

·“双清论坛”专题:大型风洞设计建设中的关键科学问题·

大型风洞部段自动柔顺对接技术研究进展

高海波* 李楠 刘振 于海涛 丁亮 邓宗全

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室,哈尔滨 150001)

[摘要] 大型风洞是高速飞行器研制与试验过程中重要的地面模拟实验设备,其试验段与挠性喷管段的自动对接技术是风洞建设和使用中的关键技术。本文分析了国内外在大尺寸部件自动对接领域的研究现状,针对风洞试验段自动对接过程提出了超大尺寸对接部段相对位姿自动检测技术,超高负载试验段位姿高精度调整技术和试验部段柔顺对接技术3个关键技术,分别介绍了3个关键技术目前的研究进展,并对未来的研究问题进行了展望。

[关键词] 风洞试验段;自动对接;位姿检测;位姿调整;柔顺对接

飞行器“高速化”、“精确化”是21世纪飞行器一个极为重要的发展方向,是提高飞行器效能的有效手段,而先进飞行器的研制强烈依赖于地面模拟试验设备——风洞。风洞实验是研究空气动力学的主要方法之一。我国目前风洞建设规模较小,地面模拟试验设备存在尺寸偏小、试验马赫数范围较窄以及试验模拟能力不足等问题,这些问题导致我们在解决飞行器的关键空气动力学问题方面缺乏较好的试验基础,无法获得更有价值的实验数据,从而严重制约了我国先进飞行器的研制和发展。

一个风洞会存在2个以上的试验段,不同的测试件安装在不同的试验段内,通过更换试验段即可进行不同测试件的实验。风洞试验段和挠性喷管段之间的自动对接技术是风洞基础设施建设的关键技术,此技术的解决可以大大提高试验段更换的速度,提高试验段和挠性喷管段对接的精度,因此缩短飞行器的研制周期。

对于风洞试验段这种超大尺寸、超高负载对象之间数字化自动对接装配的研究,国内存在技术空白。目前我国较大型的风洞主要由中国空气动力研究与发展中心设计建设,其试验段和挠性喷管段之间的对接主要通过手动对接完成,高载荷试验段由气浮平台支撑,手动调姿对正过程精度较低且耗时间较长。国外将大型风洞部件的自动对接技

术视为风洞基础实验设施的关键技术,基本采取技术封锁措施。因此对风洞试验段这种超大尺寸、超高负载对象的自动对接技术的研究是目前的研究热点和难点,本文针对风洞试验段这类超大尺寸、超高负载的自动对接难题,提出这类部件自动柔顺对接方面的关键技术问题,分析相关领域的研究现状。

1 大型风洞建设现状与趋势

目前建设完成的大型风洞主要集中于美国、俄罗斯、欧洲和日本,从低速和亚声速风洞到跨声速风洞、超声速风洞以及高超声速风洞等^[1,2]。我国在高速风洞的建设方面相对美国、俄罗斯等国家较弱,主要集中在1 m到2 m的量级,其中最大的为2.4 m×2.4 m的FL-26风洞。相比国外的风洞建设,我国前期风洞基础设施建设存在建设规模较小、口径尺寸偏小、试验马赫数范围较窄、试验模拟能力不足的问题^[3,4]。当前,我国航空航天飞行器等重要装备研制工作已进入从“跟跑”向“并跑”、“领跑”跨越发展的关键时期,对风洞设备的试验能力提出了前所未有的要求。为此,国家决定在“十三五”期间启动建设大型低温高雷诺数风洞、大型连续式跨声速风洞、大型低速风洞等一批世界顶尖风洞设备,以全面提升我国空天技术自主创新能力。

2 大尺寸、高负载部件自动柔顺对接技术现状

对于大尺寸部件的对接,目前主要体现在飞机、导弹、火箭舱段的对接,飞船和空间站的对接,风洞试验段的对接目前未见研究成果报道。

2.1 飞机舱段自动柔顺对接技术现状

随着数字化技术、电子信息技术的发展,采用先进的电脑建模仿真技术和控制技术进行辅助对接装配成为可能。飞机的数字化柔顺对接装配生产线的建设是这一时期和领域的典型成果。目前国外顶级产品的装配单位都研制了先进的数字化自动柔顺对接系统,国内在这一领域的研究以理论为主,也有一定的研究成果^[5]。

美国为波音 737 和波音 787 飞机的装配研制了高效率自动化柔性装配生产线,柔顺装配过程实现了批量化,此装配线大大提高了装配的效率和精度,同时保证了装配的一致性。美国在 F35 战斗机的装配生产线也采用了数字化自动柔性对接技术,此技术大大提高了生产效率。

目前,国内对数字化柔顺装配技术的研究主要体现在方案讨论和理论的研究^[6,7]。浙江大学研究了基于驱动方向的 POGO 柱式定位器,多个定位器组成调姿系统用于飞机部件的调姿定位。大连四达和沈飞公司联合研制的大部件对接系统也采用了定位器 POGO 柱,是一种基于托架式的多定位器定位工装^[8]。国产大飞机 C919 也采用了自动测量调姿对接系统。中国航空工业集团公司也进行了大型飞机机翼大部件数字化对接系统的研究。

总之,在飞机自动柔顺对接装配技术方面,国外已经在实际的生产线上成功应用,形成了完整的测量、调姿和对接控制系统。我国目前主要还处于理论研究的层面。飞机的对接装配和风洞的对接有相似之处,均属于大尺寸部件,但飞机部件的质量较风洞试验段轻很多,因此该方向技术虽对风洞对接的研究有指导意义,但不能直接采用,需要考虑实际情况进行灵活调整。

2.2 导弹、火箭舱段自动柔顺对接技术现状

对于批量化生产的导弹,自动对接系统可以大大缩短导弹的生产周期,并且其对接精度高,一致性好,装配质量高。国外的导弹对接已经实现了自动化柔顺对接,美国波音公司的导弹柔顺对接系统采用激光跟踪仪作为导弹位姿检测系统,依靠测量位姿和设定位姿的偏差驱动导轨式数控平台进行部件

的对接。美国雷声公司拥有号称世界上最大的现代数字化导弹装配车间,采用直线导轨式六自由度数控对接平台,设置了全自动转场车和自动吊装系统。此技术也应用于美国猎户座飞船发射中止系统(LAS)的柔顺对接过程。国内未见导弹和火箭自动柔顺对接实际应用的报导^[9,10]。

综上所述,导弹、火箭舱段的自动对接装配过程和风洞的对接过程有相似之处,多采用导轨和并联机构实现平移和位姿调整。风洞试验段的质量更大,因此需要承载力更高的调姿系统,这一点与导弹、火箭对接略有不同。

2.3 空间站舱段自动柔顺对接技术现状

飞船与空间站之间的对接和空间站舱段之间的对接是一类典型的大尺寸部件高精度、高可靠性对接技术,此领域的研究较多,主要体现为柔顺对接机构和柔顺控制策略的研究。柔顺对接机构主要有前苏联研制的“杆—锥”式对接机构、美苏合作期间研制的异体同构周边式对接机构和欧空局和日本航天局研制的“抓手—碰撞锁”式对接机构。美国国家航空航天局(NASA)在一般的异体同构周边式对接机构的基础上研制了一种弱撞击对接机构(LIDS)^[11,12]。此系统属于带有柔性联接的对接机构,采用柔顺阻抗控制策略实现低接触力对接。我国在“神州八号”与“天宫一号”交会对接采用的对接机构接口硬件规格类似于 APAS-89,可以与国际空间站进行交会对接。

综上所述,在空间站自动柔顺对接技术方面,目前以 LIDS 最为典型,相关的技术相对成熟,其柔顺阻抗控制策略的应用可以借鉴到风洞试验段的对接控制方面,对接机构的形式也有一定的借鉴意义。

3 风洞试验段自动对接关键技术研究进展

在飞机、导弹、火箭和空间站舱段对接技术分析的基础上,结合风洞试验段与挠性喷管段对接技术需求,将超大尺寸对接部段相对位姿自动检测技术、超高负载试验段位姿高精度调整技术和试验部段柔顺对接技术列为关键技术,下面分别介绍三个关键技术目前的研究进展。

3.1 超大尺寸对接部段相对位姿自动检测技术

大尺寸部件数字化装配的飞速发展,对位姿检测技术提出了多样化、全面化、更高层次的要求,单一的数字化测量技术与系统已无法满足大尺寸部件装配环节的需求,测量目的已从单纯解决大尺寸部件产品装配精度评定问题发展到解决如何全面辅助

大尺寸部件装配过程、控制装配质量等一系列问题^[13]。

3.1.1 电子经纬仪

经纬仪最初是用来测量水平面或者竖直面角度的仪器。1962年华盛顿大学的Norman提出使用两台经纬仪通过三角测量原理对空间点进行定位,并由此开始用于各种广域坐标测量。现在使用的电子经纬仪读数一般使用旋转编码器读出角度,对目标的指向定位使用CCD辅助,提高测量使用的效率。其优点是可以对物体进行非接触式的测量,较大的测量范围以及较好的测量精度。但这种需要人工辅助的测量方式相对比较耗时,在20世纪80年代中曾经大量在国内外飞机制造企业中应用,但随着其他测量设备的出现和应用,这种测量方式在自动化装配要求较高的场合逐渐失去应用。

3.1.2 激光跟踪仪

第一台激光跟踪仪由NIST(美国国家标准与技术研究所)制造,是目前最先进的测量广域动态尺度测量仪器,当前的仪器测量长度达到120 m,精度达到 $60\ \mu\text{m}$,是大型工程设计制造中的重要测量装备^[14]。由于会受传播过程中空气的影响,测量精度随着测量距离的增大而降低^[15],一般厂商在开发时会考虑自动补偿,也就是测量外部的环境并通过预先测量的参数进行补偿以达到较高的精度。目前最高性能的六自由度激光跟踪仪^[16],测量的半径范围可达160 m,精度可达 $5\ \mu\text{m}$ 。

激光跟踪仪主要的缺点是激光束在遮挡情况下会丢失,设备的价格较高,同时对现场的气流环境要求也较高,对目标物体位姿的测量需要至少三个点,一般的做法是将靶球手动移动到各处,并且此时目标和激光跟踪仪的位置不能改变。

3.1.3 激光雷达

激光雷达最早出现在19世纪60年代,最早被美国国家大气层研究中心用于云层的研究,是使用紫外光、可见光、近红外光对目标物体进行照明,并且通过传感器测量返回脉冲的状态估计目标点的空间位置及表面信息。对物体表面位置检测时,通过对大范围的空间面进行扫描,获取面的位置信息,再配合被测物体的CAD信息,能够通过表面信息对其进行精确的定位。由于激光雷达具有直接提取被测物体表面点的能力,使用方便,在气象、地理测绘、无人驾驶、机器人等领域有广泛的应用。

Nikon Metrology公司的MV330/350产品,水平角度范围达到 360° ,垂直范围达到 90° ,测量距离

达到 $50\ \text{m}$ ^[17]。测量精度达到 $24\ \mu\text{m}$ (2 m距离)到 $301\ \mu\text{m}$ (30 m距离)。然而激光雷达在进行点位测量时也只能逐点依次进行,无法同时进行多靶点空间坐标的动态实时监测。而且,激光雷达的启动预热时间往往需要数小时,也明显地影响其使用便捷性。

3.1.4 室内GPS(iGPS)

在全球定位系统GPS(Global Positioning System)的启发下,人们提出基于室内GPS(又称iGPS、Indoor GPS)的三维数字化测量技术。这种定位方式与GPS定位方式相似,支持无穷多用户,安装与维护都非常方便,为室内高精度低成本的定位提供了较好的解决方案。缺点是测量系统安装过程比较复杂,且测量成本较高,通常在安装完成后不轻易改变其测量方案,因此在安装之前需要对测量方案进行评估和优化,使其满足数字化测量任务的精度要求。

加拿大庞巴迪公司选择iGPS作为标准计量学系统,并使用自动支撑桁架,建设了一条C系列单通道窄体客机柔性集成总装线。洛克希德马丁也使用iGPS辅助某型号战机进行隐身涂装^[18]。在Nikon公司的应用报告中称巴西ITA和巴西航空工业公司在小型客机自动化装配中同样采用了iGPS系统。

3.1.5 近景摄影测量

随着计算机视觉技术的不断发展,使用CCD作为传感器的3D摄影测量在工业应用中发挥了重要作用。美国GSI公司的V-STARS系统可以达到 $4\ \mu\text{m}+4\ \mu\text{m}/\text{m}$ 的精度(在10 m范围内达到 $44\ \mu\text{m}$ 的分辨精度)。

由于CCD测量原理的限制,为了获得高精度的定位以及清晰的图像,实际使用中都将景深限制在一定的范围内,大尺寸物体的测量需要我们改变相机的方位进行多次测量拼合,对自动化程度有一定的影响。最近在该方向的研究趋势是大视场、大景深的技术研究,保证在对大型物体的装配中实现完全的自动化测量引导,提高工作效率^[19]。

综上所述,随着计算机技术以及光学测量技术的不断发展,解决大型部件装配过程中的位姿检测问题有很多工具和手段,不仅仅是单一的定位问题,更是一个系统工程。在风洞试验段位姿检测过程中,可使用数字经纬仪、激光跟踪仪或者室内GPS等,在小范围(如孔位找正等)位姿检测过程可使用近景摄影测量等方法。在针对特定系统的设计中,将这些方法融合为一个流程,提高自动化程度,尽量

减少人为操作带来的低效率以及失误。

3.2 超高负载试验段位姿高精度调整技术

由于风洞试验段对接操作具有部段质量大、精度要求高、对接运动复杂等特点,对接系统在承受超高负载的同时,精确地调整试验段的位姿,是柔性对接必备的前提。针对大部件的装配调姿技术多用于飞机、火箭等大型舱段部件的装配操作,对同属于超大尺寸、超高负载的风洞试验段对接,相关研究和技术具有借鉴意义。

3.2.1 分布支点式位姿调整

分布支点式位姿调整系统中定位器采用分布式布局,每台定位器都与对接部件单独相连,由伺服电机驱动实现 X、Y、Z 三个方向的移动。定位器按支撑位置可以分为向上支撑的柱式结构和从侧面支撑的塔式结构两类。通过各个支点位置配置多台定位器可以完成待装配部件的支撑、调姿和定位操作。美国 CAN 制造系统公司研发的基于 POGO 柱单元的柔性工装系统是该技术方案的典型,随着大飞机等相关项目的推进,国内关于大部件自动调姿对接技术的研究也逐渐增多。浙江大学邱宝贵等对大型飞机机身调姿与对接试验系统进行了研究,采用分布支点式调姿方案搭建并测试了对接试验台,涉及的若干关键技术已成功应用于国家重点型号工程,大幅提高了飞机装配的质量和效率^[20]。

分布支点式位姿调整具有定位器结构简单、通用性好,系统占地面积小的优点,但调节过程中必须保证各支点间的协调,否则可能使支点位置承力过大,造成部件变形或损坏,且系统不便于移动。

3.2.2 整体托架式位姿调整

整体托架式位姿调整系统中的部件不直接与定位器相连,而是置于支撑托架之上,托架下接多个定位器,通过控制定位器的三轴运动驱动托架来调整待装配部件的位置和姿态。波音 787 客机率先在装配过程中使用了该技术。

国内方面朱永国等设计了飞机中机身自动调姿定位器,针对中机身调姿运动学特点,建立了调姿动态系统的函数模型,提出了基于动态测量系统、托架式定位器和控制集成软件的中机身自动调姿方法^[21]。周丽华等设计了大型运载火箭部段自动对接机械调整机构,实现火箭移动部段三维平移和旋转,分析了影响火箭自动对接精度的因素^[22]。

采用整体托架式位姿调整技术时,由定位器运动不协调所造成的应力直接作用于托架上,因此部

件本身的受力条件更好,对支点的结构要求低,适合于复合材料零件,装配效率高,且装配线便于整体移动。

3.2.3 并联机构式位姿调整

并联机构具有负载能力强、结构紧凑、自重轻等特点,对于实现大型部件的高精度、高自动化对接装配具有一定优势。熊涛等提出一种卫星调姿装配并联平台,采用经典的 Stewart 并联机构。并联平台的各支链分别与动、静平台相连接,在伺服电机或液压系统的驱动下可以进行伸缩运动。通过各支链间的协调运动,实现动平台空间 6 自由度的位姿调整^[23]。唐乐为等研究的七索驱动 6 自由度柔性并联机构,上方吊索主要负责承载部件重量和调整其 Z 向位置,再配合周向的六根柔索实现部件三维移动和转动。柔索并联机构具有工作空间大、能耗低和惯量小等优点,适合于重载及长径比大的工件吊装对接操作^[24]。

Christian Löchte 等探究了大部件装配调姿系统中由 6-SPS 并联支撑结构替代 3-PPPS 三点支撑结构的设计思想。在固定平台上建立网格分布式连接点,可配置出不同的并联支撑结构,构建装配误差评估参数,对比不同结构下驱动机构的运动误差对装配误差的影响。分析结果显示多种并联结构配置方案优于三点支撑结构系统^[25]。

大型工业产品装配技术正朝着数字化、自动化和网络化方向发展,采用数字化自动对接技术是超大尺寸、超高负载部件位姿调整的发展趋势,其主要难点在于大尺寸高载荷下可靠支撑结构的设计、多支点高精度协同驱动控制的实现及装配制造中数字化信息化水平的提高。通过优化支撑调姿结构方案和改进软件集成控制方法,可以进一步提升大部件自动调姿对接的精确性和可靠性,相关技术可以作为风洞试验段自动对接方案的参考。

3.3 试验部段柔顺对接技术

风洞试验段和挠性喷管段完成位姿检测以及位姿调整之后进行柔顺对接过程,柔顺对接的目的是保证对接过程接触力在合理的范围内。大尺寸部件对接的瞬间和对接接触过程中存在一定的刚性碰撞和接触,采取能够降低接触力对接的控制方法可以有效减少测量和调姿偏差引起的对接部件损伤。柔顺对接问题可以采用被动柔顺机构、主动柔顺控制系统或者主被动混合柔顺方式。

3.3.1 被动柔顺机构对接技术

被动柔顺机构是指能通过其部分或全部具有柔

顺的构件变形而产生位移的机械机构,在对接过程中可以防止接触碰撞时产生较大的接触力。在被动柔顺机构的研究方面,最具代表性的研究工作是国外 Whitney 等为主的关于 RCC(Remote Center Compliance)装置的研发工作。

国内在被动柔顺机构研究方面也进行了很多研究,设计出了很多用于轴孔装配作业的柔顺机构。华南理工大学邓晓星等人针对轴承和轴承孔座的自动装配作业研制了一种平面柔顺型夹持器,天津大学的智能机械研究所研发了一种复合型柔性手腕,北京工业大学研制了一种气囊式被动柔顺装配手,大连理工大学魏维君研制了一种层叠式柔顺机构^[26]。

综上所述,在被动柔顺机构的研究方面,国内外的研究成果较多,总体来看,这些机构尺寸较小、承载能力较小,主要用于机械手臂操作的轴孔装配,其机构的构型可以为风洞对接接口柔顺机构的设计提供参考。

3.3.2 主动柔顺控制对接技术

由于被动柔顺机构受限于特定的环境和任务,对于大尺寸部件,被动柔顺机构存在体积较大的弊端,因此更多的采用主动柔顺控制进行对接。主动柔顺对接是指在进行装配作业时根据力传感器的反馈信息,结合适当的控制方法,如阻抗控制^[27]、力/位混合控制以及智能控制等来实现装配作业。

为了提高对接系统的柔顺和简化机械系统,NASA 和 ESA 基于 APAS 系统的设计和布置经验研发了低接触力对接系统(LIDS),此设计利用机电一体化的设计基准,借助主动柔顺阻抗力控制技术,使得完整的主动柔顺控制对接成为可能,在整个对接过程中接触力都较小。

国内在主动柔顺控制方面也进行了较多的研究。易旺民在研究大型部件对接技术的过程中采用并联机构的位姿控制和力随动控制相结合的方式^[28]。罗中海在研究飞机大部件调姿平台的过程中,提出一种力/位置混合控制方法^[29],提出调姿平台力控制轴和位置控制轴分配策略,位置控制轴实现调姿运动,力控制轴跟随理想支撑力。哈尔滨工业大学的赵杰团队在针对空间机械臂(SRA)的末端执行器和抓斗卡具之间的对接技术研究过程中,采用了自适应阻抗控制的方法^[30],保证了接触力在合理的范围内。

综上所述,国内外在主动柔顺控制方面的研究成果较多,以上介绍的为几种典型的对接和调姿过

程的柔顺控制,在其他例如机械臂的柔顺作业等领域的应用还有很多。这些控制方式对风洞的对接过程控制具有较大的借鉴意义。

3.3.3 主被动混合柔顺对接技术

主被动混合柔顺就是综合主动柔顺和被动柔顺的一种柔顺理念。两者优势互补,被动柔顺专用性强,但范围限制大;主动柔顺从非接触到接触存在状态转换,容易产生较大的接触冲击。将位置、力和视觉反馈信息集成,同时在末端集成具有一定被动柔顺功能的对接接口,既可进行实时的主动控制对接过程进行干预,又可以降低接触冲击。因此,主被动结合的方式是目前主要的研究方向。

4 结论与展望

大型风洞实验是先进飞行器进行空气动力学研究的关键手段,我国的风洞建设在规模、尺寸和测试能力方面相对较弱,因此建设大型风洞具有必要性和迫切性。风洞试验段和挠性喷管段的自动柔顺对接技术是风洞基础设施建设的关键技术,本文针对大尺寸部件的柔顺对接技术进行了研究现状的综述,主要涉及以下几个方面的内容:

(1) 介绍了目前世界上存在的跨声速范围的大型风洞,总结得出我国大型风洞建设存在的弊端以及今后的建设方向。

(2) 从风洞试验段的对接扩展到大尺寸部件的对接,从飞机部件柔顺对接、导弹与火箭舱段柔顺对接和空间站舱段柔顺对接三个方面进行了大尺寸部件柔顺对接系统研究现状的综述。

(3) 从风洞试验段自动柔顺对接过程提炼出超大尺寸对接部段相对位姿自动检测技术、超高负载试验段位姿高精度调整技术和试验部段柔顺对接技术三个关键技术。针对每个关键技术进行了相关研究现状的综述。

经过对风洞试验段与挠性喷管段自动柔顺对接技术的综述,结合我国风洞建设的现状,提出以下几点今后需要关注的重要问题:

(1) 我国在大型低温高雷诺数风洞、大型连续式跨声速风洞、大型低速风洞等一批世界顶尖风洞的建设和使用过程中,都应考虑风洞试验段的自动柔顺对接问题。

(2) 自动柔顺对接技术是目前风洞运行所必需的,采用的技术途径应合理,还需要考虑大型风洞部段尺寸大(20 m×20 m×10 m)、重量大(1 500 t)的特点,采取针对性的技术措施,开展相关研究。

参 考 文 献

- [1] Anton P S, Gritton E C, Mesic R, et al. Wind tunnel and propulsion test facilities: an assessment of NASA's capabilities to serve national needs. *Investments*, 2004.
- [2] Goodrich M, Gorham J. Wind tunnels of the western hemisphere//Federal Research Division Library of Congress, Washington, DC, 2008: 81—82.
- [3] 刘秉斌, 陈万华, 甘小明, 等. 2m×2m 超声速风洞投放试验段研制//中国空气动力学学会测控专业委员会六次全国学术交流会, 2015: 658—662.
- [4] 虞择斌, 刘政崇, 陈振华, 等. 2m 超声速风洞结构设计与研究. *航空学报*, 2013, 34(2): 197—207.
- [5] Vette M, Müller R. Versatile assembly systems for large components on the example of the aircraft structure assembly. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 490—491: 676—681.
- [6] 郭洪杰. 飞机大部件自动对接装配技术. *航空制造技术*, 2013, (13): 72—75.
- [7] Mei Z, Maropoulos P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(10): 1185—1197.
- [8] 袁立, 郭洪杰. 一代飞机, 一代技术. *航空制造技术*, 2012, (Z2): 38—41.
- [9] 王丙戌, 徐志刚, 王军义, 王亚军. 导弹总装自动对接平台设计与研究. *现代防御技术*, 2016, 44(06): 135—141.
- [10] 马剑锋. 导弹数字化柔性对接系统设计及试验研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2014.
- [11] Dick B N, Oesch C, Rupp T W. Linear actuator system for the NASA docking system. *NASA Technical Reports Server*. 2017: 1—8.
- [12] Zhang L, Shao J, Zou H. Control system research and performance prospect of low impact docking system. *International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation*, 2015: 1026—1030.
- [13] 何胜强. 大型飞机数字化装配技术与装备. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [14] Gordon L. Portable laser tracker measures large volumes accurately. *Machine Design*, 2011, 83(14): 55—55.
- [15] Hughes B, Forbes A, Lewis A, et al. Laser tracker error determination using a network measurement. *Measurement science and Technology*, 2011, 22(4): 045103.
- [16] Geosystems L. Absolute Tracker AT901. 2013.
- [17] Morey B. Metrology technologies elevating aircraft manufacturing. *Manufacturing Engineering*, 2013, 150(3): 65—75.
- [18] NIKON. iGPS—Factory-wide measuring, positioning and tracking system. <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/igps>. 2017. 08. 17.
- [19] 杨博文. 大型装备装配位姿视觉检测的关键技术研究. 南京航空航天大学, 2013.
- [20] 邱宝贵, 蒋君侠, 毕运波, 等. 大型飞机机身调姿与对接试验系统. *航空学报*, 2011, 32(5): 908—919.
- [21] 朱永国. 飞机大部件自动对接若干关键技术研究. 南京航空航天大学, 2011.
- [22] 周丽华. 大型运载火箭自动对接技术研究. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [23] 熊涛. 卫星自动对接技术研究. *航空制造技术*, 2011 (22): 27—30.
- [24] 唐乐为, 唐晓强, 汪劲松, 等. 七索并联对接机构作业空间分析及索力优化设计. *机械工程学报*, 2012, 48(21): 1—7.
- [25] Löchte C, Dietrich F, Raatz A. A parallel kinematic concept targeting at more accurate assembly of aircraft sections. *Intelligent Robotics and Applications*, 2011: 142—151.
- [26] 魏维君. 用于孔轴柔顺装配的自动精密装配系统. 大连理工大学, 2009.
- [27] Liu G, Xie Z, Li G, et al. Optimization of the impedance controller for the low impact docking//*Information and Automation (ICIA)*, 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016: 403—408.
- [28] 易旺民, 段碧文, 高峰, 等. 大型舱段装配中的水平对接技术. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(09): 2354—2360.
- [29] 罗中海, 孟祥磊, 巴晓甫, 等. 飞机大部件调姿平台力位混合控制系统设计. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(2): 265—274.
- [30] Liu G, Li C, Song C, et al. Adaptive impedance control for docking of space robotic arm based on its end Force/torque sensor. *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 2016: 713—724.

Research progress on automatic compliant docking technology for large-scale wind tunnel sections

Gao Haibo Li Nan Liu Zhen Yu Haitao Ding Liang Deng Zongquan

(State Key Laboratory of Robotics Technology and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Large-scale wind tunnels are important ground simulation equipments for the development and testing of the high-speed aircraft. The automatic docking technology for the test section and flexible nozzle

section of large-scale wind tunnels is the key in the construction and employment of the wind tunnel. This paper analyzes the research status of large-scale components in the field of automatic docking at home and abroad. Aiming at the process of automatic docking of the wind tunnel test section, the paper puts forward three key technologies of the automatic detection technology of relative position and pose of the large-size docking section, the high precision adjustment technology of the ultra-high load test section and the compliant docking technology for the test section. The current research progress of the three key technologies is introduced respectively, and the future research focus is prospected.

Key words wind tunnel test section; automatic docking; position and pose detection; position and pose adjustment; compliant docking

· 资料信息 ·

中国科学家首次观测到三重简并费米子

在国家自然科学基金项目(项目编号:11622435,11474330,11422428,11674369,11474340,11674371,11234014)等资助下,中国科学院物理研究所(简称物理所)/北京凝聚态物理国家实验室(筹)的科研团队在拓扑物态研究领域取得了重大突破,首次观测到三重简并费米子,为固体材料中电子拓扑态研究开辟了新的方向。这一研究成果以“Observation of three-component fermions in the topological semimetal molybdenum phosphide”(拓扑半金属磷化钼中观测到三重简并费米子)为题,于2017年6月19日在线发表在*Nature*上。

组成宇宙的基本粒子可分为玻色子和费米子。现有的理论认为宇宙中可能存在三种类型的费米子,即狄拉克(Dirac)费米子、外尔(Weyl)费米子和马约拉纳(Majorana)费米子,它们分别被三个基本方程所定义。固体中电子的集体激发产生的准粒子也可以用这些基本方程来描述,也就是说在固体中也存在类似的费米子,因此可以把准粒子所处的固体材料类比成真实粒子所处的宇宙,这样的“固体宇宙”与具有时空连续性的真实宇宙空间不同,只满足不连续的分立空间对称性,可能导致传统理论中所没有的新型费米子。寻找新型费米子是近年来拓扑物态领域一个具有挑战性的前沿科学问题,也是该领域国际竞争的焦点之一。2016年4月,物理所翁红明、方辰、戴希、方忠预言在一类具有碳化钨晶体结构的材料中存在三重简并的电子态,其准粒子就是三重简并费米子,是不同于四重简并的狄拉克费米子和两重简并的外尔费米子的新型费米子。物理所石友国指导博士生冯子力迅速制备出碳化钨家族中的MoP(磷化钼)单晶样品,丁洪和钱天指导博士生吕佰晴,在上海光源“梦之线”和瑞士保罗谢勒研究所经过几个月的实验测量,成功解析出MoP的电子结构,观测到其中的三重简并点,与翁红明指导博士生许秋楠的计算结果高度吻合,首次实验证实突破传统分类的三重简并费米子。

“固体宇宙”中新型粒子的研究刚刚开始,这一研究成果对促进人们认识电子拓扑物态,发现新奇物理现象,开发新型电子器件,以及深入理解基本粒子性质都具有重要的意义。

(供稿:数学物理科学部 倪培根 张守著)