引文格式：王振忠, 苗先笛, 陆锋, 等. 强激光光学元件磨抛装备与工艺过程监测技术[J]. 航空制造技术, 2026, 69(20): 26010007.
WANG Zhenzhong, MIAO Xiandi, LU Feng, et al. Grinding and polishing equipment and process monitoring technology for high-power laser optical components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(20): 26010007.

强激光光学元件磨抛装备与工艺过程监测技术

王振忠[1,2]，苗先笛[1,2]，陆　锋[1,2]，陈佳颖[1,2]，黄东汉[1,2]，毕　果[1,2]
（1. 四川天府新区厦大创新研究院，成都 610213；
2. 厦门大学航空航天学院，厦门 361005）

[摘要]　非球面强激光光学元件日益增长的精度需求对超精密磨抛装备的可靠性和工艺过程的稳定性提出了更高要求，作为加工装备性能的重要保障工具，监测系统已成为超精密制造装备的必要组成部分。考虑到非球面光学元件磨抛工艺过程的强相关性，在国产化UPG80超精密磨削机床和BP480气囊抛光机床研制过程中，打破单机独立监测的壁垒，针对整个磨抛工艺路线设计实现配套监测系统。系统通过NC-Link协议与机床建立数据通讯，搭建基于国产化硬件的信号采集平台，结合数字孪生技术实现对磨床液体静压导轨、磨削液循环系统及抛光去除函数等关键对象状态数据的采集和监测。为验证系统功能，开展超精密磨削机床典型工况下的监测系统性能测试和气囊抛光机床*R*80 mm气囊工具头抛光斑稳定性监测试验，结果表明，系统可实时监测机床振动、温度、油膜强度等关键指标和工况特征，实现抛光斑压力分布预测与可视化，同时通过数字孪生系统辅助抛光工艺，为磨抛工艺链数据互通及优化提供数据支撑与技术参考。

关键词：超精密磨削机床；气囊抛光机床；工艺过程监测；NC-Link；强激光光学元件
中图分类号：V2；TH707　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.16080/j.issn1671-833x.26010007



王振忠
教授，主要研究方向为先进光学超精密装备与工艺、激光与增材加工、机器人集成应用等。

非球面强激光光学元件在激光核聚变装置、高分辨率对地观测系统、大型天文望远镜等一系列重大国家工程及国防项目中得到广泛应用[1]。相关领域对光学元件日益严格的面形精度和表面质量要求，推动光学元件的超精密加工技术朝着更高精度、更高效率、更低成本方向持续突破[2]。“高精度磨削+高效气囊抛光”是近年来我国非球面光学元件的主要工艺路线[3]，因此高精度元件批量化制造对磨抛装备的可靠性和精度保持性提出了更高的要求。

通过监测系统对精密制造装备的运行状态及加工过程进行实时监测，保障精密制造装备在服役周期内的稳定运行与加工质量的持续可控，是在现有技术与工艺框架下提升装备性能的重要手段。强激光元件的加工工序中，磨削为抛光的基础和前序控制环节。磨削阶段产生的亚表面裂纹层、残余应力等缺陷，会延续至抛光工序，损伤层深度决定了抛光时长，磨削能达到的面形精度也严重影响抛光过程的面形收敛。鉴于磨削和抛光的深度关联关系，应面向整个磨抛工艺路线开发监测系统，在磨抛工艺过程信息交互基础上实现全局工艺优化。

目前针对单一机床的状态监测系统已经在实际应用中发挥了重要作用。状态监测系统一般围绕计算

收稿日期：2026-01-07；**退修日期：**2026-02-01；**录用日期：**2026-02-25
基金项目：“工业母机”国家科技重大专项（2024ZD0708101）

机或嵌入式硬件平台如FPGA[4]、ARM[5]、DSP[6]等搭建数据采集和处理平台，并通过OPC UA[7]、MTConnect[8]与NC-Link[9]等机床通讯协议，结合传感监测技术实现机床性能监测。庄博文等[10]基于国产嵌入式控制器MT RobustRIO搭建了内外圆磨床的状态监测系统，实现了对振动、声发射、温度、流量、压力等信号的监测。Li等[11]利用CNC系统及其机床自带的传感器在线采集磨削力，结合时频域分析预测磨削形貌，还尝试通过加工机制和数据融合建立数据机制混合驱动数字孪生系统框架，实现磨削加工状态和质量的跨尺度实时监控[12]。Surindra等[13]利用磨削过程的振动和力信号，结合KNN、SVM、MLP和DT等多种机器学习方法评估砂带磨损。Zhang等[14]利用磨削过程的功率、振动和声发射信号，基于模糊基函数网络实现了适用不同砂轮或工件材料的砂轮磨削状态监测。Duan等[15]将声发射信号小波包分解系数均方值、力信号磨削力比及振动信号有效值等作为改进支持向量机的输入，结合熵权评价法有效识别砂轮的磨损状态。孙巍伟等[16]通过电机电流信号、三向振动信号和声信号，利用马氏距离法判断刀具的磨损状态。

不同于磨床对装备和加工过程的双高要求，采用半柔性气囊工具的抛光机床监测更多聚焦于抛光过程。例如，Liu等[17]采用声发射（AE）来监测抛光加工过程。De Beatriz等[18]采集机器人辅助抛光过程的声波信号用于评估元件表面粗糙度。Pan等[19]使用在线收集的抛光力来评估气囊抛光去除函数，预测抛光斑形状和去除效率。当前，磨床与抛光机床的监测方案普遍聚焦单一磨床或抛光机床的状态监测，缺乏对非球面强激光光学元件磨抛工序的协同监测与数据联动，难以全面保障光学元件磨抛加工周期的工艺精度监控。

针对现有研究难以实现对磨抛工序进行全面监测的问题，本文提出磨削监测、抛光数字孪生的磨抛工艺协同监测系统。首先，以保障强激光光学元件磨抛工艺过程的质量稳定性为目标，分析超精密磨削机床和五轴气囊抛光机床的在线监测需求，论述磨抛工艺协同监测系统的整体架构设计。其次，针对磨床静压系统、磨削液系统、抛光去除函数等关键监测对象拟定机床监测方案。基于NC-Link协议进行磨抛设备数据采集、硬件选型与软件功能适配开发等工作。进一步，为抛光设备构建基于数据驱动的抛光工艺数字孪生可视化系统，实现抛光斑的可视化预测。最后，完成分布式监测与数据交互一体的装备监测网络构建，并通过试验验证磨抛工艺协同监测系统的有效性。本研究实现面向磨抛装备完整服役过程的健康状态监测与加工质量评估功能，并为其他多工序监测系统的设计提供指导。

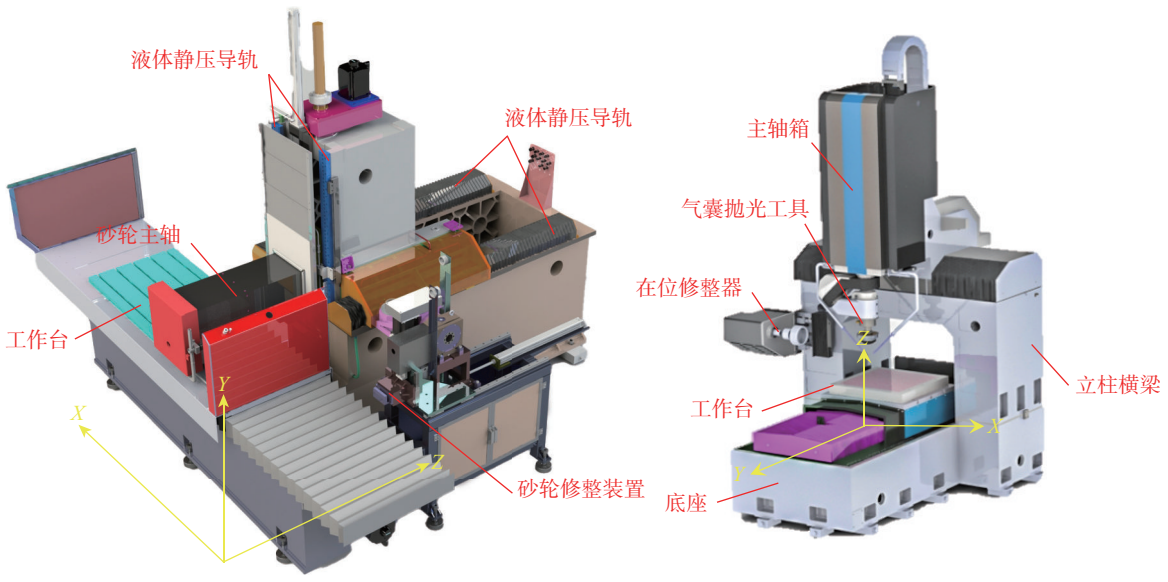
1 监测需求分析

“磨削+抛光”是非球面强激光光学元件的主要工艺路线，金刚石砂轮超精密磨削实现元件的面形成型，完成从坯料到设计面形的绝大多数材料的去除，材料去除过程以脆性去除为主，元件表面及亚表面会产生划痕、崩碎、以及裂纹和微裂纹等损伤[20]。后续的气囊抛光工艺则通过半柔性的气囊工具去除磨削损伤层，完成面形和表面粗糙度的进一步收敛，以达到抗激光损伤阈值等设计指标[2]。磨削和抛光是非球面强激光光学元件加工工艺链的紧密上下游，通过对磨抛数据的关联监测，能够优化光学元件的加工工艺过程，提高整个加工工艺链的确定性和稳定性。

磨削材料去除效率远高于抛光，对磨削元件实施全频段质量控制，并尽可能压缩磨削亚表面损伤层深度，可以大大节省后续的抛光用时。另外，抛光阶段需要采用一个绝对安全的去除量，以确保完全去除磨削亚表面损伤层。磨削加工过程的稳定性，尤其是批量元件的加工一致性，可以有效降低安全阈值与实际损伤层厚度的间隙，进一步节省抛光用时。因此，对磨削机床而言，监测的重点是机床核心部组件和影响加工稳定性的关键因素。

图1（a）所示[21]为厦门大学自主研发的国产化超精密磨削机床UPG80，采用T型床身加卧轴矩台的基本结构，完成了液体静压主轴、液体静压导轨、数控系统等核心部组件的国产化替代。从结构上看，主轴和进给系统是决定机床精度的核心部组件，考虑到机床电主轴的集成度较高，其状态参数采集模块也已整合至数控系统中，监测系统将通过机床通信接口读取相关信息。磨床的进给系统采用四油垫闭式液体静压导轨，具备高刚度、低振动等特性，确保机床达到亚微米级的加工精度。本文监测方案将重点讨论该自行设计开发的液体静压导轨进给系统。从物理参量上来看，机床的几何与热误差、机床整机振动情况、磨削液循环系统等决定了磨削加工过程和加工质量的稳定性，也将其列为重点监测类目在后文中进行详细阐述。

图1（b）所示[21]为厦门大学自研五轴联动气囊抛光机床BP480，机床整体采用龙门结构，由工作台底座、立柱横梁、中溜板、主轴箱、AB轴气囊抛光工具、在位修整系统、电气及控制系统、光栅定位系统、冷却系统、过滤装置、润滑系统、防护装置等组成。两轴的气囊抛光工具是气囊抛光机床的核心部件，气囊抛光可灵活调控接触压力，形成均匀抛光斑，实现保形抛光和确定性抛光的目标。气囊抛光机床主要通过进动抛光、路径规划和去除函数控制等实现高效抛光的同时抑制中频误差的产生[22]。



（a）超精密磨削机床UPG80　　（b）气囊抛光机床BP480

图1　超精密磨抛装备[21]

Fig.1　Ultra-precision grinding and polishing equipments[21]

鉴于上述分析，监测系统将以双轴气囊抛光工具为重点监测对象，实时获取AB轴气囊抛光工具头的实时位姿、运动轨迹、气囊状态参数等数据，建立五轴联动气囊抛光机床数字孪生模型，结合有限元仿真，实现抛光去除函数的精准预测。

2　监测系统搭建

2.1　监测方案

磨床和气囊抛光机床的监测数据从获取方式上可以分为内部数据和外部数据。内部数据是指通过数控系统通讯接口从寄存器中直接获取的数据，包括机床开关机状态、运行时长、主轴转速、进给速度、各轴实际坐标等系统数据，及已纳入数控系统监测条目的机床部件或子系统内部传感器数据。外部数据是指在机床装配或后续使用过程中额外增加的监测传感器数据，例如振动、温度、监控视频等。通过这种内外结合的方式，可以实现机床服役过程的完整数字化表征。

图2为磨抛装备状态监测系统的整体架构，考虑到磨抛机床的关注点差异，对于磨抛工艺链的监测总体上采取单机独立监测和监测系统层面上的机床数据互通，以工控机为核心控制平台分别部署磨床和气囊抛光机床的监测系统。由于两台机床均采用华中8型数控系统，机床监测系统均通过NC-Link协议获取机床内部数据，外部数据获取则采用传感器+数据采集卡的基本配置，通过USB串行总线交付至工控机。机床监测系统通过内植于系统的机器学习模型实现数据分析、特征提取和故障诊断等功能，并基于一定的存储和压缩机制实现机床大数据管理，同时，考虑到磨削与抛光工艺高度耦合的相关性，构建分布式监测与数据交互为一体的装备监测网络。为方便磨抛装备之间的数据沟通及监测系统向其他监测平台的数据分发，采用JSON格式对磨抛装备的各种状态参数进行标准化封装，并在装备监测网络中进行流动。

2.2　基于NC-Link的内部数据获取

国产化磨抛装备均采用华中8型数控系统，支持通过NC-Link协议与机床数控系统建立数据通讯。NC-Link是我国自主研发的数控机床互联互通协议标准，由适配器、代理器和客户端应用程序三层体系结构组成，适配器负责适配设备原生协议接口，从数控装备采集信息进行格式解析和转换，并通过TCP/IP协议同代理器进行数据通讯。代理器连接适配器与应用程序，作为数据路由连接并传达应用层和适配器之间的数据需求，并提供数据安全、接入管理和权限管理等保障，代理器和应用端通过MQTT协议进行通讯[23]。

2.3　监测系统软件设计

监测系统整体采用C/S（客户端/服务器）软件架构，以确保自身在工业场景下的实时响应能力与数据处理效率。开发环境基于Windows系统平台，前端开发选用.NET框架下的WPF技术，以C#语言编写软件功能模块，以XAML语言实现界面设计，既满足用户界面的交互性与数据展示需求，又兼顾算法与数据库的集成需求。

以超精密磨削机床监测系统为例，如图3所示，监测系统主要包括信息管理、数据采集、数据分析及报表输出4个功能模块，信息管理模块主要管理机床出厂信息、测点信息和

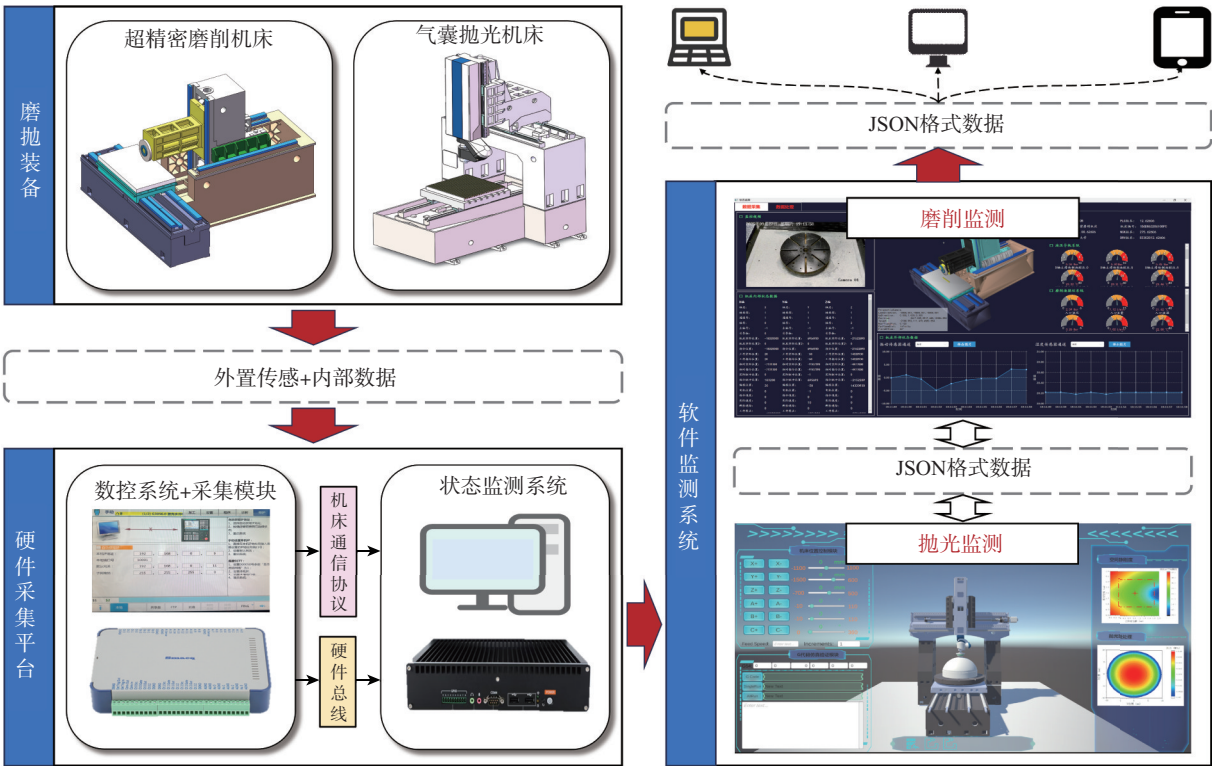


图2　监测系统整体架构

Fig.2　Overall architecture of monitoring system

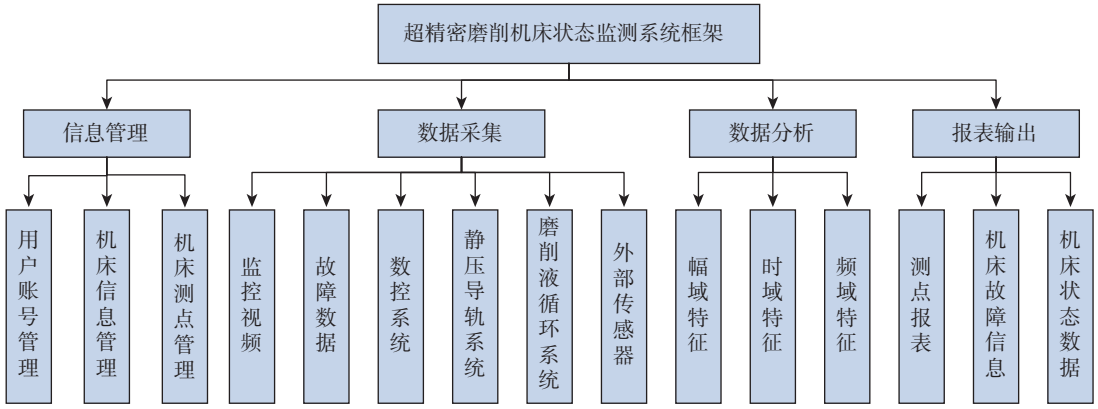


图3　系统功能框图

Fig.3　Diagram of system functional block

用户账号等基本系统信息;数据采集模块通过数采设备和NC-Link通讯协议实现对超精密磨削机床的内外部状态数据的采集并在数据分析模块对信号进行时域、频域、幅域的特征提取;报表输出模块则对机床的状态、故障、测点信息进行整合并输出为本地文档,方便用户调阅。针对工业数据高频写入、低频读取、长期存储的特点,采用MySQL关系型数据库搭建面向机床服役周期运维数据管理系统,同时充分利用MySQL开源、可迁移的优点。各模块协同工作,构成完整高效的机床状态监测体系。抛光机床状态监测系统框架与磨床基本一致,也包括信息管理、数据采集、数据分析和报表输出4个模块,其中数据采集部分根据机床自身结构和监测目标不同存在差异。由于气囊抛光头为柔性去除工具,抛光机床的监测重点是去除函数的稳定性,因此,该部分额外增加了数字孪生功能,通过实时监测抛光力反演气囊抛光斑,从而实现抛光斑的稳定性监测。

2.4　气囊抛光数值仿真模型

气囊抛光可灵活调控接触压力,形成均匀抛光斑,兼具高曲面适配性与低表面损伤的精密加工的特点。抛光工艺中,抛光力的稳定性直接决定气囊抛光工艺精度。本节构建了气囊工具有限元仿真模型,求解了气囊抛光力与抛光斑压力分布的非线

性关系。

图4(a)展示了气囊抛光工艺原理,喷嘴持续向抛光区域喷射含磨粒的抛光液,柔性气囊工具头以转速ω和进动角α与工件下压接触,两者接触界面形成类高斯接触压力分布区。图4(b)与(c)展示了气囊工具头的内部结构与所构建的网格模型,气囊整体采用结构化网格划分,内部施加0.1 MPa压力,进动角为23°。气囊工具头材料参数以及结构尺寸如表1和2所示,其中橡胶采用二参数的Mooney-Rivlin超弹性本构模型[24]。

3 关键监测对象

3.1 磨床液体静压导轨系统

液体静压导轨是超精密磨削机床的重要运动部件,具有运动精度高、承载能力强等优点[25]。液体静压导轨通过静压油膜支撑起运动部件,大幅降低了运动时的摩擦损耗,有效避免了低速运行时的“爬行”现象,是实现机床高定位精度和重复定位精度的基本保障[26]。当油膜状态出现异常时,会影响液体静压导轨的运动精度,甚至造成导轨运动部件之间发生刚性接触,对精密运动副造成损伤。由于液体静压导轨系统结构复杂,供油系统的压力和流量波动、润滑油黏度和温度改变、磨屑对油液的污染等,都有可能是导轨偏离健康运行状态的诱因。

考虑到异常油膜状态下对伺服电机负载造成的异常波动,同时将电机的电参数纳入监测体系。为此,从可靠性角度出发,在液体静压导轨系统的滑块、工作台等关键运动部件布置相应的温度、压力、流量、位移等传感器,液体静压导轨系统传感器测点布置方案如图5所示。

3.2 磨床磨削液循环系统

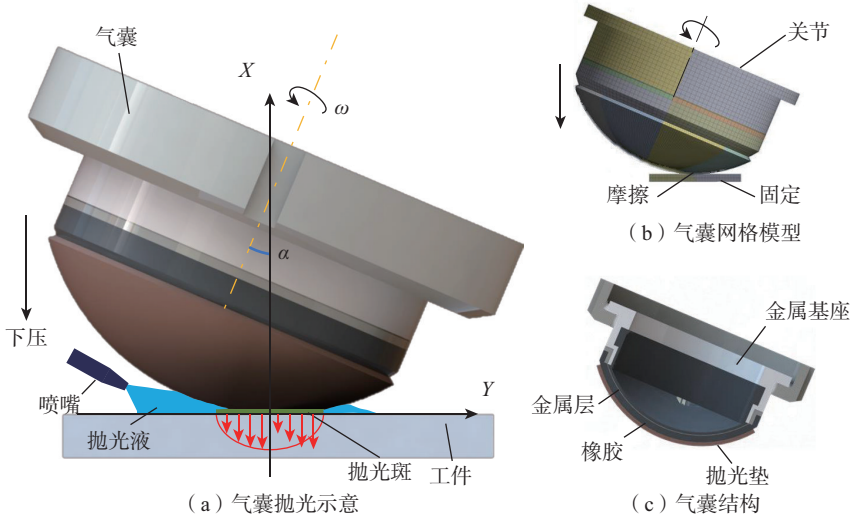
超精密磨削加工对加工环境有很高的要求[27],超精密磨削加工过程中,砂轮与光学元件表面的切削作用会产生大量热量,可能会导致机床部件产生热变形,影响运动精度,同时没有及时处理掉的碎屑可能会在加工过程中为光学元件表面带来损伤。一般在加工作业时通过循环流动的磨削液带走加工作业产生的热量和碎屑,维持相对恒定的工作温度。

为此,从保障加工环境的温度和洁净程度出发,如图6所示,对磨削液循环系统入口处的压力、流量和温度进行监测,同时将参数整合入数控系统,方便及时进行反馈控制和工艺调整。

3.3 气囊抛光去除函数预测

气囊抛光作为一种半柔性加工技术,其去除函数的稳定性和确定性直接决定了光学元件面形精度的收敛效率,是校正元件面形误差与准确求解驻留时间算法的核心前提[28-29]。因此,去除函数的动态监测被确立为气囊抛光机床的关键控制指标。然而,去除函数的行为受多重因素耦合影响,不仅与抛光压力、主轴转速、驻留时间、进动角等工艺参数紧密相关,更依赖于气囊材料的力学属性与几何尺寸。这种复杂耦合机制使得单一监测指标难以有效表征抛光去除函数。

为实现气囊抛光去除函数的精



(a) 气囊抛光示意　(b) 气囊网格模型　(c) 气囊结构

图4 气囊仿真模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of bonnet simulation model

表1 橡胶材料参数

Table 1 Parameters of rubber material

材料名称	密度/(g·cm^{-3})	第一应变不变量系数C_{01}/MPa	第二应变不变量系数C_{10}/MPa	屈服强度/MPa	R80气囊橡胶结构厚度/mm
橡胶	1.4	2.0674	0.3773	25	内层2、外层5

表2 仿真结构中线弹性材料参数

Table 2 Parameters of linear elastic material in the simulation structures

参数	聚氨酯	304不锈钢	BK7玻璃
密度/(g·cm^{-3})	0.416	8	2.51
弹性模量/GPa	0.024	206	81
泊松比	0.25	0.29	0.208
结构厚度/mm	3	0.5	10

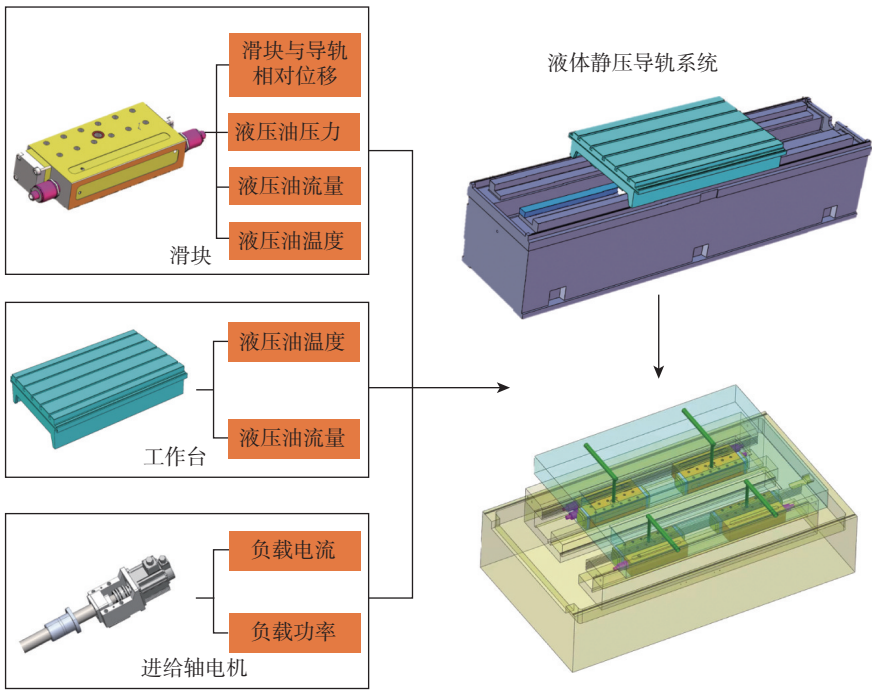


图5　液体静压导轨系统传感器测点布置方案

Fig.5　Sensor measuring point layout scheme for hydrostatic guideway systems

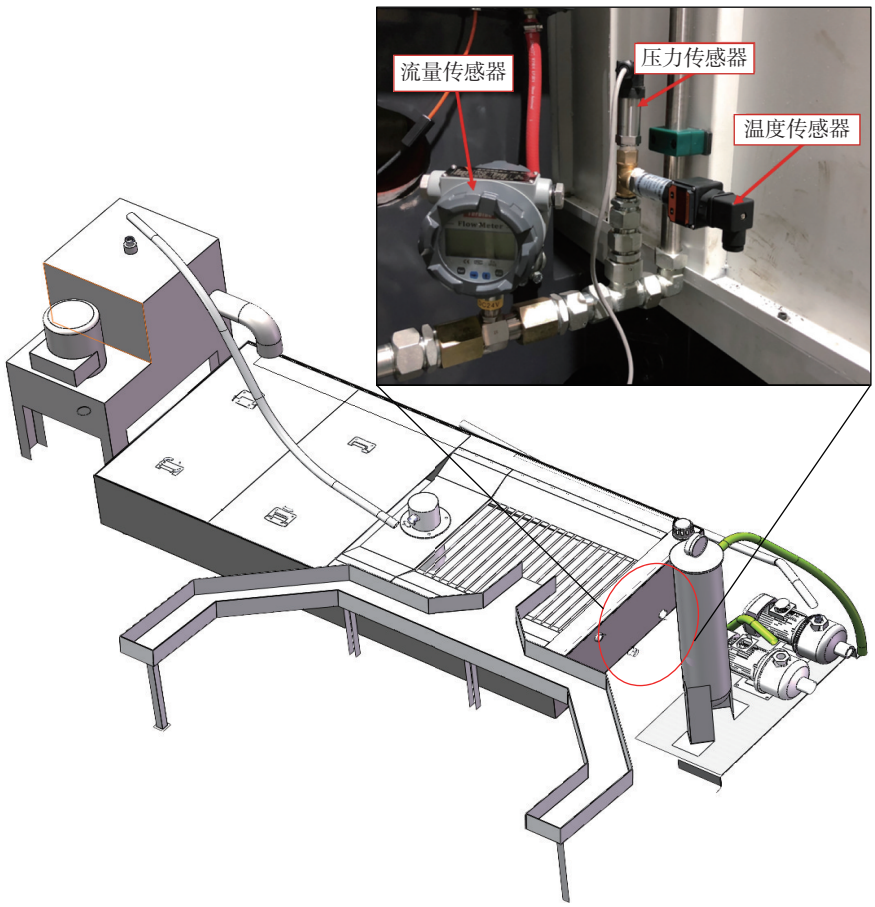


图6　磨削液循环系统传感器测点布置方案

Fig.6　Sensor measuring point layout scheme for grinding fluid circulation systems

准、动态预测，基于数字孪生技术构建五轴气囊抛光机床的高保真虚拟镜像系统。数字孪生技术能够实时映射装备运行状态，为状态监测提供动态、可视化的数据基础，同时搭载算法对状态监测系统采集的多源异构数据进行分析，实现对复杂装备系统性能的预测。系统融合有限元分析，建立涵盖不同下压量与抛光力组合的二维接触压力分布样本库。基于样本库，设计并训练了一种融合全连接层与卷积层的混合神经网络代理模型，以学习抛光力与接触压力分布形态之间的复杂非线性映射关系，将训练好的模型嵌入数字孪生引擎，通过与底层监测系统的数据交互，实时获取机床运动参数等内部数据和抛光力等外部数据，实现虚拟环境中抛光去除函数的实时动态预测。

3.4　外部状态参数

振动与温度是影响机床加工精度的重要外部因素，二者均为机床状态监测的关键外部指标[30-31]。振动可能造成光学元件表面粗糙度恶化，形成周期性中频误差；温度变化则易引发机床热误差。考虑到抛光机床半柔性气囊工具的柔性特征导致其对温度变化所引发热误差的敏感度显著低于磨床，在进行测点布置方案的设计时只涉及磨削机床的振动和温度信号及抛光机床的振动信号。

综上，如图7所示，开展气囊抛光机床和超精密磨削机床的整机模态分析，得到整机在约束状态下的模态振型图；开展超精密磨削机床的整机热仿真分析，得到热仿真温度云图。模态振型图分析结果显示，超精密磨削机床和气囊抛光机床的运动部件，如主轴的变形最为显著；其他的部件，如床身、底座的变形相对较小，因此需在机床的主轴、立柱、进给轴、床身等处布置三向压电振动传感器进行振动信号的监测。图7(b)中的热仿真云图显示超精密磨削机床的进给轴伺服电机处的发热最为明

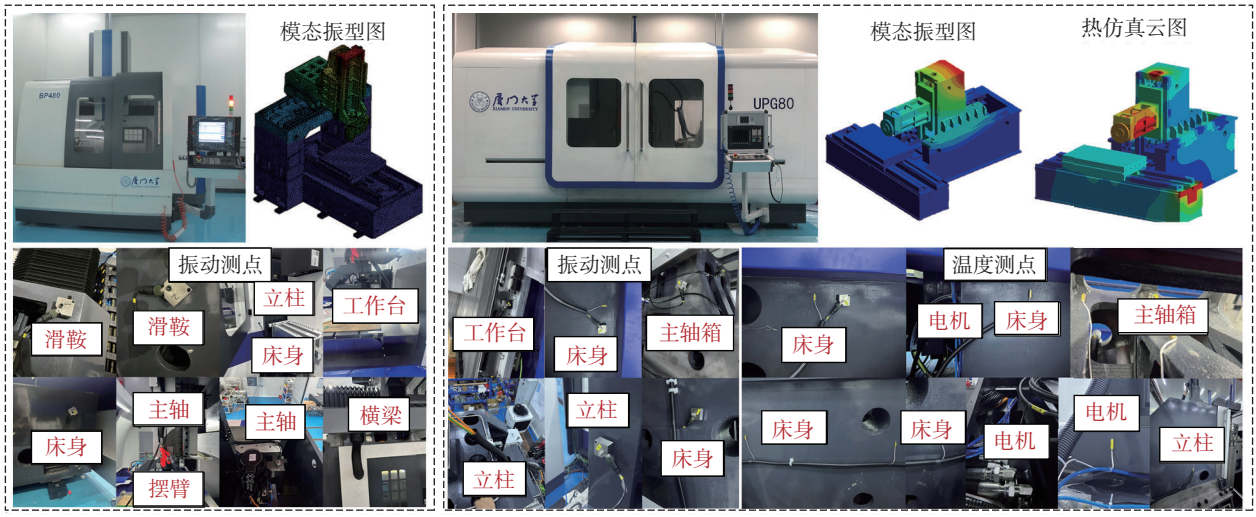
显，床身处发热较小，因此在主轴箱，在进给轴伺服电机、床身等热源附近布置PT100热电阻温度传感器进行温度信号的监测。

4 监测系统性能验证

4.1 超精密磨削机床监测系统测试

磨床监测系统主界面如图8所示，主要分为机床内外部状态数据、机床监控视频和软件运行状态等不同模块。程序启动后，会自动加载机床配置信息，尝试与机床数控系统建立连接，并检测外接数据采集卡的状态。待初始化完成后，用户点击启动监测，软件即按照给定的采样频率通过NC-Link通讯协议和数据采集卡从机床数控系统和外接传感器中读取内外部数据并实时展示在机床内部状态数据和机床外部状态数据的各个模块。

开展超精密磨削机床不同工况下的试机测试，该型号机床采用水泥隔振设计，尽可能避免外界振动对实际加工过程的干扰，给定机床单纯上电。4种工况依次为：单纯上电；主轴转速1003 r/min，工作台不移动；主轴转速1003 r/min，工作台移动3500



（a）气囊抛光机床　　（b）超精密磨削机床

图7 外部传感器测点布置方案

Fig.7 Layout scheme of external sensor measuring points

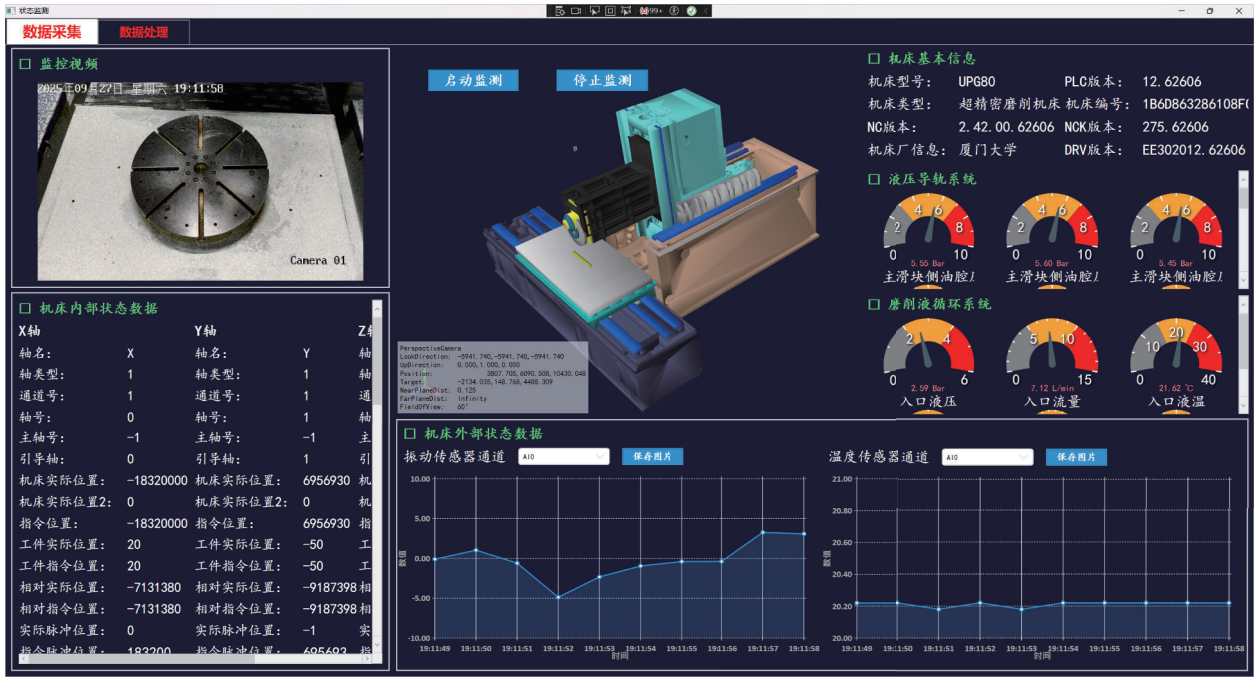


图8 机床运行参数界面

Fig.8 Interface of machine tool operation parameters

mm/min；主轴转速 1003 r/min，工作台移动 3500 mm/min，磨削深度 0.03 mm，采集主轴箱振动信号如图 9 所示，空载工况下的时域波形振幅较小，波动较为平稳，增加负载后振幅波动显著，特别是实际加工过程中运动部件的进给激励与磨削加工的切削力共同作用，能量整体增强。

4.2 抛光斑稳定性验证试验

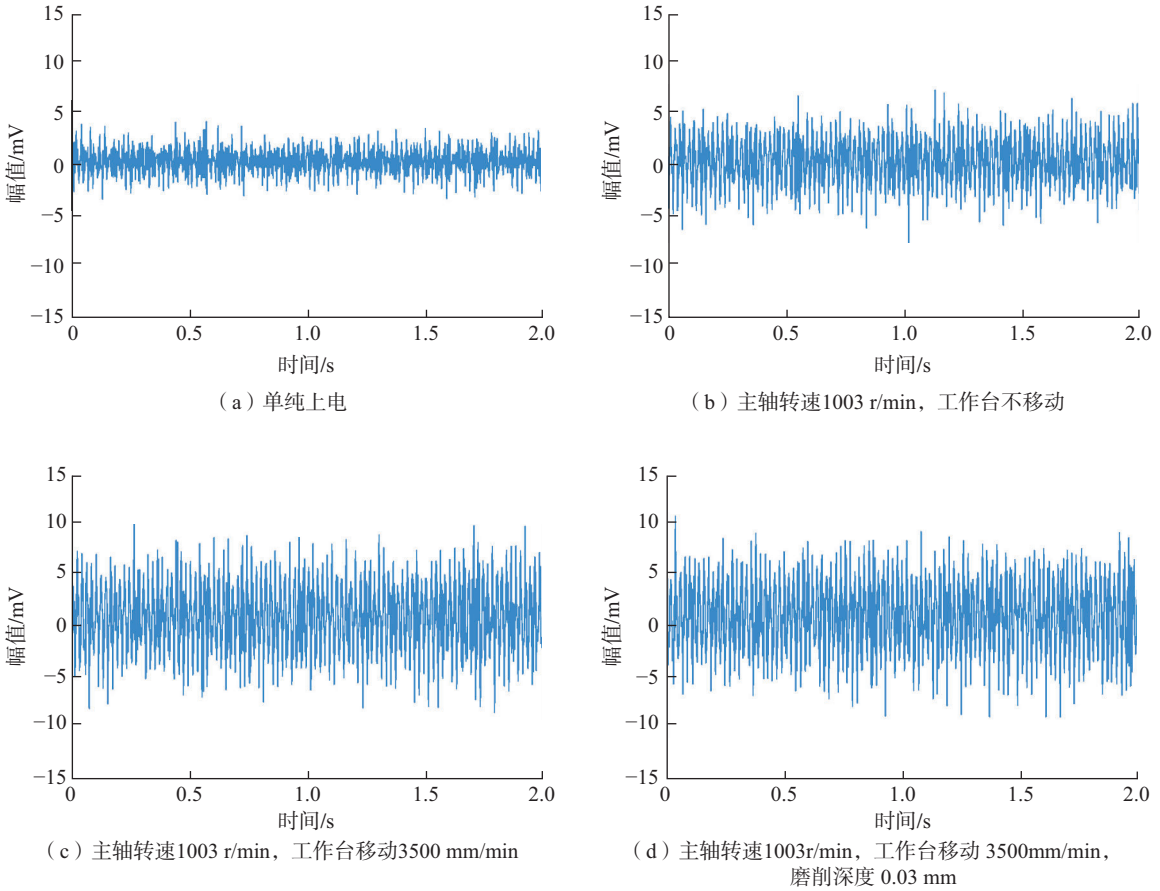
图 10 展示了气囊抛光机床数字孪生监测界面，界面左侧为机床位置反馈模块与 G 代码模块，界面右侧为气囊抛光接触力可视化模块。其中，G 代码模块支持读取加工 G 代码，机床位置反馈模块可实时读取气囊抛光机床五轴位置坐标。气囊抛光接触力可视化模块可根据读取到的抛光机各轴坐标与抛光力，实时计算对应机床姿态下的抛光斑压力分布与抛光斑直径。数字孪生系统读取工艺 G 代码与机床当前位置坐标，并动态演示气囊抛光轨迹路径。

为验证 2.4 节中气囊数值仿真模型的准确性，使用 *R*80 mm 气囊工具头开展抛光斑稳定性验证试验。气囊工具头充入 0.1 MPa 气压，进动姿态为 23°进动角，选择 3000 psi 薄膜感测片，以 1 mm 为间隔从 14~34 mm 设置等梯度接触区直径作为试验点，记录抛光接触区面积对应的接触压强分布和抛光正向力。

*R*80 mm 的气囊工具头仿真与静态加载试验对比情况如图 11 所示，随着下压量的增大，接触面积增大，当抛光接触区直径为 14~24 mm 时，仿真与实际得到的抛光正向力和接触压强分布情况一致；抛光接触区直径在 25~34 mm 之间时，仿真与实际得到的抛光正向力的趋势开始有所差异，这是由于随着下压量的增大，气囊工具头的球冠变形也随之加剧，可能导致气囊金属层发生塑性变形，与仿真模型中金属层的线弹性材料假设不符，由于目前 *R*80 气囊常用的抛光接触直径为 18~23 mm，处于本模型预测精度较高的区间内，因此，抛光预测精度符合实际工程需要。

4.3 磨-抛状态监测系统工艺验证试验

针对本文提出的磨抛装备状态监测系统，开展光学元件磨削与抛光工艺流程状态监测试验。对陡度 26°口径 150 mm 的熔石英物镜元件毛坯进行磨削与气囊修形抛光试验，元件的有效通光口径为 100 mm，因此加工区域设定为 100 mm 口径。其中，磨削工艺中，主轴转速为 1500 r/min，进给深度为 3 μm，进给速度为 4 mm/min，采用 200 mm 直径砂轮磨削。气囊抛光工艺中，进给速度恒



（a）单纯上电　（b）主轴转速1003 r/min，工作台不移动

（c）主轴转速1003 r/min，工作台移动3500 mm/min　（d）主轴转速1003r/min，工作台移动 3500mm/min，磨削深度 0.03 mm

图9 主轴振动信号

Fig.9 Spindle vibration signal`

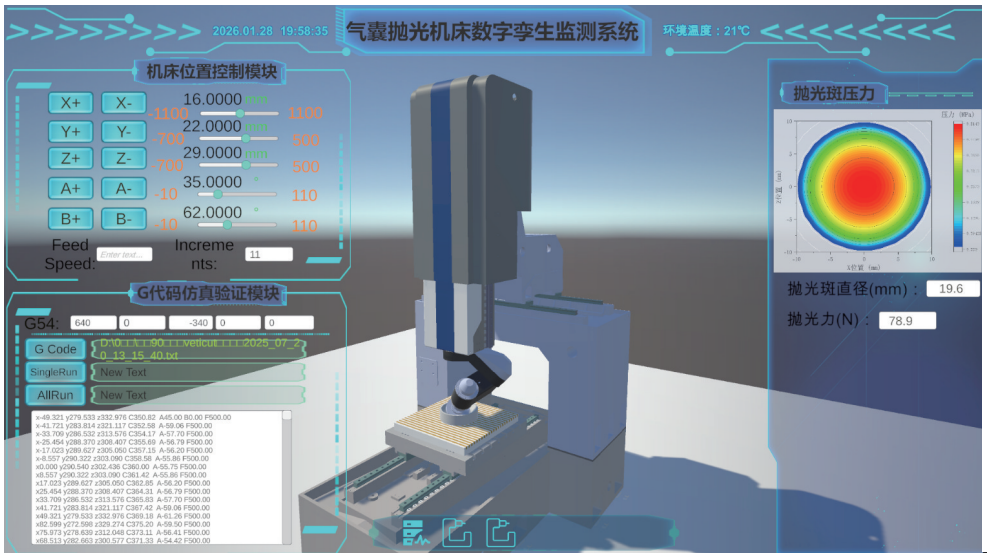
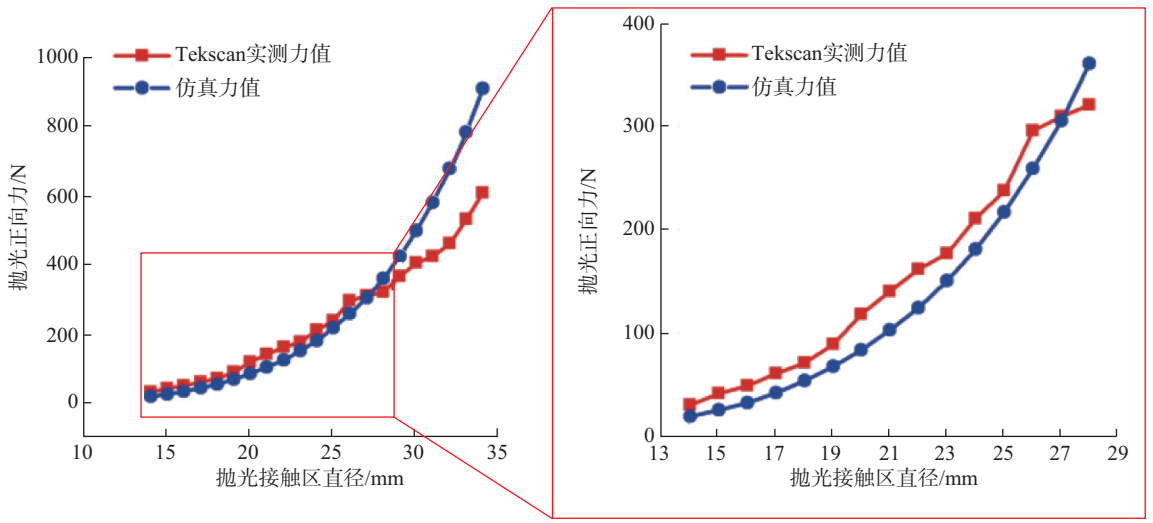
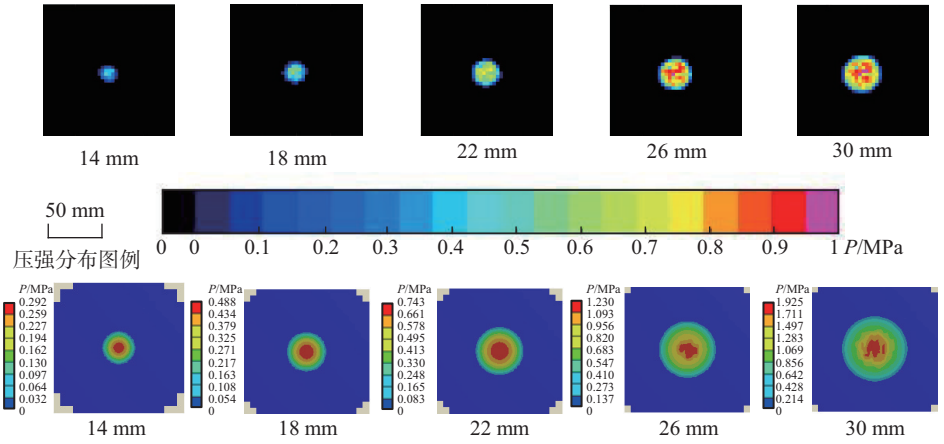


图 10　气囊抛光机床监测界面

Fig.10　Monitoring interface of bonnet polishing machine tool



（a）抛光正向力随接触区直径变化曲线图



（b）仿真与试验气囊不同下压量下的接触压强分布情况

图 11　*R*80 mm 气囊工具头仿真与试验结果对比

Fig.11　Comparison of simulation and experimental results for the *R*80 mm bonnet tool

定，转速为1000 r/min，进动角为23°，充气气压为0.1 MPa，抛光斑直径预设为20 mm。图11中，监测系统根据读取到的实时抛光力值预测抛光斑直径为19.6 mm，与预设的20 mm偏差仅为2%，说明数字孪生系统可以有效辅助抛光工艺过程监测。

图12为熔石英物镜元件磨削与抛光后的结果，物镜元件毛胚磨削后面形PV值为1.3064λ(λ = 632.8 nm)，RMS为0.2307λ。经过进一步抛光后，元件的面形PV值为0.8469λ，RMS值为0.1815λ，面形收敛比为35.2%，收敛效果良好。

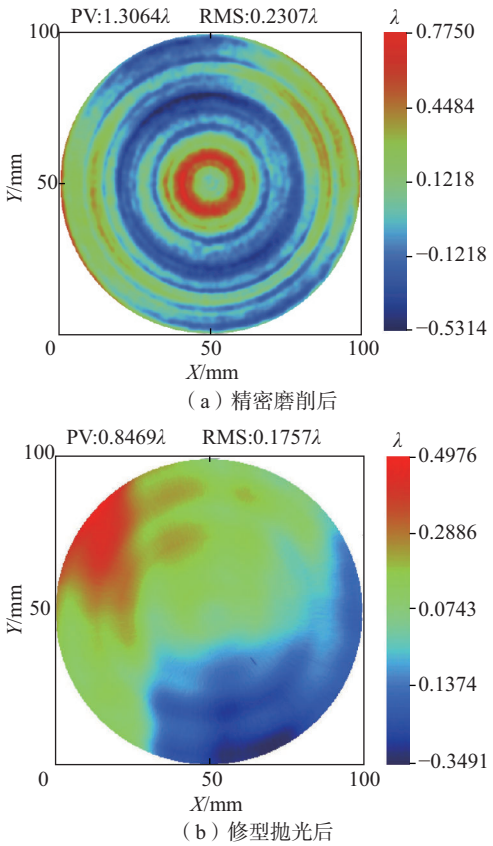


图12　熔石英物镜元件气囊修型快速抛光结果

Fig.12　Results of rapid bonnet figure correction for the fused silica lens element

5　结论

从保障非球面强激光光学元件磨抛工艺的稳定性出发，以国产化UPG80超精密磨削机床和BP480气囊抛光机床为对象，搭建覆盖完整磨抛工艺链的装备与工艺监测系统，实现了面向磨抛装备服役过程的健康状态实时监测、数据存储分析与工艺预测功能。

（1）系统设计上，通过NC-Link协议与机床建立通讯，基于国产化硬件采集平台，获取机床内外部状态数据，并通过数据库实现对机床服役过程状态数据的存储和管理。

（2）通过超精密磨削机床典型工况下的监测系统性能测试、抛光机床*R*80 mm气囊工具头抛光斑稳定性试验、磨-抛工艺试验验证系统功能。试验结果表明，系统可实时监测机床振动、温度、油膜性能、抛光压力等关键指标，实现抛光斑压力分布预测与可视化呈现，并能通过数字孪生系统有效提升抛光精度与效率，为磨抛工艺链的数据互通与工艺优化提供数据支撑和研究参考。

参 考 文 献

[1]　蒋庄德, 李常胜, 孙林, 等. 高端光学元件超精密加工技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 131–141.

Jiang Zhuangde, Li Changsheng, Sun Lin, et al. Ultra-precision machining technology and equipment for high-end optical elements[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 131–141.

[2]　王振忠, 施晨淳, 张鹏飞, 等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23–56.

Wang Zhenzhong, Shi Chenchun, Zhang Pengfei, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 23–56.

[3]　郭隐彪, 彭云峰, 王振忠, 等. 大口径光学元件的精密磨抛与检测装备开发及应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(6): 26–35.

Guo Yinbiao, Peng Yunfeng, Wang Zhenzhong, et al. Development and application of precision grinding/polishing and measurement equipment for large-size optical components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(6): 26–35.

[4]　段昭, 姚潇潇, 徐卫刚, 等. 基于FPGA与卷积神经网络分析的机床状态监测系统[J]. 制造技术与机床, 2024(11): 22–26.

Duan Zhao, Yao Xiaoxiao, Xu Weigang, et al. A machine tool state monitoring system based on FPGA and convolutional neural network analysis[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(11): 22–26.

[5]　马洋洋. 基于ARM+FPGA的滚动轴承状态监测系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.

Ma Yangyang. Research on rolling bearing status monitoring system based on ARM+FPGA[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[6]　Bo L, Di X, Chen G H. Design of extensible multi-source signal acquisition device based on DSP and STM32[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2019, 61(1–2): 118–126.

[7]　Martins A, Lucas J, Costelha H, et al. CNC machines integration in smart factories using OPC UA[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 34: 100482.

[8]　Liu C, Vengayil H, Lu Y Q, et al. A cyber-physical machine tools platform using OPC UA and MTConnect[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 61–74.

[9] 胡天宇. 面向数控机床加工过程的三维可视化监控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

Hu Tianyu. Research on 3D visualization monitoring for CNC machine tool processing process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[10] 庄博文, 姚振强, 侯志保. 基于LabVIEW的大型内外圆磨床监测系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(5): 40–43, 50.

Zhuang Bowen, Yao Zhenqiang, Hou Zhibao. Design of online monitoring system for large internal and external grinding machine based on LabVIEW[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024 (5): 40–43, 50.

[11] Li G, Bao Y, Wang H, et al. An online monitoring methodology for grinding state identification based on real-time signal of CNC grinding machine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110540.

[12] Li G, Lu H X, Wang H, et al. A visualization method for cross-scale online monitoring of grinding state based on data-mechanism hybrid-driven digital twin system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 225: 112293.

[13] Surindra M D, Ahmad Fanshuri Alfarisy G, Caesarendra W, et al. Use of machine learning models in condition monitoring of abrasive belt in robotic arm grinding process[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025, 36(5): 3345–3358.

[14] Zhang B, Katinas C, Shin Y C. Robust wheel wear monitoring system for cylindrical traverse grinding[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(5): 2220–2229.

[15] Duan J S, Cao G H, Ma G Q, et al. Research on on-line monitoring of grinding wheel wear based on multi-sensor fusion[J]. Sensors, 2024, 24(18): 5888.

[16] 孙巍伟, 黄民, 何一千, 等. 多传感器信息融合的刀具磨损状态智能监测系统[J]. 机床与液压, 2024, 52(17): 222–228.

Sun Weiwei, Huang Min, He Yiqian, et al. Intelligent monitoring system for tool wear based on multi-sensor information fusion[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(17): 222–228.

[17] Liu C W, Chen H C, Lin S C. Acoustic emission monitoring of grinding-polishing of extra-low dispersion lens[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24(1): 53–60.

[18] De Agustina B, Marín M M, Teti R, et al. Surface roughness evaluation based on acoustic emission signals in robot assisted polishing[J]. Sensors, 2014, 14(11): 21514–21522.

[19] Pan R, Zhao W Y, Zhong B, et al. Evaluation of removal characteristics of bonnet polishing tool using polishing forces collected online[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 393–401.

[20] Li S Y, Wang Z, Wu Y L. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1–3): 34–41.

[21] 彭云峰, 何佳宽, 黄雪鹏, 等. 光学元件超精密磨抛加工技术研究与装备开发[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220097.

Peng Yunfeng, He Jiakuan, Huang Xuepeng, et al. Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(4): 220097.

[22] 张伟, 李洪玉, 于国彧. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 27–34.

Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 27–34.

[23] 范伟. 智能加工单元机床状态监测及健康评估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.

Fan Wei. Condition monitoring and health assessment of machine tools in intelligent machining cells[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[24] 刘祖辉, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 基于平均压强一致性原则的大尺寸气囊工具头优化设计[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(2): 215–222.

Liu Zuhui, Wang Zhenzhong, Huang Xuepeng, et al. Optimal design for large-size bonnet based on the principle of consistency of average pressure[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2022, 61(2): 215–222.

[25] Shi C C, Wang Z Z, Peng Y F, et al. Quasi-static kinematics model for motion errors of closed hydrostatic guideways in ultra-precision machining[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 90–102.

[26] 张云, 曹聪, 姜忠, 等. 液体静压导轨油膜结合面误差对导轨几何误差的影响机制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63 (1): 52–61.

Zhang Yun, Cao Cong, Jiang Zhong, et al. Influence mechanism of the oil film contact surface error of the hydrostatic guide rail on the geometric error of the guide rail[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(1): 52–61.

[27] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161–177.

Yuan Julong, Zhang Feihu, Dai Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161–177.

[28] 姜涛, 郭隐彪, 王詹帅, 等. 光学元件气囊抛光去除效率影响因素研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 12–15.

Jiang Tao, Guo Yinbiao, Wang Zhanshuai, et al. Research on influences of removal rate for optical component in bonnet polishing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43 (1): 12–15.

[29] 王春锦. 大口径光学元件的半柔性气囊高效抛光技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015.

Wang Chunjin. Study on efficient polishing technology of large aperture optical components with semi-flexible airbag[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.

[30] 张翊, 郭隐彪, 庄司克雄. 微小振动影响超精密非球面加工精度的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003, 23(3): 17–20.

Zhang Yi, Guo Yinbiao, Zhuang Sikexiong. Influence of chatter vibration on the ultraprecision machining accuracy of aspheric surface[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2003, 23(3): 17–20.

[31] Bryan J. International status of thermal error research (1990)[J]. CIRP Annals, 1990, 39(2): 645–656.

Grinding and Polishing Equipment and Process Monitoring Technology for High-Power Laser Optical Components

WANG Zhenzhong[1,2], MIAO Xiandi[1,2], LU Feng[1,2], CHEN Jiaying[1,2], HUANG Donghan[1,2], BI Guo[1,2]
(1. Innovation Research Institute of Xiamen University in Tianfu New Area, Sichuan Province, Chengdu 610213, China;
2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

[ABSTRACT] The growing demand for precision in aspheric high-power laser optical components imposes higher requirements on the reliability of ultra-precision grinding and polishing equipment and the stability of the process. As a critical tool for guaranteeing equipment performance, the monitoring system has become an integral component of ultra-precision manufacturing equipment. Considering the strong correlation within the manufacturing process of non-spherical optical components, a dedicated monitoring system targeting the entire grinding-polishing process chain was designed and implemented during the development of the domestically produced UPG80 ultra-precision grinding machine and BP480 bonnet polishing machine, thereby the barrier of standalone monitoring for individual machines was broken. The system establishes data communication with the machines via the NC-Link protocol, builds a signal acquisition platform based on domestically produced hardware, and utilizes digital twin technology to collect and monitor key parameters such as the state of the hydrostatic guideways, grinding fluid circulation system, and polishing removal function. To validate the system functions, performance tests of the monitoring system were conducted under typical operating conditions of the ultra-precision grinding machine. Additionally, stability experiments of the polishing spot using an *R*80 mm bonnet tool were performed on the polishing machine. The results indicate that real-time monitoring of key machine indicators, such as vibration, temperature, and oil film strength, along with operating condition characteristics, is achieved by the system. Furthermore, the prediction and visualization of the polishing spot pressure distribution are realized, and the polishing process is concurrently assisted by the digital twin system, thereby providing data support and technical references for data interoperability and optimization of the grinding-polishing process chain.

Keywords: Ultra-precision grinding machine tool; Bonnet polishing machine tool; Process monitoring; NC-Link; High-power laser optical components

（责编　晓月）