

大口径非球面元件磨削轮廓测量技术研究进展

席建普, 李彬, 任东旭, 赵则祥

中原工学院机电学院, 河南 郑州 450007

摘要 大口径非球面光学元件具有优越的光学特性,在激光聚变、空间技术和大型光学望远镜等领域有着越来越广泛的应用。然而大口径非球面元件的大批量生产需要高精度和高效率的数控磨削、抛光技术,同时超精密大中型非球面光学元件大批量制造所面临的巨大挑战推动了现代光学测量技术朝着更高的效率、更高的精度和更高的自动化水平方向发展。根据非球面光学元件的加工工艺,系统总结了磨削阶段测量技术的研究现状,并详细说明了以上技术的原理,最后展望了大口径非球面元件磨削阶段测量技术的发展趋势。

关键词 光学设计; 非球面元件; 轮廓误差; 离线测量; 在位测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030008

Research Progress of Measurement Technology for Large-Diameter Aspheric Elements on Grinding Stage

Xi Jianpu, Li Bin, Ren Dongxu, Zhao Zexiang

School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China

Abstract Large-diameter aspheric optical elements have superior optical properties, and they are more and more widely applied in the areas such as laser fusion, space technology and large optical telescopes. However, the mass production of large-diameter aspheric elements requires high-precision and high-efficiency numerical control grinding and polishing techniques. Meanwhile, the enormous challenges of mass production of ultra-precision medium and large aspheric optical elements have propelled the modern optical measurement technology toward higher efficiency, higher accuracy and higher level of automation. According to the processing technology of aspheric optical elements, the research status of measurement technology in grinding stage is summarized systematically, and the principles of the above technologies are explained in detail. At last, the development trend of the measurement technology of large aspheric optical elements in grinding stage is prospected.

Key words optical design; aspheric element; profile error; off-line measurement; on-machine measurement

OCIS codes 220.1250; 220.4610; 080.4228; 120.6650

1 引言

在光学系统中采用非球面元件不但可以大幅度改善系统的性能,还能减少系统的尺寸及重量,给光学系统带来革命性的提升,因此非球面被广泛应用于军事、航天、医学等领域^[1-2]。随着航天、国防等高技术领域的发展,人们对大中型光学非球面的需求越来越大,对其制造精度的要求也越来越高。在超

精密光学测量系统、激光核聚变装置、大型光学望远镜系统等高技术水平的产品中,非球面元件均为各系统的核心部件,例如,美国加那利大型望远镜(CELT)和大型分割反射望远镜(GSMT)、加拿大加拿大-法国-夏威夷望远镜(CFHT)计划的高动态范围望远镜(HDRT)主镜、欧洲共同体EURO主镜、EURO50天文台拼接的离轴非球面镜等^[3]系统中的超过1 m口径的非球面元件;美国激光惯性约

收稿日期: 2017-09-11; 收到修改稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705546)、河南省高等学校重点科研项目(18A460037)、河南省高等学校现代制造装备与仪器重点学科开放实验室(2016MEI005)

作者简介: 席建普(1983—),男,博士,讲师,主要从事超精密加工技术与装备、精密测量技术方面的研究。

E-mail: xjpyq2010@163.com

束聚变国家点火工程(NIF)和法国兆焦耳激光系统(LMJ)^[4-6]需要的几千块米级大中型口径非球面镜,要求其面形精度在亚微米级水平,表面粗糙度达到纳米级水平^[7]。随着大中型非球面光学元件在航天、天文、国防军工及民用光电领域的广泛应用,对非球面元件制造效率、制造成本等方面提出了更高的要求,并且大中型非球面制造问题已经成为制约我国航空、国防等高新技术领域发展的瓶颈问题之一。

非球面光学元件大多为硬脆性玻璃或者玻璃陶瓷材料,这些材料的加工难度较大。现在非球面元件加工工艺流程分为成型、磨削、抛光三个阶段,其中磨削和抛光阶段都需要通过检测来指导加工^[8-10]。非球面元件的加工过程与检测是不可分的,这样不仅可以提高加工效率,同时也能保证其精度要求。因各个阶段要求的表面精度不同,各个阶段的检测方法也是不同的。在磨削阶段,首先进行粗磨成形,面形误差一般在数十个微米量级,需要进行非球面面形快速修正的精磨-测量-再磨削的工艺处理。由于面形误差较大,需要采用测量补偿方法来实现,这样可以提高加工的精度和效率,目前主要有在位和离线两种测量手段^[11-13]。在光学元件在加工过程中,超精密磨削技术以其高准确性、高自动化的特征已成为精密和超精密加工的主要技术之一。由于国内起步较晚,对于大口径非球面磨削阶段的测量技术和测量仪器还需要进行系统性研究,从而为磨削阶段的加工工艺服务。非球面测量技术采用接触式或非接触式测头进行数据采集,结合超精密制造、误差补偿和计算机控制等技术,为非球面制造过程提供高效的测量手段^[14-15]。因此,非球面光学元件测量技术的研究已成为超精密加工过程的一个重要内容,测量能力直接体现了制造能力和制造水平。

本文以大口径非球面光学元件磨削阶段的测量技术为主要内容,分析并展望了大口径非球面光学元件测量技术的发展趋势,主要从国内外研究现状、测量原理和测量方法等方面进行了阐述。

2 大口径非球面元件磨削阶段测量仪器研究现状

光学元件测量技术是非球面元件制造技术的基础,借助测量技术可以提高光学元件的制造效率和制造精度。对于大口径非球面而言,磨削和抛光阶段的加工都需要检测手段来指导完成,图1为光学非球面

元件加工链流程图,其中NC表示数控。欧美发达国家已经对大中型非球面元件的测量技术和装备的研制和开发投入大量的人力、物力及财力,并成功研制出大中口径非球面精密测量仪器及成套设备,相关的测量仪研究成果如图2所示,其中ZEISS XENOS极限测量精度的三坐标测量机用于光学元件测量,其长度方向测量精度为 $(0.3+L/1000)$ mm,测量范围在 1 m^3 之内。Leitz Infinity三坐标测量机测量范围可达 $(1200\times 1000\times 700)$ mm,空间任意测量精度为 $(0.3+L/1000)\text{ }\mu\text{m}$,该仪器主要用于高精度光学镜头和曲面的测量。Taylor Hobson PGI Dimension轮廓测量仪测量口径可达300 mm,面形误差为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。2006年英国伦敦大学学院和英国国家物理实验室(NPL)完成了摆臂式非球面轮廓测量仪的研制,其最大测量口径可达1 m,面形测量精度可达 20 nm ^[16],如图3所示。在非球面光学元件磨削阶段,国外主要采用接触式轮廓扫描方法测量,例如英国Cranfield大学采用Leitz的三坐标测量机进行磨削阶段的非球面面形误差测量,采用测量结果进一步修正元件误差;美国詹姆斯·韦伯太空望远镜主镜铰磨初期采用Leitz的大型坐标测量机进行测量,当磨削表面粗糙度达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级时,再采用红外扫描来获得表面轮廓^[17]。美国亚利桑那大学采用非接触式的激光三角测量传感器实现了磨削阶段的非球面轮廓测量,打破了摆臂式光学坐标测量仪仅能测量抛光后表面的限制^[18]。

国内对大中口径非球面轮廓扫描测量研究较多,对测量技术的提升积累了大量的经验,对于铰磨和粗抛阶段的非球面的检测,国内学者也开展了一些研究工作。贾立德等^[19]对摆臂式非球面轮廓测量的原理与技术进行了探讨,其优点是测量所需传感器量程小,测量运动为一个简单的回转运动;同时贾立德等^[20]也开发了基于柱面坐标系的新型光学坐标测量机,该测量机满足了大口径非球面精磨和粗抛过程的测量要求,测量非球面口径600 mm,系统精度优于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。程灏波^[21]对精研磨阶段非球面面形接触式测量误差补偿技术开展了研究;Zhu等^[22]开发了大口径非球面离线轮廓测量仪,该测量仪实现了接触式和非接触式两种测量方式;北京机床研究所与苏州大学开发的大口径非球面轮廓测量仪,采用海德汉长度计实现数据采集并通过对导轨误差校正来提高测量精度,在此基础上仇谷烽等^[23]建立了接触式非球面轮廓测量的数据处理模型。西

安交通大学研制了大口径非球面形状测量仪UPFM900,该测量仪最大测量口径可达900 mm,

采用超精密气体静压转台和导轨技术,根据柱坐标方式进行采样。

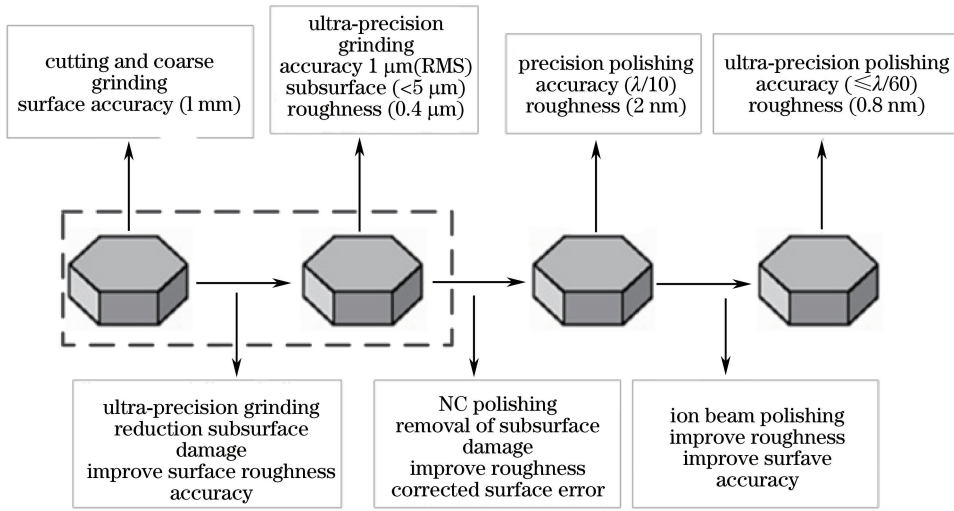


图1 光学非球面元件加工链流程图

Fig. 1 Flow chart of optics aspheric elements processing chain

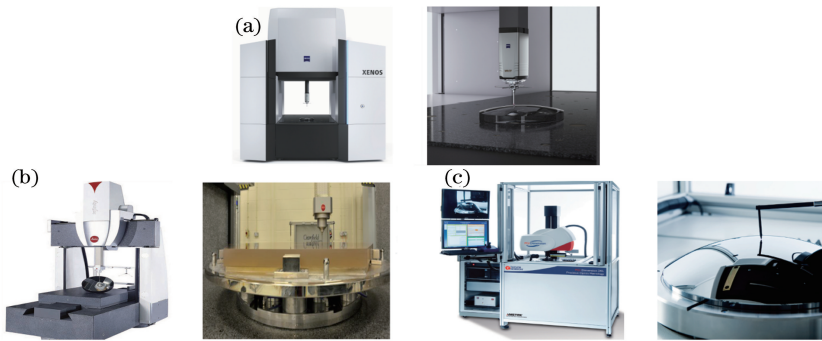


图2 大口径非球面测量商业化仪器。(a) ZEISS XENOS; (b) Leitz Infinity; (c) PGI Dimension

Fig. 2 Commercial instruments for large aperture aspheric measurement.

(a) ZEISS XENOS; (b) Leitz Infinity; (c) PGI Dimension

以上测量设备所用测量技术可以总结为两个方向:坐标测量和轮廓扫描测量。三坐标测量机采用的测量方式为点扫描方式,通过测量非球表面的点进行面形误差的计算分析,而轮廓扫描测量方法采用扫描子午线方法对工件表面采样,通过拟合非球面参数计算轮廓误差。测量仪器都是采用气体静压技术,保证超精密的运动导轨副,对于大口径非球面需要更大尺寸的测量设备,因此对于超精密的运动导轨副提出了更高的要求,需要对大尺寸的轮廓测量仪的机械结构、采样方式和评定软件进行创新设计。对于大口径非球面磨削阶段面形的测量技术来说,其测量精度越来越高,测量口径越来越大,非球面磨削加工工艺方法可以通过磨削补偿加工来修正测量误差,提高误差补偿的效果。



图3 摆臂式轮廓测量仪

Fig. 3 Swing-arm profilometer

3 大口径非球面元件磨削阶段的精密检测技术

3.1 磨削阶段大口径非球面元件在位测量技术

大口径非球面磨削阶段的精密测量技术主要受尺寸和精度限制,采用离线测量对于大口径非球面

磨削过程而言,元件的安装和调整都比较复杂,且离线测量容易引入新的误差,因此根据轮廓扫描方法提出了在位测量技术并应用到实际加工过程,目前应用较多的补偿磨削手段为在位测量误差补偿技术。在位测量技术主要是在机床主轴部位安装精密

传感器,利用机床的运动机构并且按照规划好的路径进行测量,非球面磨削阶段的在位测量误差补偿技术是磨削工艺的主要手段,需要经过磨削-测量-补偿磨削反复修正来完成,图4为补偿磨削流程图^[24]。

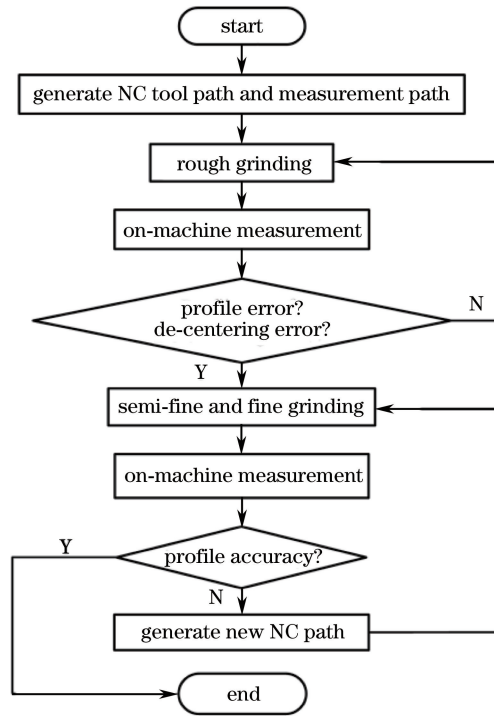


图4 非球面补偿磨削流程图

Fig. 4 Flow chart of the compensation grinding for aspheric surface

国内外研究者对在位测量补偿技术进行了研究,包括接触式和非接触式两种采样方式,采用接触式测头进行非球面轮廓采样主要采用海德汉长度计,通过对长度计的安装误差进行校正以提高测量精度。Shimizu等^[25]通过对测头的倾斜误差校正、测量不确定的分析,把测量轮廓误差结果反馈到制造加工过程,通过磨削补偿将800 mm口径非球面元件面形误差提高到 $5\ \mu\text{m}$,图5为磨削在位接触式测量装置;李彬等^[26]采用接触式测量方法对大口径非球面实现了高精度在位测量和补偿。为了更全面地确定在位测量非球面的轮廓,Dong等^[27]发展了在位三维轮廓的测量评定方法,通过对机械和长度计误差进行校正提高了测量精度,并对测头测量误差进行补偿。

伴随着传感器技术的发展,出现了采用非接触式传感器进行在位测量的方法,该方法采用日本Keyence公司的激光位移传感器通过特定工艺完成非球面面形测量,测量效率大大提高。厦门大学Lin等^[28]采用非接触式光学位移传感器Keyence



图5 大口径非球面磨削在位测量装置^[28]

Fig. 5 Device of large-diameter aspheric grinding on-machine measurement^[28]

LK-G10对大口径非球面元件磨削过程进行在位测量误差补偿,400 mm口径元件补偿后面形精度达到 $4.1\ \mu\text{m}$ 。成都精密光学工程研究中心采用非接触式位移传感器对大尺寸非球面光学元件进行在线检测^[29];西安交通大学赵惠英团队^[30]针对大口径非球面磨削阶段的在位测量、非接触式测量进行误差补偿研究,对800 mm大口径非球面元件补偿后最终面形精度达到 $8\ \mu\text{m}$ 。Chen等^[31]采用基于线

性可变差动变压器(LVDT)原理的测头对非球面表面轮廓测量,通过对测头倾斜误差校正,实现了在位测量误差补偿。

作为提高大口径非球面磨削加工的加工工艺,在位测量技术对于小口径的非球面磨削加工效果明显,但是对于大口径非球面的在位测量需要借助运动轴的运动来完成,这就引入了磨削设备的运动误差,降低了测量的精度。因此,对于大口径非球面元件磨削阶段的轮廓测量,如何消除测量过程中的运动误差成了测量的关键。在位测量误差补偿的实质是补偿磨削,如何将测量的结果反馈到磨削程序是补偿磨削工艺的难点。

3.2 非球面光学元件离线轮廓扫描测量技术

大口径非球面离线测量技术主要是为了获取更精确的面形轮廓,该技术通过反复误差补偿提高磨削阶段的面形精度,从而提高抛光阶段的加工效率。在磨削阶段,面形误差较大,而且表面粗糙度不佳,超出了干涉测量的精度范围,所以不能使用常规的光学方法如刀口阴影法、激光数字干涉法等进行面形测量,而是采用 CO₂ 红外干涉仪、三坐标测量仪、表面轮廓仪等来检测非球面精磨阶段的面形,这类测量方法都属于离线测量,并定义为轮廓扫描测量方式。目前大口径非球面元件的高精密磨削都需要高精度的测量来指导完成,虽然已经出现了成熟的测量仪器,但各测量仪器也存在一定的局限性,如测量仪器基本都是为了完成特定的国防和大型工程而进一步研发的设备,测量的口径和精度都有限,并且国外对高精度的测量仪器有禁运规定。因此离线测量技术的发展可大大提高非球面磨削制造精度。

3.2.1 CO₂ 红外干涉仪测量技术

传统的可见光干涉仪采用 He-Ne 激光器,其波长为 0.6328 μm,比被测面的精度小了一个数量级,因形成的干涉条纹太密集,干涉仪无法进行数据处理,也不能由人眼观察到被测光学非球面元件的面形质量。采用 CO₂ 激光器微光源的红外干涉仪,其中 CO₂ 激光器的波长为 10.6 μm,波长比在精磨阶段面形误差要大,一般精密磨削后非球面元件面形精度范围为 3~8 μm^[32]。红外干涉仪采用 Fizeau 型干涉系统,测量方法精度高,测量效果好,根据红外干涉仪得到的非球面元件特征干涉图,通过四步移向算法得到非球面与标准拟合面的相位差,计算得到非球面面形偏差。但是在国内很少有厂家使用红外干涉仪,主要原因是此测量

设备价格相当昂贵,在国内得不到普遍使用。泰曼格林红外干涉光学系统与可见光干涉仪的测量结果比较如图 6 所示,其中可见光干涉条纹密,从而无法计算结果,而 CO₂ 干涉条纹可通过移相法进行检测计算。但由于此类仪器价格昂贵,很难应用到实际生产中。

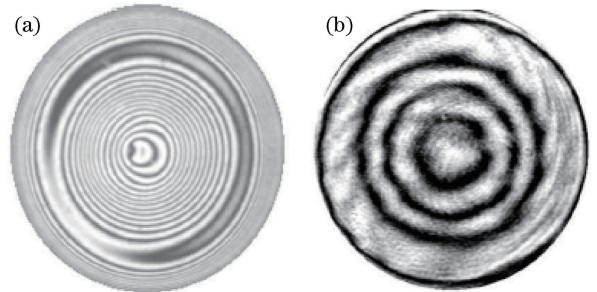


图 6 (a)可见光干涉仪与(b) CO₂ 红外干涉仪的测量结果

Fig. 6 Measurement results of (a) visible light interferometer and (b) CO₂ infrared interferometer

3.2.2 三坐标测量方法

三坐标测量机是一种集机械、光学、电子、数控技术和计算机技术为一体的大型精密智能化仪器,测量非球面镜不受透镜口径、非球面度、最大倾角、材料等的限制,可以用来测量各类大中型非球面元件。通过三轴运动,根据设定的轨迹带动测头进行工件表面的三维坐标点采样,从而得到非球面元件的面形误差,三坐标测量机可以规划测量路径,通过往复扫描采样非球面元件表面点集,后续测量数据需通过专用软件进行滤波、拟合和误差计算,三坐标测量机行程较大,因此主要应用于玻璃材料的大中型非球面面形检测。国外采用精密三坐标测量仪进行非球面磨削阶段的误差测量,英国 Cranfield 大学在非球面磨削过程中采用三坐标测量机进行误差校正磨削。基于三坐标测量原理出现了大口径径轴非球面拼接测量方法,该方法采用三坐标测量仪测量非球面的原理,对校正三坐标自身误差后的误差进行分析计算,建立相应的数据处理模型^[33-34]。非接触式的三坐标测量仪是把非接触的三角测量激光头安装在三坐标测量机上,通过扫描工作台的二维移动及探头的上升下降,利用计算机对测量数据进行处理以获得非球面元件的表面信息。英国 Cranfield 大学采用三坐标测量机对磨削阶段大口径非球面进行测量,得到的空间分辨率为 10~0.25 mm,精度优于 0.3 μm,图 7 为相关测量仪器^[35]。目前对于米级光学元件的测量采用三坐标测量机实现,大大提升了磨削加工阶段的精度,但

是由于三坐标测量机测量后需要重新将工件固定到磨削机床工作台面,这样容易引入误差,因此如

何将测量误差准确地映射到磨削机床上成了离线测量的关键。

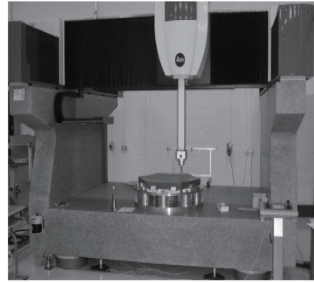
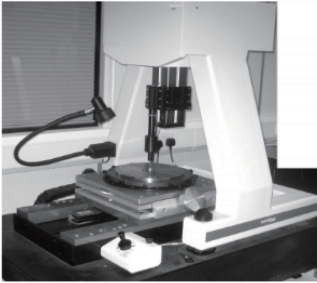


图7 Cranfield大学的轮廓扫描测量设备

Fig. 7 Profile scanning measuring devices of Cranfield University

3.2.3 表面轮廓测量方法

使用表面轮廓仪是直接测量面形的一种简单、直观且成本相对较低的方法,轮廓扫描机械结构一般采用ZB轴结构类型的测量仪器,包括高精度直线Z轴和旋转B轴,采用机械或光学探头对非球面进行扫描,采用接触式测头和非接触式测头对工件表面进行点采样,然后通过软件进行面形误差处理。表面轮廓仪主要有由美国的David设计的摆臂轮廓仪、美国Taylor-Hobson公司生产的PGI 3D轮廓仪、长春光学精密机械研究所研制了双测头非球面面形轮廓测量仪和厦门大学研制的双测头轮廓测量仪等,其中PGI 3D轮廓测量仪可对300 mm非球面进行三维轮廓评定,图8为测量多条子午线后的三维评定轮廓误差。扫描过程包括子午线扫描、多条子午线复合扫描,其中在非球面检测路径规划方面,厦门大学提出了圆周式、光栅式和子午线式三种检测路径,并对曲线拟合算法进行了研究^[36]。同时现有的轮廓测量仪器测量精度高,但测量口径受限,张东旭等^[37]利用Taylor轮廓测量仪通过拼接测量方法进行了磨削阶段大口径非球面的测量技术研究,提出了一种多段拼接综合优化数据处理模型,为大口径非球面轮廓高精度测量提出了新的方法。大口径非球面表面轮廓测量采用离线测量手段,离线测量的目的就是将测量的误差反馈到磨削补偿程序,实现精密磨削误差补偿,因此离线测量的关键就是将轮廓误差与补偿磨削路径的映射关系建立模型,并通过软件实现误差评定和补偿磨削路径生成。

为了实现大口径非球面轮廓扫描测量,国内外做了大量的研究且已有成熟的测量方案,如英国Cranfield大学采用Taylor-Hobson Talyseries轮

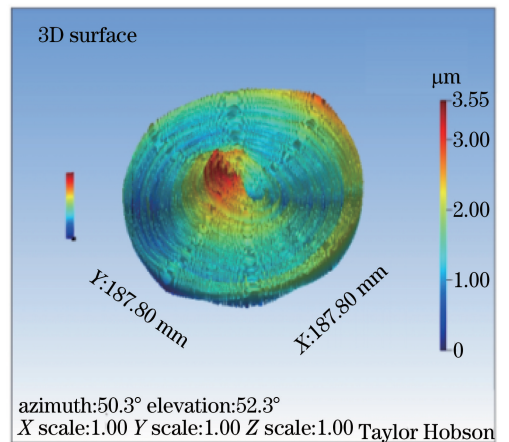


图8 非球面三维轮廓误差图

Fig. 8 3D profile error of aspheric surface

廓扫描仪^[38](图7)对磨削阶段的大口径非球面进行测量,其中Taylor轮廓扫描仪的测量行程可达310 mm,测量拟合精度达1 μm 。Yang等^[38]根据Taylor轮廓测量仪进行了大口径非球面三维轮廓的拼接测量技术研究,实现了三维轮廓的评定和精密测量。贾立德等^[39]介绍了摆臂式轮廓仪的测量原理和方法,该技术主要应用于在位测量误差补偿,用于修正磨削或粗抛的面形误差。针对大口径非球面磨削阶段的测量,西安交通大学开发了大口径轮廓测量仪,测量精度优于 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,测量口径可达900 mm。针对轮廓非接触式扫描方法,最近几年国外一些公司也研制了相关的测量仪器,如Taylor Hobson公司的Luphscan系列测量仪[图9(a)],测量口径可达420 mm;荷兰TNO公司的Nanomefos轮廓测量设备[图9(b)],测量不确定度可达15 nm(均方根值),测量口径可达 $\Phi 500 \text{ mm}$,该设备不仅可以测量非球面元件,同时也可以测量自由曲面。



图9 非接触式扫描测量仪。(a) Nanomefos;(b) Lumphoscan

Fig. 9 Non-contact scanning measuring instruments. (a) Nanomefos; (b) Lumphoscan

4 大口径非球面磨削阶段测量技术的未来研究工作

对于非球面轮廓扫描测量来说,三坐标测量机不受口径限制,但是由于阿贝误差的存在,三坐标测量机的精度一直是制约其应用的主要因素。三坐标测量机的测量效率较低,并且国际上高精度三坐标测量仪对中国禁运,因此我国需要开发磨削阶段所用高精度的大口径非球面测量仪器,以提高加工的精度和测量效率。我国超精密加工技术起步较晚,对于大口径非球面超精密磨削阶段的测量技术需要在以下几方面进行进一步研究。

4.1 高精度在位测量技术

非球面在位测量误差补偿技术提高了磨削精度和效率,但是受机床运动机构自身误差影响,测量误差补偿的精度有限。目前普遍采用的接触式测头都存在一定的测量力,有划伤工件的危险,并且受测量力和工件曲率的影响,测量测头存在较大误差。在位测量传感器采样方式和精度直接影响测量的结果,因此传感器的研究可有效提高测量效率和精度。由于在位测量的精度受机床自身精度影响较大,因此测量路径规划和测量需要避开误差较大方向或者运动轴,对运动导轨的误差进行补偿,以此来降低运动机构的误差影响。在位测量过程中,需要对测量误差与补偿磨削过程进行精确对应,因此补偿磨削路径和测量路径的测量误差对应点要确保在一个坐标系里,需要对测量坐标系和磨削坐标系进行理论分析,除了对路径进行修正和坐标对应外,还应应对在位测量补偿磨削的误差拟合和计算进行深入研究。

4.2 大口径超精密非球面轮廓测量仪的研制

国外关于非球面轮廓测量仪器的研究已经达到了很高的水平,如美国 Taylor Hobson 公司的 Form Talysurf PGI 1240 和 PGI Dimension 是当今接触式非球面透镜测量最先进的仪器,但是存在测

量口径受限的问题。对于大口径非球面测量仪器存在许多关键技术,包括仪器机械结构的创新、超精密运动导轨和转台的研制等。因为测量工件的口径大,所以对于大口径非球面的测量需要大的旋转工作台来支撑,并且需要对工作台进行位置调整,采用气体静压技术来提高精度,同时可展开固体润滑导轨的研究工作,提升测量仪器的运动精度。测量仪器的研究评定和数据采集软件是关键,从最优化方案出发,对非球面的测量评定软件需进一步研究和分析。离线大口径非球面测量的目的主要为了服务磨削误差补偿,因此测量误差与最终的磨削补偿路径怎样对应,误差映射关系怎样结合需要深入研究,从而大大提高误差补偿精度和效率。

国内外对于大中口径非球面光学元件磨削阶段测量技术研究取得了实质性的进展,但对于大口径非球面元件在各个加工阶段没有相对统一的测量方法,仍存在一些问題。商品化的仪器对测量面形的口径和精度有待提高,在磨削阶段测量倾向于在位测量,以提高测量效率和精度。国内外有大量的关于大口径非球面在位测量误差补偿的研究成果,但是在测量原理和测量精度方面需要提高,目前为了提高测量精度,需要开发离线高精度轮廓扫描测量仪器,并且应以提高效率为宗旨开发非接触式的高精度测量仪。非球面光学元件都由硬脆性的材料制成,磨削阶段会产生亚表面损伤,因此亚表面损伤层的深度检测尤为重要,非球面元件的测量精度需要提高一个等级并实现对亚表面损伤层的检测,因此测量效率和测量手段需要革新。通过对国内外大中口径非球面测量技术的分析,伴随着新的物理原理和新的技术出现,测量精度和测量速度于一体的新型大中型非球面元件的测量仪器是未来发展方向,并进一步对磨削阶段的亚表面损伤深度测量技术进行深入研究,进而填补亚表面损伤探测的仪器空白。

5 结 论

大口径非球面光学元件需求量越来越大,对其表面质量和表内质量的要求也越来越高,因此高精度的测量技术是提高加工效率和精度的必要手段。为了满足各个磨削工艺阶段的精度要求,国内外进行了各类测量原理的探索,开发了各种类型的专用测量仪器,国外企业和研究机构实现了相关测量仪器的商品化。与世界先进国家相比,我国在这方面还比较落后,虽然在加工和测试方面也有人提出了新方法和新理论,但仍限于理论探讨和实验研究阶段,检测技术的精度都达不到要求,因此还需要不断改进。对于亚表面损伤的测量还需要进行理论上的深入研究,进一步形成硬脆性光学非球面元件成套的测量设备。

参 考 文 献

- [1] Yang L. Advanced optical manufacture technology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 5-10.
杨力. 现代光学制造工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 5-10.
- [2] Shang C M, Zhang D M, Zhang X M. Lapping model of processing aspheric parts by the method of the lapping tool of bending and forming [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(5): 128-132.
尚春民, 张东梅, 张小明. 磨具弯曲成形法非球面研磨的研磨模型[J]. 光电工程, 2012, 39(5): 128-132.
- [3] Li S Y, Dai Y F. New technology for manufacturing and measurement of large and middle-scale aspheric surfaces [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 100-150.
李圣怡, 戴一帆. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 100-150.
- [4] Tonnellier X, Shore P, Morantz P, *et al.* Surface quality of a 1 m Zerodur part using an effective grinding mode[C]. SPIE, 2008, 7102: 71020B.
- [5] Andre M L. Status of the LMJ project [C]. SPIE, 1997, 3047: 38-42.
- [6] Stolz C J. The National Ignition Facility: the world's largest optical system [C]. SPIE, 2007, 6834: 683402.
- [7] Shore P, Cunningham C, Debra D, *et al.* Precision engineering for astronomy and gravity science [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 694-716.
- [8] Guo Y B, Yang W, Wang Z Z, *et al.* Technology and application of ultra-precision machining for large size optic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 171-178.
郭隐彪, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径非球面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.
- [9] Zhang X Z, Yan G J. Method of hybrid compensation detection-off-axis parabolic mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121203.
张宪忠, 闫公敬. 基于混合补偿检测-离轴抛物面的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121203.
- [10] Liu L, Chen X D, Xiong L, *et al.* Angle error investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1104003.
刘力, 陈新东, 熊玲, 等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104003.
- [11] Brinksmeier E, Mutlugünes Y, Klocke F, *et al.* Ultra-precision grinding [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 652-671.
- [12] Shimizu Y, Goto S, Lee J, *et al.* Fabrication of large-size SiC mirror with precision aspheric profile for artificial satellite [J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 640-649.
- [13] Cheng H B, Zhang X J, Zheng L G, *et al.* Optimization on testing technology for aspherics grinding [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(6): 2-3.
程灏波, 张学军, 郑立功, 等. 非球面研磨阶段检测技术的优化[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(6): 2-3.
- [14] Sun W, McBride J W, Hill M. A new approach to characterising aspheric surfaces [J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 171-179.
- [15] Hu D J. Precision grinding and adaptive control method for hard and brittle aspheric optical mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722004.
胡德金. 硬脆非球面光学镜精密磨削与自适应控制方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722004.
- [16] Martin H M, Burge J H, Vecchio C D, *et al.* Optical fabrication of the MMT adaptive, secondary mirror[C]. SPIE, 2000, 4007: 502-507.
- [17] Comley P, Morantz P, Shore P, *et al.* Grinding metre scale mirror segments for the E-ELT ground based telescope [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 379-382.

- [18] Wang Y, Su P, Parks R E, *et al.* Swing arm optical coordinate-measuring machine: high precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 1-8.
- [19] Jia L D, Zheng Z W, Dai Y F, *et al.* Principle and experiments of swing-arm profilometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 499-839.
贾立德, 郑子文, 戴一帆, 等. 摆臂式非球面轮廓仪的原理与试验[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 499-839.
- [20] Jia L D, Zheng Z W, Li S Y. Development of a new optical coordinate measuring machine in cylinder coordinates[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 835-504.
贾立德, 郑子文, 李圣怡. 基于柱面坐标系的新型光学坐标测量机的研制[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 835-504.
- [21] Cheng H B. Touch trigger probe measurement accuracy of aspherical mirror during fine lapping process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8): 228-232.
程灏波. 精研磨阶段非球面面形接触式测量误差补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(8): 228-232.
- [22] Zhu Y L, Guo Y B, Luo W, *et al.* Design of large-size aspheric measurement system and motion accuracy analysis[C]. *SPIE*, 2010, 7656: 765620.
- [23] Qiu G F, Guo P J, Xie B, *et al.* Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 492-498.
仇谷峰, 郭培基, 懈滨, 等. 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 492-498.
- [24] Suzuki H, Onishi T, Moriwaki T, *et al.* Development of a 45° tilted on-machine measuring system for small optical parts [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 411-414.
- [25] Shimizu Y, Goto S, Lee J, *et al.* Fabrication of large-size SiC mirror with precision aspheric profile for artificial satellite [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 640-649.
- [26] Li B, Zhao H Y, Xi J P, *et al.* On-machine self-calibration method for compensation during precision fabrication of 900-mm-diameter zerodur aspheric mirror[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9-12): 1855-1863.
- [27] Dong Z C, Cheng H B, Ye X, *et al.* Developing on-machine 3D profile measurement for deterministic fabrication of aspheric mirrors [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4997-5007.
- [28] Lin X H, Wang Z Z, Guo Y B, *et al.* Research on the error analysis and compensation for the precision grinding of large aspheric mirror surface [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1-4): 233-239.
- [29] Li J, Lei X Y, Zhong B, *et al.* Research of high efficiency grinding technology for large square aspheric lens[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2011, 31(2):74-78.
李洁, 雷向阳, 钟波, 等. 大口径方形非球面镜的高效磨削技术研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2011, 31(2): 74-78.
- [30] Xi J P, Zhao H Y, Li B. Profile error compensation in cross-grinding mode for large-diameter aspheric mirrors[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 83(9): 1515-1523.
- [31] Chen F J, Yin S H, Huang H, *et al.* Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5): 480-486.
- [32] He J, Chen L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 69-74.
贺俊, 陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 69-74.
- [33] Wang J M, Guo P J, Qiu G F. Data processing of off-axis aspheric surface measurement by coordinate contour measuring machine [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(4): 291-296.
王建明, 郭培基, 仇谷峰. 三坐标轮廓测量仪测量离轴非球面的数据处理[J]. *光学技术*, 2013, 39(4): 291-296.
- [34] Ren T Q. The measurement method and data processing of large aspheric surface [D]. Xiamen: Xiamen University, 2010.
任同群. 大型非球面检测方法 & 数据处理研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2010.
- [35] Tonnellier X. Precision grinding for rapid manufacturing of large optics [D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2009.
- [36] Guo Y B, Guo J, Wang Z Z. Study on measuring path and high-precision curve fitting algorithm for

- axisymmetric aspheric optics [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(10): 1201-1204.
- 郭隐彪, 郭江, 王振忠. 非球面检测路径与高精度曲线拟合算法研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(10): 1201-1204.
- [37] Zhang D X, Yang P, Bi G, *et al.* Stitching measurement technique for large-aperture aspheric surface during grinding process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(4): 22-29.
- 张东旭, 杨平, 毕果, 等. 磨削阶段大口径非球面拼接测量技术[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(4): 22-29.
- [38] Yang P, Ye S W, Peng Y F. Three-dimensional profile stitching measurement for large aspheric surface during grinding process with sub-micron accuracy [J]. *Precision Engineering*, 2017, 47: 62-71.
- [39] Jia L D, Wang J W, Zheng Z W, *et al.* Optimization algorithm for the measurement of vertex radius of aspherics with a swing-arm profilometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(9): 1996-2000.
- 贾立德, 王家伍, 郑子文, 等. 光学非球面面形摆臂式轮廓法测量顶点曲率半径优化算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(9): 1996-2000.