

·“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关键科学问题<sup>\*</sup>

郭东明<sup>1</sup> 雒建斌<sup>2</sup> 方岱宁<sup>3</sup> 张幸红<sup>4</sup> 韩杰才<sup>4</sup>  
唐志共<sup>5</sup> 赖一楠<sup>6\*\*</sup> 詹世革<sup>7</sup> 陈振华<sup>5</sup> 孟庆峰<sup>8</sup>  
叶鑫<sup>6</sup> 牛斌<sup>1</sup> 陈新春<sup>2</sup> 罗俊荣<sup>3</sup>

- (1. 大连理工大学机械工程学院, 大连 116024; 2. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;  
3. 北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081; 4. 哈尔滨工业大学航天学院复合材料与  
结构研究所, 哈尔滨 150001; 5. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000;  
6. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085; 7. 国家自然科学基金委员会  
数学物理科学部, 北京 100085; 8. 国家自然科学基金委员会政策局, 北京 100085)

**[摘要]** 先进大型风洞是支撑飞行器自主研发, 引领空气动力学及其相关学科创新发展的战略性基础设施。围绕大型风洞设计建设中的关键科学问题, 本文在国家自然科学基金委员会主题为“大型风洞设计建设中的关键科学问题”的第185期双清论坛研讨成果的基础上, 针对我国即将设计建造的四座大型风洞的重大需求, 分析了设计建设所涉及的材料、结构、制造和试验测量等方面面临的基础科学难题和技术挑战, 凝炼了面向大型风洞设计建造和试验测量重大需求未来3—5年的重大关键科学问题。

**[关键词]** 风洞; 多场耦合; 结构振动; 低温材料; 虚拟制造; 风洞试验

大型低温高雷诺数风洞、大型连续式跨声速风洞、大型低速风洞、大尺度高超声速高温风洞等的大型风洞设计建设技术难度极大, 是气动、结构、材料、工艺、测量、控制等多学科多领域技术的系统集成, 是对我国大型风洞设计建设水平和加工制造能力的综合考验。基于大型风洞的试验运行对高性能制造、智能控制和测量测试技术等提出的新需求和新挑战, 深入开展大型风洞设计、建设与应用的基础问题研究和关键技术攻关, 对提升我国相关领域自主创新能力和构建具有中国特色并达到世界一流水平的风洞设备体系, 意义十分重大, 符合国家重大战略需求。

先进大型风洞的结构、材料、制造与运行测试问题, 是设计建设工作中面临的核心关键技术问题, 贯穿于风洞设计、建设、使用和维护的全寿命周期。大型风洞设备作为国家重大基础设施, 其设备研制大

多为非标/单台(套), 部分设备的性能指标要求和技术工艺条件十分苛刻, 将挑战国内加工制造、材料、测试测量等相关行业的能力极限。主要挑战和问题包括: (1) 特殊功能机械结构方面, 面临特大尺寸结构件动力学、流固热磁多场耦合分析、大型运动机构高精度控制, 以及特殊工况条件下的高可靠性设计等; (2) 大型高精度旋转机械设计制造方面, 需要解决系统结构振动与抑制、超长转子轴系弯振扭振与抑制、噪声与降噪设计、防喘振设计, 以及如何提高系统寿命等; (3) 特种材料方面, 需要针对宽温域使用要求, 深入开展宏/微观条件下, 全寿命、多尺度、一体化的力学性能分析和加工工艺研究, 解决材料温度循环条件下脆化、老化、蠕变、疲劳、晶相及物性变化等; (4) 风洞运行管理方面, 需在大型风洞设计建设中合理引入新技术、新材料、新工艺, 实现风洞运行管理的智能化; (5) 风洞试验方面, 针对新型风

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2017-09-11

<sup>\*</sup> 本文根据第185期双清论坛内容整理。

<sup>\*\*</sup> 通信作者, Email: laiyn@nsfc.gov.cn

洞的试验环境和需求,需要研究模型与支撑系统一体化设计制造和智能控制,以及极端环境多物理量全场高精度测量原理与技术等。深入理解并准确掌握相关科学问题和关键技术,整合国内科研单位和工业企业在相关领域积累的大量工程实践经验,形成技术合力,优化设计方案、提高设备性能,确保大型风洞建设质量,保证运行安全,延长使用寿命,节约投资成本,实现建设世界一流大型风洞的目标。

在此背景下,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、数学物理科学部、政策局联合举办了主题为“大型风洞设计建设中的关键科学问题”的第185期双清论坛,来自国内50多所高校和科研院所的140名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对大型风洞设计建设以及运行等方面的现状与发展趋势、主要研究方向和科学问题进行了梳理,提出了主题相关领域的国家自然科学基金资助战略。

## 1 大型风洞特殊功能结构设计理论及力学分析方法研究

### 1.1 复杂载荷环境下机械结构力学研究

为满足风洞设备试验特殊功能需求,风洞机械结构需要在极端气动载荷、高低温多变工况、强烈瞬态冲击、频繁启停等复杂条件下工作,从而机械结构会受到气动力、热、结构、疲劳循环等多物理场耦合的载荷作用。在这些复杂工况和耦合环境下,机械结构的功能实现较为困难、结构寿命难以保证,探索复杂载荷环境下的风洞机械结构动力学理论,成为未来大型风洞设备研制需要突破的难题。

大型风洞特殊功能机械结构设计主要涉及气动调节机构、模型支撑机构、特种试验机构、转运对接装置、天平校准装置、风洞动力装置等重要组成部分<sup>[1]</sup>。在我国风洞的建设过程中,对于这些常规机械结构已经形成了一套理论体系比较完备的设计方法。但是,在大型特种风洞的设计方面还有所欠缺,特别是在多场耦合作用下的结构力学分析和结构优化方面。大型风洞机械结构是一类面临复合载荷环境的复杂结构系统,需要经受极端苛刻的温度、压力、气动静载/动态载荷环境,系统研究多场耦合产生的结构动力学是实现风洞机械结构优化设计的关键因素,那么只是在两个或者少数几个物理场相互作用的层次上理解相关的科学问题,已经难以满足大型特种风洞的设计建设需求。

因此,研究风洞结构在气动力、气动热、机械载荷等多物理场耦合作用下的强度、刚度、疲劳等特

性,以及结构可靠性测试技术和评价方法,并提出风洞结构强度及疲劳寿命优化方法,对大型风洞的结构优化和可靠运行意义重大。可见,大型风洞的设计急需建立准确高效的风洞流场数值模型,深入了解时变多场耦合环境下结构强度、传热机理和寿命评价理论,并形成复合载荷环境下机械结构力学问题的理论方法、建模手段、试验技术等一套完整研究体系,从而指导特殊功能机械结构的优化设计过程。

### 1.2 多场耦合诱发结构振动的形成机理及控制方法

振动是大型风洞结构系统中普遍存在的现象,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<sup>[2]</sup>,系统地研究风洞结构在气动力、热、结构、机械载荷、振动、噪声等多物理场下的振动特性及关键影响因素,建立大型风洞结构的振动测试技术和结构振动疲劳评价理论,并提出风洞结构的宽频段振动控制方法成为亟待解决的重大科学问题。

由于洞体机械结构振动的激励机理复杂,并且受到结构空间尺寸的限制,目前在多场耦合诱发结构振动的形成机理及控制方面还有待深入的研究。在流致振动理论方面,自上个世纪中叶以来,流致振动已经逐渐发展成为包含流体动力学、结构动力学和流固耦合动力学的系统性学科,研究内容涉及石油化工领域的长距离输水气液两相流管道振动、建筑桥梁领域的大型跨海大桥的风致振动、船舶领域的舰船结构流致振动等众多方面<sup>[3]</sup>,但是大多数研究属于低速流体诱导振动的范畴,与高速气流诱发的风洞结构振动现象有明显的区别,特别是运行参数范围宽、高速气流冲击、压力脉动复杂条件下的结构振动机理缺乏系统的研究。在振动测试和分析方面,风洞结构承受高速气流流动时多物理场的载荷作用,存在温度、压力、振动、噪声等多参数的互相干扰,对风洞结构的振动测试和信号处理都带来了较大的困难,比较突出的包括大型喷管薄壁柔板和压缩机高速旋转叶片等特殊结构的振动测试和分析问题。在结构抑振/减振方面,风洞结构设计需要考虑气动条件对空间尺寸的严格限制,例如引射器喷嘴的支撑整流板、二喉道的中心体、模型支撑系统的悬臂支撑杆等,期望简单地通过提高结构刚度和阻尼的方法进行减振,其效果将非常有限。

针对上述问题,需要解决几个方面的科学问题:

(1) 系统地建立风洞结构在气动力、热、结构、机械载荷、振动、噪声等多物理场下的流固耦合振动理论;(2) 探索大型风洞结构的振动测试技术,揭示风

洞结构振动的力学响应行为、振动特性和振动模态；(3) 提出风洞结构的宽频段振动控制方法,实现结构抑振性能的优化设计；(4) 建立基于多信号融合的结构振动疲劳寿命评估方法。通过相关问题的研究,系统地形成结构振动成因、检测、传播、控制及振动疲劳的理论体系。

### 1.3 先进风洞超长复杂转子结构动力学研究

作为大型风洞设备的核心,动力装置(压缩机)的转子系统处于高压比、大功率、高流量、极端温度等苛刻环境下运行,由压缩机转子、联轴器、中间长轴、电机转子等组成的超长超重转子轴系的结构和激励源异常复杂,且涉及“变频器+电机+传动轴系+流体负载”的共同作用<sup>[4]</sup>,使得转子系统的设计和运行监测较为困难,同时造成轴系损伤累积的难以预见性。因此,急需研究多场耦合环境下超长复杂转子结构系统的动力学行为及“电—磁—力—流体”中各关键物理量的传递与耦合机制,为大型风洞动力装置的开发提供技术支撑。

压缩机的转子系统时常处于高参数的复杂工况环境下运行,大型风洞的压缩机转子系统的振动问题在复杂的工况环境下会变得更为明显。一方面,超长转子系统动不平衡、轴系不对中、叶片颤振等问题将凸显,可能会引起转子系统的剧烈弯曲振动;另一方面,由于变频器和电机的电磁谐波会引起转子系统的输入扭矩脉动,压缩机的超长转子系统在兆瓦级变频驱动和多场耦合载荷作用下极易引起转子系统的扭振。如何揭示动力装置转子系统的动力学行为,探明其对激励载荷的响应规律,实现转子系统弯/扭振的实时监测,以及轴系损伤累积的预测,对压缩机转子系统设计和运行管理提出了挑战。国内外学者在航空发动机、汽轮机和透平机械等的振动问题方面做了大量的研究工作<sup>[5,6]</sup>,积累了丰富的理论与实验经验,取得了一批高水平的研究成果,对开展压缩机转子系统振动的研究具有非常好的借鉴作用。但是,鉴于压缩机的转子系统运行环境的多场耦合作用,以及大型风洞超长轴系的弯/扭振复杂性,相关的经验和方法不能简单地移植应用于大型风洞轴系的设计和建造,还需要做进一步的深入研究。

为解决上述问题,需要重点考虑如下几个方面的科学问题:(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;(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。通过相关问题的研究,解决超长转子系统多源激励与多变工况下动力学关键问题,为大型风洞动力装置的开发提供技术支撑。

## 2 大型风洞设计建设的材料及工艺研究

### 2.1 宽温域特种金属/复合材料性能分析

低温风洞内部设备及零部件需要长期运行在极端温度交变工况下,苛刻的使用条件要求在设计时必须选用高可靠性、长寿命的材料,以满足风洞运行要求。因此,获取材料的相关性能数据显得尤为重要,尤其是发展实际服役环境下可靠的材料物性测试技术。为保证安全,防止选材不当而造成事故,必须对材料、零部件和设备进行详细的性能分析。

在风洞深冷环境下使用的材料应具有高强度、高断裂韧性、低膨胀系数、抗疲劳、良好可焊性、可加工性等优异的综合性能。目前风洞诸多核心部件采用各种牌号的高强度钢和不锈钢,如压力容器采用的304 L奥氏体不锈钢、中高运动机构采用的S03奥氏体不锈钢以及厚板结构采用的低温马氏体不锈钢。在低温环境下,金属材料塑性降低,裂纹的萌生和扩展是其主要失效机制<sup>[7]</sup>。特别是大锻件材料,在服役过程中温变环境、受力状态、残余应力及变形累积是影响其寿命的重要因素,实际研究中可利用实验数据结合数值模拟的方法探究大锻件材料在制造服役过程中的受力和变形,测量疲劳裂纹扩展及断裂韧性并进行损伤容限寿命预测。复合材料是风洞中另外一种大量使用的功能材料,如用于制作低温压缩机叶片的环氧树脂基碳纤维、绝热保温圈的硬质高密度聚异氰脲酸酯和密封圈中采用的聚四氟乙烯。其中压缩机叶片工作在77 K至室温的大温变环境下,同时还承受着非定常、周期性的气动力冲击,因此需要采用高比强度、高韧性和高损伤耐受性的材料。国内相关单位已开展了诸如碳纤维织物增强复合材料叶片树脂传递模塑成型技术、冷热循环和变转速条件下的力学性能(拉伸强度、弯曲强度和压缩强度)和抗疲劳特性测试<sup>[8,9]</sup>,但由于国内低温碳纤维叶片的设计和制造起步较晚,目前仍然缺乏宽温域、交变载荷下复合材料性能演变和抗疲劳特性的相关数据,需要开展一系列相关研究,揭示碳纤维性能演变趋势,掌握碳纤维叶片的失效过程机理。

大型风洞设计建设在材料性能研究方面亟需解决的关键科学问题主要包括:(1) 宽温域下金属材料/复合材料强韧化机理、微结构与性能演化规律及



寿命评估；(2) 用于低温叶片、降振减噪、隔热结构的复合材料基础研究；(3) 宽温域润滑及密封材料测试技术和服役性能研究。

## 2.2 宽温域特种金属/复合材料的工艺研究

大型风洞建设所采用的材料、零部件和装置的性能和寿命受到加工、焊接、修复等制造工艺的直接影响。近年来的研究表明,通过对低温金属材料的合金成分设计(C、N、Ti、Mo、S、P、H、O等)、基体组织的尺寸控制(如马氏体组织的超细化)和多相亚稳组织(残余奥氏体或逆转变奥氏体)的技术工艺调控,可实现不锈钢的低温强韧化<sup>[10-11]</sup>。低温风洞的弯刀采用S03钢,压缩机主轴采用9Ni钢,均需百吨位钢锭,目前国内重机行业仍未掌握百吨位高合金不锈钢冶炼、锻造、热处理的基础机理。例如在压缩机主轴的制造过程中,由于凝固过程的尺寸效应,传统大钢锭制备的大锻件极易产生中心疏松、宏观偏析等缺陷,威胁核心构件服役安全<sup>[12]</sup>。此外,先进大型风洞建造过程中,风洞洞体内部段、结构件以及运动机构等采用低温不锈钢材料,壁板等大型结构件的焊接应力与变形严重影响着风洞流道部段的尺寸精度与稳定性、强度与刚度、疲劳特性与使用寿命<sup>[13]</sup>,因此控制与减小大型结构件的焊接应力与变形是设计建设与使用过程中面临的核心关键技术。目前国内关于马氏体不锈钢的厚板焊接尚缺乏系统的研究,尤其是关于该类材料在低温服役条件下的窄间隙焊接关键技术,涉及电弧力、熔池重力、表面张力、母材反作用力等方面的知识<sup>[14]</sup>,需要最大限度地发挥窄间隙高效、高质、低应力、可控焊接的优点。压缩机的核心部件——叶轮的制造工艺复杂且成本高昂,而压缩机工作过程中常面临极端温度、瞬态冲击、频繁启停等复杂多变的工况条件,在长期的服役过程中可能发生共振、旋转失速、冲蚀、腐蚀、疲劳断裂等失效行为,因此开展相关零部件的高技术修复和再制造具有重要的工程价值和科学意义<sup>[15]</sup>。同时,深入研究再制造叶轮的服役寿命预测和服役安全验证工作可为大型压缩机的结构设计优化、制造工艺改进、服役状态监测和剩余寿命评估提供参考<sup>[16]</sup>。

大型风洞设计建设在材料工艺研究方面亟需解决的关键科学问题主要包括:(1) 风洞核心大锻件制造过程形性调控研究;(2) 风洞结构件异质焊接/厚板焊接组织性能控制及可靠性评价;(3) 风洞关键零部件再制造、寿命预测与服役安全研究。

## 2.3 苛刻工况下运动机构的表面改性和润滑密封技术研究

低温风洞中存在大量的运动执行机构,其核心运动部件长期服役于重载、高速、深冷等多因素耦合的复杂环境中,如不对各摩擦副进行表面处理和有效润滑,将大大降低各运动机构运行的稳定性以及关键零部件的使用寿命。如风洞中典型的弯刀机构工作时其运动和受力情况复杂,由此产生的损伤形式多样,因此提高机构表面强度成为提升运动副稳定性和延长使用寿命的有效途径。目前有关服役温度低至110 K左右的运动副摩擦行为以及相关低温固体润滑材料的研究十分有限,需要针对涉及的关键科学问题开展深入研究,设计开发能够服役于宽温域、高速、重载等苛刻工况下的新型润滑和密封材料。在已有的报道中,过渡族金属硫化物 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{WS}_2$ 、聚酰亚胺、PTFE等是目前大型风洞中研究较多的润滑材料<sup>[17-19]</sup>。围绕实际使用需求,通过模型等效试验结合数值仿真的方法探索多因素耦合服役环境对运动副发生磨损/疲劳行为的影响和作用机制,找出导致运动副摩擦磨损失效的核心因素,为运动副的结构优化设计、表面强化处理和防护提供依据。

亟需解决的关键科学问题主要包括:(1) 发展极端环境下机械运动机构的测试评价技术;(2) 发展高性能运动副表面改性技术;(3) 研究苛刻工况下新型润滑和密封材料。

## 3 风洞复杂装备制造与智能运行管理

### 3.1 大型风洞复杂装备制造

风洞装备制造是风洞建设的基础,决定了风洞是否具有优良的流场品质,从而高效可靠地完成各种气动试验<sup>[20,21]</sup>。目前,我国已经在风洞各部件(件)的设计与分析、风洞噪声控制、高效轴流风扇设计、压缩机等动力机械以及配套传动系统设计、流固热耦合、风洞多变量控制系统等研究方面取得了一定的进展<sup>[22]</sup>。特别是围绕中小型低速、跨声速等风洞,我国在风洞装备制造等领域取得突出成绩,支撑了国家航空航天重要型号的研制<sup>[23]</sup>。

但与此同时,风洞装备制造也面临一些瓶颈问题或挑战。首先,即将建设的四座大型风洞系统组成复杂,往往面临极端温度和动态载荷环境,力、热运行条件苛刻,因此在装备制造方面面临更多的挑战。首先,需要建立更加规范和系统集成的制造信息模型,例如,洞体设计时,需要将洞体传热与冷却

结构设计、运动机构设计、对接装置、风洞柔板变形以及测量系统设计安装等诸多因素协同创新;其次,风洞系统中超大尺寸、非标结构件多,加工和安装精度要求高,面临精密制造和装配的挑战<sup>[24]</sup>,例如细长中空轴类、大尺寸复杂曲面叶片、较大范围马赫数改变的大型风洞半柔壁喷管等部件,在制造和装配过程中往往容易产生翘曲变形甚至开裂等问题,难以保证其精度,这就需要发展超大尺寸复杂构件精密制造技术;最后,基于数值模拟展开复杂装备结构设计也颇为重要,它既能够为风洞建设提供参考,同时与关键装备虚拟制造、虚拟装配结合在一起,也能够有效地提高风洞建设效率和质量。

### 3.2 风洞智能运行管理发展

我国航空航天飞行器的创新发展,对风洞运行和管理的先进性要求不断提高。首先,应当具有满足飞行器试验要求的风洞模拟能力,并具备先进、安全的风洞试验技术;其次,风洞试验技术的先进性还体现在风洞的运营成本上,减小运营成本能够节约资源,扩大试验范围;最后,高效的风洞试验是保证飞行器研制进展的重要条件。为了使风洞试验技术具备上述的先进性,部分国外的科研机构引入了现代企业管理模式,提高风洞建设和管理水平<sup>[25]</sup>。

风洞智能运行管理将长期运行经验和现代智能运行技术相结合,以提高风洞运行和管理的先进性,涉及建立装备健康状态动态评价及预测模型等。风洞试验装备规模大、复杂度高,其压缩机、电动机等关键设备的意外停机将严重影响飞行器试验任务的如期完成。然而大型风洞装备由于其结构复杂集成、工况环境多变,还没有成熟的智能运行管理平台可以使用。在以下几个方面亟需展开基础研究:(1) 考虑到风洞设备样本数据较少,在单件装置故障预测和健康管理基础上,如何利用有限的数据库展开风洞系统的健康管理及预测,从而实现考虑准备时间和能耗的多型号任务智能优化调度管理,建立节约型、可持续发展的智能风洞运行管理平台;(2) 面向大负载复杂部段自动化对接的精确定位需求,基于接触力检测、路径规划和变形补偿理论开展高精度柔顺对接方法研究;(3) 现有的低温机器人技术无法满足超低温(-160℃)环境自动化操作和故障修复,需要提高元器件对低温环境耐受能力,发展低温机器人技术;(4) 结合转子振动主动控制与复合材料叶片健康监测理论,实现压缩机多参数耦合的故障预警理论与方法,建立压缩机健康管理系统。

## 4 先进风洞试验技术

### 4.1 模型与支撑机构一体化设计制造

随着我国低温高雷诺数风洞、大型连续式跨声速风洞等大型风洞建设的发展,还需要提前研究新型的先进风洞试验技术。在风洞试验中,模型与支撑机构构成的综合系统是风洞试验的主体和核心,其材料、结构与功能的一体化设计制造是大型风洞建设的共性关键技术,是发挥风洞科学和工程效用的必要条件。

模型与支撑机构的制造精度、气动弹性特征相似性、飞行状态相似度对于风洞试验的可靠性和置信度具有极其重要的影响<sup>[26,27]</sup>。风洞试验模型与支撑种类复杂多样,性能要求高,如何在多重相似约束下,实现大型模型与支撑机构在材料、结构以及功能上的一体化的精确设计与制造?针对这一科学问题,迫切需要实现面向结构、气动和控制等的高性能制造<sup>[28-30]</sup>。目前,高气动弹性相似性的复合材料缩比模型以及能够现场快速制造的3D打印模型已经得到越来越多的关注和研究,但是在制造精度以及与支撑结构的协同制造上仍然存在问题。此外,我国在低速风洞绳牵引并联支撑系统、基于Hexaglide并联机构的六自由度风洞模型支撑结构和基于6-PSS结构的并联六自由度支撑机构等并联支撑机构设计制造上也已经取得了一定的成绩。

在未来的模型/支撑机构一体化设计制造进程中,以下几个方面亟需展开基础研究:(1) 需要针对气动弹性等典型风洞试验的风洞模型与支撑系统的结构、功能和控制需求,发展面向性能的制造理论与技术,根据多目标反求设计的思想,实现模型与支撑系统一体化制造技术的突破;(2) 在非定常气动载荷、强不确定条件下,发展风洞智能模型的精确制造、自适应控制,以及支撑系统和测控技术的相互协同<sup>[31]</sup>;(3) 面向智能变体飞机等新型飞行器,考虑主动气动弹性等问题,实现高精度、高相似模型制造技术的突破。

### 4.2 先进风洞测量测试技术研究

风洞测量系统担负着风洞试验数据采集计算的任务,对采集数据的同步性、精准度起着至关重要的作用<sup>[32]</sup>。数据的实时监测、远程查看的需求对风洞测量系统研制提出了较高的要求。此外,当测量环境处于低温、高温以及宽温域等极端条件时,待测量具有多维、高动态的特性,环境扰动大(气流扰动、温度影响),易造成信号噪音太强。这也加大了研制先



进风洞测量技术的难度。

我国在风洞试验数据常规测量、动态并行测量、声学测量、流场性能测量等方面具备了较强的研制能力和丰富的工程经验。同时,视觉测量、柔性传感测量技术、温敏漆(TSP)测量技术、压敏漆(PSP)测量技术、粒子图像测速技术(PIV)等非接触测量技术,也逐步开始用于风洞中的压力场、流场(速度、温度、密度)、位移场等多物理场的非接触测量。

但是,测量技术的发展仍然受限于某些无法检测到的变量、测量信号生成的环境依赖性以及较强的背景噪音。所以,针对大型风洞的宽温域、多物理场、全场(模型表面与环境)等极端测量要求,还需要考虑:(1)低温导致模型材料和环境物性变化对测量精度的影响;(2)多物理场的分布式测量与采集显示方法;(3)复杂曲面模型表面与环境的综合测量,实现全场实验数据重构与互验。因此,发展新型高精度的测量技术,显得尤为重要。

进一步的研究内容主要包括:(1)开展多维高动态信息测量技术研究,实现多场耦合条件下误差溯源及精度补偿、高动态大范围测量、多源信息交互耦合与协调;(2)开展低温条件下温敏/压敏材料温度特性、发光效率、压敏材料探针分子氧猝灭特性等基础问题研究;(3)开展低温条件下示踪粒子性能分析、温度对粒子的影响规律、粒子跟随特性修正方法、低温环境对光散射特性的影响研究;(4)发展大面积智能传感层的设计、制造、校准技术与评估方法,推动适用于低温环境的视觉测量等非接触测量方式;(5)发展飞行器模型物理场与环境流场综合测量,建立多种测量的互补与互验理论,实现全场测量。

### 4.3 模型与支撑机构的智能控制

围绕新一代高机动作战飞机、新型布局飞行器以及未来智能变体飞机等研究,迫切需要开展考虑飞行控制与结构主动控制的气动弹性风洞试验研究。风洞试验中控制系统目的是实现模型飞行攻角、侧滑角及滚转角等姿态指令的精确跟踪,且在实验过程中尽可能真实模拟自由飞条件下非定常气动力、结构弹性与闭环控制系统的耦合特性及其对飞行动力学的影响规律。

随着对模型姿态控制要求、支撑系统稳定性要求越来越高以及支撑与模型的耦合问题越来越复杂,为了促进先进风洞试验技术的发展,针对柔性支撑与弹性缩比模型的非线性耦合动力学,实现模型与支撑机构的精确、智能控制迫在眉睫。针对模型

姿态控制要求,需要考虑:非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以及智能变体飞机模型的精确控制。针对支撑系统稳定性要求,需要考虑: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位姿的精确控制以及支撑机构振动的主动抑制方法。针对模型与支撑的耦合问题,需要考虑: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以及飞行器复杂姿态的反馈跟踪与控制指令分配。

因而,围绕“空气动力学与飞行力学耦合的模型与支撑机构精确控制高动态气动载荷条件下支撑结构振动的主动抑制”这一科学问题,模型与支撑系统智能控制亟待解决的问题包括:(1)在深入了解飞行器模型与支撑系统的气动弹性、支撑刚度与气动干扰特性基础上,实现高动态气动载荷条件下模型与支撑结构振动的主动抑制,开发具有多维动态信息精确感知、稳定控制、快速反应的智能支撑系统<sup>[33,34]</sup>;(2)结合先进的模型制造技术,找到高动态强不确定性条件下的智能模型自适应控制方法;(3)针对智能控制以及一体化设计制造,研究支撑机构与模型之间的动力学耦合建模与求解,掌握非定常气动力扰动下风洞试验模型的高精确性、高稳定性控制方法。

## 5 未来5—10年围绕大型风洞建设和运行的发展目标及资助重点

### 5.1 发展目标

通过气动、结构、材料、工艺、测控等相关学科的交叉与融合,建立气动力、气动热、结构、机械载荷、电磁、振动、噪声等多场耦合下的动力学基础理论体系,提出宽温域下特种金属/复合材料的高性能制造工艺,探索低温下的特种润滑、密封与热防护的新方法,创建大型风洞系统的智能感知、健康监测、智能管理以及风洞试验的新技术,为先进大型风洞的论证、设计、建设、使用和维护全寿命周期提供有力的科学指导和技术支撑。

### 5.2 资助重点

#### (1) 大型风洞结构多场耦合工况下的建模理论、振动测试及评估技术

通过对风洞结构及试验模型在气动力、重力、热、噪声等多场耦合下的振动机理分析、仿真与建模、特殊结构振动测试技术、结构振动疲劳寿命评估等基础科学问题的研究,实现风洞设计和运行中振动问题的准确分析与评估。

## (2) 多场耦合作用下超长复杂转子系统振动特性分析及抑振机理研究

基于电磁—力—流体等多物理场的耦合特性分析,研究大型轴流压缩机转子及叶片振动的基本规律、多变运行工况失速/喘振机理,建立振动监测与抑制的基本理论和方法,为大型压缩机超长复杂转子系统设计、运行提供技术支撑。

## (3) 宽温域下金属和复合材料强韧化机理以及制造、服役过程中组织与性能演化规律研究

研究金属和复合材料在宽温域下的强韧化机理和制造中的组织性能演变规律,探索服役过程中温度循环、受力状态、残余应力及变形累积对材料寿命的影响机理,建立材料增韧控制方法和寿命预测理论,为高温、低温风洞材料的研发、制造和应用提供技术支撑。

## (4) 低温工况下运动构件表面强化与润滑密封、减振降噪、绝热保温性能的基础研究

针对低温风洞中的关键运动构件,建立低温性能测试方法和评价标准,探索低温风洞运动构件润滑密封、表面改性及再制造、减振降噪、绝热保温结构设计理论,为运动构件的长寿命、高可靠性运行提供依据。

## (5) 风洞结构制造和智能管理基础研究

发展风洞超大部件高性能制造技术,提出风洞部件超大载荷、高精度柔顺对接方法,探索低温工况的机器人失效机理与优化设计理论,建立基于有限数据的风洞健康预测与智能管理系统,实现关键设备的安全可靠运行,以提高风洞设备制造和运行的效率。

## (6) 风洞试验模型与支撑系统设计、感知与控制及全场测量技术基础研究

面向风洞试验的模型与支撑系统的结构、功能和控制需求,发展面向性能的制造理论与技术,实现多重相似约束下的大型模型与支撑机构一体化精确制造,建立考虑空气动力学与飞行力学耦合的模型与支撑系统精确控制方法,进而基于宽温域下风洞试验模型表面和环境的多物理场感知原理,实现复杂环境模型与支撑机构状态多维高动态信息精准感知。

## 参 考 文 献

- [1] 刘政崇. 风洞结构设计. 北京:中国宇航出版社,2005.
- [2] 陈万华,王元兴,王超琪,等. 基于有限元法的风洞结构故障诊断. 实验流体力学, 2011, 25(2): 63—67.
- [3] 杨毅晨. 多喷嘴引射器流致振动特性研究. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心, 2017.
- [4] 姚剑飞,王维民,杨佳丽,等. 转子—轴承系统中电磁作动器的力学特性分析及实验研究. 北京化工大学学报, 2012, 39(5): 102—107.
- [5] 孟光. 转子动力学研究的回顾与展望. 振动工程学报, 2002, 15(1): 1—9.
- [6] 高金吉,王维民,江志农. 高速透平机械轴位移故障自愈调控系统研究. 机械科学与技术, 2005, 24(11): 1261—1264.
- [7] 陈国邦. 低温工程材料. 杭州:浙江大学出版社, 1998.
- [8] 董永祺. 我国树脂基复合材料成型工艺的发展方向. 纤维复合材料, 2003, 2: 32—35.
- [9] 何压飞,矫维成,杨帆等. 树脂基复合材料成型工艺的发展. 纤维复合材料, 2011, 2: 7—13.
- [10] Wang CJ, Liang JX, Liu ZB, et al. Effect of metastable austenite on mechanical property and mechanism in cryogenic steel applied in oceanengineering. Acta Metall Sin, 2016, 52: 385—393.
- [11] Yong QL, Sun XJ, Yang GW, et al. Solution and precipitation of secondary phase in steels: Phenomenon, theory and practice. Advanced Steels, 2011: 109—117.
- [12] Sun MY, Hao LH, Li SJ, et al. Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels. J Nuc Mater, 2011, 418: 269—280.
- [13] Dong ZB, Wang SJ, Ma R, et al. Solute redistribution with shear flow in molten pool of Ni-Cr alloy. J Mater Sci Technol, 2011, 27(2): 183—188.
- [14] Sun QJ, Hun HF, Li WJ, et al. Electrode tips geometry and penetrating in narrow gap welding. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(3): 198—203.
- [15] Deng CY, Wang H, Gong BM, et al. Effects of microstructural heterogeneity on very high cycle fatigue properties of 7050-T7451 aluminum alloy friction stir butt welds. Int J Fatigue, 2016, 83: 100—108.
- [16] Song ZQ, He Q, Ma E, et al. Fatigue endurance limit and crack growth behavior of a high-toughness Zr61Ti2Cu25Al12 bulk metallic glass. Acta Mater, 2015, 99: 165—175.
- [17] 古乐,王黎钦,李秀娟,等. 超低温环境固体润滑研究的发展现状. 摩擦学学报, 2002, 22: 314—319.
- [18] Hübner W, et al. Tribological behaviors of materials at cryogenic temperatures. Wear, 1998, 216: 150—159.
- [19] Basu B, Kalin M. Overview: Cryogenic wear properties of materials//Tribology of Ceramics and Composites: A Materials Science Perspective, Hoboken Wiley, 2011.
- [20] Ivanco TG. Unique testing capabilities of the NASA langley transonic dynamics tunnel, an exercise in aeroelastic scaling. AIAA Ground Testing Conference, 2013.
- [21] Cole SR, Noll T E, Perry B. Transonic dynamics tunnel aeroelastic testing in support of aircraft development. Journal of Aircraft, 2012, 40(5): 820—831.
- [22] 廖达雄,黄知龙,陈振华,等. 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(2): 1—6, 20.