文章编号: 1002-1582(2005)03-0373-03

主动抛光盘磨制非球面镜面控制技术的研究*

汪达兴[1], 李颖[1,2], 杨世海[1,2], 高必烈[1]
(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042;2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 介绍了抛光盘机械结构和基本运动方式,探讨了主动抛光盘的控制系统和面形检测,重点对变形技术进行了数学分析,并给出了实验结果。根据实验结果分析了面形误差产生的原因,讨论了主动抛光盘的动态响应和校正,给出了直径910mm, 焦比为 $F/2$ 的实验镜面磨制结果。

关 键 词: 主动抛光盘; 非球面镜面; 计算机控制
中图分类号:TG580.61+3 **文献标识码**:A

Studyoncontroltechnolo gyofactivestressed lap polishingas phericalmirror

WANGDa-xing[1],LIYing[1,2],YANGShi-hai[1,2],GAOBi-lie[1]
(1.NationalAstronomicalObservatories/NanjingInstituteofAstronomicalOpticsandTechnology,ChineseAcademyofSciences,Nanjing 210042,China;2.GraduateSchooloftheChineseAcademyofSciences,Beijing 100039,China)

Abstract: Themechanicalconstructionandbasicmovementmodeofthelapareintroducedandthecontrolsystemwasexploited.Distortiontechnologywasanalyzedfrommaththeoryas pectandtheexperimentresultwas given.According tothereasonofdistortionerrorwasanalyzedandthedynamicres ponseandemendation problemwerediscussed.Thetesting resultsonapplyingthelapon ϕ910mm,with $f/2$ paraboloidalmirrorwere given.

Keywords: activestressedlap;as phericalmirror;computercontrol

1 引 言

现代天文学发展需要特大口径的天文望远镜,发展大型天文望远镜的关键技术之一是需要磨制特大口径、高精度、非球面度更陡、镜面厚度更薄的非球面镜面,加工高精度非球面镜面比较困难,通常采用手工或计算机控制小工具磨盘修磨,加工时间长,精度无法得到保证。

采用主动抛光盘磨制非球面是天文大镜面技术中的一种新技术,这一技术的原理是在大口径非球面镜面磨制过程中,根据抛光盘相对被磨制镜面的坐标,主动实时地将抛光盘变形为镜面上相应部分的非球面,使抛物面的面形总是与所要求的镜面面形一致,与传统的小工具磨盘磨制非球面相比,它具有较高的玻璃磨削速率和较大频率范围内的自然平滑(无切带)等优点。这一新技术综合了光学、精密机械、计算机自动控制领域里多项先进制造技术和方法,深入研究主动抛光盘的控制技术,特别是主动抛光盘的机电一体化系统的设计和控制、快速计算机实时控制技术更是对传统控制方法的挑战,使主动抛光盘能够磨制各种非球面度的天文镜面,从而使我国天文光学工艺技术踏上一个新的台阶。

2 主动压力抛光盘机械结构[1]和基本运动方式

主动抛光盘是一个采用弯矩力促动器的薄板主动变形机构。抛光盘背面有12个力促动器,分为四组,每组3个呈等边三角形分布(见图1),力促动器由伺服电机驱动,由计算机控制伺服电机,并对各力促动器施以不同的力,当铝基板获得足够大的

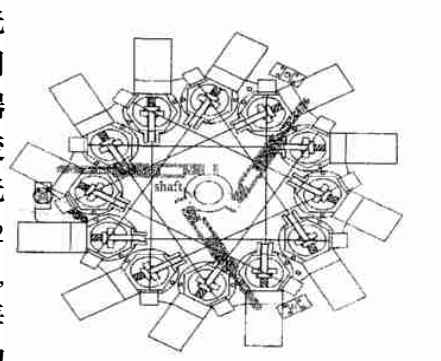

图1 盘面变形结构图

* 收稿日期: 2004-05-20; 收到修改稿日期: 2004-06-21 E-mail: yingli@niaot.ac.cn
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(19633020)
作者简介: 汪达兴(1941-),男,上海人,中国科学院南京天文台研究员,从事自动控制研究。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

弯矩,它的面形就发生改变,当加在力促动器上的力变化时,便可以获得不同的面形变化。

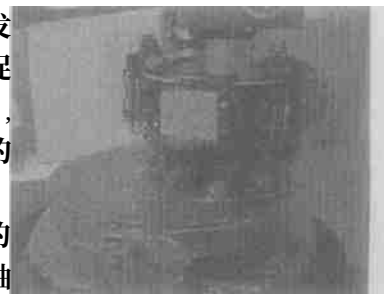

图 2　主动抛光盘磨镜照片

主动抛光盘的转动是由旋转主轴上的三个拨叉来带动。如图 1 所示。提升是由三个力矩电机经蜗轮副带动滚珠丝杆,滚珠丝杆经由拉力传感器和钢杆连接到抛光盘外缘来完成的。对镜面的压力控制也是通过这套机构来实施。图 2 是主动抛光盘磨镜照片。

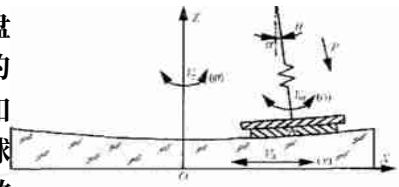

图 3　抛光盘运动方式

主动抛光盘数控加工设备的基本运动方式如图 3 所示。在非球面抛光过程中,数控加工设备各运动轴做四维运动,可用函数 $f(x,\phi,\theta,\alpha)$ 表示,其中表示抛光盘在横梁轴的位置,θ 表示抛光盘的旋转角度,ϕ 表示镜面的旋转角度,α 表示抛光盘偏离转轴的偏转角度,V_x, V_m, V_z 分别表示数控机床三轴的运转速度,P 为压力,K 为压力设备常数。通过抛光盘偏转轴的运动可以对镜面保持垂直压力,偏转角与加工镜面的直径和抛光盘中心的曲率半径有关。

3　主动抛光盘磨镜系统控制[2,3] 技术

3.1　控制系统结构简介

主动抛光盘和磨镜机的控制是一个较复杂的系统,它包括磨镜机控制、主动抛光盘变形控制和面形检测三个部分,其中,面形检测在抛光镜面前进行,计算机根据加工镜面的面形要求和实测主动抛光盘面形参数,进行数学计算获得控制面形数据库,并获得相应的控制力的电子表格,在抛光镜面时,计算机可根据镜面加工工艺,事先设定运行参数,控制磨镜机的主轴、磨头、横梁轴作可逆恒速、变速、预定线速度运转,根据需要也可以控制它们作全范围或局部范围的往复运动以及快速定位移动。计算机实时采集主轴、磨头和横梁的实际位置,通过计算和查表实时给出抛光盘的转角位置以及各力促动器所需加力的大小,保证在磨制过程中主动抛光盘的面形始终与相应的镜面面形一致,根据需要也可以在抛光过程中随时改变对镜面的压力。并具有完善的镜面加工及机床保护等功能,图 4 是控制系统的总框图。

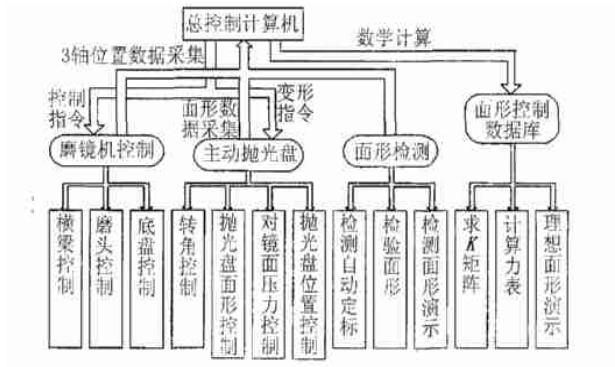

图 4　控制系统总框图

3.2　主动抛光盘面形变形控制

在抛光盘材料的弹性极限范围内,所施加的力与面板的变形是一一对应的线性关系。设力促动器的变化值为 F,面板的变形值为 U,则 F 和 U 的关系为

$$K \times F = U$$

其中 K 为主动抛光盘的刚度矩阵,在实验中通过实测抛光盘的影响函数来求取 K。根据 K 阵和抛光盘在不同位置时的应有变形量 U,再用最小二乘法求得

$$F = (K^T K)^{-1} K^T U$$

由于影响函数的测量不精确,当求得的变形力远远超出促动器的允许加力范围时,可应用阻尼最小二乘法[4] 逐步修正,最后得出比较理想的力(图 5)。

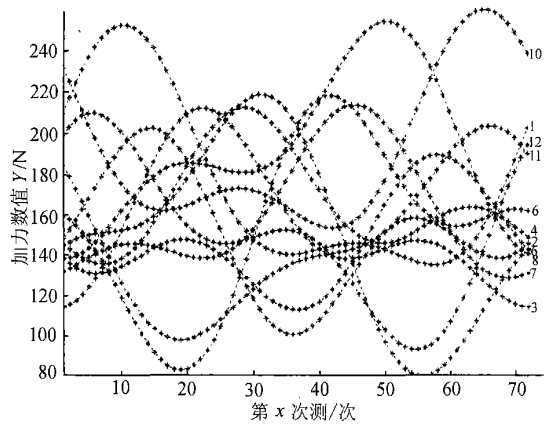

图 5　12 个变形力促动器的力
根据刚度矩阵计算得到的加力数据图线,
365mm 位置,阻尼因子:P=0.00000001

主动抛光盘非球面面形控制是一个特殊的控制系统,它是通过控制 12 个力促动器的变形力间接控制抛光盘的面形。在抛光的过程中,抛光盘的面形变化很快,根据抛光盘的位置实时计算力促动器的力比较费时,因此事先求出抛光盘在被磨制镜面上各个点相应的一组力和偏转角并编制成表格存在

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

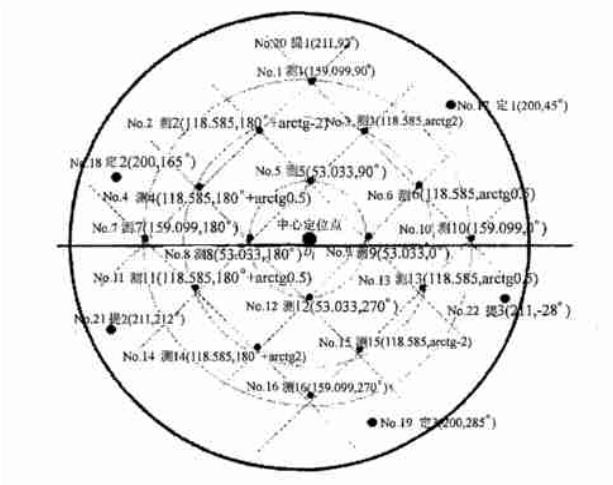

图 6　LVDT 测试点分布图

计算机中,在抛光过程中通过控制计算机实时采集抛光盘在运动过程中的位置 x、ϕ、θ, 查表得到力促动器的力和偏转角,从而获得所需要的主动抛光盘的面形。

3.3　主动抛光盘的面形检测

主动抛光盘的面形检测是在一个装有 16 个 LVDT (Linearly VariableDifferential Transformer) 传感器的测试架上(见图 6)进行,测试架上有 16 个固定的检测点,按正方点阵排布,其中的 No. 5、8、9、12 四个测量点位移量代表抛光盘的内圈的变形值,No.2 、3、4、6、11、13、14、15 八个点代表中圈的变形值,而 No.1 、7、10、16 四个点可以用来表示外圈的变形值,我们可以根据所测得 16 个点的变形面形(图 7)与计算出来的理想面形(图 8)比较,计算出面形的均方根误差(RMS)。在实验中我们以离轴量为 365mm 时计算面形为理想面形,长期的实验和反复测试,抛光盘面形的均方根误差保持在 2.5～2.9μm 之间,重复误差为 0.2μm, 其中包括了测试系统误差 0.67μm 左右,而这部分误差在磨镜的过程中并不存在。实验表明抛光盘的面形变化是稳定的,并且精度已完全满足主动抛光盘的磨镜需要。

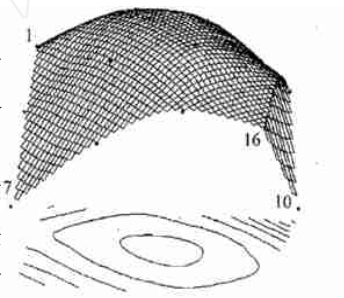

图 7　测量变形

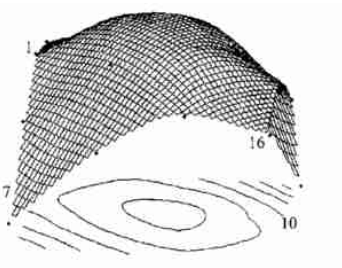

图 8　理想变形

4　主动抛光盘变形的动态响应和校正

在镜面磨制过程中,主动抛光盘在沿着横梁轴移动的同时,还绕着磨头轴转动。主动抛光盘面形变化的机、电频率响应影响着它的使用,它涉及抛光盘的机械结构和控制系统,是我们需要解决的重要问题。因此我们在静态测试的基础上还进行了动态测试, 即根据实际使用时的情况, 在抛光盘旋转时, 每 5 度给一次力的变化, 即盘旋转一周 72 次变化力,而将力变化频率分别设为 1Hz、2.5Hz、5Hz、6.6Hz, 这样大致相当于抛光盘转速 1～10r/min 。图 9 是力变化频率为 2.5Hz 时的面形变化曲线,与计算理想面形相比,其面形误差为 2.88μm, 对主动抛光盘的使用没有影响。当我们把频率提高到 6.6Hz 时,由于抛光盘机、电响应时间较慢,抛光盘的面形产生了幅值和相位误差(图 10),面形误差达到了 5.03μm, 随着抛光盘离轴位置的增加,面形误差还将增加,因而限制了主动抛光盘的使用转速。

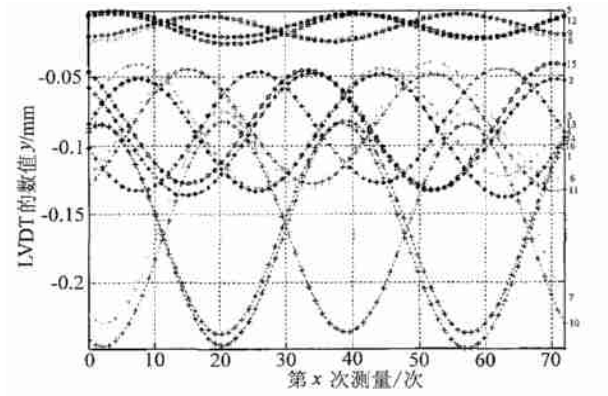

图 9　2.5Hz 测试图

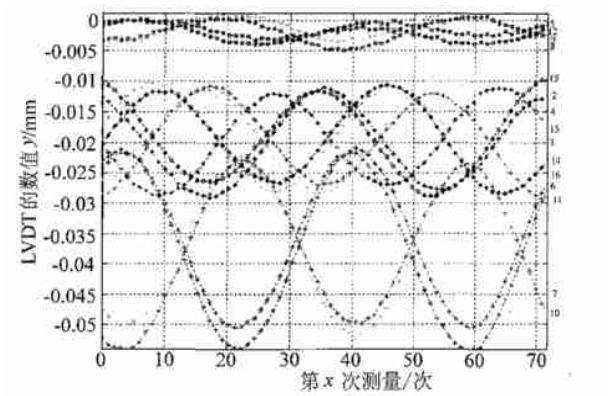

图 10　6.6Hz 测试图

为了减小误差我们采取了相位补偿的方法,通过对不同的变化频率给予不同的时间提前量来提前预加力来解决这一变形滞后的问题。在实验中对图 10 提前预加力后,误差减为 3.85μm, 效果比较明

(下转第 379 页)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

视频图像具有相似直方图分布。仿真中取 $L_T = H_T = 30$, 仿真结果如图 5 所示。从仿真结果中可以看出,对比度增强效果随着对比度增强系数的增加而增加,而且保留了原始图像的灰度层次,没有出现灰度级损失现象,具有良好的对比度增强效果。

(a) 原始图像　(b) SCALE=0.25　(c) SCALE=0.5　(d) SCALE=1

图 5　仿真结果

5 结　论

本文提出了一种针对数字显示设备的基于动态直方图均匀化的对比度增强方法。该方法应用于数字显示设备,不仅可以根据对比度增强系数动态地增强输入图像的对比度,提高显示质量,而且无需额外的输入视频图像帧间相似性检测所用的帧存储器,降低了电路实现的复杂度。仿真结果证明,本文提出的对比度增强方法能根据对比度增强系数动态地增强显示图像的对比度。

参考文献:

[1] TumblinJ,Hod ginsJK.Twomethodsfordis playofhi ghcontrast image[J].ACMTransactionsonGra phics,1999,18 (1) :56 —94.

[2]ArditoM,GunettiM,ViscaM.Influenceofdis play parameterson perceivedHDTV quality[J].IEEETran -sactononConsumer Electronics,1996,42 (1) :145 —155.

[3]Chen gHD,XueM,ShiXJ.Contrastenhancementbasedona novelhomo geneitymeasurement[J].PatternReco gnition,2003, 36:2687 —2697.

[4]JiTL,SundareshanMK,Roehri gH.Ada ptiveima gecontrasten -hancementbasedonhumanvisual properties[J].IEEETransaction onMedicalIma ging,1994,13:573 —586.

[5]ZhuH,ChanF,LamFK.Ima gecontrastenhancementb ycon -strainedlocalhisto grame qualization[J].Com puterVisionandIm -ageUnderstandin g,1999,73 (2) :281 —290.

[6]Ram poniG.Acubicunshar pmaskin gtechni queforcontrasten -hancement[J].Si gnalProcessin g,1998,67:211 —222.

[7]Ram poniG.Contrastenhancementinima gesviathe productoflin -earfilters[J].Si gnalProcessin g,1999,77:349 —353.

[8]GonzalezRC,WoodsRE.Di gitalIma ge processing[M].2ndEdi -tion,Prentice -Hall,2002.

[9]KimSY,HanD,ChoiSJ,etal.Ima gecontrastenhance -ment basedonthe piecewise-lineara pproximationofCDF[J].IEEE TransactiononConsumerElectronics,1999,45 (3) :828 —834.

[10]ChoHH,ChoiCH,KwonBH,etal.Adesi gnofcontrastcon -trollerforima geim provementofmulti -grayscaleima ge[C].Pro -ceedingsoftheSecondIEEEAsiaPacific.ConferenceonASICs, 2000.131 —133.

(上接第 375 页)

显,方法也比较简单。在相位补偿的基础上,还可以采取幅值补偿的方法进一步解决响应滞后的问题。

除了通过软件补偿,我们还可以对现有抛光盘作一些局部改进,减小抛光盘盘上载荷,提高机械响应频率,改进力促动器 PI 调节器,提高控制系统响应速度等。

5 主动抛光盘在磨制 F/2 抛物面镜中的应用

在国家自然科学基金重点项目 - 高精度大口径天文镜面磨制技术中我们利用主动抛光盘加工一个直径 910 mm、焦比 F/2 的非球面镜,磨制过程中横梁速度为 30 ～ 60mm/min, 底盘速度 2r/min, 抛光盘速度 0.8～1r/min。它的磨制精度和效率都很高,从开始到镜面加工结束,仅用了不到三个月的时间。用 Shack 干涉仪检验,获得条纹后经测算,在全口径范围内表面精度达到均方根误差 Rms ≤(1/20)λ。扣除局部非对称的误差(不是主动抛光盘的作用引起的),在 95% 的范围内面形精度达到均方根误差 Rms ≤(1/30)λ。图 11 是最后检验得到的干涉条纹图,检验结果为 Rms=0.032λ, PV=0.295λ,检验波长 λ=632.8nm。

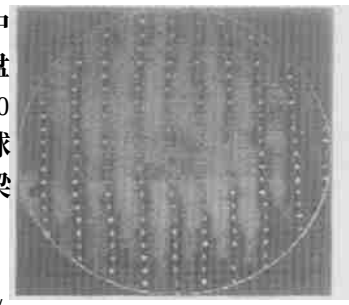

图 11　最后检验的干涉条纹

6 结　论

根据上面的分析和实验研究表明还可以将主动抛光盘技术应用于磨制离轴非球面。目前国际上正在开展 30～100m 巨型望远镜的预研,例如 CELT 的 30m 望远镜主镜就是由 1080 块一米的六边型离轴非球面组成的,进一步深入研究和应用主动抛光盘的控制技术,可以直接加工出六边型的离轴非球面。主动抛光盘技术将在下一代的望远镜的光学加工中起到非常关键的作用。

致谢:在完成本研究过程中得到崔向群研究员以及课题组全体成员的帮助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] WestSC,MartinHM,etal.Practicaldesi gnand performanceof thestressed-la p polishingtool[J].A pplO pt,1994,33 (34) : 8094 —8100.

[2]Dou ghtyG,SmithJ.Microcom puter-controlled polishingmachine forver ysmoothanddee pas phericalsurfaces[J].A pplO pt,1995, 26(12) :2421 —2426.

[3] 杨世杰. 计算机在天文镜面加工中的应用[J]. 紫金山天文台台刊,1987,6 (4) :385 —390.

[4] 苏定强,王亚男. 天文光学系统像差的自动校正[J]. 天文学报,1974,6 (4) :51 —60.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net