

大型复杂型面空气动力试验 风洞高精度建造技术

DAXING FUZA XINGMIAN KONGQI DONGLI SHIYAN
FENG DONG GAOJINGDU JIANZAO JISHU

李博平 等 著

中国建筑工业出版社

大型复杂型面空气动力试验 风洞高精度建造技术

李博平等 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型复杂型面空气动力试验风洞高精度建造技术/李博平等著. —北京:中国建筑工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-112-20349-9

I. ①大… II. ①李… III. ①气动力试验-风洞-建筑施工
IV. ①V211. 74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 012985 号

本书是一本关于现浇混凝土风洞施工技术的专业书籍,综合施工相关领域的新技术、新方法,紧密结合风洞施工实践,总结了国内外现浇混凝土风洞施工技术,具有很强的针对性。

全书共分为 6 章。第 1 章简要综述了风洞工程施工的相关概念、特点和难点、精度控制的现状和主要做法及施工工艺设计的要点等。第 2 章主要介绍了风洞洞体施工过程中结构基础、洞体结构和内型面三个施工阶段的精度控制技术。第 3 章主要介绍了基础施工、风洞结构施工和风洞内型面施工的具体工艺方法。第 4 章主要介绍了适用于风洞洞体薄壁结构的自密实混凝土材料的制备和工作性检验等方面的研究内容和工艺做法。第 5 章主要介绍了风洞工程测量控制网、结构和内型面施工测量的相关技术方法。第 6 章主要介绍了 BIM 技术应用于风洞工程中涉及的模型建立和应用标准,并以具体风洞工程为例介绍了 BIM 技术在施工过程中的应用。

本书对从事风洞施工的技术人员具有很好的指导作用,同时可供从事国防试验工程建设、特殊工业建筑施工等专业的研究人员与高等院校师生参考。

责任编辑:王 梅 郭 栋

责任设计:李志立

责任校对:焦 乐 张 颖

大型复杂型面空气动力试验风洞高精度建造技术

李博平等 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:13 $\frac{3}{4}$ 字数:340 千字

2017 年 4 月第一版 2017 年 4 月第一次印刷

定价:49.00 元

ISBN 978-7-112-20349-9

(29651)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书编委会

主 编 李博平

副 主 编 杨 辉

编写人员 张笈玮 张松林 吕培培

吕 明 刘 波 徐忠超

刘东梅

主 审 金元国 韩登林

序

风洞是从事空气动力学研究和飞行器研制的最基本的试验设备，是以人工方式产生并控制气流，用来模拟飞行器周围气体的流动对飞行器的影响情况进行试验，作为一种特殊的试验设备，风洞工程的施工工艺不同于其他土木工程，施工复杂性和精度要求远高于常规建筑物，相应的技术和工艺具有鲜明特点。从 1871 年英国人韦纳姆建成世界上第一座风洞开始，风洞的建设已经有一百多年的历史。但在漫长的历史中，风洞工程建设技术并没有多少积淀，关于风洞工程施工方面的资料和技术文献更是少之又少，国外相关资料多处于保密之中。近些年，随着我国航空航天设备的研究逐渐增多，空气动力学领域的研究不断发展，新型飞行器的研制也越来越紧迫，风洞工程建设项目要求多而复杂，工程的形体、规模、精度等要求也越来越高。该书作者及其技术团队多次负责风洞工程建设和技术研究任务，攻克了多项关键技术难题，产生了一系列科研创新成果，形成了多套先进、成熟的工艺方法。最为可贵的是，他们在完成好工程建设和科研创新任务之后能够全面、细致地进行梳理和总结，并撰写成书，及时将技术和工艺成果积淀下来。在风洞建设进入高潮期的现阶段，该书的出版意义重大。

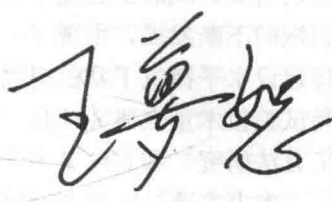
《大型复杂型面空气动力试验风洞高精度建造技术》一书既是对多种复杂风洞工程的建设实践和技术、工艺研究成果的系统总结，也是集众多风速、各种大型复杂风洞工程建设成果，集体创新的一本专著。该书系统介绍采用各种材料风洞施工过程中的断面精度和轴向精度控制、主要施工工艺方法、施工测量及 BIM 技术研究和应用。分析了风洞工程施工的特点和难点；创新提出了精度控制的现状和主要做法及施工工艺设计的要点；重点解决了风洞洞体结构施工过程中的精度控制难题；形成了洞体基础施工、风洞结构施工和风洞内型面施工的成套工艺方法，并结合建筑信息模型（BIM）、三维激光扫描等先进的信息技术，为风洞工程建设信息化奠定了基础。该书首次将工程系统控制理念和多项先进信息化技术引入到大型风洞建设中，大幅提升了风洞建设技术水平，使得我国风洞建造技术步入世界领先行列，对促进我国特种工程建设发展具有深远的意义。

该书的作者都是长期从事特种试验工程建设，多次直接参与风洞工程建设、施工技术研究的专家、学者和技术人员，具有丰富的工程实践经验。书中的内容严谨、翔实，紧密结合工程实践，既有试验研究和理论分析，又有详细的工艺方法描述，全文图文并

茂、语言流畅，具有很强的指导性和适用性，科研水平很高，是众多从事风洞工程建设和技术研究人员的智慧结晶。该书的出版必将极大地推动我国风洞工程建设技术的发展。

希望广大工程技术和管理人员，在工程实践中不断总结创新，做一批工程，出一部专著，将先进的技术、工艺和丰富的经验不断传承下去，为我国特种工程建设技术的发展和人才的培养做出积极的贡献。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the Chinese Academy of Engineering member of the Chinese Academy of Sciences mentioned in the text.

前 言

风洞工程作为一种特殊的试验工程,其施工工艺不同于其他土木建筑工程,施工精度要求高于常规建筑物,相应的施工技术具有鲜明特点。但由于风洞工程项目相对较少,一直以来很少有关于风洞工程施工方面的研究资料和技术文献。为适应我国对航空器和飞行武器研发的迫切需求及空气动力学试验研究的不断发展,风洞工程建设逐渐增多,迫切需要对风洞工程施工方面的工艺和技术进行研究、梳理和总结。此外,随着施工相关领域的不断发展,出现了一些先进的新技术、新方法,为解决风洞施工难题、提高风洞工程建设水平提供了新的思路,需要对风洞工程施工技术进行更新和提高。本书在完成原总装试验技术重点研究项目《异型薄壁混凝土结构风洞体及高精度大立体渐变空间顶立面施工方法研究》和总结某声学风洞工程施工经验的基础上编写而成。

本书主要针对现浇混凝土风洞施工过程中的施工精度控制、主要施工工艺方法、混凝土材料、施工测量及 BIM 技术应用等关键技术内容进行叙述。全书共分为 6 章。第 1 章是概论,简要综述了风洞工程施工的相关概念、特点和难点、精度控制的现状和主要做法及施工工艺设计的要点等。第 2 章是现浇混凝土风洞施工精度控制技术,主要介绍了风洞洞体施工过程中结构基础、洞体结构和内型面三个施工阶段的精度控制技术。第 3 章是风洞工程施工工艺,主要介绍了基础施工、风洞结构施工和风洞内型面施工的具体工艺方法。第 4 章是混凝土施工工艺,主要介绍了适用于风洞洞体薄壁结构的自密实混凝土材料的制备和工作性检验等方面的研究内容和工艺做法。第 5 章是施工测量方法,主要介绍了风洞工程测量控制网、结构和内型面施工测量的相关技术方法。第 6 章是 BIM 技术在风洞工程施工中的应用,主要介绍了 BIM 技术应用于风洞工程中涉及的模型建立和应用标准,并以具体风洞工程为例介绍了 BIM 技术在施工过程中的应用。

本书由李博平统稿,金元国、韩登林主审审稿。其中:第 1 章由李博平、张笈玮编写;第 2 章由李博平、张笈玮、杨辉编写;第 3 章由李博平、杨辉、吕明、刘波编写;第 4 章由李博平、吕培培编写;第 5 章由张松林编写;第 6 章由张笈玮、徐忠超编写。刘东梅对全书书稿进行了校对。

在本书的编写过程中,重庆科技学院的孙毅、卜长明、廖晓峰、王子健、刘睿老师和重庆大学的苗苗老师为本书的编写提供了技术支持,原总装备部军事训练教材工作委员会委员办公室李国华老师、原解放军工程建设协会苏敬斌副秘书长、解放军后勤工程学院于翔教授、中国农业大学蒋秀根教授、中国人民解放军 63926 部队李光明高级工程师在百忙之中审阅本书书稿,提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平和编写时间有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请同行专家和读者批评指正!

目 录

第1章 概论	1
1.1 风洞工程施工	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 风洞工程特点	3
1.1.3 风洞工程施工要求	4
1.1.4 现浇混凝土风洞工程施工难点	4
1.2 风洞工程施工精度控制	6
1.2.1 施工精度控制重要性	6
1.2.2 现浇混凝土风洞施工精度控制	6
1.3 现浇混凝土风洞工程施工工艺设计	8
1.3.1 施工工艺设计依据	8
1.3.2 施工工艺设计要点	9
第2章 现浇混凝土风洞施工精度控制技术	11
2.1 概述	11
2.1.1 施工精度影响因素	11
2.1.2 风洞施工精度控制要求	12
2.1.3 施工精度控制原则	12
2.2 风洞基础施工精度控制技术	13
2.2.1 洞体基础施工精度控制	13
2.2.2 设备基础施工精度控制	14
2.3 洞体结构施工精度控制技术	15
2.3.1 洞体结构预变形分析	15
2.3.2 洞体结构施工精度控制	23
2.3.3 结构模板与支撑体系要求	31
2.4 洞体内型面施工精度控制技术	31
2.4.1 内型面施工过程精度控制	32
2.4.2 内型面施工精度检测与控制	33
2.4.3 内型面施工精度偏差处理	45
2.5 三维激光扫描测量技术	46
2.5.1 基本原理	46
2.5.2 数据采集与处理	50

2.5.3 结果应用	55
第3章 风洞工程施工工艺	59
3.1 概述	59
3.1.1 风洞施工工艺	59
3.1.2 风洞施工工艺要求	59
3.1.3 风洞施工工艺特点	60
3.2 基础施工工艺	61
3.2.1 洞体基础施工	61
3.2.2 设备基础施工	65
3.3 风洞结构施工工艺	71
3.3.1 洞体结构施工	71
3.3.2 试验大厅结构施工	87
3.3.3 尾撑地坑施工	88
3.4 洞体内型面施工工艺	101
3.4.1 水磨石内型面力学性能	101
3.4.2 水磨石内型面施工	122
3.4.3 水磨石内型面施工效果验证	126
第4章 混凝土施工工艺	128
4.1 概述	128
4.1.1 洞体结构混凝土特点	128
4.1.2 自密实混凝土	128
4.2 自密实混凝土制备	131
4.2.1 原材料选择	131
4.2.2 配合比优化	132
4.2.3 材料搅拌及运输	142
4.3 自密实混凝土工作性检验	142
4.3.1 试验检验	143
4.3.2 数值模拟检验	147
第5章 施工测量方法	151
5.1 概述	151
5.1.1 风洞施工测量项目	151
5.1.2 风洞施工测量工作原则	151
5.2 测量控制网	152
5.2.1 平面控制网	153
5.2.2 高程控制网	155
5.2.3 测量仪器选择及控制点埋设	157

5.3 结构施工测量	162
5.3.1 同轴度控制	163
5.3.2 模板定位测量	165
5.4 内型面施工测量	169
5.4.1 内型面控制点设置与测量	169
5.4.2 分格条的位置测量	171
第6章 BIM技术在风洞施工中的应用	173
6.1 概述	173
6.1.1 BIM技术	173
6.1.2 应用范围和效果	173
6.2 BIM模型建模与应用标准框架	174
6.2.1 风洞结构BIM模型建模	174
6.2.2 BIM技术应用标准框架	181
6.3 BIM技术应用实例	199
6.3.1 辅助测量检测	199
6.3.2 施工精细化管理	200
6.3.3 多维施工模拟	205
参考文献	207

第 1 章 概 论

1.1 风洞工程施工

风洞工程与其他建筑工程相比具有鲜明的特性，在进行风洞工程施工前，必须对风洞工程的相关概念和特点有所了解，并清楚风洞工程的施工要求和技术难点。

1.1.1 基本概念

为便于更好地理解风洞工程施工的相关内容，首先对本书内容涉及的风洞、风洞工程及风洞工程施工几个主要概念进行描述。

1. 风洞

风洞（Wind Tunnel）即风洞试验室，是以人工的方式产生并控制气流，用来模拟飞行器或实体周围气体的流动情况，并可量度气流对实体的作用效果以及观察物理现象的一种管道状试验设备。它是进行空气动力试验最常用、最有效的工具之一。风洞设备的建设发展与航空航天飞行器研制紧密相连。在航空飞行器发展早期，对空气动力问题的探究促使了风洞的诞生。1871 年，英国人韦纳姆建造了世界上第一座风洞。随着飞机、导弹、航天飞行器发展，从 20 世纪 30 年代开始，迎来了风洞建设的高峰期，低速、跨声速、超声速、高超声速各类型风洞得到快速发展^[1]。

风洞按照其试验段的速度范围大体上可以分为六种类型^[1]，见表 1-1。

风洞类型

表 1-1

风洞类型	试验段速度（或 M 数）范围
低速风洞	$0 < v < 135\text{m/s}$ （或 $M < 0.4$ ）
亚声速风洞	$0.4 < M < 0.8$
跨声速风洞	$0.8 < M < 1.4$ （或 1.2）
超声速风洞	$1.4 < M < 5.0$
高超声速风洞	$5.0 < M < 10$ （或 12）
高焓高超声速风洞	$M > 10$ （或 12）

根据驱动系统不同风洞可分为两类：一类是工作时间可由几秒到几十秒，多用于跨声速、超声速和高超声速的暂冲式风洞；另一类是运转时间长、运转费用较低、多在低速风洞中使用的连续式风洞。

按照洞体管道是否封闭风洞可分为两类：一类是洞体管道为封闭的、气流可循环使用的回路式风洞（图 1-1）；另一类为洞体管道不封闭的开路式风洞（图 1-2）。近年来，还出现了可以在回路式和开路式两种类型中自行变换的风洞（图 1-3）。

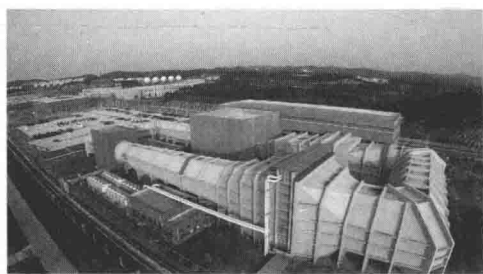


图 1-1 某回路式风洞照片

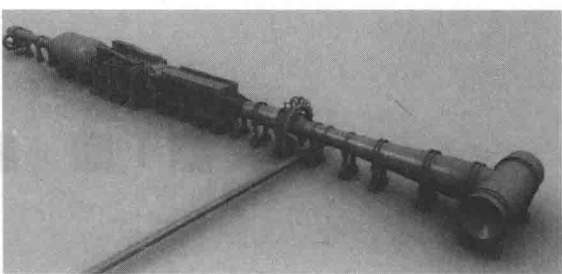


图 1-2 某开路式风洞模型图

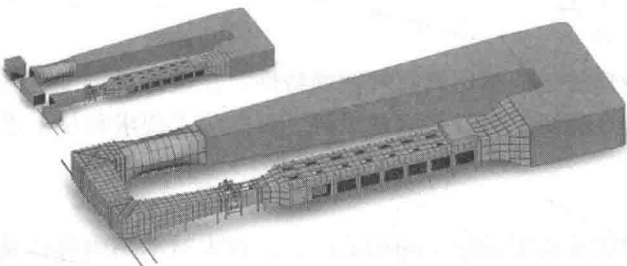


图 1-3 可转换式风洞三维模型图

本书介绍的现浇混凝土风洞主要涉及大型低速回路式风洞，该类型风洞主要由洞体、试验大厅、试验准备厂房、尾撑系统、风扇段、热交换器段、辅助厂房等组成。其中洞体又包含一系列扩散段、收缩段、拐角段和稳定段。图 1-4 为某低速风洞组成示意图。

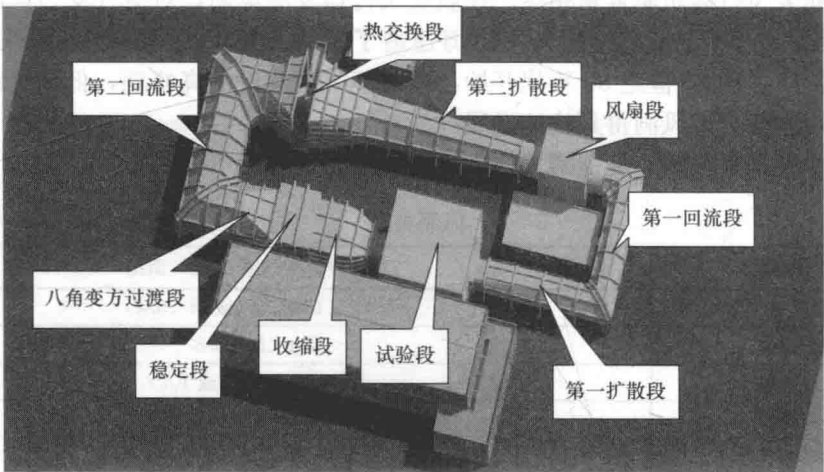


图 1-4 某低速风洞组成示意图

2. 风洞工程及风洞工程施工

本书中风洞工程，是指以风洞为建设内容的建设工程。

风洞工程施工是指按照风洞建造相关设计图纸和相关文件的要求，在建设场地上按计划将风洞设计意图付诸实现的测量、作业、检验等形成风洞工程实体的活动。其中，测量、作业、检验等活动的具体做法或操作步骤即为施工工艺，施工过程中为保证风洞实体

的精度满足设计和使用要求而采取的技术方法和措施统称为施工精度控制技术。

风洞工程洞体结构主要有钢结构洞体、混凝土结构洞体和钢—混凝土组合结构洞体,其中混凝土结构洞体按照混凝土结构施工方式可分为现浇混凝土洞体结构即采用现场浇筑混凝土的施工方式形成的洞体结构,以及预制装配式混凝土洞体结构即采用先预制混凝土洞体结构构件然后在现场拼装的施工方式形成的洞体结构。材料和施工方式不同的风洞工程,其施工工艺和精度控制技术也有很大差异,本书仅对现浇混凝土风洞工程的施工精度控制技术和施工工艺进行论述。

1.1.2 风洞工程特点

风洞工程主要具有以下几个方面的特点:

1. 工程意义重大

风洞作为空气动力和流场特性研究的重要试验设施,其对推动科研单位乃至国家的空气动力和流场特性领域的研究发展,带动相关行业的技术进步和革新具有重大意义。因此,风洞工程建设往往备受多方关注,工程建设的各项指标要求均较常规普通建筑工程严格,建设难度大。

2. 洞体精度要求高

作为一种试验设施,风洞工程的精度要求要高于常规建筑工程,尤其是风洞洞体的形位精度要求。由于洞体的精度直接影响风洞试验时模拟空气流场的品质,进而影响试验结果的精度,其形位精度指标往往由气动工艺设计决定,参照机械设备加工制造的精度要求水平提出,这对于大型风洞,尤其是采用土木建筑施工的方式进行建造的大型混凝土风洞来说,其施工精度控制难度极大。

3. 风洞类型多样,可供参考的工程实践经验少

由于风洞试验的类型不同,相应的风洞也分为多种类型,不同类型的风洞之间均有较大差异。即使是同一种风洞,也往往因为建设时期或建设区域等因素的不同而各具特点,因此,目前世界上已经建成的风洞均不相同,没有哪一项风洞工程可以提供给另一项风洞工程直接照搬的成熟经验。此外,风洞工程不同于常规建筑工程,其工程建设项目很少且类型多样,因此难以积累丰富的工程实践经验以供参考。

4. 洞体截面形状多样

由于风洞试验时,流场的模拟要依赖风洞洞体的截面形状或尺寸的变化,因此风洞洞体的截面形状或尺寸是沿流场气流方向发生变化的,尤其是大型风洞,考虑到洞体建造的难度,往往会有更多的截面形式,如某声学风洞的洞体截面有圆形、矩形、八边形、双层矩形等多种形状,且沿气流方向存在线性和非线性的截面尺寸渐变,使得风洞洞体成为异形洞体,大大增加了风洞工程的施工难度。

5. 洞体结构材料多样

对于不同类型的风洞工程,会根据风洞的尺寸规模、洞体承受荷载的强弱、工程成本及建造难度等因素采用不同的材料。目前,仅风洞工程的洞体采用的材料就涉及钢材、混凝土、有机玻璃、木头等。且同一风洞工程中,洞体结构的材料往往不止一种,常是两种或两种以上材料组成,如钢和混凝土组合、钢和有机玻璃组合等。

1.1.3 风洞工程施工要求

鉴于风洞工程区别于其他工程的特殊性，其在施工方面的要求也不同于其他建筑工程。

1. 施工单位资质、能力、经验

由于风洞工程不同于普通建筑工程，属于特种试验工程，其施工难度大、质量和精度要求高，因此对施工单位的资质、技术水平、管理能力、工程经验均有特定的要求，如试验段当量直径在 3m 及 3m 以上量级的低速风洞，其钢筋混凝土洞体应由一级企业资质的房屋建筑、土木工程施工单位承包施工。风洞非承压钢壳体现场制作及安装，应由具有一级企业资质的安装单位承包施工。风洞承压钢壳体现场制作及安装、工厂制作的风洞钢制部段、设备或部件的安装，应由具有经国家建设行政主管部门批准的一级企业资质的安装单位，且具有省级劳动、安全监察部门发给的相应压力容器制作和安装的单位承包施工。工厂制作的风洞钢制部段、设备或部件，也可由具有安装资质的承制工厂承包安装。

2. 精密筹划，精心准备，精细管理

考虑风洞工程的特殊性，在施工前必须进行精密筹划，对施工中可能出现的问题进行预测，对施工关键技术难题提前进行预研，对施工关键过程和工艺进行预演，将可能出现的问题尽量解决在施工之前，以弥补风洞工程实践经验的缺乏。工程开工前必须精心做好准备，建筑资金、材料、劳动力、施工机具、试验测量仪器、现场施工环境和条件等均需准备到位，确保连续施工。施工过程中要进行精细化管理，从材料的精细使用到工艺细节的控制把握等等都需要深入细节，以精细建精品。

3. 严格控制施工精度

针对风洞工程的高精度特点，在施工中必须严格控制施工精度，将精度控制贯穿于整个施工过程。将风洞精度作为随施工过程不断变化的变量进行动态控制，结合测量新技术和数值仿真分析进行施工精度信息化控制。

4. 做好工艺设计

从试验设备的角度来讲，风洞工程中的风洞洞体是用于风洞试验的工业设备，其生产过程从某种程度上更接近大型工业设备产品的生产，因此在编制施工组织设计的同时，应借鉴工业设备生产工艺设计的理念对风洞洞体的建造工艺进行详细的工艺设计，绘制工艺图纸，确保建造过程的精细控制和最终产品的质量、精度。

5. 综合应用“四新”成果，加强科研创新

随着空气动力学领域的不断发展，风洞试验研究对风洞的功能和性能要求越来越高，风洞建造水平逐渐成为制约风洞设施水平的瓶颈。同时，随着施工相关领域的不断发展，出现了一些先进的新技术、新方法，为解决风洞施工难题、提高风洞工程建设水平提供了新的思路。为满足越来越苛刻的风洞质量、精度和性能要求，必须积极应用“四新”成果，不断开拓思路，加强学科间交叉研究，大胆创新，推动风洞工程施工技术水平不断提升。

1.1.4 现浇混凝土风洞工程施工难点

现浇混凝土风洞工程的施工难点主要存在于施工精度控制、水磨石内型面施工、洞体

结构施工、施工测量和施工过程管理几个方面。

1. 施工精度控制难度大

风洞工程对洞体内型面的几何精度要求远高于一般建（构）筑物，在风洞施工过程中，各个施工环节对洞体内型面的精度均有影响，单纯对内型面施工环节进行精度控制难以满足最终的精度要求，需要综合考虑各种因素并全过程系统考虑精度控制问题。而对于现浇混凝土风洞工程，一方面由于其结构体采用现场浇筑成型，一旦硬化成型后其形状难以调整，必须在施工前做好充分的准备，施工过程精细控制，确保成型后不会出现过大的几何偏差；另一方面，由于结构采用现浇混凝土形式，结构内表面的几何精度难以直接满足洞体内型面的精度要求，必须通过具有一定厚度的内型面面层进行更为精细的精度控制，如水磨石内型面。在施工完成的洞体结构内部，要对底面、立面、顶面、斜面和空间曲面上的面层进行多项严格的施工精度控制，其中同轴度等指标的控制和检测尚无可直接参考的方法、规范或标准，需要针对风洞洞体的特点研究新的精度控制和检测方法。

2. 水磨石内型面施工难度大

在现浇混凝土风洞工程中，由于精度控制和材料选择等方面的原因，往往采用水磨石内型面作为风洞洞体的内型面。在一般建筑工程中，水磨石往往用于地面、楼梯面等部位，施工较方便，但在风洞工程中，风洞内型面为空间异形型面，需要在底面、立面、顶面、斜面和空间曲面上进行大面积、高精度的水磨石施工，且施工在封闭的洞体结构内部进行，需要解决水磨石面层与结构连接牢固、防止水磨石层开裂、施工过程中材料和机具如何运至洞内作业面、如何控制好型面成型精度等一系列技术难题。

3. 洞体结构模板施工难度大

对于现浇混凝土结构的风洞，洞体结构的模板施工是控制好洞体结构几何形状的关键环节。与普通建筑物不同，风洞洞体结构为空间异形薄壁结构，其结构形状变化多样，模板裁分复杂，现场放样、拼装和模板空间定位、支撑也较普通建筑困难，尤其是洞体收缩段部分的结构为空间曲面结构，曲面由气动工艺设计决定，曲面几何精度要求高，曲面模板加工定型和现场拼装难度极大。

4. 洞体结构混凝土施工难度大

现浇混凝土风洞结构的洞体为空间异形薄壁结构，由不同倾斜角度和空间曲面的洞壁构成，需要采用双面支模板的方式施工，且洞壁内有双层双向分布钢筋，采用普通混凝土施工工艺难以保证洞壁混凝土浇筑密实，需要针对不同部位、不同倾角情况选择不同的混凝土材料和施工工艺，需要反复进行混凝土材料的配合比优化和工作性检验。

5. 施工测量难度大

现浇混凝土风洞工程的施工图纸上往往只给出确定洞体形状必需的几个截面的尺寸信息，而风洞施工往往要分段、分层施工，每次施工前均需进行测量定位，需要更多的几何信息，仅靠二维施工图纸提供的信息无法满足要求，必须想办法获取更丰富的几何信息。同时，风洞洞体形状复杂多样、几何精度要求高、通视条件差、测量控制点多，而且部分测量控制参数只能寻找辅助手段间接控制，其施工测量工作量和难度远比一般建筑物大。

6. 施工过程管理难度大

由于风洞工程特殊性强，工艺复杂，建设周期长，涉及的专业多，交叉施工多，且风洞建设项目相对较少，缺乏经验积累，施工过程中存在工程信息繁杂、传递易出错、材料

和机具统筹管理难、施工进度和成本难以掌控等问题。

1.2 风洞工程施工精度控制

1.2.1 施工精度控制重要性

1. 风洞精度直接影响试验效果

风洞工程精度要求高主要是成型后洞体内型面的精度要求高,因为风洞内型面的形状是气动设计者为获得最好的气流品质而精心设计出的最佳回路形状。如果形状偏差超过一定数值,风洞试验时洞体内部的气流品质就会受到影响,流场参数偏离预先设定值,试验结果也会出现较大偏差,导致风洞无法正常使用,从而带来经济、军事等多方面的损失。

2. 施工精度随施工过程而变化

由于风洞工程有较高的精度要求,对于普通土木建筑工程可能不需要考虑的精度影响因素,如基础沉降量的变化、结构变形随不同施工工况下荷载变化而产生的变化等都需要在风洞施工时考虑全面。由于这些因素的影响是随施工过程而变化的变量,因此仅仅通过常规的粗略的精度保证措施无法确保最终成型的风洞洞体精度满足设计要求,必须采取更为精细的、全面的、动态的施工精度控制系统方法。

3. 风洞成型后精度难以调整

对于现浇混凝土风洞,由于风洞结构是在现场由混凝土浇筑成型的整体结构,一旦混凝土硬化,结构整体刚度较大,无法再对其进行局部的精度调整,即使通过水磨石内型面进行调整,也仅有有限的调整空间,且水磨石内型面的打磨调整控制难度很大。对于预制装配式风洞,虽然洞体结构是相对现浇结构较为柔性的结构形式,但由于各个预制构件之间互相连接,相对调整的空间很小,且局部构件的形位调整必然会影响周围构件的形状和位置,即各个构件之间的形状和位置是相互耦合的,进而导致结构精度调整的复杂性。

1.2.2 现浇混凝土风洞施工精度控制

1. 施工精度控制内容

现浇混凝土风洞工程的施工精度控制主要集中在风洞洞体上,根据气动工艺设计提出的相关精度指标要求,需要控制的精度主要包括洞体不同区段之间的相对位置精度、方向精度和洞体的形状精度三种类型,每种类型均包含多项具体的精度指标。

1) 相对位置

(1) 洞体同轴度

同轴度是风洞洞体的首要精度控制指标,描述了风洞内部流场的每个断面形心与理论轴线的偏离程度。偏离得越多,则同轴度越低,风洞的流场品质就越差。

(2) 内型面与轴线之间的距离

内型面是直接接触试验流场的部分,它的形状精度直接决定了风场的性质。内型面与轴线之间的距离是施工过程中需要精确控制的一个指标,用于首先标定风洞轴线后,精确把控内型面的设计位置精度。

(3) 关键点之间的距离

内型面的精确定位除了与轴线距离这一指标外,还需要同时把控内型面关键点之间的距离,来共同实现内型面的完整定位。施工过程中需要将内型面的交点、转折点等几何关键点精确定位,通过精确控制已确定的距离,实现整个内型面定位。

(4) 洞体相邻部段对接的顺流方向阶差

洞体相邻部段对接的阶差是指洞体相邻两个部段在对接线两边的内型面不在同一面上导致的偏差,即在两个部段对接处出现了台阶。对于风洞洞体,为避免试验流场内产生扰动漩涡,一般对沿试验流场流动方向后一部段内型面突出于前一部段内型面的阶差情况有严格要求。

2) 方向

垂直度是需要重点控制的施工精度指标,描述了内型面的横截面与风洞轴线的垂直程度,这也是保证风洞运行后实际流场与设计目标相吻合的关键指标。

3) 形状

(1) 表面平整度

风洞运行时,与风场直接接触的内型面对流场产生阻力而形成边界层,在边界层外同一截面各点风速是均匀的,在边界层内流场的速度从设计风速减小到内型面表面的0风速。内型面表面越平整,边界层厚度越小,内型面表面越粗糙,边界层厚度越大。因此,在施工过程中,必须精确控制内型面水磨石的平整度,因为这是直接接触风场的最后一个环节,直接决定了风洞使用性能。

(2) 曲面轮廓度

在风洞结构中存在大量的曲面,如各种扩散段和收缩段,每一个曲面均由理论方法精确获得,因此有各自的几何方程和位置定位。风洞施工时,通常需要先根据理论公式或位置坐标进行空间曲面或曲线的精确定位。然后,对其施工完成位置进行多项检验,以确定最终形状与理论形成的符合程度。

2. 施工精度控制方法

风洞工程的施工精度控制是现代控制理论与风洞工程施工需求相结合的必然产物。随着风洞类型、施工特点的不同,其施工精度控制方法也不相同,其实质就是使施工按照预定的理想状态(主要是几何参数)顺利推进。而实际上不论是理论分析得到的理想状态,还是实际施工都存在误差,所以,施工控制的核心任务就是对各种误差进行分析、识别、调整,对结构未来做出预测^[2,3]。根据现有的施工控制理论,施工控制可分为事后控制法、预测控制法、自适应控制法等(也有文献从控制思路上将施工控制分为:开环控制、反馈控制或称闭环控制和自适应控制)^[4,5]。

1) 事后控制法

事后调整控制法是指在施工中,当已成结构与设计要求不符合时,即可通过一定的手段进行调整,使之达到要求。这种方法仅适用于结构几何精度能够调整的情况。这种方法工作量较大,难以保证调整效果且实施起来较困难,最终几何精度往往难以达到理想状态。这种方法在实际应用中应用较少。

2) 预测控制法

预测控制法是指在全面考虑影响风洞结构几何状态的各种因素和施工所要达到的目标