

精密磨削机床智能监测系统 开发与应用*

毕 果,汤期林,王振忠,杨 平,杨 炜,彭云峰,郭隐彪

(厦门大学航空航天学院,厦门 361005)

[摘要] 以大口径光学元件精密与超精密磨削为监控对象,搭建磨削机床智能监测系统,探索智能磨削监控共性技术。监测系统以 NI-PXI 为主要运行硬件平台,建立与数控系统的通信,以机床内部、内置和外置传感器相结合的方式,自动获取机床运行过程和磨削加工过程的重要动态过程信号以及其他相关数据,通过对磨削机床全生命过程延伸数据体系的管理与分析,实现机床热平衡监测与热误差补偿、磨削液循环监控以及砂轮磨削性能退化在线评估等目标,以智能监控方式确保磨削机床长期平稳运行和加工质量稳定。

关键词: 智能监测系统;精密与超精密磨削;磨削机床;加工过程监测;大口径光学元件;金刚石砂轮

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.032



毕 果

博士、副教授,主要研究方向为智能制造共性技术、先进装备制造与精密工程。

非球面光学元件具有优异的光学特性,广泛应用于大型天文望远镜、卫星用光学系统、激光核聚变装置等高端科技领域。随着这些领域对光学系统性能要求的不断提高,非球面光学元件在口径、面形精度、表面及亚表面质量等方面的技术参数指标也节节攀升。在质与量的双重考验下,光学元件制造装备面临重大挑战,不仅需要兼顾精度与效率,更重要的是保持装备的长期可靠运行和加工质量稳定。西方发达国家将可靠性与精度保持性作为衡量高端光学元件制造水平的重要指标,我国也在“十三五国家科技创新规划”中明确将提升可靠性和精度保持性作为制造装备的发展重点^[1]。金刚石砂轮磨削不仅是大口径光学非球面的主要加工工艺过程,其加工质量更决定了后续抛光去除损伤层的耗

时问题,磨削加工装备与加工过程稳定可控成为精密与超精密磨削机床性能提升的核心问题。

硬件系统的性能提升是确保制造装备的可靠性和精度保持性的重要方面,精密与超精密磨床普遍采用创新型的结构设计,确保其具有优越的动静态性能。德国弗劳恩霍夫制造技术研究所基于紧凑型设计原则开发了五轴磨床,紧凑型设计是指将功能部件置于一个更小的空间,通过缩小机床总体尺寸来降低热误差和阿贝误差等误差因素^[2]。英国 Cranfield 精密加工中心研制的 BoX 超精密磨削机床,采取封闭箱体结构确保超高的静刚度和动刚度,直线运动分辨率 1nm,旋转运动分辨率 0.01",机床采用优良导热材料,具备闭环温度反馈功能,实现 $\pm 0.1^\circ$ 的温度误差控制,加工米级自由曲面光学玻璃或陶瓷材料面形精度达到 $1\mu\text{m}$,亚表面损伤 $2\sim 5\mu\text{m}$ ^[3]。该中心研制

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX 04022001-207)。

的 OAGM-2500 多功能三坐标联动大型磨床,采取油膜轴承确保运动的平稳控制,并在整个加工空间针对几何和热误差进行动态补偿,以确保磨床长期稳定加工精度^[4]。Lindsey^[5]提出了四面体的机床结构,极大改善了机床的动态刚度,借助于这一创新型结构,Zhao 等^[6]设计了四面体磨床,避免了砂轮不均匀磨损引起的砂轮高频谐波振动,从而显著改善了硬脆性材料的加工质量。

虽然结构优化与创新设计可以大大提升机床性能,但由于在加工和装配方面的技术难度,以及开发成本问题,传统结构的机床仍然会在相当长的时间内占有很大的市场份额,并且已有机床也迫切需要有效的方法和手段提升其加工性能和可靠性。对于高精度磨床而言,稳定高质量磨削的实现涉及两个方面:首先磨床本身的运行过程需要平稳可靠;其次磨削工艺过程需要稳定可控。在磨床运行过程中,各移动部件难以避免的出现受力变形、摩擦热变形、振动误差等问题,造成机床定位精度和动态性能的降低,从而影响到加工精度和表面质量。磨削工艺过程相比于切削等确定性刀具加工更为复杂,金刚石砂轮磨削是众多在空间上随机分布、切削能力各异的切削微刃综合作用的结果,砂轮与工件干涉行为复杂多样,且随着去除材料体积的增加,砂轮表面磨粒会出现不同情况的磨损、崩碎、剥落等现象,量变的累积引起宏观上砂轮磨削性能退化的质变,磨削质量波动在所难免。借助于传感检测技术,获得磨床运行过程和磨削加工过程动态过程信号,建立信号特征与机床误差及砂轮性能的关系,实施在线监测与反馈控制,是现有硬件条件下实现稳定质量高精度磨削的主要手段^[7]。

目前,监测系统已经成为精密与超精密磨床的必要组成部分。磨削过程的复杂性以及精密与超精密磨

削对精度和质量的高要求,是磨削制造装备智能化成为高可靠性质量控制得以实现的根本。自从 2006 年日本 MAZAK 公司提出“智能机床(Intelligent Machine)”的新一代高档数控机床,“智能化”成为信息技术和制造装备相融合的热门发展方向。在人工智能和工业大数据的推进下,通过对机床、加工过程以及环境等信息的全面获取与综合分析,完成机床与刀具状况的自我感知和自我学习,实现加工性能评估与加工行为优化,成为智能监测系统的终极目标^[8]。在磨削装备智能监测方面,Narita 等^[9]提出面向未来的机床(Future Oriented Machine Tools, FOMT)创新理念以用于智能制造,主要包括管理、预测、监视和决策 4 个功能模块,涉及机床从设计到使用的完整生命周期。Xu 等^[10]指出可以通过桌面型系统和嵌入式系统两种方式实现磨床的智能化改造,桌面系统更加关注于工具优化和参数选择,而全面的实现智能磨床的理念则需要更为开放的数控系统中,将监测与控制融合一体。Morgan^[11]开发了集成于 CNC 的智能磨削辅助系统,以数据库为基础,通过对磨床、材料、砂轮、冷却液、加工过程等全方位数据的存储和分析,实现磨削参数和砂轮修整周期优化,以及避免磨削烧伤问题。

本文主要介绍了厦门大学微纳加工与检测联合实验室在大口径光学元件磨削监控技术方面的研究进展,以实验室开发的大口径光学元件精密磨削机床 UPG80 为具体监测对象,搭建精密磨床智能监测系统,对机床全生命周期中的动态信号和相关数据进行采集、分析与管理,确保机床安全平稳运行,维持磨削质量稳定。监测系统利用高性能的 NI-PXI 系统搭建监测硬件平台,以 SQL Server 数据库为底层支撑,在 Labview 环境下编写监测软件,采取内部、内置与外置传感器相结合的方

式,获取磨床运行过程和磨削加工过程中的振动、温度、压力、流量、声发射等多种信号,监测系统还通过与数控系统的通信获取磨床运行参数以及关键部件内部传感器数据等重要信息,在磨床全生命周期大数据的基础上,实现智能磨削的最终目标。本文将从监测方案、监测软件构成以及具体监测目标 3 个方面详细介绍精密磨床智能监测系统。

监测方案

1 总体思路

首先针对具体磨床,确定监测对象和监测方案。UPG80 超精密磨削机床采用立柱移动式卧轴矩台平面磨床结构,床身和底座分体铸件呈 T 形布局,砂轮主轴采取液体动静压轴承支撑,确保高回转精度和运动平稳性,各轴传动系统由伺服电机带动高精度滚珠丝杠,X、Y 方向采用拼块式液体静压导轨,并通过纳米级分辨率的线性光栅构成全闭环控制回路。机床数控系统采用西门子 840D-DSL 基于 Windows 操作平台,实现四轴数控。磨床的辅助系统包括冷却系统、过滤装置、润滑系统、油水雾净化装置。

监测系统主要针对磨削干涉过程和机床运行过程进行监测。在金刚石砂轮与光学硬脆性材料磨削干涉的过程中,砂轮表面磨粒与工件挤压、刮擦、碰撞等的复杂相互作用会产生磨削力、磨削振动、磨削升温以及声发射等物理现象。机床运行方面,机床受力变形、运动部件振动、导轨摩擦升温,磨削液压力与流量,以及主轴和电机等部件的内部信号等,都能一定程度上反映机床的运行状况。综合考虑,采取外置传感器的方式获得机床温升形变、动部件振动和磨削过程信号,以内置传感器的方式获得磨削液循环管路信号,主轴和电机等关键部件运行情况则直接利用其自带的内部传感器,外置传感器信

号直接由监测系统采集硬件获得,内置传感器、内部传感器信号和其他加工参数等,则以数控系统为桥梁输入采集系统。

监测系统总体构架如图1所示,以美国NI公司PXI平台为基础构建监测系统,主要模块包括:8槽3U PXI Express机箱PXIe-1082,双核PXI控制器PXIe-9135,3张8通道PXIe-4492同步采集卡,最大采样率204.8kHz,模块具有24位模拟输入和IEPE恒定电流信号调理,用于多路振动信号的同步采集,1张4通道PXI-6115多功能I/O模块,最大模拟量输入采样频率达到10MHz,用于超高频声发射信号采样需求。PXI控制器通过485串行总线实现低频信号的采集和传输,数控系统内部存储数据,包括内置和内部传感器获取的机床运行状态数据以及加工参数等,由数控系统OPC服务器通过以太网口输送给PXI控制器。监测系统以SQL Server数据库为支撑,实时获取并管理磨床使用过程中的所有静态和动态数据,实现机床运行状态监测、砂轮磨削性能评价和机床热误差补偿。

2 监测对象

加工装备的监测信号类型主要包括振动、温度、力、声发射、功率、流量、压力等^[12-14],这些信号均在一定程度上反映了装备及加工状态信息,且各有利弊。磨床监测系统从高可靠性和实时性出发,尝试以精简的系统实现监测目标,以下针对所选择的主要监测对象,在测点布置、选型以及监测优势等方面进行详细描述。

2.1 振动信号

砂轮和工件的磨削干涉、各轴电机以及其他部件运动等均会产生振动,影响机床精度和加工质量。在各轴电机输出端布置振动传感器,以监测机床内部振源振动情况。砂轮与工件的磨削振动最终将反映在工件上,在工件表面形成振纹,同时使得

亚表面损伤深度加深。工件表面法线方向是振动误差敏感方向,高速旋转的砂轮主轴系统相对于工作台而言,是其主要产生来源,另外砂轮主轴振动对于机床长期稳定运行也至关重要,为此将对主轴振动进行重点监测。另外,对于机床辅助系统的振源,为了减小振动影响,在机床设计时已将附属设备与机床本体进行了隔离,附属设备和环境振动属于机床地基振动,在底座布置传感器对机床外部振源进行监测。综上,在主轴前后端、立柱电机以及底座电机、工作台表面和工作台底座等共6个位置布置PCB356A17三轴加速度传感振动器,传感器的频响范围为0.5~3kHz,获得每个测点的X、Y、Z3个方向共18路振动信号,对机床及环境振动情况进行监测。

2.2 温度信号

机床内外热源会导致机床组成部分发生热变形,从而引起机床加工误差。热误差约占机床误差的40%,机床精度越高,热误差比重越大^[15]。机床放置于恒温车间,环境热辐射等外部热源对加工精度的影响可忽略不计。磨床内部热源主要包括磨削热、运动部件摩擦热、电机及液压系

统生热等。其中,磨削干涉作用产生的热量绝大多数通过冷却液循环系统带离机床本体,而其他机床正常运转产生的热量则是结构部件变形的决定因素,是机床热误差控制的主要考虑对象。为此,整机温度监测主要考虑机床运动引起的升温现象。机床主要运动形式是X、Y、Z三轴的移动以及电主轴的旋转运动,选择16个位置布置温度传感器,温度传感器型号为CT100,测温范围为0~80℃,精度±0.03℃,传感器具体位置如图2所示,测点位置描述如表1所示。

2.3 声发射信号

声发射信号是材料在受到外荷载作用时,内部储存的应变能快速释放产生的弹性波^[16-17]。加工过程中,工具和工件表面的各种干涉行为会产生丰富的声发射信号,声发射信号是公认的最能灵敏表征加工过程的动态信号^[18-21]。但是,声发射信号在实际监测应用中也存在一些问题,其随机性大,且容易受到加工条件的影响,几十到几百kHz的频率范围也给实时监测的实现带来一定困难。现有研究表明,硬脆性材料破裂尺度与声发射频率存在一定关系^[22-24],对于金刚石砂轮磨削光学

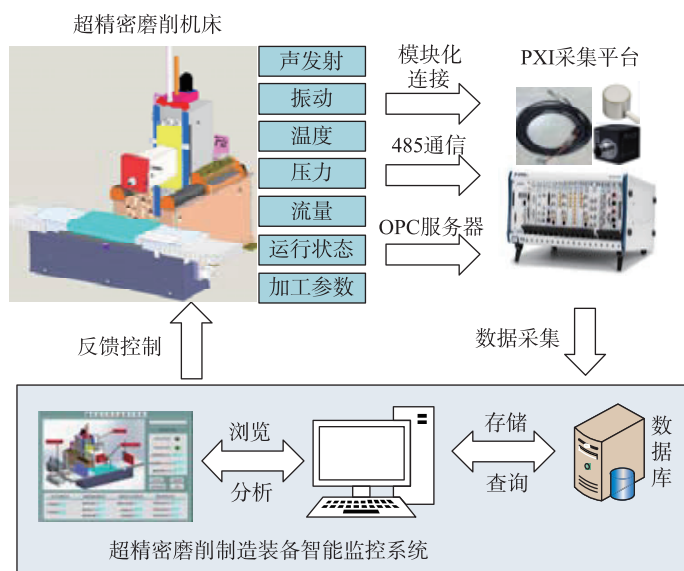


图1 磨削机床智能监测总体构架

Fig.1 Intelligent monitoring system of grinding machine

材料而言,砂轮表面磨粒对工件的切削、刮擦和挤压等多种作用造成材料不同尺度的破裂,从而释放不同频率的声发射弹性波。为全面掌握砂轮磨削过程的微观干涉行为,监测系统选择低频和中高频两种响应范围的声发射传感器,以确保全面获取不同磨损程度砂轮磨削光学材料的声发射信号。选择美国物理声学所的R6A和R50A声发射传感器安装在工件定位挡铁的侧面,传感器响应范围分别是35~100kHz和100~700kHz。

2.4 其他信号

以上讨论的振动、温度和声发射信号属于外置传感器获取的信号,UPG80超精密磨削机床采用模块化设计,主轴和静压导轨等模块均配备内部传感检测单元,反映了机床安全运行情况,为了更加全面统一掌握和管理磨床运行数据,监测系统需要获取这些内部传感器的信号,主要是主轴和各静压导轨的油温与油压等。另外,磨削液循环系统也至关重要,在供液故障或压力流量不达标时,不仅影响磨削质量,还会造成砂轮和工件严重损伤,为此需要对磨削液循环

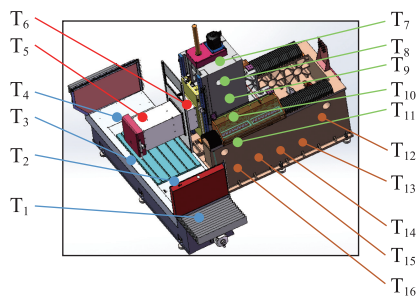


图2 温度测点示意图

Fig.2 Illustration of temperature points

表1 温度测点说明

Table 1 Location of temperature points

传感器编号	测点位置
T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	工作台 X 轴(电机、轴承座、螺母、导轨)
T ₅ , T ₆	主轴(砂轮、电机)
T ₇ , T ₈ , T ₉ , T ₁₀ , T ₁₁	立柱 Y 轴(电机、轴承座、螺母、导轨)
T ₁₂ , T ₁₃ , T ₁₄ , T ₁₅ , T ₁₆	底座 Z 轴(电机、轴承座、螺母、导轨)

系统中各关键位置的温度、流量、压力等进行实时监测,存在严重问题及时自动停机。因此,在磨削液池中布置液位和温度传感器,在磨削液过滤器进出口安装压力传感器,在磨削液机床入口处安装流量传感器,对磨削液循环系统进行全面监测。磨削液监测系统较之其他监测信号而言较为独立,且需要数控系统实时响应,在液位、流量、压力等低于阈值时,及时停机中断加工,因此,磨削液循环系统传感检测数据借助于数控系统的PLC扩展模块获取,再以数控系统为桥梁传输给PXI监测平台进行存储、管理和反馈。

监测系统

1 监测系统运行模式

监测系统设计有3种运行模式:上电模式、加工模式和干预模式。上电模式是机床上电但未加工状态下的监测模式,各关键模块正常运行以及机床热平衡监测是主要目标,为此仅对各路外置的温度传感器、机床各模块内部传感器、以及磨削液循环系统的内置传感器进行监测。监测系统以砂轮主轴转速信号为触发,自动由上电监测模式转换为加工监测模式,对所有测点进行实时监测。干预模式则为了满足用户针对性的特殊采样要求,用户需要预先确定采取干

预模式的测点和通道,并设置采样参数及存储参数,完成信号采集和保存后,自动恢复到加工模式,对于未采取干预模式的通道,在干预模式下仍然按照加工模式的监测条件进行监测。监测系统运行模式流程如图3所示,监测模式根据机床状态和用户要求自动切换,确保机床运行过程中所有相关数据的自动获取和管理。

2 监测系统软件构架

基于Labview软件搭建监测系统,主要构架如图4所示,首先进入登录界面,系统根据用户权限登录系统,然后检测硬件并进行初始化,再根据不同用户权限进入参数设置界

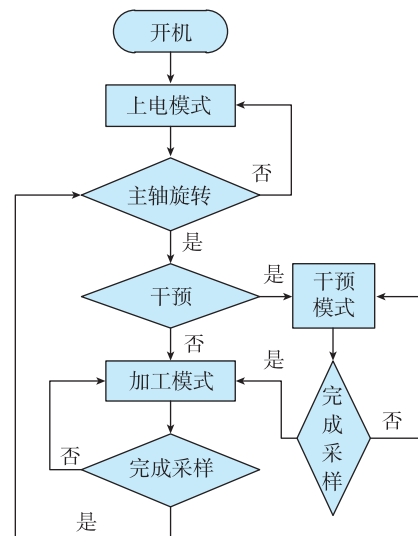


图3 监测系统运行模式

Fig.3 Flow chart of monitoring

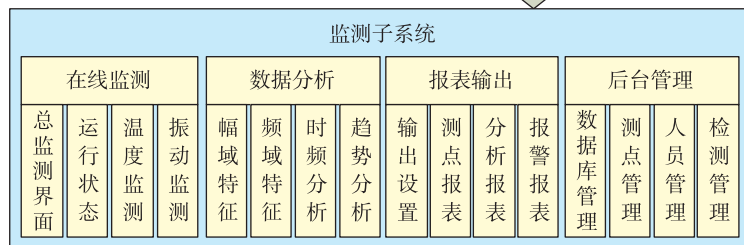
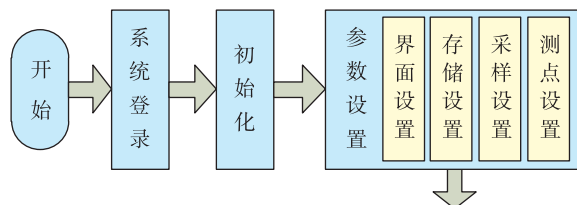


图4 监测系统软件结构框图

Fig.4 Software structure of monitoring system

面。参数设置模块主要包括：界面设置、存储设置、采样设置和测点设置等5个子页面。界面设置主要是用户个性化显示参数设置。采样设置用于设置上电模式和加工模式下各测点和通道的采集样本时间间隔、样本采样频率和采样点数等。测点设置用于选择需要监测的测点和通道。存储设置用于设定历史数据和干预采集数据的默认存储地址和文件类型。图5为部分参数设置子界面。

参数设置完毕后进入各监测子系统。监测系统包括在线监测、数据分析、报表输出和后台管理4个模块。在线监测模块用于实时显示监

测数据，总监测界面显示机床安全运行相关的重要实时数据，以及用户个性化定制的重点关注测点和通道；运行状态监测界面显示通过数控系统获得的所有内部和内置传感器数据；温度监测界面显示所有外置温度测点当前温度值以及温度变化趋势，并根据数据库预先存储的阈值进行温度测点报警；振动监测界面可以查看所有振动测点实时数据，同一测点的多个通道数据用不同颜色显示在1个坐标系中，显示样本原始数据的同时利用快速傅里叶变换对当前监测信号进行频谱分析和界面显示，便于观察其频域特征变换，图6为部分监测界面。

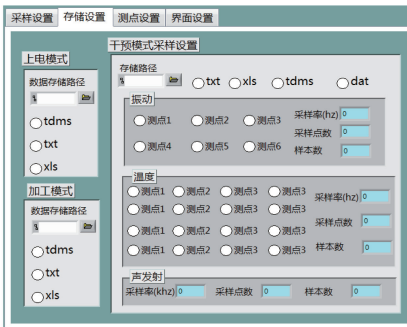
数据分析模块主要用于历史监测数据的回放与分析。模块可根据用户诉求从数据库中调出样本数据，对其进行滤波、幅域分析、时域分析、频谱分析、趋势以及短时傅里叶变换和小波分析等时频分析，也可将数据另外分为多种格式文件，以便利用专业软件进一步分析。报表输出模块将测点信息、数据分析、报警信息

等以图文的形式输出成相应的Word文件。后台管理模块主要负责数据库管理、测点管理、人员管理和离线检测数据管理等。数据库管理主要包括更改数据库结构和数据压缩机制等功能，测点管理主要用于新建和修改测点配置，人员管理是对系统各类用户信息的管理。离线检测数据管理主要用于将砂轮形貌在位检测和工件表面质量检测等离线数据输入数据库，全方位保存机床延伸数据，图7为部分后台管理界面。

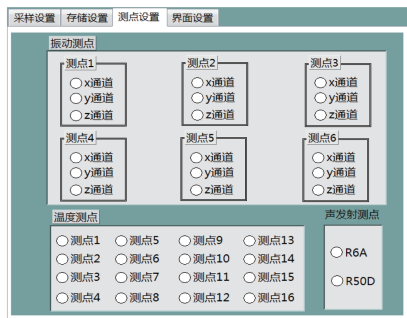
监测系统设置3种权限用户：普通用户、专家用户和管理员。普通用户具有在线监测、数据分析和报表输出3个子系统的所有权限，在参数设置模块仅具有界面设置和存储设置权限，专家用户除了具有普通用户权限外，还具有采样设置和测点设置权限，能够对采样条件进行更改，并选择所要监测的测点和通道，还能够进入检测管理界面对离线数据进行输入操作。管理员用户具有最大权限，享有所有界面和子系统的浏览和操作权限。



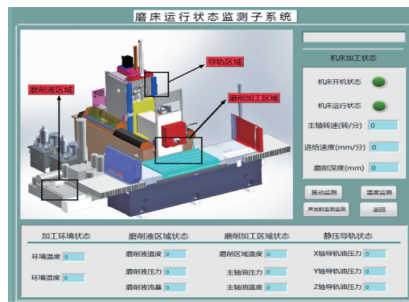
(a)子界面 1



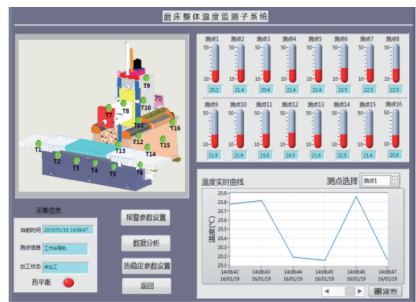
(b)子界面 2



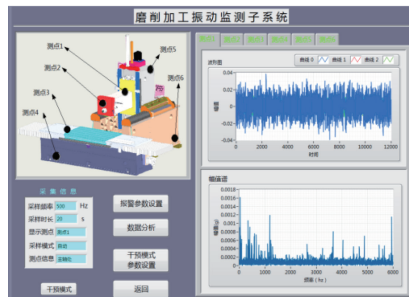
(c)子界面 3



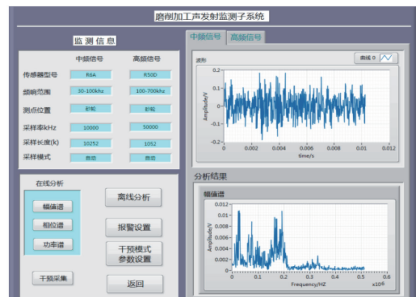
(a)运行状态监测



(b)温度监测



(c)振动监测



(d)声发射监测

图5 参数设置界面

图6 在线监测子系统界面

Fig.5 Interfaces of parameter setting modules

Fig.6 Interfaces of online monitoring modules

3 监测数据库平台

基于 SQL Server 建立磨床在线监测系统支撑数据库,监测数据库如图 8 所示,主要包括实时数据库、历史数据库、报警信息库、设备信息库、检测信息库以及人员管理库等子库。实时数据库用于存放各类在线监测动态信号和基本监测特征,为保证在线监测的实时性和系统运行流畅性,在线监测的样本数据首先以 TDMS 格式存储为硬盘临时文件,再由另一线程实现数据文件到实时数据库的转换,实时数据库仅保存近 24h 内的监测数据。历史数据库用于存放监测历史数据,按照日、周、月、年对历史监测数据进行逐级压缩,减少高相似度数据的过冗余,实现数据的网格化保存,既减少了系统运行成本,又实现机床性能发展过程信息的全记

录。报警信息数据库存放报警阈值、报警原始数据和特征以及报警处理结果,系统采取 3 级报警机制,确保机床安全运行的同时尽可能维持加工质量的稳定。设备信息库存放机床静态信息、砂轮使用及修整情况、加工工件信息以及监测测点等静态信息。检测信息库存放砂轮表面形貌和工件加工质量参数等在线或离线检测数据。人员管理库记录各类用户浏览和操作监测系统痕迹信息,便于安全检查和责任管理。

监测目标单元技术

1 磨削液监控

磨削液监控系统示意图如图 9 所示,监控对象包括磨削液的温度、液位、压力和流量。液位和温度传感器安装在磨削液池中,用于监测磨削

液池中的温度以及液位,当液位过低时及时报警。压力传感器分别安装于过滤器的进出口,磨削液经过过滤器之后会有压力的减弱。进出口的压力传感器能够监测磨削液经过过滤器后的压力变化,当压力减弱超出阈值时,及时发出报警信号。流量传感器安装于磨床入口处,该位置的流量就代表磨削加工区域的流量值,是直接反应加工区域磨削液流量的状态。以上传感器信号由数控系统的 PLC 模拟量输入模块实时获取数据,存储于 PLC 内部存储器中,数控系统可根据信号进行报警和停机响应。

利用 NI-OPC 服务器,可以将实时存储于 PLC 内部存储器的磨削液监测信号传输到 PXI 监测平台中。PXI 监测平台的控制器与 PLC 通过以太网进行连接,PLC 的内部存储



图 7 后台管理子系统界面

Fig.7 Interfaces of management modules

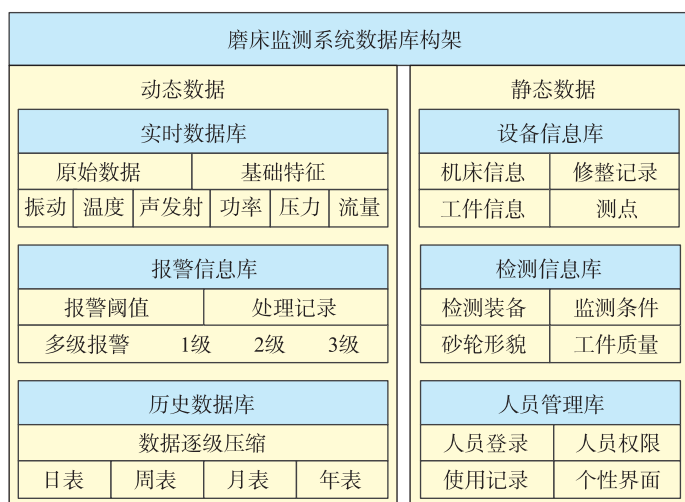


图 8 监测系统数据库

Fig.8 Database of monitoring system

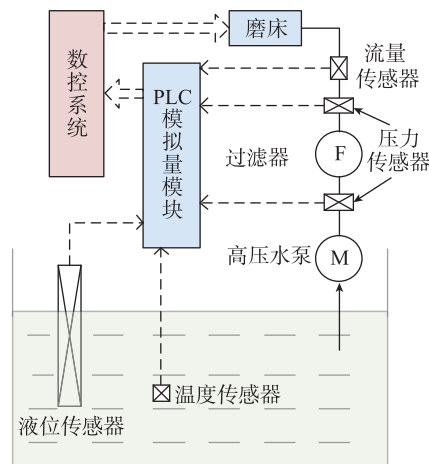


图 9 磨削液监控示意图

Fig.9 Schematic diagram of grinding fluid controlling

模块为每种存储数据都设置了存储地址,根据存储地址来访问数据,在NI-OPC服务器上设置PLC型号和连接方式以建立通信,通信成功后,在NI-OPC服务器上创建标签,设置标签对应于PLC的存储地址,监测系统控制器就可以获得数控系统的内部数据。其他内部传感器信号以及机床运行和加工参数也通过这种方式获取,保存到监测系统数据库中。

2 磨床热误差反馈补偿

热误差约占机床误差的40%,机床精度越高,热误差比重越大^[15]。磨床内部热源主要包括磨削热、运动部件摩擦热、电机及液压系统生热等,其中磨削干涉作用产生的热量绝大多数通过冷却液循环系统带离机床本体,机床结构部件热变形是热误差的主要来源。温度控制、热稳定性设计和热误差补偿是减小热误差的3种主要方法。美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)采取的油淋方式是目前加工机床恒温控制的有效手段,缺点是成本较高。热稳定性设计是在机床设计制造阶段,采取结构优化或热学特性优越的材料来提高机床的热稳定性。热误差补偿不需要改变机床结构,根据机床结构分析以及传感检测技术得到机床热误差,进行软件补偿是现有机床装备减小热误差的主要方式^[25-26]。

图10为UPG80超精密磨削机床测试阶段的热误差检测与温度测点采集,初步进行了水冷却、主轴运行和三轴导轨运行等基础条件下的检测试验,利用激光干涉仪获得不同时间节点的热误差,并同时采集重要位置的温度数据。后期将详细规划不同运动参数和加工参数下的实际磨床升温试验,以数据为基础建立磨床热误差模型,在加工过程中,采集温度传感器实时数据带入该模型,获得当前时刻磨床各轴热误差,取反得到补偿值,然后利用OPC服务器输入数控系统,通过数控系统中的坐标偏置功能实现各轴位置的实时补偿。

3 砂轮磨削性能监测

金刚石砂轮对光学表面加工质量起决定性作用,大口径光学非球面磨削加工属于高附加值加工过程,砂轮性能退化将会造成工件的磨削损伤,经济损失不可挽回,对砂轮磨削性能进行实时准确评估至关重要。声发射信号是公认的最能表征磨削干涉过程的动态信号,除此之外,砂轮磨损还会造成磨削力增加和磨削振动加剧等现象。虽然基于信息融合和机器学习模型可以实现砂轮磨削性能退化评估,但是从实时性和可解读性的角度,不利于实际监测的实施。为此,监测系统仅以最为直接的声发射信号为对象,尝试利用单一简单特征表征砂轮磨削性能的退化。

声发射信号对磨削过程的微观干涉行为反映灵敏,但是也同时具有高度随机、超高频以及受到加工参数影响等弊端。专注于光学材料精密与超精密磨削这一具体应用对象,研究声发射信号和砂轮磨削性能的对关系。精密与超精密磨削中,磨粒磨损是砂轮性能退化的主要原因,磨粒磨损造成切削刃钝化,切削能力下降,刮擦挤压作用增加,脆性材料的破裂尺寸有所增加,从而造成低频声发射能量比例的增加。以频域能量占比这种无量纲参数为特征,也有效避免了加工参数的影响。在实时监测过程中,首先对原始声发射信号进行低通滤波,然后计算频域能量占比,再利用主成分分析对频域能量占比特征进行降维,以降维后的少数主特征表征砂轮磨削性能退化情况。

图11为金刚石砂轮磨削熔石英光学玻璃的全生命过程磨削试验,在各时间节点上采集不同加工条件下的磨削声发射样本。从信号的时域波形和幅值谱上可以看出,声发射信号具有随机宽频的特点,同一节点不同加工条件下的声发射能量占比具有较高的相似度,说明该特征仅与砂轮状态有关,与加工条件无关。对能量占比特征降维后,第1主特征的贡献率接近90%,为此,利用第1主特征绘制砂轮磨削性能退化曲线。如图11所示,在第12节点之前,曲线

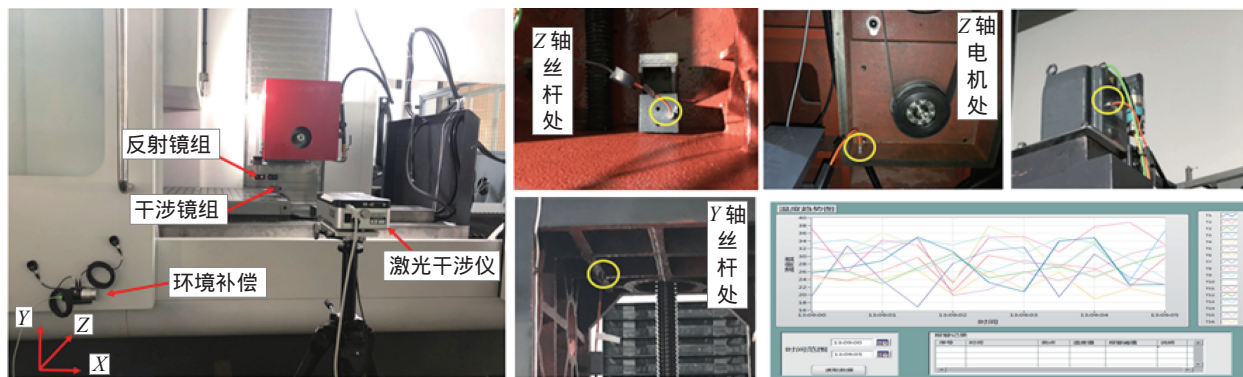


图10 UPG80超精密磨削机床热误差检测与温度监测

Fig.10 Thermal error detection and temperature monitoring of ultra precision grinding machine UPG80

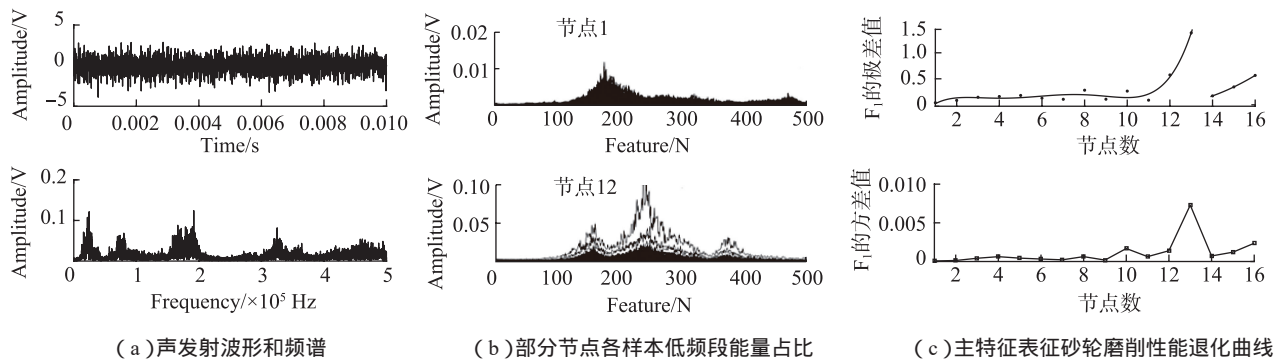


图11 砂轮磨削性能退化在线评估

Fig.11 Evaluation of grinding wheel performance degradation

基本保持水平状态,说明砂轮状态较为稳定,过了第12节点,即去除量达到 240cm^3 后,曲线上升趋势明显,说明砂轮磨削状态有了很大改变。同时观察同一节点下的各样本第1主特征方差发现,砂轮急剧磨损时,主特征方差数值明显增大。磨粒磨损加剧时会引起磨粒的崩碎或剥落,砂轮表面出现新切削刃,个别区域切削能力的恢复造成了所采集的声发射样本的差异性增加,从而造成主特征方差的增大,主特征数值的回落。对于精密与超精密磨削而言,砂轮磨削性能出现波动不利于磨削质量稳定,因此,当主特征持续增加,且方差波动显著时,判定砂轮磨削性能退化,需要进行更换和修整。

结论

精密与超精密磨削加工决定了大口径非球面光学元件的面形精度和生产效率,工艺过程的复杂性和对磨削装备性能的高要求使得监控系统成为新一代磨削机床不可或缺的重要组成部分,以厦门大学微纳加工与检测联合实验室开发的大口径光学元件精密磨削机床UPG80为具体对象,搭建了精密磨床智能监测系统,系统以NI-PXI为主要监测硬件平台,通过与数控系统和嵌入式采集系统的多种通信模式,获取磨床运行状态信息、磨削过程信息以及运行和

加工参数等重要数据,以磨床全生命周期大数据为背景实施智能监控。

本文详细讨论了监测系统的总体思路、监测对象、运行模式、监测硬件、软件组成和数据管理等方面内容,重点针对机床热误差、磨削液循环和砂轮磨损3个影响加工质量和机床性能的重要方面,介绍了热误差补偿基本原理,磨削液循环监控实施方案,以及基于无量纲声发射频域特征的特征砂轮磨削性能退化在线评估方法等共性技术,智能监测系统摒弃了传统的大而全的动态过程信号信息融合监测思路,尝试以简洁的监测方案和可追溯的分析模型,确保监测的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国科学技术部. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)[M]. 北京: 国务院, 2006.
- [2] Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Outline of the national medium-and long-term science and technology development plan(2006-2020)[M]. Beijing: The State Council, 2006.
- [3] BRECHER C, UTSCH P, KLAR R, et al. Compact design for high precision machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4): 328-334.
- [4] TONNELIER X, SHORE P, MORANTZ P, et al. Sub-surface damage issues for effective fabrication of large optics[J].

Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, 2008, 7018: 1-10.

[4] LEADBEATER P B, CLARKE M, WILLS-MOREN W J. A unique machine for grinding large, off-axis optical components: the OAGM 2500[J]. Precision Engineering, 1989, 11(4): 191-196.

[5] LINDSEY K. Tetraform grinding[J]. Proceedings of the SPIE, 1991, 1573: 129-135.

[6] ZHAO Q, LIANG Y, STEPHENSON D, et al. Surface and subsurface integrity in diamond grinding of optical glasses on Tetraform 'C' [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(14): 2091-2097.

[7] TÖNSHOFF H K, FRIEMUTH T, BECKER J C. Process monitoring in grinding [J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 551-571.

[8] GIZAW M, RANI A M B A, YUSOF Y. Turn-mill process plan and intelligence machining operations selection on STEP[J]. Asian Journal of Scientific Research, 2013, 6(2): 346-352.

[9] NARITA H, SHIRASE K, ARAI E, et al. Proposal of a concept of future oriented machine tools for advanced manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(17): 3657-3673.

[10] XU X W, NEWMAN S T. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies[J]. Computers in Industry, 2006, 57(2): 141-152.

[11] MORGAN M N. Design and implementation of an intelligent grinding assistant system[J]. International Journal of

- Abrasive Technology, 2010, 1(1): 106–135.
- [12] DURO J A, PADGET J A, BOWEN C R, et al. Multi-sensor data fusion framework for CNC machining monitoring[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, 66–67: 505–520.
- [13] CHEN S L, JEN Y W. Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(3): 381–400.
- [14] LIANG S Y, HECKER R L, LANDERS R G. Machining process monitoring and control: the state-of-the-art[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2004, 126(2): 599–610.
- [15] BRYAN J. International status of thermal error research[J]. Annals of the CIRP, 1990, 39(2): 645–656.
- [16] LEE D E, HWANG I, VALENTE C M O, et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(2): 33–54.
- [17] PRAKASH M, KANTHABABU M. In-process tool condition monitoring using acoustic emission sensor in microendmilling[J]. Machining Science and Technology, 2013, 17(2): 209–227.
- [18] DORNFELD D A, LEE Y, CHANG A. Monitoring of ultraprecision machining processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21: 571–578.
- [19] AHN B W, LEE S H. Characterization and acoustic emission monitoring of AFM nanomachining[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2009, 19(4): 45028–45033.
- [20] BI G, XU T L, KANG J Y, et al. Feature learning method of acoustic emission signal during single-grit scratching on BK7 in brittle regime[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(2): 526–538.
- [21] 毕果, 许涛林, 郭昕乾, 等. BK7 光学玻璃金刚石划刻声发射信号的特征提取[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 402–410.
- BI Guo, XU Taolin, GUO Xingqian, et al. Feature extraction of acoustic emission signal for diamond scratching of optical glass BK7[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 402–410.
- [22] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, et al. Laboratory simulation of volcano seismicity[J]. Science, 2008, 322(5899): 249–252.
- [23] 刘希灵, 王金鹏, 李夕兵. 压缩与劈裂条件下矿岩声发射信号的频率特性[J]. 实验力学, 2018, 33(2): 201–208.
- LIU Xiling, WANG Jinpeng, LI Xibing, et al. On the frequency characteristics of ore's acoustic emission signal in uniaxial compression and Brazilian splitting test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(2): 201–208.
- [24] SCHIAVI A, NICCOLINI G, TARIZZO P, et al. Acoustic emissions at high and low frequencies during compression tests in brittle materials[J]. Strain, 2011, 47(S2): 105–110.
- [25] 李书和, 张奕群, 张国雄. 数控机床热误差的补偿[J]. 航空精密制造技术, 1996, 32(4): 6–9.
- LI Shuhe, ZHANG Yiqun, ZHANG Guoxiong. Compensation of thermal error of NC machine tool[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996, 32(4): 6–9.
- [26] LI S, ZHANG Y Q, ZHANG G X. A study of precompensation for thermal errors of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(12): 1715–1719.

通讯作者: 毕果, E-mail: guobi@xmu.edu.cn.

Intelligent Monitoring System of Precision Grinding Machine

BI Guo, TANG Qilin, WANG Zhenzhong, YANG Ping, YANG Wei, PENG Yunfeng, GUO Yinbiao
(College of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

[ABSTRACT] Diamond wheel grinding machining is essential for the accuracy and efficiency of the large scale optical lens. Monitoring system is the indispensable part of the new generation grinding machine for the high demand of the reliability and stability. This paper is dedicated to the intelligent monitoring system of the precision grinding machine. PXI platform of National Instruments Corporation is used to acquire processing signals during machine operating and grinding. PXI controller is connected with the numerical control system of the machine, and the internal sensor signals and the processing parameters can also be output to the monitoring system. All the dynamic and static data related to the machine are stored and managed by the monitoring system database. Thermal error of the machine is acquired by the monitoring system and compensated for high machining precision. Grinding fluid circle system is also monitored and the numerical control system can give alarm for the emergency. Grinding wheel performance is real-time predicted which can give reliable guidance for wheel dressing.

Keywords: Intelligent monitoring system; Precision and ultra-precision grinding; Grinding machine; Process monitoring; Large-scale optical lens; Diamond grinding wheel

(责编 古索)