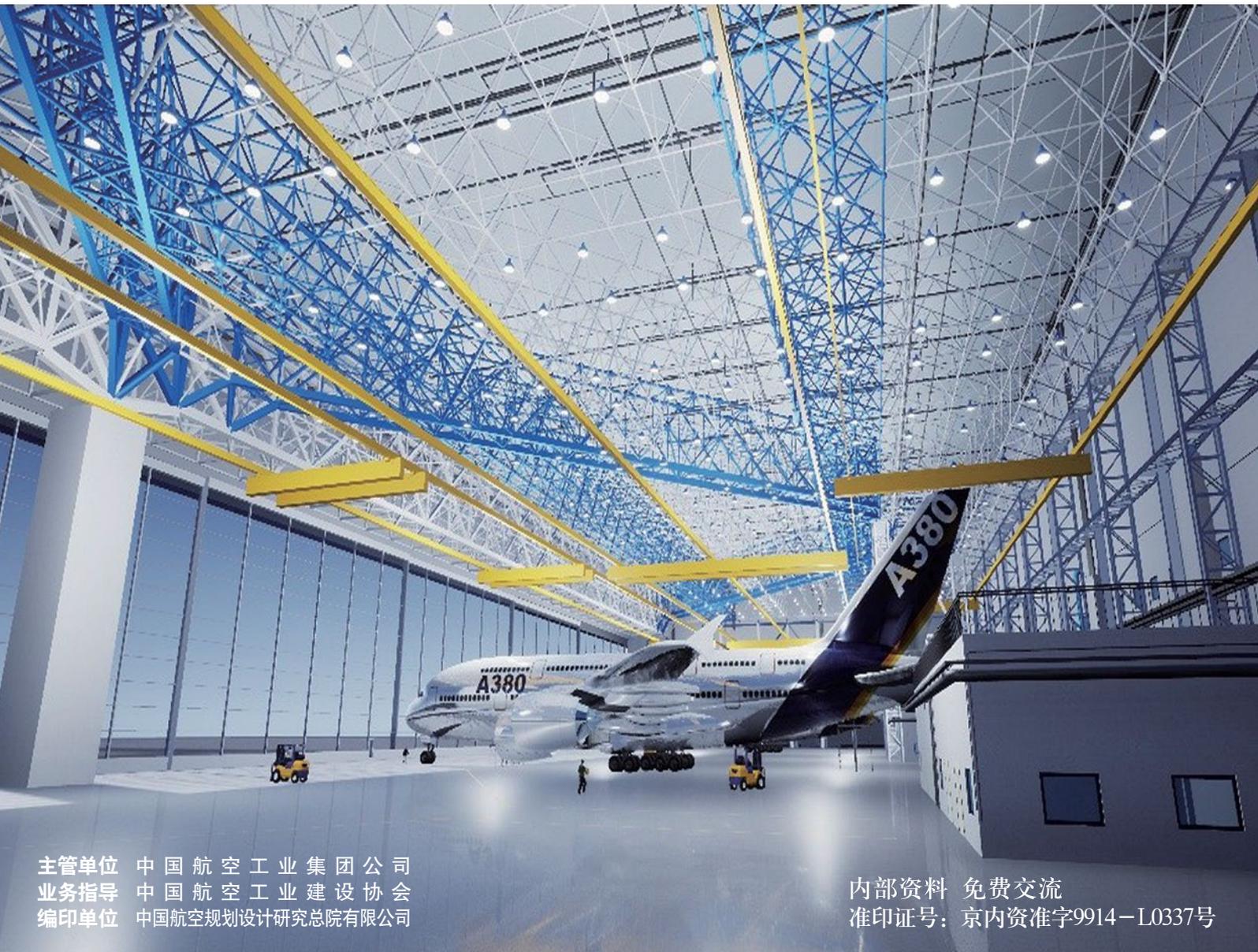
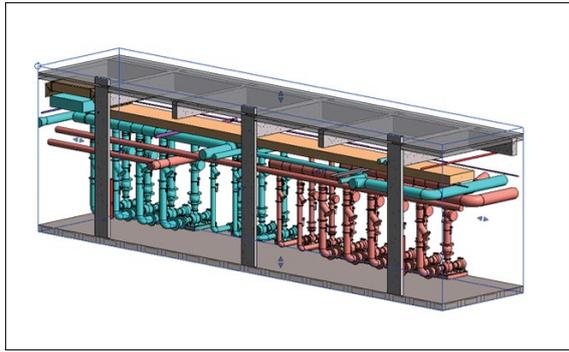
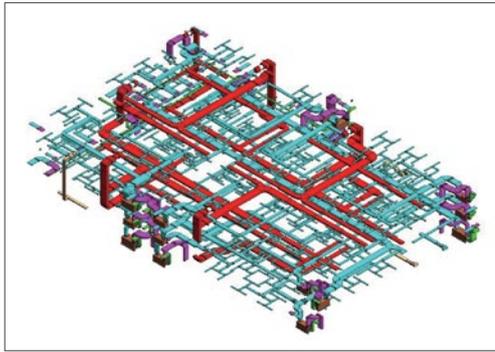
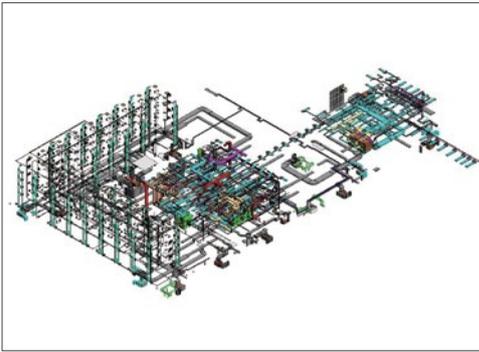


# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2018年第4期 总第138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

## 北京新机场南航基地机务维修区工程BIM应用

**项目名称：**北京新机场南航基地机务维修区工程

**建设单位：**中国南方航空股份有限公司

**设计单位：**中航建投民航工程设计研究院、航空工业规划技术发展中心 BIM工作室

### 项目简介：

北京新机场南航基地机务维修区工程，位于北京新机场机务维修区W-01-03地块内，项目总用地面积为16万m<sup>2</sup>（约242亩），总建筑面积20万m<sup>2</sup>，包括机库、航材库、立体库、特种车库、危险品库、安检楼、食堂、倒班宿舍等构筑物等21项。

### BIM技术应用：

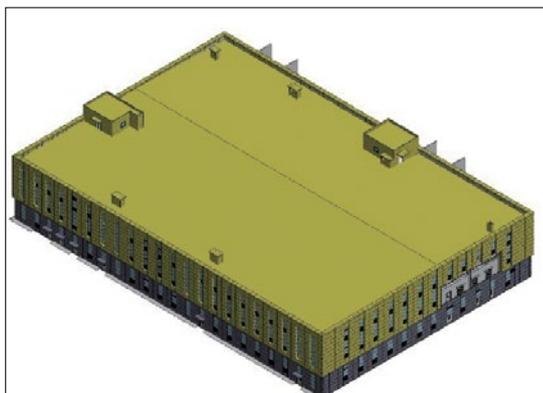
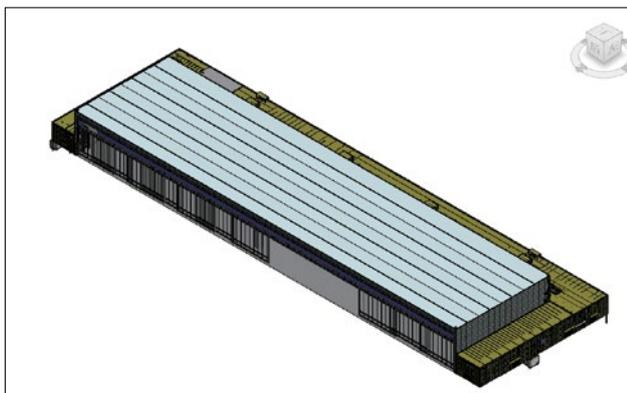
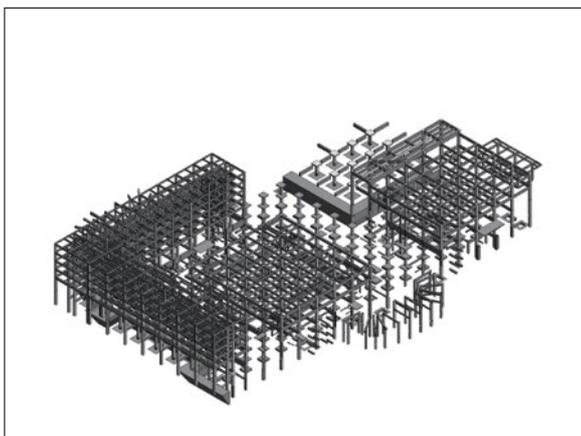
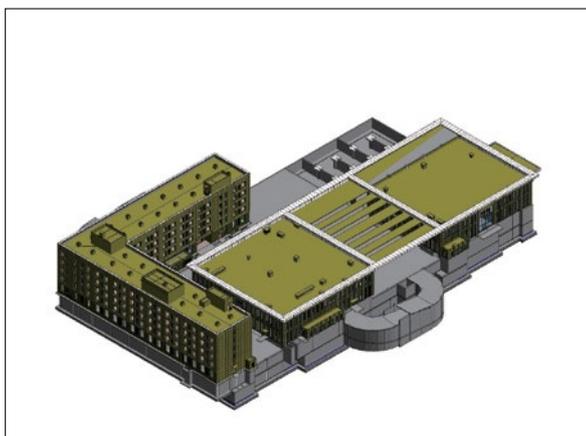
▶ **全专业可视化：**利用BIM技术三维可视化特点，将全专业设计从二维图纸转化为三维模型，让设计师能够一目了然地看到自己的设计成果，发现设计中存在的问题，优化设计方案。

▶ **机电管线深化：**利用BIM技术进行管线碰撞检查，分析设计图纸在过程中存在的问题，通过分析暖通、给排水、电气、消防、动力等专业的图纸，对机电各专业管线进行二次深化，通过BIM技术加强了设计阶段各专业间的紧密配合与相互协调。

▶ **结构洞口预留：**通过BIM技术进行管线综合后，将结构中需要预留洞口的位置标注，形成结构洞孔预留图，便于后期施工过程中，结构洞口预留的准确性。

▶ **BIM运维拓展：**在BIM模型中添加房间编码体系，方便后期运维过程中在BIM模型的基础上进行二次开发应用。

▶ **虚拟现实应用：**在BIM模型基础上，进行二次处理，导入虚拟现实软件，形成沉浸式虚拟现实文件，结合VR眼镜，能够更进一步体会到项目建成之后的实际效果。



## 《关于开展工程建设项目审批制度改革试点的通知》解读

日前，国务院办公厅印发《关于开展工程建设项目审批制度改革试点的通知》（以下简称《通知》）。住房城乡建设部新闻发言人就此进行了政策解读。

### 一、《通知》出台的背景是什么

党中央、国务院高度重视创造良好营商环境和简政放权、放管结合、优化服务改革有关工作。习近平总书记强调，要清理废除妨碍统一市场和公平竞争的各种规定和做法，激发各类市场主体活力，实施高水平的贸易和投资自由化便利化政策。李克强总理指出，营商环境就是竞争力，就是生产力；推动经济发展的着力点要由“抓项目”转向“抓环境”，把“放管服”改革向纵深推进。

今年1月国务院常务会议部署要求住房城乡建设部牵头负责提升办理建筑许可指标排名专项行动，推进工程建设项目审批制度改革。3月5日，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出“工程建设项目审批时间再压减一半”的要求。韩正副总理多次听取汇报，并召开会议研究部署相关工作。

按照国务院工作部署，住房城乡建设部会同有关方面扎实推进工程建设项目审批制度改革。一是认真梳理审批流程和环节，根据初步调查摸底，由于多年来各种法律、法规和规定交叉重叠等原因，不同地区、不同工程在审批事项、耗时等方面差异较大，有的地区对审批事项、流程、时间、依据等底数尚不清楚。二是聚焦企业和群众反映突出的办事难、办事慢、多头跑、来回跑等问题，深挖工程建设项目审批中的交叉重复、方式不当、分散管理等“堵点”和“痛点”，查找审批时效低下的症结。三是借鉴国内外经验，总结有关地方推进“多规合一”、优化再造审批流程，“最多跑一次”、“马上办，网上办，一次办”、“不见面审批”等做法，优化和完善工程建设项目审批制度改革的各项措施。四是坚持重点地区先行，指导督促北京、上海（两城市为世界银行评价营商环境的样本城市）出台优化办理建筑许可指标排名专项行动方案。五是推动改革试点，协商确定在北京市、天津市、上海市、重庆市、沈阳市、大连市、南京市、厦门市、武汉市、广州市、深圳市、成都市、贵阳市、渭南市、延安市和浙江省开展试点，并研究提出了改革的工作目标和任务要求。

### 二、改革的主要目标是什么

改革的主要目标是，2018年试点地区建成工程建设项目审批制度框架和管理系统，审批时间压减一半以上；2019年在全国范围开展工程建设项目审批制度改革，上半年将审批时间压减至120个工作日；2020年基本建成全国统一的工程建设项目审批和管理体系。

### 三、改革的主要任务和措施有哪些

《通知》主要明确了三方面改革任务和措施：

（一）统一审批流程。

（二）精简审批环节。

（三）完善审批体系。

### 四、改革的同时如何加强监管

坚持放管结合、放管并重，在推进工程建设项目审批制度改革的同时，建立健全相应的监管体系。

一是加强事中事后监管，建立透明、规范、高效的协同监管机制，全面推行“双随机、一公开”监管，加大监督检查力度，严肃查处违法违规行为。对于实行告知承诺制的审批事项，审批部门要在规定时间内对申请人履行承诺的情况进行检查，申请人未履行承诺的，要撤销行政审批决定并追究申请人的相应责任。

二是加强信用体系建设，建立诚信档案和黑名单制度，将企业和从业人员违法违规、不履行承诺的不良行为向社会公开，构建“一处失信、处处受限”的联合惩戒机制。

三是规范中介和市政公用服务，建立健全管理制度，实行服务承诺制，明确服务标准和办事流程，规范服务收费。市政公用单位要严格按照国家法律法规和有关规定办理业务，公开办理程序，提高工作透明度，严格执行限时办结制度。

### 五、住房和城乡建设部如何做好《通知》贯彻落实工作

住房和城乡建设部将会同有关部门指导地方认真抓好贯彻落实工作。

一是强化组织领导。住房城乡建设部要切实担负起工程建设项目审批制度改革工作的组织协调和督促指导责任，各有关部门要加强协作、密切配合。试点地区要成立以主要负责同志为组长的工程建设项目审批制度改革工作领导小组，研究重大问题，明晰目标要求，完善工作机制，层层压实责任。

二是加强对试点工作的指导。住房城乡建设部要会同相关部门督促、指导试点地区按照《通知》要求，研

究制定试点实施方案。加强专题培训，通过政策解读、经验交流、实地考察等方式，指导试点地区开展改革工作。加强与试点地区的沟通联系，定期了解试点地区改革进展情况，及时研究解决改革工作中遇到的问题。及时总结试点做法，形成可复制、可推广的经验，指导全国开展工程建设项目审批制度改革工作。

三是开展考核评价工作。住房城乡建设部要会同相关部门建立工程建设项目审批制度改革考核评价机制，重点考核评价试点地区全流程、全覆盖实施改革情况，考核评价试点地区统一审批流程、精简审批环节、完善审批体系等情况。试点地区人民政府要加大对有关部门改革工作的督查力度，跟踪督查改革任务落实情况。（来源：节选自中华人民共和国住房和城乡建设部官网）

## “空中丝路”国际航空合作峰会促进构建全新思路

9月13日，天高云淡，风清气爽，2018年“空中丝路”国际航空合作峰会如约在京召开。业内外、国内外嘉宾济济一堂，围绕“改革开放四十年，航空发展新时代”主题，就航空行业热点问题进行了深入沟通与交流，提出构建“空中丝路”的新思路和新见解。

这是中国航空工业发起并主办的第一届“空中丝路”国际合作峰会。“空中丝路”旨在促进各国航空产业互联互通，打造互利共赢的“利益共同体”和共同发展繁荣的“命运共同体”，以航空制造企业、航空运输企业、航空基础设施建设企业及通航、机场等运营企业为主体，通过贸易、投资、合资合作等方式，构建统一标准、统一行动，打造开放天空和自由贸易平台，提供航空产业系统解决方案，开创航空产业全方位合作新局面。“空中丝路”是中国航空工业响应国家“一带一路”倡议，结合自身优势，面向航空全产业链提出的整合资源走出去战略；是推动实现经济大融合、发展大联动、成果大共享的航空模式；也是航空工业在40年改革开放中，不懈坚持的国际化战略在新时代的新作为。

40年前，乘着改革开放的东风，中国航空技术进出口公司应运而生，为中国航空工业走向世界开了一扇门。很多老中航技人还清晰地记着1979年怀揣100美元借款勇闯非洲市场，在埃及拿下第一个航空产品出口合同的惊心动魄和喜极而泣。40年，航空人不断在国际市场

已累计出口1000多架飞机，2000余台航空发动机，50多条飞机修理和生产线，中国国产飞机在世界上100多个国家的200多条航线上繁忙运营。

随着航空技术的引进和航空产品的出口，中国航空工业在“一带一路”沿线国家，从单一的产品出口，不断地向技术合作、服务保障等周边延展，为我们构建“空中丝路”奠定了完善的产业基础。

40年来，中国航空工业不断强身健体，在学习中适应，在竞争中求生，不仅学到了先进的技术和管理理念，也在不断探索国际化的新路径和新方法。中国航空工业为海外航空公司提供的是“保姆式、介入式、帮扶式”的服务，打造了一套中国式的运营保障模式；从“枭龙”开创的战机联合研制新模式到飞机修理和研制的生产线的输出；从航空基础设施建设“布点”到航线运营的“建网”……航空工业构建“空中丝路”的完整产业链已见雏形。

中国航空工业在走向海外秉持的“多予少取、以义为先”的义利观，为“空中丝路”战略的实施奠定了深厚的民心基础。

在海外市场开拓，中国航空工业主动把解决当地民生痛点与业务开展统筹谋划。中国造的飞机、中国建的机场，解决了驻在国人民的出行困难；尼泊尔大地震中，唯有来自中国的“新舟”60和运12飞机加开航班，把一批又一批满心焦虑的人们送出震区；中国技师培养的上万名非洲青工100%就业，有了安身立命的保障；20万人次的非洲人民得到来自中国“移动医院”的救治后脸上露出如花的笑靥……以心换心，中国企业在“一带一路”沿线国家拥有良好口碑。

“一带一路”倡议“共商、共建、共享”的核心理念，正是航空工业多年国际化开拓始终秉持的核心理念。

“空中丝路”是中国航空工业响应国家“一带一路”倡议的战略实施。“空中丝路”计划，不仅要发挥航空工业的传统优势，更需要突破航空工业的产业局限，“空中丝路”联盟的建立，定能在深化对外开放合作中进一步发挥央企的主力军作用，推动国内外航空产业界强强联合。全新的倡议，全新的思路，致力于打造具有制造、建设、运营、融资等复合功能的一体化、集约式产业联盟和合作平台，为“一带一路”沿线国家，提供基于沿线国家国情的定制化、集成式航空产业发展方案。

（来源：《中国航空报》）

## 北京新机场东航基地项目航空食品及地面服务区一期工程

中航建投民航工程设计研究院

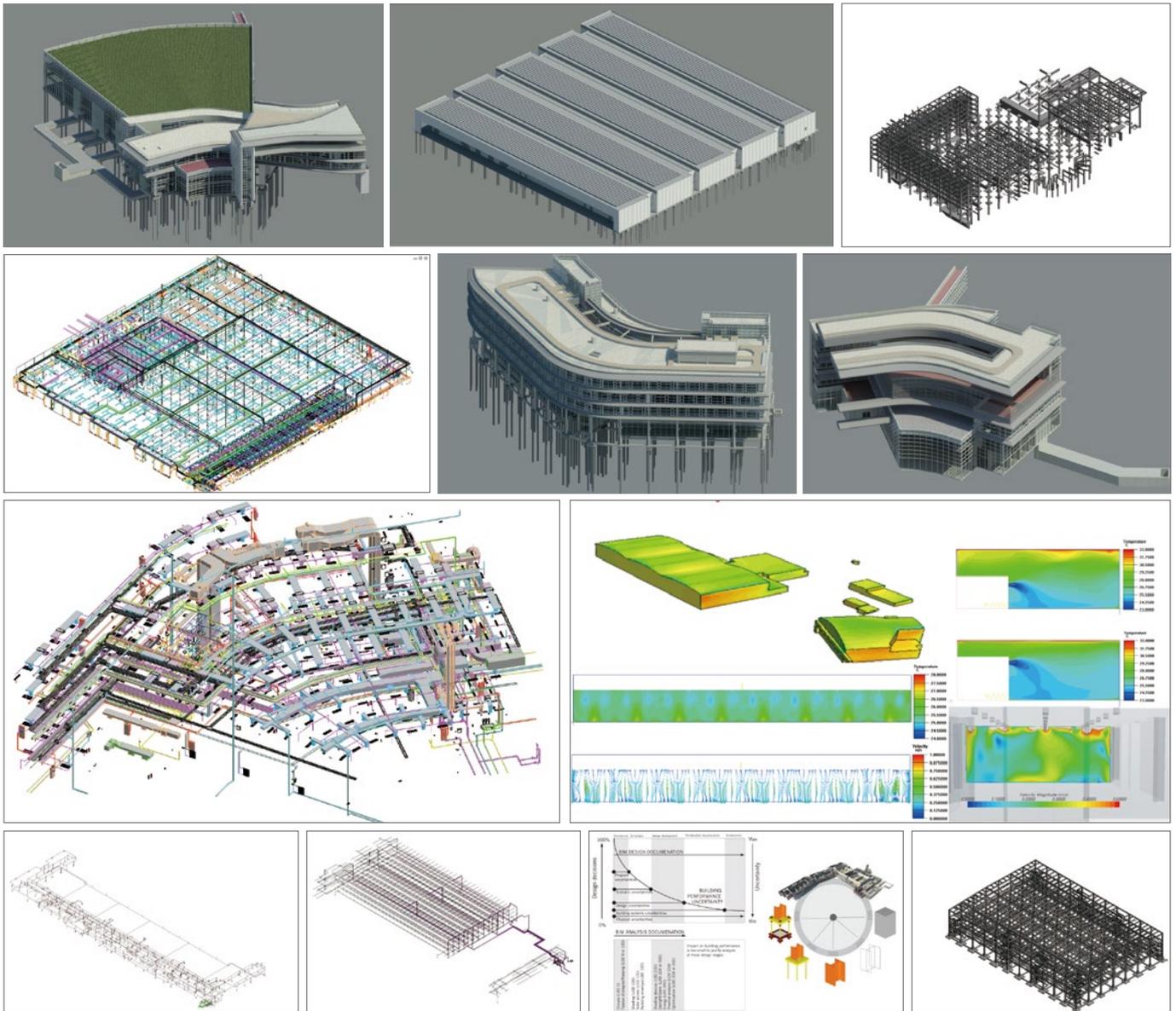
设计单位：航空工业规划飞机工程设计研究院  
航空工业规划技术发展中心 BIM工作室

建筑面积：6.2万m<sup>2</sup>

### BIM应用亮点

东航项目通过BIM设计与二维设计同步的方式实现专业间协同设计，同时通过BIM云平台实现设计院与业主方、施工方的协同工作；两个协同避免了许多不必要的沟通，大大地提高了图纸质量。BIM设计贯穿了整个设计阶段，现在，BIM模型已经交付施工现场，并由施工单位开展进一步的深化应用，真正实现了“一模到底”。





## 海克斯康产业园完成项目

设计单位：航空工业规划飞机工程设计研究院  
航空工业规划技术发展中心 BIM 工作室

建筑面积：4.2万m<sup>2</sup>

项目特点：以生产工艺需求为核心，确保生产运营科学、高效，注重人性化设计，打造节能减排、环境友好型建筑，实现绿色可持续发展。以简约的造型与现代建筑材料，展示科技领先的现代产业园特色。

BIM应用亮点

空间优化技术：

基于可视化数字建筑模型，对项目进行空间优化，设计师可

以更直观的表现复杂结构，各专业间的协同也更为高效、有序，为对复杂空间构造及净空空间要求较苛刻的设计需求提供可视化设计和检测手段，大幅度提升设计效率及质量。

绿建仿真模拟：

以LOD为主线组织BIM仿真工作，制定不同阶段、不同仿真要求的LOD实施细则，针对气象数据结合建筑特点进行全面的数字化分析，确定遮阳、自然通风、自然采光、室内舒适度作为重点设计策略。基于BIM模型，进行空调模拟，温度及舒适度分析，形成大空间变化吊顶标高情况下室内空间和时间上的恒温和节能，优化设计方案。

## 空客天津A330宽体客机完成及交付中心定制厂房项目

设计单位：航空工业规划飞机工程设计研究院  
航空工业规划技术发展中心BIM工作室

建筑面积：约5万m<sup>2</sup>

该项目用地共由两部分组成，一部分为新建项目用地，大致呈不规则的五边形，拟新规划用地272776m<sup>2</sup>；另一部分为在原A320项目厂区内改扩建的项目，拟规划用地25130m<sup>2</sup>。本次新建构筑物包括100号完成中心、112号物流中心、114号喷气机库、116号动力站、118号危险品库房和99号门房，合计建筑面积约为5万m<sup>2</sup>。

BIM应用亮点

设计优化：

通过BIM技术建立三维建筑模型，利用模型碰撞检查结果，

调整建筑檐口、结构网架、管线等的关键节点，指导设计；并利用模型生成平面、立面、剖面的施工图，实现复杂形体的任意位置剖切。

能耗仿真：

针对天津气象数据，结合建筑特点进行全面的数字化分析，确定遮阳、自然通风、自然采光、室内舒适度作为重点设计策略；基于BIM模型，进行空调模拟，温度及舒适度分析，形成大空间变化吊顶标高情况下室内空间和时间上的恒温和节能。

全周期管理系统：

基于BIM模型实现全生命周期的信息流动与共享，进而实现设计模拟到实际工程的检验，节约成本，减少周期，提高质量与生产安全，提升生产率。





## ARJ21新支线飞机批产部装厂房项目

设计单位：航空工业规划飞机工程设计研究院  
航空工业规划技术发展中心 BIM工作室

建筑面积：4.2万m<sup>2</sup>

BIM应用亮点

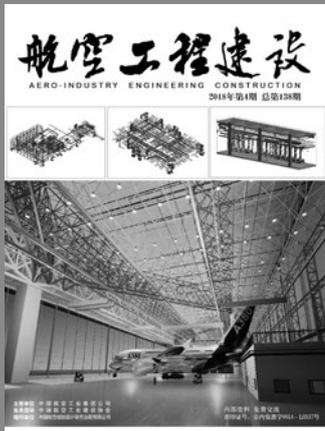
空间优化技术：

基于BIM的空间优化技术，可通过精细化设计对复杂空间、异形结构、构造节点等部位进行参数化建模，为设计师提供可视

化设计环境和检测手段，提高设计效率和质量；与此同时，多专业BIM协同设计对全专业进行碰撞检查、管线综合深化，提前发现、解决图纸问题并生成各专业施工图纸，指导后续施工，保证项目质量与进度，为项目各参与方创造价值。

虚拟现实：

基于BIM模型，通过虚拟现实可视化展示，将设计理念与成果直观的展现出来，提高各参与方沟通效率，为客户满意度的提升提供强有力支撑。



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

**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 沈金龙  
 副主任 米敬明 刘国新  
 委员 (按姓氏笔画排序)  
 丁杰 卜国磊 王玉平  
 王锋 王笃礼 刘景灏  
 李纲 李中强 肖武  
 张卫才 张立峰 陈阳  
 陈丹璐 金来建 黄春晖  
 贺宏斌 傅绍辉 葛家琪

总编 沈金龙  
 主编 陈海风  
 执行主编 王蕊  
 责任编辑 范蕊  
 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 2018年04月  
 印数 1500册  
 电话 (010)62038276 62038235  
 传真 (010)62038297  
 封面 北京新机场南航基地机务维修区工程BIM应用

# CONTENTS

## 目录 2018年第4期 总第138期

### 航空能力建设

- 02 光纤法—珀腔声传感器温度特性研究 王娜 程进
- 09 基于SimEvents的智能排产验证仿真模型框架研究 张波
- 14 生产线工艺仿真标准试验验证及服务平台设计研究  
张超 李慧 孙元亮 马文茂
- 19 基于CFD的试车台进气加温装置气动性能分析  
曹海峰 李雪峰 赵龙

### 研究与探讨

- 24 某高烈度区中小学教学楼消能减震设计  
冯丹 徐志坚 杨超杰 陈丽颖 付锦龙
- 30 临空经济下航空货运产业需求分析  
——以重庆机场为例 王琅 郭璟坤
- 36 “五态融合”理念在荆门通航小镇极客公园的实践 殷丽燕
- 43 抗震支吊架的地震作用计算分析及计算方法对比  
赵伟 闫军 李晓璐
- 48 抗震支吊架设计概述 李晓璐 闫军 赵伟
- 51 EPC项目中道路结构设计  
——以贵州某项目为例 王哲 杜慧英
- 56 某园区EPC建设过程中雨水排水设计 李志杰
- 58 关于生产设备“二次配”施工安全管控的研究 尹蕊
- 60 关于建筑屋面防水设计中易出现漏水问题的探讨 王伟 裴燕
- 62 通风空调系统自控技术在建设工程中的应用 齐金生

# 光纤法—珀腔声传感器温度特性研究

■ 王娜 程进 [工艺]

**摘要:** 根据光纤法—珀腔声传感器的结构,利用低精细度法—珀干涉原理,建立了这种声传感器的温度数学模型,包括干涉光谱随温度变化的关系和声传感器输出信号随温度变化的关系。利用建立的温度数学模型,并通过仿真分析和实验验证,提出了影响光纤法—珀腔声传感器温度特性的关键——材料的热膨胀系数差异以及复合光纤插芯结构,以获得较大的热膨胀系数,以补偿腔长的变化,从而使光纤法—珀腔声传感器具有良好温度适应性。对采用复合光纤插芯的光纤法—珀腔声传感器进行了测试,测试结果表明,在 $-20^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,该传感器具有良好的温度适应性。

**关键词:** 光纤声传感器; 温度特性; 热膨胀系数; 复合光纤插芯

作为一种新型声传感器,光纤声传感器与现有电动式、压电式、电容式等传统的声—电直接转换原理的声传感器相比,具有灵敏度高、抗电磁干扰、传输损耗低、耐腐蚀、体积小、重量轻等优点,在环境噪声监测、噪声源定位、光声探测<sup>[1]</sup>等应用领域也有广泛的需求,特别是对强电磁干扰环境下的声波拾取具有不可替代性<sup>[2]</sup>,因此光纤声传感器得到广泛研究。

光纤声传感器根据调制光学参量的不同,主要可分为强度型<sup>[3]</sup>、相位型、波长型,其中相位型是通过不同的干涉结构实现的,包括迈克尔逊干涉结构<sup>[4]</sup>、马赫—曾德尔干涉结构<sup>[5]</sup>、法—珀干涉结构<sup>[6-8]</sup>、萨格纳克干涉结构<sup>[9]</sup>,波长型主要是基于光栅结构<sup>[10, 11]</sup>。在这些不同原理的光纤声传感器中,法—珀干涉结构由于只需一根光纤,因此结构更为简单,特别是采用非本征光纤法—珀腔制作探头,结构简单,易于实现<sup>[12]</sup>。

光纤法—珀腔声传感器是基于高灵敏光学干

涉检测方法,这使它具有高灵敏度,然而这也导致它易受到外界的影响而使性能发生劣化<sup>[13, 14]</sup>,特别是环境温度的影响,这极大地限制了它的实际应用,特别是采用单色光源,利用强度解调的光纤法—珀腔声传感器,其输出信号对温度十分敏感,究其原因,是因为光纤法—珀腔的腔长会随温度变化而发生变化,从而导致干涉光谱发生漂移。

针对这一问题,目前主要有两种解决方案:

(1) 调节光的工作波长<sup>[13, 14]</sup>,这种方案是利用可调谐激光器,让工作波长随腔长变化而变化,从而保证干涉光谱相对稳定;(2) 利用正交信号<sup>[15]</sup>,包括利用双工作波长产生正交信号和双光纤产生正交信号,再利用正交信号解调方法,得到声波信号。以上两种方案都涉及复杂的信号处理和系统结构,成本较高,不利于应用;而且都没有对光纤法—珀腔声传感器的温度特性进行深入的分析。

本文首先简要介绍光纤法—珀腔声传感器结构与原理,然后采用干涉理论对光纤法—珀腔声传感器的温度特性进行仿真分析与实验研究,并

作者简介:王娜,女,高级工程师,2010年毕业于西北工业大学水声专业,现就职于中航工程集成设备有限公司。

提出复合光纤插芯改善光纤法—珀腔声传感器温度适应性的方法,采用环氧树脂与氧化锆陶瓷插芯复合结构,制作了温度适应性好的光纤法—珀腔声传感器,并进行了温度特性测试,测试结果表明,采用复合光纤插芯的光纤法—珀腔声传感器在 $-20^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 内,能够稳定的工作。这种采用了复合光纤插芯的光纤法—珀腔声传感器将固有良好的温度适应性,因此传感器的光路系统和电学系统将得到简化,成本较低,有望得到广泛应用。

## 1 光纤法—珀腔声传感器结构与原理

光纤法—珀腔声传感器的原理结构如图1所示,它的核心结构包括敏感声波的振膜和光纤,其中振膜的反光面和光纤端面组成光纤法—珀腔。

在该结构中,由于光纤端面的反射率很低(约为4%),振膜反射的光经光纤端面反射后强度非常弱,可以忽略。因此,该结构为一低精度法—珀腔,其输出的光信号等效于双光束干涉信号。

低精细度光纤法—珀腔的干涉可近似为双光束干涉,其干涉光强可写为:

$$I=I_0[1+\gamma\cos(\varphi_0+\Delta\varphi)]$$

式中  $I_0=(I_{\max}+I_{\min})/2$ ,  $I_{\max}$  是干涉光谱光强极大值,  $I_{\min}$  是干涉光谱光强极小值,  $\gamma=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$  是干涉对比度,  $\varphi_0$  为初始相位,对于法—珀腔,  $\varphi_0=4\pi nL/\lambda$ ,  $\lambda$  是工作光波长,  $L$  是光纤法—珀腔初始长度,  $n\approx 1$  为空气折射率,  $\Delta\varphi$  为外界变化引起的干涉光的相位变化。对于声波信号,  $\Delta\varphi$  可写为:

$\Delta\varphi=\varphi_s\cos(\omega t-\psi_0)$ ,  $\varphi_s$  为声波信号引起的相位振幅。

声波信号引起的干涉光强变化,可以通过物理图像进行直观的表达,如图2所示。

从图2中可以看出,声波信号的解调是利用干涉光谱的一个线性区间光强的变化实现的,即声波引起振膜振动,该振动引起腔长变化,相应于相位作周期性变化,在一个线性区间上,该变化对应于光强变化,经光电转换后,输出声波信号。在正交工作点时,光强的变化率最大,即灵敏度最高,同时为了保证输出的声波信号不失真,声波引起的相位变化最大不能超过干涉光谱

的一个线性区间。

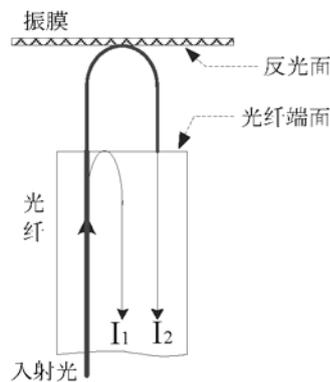


图1 光纤法—珀腔声传感器的原理结构图

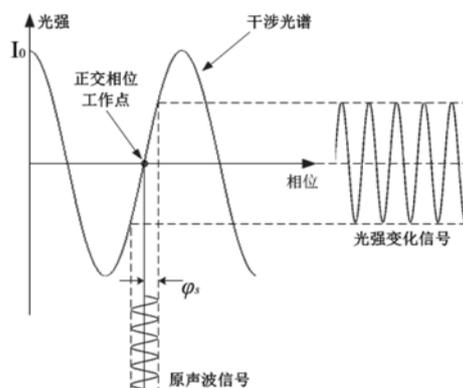


图2 光纤法—珀腔声传感器敏感机理图

## 2 温度特性仿真与分析

### 2.1 仿真与实验

温度对光纤法—珀腔声传感器的影响主要是因为温度变化引起了光纤法—珀腔的长度发生变化所致。下面将通过简化的光纤法—珀腔声传感器,具体的分析这一过程。

根据光纤法—珀腔声传感器的原理结构,这种传感器可简化为如图3所示的结构,其中光纤通常由陶瓷插芯固定,并由金属外壳分别支撑振膜和陶瓷插芯。设在该结构中,由于金属外壳和陶瓷插芯是两种不同材料,设它们的热膨胀系数分别为  $\alpha_2$ 、 $\alpha_1$ 。

设在初始温度  $T_0$  时,金属外壳的有效长度为  $L_1$ 、陶瓷插芯的有效长度为  $L_2$ ,则当温度变化到  $T$  时,在没有声波作用时,干涉光谱随温度的

变化关系为:

$$I' = I_0 \{ 1 + \gamma \cos \{ 4\pi [(L_1 - L_2) + (\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2)(T - T_0)] / \lambda \} \}$$

根据上式, 取  $I_0 = 1 \text{ W/m}^2$ ,  $\gamma = 1$ ,  $L_1 = 5.1 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 5.0 \text{ mm}$ ,  $\alpha_1 = 16.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_2 = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 温度从  $T_0 = 27^\circ\text{C}$ , 上升到  $31^\circ\text{C}$ , 温度间隔  $1^\circ\text{C}$ , 可以仿真得到干涉光谱随温度的变化趋势, 如图4所示。从图中可以看出, 光谱随温度升高发生红移, 表明腔长在升温过程不断增加。

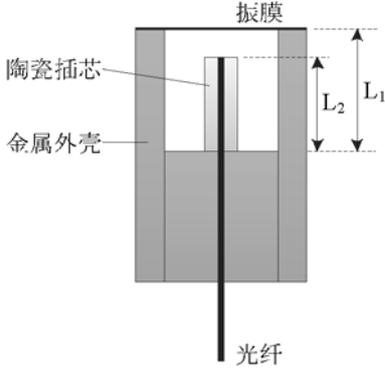


图3 光纤法—珀腔声传感器简化结构图

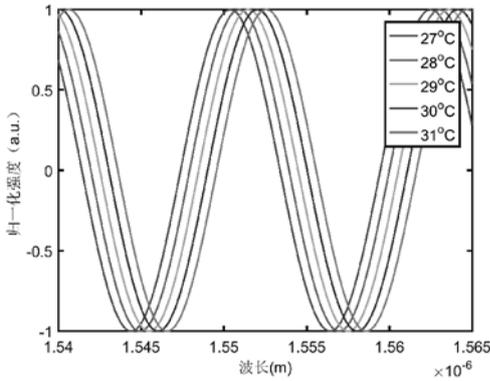


图4 干涉光谱随温度变化趋势图

在温度变化的过程中, 当有声波作用时, 设声波引起的振膜振动的振幅为  $L_s$ , 则此时, 传感器的输出  $V$  与温度的关系为:

$$V \propto I_0 \gamma \cos \{ 4\pi [(L_1 - L_2) + (\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2)(T - T_0)] / \lambda + (4\pi L_s / \lambda) \cos(\omega t) \}$$

仍取以上参数, 并根据文献<sup>[16]</sup>, 取声波信号振幅  $4 \text{ nm}$ , 取声波信号频率为  $1 \text{ kHz}$ , 在上述升温过程中, 声传感器的输出信号随温度的变化的仿真结果如图5所示。

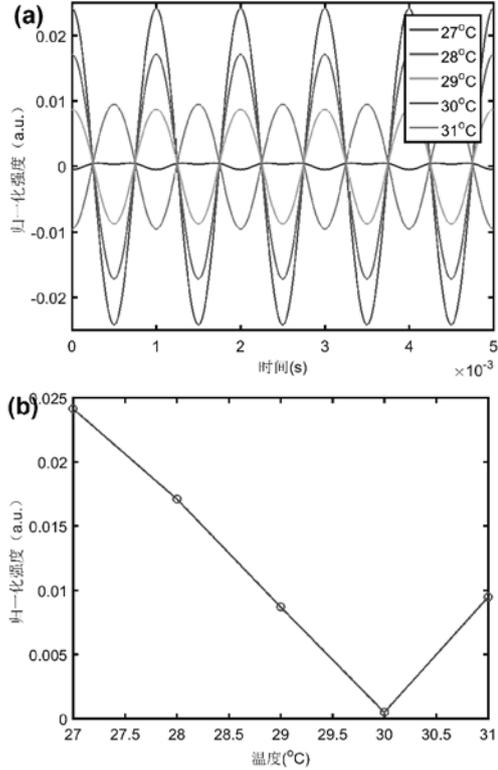


图5 光纤法—珀腔声传感器输出信号随温度变化仿真结果 (a)和信号幅值—温度曲线(b)。

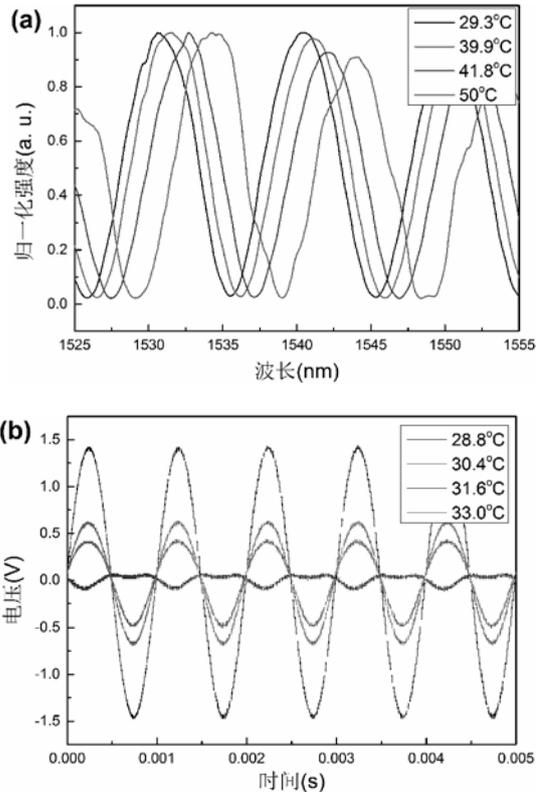


图6 典型的光纤法—珀腔声传感器干涉光谱随温度变化图(a) 输出信号随温度变化图(b)

从图5中可以看出,在上述参数下,随着温度的升高,对同一声波信号,传感器的输出从较大值变化到较小值,然后又上升,这是由于干涉光谱的周期性导致的。从仿真结果看,温度对光纤法—珀腔声传感器的关键性能产生了严重的影响。

利用镍铜合金和光纤陶瓷插芯制作了光纤法—珀腔声传感器样品,并对其温度特性进行了测试,典型结果如图6所示。对比图6和图4、图5,可知测试结果与仿真结果具有相同的变化趋势,这表明,常规的光纤法—珀腔声传感器的性能随温度变化将会劣化,甚至失效,以至于不能正常拾取声波信号。

## 2.2 讨论

由以上分析可知,光纤法—珀腔声传感器的性能随温度变化的原因,是由于制作传感器的材料的热膨胀系数不同导致的,特别是光纤陶瓷插芯的热膨胀系数要小于金属外壳的热膨胀系数,将加剧这一影响。

由图3可知,即使插芯与外壳采用完全相同的材料,由于存在长度差,腔长随温度的变化仍是增加的,在较大的温度范围内,仍会产生较大影响。

为了使光纤法—珀腔声传感器具有良好的温度适应性,一种可行的方案是使插芯材料的热膨胀系数大于外壳材料的热膨胀系数,这样在温度变化的过程中,可以利用插芯部分较大的膨胀量来抵消外壳的膨胀,从而使光纤法—珀腔的长度保持基本不变。据此,本论文提出复合光纤插芯方法。

## 3 复合光纤插芯

常用的光纤插芯主要是陶瓷插芯,它的主要成分是氧化锆陶瓷,其热膨胀系数约为 $10 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,通常这是一个必选材料。而大部分金属材料的热膨胀系数都大于它,如不锈钢的热膨胀系数约为 $16.7 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,镍铜合金的热膨胀系数约为 $14 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

因此,要实现插芯的热膨胀系数大于外壳的热膨胀系数,一种可行的方案是:采用复合光纤插芯,如图7所示,通过与热膨胀系数大的材料进行串联复合,获得较大的热膨胀系数。

环氧树脂具有良好的机械性能、粘接性能和化学稳定性,其热膨胀系数达到 $55 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

通过陶瓷插芯与环氧树脂串联复合,可得复合结构的热膨胀系数为:

$$\alpha = k_C \alpha_C + k_E \alpha_E = \alpha_C L_C / (L_C + L_E) + \alpha_E L_E / (L_C + L_E) \quad (1)$$

式中 $k_C$ 为陶瓷插芯长度百分比, $k_E$ 为环氧树脂长度百分比,有 $k_C + k_E = 1$ , $L_C$ 为陶瓷插芯的长度, $L_E$ 为环氧树脂的长度, $\alpha_C$ 为陶瓷插芯热膨胀系数, $\alpha_E$ 为环氧树脂热膨胀系数。

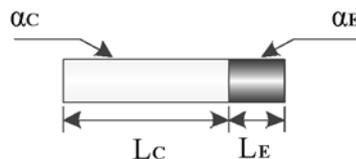
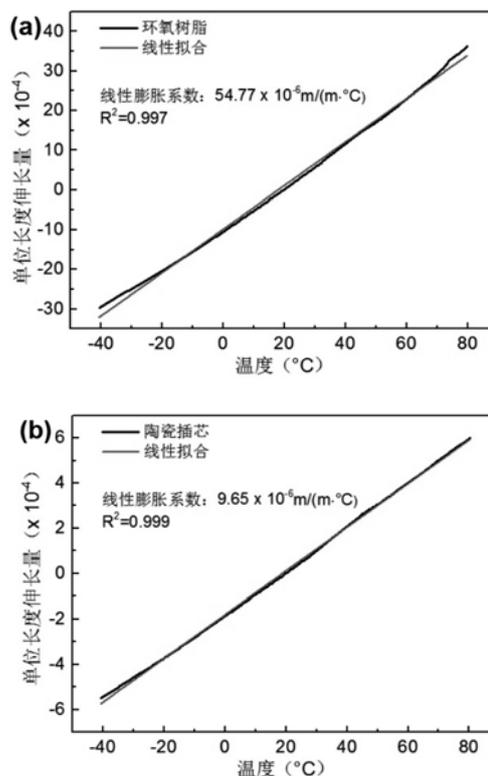


图7 复合光纤插芯示意图

为了验证上述理论模型,对关键材料的热膨胀系数进行了测定。实验制作了复合光纤插芯,如图8(c)右下角插图所示。采用德国LINSEIS L75型热膨胀系数测试仪,在 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 的温度范围内,对环氧树脂、陶瓷插芯、镍铜合金,以及制作的环氧陶瓷复合光纤插芯的热膨胀系数进行了测定,测试结果如图8所示。



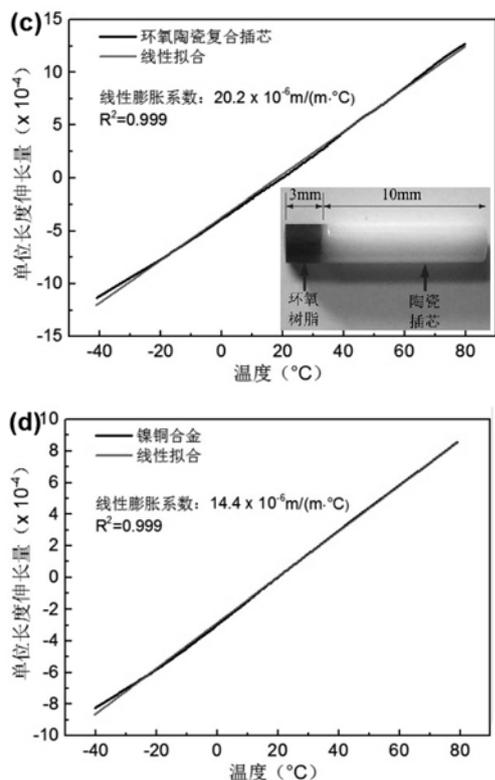


图8 测定的材料的热膨胀系数：(a)环氧树脂，(b)陶瓷插芯，(c)复合光纤插芯，(d)镍铜合金。

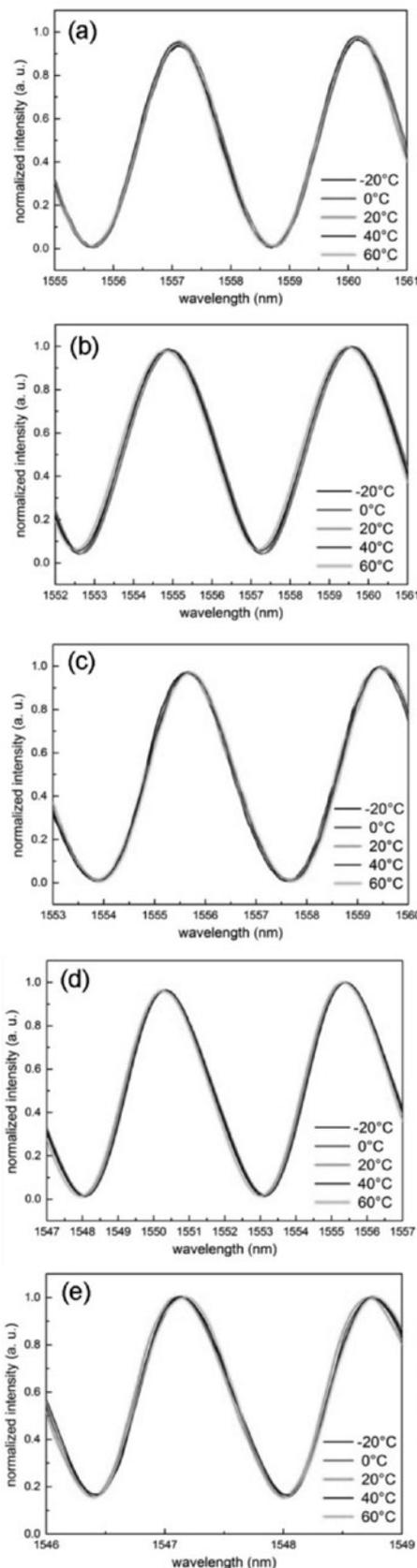
图8中黑色曲线是测试的数据，红色直线是拟合数据。从图中可以看出，在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，被测材料的长度变化随温度变化都可看成是线性变化的，材料的热膨胀系数近似为一常数。具体热膨胀系数为：环氧树脂 $54.77 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，陶瓷插芯 $9.65 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，镍铜合金 $14.4 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，环氧陶瓷复合光纤插芯 $20.2 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

根据测试的环氧树脂和陶瓷插芯的热膨胀系数，可以计算出环氧陶瓷复合插芯的热膨胀系数。图8(C)所示的复合光纤插芯中， $L_c=10\text{mm}$ ， $L_E=3\text{mm}$ ，计算得到热膨胀系数为 $20.06 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。此结果与实验值是吻合的，这表明在制作探头的过程中，可以利用式(1)进行参数设计。

#### 4 测试结果

采用复合光纤插芯，制作了一批光纤法—珀腔声传感器，并进行了温度测试实验，如图9所示，为其中6个探头在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内获得的干涉光谱。这些光谱都基本重合，这表明

复合光纤插芯方案具有良好的可行性和重复性，这对实用化至关重要。



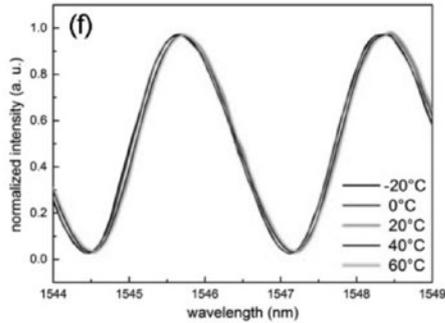


图9 典型的采用复合光纤插芯的光纤法-珀腔声传感器在不同温度下的干涉光谱

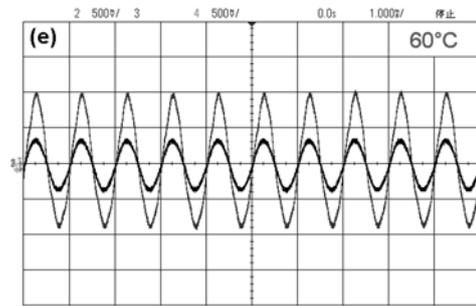
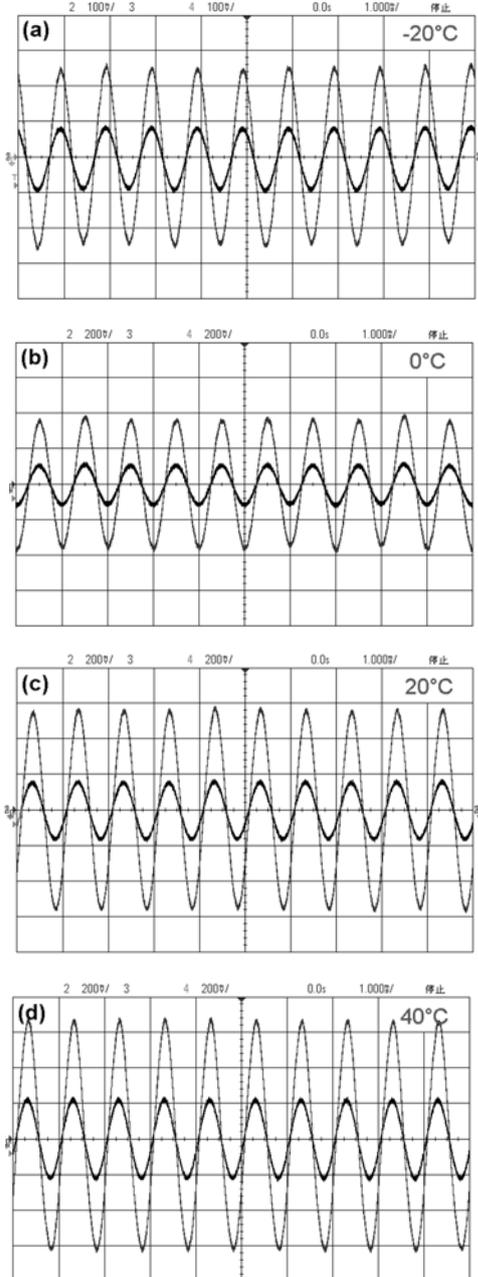


图10 复合光纤插芯制作的光纤法-珀腔声传感器在不同温度下对1kHz声波的响应。图中蓝色曲线是光纤声传感器输出信号(大信号)，黑色曲线是用作参考的驻极体声传感器输出信号(小信号)



进一步，考察这种光纤法-珀腔声传感器的输出信号随温度的变化情况。在每个测试温度点下，利用信号发生器产生1kHz正弦信号，驱动放置在温控箱里的扬声器发出1kHz声波。记录声传感器在不同温度下的输出信号。为了排除温度对扬声器的影响，同时放置一个驻极体声传感器作为参考。图10是在-20°C~60°C温度范围内，每隔20°C记录的输出信号。

通过对图10所示数据进行进一步处理，可以得到光纤法-珀腔声传感器归一化灵敏度随温度变化的关系。在每个测试温度点下，计算光纤法-珀腔声传感器输出信号幅值与驻极体声传感器输出信号的幅值之比，见图11中的插图，据此，可以得到光纤法-珀腔声传感器归一化灵敏度-温度曲线，如图11所示。以20°C时的灵敏度作为参考灵敏度，则在-20°C~60°C的温度范围内，灵敏度相对变化为9.2%，该变化在工程使用中是可以接受的。该结果表明，采用复合光纤插芯制作的光纤法-珀腔声传感器具有良好的温度适应性。

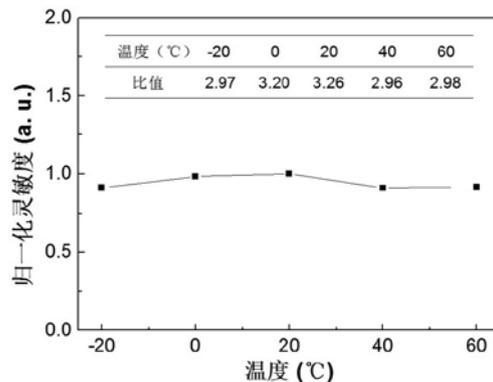


图11 光纤法-珀腔声传感器在不同温度下的归一化灵敏度

## 5 结论

本文通过建立光纤法—珀腔声传感器的温度数学模型,深入地分析了这种声传感器的温度特性。常规的光纤法—珀腔声传感器,由于构成传感器的材料具有不同的热膨胀系数,特别是常用的陶瓷光纤插芯的热膨胀系数,小于金属外壳的热膨胀系数,导致光纤法—珀腔的长度随温度发生变化,从而使干涉光谱产生明显的移动,进而使传感器的性能发生较大的变化。通过制备复合光纤插芯,利用热膨胀系数大的环氧树脂与陶瓷插芯的复合,可以获得大于金属外壳的热膨胀系数,从而使复合光纤插芯在温度变化时,能够补偿金属外壳长度变化的影响,从而使光纤法—珀腔长度保持基本不变,使光纤法—珀腔声传感器具有良好的温度适应性。利用这一方案,本文获得了能够在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内正常工作的光纤法—珀腔声传感器,该方案将促进这种声传感器的实用化研究,并有益于降低其成本,从而有望广泛应用。

### 参考文献

- [1] WANG Q Y, MA Z H, HE Z H. A novel photoacoustic spectroscopy system using diaphragm based fiber Fabry—Perot sensor[J]. Procedia Engineering, 2011, 15:5395—5399.
- [2] DENG J D, XIAO H, HUO W, et al. Optical fiber sensor—based detection of partial discharges in power transformers[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33:305—311.
- [3] BUCARO J A, LAGAKOS N. Lightweight fiber optic microphones and accelerometers[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(6): 2816—2821.
- [4] KRUGER L, THERON H J. Optical fiber Mach—Zehnder Microphone[C]. 2007 SBMO/IEEE MTT—S International Microwave & Optoelectronics Conference, 389—391.
- [5] 王永杰, 李芳, 肖浩, 等. Michelson干涉仪式光纤空气声传感器[J]. 光子学报, 2009, 38(5):1114—1118. WANG Y J, LI F, XIAO H, et al. Fiber Optic Sound Sensor Based on Michelson Interferometer. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5):1114—1118. (in Chinese)
- [6] JO W, KILIC O, DIGONNET M J F. Highly Sensitive Phase—Front—Modulation Fiber Acoustic Sensor[J]. Journal Of Lightweight Technology, 2015, 33(20): 4377—4383.
- [7] XU F, SHI J H, GONG K, et al. Fiber—optic acoustic pressure sensor based on large—area nanolayer silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838—2840.
- [8] LIU H J, CURRANO L, GEE D, et al. Understanding and mimicking the dual optimality of the fly ear[J]. Scientific Reports, 2013, 3:2489.
- [9] WU D F, ZHANG T Z, JIA B. Modified Sagnac interferometer for distributed disturbance detection[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 5(6):1608—1610.
- [10] CHENG J, FENG J, ZHAO L J, et al. An airborne acoustic fiber sensor using fiber Bragg grating[J]. Proceedings of Meetings on Acoustics, 2012, 15:03001(1—5)
- [11] GAUDRON J O, SURRE F, SUN T, et al. LPG—based optical fiber sensor for acoustic wave detection[J]. Sensors and Actuators A, 2012, 173: 97—101.
- [12] 赵龙江, 冯杰, 程进, 等. 基于法布里—珀罗干涉仪的高灵敏度光纤传声器. 北京理工大学学报, 2014, 34:1294—1298. ZHAO L J, FENG J, CHENG J, et al. A High Sensitivity Fiber—Optic Microphone Based on Fabry—Perot Interferometer. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34:1294—1298. (in Chinese)
- [13] WANG Q, MA Z. Feedback—stabilized interrogation technique for optical Fabry—Perot acoustic sensor using a tunable fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 51:43—46.
- [14] CHEN J Y, CHEN D J, GENG J X, et al. Stabilization of optical Fabry Perot sensor by active feedback control of diode laser[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 148:376—380.
- [15] ZHAO J H, SHI Y K, SHAN N, et al. Stabilized fiber—optic extrinsic Fabry—Perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. Optics and Laser Technology, 2008, 40(6):874—880.
- [16] 王坤博, 周瑜, 刘超, 马宁, 魏晓村. 强度解调的F—P干涉型光纤传声器. 应用声学, 2017, 36:438—444. WANG K B, ZHOU Y, LIU CHAO, et al. The F—P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36:438—444. (in Chinese)

# 基于SimEvents的智能排产 验证仿真模型框架研究

■ 张波 [工艺]

**摘要:** 为实现对智能排产算法的验证仿真,本文提出了基于MATLAB SimEvents的验证仿真模型框架,并实现和讨论了其中主要的模块,为后续类似的工作奠定了基础。与其他验证仿真智能算法的方法相比,基于SimEvents的模型有望大大缩短智能算法的开发周期,降低仿真验证的成本。

**关键词:** 智能排产; 验证仿真; SimEvents

## 1 前言

智能排产是驱动智能生产线高效运转的“大脑”,在智能制造中占据着重要的地位。然而,在智能排产算法设计的过程中,由于简化或遗漏,不可能总是能够将生产现场的所有相关因素都纳入考虑,从而有可能存在缺陷和不足。要在系统实际部署之前提前发现这些缺陷和不足,就必须搭建高效的仿真验证平台,对智能排产算法进行检验。实际上,当前很多软件商都宣称具备智能排产软件的开发能力,但是正是由于缺少仿真验证这个重要的环节,导致最终实施的排产软件不能很好地满足客户的需求,以至于不少用户企业对智能排产软件都缺乏信心。

因此,利用仿真技术来验证智能排产算法

的有效性是一个值得关注的问题,然而目前工业界似乎并没有找到恰当的仿真平台。以德国西门子的Plant Simulation等软件为代表的生产过程仿真软件虽然可以模拟生产线上多种离散事件,并十分便捷地实现了对设备使用率等关键指标的统计分析,为生产线设计和管理提供重要的决策支持。然而,这些生产过程仿真软件自身却不具备良好的排产功能,往往只能根据十分简单的规则来安排生产。尽管这些软件本身具备内嵌的编程环境,为引入排产模块创造了一些基础条件,但是受到自身函数库有限的制约,在此环境下编写排产模块来验证其有效性的难度很大。因此,有时需要在生产线仿真软件外部部署一个排产软件,二者通过数据交换来实现完整的排产仿真验证。另一种验证智能排产软件的环境就是借助于PLC等硬件的半物理平台。但是,这种方法往往需要大量的先期投入,成本较高;此外,需要对硬件系统做大量部署和调试工作,不利于提

作者简介:张波,男,高级工程师,2006年毕业于北京航空航天大学机械制造工程专业,现就职于航空工业规划智能技术中心。

高工作的效率。

SimEvents是MATLAB软件自带的一款离散事件建模仿真工具。它不仅具备专业生产过程仿真软件所具备的绝大多数功能,而且还可以实现与MATLAB的无缝连接。这使得在MATLAB这一个统一的平台上就可以实现智能排产算法的设计开发和仿真验证,有利于大大提高工作效率。但是到目前为止,国内外有关SimEvents应用的研究还主要局限于一般的生产过程仿真,对于如何验证智能排产算法尚未涉及。

本文基于一个简单的排产案例,通过搭建相应的SimEvents仿真模型,探讨此类仿真验证平台的通用框架及其主要的实现方法。

## 2 仿真模型的功能组成及其实现方法

为增强通用性,在针对具体的排产算法或问题搭建仿真验证模型之前,有必要先对其仿真验证模型的系统组成进行分析。通过梳理常见的排产问题,不难得出其仿真验证模型至少应当具备以下四种功能。

(1) 零件/工艺信息的生成和存储。SimEvents利用实体(Entities)和事件(Events)来驱动仿真。零件作为订单和工艺信息的载体,以实体的形式在模型中流转。由于各零件加工的顺序及其采用的设备需要经过优化排产来确定,因此需要借助一些模块来生成并存储代表这些零件的实体,直到它们完成所有指定的加工,退出模型。

利用实体生成器(Entity Generator)可以非常方便地生成需要排产的所有零件实体,而各零件相关的工艺信息可以通过与其对应实体的属性值来记录和传递。在对这些零件实体的各项属性值初始化时,可以考虑构建专门的Simulink Function,从外部文件中读取各个零件的相关信息。为了在排产模块运行之前便生成所有零件实体,需要将实体生成器的生成间隔时间(Intergeneration time, dt)设定为0。为此,可以考虑采用零序列的方法。所有的零件实体生成完毕后,实体生成器调用全局函数Schedule()来启动排产程序,由后者确定从哪个或哪些零件开始加工。

将“实体服务器”(Entity Server)的处理时间设为0,并将其处理能力设置为无穷大,便可以将其实用于存储待加工的零件实体,从而实

现对相关信息的动态存储。或者,如果使用的是MATLAB 2018a,也可以直接采用“实体存储”(Entity Store)模块。

所有可以随时进入下一道工序的零件都被缓存在实体服务器中,当排产程序确定其中的某个零件要立刻进入下一道工序时,设置在该实体服务器后面的实体门(Entity Gate,图1中未显示)将会被打开,并在只允许该零件实体通过后立即关闭。

图1展示了零件/工艺信息的生成和存储功能的系统结构。需要说明的是,除了以上提及的模块,其中还加入了一个实体输入端口(Inport)和一个实体输入开关(Entity Input Switch)。它们的作用分别是回收那些尚未完成全部加工任务的零件实体,将它们重新放到待加工零件实体的缓存中。

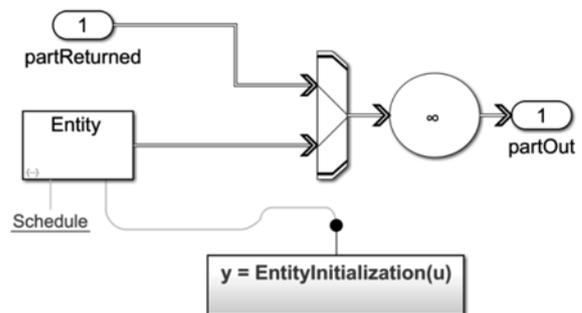


图1 零件/工艺信息生成和存储功能的系统结构

(2) 优化排产与调度。优化排产的算法和程序可以放在Simulink Function中来实现。对于面向事件的优化排产仿真验证而言,排产模块每次输出的结果主要是下一个需要加工的零件ID(nextPartID)以及该零件需要使用的下一台设备的ID(nextMachineID)。如图2所示,将上述两个输出结果分别用来控制选择零件的实体门(选择模式)和选择设备的实体输出开关(Entity Output Switch),便可以模拟实际生产过程中的调度。

(3) 异常情况模拟。SimEvents作为离散事件仿真的通用工具为模拟生产过程中各种异常情况提供了良好的基础,很多随机事件都可以通过其内置的概率分布函数来模拟。这为模拟真实生产环

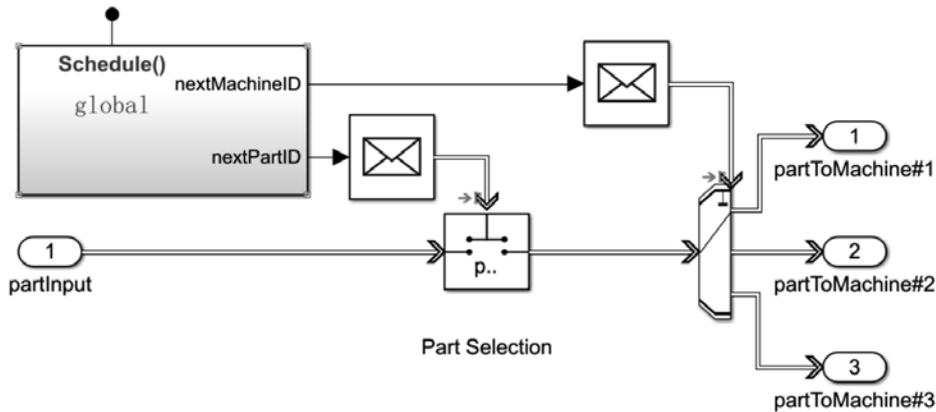


图2 优化排产与调度功能的系统结构

境中各种异常情况的影响提供了便利。限于篇幅，在此只考虑设备故障。

一般而言，可以通过在零件正常的处理时间 (serviceTime) 之上叠加额外的时间来模拟设备是否发生了故障。例如，可以假设设备发生故障的概率为P，而故障发生后设备停机的时间为随机数T。每次调用设备时，先利用生成随机数R (0<R<1) 的方法判断是否发生了故障，如果R<P，零件的处理时间保持不变；如果发生了故障，serviceTime=serviceTime+T。一般情况下，如果不用在需要模拟故障的实体服务器上修改实体的属性以记录某些信息，例如，该零件实体的开始加工时间和完成加工时间等，只需在实体服务器的主选项卡按照上述思路编写简单的语句，便可方便地实现对随机故障的模拟。

如果需要利用实体的属性来记录上述信息时，可以考虑采用串联的两个实体服务器来模拟一台可能会发生故障的设备。其中第一个服务器的处理时间设为实体属性serviceTime，利用其事件动作 (Event action) 来计算故障时间，并将此时间用实体属性downTime来记录；第二个服务器的处理时间就设为downTime。

(4) 零件/设备状态更新与信息交换。随着生产过程的推进，零件和设备等生产元素的状态需要随时根据实际情况更新，并传递给模型中的排产模块，以便于其根据实际情况来做出下一步的工作任务安排。需要更新的设备/状态信息主要包括：各零件的下道工序编号以及最早就绪时间，各设备的最早就绪时间等。对于一般的排产程序而言，这些信息可以存放在计算机的内存中随时调用；然而

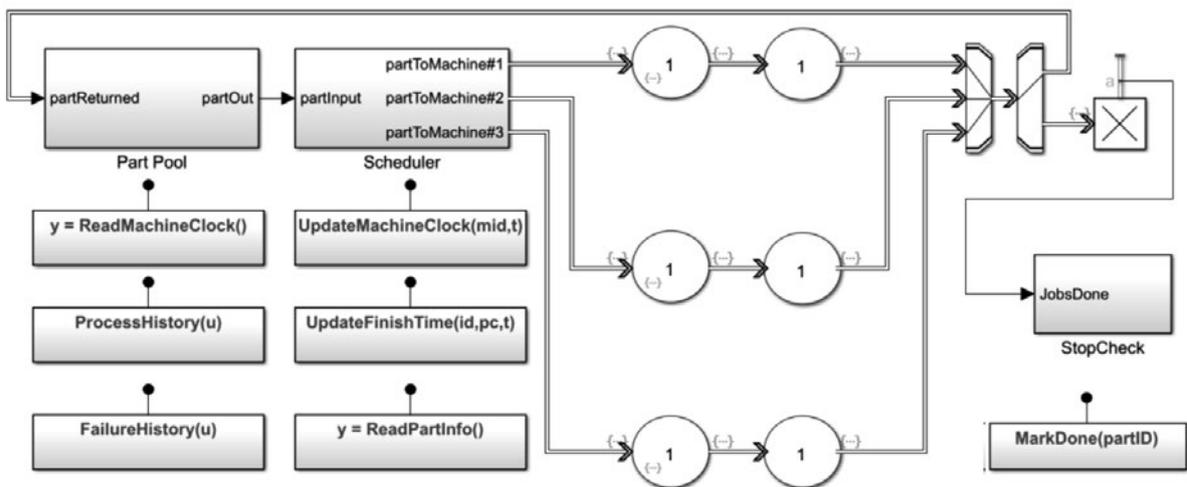


图3 模型总图

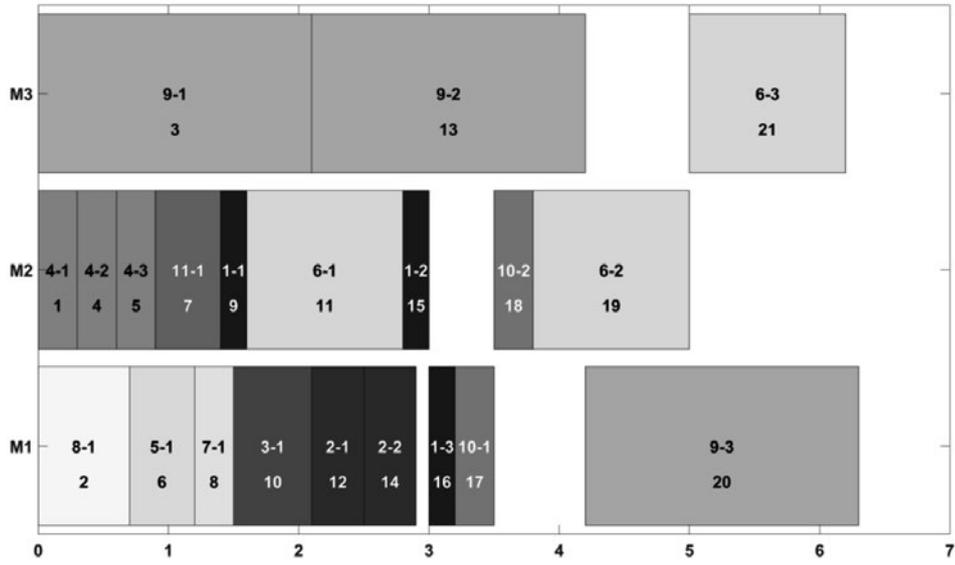


图4 无故障情况下的智能排产模拟仿真结果

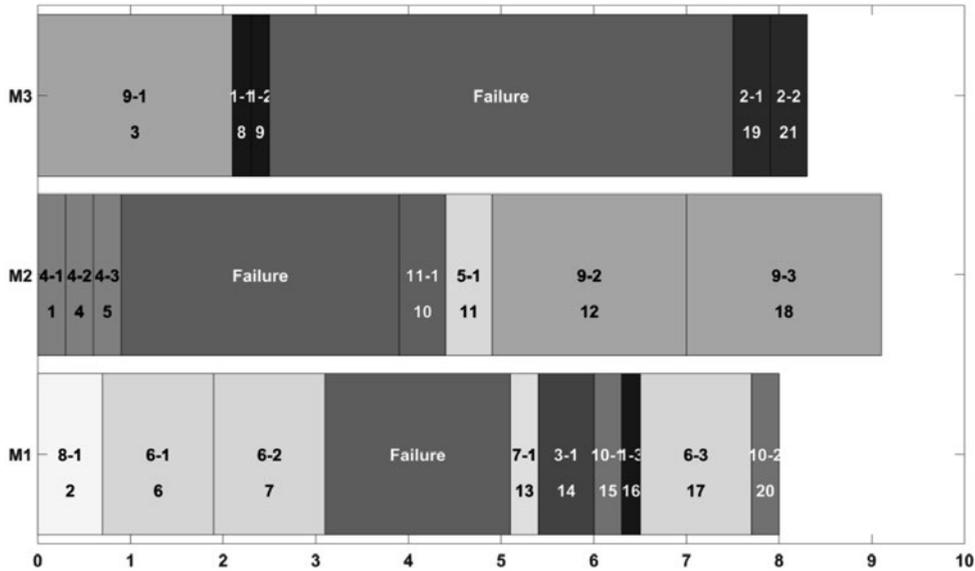


图5 有故障情况下的智能排产模拟仿真结果

表1 零件信息

零件ID	(单次) 加工时间	加工次数
1	0.2	3
2	0.4	2
3	0.6	1
4	0.3	3
5	0.5	1
6	1.2	3
7	0.3	1
8	0.7	1
9	2.1	3
10	0.3	2
11	0.5	1

对于SimEvents而言，由于其中的各个模块是相互独立的子程序，缺少统一的公共存储空间，通常需要通过文件读写的方式来实现信息在不同模块之间的交换。值得说明的是，虽然可以借助Simulink中的“数据存储”(Data Store)模块来提供跨模块的公共存储，“存储”模块对读写顺序的严格要求常常会降低仿真的速度。

### 3 案例模拟与讨论

为检验模型框架设计的合理性，本文构建了一个简单的案例。假设有3台完全相同的设备加工

11个零件（其中部分零件需要多次加工），希望合理安排零件的加工顺序，使得总工期最短。各零件的ID、加工次数和每次加工的时间如表1所示。搭建的模型如图3所示。在设备不发生故障的情况下，稍加计算便可发现，由于存在零件自身加工顺序的约束，这批零件的最短工期等于9号零件的加工周期， $C_{min}=2.1 \times 3=6.3$ 。模型仿真的结果也是如此，如图4所示。

假设设备在连续两次加工之间发生故障的概率分别为0.1，0.2和0.3，且故障持续的时间都满足指数分布 $P(t) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{t}{\mu}}$ ， $\mu=2,3,5$ 。利用搭建的仿真验证模型可以发现，优化排产模块在避让设备故障时间段的同时，尽力实现了加工任务之间的“零等待”——即除了故障停机造成的等待以外，再也没有其他时间的浪费，如图5所示。这样的排产结果有利于最大程度地缩短工期，具有显著的合理性。

#### 4 结论与展望

SimEvents作为通用的离散事件仿真环境可以用于生产线仿真，其与MATLAB的无缝连接为嵌入智能排产算法并验证其有效性提供了极大的便利。但SimEvents本身也存在一些不足，给本文研究的仿真验证模型的开发带来了一些麻烦。例如：模块之间的数据不能直接共享、实体服务器自身不能模拟故障停机、缺少批量实验功能等。希望这些不足能够得到SimEvents开发团队的重视，在未来的版本中给予改进和完善。本文仅仅初步探讨了利用SimEvents搭建智能排产算法仿真验证模型的框架，面对复杂多样的现实需求，还有许多研究工作需要深入展开。随着SimEvents自身功能的不断增强和使用经验的不断积累，相信基于SimEvents的智能排产算法仿真验证工作可以大幅度提高智能排产算法的开发效率，降低成本。

#### 参考文献

- [1] 顾寄南，尚正阳，唐仕喜，丁卫. 当前智能制造若干关键技术综述[J]. 机械设计与制造工程，2017年第9期，pp11-15.
- [2] 黄培. 对智能制造内涵与十大关键技术的系统思考[J]. 中兴通讯技术，2016年10月，第5期，pp7-11.
- [3] K. Heinz Weigl. Combining Simulation And

Scheduling: An Application In The Office Furniture Industry Using Arena And Preactor [P], Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman, p977-981.

[4] Michael A. Gray. Discrete Event Simulation: A Review of SimEvents [J], Computing in Science & Engineering, November/December 2007, p62-66.

[5] 蒋南云，汪立海，郑伟，祁玉青. 基于Petri网与SimEvents的推式生产系统建模与仿真[J]. 科学技术与工程，第14卷，第29期，2014年10月，pp238-243.

[6] 黄雪梅. 基于SimEvents的机电自动化生产系统控制[J]. 航空制造技术，2015年第20期，pp83-85.

[7] Christos G. Cassandras, Michael I. Clune, Pieter J. Mosterman. Hybrid System Simulation with SimEvents [P], 2nd IFAC Conf. on Analysis and Design of Hybrid Systems (Alghero, Italy), 7-9 June 2006, pp267-269.

# 生产线工艺仿真标准试验验证及服务平台设计研究

■ 张超 李慧 孙元亮 马文茂 [工艺]

**摘要:** 针对航空制造业生产线工艺仿真技术应用过程中的规范性指导关键技术标准缺失、配套试验验证的方法和工具不健全、标准的适用性较差等问题,开展了生产线工艺仿真关键技术标准研究。以航空预浸料热压罐固化复合材料制件生产线仿真为切入点,开发了仿真标准试验验证及技术服务平台,提出了平台的架构,并基于PSL过程表达规范,建立了复合材料工艺信息本体模型。研究结果可为航空复合材料制件的生产线工艺仿真技术标准研制提供试验验证,为进一步建成航空制造领域生产线工艺仿真的通用平台奠定基础。

**关键词:** 标准验证平台; 服务平台; 信息模型; 工艺仿真

生产线仿真技术是对生产线进行分析、实验、诊断和评价的最经济安全的一种方法。随着系统仿真技术的快速发展,生产线仿真技术在我国航空制造业中的研究与应用也越来越多。屈琦等<sup>[1]</sup>以飞机中机身典型部件装配生产线为研究对象,基于Plant Simulation建立了装配生产线仿真模型,对装配生产线的产能、瓶颈、平衡率等问题进行了分析及优化。魏方剑<sup>[2]</sup>针对飞机脉动生产线,提出了多层级建模理论,并在DELMIA V6平台上构建了飞机脉动生产线的仿真模型,对系统运行状态、产能、资源利用率等进行了分析研究。张超等<sup>[3]</sup>以某民用航空发动机传动系统的齿轮与机匣综合加工厂房的规划设计为例,基于Plant Simulation平台,

建立了该综合机加厂房的仿真模型,从产量满足率、设备利用率、在制品库存和生产线健壮性等多个指标进行了设施布局的仿真评价。但是,缺乏生产线仿真技术应用过程的规范性指导,与产品数据和工艺流程数据集成度不高,从标准化视角来看,存在着行业关键技术标准缺失,配套试验验证的方法和工具有待健全、标准的适用性较差等问题,极大地制约了生产线仿真技术的有效应用。因此,本项目围绕航空制造业生产线工艺仿真技术应用需求,以航空预浸料热压罐固化复合材料制件生产线仿真为切入点,开展航空复合材料智能生产线工艺仿真关键技术标准研究。

标准技术内容是标准的关键所在,直接影响标准的整体水平,而标准的试验验证是保证标准技术适用性和有效性的关键手段。陈杰<sup>[4]</sup>等在对机械

作者简介:张超,男,研究员,2008年毕业于清华大学水利工程专业,现就职于航空工业规划智能技术中心。

产品设计工艺仿真及信息集成标准试验验证平台进行需求分析的基础上,提出了平台的体系架构,并对平台实现的关键技术进行了研究。清华大学的岳英超等<sup>[5]</sup>面向高速动车组列车仿真系统需求,研发了高速动车组列车的协同仿真平台,提出了平台的体系结构,阐述了协同平台中的若干关键技术,并通过了实例验证。本文在仿真标准试验验证及技术服务平台需求分析的基础上,提出了仿真平台的架构,并对平台实现的关键技术进行了研究。

## 1 生产线仿真流程

生产线仿真属于离散事件系统仿真<sup>[6]</sup>,主要由三部分工作组成:

(1) 输入数据的采集与分析。根据仿真目标确定数据采集清单,通过调研获得相关数据,并对其进行分析,以满足仿真系统需求。在生产线规划设计阶段,仿真需要收集的数据通常包含生产纲领、生产线布局方案、产品工艺流程、生产设备类型、物流运输方式、各种工时数据等。仿真输入数据的质量直接影响着仿真输出结果的有效性和可信度。

(2) 仿真模型的构建与验证。仿真模型的构建包含几何模型和逻辑模型两部分。仿真模型建立后,必须进行验证。验证仿真模型的正确性以及仿真模型与实际系统的相关性。如果仿真模型运行结果与生产线实际或预测状态存在偏差,则需要根据具体情况,对仿真模型的基本对象、逻辑控制、物流系统等进行相应修正,并重新进行验证,直到验证通过。仿真模型的构建和验证是一个相互交替的过程。

(3) 仿真结果的分析与优化。观察仿真运行情况,根据仿真输出结果量化分析生产线的产能、生产效率、瓶颈、健壮性等相关指标;然后基于分析结果对生产线进行优化并再次构建仿真模型,验证优化方案的可行性,和预期目标进行对比验证,直至结果满足需求。仿真结果的分析与优化和仿真模型的构建与验证是一个相互迭代的过程。

## 2 需求分析

### 2.1 数据管理功能

生产线工艺仿真过程中依赖大量的、各种类型的数据支持。平台应具备仿真数据管理功能,

一是几何模型、仿真元素等数据的新建、上传/下载、修改和检索,二是仿真模型的数据的状态维护和管理,三是仿真结果数据的检索、分析和对比参照,从而减少重复劳动,快速获取数据,积累、重用仿真资源。除了传统数据库的增/删/改/查功能以外,还能对用户上传的数据进行信息处理,并且能够从工艺设计系统集成数据到仿真平台,加速仿真模型的创建过程。

### 2.2 仿真流程管理功能

为实现对生产线仿真的标准化、规范化,平台应具备仿真流程管理功能。通过对仿真流程的控制,将仿真的基础模型数据、配置数据、仿真结果和规范所形成的数据流和控制流进行管控。

### 2.3 技术服务功能

平台除了对仿真标准进行试验验证以外,还应提供相应的仿真服务。面向服务的需求方,提供仿真需求发布、仿真服务供应方信息检索等功能;面向服务供应方,提供仿真案例展示、供需对接、仿真资源共享等。由此降低企业实施生产线仿真的技术门槛和经费成本,推动仿真技术的应用和发展。

## 3 仿真平台架构

本生产线仿真标准试验验证和服务平台采用面向服务(SOA)的体系结构思想,基于企业服务总线(ESB)技术,集成多种仿真软件工具,以高性能计算平台为依托,为生产线仿真分析提供具有可操作性、灵活性和协同性的体系化的能力,形成了面向服务、开放、行业适用性强的仿真标准试验验证和服务平台。平台层次可划分为资源层、核心服务层、系统管理层和应用层,功能架构如图1所示。

### 3.1 资源层

资源层主要用于提供生产线仿真时所需用的各类资源,主要包括:生产线布局模板库、几何模型构件库、离散事件仿真元素库、仿真标准资源、仿真报告模板、仿真知识库、优化算法资源,以及各类服务器、工作站、VR等设备资源。

### 3.2 核心服务层

核心服务层的主要功能是提供面向生产线仿真的核心服务,包括:CATIA、DELMIA、REVIT、PLANT SIMULATION等生产线/设备建模工具,提供生产线工艺仿真所涉及的各种工具。

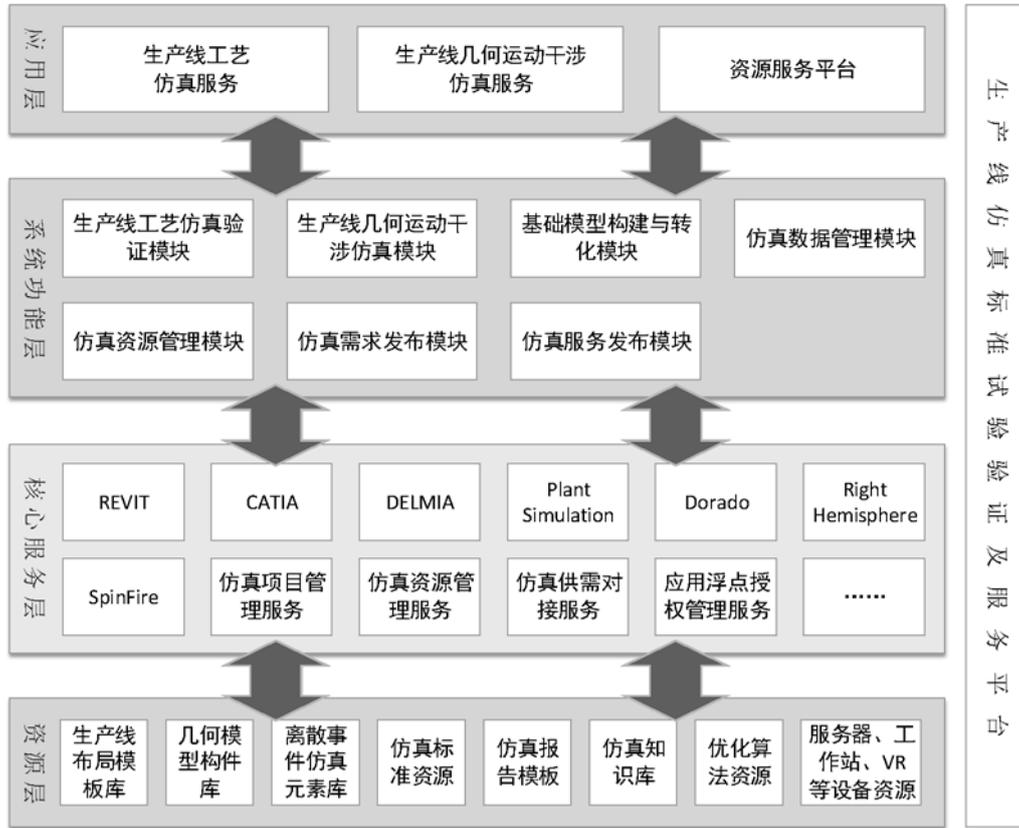


图1 生产线仿真标准试验验证和服务平台

仿真资源动态管理与优化配置服务，提供资源的部署调用、注册、监控和优化配置管理功能工艺设计和生产线工艺仿真流程管理服务，可视化引擎服务，提供3D可视化显示功能。

### 3.3 系统功能层

标准试验验证涉及了建立仿真模型基础数据、仿真过程、仿真结果和仿真资源管理等需求，面向生产线的几何运动干涉仿真和生产线工艺流程仿真领域，构建航空复合材料生产线仿真试验验证管理系统，通过ESB技术，系统可以与主流的CAD软件、PDM系统、仿真建模平台等集成，具有较强的通用性、开放性和扩展性，主要分为以下几个模块：

#### (1) 生产线工艺仿真验证模块

本模块通过开发生产线工艺仿真验证系统，根据生产线规划和布局设计信息，建立生产线规划和布局仿真模型，包括加工设备、运输设备、工装工具、仓储及各种辅助设备设施，结合生产线所处场地、空间和各种约束条件，对生产线各类资源进行规划和布局，根据仿真结果对生产线规划和布局

进行评估，迭代进行调整优化。

#### (2) 生产线几何运动干涉仿真模块

本模块基于大型商用建模软件开发几何运动干涉仿真验证系统，通过CATIA或REVIT建立生产线虚拟场景，导入到DELMIA中后，结合生产工艺流程，对生产加工设备、工装设备、物流设备、在制品等运动元素建立运动路径，包括工装运动路径规划、工装与设备之间的干涉与碰撞分析、铺贴/脱模等工艺过程的操作空间分析、设备维修操作空间分析，最终获得最佳运动路径规划和生产过程可达性检验。

#### (3) 基础模型构建与转化模块

本模块基于大型商用建模软件CATIA、REVIT、Right Hemisphere开发模型构建与转化仿真验证系统，通过读取工艺编制系统生成的XML文件，导入建模软件提供的设备模型、工装工具模型、制品模型，自动输出生产线模型中设备名称、设备坐标、等信息，自动生成符合工艺仿真软件需求的离散事件模型，无缝集成生产线几何建模软件和生产线离散事件仿真软件及几何干涉仿真软件。

通过商用模型转化软件Right Hemisphere, 实现CATIA、REVIT、SOLID WORKS、PROE等几何建模平台的模型文件互转化。

#### (4) 仿真数据管理模块

本模块主要实现对工艺仿真数据的集成化管理, 数据包括仿真模型输入、仿真结果输出和仿真模型。

#### (5) 仿真资源管理模块

生产线仿真过程中需要使用多种仿真资源, 包括仿真模型、定制化仿真元素、仿真报告模板、仿真案例和仿真标准等。针对这些需求, 本模块对相关资源进行管理和维护, 分别建设成生产线布局模板库、模型构件库、离散时间仿真元素库、仿真标准资源、仿真报告模板、仿真知识库、优化算法资源库等。

### 3.4 应用层

应用层提供了面向航空预浸料热压罐固化生产线工艺仿真的各类工具, 包括生产线工艺仿真平台、生产线几何运动干涉仿真平台和仿真资源服务平台。

应用层设计着眼行业适用性, 以标准化、规范化和服务化为目标, 围绕航空复合材料生产企业的数字化生产线仿真标准研制、试验验证和仿真服务等需求, 以仿真资源共享、可重用为核心, 定义生产线工艺仿真和几何运动干涉仿真的标准规范和流程, 构建面向航空复合材料生产企业提供生产线仿真技术应用和标准宣贯、实施的服务平台, 降低航空复合材料制造企业实施生产线仿真的技术门槛, 为相关企业推进智能生产线、智能工厂的建设奠定基础。

#### (1) 生产线工艺仿真平台

面向航空预浸料热压罐固化生产线工艺仿真需求, 提供相应的仿真服务界面, 为仿真用户提供生产线工艺仿真服务。用户可以通过服务界面按照要求输入仿真所需的参数、配置基本假设并执行模型初始化等。生产线仿真在仿真模型建立并配置完成后, 进行仿真分析, 并将仿真分析结果推送到仿真服务界面中。

#### (2) 生产线几何运动干涉仿真

面向航空预浸料热压罐固化生产线几何运动干涉仿真需求, 提供相应的仿真服务界面。用户可以通过服务界面按要求建立模型、配置生产流程, 随后进行运动仿真, 根据是否发生干涉的提示, 通过人机交互的方式完成“仿真—迭代修订”的过程,

最终形成仿真结论。

#### (3) 仿真资源服务平台

作为公共服务平台, 具备: ①仿真供需对接功能, 即面向仿真服务提供方, 提供案例成果展示、资质条件等仿真能力展示; 面向仿真服务需求方, 为用户提供仿真、标准、试验验证等需求发布服务。②仿真资源服务, 提供仿真报告模板、仿真模型、仿真元素控件、仿真标准等仿真资源下载。

## 4 平台关键技术

### 4.1 系统总体技术

系统总体技术是从全局角度考虑系统的各个组成模块之间的相互关系, 并协调、规定各模块的运行逻辑, 支持分布式架构, 能支持横向扩展, 具有高可用、伸缩性、稳定性等特点, 使其组成有机整体, 实现平台的总体目标。

### 4.2 基于PSL的工艺流程信息模型

为实现工艺流程定义与构建仿真模型的无缝集成, 本平台基于过程规范语言(Process Specification Language, PSL) 表达规范<sup>[7]</sup>, 建立了复合材料工艺信息本体模型, 并按照标准描述的工艺流程模型建模方法与内容为指导建立工艺流程信息模型, 实现对各种复合材料制品的标准化描述, 支持虚拟模型在产品的全生命周期的一致性表达和跨系统信息共享, 支持与模型相关的数据信息的提炼、交换与映射, 形成了适用于航空复合材料制件的工艺流程设计系统。

该系统主要功能模块包括工艺路线设计模块、工艺信息输出及工艺路线可视化、工艺数据库管理、三维信息模型与展示。

(1) 以持久化对象管理为核心, 构建数据访问的基础性架构, 并建立了全局对象统一标识原则和数据交互的统一入口原则等系统开发与实施的基本规范。

(2) 面向对象的关系数据库表结构设计方法。在对象关联设计中, 并不在关系数据库层面对对象的关系数量进行限制, 而是通过扩展关联的定义, 来表达过程内和独立于过程的各种工艺数据关联。

(3) 基于“对象—关联”的可扩展模式, 建立PSL核心信息、工艺信息、资源信息等基础对象模型, 构成核心子类, 并对其进行对象扩展, 支持对象属性和行为的继承。

### 4.3 支撑环境技术

一个基于组件与服务的软件技术框架对于满足制造数据灵活访问与集成需求具有重要意义。平台组件采用Java语言实现,在中间层使用轻量级框架Spring作为组件的容器,并使用Hibernate组件对数据库进行封装,显示层则采用Dorado客户端组件,通过Web浏览器进行数据的访问。在服务发布方面,使用Tomcat服务器作为服务的容器,同时可利用轻量化服务器端插件Jetty作为对系统运行的业务支持。引入三维轻量化SpinFire技术以支持系统展示三维构件模型。

## 5 结束语

标准技术内容是标准的核心,标准的试验验证是保证标准技术内容适用性和有效性的关键手段。本文结合航空复合材料制件生产线仿真标准试验验证与工程应用需求,采用面向服务的体系结构思想,根据工艺流程仿真、三维几何干涉仿真所需要的各类资源及需提供的功能服务,开发了仿真标准试验验证平台,为生产线仿真技术标准研制提供了试验验证保障。同时本平台提供仿真技术应用服务,将打造成为航空制造领域进行工艺流程仿真及三维几何干涉仿真的通用平台。

### 参考文献

- [1] 屈琦,贾晓亮,郑植元等.飞机部件装配生产线仿真研究[J].航空制造技术.2017(4).54-59. QU Qi, JIA Xiaoliang, ZHENG Zhiyuan, et al. Simulation of Aircraft Components Assembly Line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(4). 54-59.
- [2] 魏方剑.飞机脉动生产线的建模仿真与优化方法研究[D].南京航空航天大学.2016.3. Wei Fangjian. Research on Modeling Simulation and Optimization for Aircraft Pulse Production Line[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.3.
- [3] 张超,李慧,田恺.基于Plant Simulation的航空综合机加厂房布局仿真研究[J].工程设计学报.2013,20(3):199-2017. Zhang Chao, Li Hui, Tian Kai. Research on Aerospace Integrated Machining Facility Layout Based on Plant Simulation[J]. Chinese journal of Engineering Design,

2013,20(3):199-2017.

- [4] 陈杰,潘康华,王云峰等.仿真标准试验验证及技术服务平台建设探讨[J].机械工业标准化与质量.2017:34-39.
- [5] 岳英超,肖田元,范文慧等.面向高速动车组列车的协同仿真平台[J].系统仿真学报.2011,23(8):1681-1685. YUE Yingchao, XIAO Tianyuan, FAN Wenhui, et al. Collaborative Simulation Platform for High Speed Train[J]. Journal of System Simulation, 2011,23(8):1681-1685.
- [6] 刘春,魏亚飞,张洪瑞.生产线仿真技术发展及在航空制造中的应用[J].航空制造技术.2016(16).57-62. LIU Chun, WEI Yafei, ZHANG Hongrui. Development of Production Line Simulation Technology and Its Application in Aeronautical Manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(16). 57-62.
- [7] Schlenoff C, Gruninger M. The process Specification Language (PSL) Overview and Version 1.0 Specification. National Institute of Standards and Technology [J], 1999.

# 基于CFD的试车台进气加温装置 气动性能分析

■ 曹海峰 李雪峰 赵龙 [工艺]

**摘要:** 本文根据涡喷、涡扇发动机进气加温试车时所需的进气流量、进气温度及其温度场要求对进气加温装置气动结构进行设计,并在此基础上根据发动机的使用工况,通过数值模拟研究手段对进气加温装置“热态”、“冷态”工作状态下的流场性能进行分析研究,经CFD计算后,发现“热态”工况下,出口平均温度为464K,不均匀度为2.11%;“冷态”工况下,气流经过进气加温装置总压损失为577.5Pa,对发动机进口流场影响很小。计算结果表明该进气加温装置具备良好的工程应用价值。

**关键词:** 进气加温装置;数值模拟;气动结构;进气加温试车

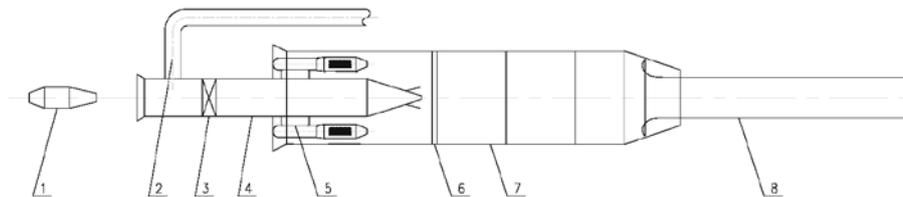
## 1 引言

在涡喷、涡扇发动机研制过程中,需要进行大量的进气加温试车考核,进行加温试车的主要目的是为了模拟航空发动机高空大马赫数的情况下,由于与空气高速摩擦导致发动机的进气温度和燃油管路等设备处于高温的环境,为了验证在规范要求的温度条件下航空发动机的工作情况<sup>[1]</sup>。此外,

在我国《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》中也规定了在飞行前规定试车的60h持久试车程序中,要求有4.2h进行发动机进口空气加温持久试车<sup>[2]</sup>。涡喷、涡扇发动机试车台进气加温装置的热源一般有三种,

第一种是用成熟发动机排出的高温气体作为热源,第二种是用多个单管燃烧室直接加热空气<sup>[3]</sup>,第三种是用电加热器对空气进行直接加温。现有试车台一般采用成熟发动机排出的高温气体作为热源加温装置。

图1给出了发动机进气加温装置结构简图,其主要由加温发动机、排气管、进气管、掺混器、蜂窝器、稳定段等组成。本文通过数值模拟研究手段对以发动机排出的高温气体作为热源的进气加温装



1—加温发动机; 2—排气管; 3—调节阀门; 4—进气管; 5—掺混器; 6—蜂窝器; 7—稳定段; 8—被试发动机;

图1 进气加温装置结构简图

作者简介:曹海峰,男,助理工程师,2016年毕业于南京航空航天大学动力工程专业,现就职于中航工程集成设备有限公司。

置不同工作状态下的流场性能进行分析研究。

## 2 进气加温装置模型及网格划分

进气加温装置中掺混段是其气动结构最复杂的部件，其掺混性能直接决定了加温装置出口温度场能否满足发动机入口温度场要求<sup>[4]</sup>。因此，考虑到处理器计算能力及计算效率，仅对进气管后的加温装置部件进行气动研究，并保留了掺混器所有几何特征，图2给出了加温装置模型示意图。当进行“热态”试验时，热流通过开孔扩压段（图中红色部分）排出到稳定段中，实现冷气与热气掺混的目的；当进行“冷态”试验时，掺混器热流出口关闭，发动机抽气将外界空气吸入稳定段内。

本研究中采用结构化网格对进气加温装置流场进行网格划分，网格量约为500万。考虑到结构化网格划分的可行性，在对数值计算模型的构造中基本保留了加温装置所有几何特征，对管内流动部分进行一定简化，由于开孔数量很大不利于网格划分，因此在数值计算过程中，采用多孔介质边界条件对其进行替代。

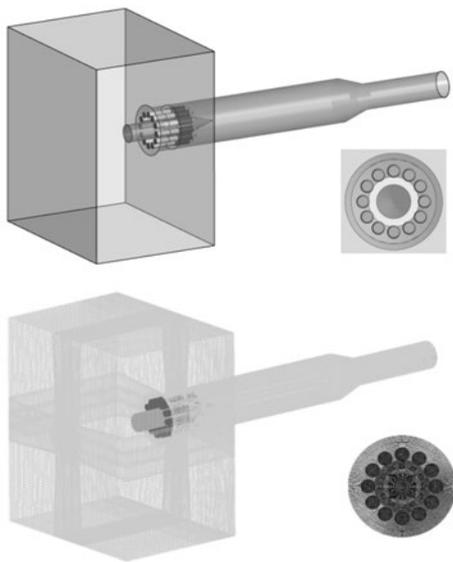


图2 进气加温装置三维模型及网格示意图

## 3 数值模拟方法及边界条件

运用商用CFD软件对加温装置流场进行三维数值模拟，无粘对流通量采用基于MUSCL插值的Roe格式进行离散，粘性通量采用二阶中心差分格

式进行离散，时间推进采用点隐式方法。湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型，同样使用二阶格式离散，分子粘性系数采用Sutherland公式计算。计算中采用了流量进口、压力进口、压力出口及无滑移绝热固壁边界条件，方程的离散均选择二阶迎风格式。计算收敛的标准为：各残差指标下降到 $10^{-6}$ 以下且不再变化，进出口流量的相对误差在 $10^{-5}$ 以下。

根据设计条件及流体力学基本公式推算，给定进气加温装置“冷态”、“热态”两工作状态下的边界条件，如表1、2所示。由于本文所研究的加温装置工程应用位置位于高原区域，因此，环境大气压设定为88000pa，环境温度设定为15℃。

表1 “热态”下，进气加温装置进、排气参数

名称	类型	流量 kg/s	总压 Pa	总温 K
掺混器进口	流量进口	28	—	673
外场	压力进口	—	88000	288
稳定段出口	压力出口	60	—	—

表2 “冷态”下，进气加温装置进、排气参数

名称	类型	流量 kg/s	总压 Pa	总温 K
掺混器进口	壁面	—	—	—
外场	压力进口	—	88000	288
稳定段出口	压力出口	60	—	—

## 4 计算结果分析

### 4.1 “热态”工况

图3给出了“热态”工况下加温装置流场结构示意图，如图中所示，冷气由外界被引射至稳定段内，通过掺混器与热气进行掺混，掺混后气流能够稳定通畅地从稳定段排出，并且引射气沿顺流方向流动并未出现返流及分离的现象。

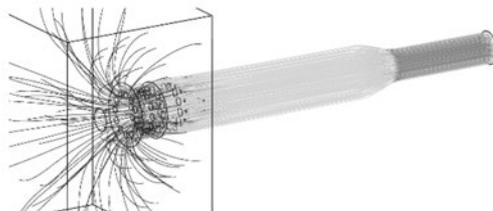
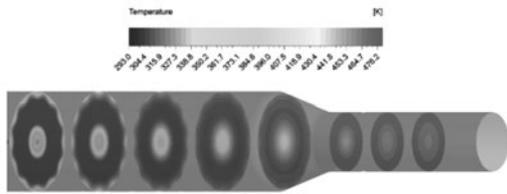
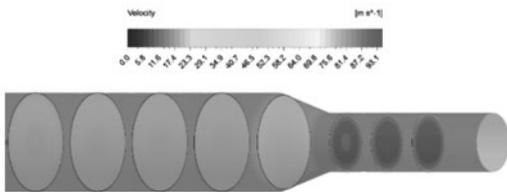


图3 “热态”工况下加温装置流场结构示意图



(a) 温度分布云图



(b) 速度分布

图4 加温装置内部温度及速度分布云图

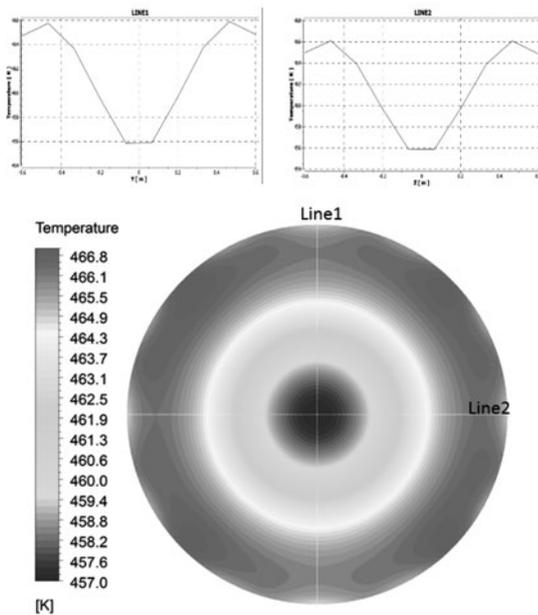


图5 进气加温装置出口截面温度分布规律

图4给出了“热态”工况下，加温装置内部温度及速度沿气流方向分布云图，如图中所示，在加温装置前部，低温区主要集中在稳定段中心处，这是由于掺混器的几何特征使冷气在稳定段前部中心处形成涡流区，在该处冷气与热气无法进行有效的掺混，但随着掺混气不断沿流向移动，涡流区逐渐消失，低温区不断被改善，各截面处温度不均匀性不断下降，掺混效果不断提高。

图5给出了加温装置出口截面位置温度分布规律，如图中所示，出口截面处最高温度与最低温度

相差9.8K，其中低温区集中在截面中心处。两条对称线Line1、Line2上温度分布规律及数值基本相同，因此不难得到出口截面处温度分布沿中心周向对称。根据出口温度不均匀度公式 $TDI = (T_{max} - T_{min}) / T_{av}$ 计算，进气加温装置出口位置处温度不均匀度TDI为2.11%。

图6给出了出口截面位置速度分布规律，考虑到速度边界层的存在会对该截面处速度不均匀度的计算产生较大影响，因此，去除边界层后，发现稳定段出口位置截面最大速度为88.3m/s，最低速度为82.8m/s，平均速度为87.2m/s。根据速度不均匀度计算公式 $VDI = (V_{max} - V_{min}) / V_{av}$ 计算得出，出口截面位置速度不均匀度VDI为6.3%。

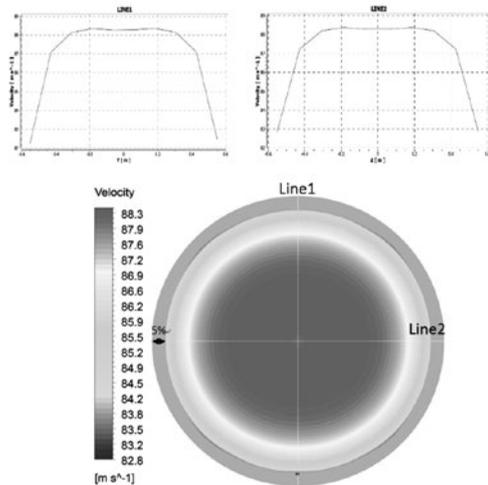


图6 进气加温装置出口截面速度分布规律

#### 4.2 “冷态”工况

图7给出了“冷态”工况下，进气加温装置流场结构示意图，如图中所示，在“冷态”工况下，发动机吸入的空气仍能较为均匀的通过加温装置流出。在图中并未发现明显的分离区，在“冷态”工况下，加温装置对发动机入口流场均匀性影响较小。

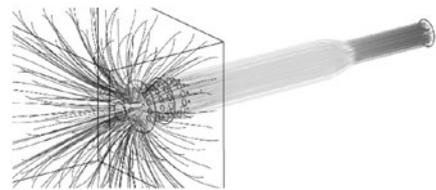


图7 冷态工况下进气加温装置流场结构示意图

图8给出了进气加温装置中心对称面上及内

部速度分布云图，从图中能够发现，由于在“冷态”工作状态下，掺混器内热流出口关闭，因此在掺混器内部形成低速涡流区，但该涡流区稳定在掺混器筒体内部，并未对稳定段内部流场产生影响；另外，由于掺混器结构的影响，冷气经过掺混器后，在掺混器后部产生一环形低速区，但随着冷气不断发展，该低速区消失，稳定段后部各截面形成了“中心高，周向低”的速度分布规律。

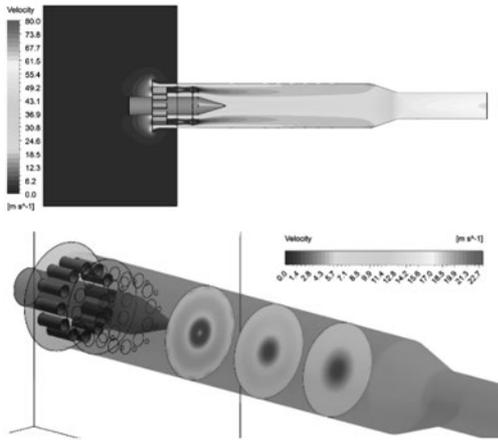


图8 进气加温装置对称面及内部速度分布云图

表3给出了稳定段进出口截面处总、静压参数。如表中所示，冷气经过进气加温装置后，总压损失为577.5Pa。其压力损失占稳定段进口压力的0.6%，对发动机进口流场影响很小。

表3 稳定段进、出位置处总静压参数

	总压 (Pa)	静压 (Pa)
稳定段进口	88000.0	87364.4
稳定段出口	87422.5	85949.2

图9给出了进气加温装置出口静压分布规律，从图中能够明显的看出，出口截面位置静压分布规律为沿截面中心周向对称，且该截面上静压最大值为85952.2Pa，静压最小值为85946.2，根据出口压力不均匀度公式 $PDI = (P_{max} - P_{min}) / P_{av}$ 计算，出口截面位置静压不均匀度为0.007%。

图10给出了冷态工作状态下进气加温装置出口速度分布图及对称线上速度分布规律，从图中能够发现相对高速区集中在掺混器出口中心处。另外考虑到速度边界层的存在会对该截面处速度不均匀

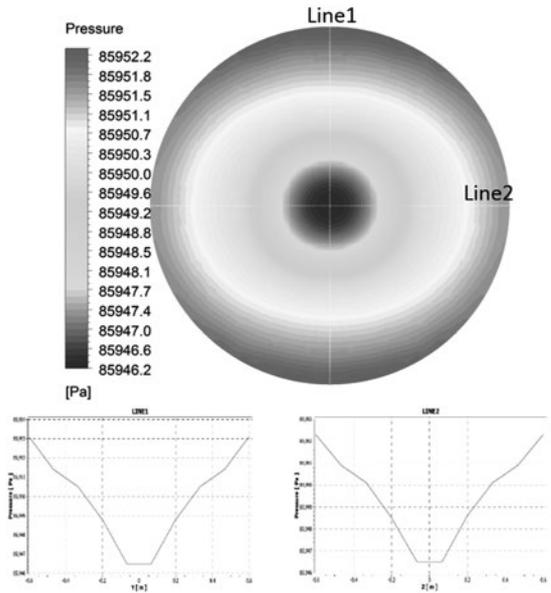


图9 进气加温装置出口截面压力分布规律

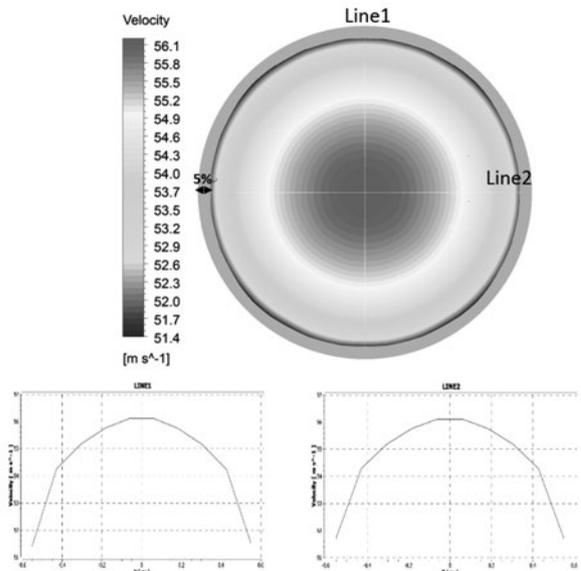


图10 进气加温装置出口截面速度分布规律

度的计算产生较大影响，因此，去除边界层后，发现掺混器出口位置截面最大速度为56.1m/s，最低速度为51.4m/s，平均速度为53.6m/s。根据速度不均匀度计算公式 $VDI = (V_{max} - V_{min}) / V_{av}$ 计算得出，出口截面位置速度不均匀度为8.8%。

表4给出了“热态”、“冷态”工况下，进气加温装置总体性能参数，从表中能够发现进气加温装置在“冷态”、“热态”工况下，性能参数差异较大，其主要原因是由于“热态”工况下进气加温装

表4 “热态”、“冷态”工况下,  
进气加温装置总体性能参数

名称	“热态” 工况	“冷态” 工况
加温装置折合流量	60kg/s	60kg/s
稳定段出口总压	87320Pa	87422.5Pa
稳定段出口静压	84921Pa	85924.9Pa
稳定段内平均速度	30.1m/s	18.4m/s
稳定段出口平均速度	87.2m/s	53.4m/s
稳定段出口平均温度	464.0K	288.0K
被试发动机进口压力 不均匀度	0.001%	0.007%
被试发动机进口速度 不均匀度	6.3%	8.8%
被试发动机进口温度 不均匀度	2.11%	—

置内部流场平均温度相比“冷态”工况下高170K左右,当保证进气加温装置出口流量一定时,两工况稳定段内部流速差异较大,但两工况下稳定段出口流场均匀性差异很小,并且均能满足国军标GJB 241A-2010<sup>[3]</sup>中相关规定。

## 5 结束语

本文采用数值模拟研究手段对进气加温装置“热态”、“冷态”工作状态下的流场性能进行分析研究,研究表明,“热态”工况下,稳定段出口平均温度为464.0K,出口温度不均匀度为2.11%,出口平均速度为87.2m/s,出口速度不均匀度为6.3%。该进气加温装置出口流场指标能够满足被试发动机进口流场需求,并且在“冷态”工况下,稳定段出口平均速度为53.4m/s,速度不均匀度为8.8%,出口平均静压为85949.2Pa,出口静压不均匀度为0.007%,总压损失为577.5Pa,对发动机进口流场影响较小。由此说明,该进气加温装置具备良好的气动性能以及工程应用价值。

本文研究内容的不足之处在于:对进气加温装置进行气动性能研究时,并未对加温装置稳定段内的流动控制装置如:整流网、蜂窝器等进行气动分析。当增加流动控制手段后,在满足发动机进口流场需求下,能够大幅度减小进气加温装置轴向长度,进一步提升进气加温装置的工程应用能力。因

此,流动控制装置对进气加温装置的影响规律是本研究下一阶段的目标。

## 参考文献

- [1] XX所航空发动机热试车问题及解决措施,机械化工,2017.
- [2] GJB 241A-2010 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范.
- [3] 陈益林.航空发动机试车工艺[M]:北京航空航天大学出版社,2010.
- [4] 徐峰,张少博,陈海峰.发动机热试车数据测量误差分析及处理方法[J].火箭推进,2012.
- [5] 某核心机台架进气加温控制系统设计,测控技术,2015.
- [6] 张逸民.航空涡轮风扇发动机[M].北京:国防工业出版社,1985.
- [7] 方昌德.世界航空发动机手册[M].北京:航空工业出版社,1996.

# 某高烈度区中小学教学楼 消能减震设计

■ 冯丹 徐志坚 杨超杰 陈丽颖 付锦龙 [结构]

**摘要:** 对某高烈度区学校采用粘滞阻尼器的消能减震设计方法进行了介绍,对多遇地震作用在有控和无控结构的地震响应进行对比分析,得到了结构的附加阻尼比。同时,利用PERFORM-3D软件对有控结构进行了罕遇地震作用下的弹塑性分析,研究了结构在罕遇地震作用下的塑性发展及阻尼器的耗能情况。分析结果表明:粘滞阻尼器有效的减小了多遇地震作用下结构的地震反应;有控结构在罕遇地震作用下的损伤状况得到了有效控制,呈现出良好的塑性铰发展机制,满足“大震不倒”的设防目标。

**关键词:** 消能减震结构; 阻尼器; 高烈度区; 消能子结构

## 1 工程概况

本工程位于河北省三河市燕郊,抗震设防烈度8度(0.3g),场地类别三类,设计地震分组为二组。由中小学教学楼、报告厅、食堂风雨操场、教师宿舍、连廊、门房、室外运动场及室外看台等组成,各结构单元如图1所示。

总建筑面积43738m<sup>2</sup>,其中地上建筑面积33511m<sup>2</sup>,地下建筑面积10227m<sup>2</sup>。其中中学教学楼地上6层,结构高度23.65m,小学教学楼地上4层,结构高度16.05m,原设计均采用传统的框架-抗震墙结构体系,经计算发现主要存在以下问题:在保证结构小震层间位移角满足规范要求的情况下,梁柱墙截面尺寸过大,不满足建筑功能要求,且墙抗剪截面超限情况较多,墙柱梁配筋量过大,不方便施工;依靠结构刚度抵抗水平地震作用,导

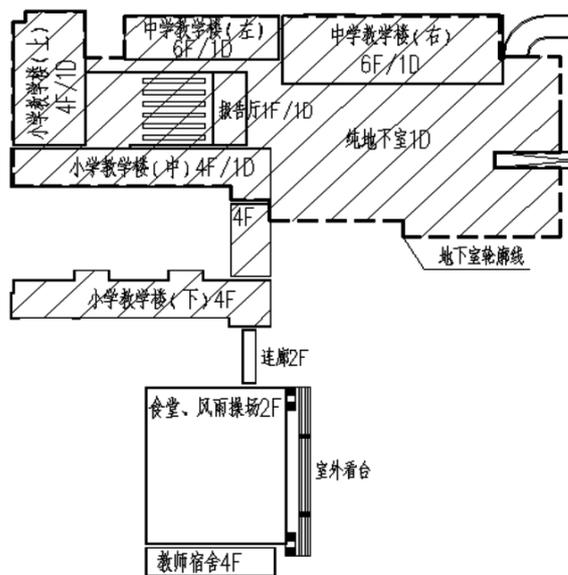


图1 结构单元示意图

致结构在大震作用下主要竖向构件出现严重破坏,结构安全性降低。

作者简介:冯丹,女,高级工程师,1999年毕业于辽宁工学院建筑工程专业,现就职于中航建投建筑设计研究院。

表1 粘滞阻尼器性能及技术参数

单元	阻尼系数 $C(\text{kN}(\text{S}/\text{mm})\alpha)$	阻尼指数 $\alpha$	阻尼力 (kN)	设计行 (mm)	速度 (mm/s)	数量 (套)
中学 (6层)	200	0.3	1000	$\pm 60$	55	38
小学 (4层)	150	0.3	750	$\pm 60$	40	40

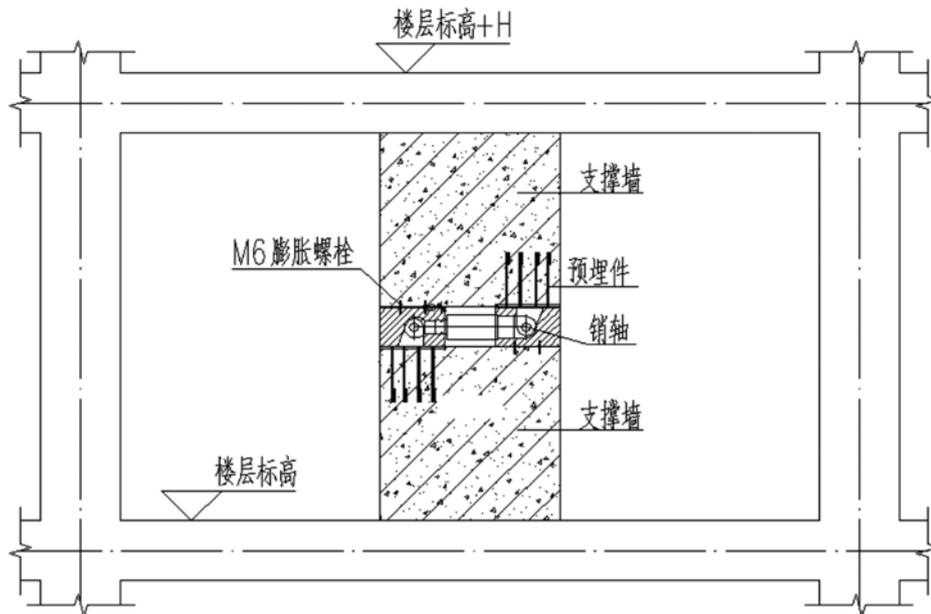


图2 阻尼器大样图

(墙体混凝土标号同框架梁)

因此本工程中小学教学楼均采用钢筋混凝土框架-剪力墙+粘滞减震阻尼器结构,通过阻尼器局部变形可消耗输入结构的地震能力,使结构的动力响应得到合理的控制<sup>[1-2]</sup>,改善结构的抗震性能的同时,减小主体结构构件截面大小。

本工程共采用粘滞阻尼器78套,粘滞阻尼器

性能及技术参数如表1所示,阻尼器形式如图2所示。本文主要以中学教学楼(右)为例,介绍本工程消能减震设计方法。

经计算,无控结构柱截面尺寸为1~4层900mm×900mm,5~6层800mm×800mm,主要剪力墙墙肢厚度为600mm;有控结构柱

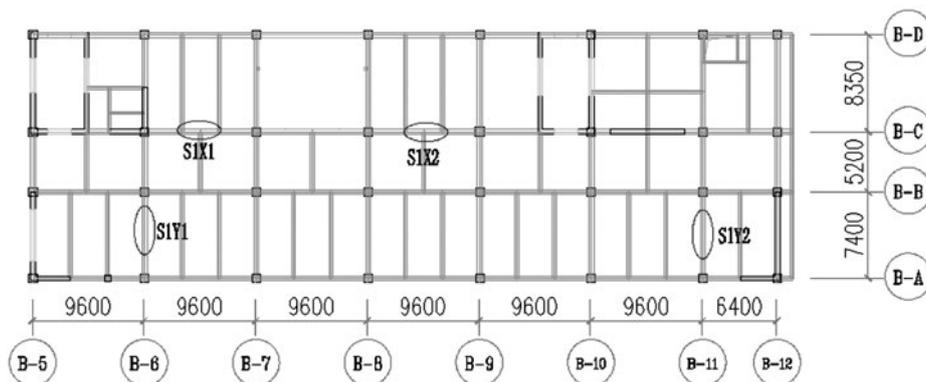


图3 一层阻尼器布置位置平面图

(粘滞阻尼器布置见椭圆圈)

截面尺寸为1~4层700mm×700mm，5~6层600mm×600mm，主要剪力墙墙肢厚度为400mm。

## 2 消能减震装置的布置方案

参考类似工程案例，根据结构实际计算需要并考虑经济性因素，本工程拟定以7%附加阻尼比为主要控制参数，选择适当数目的阻尼器配置在合适的位置。主要布置原则如下：（1）阻尼器应配置在层间相对位移或相对速度较大的楼层；（2）阻尼器的布置应基本满足建筑使用上的要求，并尽量对称布置<sup>[3-4]</sup>。

本工程减震设计中，粘滞阻尼器安装在原结构第一层~第五层，共安装22个粘滞阻尼器（型号吨位一致），各楼层阻尼器数量的布置数量如表2所示，结构一层平面布置图如图2所示。

## 3 多遇地震作用下消能减震结构弹性分析

结构基本模型由盈建科软件建立，在多遇地震下的弹性时程分析采用ETABS软件，选取7条时程波，为便于比较，将分别分析无控和有控两种状态下的结构地震响应，分析内容包括：结构减震前后的层间剪力及层间位移角对比、阻尼器在多遇地震作用下的实际等效附加阻尼比计算滞回耗能分析等。

### 3.1 无控和有控结构地震响应对比

在8度多遇地震作用下，无控和有控结构输入7条时程波平均值的计算结果如图4、图5所示。其中有控结构的层间剪力是在ETABS中通过框架柱分层截面切割获取，层间位移角通过读取层质心处的层间位移计算求得。可见有控结构在多遇地震作

用下的层间剪力和层间位移角明显优于无控结构，这说明结构附加粘滞阻尼器减震之后的抗震性能获得了大幅提高。

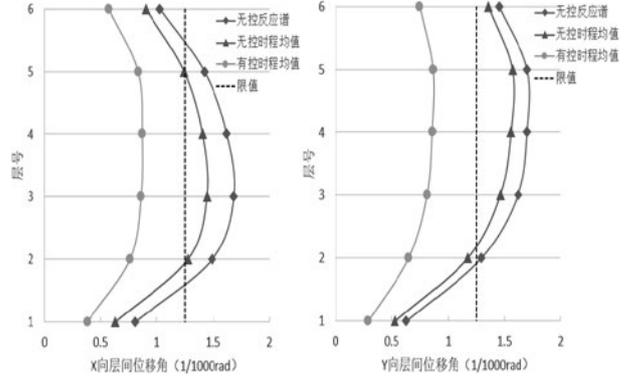


图4 多遇地震作用下有控和无控结构层间位移角对比

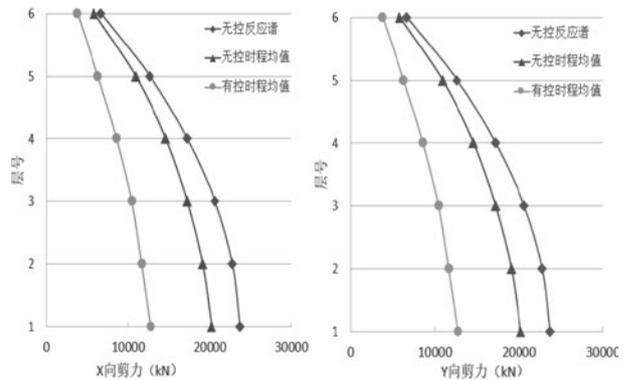


图5 多遇地震作用下有控和无控结构层剪力对比

表2 粘滞阻尼器的布置方案

层号	层高	阻尼器配置方案	
		X向	Y向
5	3.8	2个	2个
4	3.8	2个	2个
3	3.8	2个	3个
2	3.8	2个	3个
1	4.2	2个	2个

### 3.2 阻尼器附加阻尼比计算

本工程中粘滞阻尼器附加给结构的等效阻尼比依据《建筑消能减震技术规程》（JGJ297-2013）<sup>[5]</sup>第6.3.2条，按应变能法计算。计算所得7条时程波作用下的等效附加阻尼比计算结果见表3、表4。综合7条时程波计算结果的等效附加阻尼比平均值为：X向7.85%和Y向8.23%。

## 4 罕遇地震作用下消能减震结构弹塑性分析

对于罕遇地震工况的分析采用PERFORM-3D软件进行，主要分析内容包括：罕遇地震作用下结构抗震性能的分析、结构减震后屈服机制和子结构

表3 X向附加阻尼比计算

地震波	X向		
	总应变能 (kN·mm)	阻尼器耗能 (kN·mm)	附加阻尼比
ART1	58307	4820	8.26%
ART2	51743	4659	9.00%
CH1	74483	6033	8.10%
IMP	118330	7730	6.53%
IRP	60237	5080	8.43%
LOMA	61427	4975	8.10%
MOR	100718	6564	6.51%
平均			7.85%

表4 Y向附加阻尼比计算

地震波	X向		
	总应变能 (kN·mm)	阻尼器耗能 (kN·mm)	附加阻尼比
ART1	58307	4820	8.26%
ART2	51743	4659	9.00%
CH1	74483	6033	8.10%
IMP	118330	7730	6.53%
IRP	60237	5080	8.43%
LOMA	61427	4975	8.10%
MOR	100718	6564	6.51%
平均			7.85%

极限承载力验算。

#### 4.1 分析模型验证

为了校核所建立PERFORM-3D模型的准确性,将PERFORM-3D和YJK模型计算得到的质量、周期进行对比,结果如表5、表6所示。

表5 模型质量对比

YJK (t)	PERFORM-3D	差值 (%)
13161	13092	0.5

表6 模型周期对比

阶数	YJK (s)	PERFORM-3D	差值 (%)
1	0.604	0.574	4.9
2	0.568	0.534	5.9
3	0.458	0.412	10.0

综合上诉数据可以看出,原结构PERFORM-3D模型与YJK模型的质量差别小,动力特性基本一致。可认为,PERFORM-3D模型作为本工程消能减震分析的弹塑性计算模型是相对准确的,且能较为真实地反映结构的基本特性。

#### 4.2 地震波的选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB5001-2010)2016版<sup>[6]</sup>规定,计算罕遇地震时特征周期增加0.05s,大震分析按特征周期0.6s选波,选3条波(满足地震影响系数曲线统计意义相符)进行弹塑性时程分析。时程波计算基底剪力与反应谱对比结果如表7所示。

表7 反应谱于时程工况(弹性)的基底剪力对比

工况		反应谱	AW1	CHI	HAM	平均值
基底剪力 (kN)	X	23680	23307	22811	25183	23767
	Y	22107	23406	22999	23710	23372
比例 (%)	X		98.4	96.3	106.3	100.4
	Y		105.9	104.0	107.3	105.7

注:比例为各个时程分析与反应谱得到的结构基底剪力之比

#### 4.3 有控结构罕遇地震响应分析

##### 4.3.1 层间位移角

采用选取的AW1、CHI和MAM3条时程波进行罕遇地震作用下的弹塑性动力时程分析,结构的层间位移角如图6所示。由图6可知,在罕遇地震作用下,有控结构在3条时程波作用下均满足规范1/100的限值要求。

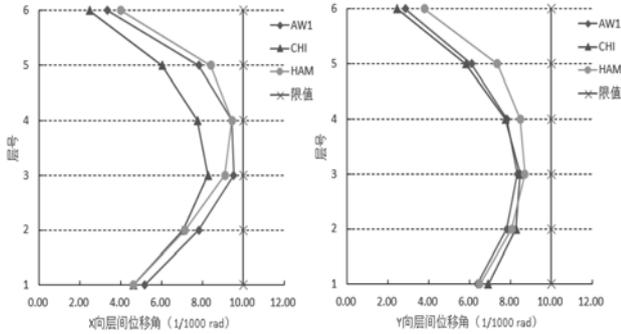


图6 罕遇地震作用下有控结构层间位移角

### 4.3.2 有控结构的弹塑性发展示意图

以AW1为例，对有控结构进行罕遇地震作用下的弹塑性屈服机制分析。其中，30s时X向罕遇地震整体结构的塑性铰发展如下图7所示。

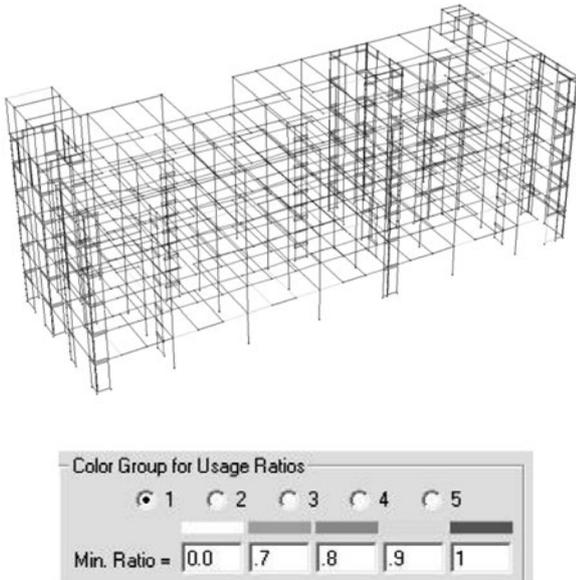


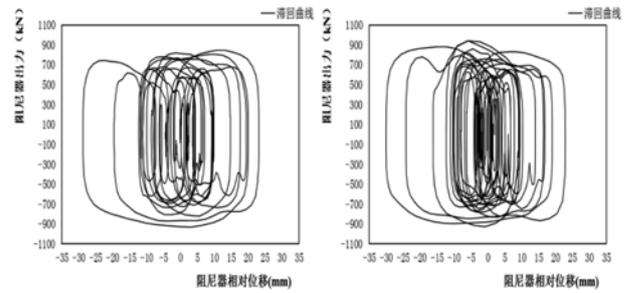
图7 结构塑性铰发展示意图

根据规范ASCE/SEC 41-46<sup>[7]</sup>，在罕遇地震作用下，有控结构主要竖向受力构件剪力墙塑性发展小，连梁适度进入塑性阶段，呈现良好的塑性铰发展机制，这表明主体结构在罕遇地震作用下的损伤状况能够得到有效控制和改善，从而使得整体结构具有良好的抗震性能，更有利于实现“大震不倒”的设防目标。

### 4.3.3 阻尼器耗能滞回曲线及出力分析

以AW1波为例，选取X、Y方向各一个出力最大的粘滞阻尼器，给出其在罕遇地震作用下的滞回曲线，如图7所示。结构中布置的粘滞阻尼器的最

大出力及最大位移如表8所示。



(a)X向阻尼器S4X2滞回曲线 (a)y向阻尼器S5Y1滞回曲线

图7 AW1时程波作用下粘滞阻尼器的耗能滞回曲线

表8 AW1 时程作用下阻尼器出力与位移分析

层号	X向			层号	Y向		
	位置编号	出力(kN)	位移(mm)		位置编号	出力(kN)	位移(mm)
1	S1X1	689	8.7	1	S1Y1	694.6	9
2	S2X1	839.4	19.3	2	S2Y1	849.6	19.4
3	S3X1	875.7	23.1	3	S3Y1	898.9	27.4
4	S4X1	887.3	23.9	4	S4Y1	909.6	30.1
5	S5X1	870.7	22.8	5	S5Y1	941.1	30.1
1	S1X2	711.9	12	2	S2Y2	826.4	19
2	S2X2	876.9	23.2	3	S3Y2	848.8	24.6
3	S3X2	920	28.5	1	S1Y2	665.3	7.4
4	S4X2	929.4	28.8	2	S2Y3	768.1	13.9
5	S5X2	895.4	24.3	3	S3Y3	785.8	17.9
				4	S4Y2	823.6	18.4
				5	S5Y2	845.3	17.4

综上所述，在AW1作用下，粘滞阻尼器的滞回曲线饱满，起到了良好的耗能作用，结构中阻尼器的最大出力为941.1KN，最大位移为30.1mm。

### 4.4 消能子结构极限承载力验算

根据《建筑消能减震技术规程》(JGJ297-2013)<sup>[5]</sup>6.4.2条要求，消能子结构的梁、柱构件应进行罕遇地震作用下的构件极限承载力验算，以确保在主体结构达到极限承载力之前，消能子结构不发生破坏。本工程根据消能子结构在罕遇地震弹塑

性时程分析过程中内力的时程结果,调整梁、柱截面尺寸及配筋,以满足子结构极限承载力的要求。计算过程中,荷载作用效应取考虑次要结构塑性发展及阻尼器产生附加阻尼作用的荷载作用标准值的效应,构件材性取材料最小极限强度值。

本工程中,消能子结构梁、柱均采用对称配筋,箍筋全长加密,梁上下钢筋全部通长配置。

以AW1为例,其典型柱承载力验算结果如图8、图9所示。

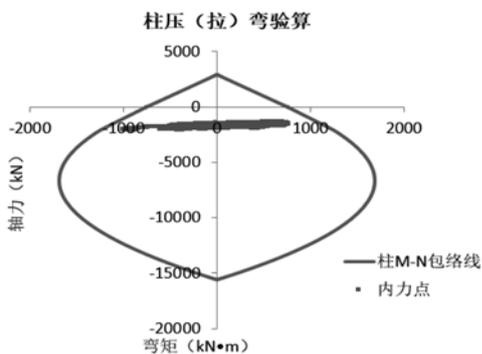


图8 典型柱正截面承载力验算

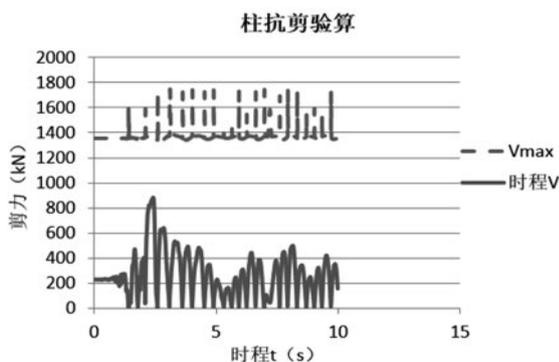


图9 典型柱抗剪承载力验算

## 5 结论

本文进行了多遇地震下无控和有控结果的对比分析,以及罕遇地震作用下有控结构的弹塑性时程分析。结果表明,本工程采用消能减震设计方案具有良好的效果和独特的优势,主要体现在几个方面:

1.多遇地震作用下有控结构的层间剪力、层

间位移角均明显小于无控结构,表明粘滞阻尼器耗散了地震能量,减轻了结构地震反应,减少了结构构件的截面尺寸,结构用材更经济。

2.罕遇地震作用下结构中所附加的粘滞阻尼器滞回曲线饱满,在罕遇地震作用下的最大出力和最大位移均不大于产品最大出力和容许位移。

3.设置粘滞阻尼器的消能减震构件在罕遇地震作用下剪力墙塑性发展小,连梁适度进入塑性阶段,呈现良好的塑性铰发展机制,且消能子结构部分的塑性发展程度较小,这表明主体结构在罕遇地震作用下的损伤状况能得到有效控制,使得整体结构具有良好的抗震性能。

## 参考文献

- [1] 丁幼亮等. 某底层框架砖房的消能减震设计. 建筑结构, 2005, 35(8): 33-35.
- [2] 李爱群. 工程结构减震控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 潘鹏. 建筑结构消能减震设计与案例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [4] 日本隔振构造协会. 被动减震结构设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S] (2016版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013..
- [7] Seismic rehabilitation of existing buildings; ASCE/SEC 41—46[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.

# 临空经济下航空货运产业需求分析

## ——以重庆机场为例

■ 王琅 郭璟坤 [工艺]

**摘要:** 随着民航大发展时代的来临,许多城市把未来发展机遇聚焦在以大空港带动临空经济的发展目标上,航空货运作为临空经济中航空核心产业的重要组成部分,近年来越来越受到重视。需求分析是产业规划的基础,本文以重庆机场临空经济规划项目为契机,通过对宏观环境、产业环境、区域竞争态势、规模分析等需求分析环节入手,明确江北机场航空货运的发展诉求,为后续产业方向和内容的确定提供了依据。

**关键词:** 航空货运;需求分析;规模预测;物流

### 1 引言

2017年,全国临空经济示范区增至10个,一轮以空港为动力源的流量经济热潮已被掀开。临空经济的产业构成多样,主要包括临空产业链和运输服务链围绕机场产生的相关产业,按照临空指向性通常分为:航空核心产业、航空关联产业和航空引致产业,其中航空货运属于航空核心产业。

航空货运1970年以来以每10年提高一倍的速度增长,进入20世纪90年代,国际空港物流增长速度几乎是客流增长速度的2倍。同时,航空货运以全球贸易运输量的2%运送了超过全球贸易货运总值40%的货物,航空货运高价值、高效率 and 远距离的特征决定了其对于区域内贸易和产业结构升级具有重大意义。随着鄂州机场项目的横空出世,一场关于航空货运产业的市场争夺战已经打响。

### 2 需求分析方法

需求分析的目的在于洞悉产业特点、甄别地域禀赋、明确产业突破点,它影响着规划思路和内容,是产业规划中的一个重要过程,是规划精确、

高效的基础。需求分析通常包括宏观环境分析、产业环境分析、细分市场分析、竞争分析、规模分析等内容,常用的方法包括:PEST分析模型、五力模型、SWOT分析模型、波士顿矩阵、钻石模型、组合预测方法、演绎分析法、案例分析法、数据分析、复合因素法等。

需求分析是一个系统分析的过程,需要针对不同的产业类型选择适宜的方法进行分析,物流产业是带有公共属性的服务行业,其受宏观经济与贸易影响比一般行业更为突出,同时需要准确的体量规划避免资源的浪费,因此进行航空货运产业需求分析时必须定性和定量结合考虑。

### 3 项目背景

2016年12月,国家发改委和民航局联合印发了《关于支持重庆临空经济示范区建设的复函》,标志着重庆临空经济示范区建设正式展开,届时重庆江北机场T3A航站楼及第三跑道工程即将建成,新跑道长3800m、宽75m,4F级,新T3A航站楼53万。此时期下,充分发挥江北机场区位优势、口岸优势和航空优势,引进相关产业投资者,做大重庆机场产业规模,促进重庆机场非航产业发展转型升级成为历史要求。

作者简介:王琅,男,助理工程师,2012年毕业于天津大学市政工程专业,现就职于中航建设综合规划研究院。

表1 我国物流相关规划

政策	主要内容
《全国物流园区发展规划（2013—2020年）》	将物流园区布局城市分为三级，重庆成为一级物流园区布局城市
《物流业发展中长期规划（2014—2020年）》	到2020年要建立出色的现代物流服务体系，加大物流基础设施投入，加强管理
《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》	大力发展第三方物流和绿色物流、冷链物流、城乡配送
国务院《关于促进快递业发展的若干意见》	到2020年，形成覆盖全国、联通国际的服务网络。
商务部等6部门《全国电子商务物流发展专项规划（2016—2020年）》	到2020年，基本形成“布局完善、结构优化、功能强大、运作高效、服务优质”的电商物流体系。

本项目规划范围面积约为17km<sup>2</sup>，重点对货运区和工作区未建成区域、配套服务区、生态绿化区域的临空产业开发建设发展进行研究，明确重庆机场临空经济发展方向、发展目标、发展思路与内容。本文以机场临空经济主要功能之一的航空货运为研究对象，按照宏观环境分析—产业形势分析—区域竞争分析—规模预测的系统化研究思路，得出重庆机场航空货运的发展建议和用地规模，为后续航空货运产业内容规划、空间布局和开发模式建议提供分析和决策的依据。

#### 4 宏观环境分析

首先利用PEST分析模型进行政治、经济、社会、技术多维度宏观环境的分析和把握：

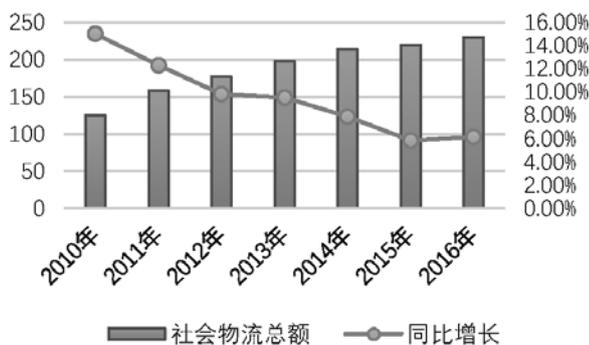
国际近几年来政治环境变化较快，特朗普新政、“萨德”入韩等事件的发生对全球经济造成了

较大影响，在当前形势下国际经济增长速度放缓，对我国而言挑战与机遇并存。国内对外开放的脚步逐渐加快，我国相继出台了自贸区、“一带一路”建设等各类相关政策，促进与周边友好国家及世界各国进行更好的贸易交往与合作活动。

自08年金融危机以来，全球经济复苏乏力，增长动力不足、经济全球化遇到波折、贸易保护主义抬头等问题仍是未来全球经济复苏需要解决的问题。从经济发展的周期看，全球经济增速呈现阶段波动、总体下降的趋势。另一方面，新一轮科技和产业革命正孕育兴起，国际分工体系加速演变，全球价值链深度重塑，这些都给经济全球化赋予了新的内涵。

十二五以来我国经济较于全球发展快速，社会人均收入不断增加，目前我国人均国民收入已经接近中等偏上收入国家的平均值，中产阶级逐渐在社会中占据主导地位，购买力不断增强。中国普遍

中国社会物流总额及增长趋势（万亿）



物流总费用占GDP对比

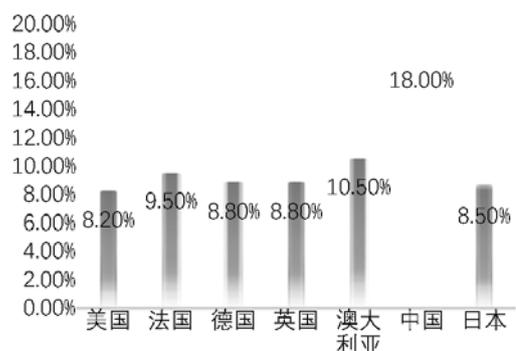


图1 国内物流业发展情况

性的市场增长时代逐渐走向尽头，消费形态正从购买产品到购买服务，从大众产品到高端商品转变，越来越多的中国消费者更加关注健康、家庭和体验，注重品质消费，品牌忠诚度提高，而国际品牌依然主导者中国高端产品市场格局。

近年来，我国高铁行业的不断发展以及智能无人机技术的不断进步，都对航空货运产生了一定影响。未来货运列车的继续提速，随着高铁八纵八横网络的建成，高铁货运网络构建成型，航空运输在800km以内不在具有优势；国内无人机物流热度很高，以京东、顺丰、阿里为首的三大的巨头正加速布局无人机物流市场，随着未来几年通用机场加快建设、低空空域逐渐开放、政策法规逐渐完善，无人机货运将极大促进航空货运的发展。

## 5 航空货运及细分市场分析

### 5.1 总体形势

宏观环境挑战和机遇并存，新时期的临空经济发展需深耕产业诉求、寻求开放合作、培育核心优势。航空货运是物流业的高端方式，开放的世界经济、频繁的国际贸易为我国物流业带来了巨大的机遇，近年来政府相关规划连续出台，为物流业的高速发展提供了政策保障。同时跟发达国家相比，中国物流发展任重而道远，但总体来说我国社会物流总费用逐年增长，其占GDP比例与发达国家逐步缩小，物流行业越来越繁荣。

航空货运方面，全球航空货（邮）运输总周转量逐年增长，近30多年来增长率一直在6%上下，1980年到2010年平均复合增长率为6.18%。我

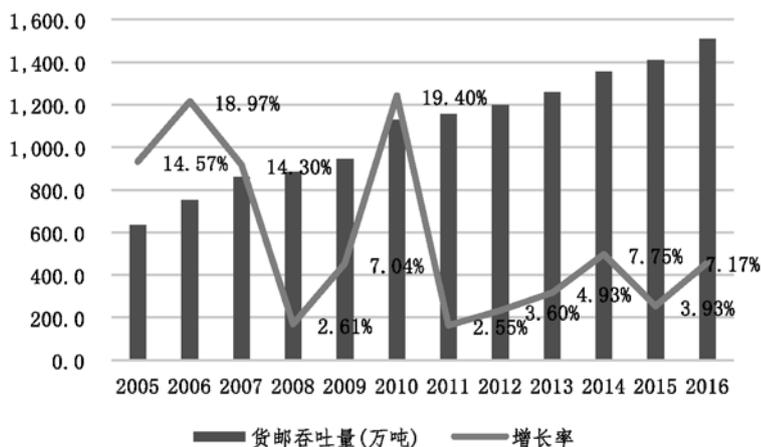


图2 2005~2016年我国机场货邮吞吐量增长情况

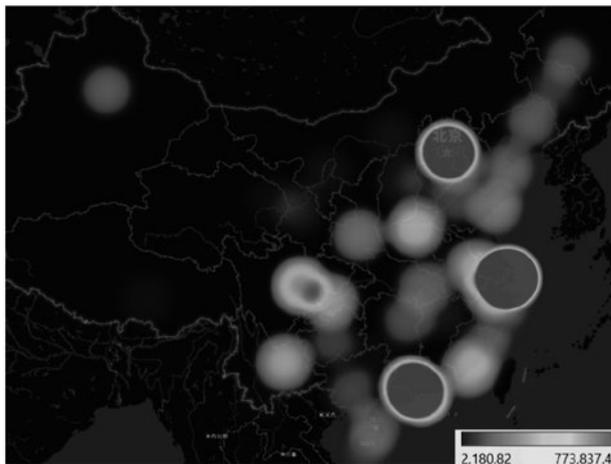


图3 2016年我国航空货邮量格局（万吨以上）

表2 中国航空公司在役货机机队（截止2016年12月）

货运航空公司	中型货机数量	大型货机数量	合计
顺丰航空	36	—	36
扬子江快运	22	3	25
中国邮政航空	27	—	27
国货航	4	11	15
南航	—	15	15
中货航	—	10	10
友和道通	—	10	10
长龙航空	3	—	3
圆通航空	5	—	5
奥凯航空	1	—	1
龙浩航空	1	—	1
合计	99	49	148

国2016年完成货邮吞吐量1510.4万t，比上年增长7.2%，增长率有所回升，北上广地区占货邮量主要部分，川渝地区逐步成为第四极。从航空货运企业来看，传统国家货运航空公司主运营基地布局基本完成，民营快递、地方货运航空、国际快递巨头正在加速布局。目前，全国共有全货机148架，主要集中在顺丰航空、扬子江快运、中国邮政航空、国货航等货运航空公司，中型货机占比超过75%。

### 5.2 细分市场

深入细分市场，航空货运产业涵

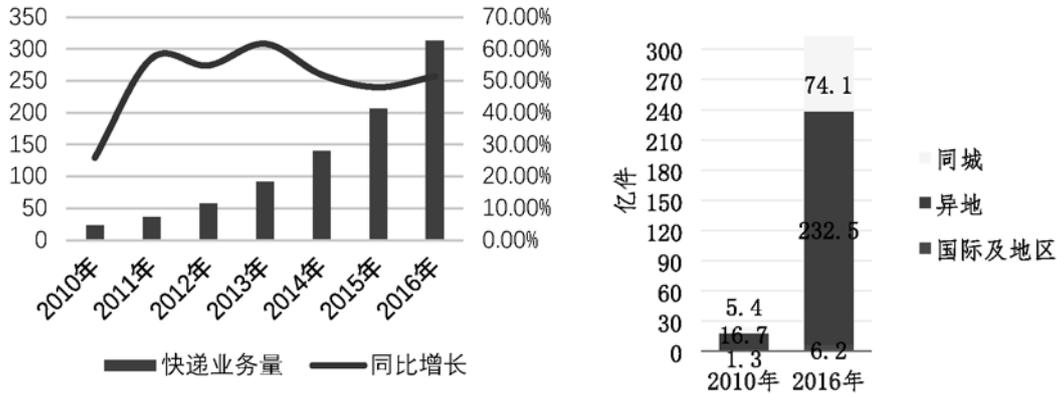


图4 我国快递业增长情况

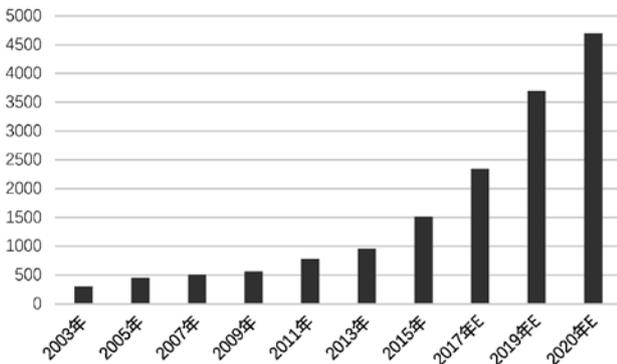


图5 冷链物流行业市场规模发展及预测 (亿元)

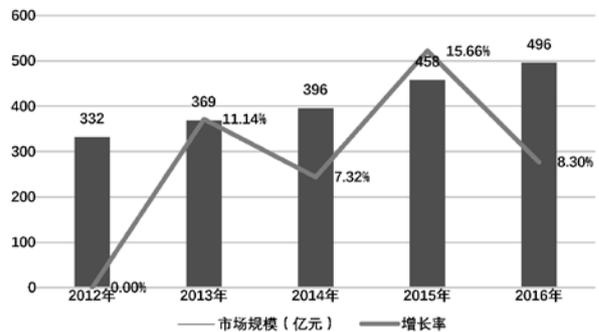


图6 医药冷链物流市场规模

盖的航空普货、航空快递、航空特货和航空邮件四大主要领域，也呈现出新经济时代下各自的发展特点。航空普货受产业转移和运输模式转化的影响较大，互联网的发展使得航空邮件走向没落，而航空特货将越来越成为货运高价值的组成部分，航空快递也逐步成为我国航空货运的重要增长源，本文以航空快递和航空特货进行深入分析。

新经济时代下的电子商务飞速发展，各类激励政策的连续出台，使快递、冷链等领域获得了快速发展，航空货运因此受益。爆发式增长使得快递日益成为国内航空货运市场的主要驱动力，2014年国内快件航空货运量约占国内航空货运总量的49.2%，据统计美国国内快递占国内航空货运60%以上，中国预计2025年达到美国同等水平。参照现在异地快递量的发展速度进行保守估计，以特快快递平均首重0.5kg/件来估算，2025年中国快递空运需求将超过400万t，

航空运输的高时效性决定了其与冷链产品的

高匹配性，我国冷链物流市场迎来了高速发展时期，总体增长率在10%左右。据统计，药品从生产到一线城市的冷链运输中航空运输占比达到80%，而生鲜电商作为垂直电商的最后一块蓝海，未来将和药品运输共同促进航空货运的增长。预测未来我国冷链需求规模超过1.1亿t，市场规模将在2020年超过4500亿元。

## 6 重庆航空货运竞争分析

产业形势分析洞悉的产业机遇需要与区域竞争分析相结合，才能实现内部资源禀赋和外部环境相匹配的发展策略。2016年江北机场货邮吞吐量36.1万t，增长率13.17%，增速位列西南地区第一，但区域竞争中呈现的“客强货弱”的态势并未得到根本改善，货运量低于昆明机场，与成都双流货运差额比一直保持在40%左右。机场“十三五”预测2020年货邮吞吐量超过70万t，国际货邮吞吐

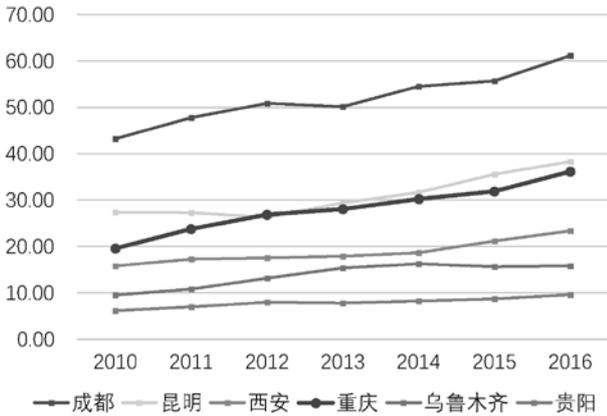


图7 西部地区五大机场货运量比较

量达到20万t。在西南地区机场中，重庆江北占比为24%，位列西南第三位，其国际货邮量2016年突破10万t，占自身货邮量27.7%，居西部第一。

笔电产品附加值高，适于航空运输，是重庆航空运输的重要货源，2011年和2012年笔电产品的爆发式增长使得重庆机场的国际货运量在整个西部地区领先。汽车和电子信息是重庆工业经济的两大支柱，在重庆市2015年规模以上工业总产值中位列前两位，近年笔电产品的增速有所放缓，手机制造兴起，应做大现有优势。

在国内快递业航空货运市场上，民营快递顺丰、国资快递EMS、圆通均有自建的航空货运公司，顺丰和圆通分别选择了鄂州和嘉兴自建机场；从快递公司发展来看，目前国内民营快递企业纷纷上市，融资布局，未来航空货运会进入繁荣竞争的局面，重庆应抓住各大企业的布局需求寻求合作。

电子商务领域的企业一级仓库布局基本完成，重庆在电商西南中心的争夺中远远落后成都。重庆应注重市场潜力大、航空运输需求旺盛的医药、美妆、智能穿戴等类型的电商企业。

冷链方面，2016年重庆冷库面积增长近一倍，每万人冷库保有量为358.52t，位于全国第五，远高于西南其他省份，具备冷链资源的竞争优势，甚至可以承接周边省市溢出的冷链需求，重庆冷链物流发展正当其时。

## 7 航空货运用地需求预测

用地需求预测是产业规划指导空间落地的必要过程，按照重庆机场集团“十三五”规划，江

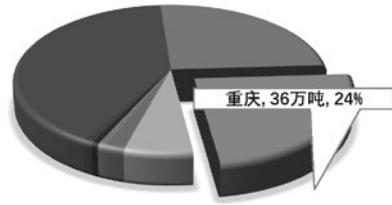


图8 西南片区机场货邮完成量

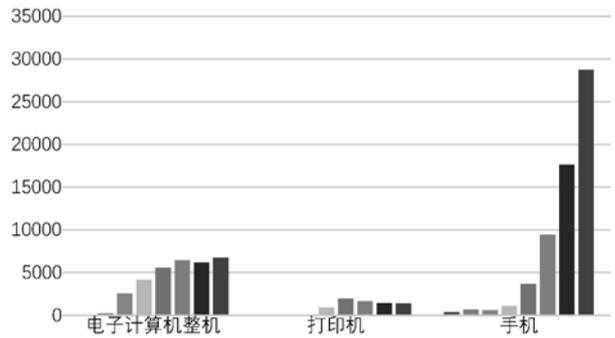


图9 重庆电子信息主要工业产品产量(万台)

北机场2025年目标年货邮吞吐能力110万t，2030年达到160万t。以此为基础，通过案例对比法和时间序列法预测到2025年国际货邮吞吐量达到30万t，2030年达到65万t。

以重庆江北国际机场2025年和2030年货运量目标为基础，通过采用典型案例类比和行业标准推

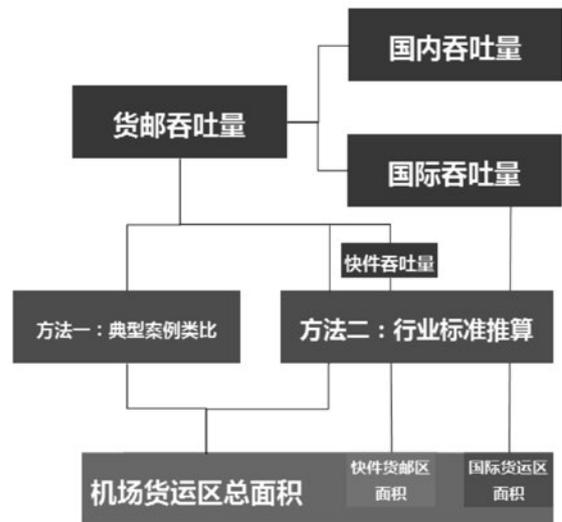


图10 重庆机场货运区用地规模预测思路

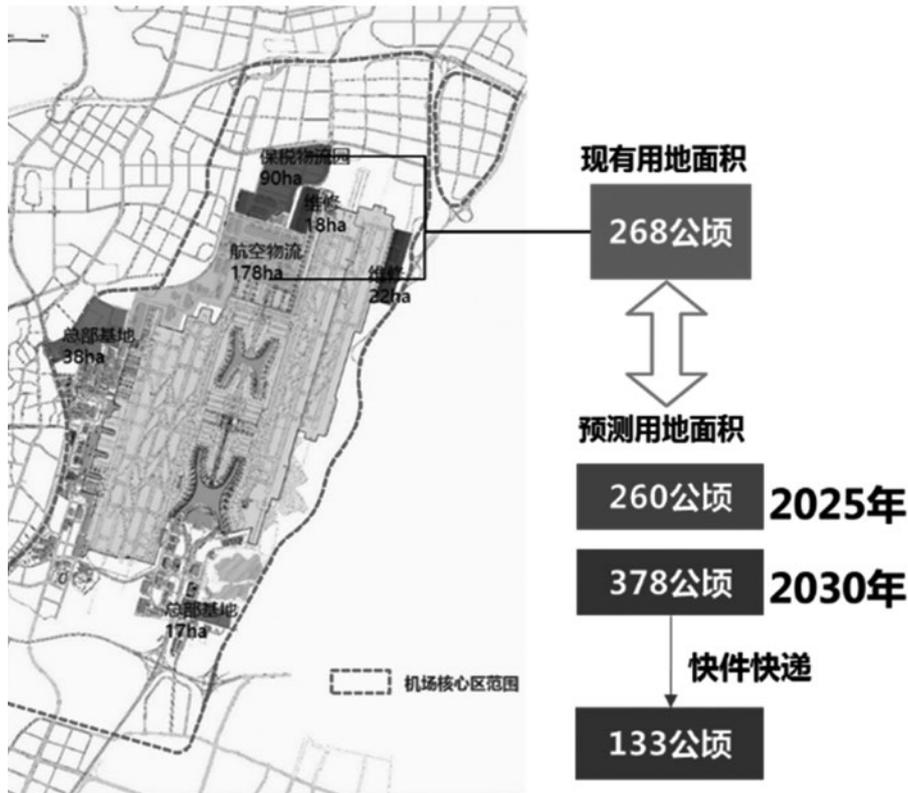


图11 重庆江北国际机场航空物流用地规模预测

算两种方法，预测江北国际机场货运区总面积。另外，依据国际货运量目标值为基础，采用行业标准推算方法来测算综合保税区口岸操作区的面积。最后，根据航空快件占航空货邮量比例的发展趋势，预计2025年快件能到80万t，根据行业标准推算法推算处理快件货邮所需用地。

根据推算，预计2025年，总体物流产业占地260ha，国际功能区占地79ha。快件货邮将能达到80万t，其所需的土地为133ha。

梳理现状表明江北机场目前已拥有物流用地约268ha（含保税区面积），根据预测，到2025年物流功能相关用地总体需求为260ha，2030年需求为390ha，总体来说物流用地充足，能满足近中期发展要求，远期还需拓展。

## 8 结语

随着产业转移的推进及中西部机场的崛起，内陆城市的航空货运市场将逐渐壮大。重庆机场航空货运的发展需注意：利用“一带一路”、中新战

略、渝新欧等优势打造中国西部立体化综合物流节点，挖掘货源需求，保障双向流量平衡；紧抓快递企业正“向下向西”布局的契机，寻找潜在快递企业在重庆建立基地和转运中心；快递向空中发展是行业趋势，重庆应积极引入布局尚未完成的国内外快递巨头，同时关注已选址的高品质快递企业后续战略，寻求合作机会；冷链物流具备竞争优势，应抓住医药、生鲜行业对航空运输的需求，大力发展冷链物流，占领市场。

# “五态融合”理念 在荆门通航小镇极客公园的实践

■ 殷丽燕 [规划]

**摘要:** 随着全球化进程的加快以及人们对速度经济的追求,城市发展进入航空时代。通航产业作为战略新兴产业正逐步成为新常态经济增长的重要引擎。同时,互联网的快速发展已经颠覆了传统的消费观念。本文立足新时期通用航空结合创意经济的新消费体验市场背景,探索以航空为核心的主题公园类项目规划理念及方法,在此基础上提出“五态融合”理念,并将该理念应用于荆门爱飞客航空小镇极客公园的实践中。该理念从“业态、文态、形态、生态、时态”五个方面对项目规划实践进行了分析,对航空创意经济规划建设进行了新的尝试。

**关键词:** 爱飞客;航空创意经济;主题公园;五态融合

## 1 引言

全球化进程不断加快的进程增速了人们对速度经济的追求,城市发展进入航空时代。运输航空与通用航空是民航的两翼,在欧美国家,通用航空已经发展为创意经济的重要推动力量。近年,我国低空空域逐步开放,一直限制我国通用航空发展的核心问题逐步得到了解决。

随着我国经济和社会发展进入“新常态”,经济稳增长和产业转型升级将给新兴产业带来更多机遇。同时,随着互联网的快速发展,传统消费观念已经发生了巨大转变。通用航空结合创意经济的新消费体验市场正逐步形成。

由中国航空工业集团在全国布点打造的首个“爱飞客”创意产业项目——荆门爱飞客通航小镇是以通航服务为核心,依托爱飞客航空服务基地而逐步形成的新型城镇化聚集区。爱飞客通航小镇中,航空主题极客公园位于小镇核心位置,它是爱飞客通航小镇的形象展示窗口,同时也是“爱飞客”品牌的创意综合体中第一个实践项目,它的规划实践将发挥重要的创新探索和示范作用。

## 2 五态融合理念解读

### 2.1 五态融合理念的要素

为打造首个爱飞客综合体示范项目并迎接2016年爱飞客飞行大会,荆门市将极客公园作为漳河新区建设的重点项目。为避免主题公园定位不准、文化挖掘不足、产品同质化严重等常见问题,团队在设计之初提出了“五态融合”理念,即将“环境生态、功能业态、场地文态、空间形态和发展时态”五项要素贯穿于规划及建设中。这五态是城市建设中最核心的要素,各要素间协调、融合,才能最终形成适宜项目自身的最优组合。

#### 2.1.1 环境生态

自然环境生态的利用和保护是项目规划设计的前提。国家近年陆续提出的“维护生态安全、优化生态空间”的政策和理念便是对生态环境关注的体现。项目生态环境不仅需要构建自身内部完善的生态系统,还需要从更宏观的层面与外部生态环境有效衔接。从而形内外交织、多元协同的城市生态网络。

#### 2.1.2 功能业态

功能业态的定位源于上位规划的引导和对未来发展的分析判断。功能业态与项目用地存在着紧密而互动的关系,它直接影响空间布局和发展目标

作者简介:殷丽燕,女,高级工程师,2005年毕业于荷兰瓦格宁根大学空间规划专业,现就职于中航建设综合规划研究院。



图1 设计范围图

的制定。不同业态的主次关系，在布局、位置、用地比例中都有所体现。

### 2.1.3 场地文态

场地文态是“场地内涵的体现，是城镇的灵魂，也是不同于其他城镇“气质”的关键要素所在。”一个优质的项目具有空间归属感，并能够让人们认同。规划设计中，除了挖掘、保护、利用现有文化元素外，还需要对文化主题思想进行提升、将文化设施合理布局，注入具有活力的文化活动，构建完善的文化服务体系，这样才能形成场地鲜明可持续发展的文化特色。

### 2.1.4 空间形态

空间形态是自然、业态、风貌、文化等多方面内涵的外在表达，它需要对项目开发强度进行合理控制，形成人们可认知的、愉悦的空间感。空间形态具有多种多样的形态，其形态与业态的不同性质和用途相辅相成。同时，空间形态的设计受到地形、限高、造价等多方面因素的制约。

### 2.1.5 发展时态

发展时态指项目的动态发展特性，项目从规划之初至建设运营的过程中，不断应对变化的区域发展和城市环境，持续提升自身建设运营水平和场地空间变化等动态发展的使用需求。对项目的多方考量从动态发展的角度出发，将时间元素融入到三维的空间规划中。

## 2.2 五态融合理念的内在联系

通过对“五态”进行梳理，可以精准研判并确定城镇及项目的定位及发展策略，最终形成高屋建瓴、系统解决主题公园复杂问题的五态融合的发展体系。

## 3 五态融合理念在荆门航空小镇极客公园的实践

荆门爱飞客极客公园项目占地40ha，位于湖北省荆门市漳河新区，荆门爱飞客镇机场核心区和航空扩展区内，西至规划中的飞行社区、东至荆漳公路、北至爱飞客大道，南临漳河水库，镇域面积1034ha。

爱飞客通航小镇所处的漳河新区为典型的鄂中低山丘陵地带，通航小镇除北部丘陵和西侧水库外，整体用地平缓，地质条件良好。现状水资源丰富，南临万顷漳河水库。

极客公园项目的规划设计除了关注空间塑造和文化特色外，还对产业、生态、建设时序等方面进行了充分分析论证，以“产业联动、生态优先、航空筑魂、理水营园、与时俱进”五态融合的理念指导极客公园的规划实施，充分提高规划效能。

### 3.1 基于区域可持续发展的业态选择—产业联动

“产业与城市是紧密而互动的关系，产业功能区是城市经济职能落地的空间聚集地域。产业功能区又服务于城市，其发展内容与城市主导功能是密切相关的。”同时，产业功能定位是一个项目成功的关键。通过对极客公园客观地分析和论证，将公园定位为依托荆门通航小镇的整体航空氛围和漳河水库的滨水自然生态资源的“滨水生态航空主题公园”。

极客公园规划超越了传统公园的概念。为促进项目与其他核心功能紧密结合，设计从漳河新区及爱飞客通航小镇两个层面提出提升联动性和完善产业内涵的策略，最终达到项目与区域间共同可持续发展。

## 一环

可环湖打造六大旅游休闲板块，极客公园特色鲜明，与其它产品差异化明显，将打造成为漳河水库周边最具吸引力的旅游产品。

1	2	3
<b>水库游船体验</b>	<b>航空文化</b>	<b>美丽乡村</b>
乘船观 观音岛 漳河第一坝 十里画廊 洪山古寺、观音寺	漳河机场 极客公园 航空主题乐园 ...	林场半岛 黄色陈井 蓝色付集 漳河荆楚慢镇 谢花桥渔厂...
4	5	6
<b>农科体验</b>	<b>水利观光</b>	<b>生态保育</b>
中国农谷 京河生态农业园 可可生态农业园 昕泰休闲采摘园...	漳河第一坝 鸡公尖大坝 漳河展览馆 观音寺...	候鸟栖息地 鸟岛湿地鸟类家园 潜水训练基地 三星岛野营基地

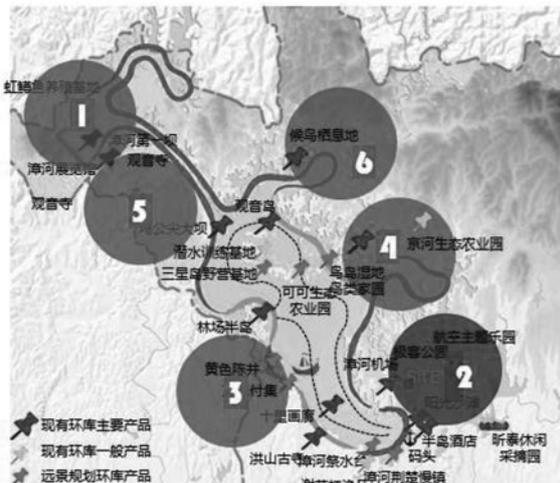


图2 漳河新区环湖产业布局图



图3 爱飞客通航小镇产业版块分区图

### 3.1.1 与漳河新区的产业联动

漳河新区依靠航空文化、水文化、荆楚文化三大特色并驾齐驱，共同促进城镇发展，并依托万顷漳河水库的优美自然资源，环水库打造旅游休闲产业。定位航空主题的极客公园与环湖畅游、美丽乡村、农科体验、水利观光、生态保育等主题产品差异化明显，对休闲产业进行了互补。

### 3.1.2 与爱飞客通航小镇的产业联动

根据产业定位，通航小镇被划分为8个产业版块：航空运营核心版块、通航企业聚集版块、创意文化及配套版块、科技研发及生产版块、特色商业街区版块、飞行社区版块、滨水休闲版块及游艇社区版块。极客公园处于小镇的核心位置，属于滨水休闲版块，其滨水的场地条件和狭长的城市界面要

求该片区承接休闲服务功能。

爱飞客通航小镇承载了通航制造业、服务业、旅游业及其他相关联协调同发展的使命。爱飞客大道由东向西联接了“以航空展示研发为核心的爱飞客之家、以飞行旅游体验为特色的爱飞客之旅、以飞行社区为吸引的爱飞客之夜、以创意经济为内涵的爱飞客之汇、以航展表演为内容的爱飞客之秀。”在通航小镇多元完善的产业中，极客公园产业项目与其他产业功能互补、客源共享、产品关联，在通航小镇内部构建了整体完善的“吃、住、行、游、购、娱”的良性经济循环。

## 3.2 基于利用和保护生态策略——生态优先

### 3.2.1 航空小镇生态网络

“城市生态网络的建设实质就是以植被带、

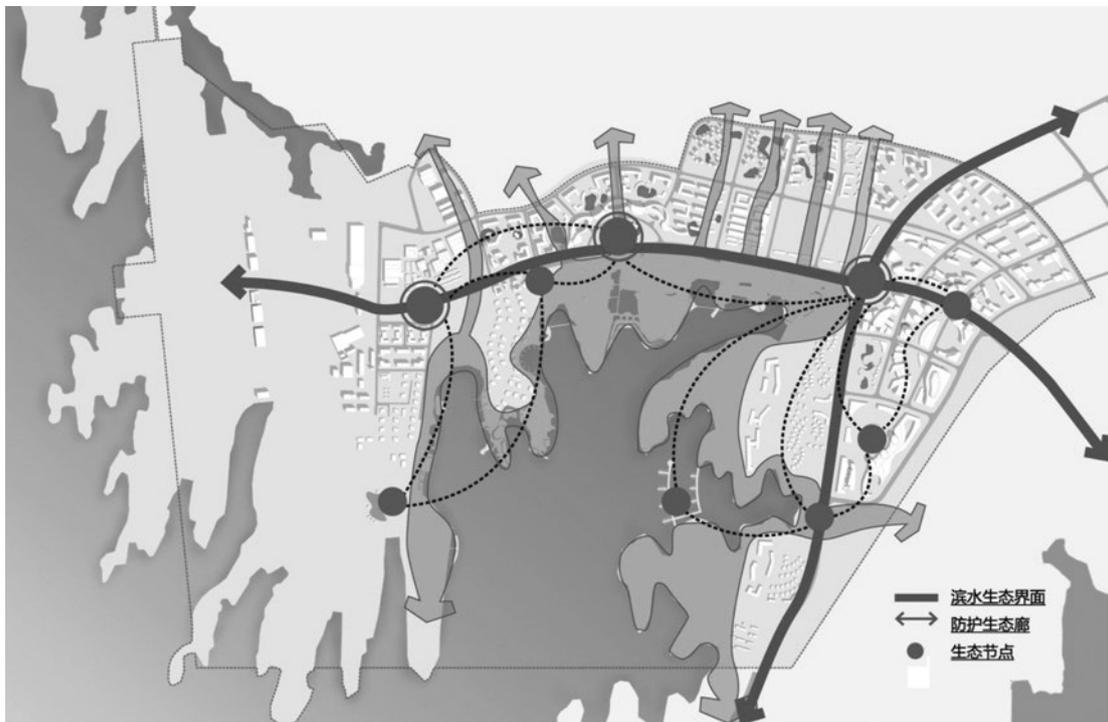


图4 爱飞客通航小镇生态网络图

河流、农田为主，通过线性廊道将城市中分散孤立的各类型的生态斑块联系起来，形成“点—线—面”结合的自然、多样、高效、有一定自我调节能力的完整的城市自然生态体系。”荆门通航小镇的生态网络分为：滨水生态界面、防护生态廊和生态节点三个层级。公园规划设定的生态空间和外部自然生态屏障连为一体，形成内外融合的生态网络。极客公园位于滨水生态界面的北侧重要生态节点。它在整个城镇中占据着关键的位置。

### 3.2.2 极客公园的生态要素

极客公园与自然资源呈现良好的互融关系。原场地除了湿地植被系统外，还有大量橘林。设计遵循生态优先原则，结合道路广场的设置需求，保留了大量原生植被和现状橘林。

公园南部紧邻漳河水库，场地依自然条件形成大小不一的4个半岛，岸线总长约2km。为保护漳河水体生态格局，同时激发滨水空间活力。公园规划了生态防护岸线、公共活动岸线。生态防护岸线是指结合生态湿地规划设计的以生态防护为主要目的的滨水空间；公共活动岸线则指以公共活动为导向的滨水活动空间。

## 3.3 基于航空主题的文态诠释—航空筑魂

### 3.3.1 航空文化基础

场地缺少了文脉，也就缺少了精髓。设计需要体察场地文化基础，充分揭示场地人文及物理特

征，展现文化内涵。

湖北荆门拥有良好的通航产业及文化基础：造就中国航空史传奇、具有55年历史的特种飞行器研究所坐落于荆门，这里研制出了我国第一架大型水上反潜巡逻机、第一艘大型载人充氦飞艇、第一架实用型地效飞机、第一架水陆两用飞机……填补了中国航空史上一个又一个空白。极客公园不仅近距离接受荆门机场核心区和航空产业园航空文化氛围辐射，更凭借爱飞客品牌，成为普及航空知识、传播航空文化、实现飞行梦想的载体，为人们提供飞行体验和服务。

### 3.3.2 航空文化的提升与创新

在航空主题和故事线索下构建与航空文化相关联的场景，建立“点、线、面”的文化展示体系，在“面”上提升航空主题为：“航空魅力舞台，极客水天秀场”；在“线”上着力打造沿爱飞客大道文化展示廊道和公园内部连接各节点的航空体验游线；在“点”上打造了展示地方产业的“天空之城”主题区，特种飞行器研究所按产品谱系分类，通过真机展示、涂装、发展历程墙、创新雕塑群等手法塑造场地文脉。这里打造的不仅是景观空间，更是地方企业对外展示的舞台。它向人们传达出具有荆门特色航空工业的欣欣向荣和对未来发展的期望。

还有结合原生自然环境探索飞翔的“绿野仙



图5 极客公园岸线布局示意图

踪”主题区、无人机赛场、热气球体验区、飞碟餐厅等重要节点，这些节点以和时代同步的景观形式丰富着公园内涵，与主题产生密切联系。

### 3.4 基于水天特色的形态塑造—理水营园

良好的空间形态是规划成果的外在表现，也是人们对空间评价的重要因素。在结合生态、业态和文态的基础上，构建“将航空创意体验与城市滨水休闲相结合”空间理念，形成特色界面和节点空间。

#### 3.4.1 理水

漳河水库水位根据季节发生明显的周期性变化，枯水位与洪水位的变化高差达到11.5m，对滨水区的景观设计带来巨大的挑战。根据常水位标高确定木栈道竖向，木栈道两侧在保留现状植物的基础上，进一步丰富滨水植物景观，打造具有场地特色的自然野趣的景观风貌。栈道滨水外侧增加局部微地形的营造，并在常水位线以上种植大量的花卉植物，形成别具特色的滨水花海景观，同时减少了水位降低时栈道与水岸的高差。局部设置的景观台阶区能够很好应对水位高差变化。

#### 3.4.2 营园

极客公园场地被自然形成的半岛划分为4个空间，同时“北临大道、中间狭长、南滨水畔”的特征，使得场地自然产生了3条流线贯穿全园。规划将元素复杂、竖向丰富的场地梳理为“四区三线”的结构。

##### 3.4.2.1 四区—天空之城、绿野仙踪、云霄豪

情、云中花园

极客公园以航空文化为灵魂、以极客体验为特色，通过“天空之城”、“绿野仙踪”、“云霄豪情”和“云中花园”四区进行展示。

“天空之城”是极客公园的门户节点，担负着入区提示、产品形象展示宣传的作用。航空工业LOGO标识和80m跨度模拟飞行轨迹的雕塑强调了公园的航空特征。特种飞行器研究所最新产品AG600水陆两用飞机真机涌泉、地效飞机等真机展示群、飞行主题创意雕塑强调了极客公园在产业、文化价值展示的独到之处。

“绿野仙踪”是公园自然条件最优质的区域。规划将自然肌理保留下，通过保留的道路、建筑和植被群落来还原场地记忆，弱化人工痕迹，简化设施，使这里成为人类探究自然、与自然和谐相处的净土。

“云霄豪情”位于极客公园中部，用地开阔，景色优美，这里被打造成极客公园最活跃的区域。航空专业比赛场地、航空体验乐园、现代飞行器展示区和飞碟餐厅都聚集在这里。这里集知识性、科学性、趣味性为一体，让人们获得与众不同的航空娱乐体验，享受冲上云霄的激情。

“云中花园”是展现探索航空未来与创新的区域。模拟未来航空器造型及场景，通过光电等现代手法烘托科幻氛围。通过加入航空元素的方式改造现状6栋民居，打造航空主题客栈。这里的绿

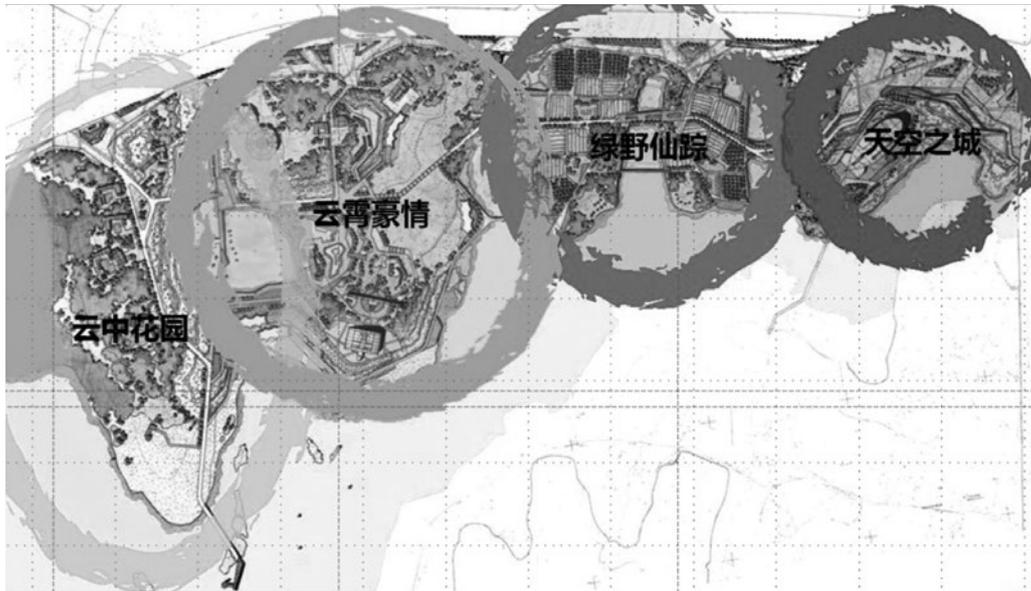


图6 极客公园分区图

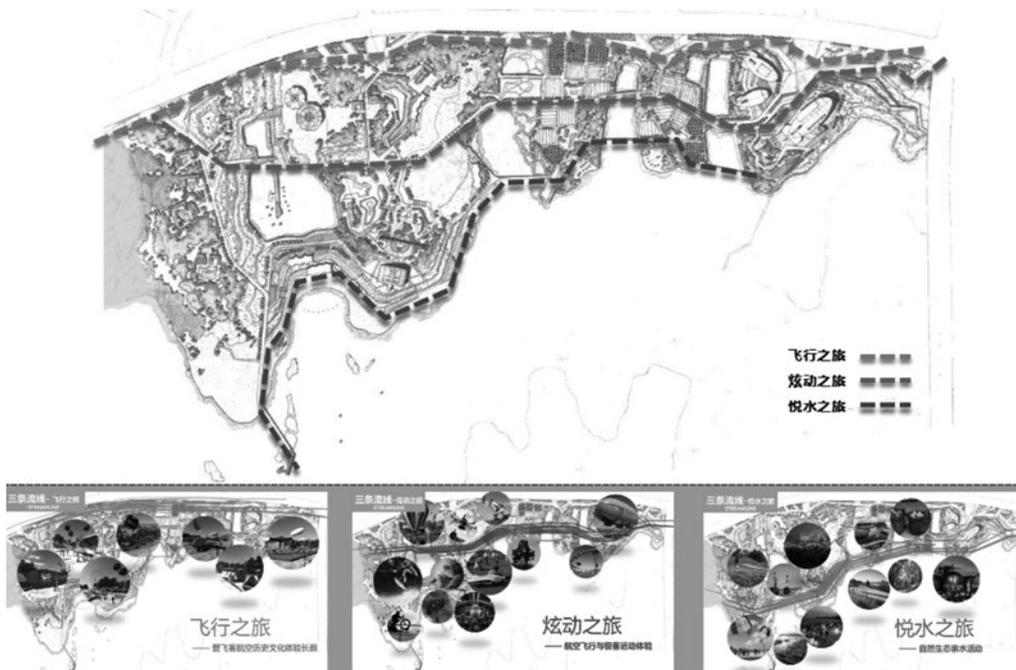


图7 极客公园流线图

树、花海、客栈、沙滩等将营造出唯美、梦幻的航空未来世界。

#### 3.4.2.2 三线—北部飞行之旅、中部炫动之旅、南部悦水之旅

飞行之旅北临爱飞客大道，长1.5km，是重要的城市界面。它承担着航空文化宣传展示和航空科普教育的功能。公园边界放弃了高大封闭的围墙，利用花池跌水和自然花溪形式，不露痕迹地围合公园、阻隔人流、并保证了公园开放、透明的特

色，向城市渗透着航空文化。飞行之旅有限空间采用了富有变化的折线造型，曲折硬朗的铺装肌理、折线型的钢板和毛石挡墙隐喻了人类实现航空梦想的艰辛曲折过程。1.5km宏大的航空文化长廊自东向西被细分为：启梦、寻梦、追梦、逐梦、圆梦和创梦6个按时间发展顺序递进表达的空间。

炫动之旅具有航空体验、娱乐休闲功能。它连接了特种飞行器研究所产品展示区、飞艇咖啡厅、航空户外拓展、无人机赛场、航空体验乐园、



图8 极客公园建成照片

热气球体验、航空客栈等重要节点。这条游线维系了各功能空间的互动，是航空爱好者竞技观演、大众游客真实体验的欢乐之旅。

悦水之旅是以保护场地原生湿地植被群落而打造的1.7km蜿蜒曲折的滨水游。通过梳理本土生态植物群落，展现自然美丽的漳水库原生景观。

### 3.5 基于发展研判的时态规划——与时俱进

#### 3.5.1 公园近期及中远期目标

近期(2016年~2018年)目标：立足本地市场及2小时交通圈市场，打造华中休闲旅游首选地；中远期(2019年~2025年)目标：立足华中、辐射全国，打造华中最大航空运动休闲旅游目的地。

#### 3.5.2 公园建设时序：初期、基底、完善

公园建设初期：全力打造航空文化主题展示区及爱飞客大道航空文化长廊，保障飞行大会形象并展现出浓郁的航空文化特色；

公园基底建设：打造公园内道路系统，铺装广场、景观水系、景观种植等景观基底，使极客公园展现出优美的景观面貌；

完善公园建设：逐步将重要节点完善，使极客公园成为华中地区航空特色突出、航空主题活动，丰富的航空文化公园。

#### 3.5.3 航展与非航展时期空间利用：

极客公园需要统筹兼顾飞行展演期间和平日运营的弹性使用需求。飞行展演期间大量人流来到

通航小镇。极客公园内绿道及大面积的景观草坪不仅起到了引导和疏散的作用，还为临时增加的休憩座椅、餐饮、移动公厕等临时设施提供了充足的放置空间。在非航展时期，景观草坪则可以开展放风筝、热气球体验、音乐节等丰富的户外活动。

## 4 结语

随着航空时代的到来和新型城镇化的发展，通航小镇的建设将异军突起。“五态融合”理念指导下的荆门爱飞客通航小镇极客公园从规划至实施运营，已经成功地吸引了大量游客并成为荆门名片。极客公园项目验证了“五态融合”理念的全面性与合理性，希望本文对未来航空小镇规划实施具有一定的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 《“四态合一”的县城风貌规划——以四川甘孜州德格县为例》，麦贤敏，李永华，雷济铭，规划师，2015年第2期，第31卷。
- [2] 《“产城融合”的运行逻辑》，鞠鹏艳 中国高新区，2013年第11期，第29页。
- [3] 《基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别》 许文雯，孙祥，朱晓东，宗跃光，李杨帆，生态学报，2012年2月，32卷第4期。

# 抗震支吊架的 地震作用计算分析及计算方法对比

■ 赵伟 闫军 李晓璐 [结构]

**摘要:** 如今,机电管线的抗震安全日益引起社会的重视。本文一方面采用时程分析法,统计分析抗震支吊架的地震力沿楼层的分布规律,为今后类似非结构构件的抗震设计提供数据支持;另一方面,研究采用楼面反应谱法计算抗震支吊架的地震作用,并比较时程分析法、楼面反应谱法与等效侧力法的计算结果,分析三种方法的优缺点。

**关键词:** 抗震支吊架;时程分析法;楼面反应谱法;等效侧力法

## 1 概述

从1964年美国阿拉斯加地震开始,非结构构件破坏对建筑性能的影响逐渐引起社会的重视。我国也于2014年、2015年相继发布了《建筑机电工程抗震设计规范》及《非结构构件抗震设计规范》,以明确建筑机电工程及非结构构件的抗震设防目标,从而减轻震害,保障安全。其中,GB50981第5.1.4条强制规定:“防排烟风道、事故通风风道及相关设备应采用抗震支吊架”。由此,支吊架的抗震安全及经济性日益引起社会的重视。

## 2 模型及参数

### 2.1 主体结构模型

针对多层厂房和高层办公楼,分别建立了一个三层框架模型(即多层)和一个十二层框架-剪力墙模型(即高层),平面布置分别见图1和图2。

其中,三层框架模型:首层层高6.5m,二、

三层层高6.0m,总高18.5m。楼面恒荷 $5.0\text{kN}/\text{m}^2$ ,楼面活荷 $8\text{kN}/\text{m}^2$ 。十二层框架-剪力墙模型:层高4.2m,总高50.4m。楼面恒荷 $5.0\text{kN}/\text{m}^2$ ,楼面活荷 $2.5\text{kN}/\text{m}^2$ 。

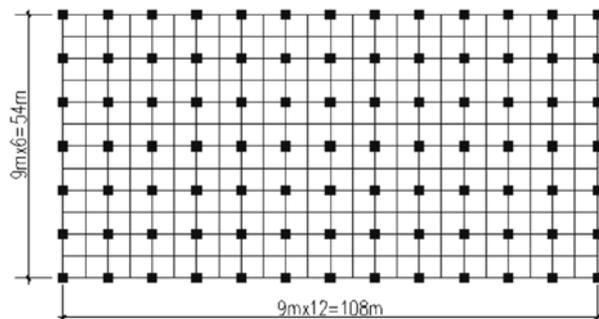


图1 三层框架模型平面图

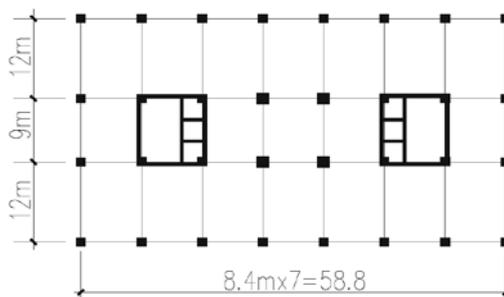


图2 十二层框架-剪力墙模型平面图

作者简介:赵伟,男,工程师,2013年毕业于天津大学结构工程专业,现就职于航空工业规划电子工程设计研究院。

表1 时程分析采用的地震波

工况	序号	多层地震波	高层地震波
8度, Tg=0.40s	1	RH3TG040	Tabas, Iran-NO-139
	2	RH1TG040	Imperial Valley-06-NO-172
	3	RH2TG040	Coalinga -01-NO-353
	4	chalfant Valley -04-NO-563	Borrego Mtn-NO-40
	5	chi-chi, Taiwan-02-NO-2170	RH3TG040
	6	Loma Prieta-NO-739	RH2TG040
	7	Santa Barbara-NO-135	RH1TG040
8度, Tg=0.55s	1	RH1TG055	RH1TG055
	2	RH2TG055	RH2TG055
	3	RH4TG055	RH4TG055
	4	Coalinga-01-NO-336	Chi-Chi, Tanwan-06-NO-3292
	5	Gilroy-NO-2015	Kobe, Japan-NO-1109
	6	Imperial Valley-06-NO-169	Landers-NO-860
	7	Kobe, Japan-NO-1105	San Fernando-NO-55

2.2 地震波的选择

采用YJK软件, 根据《抗规》第5.1.2条, 针对每组计算参数, 分别按6度 (Tg=0.4s)、7度 (Tg=0.4s)、7度 (Tg=0.55s)、8度 (Tg=0.4s)、8度 (Tg=0.55s) 筛选出7条地震波 (见表1, 限于篇幅, 仅列出8度采用的地震波), 并采用直接积分法求得各楼层加速度时程。

2.3 支吊架计算模型

如图3所示, 侧向支撑间距9m, 普通管道支架间距3m, 支架宽度 $l_0=2.6\text{m}$ , 支架长度 $h=1.8\text{m}$ ; 风管重量每3m取2.3kN, 每个支架重量2.5kN。

图4为侧向抗震管道支架计算模型。构件截面为: 吊杆采用圆钢管D40×2.0, 横梁采用槽钢[6.3, 侧向钢支撑采用角钢L75×5, 材料强度为Q235B。结构的阻尼比采用 $\beta=0.03$ ; 该支架的自振周期取0.054s。

表2 模型位置系数  $\zeta_2$

多层		高层	
楼层	$\zeta_2$	楼层	$\zeta_2$
一层	1	三层	1.25
二层	1.5	六层	1.5
三层	2	九层	1.75
—	—	十二层	2

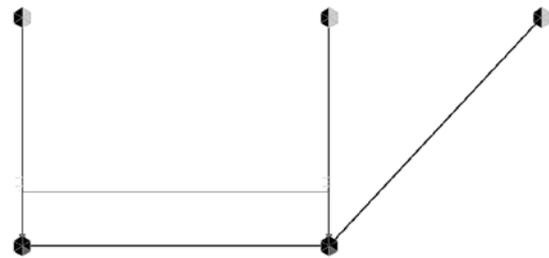


图4 侧向抗震管道支架计算模型

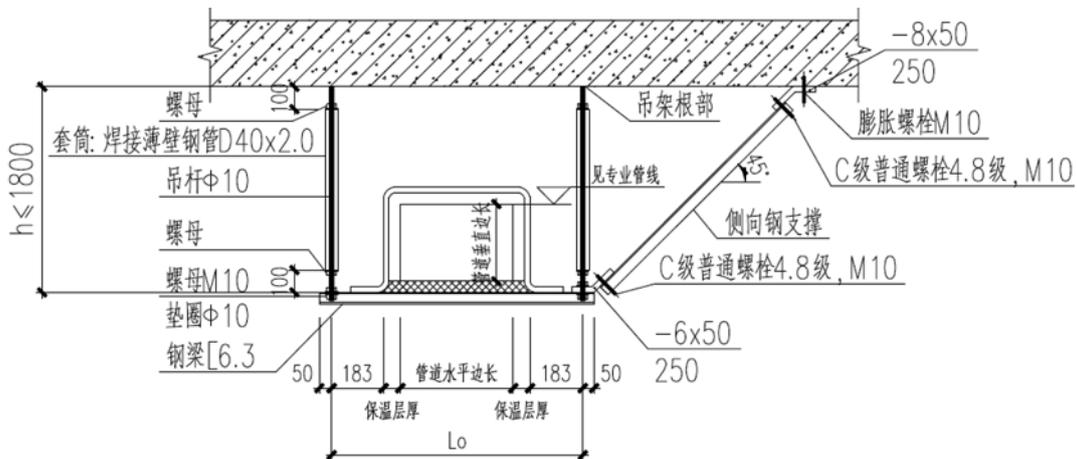


图3 侧向抗震管道支架

### 3 支吊架地震作用分析

#### 3.1 时程分析法与等效侧力法

采用等效侧力法，水平地震作用标准值按规范<sup>[1]</sup>表公式(3.4.5)计算：

$$F = \gamma \eta \xi_1 \xi_2 \alpha \max G$$

其中，功能系数 $\gamma=1.4$ ；类别系数 $\eta=1$ ；状态系数 $\xi_1=1$ ； $\alpha \max$ 为水平地震影响系数最大值；位置系数 $\xi_2$ ：取值见表2。

采用等效侧力法计算得到的支吊架水平地震力见表3、表4。

表3 多层地震作用F (单位: kN)

楼层	一层	二层	三层
6 (0.05g)	0.806	1.210	1.613
7 (0.10g)	1.613	2.419	3.226
8 (0.2g)	2.419	3.629	4.838

表4 高层地震作用F (单位: kN)

楼层	三层	六层	九层	十二层
6 (0.05g)	1.008	1.210	1.411	1.613
7 (0.10g)	2.016	2.419	2.822	3.226
8(0.2g)	4.032	4.838	5.645	6.451

采用时程分析法计算地震作用时，由于支吊架系统的质量及刚度显著小于主体结构，可不考虑二者间的地震耦合作用。因此，首先将符合要求的地震波（见表1）输入到主体结构（即多层与高层），采用时程分析得到各楼层的加速度反应；再将上述楼面加速度反应时程作为激励输入到管线支吊架系统进行动力计算，得到抗震支吊架的地震作用沿楼层的分布见图5。其中，NO1~7表示表1中各序号地震波采用时程分析法所计算的地震力；Fk表示等效侧力法计算的地震力，AVE表示NO1~NO7共7条地震波的地震力的平均值。限于篇幅，仅列出8度的时程分析结果。

根据时程分析的结果可知：抗震支吊架的地震作用与设计烈度有关，与设计地震加速度成正比；抗震支吊架的地震作用沿结构楼层的变化趋势较缓且分布规律明显，楼层越高，地震力越大；抗震支吊架的地震作用的时程分析结果在多层与高层相比，首层基本一致，但顶层两者的关系不明显。

此外，抗震支吊架的地震作用的等效侧力法结果均大于时程分析法结果，且约为弹性时程结

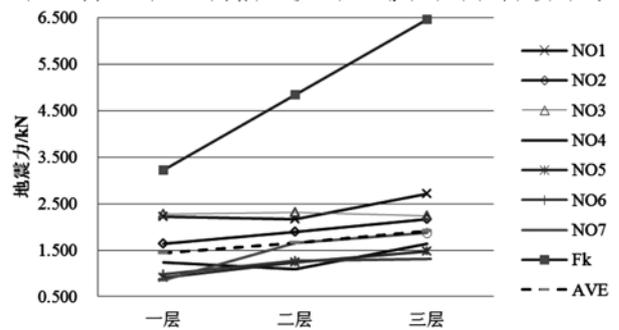


图5a 多层8度 (0.40s) 抗震支吊架地震力沿楼层的分布

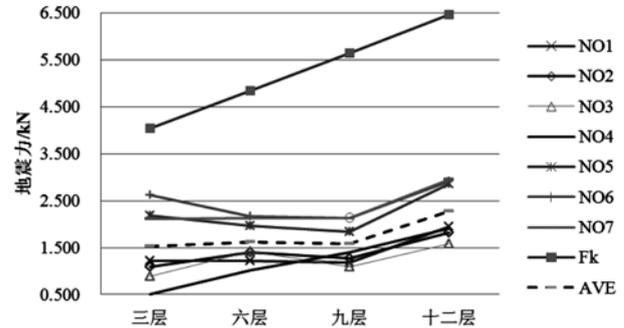


图5b 高层8度 (0.40s) 抗震支吊架地震力沿楼层分布

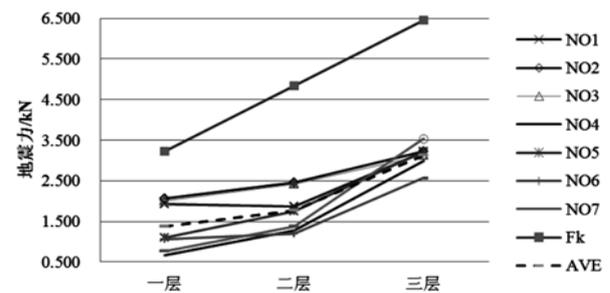


图5c 多层8度 (0.55s) 支吊架地震力沿楼层分布

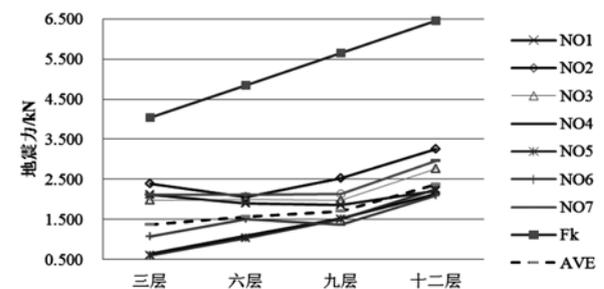


图5d 高层8度 (0.55s) 抗震支吊架地震力沿楼层分布

果平均值的2~3倍。

#### 3.2 楼面反应谱法

由于管道重量、尺寸、吊挂位置等不同，同一工程中的支吊架种类往往很多，采用时程分析法工作量巨大，在实际设计工作中不现实，也不必要。本节建立了各楼层的楼面反应谱，进行各

类支吊架地震作用计算时, 根据支吊架的特征周期, 选用相应的反应谱值作为动力放大系数。

将表1中的地震波生成的楼层加速度时程作为地震波, 采用反应谱生成软件SPECTR, 得到各条波在一定周期范围内的反应谱, 并取其平均值作为设计用的楼面反应谱。

SPECTR是由华南理工大学结构工程专业的崔济东博士所开发的一款生成地震反应谱的软件, 支持批量进行加速度时程的积分和反应谱分析, 批量导出分析结果, 自由选择坐标轴进行谱曲线绘制等, 提高了地震反应谱在工程设计及研究中的数据后处理所使用的便捷性。

图6为阻尼比取0.03时, 多层和高层的楼面反应谱曲线。其中, NO1~7表示表3中各序号地震波采用上述方式生成的楼面反应谱;  $\beta_k$ 为等效侧力法的动力放大系数  $\xi_1 \xi_2 \alpha_{\max}$ ; AVE为NO1~NO7共7条楼面反应谱的平均值。限于篇幅, 本文仅列出多、高层8度(0.44s)的楼面反应谱。

由以上楼面反应谱的结果可知: 随着支吊架结构的特征周期增加, 楼面反应谱值也略有增加。当支吊架的特征周期不大于0.1秒时, 楼面反应谱值均小于按等效侧力法计算的动力放大系数, 与时程分析法得到的结论是一致的。

### 3.3 三种计算方法对比

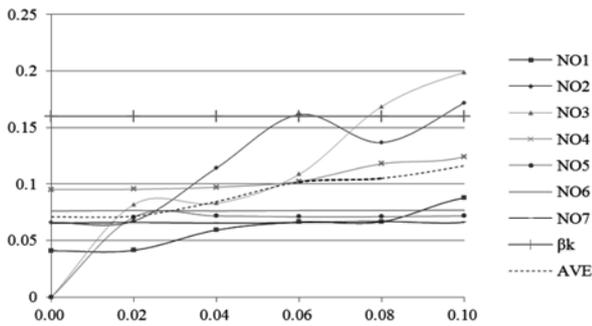


图6a 多层的一层8度(0.40s)的楼面反应谱

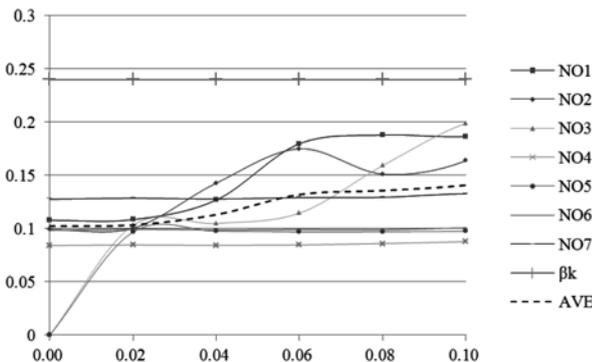


图6b 多层的二层8度(0.40s)的楼面反应谱

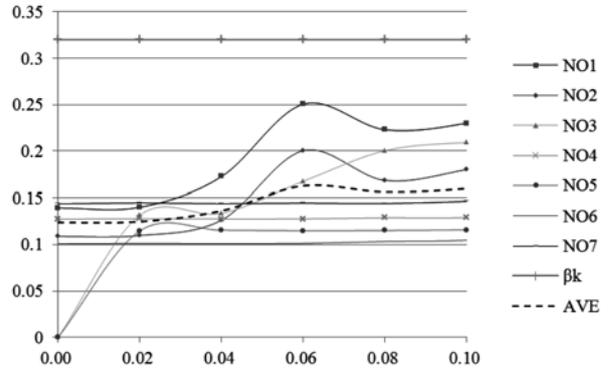


图6c 多层的三层8度(0.40s)的楼面反应谱

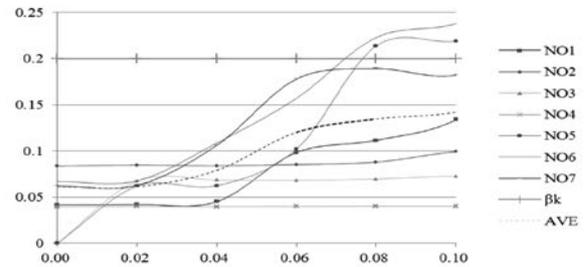


图6d 高层的三层8度(0.40s)的楼面反应谱

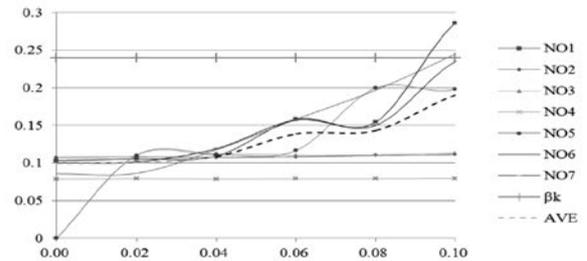


图6e 高层的六层8度(0.40s)的楼面反应谱

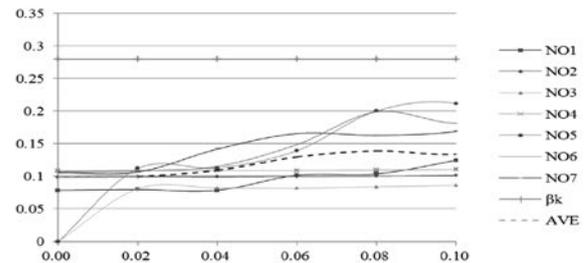


图6f 高层的九层8度(0.40s)的楼面反应谱

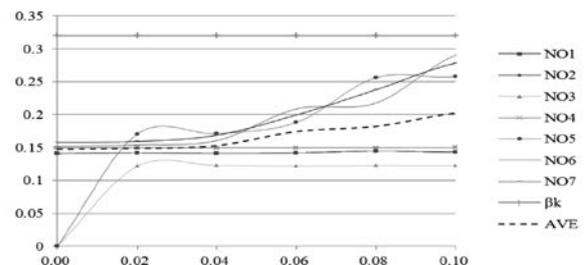


图6g 高层的十二层8度(0.40s)的楼面反应谱

图7为采用上述三种计算方法所得的支吊架的地震作用的结果对比。其中，F1表示等效侧力法所得地震作用，F2表示自振周期（ $T=0.54s$ ）对应的楼面谱平均值曲线所得地震作用，F3表示时程分析法所得地震作用的平均值。限于篇幅，本文仅列出8度的三种计算方法结果对比。

由以上的结果对比可知：三种计算方法所得

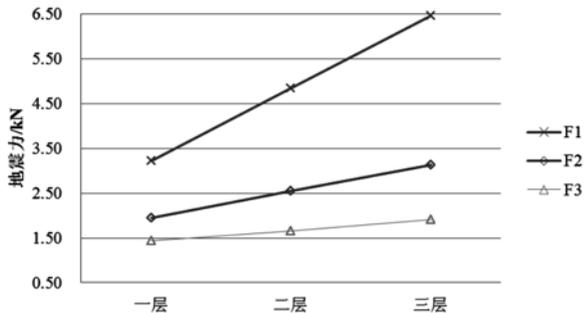


图7a 多层在8度 (0.40s) 地震下三种计算方法对比

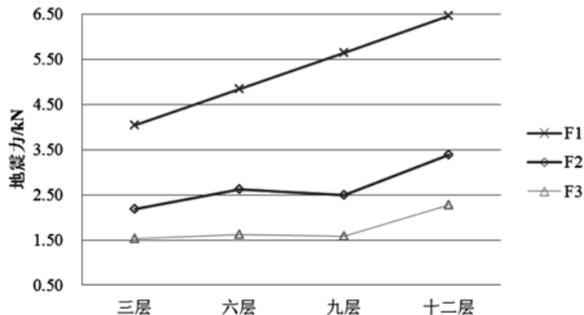


图7b 高层在8度 (0.40s) 地震下三种计算方法对比

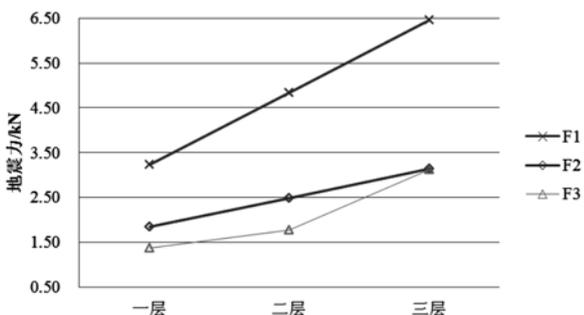


图7c 多层在8度 (0.55s) 地震下三种计算方法对比

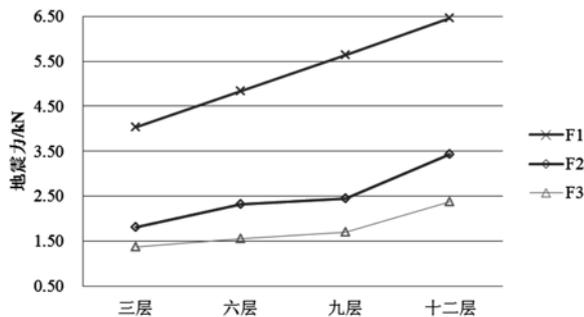


图7d 高层在8度 (0.55s) 地震下三种计算方法对比

地震作用均随楼层增加呈增长趋势；楼面谱法约比时程分析法大30%，等效侧力法显著大于两者；除个别情况外，三者的差距随楼层的增加呈增大趋势；三种计算方法的结果在多层与高层相比，首层基本一致，但顶层两者无明显的关系。

## 4 结论

通过支吊架的地震作用计算分析及方法对比可知：支吊架地震作用与设防烈度有关，与设计地震加速度成正比；支吊架地震作用沿结构楼层的分布规律与结构体系及总高度有关，楼层越高，地震力越大。本文研究的模型工程顶部楼层支吊架地震力约为底部楼层的2倍。

采用不同的计算方法，得到的支吊架地震作用差异较大：等效侧力法结果最大，约为时程分析结果的2~3倍；楼面反应谱法结果约为时程分析结果的1.3倍。

等效侧力法不考虑场地类别、主体结构的动力特性，采用较简单的系数进行地震力计算，一般情况下计算结果偏大，但计算过程简单，容易被设计人员采用；时程分析法考虑了地震波的频谱特性以及主体结构、支吊架的动力特性，计算精度较高，但计算量巨大，不利于设计人员采用；楼面反应谱法考虑了地震波的频谱特性以及主体结构、支吊架的动力特性，计算过程较时程分析法相对简单，相对容易被设计人员采用。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50981—2014 建筑机电工程抗震设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ 339—2015 非结构构件抗震设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [3] 韩庆华，寇苗苗，卢燕，等.国内外非结构构件抗震性能研究进展[J].燕山大学学报,2014,38(2):181—188.
- [4] 秦权，聂宇.非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法[J].建筑结构学报,2001,22(3):15—20.
- [5] 中国工程建设协会.CECS 420:2015抗震支吊架安装及验收规程[S].北京：中国计划出版社，2015.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ 141—2004通风管道技术规程[S].北京：中国建筑工业出版社，2004.

# 抗震支吊架设计概述

■ 李晓璐 闫军 赵伟 [结构]

**摘要:** 非结构构件的地震响应和抗震设计方法研究已经成为国内外研究学者关注的焦点。针对不同专业不同的管道排布形式,对抗震支吊架进行内力分析,进行支吊架的详细设计;包括锚固件、加固吊杆、抗震连接构件及抗震斜撑的设计。抗震连接构件的构造应便于生产加工及现场安装。通过对比分析,估算采用抗震支吊架后对工程造价的影响。

**关键词:** 抗震支吊架;非结构构件;有限元

## 1 引言

随着非结构构件的造价在建筑总造价中所占比例不断上升以及其在地震中的易损性带来的巨大人员和财产损失,非结构构件的地震响应和抗震设计方法研究已经成为国内外研究学者关注的焦点<sup>[1]</sup>。抗震支吊架作为管道系统的重要组成部分,是以地震力为主要荷载的抗震支撑,对机电设备及综合管线可进行有效保护。《建筑机电工程抗震设计规范》<sup>[2]</sup>GB50981第5.1.4条(强条)规定:“防排烟风道、事故通风风道及相关设备应采用抗震支吊架”,目的是使非结构构件的抗震性能与主体结构相匹配,从而减轻地震破坏、防止次生灾害、避免人员伤亡、减少经济损失。

## 2 抗震支吊架概述

### 2.1 抗震支吊架的应用范围

根据《建筑机电工程抗震设计规范》<sup>[2]</sup>第3.1.6条及其条文说明,以下设备需进行抗震设防:1、悬吊管道中重力大于1.8kN的设备;2、DN65以上的生活给水、消防管道系统;3、矩形

截面面积大于等于0.38m<sup>2</sup>和圆形直径大于等于0.7m的风管系统;4、内径大于等于60mm的电气配管及重力大于等于150N/m的电缆梯架、电缆槽盒、母线槽。

同时,规范<sup>[2]</sup>5.1.4条(强条)规定“防排烟风道、事故通风风道及相关设备应采用抗震支吊架”。由于地震灾害极易伴随火灾发生,也容易导致建筑内使用有危害气体的场所发生泄漏事故,为了保障人员安全疏散以及避免二次危害,故作出以上要求。

### 2.2 抗震支吊架的布置要求

抗震支吊架承受来自任意水平方向的地震作用,因此沿管道横向、纵向均应设置抗震支吊架。每段水平直管道应在两端设置侧向抗震支吊架,当两个侧向抗震支吊架间距大于最大设计间距时,应在中间增设侧向抗震支吊架。每段水平直管道应至少设置一个纵向抗震支吊架,当两个纵向抗震支吊架间距大于最大设计间距时,应在中间增设纵向抗震支吊架。

### 2.3 抗震支吊架的组成

图1为一种抗震支吊架的示意图。抗震支吊架一般由锚固件、加固吊杆、抗震连接构件及抗震斜撑组成。抗震斜撑、加固吊杆及结构顶板形成一个稳定的三角支撑,限制了支架横梁的水平位移,避

作者简介:李晓璐,男,助理工程师,2016年毕业于天津大学建筑与土木工程专业,现就职于航空工业规划电子工程设计研究院。

免了设备及管线在地震时产生过大的变形。

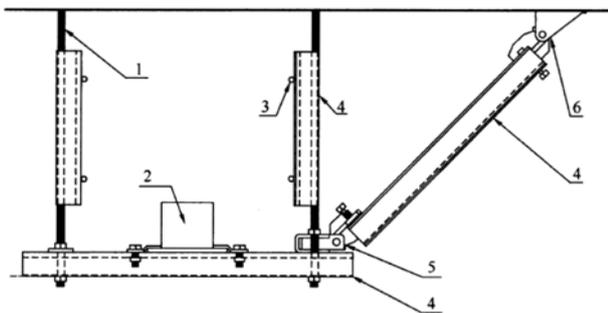
### 2.4 抗震支吊架与普通支吊架对比

与普通支吊架相比，抗震支吊架有以下特点：

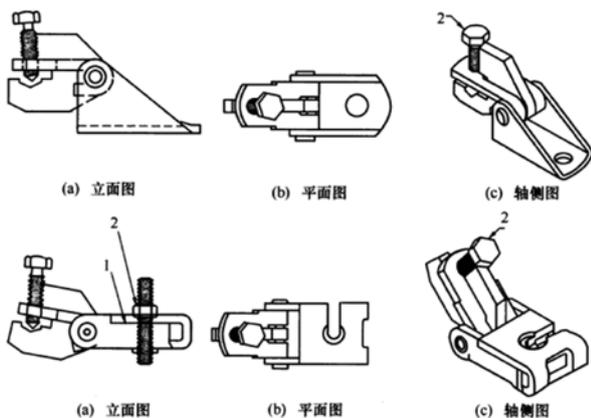
1、为了抵抗水平地震力，需要设置抗震斜撑。地震时斜撑既可能受拉，又可能受压，应按压杆控制其长细比，宜采用槽钢、角钢及钢管等型钢制作。

2、竖向吊杆在地震作用时可能受压，应按压杆控制其长细比，可采用型钢制作，也可对长螺杆外套型钢加固后形成撑杆（这种方式尤其适用于将现有普通支吊架改造为抗震支吊架的工程）。

3、抗震斜撑通过抗震连接构件与主体结构或吊杆固定。图1b中的抗震连接构件是厂家的定型产品，其中部采用销轴连接，可调节角度，方便安装；与竖向吊杆固定的连接件采用侧面开安装孔的方式，尤其适用于改造工程。当然，只要能保证抗震斜撑的安装质量，还可以采用其他各种形式的连接构件，甚至不采用连接构件，将抗震斜撑直接与支吊架横梁或主体结构可靠连接即可。



1—长螺杆；2—设备或管道等；3—螺杆紧固件；  
4—C形槽钢图；5—快速抗震连接构件；6—抗震连接构件  
图1a 抗震支吊架示意图



1—缝隙；2—螺栓  
图1b 抗震连接构件示意图

### 3 抗震支吊架构件受力分析

基于有限元软件MIDAS，采用等效板厚法建立了抗震连接构件的全实体单元有限元模型，板件厚度6mm，螺栓孔洞直径11mm，对抗震支吊架的应力分布及传力机理进行分析。

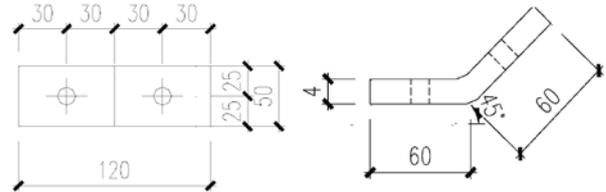


图2 抗震连接构件（一）示意图

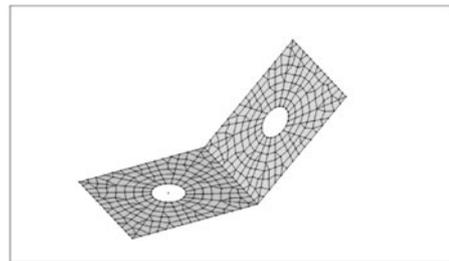


图3 抗震连接构件示意图

该模型受力以均布点荷载的方式施加，加载力取在等效侧力法计算的最大连接力。连接构件的Von Mises应力如图所示，总体应力水平较低，但局部范围出现应力集中现象，主要区域集中在连接板中心开孔的下边缘处，但由于加载力并不是很大，所以应力集中极值相对较小。结果表明，抗震连接构件应力小于305MPa，满足规范<sup>[3]</sup>要求。

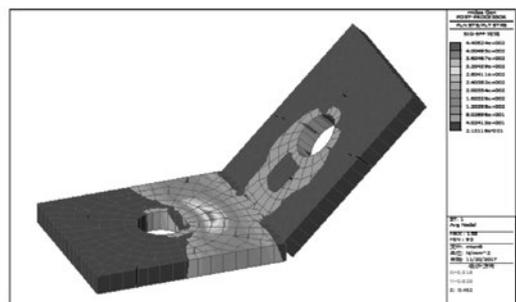


图4 抗震连接构件应力云图

抗震连接构件的全实体单元有限元模型，

板件厚度分别为6mm, 8mm, 10mm, 12mm和14mm, 用试算法分析连接件能够承受的最大拉力, 并与规范螺杆承压力比较, 结果见表1。

表1 连接件试算承载力与规范螺杆承载力对比

	板厚 6mm	板厚 8mm	板厚 10mm	板厚 12mm	板厚 14mm
规范计算承载力 (kN)	18.3	24.4	30.5	36.6	42.7
有限元分析承载力 (kN)	7.5	12.0	20	31.0	40.0

#### 4 抗震支吊架对工程造价的影响

选取18m长风管作为研究对象, 支吊架间距为3m, 非抗震设计时, 需采用6榀普通支吊架。抗震设计时, 每隔9m设侧向抗震支吊架, 每隔18m设纵向抗震支吊架, 纵向抗震支吊架与侧向抗震支吊架可合并为(侧向+纵向)抗震支吊架, 则在18m长范围内, 需设置4榀普通支吊架, 1榀侧向抗震支吊架, 1榀(侧向+纵向)抗震支吊架。

从图集《风管抗震支吊架(一)》中选取800×400、1250×630、2000×500三种规格风管计算支吊架用钢量。其中, 800×400规格风管每榀普通支吊架用钢量为7.88kg(H=1m)、8.28kg(H=1.5m)及8.68kg(H=2.0m); 1250×630规格风管每榀普通支吊架用钢量为12.41kg(H=1m)、12.81kg(H=1.5m)及13.21kg(H=2.0m); 2000×500规格风管每榀普通支吊架用钢量为22.5kg(H=1m)、23.12kg(H=1.5m)及23.74kg(H=2.0m)。用钢量对比见表2。

表中三种风管当采用抗震设计时, 支吊架用

钢量是非抗震设计时的1.14~2.53倍, 随着支吊架高度H的增大, 抗震斜撑的用钢量明显增加。

#### 5 小结

设置抗震支吊架的目的是为了限制设备及管道的侧向和纵向位移, 哪些管道需要设置抗震支吊架应由相关专业根据规范确定。抗震支吊架一般由锚固件、加固吊杆、抗震连接构件及抗震斜撑组成。竖向吊杆在地震作用时可能受压, 应按拉压杆设计, 可采用型钢制作, 也可对普通支吊架常用的长螺杆外套型钢加固后形成撑杆。单侧设置抗震斜撑可节约空间, 地震时斜撑既可能受拉, 又可能受压, 应按拉压杆设计, 宜采用槽钢、角钢及钢管等型钢制作。抗震斜撑通过抗震连接构件与主体结构或支吊架横梁固定。

抗震支吊架用钢量较普通支吊架显著增加, 增加的幅度与管道尺寸、重量有关。为减少用钢量, 建议各专业管道采用综合支吊架, 抗震斜撑可合并设置以便充分利用钢材的强度、减少斜撑的数量。

#### 参考文献

- [1] 韩庆华, 寇苗苗, 卢燕, 等. 国内外非结构构件抗震性能研究进展[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(2): 181-188.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50981-2014 建筑机电工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [4] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 17116.1-1997 管道支吊架 第1部分: 技术规范.

表2 风管支吊架用钢量对比

风管规格	非抗震设计, 支吊架用钢量(kg)			抗震设计, 支吊架用钢量(kg)			抗震支吊架/普通支吊架		
	H=1m	H=1.5m	H=2m	H=1m	H=1.5m	H=2m	H=1m	H=1.5m	H=2m
800×400	47	50	52	65	90	132	1.4	1.9	2.5
1250×630	75	77	79	92	117	159	1.2	1.5	2.0
2000×500	135	139	143	154	174	218	1.1	1.3	1.5

# EPC项目中道路结构设计

## ——以贵州某项目为例

■ 王哲 杜慧英 [总图]

**摘要:** 随着工程总承包(EPC)模式的大力推行,设计行业对每个设计师的技能水平有了更高的要求,设计的精细化,方案的经济性也成为了大家关注的焦点。本文以贵州某项目为例,针对厂区道路的结构做法进行系统的分析、计算、比选,从而确定更适合项目自身特点的道路结构层,以达到实用、经济、美观的效果,为后续EPC项目提供更有力的技术支撑。

**关键词:** 沥青混凝土路面;交通量;容许弯沉值;道路基层材料;道路结构层厚度

### 1 引言

道路设计过程中,多数道路结构的确定大多数情况是选择图集或者对类似项目进行套用,但往往忽视了道路的实际需求和成本的控制,对道路的设计标准和验收要求存在一定盲区。特别是近两年来,各大设计院推行的EPC模式,更是将设计和造价紧密结合起来,对于合理计算选择道路结构,明确各类技术参数等精细化设计将推动设计向更深层次探索,本文就贵州某项目道路选型的案例进行探究。

### 2 项目概况分析

本项目位于贵州省遵义市,属亚热带季风气候,冬季平均温度 $5.5^{\circ}\text{C}$ ,道路结构层无需考虑冻土深度。该地区全年雨水充沛,需要根据地勘资料核实丰水期地下水位是否会对道路基层产生影响。

本项目分两期建设,一期采用EPC运营模式,项目一期总投资约24000万元,投资强度

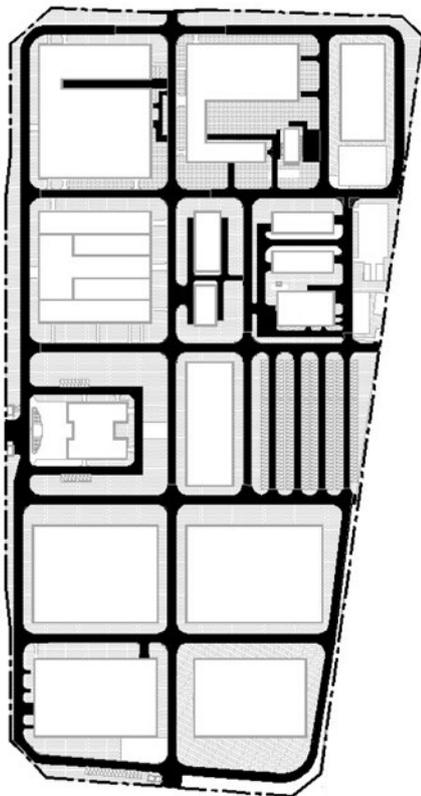


图1 道路分布示意图

作者简介:王哲,男,助理工程师,2013年毕业于西安建筑科技大学交通工程专业,现就职于航空工业规划电子工程设计研究院。

1844.98万元/ha, 属较低水准, 设计过程需要对各项投资严格控制。

本项目产品类型较复杂、工艺生产线种类较多, 但原料和产品均为小部件, 厂区日常无过大车辆行驶, 车流量较小, 故道路宽度取7m, 可满足工艺使用需求及消防扑救通行需求。

由于本项目厂房房号偏多, 且场地高差较大, 厂内设置有多个抬地, 部分道路厂房之间不能共用, 为满足厂内工艺运输和消防车道的需求, 场地路网较为密集, 一期道路约38479m<sup>2</sup>, 约占一期工程用地面积的29.58%, 在同类型行业中占比偏大, 建设成本比重较大, 道路结构做法是否合理的尤为重要。

故本文拟对道路结构进行系统的分析计算, 结合现场临时施工道路的设置, 综合考虑建设成本, 以确定最佳的道路结构层。

### 3 道路做法的确定

#### 3.1 确定道路面层类型

本项目前期对项目周边厂区道路进行调研, 该地区沥青道路的使用较为广泛, 沥青路面属半刚性路面, 有着噪音量小, 行车舒适度高, 摊铺速度快, 整体性好, 较为美观, 温度降至50℃以下即可通车等优点, 考虑本项目厂内重型交通较少, 最终经与业主沟通, 决定采用沥青混凝土路面。选用常规AC-10型细粒式沥青混凝土和AC-16型中粒式沥青混凝土(由于道路等级较低, 同时不考虑路面竖向排水, 为节约造价常采用连续级配型沥青混凝土(AC型))。

根据《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2017标准第67页图A.4.6-1查得遵义市沥青路面气候分区属于2-4型, 根据该规范第9页表4.2.1-2查得沥青标号选用70号。

常规沥青道路在基层养护完成后需要喷洒一层透层油, 透层油常选用PC-3型乳化沥青, 该型号乳化沥青带阳离子(+), 破乳速度适中, 能对基层表面松散的料料进行粘结固化, 可确保基层与面层能更好的粘结。

#### 3.2 交通量和设计标准

为减少后期维护成本, 设计年限按15年考虑。根据对工艺流程的梳理、各厂房原料和成品用量的估算、行业常用运输车辆类型的统计、结合业主方的经验估值, 最终确定本项目厂内主干道交通

量构成主要分以下几个部分:

1. 仓栅式载货车(以东风商用车 天龙重卡 DFH5310CCYAI型车为例, 总质量31t, 四轴, 双后轴最大荷载180KN) 4轴次/天

2. 箱式载货车(以东风柳汽 新乘龙M3中卡为例, 总质量16t, 三轴, 单轴最大荷载115KN) 12轴次/天

3. 普通轿车(以金杯SY132为例, 两轴, 单轴最大荷载20KN) 1400轴次/天

A. 当轴载 $20\text{KN} < P_i < 40\text{KN}$ 时, 各级轴载与双轮组单轴轴载100KN的标准轴载计算公式为:

$$N = \sum \frac{1}{C_i} \cdot n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right)^4$$

式中N—标准轴载的当量轴次(次/日);

$n_i$ —被换算的各级轴载作用次数(次/日);

P—标准轴载(KN);

$P_i$ —被换算的各级轴载(KN);

p—标准轴载的轮胎;

$p_i$ —被换算的各级轴载的轮胎接地压强;

$C_i$ —被换算的各级轴载的轮组系数。双轮组为1, 单轮组为0.25。

本项目仅第3种普通轿车轴载在该公式计算范围内, 查阅类似车型的各类参数带入公式:

$$\begin{aligned} N_3 &= \sum \frac{1}{C_i} \cdot n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right)^4 = \frac{1}{C_1} \cdot n_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P}\right)^4 \\ &= \frac{1}{0.25} \cdot 1400 \cdot \left(\frac{20}{100}\right)^4 = 8.96 \text{ (次/日)} \end{aligned}$$

B. 当轴载大于或等于40KN时, 按下式换算成标准轴载的作用次数:

$$N = \sum_{i=1}^n a_i \cdot N_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_s}\right)^{16}$$

式中N—标准轴载的当量轴次(次/日);

$N_i$ —被换算的各级轴载作用次数(次/日);

$P_s$ —标准轴载(KN);

$P_i$ —被换算的各级轴载(KN);

$a_i$ —与车辆后轴轴数有关的后轴数系数。

本项目第1种和第2种车辆需用本公式进行计算, 查阅相关类似车辆的信息后带入公式:

$$N_{1,2} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot N_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_s}\right)^{16}$$

$$= a_1 \cdot N_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_S}\right)^{16} + a_2 \cdot N_2 \cdot \left(\frac{P_2}{P_S}\right)^{16}$$

$$= 1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot \left(\frac{90}{100}\right)^{16} + 1 \cdot 12 \cdot \left(\frac{115}{100}\right)^{16}$$

$$= 21.53 \text{ (次/日)}$$

故厂区道路每天行驶标准轴载当量的作用次数:

$$N = N_{1,2} + N_3 = 21.53 + 8.96$$

$$= 30.49 \approx 35 \text{ (次/天)}$$

不考虑交通量年平均增长率时, 平均日车道当量轴次 $N_t$ 按下式计算。

$$N_t = N \cdot \eta$$

$N_t$ —平均日车道当量轴次(次/日车道)

$N$ —标准轴载的日当量轴次(次/日)

$\eta$ —车道系数, 单车道时取1。

故厂区平均日车道当量轴次:

$$N_t = N \cdot \eta = 35 \cdot 1 = 35 \text{ (次/日车道)}$$

### 3.3 路面容许弯沉值( $L_R$ )

路面层的整体强度, 以标准轴载作用下轮隙中心处的路表弯沉值 $L_S$ 表示。路表弯沉值 $L_S$ 应小于或等于路面容许弯沉值 $L_R$ , 即

$$L_S \leq L_R;$$

路面容许弯沉值按下列公式计算:

$$L_R = \frac{11.0}{N_e^{0.2}} \cdot A_C \cdot A_S;$$

$L_R$ —路面容许弯沉值(mm), 对沥青路面指路面温度为20℃时的值;

$A_C$ —道路等级系数, 三四级场外道路为1.2;

$A_S$ —面层类型系数, 沥青混凝土、热拌沥青碎石为1.0, 沥青贯入式、沥青上拌下贯式为1.1, 沥青表面处置为1.2, 粒料类面层为1.3;

$N_e$ —道路设计年限内, 一个车道上累计当量轴次, 按下列公式计算:

$$N_e = 365 \cdot t \cdot N_t;$$

式中365—一年日历天数(天/年);

$t$ —路面设计年限(年);

$N_t$ —平均日车道当量轴次(次/日车道);

根据2.2条计算结果代入公式计算 $N_e$ :

$$N_e = 365 \cdot 15 \cdot N_t = 365 \cdot 15 \cdot 35$$

$$= 191625 \text{ (次/年车道)};$$

进而计算路面允许弯沉值:

$$L_R = \frac{11.0}{N_e^{0.2}} \cdot A_C \cdot A_S = \frac{11.0}{191625^{0.2}} \cdot 1.2 \cdot 1$$

$$= 1.16 \text{ mm}$$

### 3.4 地基承载力

场地原始地貌为岩溶谷底, 区域地貌为构造溶蚀地貌类型。场地多数区域为填方区, 填方厚度0~13.2m。根据地勘资料, 素填土层在场区内广泛分布, 主要由粘土及碎石组成, 碎石约占10~30%, 结构松散, 压缩性较高。场地道路设计标高在903~907.8m之间, 实测稳定地下水位891.6~896.4m之间, 根据区域水文地质资料及遵义城区多年的勘察经验, 场地丰水期最大涨幅约2m。因此丰水期地下水最高水位在898.4m左右, 道路路基距地下水水位3~4m。

场地地表红粘土平均含水率 $W_0=38.7\%$ , 属于干燥型土壤, 土壤液限 $W_L=59.2$ , 土壤塑限 $W_p=32.7$ , 路基稠度 $=\frac{W_0-W_L}{W_p-W_L}=\frac{38.7\%-59.2\%}{32.7\%-59.2\%}=0.77$ 。

根据中国公路自然区划图, 遵义市属 $V_3$ 三西贵州山地过湿区。根据规范《城市道路路基设计规范》CJJ194-2016标准第71页续表B.0.5, 查得该土质道路基层的回弹模量不足24.5Mpa, 根据现场实测, 场地承载力较低, 需要进行地基处理。

### 3.5 道路路基材料的选择

本项目所在遵义市隶属山石较多的区域, 级配碎石材料市场较多, 成本较低(60~70元/ $m^2$ ), 故可采用级配碎石作为道路的底基层。

上基层可在级配碎石中掺杂水泥砂砾, 其较稳定土类基层强度更高, 故本项目拟采用水泥稳定碎石作为上基层。

厂区道路一般在项目主体建筑完工后才开始铺设, 如果先施工道路, 在整个项目完工后道路面层会因施工中各类原因产生破损老化, 需要重新铺设面层, 从而造成返工, 增加造价。但施工过程中安全文明施工要求施工道路需要硬化处理, 施工道路还是要提前铺设, 若只做道路基层, 不做面层, 则基层长期日晒雨淋, 会失去稳定性, 出现各种破碎, 扬尘等情况, 这些情况应予以避免, 根据近两年来EPC项目的施工经验, 常将基层的水泥稳定碎石部分换成贫混凝土, 作为施工道路的面层, 待完工后加铺一层水泥稳定碎石, 最后铺设道路面层。

故经各种筛选, 比较, 底基层选用级配碎石, 上基层选用水泥稳定碎石或与贫混凝土搭配作为上基层。

本项目填土较厚, 不能满足路基承载力要求, 故底基层拟考虑用300mm厚级配碎石压入土基以增强其地基承载力。

### 3.6 道路结构层厚度计算

道路结构层厚度计算可通过公路路面设计程序系统HPDS2011进行计算。道路面层及底基层材料及厚度已经确定，本过程主要计算道路基层厚度，暂定基层厚度300mm。

首先根据交通量计算道路设计弯沉值：

#### 3.6.1 设计弯沉值计算

一个车道上大客车及中型以上的各种货车日平均交通量： $N_h=35$ ，属轻交通等级；当以设计弯沉值和沥青层层底拉应力为指标时：路面营运第一年双向日平均当量轴次：35，设计年限内一个车道上的累计当量轴次：191625，属轻交通等级；路面设计交通等级为轻交通等级；公路等级为四级公路，公路等级系数：1.2；面层类型系数：1；路面结构类型系数：1；路面设计弯沉值：63.2 (0.01mm)。

#### 3.6.2 根据路面设计弯沉值计算沥青路面结构厚度

新建路面结构厚度计算：

公路等级：四级公路

新建路面的层数：4

标准轴载：BZZ-100m

路面设计弯沉值：63.2 (0.01mm)

路面设计层层位：3

设计层最小厚度：150 (mm)

层位	结构层材料名称	厚度 (mm)	20℃ 平均抗压模量 (MPa)	标准差 (MPa)
1	细粒式沥青混凝土	40	1400	0
2	中粒式沥青混凝土	60	1200	0
3	水泥稳定碎石	?	1400	0
4	级配碎石	300	300	0
5	新建路基		20	

按设计弯沉值计算设计层厚度；

$LD=63.2(0.01mm)$

$H(3)=300\text{ mm}; LS=47.3(0.01mm);$

由于设计层厚度  $H(3)=H_{min}$  时  $LS \leq LD$ ，故弯沉计算已满足要求。

路面设计层厚度：

$H(3)=300\text{ mm}$  (仅考虑弯沉)。

#### 3.6.3 计算沥青路面及路基交工验收弯沉值

交工验收弯沉值计算：

公路等级：四级公路；

新建路面的层数：4；

标准轴载：BZZ-100；

表1 设计弯沉值计算

序号	车型名称	前轴重 (kN)	后轴重 (kN)	后轴数	后轴轮组数	后轴距 (m)	交通量	设计年限	车道系数	交通量平均增长率
1	标准轴载 BZZ100	-	100	1	-	-	35	15	1	0

层位	结构层材料名称	厚度 (mm)	20℃ 平均抗压模量 (MPa)	标准差 (MPa)	综合影响系数
1	细粒式沥青混凝土	40	1400	0	1
2	中粒式沥青混凝土	60	1200	0	1
3	水泥稳定碎石	300	1400	0	1
4	级配碎石	300	300	0	1
5	新建路基		20		1

计算新建路面各结构层及路基顶面交工验收弯沉值：

第1 层路面顶面交工验收弯沉值  $LS=33.5$  (0.01mm)

第2 层路面顶面交工验收弯沉值  $LS=37.4$  (0.01mm)

第3 层路面顶面交工验收弯沉值  $LS=43.6$  (0.01mm)

第4 层路面顶面交工验收弯沉值  $LS=165.8$  (0.01mm)

路基顶面交工验收弯沉值  $LS=465.8$  (0.01mm)

经计算，道路结构做法满足设计需求，具体如图2，将150mm厚的水泥稳定碎石换成C25混凝土变为道路结构（二），如图3，两种做法均能满足道路交通量需求。

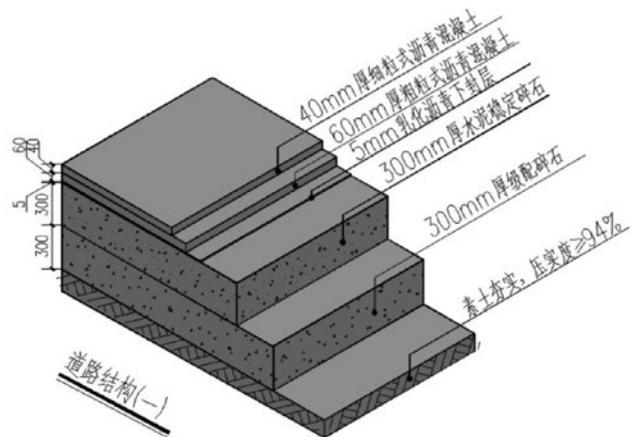


图2

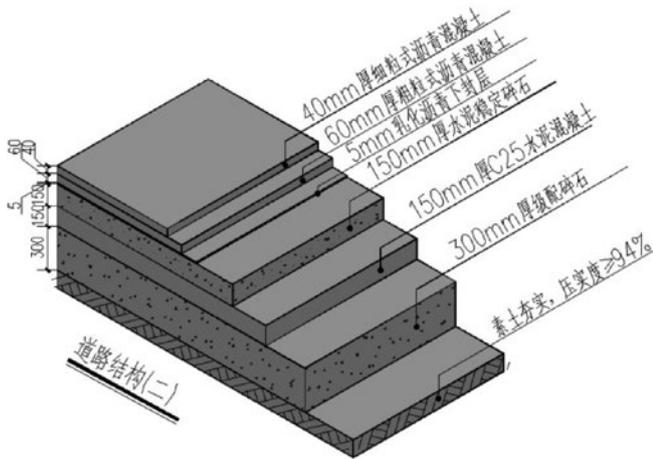


图3

### 3.7 道路造价比选

道路结构 (一) 造价			道路结构 (二) 造价		
编号	道路材料	造价	编号	道路材料	造价
1	40mm厚细粒式沥青混凝土	52元/m <sup>2</sup>	1	40mm厚细粒式沥青混凝土	52元/m <sup>2</sup>
2	60mm厚中粒式沥青混凝土	47元/m <sup>2</sup>	2	60mm厚中粒式沥青混凝土	47元/m <sup>2</sup>
3	300mm水泥稳定碎石	40.5元/m <sup>2</sup>	3	150mm水泥稳定碎石	20.23元/m <sup>2</sup>
4	300mm厚级配碎石	27元/m <sup>2</sup>	4	150mm水泥混凝土	88.54元/m <sup>2</sup>
5	合计	166.5元/m <sup>2</sup>	5	300mm厚级配碎石	27元/m <sup>2</sup>
			6	合计	234.77元/m <sup>2</sup>

从道路直接造价方面比较,道路做法(二)较第一种做法综合单价高出68.20元/m<sup>2</sup>。

从整个项目整体考虑,若道路做法(一)在施工阶段需要至少修建施工临时道路,施工临时道路的造价至少在100元/m<sup>2</sup>以上,施工道路成本与项目最后道路的实施成本之和大于道路做法(二)的综合成本。

### 3.8 结论

采用道路结构(二)种做法进行施工,对场内过路管预埋后可先实施级配碎石底基层和水泥混凝土基层。待整个项目接近尾声时,完善场内室外管线,后增的室外管线需要穿路时,对道路进行局部破除,完成埋管后对混凝土道路基层进行整体修补。养护完成后在其之上铺设150mm厚水泥稳定碎石基层,养护完成后完成面层。

## 4 结语

在传统模式下,设计院仅设计与项目直接相关的内容,而施工单位和设计院并非直接的利益方,设计院在进行项目成本优化时往往会忽视施工部分优化,而在EPC模式下,设计方与施工方成为

统一的利益体,双方可以相互审视,站在更高的层面进行判断。本文旨在从道路结构做法这一小的视角为EPC项目提供技术支撑,同时也希望能从这一小点的思维角度引发更多的思考,即当设计阶段从更多方面考虑施工难度和施工成本时,整个工程的造价是否会有更多的优化空间。

### 参考文献

- [1] 蒋继穆, 道路 (J007-1-2(1993年合订本)), 中国建筑标准设计研究院出版, 2002.3
- [2] 邓学钧, 路基路面工程 (第三版), 人民交通出版社, 2008.5
- [3] 中交公路规划设计院有限公司, 公路水泥混

凝土路面设计规范 (JTG D40-2011), 2011.9

[4] 吴万平, 公路路基设计规范 (JTG D30-2015), 人民交通出版社, 2015.2

[5] 刘伯莹, 公路沥青路面设计规范 (JTG D50-2017), 人民交通出版社, 2017.3

[6] 交通部公路科学研究所, 公路沥青路面施工技术规范 (JTG F40-2017), 2017.9

# 某园区EPC建设过程中雨水排水设计

■ 李志杰 [给排水]

**摘要:** 由于园区建设有地形多变、区域地质多样化等特点,其排水系统设计及施工的难度较其他项目更大。本文以某园区排水系统为主线,从规划设计、施工及监理三个方面对某园区建设项目进行探讨,总结设计及施工经验。

**关键词:** 园区建设;排水;临时排水;总承包

现今,城市的扩张和城市化进程发展进入了前所未有的建设速度。近年来,随着国民经济迅猛发展,老的工业园区已无法满足新时代背景下的生产任务,全国出现大量的结合现代化、科技化的园区建设项目。产业园区、智慧园区、创新园区等功能多而复杂的大型综合园区如雨后春笋般出现。园区建设过程中的排水乱象也随之而来:无组织排水,无规划,雨季道路泥泞无法通行;生活污水无组织;侵占河道池塘,造成区域排水不畅。

本文基于对某园区排水设计及施工过程中相关问题的处理,提炼出相关经验,对后续项目起到指导作用。

## 1 项目概况

某园区位于江西省南昌市,项目占地面积约200万 $m^2$ 。园区所在区域西侧市政道路上有现有市政雨污水管网;园区西侧有焦头河,但距离较远,且中间规划有其他园区,无法向东直接排出,因此该园区排水只能沿设计明渠排至园区北侧的河流。



图1 某园区规划设计示意图

## 2 园区排水设计难点

### 2.1 园区排水规划设计原则

园区排水的规划设计需要在遵守相关国家及地方规范的前提下,还应遵循以下原则:

a. 设计之初,应对整个流域现状做周密的调查,调查现有的和将来潜在的再生水用户的地理位置及水量与水质的需求,并将这种结果反映到给排水专业规划中<sup>[1]</sup>;

b. 在不违反相关规范的前提下,因地制宜,采用合理的设计参数,重要地区设计标准适当提高;

作者简介:李志杰,男,工程师,2012年毕业于天津大学市政工程专业,现就职于航空工业规划飞机工程设计研究院。

c. 重视园区排水与城市建设的关系——园区设计排水系统一般为小排水系统<sup>[2]</sup>，其设计参数及依据应与城市或流域排水（即大排水系统）的设计目标相匹配；

d. 规划时尽量不占用湖泊河道，充分利用现有河流湖泊的调蓄作用；

e. 规划设计时，道路、停车场等区域优先采用透水铺装，减小径流系数，增设雨水调蓄设施，错峰排出，缓解排水系统的压力；

f. 园区排水系统是一项系统工程，应纳入城市总体规划，以适应城市不同阶段的发展。

## 2.2 项目排水规划设计难点及解决措施

a. 位于南方多雨地区，周围水系丰富，地下水位高，在雨季地面径流入渗微乎其微，因此，设计采用较高的综合径流系数，取0.7，以降低园区内涝风险；

b. 项目所在地块地形平坦，且现有河流河床高程较高，不利于雨水排出，经过多方案比较，最终选定将地块最低填高至河流洪水位以上0.5m；

c. 地块位于内涝区域，需要比对和参考大量的水文数据，且该区域无统一的数据来源，需要一一筛选确认，给园区排水设计带来诸多不便；

d. 由于园区建设分期完成，排水设计也相应存在大量的预留预埋设计，这都需要与建设方实时沟通，在充分了解其意图后方能准确实施；

e. 由于园区西侧市政道路预留的雨水管道排水能力有限，无法满足整个园区的排水需求，因此，规划园区西侧三分之一区域向西排至市政管网，靠近东侧的三分之二区域向东排至规划雨水明渠。图1中可以看到，园区东侧需要建设一条长约3km的排水明渠，排至规划河道。该明渠工程量大，且涉及到征地问题，在综合考虑其截面和渠底、渠顶高程变化，这对排水计算及工程造价均带来很大困难，因此设计采用分段变截面、等底坡的设计方案，并选取中间区域校核流量，充分保障园区排水安全。

## 3 园区排水施工控制难点及解决措施

a. 由于园区面积较大，且工期紧张，现场有多支施工单位，施工之初造成不同施工单位之间对接混乱，存在大量漏项，为此，项目部及时召开项目沟通会议，制定严密施工分工计划，杜绝

了这类乱象的发生；

b. 施工过程中，甲方存在大量新增需求，设计也随之变更较多，这对施工带来诸多麻烦，返工现象层出不穷；

c. 园区建设项目工程量大，施工现场应在进场前做好组织规划，做到不内涝、无污染、方便文明施工；节约成本，因地制宜；

d. 施工现场的排水设施应临永结合，统筹规划，在工地作业区域设置雨水临时排水沟、排水泵站等，保障作业区域安全；

e. 临时卫生间应设于施工人员密集场所，杜绝污染环境；

f. 园区项目建设工程浩大，给监理提出了新的难题，监理应对项目管理过程中，建议记录电子存档，拍照记录安装进度，简单省事，还可查询控制，方便总承包远程控制；

g. 有条件的园区建设，建议引入GIS系统，对区域排水监测。优化园区排水设计，减少对城市、流域排水的冲击。

## 4 结语

园区排水规划标准要随着经济社会发展规模适当提高，赶上新时代发展步伐，不给城市建设增加负担。这就需要排水管理部门及时调整原有排水设计标准，提高排水设施建设要求，满足城市不断发展的需要。在具体的工作中，市排水规划、设计、施工等人员要吸取先进经验，尽快形成适合园区的长期排水规划和排水设计标准。

## 参考文献

- [1] 王强. 浅谈我国城市排水现状及发展[J]. 山西科技报 [J], 2009.7.23
- [2] 陈华. 雨水排水体系构建和技术发展重点的综述[J]. 净水技术 [J]. Vol. 33, No. 1, 2014

# 关于生产设备“二次配”施工安全管控的研究

■ 尹蕊 [工程管理]

**摘要:** 随着工程总承包行业的高速发展,越来越多的工程项目从传统的建安工程模式向包含生产设备的总承包模式转型。其中,占主要投资的生产设备管理成为工程总承包管理的重要组成部分。生产设备及二次配的管理贯穿生产设备调试、生产线试生产以及项目的达产整个过程,而伴随着生产设备二次配安全和环境控制也涉及到了工程的整个过程。

**关键词:** 工程总承包;生产设备二次配;施工安全管控

近年,随着工程总承包模式在我国建设市场的深入推广,国内正在逐步实现整体工业生产线的交钥匙工程。生产设备的二次配施工管理,逐渐成为工程总承包业务实施过程中至关重要的环节。随着各类工业生产设备朝着大型化、高速化和自动化的方向发展,生产设备的机械结构和电气管线系统日趋复杂,随之配套的二次配管线施工技术难度和安全风险也逐步增大,这就对二次配施工安全管控提出了更高的要求。

## 1 二次配施工安全管控难点

生产设备二次配是以生产设备为对象,按其技术要求和方案,在合理时间内,将各种动力源安全、保质、及时地连接到生产设备,以保证生产设备能持续稳定的正常运转。

生产设备二次配施工涉及水电风气各专业管道线缆的预制、吊装、敷设、焊接、探伤、打压、测试等施工内容。作业环境通常比较危险,如格构梁上高空作业、吊顶夹层上临边作业、各类设备管沟地沟及设备小环境罩中受限空间作业等。

二次配施工一般在一部分室内装饰装修工程完成后开始,在封闭或受限空间进行焊接等动火作业时,火灾危险隐患较大,进行油漆、环氧的涂装施工时,也存在人员中毒风险。

二次配施工需要接触高压、高温或低温、有毒有害有腐蚀性的各类工业气体管道系统,在施工和测试过程中存在大量安全隐患。

二次配施工作业可能与部分生产设备调试工作同步进行,经常需要带水、带电、带油、带气作业,技术含量高、施工危险性大。

## 2 二次配施工安全管控要点

针对生产设备二次配施工的特点和难点,需从以下方面加强管控,以保证二次配施工过程中的安全管理目标。

### 2.1 二次配施工吊装、高架作业安全管控要点

二次配施工吊装作业时,起重工、信号工必须持证上岗,指挥信号要统一、明确。起重吊装作业前要放下吊车支脚,地面铺垫设施要符合要求。起重半径范围内不得站人,起重半径边缘设警示带隔离,起重作业全程设安全员旁站监护。起重吊装作业严格遵守“十不吊”规定。

二次配施工高架作业时,应按规范租赁、操作液压升降机,搭设、使用脚手架。高架作业必须系安全带,每处高架作业下方至少设一专人进行监护。液压升降机行驶时必须将操作台降至最下方,挪动脚手架时平台上方不得有人。吊装设备由下至上传递至作业面,设备安装作业面下方不得站人,并设专人指挥、专人监护。

### 2.2 二次配施工高处作业安全管控要点

在格构梁上高处环境进行二次配施工时,为保证高处作业安全,必须在格构梁上方张拉生命线,下方满布安全网。当工人进入格构梁区域行走和施工时,必须将安全带系于生命线之上。生命线拉设完毕后应作坠落试验,用60kg沙袋从正常操作位置坠落,钢丝绳不应脱落、断裂。生命线与立柱

作者简介:尹蕊,女,工程师,2008年毕业于郑州航空工业管理学院工程管理专业,现就职于航空工业规划技术质量安全部。

的拉结点要坚实可靠，每天进行重点检查。

### 2.3 二次配施工临边作业安全管控要点

在未封闭的吊顶夹层或设备夹层中进行二次配施工作业时，吊顶板上的临边、洞口周围必须张拉警戒带、挂安全网。吊顶板上施工作业必须系安全带、带安全帽，每块吊顶板上最多只能站一个人。在吊顶板临边、洞口边上作业时，必须设专人旁站监护。

### 2.4 二次配施工受限空间作业安全管控要点

在受限空间内进行二次配施工作业前，应切断受限空间内的动力源，通风排出有毒有害气体。随后测试受限空间内气体，确定受限空间内无毒且氧气浓度正常方可进入。施工过程中使用安全电压和安全行灯，必要时佩戴隔离式防护面具等适用的个体防护用品。作业人员应定时轮换，在受限空间入口处设专人进行安全监护。

### 2.5 二次配施工动火作业安全管控要点

二次配施工时，生产设备区域通常已逐渐达到封闭状态，电气焊作业产生的有毒有害气体，如不采取措施，会大量积聚，造成职业病危害。因此需通过在动火点搭设封闭的动火棚，使毒害气体不外泄，并通过排烟风机和导管将动火棚内的毒害气体排出室外。动火棚内和动火点下方设看火员看火，配灭火器做好消防准备，动火作业严格按照操作规程进行操作和监管。

### 2.6 二次配施工涂装作业安全管控要点

二次配施工涂装作业时，油漆、环氧等涂装材料每天用多少拿多少，储存于现场指定区域，布置灭火器做好消防准备工作。作业时涂装人员必须佩戴口罩，防止粉尘吸入引起职业病的发生。在封闭空间等通风不畅的区域设置排烟风机，及时排出有毒有害气体。涂装施工区域外围四周拉警戒带，设置安全标志，无关人员不得进入，上方不得有动火作业。

### 2.7 工业气体管道二次配施工安全管控要点

在进行工业气体管道二次配施工前，应先对需要施工的工业气体类别进行辨识，编制并审批可行的施工方案及应急预案，在施工过程中严格按照方案和预案执行操作。

二次配施工涉及的工业气体分为大宗气体和特殊气体，大宗气体分为CDA、GN<sub>2</sub>、He、Ar、O<sub>2</sub>等，特殊气体分为毒性气体（包括CO、NO、CLF<sub>3</sub>）、易燃性气体（包括SIH<sub>4</sub>、PH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>）、腐蚀性气体（包括NH<sub>3</sub>、SIF<sub>4</sub>、CL<sub>2</sub>）、低压性/保温气体（包括WF<sub>6</sub>、BCL<sub>3</sub>、DCS）、惰性气体（包括SF<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、N<sub>2</sub>O）等。特殊气体通常均为易燃易爆、有毒

有害的危化物质，大宗气体虽不具有强烈的毒性和腐蚀性，但往往无色、无味、无臭，有窒息性的危险。因此在二次配施工、试验和生产设备试车过程中，要避免各类工业气体的泄漏和混入情况出现。

首先要求工人在二次配施工过程中，全程穿戴PPE（安全帽、安全鞋、耳塞、隔热手套、护目镜）。各类气体管道焊接或连接完成后，应认真进行焊缝探伤或打压漏气试验，确保管道密闭性满足气体使用要求。带气作业时，各类气体管道泄压阀门应缓慢打开，不可快速开启，以防气体过快喷出。因低温气体发生冻伤时，不要脱掉衣服，避免擦拭受冻伤的部位导致组织损伤。应用消过毒的包扎用品包扎伤口，将受影响部位置于温水中，水温不超过40℃。必要时，安装相应气体的泄漏探测装置，一旦发生气体泄漏报警，及时开启风机排风，进行人员撤离。

### 2.8 二次配施工成品的安全防护及标识管控要点

二次配施工过程中，还要注意对成品进行各项安全防护和安全提示工作，一方面保证施工人员的作业安全，同时也为投产后生产工人的安全操作打下良好基础。例如：各类水电风气管线的种类、压力、规格登记标签、阀门挂牌、使用注意事项标牌、丝扣衔接处的易损标签、焊道抛光处的焊道标签、过道旁外露管线的防护围栏、过路的外露管线防踩踏盖板等。为了防止现场工人的误操作，各系统开关、阀门等应有明确的标识，各类控制阀安装位置应合理、便于操作。而压力表、流量计等各种计量仪表应安装在便于观测的位置。为了避免闲杂人等操作而导致现场出现紧急或危险情况，应在开关控制箱、阀门分流箱上锁。

## 3 二次配施工安全管控的重要性

近几年，随着国家政策的大力支持，一些高新工业企业正处于高速发展阶段。为了快速抢占市场，业主在建设过程中设定的一系列目标，其最终目的都是为了早日投产占有市场。作为包含工业生产线建设任务在内的工程总承包项目，生产设备二次配工程能够安全、平稳、可靠的按计划实施完成，正是项目能够如期顺利达产的关键。

通过加强生产设备二次配施工安全管控方面的技术能力和工程经验，系统性地提升工程总承包整体的管控能力，是增强工程总承包单位综合实力的重要举措，也是进一步增强我国工程总承包行业发展水平的必经之路。

# 关于建筑屋面防水设计中易出现漏水问题的探讨

■ 王伟 裴燕 [建筑]

**摘要:** 随着我国经济技术的飞速发展,人们的生活水平也在逐年提高,与建国初期的情况相比可以说是天差地别。经济的发展带动了社会各行各业的发展,但是房屋建筑的漏水问题却一直在困扰着人们,本文主要是对建筑屋面防水设计要点进行的一些分析,并提出一些有用的建议,希望对建筑屋面防水设计中遇到的问题有所帮助。

**关键词:** 建筑屋面; 防水设计

## 1 建筑屋面防水普遍存在的不足

选材因素防水材料质量好坏,是能否搞好防水工程的基础。目前国内防水材料的品种、规格较多,产品质量良莠不齐,防水材料市场比较混乱,不少劣质防水材料充斥市场。这些产品用于屋面工程,中西部一带降水量比较小,暂时还不会受到威胁,但是沿海城市多雨,一旦受到雨水侵蚀,影响屋面防水工程的质量。有关选材方面对屋面渗漏的影响因素应引起工程管理各方的高度重视。

### 1.1 设计因素

屋面防水工程质量设计不高是造成屋面渗漏的主要原因之一。我国长期以来没有制定防水工程的设计规范,设计人员无规范可遵循,各种不同类型、不同使用功能的建筑应如何进行防水设计,采用何种防水材料,有哪些具体的技术要求,均没有明确的规定。目前,有相当一部分高层建筑屋面防水工程采用1道设防,不符合《屋面工程技术规范》的要求;有的虽采用二道,但个别设计人员对新型防水材料的性能、使用范围及使用条件了解不透,不能根据建筑物的具体情况选用防水材料;有的在一道防水材料上进行二道热熔防水,以致造成一道材料热烤融化,无法起到二道设防的作用。有的设计仅考虑造型,排水位置设置不合理,造成排水不畅或排水线路过长,使屋面个别部分长期处于积水状态以致引起渗漏。

### 1.2 施工因素

施工方面的因素是造成屋面漏水的重要因素。即使有合格的材料、优秀的设计人员,如果施工过程不实施监督的话,仍然会造成屋面漏水这种严重的问题。在施工方面的因素主要包括这几个方

面:①缺乏防水专业施工队伍。②对防水施工工序的质量控制及管理不重视。③由于赶抢工期,找平层未干就急于铺设防水层,而未采取排汽屋面等有效措施,致使防水层出现起鼓、脱层、腐烂而导致渗漏。④涂膜防水施工时,则往往因涂膜厚度不均匀或涂膜过薄导致防水失败。⑤刚性防水屋面振捣不密实,养护不好,厚度不足,混凝土中各种砂石料比例及水灰比处理不当。

## 2 屋面防水类型

### 2.1 卷材防水屋面

卷材防水屋面的防水层具有一定的适应变形的能力和延伸性,所以又被称为柔性防水屋面。卷材防水屋面是通过防水卷材与胶粘剂的结合来达到防水的目的。它的优点是能适应温度变化、振动变化、不均匀沉陷因素的变化,并能承受一定的压力,且不易渗漏,整体性能好。只要严格按照施工操作规程施工,就能保证屋面防水的质量,但是操作较复杂,技术含量高。

### 2.2 刚性防水屋面

用细石混凝土做防水层的屋面称为刚性防水屋面,主要是由于混凝土抗拉强度较低,属于脆性材料。它的主要特点是造价低、构造简单和施工方便,缺点是对气温变化和屋面变形的适应性低,容易开裂。

### 2.3 涂膜防水屋面

用防水材料涂刷屋面基层的称为涂膜防水屋面,它是通过涂刷的涂料干燥后或固化后的不透水性来防水,以前的涂膜防水屋面由于涂料的抗变形和抗老化能力差,应用不广泛,但随着材料和施工技术的提高,涂膜防水屋面已经具有防水、抗渗漏、耐腐蚀、抗老化、粘接力强等特点,已经广泛应用于建筑的屋面防水工程中。

作者简介:王伟,男,工程师,2009年毕业于吉林建筑工程学院建筑学专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

## 2.4 瓦屋面

我国传统建筑常用的屋面构造形式是瓦屋面，它取材方便，构造简单，目前在一些民居建筑，农村建筑和生产辅助中仍然得到较多应用。瓦屋面大多是在屋面基层上铺盖各种相互搭接的瓦材，从而达到防止雨水渗漏的目的，也有一些做法是利用瓦下铺设其他防水材料来防水的方式。

## 3 建筑屋面的防水设计

### 3.1 明确防水等级

我国的房屋建筑行业相关部门根据工程技术的基本规范（包括耐用年限、设防层次、材料限制等）将房屋建筑的防水共划分为四个等级，所以工程师在设计时一定要根据实际情况合理选择防水等级。工程师在设计屋面防水时要遵循合理、适用的原则，依据建筑物的内部构造、建筑物的特点以及建筑物自身具有的建筑意义来选择房屋防水的等级，严格按照等级规定，选择适合的材料和层次结构设计。

### 3.2 “防”、“排”结合的思路原则

广义的防水设计包括排水设计，但排水设计的重要性在实际工程中易被忽视，因该明确，特定的防水材料性能及其相应的防水构造形式往往相对于特定的排水方式，迅速而顺畅地排除积水可以减轻防水层所受水压，减轻防水负担和困难，减少渗漏机会，为防水提供有利条件，“防水”与“排水”应密切结合，其目的都是为了防止渗漏，例如依据住宅屋盖结构构造形式、形状、面积大小、地区降雨量，以及檐口距地面高度，檐口立面造型等因素，制定相应的排水方式，对排水分区、排水坡度、坡向以及檐沟、天沟、雨水口、雨水管大小，间隔及其防堵塞构造，均应认真设计，对特殊的，重要的或防水要求很高的建筑，其屋面排水形式要经过慎重研究而定，必要时依据地区降雨量，屋盖结构形式和形状，汇水面积允许汇水深度等，对排水效率进行一些定量计算；对地下室还应注意其地表面的排水设计，防止地面积水渗入地下，侵蚀地下室；卫生间等的排水，不仅是防止楼层渗水的关键，也是保证建筑使用功能所必须的，设计中更不忽视。

### 3.3 细部节点构造重要性

水流或渗水汇集、冲刷、积存时间相对较长，结构构造和防水，构造层各项交接、转折、间断封口或收头、层次多、联接复杂；结构应力集中，应变敏感等原因，而成为渗漏多发处，也是防水工程的关键

部位，应在设计中重点设防，要选择抗渗能力，抗拉强度，延伸率、耐疲劳、耐久性能好的材料品种。主要措施包括：①附加防水层多道防线共同作用；②防水层搭接尺寸加大，增加连接强度；③加强结构构造整体刚度，或使防水构造以“柔”适变，等等，从而保证细部节点的防、排水性能可靠。在住宅建筑防水设计中，应重视绘制细部节点详图，并结合新材料新工艺和新的建筑构造型式、不断改进设计。

### 3.4 防水材料选用及环境和气候因素

建筑防水材料可分为柔性和刚性两大类。柔性防水材料拉伸强度高、延伸率大、重量小、施工方便，但操作技术要求较严，耐穿刺性和耐老化性能不如刚性材料。同是柔性材料，卷材为工厂化生产，厚薄均匀，质量比较稳定，施工工艺简单，工效高，但搭接缝多，接缝处易脱开，对复杂表面及不平整基层施工难度大。而防水涂料其性能和特点与卷材有很大不同，其具有防水、抗渗、粘结力强、耐老化、延伸率好、弹性好、不易燃、无毒、施工方便等特点，主要适用于防水等级为Ⅲ、Ⅳ级的屋面防水，也可用作Ⅰ、Ⅱ级屋面多道防水设防中的一道防水。同是卷材，合成高分子卷材、高聚物改性沥青卷材和沥青卷材也有不同的优缺点。刚性防水屋面材料，施工方便，造价较低，但易开裂，多用于日温差较小的我国南方地区防水等级为Ⅲ级的屋面防水，也可用于防水等级为Ⅰ、Ⅱ级的屋面多道设防中的一道防水层，不宜用于高温、有震动和基础有较大不均匀沉降的建筑。由此可见，在选择防水材料时，必须注意其性能和特点。

## 4 结语

防水设计是防水施工的依据，合理而先进的设计是保证防水工程质量和经济效益的前提，值得注意的是，许多防水质量的通病，通过改进设计比从施工角度着手更易得到根治。随着现代住宅建筑形式和结构构造技术的发展，对防水设计和防水工程质量提出了更高的要求，因而必须对防水设计引起足够的重视。

### 参考文献

- [1] 杜霜.谈建筑工程屋面防水设计与施工质量控制[J]现代装饰(理论), 2012, 04.
- [2] 陈尧译.屋面防水与地下防水[J].中国建筑防水, 2012, (08).

# 通风空调系统自控技术在建设工程中的应用

■ 齐金生 [电气]

**摘要:** 北京市某水电站地下厂房结构复杂,且地处特殊的不利气候环境。为保证电站通风空调设备能可靠稳定、合理分配运行,电站厂房采用了自动化通风空调控制系统。文中概要介绍了该系统的结构和主要功能。

**关键词:** 通风空调系统;自动化控制;运行管理

北京市某水电站设计装机6300MW,安装9台700MW的混流式水轮发电机组。电站厂房为地下式,布置于左岸山体内,厂房长为388.5m,宽为28.5m,高为74.4m,由主厂房、主变洞及母线洞组成。中控楼及开闭站均设于地面,设备分布区域广泛。由于电站属于高温潮湿地区,如何解决降温与除湿两者并存的睛况。

## 1 控制功能

水电站通风空调控制系统包括以下功能:主要设备间温湿度检测;室内参数给定值随季节、电站机组负荷而自动选择转换;通风空调系统运行状态监控和事故巡检;通风空调系统风量调节

与平衡;所有设备模拟显示与集中遥控;设备连锁保护;发生火灾事故时,可按火灾自动报警控制系统的要求,实现其相应的通风空调系统消防连锁控制;发生火灾事故时,未失火区域的适应态自动选择转换。

## 2 系统结构

### 2.1 主站级

两台主机工作站分别定义为系统操作工作站、工程师工作站,是系统的控制中心,能控制、监视、远程操作所有通风空调设备的运行。通过通信接口完成与电站计算机监控系统的通信及接收GPS对时功能;通过网络接口与现地控制级设备通信;通过RS485/RS422多串口与电站火灾自动报警系统联接。

作者简介:齐金生,男,高级工程师,2009年毕业于河南周口技术学院建筑工程专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

通风空调控制系统自动控制程序安装在现地控制单元CCU中,系统工作站设有连续控制的能力,只是将操作指令下发至现地控制单元CCU,由CCU自动完成。

## 2.2 现地控制级

共12个通风空调现地控制单元,即每台机组段各设一个通风空调现地控制单元(CCUI—9)、洞内其他通风设备设置一个通风空调现地控制单元(CCUI0)、主厂房空调除湿系统设置一个通风空调现地控制单元(CCUI1)、洞外中控楼开关站设置一个通风空调现地控制单元(CCUI2)。

各现地通风空调控制单元通过PROFIBUS—DP现场总线组成现地控制网,各现地通风空调控制单元作为现地控制网上的1个节点,既能独立完成各自监控范围内通风空调设备的运行及数据采集、处理,也能通过温度或水位传感器采集数据,进行数据处理并控制相应设备的运行。且现地通风空调控制单元盘上均有手动操作功能,能实现远方控制现地设备的启、停。各现地通风空调控制单元通过网络总线进行数据交换,实现网络资源共享。25个现地启动控制柜/箱则将采集到的数据送入相应的现地通风空调控制单元内,并具有现地手动/自动切换控制功能。

(1)各机组段通风空调现地控制单元(CCUI—CCUI9)的控制对象是主厂房各机组段对应的母线层和水轮机层辅助通风系统、操作廊道通风系统、机坑检修通风系统、与①③⑤⑦⑨号机组段对应的油气管子廊道通风系统,未设现地控制箱。CCUI—CCUI9现地控制单元柜触摸屏只作为监视,而没有控制功能,可通过盘柜控制把手来实现现地控制。

(2)洞内公用风空调现地控制单元(CCUI0)的控制对象较多,除设有现地控制箱外,还另增设有两个变频现地控制箱CCUI0—1、CCUI0—2。其中CCUI0控制LCP1蓄电池室风机启动控制箱;LCP2紧急出口风机启动控制箱;LCP3空压机室风机空调启动控制箱;LCP4透平油库风机启动控制箱;LCP9、LCP10主变洞电缆室风机启动控制箱;LCP11绝缘油库风机启动控制箱;LCP19主厂房排风机启动控制柜;LCP20尾水调压室排风机启动控制柜;CCUI0—1控制LCP15、LCP6母线洞(竖井端)排风机启动控制柜;LCP12、LCP13主变洞(竖井端)排风机启动控制柜;CCUI0—2控制LCP7、LCP8母线洞专用

风道(平洞端)排风机启动控制柜;LCP14、LCP15主变洞专用风道(平洞端)排风机启动控制柜。

(3)空调除湿系统现地控制单元(CCUI1)的控制对象是主厂房空调除湿系统的4台空调系统及配套的滤水器,只能监视不能控制。同时对500kV GIS开关站SF<sub>6</sub>气体检测装置进行控制。

(4)中控楼开关站通风空调现地控制单元(CCUI2)的控制对象是:LCP16①出线廊道风机启动控制箱;LCP17②出线廊道风机启动控制箱;LCP18③出线廊道风机启动控制箱;LCP21、LCP22中控楼GIS室风机启动控制箱;LCP23 GIS电缆室风机启动控制箱;LCP24④出线廊道正压送风机启动控制箱;LCP25中控楼电缆层排风机启动控制箱。

## 3 系统特点

### 3.1 通风空调主站级工作站冗余热备

为了充分保证监控系统的可靠性,主站级两台工作站在通过网络硬件联接的基础上由WinCC实现冗余热备。两个WinCC站(服务器)配置相同,完全并列运行,每个站有自己的过程联接和自己的数据存档。如果两个服务器中的一台故障,另一台接管信息存档和过程数据存档,保证了数据始终完整。当故障服务器修复再次启动,系统会自动更新故障期间所有的过程值和信息,使两台服务器始终具有相同数据,保证集中控制操作和管理的可靠性。

### 3.2 通风空调现地控制单元使用SIEMENS S7—414H大型可编程逻辑控制器

(1)双机热备冗余控制器CPU414H,由一套互为热备的S7—414H型中央控制器(CPU)组成,并预装有冗余组态软件,通过专用冗余光纤同步专线实现两台中央处理器之间的冗余连接。它采用了同步光纤冗余专线技术和自动事件同步功能,主备CPU故障切换时间小于30ms。在系统运行时,当某个中央控制器出现故障时,另一个中央控制器能立即无扰动地自动接管所有的控制任务,保证了系统正常运行,故障控制器可以在线更换。

(2)现地通风空调控制单元PLC主控制器采用SIEMENS全冗余容错热备的S7—400H系统设计。它由2套互为热备的S7—400H控制器组成,并通过同步接口模块和光纤电缆实现相互连接。

它能将各个分布式现场I/O站采集来的数字量或模拟量信息经过处理后传送到系统工作站,使系统工作站可查看到系统所有设备的工作状态及各种工艺参数,同时可以处理、执行来自系统工作站的各种控制指令和参数设置指令。在系统正常的运行中,当某个中央控制器出现故障时,另一个中央控制器能自动接管所有的工作,保证了系统正常继续运行和数据的一致性。S7—400H按照“热备份”模式(无冲击、出现故障自动切换)的活动冗余原理运行。根据这个原理,只要没有故障,两个子单元都是活动的。如果发生故障,起作用的控制器全面接管过程控制。

(3)现地通风空调控制单元ET200M分布式I/O站主要采用PROFIBUS—DP作为其通信总线系统采集现场信号,并将中央处理器的指令传输给执行机构,其最高网络通信速率可达12Mbps。每个ET200M分布式I/O最多可配置8个I/O用于计数、控制和定位信号的接口模块。所有I/O模块均采用了光电隔离,具有带电热插拔功能,并且均有自动故障检测和显示功能。I/O站直流电源采用了冗余设计,具有很好的容错性。

(4)现地通风空调控制单元供电方式,采用交直流供电方式,选用工业级的GEI系列正弦波逆变电源,采用高频脉宽调制(SPWM)技术,整机具有效率高、体积小、重量轻、噪音低等优点。直流输入端采用独特的高频电子有源滤波技术,有效地降低了输入端的反灌杂音,避免对同一直流回路上其他用电设备的干扰,又保证逆变器可工作于很宽的直流电压范围上。

(5)与调温除湿机控制装置通信:主厂房空调除湿现地控制单元(CCU10)与调温除湿机控制装置的连接除采用IO连接外,还采用现场总线通信方式连接,完成通风空调控制系统对调温除湿机的数据采集、单机和联合控制。

(6)SF<sub>6</sub>气体在线监测装置:SF<sub>6</sub>气体在线监测装置通过规约对接可以方便地实现遥信、遥测、遥控功能;灵活的系统组网功能,通过配接不同的监测模块,可以检测不同的环境变量,配接不同的控制器,可以控制不同的设备。

#### 4 结束语

综上所述,该水电站地下厂房采用自动化通风空调控制系统,充分保证了电站通风空调设备

可靠稳定、合理分配运行,为整个水电站的顺利运行提供了重要的保障。

#### 参考文献

- [1]尚志宇.通风空调系统自动化控制研究[J].科技博览,2013(5):295.
- [2]闻彪,吴庆,洪学新.地铁通风空调系统节能研究[J].建筑节能,2010(4):32—35.

## 航空工业规划技术发展中心 BIM工作室

航空工业规划BIM工作室隶属于中国航空规划设计研究总院（简称“航空工业规划”）技术发展中心，是公司开展BIM项目实践、技术培训支持、三维数字化先进技术研发与应用的专业团队。BIM工作室秉承公司“创新成就梦想 实干成就辉煌”的核心价值观，支撑公司各业务领域项目BIM技术应用和探索。

航空工业规划BIM工作室成立于2012年，6年来为公司培养了一批专业的BIM工程师，涵盖工艺、建筑、结构、给排水、暖通、电气等各个专业，10余人考取“BIM等级证书”高级建模师。航空工业规划BIM工作室的组织下，公司项目接连斩获行业BIM大赛奖项9个，包括“最佳工业工程类BIM应用奖一等奖”、“最佳BIM协同设计奖二等奖”、“绿色设计优秀BIM应用奖”，公司也连续两年获得“最佳BIM应用企业奖”。

航空工业规划BIM工作室建立有技术过硬的BIM技术团队，具备丰富的BIM辅助设计优化经验，先后完成了鲁家山生物质能源垃圾焚烧场、赤道几内亚总统府配套项目、济宁文化中心、北京新机场南航基地机务维修区工程项目、北京新机场东航基地项目航空食品及地面服务区一期工程等一系列标志性建筑的BIM辅助设计、绿色建筑仿真、工艺仿真模拟、可视化交互等工作。同时，基于项目需求着力开展多学科优化仿真、运营维护、数据管理、虚拟现实等三维数字化技术应用与系统集成研发探索。

航空工业规划BIM工作室将继续坚持BIM设计与工程设计紧密结合，BIM设计成果充分支持建筑全生命周期的应用，将BIM价值最大化，支持公司为客户打造数字工厂、智慧建筑，实现精益建造和智慧运维，提升经营效益。





北京新机场南航基地机务维修区工程BIM应用