

文章编号 1004-924X(2012)03-0477-07

## 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴

李锐钢\*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了满足高精度加工大口径光学元件的需求,对原有的三轴机械加工中心上进行了一系列技术改造,从而实现了光学元件的五轴数控加工。介绍了三轴系统数控加工中心到五轴数控加工中心的改造过程,并提出了一种标定改造后主轴参数的方法。该方法运用高精度激光跟踪仪建立坐标系、采集数据,计算系统几何参数,由此对主轴的杆长、摆角等参数进行精确标定和精度分析。结果显示,角度量标定精度优于 $10.000''$ ,长度量标定精度优于 $0.040\text{ mm}$ 。实验证实提出的方法对类似的工作具有普适性。

**关键词:** 光学元件加工;数控加工中心;激光跟踪仪;主轴标定

**中图分类号:** TQ171.68; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0477

## Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker

LI Rui-Gang\*

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,  
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: Lirui-gang@sohu.com

**Abstract:** To meet the requirements of large aperture optical elements for high precision manufacturing, a 3-axis Computer Numerical Control(CNC) milling machine was reconstructed into a 5-axis CNC one to implement the hardware improvement. The reconstructing process from the 3-axis machine to the 5-axis one was introduced, and a method to calibrate the parameters of the tool spindle was put forward. The method used a higher precision laser tracker to build coordinate systems, collect data and calculate geometric parameters, then to obtain the calibrating results of the rod length and swing angle for the tool spindle. Precision analysis shows that the angular precision is better than  $10.000''$  and the length precision is better than  $0.040\text{ mm}$ . The proposed method can also be applied to similar tasks.

**Key words:** optical element machining; Computer Numerical Control (CNC) center; laser tracker; tool spindle calibration

收稿日期:2011-05-11;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61036015)

## 1 引言

大口径光学系统在航空航天、测绘、天文观察等领域得到了极为广泛的应用<sup>[1-5]</sup>,其元件的制造技术为大口径光学系统制造的最关键技术之一<sup>[6-8]</sup>。大口径光学元件的制造过程包括镜坯制作、铣磨成型、光学研磨、光学抛光、镀膜等阶段,其中铣磨成型到光学抛光均需要多轴(4轴以上)数控加工中心,而这种数控加工中心高昂的价格令人望而却步,因此,从高精度三轴数控加工中心改造成多轴数控加工中心成为了一个替代方案。这种方案用少量的经费实现了大的技术进步,因而成为不少单位的首选。然而改造不仅需要机械、电子、控制等方面的专业知识,而且改造后数控加工中心技术参数的精确标定也成为必须解决的一个问题。

数控加工中心的装配和检测标定主要有两种方法:(1)对于精度要求一般的情况,多采用基准平尺、三角尺和千分表等测量工具对加工中心的垂直度、同轴度以及各轴的空间位置等进行调整或标定,该方法简单易行,但绝对精度和重复精度都较差,且要求操作人员经验丰富;(2)对于精度要求较高的情况,采用激光多自由度误差测量方法,该方法可基于多种光学原理从而实现多自由度测量,例如全反射原理、多光束分光、全息透镜等,国内外专业的数控加工中心制造公司多采用这种方法对产品做检测和精度标定。

近年来,出现了把激光跟踪测量的方法运用于机床制造和检测工作的报道,但大多数是针对机床整体结构参数来开展的。本文简单介绍了三轴数控加工中心改造为五轴数控加工中心的过程,着重提出一种运用高精度激光跟踪仪来标定改造后数控加工中心主轴参数的方法,并给出了详细的实验过程及精度分析,该方法操作简便、精度高,具有广泛的适用性。

## 2 三轴到五轴的改造过程

对普通的机械加工来说,三轴(X轴、Y轴、Z轴)数控加工中心完全可以满足绝大部分的工作需求。然而,对光学加工来说,无论是铣磨成型,还是研磨、抛光,都需要四轴甚至五轴参与运动。

在光学元件的铣磨成型过程中,安装在主轴上的砂轮以一定角度对工件高速磨削去除<sup>[9]</sup>,同时转台转动并配以适当的进刀量,达到铣磨成型的目的,如图 1 所示。对于光学研磨、抛光,极坐标方式加工时需要转台轴的配合才能完成;而对于高陡度元件的光学研磨和抛光,则需要加工磨头沿工件每一点的法线方向行进<sup>[10]</sup>,摆轴的参与必不可少。然而高精度的四轴或五轴数控加工中心动辄几百万甚至上千万的价格使用户很难承受,在价格相对低廉的三轴数控加工中心基础上进行改造从而实现四轴或五轴联动,在实现主要功能的同时又可大大节省费用,应该说是一个完美的解决方案。

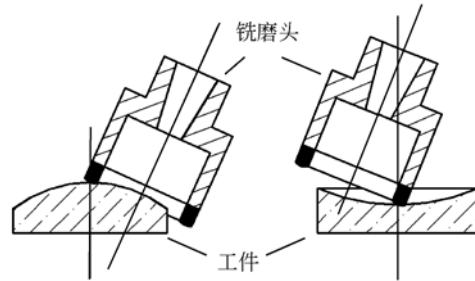


图 1 光学元件的铣磨

Fig. 1 Milling of optical element

本实验室通过改造一台原有的三轴数控加工中心使它实现了五轴功能,如图 2 所示。改造的内容主要是:(1)增加了转台轴,以适应极坐标的加工要求;(2)增加了摆轴,以满足铣磨成型和高陡度光学元件的研磨和抛光;(3)控制系统更加复杂,从三轴开放至五轴,编程功能和自由度均得到提升,具备了加工复杂曲面的能力。大规模改造使数控加工中心多个参数发生改变,尤其是主轴结构产生了重大改变。



图 2 改造后的五轴数控加工中心

Fig. 2 Photo of 5-axis CNC machine after reconstructing

### 3 激光跟踪仪测量原理

激光跟踪仪是一种高精度、便携式三维测量设备,其工作原理为 633 nm 可见光的单频光外差法干涉,实质上是一台激光干涉测距和自动跟踪的全站仪。干涉测距原理是利用光学干涉法,通过测量干涉条纹的变化来测量距离的变化,激光跟踪仪的干涉仪(IFM)相对测量通过测量反射器移动的相对距离加上基准距离得到绝对距离;激光跟踪仪的绝对距离测量仪(ADM)根据斐索原理(用齿轮挡光测量光速,即光的偏振原理)通过测定反射光的光强最小来计算光所经过路径的时间,从而计算出绝对距离。激光跟踪仪自动跟踪控制部分主要由位置检测器(PSD)来完成,反射器反射回的光经过分光镜时,有一部分光进入位置检测器,当反射器移动时,这一部分光将会在位置检测器上产生一个偏移值,根据偏移值,位置检测器就会控制马达转动直到偏移值为零,从而达到跟踪的目的<sup>[11]</sup>。具体测量时跟踪仪发射红色氦氖激光经过球形固定反射器反射后返回跟踪仪,跟踪仪机械轴的方向会根据内置的位置感应探测器的反馈形成闭环不断进行调整。跟踪仪通过测量俯仰和方位两个角度和一个距离来确定目标相对跟踪仪的坐标<sup>[12]</sup>。由于激光跟踪仪具有测量范围大、速度快、精度高等优点,在航空工业、汽车制造、重型机械制造、造船业等领域得到了极为广泛的应用<sup>[13-15]</sup>。

相对而言,三坐标测量机测量精度更高一些,但其更适合单个零件或结构的测量,而且测量范围也受导轨长度限制;激光跟踪仪虽然精度比三坐标测量机差一些,但其具有测量范围大、便于移动等特点,因而也更适合大尺寸设备的装配、测定等工作。由于以上原因本课题组选择激光跟踪仪来标定改造后数控加工中心的主轴参数。

### 4 主轴参数标定实验

数控加工中心的改造并不涉及主轴内部,主轴自身原有的参数并没有改变,因而也不需要重新标定。需要标定的参数主要是数控加工中心改造后,主轴相对其他轴或相对于加工中心坐标系发生改变的参数,主要包括摆轴零点角度位置,增

加摆轴后主轴在加工坐标系中的位置,主轴刀头到摆轴旋转中心的距离等。

#### 4.1 标定前的准备工作

##### 4.1.1 测量基准的制作

为了标定加工中心的主轴参数,根据激光跟踪仪测量的特点和要求,设计加工了一个用作测量基准的工艺柱体,如图 2 中所示。工艺柱体设计与加工中心主轴刀柄相连接的接口,可以连接在主轴刀柄上。由于工艺柱体作为测量基准使用,所以表面进行了刮研和研磨加工,表面形位精度足以满足激光跟踪仪的测量要求。通过建立工艺柱体的特征参数与主轴参数的关系,从而间接获得加装摆轴后主轴的角度和位置参量。

##### 4.1.2 激光跟踪仪的安装

激光跟踪仪的安装需注意:主机与三脚架连接要稳固;三脚架要放置稳定,最好有固紧措施;安装位置尽量使跟踪仪与待测特征高度相一致,并且使测量过程中水平转角尽可能小,这样有利于提高测量精度。

#### 4.2 主轴摆角参数的标定

首先借助转台上平面以及转台的侧柱面和前侧平面建立数控加工中心坐标系,转台各特征面及数控加工中心坐标系如图 3 所示。转台安装完成后,为了消除装配误差,转台上平面及侧柱面和前侧平面均进行了在线机械加工并进行了刮研或研磨加工,此精度完全可以满足建立坐标系的要求。测量转台上平面,在激光跟踪仪测量软件中选择平面特征测量,然后将球形固定反射器放在转台平面上逐一采点,采点分布离散性要好,以免以偏概全,从而不能得到整个平面的真实数据;采点数量也不能过少,以免整个平面的拟合值不准确,本实验中要求选择测量点数不少于 30 个。转台侧柱面和前侧平面的测量方法与测量上平面

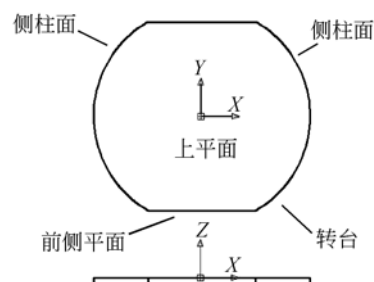


图3 借助转台确定坐标系

Fig. 3 Coordinate system of CNC machine

类似,最终获得了每个特征面信息及其矢量信息。

测量完成后,转台侧柱面矢量与转台上平面相交点定义为坐标系的原点  $O$ ;转台上平面的矢量方向定义为坐标系  $+Z$  方向;转台前侧平面通过平移构造过坐标系原点的平面并与转台上平面相交得到一过原点的直线,确定为坐标系的  $+X$  方向;在转台上平面内的与  $X$  方向相垂直的方向定义为  $Y$  方向,并按右手坐标系确定  $+Y$  方向。这样,数控加工中心的测量坐标系  $C$  就建立起来了,此后的测量均基于该坐标系。

增加摆轴后主轴位置参数的标定主要有两个:摆轴角度零点的标定和摆角零点时刀头下端点坐标的标定。

#### 4.2.1 摆轴角度零点的标定

角度零点标定时摆轴调到名义零点位置,用激光跟踪仪测量工艺柱体柱面获得主轴柱线的矢量信息,根据此柱线矢量求解摆轴在名义角度零点位置时相对  $C$  坐标系  $Z$  轴的实测角度偏差,测量结果为: $V_{xz}=0.032^\circ$ ;  $V_{yz}=0.011^\circ$ 。

$XZ$  平面内的角度零点偏差可以通过数控加工中心的摆轴零点重置完成角度零点校正; $YZ$  平面内的角度零点偏差无法通过重置角度零点的方法来校正,因为主轴及摆轴装配完成后在  $YZ$  平面内无法调整,但可以把角度零点偏差标定结果存入计算机,在检测和加工生成文件时通过理论计算补偿校正,用比较简便的方法提高数控加工中心的加工检测精度。

#### 4.2.2 刀头下端点位置的标定

刀头下端点位置的标定借助工艺柱体的柱面特征和下端平面特征来实现,它只需要标定摆轴在角度零位时刀头下端点的位置坐标,而其他摆轴姿态(角度)都可以根据几何关系求解。转动摆轴到角度零点位置,测量工艺柱体的柱面和下端平面特征,柱线矢量与下端平面相交,确定摆轴角度零位时工艺柱体下端点的位置坐标。当主轴位于数控加工中心坐标系以下  $-152.206$  mm 时,工艺柱体下端点在测量坐标系  $C$  中的坐标为  $(-50.351, -3.384, 366.708)$ ,其中  $X, Y$  轴的坐标值虽然很大,但却可以根据标定结果调整转台平动位置实现转台轴与主轴的精确对准;而对于  $Z$  轴坐标则可以记录下来,当检测或加工时用于确定测头点或刀头点的高度位置。因为工艺柱体的几何信息是已知的,每一把实际使用的刀具的几

何参量也都已知,所以当卸下工艺柱体安装上加工刀具后,通过简单换算就能得到刀具刀头下端点的位置坐标。此位置坐标在生成可以加工复杂曲面的数控加工代码的理论计算中(用标定的  $Z$  轴坐标值通过计算来给加工或检测程序文件赋初值)是必不可少的。

#### 4.3 主轴摆杆长度标定

主轴摆杆长度指从摆轴转动中心轴到刀头下端点的距离,如图 4 所示。摆杆长度的确定是至关重要的,在确定摆杆长度后再结合已经确定好的刀头下端点坐标,就可以通过编程来控制刀具的运行轨迹。由于摆轴在行程范围内摆动角度时主轴下端点的空间轨迹是一段圆弧,圆弧的半径即为摆杆长度,因此可以利用这段圆弧来标定摆杆长度。摆轴行程为  $60^\circ(-30\sim 30^\circ)$ ,以  $3^\circ$  为间隔测量摆动主轴的特征信息,对于每一个摆动的角度位置,测量工艺柱体的柱面和下端平面,并做相交求得下端点坐标。测量完成后得到圆弧上的一系列点,根据这些点按圆进行拟合,拟合得到圆的半径值(摆杆长度)为  $536.243$  mm。另外,因为摆轴行程为  $60^\circ$ ,所以行程两个极限位置的下端点与摆轴转动中心点在同一空间平面内形成一个等边三角形,因此行程的两个极限位置的下端点之间的距离也与摆杆长度相等,据此得出的摆杆长度为  $536.245$  mm。由此可见,两种方法的测量结果基本一致,取两者平均值得到摆杆长度为  $536.244$  mm。

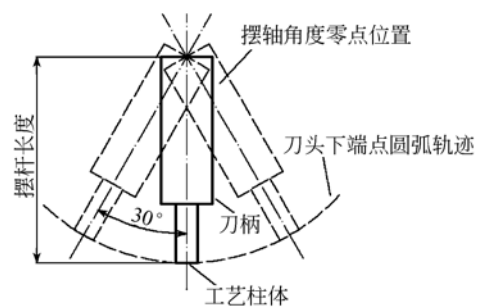


图 4 摆轴参数测量示意图

Fig. 4 Scheme of measuring tool spindle parameters

## 5 精度分析

摆轴角度基准零点的标定误差主要来源于工艺柱体安装入刀柄时的安装误差,工艺柱体安装的同轴度误差  $< 0.003$  mm,柱体长度为  $67.585$  mm,

根据三角关系,计算得到的角度误差最大为  $9.156''$ ;刀头下端点位置坐标的标定误差主要取决于刀具的安装间隙,对工艺柱体来说安装重复精度可以控制在  $0.010\text{ mm}$  以内,因此刀头下端点位置坐标的标定精度也可以优于  $0.010\text{ mm}$ 。

摆杆长度的标定精度影响因素较多,相对也复杂很多。其中主要的因素之一就是激光跟踪仪自身的测量精确度,表示为“最大允许误差”(MPE)。按照 ASME B89.4.19 标准,FARO 激光跟踪仪的性能规格见表 1。除此之外,测量精确度还受空气温度变化的影响,如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 FARO 激光跟踪仪的性能规格

Tab.1 Specification of FARO laser tracker

| 跟踪仪子系统   | 符号               | 最大允许误差  |
|----------|------------------|---|
| 干涉仪      | $e_{\text{IFM}}$ | $4\ \mu\text{m} + L \cdot 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$  |
| 绝对距离测量仪  | $e_{\text{ADM}}$ | $20\ \mu\text{m} + L \cdot 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$ |
| $R_0$ 参数 | $e_{R_0}$        | $20\ \mu\text{m}$                                     |
| 横向       | $e_t$            | $36\ \mu\text{m} + L \cdot 6\ \mu\text{m}/\text{m}$   |

表 2 空气温度变化的影响

Tab.2 Influence of atmosphere temperature variation

| 测量类型              | 符号                 | 误差  |
|-------------------|--------------------|---|
| 径向<br>(IFM 或 ADM) | $E_{\text{TEMPR}}$ | $L \cdot (\Delta T_{\text{AVE}} / ^\circ\text{C}) \cdot (1\ \mu\text{m}/\text{m})$                              |
| 横向                | $E_{\text{TEMPT}}$ | $0.5 \cdot (L^2 \partial T / \partial X)_{\text{EFF}} \cdot (1/^\circ\text{C}) \cdot (1\ \mu\text{m}/\text{m})$ |

测量点 1 和点 2 坐标时跟踪仪的布局如图 5 所示。这些坐标确定了  $d$  的长度(也就是摆杆长度),此长度的最大允许误差(MPE)为性能校验测试允许的最大误差。测量长度  $d$  的最大允许误差由公式(1)计算<sup>[16]</sup>。

$$\text{MPE}_d = (e_1^2 \sin^2 a_1 + e_2^2 \sin^2 a_2 + e_{R_0}^2 (\sin a_1 + \sin a_2)^2 + e_{t1}^2 \cos^2 a_1 + e_{t2}^2 \cos^2 a_2 + E_{\text{TEMPR1}}^2 \sin^2 a_1 + E_{\text{TEMPR2}}^2 \sin^2 a_2 + E_{\text{TEMPT1}}^2 \cos^2 a_1 + E_{\text{TEMPT2}}^2 \cos^2 a_2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中,下标中包含 1 或 2 的参数是指路径 1 或 2,分别用表 1 和表 2 中的对应项根据不同路径进行计算;角度  $a_1$  和  $a_2$  在图 5 中所示的方向为正值,而相反方向为负值。参数  $e_1$  和  $e_2$  需首先确定是使用 IFM 还是 ADM,再分别按路径进行计算。在

普通的工厂或实验室环境中,式(1)的最后 4 项(温度项)可以忽略。 $L$  小于  $2.500\text{ m}$ ,摆杆长度  $d$  值测出为  $536.244\text{ mm}$ ,  $a_1 = a_2 = \arctan(d/2L) \approx 6.122^\circ$ ,  $L_1 = L_2 = \sqrt{L^2 + (d/2)^2} \approx 2\ 514.337\text{ mm}$ 。当使用 IFM 进行测量,把各已知量代入公式(1),可以得出  $\text{MPE} = 71.964\ \mu\text{m}$ ,激光跟踪仪的典型性能是 MPE 值的一半,即  $35.982\ \mu\text{m}$ 。

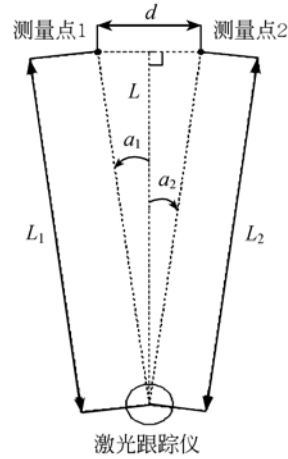


图 5 测量精确度分析示意图

Fig.5 Scheme of precision analysis

## 6 结 论

本文简要介绍了改进的五轴数控加工中心,给出了详细的主轴参数标定方法,并进行了精度分析。

根据激光跟踪仪的测量特点,设计加工了用于主轴标定的测量基准。标定了摆轴位于零点位置时主轴刀头点的坐标值和角度零点的偏差值,标定精度分别优于  $0.010\text{ mm}$  和  $10.000''$ 。对主轴摆杆长度进行了精确标定,并进行了详尽的精度分析,标定精度优于  $0.040\text{ mm}$ 。最终形成了完整的对于加工中心主轴外部参数精确标定的方法及流程。

通过主轴参数标定,加工中心的检测和加工精度得到了保证。实测显示该方法简便、高效、精度高,对于类似的加工中心主轴标定工作具有普遍适用性。

## 7 致 谢

本文在测量实验过程中得到了长春奥普光电

技术股份有限公司刘韬同志的帮助,在此表示真挚的感谢。

### 参考文献:

- [1] BURGE J H, MARTIN H M. Optical issues for giant telescopes with extremely fast primary mirrors [J]. *SPIE*, 2003, 4840: 226-237.
- [2] 常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(3): 170-172.  
CHANG J, LIU L P, WANG Y T, *et al.*. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(3): 170-172. (in Chinese)
- [3] GE J. The optical design of rapid infrared-visible multi-object spectrometer: a NGST demonstration instrument [J]. *SPIE*, 2003, 4850: 535-543.
- [4] 明名, 王建立, 张景旭, 等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 104-108.  
MING M, WANG J L, ZHANG J X, *et al.*. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 104-108. (in Chinese)
- [5] 崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2087-2091.  
CUI J CH. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2087-2091. (in Chinese)
- [6] MARTIN H M, BURGE J H, CUERDEN B, *et al.*. Manufacture of 8.4 m off-axis segments; a 1/5 scale demonstration [J]. *SPIE*, 2004, 5494: 62-70.
- [7] 张斌智, 张忠玉, 张学军. 大口径 SiC 反射镜的焊接加工和测试 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 74-78.  
ZHANG B ZH, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Fabrication and testing of brazed SiC space large aperture mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 74-78. (in Chinese)
- [8] 刘华, 卢振武, 李凤有. 大口径非球面计算全息图检测系统 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 177-182.  
LIU H, LU ZH W, LI F Y. CGH testing system for large aspheric surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 177-182. (in Chinese)
- [9] 舒朝濂. 现代光学制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 112-121.  
SHU CH L. *Modern Optics Manufacturing Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 112-121. (in Chinese)
- [10] 李锐钢, 郑立功, 张峰, 等. 大口径、高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 633-639.  
LI R G, ZHENG L G, ZHANG F, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 633-639. (in Chinese)
- [11] 李迎伟, 李明, 张靓, 等. 激光跟踪仪测量技术在地铁检测中的应用 [J]. *机械设计与制造*, 2007(7): 98-100.  
LI Y W, LI M, ZHANG J, *et al.*. Technology of laser tracker and its application in subway train's testing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007(7): 98-100.
- [12] BURGE J H, KOT L B, MARTIN H M, *et al.*. Alternate surface measurements for GMT primary mirror segments [J]. *SPIE*, 2006, 6273: 62732T.
- [13] 陈智勇, 吴建军, 赵玉静, 等. 激光跟踪测量系统在飞机型面测量中的应用 [J]. *机械设计与制造*, 2009(12): 68-70.  
CHEN ZH Y, WU J J, ZHAO Y J, *et al.*. The application of laser tracker system in feature measurement for airplane [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(12): 68-70. (in Chinese)
- [14] GALE D M. Mechanical alignment of tertiary mirror and positioner on the LMT telescope [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70183M.
- [15] ZOBRIST T L, BURGE J H, DAVISON W B, *et al.*. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70183U.
- [16] FARO CAM2 激光跟踪器用户手册 [Z]. 2006, 7. FARO CAM2 laser tracker user manual [Z]. 2006, 7. (in Chinese)

## 作者简介:



李锐钢(1975—),男,河北邯郸人,博士,副研究员,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为先进光学制造技术。E-mail: Liruigang@sohu.com

## ●下期预告

## 基于星点图像的小像差复原方法

陈新华,沈为民

(苏州大学 现代光学技术研究所 江苏省现代光学技术重点实验室,江苏 苏州 215006)

提出了一种基于星点图像的小像差复原方法。基于标量衍射理论和 Bessel 级数,推导了以像差的 Zernike 系数为参量的小像差光学系统点扩散函数的解析计算公式。利用该公式给出了基于星点图像小像差复原问题的目标函数及其梯度表达式,采用最优化方法对目标函数进行求解。分别进行理想情况下和噪声情况下的光学系统像差复原的数值模拟,验证本文提出的像差复原方法的有效性,并分析实际星点目标尺寸对复原效果的影响。该方法以像差的 Zernike 系数为优化变量,并利用推导得到的解析表达式计算目标函数及其梯度,避免了常用像差复原算法中所需的傅里叶变换和有限差分等运算,提高了复原算法的运算速度。