

美国AIAA风洞试验管理标准浅析

Remark on AIAA Standard for Wind Tunnel Testing Management

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心

摘 要: 国外大型风洞的运营已呈现出企业化发展模式。风洞试验管理直接关系到试验周期、质量和成本,影响研制型号的性能和竞争力。本文归纳了风洞试验发展的历史背景,简述了美国AIAA风洞试验管理标准制定的过程和内容,重点阐述了标准中的风洞试验理念和管理做法,分析了标准中映射出的美国风洞试验技术的先进点,为国内大型风洞生产性试验的科学管理和创新发展提供参考。

Abstract: The large wind tunnel managing has the trend of something like that of the enterprises in overseas countries. Wind tunnel management is relation to test cycle, quality and cost, affects the performance and competition of product developing. This paper introduces the background of wind tunnel testing development, summarizes the drawing process and contents of the wind tunnel standard of AIAA, expounds the thoughts and managing measures of the standards, analyzes the advancements of American wind tunnel testing techniques reflecting from the standard. The purpose is to provide thoughts and references for large wind tunnel running management and innovation development in domestic wind tunnel testing field.

关键词: 风洞试验; 管理; 标准

Keywords: wind tunnel testing; management; standard

0 引言

目前,风洞试验不仅应用于航空航天飞行器空气动力学研究,而且广泛应用于大气相关的许多领域,如车辆、建筑、风能、环境等,风洞试验研究已为更多的行业所应用。长期以来,在风洞试验领域,国内外众多从事风洞试验的机构都是按照各自的历史沿袭经验或习惯做法,周而复始地管理着一个个风洞试验项目。

进入21世纪以来,低碳、环保、可持续发展逐步成为世界各行各业发展的潮流,风洞试验领域也不例外。创新风洞试验方法,如美国NASA提出的现代实验设计(MDOE)风洞试验方法,规范风洞试验管理,如美国美国航空航天协会(AIAA)制定的风洞试验不确定度标准、天平校准标准、风洞校准标准、风洞

试验管理标准、运行标准等,已成为世界一流风洞试验机构规范风洞试验、提高风洞试验质量和效率、提高行业内竞争力的重要途径。

2002年7月,美国AIAA地面试验技术委员会(GTTC)批准了“风洞试验——第1部分:管理卷”标准(AIAA R-092-1-2003,以下简称“标准”或“风洞试验管理标准”),2003年9月,AIAA标准执行委员会(SEC)通过并颁布。通过制定风洞试验管理标准,指导行业科学管理风洞试验活动,达到提高质量、缩短周期、降低成本的目的。

1 风洞试验管理标准的概述

1.1 标准制定的背景

在航空飞行器发展早期,人们缺少

对空气动力的认知,对空气动力问题的探究促使了风洞的诞生。1871年,英国人温霍姆(F.H.Wenham)建造了世界上第一座风洞。1901年,莱特兄弟用他们自己设计的风洞获得了有关空气动力的知识,并于1903年实现了人类带动力飞机首飞。

随着飞机、导弹、航天飞行器发展,20世纪50年代前后,迎来了生产型风洞建设的高峰期,亚声速、跨声速、超声速、高超声速等各类型风洞得到快速发展。20世纪30年代前后,随着早期螺旋桨飞机的发展,为了探索研究飞行遇到的诸多空气动力问题,工业发达国家开始建造大型低速风洞,如美国建设了60ft×30ft(18.3m×9.15m)全尺寸风洞。20世纪40年代开始,航空工程开始从活塞式螺旋桨飞机向喷气式飞机

过渡,促进了超声速风洞的迅速发展,1956年美国建造了世界最大的超声速风洞,试验段尺寸为 $4.88\text{m} \times 4.88\text{m}$ 。20世纪40年代初,在风洞中进行近声速试验时,出现了壅塞现象,使风洞试验得不到可靠的的结果。1947年,美国建造了世界第一座跨声速风洞,为飞机突破音障奠定了基础。随着航天飞行器的发展,从20世纪50年代开始,相继建成了各类高超声速风洞,如激波风洞、热结构风洞、低密度风洞等,为运载火箭、飞船等航天工程发展奠定了基础。20世纪70年代,随着计算机技术的发展,国外对早期建设的风洞进行了测量和控制技术改造,风洞的自动化程度和生产效率大幅度提高。20世纪80年代末,许多重点风洞又对流场品质、模拟能力、试验技术扩展等方面进行了更新改造。这期间,除航空航天领域外,随着高层建筑、大跨度桥梁、高速列车、汽车、环境研究等迅速发展,风洞开始专业细分,出现了一些航空领域外的其他行业专用风洞,如列车风洞、汽车风洞、桥梁/建筑风洞、环境风洞等,风洞试验活动与国民经济建设日益密切。综上所述,风洞因航空空气动力学研究出现,从低速风洞发展到高超声速风洞,并已扩展到交通、建筑、能源和环境等其他领域。

人们的风洞试验活动已有上百年的历史,但是,如何规范管理风洞试验并没有一个权威的国际行业标准。在风洞试验领域商业化竞争日益激烈的今天,风洞试验管理对数据质量、成本、周期的影响已不可忽视,同时,也需要总结风洞试验活动的规律和经验。因此,美国AIAA地面试验技术委员会召集了NASA兰利、格林、艾姆斯等3个中心,AEDC、波音、洛克希德等10多个与风洞试验相关的政府部门或工业企业,组成了一个具有广泛代表性的风洞试验

专家小组,制定了“风洞试验——第1部分:管理卷”标准,并征询了美国许多公司专家的意见。该标准属于AIAA标准的推荐类(R),不具有强制性,可作为风洞试验活动过程的管理指南。

1.2 标准的内容

AIAA风洞试验管理标准共由6部分组成,分别是:前言、绪论、管理当今的风洞试验过程、结论、附件A和附件B。

“前言”部分介绍了标准制定的目的、参与标准制定人员的所属单位以及标准编写过程中和完成后征询过意见的人员和单位。AIAA地面试验技术委员会对标准性质进行了说明。从“前言”可以看出,标准制定的参与者主要是美国航空航天的主要风洞试验机构(NASA、AEDC)和型号研制公司(波音、雷神导弹、洛克希德·马丁等),参与制定标准的人员来自十多个单位,覆盖面广,具有广泛的代表性,也为标准的推广使用奠定了基础。

“绪论”部分简要介绍了风洞试验的起源,以及在航空飞行器研制中的作用,指出了风洞试验管理的内涵,即管理风洞试验就是在成本、质量、数据量和计划安排响应中做出一种折中,并贯彻到风洞试验活动中。风洞管理者深刻理解这种“折中”并掌握一定的管理技术,是成功管理风洞试验项目的基础。

“管理当今的风洞试验过程”部分是标准的核心内容。它从“风洞试验过程中的计划问题”和“成功管理一个试验项目的关键”等两方面内容,阐述了风洞试验管理的具体内容,总结了长期风洞试验的成功做法经验。标准阐述的风洞试验环节包括:试验条件、计划和时间安排、特殊问题、先进工具和技术,涉及的具体内容很细,从模型缩比和保真度、测量设备、风洞选择、安全、特殊问题等;体现出了标准的制定者有着长

期丰富的风洞试验从业经验和严谨的工作作风。标准指出了成功管理风洞试验等七个关键方面,内容涵盖了管理计划阶段、执行阶段和完成后阶段需要做的工作。

“结论”部分重申了风洞试验以及管理风洞试验的重要性,强调了标准中提出的管理风洞试验的关键方面对风洞试验顺利进行、降低成本、缩短周期的重要性。

“附件A”和“附件B”分别阐述了管理风洞试验中应考虑采用的先进工具和方法,以及风洞试验的模型制作环节中可能涉及到的合同转包机制问题。

2 风洞试验管理标准的核心内容

2.1 风洞试验管理的理念

风洞试验管理是追求用较短的周期和较少的成本来获得较高品质的更多风洞试验数据。在许多情况下,周期、成本和品质、数据量是相互制约的,因此,成功的管理需要深刻理解它们之间的关系,并在这些关系之间找到一种折中或平衡。此外,管理还需要掌握管理技术:在制订试验计划前,了解试验项目技术目标,由此掌握风洞试验的数据要求;为了减小成本和风险,尽早选用合适的人员参与进来,包括选择试验设备和设备操作人员;确定试验模型和数据保真度,以便节约成本和时间;采用系统工程的方法来发展、计划和管理试验项目;综合试验过程中一些必需的计划改变,使影响降低到最小。

2.2 风洞试验管理的计划问题

风洞试验项目的周期、成本是管理的重要目标,而技术问题更是管理的重中之重,因此,沟通是试验管理的基础。标准中强调了管理者在计划制订过程中与试验执行者的沟通,特别是尽早与试验型号单位沟通,并参与到计划制订

中,这样有利于试验管理者和试验执行者更好地理解试验型号单位的意图和目标。

在风洞试验条件和目标明确、试验项目任务书获得批准和提供后,就可以进行风洞试验管理的计划工作。计划工作主要包括以下几方面。

1) 综合考虑试验项目。宏观上,要综合考虑飞行试验、风洞试验、CFD建模和分析;就风洞试验而言,需要综合考虑项目是否要在不同的风洞中进行,能否进行相关的综合利用,比如能否共用模型等。

2) 试验模型缩尺比和保真度。试验模型的大小需要与风洞设备的能力精心匹配,包括与模型制成系统、测试系统(天平、传感器等)的匹配,模型外型的模拟细节及加工精度需要确定,这直接关系到周期、成本和试验数据的精度要求。

3) 数据和测试仪器条件。风洞试验种类很多,比如测力、测压、测热等,数据和测试仪器的要求差异很大,仪器的校准、数据采集、处理过程环节多,管理计划需要考虑其中的复杂性,以及需要的时间及成本。按照AIAA S-071A-1999风洞试验数据不确定度评估标准,尽早进行数据不确定度分析,确保所采用的测试仪器精度能满足试验的要求。

4) 风洞设备的选择。风洞运行成本一般占整个风洞试验项目成本的1/2~2/3。对许多试验项目而言,可用的风洞设备不是唯一的,因此,可以根据试验的目的对数据的要求、风洞的能力等综合选择。

5) 计划和制订时间表。涉及完成风洞试验最终目标的所有工作都需要计划和制订时间表,对实验设计要进行风险评估,考虑各种条件变化对整个试验安排产生的影响。比如,技术风险就

包括模型外型变化、项目预算或时间要求变化等。

6) 一些特殊问题。主要包括安全和分包采购。安全问题也涉及试验成本,主要有技术安全、试验区域的保密监控和数据文件管理;分包采购主要涉及成本和时间控制等。

7) 先进的工具和技术。做风洞试验计划时,需要认识新技术和实验设计方法的积极作用。

2.3 风洞试验管理的关键

风洞试验管理主要贯穿于一个风洞试验项目合同执行的三个阶段(图1):一是试验计划制订;二是试验计划的执行;三是试验结束后工作。在这三个阶段过程中,风洞试验管理有以下七个关键方面需要把握。

1) 建立目标、质量和成功的准则。风洞试验管理开始就必须明确目标,把握试验数据精度/不确定度,确定衡量试验是否成功的准则。早期的不确定度分析将有助于管理决策。

2) 深入了解项目的商业模式或资金考虑。商业模式或资金因素可能影响试验项目的技术决策,如经费总包干试验项目就要限制使用高风险的处理方法或试验计划。

3) 尽早吸纳试验相关部门人员参与。风洞试验环节众多,沟通和尽早吸纳相关试验环节关键人员参与,对建立实际可行的试验计划非常重要。

4) 建立试验队伍。建立试验队伍分两步,一是在试验计划和准备阶段,这个阶段队伍的组成主要是试验重要环节的负责人,如项目客户、模型设计、加工、风洞设备、试验和数据分析、安全等。这些人要有一定的决策权。二是在试验执行阶段,也就是风洞试验中,需要一个项目试验工程师和风洞试验工程师组成的团队。项目试验工程师负责与项目客户沟通、数据分析、模型管理和安全等;风洞试验工程师负责设备运行、测试、计算等风洞运行管理。

5) 编制详细的试验计划并执行。详细的试验计划有利于试验的顺利执行,这其中包括试验各环节时间表、模型状态、试验大纲、测量条件、数据采集/处理条件、各环节责任、人力财力资源预算、风险、计划改变控制、试验评估等。

6) 项目总结/经验教训/反馈。试验结束后对试验整个过程进行评估总结是管理的一项重要工作。总结包括对

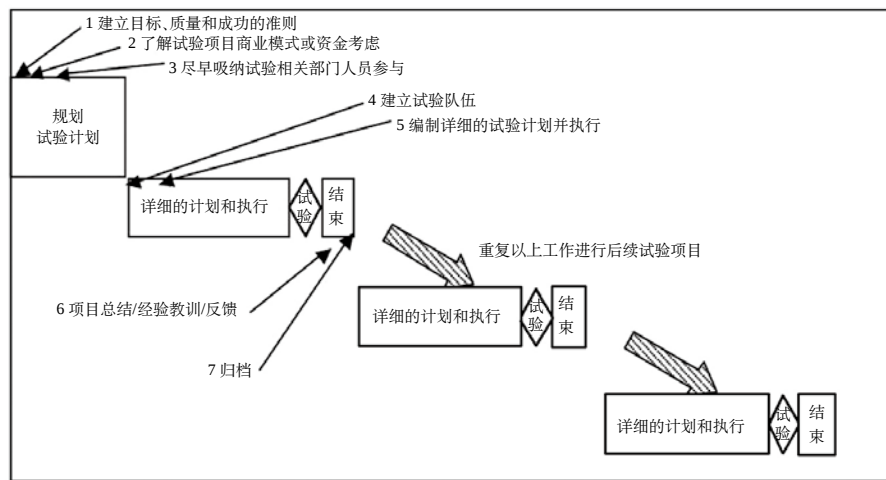


图1 风洞试验管理关键环节流程

试验结果的确认、模型/风洞/测量设备状况、预算执行情况、技术和经验教训、试验计划表执行情况、事后数据分析和交付情况等。

7) 归档。试验项目完成后,试验活动各环节形成的文档记录需要搜集汇总归档,这些记录文件将为以后的试验管理工作提供借鉴经验。

3 风洞试验管理标准中折射出的技术进步

风洞试验从早期的研究性质逐步发展到生产性的商业运营,大型风洞的生产性试验管理对型号研制的周期、成本产生直接的影响。在AIAA风洞试验管理标准中,可以感受到美国在风洞试验过程中的先进理念、做法和技术。

1) 风洞试验管理提出了采用系统工程的管理观点,并指出了采用先进实验设计方法的重要性。虽然根据标准内容,可以看出其主要针对的还是目前风洞试验领域采用的传统OFAT方法,但标准已经注意到创新的实验设计方法(如MDOE方法)可能对风洞试验管理带来的巨大效益。

2) 风洞试验管理既是过程管理,也是技术管理。在实践中,更多地把风洞试验管理看作组织协调、计划和过程的管理,但从标准中折射出这其中包含着对风洞试验技术的深入了解,只有熟练掌握风洞试验技术才能科学地实施管理。

3) 风洞试验和CFD的结合。CFD技术独立地作为一种空气动力学研究的手段已为人们所认识,标准中提到的CFD技术是作为一种提升风洞试验效率和质量的辅助工具。CFD技术在风洞试验中的应用将提高风洞试验效率,有助于优化试验方法,评估试验软、硬件风险。

4) 模型CAD设计和快速原型加工。模型CFD设计技术在风洞模型设计中已得到广泛应用。快速原型加工涉及新材料、新工艺在风洞模型上的应用,在满足模型设计要求的条件下,采用新的模型制造材料和技术,有助于降低成本,缩短加工时间。

5) 远程参与风洞试验。互联网和计算机软件技术、视频技术的发展,已使型号单位人员异地参与风洞试验成为可能,这将有效地降低参试人员差旅成本,提高效率,缩短型号研制周期。

6) 先进的仪器仪表、测试技术应用。测试技术的发展日新月异,传统风洞试验数据采集测试系统通常都有大量的传输线缆,而遥测、机载数据采集无线传输将在风洞试验中得到应用;非接触测量技术、MEMS微机电测试技术都将显著影响风洞试验数据质量和效率。

7) 风洞试验模型自动化。大型风洞生产型试验需要获取各种状态下飞行器气动特性,由于飞行器模型各种控制面组合变化多,模型试验状态变化多,因此风洞模型自动化直接关系到风洞试验的数据质量、成本和效率。例如,国外某风洞试验研究表明,采用传统的常规风洞飞机模型,其人工变换升降舵状态1次需要7~10分钟,这包括风洞停车、模型舵片调整(1~1.5分钟)、状态确认检查、风洞重新开车到试验状态条件的时间。如果模型采用遥控电动升降舵,同样的模型变化只需要0.25分钟。

8) 试验模拟工具。大型风洞中有些试验用到的测试设备安装准备过程复杂,利用试验模拟工具,如虚拟现实工具能够在安装前就合理选择好在风洞中的正确安装位置,提高试验准备的效率。

4 结束语

进入21世纪,型号研制的风洞试验市场竞争日益激烈,大型生产型风洞的运营向企业化模式发展,风洞试验的质量、成本和效益直接关系到未来型号的性能和市场竞争能力,因此风洞试验过程需要总结经验并加以规范,科学管理。美国AIAA协会制定风洞试验管理标准,目的就是要以标准的形式规范风洞试验过程,提高美国整个风洞试验行业的质量和效益。在我国大力推进科学发展观的今天,科学管理就是生产力、就是效益的观点已成普遍共识。AIAA制定的风洞试验管理标准,对我国航空航天领域风洞试验从业单位与世界一流水平接轨,具有重要的借鉴和参考作用。 **‘AST**

参考文献

- [1] Wind Tunnel Testing-Part 1: Management Volume[S].AIAA R-092-1-2003.
- [2] Christensen P F. Methods for increasing wind tunnel testing effectiveness[R]. AIAA2008-1655.
- [3] Deloach R. Productivity and quality enhancements in a configuration aerodynamics test using the modern design of experiments[R].AIAA 2004-1145.
- [4] Ulrich A. Remotely controlled movable surface motorization of an industrial used wind tunnel model[R]. AIAA2010-4338.
- [5] Tyler C.Evaluation of rapid prototyping technologies for use in wind tunnel model fabrication[R].AIAA2005-1301.