

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

光学元件超精密磨抛加工技术研究及装备开发

彭云峰, 何佳宽, 黄雪鹏, 刘佳明, 王振忠, 李陈磊, 王竞航

引用本文:

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及装备开发[J]. *光电工程*, 2023, **50**(4): 220097.

Peng Y F, He J K, Huang X P, et al. Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(4): 220097.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220097>

收稿日期: 2022-05-25; 修改日期: 2022-09-27; 录用日期: 2022-10-24

相关论文

大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展

樊非, 徐曦, 许乔, 王健, 钟波, 谢瑞清, 雷向阳, 陈贤华, 汪圣飞, 侯晶, 邓文辉, 安晨辉, 周炼, 赵世杰, 廖德锋, 朱玉洁
光电工程 2020, **47**(8): 200135 doi: [10.12086/oe.2020.200135](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200135)

大矢高凸柱面的超精密车削轨迹计算方法研究

雷茸粮, 李云, 林妮媚, 张帅, 青建宏, 唐林峰
光电工程 2021, **48**(3): 200192 doi: [10.12086/oe.2021.200192](https://doi.org/10.12086/oe.2021.200192)

大口径光学非球面镜先进制造技术概述

刘锋伟, 吴永前, 陈强, 刘海涛, 闫锋涛, 张仕杨, 万勇建, 伍凡
光电工程 2020, **47**(10): 200203 doi: [10.12086/oe.2020.200203](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200203)

复杂曲面铝反射镜超精密制造现状

徐超, 彭小强, 戴一帆
光电工程 2020, **47**(8): 200147 doi: [10.12086/oe.2020.200147](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200147)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

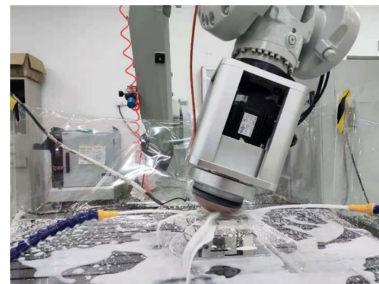
DOI: 10.12086/oe.2023.220097

光学元件超精密磨抛加工技术研究 与装备开发

彭云峰^{1,2}, 何佳宽^{1,2*}, 黄雪鹏^{1,2}, 刘佳明^{1,2},
王振忠¹, 李陈磊^{1,2}, 王竞航¹

¹厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005;

²厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518057



摘要: 在深入实施“中国制造 2025”的契机下, 我国的超精密加工领域突破了许多关键瓶颈技术, 并取得了众多显著的科研成果, 建设了一批高水平超精密加工技术创新平台、人才成长平台和应用示范基地, 开创了一条我国超精密产业的自主创新之路, 解决了该领域一些相对应的技术难关。本文主要介绍了厦门大学精密工程实验室在光学超精密加工技术与装备方面的研究进展, 围绕大口径光学非球面元件的磨削与抛光加工, 阐述课题组研发的加工工艺、磨削与抛光装备、装备监控与控制软件以及相关单元技术。这些研究成果可为实现高端光学元件的超精密加工提供制造加工技术支持与装备解决方案。

关键词: 超精密加工; 磨抛装备; 加工工艺; CAM 软件

中图分类号: TH74

文献标志码: A

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 Y F, He J K, Huang X P, et al. Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220097

Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development

Peng Yunfeng^{1,2}, He Jiakuan^{1,2*}, Huang Xuepeng^{1,2}, Liu Jiaming^{1,2}, Wang Zhenzhong¹,
Li Chenlei^{1,2}, Wang Jinghang¹

¹School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

²Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract: Under the opportunity of "Made in China 2025", in the field of ultra-precision, China has broken through many key bottleneck technologies, achieved many remarkable scientific research results, built a number of high-level ultra-precision processing technology innovation platforms, talent growth platforms and application demonstration bases, and created an independent ultra-precision industry in China. This paper mainly introduces the research progress of optical ultra-precision processing technology and equipment in the Precision Engineering Laboratory of Xiamen University. Focusing on the grinding and polishing processing of large-diameter optical aspherical components, the processing technology, grinding and polishing equipment, equipment monitoring and control software and related unit technologies developed by the group are described. These research results can

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-09-27; 录用日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675453); 深圳科技计划项目(JCYJ 20160517103720819)

*通信作者: 何佳宽, 18850470962@163.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

provide manufacturing and processing technology support and equipment solutions for the ultra-precision processing of high-end optical components.

Keywords: ultra-precision machining; grinding and polishing equipment; processing technology; CAM software

1 引言

在激光核聚变、空天望远镜等国家大光学工程以及先进仪器、光学镜头等高端民用领域快速发展的共同驱动下,对光学元件的全频段加工误差和表面的要求越来越严格。现阶段,光学元件一般需经过粗磨、精磨、抛光和镀膜等工序,其表面质量主要取决于抛光工艺的缺陷去除能力与误差控制水平,而能够获取更优面形精度及低表面/亚表面损伤抑制的精磨工艺则决定了加工效率。

超精密磨削是一种能够兼顾加工精度、表面质量和加工效率的加工手段,通过利用超硬磨料砂轮结合高性能磨床实现材料高效率去除,其加工精度可达到或优于 $0.1\ \mu\text{m}$,加工表面粗糙度 R_a 优于 $0.025\ \mu\text{m}^{[1]}$ 。光学元件通常由硬脆材料制成,磨削时材料去除机制主要是脆性断裂和裂纹扩张,这易产生亚表面损伤及变质层。抛光作为光学元件超精密制造中最后一道冷加工工序,其目的是为了去除表面损伤层和平滑表面误差,降低加工工件表面粗糙度,获取高质量的光滑表面^[2]。

超精密加工制造装备是实现光学元件超精密加工的前提基础。至今世界各国均对光学超精密磨抛技术投入了较大的研发力量,已经研制出了较多相对成熟的高精度磨抛设备,较好地满足了当前大部分的光学元件加工需求。在磨削设备方面,英国的克兰菲尔德精密工程研究所研制的 Big Optix 大型超精密磨床具有较高的动态和静态环路刚度,可实现亚表面损伤深度微量可控的超精密磨削加工,加工口径为 $1\ \text{m}$ 工件的表面形状精度能够达到 $1\ \mu\text{m}^{[3]}$ 。美国 Moore 公司研制的五轴联动 Nanotech 500FG、Nanotech 650FG 超精密磨床,可以磨削轴对称、非轴对称的光学曲面,曲面磨削加工面形精度 PV 可达到 $0.3\ \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 可达 $10\ \text{nm}^{[4-5]}$ 。在抛光设备方面,法国 REOSC 制造了具备加工 $8\ \text{m}$ 口径镜片能力的抛光机,用于抛光超大望远镜 VLT 镜,面形误差可收敛到 $8.8\ \text{nm RMS}^{[6]}$ 。美国 QED 公司研制的磁流变数控抛光机床 Q22-2000F 能实现平面、球面、非球面和自由曲面等

多种面形大口径光学非球面元件的加工,可高效率和高精度的加工出口径为 $2\ \text{m}$ 级别的光学元件^[7]。REOSC 开发了具备加工 $\Phi 2500\ \text{mm}$ 能力的离子束抛光系统,用于加工 GTC $10.4\ \text{m}$ 的主镜,加工后的平均表面精度 RMS 约为 $12.8\ \text{nm}^{[8]}$ 。

对超精密制造所需的核心装备与关键技术,我国长期依赖进口。为了突破制约我国现阶段超精密技术发展的瓶颈,在国家大工程项目的牵引与驱动下,我国在光学超精密制造装备与工艺取得了显著进展。大连理工大学开发了 $\Phi 300\ \text{mm}$ 硅片超精密机床,具有在线测量硅片厚度、在线测量磨削力等功能,磨削 $\Phi 300\ \text{mm}$ 硅片的 TTV 值 $\leq 4\ \mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a \leq 1.4\ \text{nm}$,亚表面损伤深度 $\leq 0.25\ \mu\text{m}$,实现了高效低损伤超精密磨削^[9]。国防科技大学研制的超精密机床 UPL-450,磨削 $\Phi 195\ \text{mm}$ 的单晶硅曲面光学元件,面形精度 PV 值从 $20.4\ \mu\text{m}$ 降低到 $3.77\ \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 值从 $0.515\ \mu\text{m}$ 提升到了 $0.081\ \mu\text{m}^{[10]}$ 。虽然国内已能够研发制造出相对高端的精密机床,但与国际先进水平相比,我国的光学超精密加工技术与装备还存在一定的差距,须继续加强攻关研究。除光学元件超精密加工所必须的高端磨抛装备,还需要加强一系列关键的配套单元技术水平提升,如超精密磨抛加工工艺与技术、高端关键功能部件、加工环境智能监控技术、高效超精密加工工具、加工与检测路径规划及补偿加工策略、计算机辅助制造和检测软件等。这些技术的研发应用关系到高端制造民用领域与国防领域的发展,更是国家重点关注的研发技术。本文主要围绕大口径光学非球面元件的超精密加工,从磨削和抛光工艺路线出发,介绍了厦门大学精密工程实验室长期以来在大口径光学非球面元件加工领域的研究进展,就超精密磨抛加工设备、机器人辅助磨抛、装备智能监控系统、加工工艺与控制软件等技术及系统成果进行了详细的介绍。

2 超精密磨削装备及单元技术

为了获得较高的面形精度、较好的表面粗糙度,通常以牺牲加工效率为代价,这将严重拉长大口径光

学非球面元件的制造周期。研发制造精密磨床设备, 降低磨削加工阶段遗留的表面损伤层程度, 不仅有助于提升抛光阶段的抛光效率, 更是缩短大口径光学非球面元件加工周期的重要途径之一。厦门大学精密工程实验室在国家项目的支持下, 先后研发了三套大口径光学元件超精密磨削机床装备, 分别为 MK7160、2MK1760 和 UPG80。本文将主要介绍近期开发的 UPG80 平面磨床及其单元技术。

2.1 大口径光学精密磨削机床开发

厦门大学精密工程实验室研制的 UPG80 大口径精密磨床在先前研发的 MK7160 和 2MK1760 技术经验基础上, 进行了技术改进和提升。如图 1 所示, 为确保磨床实现高精度运动与加工, UPG80 床身底座采用了 T 型布局, 磨床整体采用立柱移动式卧轴矩台

结构, 不仅结构简单、总体刚性好、磨削效率高, 也方便安装光栅测量反馈系统, 提高了测量精度和反馈速度^[11]。为避免金刚石砂轮因脆性材料的作用导致磨损而影响光学精密加工效果, 采用了杯状砂轮修整方法, 设计了在线修整装置、修整工艺及修整计算机辅助制造软件^[12-14], 实现了修整砂轮轮廓面形精度优于 5 μm 的技术要求。此外, 课题组还搭建了精密磨削智能监控系统, 对磨床进行在线监测和反馈控制, 保证了精密加工的稳定性, 提高了加工设备的可靠性。最后, UPG80 磨床开展 530 mm×530 mm 熔石英非球面元件磨削加工, 其加工面形精度 $PV \leq 3.38 \mu\text{m}$ 、亚表面损伤深度 $SSD \leq 3 \mu\text{m}$ ^[15], 检测结果如图 2 所示。UPG80 实现了研制高端超精密磨削机床关键核心技术的突破, 机床技术指标如表 1 所示。

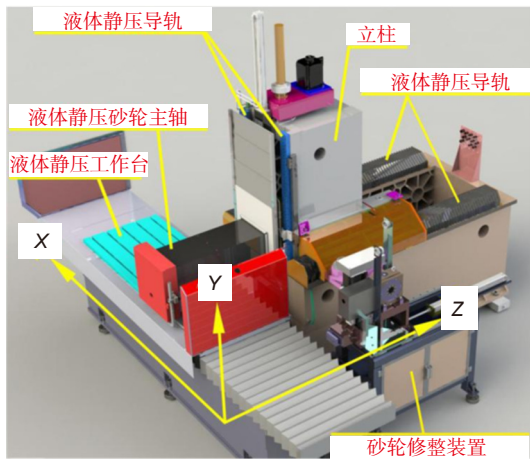


图 1 大口径精密磨床 UPG80 及机床整体钣金外观^[11]

Fig. 1 The appearance of the large diameter precision grinder UPG80 and the overall sheet metal of the machine^[11]

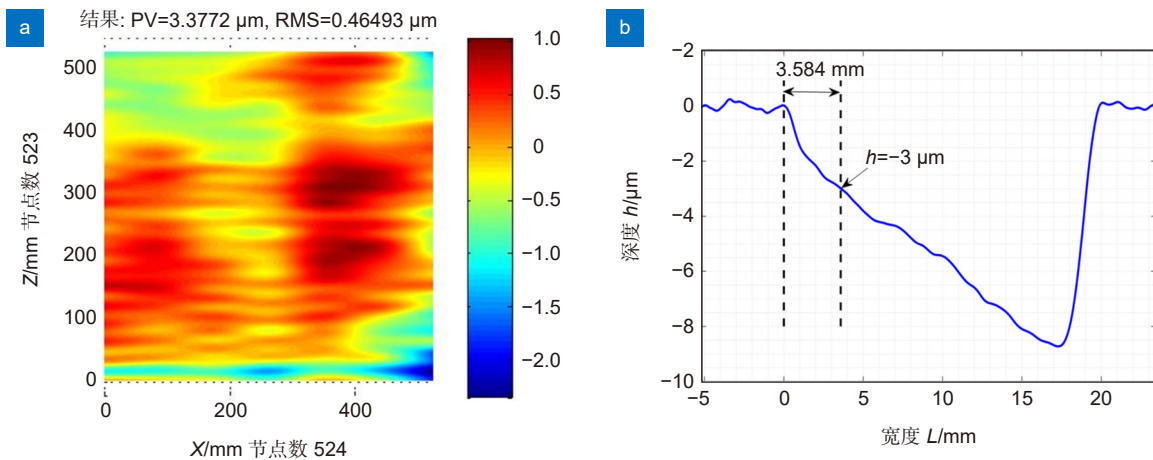


图 2 大口径非球面元件加工结果^[15]。(a) 面形精度 ($PV=3.38 \mu\text{m}$); (b) 亚表面损伤深度 ($h=3 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Processing results of the large aperture aspheric elements^[15]. (a) Surface shape accuracy ($PV=3.38 \mu\text{m}$); (b) Subsurface damage depth ($h=3 \mu\text{m}$)

表 1 大口径精密磨床 UPG80 技术指标

Table 1 Technical specifications of the large diameter precision grinding machine UPG80

技术指标	参数
可磨削的最大工件尺寸	1300 mm×750 mm×550 mm
工作台承重	1500 kg
数控系统分辨率	0.1 μm
X/Y/Z轴定位精度	≤2 μm/300 mm
X/Y/Z轴重复定位精度	≤1 μm/300 mm

2.2 超精密液体静压支承技术研究

导轨作为超精密加工装备的重要功能部件, 其性能优异直接决定了各运动轴的精度, 主要有滑动导轨、滚动导轨、静压导轨等三种形式。在这三种类型导轨中, 滑动导轨有着结构简单、刚度大的优点, 但相对比较存在较大的摩擦阻力。滚动导轨摩擦阻力小, 但抗震性差且阻力大。而静压导轨没有摩擦, 运动精度高, 抗震性好。静压导轨又分为液压式与气浮式, 但液体静压导轨在承载力、刚度、稳定性、受干扰性等方面有着更好的优势, 广泛应用于超精密机床中^[16]。液体静压支承是精密机械装备领域获得高刚性与高精度的重要保证, 在超精密机床领域的重要性益发凸显。为获得高的机床刚性和几何及运动精度, UPG80 磨床三直线轴均采用了静压导轨滑块和静压主轴技术。课题组深入研究分析超精密液体静压导轨运动误差对超精密机床加工精度的影响, 以其为超精密磨床的静压支承理论技术支撑。

现有研究中关于静压导轨运动精度的建模均有一定简化处理, 且鲜有报道考虑恒压式液体静压导轨的节流器影响作用。为此, 课题组通过运动学理论, 建立了四油垫封闭式液体静压导轨准静态理论模

型, 分析 PM 流量控制器参数对运动精度的影响规律, 研究发现流量控制器的比流量、供油压力初始流量不影响运动误差曲线波峰波谷的出现位置, 但会影响运动误差的波动程度和 PV 值, 且初始流量对运动精度的影响更加显著^[17], 图 3 是初始流量 Q_0 对运动精度的影响。还分析了考虑外力加载形式下的油膜设计总间隙对运动精度的影响规律以及配对导轨面相对差异对运动精度的影响, 其研究结果为 UPG80 导轨部件的横向闭式导轨运动误差分析提供了参考。另外, 在此理论基础上, 课题组以 X 轴液体静压导轨为研究对象, 如图 4 所示, 针对性地建立了准静态的运动条件前提下六垫闭式液体静压导轨运动误差模型, 模型预报结果与激光干涉仪实际测量结果变化趋势一致且吻合性好, 研究还发现闭式导轨的下导轨面比上导轨面的运动误差更加敏感^[11]。该模型不仅具有相对更高的一般性和通用性, 而且还能有效地预报运动误差。为了验证模型的正确性和可靠性, 课题组通过改变模型输入量对模型输出结果影响程度来判断模型的有效性, 结果表明导轨形貌误差的输入量对理论结算结果影响甚微, 搭建的六油腔静压滑动平台运动误差模型有效。

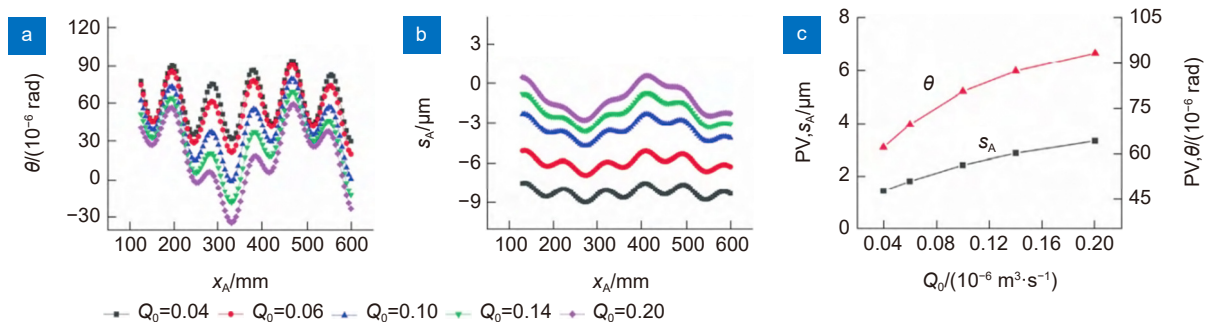


图 3 初始流量 Q_0 对运动精度的影响^[17]。(a) 角度运动误差; (b) 位移运动误差; (c) 角度运动误差和位移运动误差的 PV 值

Fig. 3 Influence of the initial flow Q_0 on the motion accuracy^[17]. (a) Angular motion error; (b) Displacement motion error; (c) PV value of angular motion error and displacement motion error

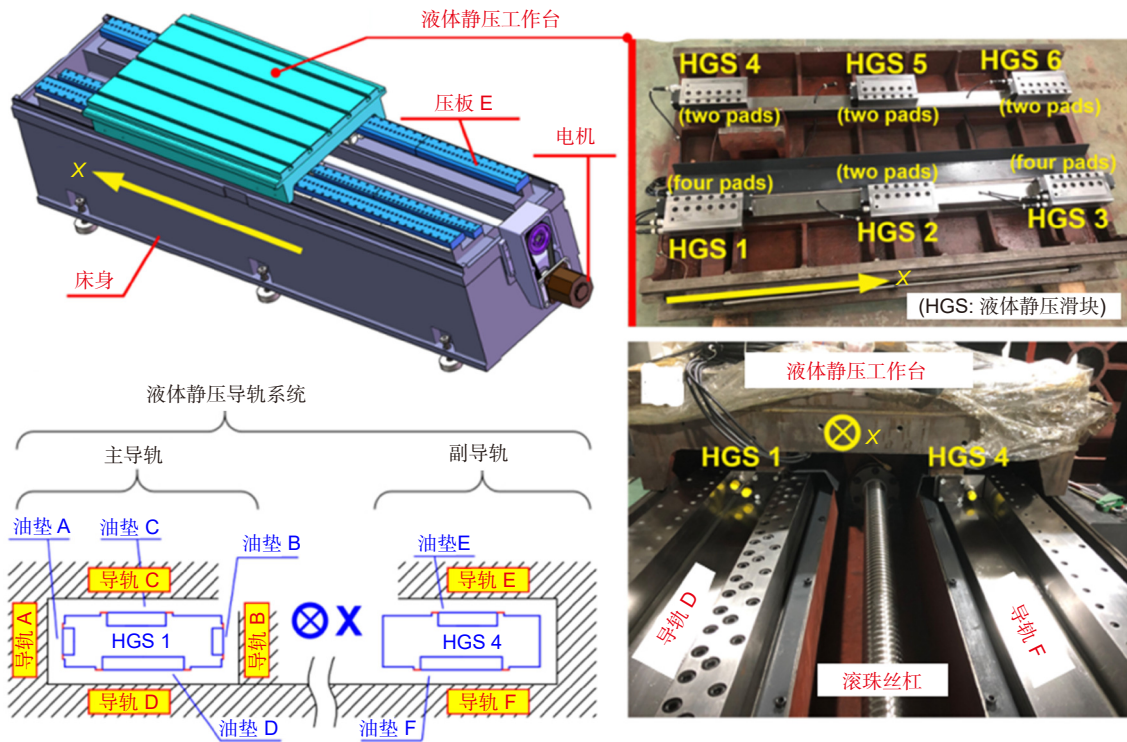


图 4 磨削机床 UPG80 的 X 轴结构^[11]

Fig. 4 Guide rail distribution view along the X axis of the grinding machine UPG80^[11]

3 超精密抛光装备及单元技术

实现超精抛光的方法有很多种, 较为主流的抛光方法有: 小磨头抛光、应力盘抛光、磁流变抛光、离子束抛光、气囊抛光、化学机械抛光、磁射流抛光等。课题组总结对比了这些抛光方法的技术特点, 综合评价后, 认为气囊抛光有着更明显的技术优势。优势如下: 1) 气囊抛光头与非球面吻合度好, 非常适用于大口径非球面抛光; 2) 去除函数稳定性好, 呈类高斯分布; 3) 去除效率高、加工面形精度高。综上, 课题组在国家项目的资助下, 开发了五轴数控气囊式抛光机床及单元技术。

3.1 大口径五轴数控气囊式抛光机床开发

气囊抛光技术最早由英国 ZEEKO 公司和伦敦大学学院物理与天文学系的 David Walker 联合提出并研究, 后由 ZEEKO 公司实现了商业化的推广^[18]。气囊抛光技术具备加工面形精度高、去除函数稳定以及材料去除效率高等优势, 是一种极具工程应用潜力的非球面光学元件超精密抛光加工技术。课题组自主研发了五轴数控气囊式抛光机床。如图 5 所示, 整机采用龙门结构, 运动系统包括工作台、底座、立柱、主轴

箱、AB 摆轴气囊抛光头等, 辅助系统包括电气及数控系统、在位修整系统、光栅反馈系统、气动系统、冷却系统、过滤系统、润滑系统、永磁吸盘和外围钣金安全防护罩等^[19]。

气囊抛光主要技术特点在于采用了进动运动方式, 如图 6(a) 所示, 在抛光过程中, 气囊主轴的轴线始终与工件局部法线成固定进动角抛光。这种运动方式不仅能够形成有利于面形收敛的类高斯型去除函数, 还会产生不规则的表面纹理, 起到有效抑制中频误差的作用。而独特的“AB”摆进动控制模式正是实现该技术特点的主要结构。如图 6(b) 所示, 为了方便控制主轴的空间姿态, 设计的 A 轴和 B 轴轴线与主轴轴线相交于气囊抛光工具头的球心, 且 A 轴与 B 轴控制着气囊自转轴的空间位姿变化。另外, 自主设计的半柔性气囊抛光工具与工件具有很好的吻合性, 在保证一定程度柔性的前提下获得最大接触应力, 从而保证稳定、高效的抛光效率^[20]。

针对规则路径规划会引入中频误差从而降低成像质量导致光学元件性能低的问题, 课题组提出了多种伪随机的加工路径规划方法, 其中图 7 所示为基于迷宫原理的随机路径。该路径的随机性高, 每次都能生

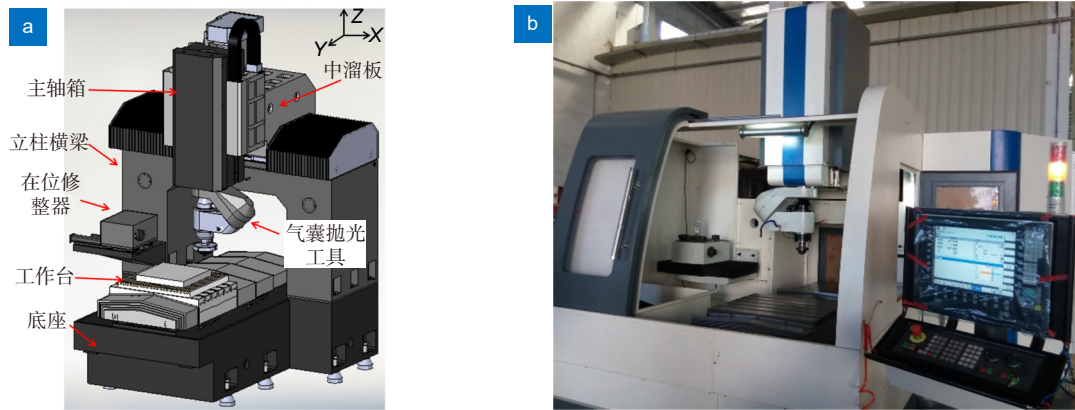


图 5 五轴数控气囊式抛光机床^[19]。(a) 气囊抛光机模型图; (b) 气囊抛光机床实物图
 Fig. 5 Five-axis CNC bonnet polishing machine^[19]. (a) Bonnet polishing machine model diagram; (b) Actual drawing of the bonnet polishing machine

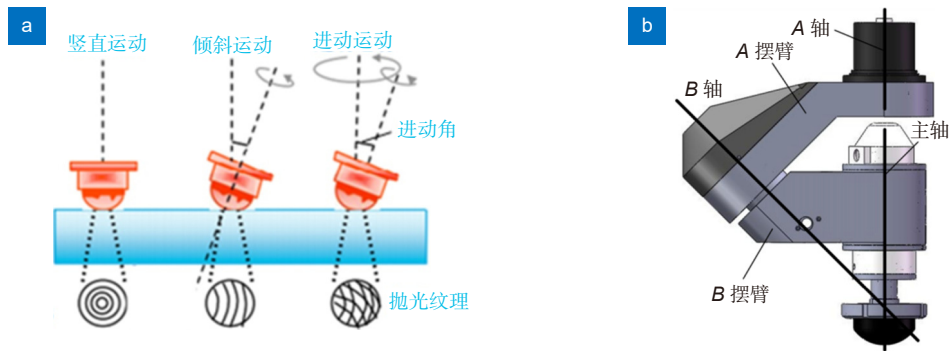


图 6 气囊抛光原理^[20]。(a) 进动运动模型; (b) 气囊“AB”摆结构
 Fig. 6 The principle of bonnet polishing^[20]. (a) Precession motion model; (b) Bonnet "AB" pendulum structure

成不同的路径,一定程度上能够有效地抑制中频误差。为验证随机路径的效果,通过仿真和实际加工对比了光栅路径、Hilbert 路径和迷宫路径的加工效果,结果表明:1) 迷宫路径只在靠近低频段引入一定的功率密度谱,其功率密度谱分布更加趋近于美国国家点火装置标准,一定程度上能抑制中频误差;2) 迷宫路径能获得比光栅路径和 Hilbert 路径更小的表面粗糙度^[20]。如图 8 所示,为三种路径中心区域粗糙度 RMS 测量结果对比。

为了获得较高的抛光效率,实现大面积材料的高效去除,课题组自主研发了半柔性气囊抛光工具,即在气囊内部添加一层薄锈钢片,如图 9 所示。该气囊不仅具有较大刚性带来的高效率,而且又不失自身柔性,具有良好的保形抛光效果,适用于预抛光后的粗修抛、半精修抛阶段,缩短了修形抛光周期。目前研制的半柔性气囊工具的体积去除率最高可超过 30 mm³/min。使用 R80 嵌入钢片的半柔性气囊对 100 mm×100 mm 的 BK7 平面工件进行修形抛光实验,如

图 10(a) 所示,初始 PV 值为 7.634 μm,加工过程使用光栅路径,四步进动执行修形抛光,每步实际加工时间为 7 min 58 s,去除函数的体积去除率为 1.9526 mm³/min。加工过后的面形结果如图 10(b) 所示,面形的 PV 值为 949.2 nm, RMS 为 153.8 nm^[20]。

3.2 空间自旋转柔性进动抛光

因气囊抛光受限于机床自身结构,抛光工具主轴难以跟随工件抛光点法线做连续回转运动而不能实现真正意义上的连续进动抛光,这限制了气囊抛光技术优势的发挥。更为严重的是气囊抛光机床核心的进动摆轴与主轴电机均依赖国外进口。为摆脱对国外进口的依赖,课题组创新性地提出了一种新型空间自旋转柔性进动抛光技术,并开发了空间自旋转柔性进动抛光原理装置,如图 11 所示,通过利用空间正交的三个电机协同驱动柔性球抛光工具绕目标轴以进动角倾斜旋转,实现气囊进动抛光技术的“AB”摆轴控制工具头姿态的有效替换,且能提升加工效率,接触区可形成不规则痕迹从而抑制中频误差。为了验证该方法

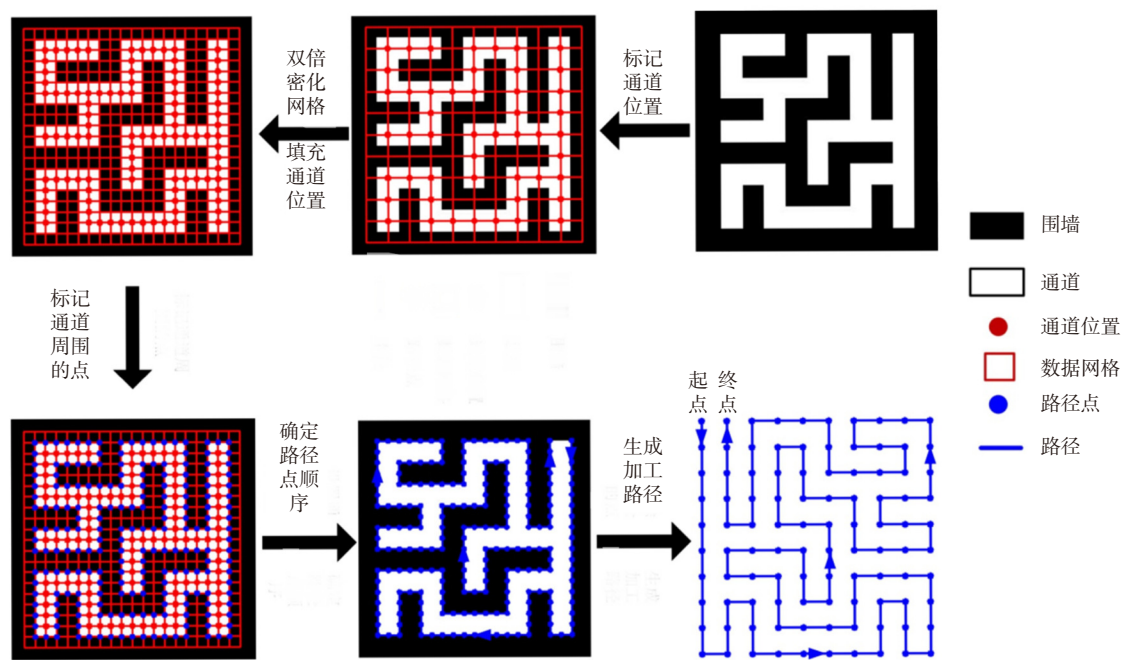


图 7 基于迷宫的抛光路径生成原理图^[20]

Fig. 7 Maze-based polishing path generation schematic^[20]

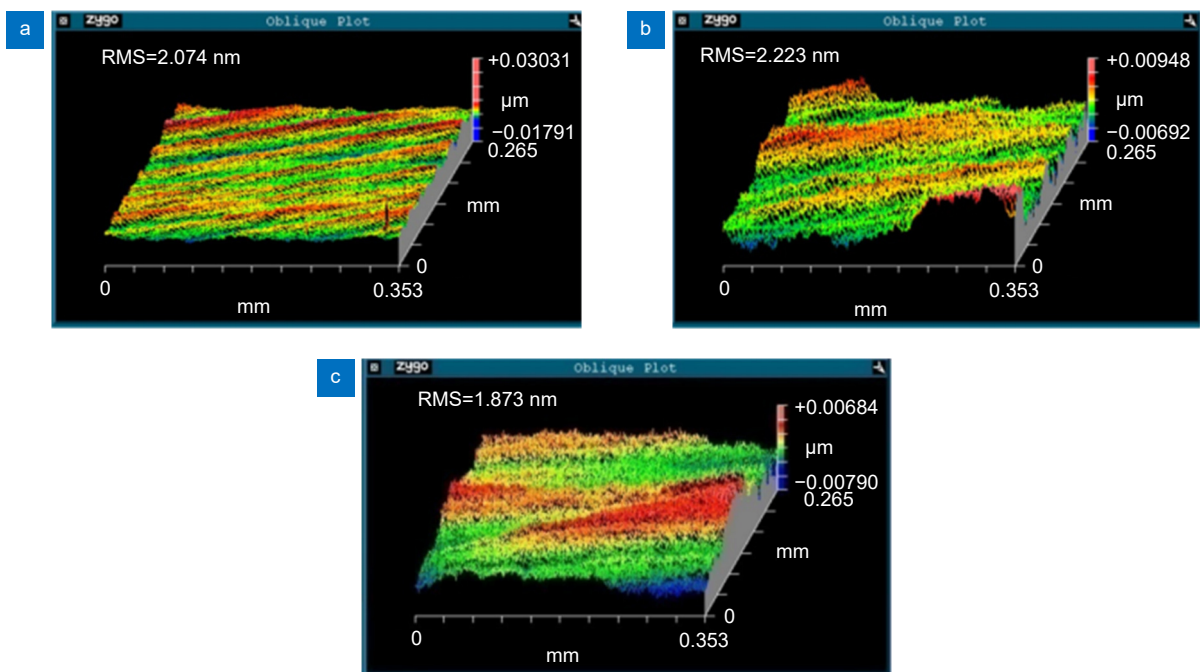


图 8 中心区域粗糙度测量结果^[20]。(a) 光栅路径；(b) Hilbert 路径；(c) 迷宫路径

Fig. 8 Measurement results of roughness in the central region^[20]. (a) Grating path; (b) Hilbert path; (c) Maze paths

的抛光性能，课题组通过旋转测试实验和抛光功能实验验证该方法的技术可行性与抛光去除功能，分别选择了 0°垂直抛光与 20°倾斜抛光进行抛光实验，实验参数如表 2 所示。实验结果表明加工的 BK7 工件倾

斜抛光点和垂直抛光点都有明显的抛光痕迹。如图 12 所示，垂直抛光的光斑呈典型的 W 型轮廓，倾斜抛光的光斑呈 D 型轮廓，表面粗糙度 Ra 由 843.5 nm 收敛至 1.8 nm^[21]。



图 9 半柔性气囊结构^[20]
Fig. 9 Semi-flexible bonnet structure^[20]

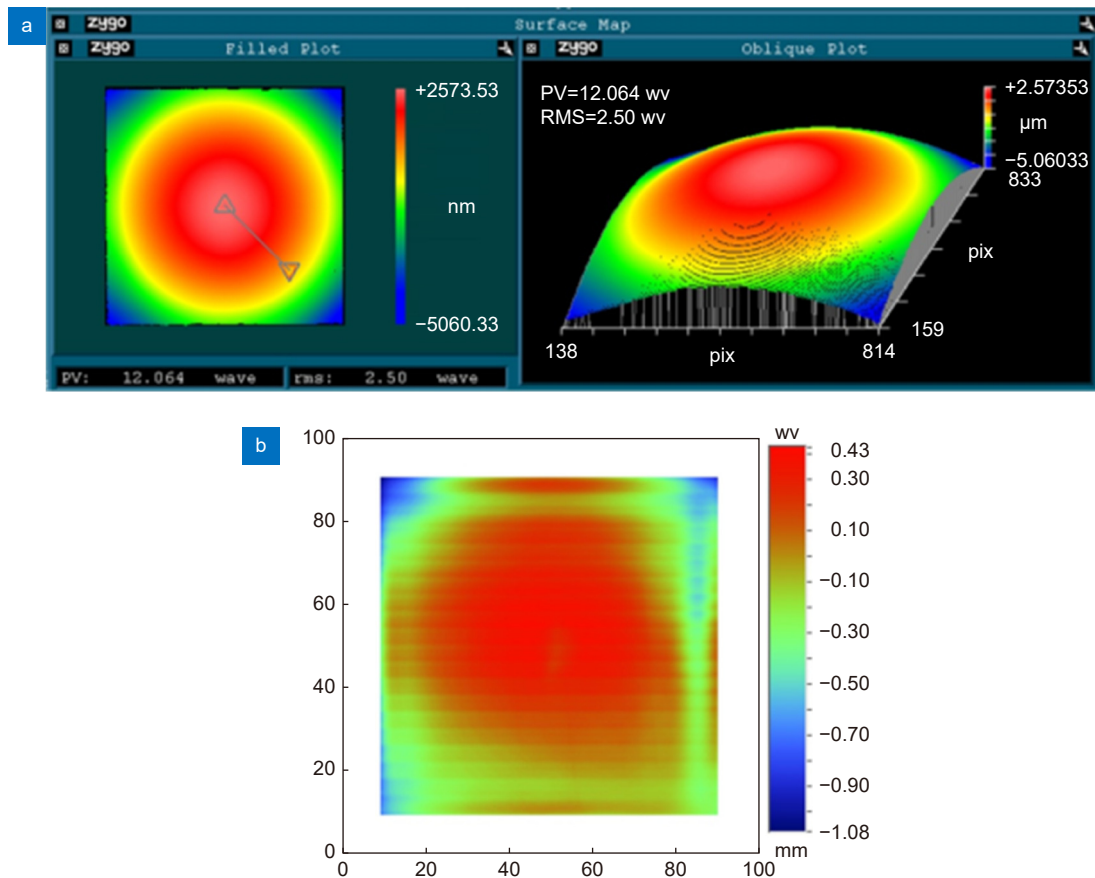


图 10 修形加工前后面形结果^[20]。(a) 修形抛光前面形；(b) 修形抛光后面形
Fig. 10 The results of shaping and processing front and back^[20]. (a) Polishing front shape; (b) Polishing back shape

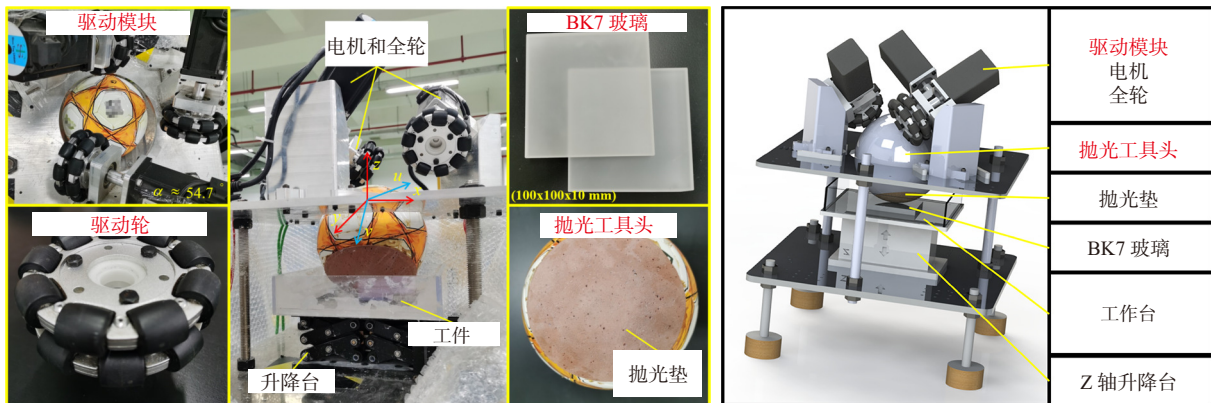


图 11 空间球柔性进动抛光实验装置^[21]

Fig. 11 Experimental device for flexible precession polishing of space ball^[21]

表 2 抛光参数

Table 2 Polishing parameters

	垂直抛光($\theta=0^\circ$)	倾斜抛光($\theta=20^\circ$)
电机1转速/(r/min)	500	714
电机2转速/(r/min)	500	350
电机3转速/(r/min)	500	350
球旋转速度/(r/min)	481	482
抛光时间/s	200	500

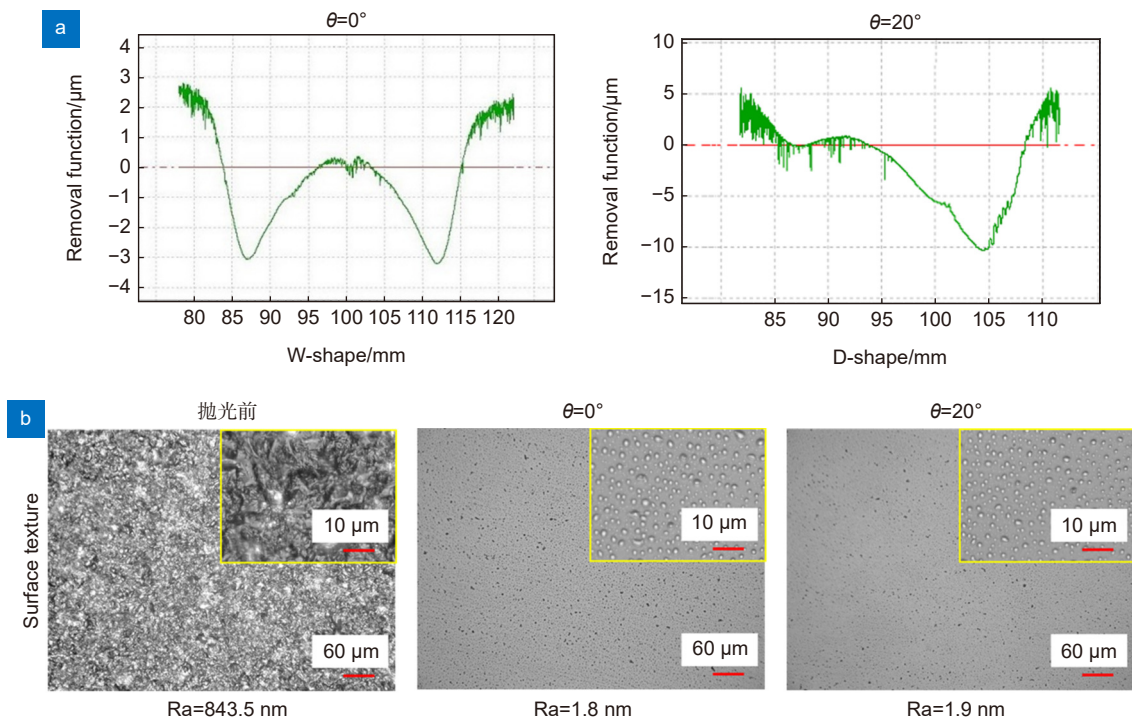


图 12 实验结果图^[21]。(a) 抛光斑材料去除函数；(b) 工件表面抛光前后粗糙度

Fig. 12 Diagram of the experimental results^[21]. (a) Material removal functions of polishing spots; (b) Surface microscale morphologies of the workpiece before and after

4 机器人辅助磨抛加工技术

4.1 机器人曲面恒力研磨加工技术

在复杂曲面研磨领域, 使用聚氨酯弹性小磨具的机器人辅助研磨系统能够有效替代人工研磨, 高质量、高效率地完成研磨加工任务。由于机器人的刚度和稳定性不足, 影响了加工稳定性。虽然基于阻抗控制的恒力控制系统能够稳定磨具与工件间的接触力, 保证加工去除效率的稳定。但是, 阻抗控制需要根据接触压力与期望压力的偏差量计算相应的位置补偿量, 而实时的补偿量反馈会使工具头的位置不断变化, 导致研磨加工的稳定性下降。因此, 需要通过迭代计算输出最终的稳定补偿量, 使机器人的误差补偿一步到位。但又因为聚氨酯磨具的接触退让性与非常量磨损, 导致迭代过程所需的中间压力难以通过理论模型计算得到。于是, 课题组提出了一种基于环境模型的阻抗控制策略来满足研磨加工中的恒力控制需求^[22]。

阻抗控制是一种适用于解决机械与环境交互任务的控制方法^[23]。课题组提出的基于环境模型的阻抗控制算法框图, 如图 13 所示。系统的外循环进行位置控制, 内循环进行阻抗控制, 并通过环境模型连接内外循环。位置控制是指由机器人控制器控制机器人进行笛卡尔坐标运动并读取接触点的实时接触压力。环境模型能够将外循环中读取到的实时接触压力转化为环境变形量输入内循环, 内循环通过阻抗模型对环境变形量进行位置补偿, 直到接触压力达到期望接触压力。相比于传统阻抗模型, 基于环境模型的阻抗控制算法有三个方面的优势: 1) 基于环境模型的阻抗控制

算法只需要通过改变刚度、惯性与阻尼比三个参数使系统快速响应并达到稳定即可; 2) 基于环境模型的阻抗控制算法能够根据不同的加工环境配置不同的环境模型, 从而产生不同的控制效果, 加强了控制系统的柔性; 3) 基于环境模型的阻抗控制算法不会因为曲面插补过程中接触压力的实时变动而导致机器人来回反复补偿, 提高了机器人研磨加工的精度与稳定性。此外, 为了优化不同加工倾角下变化的环境模型, 课题组分别使用插值拟合与 BP 神经网络两种方法对环境模型进行了优化, 提高了恒力控制的精度与稳定性。

为证明基于环境模型的阻抗控制策略的有效性, 分别进行了力控效果测试实验和力控研磨加工实验。实验工件选用边长为 120 mm 正方形, 顶面为 R500 mm 球形的 6061 铝合金曲面, 磨具采用 R10 mm 半球形聚氨酯基体磨具, 加工速度为 50 mm/min, 加工倾斜角为 30°。基于机器人补偿的力控实验表明该策略能够获得较为稳定的曲面研磨接触压力, 力控精度能达到±0.5 N, 如图 14 所示, 为机器人补偿力控实验结果曲线图。

为更好体现力控研磨效果试验, 分别在开启力控与关闭力控的情况下对相同初始表面质量的工件进行研磨加工实验。关闭力控时, 接触压力在 10 N~20 N 区间内变化, 分别取接触压力为 10 N、15 N 与 20 N 加工表面。开启力控时, 接触压力稳定在 10 N。实验结果如图 15 所示, 接触压力为 10 N、15 N 与 20 N 时的表面粗糙度 Ra 分别为 0.1517 μm、0.1389 μm、0.1241 μm。接触压力稳定在 10 N 的表面粗糙度 Ra

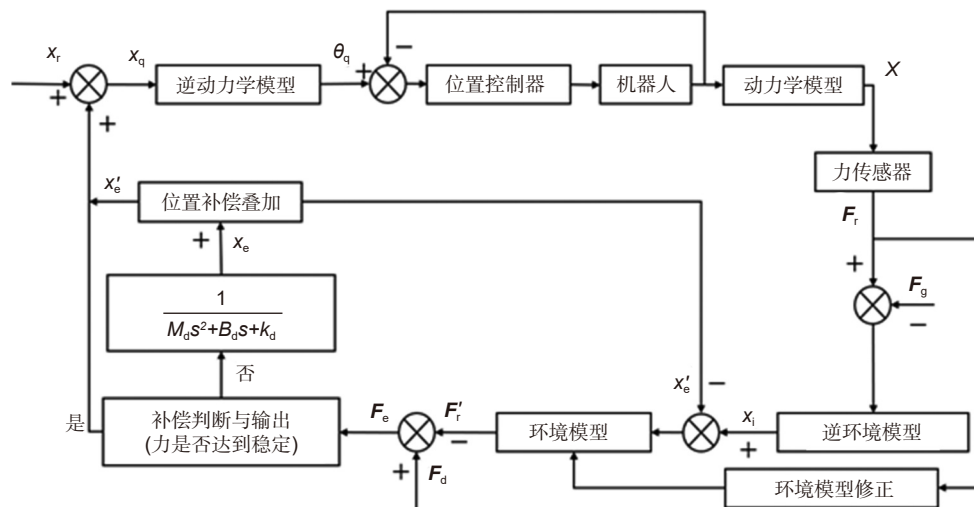


图 13 基于环境模型的阻抗控制算法框图^[22]

Fig. 13 Block diagram of impedance control algorithm based on environment model^[22]

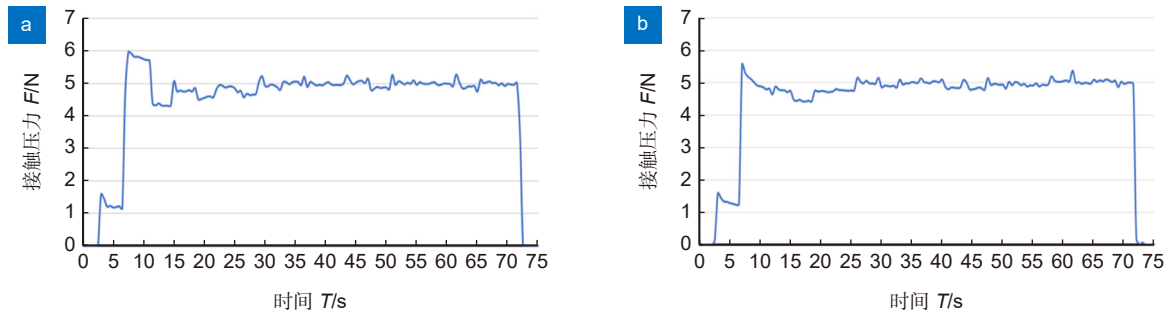


图 14 机器人补偿力控实验结果曲线^[22]。(a) 力控实验结果曲线一; (b) 力控实验结果曲线二
Fig. 14 Experimental results curve of the robot compensation force control^[22]. (a) Curve 1 of the force control experiment results; (b) Curve II of the force control experiment results

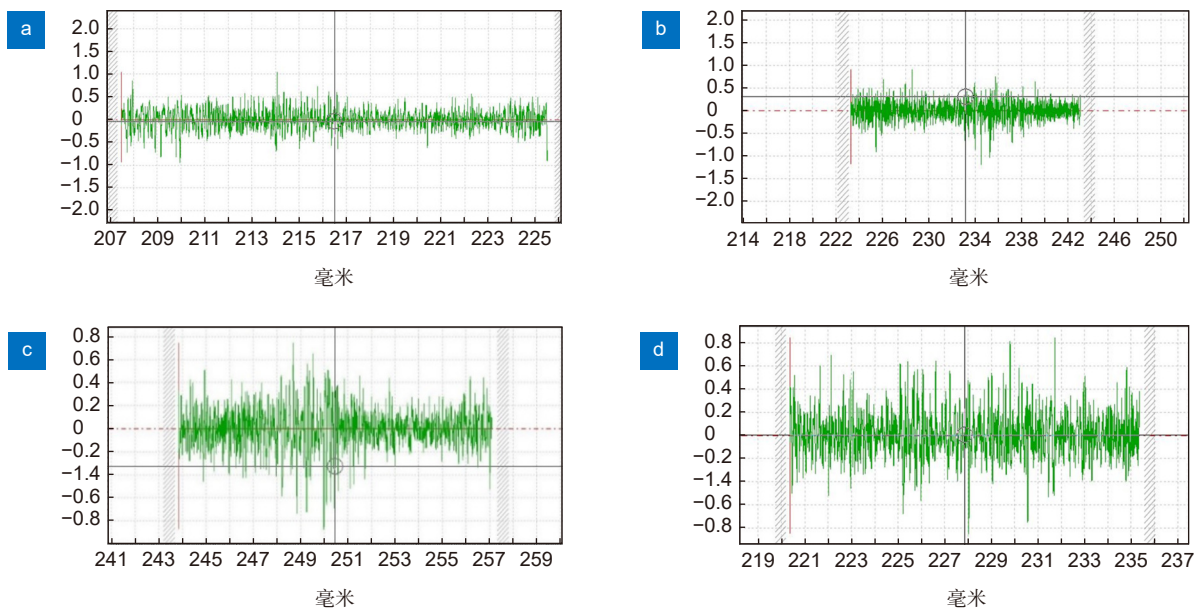


图 15 变化压力与稳定压力下的表面加工质量。(a) 压力 10 N; (b) 压力 15 N; (c) 压力 20 N; (d) 10 N 稳定压力下的表面加工质量

Fig. 15 Surface finishing quality under varying pressure and steady pressure. (a) Pressure 10 N; (b) Pressure 15 N; (c) Pressure 20 N; (d) Surface machining quality at 10 N steady pressure

为 $0.1332 \mu\text{m}$, 且分布均匀。实验结果表明, 恒力控制适用在需要保证均匀的表面加工质量的场合, 它能够通过保持接触压力恒定来保证加工质量的稳定, 而变化的接触压力会导致加工质量不稳定。

4.2 机器人气囊抛光加工技术

在主流的小工具数控抛光技术中, 五轴数控气囊式抛光技术具有很好的优势, 但五轴机床开发成本高, 限制了气囊抛光技术的应用与推广。工业机器人具有开发成本低、自动化程度高、适应性强等优点, 课题组基于气囊抛光和工业机器人技术, 搭建了机器人气囊抛光系统^[24], 如图 16 所示。

目前, 主要围绕以下三个方面开展相关研究:

1) 机器人气囊抛光运动建模和控制分析。气囊抛光在实际应用中通常使用多步离散进动方式加工, 课题组基于机器人气囊抛光系统, 选用平面工件作为研究对象, 建立局部坐标系和工具坐标系, 通过旋转变换获得各个不同的离散姿态。对于非球面抛光, 采用位姿分离方法计算, 分别确定气囊球心坐标和姿态^[25]。为了验证模型的准确性, 对比了平面、非球面运动控制进动角理论值和仿真值, 二者的相对误差最大为 0.012% , 模型具有一定可靠性。

2) 机器人刚度对气囊抛光材料去除函数的影响。基于机器人动力学构造机器人雅克比矩阵, 建立机器人刚度模型, 分析气囊抛光工况下机器人末端载荷分布情况, 计算机器人气囊定点抛光时末端变形数据,

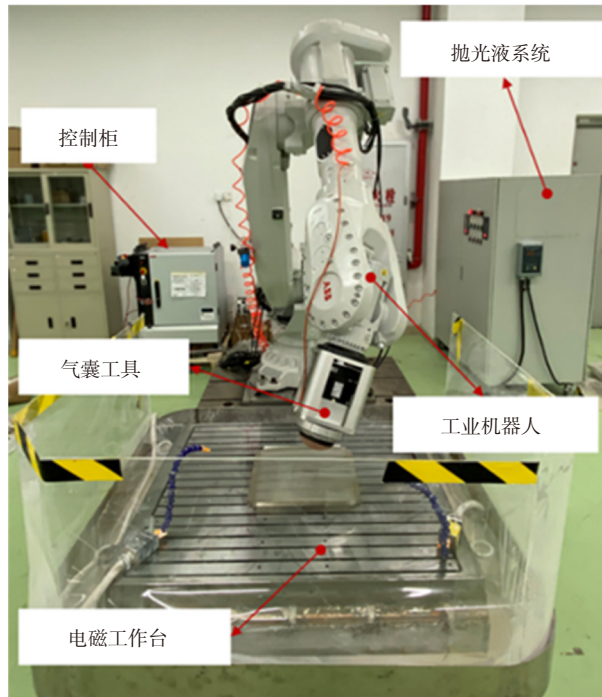


图 16 机器人气囊抛光系统^[24]

Fig. 16 Control frame diagram of the robot airbag polishing system^[24]

采用 ANSYS 有限元仿真软件进行仿真末端变形, 如图 17 所示。分析机器人末端变形对于气囊多步离散进动抛光的影响, 建立实际抛光的材料去除函数模型, 最后通过定点抛光实验验证机器人气囊抛光稳定性^[26]。

3) 机器人气囊抛光振动抑制分析。在工业机器人抛光过程中由于刚度较差, 容易产生强迫振动, 影响抛光质量。课题组对机器人进行了模态仿真, 通过实验测量模态信息来验证仿真的准确性, 为设计抑振结构的气囊提供了理论技术指导。对设计具有抑振结构的气囊工具头进行瞬态动力学仿真, 仿真结果表明位

移幅值相比普通气囊振幅更小, 具有抑振结构的气囊工具头如图 18 所示。为验证抑振气囊工具头的可靠性, 开展进动角、下压量和充气压力等单因素试验与整面抛光实验, 结果表明抑振气囊工具头具有较优的 RMS 及 PV 收敛能力^[24]。SiC 元件经普通气囊整面抛光结果和抑振气囊整面抛光结果如图 19 和图 20 抑振气囊整面抛光前后对比。(a) 抛光前; (b) 抛光后所示, 抛光 60 min 后, 普通气囊整面抛光 RMS 值收敛比为 11.67%, PV 值收敛比为 11.25%; 抑振气囊整面抛光 RMS 值收敛比为 16.65%, PV 值收敛比为 13.45%。

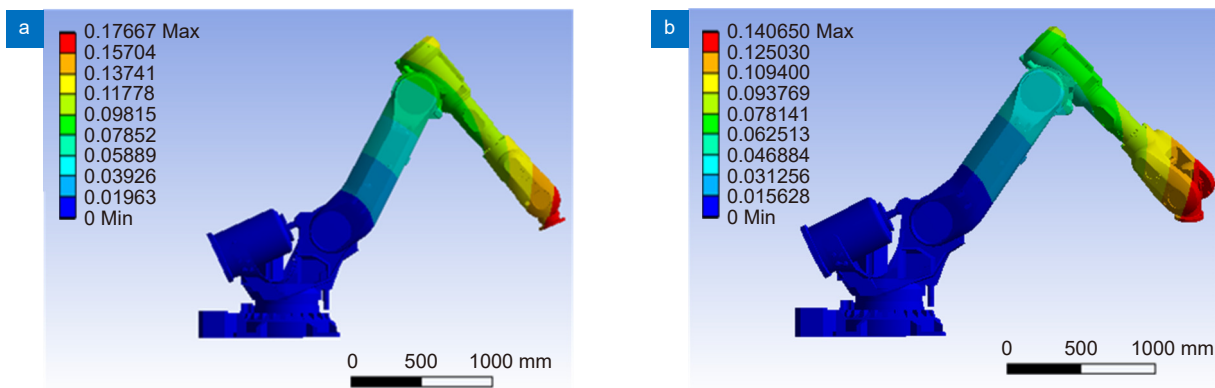


图 17 机器人末端变形云图^[26]。(a) 姿态位置角 0°; (b) 姿态位置角 90°

Fig. 17 Deformation cloud of robot end^[26]. (a) Attitude position angle 0°; (b) Attitude position angle 90°

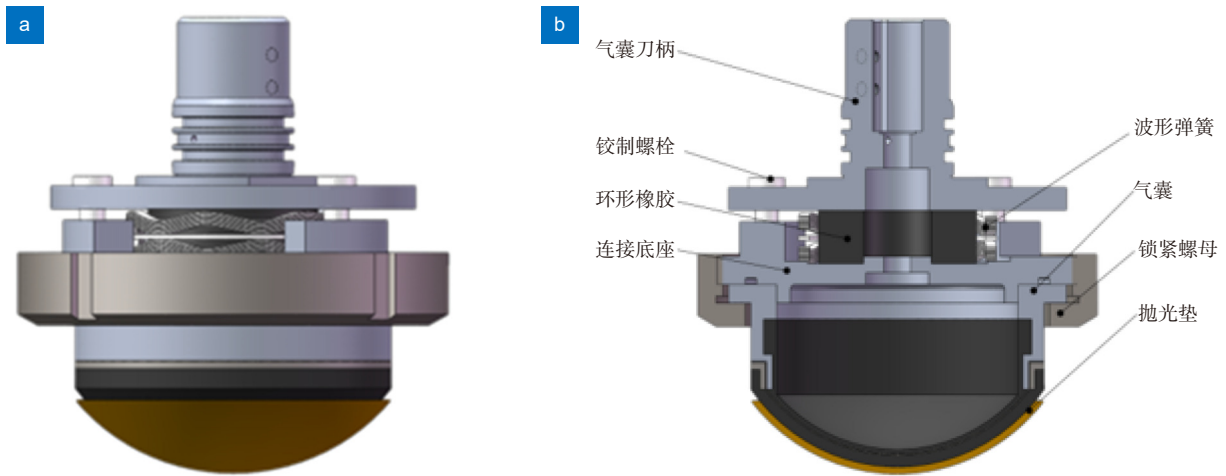


图 18 气囊抑振结构^[24]。(a) 抑振工具头模型图; (b) 抑振工具头剖视图
 Fig. 18 Bonnet suppression structure^[24]. (a) Model diagram of the vibration suppression tool head;
 (b) Section view of the vibration suppression tool head

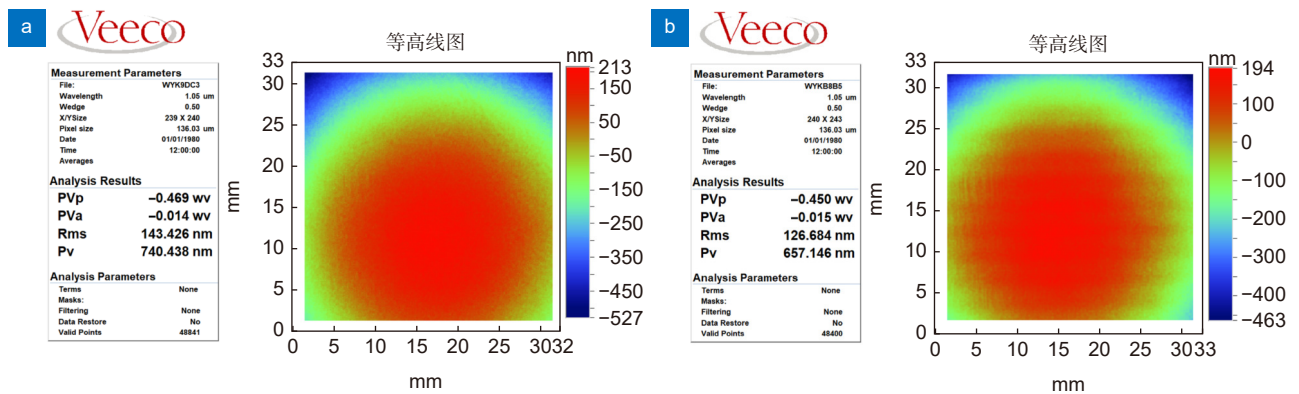


图 19 普通气囊整面抛光前后对比^[24]。(a) 抛光前; (b) 抛光后
 Fig. 19 General bonnet whole surface polishing before and after comparison^[24]. (a) Before polishing; (b) After polishing

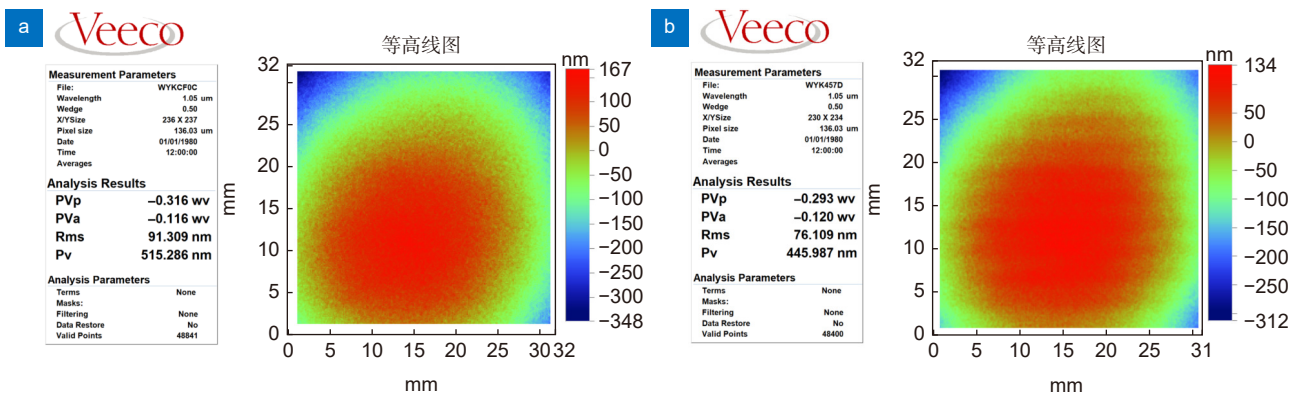


图 20 抑振气囊整面抛光前后对比^[24]。(a) 抛光前; (b) 抛光后
 Fig. 20 Comparison before and after the whole surface polishing of vibration suppression airbag^[24]. (a) Before polishing; (b) After polishing

5 光学元件超精密磨抛加工 CAM 软件

5.1 精密磨削智能化监控系统设计

随着制造行业不断向高端智能化发展, 精密制造领域对质量控制的要求越来越高。为保证机床长期平稳的运行和加工质量稳定, 获取高精度的光学元件, 课题组以自研的 UPG80 大口径光学元件精密磨削机床为研究对象, 设计了精密磨削加工状态智能监控系统, 对磨床的运行过程和磨削加工状态进行实时监测。主要开展了以下三个方面工作:

1) 搭建磨削机床智能监控系统。为了获取磨床运行过程和磨削加工过程的各种特征信号, 采用了 NI-PXI 系统及相关硬件搭建监测平台, 基于 LabVIEW 开发了监控软件, 针对磨床重要部件的振动、温度、声发射信号等进行了实时采集、储存、分析与处理, 最后通过实验测试, 对磨床磨削加工进行现场监测, 验证了监控系统相关功能的可行性^[27]。图 21 所示为 UPG80 磨床的磨削加工状态智能监控系统框架^[28]。

2) 砂轮磨削性能监测。砂轮性能的退化将会对光学元件造成磨削损伤从而使其失去精密加工的作用,

课题组尝试以最直接的声发射信号为对象, 利用单一简单特征表征砂轮磨削性能退化。如图 22 所示, 通过对原始声发射信号进行滤波, 然后计算声发射信号在低频段的归一化能量占比, 并利用主成分分析 (PCA) 对能量占比进行降维, 以降维少数主特征表征砂轮磨削性能退化情况^[29]。此外, 课题组还基于长短时记忆网络 (LSTM) 建立砂轮磨损状态识别模型, 通过小波包分析提取砂轮磨损敏感频段特征, 继而使用降维后的敏感频段频域特征为输入来训练模型以识别砂轮的磨损状态, 并对比了不同超参数下的 LSTM 网络以及传统前馈神经网络的识别效果以获取最佳模型。图 23 所示的模型对比结果表明, LSTM 网络模型相比前馈神经网络 (BPNN) 模型均方误差降低了 73.1%, 均方根误差降低了 33.6%, 实验结果也表明该模型能够较准确识别砂轮磨损状态^[30]。最后, 课题组还利用声发射信号的频谱进行线性判别分析 (LDA), 提出了一种基于 LDA 的砂轮状态恶化在线监测方法, 该方法能够实时识别磨削过程中的不同磨损阶段和砂轮的自锐性^[31]。

3) 磨床热误差反馈补偿。机床结构部件的热变形是机床热误差的主要来源。课题组设计了相应的热平衡监测方案, 对三轴电机、导轨和丝杆等部件利用监

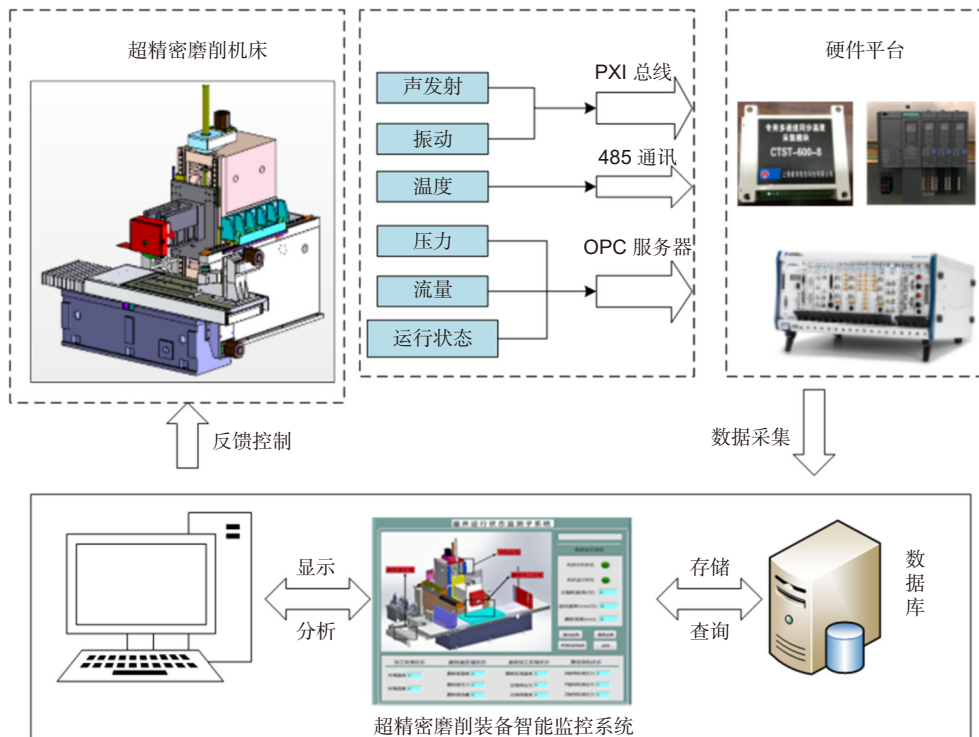


图 21 磨削智能监控系统框架^[28]

Fig. 21 Frame of the intelligent grinding monitoring system^[28]

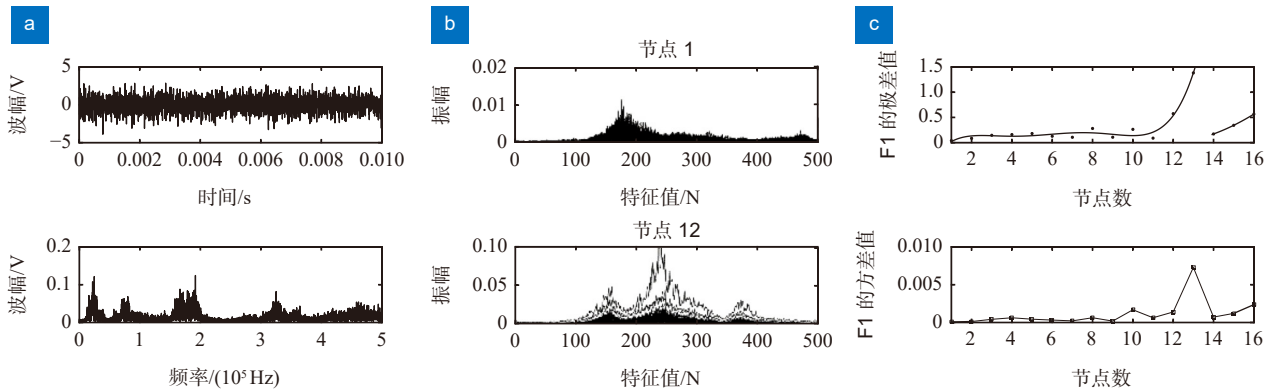


图 22 砂轮磨削性能在线评估^[29]。(a) 声发射波形和频谱; (b) 部分节点各样本低频段能量占比; (c) 主特征表征砂轮磨削性能退化曲线

Fig. 22 Online evaluation of the grinding performance of grinding wheel^[29]. (a) Acoustic emission waveform and spectrum; (b) Proportion of the low-frequency energy in samples of some nodes; (c) Main features represent grinding performance degradation curve of grinding wheel

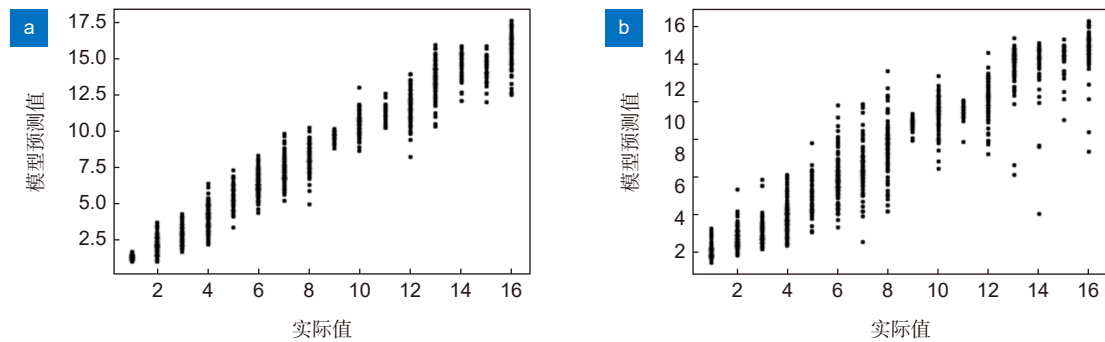


图 23 LSTM 和 BPNN 网络模型对比图^[30]。(a) LSTM 网络模型预测结果; (b) BPNN 网络模型预测结果
Fig. 23 Comparison diagram of LSTM and BPNN network models^[30]. (a) Prediction results of LSTM network model; (b) Prediction results of BPNN network model

测系统的温度检测模块采集相应的温度数据, 通过激光干涉仪获取各轴不同节点的热误差, 建立磨床热误差模型。在加工过程中, 实时将温度数据导入模型中, 获得当前时刻的磨床热误差, 最后利用数控系统的偏置功能实现各轴热误差的实时补偿^[28]。

5.2 高效可控气囊抛光控制软件

高精度光学元件的获取, 除了具备高刚度、高精度的装备与合理的加工工艺外, 还需要保证小工具抛光头的精准控制。课题组开发了五轴高效可控气囊抛光系统控制软件, 该控制软件基于光学元件气囊抛光工艺流程进行设计。如图 24 所示, 控制软件主要功能包括: 气囊工具测量及修正、光学元件粗抛光(保形抛光)、光学元件精抛光(修正抛光)、抛光过程状态监测和仿真及评价。开始加工光学元件前需要对气囊面形进行修整, 随后进入保形抛光和修正抛光两段加工工序, 然后根据实际情况规划, 对两段不同的面

形数据类型、加工路径、加工方式及加工参数等进行设定, 根据参数值对光学元件进行仿真加工, 验证参数能否满足加工要求, 最后生成加工 NC 程序代码, 通过通信模块传至机床, 实现光学元件的超精密加工以及批量化生产。

5.3 机器人辅助研磨恒力控制系统

为满足研磨加工过程中的数据监控与人机交互需求, 课题组基于 Qt 开发了机器人恒力研磨控制系统, 控制系统集成了机器人控制、恒力研磨控制、数据交互、人机交互等功能。如图 25 根据工业机器人辅助研磨加工控制系统的功能需求, 将控制系统分为虚拟空间、物理空间与数据空间三个基本空间。虚拟空间包含了控制模块、运算模块与人机交互模块, 是控制系统的核心, 用于完成机器人的控制、力控计算、仿真预测等任务; 物理空间为机器人本体、传感器硬件设备、双轴平台与工控机等, 是实际执行加工任务的



图 24 五轴高效气囊抛光控制系统。(a) 控制软件主界面; (b) 平面保形抛光; (c) 非球面修正抛光
 Fig. 24 5 axis high efficiency bonnet polishing control system. (a) Main interface of the control software; (b) Plane conformal polishing; (c) Aspheric correction polishing

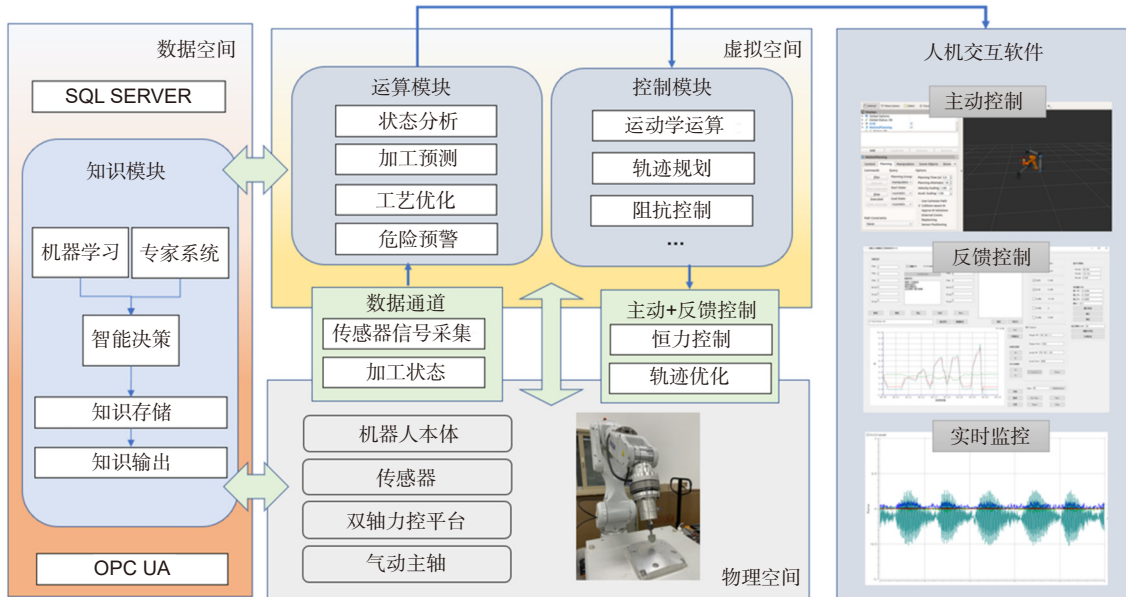


图 25 智能机器人辅助磨抛数字孪生系统框图
 Fig. 25 Block diagram of the intelligent robot assisted grinding and polishing digital twin system

对象, 同时提供各种加工过程信号的硬件支持; 数据空间用于存储研磨加工中的过程数据, 并引入知识模块对数据进行处理与分析, 主要用于对控制模型进行优化。虚拟空间集成了大部分的计算与控制任务, 是

机器人辅助研磨智能力控系统的核心, 需具备实时监测与记录功能、机器人控制与反馈控制功能、计算与优化功能以及人机交互功能。

人机交互界面如图 26 所示, 分为控制区、监测

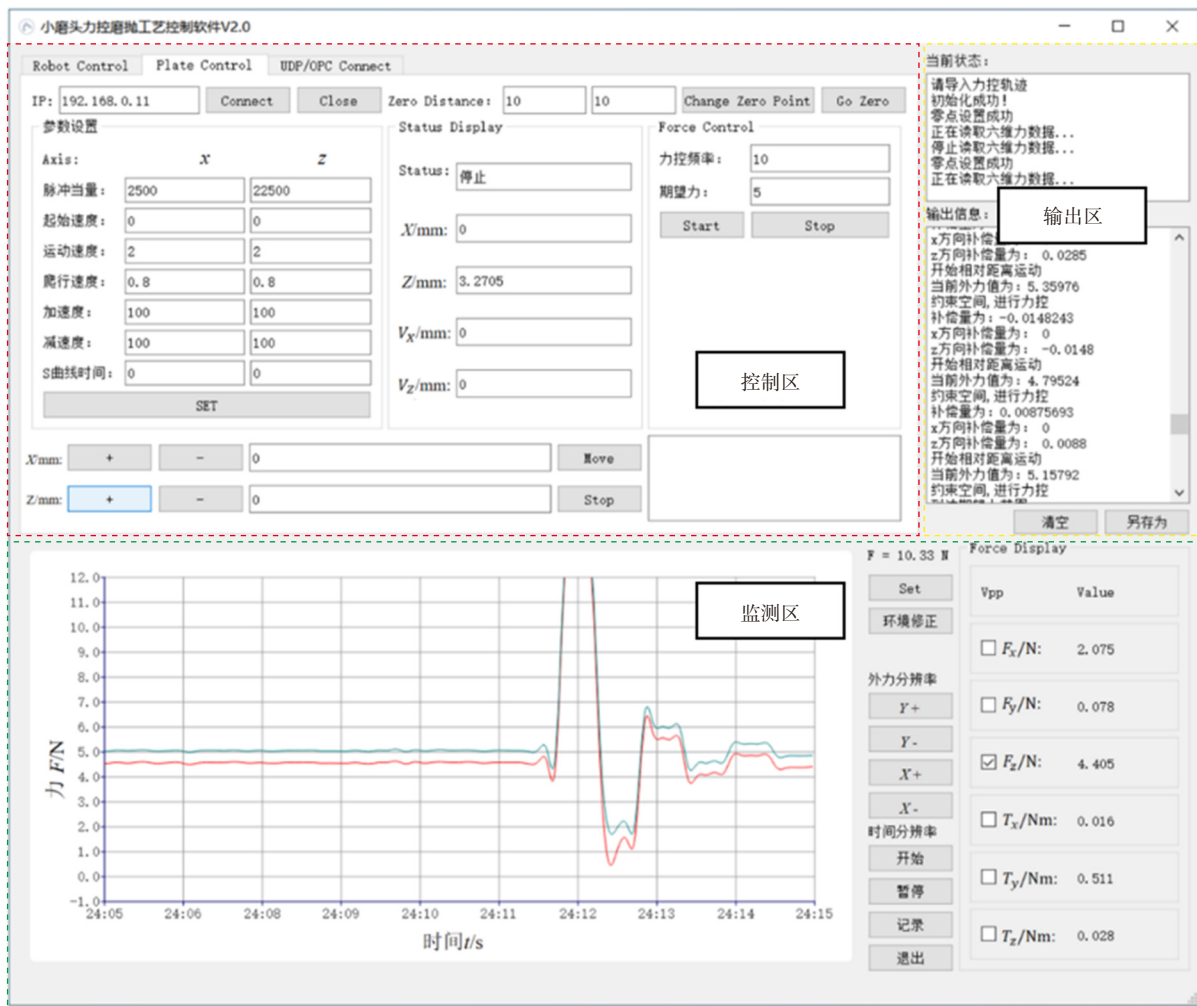


图 26 人机交互界面

Fig. 26 Human-computer interaction interface

区和输出区三个部分。控制区用来进行基本的控制操作和通信连接操作。监测区能够实时地可视化监测传感器信号，对信号进行筛选、比例调节、截取与存储等操作。输出区会输出控制过程的输出量与当前的控制状态信息。

6 结论

本文综述了厦门大学精密工程课题组在光学元件超精密磨削与抛光加工技术方面的研究情况与进展，主要包括：1) 介绍了高刚度的大口径超精密磨削机床与五轴数控气囊抛光机床的研发过程和液体静压支承、加工路径、在线修整等相关单元技术的研究。2) 鉴于气囊抛光无法实现真正意义上的连续进动抛光且核心关键部件过于依赖国外进口，提出了一种空间球柔性进动抛光替代气囊“AB”摆轴进动抛光，且能

够实现较好的柔性抛光功能。3) 开发了磨抛加工 CAM 软件，实现了相应机床的性能监测、热误差补偿以及工具头的精准控制。

未来，随着大型天文望远镜、航空航天、国家大光学工程等领域的深入发展，光学元件的精度要求与需求量势必越来越高，而我国超精密加工技术水平还有很大的提升空间，这需要专业的科研人员不断探索新的加工技术和方法，攻克研制出更高水平超精密装备的难关，推动我国超精密技术发展。

参考文献

- [1] Yuan J L, Zhang F H, Dai Y F, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. *J Mech Eng*, 2010, 46(15): 161-177.
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.
- [2] Wang Z, Wu Y L, Dai Y F, et al. Detection of subsurface

- damage and material removal mechanism in optical polishing process[J]. *J Natl Univ Def. Technol*, 2009, **31**(2): 107–111.
王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料抛光亚表面损伤检测及材料去除机理[J]. *国防科技大学学报*, 2009, **31**(2): 107–111.
- [3] Tonnellier X, Morantz P, Shore P, et al. Precision grinding for rapid fabrication of segments for extremely large telescopes using the Cranfield BoX[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7739**: 773905.
- [4] Luo X C, Cheng K, Webb D, et al. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components[J]. *J Mater Process Technol*, 2005, **167**(2–3): 515–528.
- [5] Ruckman J L, Fess E M, Pollicove H M. Deterministic processes for manufacturing conformal (freeform) optical surfaces[J]. *Proc SPIE*, 2001, **4375**: 108–113.
- [6] Jones R A. Fabrication using the computer controlled polisher[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**(12): 1889–1892.
- [7] Hull T, Hartmann P, Clarkson A R, et al. Lightweight high-performance 1–4 meter class spaceborne mirrors: emerging technology for demanding spaceborne requirements[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7739**: 77390C.
- [8] Geyl R. From VLT to GTC and the ELTs[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5965**: 59650P.
- [9] Zhu X L, Kang R K. Design and development of 300 mm silicon wafer ultra-precision grinding machine[J]. *J Mech Eng*, 2013, **49**(4): 192.
朱祥龙, 康仁科. 300 mm硅片超精密磨床设计与开发[J]. *机械工程学报*, 2013, **49**(4): 192.
- [10] Niu Y J. Research on precision grinding and measurement technique for low subsurface damage of monocrystalline silicon curved optics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 40–52.
牛玉杰. 单晶硅曲面镜低损伤精密磨削及检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 40–52.
- [11] 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]. *Precis Eng*, 2021, **71**: 90–102.
- [12] Lin X H, Wang Z Z, Guo Y B, et al. Truing error analysis of arc wheel in optical aspheric grinding[J]. *Acta Armam*, 2013, **34**(1): 60–65.
林晓辉, 王振忠, 郭隐彪, 等. 光学非球面磨削中的圆弧砂轮修整误差分析[J]. *兵工学报*, 2013, **34**(1): 60–65.
- [13] Chang X L, Wu H Y, Peng Y F. Research on the 2-axis cup-wheel dressing technology of arc-diamond grinding wheel[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9281**: 92811X.
- [14] Guo Y B, Yang W, Wang Z Z, et al. Technology and application of ultra-precision machining for large size optic[J]. *J Mech Eng*, 2013, **49**(19): 171–178.
郭隐彪, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径光学元件超精密加工技术与应用[J]. *机械工程学报*, 2013, **49**(19): 171–178.
- [15] Fan F, Xu X, Xu Q, et al. Progress on ultra precision manufacturing technology of large-aperture high-power laser optics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 200135.
樊非, 徐曦, 许乔, 等. 大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200135.
- [16] Xiao D L, Zhang C, Fang B W, et al. Analysis of liquid hydrostatic guide technology[J]. *Mech Electr Inform*, 2021(20): 51–52.
肖道林, 张超, 房博文, 等. 液体静压导轨技术分析[J]. *机电信息*, 2021(20): 51–52.
- [17] Shi C C, Wang Z Z, Peng Y F, et al. Influence of PM controller parameters on motion accuracy of hydrostatic guideways[J]. *J Mech Eng*, 2020, **56**(1): 157–165.
施晨淳, 王振忠, 彭云峰, 等. PM流量控制器参数对液体静压导轨运动精度影响的研究[J]. *机械工程学报*, 2020, **56**(1): 157–165.
- [18] Bingham R G, Walker D D, Kim D H, et al. Novel automated process for aspheric surfaces[J]. *Proc SPIE*, 2000, **4093**: 445–450.
- [19] Guo Y B, Peng Y F, Wang Z Z, et al. Development and application of precision grinding/polishing and measurement equipment for large-size optical components[J]. *Aeronaut Manuf Technol*, 2018, **61**(6): 26–35.
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.
- [20] Wang C J. Research on efficient polishing technology of semi-flexible airbags for large-diameter optical components[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 109–142.
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: 109–142.
- [21] Peng Y F, Li C L, Shen B Y, et al. Sphere precessions polishing method[J]. *Opt Eng*, 2021, **60**(6): 064108.
- [22] Wang J H, Peng Y F. Robot grinding and polishing impedance control based on environmental model optimization[J]. *Diamond Abras Eng*, 2021, **41**(6): 12–17.
王竞航, 彭云峰. 基于环境模型优化的机器人磨抛阻抗控制[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, **41**(6): 12–17.
- [23] Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation[C]// *1984 American Control Conference*, 1984. <https://doi.org/10.23919/ACC.1984.4788393>.
- [24] Huang X P. Study on the removal mechanism and process optimization of robotic airbag polishing material for SiC components[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021: 51–65.
黄雪鹏. SiC元件机器人气囊抛光材料去除机理及工艺优化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021: 51–65.
- [25] Lin Z W. Research on bonnet polishing technology and process with industrial robot for optics[D]. Xiamen: Xiamen University, 2020: 15–34.
林泽文. 光学元件机器人气囊抛光技术及工艺研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2020: 15–34.
- [26] Lin Z W, Wang Z Z, Huang X P, et al. Influence of robotic structural deformation on bonnet polishing removal function[J]. *High Power Laser Part Beams*, 2021, **33**(5): 051002.
林泽文, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 机器人气囊抛光去除函数稳定性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2021, **33**(5): 051002.
- [27] Tang Q L, Peng Y F, Tong Y F, et al. Design and implementation of multi signal monitoring system for ultra precision grinding machine[J]. *Modular Mach Tool Autom Manuf Tech*, 2019(2): 72–75.
汤期林, 彭云峰, 童雅芳, 等. 超精密磨床多信号监测系统的设计与实现[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(2): 72–75.
- [28] Bi G, Tang Q L, Wang Z Z, et al. Design and implementation of multi signal monitoring system for Ultra Precision grinding machine[J]. *Aeronaut Manuf Technol*, 2019, **62**(6): 32–40.
毕果, 汤期林, 王振忠, 等. 精密磨削机床智能监测系统开发与应用[J]. *航空制造技术*, 2019, **62**(6): 32–40.
- [29] Bi G, Wang H X, Zhou L, et al. Gringing performance degradation of diamond wheel[J]. *Opt Precis Eng*, 2019, **27**(7):

1508-1515.

毕果, 王惠雪, 周炼, 等. 金刚石砂轮磨削性能退化评估[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1508-1515.

- [30] Su S B, Bi G, Zheng S H, et al. Identification of wear status of diamond grinding wheel based on LSTM and acoustic emission[J]. *Mod Mach Tool Autom Manuf Tech*, 2021(8):

169-172.

苏史博, 毕果, 郑守红, 等. 基于LSTM和声发射的金刚石砂轮磨损状态识别[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(8): 169-172.

- [31] Bi G, Zheng S H, Zhou L. Online monitoring of diamond grinding wheel wear based on linear discriminant analysis[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 115(7-8): 2111-2124.

作者简介



彭云峰(1977-), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为光学先进制造、精密磨削与抛光、加工环境控制、精密制造相关检测、高端装备等。

E-mail: pengyf@xmu.edu.cn



【通信作者】何佳宽(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为超精密加工。

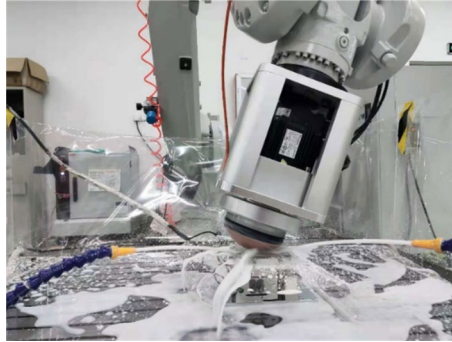
E-mail: 18850470962@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development

Peng Yunfeng^{1,2}, He Jiakuan^{1,2*}, Huang Xuepeng^{1,2}, Liu Jiaming^{1,2},
Wang Zhenzhong¹, Li Chenlei^{1,2}, Wang Jinghang¹



Robot bonnet polishing picture

Overview: Driven by the rapid development of national optical projects such as laser nuclear fusion and aerospace telescopes, as well as high-end civilian fields such as advanced instruments and optical lenses, the requirements for full-frequency domain processing errors and surfaces of optical components are becoming more and more stringent. At this stage, the optical components generally need to go through rough grinding, fine grinding, polishing and coating, and other processes, and their surface quality mainly depends on the defect removal ability and error control level of the polishing process. Whether the fine grinding process can obtain better surface shape accuracy and low surface/subsurface damage suppression determines the processing efficiency, and the ultra-precision processing manufacturing equipment is the premise of the realization of ultra-precision machining of the optical components. So far, all countries in the world have invested in the research and development of optical ultra-precision grinding and polishing technology, and have developed more relatively mature high-precision grinding and polishing equipment, which can better meet the processing needs of most of the current optical components. For the core equipment and key technologies required for ultra-precision manufacturing, China has long relied on imports. In order to break through the bottleneck restricting the development of ultra-precision technology in China at this stage, under the traction and drive of the national large-scale engineering project, China has made remarkable progress in optical ultra-precision manufacturing equipment and technology. However, for the optical ultra-precision technology and equipment, there is still a certain gap between China and the international advanced level, and it is necessary to continue to strengthen the research. In addition to the high-end grinding and polishing equipment necessary for the ultra-precision machining of optical components, it is also necessary to strengthen the technical level of a series of key supporting units, such as ultra-precision grinding and polishing processing technology, high-end key functional components, intelligent monitoring technology of processing environment, efficient ultra-precision machining tools, processing and inspection path planning and compensation processing strategies, computer-aided manufacturing and testing software, etc. The research, development, and application of these technologies are related to the development of high-end manufacturing in the civilian fields and national defense fields, and are also the focus of the country. This paper mainly focuses on the ultra-precision machining of large-diameter optical aspherical components. Starting from the grinding and polishing process route, this paper introduces the long-term research progress of the Precision Engineering Laboratory of Xiamen University in the field of large-diameter optical aspherical component processing, and introduces in detail the technical and system achievements such as ultra-precision grinding and polishing equipment, robot-assisted grinding and polishing, equipment intelligent monitoring system, processing technology and control software.

Peng Y F, He J K, Huang X P, et al. Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220097; DOI: 10.12086/oe.2023.220097

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075463) and Technology Projects of Shenzhen (JCYJ20210324122001003)

¹School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; ²Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen, Guangdong 518057, China

* E-mail: 18850470962@163.com