

·“双清论坛”专题:大型风洞设计建设中的关键科学问题·

大型风洞设计建设中的结构力学问题

郭旭* 赵岩 王跃方

(大连理工大学工程力学系 工业装备结构分析国家重点实验室,大连 116023)

[摘要] 在我国大飞机、高速飞行器等研制需求背景下,急需设计建造大型低温高雷诺数连续式跨声速风洞。风洞结构形式复杂,运行工况多变,所涉及的与结构力学相关的科学问题十分突出。本文在国家自然科学基金委员会第185期“双清论坛”研讨成果的基础上,阐述了与大型风洞结构相关的多物理场耦合作用、气动弹性实验模型结构设计、流固耦合诱发结构振动、结构优化设计方法和特种装备动力学方面的进展和成就,凝练了风洞设计建设中的结构力学关键科学问题。

[关键词] 风洞;多物理场;结构优化;结构振动

自1871年英国建造了世界上第一座风洞起,其就成为改善飞行器安全、性能和效率的基本工具。在欧美等发达国家,低速($Ma < 0.4$)、跨声速($0.4 \leq Ma < 1.4$)、超声速($1.4 \leq Ma < 5$)、高超声速($Ma \geq 5$)各类型风洞得到了快速建设和发展。近年来,新一代高机动作战飞机、超大展弦比飞行器、主动气动弹性、智能变体等技术的进步,对气动弹性风洞实验提出了更高的要求^[1-3]。特别地,在我国大飞机研制需求的背景下,为解决现有跨声速风洞雷诺数模拟能力严重不足的问题,急需设计建造大型低温高雷诺数连续式跨声速风洞^[4-8]。由于大型风洞结构形式复杂,运行工况多变,风洞建设不仅技术难度大,所涉及的与结构力学相关的科学问题也十分突出,本文将从几个方面进行论述。

1 大型风洞流、固、热、力多物理场耦合作用

低温技术和风洞技术融合是大型低温高雷诺数连续式跨声速风洞的核心^[6,9-12],风洞大尺寸构件面临着时变热、机械力、振动等复杂载荷环境,为优化风洞设计参数和提高系统可靠性,需要发展有效的结构多物理场耦合作用下动力学建模技术和响应分析方法^[13-15]。此外,在流固热耦合不均匀条件下,洞体结构局部易发生大温度梯度,诱发热变形,从而引起风洞回路轴线偏离、气动型面变形和内部气流表

面出现阶差等诸多问题,因此,开展低温环境风洞局部流固热耦合不均匀条件下的热动力学特性研究将十分必要^[16-17]。已有的研究表明,管内流动传热经验公式无法满足大型低温风洞超过107的雷诺数气动加热过程的分析计算,研究低温条件下高雷诺数传热,针对低温风洞结构特点,探讨几何形状、风速、温度、结构特征参数对计算准则的影响,可为低温风洞结构热应力和热变形分析提供换热边界数据^[18]。另一方面,实验模型和洞体结构材料的物性受温度影响变化较大,采用流固热耦合分析方法对低温风洞结构段流体域进行流动、换热特性耦合分析,能够实时完成热量和变形量的传递,进而获得高速气流下结构的传热过程、应力应变,模拟结构段温度场分布和应力应变分布,可为风洞结构设计和运行维护提供理论依据^[19-20]。

针对上述问题,需要着重开展如下研究:(1)建立多尺度复杂流场空间流动传热数值方法;(2)建立温变结构界面接触传热机理研究方法;(3)研究宽域温变环境下机构动力学行为演变模拟方法;(4)研究时变多场耦合条件下结构动力学模型降阶方法。

2 大型风洞气动弹性实验模型与支撑设计

飞行器缩比模型和相应支撑构成了风洞实验的

主体,其气动弹性特征相似性、飞行状态相似度对于气动弹性风洞实验的可靠性和置信度具有极其重要的影响,结合主动气动弹性、智能变体技术等,发展含有控制环节的气动弹性风洞试验,是提高气动弹性模型风洞试验水平的关键环节^[21-23]。常用的模型支撑方式包括腹撑、尾撑等,由于支撑一般具有结构细长、刚度低的特点,在非定常激励载荷作用下易产生大幅振动。特别是跨超声速风洞中的模型支撑系统(由弯刀机构、天平元件、天平支杆和试验模型四大部分组成)在流场脉动和气流分离引起的非定常气动载荷作用下,模型支撑系统振动难以避免,一方面影响试验精度,另一方面振动较大时,也危及试验安全^[24-25]。通过主动控制措施,抑制模型支撑系统的振动是国内外风洞关注的重要技术,所涉及的基础问题包括^[26-31]:定常高动态扰动下模型姿态动力学特性,高动态强不确定条件下飞控系统控制方法,智能变体飞机模型的精确控制;气动脉动载荷下支撑机构振动特性,支撑机构对飞行器复杂姿态的精确控制,支撑机构振动的主动抑制方法;模型和支撑机构的耦合动力学建模,面向精确控制的模型解耦与设计,飞行器复杂姿态的反馈跟踪与控制指令分配。

针对上述问题,需要着重开展如下研究:(1)气动脉动载荷下模型支撑耦合结构体系振动控制技术;(2)飞行器复杂位姿及结构振动智能感知及测试数据发掘技术。

3 大型风洞流固耦合诱发结构振动机理及控制

振动是大型风洞结构系统中普遍存在的现象,振动/噪声是气动载荷与风洞结构产生的流固耦合力学的响应,剧烈的非线性、宽频振动会干扰气动试验环境,影响测试结果,并导致风洞结构破坏和失效^[32-34]。在流动诱发结构振动与噪音的自适应性设计方面,随着流速、压力、温度等参数向极端情况的发展以及变工况运行,非定常流动诱发的风洞结构振动以及气动噪声是目前面临的关键问题,制约着高参数风洞的发展,采用非定常流动的 Lagrangian 拟序结构动力学描述方法,探讨流体诱发的气动弹性行为中存在的非线性能量、靶向能量/动量迁移效应,将为流动诱发结构振动及噪音的自适应性设计提供理论依据^[35-36]。对于引射器内部结构在高速气

流激励下产生的流致振动,可采用计算流体力学与计算固体力学分区耦合方法,分析气流冲击、脉动及涡激脱落现象,探讨流固耦合响应机理及控制方法^[37-38]。大流量液氮输送系统是低温风洞重要组成部分,由于低温输送管路存在低温阀、弯头及变径等部件,当低温管路两相流存在较大气泡时,在不同区域由于所受压缩不同将会产生振动。此外,管内流体流速过快,流体边界层分离而形成湍流也会诱发管道振动,探讨液氮输送系统振动机理及减缓或消除流动诱发的结构振动是低温风洞正常工作的重要保证^[39-40]。

针对上述问题,需要着重开展如下研究:(1)多场耦合作用下大型风洞结构流固耦合力学响应机制;(2)大型风洞结构的流固耦合力学理论与数值方法;(3)建立多场耦合作用下的风洞非线性结构振动及其传播路径的辨识方法;(4)建立基于多信号融合的结构振动疲劳寿命评估方法。

4 大型风洞结构优化设计理论与方法

目前风洞的强度、刚度设计多是借鉴钢制压力容器规范进行,并未形成一种较为可行的设计准则,更无法达到结构整体强度、刚度的优化配置。在大型低温风洞结构总体设计方案中,应考虑温度梯度变化、气动力载荷及地震载荷的作用,以多物理场耦合分析确定风洞整体及各部段结构的强度刚度要求、合理的支座型式与布局,以及由支座载荷确定土建设计载荷及风洞洞体加强筋的优化布局,进行静态、动态强度刚度设计与优化配置,制定出较为统一的、符合风洞结构整体和部件的强度、刚度设计准则^[41-42]。由于大型风洞结构形式复杂,并且需要考虑多物理场耦合条件下的复杂目标/约束函数,因此迫切需要发展新的优化(特别是拓扑优化)框架和高效的数值求解算法^[43-44]。

针对上述问题,需要着重开展如下研究:(1)耦合场条件下考虑强度、疲劳破坏等复杂约束的风洞结构整体优化理论与方法;(2)动载荷下考虑动强度的风洞结构布局优化理论与方法;(3)高效进行大型风洞结构轻量化/承载/隔振/降噪一体化设计的全新优化列式与数值方法。

5 大型低温风洞特种装备动力学行为及可靠性分析

大型风洞压缩机变频调速动力系统涉及“电—

磁—力—流体”耦合复杂物理场,在变频调试过程中可能引起轴系在多频点共振,需要从系统层面研究“电—磁—力—流体”中关键物理量的传递与耦合效应^[45]。此外,由于温度梯度大,压缩机转子轴向长度以及对中位置始终处于不停变化之中,复杂多变的温度场对于材料特性、转定子间隙、转子对中性的影响也不可忽视^[46]。对于超长转子系统多源激励动力学,一个显著特征就是高参数(高压比、大功率、高流量、极端温度环境)。揭示动力装置轴系复杂系统动力学行为,需要探明其对激励载荷的响应规律,以确保动力装置平稳运行^[47-48]。在轴流叶片结构可靠性方面,两个关键问题是变工况、宽频激振下的动力稳定性和高周疲劳。动力稳定性的焦点是^[49-50]:(1)气弹稳定性,即避免叶片因流—固相互作用出现过大的自激振动而发生破坏,其核心是流固耦合环境下的气动阻尼分析问题。(2)复材叶片内阻尼和榫槽—叶根配合面摩擦导致的失稳。就叶片振动响应的计算方法来说,需要考虑从时域分析转换到频域分析,关注的重点不是某一具体时刻的瞬态位移或应力,而是在较长周期的动响应指标的统计特征。采用高效率、高精度的随机振动分析方法(如虚拟激励法)可以实现上述意图。在与损伤评估理论结合后,有望为疲劳分析和寿命预测提供基础性支撑数据^[51-52]。

针对上述问题,需要着重开展如下研究:(1)弯—扭—轴向激励力共同作用下叶片—转子—支撑结构的动力学响应规律及可靠性评估;(2)流体—热—电磁—结构多场作用下转子和叶片的耦合振动规律;(3)多变工况下叶片—叶栅流致振动机理及防控;(4)超长转子系统多源激励与多变工况条件下的扭振问题。

参 考 文 献

- [1] Hank JM, Murphy JS, Mutzman RC. The X-51A scramjet engine flight demonstration program. AIAA, 2008: 2540.
- [2] Chase R, Tang M. A history of the nasp program from the formation of the joint program office to the termination of the hystp scramjet performance demonstration program. International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies, 1995: 6031.
- [3] Schmidt DK. Integrated control of hypersonic vehicles. AIAA, 1993: 2504.
- [4] 任泽斌, 廖达雄, 张国彪. 2m×2m 超声速风洞射器气动设计. 航空动力学报, 2014, 29(10):2288—2293.
- [5] 吕金磊, 盛美萍, 廖达雄, 王海锋. 基于实验的跨声速风洞试验段噪声机理研究. 空气动力学学报, 2014, 32(04): 488—492.
- [6] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 汤更生. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述. 实验流体力学, 2014, 28(02):1—6+20.
- [7] 虞择斌, 廖达雄, 刘政崇, 陈振华. 2m 超声速风洞总体结构设计. 实验流体力学, 2012, 26(02):90—96.
- [8] 廖达雄, 陈吉明, 彭强, 柳新民. 连续式跨声速风洞设计关键技术. 实验流体力学, 2011, 25(04):74—78.
- [9] 潘春晖, 李式模, 周新辉. 低温风洞的回顾与发展. 环模技术, 1996, 01:19—25.
- [10] Loving DL. Wind—tunnel—flight correlation of shock—induced separated flow. NASA TN D-3580, 1966.
- [11] Goodyer MJ, Kilgore RA. The high reynolds number cryogenic wind tunnel. AIAA J, 1973, 11(5):613—619.
- [12] Green J, Quest J. A short history of the European Transonic Wind Tunnel ETW. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(5):319—368.
- [13] Liu L, Lv BY, Li YS. Dynamic response of acoustically excited plates resting on elastic foundations in thermal environments. Composite Structures, 2016, 156: 35—46.
- [14] Tracy MB, Plentovich EB. Characterization of cavity flow fields using pressure data obtained in the Langley 0.3-meter transonic cryogenic tunnel. NASA Technical Memorandum, Technical Report, 1993: 4346.
- [15] Fehren H, Gnauert U, Wimmel R, et al. Validation testing with the active damping system in the european transonic wind tunnel. AIAA, 2001: 610.
- [16] 邓笔财, 谢秀娟, 杨少荣, 张宇, 李青. 多层绝热和支撑辐射对低温传输管线的影响分析. 低温工程, 2015, 2: 51—56.
- [17] Augusto PA, Castelo-Grande T, Augusto P, et al. Optimization of refrigerated shields using multilayer thermal insulation: Cryostats design-analytical solution. Cryogenics, 2006, 46(6):449—457.
- [18] 刘井龙, 熊联友, 候予, 王瑾, 吴刚, 陈纯正. 空气制冷机制冷系数影响因素的分析. 低温工程, 2000, 2:30—34.
- [19] 候予, 熊联友, 王瑾, 陈纯正, 汤润泉, 刘国钧, 吴其蒙, 张风华, 徐友亮. 低温透平膨胀机用全动压气体轴承的设计与试验研究. 深冷技术, 2002, 1:6—9.
- [20] 姚大平, 胡壮麒, 李依依, 师昌绪. 铝—锂合金低温力学行为. 材料科学与工程, 1990, 1:15—21.
- [21] 杨超, 许赞, 谢长川. 高超声速飞行器气动弹性力学研究综述. 航空学报, 2010, 31(1):1—11.
- [22] 杨超, 黄超, 吴志刚, 等. 气动伺服弹性研究的进展与挑战. 航空学报, 2015, 36(4):1011—1033.
- [23] Ericsson LE, Almroth BO, Bailie JA. Hypersonic aerothermoelastic characteristics of a finned missile. AIAA, 1978: 231.

- [24] 曾开春, 向锦武. 高超声速飞行器飞行动力学特性不确定分析. 航空学报, 2013, 34(4):798—808.
- [25] 向锦武, 曾开春, 聂璐. 考虑弹性影响的乘波体飞行动力学特性. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10):1306—1310.
- [26] 贾振元, 高翼飞, 任宗金, 等. 六维力压电天平研制与静态性能测试研究. 大连理工大学学报, 2014, 54(1):43—48.
- [27] 刘巍, 尚志亮, 马鑫, 等. 基于彩色编码的副油箱风洞模型位姿测量方法. 航空学报, 2015, 36(5):1556—1563.
- [28] 刘巍, 毕晓丹, 贾振元, 等. 风洞模型主动抑振器的设计与实验. 光学精密工程, 2015, 23(10):895—2901.
- [29] 刘巍, 李肖, 马鑫, 等. 采用复合式靶标的近景大视场相机标定方法. 红外与激光工程, 2016, 45(7):3—6.
- [30] McRuer D. Design and modeling issues for integrated airframe/propulsion control of Hypersonic Flight vehicles. 1991 American Control Conference, 10th, Boston, MA, Proceedings. 1991, 1: 729—734.
- [31] Schmidt DK, Mamich H, Chavez F. Dynamics and control of hypersonic vehicles-The integration challenge for the 1990's. AIAA, 1991: 5057.
- [32] 胡海岩, 王在华. 非线性时滞动力系统的研究进展. 力学进展, 1990, 29(4):501—512.
- [33] 金肖玲, 王永, 黄志龙. 多自由度非线性随机系统的响应与稳定性. 力学进展, 2013, (1):56—62.
- [34] Pourtakdoust SH, Assadian N. Investigation of thrust effect on the vibrational characteristics of flexible guided missiles. Journal of sound and vibration, 2004, 272(1): 287—299.
- [35] 雷鹏飞, 张家忠, 王琢璞, 等. 非定常瞬态流动过程中的Lagrangian拟序结构与物质输运作用. 物理学报, 2014, 63(8): 1—8.
- [36] Haller G, Yuan G. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2000, 147(3): 352—370.
- [37] 秦超晋, 汤海滨, 晔振鹏, 等. 环境压力对胶体推力器喷雾过程的影响. 空间控制技术与应用, 2009, 35(3):44—48.
- [38] 秦超晋, 汤海滨, 王海兴, 等. 胶质微推进液滴加速过程的数值模拟. 推进技术, 2009 (2):251—256.
- [39] 徐璐, 朱佳凯, 谢黄骏, 等. 三维液氮空化的大涡模拟和机理. 化工学报, 2016, 67(S2):70—77.
- [40] 张小斌, 曹潇丽, 邱利民, 等. 液氧文氏管汽蚀特性计算流体力学研究. 化工学报, 2009, 60(7):1638—1643.
- [41] 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理. 北京: 北京航空学院出版社, 1985.
- [42] 刘政崇, 廖达雄, 董谊信. 高低速风洞气动与结构设计. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [43] Guo X, Zhang WS, Zhong WL. Doing topology optimization explicitly and geometrically: a new moving morphable components based framework. Journal of Applied Mechanics, 2014, 81(8): 081009.
- [44] Zhang WS, Yang WY, Zhou JH, Li D, Guo X. Structural topology optimization through explicit boundary evolution. Journal of Applied Mechanics, 2017, 84(1): 011011.
- [45] 冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用. 宇航学报, 2010, 31(4): 950—956.
- [46] 钱煜平, 郑志国, 孙玉莹, 等. 周向布局对串列转子气动性能的影响研究. 风机技术, 2016, (2):30—36.
- [47] 李启行, 王维民, 齐鹏逸, 等. 转子轴承系统稳定性分析与识别方法. 机械工程学报, 2014, 50(7):54—59.
- [48] 谢志江, 唐一科, 李远友. 转子双面现场动平衡的不卸试重平衡法. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(9): 101—103.
- [49] 王跃方, 郭婷, 孙兴华. 考虑气流激振效应的离心式压缩机叶轮强度分析. 风机技术, 2013, (5):11—21.
- [50] 王跃方, 刘艳, 郭婷. 离心式压缩机叶轮非定常流动特性及动力响应研究进展. 风机技术, 2016, (5):81—87.
- [51] 王跃方, 王素景. 虚拟激励法在叶轮随机振动分析中的应用. 风机技术, 2014, (1):13—19.
- [52] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法. 北京: 科学出版社, 2004.

Some key structural mechanics problem in design and construction of large wind tunnels

Guo Xu Zhao Yan Wang Yuefang

(Department of engineering mechanics, Dalian University of Technology,
State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalia 116023)

Abstract Under the demand of developing large airplane and high-speed aircraft in China, it is in urgent need to design and build large-scale high Reynolds number cryogenic transonic wind tunnels. Since a wind tunnel has a very complex structure and its operating condition is changeable, the related structural mechanics problems are particularly prominent. Based on the fruit of the 185th “Shuangqing Forum” of National Natural Science Foundation of China, some recent progresses and achievements are discussed in this

paper, including multi-physics coupling effect of large-scale wind tunnel structure, structural design of aerodynamic elasticity model, vibration induced by fluid-structure interactions, design and optimization method for wind tunnel structures, and the dynamics of special wind tunnel equipment. Furthermore, some key structural mechanics problems in design and construction of large wind tunnels are also summarized.

Key words wind tunnel; multi-physics field; structural optimization; structural dynamics.

· 资料信息 ·

国家自然科学基金 2017 年度项目资助进展新闻发布会在国新办举行

2017年8月24日,国务院新闻办公室召开新闻发布会,请国家自然科学基金委员会党组书记、主任杨卫院士就2017年度国家自然科学基金(以下简称科学基金)项目申请、评审和资助等方面情况向新闻界作了介绍。新闻发布会由国务院新闻办新闻局副局长、新闻发言人袭艳春主持。

杨卫主任介绍,2017年国家自然科学基金委员会深入贯彻全国科技创新大会精神,全面培育源头创新能力,统筹实施资助计划,扎实推进基础研究发展。截至2017年8月15日,国家自然科学基金委员会共接收各类项目申请194966项,评审批准资助40860项,资助直接费用1997346.66万元,已完成全年资助计划的78.29%。

杨卫主任指出,2017年度科学基金项目评审与资助情况具有以下三个基本特点:一是聚焦基础前沿,夯实创新基础。科学基金着眼于统筹学科布局,突出重点领域,激励原始创新。二是突出人才为先,培育创新队伍。科学基金落实人才强国战略,立足于提高未来科技竞争力,着力培养凝聚创新人才。三是面向战略需求,促进交叉融合。科学基金主动对接国家科技发展重大战略,强化对供给侧结构性改革的科技支撑。杨卫主任还强调指出,国家自然科学基金委员会始终把维护评审工作的公正性放在评审工作的首位,持续完善评审制度。

发布会上,杨卫主任和高瑞平副主任一同就国家自然科学基金落实创新驱动发展战略、培育重大科研成果、加强青年人才培养、促进研究成果转化等方面的问题回答了记者提问。人民日报、新华社、中央电视台、中国国际广播电台等20多家媒体参加发布会。

(供稿:计划局 郑知敏;科学传播中心 贾雷坡)