

风洞试验数据技术风险管理研究

战培国*

中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000

摘 要: 风洞试验数据已广泛应用于航空航天飞行器、车辆、建筑、风力机等产品中。本文从风洞试验的技术层面出发, 分析风洞试验数据生产过程中技术风险产生的根源, 研究风洞试验数据不确定度的评定方法, 提出了风洞试验数据技术风险的管控途径。

关键词: 风洞试验; 试验数据; 技术风险管理; 误差; 不确定度

中图分类号: V217 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 05-0089-05

随着科学技术的发展, 风洞试验已广泛应用于航空航天、交通运输、建筑、能源、环境等领域。目前, 大型工业风洞的运营已呈现出工业企业化的管理生产模式, 如: 美国NASA兰利研究中心成立了风洞企业集团(WTE), 欧洲建立了DNW风洞联合体和ETW风洞股份公司, 并采用工业化的质量体系认证。在风洞试验领域, 国内外普遍的理念是将大型工业风洞视为“工厂”, 其“产品”就是风洞试验数据^[1,2]。这些大型工业风洞试验数据被型号部门应用于相关领域工业产品的设计研制、评估和CFD验证, 如航空航天飞行器、车辆、风力机、高层建筑、桥梁等, 由此可见, 风洞试验数据的质量直接关系到下游产品的性能。大型风洞生产型试验质量要求高、准备过程长、费用高, 风洞试验数据生产过程涉及的技术环节多, 试验数据的生命周期长, 型号单位(风洞试验数据的用户)采用不同期或不同风洞试验数据对比等。随着风洞试验运营的商业化, 如何从风洞试验的技术层面管理试验数据品质, 控制风洞试验数据质量可能造成的经济风险和信誉风险, 以成为不可回避的现实问题。

本文对大型风洞生产型试验的技术风险进行了分析, 从试验数据不确定度入手, 提出技术风险管理方法, 为国内风洞试验的科学发展提供参考。

1 技术风险分析

大型风洞生产型试验是科技人员为获取试验模型的空

气动力特性数据而进行的科研生产试验活动, 它以获取满足型号单位需要的风洞试验数据为直接目的。通常一项风洞试验任务主要包括以下五个阶段:

- (1) 按试验任务书(合同)进行试验计划。
- (2) 风洞试验模型的设计和加工。
- (3) 风洞试验前的组织和准备。
- (4) 风洞试验实施。
- (5) 试验完成后收尾工作。

在风洞试验数据生产过程中, 从管理层面看, 人为差错产生的风险可以通过强化风洞试验技术人员的能力和责任心、提高风洞试验的科学管理、规范风洞试验流程、加强各试验岗位准备就绪情况检查、数据分析坏值或异常值剔除等措施得以避免。美国AIAA地面试验技术委员会(GTTC)及其下属的标准执行委员会(SEC)分别于2002年7月和2003年9月, 批准颁布了“风洞试验——第1部分: 管理卷”标准^[3]和“风洞试验——第2部分: 从业者卷”标准^[4], 通过制订风洞试验管理标准和从业者标准, 指导行业科学管理风洞试验活动, 并为直接从事风洞试验的工程技术人员提供详细的方法, 指导工程技术人员科学从事风洞试验活动, 达到提高试验质量、降低风险的目的。

从技术层面上看, 风洞试验数据的生产过程是一个复杂的系统工程, 其包含的技术因素多, 试验数据的误差是客观存在的。误差来源主要包括五个方面:

收稿日期: 2014-03-10; 录用日期: 2014-04-25

*通讯作者. Tel.: 0816-2463166 E-mail: zpg63@163.com

引用格式: ZHAN Peiguo. Research on the technique risk management of wind tunnel test data[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(05): 89-93. 战培国. 风洞试验数据技术风险管理研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(05): 89-93.

(1) 风洞试验技术。风洞试验技术与实验设计密切相关,目前国内外普遍采用的风洞试验方法是OFAT(One Factor at a Time)方法,即一次一个参数变化的方法,也称为“传统设计的方法”。此外,在20世纪末,美国NASA兰利研究中心开始倡导用MDOE(Modern Design of Experiments)方法来替代OFAT方法^[5,6],即现代实验设计方法。这里探讨的技术风险是针对传统设计方法而言的。风洞试验技术是试验数据产生误差的一个主要来源,它包括:模型的设计和安装,模型部件的结构设计直接关系到试验中模型状态变换的精确度;测量天平或传感器的选择,天平量程与模型估算气动载荷的匹配程度对试验结果有重要影响;边界层模拟技术,为了保证风洞试验中模型表面边界层状态与实际相符,有时需要采用人工转捩技术;数据修正技术,如风洞流场的气流偏角修正、洞壁干扰修正、支架干扰修正等。

(2) 模型保真度。模型是气动数据的来源,也是产生误差的一个重要方面,模型的外形尺寸、公差和表面光洁度对试验数据非常关键,特别是模型可变换姿态部件拆装的定位精确度对试验数据将产生直接影响。

(3) 试验流场品质。风洞试验流场品质对风洞试验数据的精确度非常重要,例如 M_a 、 R_e 、压力、温度等参数的稳定性和均匀性,流场校准的质量等。

(4) 测试仪器和数据采集处理。风洞试验的特殊性在于许多仪器仪表的校准、标定没有国家标准,测力天平、校准方法、校准设备和数据处理方法的不同都会对试验结果产生影响。

(5) 数学模型。在试验数据的生成过程中,很多计算、修正或对校准方程的描述等都要用到数学模型,数学模型的准确性对试验数据结果有着重要影响。

误差是风洞试验数据技术风险的根源,技术风险分析本质上是试验数据的误差分析或不确定度分析,风洞试验数据的不确定度越大,意味着数据品质越差,风洞试验单位的经济风险和信誉风险越大,型号单位应用数据的风险越高。

2 不确定度评定

如上所述,风洞试验数据技术风险的根源在于试验测量的误差,技术风险管理的核心在于科学评定风洞试验数据的不确定度。

2.1 误差与不确定度

长期以来,对测量结果的质量评定,各行各业都采用“测量误差”的概念,直到1993年,国际标准化组织起草制订了《测量不确定度表示指南》(GUM)，“测量不确定度”概念

才被国际各有关组织接受并推广应用^[7,8]。

误差表示测量结果与真值的偏离。通常,误差被分为系统误差和随机误差,而系统误差和随机误差又与无限多次测量(不可能做到)的平均值有关,因此,严格意义上说,误差是一个理想化的概念,在实际应用中很难准确定量评定,只能是估计值,误差的评定方法和表达形式也是多样的。

“不确定度”表示测量结果正确性的可疑程度,是由于误差的存在所造成测量结果不能肯定的程度,是对被测量量真值所处范围的评定。“不确定度”能够合理地表征某一置信水准下被测量量的结果分散性。例如95%置信水准下的不确定度(U)意味着100次测量中有95次,被测量量的真值应该在实验测量值 $x \pm U$ 的区间范围内。

我国尚无针对风洞试验的不确定度评定国家标准,但在1999年,美国AIAA地面试验技术委员会和标准执行技术委员会颁布了《应用于风洞试验的实验不确定度评定》标准^[9],为规范风洞试验领域试验数据的不确定度评定方法,科学评定风洞试验数据质量和控制风洞试验数据的技术风险提供了重要依据。

2.2 不确定度评定标准

20世纪80年代,北大西洋公约组织(NATO)的航空航天研究与发展咨询组(AGARD)组织成员国开展了风洞试验数据品质的评定方法研究并出版了相关报告AGARD-AR-304^[10],美国AIAA协会《应用于风洞试验的实验不确定度评定》标准继承了AGARD有关风洞试验测量不确定度评定方法和研究的工作成果,并结合国际标准化组织(ISO)有关测量不确定度的定义和评定标准,考虑了风洞试验领域长期实践的具体情况制订的。该标准是美国和欧洲主要国家风洞试验机构长期实践经验的总结和不确定度评定方法的进一步规范,代表了当今世界一流风洞试验机构的做法。标准的主要特点为:

(1) 采用“偏差极限”和“精度极限”概念来评定不确定度,而不是简单地沿用国际标准化组织关于测量不确定度更为通用的“A类不确定度”和“B类不确定度”概念^[11]。这样处理使风洞试验技术人员更容易理解,保持了系统误差源与随机误差源的区分,而不管这些误差是根据统计方法(A类)还是其他方法(B类)得到。

(2) 定量给出了风洞试验误差源的重要程度。由于风洞试验过程存在大量的误差源,各种误差源对风洞试验结果影响程度不同,因此,确定风洞试验的误差源,分析这些误差源对试验结果的重要性是正确评定试验数据不确定度的关键。该标准中定量给出了约百种误差源的重要性评定。

(3) 简化分析,关注重要误差源,在一个过程中,不需要确定出其中每个影响因素的不确定度,而只需要根据初始端的不确定度主要影响因素确定出终端结果的不确定度。

(4) 给出了不确定度评定方法,介绍了常规测力和测压试验的不确定度评定样例,指出了该不确定度评定方法适用于风洞试验领域其他方面,如天平校准不确定度的评定。

3 技术风险管理

风洞试验数据的不确定度是客观存在的,因此,风洞试验数据的技术风险也是不可避免的,这就需要风洞试验任务承担单位和型号单位相互沟通,建立互信,正确认知,科学防范,将技术风险控制在可接受的范围内。

(1) 建立风洞试验单位和型号单位共同认可的风洞试验数据不确定度评定方法。长期以来,风洞试验都缺乏完善的、成体系的标准或行业规范,如风洞天平是测力试验的重

要测量设备,但国内没有天平校准的国家标准。同样,我国也没有风洞试验数据不确定度评定的统一方法或行为准则,对风洞试验数据质量的认定没有标准,只有习惯的做法,而这些做法可能是不严谨的、不科学的或不统一的,例如审视试验结果质量时用几次重复性试验结果的方差,或用天平校准方差的3倍值来估计,而不做重复性试验,以节约试验成本;用不同时期、同一状态条件下两次风洞试验结果逐点对比来分析等。因此,迫切需要一套有共识的不确定度评定方法。

(2) 将风洞试验数据的不确定度评定贯彻到整个试验过程。通常,在风洞试验数据产生后,通过一些习惯做法或经验来检查数据质量,由于试验数据已经产生,如果数据存在问题,就会导致风险发生。因此,为了控制风险,需改变风洞试验流程,将不确定度评定融入其中。图1给出了美国AIAA协会风洞试验不确定度评定标准中考虑了不确定度评定的风洞试验流程。由图可见,在风洞试验正式开始前就考虑了

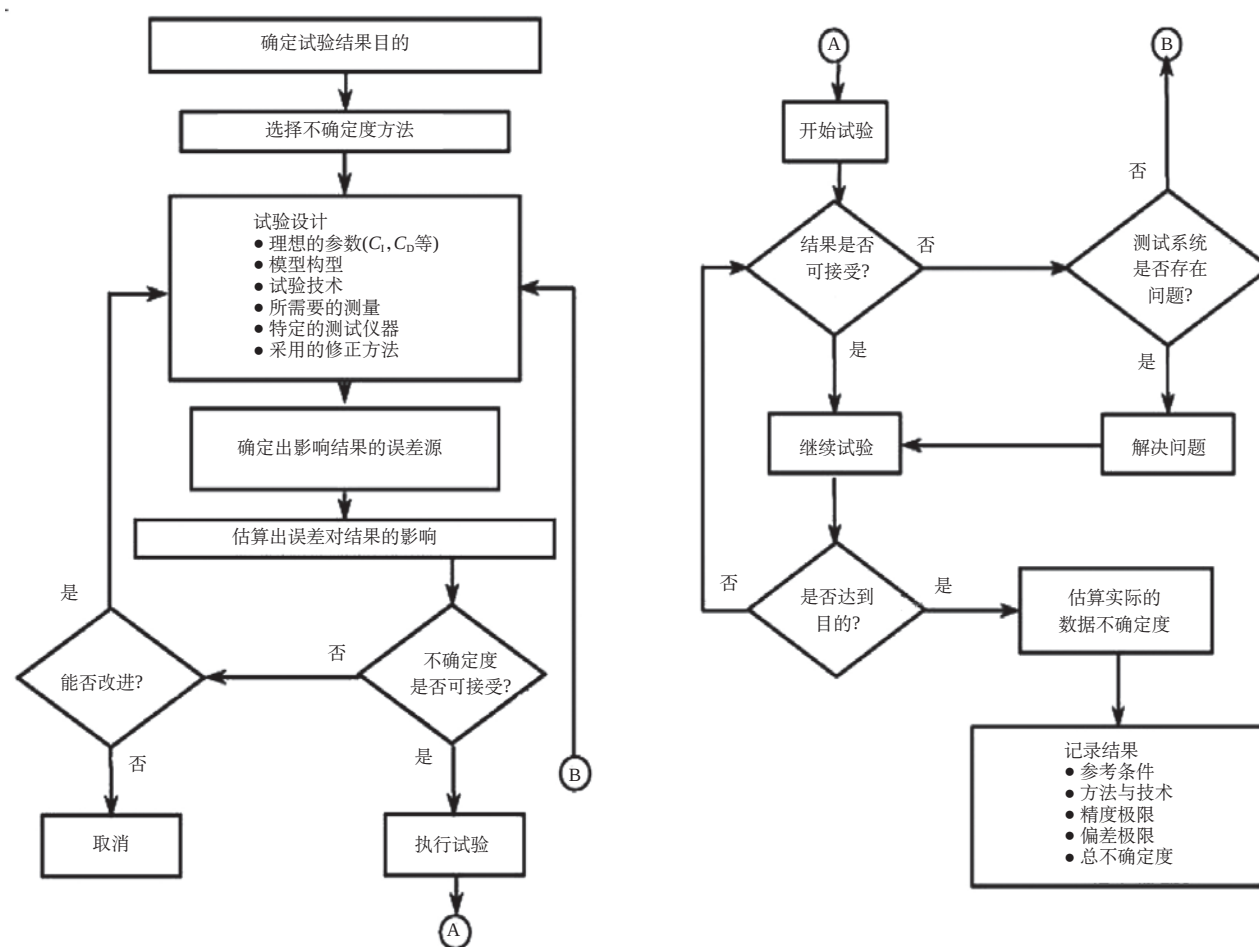


图1 含有试验不确定度评定的风洞试验流程

Fig.1 Wind tunnel testing process including uncertainty assessment

风洞试验数据不确定度的评定。将不确定度评定融入试验过程中才能确保试验数据的质量,控制试验数据不合格造成的风险。

(3) 给出风洞试验数据的不确定度报告。风洞试验数据的不确定度和技术风险是客观存在的,风洞试验单位需向委托试验的型号单位客观、科学地告知风洞试验数据的不确定度。然而,由于没有统一的评定方法和标准,长期以来,风洞试验单位在试验任务完成后,只提交风洞试验报告,没有详细的风洞试验数据不确定度评定分析报告。有时风洞试验单位之间出于商业竞争的需要或由于采用的试验数据质量评定方法不统一等原因,可能导致高估试验数据质量的问题,长远来看,这无论是对风洞试验单位还是应用风洞试验数据的型号单位都是一种风险。1999年,AIAA颁布的风洞试验不确定度评定标准中规范了试验数据不确定度评定报告的报告内容。

(4) 采用与世界一流风洞试验机构接轨的AIAA风洞试验行业标准。1871年,英国人温霍姆(F.H.Wenham)建造了世界上第一座风洞。20世纪50年代前后,亚声速、跨声速、超声速、高超声速各类型风洞在世界工业发达国家得到快速发展。80年代末,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,风洞向专业细分方向发展,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。如今,风洞试验活动与国民经济建设日益密切。从国际看,20世纪80年代以前,风洞试验标准相对较少,各机构都是按照各自的习惯或经验从事风洞试验。自90年代以来,为了适应发展的需要,美国AIAA协会相继组织编写和颁布了一些风洞试验标准,例如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、风洞试验从业者标准等。这些标准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法则^[12]。从国内看,我国尚未建立完善的空气动力试验标准体系,还缺乏相关的标准。从标准制订和采用的习惯做法看,可以直接采纳AIAA的这些标准,以于提高风洞试验数据质量的说服力,最终降低风洞试验数据技术风险。

4 结论

进入21世纪,生产型风洞试验市场竞争日益激烈,大型风洞的运营向企业化模式发展,风洞试验数据的技术风险管理关系到试验数据的质量,影响型号部门终端产品的性能,也影响风洞试验单位自身的信誉和竞争力。

(1) 风洞试验数据的不确定度分析是技术风险控制和管理工具。不确定度分析应包括试验准备阶段和试验完成后阶段两部分,前者为选定满足试验要求的设备、测试仪器和方法做必要的预估,后者评定试验结果的实际不确定度。

(2) 根据国家有关测量不确定度评定标准,制定国内风洞试验行业的不确定度评定标准。国内风洞试验行业经过几十年的发展,已经积累了大量的实践经验和通用习惯做法,为了促进行业发展和数据使用交流,应尽快制定针对风洞试验行业的不确定度评定国家或行业标准。

(3) 风洞试验活动越来越国际化,为了方便国际交流和与世界主流做法接轨,可学习和借鉴AIAA制定的相关行业标准,从而达到有效管理风洞试验数据技术风险的目的。

AST

参考文献

- [1] R.Deloach. Applications of modern experiment design to wind tunnel testing at NASA Langley Research Center[R]. AIAA 98-0713, America: AIAA, 1998.
- [2] R.Deloach. Productivity and quality enhancements in a configuration aerodynamics test using the modern design of experiments[R]. AIAA 2004-1145, America: AIAA, 2004.
- [3] Wind Tunnel Testing – Part 1: Management Volume[R].AIAA R-092-1-2003, America: AIAA, 2003.
- [4] Wind Tunnel Testing – Part 2: Practitioners Volume[R].AIAA R-092-2-2003, America: AIAA, 2003.
- [5] R. Deloach. The modern design of experiments: a technical and marketing framework[R]. AIAA 2000-2691, America: AIAA, 2000.
- [6] R. Deloach. Comparison of resource requirements for a wind tunnel test designed with conventional vs. modern design of experiments methods[R]. AIAA 2011-1260, America: AIAA, 2011.
- [7] 李金海. 误差理论与不确定度评定[M].北京:中国计量出版社, 2003.
LI Jinhai. Error theory and uncertainty assessment [M]. Beijing: China Metrology press, 2003.(in Chinese)
- [8] 李慎安, 施昌彦, 刘风. 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 1999.
LI Shenan, SHI Changyan, LIU Feng. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S]. Beijing: National Supervise Bureau of quality and technology, 1999.(in Chinese)

[9] Assessment of experimental uncertainty with application to wind tunnel testing[R]. AIAA S-071A-1999, America: AIAA,1999.

[10] Quality assessment for wind tunnel testing [R].AGARD-AR-304 , France: AGARD, 1994.

[11] Hugh W.C. Experimental uncertainty survey and assessment[R]. NASA-CR-184297, America: NASA,1992.

[12] M.J.Hensch. Development and status of data quality assurance program at NASA Langley Research Center—Toward national standards[R]. AIAA 96-2214, America: AIAA, 1996.

作者简介

战培国(1963—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:空气动力学。

Tel:0816-2463166

E-mail:zpg63@163.com

Research on the Technique Risk Management of Wind Tunnel Test Data

ZHAN Peiguo*
Calculating Aerodynamic Research Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

Abstract: Wind tunnel test data has been widely applied in many national economic areas, such as aeronautical vehicles, cars, architectures, wind turbines etc. From the view of the technique point, this paper analyzed the reasons and process of technique risk during the wind tunnel data production, studied the assessment methods of the wind tunnel data uncertainty, presented the technique risk management and control methods for wind tunnel testing.

Key Words: wind tunnel test; test data; technique risk management; error; uncertainty