

光学自由曲面计算机控制加工中的形面检测研究*

李全胜 成 晔 张伯鹏 蔡复之

(清华大学精密仪器与机械学系 CIMS 研究室 北京 100084)

摘 要 光学自由曲面可以实现特殊的成像效果,给光学设计提供了更大的自由度,计算机控制加工方法可以在低精度设备上加工出高精度的光学自由曲面。自由曲面的形面检测是决定其最终加工精度的关键因素。本文讨论了自由曲面的形面检测方法,研究了自由曲面的坐标测量法,提出了快速自由曲面坐标测量法,并进行了验证。结果表明采用快速自由曲面测量法可以大大缩短测量时间,测量精度在测量机的精度范围内。

关键词 光学自由曲面 计算机控制加工 形面检测

1 引 言

在光学系统中,为了实现一些特殊成像效果,需要采用复杂的自由曲面光学零件。例如,在彩色显像管的生产中,为了使光线模拟电子束的运行轨迹,需要使用自由曲面光学透镜^[1]。另外,在一些短波应用领域中,也需要采用光学自由曲面^[2]。自由曲面是一类复杂的不规则的非回转型曲面,一般很难采用统一的数学方程描述,通常采用一系列离散型值点表示。由于自由曲面各型值点间没有任何几何约束,所以在设计中采用光学自由曲面会给光学设计人员提供很大的设计自由度。但是光学自由曲面的加工远比普通光学球面和光学非球面加工困难,这大大地限制了光学自由曲面的广泛应用。

随着计算机辅助制造技术(CAM)和数控加工技术(NC)的发展,可以在数控机床上加工出自由曲面的基本形面,然后对自由曲面的基本形面进行研磨和抛光,就可以得到光学自由曲面。图1表示了光学自由曲面的计算机控制加工方法流程图。数控磨削是加工光学自由曲面

* 本课题为自然科学基金资助项目(资助号 59605020)

收稿日期: 1999- 01- 20

修稿日期: 1999- 03- 09

的基础,需要在能够做连续曲面控制的数控磨床上进行。通过数控磨削可以得到呈明显的“峰-谷”相间结构的自由曲面基本形面。采用数控研磨工艺可以均匀地去除“峰-谷”层和磨削微裂纹层,降低表面粗糙度,并保持数控磨削的形面精度。由于机床精度的限制,数控磨削的精度不能满足光学自由曲面的形面精度要求,需要通过修正研磨工艺提高自由曲面形面精度。它是利用自由曲面的形面数据与要求的曲面数据比较,得到修研数控程序,进行修研加工,减小形面误差。修正研磨加工与形面测量两个过程结合起来反复进行,就可以不断地提高自由曲面的形面精度,满足光学零件的需要。数控抛光可以进一步降低自由曲面表面粗糙度并消除研磨过程的破坏层,达到光学零件的要求。

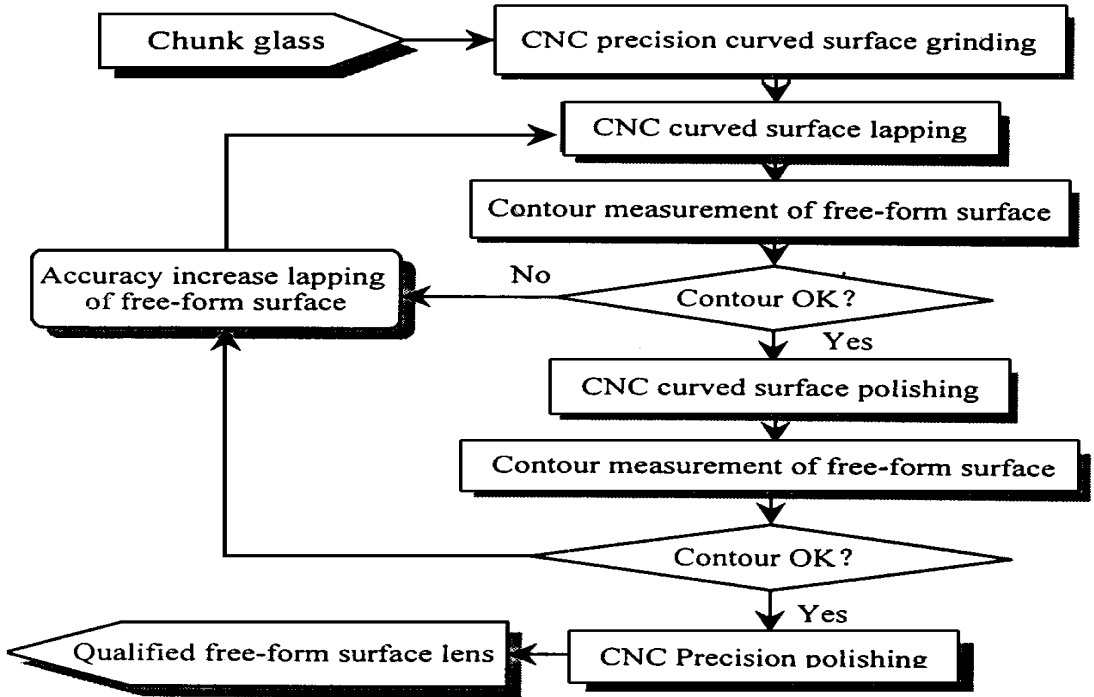


Fig. 1 Flow of CCF of optical free form surface

2 光学曲面计算机控制加工中的形面检测

光学平面和球面的形面测量可以采用光学干涉方法进行,与球面偏离较小的非球面也可以采用光学方法通过测量与球面的差值进行精确地测量^{[3][4]}(可以达到 $\lambda/50$ 或更高, $\lambda \cong 600$ nm),一些特殊非球面,如抛物面和双曲面等,可以通过设计特殊检测光路完成形面测量^[3-6]。由于自由曲面的复杂性和多变性,采用光学方法测量有很多困难,目前广泛应用的方法是坐标测量方法。

坐标测量是一种通用数字化间接测量技术,是以空间直角坐标为参考系,检测零件轮廓上各被测点的坐标值,并对其数据群进行处理,求得零件各几何元素形位尺寸的检测方法。实施设备一般为三坐标测量机^[7]。在具有扫描功能的测量机上,可以对曲面进行扫描,得到的测

量结果是一系列的离散坐标值, 只是比单点测量时测点密集、测量速度快, 但是一般测量机在扫描测量方式时测量精度比单点测量方式精度低。目前, 生产型坐标测量机的综合测量精度已经达到了 $0.6\text{--}0.7\mu\text{m}$ ^[8], 而日本的 Cannon 公司为了加工高精度光学非球面开发了 CSSP 机床, 附带的坐标测量装置测量精度可达 10nm ^[9], 采用了扫描方式测量。自由曲面形面的高精度测量是影响其最终加工精度的一个决定性因素。

3 光学自由曲面形面检测的坐标测量方法

3.1 自由曲面坐标测量方法

坐标测量机通过测量被测表面上一系列有意义的空间点的坐标值, 然后通过数字处理确定被测表面的特征, 确定被测量元素的尺寸和位置。测量空间曲面时, 一般是固定一个坐标, 然后按截面测量曲线, 例如固定 X 坐标, Y 方向作等距或不等距进给, Z 方向即可采集轮廓表面坐标值。图 2 表示了坐标测量机测量自由曲面的原理^[10], 图中 1 为坐标测量机测尖, 2 为被测自由曲面, 点 A 为测尖球心, 点 B 为测尖与被测曲面的接触点, 点 D 、点 C 分别为与球心点 A 具有相同 (x, y) 坐标的测尖上的点与被测曲面上的点。自由曲面形面检测就是测量一系列自由曲面上点的 (x, y, z) 坐标值。

在每一点的测量中, 测尖的球心位置是可知的, 测量系统软件由测尖球心点 A 的坐标计算接触点 B 的坐标时, 需要曲面上 B 点的法线方向。由于测量机是按照测尖的运动方向进行补偿计算的, 所以在每点的测量中, 需要测量被测点的法向方向, 然后沿法线方向进行测量。一般坐标测量机采用微平面法计算测点的法线方向^[7], 即将测点附近的曲面近似为小平面计算测点的法线方向, 如图 3 所示, 在点 P 周围有 P_1, P_2, P_3, P_4 四点, 相互等距为 a , 当 a 足够小时, 曲面在 P 点的法矢方向可由 $P_1P_2P_3P_4$ 小平面的法矢量代替。

图 4 表示了采用坐标测量机测量自由曲面形面的过程。从上述的坐标测量过程可以知道, 每测量一个有效的坐标点, 需要至少测量三或四点确定法线方向, 测量速度很慢、效率很低; 并且测量中计算的法线方向有偏差, 测量系统软件的补偿值有误差, 造成测量结果有误差。

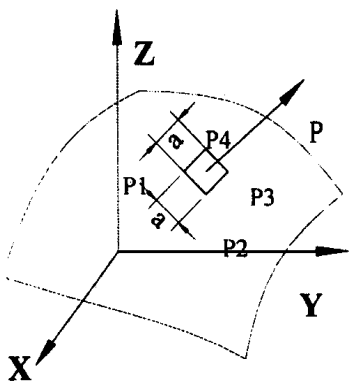


Fig. 2 Principle of coordinate measure of free form surface

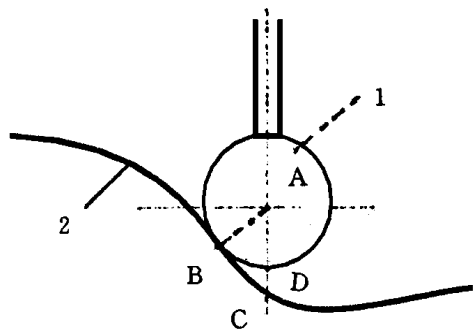


Fig. 3 Normal direction calculation with micro plan method

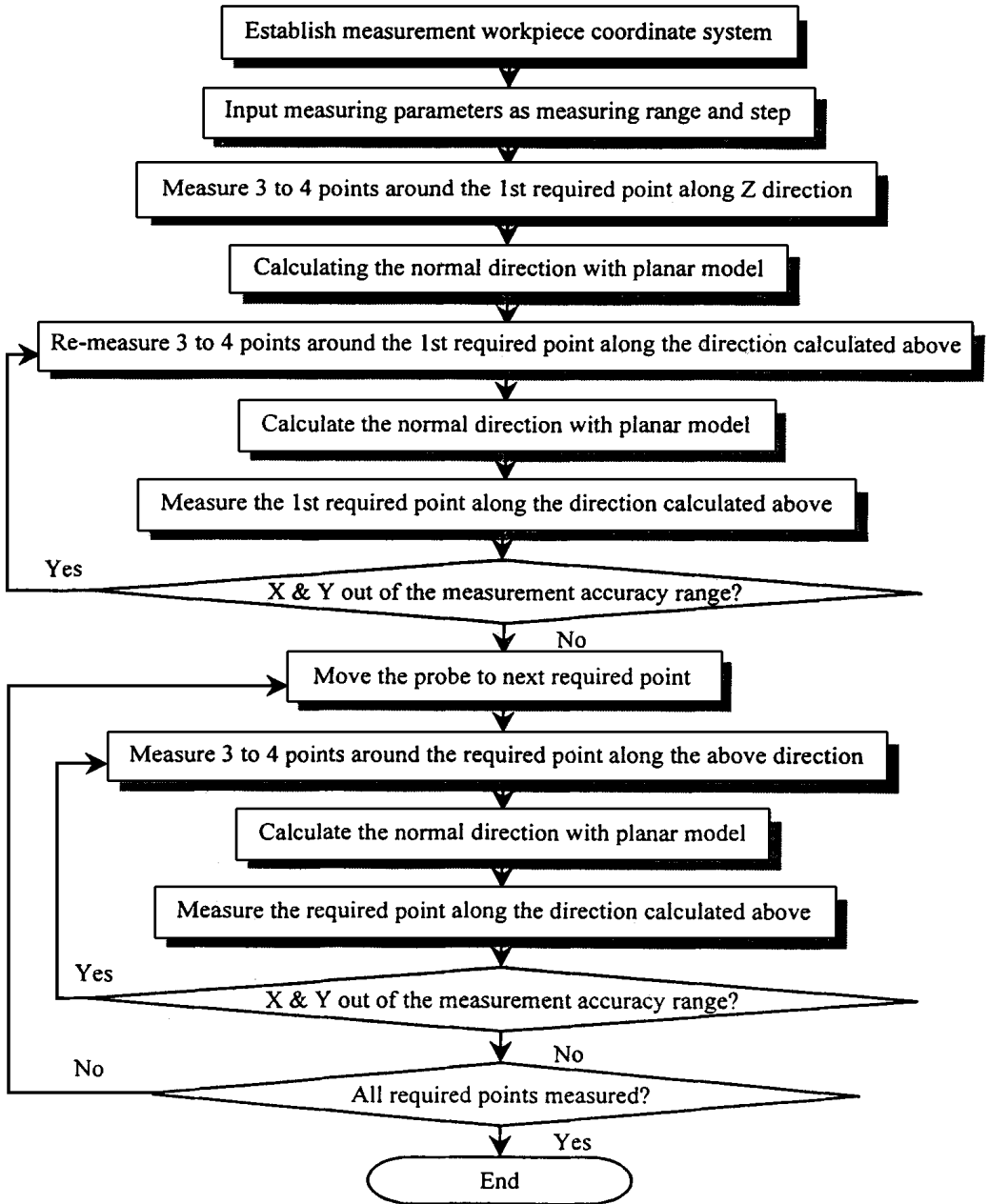


Fig. 4 Flow of coordinate measuring of free form surface

3.2 快速坐标测量方法

从自由曲面的坐标测量过程可以看出, 测量效率低的原因在于: 为了得到一个有效的坐标值, 需要实时测量该点的法线方向, 从而需要测量每个测点附近的三或四个点。如果在测量自由曲面时直接沿 Z 方向按截面测量数据, 然后进行复杂的包罗面运算, 回归计算出真实曲面的坐标点群, 则可以节省大量的测量时间, 提高测量效率。为了计算自由曲面, 需要对自由曲面进行数学描述。由于双三次 B 样条曲面可以实现 C^2 连续, 表达简单, 通常使用双三次 B 样条

曲面表示自由曲面。

3.2.1 双三次 B 样条曲面

双三次 B 样条曲面可用下式表示^[11]:

$$R_B(u, w) = UM_B VM_B^T W^T \quad (1)$$

上式中, U 、 W 为参数矢量, $U = [u^3 \ u^2 \ u \ 1]$, $W = [w^3 \ w^2 \ w \ 1]$, 且 $0 \leq u, w \leq 1$; V 是构成双三次 B 样条曲面片的特征网格点矩阵, M_B 是三次 B 样条曲线的特征矩阵, $V =$

$$\begin{bmatrix} v_{00} & v_{01} & v_{02} & v_{03} \\ v_{10} & v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{20} & v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{30} & v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix}, M_B = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

对(1)式求导数,可以得到 u 向及 w 向切矢:

$$\left. \begin{aligned} R_B^u(u, w) &= U M_B V M_B^T W^T \\ R_B^w(u, w) &= U M_B V M_B^T W^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

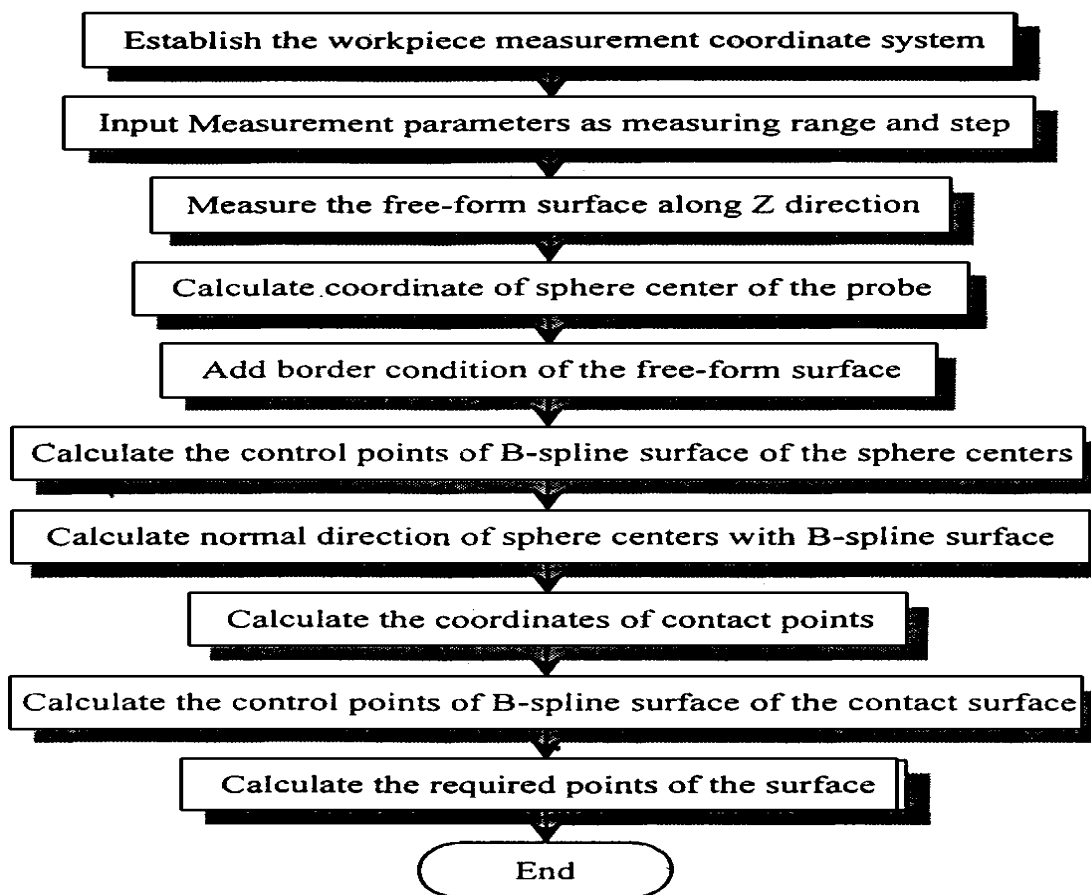


Fig. 5 Flow of Z direction coordinate measuring of free form surface

式中, $U' = [3u^2 \quad 2u \quad 1 \quad 0]$, $W' = [3w \quad 2w \quad 1 \quad 0]$, 分别为 U 、 W 的导数。

自由曲面的单位法矢 $F_B(u, v)$ 可由(3)式计算:

$$F_B(u, v) = \frac{R_B^u(u, v) \times R_B^w(u, v)}{|R_B^u(u, v) \times R_B^w(u, v)|} \quad (3)$$

其中 $R_B^s(u, v)$ 、 $R_B^w(u, v)$ 为曲面的 u 向与 w 向切矢矢量, 分别由 x, y, z 方向的分量组成, 即: $R_B^u(u, v) = (R_{Bx}^u \quad R_{By}^u \quad R_{Bz}^u)$, $R_B^w(u, v) = (R_{Bx}^w \quad R_{By}^w \quad R_{Bz}^w)$ 。

式(1)称为 B 样条曲面正向算法。由于在设计中只给出自由曲面的离散型值点 $\{R_{ij}\}$, 并不知道 B 样条曲面特征网格顶点 $\{V_{ij}\}$, 所以必须采用 B 样条曲面反向算法。即已知型值点网格 $\{R_{ij} \mid i \in [1 \dots n], j \in [1 \dots m]\}$, 要先求出 B 样条曲面特征网格顶点 $\{V_{ij} \mid i \in [0 \dots n + 1], j \in [0 \dots m + 1]\}$, 然后按式(1)进行插值计算。由型值点 $\{R_{ij}\}$ 计算 $\{V_{ij}\}$ 可以归结为解下述线性方程组:

$$R_{ij} = \frac{1}{36} \left\{ \begin{array}{l} (v_{i-1, j-1} + 4 \cdot v_{i, j-1} + v_{i+1, j-1}) + 4 \cdot (v_{i-1, j} \\ + 4 \cdot v_{i, j} + v_{i+1, j}) + (v_{i-1, j+1} + 4 \cdot v_{i, j+1} + v_{i+1, j+1}) \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} i \in [1 \dots n] \\ j \in [1 \dots m] \end{array} \right\} \quad (4)$$

方程组(4)中有 $(n+2)(m+2)$ 个未知变量, 只有 nm 个方程, 若补充 $(n+2)(m+2) - nm = 2(m+n+2)$ 个方程或适当的边界条件, 方程组(4)有唯一解。

3.2.2 Z 向坐标测量方法

由于测量系统软件的测尖半径补偿只能沿着测尖的运动方向进行, 所以沿着 Z 方向的面测量存在测量误差。由图 2 可知, 自由曲面测量时, 测尖在 B 点与被测量曲面接触, 若测尖沿法线方向进行测量, 测量机记录了曲面上 B 的坐标值 (x_B, y_B, z_B) , 沿着 Z 向坐标测量, 测量机记录了 D 点的坐标值 (x_D, y_D, z_D) 。但是 D 点不在曲面上, 曲面上对应于 (x_D, y_D) 的点是 C 点, 这样 Z 坐标无补偿测量时, 测量误差为 $err = |CD| = |z_C - z_D|$, 曲面上不同斜率的点, 测量误差值也不相同。

Z 向坐标测量法是直接沿着 Z 方向测量自由曲面一系列点的坐标值(如图 2 中的 (x_D, y_D, z_D) 点), 然后进行坐标补偿计算, 得到曲面上真正的点。 Z 向坐标测量方法的测量过程如图 5 所示, 其中, 测尖球心 A 点坐标采用式(5)计算:

$$\left. \begin{array}{l} x_{Aij} = x_{Dij} \\ y_{Aij} = y_{Dij} \\ z_{Aij} = z_{Dij} - r \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} i \in [1 \dots n] \\ j \in [1 \dots m] \end{array} \right\} \quad (5)$$

4 测量验证

对一个特定的自由曲面, 分别采用普通坐标测量方法和 Z 向测量方法进行了测量, 测量时间比较如图 6 所示, 测量结果比较如图 7 所示。从图 6 中可以看到, 两种测量方法测量准备时

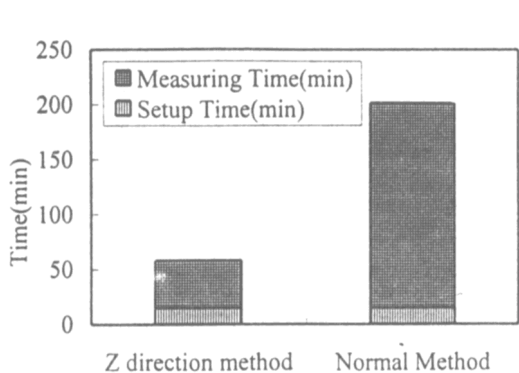


Fig. 6 Compare in measuring time

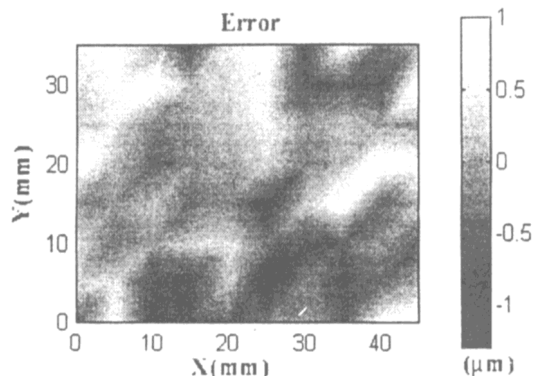


Fig. 7 Error profile between Z direction and normal measuring method

间基本相同, 均为 10 分钟左右; 但是采用 Z 向测量方法, 直接测量时间仅为 45 分钟, 而普通测量方法却需要 185 分钟, 约为 Z 向测量时间的 4 倍。从测量结果的比较(图 7) 看, Z 向测量计算的结果比普通测量的结果一致性较好, 对同一曲面的测量误差在坐标测量机的测量误差范围内 ($3\mu\text{m}$)。

5 结 论

在光学自由曲面的计算机控制加工中, 自由曲面的形面测量是一个关键环节。普通的坐标测量方法, 由于在测量过程中需要实时测量每个测点的法线方向, 测量效率很低, 采用直接 Z 向测量, 然后进行补偿计算的 Z 向坐标测量方法可以节省大量的测量时间, 测量精度在测量机的测量精度范围内, 是一种经济实用的曲面坐标测量方法。

参 考 文 献

- 1 吴华安. 彩色显像管的制造与应用. 北京: 国防工业出版社, 1992
- 2 Suzuki Hirofumi, et al. Study on aspherical surface polishing using a small rotating tool: Development of polishing system. J of JSPE, 1993, 59(10): 17131718
- 3 王文生. 干涉测试技术. 北京: 兵器工业出版社, 1992
- 4 苏大图. 光学测试技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- 5 普里牙耶夫 П Т 著. 光学非球面检验. 北京: 科学出版社, 1982
- 6 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验. 北京: 科学出版社, 1994
- 7 《航空制造工程手册》总编委会. 《航空制造工程手册》工艺检测卷. 北京: 航空工业出版社, 1993
- 8 Leitz. 三坐标计算机数控精密测量机. 香港: 德国莱兹远东顾问处, 1997
- 9 Negishi Mahito, et al. Super smooth polishing on aspherical surfaces(1): high precision coordinate measuring and polishing systems. Proc SPIE, 1995, 2576: 336347
- 10 中国航空精密机械研究所编. DEA 测量机软件应用手册. 1990
- 11 Hosaka M 著. CAD/CAM 曲线和曲面造型. 冉瑞江, 田洪霞译. 海洋出版社, 1995

Study on Profile Measuring in Computer Controlled Fabrication of Optical Free form Surface

LI Quar Sheng, CHENG Ye, ZHAN Bo Peng, CAI Fu Zhi
(*CIMS Division, Dept. of Precision Instruments & Mechanics,
Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract

Optical free form surfaces can be employed to realize some special imaging effects and supply more degree of design freedom. These free form surfaces can be manufactured by computer controlled fabrication (CCF) method on low accuracy machine tool. The profile measurement studied is a key factor that determines the finish accuracy of the optical free form surfaces in CCF, especially the coordination measuring method. Rapid coordinate measuring method (RCMM) is proposed with case study. Results indicate that measuring time can be largely reduced by RCMM, with no measuring accuracy losing.

Key words: Optical free form surfaces, Computer controlled fabrication, Profile measurement

李全胜 男, 1972年5月出生于河北省东光县。现为清华大学精密仪器与机械学系博士研究生, 博士期间主要研究方向为非球面与复杂自由曲面光学透镜的计算机控制制造技术, 同时研究 CAD/CAM/CAE/CIMS、反向工程、并行工程。在以上研究领域已有 10 篇文章发表。