

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2016年第1期 总第123期



主管单位 中国航空工业集团公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

内部资料 免费交流  
准印证号：京内资准字9914-L0337号

## 伊金霍洛旗全民健身体育馆

**结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2010年

**项目亮点：**本工程结合外围多层大悬挑和内部大跨度空间的结构特点，发明了外围空间网格大悬挑结构与内部索穹顶结构组合的新型组合结构体系，实现大悬挑结构与索穹顶结构受力内外自平衡，是国内首座拥有完全自主知识产权的的第一个大跨度索穹顶结构，也是世界上首个索穹顶与多层大悬挑结构组合的新型结构工程（2层43m悬挑），突破了欧美国家对大跨度索穹顶结构技术长期的垄断局面。



## 公司召开2016年度工作会暨二届二次职代会

1月29日，公司召开2016年度工作会暨二届二次职代会。集团公司党组成员、副总经理李玉海，公司董事长魏晓龙，监事会主席庞建，公司董事吴方辉、罗霖斯、戴亚隆及职工代表等350余人参加会议。公司分党组书记沈顺高主持会议。

会议首先对公司2015年度“爱岗敬业标兵”、“创新超越团队”、“优秀团队”、“总经理特别奖”和“技术创新特别贡献

奖”获奖团队代表和个人进行了隆重表彰。

公司总经理廉大为作了题为《坚持创新求变，推进转型升级，努力开创中航规划“十三五”发展新局面》的工作报告。2015年，面对复杂多变的经营环境和艰巨繁重的改革发展任务，公司全面完成了集团公司下达的各项任务，营业收入突破百亿元，实现了“十二五”规划的圆满收官。

李玉海对获奖的团队和个人表示热烈祝贺，对公司2015年和“十二五”工作给予充分肯定，同时对2016年工作提出了六项要求：要认真学习领会、贯彻落实全国经济会议精神和集团峰会各项要求；要仔细关注、研判当前的国际、国内经济发展走势，做到心中有数、决策清晰、措施有力；要进一步提高高端咨询能力；要抓住上市契机，全面提升公司管理水平；要持续加强国际化开拓力度；要扎实抓好党建工作。

沈顺高在总结讲话时指出，要深刻领会此次会议精神，高度凝聚发展共识，坚定发展信心，发扬从严从实的工作作风，团结一心，锐意进取，真抓实干，开拓奋进，全力做好年度各项工作，实现“十三五”良好开局。



## 公司与秦皇岛市签署战略合作协议

1月5日，在公司总经理廉大为和秦皇岛市副市长张峰的见证下，市政院院长孙刚与秦皇岛市经济技术开发区副主任吕爱国在秦皇岛市正式签署秦皇岛市经济技术开发区地下综合管廊建设工程项目战略合作协议。

秦皇岛市经济技术开发区地下综合管廊项目规模10.2km，预计投资约12亿元，项目拟以PPP模式开发。公司将和秦皇岛市以本项目合作为契机，携手国家开发银行等金融机构，进一步推动双方在秦皇岛市能源与环境、市政工程等基础设施领域的深入合作。

## 公司中标中航锂电（江苏）产业园一期工程EPC总承包项目

1月19日，电子院中标中航锂电（江苏）产业园一期工程EPC总承包建设项目。该项目位于江苏省常州市金坛区，项目占地约16万m<sup>2</sup>。公司负责包括工程勘察、规划方案设计、工程设计、工程施工以及生产线的设计、采购、安装及调试等项目全过程工作，将采用含工艺生产线在内的新EPC总承包模式，EPC总承包合同额20.2亿元。该项工程的实施，将丰富公司EPC总承包业务的内涵，标志着公司工业项目EPC模式转型升级迈出了重要一步。

中航锂电（江苏）产业园是国内单体规模最大的锂离子动力电池生产基地之一，一期工程预计于2016年年底前全部建成并投产。

## 公司民航院中标多个通航机场项目

今年以来，民航院通航机场项目投标喜讯频传，截止2月底，以下项目已收到中标信息：河南登封通用机场工程建设项目设计（一、二标段），云南省元谋、江川（红塔）、元江、会泽通用机场开展项目前期技术研究的场址论证设计，阜平县通用机场选址报告、飞行程序设计报告编制项目，自贡凤鸣通用机场建设项目设计，镇江大路通用机场二期扩建项目建议书、可研、初步设计及概算。

这些项目的中标，标志着民航院在优化组织结构、引进民航专业人才等方面取得初步成效，为今后进一步开拓通航市场积聚了经验，也为“十三五”规划实施及“一带一路”战略响应奠定了良好基础。

12月30日，由综规院完成的《青岛市航空产业总体规划研究》通过专家评审。该规划规划和布局了青岛全市航空产业，提供了相关政策措施和发展建议。

1月7日，长沙院中标长沙黄花国际机场通用航空基地及专属服务区工程航站区建筑物实施方案设计项目。项目总建筑面积14250m<sup>2</sup>，总投资1亿元。

## 林左鸣强调： 智能化制造是航空工业的发展趋势

2月23至24日，中航工业董事长、党组书记林左鸣一行到中航工业洪都调研，听取了中航工业洪都的发展情况汇报，参观了中航工业洪都的科研生产现场。他在调研时强调，智能化制造是未来航空工业的发展趋势，要统一思想，下定决心，坚定智能化制造发展方向。他指出，从信息化、自动化、智能化入手，提高企业成本优势是未来航空工业发展的趋势所在。智能化生产制造不仅可以节约人工成本，而且更精准，质量更好，速度更快，效率更高。中航工业即将发布智能化制造构架，加大力度推动智能制造。（摘自“中国航空新闻网”）

## 国家发改委发布第二批PPP推介项目 总投资逾2万亿元

近日，发展改革委发布了第二批PPP推介项目，共计1488个项目、总投资2.26万亿元，涵盖农业、水利、交通设施、市政设施、公共服务、生态环境等多个领域。同时，发展改革委对第一批PPP项目进行了更新，保留了继续推介的PPP项目637个、总投资1.24万亿元。目前，发展改革委PPP项目库总计包含2125个项目、总投资3.5万亿元。

为推广政府和社会资本合作模式，2015年5月，发展改革委建立了首个国家部委层面PPP项目库，向社会公开推介了第一批PPP项目。目前，第一批推介项目取得积极进展，有329个项目已经签约，签约率为31.5%。（摘自“发改委网站”）

## 中央经济会议提出的五项任务 为建筑业提供了市场和转型的新入口

日前召开的中央经济工作会议提出，2016年经济工作的重心就是去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板这五大任务。具体而言，就是积极稳妥地化解产能过剩、帮助企业降低成本、化解房地产库存、扩大有效供给、防范化解金融风险。

五大任务为建筑业明年的转型与突围提供了新的方向。借助清除产能过剩来进一步对企业扶优汰劣，并加速推动建筑产业向现代化方向发展；借助降成本来提升企业的经营和项目管理的水平；借助房地产去库存去寻找建筑业新的增量市场；借助扩大有效供给聚焦对新业态、新产业的创新，深入研究并参与PPP等模式的各类基础设施项目建设，为企业的发展寻找新的“蓝海”；借助防范和化解金融风险，力争进一步改善市场环境，清理近些年来一直困扰在建筑企业身上的项目资金紧张、带资垫资现象屡禁不绝等违法现象，以及提高各种新型投资模式的抗风险能力。毫无疑问，五大任务为建筑业明年的工作提供了新的市场价值和转型入口。（摘自《建筑时报》）

## 住建部敲定2016年八项重点工作

12月28日，全国住房城乡建设工作会议在京召开。会上，住房城乡建设部部长陈政高全面总结了2015年全国住房城乡建设工作，对2016年工作任务作出部署。陈政高强调，2016年，住房城乡建设部将推进八项重点工作。一是贯穿一条工作主线；二是巩固房地产市场向好态势；三是切实树立城市规划的权威；四是继续大力推进城市基础设施建设；五是全面加强城市管理工作；六是加快建筑业改革发展步伐；七是推动装配式建筑取得突破性进展；八是抓实抓好改善农村人居环境工作。（摘自《中国勘察设计》）

## 住建部：发布建筑节能等26项国标 含多项强制性条文

近日，住房和城乡建设部一次性发布《建筑节能基本术语标准》、《民用建筑可靠性鉴定标准》、《大体积混凝土温度测控技术规范》等26项国家标准，其中15项标准含有强制性条文，实施时间统一为2016年8月1日。（摘自“筑龙新闻网”）

## 住建部：发生较大事故企业一年内不得接新工程 且通报多家知名建企

近日，住房和城乡建设部对“2015年房屋市政工程生产安全事故情况”进行了通报，2015年，全国房屋市政工程安全生产形势总体平稳，但当前安全生产形势依然不容乐观，较大事故时有发生，特别是造成群死群伤的事故还没有完全遏制。根据住房和城乡建设部部长陈政高电视电话讲话精神，对于发生较大及以上事故的责任企业，一年内不得承接新的工程项目。（摘自“筑龙新闻网”）

## 建筑业拟征增值税税率为11%

建筑业拟征增值税，税率为11%。为保证建筑业营改增后工程计价依据的顺利调整，住房城乡建设部办公厅近日下发通知，要求各地区、各部门做好工程计价依据调整准备工作。

住房城乡建设部组织开展了建筑业营改增对工程造价及计价依据影响的专题研究，并请部分省市进行了测试，形成了工程造价构成各项费用调整和税金计算方法，以适应建筑业营改增的需要。

有关地区和部门可根据计价依据管理的实际情况，采取满足增值税下工程计价要求的其他调整方法。通知强调，各地区、各部门要高度重视此项工作，加强领导，采取措施，于今年4月底前完成计价依据的调整准备。（摘自《中国建设报》）

## 2015年建筑业十大关键词

2015年，建筑业大事不断，业内人士遍尝欣喜、忧虑、振奋滋味。推出“2015年建筑业十大关键词”在回顾过去一年建筑业改革足迹的同时，为行业未来发展作一次全景式的展望。

2015年建筑业十大关键词：质量、地下管廊、PPP、工人、走出去、营改增、秩序、服务、生存、改革转型。（摘自《中国建设报》）

## 2015年全国建筑业总产值达180757亿元 增速大幅跳水近8个百分点

近日，国家统计局官网正式发布2015年我国国民经济各项数据。据国家统计局初步核算，全年国内生产总值676708亿元，按可比价格计算，比上年增长6.9%，增幅首次破七，再创新低。令建筑业人士十分关注的全国建筑业总产值数据也同时公布，据国家统计局公布的数据显示，2015年全国建筑业总产值达180757亿元，比上年增长2.3%。与2014年增长10.2%相比，2015年建筑业总产值首次跌进个位数，且增速大幅跳水，令业内人士担忧。

从行业的数据来看，2015年全国建筑业总产值达180757亿元，比上年增长2.3%；全国建筑业房屋建筑施工面积124.3亿平方米，比上年增长-0.6%。据数显示，2015年全国固定资产投资增速也明显回落，这也对建筑业增速的大幅下降产生较大的影响。

业内人士认为，在新常态下，面对错综复杂的国际形势和不断加大的经济下行压力，投资结构将会逐步变化，这些变化必然会带来行业增幅的下滑。因此，我们的建筑业企业要改变以往的增长模式，加快推进企业的转型升级。（摘自《建筑时报》）

## 2015年工程勘察设计行业十大新闻

1. 建筑业企业资质管理改革提速
  2. 行业内并购重组、上市步伐持续加快，与资本结合更加密切
  3. 推进市场化改革，加快建筑市场统一开放
  4. “一带一路”战略进入实质性实施阶段
  5. “互联网+”为行业提供发展新动力
  6. PPP示范推介项目连续推出，PPP进入落地实施阶段
  7. 住建部明确BIM应用路线图
  8. 新一轮国企改革大幕开启
  9. 中央城市工作会议召开
  10. 工程勘察设计行业掀起降薪裁员潮
- （摘自《中国勘察设计》）

编者按：今年初，中航规划首席专家、总结构师葛家琪及其团队以“预应力整体张拉结构关键技术创新与应用”荣获国家科学技术进步二等奖。

预应力整体张拉结构是国际公认的承载效率更高、跨越能力更强的预应力钢结构体系，在欧美等发达国家已广泛应用于大跨度建筑领域。以索穹顶、弦支穹顶等为代表的该新型结构是一个国家建筑科技创新水平的重要标志。本项技术是我国首次在大跨度弦支穹顶结构、索穹顶结构的设计方法与安全指标、施工方法及成套技术、关键节点及产品等瓶颈上取得突破。其主要技术创新成果如下：

1、首次提出了预应力整体张拉结构全过程性能化设计方法，建立了多阶段安全设计指标体系。项目成果填补了国内外相关规范的空白。

2、首次提出了预应力整体张拉结构施工全过程动态模拟方法，开发了成套施工技术。在施工全过程动态连续模拟及安全控制技术方面，取得了突破性进展。

3、研发了预应力整体张拉结构新体系、新节点和新产品，实现了大量工程应用。打破了欧美国家对预应力整体张拉结构长期的垄断，在我国率先实现了该新型结构的大量工程应用。

本期“项目展示”展示了此项技术所应用的设计项目。

## 北京工业大学体育馆



**钢结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2007年

**项目亮点：**通过结构体系创新实现了轻盈的建筑效果，建成了世界上首个大跨度预应力弦支穹顶结构，获得了各界高度评价。

## 芜湖体育场

**结构设计：**中航规划技术研究院  
葛家琪工作室

**建成时间：**2002年

**项目亮点：**开发出一种巨型桁架索膜张拉结构体系，该体系主拱桁架与次桁架V形连接，形成空间整体受力的圆锥面巨型桁架，与内部开口式索膜张拉结构形成一种新型结构体系。成为当时国内跨度最大的巨型桁架索膜结构体系，体育场跨度273m，由于受力合理，273m跨度的前主拱桁架高度仅为3m，主拱脚推力仅为传统结构的1/20，与同等规模跨度的传统主次桁架结构相比，节材45%以上。



## 长春经济技术开发区体育场

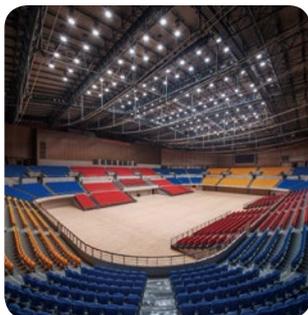
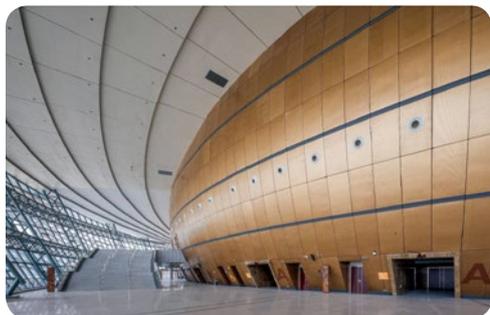
**结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2002年

**项目亮点：**当时国内跨度最大的塔柱-斜拉索-钢桁架结构体系，主桁架跨度176m。



## 绍兴市体育会展馆



**钢结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2013年

**项目亮点：**本工程整个屋盖为沿建筑长轴单轴对称的不规则椭球壳，长轴跨度240m，短轴140m。比赛区屋盖采用跨度90m的拱形空间预应力桁架结构，减少屋盖用钢量，并减少对下部结构的水平力作用。

## 金沙遗址博物馆

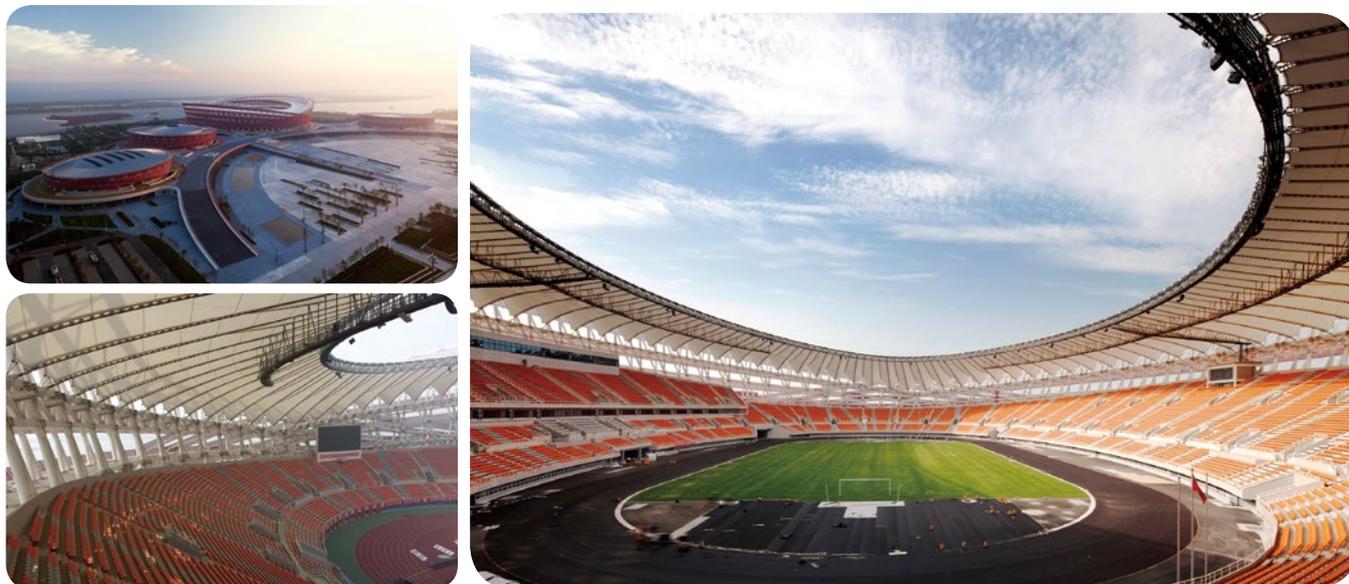


**钢结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2006年

**项目亮点：**本项目中庭屋盖采用24m跨度的车辐式双层索网结构，构成博物馆镇馆之宝，也是中国文化遗产标志太阳神鸟建筑效果，建筑形式新颖独特、轻盈美观。双层索网与周边钢结构巧妙结合，共同工作，实现了国内首个多层大跨度（33m跨）博物馆。同时大幅降低了主体钢结构用量及结构自重，实现了遗址博物馆对遗址场地最少干预的文物保护目标。

## 盘锦体育场



**钢结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2012年

**项目亮点：**项目采用新型的非对称开口式马鞍型索膜整体张拉结构体系，由吊索、脊索、谷索三层径向索和环索组成的空间索网，通过膜面张拉和脊谷索张拉，形成富于建筑动感的非对称开口式索膜张拉结构，并与外围钢结构环梁形成一种新型预应力整体张拉结构体系。该工程跨度283m，建筑结构完美结合，建筑效果佳，成为拥有自主知识产权的我国最大跨度非对称开口式索膜整体张拉结构工程。

## 三亚体育中心



**钢结构设计：**中航规划技术研究院葛家琪工作室

**建成时间：**2010年

**项目亮点：**体育馆采用78m跨度弦支穹顶结构体系，减小结构位移，降低杆件应力，减小了屋盖结构对支座的水平推力，提高了结构整体稳定性能，大幅减小了结构用钢量。体育场采用曲面悬挑桁架体系，建筑效果佳。

## 2015年度专业技术交流活动总结

### 「工艺专业」

1月19日，工艺专业召开2015年度技术交流总结会议，本次会议的主题为“工艺设计的标准、流程和方法”。会上，副总工程师刘子彦代表公司领导对2015年工艺专业的工作给予了肯定，指出工艺专业对公司战略实现的重要作用；并对工艺专业今后的工作提出了要求和希望，希望工艺人员在工作中带着想法和思路与甲方碰撞，充分发挥协调作用、沟通作用和牵引作用。总工艺师卜国磊代表工艺专业委员会从项目质量、技术进步和队伍建设三个方面简要回顾了2015年的主要工作，2015年工艺专业完成各类高端咨询和决策支持服务近20项；完成可研任务36项、初步设计任务19项；荣获工程咨询项目一等奖7项、二等奖7项、三等奖9项；完成研发课题9项、业务建设13项。

2016年，工艺专业将进一步落实贯彻公司“调结构、树品牌、拓规模”战略，追踪技术发展，面向“中国制造2025”以及“工业4.0”，开展先进制造技术高端咨询研究、模块化智能化工厂设计、全价值链工艺设备集成服务等研究工作，以期提高公司的核心竞争力。

### 「结构专业」

1月25日，结构专业举办了专业技术交流会，共90余位结构技术人员参加了本次交流会。结构总师金来建介绍了结构专业2015年工作总结及问题和改进，结构技术人员分别针对“首开华润白盆窑产业化住宅结构设计”、“内蒙古美术馆结构设计”、“业务建设《钢结构设计总说明》介绍”、“预制拼装预应力混凝土塔大比例缩尺试验研究”等11个主题进行发言。

### 「电气专业」

1月29日，公司电气专业举办了内部交流活动。与会者从各自的实际工作和问题出发，分享了来自工程方案设计、业务建设及施工现场的技术问题的解决方法及处理经验。专业总师丁杰在会上做了总结报告，介绍了电气专业2015年取得的技术成果、论文、获奖等，并就大家提出的一些专业问题进行解答和交流，对2016年电气专业的质量管理目标进行宣贯和强调，最后，丁总表示2016年又是充满挑战的一年，需要所有电气人的共同努力，才能取得更好的成绩。

### 「工程造价专业」

1月22日，工程造价专业举办了年度专业技术交流会，公司全体工程造价专业人员参加了会议。工程造价专业技术委员会选取了2015年度典型课题和业务建设；公司人员参加外部培训重点内容，如新发布的《建设工程造价咨询规范》、合同案例分析；以及招标投标规定及问题分析为参会人员做了交流。交流人员围绕交流主题，深入剖析、详细讲解，遇到典型案例还会与参会人员互动，效果良好。最后，专业总师王玉平对2015年工程造价专业发展总体情况进行总结，2015年工程造价专业课题和业务建设质量大幅提高，一篇专业论文荣获中价协一等奖等，在肯定取得成绩的同时王总对2016年重点工作做了部署和展望。

### 《概算清单法研究及应用》获中国建筑学会科技进步奖

工程造价专业组织编纂的《概算清单法研究及应用》获得2014年中国建筑学会科技进步三等奖（2015年颁发），概算清单法提出将初步设计阶段的概算与施工图阶段清单预算统一的思路。概算清单法从提出到实践历经4年多时间，其中包含三个主要阶段，提出概算清单法的构想、概算和清单转换的六大步骤和概算清单法的知识库管理方案。

### 工程造价专业论文获中国造价管理协会优秀论文一等奖

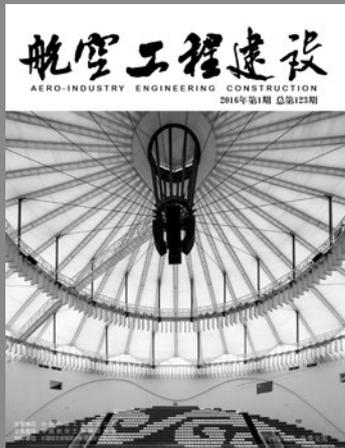
公司工程造价专业孟繁的论文《基于大数据工程造价估算扩大清单法的思路与建议》在中国造价管理协会第六届优秀论文评选中荣获一等奖。该论文从全国各省市造价管理机构、造价协会及专业委员会推荐的664篇论文中脱颖而出，代表了造价管理规范性、实践性的前沿水平。



### 「设备专业」

近期，中航设备技术质量安全部、研发中心结合公司发展规划方向先后组织了内部多场技术交流活动及专项技术工具培训活动。交流及培训活动涉及公司发展各个市场方向，分别针对军品、航空及非航市场进行了深入交流和广泛探讨。

系列活动以“德国工业4.0及中国制造2025年计划”开始，从宏观角度介绍了国家及企业未来的发展方向，对比自身工作环节中的缺失，为广大员工树立信心及前进方向。之后针对我院多专业、跨专业的自身特点，分别对军品、航空及非航市场进行各自领域内的技术交流，交流活动基本上全面覆盖工程项目中各个环节，使每一名参与者积极参与其中，切身收益。



**主管单位** 中国航空工业集团公司  
**业务指导** 中国航空工业建设协会  
**编印单位** 中国航空规划建设发展有限公司

**顾问委员会**

**主任** 李平  
**副主任** 廉大为  
**委员** (按姓氏笔画排序)  
 王伟 刘晋忠 李世民  
 陈远明 张忠良 杨锐  
 周训文 周凯 贺沂  
 张继超 常洪亮 梁相文

**编辑委员会**

**主任** 陆国杰  
**副主任** 米敬明 刘子彦  
**委员** (按姓氏笔画排序)  
 丁杰 卜国磊 马培贤  
 王玮 王玉平 王锋  
 王笃礼 刘国新 刘晓评  
 李纲 李守旭 李中强  
 肖武 张卫才 张立峰  
 陈阳 陈丹瑚 金来建  
 黄春晖 贺宏斌 黄滨  
 傅绍辉 葛家琪

**总编** 陆国杰  
**主编** 陈海风  
**执行主编** 王蕊  
**责任编辑** 李楠  
**出版** 《航空工程建设》编辑部  
**地址** 北京德外大街12号  
**邮编** 100120  
**E-mail** hkgcjs@avic-apc.com  
**印刷单位** 北京奇麒麟印刷有限责任公司分公司  
**发送对象** 公司内部及本系统内部  
**印刷日期** 2016年2月  
**印数** 1500册  
**电话** (010)62038276 62038235  
**传真** (010)62038297  
**封面** 伊金霍洛旗全民健身体育馆

# CONTENTS

## 目录 2016年第1期 总第123期

### 航空能力建设

- 02 基于改进逆向差分算法的第二类装配线平衡问题研究  
张超 李慧 孙元亮
- 08 GOOGLE EARTH在通用机场选址中的应用  
张帆
- 14 基于多目标优化的叶片优异中心业务分工问题研究  
李金芝 王明珠 张波
- 19 机械加工车间布局方法研究及案例分析  
池力 陈军

### 研究与探讨

- 24 基于性能的预应力钢结构设计研究  
葛家琪 张国军 王树 张玲
- 32 探索经济新常态背景下的临空经济区规划  
——以南通滨海园区临空经济区规划为例  
张媛 董磊 郭璟坤
- 36 利用道路作为通用飞机临时起降点跑道的探索与实践  
孟祥龙 王勇传
- 39 《馆藏文物防震规范》关键技术  
——之防震安全设计研究  
宋毛毛 马伯涛 葛家琪
- 44 对工程量清单计价模式下招投标工作的研究  
黄卫群
- 50 导体截面减小处保护电器安装分析  
逯霞
- 54 能源健康管理系统在集中供热工程中的应用研究  
赵瑞霞 邓剑宏

### 工程设计

- 59 北京雁栖湖国际会展中心空调绿色节能技术应用  
孟凡兵

# 基于改进逆向差分算法的第二类装配线平衡问题研究

■ 张超 李慧 孙元亮 「工艺」

**摘要:** 根据第二类装配线平衡问题的特点,以节拍最小化为首要目标,同时兼顾站位间的负荷均衡性,提出一种改进的逆向差分粒子群算法。采用一种对应于作业序列的随机浮点数排列编码方法来表征问题的解,采用零入度有向图拓扑排序算法对粒子编码进行解码,将粒子编码映射为可行解;用迭代式站位分配算法将作业序列分配到各站位并获得装配线节拍及负荷标准差,然后采用逆向差分变异算子更新粒子位置。为加速收敛,采用了逆向学习法来初始化种群;为抑制逆向差分进化算法到后期收敛变慢,采用种群停滞判断及变异扰动策略。通过对Scholl基准问题进行的多站位设定验证,验证了本算法的有效性。

**关键词:** 装配线平衡;逆向差分进化;粒子群算法;可行作业序列;零入度排序

## 0 引言

装配线平衡问题(Assembly Line Balance Problem)是设施规划及机械制造领域的重要命题,装配线上各站位的平衡性直接关系到生产效率,从而影响企业经济效益。一条装配线由若干个呈线性或U形排列的站位构成,由运输系统将装配线在各站位之间依次搬运。由于装配任务有不同的操作时间,在服从装配优先关系的前提下,需要将这些任务合理分配到各站位,使装配线的节拍最小且各工作站的负荷均衡,由此称为ALB问题<sup>[1]</sup>。随作业数目的增加,其解的个数呈指数级数爆炸增长,所以能在合理CPU耗时内适应大规模问题的算法研究非常重要<sup>[2]</sup>。

相对于ALB-I类问题,对ALB-II类问题的研究较少,对该类问题的求解途径总体上可分为迭代式求解<sup>[2]</sup>和直接求解<sup>[3][4]</sup>。迭代式求解是将ALB-II转化为一系列的固定节拍问题,随着迭代次数增

加,逐渐减少固定节拍。直接求解方法中,文献<sup>[5][11]</sup>采用的禁忌搜索是一种有效的方法,其他的启发式算法、元启发算法包括遗传算法<sup>[6][7]</sup>、蚁群算法<sup>[8][9]</sup>、混合粒子群算法<sup>[10]</sup>等。如文献<sup>[9]</sup>提出一种改进的蚁群算法,混合应用最大、轮盘赌和随机的搜索机制从可选任务集中构造可行解,但存在多个参数需要调校;文献<sup>[10]</sup>为求解ALB-I问题,采用位置交叉算子更新粒子位置,并混合简化了的变邻域搜索,提出了优于一般遗传算法的混合粒子群算法。

综合来看,将粒子群算法应用于ALB-II的求解尚不多见。本研究中用浮点数字列编码来间接表征装配线作业平衡问题的解,通过基于有向图的零入度拓扑排序法解码,使得任意粒子解码后均满足作业先后顺序约束。在进化算法的选用时基于以下考虑:1)所需调节的控制参数少,易于调校;2)较其他进化算法易于实施;3)浮点数字操作无需其他处理,在种群迭代中直接采用逆向差分算子更新粒子位置。此外,为加速收敛,采用逆向学习法来初始化种群;为抑制逆向差分

作者简介:张超,男,高级工程师,2008年毕业于清华大学水利工程专业,现就职于中航规划工程技术研究院。

进化算法到后期收敛慢,采用种群停滞判断及变异扰动策略,从而导出一种改进逆向差分变异粒子群算法(M-ODE)。将文中算法以经典ALB-II基准问题集Scholl中的数据(<http://www.assembly-line-balancing.de/>)测试,并通过与现有方法的计算结果对比,验证了本文算法的有效性。

## 1 第二类装配线平衡问题的定义

### 1.1 模型假设

为求解ALB-II问题,文中约定:1)工作站数为指定值,工作站线性排列且站内任务无并行,作业不可跨站分配,且各工作站至少分配一个作业;2)各作业耗时为已知,任意作业都可分配到任意工作站;3)作业优先关系约束是作业分配的唯一强约束;4)忽略各零部件在装配线上的运输耗时时间(运输时间损耗可均摊到装配任务中)。这些约定条件使ALB-II问题得以合理简化且符合生产实际。

### 1.2 目标函数

ALB-II问题的优化目标是在给定站位数量和优先关系约束的条件下,寻求最小的节拍,并使装配线的负荷尽可能均衡,即各站位的工时负荷标准差最小。设定目标函数<sup>[1]</sup>如下:

装配线节拍最小化为首要目标:

$$Obj.1: \min c = \text{Max}(T_k), k \in (1, m) \quad (1)$$

站位负荷标准差最小化为次要目标:

$$Obj.2: \min S_t = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (T_k - \bar{c})^2}{K - 1}} \quad (2)$$

约束条件为:

$$S_x \cap S_y = \emptyset \\ x \neq y, x \in [1, K], y \in [1, K] \quad (3)$$

$$\bigcup_{k=1}^m S_k = J \quad (4)$$

$$\forall i \in S_x, j \in S_y \text{ if } r_{ij} = 1, x \leq y \quad (5)$$

其中: $n$ 为装配线作业数量; $J$ 为所有装配线的作业集合, $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ; $C$ 为装配线生产节拍; $S_k$ 为分配到第 $k$ 个工作站的作业集合;为

$T_k = \sum_{i \in k} t_i$ 第 $k$ 个工作站的总作业时间; $t_i$ 为完成

作业 $i$ 所需的时间; $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 为装配作业优先关系矩阵,当作业 $i$ 为作业 $j$ 的紧前工序时 $r_{ij} = 1$ ,否则 $r_{ij} = 0$ 。式(3)约束任何作业只能分配到唯一站位上,且只能分配一次;式(4)使所有作业都分配出去;式(5)表示作业顺序必须满足先后约束。考虑到ALB-II问题的复杂性,目标函数(1)、(2)不一定能同时达到最优。因此,本研究设定最大生产节拍最小化为第一目标,其次才是追求各站位负荷平衡。

## 2 装配线平衡问题编码与解码

ALB问题一般用有向无环的优先图表示(如图1),记为 $G(N, A)$ ,其中 $N$ 表示作业集合, $A$ 表示有向弧集合。若节点 $(i, j)$ 存在有向弧,则节点 $i$ 必须先于节点 $j$ 分配。优先图的一种拓扑排序即为一种可行作业序列<sup>[12]</sup>。

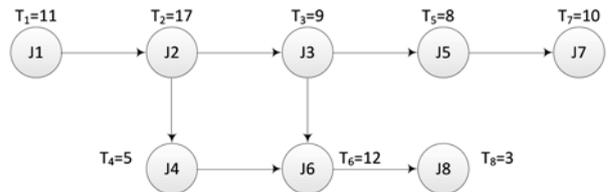


图1 作业优先图

一般采用间接编码方法来表征ALB问题的解,这样易于保证解的可行性<sup>[13]</sup>。对于 $n$ 个作业,将作业序列编码为以 $n$ 个浮点数构成的权重序列,粒子的第 $i$ 维对应着第 $i$ 个作业的选择优先权值,权值越大,则该作业的优先级越高。解码操作分为2步:1)基于该编码方式,采用带权重的零入度拓扑排序算法(Priority based Zero in-degree Topological Sorting, PZTS)<sup>[12]</sup>可将优先图(图1)映射为一个拓扑排序,同时也将一个离散优化问题映射为一个连续空间的优化问题,使得差分进化算法能得以运用。如针对图1中所示的Bowman问题,假设有浮点数字列0.98-0.61-0.83-0.37-0.16-0.91-0.21-0.26, J1、J2经分配后, J3、J4即为当前的可选任务集,其对应的权重值分别为0.83和0.37,由于0.83>0.37,则J3应先于J4分配,以此类推,经零入度拓扑排序的

任务序列为J1-J2-J3-J4-J6-J8-J5-J7；2) 为获得ALB-II型问题的解，还需要将拓扑排序后的作业分配到工作站中。对于ALB-II型问题，工作站的数量是固定的，因此用节拍时间来控制工作站作业分配，本文采用迭代式站位分配算法<sup>[14]</sup>：

步骤(1)：令指导节拍 $\bar{c}$ 的初值为理论节拍

$$\max(t_i, \sum t_i / m),$$

步骤(2)：对于拓扑后序列的每一个作业 $i$ ，将其分配到当前工作站 $k$ ，站内的 $s$ 个作业满足 $\sum_{i=1}^s t_{j_i} \leq \bar{c}$ ，即工作站 $k$ 的总工时不超过指导节拍 $\bar{c}$ ，将剩余工作全部分配到最后一个工作站；

步骤(3)：计算各站任务负荷，即各站总作业时间 $T_k$ ；

步骤(4)：计算各站潜在任务负荷 $T'_k = T_k + t_{First}$ ， $t_{First}$ 为 $(k+1)$ 工作站的第一个工作所需时间；

步骤(5)：更新 $c_w = \max\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ，更新 $\bar{c} = \min\{T'_1, T'_2, \dots, T'_{m-1}\}$ ；

步骤(6)：若 $c_w > \bar{c}$ ，跳转步骤(2)；

步骤(7)：结束，通过式(1)、(2)计算两个目标函数值。

当所有粒子所代表的作业序列分配完成后，检视整个种群，将最大节拍最小的视为最优个体；节拍相等时，站位负荷标准差最小的视为最优个体。

### 3 改进的逆向差分进化算法

#### 3.1 初始种群

初始种群中的粒子优劣情况对粒子群算法的性能有较大影响，仅采用普通的随机初始化方法不利于加快进化算法的收敛。有研究采用混沌初始化<sup>[15]</sup>和基于逆向学习<sup>[16]</sup>的初始化方法取得了较好的计算结果，文献<sup>[17]</sup>应用混沌反学习初始化方法也取得了较优的结果。本文也采用逆向学习方法，其中逆向位置定义为：

设一个 $n$ 维空间中有粒子 $i$ ，其位置向量为 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ ， $x_{in} \in R$ 且 $x_j \in [a_j, b_j] \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，则其逆向位置为：

$$\bar{x}_j = a_j + b_j - x_j \quad (6)$$

通过利用逆向点，即使没有先验知识也能获得好的初始解。本研究中初始种群的生成步骤为：

步骤(1)：随机生成初始种群 $S(P_n)$ ，种群规模为 $P_n$ ；

步骤(2)：根据初始种群生成逆向种群： $OS_{i,j} = a_j + b_j - P_{ij}$ ；

步骤(3)：从 $\{S \cup OS\}$ 集合中优选 $P_n$ 个粒子作为初始种群。

#### 3.2 逆向差分进化算法

标准粒子群算法中，粒子自身历史最优位置和种群最优个体位置值影响着粒子速度的更新以及位置的更新。众多研究者设计了各种种群进化算子，如混沌扰动<sup>[18]</sup>、正态变异<sup>[19]</sup>、差分变异<sup>[20-23]</sup>等。如文献<sup>[20]</sup>使用差分变异算子避免种群早熟；文献<sup>[22]</sup>提出的二阶震荡算子更新粒子速度，利用了粒子在前次迭代的速度信息，本质上也是一种差分格式；文献<sup>[24]</sup>利用差分算子作为改进粒子群算法中的速度更新策略；文献<sup>[25]</sup>则采用了类似Hendtlass（文献<sup>[20]</sup>）提出的差分变异算子并将其与标准PSO混合更新的策略。鉴于差分变异算子对种群的收敛性有较大改进，本文采用逆向差分进化算法<sup>[26]</sup>使种群迭代进化，它是一种简单有效的全局优化算法<sup>[27]</sup>，完全摒弃粒子速度概念，算子直接对粒子位置发生作用。经典差分算法包括变异、交叉和选择算子，下文将分别介绍。

##### 1) 变异算子

初始化后种群 $\{X_i\}$ 中的某个粒子 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 的变异后的位置向量为 $V_i$ ：

$$V_i^{t+1} = X_a^t + F(X_c^t - X_b^t) \quad (7)$$

其中， $F$ 为波动系数，对差分项起调节作用，取值范围 $(0, 2)$ <sup>[21]</sup>； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 是随机生成的种群粒子下标， $a|b|c \in [1, P_n]$ ，且约束 $a \neq b \neq c \neq i$ 。

##### 2) 交叉算子

经典差分算法采用位置向量各维度的选择性交叉来增加种群的多样性，交叉后的位置向量为 $U_i = (u_{ij})$ ：

$$u'_{ij} = \begin{cases} V'_{ij} & \text{rand}(0,1) \leq C_r, v, j = \bar{k} \\ X'_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $C_r$ 为交叉概率，一般取值范围<sup>[28]</sup> $(0.4, 1)$ ； $\bar{k} \in \{1, 2, \dots, n\}$ 为随机维度下标，用于确保

每个迭代步骤中对各粒子至少有1维发生交叉操作。

### 3) 选择算子

用于在粒子群  $\{X_i\}$  及  $\{U_i\}$  间确定构成下一代的粒子, 通过式 (1)、(2) 评价粒子择优选取。

### 4) 逆向跃迁算子

与种群初始化时使用的逆向算子类似, 通过该算子可能让种群跃迁产生更优的候选解。在一次迭代过程中, 种群  $S$  完成变异、交叉、选择算子后, 当产生的随机数满足跃迁概率  $J_r$  时按式 (9) 计算种群的逆向种群  $OS$ , 从  $\{S \cup OS\}$  中选择个最优粒子。计算逆向粒子时, 其第  $j$  维变量的最大、最小值  $[Min_j^p, Max_j^p]$  应基于粒子的当前位置状态动态计算。 $J_r$  的一般取值范围<sup>[28]</sup>为  $(0, 0.4]$ 。这种跃迁方式在一定程度上可以使粒子跳出局部最优陷阱, 但随着迭代的进行, 相较于设定的值域, 粒子各维极值所张成的空间将逐步缩窄, 跃迁的效果将逐步退化。因此, 本文还采用了种群停滞防止措施。

### 3.3 种群停滞判断

种群多样性的匮乏将导致进化停滞, 其常用评价指标是平均粒距, 表征了粒子空间分布聚集程度:

$$D = \frac{1}{P_n \cdot l} \sum_{i=1}^{P_n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - \bar{p}_j)^2} \quad (9)$$

其中,  $l$  为搜索空间的 最大对角线长度;

$p_{ij}$  为粒子  $i$  第  $j$  维位置值;  $\bar{p}_j$  为所有粒子第  $j$  维位置的平均值。 $D$  越小种群越集中, 反之越分散。在本研究中设定, 当种群平均粒距小于某阈值  $\delta$ , 取  $\delta = 0.1$ ; 或全局极值连续较多迭代次数 (如 20 次) 无变化时, 对种群中部分粒子按一定的概率  $p_m$ <sup>[29]</sup> 执行扰动操作,  $p_m$  的建议取值范围  $[0.1, 0.3]$ , 本文取  $p_m = 0.3$ , 具体步骤为:

步骤(1): 根据适应度值大小对种群所有粒子进行排序;

步骤(2): 取适应值最好的  $L$  个粒子, 依次生成均匀分布于  $[0, 1]$  的随机数  $r_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ , 取  $L = P_n / 2$ ;

步骤(3): 如果  $r_i < p_m$ , 则按  $x_{id}^{t+1} = (1 + 0.5\eta) \cdot x_{id}^t$  更新粒子各维位置值, 其中  $\eta$  是服从  $Gauss(0, 1)$  分布的随机数。

### 3.4 算法流程

改进的逆向差分进化算法流程如图2所示。

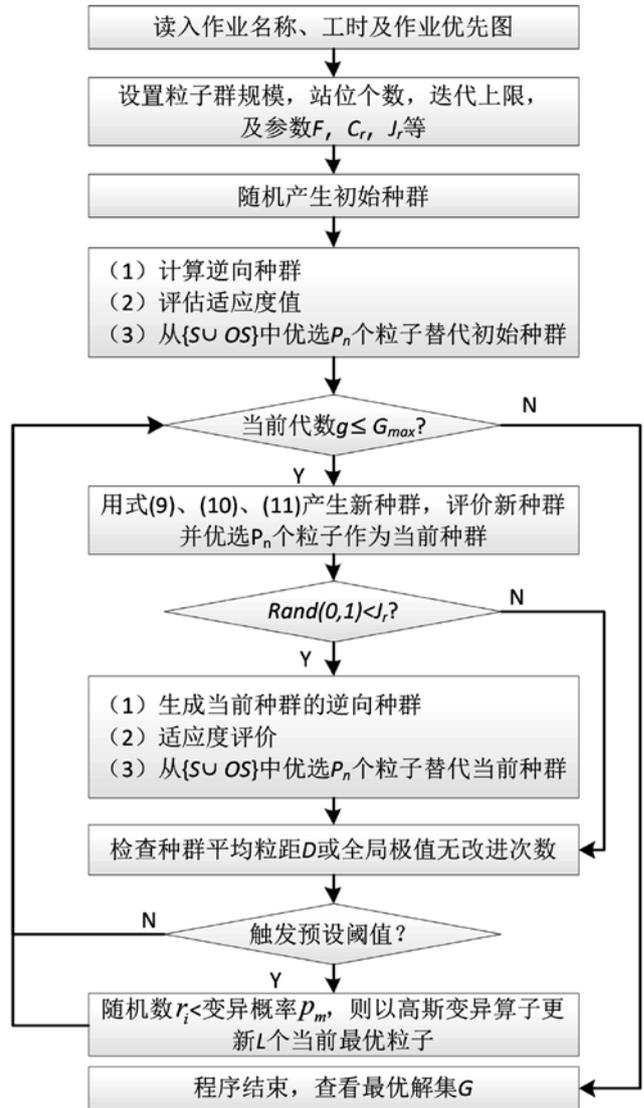


图2 M-ODE算法流程

初始种群的生成采用3.1节所述方法。由图2可知, 本逆向差分进化算法在一次进化中, 通过变异、交叉、选择算子后, 由逆向种群生成拓展搜索范围, 通过定期的观察种群进化情况对种群施加高斯变异扰动。

### 4 算例测试

本文用Visual C#开发了M-ODE程序, 先对Buxey (图3) 基准问题进行求解, 并将计算结果与已知最优值进行了对比。经反复测试, 算法参

数配置为： $N = 60$ ， $G_{\max} = 1000$ ， $F = 0.9$ ， $c_r = 0.9$ ， $J_r = 0.4$ ，其余参数同前文所述。

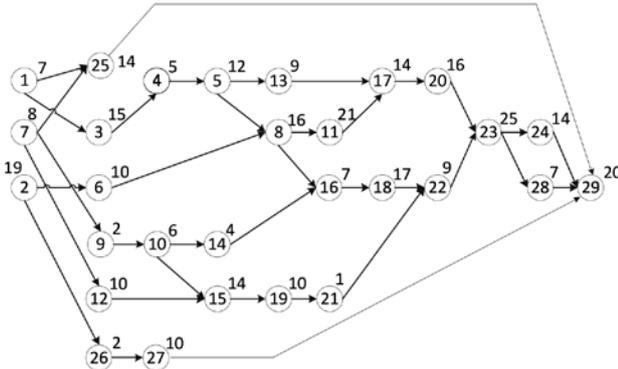


图3 Buxey-P29作业优先图

站位数依次指定为7~14，各运行M-ODE算法10次，获得的最优结果如表1所示。

由表1所示的测试结果可以看出，本文提出的M-ODE获得的最优节拍与文献<sup>[30]</sup>给出的目前已知最优节拍相同，但部分指定工作站数量的作业分配方案不同；再观察负荷标准差指标，本文获得的标准差要明显优于文献<sup>[30]</sup>，且较文献<sup>[7]</sup>能在部分指定站位个数时获得更加均衡的装配任务分配方式。

对中大规模问题，选取Scholl问题集中的Arcus2、Barthol2、Kilbridge、Lutz2、Warnecke、Wee-mag和Scholl问题进行了测试。各问题依次指定不同的工作站数，除迭代次数随问题规模的扩大适当增加，其余控制参数不作调整。对每个问题随机运行算法20次，所能取得的最好解如表2所示。

由表2可知，在指定站位数量条件下，M-ODE算法对于Kilbridge、Warnecke、Lutz2等工作节点数量中等、理论节拍相对较小的这类问题中，有15个子问题取得了最优节拍，且负荷

标准差均在4以内，其余子问题取得了较优解，且负荷标准差控制在2.1以内；对于Arcus2、Barthol2、Scholl这类任务数量多、理论节拍大的问题，有6个达到最优节拍，其余9个子问题取得了较优解。在测试运行期间，M-ODE算法在迭代初期的收敛速度较快，种群快速向最优解位置移动，但到了接近最优解后，收敛速度较慢。

### 5 结束语

本文采用一种改进的逆向差分进化算法M-ODE求解ALB-II问题，以节拍最小化为首要目标，同时兼顾站位间的负荷均衡性。采用一种基于作业优先图的随机浮点数排列方法对ALB-II问题进行编码，采用有向图的零入度拓扑排序算法进行解码，再用迭代式站位分配算法将作业序列分配到各站位并获得装配线节拍及负荷标准差；采用逆向差分变异算子作为粒子位置更新机制；为加速收敛，采用了逆向学习法初始化种群；为抑制逆向差分进化算法到后期收敛慢，采用种群停滞判断及变异扰动策略。通过对Scholl基准问题进行多站位设定测试，并与基准值比较，结果表明：改进的逆向差分进化粒子群算法可以比较有效地应对各种规模的ALB-II问题，改进逆向差分进化算法具备较好的全局寻优能力。下一步的研究可以考虑利用迭代过程中的已知最优信息加速算法收敛。

### 参考文献

[1] ZHOU Jin-ping. Production System Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press. 2011: 109-110. (in Chinese). [周金平. 生产系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社. 2011: 109-110.]

以下从略

表1 Buxey问题测试结果对比

站位数	M-ODE计算的各站位总工时	节拍	文献 <sup>[30]</sup> 负荷标准差	文献 <sup>[7]</sup> 负荷标准差	M-ODE负荷标准差
7	47,47,47,44,47,46,46	47	1.169	1.113	1.113
8	40,41,41,40,40,40,41,41	41	1.414	0.534	0.534
9	37,37,37,37,37,36,36,33,34	37	1.803	1.803	1.716
10	31,32,32,32,33,32,33,33,34,32	34	2.271	1.075	0.843
11	29,29,28,29,30,30,28,30,32,29,30	32	3.357	1.128	1.128
12	27,28,27,28,28,27,27,26,26,25,28,27	28	1.279	1.044	0.954
13	26,25,27,26,24,24,25,23,23,25,25,24,27	27	2.691	1.320	1.320
14	22,24,22,24,22,24,22,24,23,25,25,23,24,20	25	2.598	1.512	1.406

表2 Scholl问题集测试结果

问题	作业个数	作业总时间	工作站数	理论节拍	最优节拍			负荷标准差 M-ODE
					理论 <sup>[2]</sup>	M-ODE	误差	
Kilbridge	45	552	6	92.00	92	92	0	0
			7	78.90	79	79	0	0.378
			8	69.00	69	70	1	0.756
			9	61.30	62	62	0	0.866
			10	55.20	56	56	0	1.033
Warnecke	58	1548	5	309.60	310	310	0	0.894
			10	154.80	155	155	0	0.632
			15	103.20	104	104	0	1.474
			20	77.40	79	79	0	2.703
			25	61.92	64	64	0	2.722
Wee-mag	75	1499	5	299.80	300	300	0	0.447
			10	149.90	150	151	1	3.479
			15	99.93	100	102	2	2.086
			17	88.18	89	89	0	0.809
			20	74.95	77	77	0	2.564
Lutz2	89	485	9	53.89	54	55	1	0.928
			13	37.31	38	38	0	0.630
			17	28.53	29	30	1	0.717
			21	23.10	24	24	0	1.091
			25	19.40	20	20	0	1.291
Arcus2	111	150399	5	30079.80	30080	30080	0	4.34
			7	21485.57	21486	21487	1	1.902
			10	15039.90	15040	15040	0	4.492
			13	11569.15	11570	11570	0	5.247
			17	8847.00	8855	8855	0	4.037
Barthold2	148	4234	20	211.7	212	212	0	0.801
			25	169.36	170	171	1	2.691
			30	141.13	142	143	1	3.014
			35	120.97	121	122	1	2.792
			40	105.85	106	106	0	1.474
Scholl	297	69655	22	3166.14	3167	3168	1	4.465
			27	2579.81	2580	2581	1	5.182
			32	2176.72	2177	2178	1	5.692
			37	1882.57	1883	1884	1	6.126
			42	1658.45	1659	1662	3	8.405

# GOOGLE EARTH 在通用机场选址中的应用

■ 张帆 「工艺」

**摘要:** 通用机场选址工作常常会受到前期时间资金有限、相关资料匮乏等困扰,给选址工作带来难度,影响整个机场工程建设周期。根据Google Earth(以下简称GE)数据免费、直观、时效性强等特点,本文将GE引入通用机场选址工作,对GE在通用机场选址中的应用进行初步探讨,为GE在机场设计过程提供工程经验参考。

**关键词:** 通用机场;机场选址;Google Earth

## 1 引言

近几年,中国对通用航空的开放程度逐步扩大,国家政策支持力度不断增强,通用航空迎来了前所未有的发展期。通用机场建设是通航产业发展的基础,随着国家及民航局关于通用机场建设的一系列政策的出台,尤其是自2013年12月1日起实行的由中国民用航空局与解放军总参参謀部共同印发的《通用航空飞行任务审批与管理规定》,进一步推动了通用机场的建设。

不同于民用机场建设,通用机场前期工作投入资金和时间有限,且大多数通用机场选址阶段资料匮乏,尤其涉及到选址区域的地形图资料较为零散,经常受到地形图成图年代早、时效性差、新建城镇、公路等地物缺失等因素的困扰,给通用机场选址工作带来难度。在这种情况下,我们尝试运用新的技术手段和工具来弥补传统技术的不足,拓宽设计思路。

GE虚拟地球软件自推出以来,因其能提供高精度的三维地图和匹配真实地表信息的高清画面而被广泛地应用于各个领域,在建筑、城市轨道交通、地震应急、水利水电、电力线路规划、土地开发和道路设计等方面有着广泛的应用。GE提

供了全球近1~2年的地形数据和影像资料,对于一些缺少勘测设计资料的设计项目,可以借助GE的二次开发功能,提取选线区域的地形数据和影像资料,作为初始平面设计依据,从而减少野外踏勘工作、降低成本<sup>[1]</sup>;此外,由于GE平台是一个三维空间地理信息展示平台<sup>[2]</sup>,借助该平台为决策者提供更加直观的决策依据,极大地提高设计人员的设计效率和质量。针对GE地图数据免费、直观、时效性强、且具备二次开发接口等优点,在机场工程设计中具有巨大的应用前景。本文研究将GE引入于通用机场建设,探索GE在通用机场选址工作中的应用,拓宽通用机场设计手段,提高通用机场设计效率。

## 2 通用机场选址工作特点

通用机场场址的选择和确定,是一项复杂的系统工程。需要综合考虑地面建设条件和净空条件,涉及空域、地形、地震、供电、供水、供气、通信、环保、给排水、工程地质、水文地质、地面交通、气象条件、地下矿藏、可用土地情况、城市规划等诸多因素。选址的优劣直接关系到机场运行的安全保障。只有选址恰当,才能保证整个机场建设顺利进行,在满足机场功能使用的同时,节省建设投资、缩短工期、提高机场运行的经济效益。

作者简介:张帆,女,高级工程师,2008年毕业于中国民航大学通信与信息系统专业,现就职于中航规划民航工程设计研究院。

通用机场规模相对不大,机场等级不高,机场建设一般按照满足基本功能、简约、适用的原则。一般来说,通用机场选址的具体任务如下:

(1) 根据通用机场场址选择基本要求,调查机场场址情况,确定初选场址。

(2) 在保证地面及空中运行安全、满足使用功能、符合通用机场技术标准的前提下,初步比选出技术上可行、经济上合理的场址。

(3) 给出场址分析结论和下一步工作建议。

笔者近几年参与了多个通航机场的前期工作和设计工作,在具体的实际工作中深切地感到,多数通用机场建设前期准备不足,资料匮乏,多数地方提供的地形图大多是城区小比例尺地形图或者根本没有地形图,给选址工作带来难度,特别是涉及到净空条件的比选等工作。而且,选址阶段常用的1:50000的二维地形图显示范围有限、包含地理信息有限,使得设计人员难以快速直观把握全局,增加多方案比选的工作量。

因此,我们考虑采用更为简便快捷、表现形式更为丰富的方法来进行通用机场选址工作,利用GE提供的高分辨率影像、高精度三维坐标数据以及二次开发的接口来进行通航机场选址不失为一个好选择。

### 3 GE简要介绍

GE是由Google公司推出的虚拟地球仪软件,它把航拍照片、卫星影像、遥感影像和地理信息(GIS)数据、三维数字地形布置在一个地球的三维模型上,用户可以通过电脑上的客户端软件,免费浏览全球各地的高清晰度卫星图片。GE自2005年推出以来,其卫星图片不断更新、清晰度不断提高、功能不断丰富,由于GE中含有GIS数据,可将场址与城镇、道路、山川和河流等地理信息结合起来,几乎能够达到“身临其境”般的感觉,比普通地图效果要真实许多,且范围广,使用起来更为方便。而行业用户可在此基础上,把GE当作一个数据平台,结合编程接口和自有系统的数据信息,通过与GE的数据互换、整合来实现行业需要的目的<sup>[3]</sup>。如今GE已在地质矿产、石油、水利、道路交通、房产、通信、海事、物流、电力、城市规划、旅游、教育、公共服务等众多行业得到广泛的应用<sup>[4-7]</sup>。

GE上的全球地貌影像的有效分辨率至少为

100m,通常为30m,在中国大城市的分辨率甚至达到了0.15~2m,大部分地级城市和主流县城以上的城市达到辨认汽车的精度,且卫星图像经常更新,分辨率还在不断提高。GE中还内置了国界线、省界线、地名、城市交通、公路、铁路、航空地标、三维建筑、海洋等大量有用图层,此外还提供开放的模式允许用户添加地标、航迹,叠加地图、地貌景观图像等内容,共同组成了一个巨大的基于互联网的多维地理信息库。由于它和真实的地球物理信息做了匹配,也就是说它的地形、海拔、经纬度信息和GPS输出的经纬度信息是完全重合的,所以我们就采用它的地貌影像和3D数据对一些具体工程进行分析。GE还提供了开发接口,可供人员调用数据,进行二次开发。针对GE的开发有两种方式<sup>[8]</sup>:

1) 基于COM API的开发。这种开发方式主要用来控制GE的视角、实现动画效果。第三方应用程序可以使用COM API对GE进行信息搜寻和发布命令。

2) 基于KML的开发。这种开发方式主要用来生成地理要素,实现数据的动态更新等。基于KML的开发主要是程序员编写KML文件对GE进行操作。

GE地图数据相比传统地形图具有全球覆盖、在线获得、免费、定期更新等显著优点。Google Earth软件提供地标、多边形、路径、图像叠加层、标尺、图像输出等多项功能,为室内场址预选提供了保障。

## 4 GE在通航机场选址中的应用

### 4.1 确定初选场址

依据《通用机场管理规定》和《民用机场选址报告编制内容及深度要求》,通航机场选址首先需要按照机场的远期建设规模确定3个以上的初选场址,再通过各种分析比较各个初选场址的区位条件、场地条件、净空条件、周边交通条件等方面进行综合筛选,最终推荐首选场址。

通常在初选场址工作中,都是利用1:50000的地形资料并结合现场踏勘,在大范围内进行现场踏勘的工作量较大,且多数区域发展迅速,地物变化快,地形资料上反映的信息量有限,难以全面反映场址周边的现实情况。而GE提供的高清卫星影像具有很好的现势性和时效性,直接用于

大范围的选址，解决原来需收集大量地形图进行判别和现场踏勘工作才能完成的任务，极大地提高了工作效率。

一方面，通过浏览GE，可以直观而迅速的帮助设计人员了解项目实地情况，城镇、村庄、边界线（含国/市/县境线）、道路、水库、机场、甚至环境保护区域等信息一目了然并可以直接利用。在GE开启“Terrain”效果的情况下可以观察到3D方式显示的高原、山地等地形，并显示指定点高程值，使得设计人员在项目前期对场址区域的地形地貌、净空情况、公路铁路网、水系等情况进行全面认识。同时，GE发布以来也吸引了众多爱好者添加共享地标、风景名胜、森林地质公园、文物古迹等信息，初选时可以通过这些信息来提高方案的可行性。借助GE三维地图可以形象直观的反应出若干初选场址的相对位置（如图1）、每个初选场址周边的基本情况（如图2）等信息，利用这些信息并结合现场调研收集的各种资料，可在大面积范围内对初选场址进行快速的定性评价，进行初选场址的筛选工作。

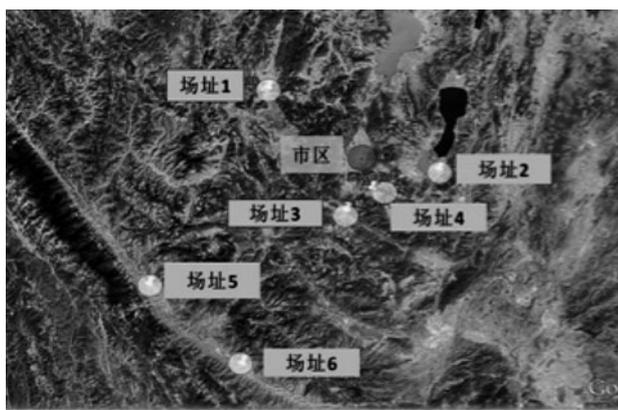


图1 某通用机场初选场址相对位置图

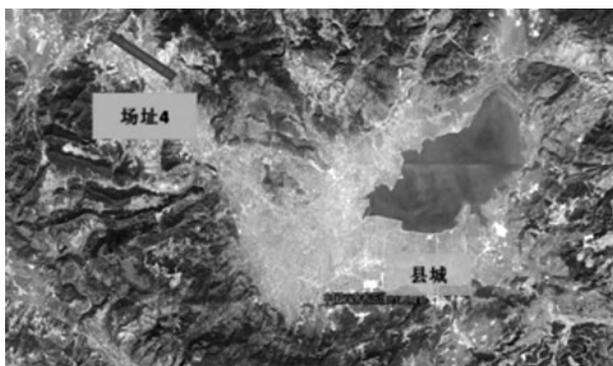
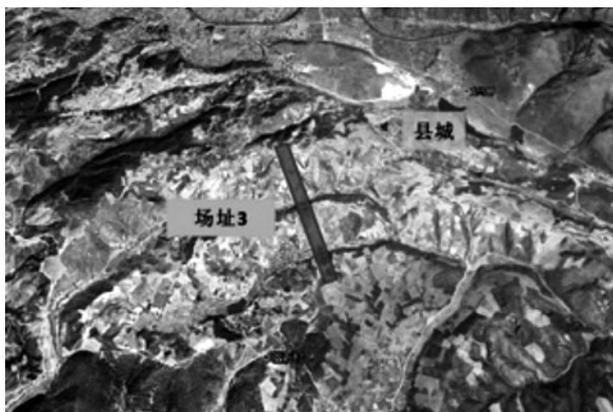
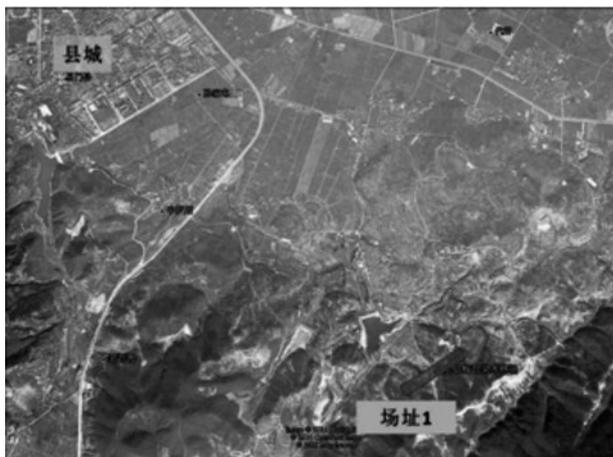


图2 某通用机场初选场址周边情况图

另一方面,我们也可以利用GE卫星地图修测手中的地形图资料。我们可将初选范围内的数张卫星图片进行拼接,而后导入Auto CAD,按照GE中给定比例尺缩放,通过经纬度或地形特征点与地形图叠加,通过修测来弥补地形图中缺少的新建地物。这样可以使得场址情况更切合实际,提高成果的精度,较少拆迁,节省建设投资。

#### 4.2 初步确定跑道标高

跑道标高的确定需要综合考虑机场土石方量、场区排水、交通连接条件等多个因素,是机场设计前期工作重要的环节,也是影响工程造价的主要因素。

机场选址阶段确定跑道标高通常采用“纵断面法”。这种方法通过离散化地形图构建模型,通过计算土方平衡标高并综合相关因素来确定。一方面,通用机场选址阶段往往不具备使用这种方法所必须的离散化的地形图;另一方面,由于需要对初选场址进行多方案比选,该方法的工作量较大。考虑到通用机场选址阶段不确定性因素较多,跑道标高在后续工作中调整的可能很大,因此并不需要达到十分精确的程度。故而,我们可以利用GE中直线“高度配置”功能来初步确定跑道标高。

首先,在GE中标出跑道中心线,然后通过生成跑道中心线的“高度配置文件”来绘制跑道的纵断面图,包括最大值、最小值、平均值、距离、坡度、高程等内容。GE图中还可以自动跟踪修正曲线,得到比较优化的纵断面图。根据纵断面图并结合场地的净空处理情况,就可以初步确定跑道的标高。与传统方法对比,采用该方法方便快捷,且绘制的纵断面图起伏大致与实测图一致(如图3),误差较小,具有较高的可信度。

#### 4.3 地空条件结合分析

机场选址过程中不仅要考虑场址的地面条

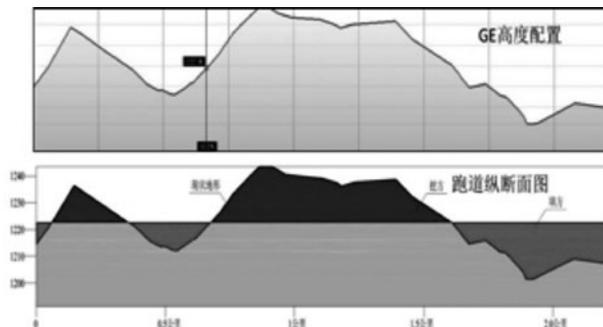
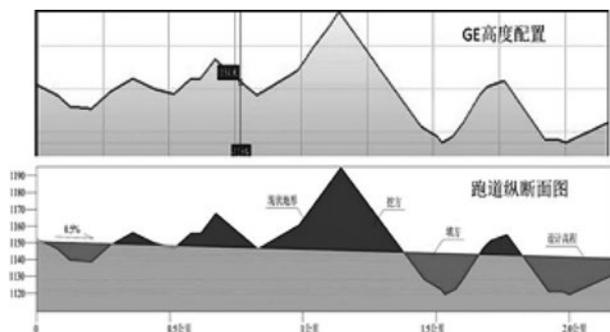


图3 某两个通用机场跑道纵断面图

件,还要考虑空域、净空等因素,综合考虑地面与空中条件,选取最佳场址。场址周边影响净空条件的障碍物是决定场址能否成立的关键因素之一,选址过程中需要对这些障碍物进行分析,判断是否能合理规避,是否需要处理以及如何处理。

从地面设计角度来说,在选址场址位置时,都是以ICAO附件14中的障碍物限制面的要求评价场址周围的障碍物,并选出能满足其要求的场址。附件14障碍物限制面的目的是为了在机场周围保持无障碍物的空域,通过制定一系列障碍物限制面,用来规定对物体高度的限制,并防止由于机场周围障碍物增多而使机场变得无法使用。而对于穿透附件14面的障碍物,只是有可能对飞行带来影响,还须要经过航行方面的飞行程序设计从多个方面、多个角度去评价这些障碍物,是否真的对飞行有影响、影响程度如何。

按照传统的净空图不但难以反映机场选址地空结合设计的要求,而且平面图表现不够生动,对多方案比选更缺乏说服力。我们尝试通过GE三维图像来构障碍物的限制面,将场址的地空条件形象的展示出来。

通用机场多数采用非仪表跑道或非精密进近跑道,障碍物限制面常含有过渡面、进近面、内水平面、锥形面。首先在AutoCAD中对机场障碍物限制面进行三维建模(如图4),然后利用GE提供的KML接口将三维模型文件转换成KML文件输入。在GE中可以形象地展示出机场净空限制面(如图5),也可逐一显示其中各个面(如图6)。

通过GE我们可以清晰地了解到通用机场的净空条件,并形象生动地表现出来,从而提高选址的工作效率和精度。

#### 4.4 设计方案表现

在机场工程选址过程中,我们主要使用AutoCAD软件工具辅助设计,绘制平面图进行方案展

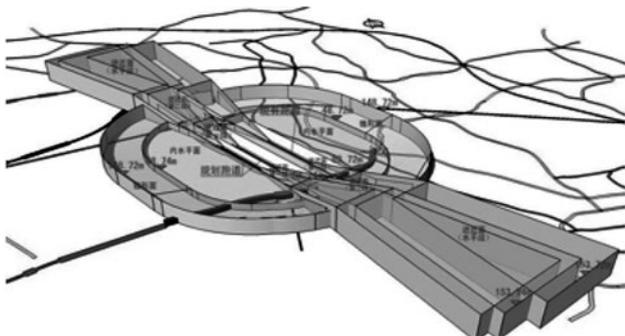


图4 某机场净空限制面三维图

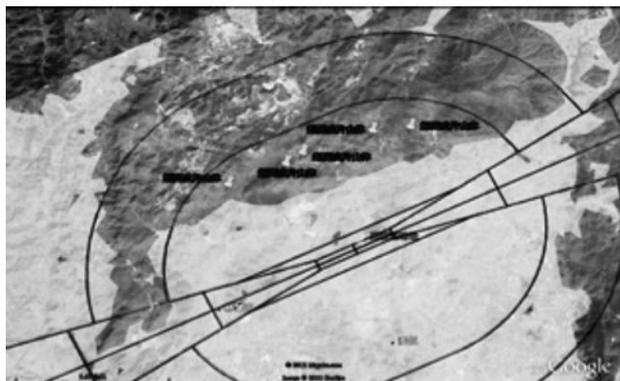


图5 某通用机场附件14面三维图

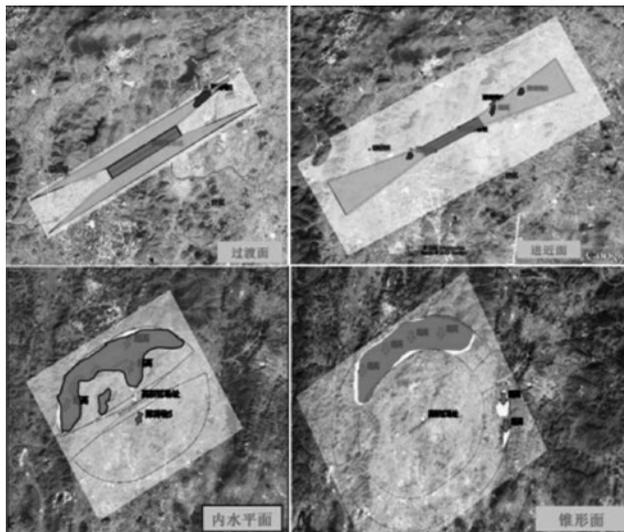


图6 某通用机场各净空限制面图

示, 这种表现形式显得较为单一。而利用GE的地理信息, 我们将设计方案与三维实景结合, 使得成果展示更为形象生动, 几乎能达到身临其境的感觉(如图7、8)。

我们可以通过两种方法将Auto CAD中的平面图导入GE。一是可以利用Acad2Earth、Acad2Kml等软件工具, 直接将Auto CAD中



图7 某通用机场用地和拆迁范围图



图8 某通用机场GE三维图

DWG格式的文件转换成KML文件导入GE中。二是可以通过坐标系转换, 将Auto CAD图中的坐标点转换为大地坐标系WGS84下的坐标, 编辑成KML格式的路径, 即可导入。导入过程中, 需要注意协调绘图比例、坐标匹配和基准点确定等问题, 可在导入之前, 对CAD中的图形文字进行一定的处理, 这样导入GE后, 实际的显示效果会更好。

## 5 需要注意的几点

(1) 由于GE自身存在一定的精度限制, GE提供的数据准确度难以满足设计后期的需要, 因此, GE平台在设计前期阶段更为适用。

(2) 虽然GE图像时效性较强, 但毕竟不是实时数据, 而且还有卫星图片拼接、云层遮挡等问题, 这些有可能导致提供的三维地形图失真。因此, 如发现高程数据偏差的情况应特别引起重视并进行甄别修正。

(3) 在利用GE平台时, 应注意保密问题, 在涉密敏感性地区不要随意标注地标, 在标注名称时注意不要用实名, 更不能把带有敏感信息的GE图发布到网上。

## 6 结语

GE在通用机场选址阶段有很好的适用性,为通用机场选址工作提供了一个很好的平台,将GE应用在通用机场选址阶段工作中,可以非常直观、方便地进行大范围内场址多方案比选、初步确定跑道标高以及进行场址净空分析等工作,不仅节约了前期工作研究成本、缩短设计周期,且能使研究方案更为形象直观的展示,为场址的决策提供更为科学可靠的依据。随着GE功能的不断完善,GE系统将为机场设计领域发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 王子明. Google Earth 在公路工程可行性研究中的应用 [J]. 公路交通技术, 2008(5): 4-6.
- [2] 马文祥, 金芳丽. 在 AutoCAD 中是吸纳高程信息的快速提取 [J]. 测绘通报, 2006(3): 54-55.
- [3] 李春生. Google Earth软件在公路测设中的应用 [J]. 河南科技, 2009(7): 50-51.
- [4] 李为乐, 陈情, 陈哲锋, 陈重铭. Google Earth三维可视化在滇藏铁路林芝-拉萨段地质选线中的应用 [J]. 遥感应用, 2012, (1): 95-99.
- [5] 梁诚, 陈楚江, 王丽园. Google Earth二次开发方法及其在公路勘察设计中的应用研究 [J]. 交通科技, 2010, (7): 107-110.
- [6] 陈强, 姜立新, 帅向华. Google Earth在地震应急中的应用 [J]. 地震, 2008, 28 (1), 123-128.
- [7] 叶丰明, 韩正梅. Google Earth在铁路勘测设计中的应用 [J]. 铁道勘察, 2009, (6) 43-45.
- [8] 刘珍, 刘建勋. 浅谈Google Earth二次开发技术 [J]. 地理空间信息, 2009, 7 (4): 72-74.
- [9] SUN Enji, NIETO Antonio, LI Zhongxue. GPS and GoogleEarth based 3D assisted driving system for trucks in surfacemines [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20 (1): 175 - 177.
- [10] 张坤, 邹峥端, 余加勇. 基于 Google Earth 的虚拟城市构建方法 [J]. 测绘工程, 2007(5): 36 - 38.
- [11] 丁斌芬, 程鹏根, 安洁玉. 基于Google Earth和MapInfo的城市道路信息获取方法与实践 [J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 45-49.
- [12] 姬洪亮, 杨品. Google Earth在道路工程前期规划设计中的应用研究[J], 测绘与空间地理信息, 2013, 36(7): 103-105.

# 基于多目标优化的叶片优异中心业务分工问题研究

■ 李金芝 王明珠 张波 「工艺」

**摘要:** 航空发动机涡轮叶片生产的业务分工方案,是叶片优异中心建设的核心问题之一。本研究通过目标规划模型、综合评价模型解决该问题。目标规划模型以技术、质量、效率、成本为研究目标,定量给出各叶片生产厂的年产量规划;综合评价模型确定了技术创新、质量、柔性、生产效率、客户满意度、成本和人力资源七个评价指标,以专家打分的形式给出各厂综合绩效排名。研究结果表明,通过目标规划模型和综合评价模型,可以得到叶片优异中心各生产厂科学、合理的业务分工方案。

**关键词:** 目标规划模型;综合评价模型;优异中心;涡轮叶片

## 0 引言

涡轮叶片是航空发动机上关键、易损且难加工的部件,它的研发、生产难度极大<sup>[1]</sup>,能够直接决定发动机的性能、安全与寿命的关键部件之一。总的来说我国航空工业,经过多年来的投资建设,已形成了较强的叶片研制、生产能力,基本满足国内发动机的研制、生产需要,但目前也存在一定问题。国内叶片的生产技术水平与国外存在较大差距(尤其是先进的定向、单晶叶片<sup>[2, 3]</sup>),生产模式与管理方面也存在混线生产、业务分工定位不甚合理、重复建设多等问题,这些使得涡轮叶片成为我国航空发动机高速发展的瓶颈之一<sup>[4]</sup>。国外优秀的航空制造企业,如GE、空客等,通过专业化发展的手段,以优异中心(COE, Center of Excellence)模式实现资源优化整合,使企业核心竞争力得以提升<sup>[5]</sup>。借鉴国外的先进经验,国内也应采用COE模式解决目前生产管理方面存在的问题,降本增效,实现资源整合<sup>[6]</sup>。

开展航空发动机涡轮叶片COE建设,必须结合生产现状。当前,中航工业涡轮叶片的生产主要集中在各主机厂、涡轮叶片专业化生产厂和研究院所等单位,各单位的业务合理分工是COE建设的核心问题之一。本文采用供应链管理领域中的目标规划模型和综合评价模型<sup>[7]</sup>对叶片产品业务分工问题开展专题分析,以期为叶片COE建设确定科学、合理的业务分工方案。

## 1 目标规划模型

目标规划可以根据各个目标的相对重要程度,给出最大程度满足多个优化目标的解决方案。本文将通过建立目标规划模型给出各单位开展各叶片产品的业务分工参考方案。

由于影响各单位业务分工的因素很多,本文采用德尔菲法开展调研分析,最终确定重点考察技术、质量、效率、成本这几方面因素。为不失一般性,我们可以将问题描述为:有 $m$ 个叶片厂分别生产 $n$ 种叶片产品供应发动机公司,现拟确定业务分工方案,以实现技术、质量、效率、成本等方面的目标。建立目标规划模型如下:

作者简介:李金芝,女,高级工程师,2012年毕业于北京航空航天大学工程力学专业,现就职于中航规划工程技术研究院。

$$\min z = w_1 \sum_j d_{j1}^- + w_2 \sum_j d_{j2}^- + w_3 \sum_j d_{j3}^+$$

s.t. (1)  $\sum_j p_{ij} X_{ij} + d_{j1}^- - d_{j1}^+ = D_j$   
 (2)  $\sum_j X_{ij} + d_{j2}^- - d_{j2}^+ = \beta \sum_j Z_{ij} k_{ij}$   
 (3)  $X_{ij} \leq Z_{ij} k_{ij}$   
 (4)  $\sum_j (vc_{ij} X_{ij} + fc_{ij} Z_{ij}) + d_{i3}^- - d_{i3}^+ = (1 - \gamma) R_i$

其中,

$$Z_{ij} = 0 \text{ 或 } 1,$$

$$X_{ij} \geq 0 \text{ 并且为整数}$$

$$d_{uv}^-, d_{uv}^+ \geq 0, \quad u = i \text{ 或 } j, v = 1, 2, 3$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, n$$

决策变量:

$X_{ij}$ : 叶片厂*i*生产叶片产品*j*的产量的决策变量 (单位: 件/年);

$Z_{ij}$ : 叶片厂*i*是否生产叶片产品*j*的0~1决策变量, 该变量取1表示叶片厂*i*生产叶片产品*j*, 取0表示不生产;

$d_{uv}^-, d_{uv}^+$ : 表示决策结果与目标之间差距的偏移变量。

模型参数:

$i = 1, \dots, m$ , 表示叶片厂的集合;

$j = 1, \dots, n$ , 表示叶片产品品种的集合;

$D_j$ : 市场对叶片产品*j*的需求量, 单位: 件/年;

$p_{ij}$ : 叶片厂*i*生产叶片产品*j*时的合格率;

$k_{ij}$ : 叶片厂*i*能够用于生产叶片产品*j*的总产能, 单位: 件/年;

$\beta$ : 产能利用率的目标值, 根据一般设备投资决策所参考的产能利用率要求, 将此目标值设为80%;

$\gamma$ : 利润率;

$R_i$ : 叶片厂*i*的期望年销售收入, 单位: 元/年;

$vc_{ij}$ : 叶片厂*i*生产叶片产品*j*时的可变成本, 单位: 元/件;

$fc_{ij}$ : 叶片厂*i*生产叶片产品*j*时的固定成本, 单位: 元/年;

$w_1, w_2, w_3$ : 各目标的权重, 依据专家建议, 本文取0.74, 0.14, 0.12。

根据实际情况, 叶片生产单位主要包括5家,

分别用A\B\C\D\E表示, 叶片产品类型包括低压导向叶片、高压导向叶片、低压工作叶片、高压工作叶片等四类。通过对建模所需的叶片产品合格率、产品利润率、市场需求量、生产总产能、可变成本、固定成本以及年期望销售收入等相关参数开展调研, 经分析计算, 得到下表1~表7。

表1 市场对叶片产品的需求量\*

	低压导向叶片	高压导向叶片	低压工作叶片	高压工作叶片
$D_j$ (件/年)	6161.00	6993.00	6993.00	7659.00

表2 各类产品利润率\*

	低压导向叶片	高压导向叶片	低压工作叶片	高压工作叶片
$\gamma$	0.0350	0.0450	0.0600	0.0800

表3 各叶片厂的期望年销售收入 (单位: 万元/年)\*

	A厂	B厂	C厂	D厂	E厂
$R_i$	3010.32	4145.18	4885.78	15051.60	5507.24

表4 各厂叶片产品合格率\*

	低压导向叶片	高压导向叶片	低压工作叶片	高压工作叶片
A厂	0.22	0.12	0.09	0.06
B厂	0.22	0.14	0.11	0.08
C厂	0.22	0.12	0.09	0.05
D厂	0.22	0.14	0.12	0.08
E厂	0.25	0.19	0.16	0.11

表5 各厂用于生产叶片产品的总产能 (单位: 件/年)\*

产能 (合格产品)	低压导向叶片	高压导向叶片	低压工作叶片	高压工作叶片
A厂	1332.00	1332.00	1332.00	1332.00
B厂	1332.00	2498.00	1665.00	2498.00
C厂	1903.00	1665.00	2220.00	1665.00
D厂	3700.00	4163.00	4163.00	4163.00
E厂	1665.00	1665.00	1665.00	2775.00



表8 业务分工方案数据表

	低压 导向叶片	高压 导向叶片	低压 工作叶片	高压 工作叶片
A厂	0.00	11100.00	0.00	0.00
B厂	0.00	0.00	15136.00	22545.00
C厂	4147.00	13873.00	0.00	0.00
D厂	16290.00	18079.00	30526.00	52037.00
E厂	6660.00	8763.00	10406.00	15386.00

注：表中数据为各厂针对不同类型叶片的产量，单位：件/年。

表9 评价指标体系的指标及权重

叶片供应链绩效综合评价指标 (S)	第一层 (B) 指标及编号	第二层 (C) 指标及编号	综合 权重
	技术创新 (B1)	新产品研制周期 (C11)	0.159
		新产品研制成本 (C12)	0.056
	质量 (B2)	产品合格率 (C21)	0.304
		退货率 (C22)	0.134
	柔性 (B3)	技术柔性 (C31)	0.018
		设备转产反应能力 (C32)	0.015
		战时动员能力 (C33)	0.019
	生产效率 (B4)	生产效率 (C41)	0.070
	客户满意度 (B5)	完好订单履行率 (C51)	0.049
		客户抱怨率 (C52)	0.019
		客户抱怨响应时间 (C53)	0.010
	成本 (B6)	生产成本 (C61)	0.051
		物流成本 (C62)	0.015
人力资源 (B7)	人力资源匹配性 (C71)	0.081	

体系，经德尔菲法确定了由技术创新、质量、柔性、生产效率、客户满意度、成本和人力资源等七方面组成评价指标体系，各指标的权重通过层次分析法确定，具体结果如表9所示。

根据前面得到的综合评价指标体系模型，可以对各厂生产不同叶片产品时的绩效进行评价。邀请专家根据表9中的各项指标针对各工厂按照10分制进行打分（10分为最优）。将各专家给出的分值进行算术平均，然后乘以对应的权重并累加，最后得到各厂生产不同叶片产品时的综合绩效得分，具体结果如表10所示。

通过对各厂综合绩效得分情况进行汇总排名，可得到表11。

### 3 业务分工方案

根据目标规划模型和综合评价模型，可以得到航空发动机涡轮叶片产品生产业务分工方案如下：

(1) 依据综合评价模型，E厂和D厂在各类产品的排名中都分别位于第一、第二，且目标规划模型给出的分工方案里，E厂和D厂生产全品类叶片。结合实际情况，E厂在叶片产品研制、材料、工艺等方面具有很强的技术优势，并且其地理位置在人才的吸引方面也具备一定的优势，因此，适宜将E厂定位为叶片的专业技术研发单位，将D厂定位为全品类生产厂。

(2) C厂在综合评价中尽管各品类的排名都在最后，但是从综合评分的绝对值来看，其在低压和高压导向叶片上的得分相比在其他产品上的得分更高。因此，C厂应专注于生产低压和高压导向叶片，而这也与目标规划模型中给出的方案相一致。

(3) 根据目标规划模型给出的分工方案，B厂应重点生产低压工作叶片和高压工作叶片。而从综合评价模型中可见，B厂在各品类产品排名中都位于第三，但从得分的绝对值来看与排名第二的D厂差距并不太大，而其中高压导向叶片和高压工作叶片上得分的差距最小。综合考虑，B厂应专注于生产低压工作叶片和高压工作叶片。

(4) A厂在综合评价中得分较高的两项是低压导向和低压工作叶片，而目标规划模型给出的方案是生产高压导向叶片。考虑到前面在安排B厂的业务分工对目标规划模型给出方案的调整可能对产能约束的影响，A厂应专注于生产高压导向叶片和低压导向叶片。

表10 各厂生产不同叶片的综合绩效得分

产品	指标编号	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C33	C41	C51	C52	C53	C61	C62	C71
	权重	0.159	0.056	0.304	0.134	0.018	0.015	0.019	0.07	0.049	0.019	0.01	0.051	0.015	0.081
低压导向叶片	A厂	6	5.5	6	6	5.5	7	6.5	7	5.5	5.5	6.5	6.5	7	6
	B厂	6.5	6	6	6	5.5	7	6.5	7	6	5.5	6.5	6.5	7	7
	C厂	5.5	5.5	5.5	6	4.5	7	6.5	6.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7	6.5
	D厂	7.5	5.5	6.5	6	6	6	7	6.5	6	6	6.5	7	7	6
	E厂	9.5	6	6.5	6.5	8	6	5	6	6	5.5	6.5	6.5	6.5	8
高压导向叶片	A厂	6	5.5	5	6	5.5	6	5.5	6.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7	6
	B厂	7.5	5.5	5.5	6	5.5	6	5.5	6.5	6	5.5	6.5	6.5	7	7
	C厂	5.5	5.5	4	6	4.5	5	5.5	6.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7	6.5
	D厂	8	5.5	5.5	6	6	7	8	6.5	6	6	6.5	7	7	6
	E厂	10	6	7	6.5	8	7	6	6	6	5.5	6.5	6	6.5	8
低压工作叶片	A厂	5.5	5.5	5.5	6	5.5	6	5.5	6.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7.5	6
	B厂	6	5.5	5.5	6	5.5	6	5.5	6.5	6	5.5	6.5	6.5	7.5	7
	C厂	4.5	5	4.5	6	4.5	5	5.5	6.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7.5	6.5
	D厂	7	5.5	6	6	6	7	8	6.5	6	6	6.5	7	6.5	6
	E厂	10	6.5	6.5	6.5	8	7	6	6	6	5.5	6.5	6	6.5	8
高压工作叶片	A厂	5.5	6	4	6	5.5	5.5	5	5.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7.5	5.5
	B厂	6.5	6	4.5	6	5.5	5.5	5	5.5	6	5.5	6.5	6.5	7.5	6.5
	C厂	5	5.5	3.5	6	4.5	4.5	5	5.5	5.5	5.5	6.5	6.5	7	6
	D厂	6.5	6.5	4.5	6	6	7	6.5	5.5	6	6	6.5	7	6.5	6
	E厂	9.5	6.5	5.5	6.5	8	7	6	7.5	6	5.5	6.5	6	6.5	8.5

表11 各厂综合绩效得分及排名汇总表

得分 排名	A厂		B厂		C厂		D厂		E厂	
	得分	排名								
低压 导向 叶片	6.068	4	6.281	3	5.824	5	6.487	2	6.982	1
高压 导向 叶片	5.695	4	6.191	3	5.318	5	6.296	2	7.223	1
低压 工作 叶片	5.775	4	5.960	3	5.290	5	6.282	2	7.099	1
高压 工作 叶片	5.219	4	5.636	3	4.959	5	5.704	2	6.860	1

综上所述,可得到业务分工方案如表12所示。该分工方案,既考虑了各单位的自身特点和优势,又考虑了生产能力的灵活性,非常适合我国航空工业当前的实际情况,有利于推动叶片专业化生产。

#### 参考文献

[1] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会[编].

表12 业务分工方案表

产品	A厂	B厂	C厂	D厂	E厂
低压导向叶片	✓		✓	✓	
高压导向叶片	✓		✓	✓	
低压工作叶片		✓		✓	
高压工作叶片		✓		✓	
专业技术研发					✓

叶片制造技术[M]. 科学出版社, 2002.

[2] 黄维, 黄春峰, 王永明等. 先进航空发动机关键制造技术研究[J]. 国防制造技术, 2009, (03): 42-48.

[3] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲等. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. 航空制造工程, 1998, (02).

[4] 李涤尘, 吴海华, 卢秉恒等. 型芯型壳一体化空心涡轮叶片制造方法[J]. 航空制造技术, 2009, (3): 38-42.

[5] Airbus. Airbus Centers of Excellence[J]. Airbus information, 2012, 6: 1-3.

[6] APPLICATION DELIVERY: CENTER OF EXCELLENCE EVOLUTION, WWW.MERCURY.COM.

[7] 马士华, 林勇. 供应链管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

# 机械加工车间布局方法研究 及案例分析

■ 池力 陈军 「工艺」

**摘要:** 基于加工单元模式的机械加工车间布局问题, 主要包括加工单元的划分和加工单元的布局两方面问题。对于加工单元的划分, 本文应用顺序分枝法(SBM)获得加工单元类别, 并结合机加工时计算和工厂总体规划原则, 对加工单元进行了合理布局, 最终得到机械加工车间布局图。

**关键词:** 机械加工车间; 车间布局; 顺序分枝法; 加工单元

## 1 引言

对于制造型企业而言, 车间是企业的关键生产单元, 也是企业的物化中心, 它不仅是制造计划的具体执行者, 也是制造信息的反馈者, 更是大量制造实时信息的集散地, 因此车间系统在整个制造系统中起到的作用越来越重要<sup>[1]</sup>。长期以来, 车间系统的布局设计一直被当作制造业中最关键和最困难的设计任务之一。良好的车间布局不仅能大幅度削减物料搬运费用, 而且能够简化加工过程, 有效利用设备、空间、能源以及人力资源。国内制造企业对于技术的革新和产能的扩大需求已日益迫切, 先进的生产组织模式是制造企业追逐的目标, 高效性、高柔性、易于重构已成为现今厂房布局设计的主要趋势。

加工单元作为一种先进的生产组织模式受到越来越多的青睐。加工单元正沿着两方面演进: ①日式单元化生产(Seru Seisan), 精益生产和单人制生产方式的融合<sup>[2]</sup>; ②欧美式单元生产(Cell Production), 该生产方式是成组技术的一个成功应用<sup>[3]</sup>。

本文首先对典型的设施布局方式以及在此基础上形成的比较流行的车间布局理念进行了概述

和总结, 接着结合应用于成组技术的顺序分支法(SBM, Successive Branching Method), 针对某企业实施加工单元的机械加工车间设计案例, 对加工单元进行了科学划分, 最后, 根据车间的总体规划原则和工艺流程对各加工单元进行合理布局。

## 2 典型的设施布局方式

车间布局主要包括两方面问题, 一是加工单元的划分, 二是加工单元之间的布局。而设施布局问题属于加工单元内设施的具体布置形式, 设施包括人员、设备、材料等。典型的设施布局方式主要有以下几类:

1) 固定式布置形式(Fix-Position Layout), 根据体积或者质量将产品固定在某一位置上, 设备、人员、材料都围绕产品分布, 如造船厂等。其优点在于物料移动较少, 柔性度高。缺点是人员设备的移动将相对增加, 设备需要重复配置, 对工人的技能要求较高等。

2) 产品原则布置形式(Product Layout), 根据产品的制造工艺流程布置各组成部分。从理论上讲, 流程是一条从原材料上线到成品产出的连续线。固定制造某种部件或某种产品的封闭车间, 其设备、人员按加工或生产的工艺过程顺序布置, 形成一定的生产线, 适合品种少、批量大

作者简介: 池力, 男, 工程师, 2013年毕业于华中科技大学工业工程专业, 现就职于中航规划战略管理部。

的生产方式。

3) 工艺布置原则形式 (Process Layout), 是将同类设备和人员集中布置在一个地方的布置形式。工艺原则将功能相同或相似的一组设施布置在一起, 故又称为机群式布置。工件按工艺路线成批进入这些班组, 不同的产品需要不同的工艺路线。

4) 成组原则布置形式 (Group Layout), 应用成组技术进行设施布置, 成组技术就是识别和利用产品零部件间的相似性。一系列工艺要求相似的零件组成零件族。针对一个零件的设备要求形成机器组, 这些机器组形成加工制造单元。成组原则布置介于产品布置和工艺布置之间, 适用于中小批量生产<sup>[4]</sup>。

### 3 典型的机械加工车间设计方法

上述四种设施布置方式属于基本的布置形式, 适用范围较广。随着信息化和工业化的深度融合, 制造车间对于按市场变化实现其产品快速变化能力的需求日益迫切, 越来越多新的设计理念, 如敏捷制造、智能制造等理论正逐渐被植入到上述4种基本的布置形式之中, 使得车间布置形式更加多样化。这些新的布置模式都是建立在基本的布置形式之上的, 是对其进行的重组, 交叉和衍生。本文主要介绍3种比较典型的车间布局设计方法。

#### 3.1 基于工艺设计与车间作业计划的优化运行的布局设计

为了解决工艺设计与车间作业计划在实际并行运行时存在的诸多问题, 国内外学者已经进行了一些研究, 主要研究方法包括非线性工艺设计、柔性工艺设计、可选择的工艺设计、闭环工艺设计、分布式工艺设计等。

国内学者乔建明等<sup>[5]</sup>提出了基于分布式工艺设计的任务划分思想。其本质是产品布置形式和工艺布置形式的深度融合, 通过分析并行工程的要求和特点, 以及工艺设计与车间作业计划之间的联系和区别, 提出了一种工艺设计与车间作业计划的优化运行模式, 保证产品制造工艺流程畅通性的前提下, 使得车间布局形式能柔性地适应车间作业计划。

#### 3.2 基于敏捷制造理念的车间布局设计

国内学者马玉敏等<sup>[6]</sup>提出了面向敏捷制造的车

间分布式布局的设计方法。敏捷制造是指企业制造单元能快速适应市场的变化。该设计理念具体实施方式表现为根据产品需求情况分布、产品的工艺路线以及产品在制造单位间的流转负荷, 确定每一种需求模式下的物流量, 然后生成每一种需求模式下的产品物流矩阵, 选择一个布局能为各种模式提供有效的物流。

该方法主要强调分析作业单位之间的物流关系, 其本质是建立在产品原则布置基础之上的, 适用于机床种类和数量以及确定后的车间布局。

#### 3.3 基于智能制造的智慧工厂

经过多年的信息化与工业化的融合建设, 我国制造业数控加工技术已取得长足的进步, 但与发达国家相比, 在高端数控机床、智能化工艺技术、先进物流体系及数字化管控平台建设等方面还存在较大差距。未来制造技术的发展趋势是以数字化为核心、以自动化为基础、以集成化为措施、以网络化、智能化为道路。

国内技术专家汤立民等<sup>[7]</sup>在紧密结合行业发展现状的基础上, 提出了基于智能制造的飞机结构件数控加工智慧工厂发展思路, 并指出智慧工厂需突破的关键技术, 包括智慧机床、智能工艺设计、智能物流和智能管控中心。目前, 国内对智慧工厂的布局设计研究较少, 尚处于探索阶段, 但智慧工厂的提出、发展和实现, 为传统的制造厂提出了新的发展方向。智慧工厂的设计可围绕掌握资源运转流程, 提高生产过程的可控性, 减少人工对生产线运行的干预、即时准确地采集工厂运行数据, 以及合理的生产编排等方面展开。

综上所述, 新的设计理念被引入到基本的布置形式之中, 进而衍生出差异化的布置模式和多样化的具体分析研究方法。目前, 对于机械加工车间布局优化问题, 国内外学者提出的具体的典型的分析研究方法包括: ①基于SLP/SSLP得到设施间的相互关系、作业单位之间的物流关系或非物流关系; ②基于数字化工厂的车间布局, 采用可视化仿真建模技术, 为布局方案的评估和优化提供便利; ③基于RMC的可重构制造系统设备布局优化, 通过智能算法求解可重构制造系统设备优化数学模型。

在此基础之上, 本文根据某类零件具体特点, 对某机械加工车间的布局进行了研究, 采用顺序分枝法 (SBM) 对加工单元进行科学划分, 并结合工厂总体规划原则, 对加工单元进行合理布置。

## 4 案例分析

### 4.1 对象选取

某机械加工车间的加工对象为动部件、系统件、接头类等零件，在同一车间内如何合理划分和布局各加工单元是本次研究的重点。

零件规模方面，动部件、系统件、接头类等零件单机共1297件/1183项，属于中小批量规模。零件组成方面，动部件主要包括主桨毂、尾桨毂和自动倾斜仪三大部件，关键零件有主桨毂中央件、主桨毂连接件、折叠接头，尾桨毂中央件、尾桨毂连接件，自动倾斜仪动环、不动环等，最大零件尺寸在 $\Phi 1000\text{mm}$ 左右。

零件工艺特点方面，动部件中折叠接头零件与系统件中摇臂、支座类零件特点相似，都存在高精度定位孔，位置度要求 $0.02\text{mm}$ ；各安装平面、理论型面、对接安装孔的加工复杂。该类零件工艺特殊，零件数量较多，加工设备类似，适合采用成组加工技术。

另外，在实际生产制造中，还需要并列加工某型机的其他几种扩展型，鉴于平台的一致性，动部件、接头类等关重件的零件特征及加工工艺流程具有一定的相似性，加工设备也类似。

因此，工厂拟将各型机动部件、接头类等产品的分类组成生产单元。根据被加工零件的工艺流程的相似程度及零件数量规模，生产单元的具体布置形式适合采用成组布置形式或兼顾产品原则和成组原则布置形式。顺序分枝法（SBM, Successive Branching Method）是一种应用于成组技术的产品分类方法，本文拟采用顺序分枝法来划分加工单元类别。

### 4.2 基于SBM的加工单元划分

#### 4.2.1 顺序分枝法简介

顺序分枝法是许香穗等<sup>[7]</sup>提出的应用于成组技术产品分类的方法。该方法首先将待分

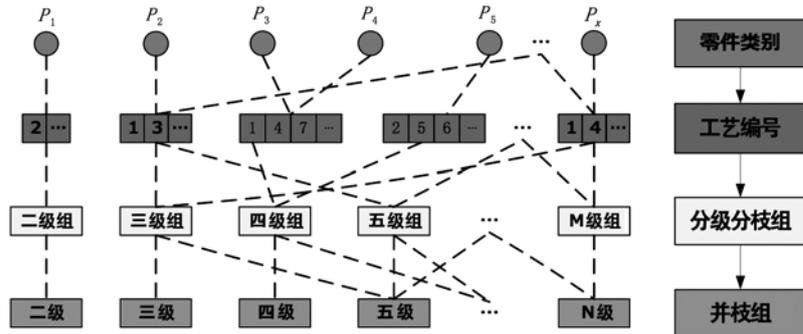


图1 顺序分枝法示意图

类的全部零件按其工艺流程逐个判别，得出每一组零件特点的工艺编号，根据工艺编号初步分为若干个分级分枝组，划入分级分枝组的零件在主要工序数目上完全一致，然后遵循工艺相似和包容的原则，将分级分枝组合并为零件种数适当的加工族。顺序分支法示意图如图1所示。

#### 4.2.2 工艺流程分析

动部件、系统件、接头类等零件的机械加工工艺流程如表1所示。图中带圆圈的数字表示工艺的先后顺序。

#### 4.2.3 分枝—并枝分析

在进行分枝—并枝分析之前需要先对工艺流程进行编码。这里给定编码规则为：①按工艺流程中设备顺序编码；②在工艺中设备二次出现的不再编码。

表1 动部件、系统件、接头类等零件机加工艺流程

编号	设备名	动部件				系统件	接头类	其他
		1	2	3	4	6	7	8
1	数车 1	①				①		
2	数车 2			①	①			
3	立加 1	②		②		②	③	
4	立加 2			③	②			
5	卧加 1		①				①	
6	卧加 2		②				②	①
7	镗铣	③		④				
8	钳工			⑤				②
9	坐标磨		③			③		
a	插齿机							
b	线切割		④			④	⑤	
工艺编号		1376	569b8	2347	24	139b	56b	68

该制造厂机加车间动部件、系统件、接头类等零件工艺编码,如表1所示。

#### (1) 分枝过程

分枝过程就是将待分类的全部零件按其工艺流程逐个判别,得出每一组零件特点的工艺编号,根据工艺编号初步分为若干个分级分枝组,划入分级分枝组的零件在主要工序数目上完全一致。

该机加车间动部件、系统件、接头类等零件工艺分枝结果如表2所示。

表2 分枝结果统计表

分枝组	工艺编号	工艺号
二级组	24	4
	68	8
三级组	56b	7
四级组	1376	1
	2347	3
	139b	6
五级组	569b8	2

#### (2) 并枝过程

并枝过程是按照分枝组间的相似性和包容原则,将分枝组进行合并,合并后的分枝组级别取最高分枝组级别。

该机加车间动部件、系统件、接头类等零件工艺并枝结果如表3所示。共分为4个加工单元。

表3 并枝结果统计表

分枝组	工艺编号	工艺号
四级(1)	1376	1
四级(2)	2347(24)	3,4
四级(3)	139b	6
五级	569b8(68,56b)	2,7,8

### 4.3 车间总体规划原则和机加车间布局

#### 4.3.1 车间总体规划原则

该动部件厂房既包括零件的加工制造,也涵盖零部件的修理和装配。该车间总体规划遵循如下几点原则:

(1) 精密加工间共用。零件的加工制造和

零部件的修理装配,都存在部分零件的精密补加工工序,需要在精密加工间完成制造任务,本次将精密加工间设置于机械加工区和修理装配区之间,保证两个区域物流转运的合理性和便捷性。

(2) 生产组织模式按加工单元布置。该项目属于批产项目,零件级别的加工制造任务量较大,且按加工单元布置有利于提高生产效率,降低制造成本,提高设备利用率。

(3) 设置加工后处理工序。厂房建设于某新区规划用地之中,与原厂区距离较远,大部分零部件加工之后需要转热处理、探伤、喷完强化等各项后处理,为了保证零件的精度和制造质量,需要在厂房规划前期考虑在合适的位置设置各项后处理工段。

#### 4.3.2 机械加工车间布局

表3给出了分枝-并枝结果,得到4个加工单元。根据4个加工单元所对应的加工制造任务,以及所需要的设备类型,通过工时计算可以得出每个加工单元所对应的设备组成。各加工单元详细信息如表4所示。由于设备数量较多,加工单元内存在不同的工艺路线,为节省空间,缩短物流运输距离,便于实现多机床看管,因此,均采用“U”型布置。

表4 各加工单元设备组成明细表

序号	分枝组	加工单元类别	设备组成	设备数量
1	四级(1)	连接件生产线(一)	三坐标卧加6台、卧车2台、立卧转换2台、卧式镗铣1台	11
2	四级(2)	连接件生产线(二)	三坐标卧加5台、卧车2台、立卧转换3台	10
3	四级(3)	系统件生产线	数车2台、立加3台	5
4	五级	接头类生产线	立加1台、卧加2台、卧式镗铣1台、线切割1台	5

根据车间总体规划原则以及各加工单元组成,可以得到机械加工车间的平面布局。如图2所示。

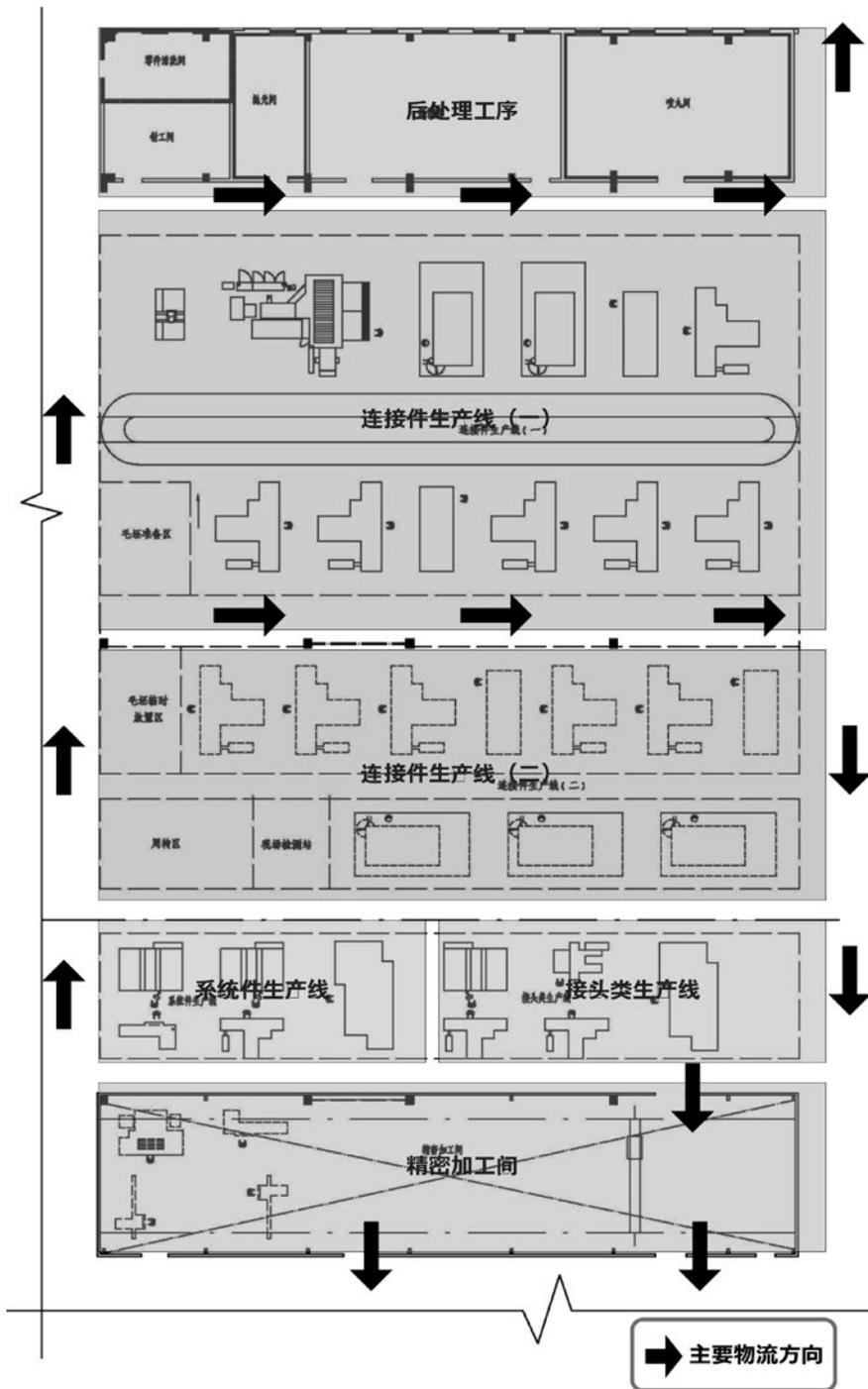


图2 机械加工车间工艺平面布局图

## 5 结论与展望

本文梳理了典型的设施布局方式，综述了几种典型的机械加工车间设计方法。以某机械加工厂房为背景，采用SBM方法对加工单元进行划分，并结合车间总体规划原则对机械加工车间进行合理布

局，有效解决了车间布局设计的加工单元的划分和布局两方面问题。

后续研究工作将侧重于定量分析加工单元间布局问题，以及对布局的结果进行综合评价，为今后的设计提供更有意义的指导。

### 参考文献

- [1] 王伟, 刘德忠, 黄静等. 基于设备可重组布局的车间系统. 组合机床与自动化加工技术, 2006 (9): 100~102, 105.
- [2] Ikujiro Nonaka, Akira Katsumi. The Essence of Innovation (in Japanese) [M]. Japan: Nikkei BP, 2004.
- [3] Tomofumi Kimura, Masaru Yoshita. Cellular Manufacturing Runs into Trouble When Nothing is Done (in Japanese) [J]. Nikkei Monozukuri, 2004(7): 38-61.
- [4] 伊俊敏. 物流工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [5] 乔建明, 董红军, 黄乃康. 工艺设计与车间作业计划优化运行模式的研究. 机械科学与技术, 1999 (11)
- [6] 马玉敏, 陈炳森, 张为民. 基于敏捷制造理念下的车间布局设计. 组合机床与自动化加工技术, 2002 (4): 41~43, 45.
- [7] 汤立民, 牟文平, 宋戈. 飞机结构件数控加工智慧工厂之路. 航空制造技术, 2015 (5): 26~29.

- [8] 许香穗. 顺序分支法——零件归类成组的一种实用方法[J]. 重庆大学学报, 1985 (1): 67~74.

# 基于性能的预应力钢结构设计研究

■ 葛家琪 张国军 王树 张玲 「结构」

**摘要:** 大跨度钢结构通过引入预应力,增加结构刚度,创造出新的预应力钢结构体系,结构受力更为合理,显著节省用钢量。预应力钢结构比传统钢结构几何非线性更明显,且结构力学性能与预应力度的大小关系密切。本文针对几种不同的预应力钢结构体系进行力学性能分析研究。从体系到构件的破坏形态均可归结为大变形失稳,其安全控制目标包括承载力和变形能力两个方面。从大跨度预应力钢结构工程设计实践出发并结合试验研究,通过考虑几何非线性、材料非线性的计算分析,得到体系、构件、节点的荷载-应力、荷载-应变、荷载-位移全过程曲线,对基于延性的承载力与变形能力进行分析研究,提出基于性能的预应力钢结构设计方法。

**关键词:** 大跨度钢结构;几何非线性;弹塑性;变形能力;稳定承载力

## 0 引言

与其他形式的钢结构一样,大跨度钢结构设计主要解决结构体系设计、构件设计及连接节点设计等方面的内容。与其他形式钢结构不一样的是,大跨度钢结构体系几何与材料非线性影响突出,延性性能成为其体系、构件、节点的安全控制因素。在工程实践中,设计技术人员迫切需要设计规范提供明确的大跨度钢结构计算分析理论与设计方法、与现代计算技术相应的工程实用计算软件以及明确的钢结构承载力与变形能力安全控制指标。

美国、英国和中国香港等国家和地区的钢结构设计规范主要针对构件和钢框架结构设计作出

规定<sup>[1-4]</sup>。我国现行钢结构及相关设计规范(程)在结构体系、构件及连接节点等三个层次的设计规定内容如表1所示。

预应力钢结构体系是现代结构中的新体系和新技术,通过科学合理地设置高强度预应力构件,可以创造出新颖优美的现代结构体系,建设富有强烈时代美感的标志性建筑。典型的预应力钢结构体系有斜拉结构、悬索结构、张弦结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构以及其他整体张拉索膜结构等。一般情况下,预应力钢结构体系可节约钢材10%~30%,整体张拉结构节材甚至可达60%以上,且跨度越大,节材效果越明显。预应力钢结构具有很好的结构安全性能和经济效益,是一种具有广阔应用前景的绿色节材节能型结构体系。

从上述规范规程可知,我国现行钢结构及相关设计规范(程)对体系、构件及连接节点三个层次设计的现状如下:

作者简介:葛家琪,男,研究员,1987年毕业于同济大学建筑学专业,现就职于中航规划工程技术研究院。

表1 钢结构设计规范体系在钢结构体系、构件及连接节点方面的设计规定

钢结构设计规范、规程	体系	构件	连接节点
GB50017-2003 钢结构设计规范	基本没有论述	完整	“连接设计”较完整 节点设计严重不足
JGJ99-98高层民用建筑钢结构 技术规程	简要规定	较完整	类型单一较完整
TGJ7-2010 空间网格结构技术规程	已确定	较完整	较完整
CECS230:2008高层建筑钢-混 凝土混合结构设计规程	简要规定	较完整	较完整
CECS212:2006 预应力钢结构技术规程	较完整	较完整	构造设计较完整 计算设计未规定
JGJ138-2001型钢混凝土组合 结构技术规程	已确定	较完整	构造设计较完整 计算设计未规定
CECS 159:2004矩形钢管混 凝土结构技术规程	已确定	较完整	构造设计较完整 计算设计未规定
CECS102:2002门式钢架轻型 房屋结构技术规程	已确定	较完整	较完整

(1) 在计算理论与设计方法方面, 现行钢结构及相关设计规范(程)对计算理论与方法的规定, 相当程度是基于手算或平面简化计算技术, 对于空间受力的大跨度钢结构体系缺乏适应性。此外现行钢结构及相关设计规范(程)对连接设计有计算公式, 对节点设计缺乏明确的计算理论和方法。

(2) 在计算手段方面, 现代计算机应用技术已能够解决钢结构体系、构件、节点的有关线性与非线性、静力与动力的计算分析, 国内版SAP84、3D3S软件及一些国外编程但已本土化的软件SAP2000、MIDAS、ANSYS等已为设计者提供工程实际可行的计算手段。现行钢结构及相关设计规范(程)基于手算和平面计算的方法规定, 给广大工程设计人员带来方便的同时, 有时限制了先进计算技术的推广应用。

(3) 在性能控制指标方面, 完整的钢结构设计应包括体系、构件、连接节点的承载力(包括稳定承载力)、变形能力等性能控制指标。现行钢结构及相关设计规范对钢结构安全控制的性能指标规定不全面, 主要体现在以下几个方面: ①结构体系设计着重于弹性变形控制, 对于结构体系稳定承载力性能, 《钢结构设计规范》、

《高层民用建筑钢结构技术规程》等用增大构件计算长度以增加其稳定承载力来实现, 《空间网格结构技术规程》仅对空间网壳结构体系的稳定承载力系数作出规定; ②连接节点设计主要是基于经验和试验的指导性构造设计。

总之现行钢结构及相关设计规范(程)对工程设计人员来说简单实用, 但对于大跨度钢结构体系和节点设计缺乏明确的工程实用的计算理论和方法, 未能很好地适应现代计算技术的发展, 且尚未建立系统明确、工程实用的基于力学计算的安全设计控制指标。

## 1 钢结构基于性能的设计概述

### 1.1 性能设计

从结构设计方法的演变和发展看, 20世纪90年代由美国学者提出的基于性能的结构设计理论代表了未来结构设计的发展方向。性能化设计(performance-based design)是一种运用工程方法达到既定结构性能目标的设计方法。基于性能的设计理论中, 通过高效的结构高等分析计算, 预测结构在各种条件下, 尤其是不同荷载作用下的结构响应, 从而评估结构性能是否满足业主对结构性能的要求和规范规定的性能指标。

### 1.2 结构几何与材料双非线性计算分析

由于高强度材料与新技术的应用, 钢结构建筑的重量越来越轻, 跨度越来越大。结构在达到屈服荷载之前变形很大, 表现出相当程度的几何非线性性质。传统的基于平面和线性假定的分析方法已不适用, 必须考虑几何非线性进行承载力分析。在很多情况下, 当结构渐渐接近其所能承担的极限荷载时, 钢结构进入屈服阶段, 材料的性质也渐渐地从线弹性向塑性转化, 表现出材料非线性的行为。因此设计时要考虑几何非线性和材料非线性相互耦合的双重非线性, 借用有限元

方法对结构进行大位移弹塑性全过程分析以确定结构在极限荷载作用下的工作状态。

目前, ANSYS等通用有限元计算软件已在国内外广泛应用, 为工程设计人员提供了切实可行的基于结构几何与构件材料双非线性的全过程计算分析方法和手段。

### 1.3 基于延性性能的设计思路

延性的通常定义是指结构、构件或构件某个截面从屈服开始到达极限荷载或到达以后荷载还没有明显下降期间的变形能力。延性能力好的结构或构件的后期变形能力大, 在达到屈服或承载力极限状态后仍能吸收一定的加载能量, 从而在其破坏前有明显变形或其他预兆(即发生延性破坏)。对延性性能进行控制是钢结构设计的基本原则, 根据延性的定义可以清晰地理出大跨度钢结构延性性能设计的基本思路:

(1) 延性设计的关键性能参数包括屈服荷载、破坏荷载、屈服变形( $D_y$ )和破坏变形( $D_u$ )。其中, 屈服荷载为结构或构件加载-结构响应全过程曲线出现转折时的荷载; 破坏荷载为结构或构件的加载-结构响应全过程曲线中最大荷载。由于结构设计时一般不考虑材料强度屈服后的强化阶段和颈缩阶段, 因此, 结构设计计算的加载-结构响应全过程曲线在荷载最高点即停止, 因此最大荷载即为破坏荷载。屈服变形为屈服荷载对应结构或构件变形; 破坏变形为破坏荷载对应的结构或构件变形。

(2) 延性设计的关键首先是如何计算得到上述延性性能参数, 并分析确定合理的屈服荷载值及屈服变形值指标, 以保证结构在正常设计荷载作用下安全使用。

(3) 延性设计的关键之二是分析确定合理的承载力比例系数(对于材料即为强屈比, 对于构件即为应力比; 对于体系即为稳定承载力系数, 对于节点即为设计承载力), 以保证在超正常设计荷载作用下, 结构破坏前有一定的承载力储备。

(4) 延性设计的关键之三是分析确定合理的变形比例系数(对于材料即为延伸率, 对于体系和构件即为变形延性 $D_u/D_y$ 、相对变形 $D_y/L$ 、 $D_u/L$ (其中 $L$ 为跨度), 对于节点即为平面外屈服变形能力), 以保证在超正常设计荷载作用下, 结构破坏前有足够的变形能力储备。

钢结构基于延性的性能设计就是通过考虑体系几何非线性、材料非线性的计算分析, 得到

荷载-应力、荷载-应变、荷载-位移全的过程曲线, 进而得到钢结构屈服荷载、破坏荷载、屈服变形和破坏变形等性能参数, 并建立相应的安全设计性能控制指标。

## 2 钢材的强屈比与延伸率

钢材是一种理想的弹塑性材料, 在屈服点之前的性质接近理想的弹性体, 屈服点应变 $\epsilon_y$ 约为0.2%; 屈服点之后的流幅阶段又接近理想的塑性体, 流幅的范围 $\epsilon_s$ 约为0.15%~2.5%; 常用钢材(低碳钢)的最大塑性应变 $\epsilon_u$ 约为24%, 差不多等于弹性屈服应变的200倍; 说明钢材在破坏之前将出现很大的变形, 足以满足结构或构件的塑性变形能力要求。但实际上钢结构几乎不可能发生纯塑性破坏, 因为当结构出现相当大的变形后早已丧失使用性能。理论分析和试验研究都表明<sup>[8]</sup>, 用于塑性设计的钢材必须具有材料强度强化性能, 并且不能过低。一些涉及塑性设计的规范, 或是对钢材的强屈比作出最低限值的规定, 或是对可以采用的钢号做出具体规定, 例如, 国际标准组织的《钢结构材料与设计》1985年草案规定钢材强屈比不小于1.2。欧洲规范EC3-ENV-1993除这条规定外, 还要求材料拉断时的伸长率不低于15%, 并且对应于抗拉强度的应变不小于20倍屈服应变。美国AISC规范允许用于塑性设计的钢材屈服点最高为 $448\text{N/mm}^2$ (A572), 其强屈比不低于1.23。我国现行规范GB50017-2003钢结构设计规范<sup>[3]</sup>对钢材延性未作具体规定, GB50011-2010《建筑抗震设计规范》对钢结构的钢材作出下列规定: 钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不大于0.85(相当于强屈比1.18); 钢材具有明显的屈服台阶, 且伸长率不应小于20%。

从上述各类规范标准的规定可知钢材延性能力包括强屈比和延伸率两方面要求。钢材弹塑性大变形破坏状态与屈服状态的性能设计指标为: 强度方面即强屈比应大于1.20, 变形能力方面即延伸率应大于20%。

## 3 钢构件性能设计

### 3.1 钢构件承载力性能

我国现行规范GB50017-2003钢结构设计规范<sup>[3]</sup>对钢构件局部稳定主要是通过经验式的指导

性构造设计来实现,对受弯、受压构件是通过构件稳定系数加大其安全度实现构件承载力性能设计,并有完整的计算公式,此处不赘述。

### 3.2 钢构件变形性能

我国现行GB50017-2003<sup>[3]</sup>钢结构设计规范对构件弹性变形性能做了如下规定:①为了不影响结构或构件的正常使用和观感,设计时应应对结构或构件的变形(挠度或侧移)规定相应的限值。一般情况下,结构或构件变形的容许值见本规范附录A的规定。当有实践经验或有特殊要求时,可根据不影响正常使用和观感的原则对附录A的规定进行适当调整。②计算结构或构件的变形时,可不考虑螺栓(或铆钉)孔引起的截面削弱。③为改善外观和使用条件,可将横向受力构件预先起拱,起拱大小应视实际需要而定,一般为恒载标准值与1/2活载标准值之和所产生的挠度值,同时对活荷载作用下变形限值作了规定。尽管看起来已很具体,但工程设计中依然面临如下难题:

(1)实际工程中,大跨度钢结构弹性位移控制值从 $L/250 \sim L/400$ 均可行,设计者不清楚在正常使用荷载作用下的弹性位移值到底取多少合适。

(2)结构预起拱是在建筑屋面荷载、装修荷载、使用活荷载加载之前进行的,因此预起拱并不能减少上述荷载作用下结构发生的绝对变形值。而建筑结构正常使用性能往往是上述荷载产生的绝对变形值起控制作用,因此,通过预起拱减小构件相对初始几何形态的变形值,解决正常使用性能要求(防裂、防水等)并无科学依据。

(3)规范允许通过结构初始几何形态预起拱解决变形限值问题,起拱幅度达(1.0静+0.5活)荷载产生的变形。按此幅度预起拱,几乎所有刚度不足的结构均可通过预起拱来实现弹性变形控制指标。那么在钢构件强度安全满足情况下,为什么还要控制结构正常使用荷载作用下的弹性位移?通过预应力措施产生反拱解决位移控制指标是否还有必要?

(4)现行钢结构及相关设计规范(程)对钢构件变形性能设计仅局限于弹性小变形阶段,对弹塑性大变形性能设计没有规定。在实现弹性小变形能力设计目标条件下,能否保证大跨度结构体系弹塑性大变形能力安全?

要解决这些问题,亟待建立钢构件基于双非线性分析的弹性小变形与弹塑性大变形能力设计控制指标。

## 4 钢结构体系性能设计

基于性能的设计方法首先在高层建筑结构抗震设计中得到应用,高层建筑结构抗震延性能力设计目标是结构在某一设定地震地面运动(如在给定年限内超越概率63%、10%和2%~3%的小震、中震和大震)作用下建筑的预期变形能力水准。建筑物的变形能力水准包括结构、非结构和建筑附属设施的性能水准的各种组合。当前,“超限”高层建筑结构的延性性能设计技术已广为设计人员掌握,本文不再赘述。

对于大跨度钢结构体系弹性小变形能力,我国相关设计规范(程)的规定基本与钢构件相同,实际工程设计也就面临同样的难题(见本文节3.2)。对于大跨度钢结构体系弹塑性阶段的设计,我国相关设计规范(程)中只有JGJ7-2010《空间网格结构技术规程》仅对空间网壳结构的稳定承载力有规定。对于大跨度钢结构弹塑性大变形性能设计方面,我国相关设计规范(程)没有提出任何规定和要求。为保证大跨度钢结构安全,工程设计界迫切需要对弹塑性稳定承载力、大变形性能进行深入系统研究,并提出明确的稳定承载力、大变形能力设计控制指标。

### 4.1 稳定承载力

国内以哈尔滨工业大学沈世钊院士为首的课题组对网壳结构进行了大量在几何非线性条件下的荷载-位移全过程屈曲分析,研究成果认为“将几何非线性条件下网壳结构线弹性全过程分析得到的第一个临界点处的荷载值,可作为网壳的稳定承载力;此稳定承载力应为网壳设计荷载标准值的5倍,结构方安全”<sup>[11]</sup>。作者在河南艺术中心<sup>[6-7]</sup>、北京金融街F7/9、迁安文化会展中心<sup>[8]</sup>等工程的设计研究中发现,大跨度钢结构体系仅考虑几何非线性的稳定承载力远大于设计荷载标准值的4.2倍,但同时考虑几何非线性和材料非线性时的稳定承载力却急剧下降,仅为设计荷载标准值的2~3倍。由于双非线性分析模型更符合结构的实际工作状态,因此,仅用几何非线性分析获得的结构线弹性极限荷载作为结构体系的稳定承载力是不科学且不安全的,必须在双非线性分析基础上对钢结构的稳定承载力进行设计。

范峰等<sup>[9-10]</sup>对球面网壳的弹塑性稳定性能(双非线性性能)开展研究,提出了代表材料非线性影响的“塑性折减系数”,对原有线弹性“安全

系数”进行折减。JGJ7-2010《空间网格结构技术规程》<sup>[5]</sup>规定“网壳稳定容许承载力(荷载取标准值)应等于网壳稳定极限承载力除以安全系数K。当按弹塑性全过程分析时,安全系数K可取为2.0;当按弹性全过程分析,且为单层球面网壳、柱面网壳和椭圆抛物面网壳时,安全系数K可取为4.2”。

作者结合2008奥运羽毛球馆、河南艺术中心、贵阳奥体中心等大量工程实践,对平面桁架体系、空间桁架体系、平面张弦梁体系、空间张弦梁体系、预应力管桁架体系、塔柱-拉索管桁架体系、弦支穹顶体系、索穹顶体系等十几种不同大跨度钢结构体系进行分析研究<sup>[6-8,12-14]</sup>,在此基础上提出大跨度钢结构稳定承载力设计与控制指标:

(1) 所有大跨度钢结构体系均呈现大变形失稳破坏形态,应进行基于双非线性的荷载-位移全过程分析,得到结构体系屈服荷载系数、破坏荷载系数等关键性能参数。其中:结构体系屈服荷载系数为结构体系屈服荷载与设计荷载标准值之比;破坏荷载系数为结构体系破坏荷载与设计荷载标准值之比。

(2) 对比分析体系屈服荷载系数、

1/1.2~1/1.4破坏荷载系数、L/40~L/50大变形值对应的荷载系数,取三者中小值作为体系稳定承载力系数。

(3) 采用几何非线性分析的体系稳定承载力应大于设计荷载标准值的4.5倍,且同时要求采用双非线性分析的体系稳定承载力应大于设计荷载标准值的2.4倍。

#### 4.2 变形能力

针对结构设计人员在大跨度钢结构构件与体系变形能力设计方面面临的困惑(详见文章3.2节),作者在东北师范大学体育馆、贵阳奥体中心体育场等工程设计实践中,研究了结构预起拱、加大用钢量、施加预应力等方法对结构体系两阶段(弹性、弹塑性)稳定承载力与变形能力的影响(见表2)。

同时结合大量工程实践和分析研究,得出如下结论<sup>[12,14]</sup>:①对于刚度大的大跨度钢结构,在构件强度满足要求后,通过结构预起拱、施加预应力措施均可实现现行规范<sup>[3]</sup>规定的结构弹性小变形性能指标要求。②预起拱对结构体系稳定承载力有一定影响,不同结构体系影响程度不等。但预起拱对不同大跨度钢结构体系的弹塑性大变

表2 平面钢管桁架延性性能计算结果

指标		预起拱计算结果				施加预应力计算结果			
		2.4	2.7	3	3.3	2.4	2.7	3	3.3
结构厚度/m		2.4	2.7	3	3.3	2.4	2.7	3	3.3
矢跨比		1/29	1/26	1/23	1/21	1/29	1/26	1/23	1/21
起拱值/m (预应力值/KN)		0.144	0.107	0.059	0.051	(700)	(500)	(200)	(100)
上下弦杆 尺寸/ mm	上弦圆管	Φ168×5	Φ152×5	Φ146×5	Φ40×4.5	Φ168×5	Φ152×5	Φ146×5	Φ140×4.5
	下弦圆管	Φ103×12	Φ194×12	Φ194×12	Φ194×10	Φ203×12	Φ194×12	Φ194×12	Φ194×10
型钢用量/t		10.04	8.93	8.78	7.47	10.04	8.93	8.78	7.47
正常使用极限 状态	弹性变形值/ m	0.169	0.174	0.172	0.172	0.173	0.171	0.174	0.175
	挠跨比	1/414	1/403	1/408	1/407	1/405	1/408	1/401	1/400
双非线性 稳定极限 状态	大变形值/m	1.806	1.294	0.863	0.707	0.422	0.403	0.618	0.866
	挠跨比	1/39	1/54	1/81	1/99	1/166	1/174	1/113	1/81
	稳定承载力 系数	2.47	2.53	2.62	2.83	4.48	4.59	3.19	3.03

形值降低幅度均很小, 预起拱不能提高大跨度钢结构体系弹塑性大变形能力。工程设计时, 按现行规范方法用预起拱方法解决弹性小变形能力要求, 但不能保证结构体系弹塑性变形能力。③预应力对除大悬挑结构体系之外的大跨度钢结构体系的稳定承载力均有较大幅度的提高, 同时可大幅减小大跨度钢结构体系的弹塑性大变形值。预应力是同时提高大跨度钢结构体系弹性与弹塑性变形能力的有效且可靠的措施。大跨度钢结构体系采用预应力时, 结构体系破坏变形值下降幅度较大, 当预应力度过大时其荷载-位移全过程曲线有时出现无明显屈服台阶的“脆性”破坏特征, 因此设计应对预应力索系布置及预应力度进行全程优化, 同时应适当增加预应力构件的安全系数, 确保在结构体系大变形情况下, 预应力构件仍处于弹性阶段, 避免脆性破坏的出现。④刚度偏小的大跨度钢结构在仅满足稳定承载力指标条件下, 结构体系弹塑性极限变形值过大, 有的工程结构体系最大弹塑性变形值大于 $L/30$ , 甚至达到 $L/15$ 。此时结构体系实际已处于大变形倒塌状态。因此, 大跨度钢结构体系必须同时满足稳定承载力与大变形能力双重性能指标要求。作者在大量工程实践与分析研究基础上, 提出了大跨度钢结构体系变形能力设计方法与控制指标:

(1) 基于弹性计算分析时, 结构体系最大弹性变形可按现行规范<sup>[3]</sup>进行设计。

(2) 所有大跨度钢结构均应进行基于双非线性的荷载-位移全过程分析, 得到结构体系屈服变形值、破坏变形值等关键性能参数, 体系弹塑性大变形能力指标即破坏变形值与体系屈服变形值的比值应大于 $1.2\sim 1.4$ , 刚度偏大时取 $1.2$ , 刚度偏小时取 $1.4$ 。

(3) 结构体系在稳定承载力对应的荷载作用下, 弹塑性大变形值应小于结构跨度的 $1/40\sim 1/50$ 。

## 5 钢节点性能设计

钢结构节点设计是钢结构安全设计最重要因素之一。当前我国钢结构设计质量控制最薄弱环节之一就是钢节点, 钢节点工程事故发生率也较高。现行钢结构及相关设计规范(规程), 对于钢节点的连接设计(焊接、螺栓)有计算公式, 对于节点整体安全设计, 主要是依靠经验和

试验成果的指导性构造设计和少量的经验计算公式, 钢节点整体安全计算设计内容严重不足, 并且缺乏明确的计算理论和方法。受到资金和工期限制, 钢结构节点试验仅能在少数重点工程中得以实施。实际工程设计中只能进行有限元计算分析, 但现行钢结构及相关设计规范(规程)又缺乏节点安全设计准则(破坏准则)的规定, 设计者往往错误地将节点局部区域材料达到屈服点作为钢节点安全设计标准。

为保证钢结构整体安全, 同样亟需建立钢节点基于双非线性分析的弹性小变形与弹塑性大变形性能设计控制指标。

作者在工程设计实践中, 进行了大量的钢节点计算分析研究, 并对河南艺术中心与贵阳奥体中心体育场大直径钢管空间相贯节点、贵阳奥体中心体育场索-钢转换节点进行足尺模型试验与研究<sup>[15-18]</sup>(见图1)。将节点作为“微型体系”采用与体系设计过程相同的基于双非线性的加载-力学响应全过程分析(见图2: 图2a、2c中, 水平轴为测点主应变, 竖轴为实验加载级数, 14条曲线分别为相贯区域最先进入屈服的14个应变测点的曲线, 图2a为试验结果, 图2c为理论计算结果; 图2b、2d分别为主弦杆径向位移最大点的试验曲线和理论计算曲线)<sup>[15]</sup>, 并与节点试验结果进行对比分析。计算分析与试验研究发现: 节点在加载历程中的“加载-力学响应”呈现出线弹性阶段、屈服阶段、弹塑性阶段的全过程力学特征, 该力学特征为钢节点延性性能设计明确了工作方向。

### 5.1 节点设计承载力

节点的荷载-应变全过程的计算分析曲线及试验实测曲线表明, 节点在绝大部分区域材料应变达到屈服应变前, 即出现非线性增长, 说明节点在钢管构件应力较低时节点局部区域就进入塑性重分布状态; 另一方面, 从节点局部出现塑性到塑性区充分发展, 荷载增幅可达到1倍以上。因此, 钢结构节点承载力不应采用材料的屈服应力作为其安全控制指标。节点设计承载力取其弹性极限荷载过于保守。因此, 本文将节点屈服荷载定义为节点塑性区充分发展后, 荷载-应变位移全过程曲线出现明显拐点时对应的荷载值, 而不是节点局部出现塑性时的荷载。节点屈服荷载对应的节点应变和位移为节点屈服应变和屈服位移。节点屈服荷载可以作为节点设计承载力, 但节点从弹性极限状态到屈服状态是一个流塑幅度很大

的塑性发展过程，很难确定屈服点及对应的屈服荷载值。而节点破坏极限状态对应的节点破坏荷载接近于定值，因此，可行的节点设计承载力确定方法是以节点破坏荷载为基准，留有适度的安全系数作为节点设计承载力。

依据工程实践大量计算分析与试验研究成果，提出大跨度钢结构基于双非线性计算分析的节点承载力设计方法与控制指标：

(1) 根据荷载—应变(位移)全过程分析可分别得节点屈服应变及屈服位移对应的荷载值，取其较小者作为节点设计承载力。

(2) 当节点全过程分析曲线中无明显屈服点时，取节点破坏荷载的 $1/1.2\sim 1/1.4$ 作为节点设计承载力。

(3) 当节点破坏位移大于 $D/100$ ( $D$ 为主管管径)时，取 $D/100$ 对应加载值作为节点设计承载力。

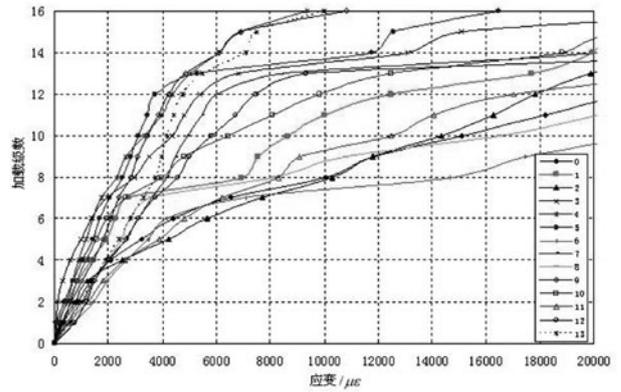


(a) 节点试验加载整体照片

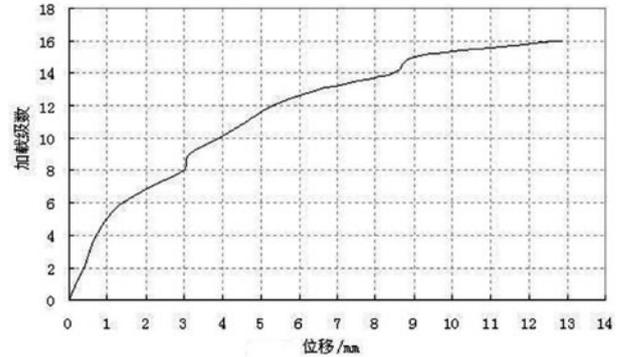


(b) 节点区受压屈曲严重

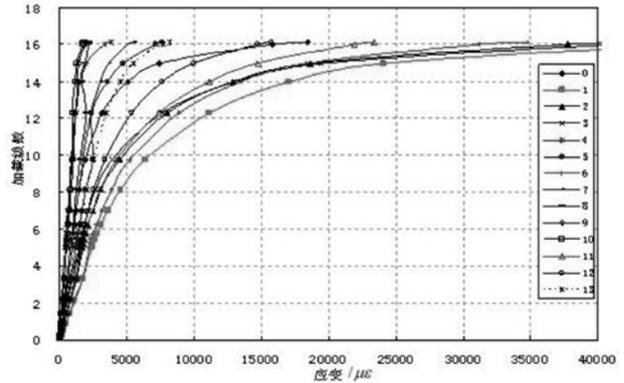
图1 贵阳奥体中心节点试验加载照片



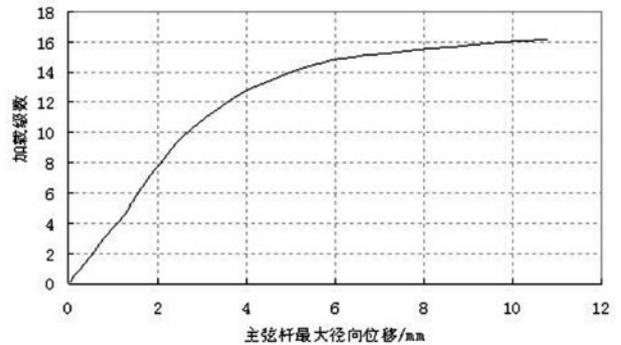
(a) 不同测点的试验实测荷载—等效应变关系曲线



(b) 主弦杆位移最大点实测荷载—位移关系曲线



(c) 不同测点的荷载—等效应变关系有限元分析曲线



(d) 主弦杆有限元计算荷载—位移关系曲线

图2 贵阳奥体中心节点有限元结果曲线

## 5.2 节点变形能力

节点的荷载-应变全过程计算分析曲线及试验实测曲线还表明,节点的弹性极限应变约为 $2500\mu\varepsilon$ ,大于材料弹性极限应变 $1900\mu\varepsilon$ ;节点屈服应变约为 $6000\mu\varepsilon$ ,也远大于材料的屈服应变 $3100\mu\varepsilon$ 。因此,节点的应变能力不能采用材料的屈服应变作为其安全控制指标。荷载-位移全过程曲线还显示,节点从弹性极限应变(位移)到屈服极限应变(位移),再到破坏极限应变(位移)均有很好的塑性发展过程,但节点达到破坏极限状态时,径向位移最大点如下:试验实测为 $12.87\text{mm}$ , (即 $D/27$ ,  $D$ 为主弦杆管径);有限元分析为 $10.79\text{mm}$  (即 $D/32$ )。针对实际工程,出现这样大的径向变形,主弦杆已经破坏。因此,确定钢节点设计承载力时,必须同时对破坏荷载作用下节点大变形值进行控制。

由于钢结构节点类型多种多样,本文节点研究主要针对实际工程中应用越来越多的相贯节点。依据工程实践大量计算分析与试验研究成果,提出大跨度钢结构节点基于双非线性分析的变形能力设计方法与控制指标:

(1) 根据荷载-应变、荷载-位移全过程分析,得到节点屈服应变值、屈服变形值、节点破坏变形值等延性性能参数。

(2) 节点破坏变形值与屈服变形值的比例系数应大于1.2。

(3) 节点在设计承载力对应的荷载作用下变形值应小于 $D/100$ ;节点在破坏荷载作用下弹塑性大变形值应小于 $D/4\sim D/50$ 。

## 6 结语

(1) 随着计算理论、计算手段和设计方法的发展,对钢结构进行基于性能的设计是可行的,而且代表了现代设计技术的发展方向。

(2) 大跨度钢结构应当从体系、构件、节点等几个方面均应进行基于性能的设计。首先通过几何非线性、材料非线性的分析,得到体系、构件、节点的荷载-应力、荷载-应变、荷载-位移全过程曲线,进而得到关键延性性能参数,建立相应的性能控制指标,对构件、节点、体系的安全进行全面的性能设计。

(3) 广大科研人员和工程技术人员应共同努力,尽快使性能化设计的思想和方法体现到我国现行各类钢结构规范(程)体系中,确保钢结构工程安

全,进一步促进我国钢结构行业的科技创新与发展。

## 参考文献

- [1] ANSI-AISC-360-05, Specification for Structural Steel Buildings[J]. Chicago, IL.: American Institute of Steel Construction(AISC), 2005.
- [2] BS5950, Structure use of steelwork in buildings[S]. London: British Standards Institution: 1990.
- [3] GB 50017-2003 钢结构设计规范, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. [S]. GB 50017-2003 Code of design of steel structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [4] 彭达材, 关建祺, 陈绍礼. 香港2005 钢结构规范不需要假定有效长度的二阶分析和设计法[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(5): 57-62. (Pang Dacai, Guan Jianqi, Chen Shaoli. Hong Kong code of practice for the structural use of steel 2005: second-order analysis and design method with effective-length-free Assumption[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(5): 57-62. (in Chinese))
- [5] JGJ7-2010 空间网格结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. JGJ7-2010 Technical specification for space frame structures [S].
- [6] 葛家琪, 王树, 梁海彤, 等. 河南艺术中心大剧院钢屋盖基于延性的性能化设计研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(12): 1-6 (Ge Jiaqi, Wang Shu, Liang Haitong, et al. Ductility performance design and research of the theatre steel roof of Henan Provincial Art Centre[J]. Building Structure, 2008, 38(12): 1-6. (in Chinese)).
- [7] 葛家琪, 王树, 杨霄, 等. 河南艺术中心艺术墙共享大厅结构体系稳定性分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(12): 11-13 (Ge Jiaqi, Wang Shu, Yang xiao, et al. Performance analysis and design research of the structural overall stability of the art wall and shared hall of Henan Provincial Art Centre[J]. Building Structure, 2008, 38(12): 11-13. (in Chinese)).
- [8] 王树, 葛家琪, 李健等. 迁安文化会展中心平面张弦梁结构稳定性研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(10): 79-84 (Wang Shu, Ge Jiaqi, Li Jian, et al. Analysis and research on the stability of plane beam string structure [J]. Building Structure, 2009, 39(10): 79-84 (in Chinese)).

以下从略

# 探索经济新常态背景下的临空经济区规划

## ——以南通滨海园区临空经济区规划为例

■ 张媛 董磊 郭璟坤 「规划」

**摘要:** 在经济新常态下,我国加快转变经济发展方式,寻求新经济增长点。而正值全球进入航空时代,国内各地掀起临空经济区规划建设浪潮。临空经济区对于促进经济快速增长、升级产业结构、推动城镇化进程、扩大对外开放具有极为重要的作用。新常态下,应实施差异化的临空经济区规划策略,注重产业升级和区域协调。本文以南通滨海园区临空经济区为例,探讨临空经济区建设对于经济发展的重要促进作用,以及经济新常态背景下临空经济区规划要点。

**关键词:** 经济新常态;临空经济区;升级转型;南通滨海园区临空经济区

### 1 经济新常态概述

当前我国进入“经济增长中高速、产业结构不断优化、经济增长动力转化”的新常态,新常态有利于中国经济加快转变发展方式,跨越“中等收入陷阱”,继续保持较长时期的中高速增长。

新常态下,稳定增长仍需内需拉动,个性化、多样化消费渐成主流;投资向基础设施互联互通、新技术、新产品、新业态、新商业模式等领域转移;经济增长将更多地依靠人力资本质量和技术进步;市场竞争逐步转向以质量型、差异化为主的竞争;制度创新、产业升级、区域经济一体化将成为国家未来经济发展的主基调。

然而,在经济新常态背景下,我国经济面临产能过剩、生产要素成本增加、企业创新能力不足、财政金融风险大等挑战,国家在资本市场、科技创新、体制改革、促进消费等方面进行调整和努力,提出了“一带一路”、长江经济带和京津冀协同发展三大国家发展战略。

实施“一带一路”战略,旨在打破原有点

状、块状的区域发展模式,从海陆至空间,从纵向到横向,贯通我国东中西部和主要沿海港口城市,进而连接起亚太和欧洲两大经济圈,促进贸易服务往来,实现沿线国家和地区全方位、立体化、网络状的“大概念联通”。其核心在于古今传承、内外开放、海陆统筹、东西互济、中外共赢。通路、通航和通商是“一带一路”战略发力点,在通路、通航的基础上通商,可以解决中国过剩产能的市场、资源的获取、战略纵深的开拓和国家安全的强化等问题。

长江经济带总体布局以长江三角洲、长江中游和成渝三大跨区域城市群为主体,以黔中和滇中两大区域性城市群为补充。其中长江三角洲以上海为龙头,辅以南京、杭州、合肥都市区的国际化水平提升。长江经济带成为再造我国内需市场的关键布局。中国经济进入高速增长向中高速增长换挡期,寻找新的经济增长点、挖掘新需求和新市场成为重点。长江经济带作为国家战略的启动,将成为带动沿岸经济,再造我国内需市场的关键布局,对我国稳增长和调结构都具有战略意义。

京津冀协同发展有利于破解首都发展长期积累的深层次矛盾和问题,优化提升首都核心功

作者简介:张媛,女,助理工程师,2014年毕业于北京大学金融信息工程专业,现就职于中航规划综合规划设计研究院。

能,走出一条中国特色解决“大城市病”的路子;有利于完善城市群形态,优化生产力布局 and 空间结构,打造具有较强竞争力的世界级城市群;有利于引领经济发展新常态,全面对接“一带一路”等重大国家战略,增强对环渤海地区和北方腹地的辐射带动能力,为全国转型发展和全方位对外开放作出更大贡献。

## 2 临空经济区发展现状

在全球化和信息化不断发展的现代社会,国际经济正在创造一个以航空、数字、全球和时间价值为基础的全新竞争体系,航空运输成为促进全球经济一体化的重要力量。以机场为依托的临空经济在区域经济格局中的地位日益突出,已经逐步成为国家和地区经济增长的核心动力之一。国际机场协会(ACI)的研究调查数据表明,每100万航空旅客运输量将产生1.3亿美元的经济收益和增加2500个就业岗位,临空经济区被喻为“国家和地区经济增长的引擎”。

临空经济作为新兴经济形态得到世界各国高度重视,在全球范围已掀起建设临空经济区的浪潮,一些国际大型枢纽机场航空城建设已走在前列,如荷兰阿姆斯特丹的史基浦机场、法国的戴高乐机场、美国的孟菲斯机场等均已形成颇具规模的临空经济区或航空城。随着我国经济的高速增长,对临空经济发展的需求也应运而生,各地政府十分重视临空经济的发展,围绕大型机场积极制定临空经济区的发展规划。截至2014年底,全国有62个城市依托54个机场规划或建设了63个临空经济区,临空经济发展取得一定成效。

为了支持临空经济发展,我国已经相继出台了多项政策措施以促进其发展。早在2012年我国就出台了《关于促进民航业发展的若干意见》,提出发展航空经济、建设若干示范区。2013年国务院正式批复了《郑州航空港经济综合实验区发展规划(2013—2025年)》,成为我国首个上升为国家战略的航空港经济发展先行区。随着临空经济在我国经济社会发展中所发挥的带动和影响作用不断提升,2015年国家发改委和民航局又联合发布了《关于临空经济示范区建设发展的指导意见》,明确了临空经济区发展的总体要求和建设任务等内容,将推动临空经济区实现健康有序发展。

目前,我国临空经济区多以大型枢纽机场为

依托进行发展,但是干支线机场的设立是国家政府行为,而通用航空作为民用航空的重要组成部分,地方政府参与度更高,发展以通用航空为主线的临空经济,可以成为地方经济增长的新引擎。

## 3 临空经济区建设对于经济新常态意义重大

### 3.1 临空经济区建设是当地转方式、调结构、促改革的必然选择

我国正处于经济社会转型发展的关键时期,依靠低附加值、低科技含量的传统发展方式亟需改变,产业结构调整、加快转型升级要求日益紧迫,市场配置资源的决定性作用有待充分发挥,全面深化改革的任务艰巨繁重。依靠机场资源的临空特性,实现更多低能耗、高附加值的产业选择,全面促进高端制造与现代服务业的有效发展,带动临空经济区与周边区域的产业统筹和结构调整。未来临空经济将在我国总体社会发展中占据重要位置,成为又一重要社会经济成长引擎。

### 3.2 临空经济区建设是当地扩大对外开放,融入全球产业链的重要路径

临空产业具有显著的国际化特征,特别注重国际交流与合作。能够成为区域集聚全球高端要素的重要载体,并推动国际金融、航空物流、会展贸易、总部经济等外向型产业的发展。聚集全球航空相关、科研、金融等高端人才,汇集国际投资集团、跨国公司等国际资本投资发展,有助于当地参与世界产业链分工和全球化发展,提升参与世界城市竞争地位,更好地深化改革开放,是一种全新发展的产业模式。

### 3.3 临空经济区建设有助于推动新型城镇化进程

临空经济区是一个节点,其发达的交通线是轴。发达的交通线加强了节点与外界的联系,改善了沿线地区的区位条件,刺激了沿线地区的经济发展。临空经济区一般在距离城市15~25km的远郊,一直以来都是城市经济发展的空白区域,临空经济区的建立和发展,使该地区拥有完善的基础设施条件和便利的交通、通讯条件,加强了机场区域和经济腹地的联系。加之该地区拥有大量廉价土地,能够较好地进行空间结构规划,促进了城市空间的扩展,有利于缓解城市中心区的交通和空间压力,同时也带动交通经济带和临空地区的发展。临空经济区的发展必然加快城市空间向郊区的扩张,为新型城镇化进程创造了条件。

## 4 南通滨海园区临空经济区规划

### 4.1 发展定位

#### (1) 华东临空经济开放创新典范

发挥地处华东和长三角的区位优势，面向国际、国内两大市场，利用上海自贸区开放型经济的溢出效益，以创新的发展理念、创新的体制机制和创新的科技应用，推进南通滨海园区临空经济区在重点领域和关键环节的改革创新，在管理体制和运行机制方面先行先试，提高临空经济区对外开放水平，快速融入世界经济格局和国际贸易分工体系，成为开放型经济创新发展典范。

#### (2) 长三角北翼通航产业集聚区

紧抓国家通航产业大发展的战略机遇，面向长三角地区高端消费群体，围绕规划建设的通航机场，形成以通用航空运营和制造业为主要发展方向和特征，以保障服务、水上飞行、航空培训、商务配套和旅游休闲等产业协同发展的新兴通航产业集聚区，并成为长三角北翼重要的通航综合运营服务基地和通航产业发展示范区。

#### (3) 江海联动先导区重要增长极

深度融入“一带一路”和建设长江经济带国家战略，依托国家级通州湾江海联动开发示范区，利用机场和综合交通条件，合理引导生产力布局 and 要素流动，完善区域政策，构建集聚度高、辐射带动作用强的临空经济区，打造成为促进长三角一体化、推动江海联动区域可持续发展的新增长极，以及深化沿海开发、海陆空统筹发展的重要战略支点。

### 4.2 发展目标

#### (1) 总体发展目标

规划到2025年，构建起优势明显、重点突出、配套完善、特色鲜明的通用航空产业体系，通用航空产业发展环境显著改善，成为南通市经济转型升级的重要推动力量和新的增长极。

#### (2) 产业发展目标

规划到2025年，园区通用航空产业规模显著扩大，形成较为完备的上下游产业链。通用飞机整机制造、航空配套制造、临空高科技制造等产业具备规模化发展能力。通航运输及服务保障体系完善，航空维修、航空物流、通航培训等产业发展壮大。信息化与工业化融合成效显著，创新能力显著增强，掌握一批关键核心技术，成为华东通用航空产业重要集聚地。

规划到2025年，实现通用航空产业总收入年平均增长25%左右，实现全市通用航空产业收入突破80亿元，充分发挥通用航空产业的带动作用和技术扩散效应，实现全产业链带动效应达150亿元，并将直接和间接带动8万个工作岗位，成为全市战略性新兴产业的领跑者。

### 4.3 产业发展重点

#### (1) 航空核心产业

依托规划建设的通用机场发展临空经济区，主要围绕通航运营与服务、航空装备与配套制造两条主线构建航空核心产业，重点发展通勤航空、公务飞行、飞机托管、通航作业、应急救援、通用飞机整机制造和航空配套制造等产业内容，形成具有通航特色的航空核心产业。

#### (2) 航空特色服务业

临空经济区除了要具备基本的机场运输服务，商务、物流、文化、娱乐等相关服务业已成为临空经济区整体功能构成和临空产业体系的重要组成部分。南通滨海园区临空经济区发展航空特色服务业，应依托规划建设的通航机场和海陆空多方式的区域交通条件，结合南通市良好的生态环境与旅游资源，并发挥紧邻上海自贸区的优势区位，重点发展现代综合物流、航空培训、航空维修、航空休闲娱乐和临港商业。

#### (3) 临空高科技产业

临空高技术产业作为高技术、高附加值、高资本聚集型产业，具有辐射带动范围广、经济效益显著的特点，可以有效带动区域经济发展。为了应对新一轮的科技革命和产业变革，我国提出了“中国制造2025”、“互联网+”行动计划等多项战略举措，力争到2025年实现我国从制造大国向制造强国的转型，形成新的生产方式、产业形态和经济增长点。

南通滨海园区临空经济区将融合“中国制造2025”、“互联网+”行动计划的重点发展领域和相关内容，利用紧邻机场和海港的区位交通条件，依托先进制造业、新材料、海工装备等基础产业优势，未来重点发展智能装备制造、海洋生物工程。

### 4.4 产业空间布局

根据南通滨海园区临空经济区发展定位和发展内容，规划临空经济区总体用地面积为800ha，完全可以满足核心产业用地需求。根据机场选址的实际情况，结合航空核心产业、航空特色服务业、临空高科技产业的布局特点，产业空间布局



图1 南通滨海园区临空经济区总体布局方案

结构为“一区一基地”。南通滨海园区临空经济区总体布局方案见图1。

一区：临空经济核心区，集中发展临空产业，主要包括通航运营与服务、航空维修及培训、航空装备及配套制造、临空高科技、现代综合物流、临港商务及商业等。

一基地：水上飞机起降基地，突出滨海休闲娱乐特色，重点发展水上运动及水上航空娱乐、通航旅游、邮轮游艇、滨海休闲等水上休闲娱乐项目。

## 5 结语

临空经济区作为近期热门的城镇建设类型受到越来越多的关注，规划工作者应当审慎对待，按照经济新常态要求，规划建设好临空经济区，促进产业结构转型升级。南通滨海园区临空经济区规划是在经济新常态背景下对临空经济区规划的探讨，以期达到抛砖引玉的效果。

## 参考文献

- [1] 魏晓芳,赵万民,黄勇等.现代空港经济区的产业选择与空间布局模式[J].经济地理,2008,30(8):1328-1332.
- [2] 张超.成都双流临空型服务经济发展研究[D].四川:西南财经大学,2011.
- [3] John D. Kasarda. Shopping In the Airport City and Aerotropolis New Retail Destinations in the Aviation Century. <http://www.aerotropolis.com/articles>.2010.
- [4] 龚健,陈育霞,杨屹.北京新航城带动首都经济圈经济发展的思考[J].当代经济,2012.
- [5] 曹允春.“空港商业城”.区域未来的商业中心.中国民航报,2012(4).
- [6] 何艳,张瑜.临空经济区发展的动力因素研究[J].地域研究与开发,2012,31(2).

# 利用道路作为通用飞机临时起降点跑道的探索与实践

■ 孟祥龙 王勇传 「总图」

**摘要:** 本文主要论述利用道路作为通用飞机临时起降点跑道,进行起降的可行性。文章首先介绍了临时起降的设立与管理,然后在理论层面提出通用飞机起降对道路的要求,最后以实际工程案例列举了通用飞机在道路上起降的论述过程。

**关键词:** 道路;通用飞机;临时起降点

通用航空产业的发展离不开通用航空机场的建设和布局,通用航空机场的建设已经成为制约通用航空产业发展的重要因素。在当前大力发展通用航空产业政策的支持下,各省级主管部门开始制定适合本省特点的通用航空机场建设发展规划。中国通用航空机场建设的大幕正逐步拉开,然而政策的落地和实施需要时间。国内大批通用航空产业的投资人已经显得迫不及待,很多通用航空企业已经购买了通用飞机,然而机场建设的滞后,使得这些飞机无法投入使用。如何在现实与规划的差距中找到一种两全其美的解决办法呢?利用现有道路作为通用飞机的临时起降点跑道不失为一种有意义的探索与实践。

## 1 临时起降点的设立与管理

临时起降点是临时设立的,使用临时起降点的航空器主要是轻、小型飞机、直升机、滑翔机、气球、飞艇等。临时起降点是提供航空器起降、停放和组织飞行保障活动的场所。

临时起降点开展的通用航空飞行活动主要集中在工业、农业、林业、渔业、矿业、建筑业等作业飞行和医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋

监测、科学实验、遥感测绘、教育训练、文化体育、旅游观光、公务等通用航空飞行及警务飞行。

临时起降点有明确的使用年限要求,设立后其连续使用年限一般不得超过两年,短期使用年限一般不得超过一年。临时起降点场址由军方核准,报上级主管部门备案。同时,临时起降点不得建设永久性场地设施,不得修建跑道。因此,如能利用现状道路作为临时起降点的起降跑道既符合相关管理规定,又提高了现有设施的利用效率,改善了临时起降点的设施条件,提高了临时起降点运行过程中的安全可靠。

临时起降点类似于民航系统所称的三类通用机场,在民航系统管辖范围内不做具体要求。但是,在选择用于临时起降点跑道的道路时,要对道面的平面尺寸及构型进行充分的分析和论证,确保飞行安全。

## 2 通用飞机对道路起降的基本要求

### 2.1 道路的方向及直线段最小长度

绝非任何道路都可以选做跑道使用,道路的朝向要尽量与当地的主导风向保持一致,以期在临时起降点使用期内,尽可能提高跑道的使用效率。

根据《通用机场建设规范》(MH/T 5026—2012)的相关规定,建设有飞行区的通用机场应按

作者简介:孟祥龙,男,工程师,2009年毕业于长安大学道路与铁道工程专业,现就职于中航规划民航工程设计研究院。

照《民用机场飞行区技术标准》(MH/5001-2013)(以下简称标准)执行。

道路的直线段长度要能满足通用飞机安全起飞和着陆。对于翼展小于15m的小型通用飞机,通常需要的跑道长度会在800m左右。具体的长度的确定还要根据飞机的自身性能具体得出。

### 2.2 道路的宽度与坡度

根据《标准》的规定和当前通用飞机的使用类型,翼展小于24m,飞机起降长度在800m以内的,所选道路的宽度要保持在18m以上。如道路宽度能达到23m以上,且道路直线长度能达到要求的,则能运行翼展不大于24m,起降长度不大于1200m的通用飞机。

跑道的纵向坡度应不大于2%,跑道的横向坡度不大于2%。

### 2.3 道路周围的障碍物

临时起降点均采用目视飞行,根据规范要求,周边障碍物应符合《标准》中有关净空的要求,除非经论证无实质性影响。因此,在确定道路前要对道路周边的障碍物给出意见。对于突破障碍物限制面的障碍物要根据飞行员的驾驶经验结合空军相关部门的实际审批意见,最终确认该道路周围的障碍物是否能够满足其作为跑道的可行性。

## 3 道路作为临时起降点的探索

### 3.1 项目基本情况

本项目中的临时起降点位于华北地区某绿色能源产业基地。该产业基地建设有完善的路网结构,但因基地招商相对较慢,多数地块处于待开发状态。同时基地内的道路利用率较低,多数道路基本没有车辆通行。如图1所示即



图1 总平面布置图

为产业基地平面布置图,图中所示的拟选道路为南北向断头路,拟用作临时起降点跑道使用。

### 3.2 道路的基本特点

#### 3.2.1 道路的平面尺寸

该条道路为宽度为44m,长度为957.5m,基本为正南北向布置,道面结构为沥青混凝土面层。道路标高范围为26.72m~27.86m。

#### 3.2.2 道路的竖向坡度

场地地势北高、南低,跑道标高沿地势设计,跑道纵向坡度0.88%,跑道横坡1.5%,坡向道肩。

#### 3.2.3 道路周边障碍物情况

道路周围障碍物情况见表1。跑道南北端及南端东侧升降带内存在12m左右的小片树林,飞机离开道路时飞行高度已达到12.4m以上,避开了两端树木的影响。



图2 道路实景图

表1 跑道范围内的主要障碍物

障碍物名称	标高(m)	备注
联通基站1 (跑道北端头西侧360m)	30	未超高
联通基站2 (跑道北端头北侧偏东150m)	30	800m跑道超高
移动基站1 (跑道北端头东侧1900m)	35	未超高
移动基站2 (跑道北端头东侧1500m)	35	未超高
热力烟囱 (跑道南端头东侧1700m)	40	未超高
树林 (跑道南端东侧, 200m × 200m)	12	800米跑道超高
树林跑道南端头南侧, 60m宽绿化带	12	800m跑道超高

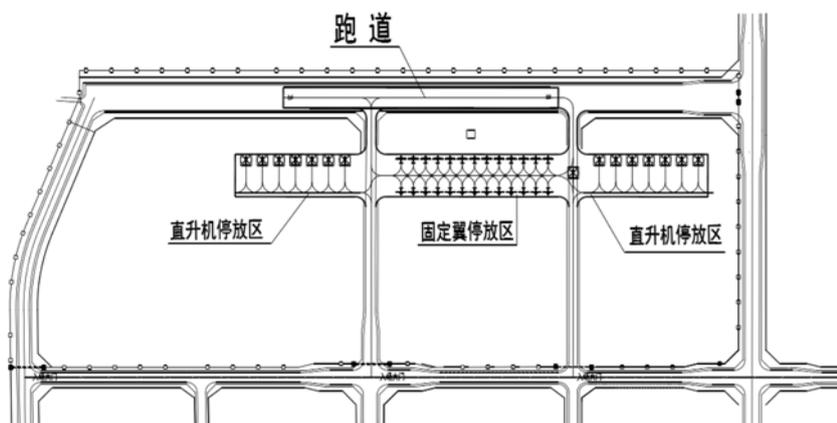


图3 起降点的平面布局图



图4 飞机在道路上起飞

跑道北端进近面内存在联通一基站, 距远期800m跑道北端150m, 高度30m, 超出远期障碍物限制面, 应予拆除。本期应启动拆除程序, 同时, 通过飞行程序进行合理避让。其余障碍物均处在跑道内水平面内, 按内水平面45m的障碍物相对限制高度, 均未超高。

### 3.2.4 道路结构

拟选道路的结构层整体厚度为1.66m, 其中沥青面层厚度16cm (4cmAC-13; 5cmAC-16; 7cmAC-25), 基层厚度66cm (16cm水泥稳定碎石基层; 16cm稳定碎石基层; 18cm水泥稳定碎石底基层), 垫层厚度1m (天然砂砾), 道面结构及强度完全能够满足运行飞机的需求。

### 3.3 起降点总平面规划

飞行区的规划和设计主要考虑近期供最大起降重量为11t的直升机起降, 并考虑供小型固定翼飞机起降。一期跑道长度400m, 二期跑道长度发展为800m, 跑道宽度30m, 两侧设置道肩, 道肩宽度2m。跑道及道肩均为沥青混凝土材料。

对飞机停放区不再进行专门的道面硬化, 在现状自然土面区的基础上, 对停放区进行碾压, 压实度不低于97%。

2015年初, 经过民航及空军审批的临时起降点正式试飞成功。

## 4 结论

利用现有道路作为通用飞机临时起降点的跑道是完全可行的。在选取临时起降点和跑道时, 要严格遵守空军及民航系统的有关规定, 对诸如道路长度、宽度及周围障碍物等情况要进行详细的分析论证, 以保障起降点的运行安全。利用现有道路作为跑道不仅能够节约资源避免重复建设, 还能改善起降点的运营条件, 是一次十分有意义的实践。

# 《馆藏文物防震规范》关键技术 ——之防震安全设计研究

■ 宋毛毛 马伯涛 葛家琪 「结构」

**摘要:** 《馆藏文物防震规范》WW/T 0069-2015中, 基于馆藏文物防震安全提出馆舍、展陈和文物全系统防震安全理念设计方法和具体措施。本文针对馆藏文物防震设计方法、适用范围、展柜及文物安全性判别等关键技术问题展开研究。首先, 提出了“地震波+馆舍+展柜+文物”的全过程全系统防震设计理念; 其次, 针对浮放展柜及文物, 进行地震作用下安全性分析研究; 第三, 与Getty博物馆研究成果对比, 验证本文理论的正确性与可靠性。分析得出: 文物防震安全与文物高宽比、支撑接触面摩擦系数、安放处竖向加速度峰值等因素有关; 引入了抗滑动安全系数和抗倾覆安全系数进行设计, 可充分保证文物安全性。

**关键词:** 馆藏文物; 防震; 浮置文物; 安全性判别

## 0 引言

博物馆是展现社会历史文明和社会发展过程的窗口。我国是历史文化大国, 文物众多, 截止2015年3月, 据全国可移动文物普查数据显示, 全国经过认定并登录的可移动文物已超过1268万件, 并以平均每天6万件的速度增加。将大量可移动文物集中到博物馆中保存, 有利于文物保护修复和日常防护管理, 但增加了在突发灾害下文物大规模损毁的风险。2008年5·12汶川地震造成不少于3169件(套)馆藏文物损毁, 其中一级文物16件(套), 二级文物20件(套), 三级文物184件(套)。

中国博物馆文物分布与地震烈度区划表明, 博物馆文物主要分布于地震区, 超过50%的国家级博物馆位于7度及以上高烈度抗震设防区。历次震害分析表明, 地震动经历博物馆馆舍、展柜、文物底座, 其中任何一环节出现震害, 均会危机文

物安全。在中国大陆, 针对博物馆馆舍防震安全有强制性规范标准要求, 并施行严格的设计审查及工程质量检查制度; 而针对博物馆文物防震安全却没有规范要求, 大部分博物馆文物没有系统有效的防震措施。因此, 博物馆防震安全设计理念与装置有待提升。

国内专家针对常规的馆藏文物提出经验公式法, 通过经验总结和回归分析得到地震动从震源到文物传播过程中的动力放大系数, 得到文物安放处的震动响应, 进而对文物防震安全进行评判。吴来明<sup>[1]</sup>、王忠良<sup>[2]</sup>等以上海博物馆为例, 讨论了上海市及周边地区的地震动参数, 通过反应谱分析和时程分析计算了文物安放处楼层地震动所致振动响应, 提出了楼层反应谱, 用于快速计算楼层动力响应; 张俊勇<sup>[3]</sup>等将浮放物假设为刚性体, 给出了浮放物由静止开始摇晃的判别条件, 其安全稳定与浮放物的高宽比、质量、水平和竖向加速度相关; 陆钦年和熊立红<sup>[4]</sup>通过理论推导给出了考虑竖向地震作用的设备滑移判别式。已有研究一般通过浮放文物的宏观运动响应判别其安全性, 对馆藏文物地震响应分析和安全性评价没有考虑馆舍对藏品震动响应的影响, 评价结论

作者简介: 宋毛毛, 女, 工程师, 2013年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业, 现就职于中航规划工程技术研究院。

不一定可靠。本文提出“地震波+馆舍+展柜+文物”的全过程全系统防震设计理念,综合考虑文物安全与文物高宽比、支撑接触面摩擦系数、安放处竖向加速度峰值等因素,分析浮放物在地震作用下的安全性,并与Getty博物馆研究成果进行对比研究。

## 1 全系统防震设计理念

文物防震设计时应考虑各地区地震动特性差异,地震动经历博物馆馆舍、馆内每个展柜,传至馆藏文物的地震作用效应各异,馆藏文物地震响应分析和设计应基于馆舍和馆藏文物的双重防震安全,充分体现防震性能化设计理念。按照地震动传播过程“从震源发生,传递至建筑结构各楼层,经展柜传至馆藏文物”进行分析,建立“地震波+馆舍+展柜+文物”全模型,分析馆舍结构、展柜及文物之间的相互振动影响及动力耦合作用,得到文物的真实振动响应;通过抗震安全指标评价其安全性,并辅以现场动力特性实测进行验证,给出合理的分析方法和经验参数。文物全系统防震设计理念(见图1)应考虑以下四个方面:

(1) 全系统安全目标:震害分析表明,地震动经历馆舍、展柜、文物底座,其中任何一环节出现震害,均会危及文物安全,应建立“地震波+馆舍+展柜+文物”全系统防震安全性能目标,文物展陈防震应从博物馆馆舍、展柜或展陈台座、文物本身三个方面考虑。

(2) 个性化安全设计:每个地区地震动特性不同,地震动经历博物馆馆舍、馆内每个展柜,传至每个馆藏文物的地震作用效应各异。因此,每个馆藏文物均应进行“地震波+馆舍+展柜+文物”的全系统安全目标地震作用全过程性能分析及个性化安全目标。

(3) 馆舍展陈防震措施:馆藏文物与展具、展具与馆舍之间多为浮放关系,其安全性基本只与馆舍的加速度效应相关;目前馆舍及展具基本采用增强刚度即“堵(抗)”的方法防震,造成文物加速度响应的放大;故基于文物安全需求,博物馆馆舍、展具、文物底座应采取隔震、消能减震(“疏导措施”),以降低地震下文物的加速度响应<sup>[5]</sup>。

(4) “私人定制”的防震产品:综合考虑不

同地区地震烈度、博物馆馆舍结构类型及文物的个体差异,对文物防震装置进行系统化全过程性能设计,有效控制每个文物不同的地震响应,实现文物防震安全性的“私人定制”。

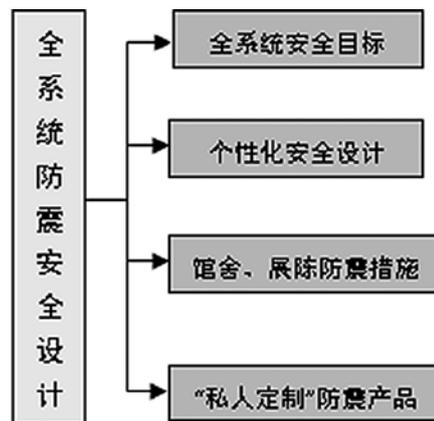


图1 文物全系统防震设计理念

充分考虑到我国各地区震源特征、馆舍结构、文物种类和等级的差异性,《馆藏文物防震规范》WW/T 0069-2015中,基于馆藏文物防震安全提出馆舍、展陈和文物全系统防震安全理念设计方法和具体措施。馆藏文物地震效应分析简化方法如下:

(1) 抗震设防烈度不超过6度地区的博物馆内馆藏文物,如文物结构形式简单,高宽比小于3且重量较轻,可采用经验公式法计算馆藏文物地震作用效应。

(2) 文物高宽比小于3的,应考虑文物与展柜动力耦合影响采用数值模拟法进行地震作用效应计算;楼盖竖向振动卓越频率不大于5Hz时,应计入竖向地震的影响。抗震超限的复杂博物馆结构、建于不利场地的博物馆内馆藏文物,以及高宽比不小于3或单体文物质量大于1吨的文物,应考虑馆舍结构、展柜、馆藏文物动力耦合影响采用数值模拟法进行地震作用效应计算。

(3) 珍贵文物及博物馆内重点保护文物,应采用试验分析法进行馆藏文物与展柜组合的模型振动台试验,分析馆藏文物及展柜的地震作用效应。振动台试验的地震波输入应采用文物展柜安放处的楼(地)面地震波,通过场地地震波和博物馆结构数值模拟确定<sup>[6]</sup>。

下文理论分析主要针对上述(1)方法中的经验公式法开展。

## 2 浮置文物防震安全设计之经验公式法

### 2.1 基本规定与参数计算

浮置文物安全性分析对于形体较为规则文物, 假定其质量为  $m$ 、底边宽度  $b$ 、高度为  $h$ ; 对于形体较为复杂的文物, 应分区分块确定文物的质量  $m_i$ 、高度  $h_{ci}$  等。根据文物的质量与外形尺寸, 确定质心, 并得出质心至支承面的垂直距离  $h_c$ 。

对于质量均匀、形状规则对称的文物,  $h_c$  按式 (1) 计算:

$$h_c = 0.5 \times h \quad (1)$$

对于质量不均匀或形状不对称的文物,  $h_c$  按式 (2) 计算:

$$h_c = \sum m_i h_{ci} / \sum m_i \quad (2)$$

式中:  $h_c$ ——物物质心至支承面的垂直距离;  $h$ ——文物高度;  $m_i$ ——某质点  $i$  的质量;  $h_{ci}$ ——某质点  $i$  至支承面的垂直距离。

由于地震发生时, 地震波沿平行浮置文物底面短边情况传播更不利, 故只考虑短边所在竖直面内的平面安全计算。需考虑竖向地震作用时, 按单一频率考虑, 底部水平及竖向地震加速度分别按式 (3)、(4) 计算:

$$a_h = a_{h0} \sin(\omega_h t + \varphi_h) \quad (3)$$

$$a_v = a_{v0} \sin(\omega_v t + \varphi_v) \quad (4)$$

式中:  $a_h$ 、 $a_v$  为浮置文物在水平或竖向地震加速度;  $a_{h0}$ 、 $a_{v0}$  为浮置文物水平或竖向地震加速度最大值, 以向右或向下为正方向;  $\omega_h$  为水平向地震频率;  $\varphi_h$  为水平向地震的初始相位角。

偏安全考虑, 两者同时作用时, 假定水平地震与竖向地震同时达到各自最大值  $a_{h0}$  及  $a_{v0}$ , 并形成不利组合。仅考虑浮置文物底面与其基座两点接触, 静摩擦系数  $\mu_0$ , 定义已知量  $b$ 、 $h$ , 文物质量为  $m$ , 计算简图见图2。

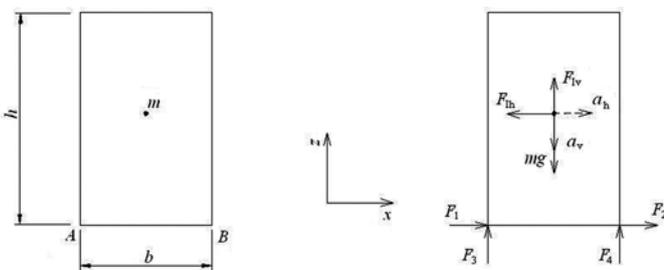


图2 文物计算简图

### 2.2 滑动验算

当文物的水平惯性力不大于底面静摩擦力时, 该文物保持静止。只有水平地震作用时, 水平惯性力最大值  $F_{lh} = ma_{h0}$ , 最大静摩擦力为  $\mu_0 mg$ , 考虑文物抗滑动安全系数  $k_s$ , 底面水平力不大于静摩擦力需满足:  $k_s ma_{h0} \leq \mu_0 mg$ , 整理可得水平加速度的限值见式 (5)。

$$a_{h0} \leq \frac{\mu_0 g}{k_s} \quad (5)$$

当竖向地震作用 (加速度) 不可忽略时, 水平惯性力最大值仍取  $F_{lh} = ma_{h0}$ , 计入竖向加速度对摩擦力的不利作用, 最大静摩擦力为  $\mu_0 m(g - 0.65a_{v0})$ , 底面水平力不大于静摩擦力需满足:  $k_s ma_{h0} \leq \mu_0 m(g - 0.65a_{v0})$ , 整理可得此时水平加速度的限值见式 (6)。

$$a_{h0} \leq \frac{\mu_0 (g - 0.65a_{v0})}{k_s} \quad (6)$$

式中:  $\mu_0$  为浮置文物与支承面之间的静摩擦系数,  $k_s$  为抗滑动安全系数, 建议取值 1.2~1.6, 当防震设防等级高时取大值<sup>[6]</sup>。

### 2.3 倾覆验算

为保证文物在地震作用下不发生倾覆, 假定文物质量沿高度分布均匀, 设浮置文物  $\tan \alpha = h/b$ , 文物旋转角度为  $\theta$ , 旋转后角度为  $\alpha_0$ , 且  $\tan \alpha_0 = h_0/b_0$ , 分析简图如图3所示。

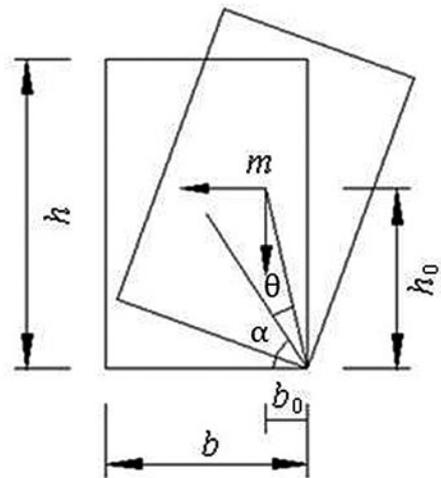


图3 文物抗倾覆分析简图

浮置文物不发生倾覆, 浮置文物旋转后角度应满足  $\alpha_0 = \alpha + \theta \leq 90^\circ$ , 抗倾覆力矩  $M_{抗}$  应大于倾覆

力矩  $M$ ，即  $(mg - F_{lv})b_0 + F_{lh}h_0 \geq 0$ ，则浮置文物旋转角度  $\theta$  应满足式 (7)。

$$\begin{aligned} \theta &\leq \arctan\left(\frac{(0.65a_{v0} - g)}{a_{h0}}\right) \\ -\arctan(h/b) &\leq 90^\circ - \arctan(h/b) \end{aligned} \quad (7)$$

由于地震作用时浮置文物的旋转角度  $\theta$  计算及监测难度较大，理论公式难于实施，故偏于安全考虑，将浮置文物不摇晃作为不发生倾覆的判别条件，为保证文物不发生摇晃，需满足竖向反力  $F_3$ 、 $F_4$  均不小于 0。对图 2 所示的 A 点取矩，即满足式 (8) 要求。

$$F_4 \times b + F_{lh} \times h/2 = F_{lv} \times b/2 + mg \times h/2 \quad (8)$$

式中： $F_{lv}$  为竖向惯性力最大值， $F_{lv} = ma_{v0}$ ； $F_{lh}$  为水平惯性力最大值， $F_{lh} = ma_{h0}$ ； $F_4$  为转动中心点 A 点的竖向反力。只有水平地震作用时，计入浮置文物抗倾覆安全系数  $k_0$ ，由  $F_4 \geq 0$ ，得： $k_0 ma_{h0} h \leq mg \times b$ ，整理可得此时水平加速度的限值为式 (9)。

$$a_{h0} \leq \frac{g}{k_0(h/b)} \quad (9)$$

当竖向地震作用（加速度）不可忽略时，由  $F_4 \geq 0$  得： $k_0 a_{h0} h \leq (g - 0.65a_{v0})b$ ，整理可得此时水平加速度的限值为式 (10)。

$$a_{h0} \leq \frac{g - 0.65a_{v0}}{k_0(h/b)} \quad (10)$$

式中： $k_0$  为抗倾覆安全系数，建议取值 1.2~1.6，当抗震设防等级高时取大值； $h/b$  为浮置文物的高宽比。

### 3 与 Getty 博物馆研究成果对比

#### 3.1 浮放文物安全判别

国外对文物在地震作用下的安全稳定性进行了研究，美国 Getty 博物馆已有研究主要通过确定文物宽高比来预测地震下文物可能出现的状态，如摇晃，滑动，或倾覆情况<sup>[7]</sup>。

文物出现滑动或摆动通过地震加速度峰值来

衡量，当地震水平加速度峰值 ( $a_{h0}$ ) 大于文物宽高比 (文物宽度  $B$  与高度  $H$  的比值  $B/H$ )，即达到式 (11) 时，文物会发生摇晃或滑动。

$$a_{h0} \geq B/H \quad (11)$$

如果文物底部和所在表面之间是光滑的，很文物会滑动，如果表面之间粗糙或不平，则更可能摇晃。文物是否会倾覆通过地震最大速度来确定，当文物宽高比和地震最大水平速度 ( $V_0$ ) 关系满足式 (12) 时，则文物会发生倾覆。

$$V_0 \geq 10B/\sqrt{H} \quad (12)$$

不论摆动、滑动还是倾覆都基于文物宽高比的比值和重心位置。基于 Getty 博物馆地震数据代表值 (水平加速度峰值  $687\text{cm/s}^2$ ，速度峰值  $33.9\text{cm/s}$ )，可得文物发生各种可能状态与宽高比的关系曲线，如图 4 所示。

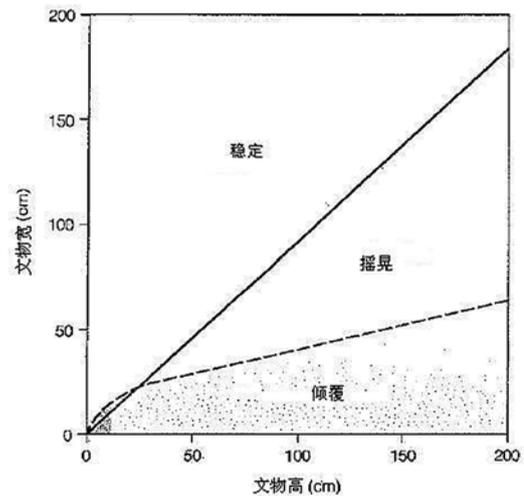


图 4 文物状态与宽高比的关系曲线

与 Getty 博物馆研究成果对比可知：

(1) Getty 博物馆文物地震安全性只考虑了文物的宽高比和重心位置，本文通过理论推导得出：文物安全与水平加速度峰值、文物高宽比、摩擦系数及竖向加速度峰值有关，并引入了抗滑动安全系数  $k_s$  及抗倾覆安全系数  $k_0$ ；

(2) Getty 博物馆以地震峰值速度评判文物倾覆，而本文以摇晃作为倾覆判别，较之相对保守，主要考虑其作为监测系统中文物安全稳定预警来说，更具可行性与可靠性。

#### 3.2 实例对比验证

选取长方体浮置物体验算，底面为

30cm×30cm,高50cm,浮置文物与支承面之间的静摩擦系数为0.5,地震作用下水平加速度峰值为687cm/s<sup>2</sup>,速度峰值为33.9cm/s。

#### 1) 滑动判别

由本文理论推导结果可知,浮置物体不发生滑动需满足:  $a_{h0} \leq \frac{\mu_0 g}{k_s}$ ; 抗滑动安全系数及抗倾覆安全系数均取为1.2,该浮置物体水平加速度峰值为:  $a_{h0} = 687\text{cm/s}^2 \approx 0.7g$ ,  $\frac{\mu_0 g}{k_s} = 0.4g$ ;

根据Getty博物馆研究,浮置物体不发生滑动需满足:  $a_{h0} \leq B/H$ ; 该浮置物体水平加速度峰值为:  $a_{h0} = 687\text{cm/s}^2 \approx 0.7g$ ,  $B/H = 0.6g$ ;

两公式判断均为滑动,但对比可知本文的滑动判别条件较为保守,且对于高宽比较小的物体,滑动判别结果偏于不安全。

#### 2) 倾覆判别

根据本文理论推导可知,浮置物体不发生倾覆需满足:  $a_{h0} \leq \frac{g}{k_0(h/b)}$ ; 抗滑动安全系数及抗倾覆安全系数均取为1.2,该浮置物体水平加速度峰值为:  $a_{h0} = 687\text{cm/s}^2 \approx 0.7g$ ,  $\frac{g}{k_0(h/b)} = 0.5g$ ;

根据Getty博物馆研究,浮置物体不发生倾覆需满足:  $V_0 \leq 10B/\sqrt{H}$ ; 该浮置物体水平速度峰值为:  $V_0 = 33.9\text{cm/s}$ ,  $10B/\sqrt{H} = 42.4\text{cm/s}$ ;

对比可得,根据Getty博物馆提出的速度判别该物体不会倾覆,但本文理论分析结果表明该物体会发生倾覆,实际工程中建议对该物体进行隔震处理,降低物体的水平加速度以满足物体抗倾覆要求。

## 4 结论

基于国内馆藏文物防震安全现状,本文提出馆藏文物防震全系统全过程防震设计理念,针对浮放文物在地震作用下安全稳定问题进行分析,并与Getty博物馆研究成果进行对比研究,主要结论与建议如下:

#### 1) 浮置文物的滑动判别,主要考虑文物质心

处的水平惯性力与底面静摩擦力的关系,保证地震峰值加速度不超过限值要求;

2) 为保证文物不发生倾覆,需限定浮置文物在地震作用下的旋转角度,但其计算及监测难度较大,理论公式难于实施,故偏于安全考虑,建议将文物不摇晃作为不发生倾覆的判别条件;

3) Getty博物馆文物地震安全研究考虑文物的宽高比和重心位置,与本文研究成果对比,验证了本文理论的正确性与可靠性;Getty博物馆在文物摇晃判别方面,其理论可行,但考虑可操作性及可行性及文物保护可靠性,更建议采用本文方法。

## 参考文献

- [1] 吴来明,王忠良,高华平等.博物馆文物的防震保护研究(一)——传统抗震措施与现代隔震技术.文物保护与考古科学[J],2001,13(2),49—51;
- [2] 王忠良,高华平,吴来明等.博物馆文物的防震保护研究——设防地震动输入及文物防震保护参数的确定[J].工程抗震,2004,(1):18—25;
- [3] 张俊勇,唐家祥,江宜城.地震中房屋基础隔震对室内浮放设备的防护作用[J].振动与冲击,1998,17(4):62—65;
- [4] 陆钦年,熊立红.浮放设备的抗震设计[J].中国建筑协会抗震防灾研究会(第五届全国地震工程会议论文集).北京,1998:745—751;
- [5] 葛家琪,博物馆文物防震技术和系统解决方案,博物馆文物展陈防震技术国际学术研讨会会议报告,2015.04.
- [6] 中华人民共和国文物保护行业标准,WW/T 0069—2015 馆藏文物防震规范[S].北京:中华人民共和国国家文物局,2015.
- [7] McKenzie Lowry, David Armendariz, B.J.Farrar, Jerry Podany. Seismic Mount Making: A Review of the Protection of Objects in the J.Paul Getty Museum from Earthquake Damage[J]. Advances in the Protection of Museum Collections from Earthquake Damage.2008,47—50.

# 对工程量清单计价模式下 招标投标工作的研究

■ 黄卫群 「工程造价」

**摘要:** 推行工程量清单招标投标在我国具有极强的生命力和广阔发展前景,对招标投标双方来说,既是一种机遇,也是一种考验,双方都需要一个学习和适应的过程来转变观念,提高认识。作为一种新型的计价模式,工程量清单的实施还处于探索阶段,还存在着许多不足之处。对于招标投标主体的业主和施工单位来说,也还需要一段相当长的适应过程。招标方要在工程量清单计价模式下成功选定中标人并对工程造价进行动态控制,就必须合理地进行招标文件编制,开标与评标几个部分的工作。

**关键词:** 工程量清单; 招投标

## 1 引言

工程量清单计价模式下的招投标,是以招标人按照国家统一的《建设工程工程量清单计价规范》和《通用安装工程工程量计算规范》(以下简称“计算规范”)等九个专业的“计算规范”的要求编制和提供的工程量清单为平台,投标人根据自身的技术、财务、管理能力进行投标报价,招标人根据具体的评标细则进行优选投标人。现阶段实施的《建设工程工程量清单计价规范》(GB50500-2013)中规定:使用国有资金投资的建设工程发承包,必须采用工程量清单计价。国有资金投资的建设工程招标,招标人必须编制招标控制价。

作者简介:黄卫群,男,高级工程师,1983年毕业于原航空工业部航空职工工学院自动控制专业,现就职于中航规划动力工程设计研究院。

我国的工程量清单计价模式实施的时间不长,对于其操作,作为招标投标主体的招投标双方还处于一种摸索阶段。本文以《建设工程工程量清单计价规范》(GB50500-2013,以下简称“计价规范”)、《通用安装工程工程量计算规范》(GB50856-2013,以下简称“计算规范”)和《北京市招标投标条例》等为依据,对工程量清单招标投标工作进行研究,使工程量清单计价更好地服务于我国的建设工程招标投标工作。

## 2 工程量清单计价模式

### 2.1 工程量清单计价模式特征与特点

工程量清单计价模式采用的是市场计价模式,其最基本的特征一是在计价依据上实行“量价分离”;二是在管理方式上实行“政府宏观调

控、企业自主报价、市场形成价格、加强市场监管”；三是在工程量清单的编制上实行四统一的原则，即统一项目编码、统一项目名称、统一计量单位、统一工程量计算规则。其特点是由政府间接调控市场形成价格，在政府职能上由政府管理变为政府依法监督与服务。以2013年7月1日起执行的2012年《北京市建设工程计价依据——预算定额》（以下简称“2012年北京预算定额”）为例，“2012年北京预算定额”是作为北京市行政区域内进行工程招标、编制工程量清单招标控制价、投标报价等计价的参考，是北京市工程造价管理部门宏观调控工程造价的依据。

## 2.2 工程量清单计价过程

工程量清单计价方法是一种主要由市场定价的计价模式。工程量清单计价的基本过程是在统一的工程量清单项目设置的基础上，制定工程量清单计量规则，根据具体工程的施工设计图纸计算出各个清单项目的工程量，再根据各种渠道所获得的工程造价信息和经验数据计算得到工程造价。编制过程可以分为两个阶段：①工程量清单的编制；②利用招标工程量清单来编制建设工程项目的招标控制价或投标价。工程量清单计价过程如图1所示。

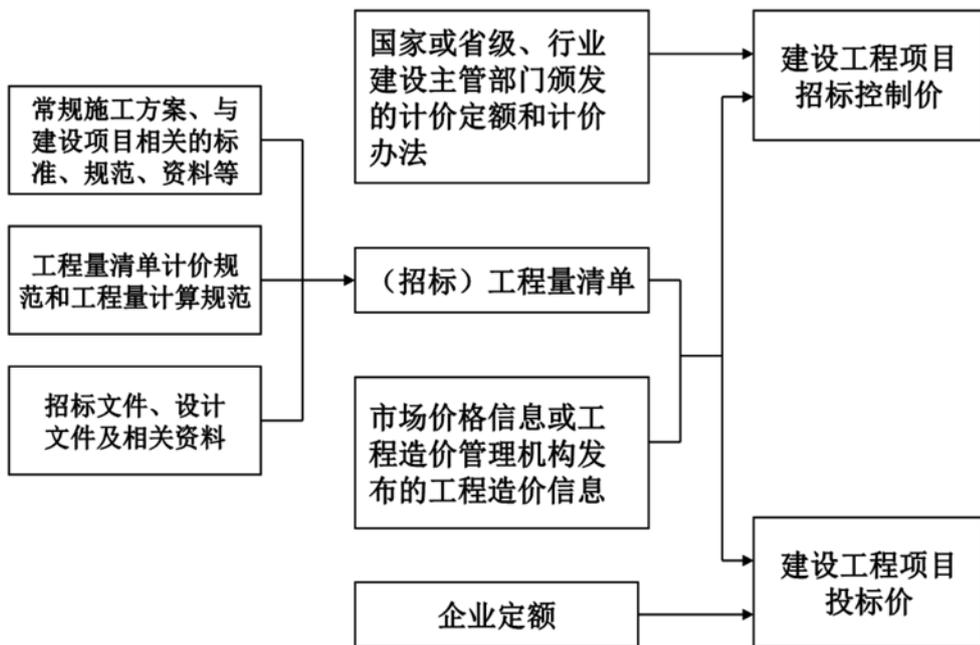


图1 工程量清单计价过程示意图

## 3 工程量清单计价模式下的工程招投标

### 3.1 建设工程招投标概述

建设工程招标是指建设单位对拟建的工程发布公告，通过法定的程序和方式吸引建设项目的承包单位竞争并从中选择条件优越者来完成工程建设任务的法律行为。按照工程建设程序，可以将建设工程招投标分为建设前期咨询招标投标、工程勘察设计招标投标、材料设备采购招标投标和施工招标投标。

建设工程投标是指具有合法资格和能力的投标人根据招标条件，经过初步研究和估算，在指定期限内填写标书，提出报价，并等候开标，决定能否中标的经济活动。

### 3.2 建设工程招投标的意义

(1) 有利于贯彻“公正、公平、公开”的原则。招投标双方在统一的工程量清单基础上进行招标和投标，承发包工作更易于操作，有利于防止建筑领域的腐败行为。

(2) 要求投标方编制企业定额，进行项目成本核算，提高其管理水平和竞争能力。

(3) 清单条目简洁明了，有利于监理工程师进行工程计量，造价工程师进行工程结算，可以加快结算进度。

(4) 工程量清单对业主和承包商之间承担的工程风险进行了明确划分。业主承担了工程量变动的风险，承包商承担了价格波动的风险，体现了风险分担的原则。

### 3.3 建设工程招投标的特点

#### 3.3.1 程序规范

程序规范：在招标投标活动中，从招标、投标、评标、定标到签订合同，每个环节都有严格的程序和规则。这些程序和规则具有法律约束力，当事人不能随便改变。

### 3.3.2 编制招标投标文件

编制招标投标文件：在招标投标活动中，招标人必须编制招标文件，投标人据此编制投标文件并参加投标，招标人组织评标委员会对投标文件进行评审，根据招标文件择优选出中标人。

### 3.4 强制招标范围

以北京市为例，根据《北京市招标投标条例》（第四条），在北京市行政区域内进行下列建设工程项目，包括项目的勘察、设计、施工、监理以及与工程建设有关的重要设备、材料等的采购，符合市人民政府按照国家规定制定的招标范围和规模标准的，必须进行招标：（1）基础设施和公用事业等关系社会公共利益、公众安全的项目；（2）全部或者部分使用国有资金投资或者政府融资的项目；（3）使用国际组织或者外国政府贷款、援助资金的项目。在此基础上，北京市人民政府发布了《北京市建设工程项目招标范围和规模标准规定》（北京市人民政府令第89号），对必须进行招标的建设工程项目的具体范围和规模标准做了规定。

### 3.5 招标工程量清单

招标工程量清单，是指招标人依据国家标准、招标文件、设计文件以及施工现场实际情况编制的，随招标文件发布供投标报价的工程量清单。招标工程量清单包括分部分项工程项目清单、措施项目清单、其他项目清单、规费和税金项目清单。《建设工程工程量清单计价规范》（GB50500-2013）中规定，招标工程量清单必须作为招标文件的组成部分，其准确性和完整性应由招标人负责。招标工程量清单应依据：“计价规范”和相关工程的“计算规范”；国家或省级、行业建设主管部门颁发的计价定额和办法；建设工程设计文件及相关资料；与建设工程有关的标准、规范、技术资料；拟定的招标文件；施工现场情况、地勘水文资料、工程特点及常规施工方案等资料进行编制。

## 4 工程量清单计价模式下实施招投标工作的程序

### 4.1 公开招标工作程序

建设工程公开招标工作程序如图2所示。

#### 4.1.1 建设工程项目报建

建设工程项目的立项批准文件或年度投资计

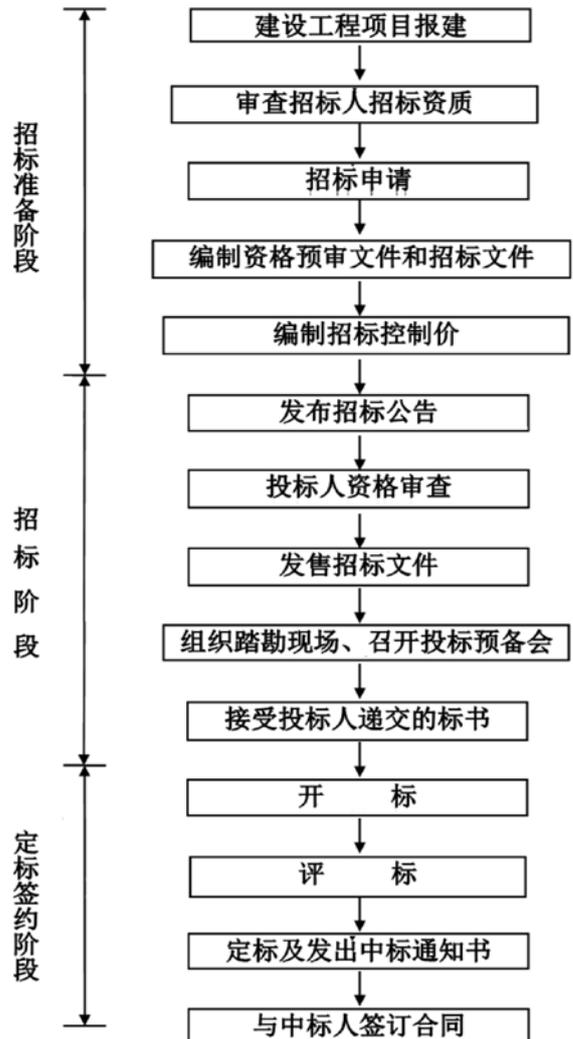


图2 建设工程公开招标工作程序框图

划下达后，按照有关规定，须向当地建设行政主管部门的招标投标行政监管机关报建备案。工程项目报建备案的目的是便于当地建设行政主管部门掌握工程建设的规模，规范工程实施阶段程序的管理，加强工程实施过程的监督。

#### 4.1.2 审查招标人招标资质

资质审查主要是审查招标人是否具备招标条件。具备招标条件招标人可自行办理招标事宜，并向其行政监督机关备案。

#### 4.1.3 招标申请

向其行政监督机关提出招标申请。当招标申请批准后即可以进行招标工作。

#### 4.1.4 编制资格预审文件和招标文件

资格预审文件和招标文件须经招标管理机构审查，同意后可公开发布资格预审通告和招标通告。

招标人或其委托的招标代理机构应根据招标项目的特点和要求编制招标文件。招标文件包括的内容主要有：（1）投标人须知、（2）合同条款（包括通用条款和专用条款）、（3）技术规范、（4）工程量清单、（5）投标文件格式（包括工程量清单计价格式、技术标书格式、保函格式等）、（6）施工图纸、（7）评定标办法、（8）其他资料。

#### 4.1.5 编制招标控制价

招标控制价应依据：《建设工程工程量清单计价规范》；国家或省级、行业建设主管部门颁发的计价定额和计价办法；建设工程设计文件及相关资料；拟定的招标文件及招标工程量清单；与建设项目相关的标准、规范、技术资料；施工现场情况、工程特点及常规施工方案；工程造价管理机构发布的工程造价信息（当工程造价信息没有发布时，可以参照市场价）等资料进行编制与复核。

#### 4.1.6 发布招标公告

资格预审文件和招标文件经当地招标管理机构审查后，招标人即可发布招标通告。

#### 4.1.7 投标人资格审查

对已获得招标信息愿意参加投标的报名者都要进行资格预审。资格预审的主要内容有（1）申请人基本情况、（2）近年财务状况、（3）拟投入的主要管理人员情况、（4）近年完成的类似项目情况、（5）其他资料情况等。

#### 4.1.8 发售招标文件

#### 4.1.9 组织踏勘现场、召开投标预备会

踏勘现场是使投标人了解工程现场和周围环境的有关情况，获取对投标有帮助的信息，并据此做出关于投标策略和投标报价的决定。

投标预备会是将投标人用书面的形式向招标人提出的招标文件或在现场勘察中有疑问或不清楚的问题予以澄清和解答；还有对施工设计图纸进行交底、答疑等。

#### 4.1.10 接受投标人递交的标书

#### 4.1.11 定标签约

定标签约阶段的主要工作有：开标、评标、定标及发出中标通知书、与中标人签订合同等。

### 4.2 施工投标工作程序

建设工程施工投标工作程序如图3所示。

#### 4.2.1 购买和研究招标文件

投标人在通过了资格预审后，就可以在规定的时间内购买招标文件。购买到招标文件后，

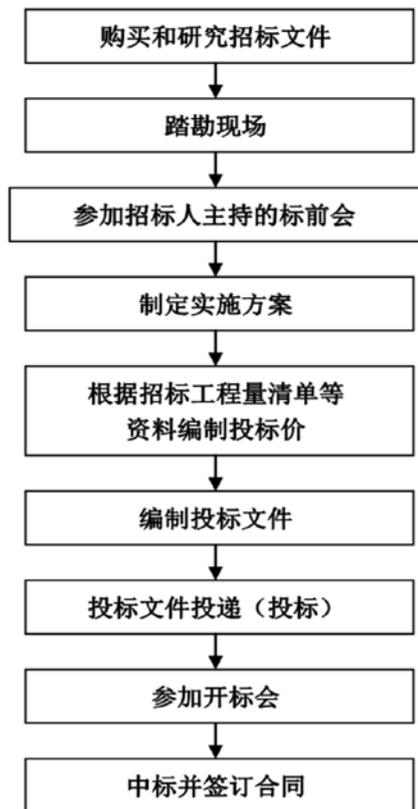


图3 建设工程施工投标工作程序框图

要阅读和研究招标文件中的所有条款（如招标文件中对投标报价、工期、质量等的要求及合同条款、无效标书的条件等），对可能发生疑问或不清楚的地方，应向招标人书面提出。

#### 4.2.2 踏勘现场

踏勘现场的主要目的是了解施工工地地貌、地质、气候、交通、电力和水源等情况；还要了解工地附近的住宿条件等情况。

#### 4.2.3 参加招标人主持的标前会

#### 4.2.4 制定实施方案

#### 4.2.5 根据招标工程量清单等资料编制投标价

2013《建设工程工程量清单计价规范》中规定，投标报价不得低于工程成本，投标人的投标报价高于招标控制价的应予废标。

建设工程项目的投标报价应依据：《建设工程工程量清单计价规范》；国家或省级、行业建设主管部门颁发的计价办法；企业定额，国家或省级、行业建设主管部门颁发的计价定额和计价办法；招标文件、招标工程量清单及其补充通知、答疑纪要；建设工程设计文件及相关资料；施工现场情况、工程特点及投标时拟定的施工组

织设计（或施工方案）；与建设项目相关的标准、规范等技术资料；市场价格信息（或工程造价管理机构发布工程造价信息）等资料进行编制与复核。

#### 4.2.6 编制投标文件

投标文件应按招标文件规定的要求进行编制。

#### 4.2.7 投标文件投递（投标）

#### 4.2.8 参加开标会

#### 4.2.9 中标并签订合同

在投标有效期内，招标人以书面形式向投标人发出中标通知书，并与投标中标人签订工程承包合同。

## 5 工程量清单计价实施后的投标对策

### 5.1 全面准备投标资料

招标文件是投标的纲领性文件，投标人必须认真研究，全面了解工程概况、招标范围和内 容、质量、工期、进度、安全等控制要求、工程类别、计价方式、合同主要条款及风险范围等。对存在的错、漏、差等有疑问的内容，在规定的时间内，以书面形式向招标人或招标代理机构提出，并要求做出书面答复。

编制投标文件之前，投标人要及时、全面收集经审图公司审定通过的施工设计图纸及其说明、国家或省、市的标准图集、拟建工程的勘察报告、周边环境情况等；还有我国现行的法律、法规、规范及工程造价管理机构发布的工程造价信息等资料。

### 5.2 认真复核工程量清单，准确计算消耗量

招标人在工程量清单中提供的工程量是实体工程量，不包括任何损耗及因施工方案或工艺不同而造成的工程增量，即消耗量。一般情况下，投标人必须按照招标人提供的工程量清单进行组价，并按综合单价的形式报价。投标人在组价时，必须把施工方案或施工工艺造成的工程量增量以价格的形式包括在综合单价内。有经验的投标人除按施工方案或施工工艺准确计算消耗量外，还必须对清单工程量进行认真复核。投标人虽然不能直接修改工程量清单，但必须清楚地知道招标人提供的工程量清单的准确度或清单中存在的问题，为投标人不平衡报价及工程索赔埋下伏笔。

### 5.3 做好编制投标文件前的组织管理工作

招标文件内容很多，在有限的内 容内，要

抓住重点仔细阅读。一是关于投标文件递交截止时间、开标时间、标书送达地点，标书的组成内容。标书的实质性要求，如法定代表人身份证明书或授权委托书、投标保证金的提交、标书的签署、份数、正副本标注、评标办法（细则）等。二是关于工程的招标范围、总平面布置、施工总进度要求，业主提供的临时设施条件；施工方法、材料要求、规范及标准适用、质量检查及检验、施工安全保护、环境保护要求；提供的水文、气象、地质资料，计量与支付的规定等。三是关于工程进度、质量、费用、安全文明施工控制要求，适用规程规范标准；预付款额度，开工及竣工日期，变更与暂停，签证与支付，奖罚规定；影响价格考虑，如质量标准、调价规定、总价承包还是单价承包、支付时效、质保金的预留等条款。

在条件允许的情况下，尽可能多地组织投标书编制人员踏勘现场。踏勘现场的目的是了解现场的交通条件、场内三通一平、临时设施准备、物资供应和地材的开采条件及供应情况等。

### 5.4 编制与完善企业定额

企业定额管理是提升企业内部管理水平的关键。企业应该以企业定额为基础，合理制定出一个质和量的分配标准，从而保证按劳分配，多劳多得。企业在“按劳分配，多劳多得”的分配原则基础上，还应该建立一套合理的竞争机制和激励机制，企业内部的竞争不能只看完成任务的数量或质量等单一层面，更不能简单地以完成的工作量作为奖励标准，要综合竞争参与者实际所处的客观环境和所拥有的现实条件，确定在一种什么样的公平环境下进行奖励，这样才能调动人的积极性，才能真正做到激励有效，而这个公平的前提就是企业定额。

企业定额管理有利于提升企业核心竞争力。企业定额直接体现施工企业核心竞争力，其管理过程能够直接对企业的技术、经营管理水平、工期、质量、价格等因素进行准确的测算和控制，进而能够控制项目的成本。同时企业定额作为企业内部生产管理 的标准，结合企业自身技术力量，利用科学管理的方法提高企业的竞争力和经济效益，为企业进一步拓展生存的空间打下坚实的基础。

施工企业必须对自身的现状有较深入的了解，从研究典型工程入手，总结本企业有优势的

施工方法和工艺,分析其造价的组成,从而制定出既符合本企业实际情况又具有市场竞争力的企业内部定额。

### 5.5 精心编制投标文件,注重质量

投标文件一般主要由技术标、商务标两个部分组成,只有保证这两个部分的优质,才能保证整套投标文件的高质量。

施工组织设计及施工方案是技术标的重要组成部分,为招标人评标时考虑的主要因素之一,也是投标人确定施工工程量的主要依据。施工组织设计包括施工方法、施工机械设备及劳动力的配置、施工进度、质量保证措施、安全文明施工措施及工期保证措施等内容,因为施工组织设计不仅关系到工期,而且对工程成本和报价也有密切关系。施工组织设计既要采用先进的施工方法,安排合理的工期,又要充分有效地利用机械设备和劳动力,尽可能减少临时设施和资金的占用。如有同时能向招标人提出合理化建议,在不影响使用功能的前提下为招标人节约工程造价,那么会大大提高投标人低价的合理性,取得技术标的高分,增加中标的可能性。

商务标的格式是固定的,按照招标文件提供的格式,准确填写即可,主要施工企业对投标价格的具体体现,需要合理、准确、具有竞争性。在招标单位提供施工图纸、招标文件、工程量清单的基础上,投标单位考虑自身实力,结合市场平均水平、依靠企业定额,填报单价和总价。

在投标书编制完成后,企业经营部门应组织公司各部门对投标文件进行详细评审,并做好详细的评审记录。评审内容为技术标的施工组织设计及施工方案的合理性、针对性、全面性、优越性等进行评价,并进行完善和优化,最大程度地响应和满足本工程实际状况和招标文件提出的实质性内容及业主要求。

## 6 结语

工程量清单计价模式下的招投标在我国实行时间较短,在实际运用过程中难免存在一些问题,但是工程量清单计价分担风险、促进竞争的作用适用于市场需求。实行工程量清单计价是深化工程造价改革的必然结果,采用工程量清单计价模式下的招投标有利于规范建筑市场秩序,适应市场经济的发展。采用工程量清单计价模式下

的招投标有利于工程成本及总价的控制,有利于建筑企业自身管理的加强及市场竞争,有利于适应世界经济的发展。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建设工程工程量清单计价规范GB50500-2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.通用安装工程工程量计算规范GB50856-2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [3] 2013建设工程计价计量规范辅导规范编写组.2013建设工程计价计量规范辅导[M].北京:中国计划出版社,2013.
- [4] 赵平(主编).建筑工程概预算[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 柯洪(主编).建设工程计价[M].北京:中国计划出版社,2013.

# 导体截面减小处保护电器安装分析

■ 逯霞 「电气」

**摘要:** 文章以工程中遇到的导体截面减小处保护电器安装问题为例,引发了对导体截面减小处保护电器安装问题的思考。通过案例分析对于导体截面减小处保护电器安装提出异议,希望相关规范能够考虑工程应用问题。

**关键词:** 过负荷保护电器; 短路保护电器; 导体截面; T接箱; 插接箱

## 1 前言

《低压配电设计规范》GB50054中关于导体截面减小处保护电器(用于过负荷保护和短路保护的电器)的安装要求有明确的规定,但是工程实际中分别设置过负荷保护和短路保护电器存在很大的困难,原因为市场上400V系统常用的保护电器为断路器和熔断器,这两种电器兼有过负荷和短路保护的功能,能安装保护电器自然能实现两种保护功能,设计需要考虑的是保护配合问题;其次保护电器的安装存在很大的困难,受产品的限制,母线插接箱的最大规格为800A~1000A(某些企业的产品最大只到630A),保护电器整定值大于此规格时变截面导体均无法安装保护电器。

## 2 规范规定

据笔者了解,《低压配电设计规范》GB50054曾经进行了三次修编,关于保护电器在导体截面较小处的安装规定分别如下(以下规范部分为原文引用):

### 1) GBJ54-83《低压配电装置及线路设计规范》

第4.0.8条 在配电线路的导体截面减小处、配电线路分支处或保护须有选择性的地方,均应装设保护电器。但符合规范第4.0.9条规定者除外。

保护电器应装设在被保护线路与电源线路的连接处,有困难时,可装设在距离连接点3m以内便于操作和维护的地方。

当从高处的干线向下引接分支线路时,可将保护电器装设在距离分支点30m以内便于操作和维护的地方。但应保证在该段分支线末端发生单相(或两相)短路时,离短路点最近的保护电器能够动作,且该段分支线路应有不延燃性外层或穿管保护。

说明:考虑到3m长的分支线路是一短段,在此短段发生故障,干线的保护电器应能正确动作。当分支线路长度为30m时,此段线路内发生故障时,干线的保护电器可能动作时间过长,因此规定应有不延燃性外层或穿管敷设,防止因故障引起的燃烧蔓延。

第4.0.9条 下列情况的配电线路中,在导体截面减小处或配电线路分支处可不装设保护电器:

- 一、上一段线路的保护电器已能保护截面减小的那一段线路或分支线;
- 二、采用20A及以下的保护电器所保护的线路;
- 三、配电装置内部从母线上接到保护电器的分支线;
- 四、室外架空配电线路。

说明:一般设计原则。

### 2) GB 50054-95《低压配电设计规范》

第4.5.2条 保护电器应装设在被保护线路与电源线路的连接处,但为了操作与维护方便可设置在离开连接点的地方,并应符合下列规定:

作者简介:逯霞,女,高级工程师,2002年毕业于南京理工大学电力系统及其自动化专业,现就职于中航规划动力工程设计研究院。

- 一、线路长度不超过3m；
- 二、采取将短路危险减至最小的措施；
- 三、不靠近可燃物。

第4.5.3条 当将从高处的干线向下引接分支线路的保护电器装设在距连接点的线路长度大于3m的地方时，应满足下列要求：

一、在分支线装设保护电器前的那一段线路发生短路或接地故障时，离短路点最近的上一级保护电器应能保证符合本规范规定的要求动作；

二、该段分支线应敷设于不燃或难燃材料的管、槽内。

3) GB 50054-2011《低压配电设计规范》

6.2.5 短路保护电器应装设在回路首端和回路导体载流量减小的地方。当不能设置在回路导体载流量减小的地方时，应采用下列措施：

1 短路保护电器至回路导体载流量减小处的这一段线路长度，不应超过3m；

2 应采用将该段线路的短路危险减至最小的措施；

3 该段线路不应靠近可燃物。

6.2.6 导体载流量减小处回路的短路保护，当离短路点最近的绝缘导体的热稳定和上一级短路保护电器符合本规范第6.2.3条、第6.2.4条的规定时，该段回路可不装设短路保护电器，但应敷设在不然或难燃材料的管、槽内。

6.3.4 过负荷保护电器应装设在回路首端或导体载流量减小处。当过负荷保护电器与回路导体载流量减小处之间的这一段线路没有引出分支线路或插座回路，且符合下列条件之一时，过负荷保护电器可在该段回路任意处装设：

1 过负荷保护电器至回路导体载流量减小处的距离不超过3m，该段线路采取了防止机械损伤等保护措施，且不靠近可燃物；

2 该段线路的短路保护符合本规范第6.2节的规定。

条文解释为：6.2.5 导体载流量减小的原因

包括截面积、材料、敷设方式发生变化等。

6.3.4 本条第1款规定是为了操作与维护方便，例如一段安装在高处的水平母线变截面后经插接开关箱引至配电箱，插接开关箱可以安装在便于操作的高度，但距离母干线截面减小处的距离不能大于3m。

国家规范GB 50054-修编中均保留了关于导体截面减小处保护电器的安装要求，但是只有83版规范对不能安装保护电器时的工程处理方式做了明确规定，其他版本规范取消了此条要求，并未解释具体原因。据了解取消此条的原因是后两版标准是按照IEC 60364-4-473（后来这部分内容也作废了）以及IEC 60364-4-43 2008的规定编写的。IEC 60364-4-43 2008中规定了“3m”，但并未对其来由做具体解释。

### 3 支持导体截面减小的工程产品

目前市场上能够支持导体截面减小的工程产品有：

- 1) 穿刺夹
- 2) 母线插接箱
- 3) 母线T接端子
- 4) 电缆T接箱

### 4 产品规格举例

1) 国标13D101-7/10给出的预分支电缆

主干电缆		分支电缆截面 (mm <sup>2</sup> )	分支接头参考尺寸 (mm)			主干电缆		分支电缆截面 (mm <sup>2</sup> )	分支接头参考尺寸 (mm)			
截面 (mm <sup>2</sup> )	外径 (mm)		d1	d2	L	截面 (mm <sup>2</sup> )	外径 (mm)		d1	d2	L	
10	9	10	(2.5~3) D	1.7D	120	185	24	10、16、25、35、50、70	(2.5~3) D	1.7D	125	
16	9.5	10、16				240	11.6					150
25	11.6	10、16、25				300	12					
35	12	10、16、25、35				400	14					185
50	14	10、16、25、35、50			500	16						
70	16				630	18						
95	18				800	20						
120	20	10、16、25、35、50、70、95			125	1000	22				185	
150	22											10、16、25、35、50、70

图1 国标13D101-7推荐的预分支电缆规格

规格。从图1可以看出厂家的产品中最大截面 $1000\text{mm}^2$ 的主干线可以有 $10\text{mm}^2$ 的分支电缆。

2) 母线插接箱的规格由工程设计确定, 母线厂家根据断路器的规格大小一般提供630A以下的插接箱, 也有部分厂家能够提供800A, 1000A的插接箱, 再大的插接箱就无法安装了。

### 3) 母线T接端子的规格

根据厂家提供的资料, 厂家可以提供分支接线为400A~3150A的母线T接端子。

### 4) 电缆T接箱的规格由工程设计确定。

对于各种产品的应用范围、产品技术特性、优缺点等本文暂不讨论, 其共同点是工程应用后都可以改变导体截面, 通常为减小。

## 5 工程应用的问题

在工程设计中导体截面变化是一个经常性的问题, 从配电系统方面考虑, 供电电源(变压器或总进线处)至末端配电设备存在容量逐渐减小的问题, 就存在导体截面减小的问题。低压电力配电系统接线方式包括放射式、树干式、链式等。

工程设计中, 如果导体截面减小处能够安装保护电器, 设计人员从配电的合理和保护的配合性上考虑一般都设置保护电器, 但有些配电系统不能安装保护电器, 该如何处理? 仔细研读《低压配电设计规范》GB 50054-2011给出答案是通常要求安装保护电器, 除非计算满足保护要求。只有距离3m以内采取措施时可以不装保护电器。

目前市场上常用的低压保护电器产品有断路器、熔断器, 这两种产品兼有过负荷保护和短路保护的功能。笔者认为如果导体截面减小处能够安装保护电器, 设计师需要考虑的是过负荷、短路保护的配合, 而并非一定只安装一种保护。而且据笔者了解熔断器也无法只提供一种保护功能。

举例如下:

某厂房建筑高度15m, 其中某试验区域, 一共安装有9台设备, 设备额定功率、电流分别为

1#/1100kW、1672A; 2#/2001kW、2945A; 3#/650kW、988A; 4#/755kW、1235A; 5#/842kW、1400A; 6#/800kW、1216A; 7#/700kW、1064A; 8#/120kW、182A; 9#/240kW、364A。根据工艺使用要求、供电系统合理等因素综合考虑这9台设备由一台变压器配电, 最大运行时1#、2#设备同时使用或4#、5#、6#设备同时使用。

综合比较供电方案, 1#~9#设备由同一台变压器的同一母线配电, 分别设置有1#~9#共计9台落地式配电/控制箱, 其中1#~7#控制箱均为设备配套。

母干线上可以安装插接箱时, 均已安装, 如图2示i#、j#设备。对于1#~7#设备的配电, 各方案不同。

图2的配电方案, 分支线采用变截面安装, 长度大于3m, 约10m, 优点是施工方便、造价合理, 分支母线敷设路径上无可燃材料, 如果此段长度只考虑短路防护电器能保护分支回路, 利用IEC60364-4-43 2008给出相似三角形方法计算的话, 可以不设置短路保护。末端过负荷保护、末端线路的短路保护由1#~7#配电箱内的开关实现。为了工程可靠, 可以在分支回路、分支母线接头处安装测温装置, 提前发现故障, 测温装置为2~3个, 因为母线标准段有3m、4m和6m。

图3的配电方案, 分支线严格按照现行规范要求参考条文解释在长度3m处安装插接箱, 优点是满足规范要求, 缺点是大容量的插接箱改为配电柜或配电箱挂墙安装, 现场安装位置有限, 通常无法安装, 而且安装在房间的半空中, 影响美观; 同时由插接箱到1#~7#配电/控制箱采用母线还是电缆导体现场都会带来施工困难。

图4的配电方案, 分支线与母干线采用等截面, 优点是完全满足规范要求; 缺点是造成工程

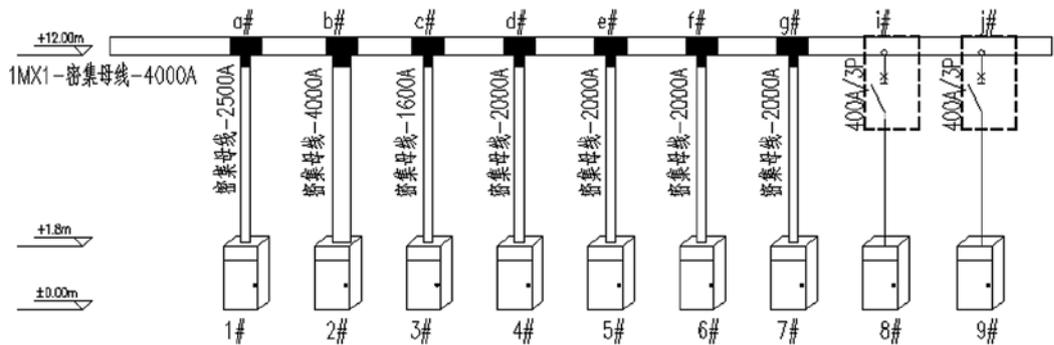


图2 某工程某支线配电系统示意图

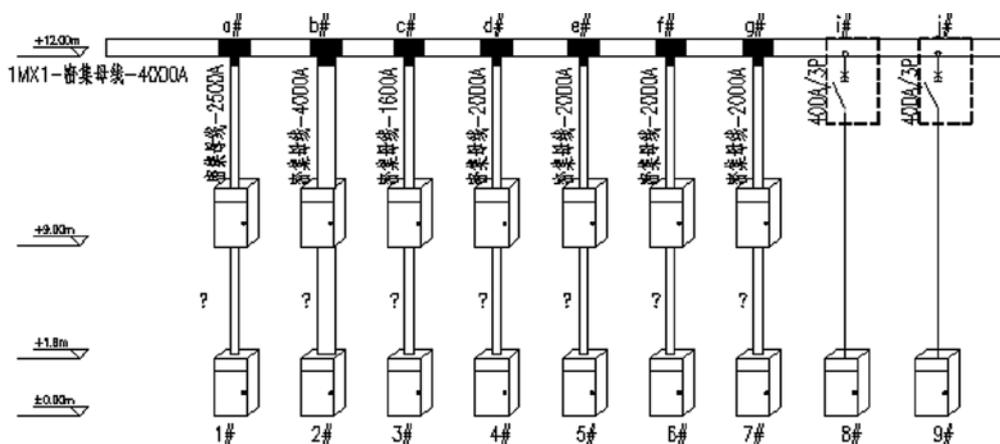


图3 按照规范要求设计的配电系统示意图一

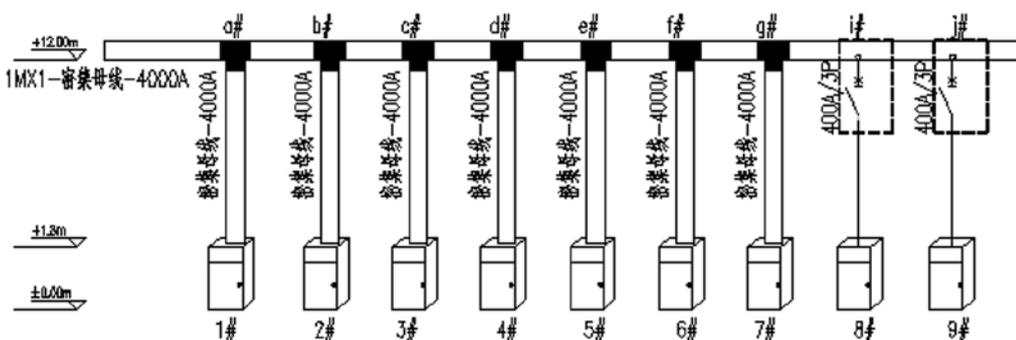


图4 按照规范要求设计的配电系统示意图二

投资的浪费，而且母线与1#~7#配电柜的接线也不容易施工，1#~7#配电柜为设备配套时连接更存在问题。

各种方案均存在自己的优缺点，工程实际中需要设计师结合工程需要设计经济、可靠、合理的方案。

## 6 小结

1) GB50054-2011中将过负荷保护和短路保护保护分别论述的原因是为了说明对两种保护的原则性要求，设计中这两种保护功能一般由同一个保护电器承担。目前市场上通用的保护电器熔断器无法单独承担一种保护功能。

2) GB50054-2011中6.3.4条从条文解释理解强调的是可以安装插接箱的情况，考虑插接箱的操作、维护。工程中插接箱内开关的操作可以采用电动操作机构来实现，同时>3m的高度不见得都不能维护，还需要结合工程实际情况确定。另外距离母干线截面减小处距离不大于3m的地方经常

无法安装插接箱。建议规范增加无法安装插接箱时应该采取的措施。

3) 按照GB50054-2011的规定，预制分支电缆、T接箱、穿刺夹的应用场合均能在导体变截面3m范围内使用，但对于干线截面和分支线截面的范围并无要求。如预分支电缆主干线 $1000\text{mm}^2$ ，分支线 $10\text{mm}^2$ ，支线长度小于3m是可以使用的吗？短路电流跟阻抗成反比，长度一定时，短路电流跟截面单位阻抗成反比，截面越小，短路电流减少越多，是否一定合理？关于变截面的长度需要按照

IEC60364-4-43和王厚余编《建筑物电气装置》给出的相似三角形法计算，工程中设计可以参考。

## 参考文献

- [1] 中国机械工业联合会主编.《低压配电设计规范》.北京:中国计划出版社,2012.
- [2] 中国机械工业联合会主编.《低压配电设计规范》.北京:中国计划出版社,1995.
- [3] 中国机械工业联合会主编.《低压配电装置及线路设计规范》.北京:中国计划出版社,1984.
- [4] 中国建筑东北设计研究院主编.《民用建筑电气设计规范》.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 中国航空工业规划设计研究院组编.工业与民用配电设计手册[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [6] 王厚余编.建筑物电气装置600问[M].北京:中国电力出版社,2013.

# 能源健康管理系统 在集中供热工程中的应用研究

■ 赵瑞霞 邓剑宏 「电气」

**摘要:** 供热工程作为传统的重大能源供应领域,存在系统能耗高、占地空间大、系统分布广、关键环节多等特点,使得能源系统的可靠、安全地管理对于供热质量和稳定具有决定性的作用,对我国城市居民生活水平具有巨大的影响。能源系统科学管理对改善城市环境,降低城市污染、节能减排等具有重要的意义。本文通过将健康管理机制、技术、系统引入供热工程的能源管理中,采用数字化、信息化管理手段及技术,建立能源健康管理系统,实现对能源系统的水温、端差、压力、振动频率、湿度等性能参数全寿命周期监控、报警、以及热换器、水泵等关键设备诊断及评价分析,有效解决了影响能源系统健康的关键设备故障诊断与健康水平定量评价,达到供热工程中能源系统的全面掌控与科学管理的目的,为创造和谐人居环境、塑造城市形象、保证城市可持续发展提供有力的保障。

**关键词:** 能源系统; 供热工程; 健康管理

## 1 引言

换热器、循环水泵和补水泵、全自动硬度在线监测软化水设备、低压变频柜、自动控制设备(自动控制方案及设备、PLC控制器、超声波热计量表、超声波流量计、电动调节阀、温度变送器、压力变送器)等作为供热工程能源系统<sup>[1]</sup>的主要组成设备对于整个系统工程的正常运行起到决定性的作用。由于热网结构复杂、分布广、系统能耗高、工作环境相对严酷,使得能源系统中关键设备在供热期以及非供热期均可能出现异常故障以及长期的性能老化,为整个能源系统的安全、稳定运行带来影响<sup>[2]</sup>。本文以“热换器”、“水泵”受环境、载荷影响容易出现性能下降、故障以及失效等问题,以供热系统的薄弱部件为研究对象,建立透明度与智能化程度更高的能源管理和辅助决策平台目标出发,从能源使用的全生命周期角度开展能源健康管理系统在集中供热工程中的研究。通过对重要的热网能源运行数据的集成,实现灵活可靠的热网能源过程监控<sup>[3]</sup>,在更低能耗、更低排放的水平下获取运行优化和最大化能源效率<sup>[4]</sup>。

作者简介: 赵瑞霞,女,高级工程师,2003年毕业于南京航空航天大学电气工程与自动化专业,现就职于中航规划市政工程设计研究院。

## 2 典型的系统架构分析

根据OSA-CBM+(Open System Architecture for Condition Based Maintenance:基于视情维修开放式系统框架)标准参考体系架构,设计供热工程中能源健康管理系统架构如图1所示。

其中体系组成包括:

- 1) 管理对象,供热工程中的容易出现故障、老化的设备,包括了水泵、热换器、自动软水器、低压变频柜等;
- 2) 数据获取,利用传感器及部分设备已有的自检数据,包括了温度、湿度、压力、振动、电流、电压、流量等指标;
- 3) 数据处理,利用编码协议、极值计算、傅里叶变换等算法,实现供热设备关键参数的处理,供后续监控、诊断、评估、预测;
- 4) 状态监控,利用工程门限、数据相关性、特征值异变等方法,实现供热关键参数的监控、异常状态识别、异常报警;
- 5) 健康评估,利用规则推理、模糊评判、支持向量机、统计评估等方法,实现供热系统关键设备、系统的健康状态评价、故障定位;
- 6) 健康预测,利用时间序列模型、多项式拟合等数据驱动方法,实现压力、温度等关键参数

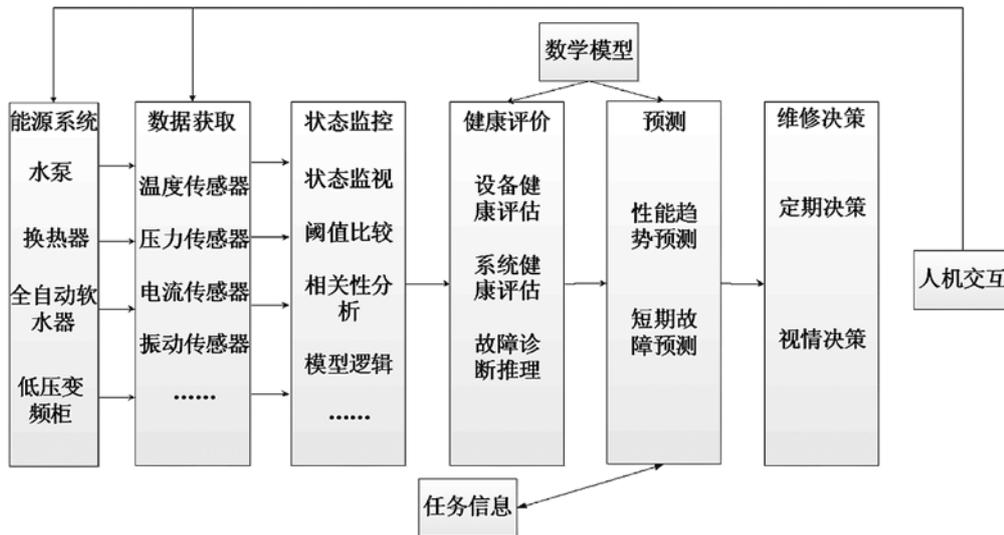


图1 供热工程中能源健康管理体系框架

趋势预测，估计未来异常可能性；

7) 维修排故决策：利用根据供热系统历史、当前、预测等分析结果，提出合理的定期维修、视情维修决策。

能源健康管理体系架构设计后，将重点针对其中的关键分系统、设备开展有针对性的健康管理分析。

### 3 热交换器健康状态分析

#### 3.1 热交换器健康监控

换热器是热力站的核心设备，包括了板式热交换器、热交换机组、宽通道焊接式板式热交换器、板壳式热交换器等。以管壳式热交换器为例，其工作压力从高真空到几十Mpa，工作温度从 $-100^{\circ}\text{C}$ 到 $1200^{\circ}\text{C}$ 的高温，水从具有一定高度的水槽流出，水的流量是由相应的水位高度确定，热交换器的使用主要实现对出口水温的控制。通过热交换器的工作结构进一步分析可知，热交换器出口水温所受影响因素包括了，进口水温、进口水量、进口蒸气流量、进口蒸气温度以及工作环境温度。

#### 3.2 热交换器故障诊断

由于热交换器利用高压缸的高温过热蒸汽加热来自水泵的进水，以U型热管为传热面，将来自汽轮机高压缸中的高温过热抽汽进入加热器。因此管道的泄漏、接口的泄漏是其主要的故障模式之一。根据统计分析，管道的泄漏占85%的比例，其主要故障原因包括了汽、水冲刷管道变薄，引起系统共振，给水酸性腐蚀，表现为水侧压力过大；接口处故障原因包括了热应力过大，管板变

形。由于热交换器的成本相对低、且工作相对稳定，维修简单，因此对其开展健康管理主要通过健康监控，掌握其工作状态，并对其工作过程出现的监控参数异常、超出门限时进行故障诊断。重点关注的指标为进水温度端差与出水温度端差，具体诊断模型如公式1所示。

$$\begin{aligned} \theta_i &= t_{sj} - t_{wc} \\ \theta_o &= t'_{sj} - t_{wj} \end{aligned} \quad (1)$$

其中：

$\theta_i$  为进水端差；

$\theta_o$  为出水端差；

$t_{sj}$  为汽侧压力下蒸汽饱和温度；

$t_{wc}$  为给水出口温度；

$t'_{sj}$  为疏水温度；

$t_{wj}$  为给水出口温度；

实际的监控过程中，可根据工程经验及历史监控数据，分析判明历史过程中端差的工程门限，从而判明热交换器的故障状况。对于超出门限的设备，通过现场的排查实现维修与故障恢复。

#### 3.3 热交换器健康状态评估

根据前面分析，影响热交换器健康状态的因素较多，包括了温度、振动、压力等，可表征其健康状态的指标也较多，因此采用传统的模糊评判方法会导致其健康状态的误判、漏判等问题。对于长期安装使用的热交换器，其在不同季节、月份所受影响相似，即同年份的对应时期内具有可比性。本文采用了基于统计的评估方法，实现利用关键参数评价交换器健康水平，具体分析流程如图2所示。

1) 评估参数项选取：以进水端差为例，该参数由于受温度、振动影响，使其在典型的月份中曾显的数据具有统计特性（可认为服从正态分

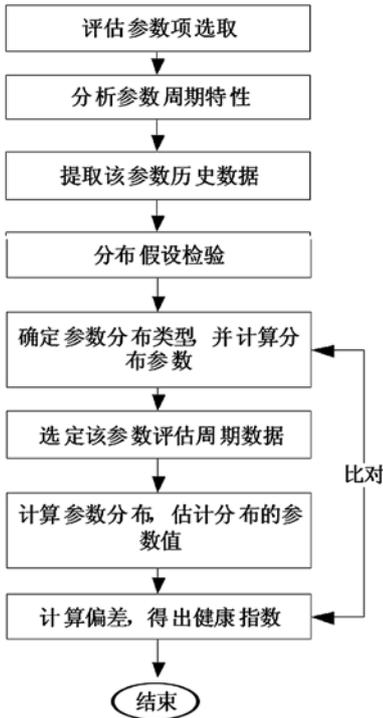


图2 供热工程中能源健康管理框架

布), 提取该参数2007年12月历史数据, 进行检验其分布特性;

2) 分布检验, 利用历史数据, 分别采用极大似然法、核密度估计法, 估计参数所属分布类型及概率密度函数参数, 获取该参数在2010年数据服从的正态分布, 如图3所示;

3) 统计评估: 利用2007年12月统计分布为基准分布, 将2012年12月分布与2010年分布计算分布差异散度得出健康评估

指数 (HI; Health Index), 并将2007年5月分布与2010年分布最大值2.0001为最大散度, 计算得出2012年该热交换器健康评估结果如下。

4) 健康计算:

$$HI = (1 - \frac{KL}{KL_{max}}) \cdot 100 = (1 - \frac{1.0256}{2.0001}) \cdot 100 = 48.722$$

## 4 水泵健康状态分析

### 4.1 水泵健康监控

水泵主要安装于供热工程中的热力站, 主要用于供水、供热的传输, 包括了循环水泵和补水泵。其中, 循环水泵是输送流体或使其增压的机械。其作用是向汽轮机凝汽器供给冷却水, 用以冷却凝汽轮机排汽; 补水泵是为保持供热系统内充满水及必须的工作压力, 在设定点向供热系统补充供热介质。根据水泵的工作原理分析, 水泵在供热期和非供热期存在着油液清洁度、颗粒聚集、污染、径向力不平衡等, 可能导致循环水泵出现故障及老化。例如, 循环水泵的液压阀卡住引起液压阀动作缓慢或不动作, 循环水泵启动失败。水泵的健康管理主要监控的参数包括, 承压、电机电压、水泵效率、水泵流量、密封性、工作温度等。

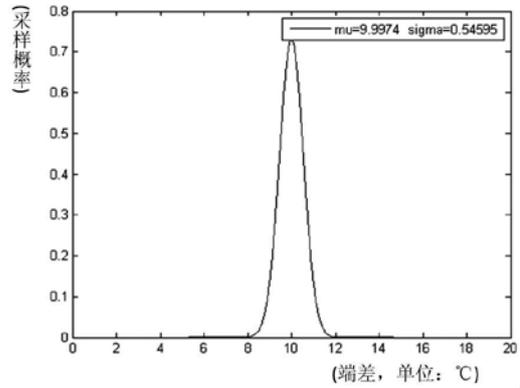


图3 2010年数据统计分布曲线

### 4.2 水泵故障诊断

水泵作为机电类产品, 在工作过程中受到温度、振动、流量等载荷影响, 利用振动信号对其进行故障诊断最为有效。根据以往经验与统计, 水泵的常见故障包括了转子不平衡、转子不对中、支座松动、绕组发热等, 以上故障模式都会产生对水泵的振动的的影响。针对振动信号的故障诊断方法较多, 比较常见的包括傅里叶变换、小波变换等。本文采用基于时域平均的信号消噪与诊断方法, 在时域中从混有噪声干扰的信号中提取周期分量, 按照信号周期对原始信号进行连续的等长度截取, 并对各段信号进行累加平均计算, 得出处理后的单个周期的新序列。

以 $\Delta t$ 为间隔的采样序列 $x(n), n = 0, 1, 2, \dots, N1$ , 其中感兴趣分量的周期为  $T$ , 则时域平均后新序列为:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n - m_k) \quad (2)$$

其中,  $n = N1 - M + 1, N1 - M + 2, \dots, N1$ ;

$M$  为平均后的新序列长度;

$M = T / \Delta t$  的就近取整值;

$m_k$  为  $kt / \Delta t$  的就近取整值,  $N$  为平均段数;

由于水泵振动信号为较为典型的周期信号, 因此采用时域平均方法进行信号消噪和提取特征频率可以取得良好的效果。其主要步骤如下:

Step1: 根据水泵的特点和故障诊断要点, 明确关键特征频率, 确定感兴趣频率分量。

Step2: 根据采样频率和所选感兴趣频率得到平均段数和新序列长度。

Step3: 计算信号经时域平均后的新序列, 观察信号时域波形, 进行趋势分析。

Step4: 对新序列进行快速傅里叶变换, 观察和分析其特征频率及其各阶倍频。为了提高频域分辨

率，进行变换前，一般需对新序列进行周期延拓。

Step5：将频率特征与故障信号特征比较，判断部件故障，实现水泵的故障诊断。

### 4.3 水泵健康状态评估

根据水泵的健康监控分析，其健康状态主要由承压、电机电压、水泵效率、水泵流量等关键参数影响，采用模糊评判的方法对其健康水平进行评价，水泵健康状态评估原理如图4所示。

1) 评估指标选取，本文主要选取了电机电压、水泵功率、水泵流量三个指标作为其评估指标；

2) 评估权重分配，采用专家经验与评判矩阵计算相结合，可有效解决专家经验不准的问题，构造的成对评判矩阵如下，同时采用判断矩阵对应的最优权重向量及遗传算法，得出最优权重向量为 (0.5,0.25,0.25) ；

$$A = \begin{bmatrix} [11] & [57] & [35] \\ \left[\frac{1}{7} \frac{1}{5}\right] & [11] & \left[\frac{1}{5} \frac{1}{3}\right] \\ \left[\frac{1}{5} \frac{1}{3}\right] & [35] & [11] \end{bmatrix}$$

3) 指标级健康评估，针对三个指标，分别采用规则门限、退化率两种方法进行评估，其中电机电压、水泵流量利用主要采用统计方式，利用历史数据划分其健康区间，而水泵功率主要采用了以初始平均功率为基准，根据其设计给出的年退化率，按照百分比退化尺度进行打分规则划分，具体如表1所示。

4) 健康指数打分，利用水泵历史数据，计算月平均值结合上述打分规则，给出水泵健康水平衡量指标。

表1 水泵关键指标打分规则

指标	原始值	健康指数	映射关系
电机电压	(0, 320, 360, 380)	(0, 60, 80, 100)	线性映射
电机功率	(0, 3%, 10%, 15%, 20%, 100%)	(100, 90, 80, 60, 0)	指数映射
水泵流量	(800, 500, 0)	(100, 60, 0)	线性映射

## 5 全自动软水器健康状态分析

全自动软水器是一种运行和再生操作过程全自动控制的离子交换软水器，利用钠型阳离子交换树脂去除水中钙镁离子，降低原水硬度，以达到软化硬水的目的从而避免碳酸盐在管道、容器、锅炉产生结垢现象。全自动软水器受再生周期设定过大，正洗时间偏短，给水水压不稳引发的盐箱补水过少、吸盐过少、正洗不足，以及在盐箱中的盐少等因素，造成全自动软水器的故障及健康状态异常。由于全自动软水器的健康表征比较明显，因此其健康状态主要可通过关键参数监控与判断，主要监控的参数包括：原水水质、出水水质、硬度、进水压力、进水硬度、进水水温、环境温度、相对湿度等。

## 6 低压变频柜系统健康状态分析

低压变频柜系统主要为循环泵、补水泵提供变频支持，具有控制电路结构简单、成本较低，机械特性硬度也较好，能够满足一般传动的平滑调速要求。低压变频柜包括：正弦脉宽调制、矢量控制变频调速、直接转矩控制等方式。低压变频柜的主要故障包括了主控电路故障，主要包括主板，

电源板，逆变器、滤波电容等主控电路损坏；冷却直流风扇故障；外围控制器件故障；散热不良等。其主要故障原因有，外部的电磁感应干扰、环境问题、参数设置等原因。由于低压变频柜采用了自检手段，因此健康管理过程主要通过监控关键参数进行报警，具体参数包括电压、功率、过载电流、加



图4 水泵结构图和实物图

速时间、控制精度、延时等。

## 7 能源健康管理系统设计

在完成热交换器、水泵等典型供热系统设备健康管理技术研究基础上,开展健康管理系统<sup>[5][6]</sup>设计,其主要由四大子系统组成,包括实时监控子系统、诊断与预警子系统、健康评估子系统、综合信息管理子系统组成。系统组成如图5所示:

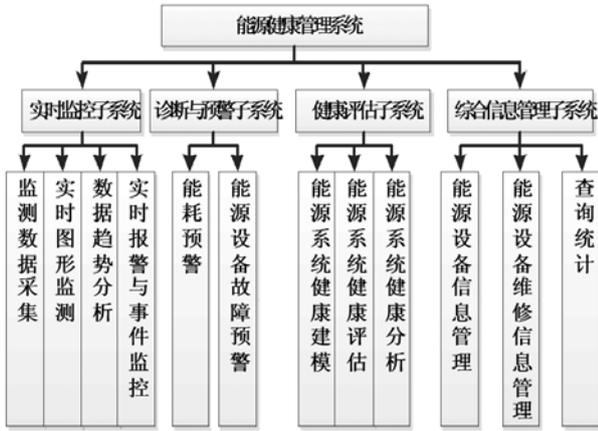


图5 能源健康管理系统组成

其中:

1) 实时监控子系统:采用先进的图形化技术,实现热网运行过程和能源应用过程的可视化;同时提供超限报警、事件监视、以及趋势分析等智能化监测手段,实现对热网的实时运行情况、实时能耗情况以及关键绩效指标的监测,为能源调度管理以及相关决策提供辅助支持。其中,检测的内容除了能源的监测以外还包括了关键的能源系统内设备的工作状态参数(具体参数见2、3、4、5部分的内容)。

2) 诊断与预警子系统:根据本文的2、3部分的研究,采用基于温度差异、信号处理等方法,研制能源系统典型设备的故障推理引擎,实现热交换器、水泵等关键设备故障诊断。同时,采用非参数回归分析、多项式拟合等方法,提供基于能源系统关键参数的趋势预测功能,根据实时预测值与预警门限的接近程度,对热网运行过程的能耗趋势、增长情况、节能情况进行统计分析,实现热网运行能耗信息的高度集成,从而有效改善整个热网能源使用的跟踪与预计能力,为管理者提供可视化的能源使用与消耗状况,辅助决策层对节能增效管理策略的制定和实施。

3) 健康评估子系统:主要提供管网能源设备

的健康评估建模管理功能,通过图形化的建模工具,实现对能源系统的层次化建模,配置待评估对象的评估节点参数、数据权重信息以及评估算法。在此基础上,提供评估执行服务,通过实时评估与历史评估服务,实现能源设备的24小时值班评估分析,定时给出系统健康状态评估结果。针对评估过程中出现的健康等级退化,提出健康报警。管理者可通过健康趋势分析定期查看系统健康报表,从而为提前安排检修、排故提供建议。

4) 综合信息管理子系统:系统主要提供了能源设备的基础信息管理、测试记录信息管理、故障与维修信息管理等功能。同时,提供按照供热时间、供热区域、供热系统等综合查询功能。

## 8 结论

能源健康管理系统采用了世界先进的能源系统平台解决方案,通过建立透明度更高、智能化程度更深的能源调度、管理和辅助决策平台,从能源使用的全生命周期角度,通过对重要的热网能源运行数据的集成,实现灵活可靠的热网能源过程监控,在更低能耗、更低排放的水平下获取运行优化和最大化能源效率。

本文主要对供热工程能源健康管理系统设计及功能应用进行了研究,在分析了热交换器、水泵关键系统故障及与健康状态相关参数分析基础上,提出能源健康管理设计主体框架及应用功能,对我国相关供热领域的系统可靠、安全管理具有一定借鉴作用。

## 参考文献

- [1] 黄斌.既有集中供热二级管网系统升级改造模式及应用研究.河北工业大学.2011.
- [2] 王军、王雁等.采用热量表动态网络提高集中供热系统性能.计算机工程与应用.2009.
- [3] 赵艳涛.大连开发区供热公司集中供热远程监控系统.大连理工大学.2007.
- [4] 王玉峰.区域供热燃煤锅炉房的优化配置.北京建筑工程学院.2010.
- [5] 孙辉.热网远程监控系统的设计及安能城市热网的应用.合肥工业大学.2009.
- [6] 吴明强、房红征、伊大伟.复杂系统故障预测方法与应用技术研究.计算机测量与控制.2010.

# 北京雁栖湖国际会展中心 空调绿色节能技术应用

■ 孟凡兵 「暖通」

**摘要:** 本文通过综合分析该工程所处地域特点、使用功能、负荷分布等因素,遵循节能环保、因地制宜的原则,以满足使用可靠为主线,兼顾投资、运行等综合效益,从冷源到末端,以适值、适量、适时、适处的原则,充分利用空调领域的节能环保技术,诸如复合能源利用、能量回收、地道风等技术,力争实现真正意义上节能环保空调。

**关键词:** 节能;地源热泵;复合能源;地道风

## 1 引言

面对能源危机和环境变迁,低碳排放,绿色节能是当今建筑领域的主题。中国宣布2020年减排目标,碳排放下降40~50%。在具体的每一个工程项目中,如何因地制宜、积极采用节能环保技术,是每位设计者的绿色使命。

北京雁栖湖国际会展中心,作为对外交流的窗口,建筑本身应成为高科技、新能源、节能减排的典范。但空调节能不单单是新技术、新设备的罗列,更不单单是节能概念的引入与节能亮点的闪现。

空调节能应注重其节能技术应用的合理性,需适值、适量、适时、适处地分析空调用能的合理性。即:适值,按需确定能源品种,防止高值低用;适量:提高能源转换效率,降低绝对消耗量;适时,提高用能系统的自动监测和控制水平,实现“只在需要时供给”;适处,提高设计和规划的精细程度,确保只向有需求处供给。

## 2 概况

北京雁栖湖国际会展中心,顾名思义,是以会议和展示为主要功能的综合建筑,建筑风格为具有时代特征以及中国传统建筑语言相结合的现代建筑,传递出中国建筑文化信息,运用现代手法以及现代建筑技术、材料打造现代生态建筑。如图1所示。

该项目位于雁栖湖西岸范崎路东侧,用地规模约10.8ha,总建筑面积79000m<sup>2</sup>,地上为44000m<sup>2</sup>,地下为35000m<sup>2</sup>,容积率0.4,建筑高度31.9m。建筑分为地上5层,地下2层,地上2层为建筑主体功能,周围是环形通廊,建筑中心为可容5000人开会的多功能厅。

本工程于2011年2月完成设计,2011年7月竣工并投入试运行,该工程已获得绿色三星设计评价标识,目前正在申请绿色三星运营标识。

到目前为止,该国际会展中心已成功为APEC会议、北京国际电影节、2015年第五届世界水大会提供了会场服务,并收获良好的社会效益。

作者简介:孟凡兵,男,研究员,1998年毕业于哈尔滨建筑大学暖通专业,现就职于中航规划建筑设计研究院。



图1 北京雁栖湖国际会展中心效果图

### 3 设计目标理念

本项目定位为国家绿色设计、运营三星级建筑，在项目整体过程中坚持以“绿色建筑”和“节能减排”为主导思想，积极实践创新绿色低碳、生态环保的建设理念，把项目打造成具有自主创新要素汇集、科技与文化、旅游效应的绿色宣传基地。

本项目势必成为北京市绿色建筑会展类的典范。成为世界了解中国发展的窗口，从节地、节能、节水、节材、室内环境和运营管理六个方面充分采用相关绿色生态技术，实现减低建筑能耗、节省运营费用的现实目标，并对其他相似项目的建设有示范带动意义，成为北京首个绿色建筑三星级全过程认证的绿色会展类建筑。

量化目标：  
建筑总能耗低于国家备案标准的80%，即实现节能率60%。

### 4 本专业采用的节能措施

针对三星级目标，结合本工程实际情况和绿色建筑条款，本专业所能采取的技术措施如图2所示。

1) 地下空间的利用：将动力站房置于地下一层，节省地上空间；

2) 建筑自然通风：侧窗和屋顶设置电动开启窗；

3) 建筑遮阳设计：侧窗设置外遮阳，有效减少热辐射，减少空调能耗；

4) 空气质量检测：人员密集区域设置二氧化碳检测，并与新风阀连锁，有效去除pm2.5颗粒物；

5) 围护结构节能：通过详细计算围护结构传热系数，增强保温性能，减少能耗，满足并优于节能标准要求；

6) 水源热泵高效空调；

7) 排风热回收：进行热回收的同时，利用地道风；

8) 设备维护及监控：空调通风系统纳入BA

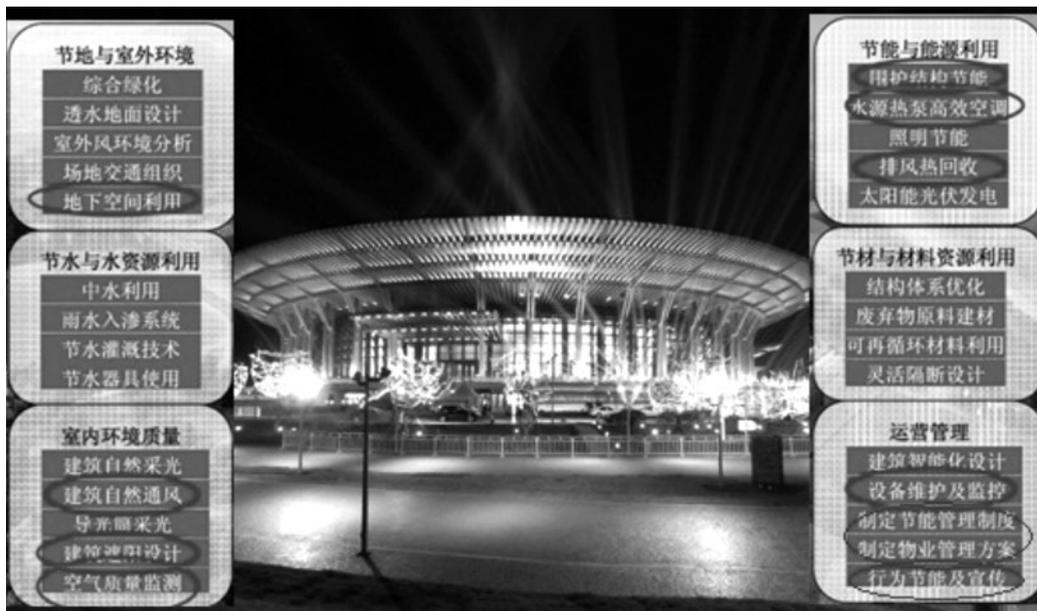


图2 节能技术措施分布图

自动控制系统；

- 9) 制定能源管理制度；
- 10) 制定物业管理方案；
- 11) 行为节能及宣传。

## 5 空调冷热源影响因素分析

根据本建筑的规模和使用功能，本建筑设置集中的空调系统，冷热源集中设置，夏季需供冷，冬季需供热。面对多种多样的空调冷热源形式和节能环保技术，本文针对该项目的特点对冷热源方案的确定作如下分析。

### 5.1 气候地域特点和负荷分布

气候地域特点是影响空调冷热源形式的重要因素之一。我国地域辽阔，不同地区气候分布差异较大，南热北冷、东部潮湿、西部干燥。北京地处华北地区，其所处气候分区为寒冷地区，建筑物本身存在内区空间，一年四季要兼顾供冷供热。

空调冷热负荷和采暖热负荷分布如表1所示。冷、热负荷分布图见图3、图4。

表1 冷热负荷统计表

冷负荷		热负荷	
夏季空调kw	冬季空调内区kw	冬季总供热kw	冬季基础热负荷kw
8186	550	6000	3340

从负荷参数分布看出，除冬、夏季常规冷热负荷需求外，冬季在建筑物内存在小部分冷负荷需求，由于会展中心的使用功能所致（如图5所示。）在大型会展会议期间峰日存在较大负荷需求，而在平日非会展会议时段，为节能运行，将冬季负荷调制值班运行状态，热负荷大大降低，形成冬季基础热负荷，约占总负荷的55.6%。

负荷分布和使用直接影响冷热源的配置与投

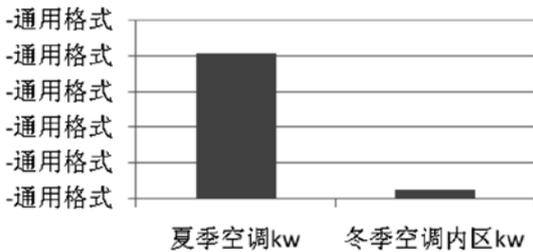


图3 冷负荷分布图

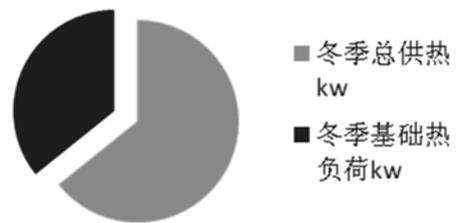


图4 热负荷分布图

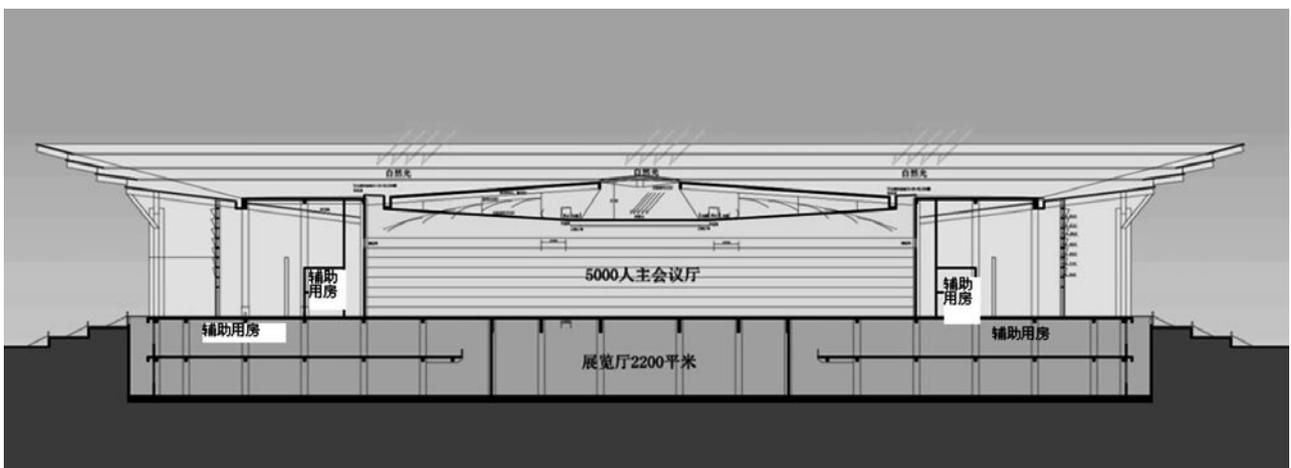


图5 主要功能分布

资,既要考虑总体满足峰日需求,又要兼顾平日节能运行。对于地源热泵系统,以最高的效率服务于最常用的需求,避免高投入的设备长期处于闲置状态,造成资源浪费,考虑调峰负荷的设备配置,可以减少井的数量,减少初投资。

### 5.2 当地政府对节能措施的政策

地源热泵系统属可再生能源系统,是经济有效的节能技术,如运用得当,不仅节能、节省运行费用,系统高效、经济,且环保效益显著。因此,地方政府对采用地源热泵系统建筑通常具有鼓励政策,给予一定的经济补贴。经与怀柔当地水务部门沟通和多次论证,对该项目采用地源热泵系统予以批准。

### 5.3 地源热泵换热系统勘察

由于环境保护越来越受到各界重视,在确定地源热泵系统方案之前,依据《地源热泵系统工程技术规范》(GB50366-2005)(2009版)第3.1.1条之规定,应对潜层地热能资源进行勘察,并出具相应勘测评价报告。经勘测,此区具有一定的换热能力,但受场地面积和地形的限制,不能满足全部负荷需求。

## 6 冷热源的确定

综合分析该地区的气候特点、建筑物的用冷用热的负荷特点、地理环境以及周围的市政情况,适宜采用复合式地源热泵系统,因此确定采用水源热泵+常规电制冷+燃气锅炉的复合能源系统,即由清洁能源地源热泵承担系统的基础负荷,最大限度减少污染物和二氧化碳排放。系统原理如图6所示。具体如下:

**热源:**冬季空调热源采用地源热泵系统+燃气锅炉,其中地源热泵系统负担平时运营时的冬季基础热负荷,既总负荷的56%。燃气锅炉在调节峰值热负荷期间与地源热泵机组并联运行,最大限度减少锅炉负荷。

燃气锅炉容量在选型时充分考虑了该建筑物的重要性、系统的安全可靠性等因素,并适当保留了余量。

地源热泵机房位于地下2层,内设2台地源热泵机组,制热工况:热水进出口:40℃/45℃。夏季利用地源热泵机组进行热回收,作为夏季太阳能生活热水系统的辅助热源。

锅炉房位于建筑主体以外,在院区的东北侧

独立设置,与冷却塔处于同一辅助区域,避免了烟囱和冷却塔对建筑物美观的影响,同时便于锅炉间泄爆,提高了安全性。该热源同时为冬季太阳能生活热水系统提供辅助热源。

**冷源:**空调源采用地源热泵系统+水冷冷水机组,其中地源热泵系统负担平日时的夏季基础冷负荷,水冷机组在调节峰值冷负荷时启用与季地源热泵机组并联运行。运行时最大限度减少开启水冷冷水机组。以高效热泵机组运行为主。

设置两台水冷机组,与地源热泵机组同设在一个站房房内;制冷工况下冷冻水进出口:12℃/7℃,制冷量2813kW/台;冬季利用地源热泵机组进行冷回收,为建筑内区的空调系统供冷。

**冷却水系统:**设置4组冷却塔,其中两台为调峰水冷机组对应,冷却水供回水温度为32/37℃;考虑到本建筑重要国际会议期间安全可靠的重要性,另两台作为备用,与地源热泵机房内的2台地源热泵机组对应,如图6所示。

## 7 冷热源节能运行策略

节能运行策略是绿色建筑的重要环节,尤其是冷热源头,可实现对所有机电设备的集中管理和自动监测,确保建筑内所有机电设备既可以安全运行达到最佳状态,又可以节省系统运行能耗,并及时发现故障,提高建筑内人员的舒适感和工作效率,最大限度地延长设备的使用寿命。

本工程采用集散式控制管理方式,对现场设备进行分散控制、集中管理,各现场控制器可实现点对点的双向通讯。通过优化机电设备控制工艺流程,制定符合本项目特点和特色的节能控制策略,节约长期运营成本、延长设备生命周期、节省运营管理人员,真正实现“水、电、气、暖、机”的统筹管理、可控运营和节能降耗之目标。具体如下:

1) 冬季供暖系统控制方案:地源热泵机组优先  
热源系统包括:2台地源热泵、锅炉侧3台换热板换、5套子系统采用群控,控制流程。末端供回水温度低于设定值时设备开启顺序(此时相对应的泵、阀将同时动作)。1号地源热泵机组(热回收)→2号地源热泵机组→锅炉侧第1台板换→锅炉侧第2台板换→锅炉侧第3台板换。

地能井泵根据地能采集井供回水总管温度及地能热泵机组的最小需水量进行数量控制,在

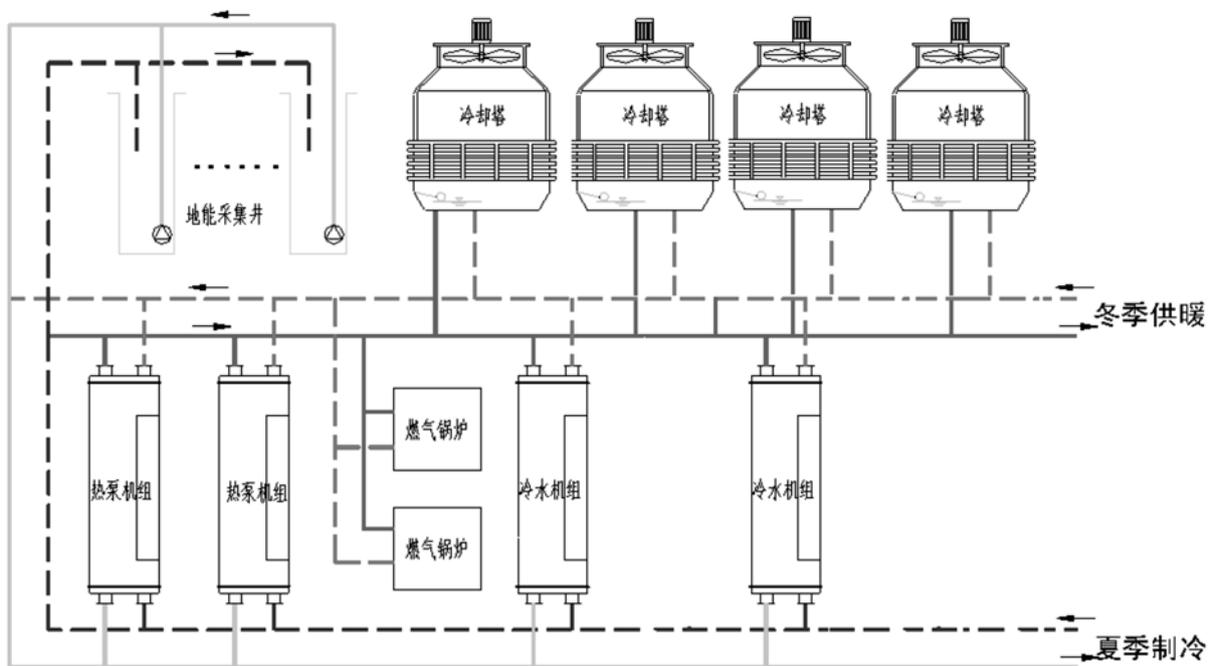


图6 动力站原理图

进行数量控制时，可根据每台水泵的累计运行时间，进行水泵的轮换使用达到水泵的合理运行。

末端供回水温度高时设备停止顺序（此时相对应的泵、阀将同时动作）：锅炉侧第3台板换→锅炉侧第2台板换→锅炉侧第1台板换→2号地源热泵机组→1号地源热泵机组（热回收）

2) 夏季制冷系统控制方案：地源热泵优先

冷源系统包括：2台地源热泵、2台冷水机组、4台冷却塔、20口地能井水泵；及相应循环泵。

控制流程：末端供回水温度高时设备开启顺序（此时相对应的泵、阀将同时动作）：

1号地源热泵机组（热回收）→2号地源热泵机组→1号冷水机组（冷却塔同时开启）→2号冷水机组（冷却塔同时开启）

地能井泵根据地能采集井供回水总管温度进行数量控制。

末端供回水温度低时设备停止顺序（此时相对应的泵、阀将同时动作）：

2号冷水机组（冷却塔同时开启）→1号冷水机组（冷却塔同时开启）→2号地源热泵机组→1号地源热泵机组（热回收）

3) 热回收提供生活热水加热系统

生活热水热源以太阳光优先，太阳能不足

时，优先使用热泵热回收能量，二者均不能满足要求时，再由锅炉热源补充保证。

## 8 地道风的应用

地道风利用是可再生能源利用的途径之一，在建筑通风空调中的节能效果显著。它是利用地道风作为冷热源的系统，由于地道风夏季温度低，冬季温度高，故利用天然的地层蓄热（冷）性能，为建筑物提供冷（热）量。通过与地道壁面的传热，达到调温的目的。因此，地道风不论冬季还是夏季，都非常有效。

北京雁栖湖国际会展中心造型优美独特，作为建筑呼吸系统的空调新风口百叶窗却成为了影响外立面的主要矛盾之一。

为解决这一矛盾，遵照因地制宜的原则，结合新风需求和建筑形式，采取了地道风的新风取风方式。

在建筑物的北侧设置了2条长65m，有效截面尺寸为2.7m×2m（宽×高）的混凝土地道，地道上面覆土厚度为6m，利用地道避免的热交换，对引入的新风进行预处理（预热、预冷），达到节能的目的。经过数值模拟分析计算，夏季可使新

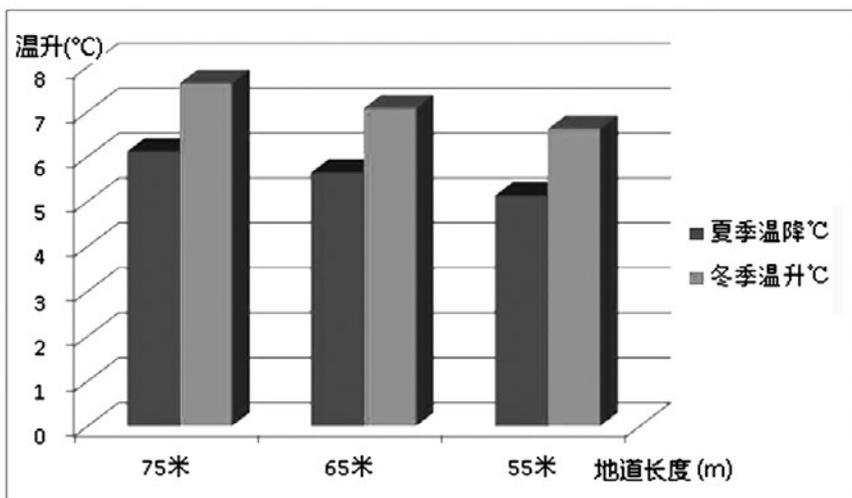


图7 地道风温度变化分析

风温度降低约5.5度，冬季预热新风温度可上升约6.8度（如图7所示）。

## 9 末端空调系统节能

会议厅、入口大厅、多功能厅等大空间区域空调系统采用了低速风道全空气双风机系统，过渡季可实现100%全新风运行。减少冷机运行时间。

办公室、媒体办公等小空间区域采用风机盘管加独立新风的系统，有利于减少新风机房面积，减少低区吊顶内占用空间。新风机组为全热回收新风机组，设置初效、高压静电中效过滤器，加湿器采用湿膜循环水加湿器。

负荷侧的空调机组、新风机组冷（热）水出口设置动态平衡电动调节阀，风机盘管设电动两通阀，风机盘管水系统支路设置自力式压差平衡阀。

大空间区域采用合理的气流组织，冬季设置了地面辐射供热系统，达到节能运行的目的。

## 10 小结

1) 空调整节能应注重其节能技术应用的合理性，需适值、适量、适时、适处的分析空调用能的合理性。

2) 地源热泵系统是节能环保的有效技术措施，忌盲目采用，对于水文地质资料不应想当然，应结合地域特征、地质条件、建筑物功能等因素进行充分的论证分析，尤其是特殊地形地貌，要充分考虑安全性、节能性与创新性的相互关系。

3) 应根据项目功能的重要程度，对空调的能源利用进行可靠性分析，尤其是采用创新技术时，应将安全可靠置于首位，必要时需考虑应急措施。

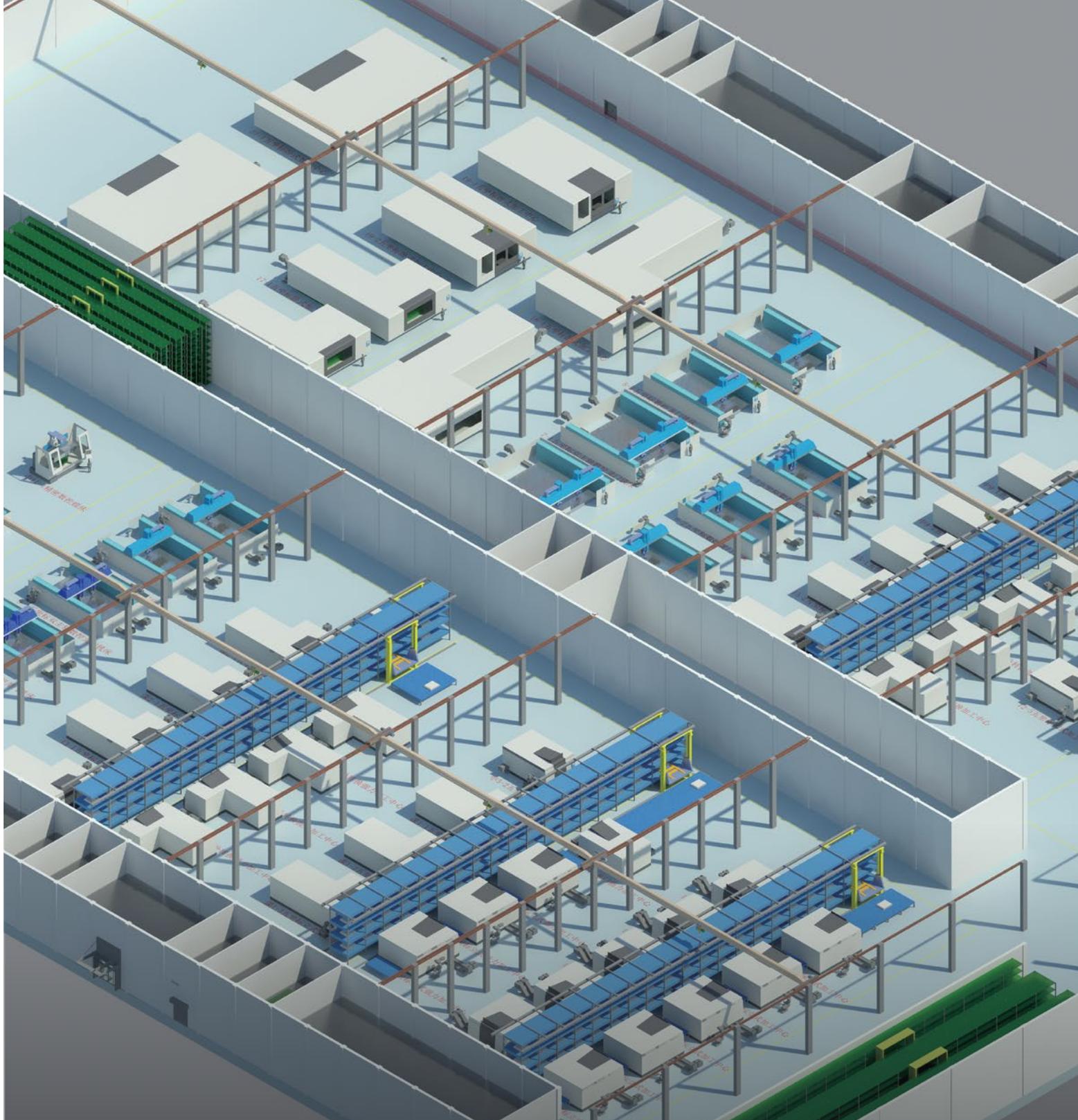
4) 国家对地下水资源保护越来越重视，尤其是采用水源热泵，应采取安全可靠的回灌和监测措施，并得到当地水务部门的批准。

5) 地道风的采用应采取好取风口的安全防护以及污染物防护，对影响空气品质的因素应设置处理措施。

6) 节能运行策略是绿色建筑的重要环节，节能设计+节能设备≠节能，绿色建筑仅仅“绿色设计”是不够的，应注重运行和调试，实现真正意义上的绿色节能。

## 参考文献

- [1] 《地源热泵系统工程技术规范》GB50366—2005（2009版）。
- [2] 《北京市平原区地源热泵系统适宜性分区评价》董殿伟等《北京水务》2010年2期。



## 中国航空规划设计研究总院有限公司 技术研究院

技术研究院是公司的研发中心（COR），业务定位以工程领域基础研究、前沿技术、应用技术为对象，紧密结合行业发展趋势和公司规划、咨询、勘察、设计、建设和运营等各项业务发展需要，开展探索性和应用性研究，形成对公司发展的技术引导和引领，成为公司经营生产项目的强大技术支撑，培养复合型和研究型的高层次技术人才。

技术研究院秉承中航规划的企业文化理念，开拓创新，勇于进取，以成为公司技术研发和品牌创新的主要技术平台而不懈努力。

2016年第1期（总第123期）  
2016年2月出版



伊金霍洛旗全民健身体育馆