

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.11

基于 CFD 技术的气流温度传感器数值 校准虚拟风洞初探

王玉芳, 赵俭

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 在气流温度传感器风洞校准试验中, 由于试验成本高、校准试验环境与实际使用环境差距大等原因, 有必要构建气流温度传感器数值校准虚拟风洞, 实现极限非常规校准工况的气流温度传感器误差修正及虚拟校准, 并通过气流温度传感器的虚拟校准数值风洞获取仿真结果, 尽可能地减少实物校准的工况数量, 同时也从理论层面为气流温度传感器的设计与校准提供补充。本文介绍了气流温度校准技术国内外发展现状, 分析了气流温度传感器数值校准虚拟风洞实现思路及方法, 探讨了如何利用 CFD 技术在计算机平台上建立虚拟仿真风洞以模拟真实的校准环境, 为建立国产化气流温度传感器数值校准虚拟风洞提供技术参考。

关键词: CFD 技术; 气流温度传感器; 风洞校准试验; 数值校准虚拟风洞

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0091-04

Preliminary Study on Numerical Calibration of Virtual Wind Tunnel of Airflow Temperature Sensor Based on CFD Technology

WANG Yufang, ZHAO Jian

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In the wind tunnel calibration test of air temperature sensor, due to the high test cost and the gap between the calibration test environment and the actual use environment, it is necessary to build the virtual wind tunnel for the numerical calibration of the air temperature sensor, and realize the error correction and virtual calibration of the air temperature sensor under the extremely abnormal calibration condition. The virtual calibration of the numerical wind tunnel of the air temperature sensor is obtained. The simulation results can reduce the working conditions of the real calibration as much as possible, and provide a supplement for the design and calibration of the air temperature sensor from the theoretical level. The development of air temperature calibration at home and abroad is introduced. The realization idea and method of virtual wind tunnel for the numerical calibration of air temperature sensor are analyzed. How to establish virtual simulation wind tunnel on computer platform by Computational Fluid Dynamics (CFD) technology is discussed to simulate the real calibration environment, which provides technical reference for the establishment of the virtual wind tunnel for the numerical calibration of domestic air temperature sensor.

Key words: CFD technology; airflow temperature sensor; wind tunnel calibration test; numerical calibration of virtual wind tunnel

0 引言

气流温度是武器装备研制、生产、试验中需要准确测量的重要参数, 为武器装备的性能评价、状态监控等提供数据支撑, 对武器装备的技术指标验证和可靠性评价起到至关重要的作用。涡轮入口温度 T_3^* 的不断提高是航空发动机研制技术向前推进的重要标志。美国高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)中提出实现 T_3^* 达到 2273 ~ 2473 K 的目标。据计算, 涡轮入口温度测量误差达到 8 K, 引入的效率计算误差将可达到 1%, 因此随着涡轮入口温度的逐步提高, 对气流温度

测量校准的要求也越来越高^[1]。

航空发动机内流温度的计量需要充分考虑气流速度和压力所带来的影响。由于目前主要使用冷却式测温靶进行航空发动机高温气流测量, 气流的速度、压力和环境温度等参数对测量结果影响非常大, 如果不能在相应条件下对温度传感器进行校准, 将带来几十甚至上百摄氏度的测量误差^[2]。

随着航空发动机技术的发展, 气流温度传感器的需求量不断增大, 且要求其测温范围更大、测量精度更高, 并能够在苛刻条件下工作。由于目前气流温度传感器校准风洞试验成本高且无法模拟极端工况, 有

必要构建温度传感器与热校准风洞相结合的虚拟校准数值风洞。随着计算机软硬件技术的迅速发展以及计算流体力学的日益成熟,在计算机上建立气流温度传感器数值校准虚拟风洞已成为可能。从理论层面模拟现有气流温度传感器风洞校准所达不到的工况,为后续扩展风洞工况范围极限提供技术参考具有重要意义,且能够节约大量试验经费。

1 气流温度校准国内外现状

目前,航空工业计量所拥有国内最完备的气流温度校准风洞群,该套校准风洞群从1976年开始建立,气流温度范围为室温至1973 K,气流速度覆盖亚声速范围。同时,航空工业计量所对气流温度传感器的校准技术及其稳态与动态性能进行了大量研究,负责起草了JJF 1049-1995《温度传感器动态响应校准》等计量技术规范。但是由于工况众多,传感器结构形式也多种多样,目前还无法编制出完备的传感器性能手册。此外,目前所建立的校准风洞均为常压风洞,校准数据对压力的修正缺乏可靠的试验验证,得到的校准结果与实际情况有所差异。同时,随着航空发动机技术的发展,需要用于试验的气流温度不断提高,现有热校准风洞的温度上限无法完全满足高温气流温度传感器的校准需求。随着我国武器装备自主化研制的推进,气流温度传感器的校准工作量呈几何级增长,目前的校准风洞存在数量少、校准费用高、自动化程度低等问题^[3]。

受试验条件所限,我国尚无法对气流温度探针在复杂使用环境下进行校准试验,导致气流温度测量结果存在一定误差。由于热风洞技术能力不足,气流温度传感器的校准技术研究受到限制,且在实际的气流温度校准过程中,存在试验过程复杂、试验费用较高、试验数据提取受限等问题。

近年来,NASA在气流温度传感器校准技术研究中逐步引入了数值模拟手段,采用数值虚拟风洞技术,在实流校准的基础上将压力、速度、温度等因素外推修正,扩展了气流温度传感器校准技术的应用范围。俄罗斯也对气流温度传感器校准技术进行过详细的研究,并将相关的传感器性能曲线进一步总结为经验公式,以便传感器的设计或使用人员查看。英国的P. Smout和S. Cook等人基于剑桥大学惠特尔实验室的变压力风洞,在变压力条件下对气流温度传感器的校准技术进行了研究,并将校准结果与所建立的理论模型进行了对比。Robert Rhodes

研究团队采用有限元数值分析的方法建立了高温气流温度传感器的误差修正模型,并根据NACA的George Glawe等人的早期试验数据对误差修正模型进行了验证。

美国、俄罗斯等国都建立有比较完备的系列风洞校准或试验设备,可以利用风洞实现实际的发动机内流工况,并在此基础上进行大量试验工作,与数值模拟技术充分结合,形成了可靠的研究基础。由此可见,国际上已广泛利用数值模拟手段对气流温度校准技术进行补充和修正。

2 气流温度传感器数值校准虚拟风洞实现思路

气流温度传感器数值校准虚拟风洞实现的基本思路是:通过数字化虚拟仿真手段,结合计算流体力学仿真技术和有限元技术,构建气流温度传感器在典型校准工况下的不同测试场景,最终实现对气流温度传感器的性能评估及校准工作。

首先,通过参数化建模技术对典型的校准风洞及气流温度传感器进行几何建模,结合几何装配技术,构建气流温度校准数字化场景几何模型;之后通过自动网格划分技术对流体域及固体域进行离散;再通过数值仿真技术对校准场景中的流动、传热等进行系统分析,得到校准场景中典型参数(气流速度、压力、温度等)的分布规律;通过对仿真结果的后置处理,重构场景的模型并显示所关注参数的空间分布图、报表等,进而实现气流温度传感器校准场景的全数字化展示。平台后台采用数据库技术,可以储存典型的校准风洞模型、气流温度传感器模型库、分析结果数据库、试验数据库等,便于进行设计经验的复用及校准场景的再现。气流温度传感器数值校准虚拟风洞实现的基本思路如图1所示。

3 实现方法及途经

数值校准虚拟风洞是CFD数值模拟技术和高性能计算机软硬件技术紧密结合的产物,包括硬件系统和软件系统两大部分:硬件系统是软件系统的运行平台和物质基础,主要包括高性能计算机、高性能可视化服务器、海量存储设备和外围输入输出设备,以及连接各设备的网络等;软件系统包括前置处理系统、流场求解器、CFD数据可视化系统、网络数据库系统。

数值校准虚拟风洞虚拟平台的实现途径为:针对典型校准风洞及气流温度传感器的几何结构特点,采用参数化模块建模方案,预先定制一系列基础模型数

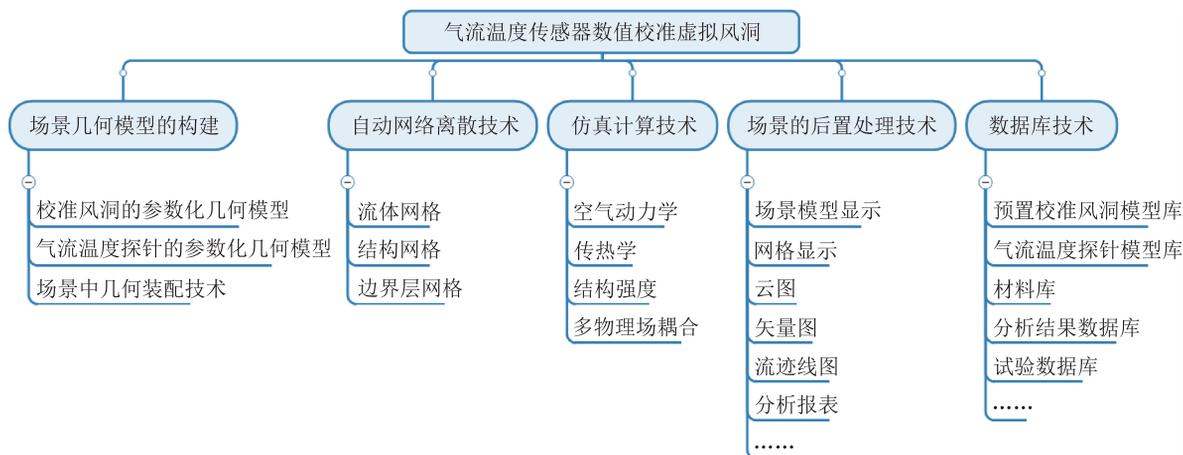


图1 气流温度传感器数值校准虚拟风洞实现的基本思路

据(例如:传感器型号模型库、典型风洞试验段模型库等),通过对基础结构模型的搭配组合形成完整的数值校准虚拟风洞几何模型。通过对数值校准虚拟风洞几何模型进行计算网格的自动划分及CFD求解,得到数值校准虚拟风洞内部的流场及温度场分布数据,根据用户需求对分析数据进行提取并与实验结果进行相应的对比处理等,最终形成对气流温度传感器性能的整体评价。根据上述分析流程,采用先进的计算机软件开发技术进行封装及定制,采用Java语言开发数值校准虚拟风洞仿真软件平台的前端用户界面、数据库及后置处理部分,并结合UG,FLUENT等商业软件的二次开发定制技术,最终形成数值校准虚拟风洞虚拟平台。

上述对校准风洞及气流温度传感器参数化的分析流程包含几何模型参数化、网格划分的参数化、计算模型参数化等,各个阶段既有联系又相对独立。根据前述各关键技术的实现路线及方法,深入研究相关软件的二次开发技术,采用编程的方式创建各处理进程所需的批处理命令流,同时构建自动化驱动程序、相关的接口程序,以实现计算流程的完全自动化。

将上述得到的自动化计算流程封装到相应的功能模块,然后开发图形化的用户输入及控制界面,如图2所示。设计并开发针对计算结果及相关模型的处理程序,用于转化数据格式、提取数据、以图表形式显示计算结果,以便进行对比分析。

采用上述气流温度传感器数值校准虚拟风洞,基于计算流体力学原理和数值化仿真手段,选择合适的湍流模型,结合一定的数值算法和图形显示技术,将气流温度传感器在校准风洞中的吹风结果形象直观地

显示出来,建立数值校准虚拟风洞平台。相较传统的实验方法,数值校准虚拟风洞平台具有价格低廉、数据信息丰富、可方便地模拟各种不同工况等优点。基于数值校准虚拟风洞平台,可以实现以下功能:①在气流温度传感器校准试验前可利用数值校准虚拟风洞平台进行数值计算,在一定程度上指导试验;②可通过数值校准替代部分试验,节约经费;③可利用数值校准虚拟风洞平台对试验时达不到的工况进行数值计算,达到补充试验的目的。

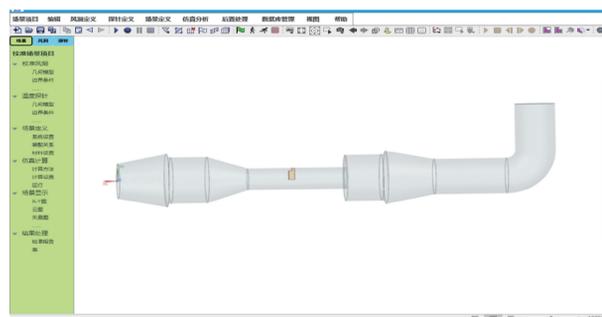


图2 气流温度传感器数值校准虚拟风洞软件界面

4 气流温度传感器数值校准仿真方案

气流温度传感器数值校准主要具有以下特点:①气流温度传感器的尺寸形式多样化,与风洞流场相比,尺寸差异也较大;②气流温度传感器内部流动包含较大畸变,感温探球附近的速度几乎滞止为零;③若考虑时间常数的校准,在仿真计算中需要进行非定常计算;④仿真计算中涉及到流固耦合、传热、流动等多种形式的计算。气流温度传感器数值校准的这些特点给数值模拟提出了巨大的技术挑战。

目前,对于非定常可压缩流动问题,广泛采用的

方法是在 N-S 方程的基础上添加非定常源项进行求解,但由于气流温度传感器数值校准仿真是一个复杂的流动过程,针对此类问题一般采用流体网格法进行求解(fluid-in-cell method),流体网格法属于欧拉差分法中的一种,欧美简称它为 FLIC 法,苏联称它为大粒子法。流体网格法是在质点网格法(PIC)的基础上将单一网格元作为一个大粒子而发展起来的,它和 PIC 法的不同之处在于在第二步的计算中不计算质点的位移,而是计算连续流体的迁移,即先计算得出通过网格边界的质量输运量,从而得到每个网格的新密度,再计算得出通过网格的质量所携带的动量和能量的输运量,最后计算得到每个网格的新速度和能量。该方法的突出特点是对于复杂的流动问题,消耗比较适中的计算时间就可以得到相当准确的解,特别适用于包含大流动畸变的单种物质的流动问题。

根据文献资料^[4-10],大型的管路及管网系统的模拟通常采用流体网格法,而对精细的流场模拟通常采用三维高精度的 CFD 方法。由于气流温度传感器数值校准涉及复杂的流路及局部精确的流场、温度场,如果全部采用三维非稳态数值模拟技术,计算规模庞大,实施难度较大。因此采用流体网格计算技术与三维 CFD 数值模拟技术结合的方式,即:大部分计算域采用流体网格方法,将各个典型部件使用元件表示,将各个部件连接的部分使用节点表示;对于需要进行精细化仿真的局部结构采用三维 CFD 技术模拟,综合计算得到流量、压力和温度等典型参数。

5 结论

对气流温度传感器进行校准,既是获取其稳态与动态性能的必要手段,也是对传感器测量结果进行修正的必要依据。随着我国自主化研制技术的推进,对气流温度的测试校准提出了更高要求,为解决目前气流传感器校准中存在的费用高、可视化程度低、极端工况无法校准等问题,满足自主研制气流温度传感器试验的测试计量需求,支撑“中国制造”,搭建数值校准虚拟风洞虚拟平台具有重要的战略意义。

实现气流温度传感器数值校准虚拟风洞需要同时研究参数化建模技术、多物理场耦合技术、网格自动生成技术、数值仿真技术、数据库技术等,并须结合气流温度校准专业实际需求,专业跨度广,技术难度大,有待进一步探索。

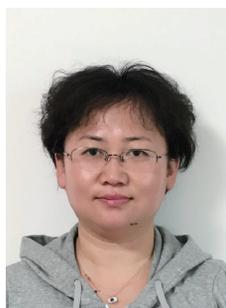
参 考 文 献

- [1] 赵俭. 高温气流温度测量与校准技术[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 42-47.
- [2] 乔渭阳. 高温气流温度的测量[J]. 工业仪表与自动化装置, 1989(1): 7-10.
- [3] 杨永军. 温度测量技术现状和发展概述[J]. 计测技术, 2009, 29(4): 67-70.
- [4] Song X G, Park J H, Kim S G, et al. Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method [J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2011, 57(2): 245-253.
- [5] Yimera I, Beckerb H A, Grandmaisonb E W. The strong-jet/weak-jet problem: new experiments and CFD[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 124(3): 481-502.
- [6] bdulaziz A M. Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2014, 53: 40-48.
- [7] Kumar P, Bing M. A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2010, 22(1): 33-42.
- [8] Cruz Maya J A, F Sánchez Silva, Quinto Diez P. A new correlation to determine the discharge coefficient of a critical Venturi nozzle with turbulent boundary layer[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, 17(5): 258-266.
- [9] Ghassemi H, Fasih H F. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22(5): 406-412.
- [10] Singh R K, Singh S N, Seshadri V. Study on the effect of vertex angle and upstream swirl on the performance characteristics of cone flowmeter using CFD[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2008, 20(2): 69-74.

收稿日期: 2020-12-19; 修回日期: 2021-03-29

基金项目: 工信部两机技术基础科研项目(J2019-VIII-0006-0617)

作者简介



王玉芳(1976-),女,高级工程师,博士,主要研究方向为航空发动机测试计量、动态温度及流速计量测试、计算流体力学。2005年毕业于北京理工大学机电工程学院,同年于航空工业计量所工作至今。主持参与了航空基金、技术基础等多项科研项目,先后发表学术论文20余篇,编译撰写国外航空发动机测试及校准译文集系列、民用航空发动机参数溯源链手册等专业书籍。