

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 超精密非球面镜面模具直轴磨削的研究

欧阳渺安

(佛山职业技术学院, 广东佛山 528000)

**摘要:**研究了非球面镜面模具直轴超精密磨削技术,给出了非球面镜面模具超精密加工机理、算法原理、软硬件结构、系统实现、工艺分析及实例应用,开发了小型超精密非球面镜面加工系统 SGTCAM1.0。研究表明,系统原理正确,加工出的非球面光学零部件形状误差在 100 nm 以下,表面粗糙度在 5 nm 以下,达到纳米级加工精度。开发的系统使用方便,成本低。

**关键词:**超精密加工;直轴磨削;单点金刚石切削;非球面镜面模具;计算机辅助制造

中图分类号:TQ171.684 文献标识码:A

## Study of ultra-precision vertical grinding for aspheric lens mould

OUYANG Miao-an

(Foshan Polytechnic College, Foshan 528000, China)

**Abstract:** The mechanism of ultra-precision machining, the algorithm of principle, the structures of hardware and software, the realization of Computer Aided Manufacture(CAM) system and the analysis of processing were studied and presented to deal with vertical grinding and Single Point Diamond Turning (SPDT). The CAM system of small size ultra-precision aspheric lens for vertical grinding (SGTCAM 1.0) was developed. The principle is proved to be correct and the results are reached to the nano manufacturing precision with the form error under 100 nm and the surface smoothness under 5 nm. The conflicts between huge market requirements of optical products and the high price of conditional ultra-precision numerical machine tools will be resolved by the low developing costs of the system.

**Key words:** ultra-precision machining; vertical grinding; Single Point Diamond Turning(SPDT); aspheric lens mould; Computer Aided Manufacture(CAM)

## 1 引言

非球面镜面超精密加工技术的研究一直是制造领域的热点和难点,从 20 世纪 60 年代以来,国

内外有关专家投入了大量的人力物力,已经取得了初步的研究成果。非球面光学产品有着无可比拟的光学性能和广阔的应用前景。在国防、航空航天领域,大型或超大型光学产品的开发是国防空间技术的关键,体现着一个国家的技术实力和

经济实力。而在 IT 突飞猛进的时代,除国防、空间技术宏观领域外,更多的民用光学产品如数码相机、电脑摄像头、DVD 拾取头、光纤通讯以及激光产品,也在朝小型、微型等微观方向发展,成为与人民生活息息相关的核心技术。西方发达国家,尤其是美国、日本和英国,已经有了成熟的超精密机床设备及工艺研究成果,它们代表了当今世界的超精密制造水平,但其开发成本也相当高,一些典型设备市场价格在 800 万人民币左右。在发展中国家,这项技术还存在相当大的差距,尤其是经济急速发展的中国,一方面面临着强大的市场需求,超精密加工越来越引人注目;另一方面,受发达国家的技术封锁和出口限制,开发自主知识产权的超精密成套装备成了制造业的热点和难点问题。中国航空精密机械研究所,哈尔滨工业大学等国内研发机构,经过多年的努力,已经积累了一定的技术储备,但总的来说还处于起步阶段,非常有必要进一步加大投入和深入研究。纵观超精密加工技术,其核心集中在以下几个方面:(1)超精密硬件技术的研究与开发;(2)超精密软件技术的开发;(3)超精密工艺技术的研究,也就是说,硬件技术是基础,软件技术是关键,工艺技术是保证。

本文主要研究超精密加工原理及硬件组成,以单点金刚石切削(SPDT—主要加工对象为铜、铝及合金等有色金属材料)以及超精密磨削(UPGT—主要加工对象为黑色金属、玻璃、陶瓷等超硬材料)为主,研究直轴方式超精密加工,以及系统的算法及结构和实现,同时研究了直轴磨削的工艺条件,开发了直轴磨削(车削)加工的计算机辅助加工软件系统。通过应用实例分析超精密加工的具体步骤和实际应用,开发出来的系统除制造精度已达到纳米级精度外,最大的特点是开发成本低,特别适用于小型(10 mm 以下)超精密镜面光学零件及模具的生产,具有非常好的市场推广前景。

## 2 直轴磨削加工原理

非球面镜面超精密直轴磨削装置如图 1 所示。工件通过真空吸盘固定在工件主轴上,由线性马达带动作 100~5 000(r/min)的回转运动,工件主轴固定于机床床身(天然大理石材料制成),

砂轮安装在高速旋转(高达 100 000 r/min)空气主轴上,而砂轮空气主轴固定于机床立柱,立柱沿 Y 轴方向直线运动。调整 Y 轴坐标,使加工接触点通过工件的中心(刀具对心),加工过程中,X、Z 两轴联动,完成非球面曲线形状加工。直轴磨削(UPGT-Vertical Grinding)中,砂轮的回转运动,工件的回转运动在数控装置的控制下产生 X、Z 两轴联动,主要完成高硬度材料的模具加工,原理上与数控车削是相同的,因此对于铜、铝等有色金属的加工,常采用原理方式一致的单点金刚石切削(SPDT)。

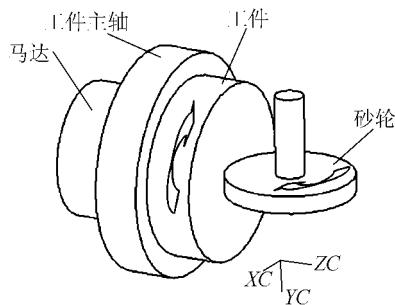


图 1 直轴磨削装置图

Fig. 1 Configuration of vertical grinding

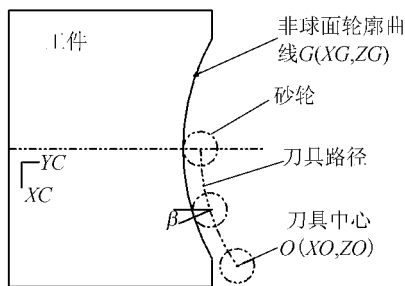


图 2 曲线轮廓坐标与刀具中心坐标的关系

Fig. 2 Relation of aspheric profile and tool path center

根据非球面光学方程(1),计算得到非球面直径方向曲线上的点(G点),亦称曲线轮廓上的点,由砂轮半径(R)尺寸可推算砂轮中心点(O点)的运动轨迹,由此产生刀具路径,生成 NC 代码输入 CNC 控制器,控制 X、Z 坐标的运动完成磨削加工。曲线轮廓坐标 G 点(XG, ZG)与刀具中心 O 点(XO, ZO)坐标的关系如图 2 所示,β角为曲线上的切线角,即曲线法线与 Z 轴夹角,或曲线切线与 X 轴的夹角,切线角越大曲线越陡峭,加工难度也越大。

$$Z = \frac{x^2}{R \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{(K+1)x^2}{R^2}} \right\}} + \sum_{i=1}^{20} A_i |x|^i, \quad (1)$$

非球面镜面直轴磨削加工,初次加工后,通过超精密测量设备进行测量,获得的测量数据需进行误差分析。一般情况下,初次加工误差会比较大,只有通过一次或多次修正加工才能达到纳米级加工精度,对于工件外径小于 10 mm 的小型模具,形状误差一般小于 100 nm,表面误差小于

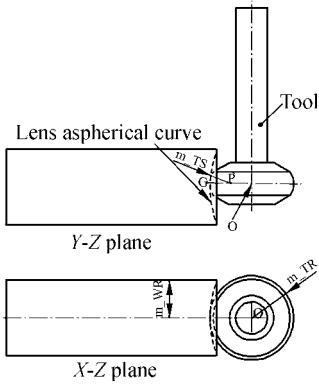
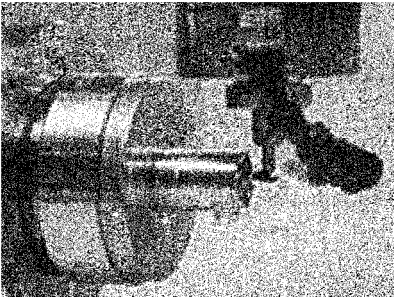


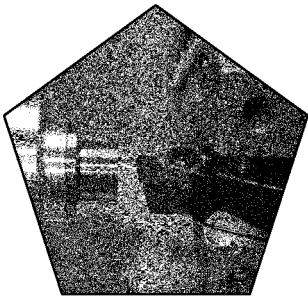
图 3 直轴磨削原理图

Fig. 3 Principle of vertical grinding



(a)UPGT 照片

(a)UPGT picture



(b)SPDT 照片

(b)SPDT picture

图 4 直轴磨削(或车削)实物照片

Fig. 4 Pictures of real machining

5 nm;对于外径大小在数十个毫米的工件,形状误差也应控制在 0.5~1 μm 范围内。超精密加工的精度获得,同时要深入研究加工工艺,在不断地进行误差分析和修正加工情况下才能获得。直轴磨削(UPGT)及单点金刚石切削(SPDT)的原理如图 3 所示,实际上切削照片如图 4 所示。

### 3 直轴磨削算法分析

假设非球面光学曲面方程(1)中的轮廓坐标为 G 点坐标,用离散的 X(XG[i])代入方程求得 Z(ZG[i]),计算公式简化为 KEISAN()函数:

$$ZG[i] = \text{KEISAN}(XG[i]), i = 1, 2, \dots, n.$$

根据图 2,有以下方程组(2):

$$\begin{cases} XO[i] = XG[i] - TR \times \sin(\beta[i]) \\ ZO[i] = ZG[i] + TR \times \cos(\beta[i]) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, XG[i]、ZG[i]为非球面曲线轮廓坐标, XO[i]、ZO[i]为砂轮中心坐标, TR 为砂轮半径, beta[i]为曲线的切线角,利用差分方式求得 beta[i]为:

$$\beta[i] = \text{atan} \left( \frac{\Delta Z[i]}{\Delta X[i]} \right);$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta Z[i] = Z2 - Z1 \\ \Delta X[i] = X2 - X1 \\ Z1 = \text{KEISAN}(X1) \\ Z2 = \text{KEISAN}(X2) \\ X1 = XG[i] - \text{DELX} \\ X2 = XG[i] + \text{DELX} \end{cases}$$

DELX 为差分增量,决定计算精度,若要提高计算精度,可采用解析法,先求出 dz,即非球面曲线方程的一阶导数,再求 beta[i],方程如下所示:

$$\beta[i] = \text{atan}(dz), \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} dz = & \frac{2 \times x}{R \times (1 + \text{temp1})} + \\ & \frac{x^3 \times (1 + K)}{R^3 \times (1 + \text{temp1})^2 \times \text{temp1}} + \\ & i \times \sum_{i=1}^{20} A_i |x|^{i-1} \\ \text{temp1} = & \sqrt{1 - \frac{(1+K)x^2}{R^2}} \end{aligned}$$

算法步骤如下:

(1)读取非球面曲线数据  $XG, ZG$ , 由曲线设计模块提供;(2)输入加工参数,  $TR$  为砂轮半径,  $TS$  为砂轮前端圆弧半径,  $wrpm$  为工件转速,  $trpm$  为砂轮转速,  $tfeed$  为进给速度,  $zdepth$  为磨削深度,  $nx, nz$  为退刀距离,  $m\_fform, m\_fform2$  为凹凸判别系数,  $m\_cutV$  为恒速控制参数;(3)判定是否要增加曲线圆角, 由参数  $m\_CORNER$  控制;(4)分加圆角和不加圆角两种情况, 分别计算砂轮中心坐标值  $XO, ZO$ ;(5)输出 NC 代码。

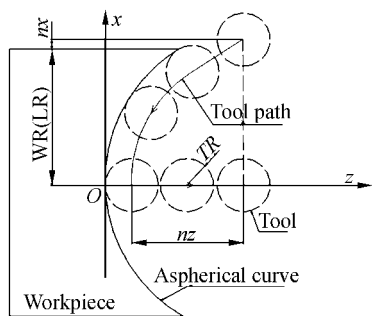


图 5 NC 轨迹示意图

Fig. 5 NC path description

图 5 为 NC 轨迹示意图。图 6 为直轴加工算法流程图。

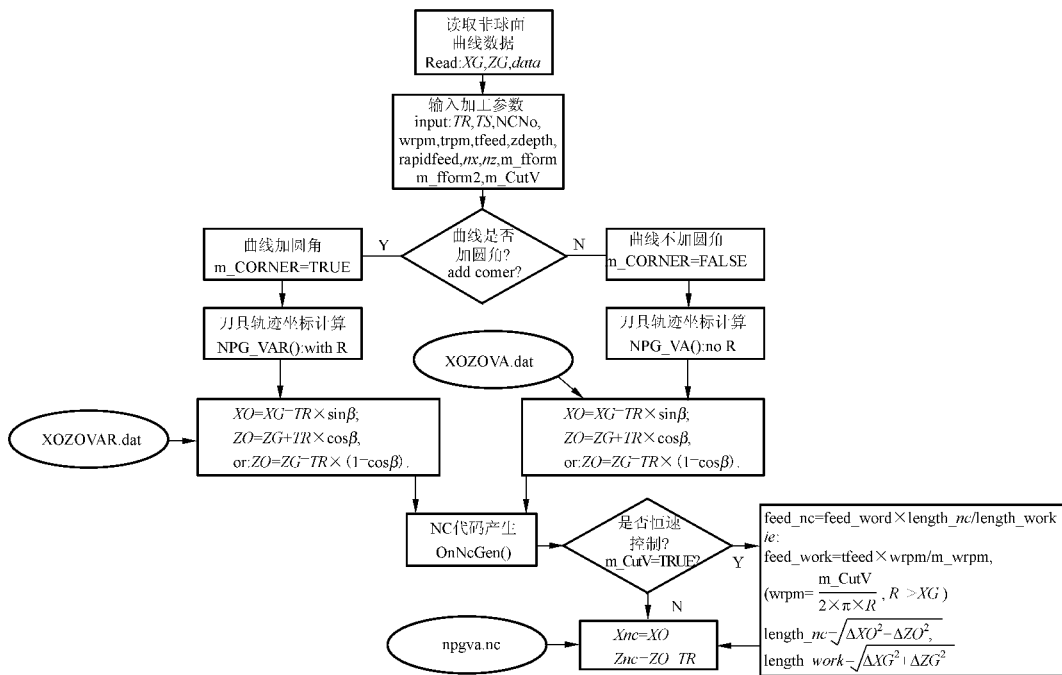


图 6 直轴加工算法流程

Fig. 6 Algorithm of vertical grinding

### 4 直轴磨削系统结构

非球面镜面直轴磨削系统结构主要由三大部分组成, 第一部分为硬件系统组成, 第二部分为应用软件系统, 第三部分为数控系统。

#### 4.1 直轴磨削硬件系统

直轴磨削硬件配置主要由以下几个部分组成。

(1)工件主轴系统, 使用空气主轴, 转速在 100~5 000 r/min。

(2)砂轮主轴, 使用空气主轴, 转速在 1 000~

100 000 r/min, 当使用单点金刚石切削时, 安装车刀。

(3)传动系统, 工作台采用线性导轨, X 轴、Z 轴采用线性马达驱动, Y 轴采用空气静压滚珠丝杆传动, 伺服马达驱动。X 轴行程为 150 mm, Y 轴行程为 50 mm, Z 轴行程为 50 mm。

(4)反馈系统, 采用光栅尺, 反馈精度在 1 nm, 完成精确控制。

(5)测量系统, 采用机上测量技术 (OMM), 可以不拆卸工件完成工件加工轮廓测量工作, 消除拆装造成的误差。

#### 4.2 直轴磨削软件结构

图 7 为软件系统的控制策略。

根据加工需要与硬件设备配套,开发了专用

直轴加工 CAM 系统 SGTCAM1.0。

(1) 装载设计数据 XG,ZG;

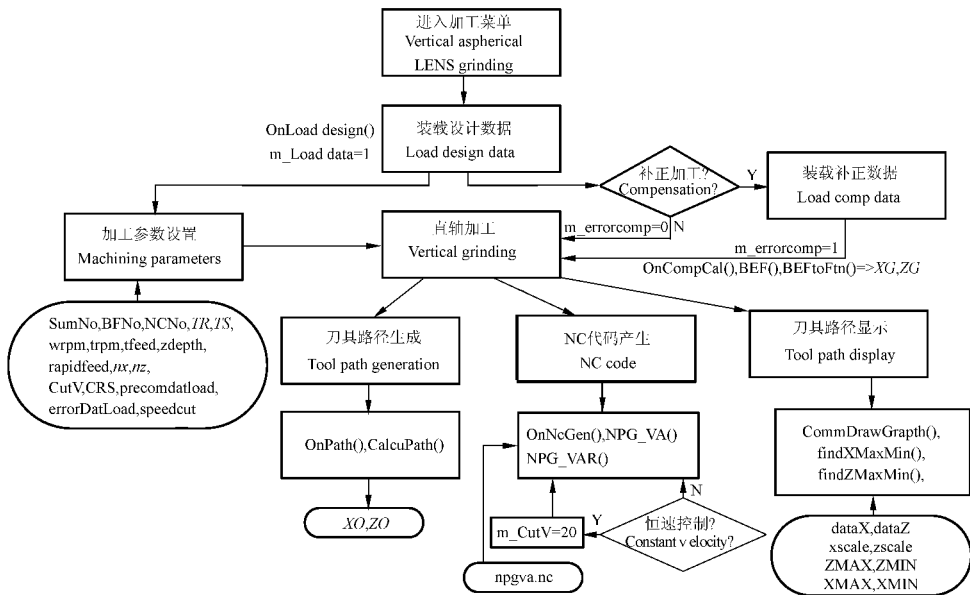


图 7 系统软件结构

Fig. 7 System software structure

(2) 设置加工参数;

(3) 确定是否补偿加工, 若需补偿加工则装载补偿数据;

(4) 产生刀具路径;

(5) 生成 NC 代码;

(6) 显示刀具路径, 仿真加工轨迹。

#### 4.3 系统 NC 数控装置

采用 FANUC 专用超精密控制系统, 系统实现 X, Y, Z 三轴联动, 最小设置精度为 1 nm, 最小运动精度为 1 nm, 控制系统与专用软件采用 RS232 或 HSSB 接口传输数据, NC 控制系统直接控制机床坐标轴进行加工。

## 5 CAM 系统实现及应用实例

超精密加工精度影响因素很多, 只有广泛研究和综合采用各种新技术, 并在各方面精益求精, 才能达到纳米级加工精度。从硬件角度分析, 采用空气静压轴承主轴, 其回转精度国内已达到 50 nm, 国外已达到 30 nm 的水平, 日本高广工业已研制使用该主轴上的空气静压轴承, 使回转精度提高到 8 nm; 目前线性导轨的精度达到 0.1  $\mu\text{m}/200\text{ mm}$ , 通过补偿可以提高到 0.1  $\mu\text{m}/300\text{ mm}$ ,

X、Z 轴传动采用线性导轨由线性马达驱动, Y 轴传动采用空气静压滚珠丝杆, 利用闭环控制定位精度可达 10 nm。直径 25 mm, 导程为 10 mm 的空气静压滚珠丝杆, 刚度可达到 50 N/ $\mu\text{m}$ 。即使如此, 要达到纳米级加工精度需要软件系统来加以保证。在影响超精密加工的因素中, 所有因素最终反映在综合误差当中, 综合误差由超精密测量系统测量, 采用软件进行分析得到, 通过补偿实现。因此, 软件系统的开发及算法的实现是至关重要的。为了实现非球面镜面纳米级加工精度, 本项目开发了直轴磨削(切削)超精密计算机辅助加工系统(SGTCAM1.0—Super Grinding and Turning Computer Aided Manufacturing System)。系统由四大块模块组成: 设计模块、加工模块、测量模块及分析模块。系统有两种策略, 初次加工及补偿加工。把系统生成的 NC 代码输入到机床(SGT100), 加工后利用超精密测量仪器(采用本系统配套开发的机上测量 OMM 或利用 Taylor Hobson、UA3P 等测量仪)获得测量数据, 进入分析模块, 求得加工误差数据及误差曲线, 通过误差分析得到补偿文件。若精度要求没有达到, 则重新回到加工模块, 采用补偿加工方法进行第二次加工, 再进行测量及误差分析, 循环往复直

到满足加工精度为止。实践表明,要达到纳米级制造精度,往往要经过多次“加工—测量—分析—再加工”循环,其中加工工艺经验非常重要。

SGTCAM1.0 采用面向对象的 Windows 编程,系统采用单文档技术(SDI),通过选择不同的菜单进到不同的模块(如设计模块、加工模块、测量模块及误差分析模块),操作简单方便,结果以图形方式显示,简洁明了。

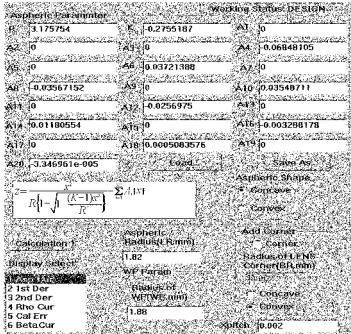


图 8 用户光学及几何参数  
Fig. 8 Aspheric parameters

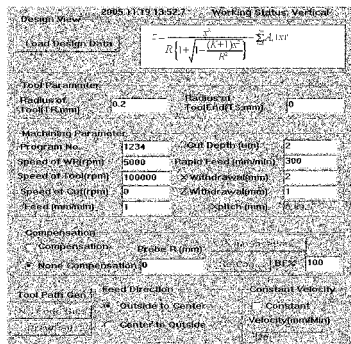


图 9 加工参数  
Fig. 9 Machining parameters

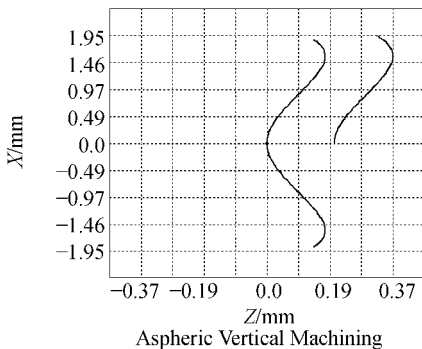


图 10 加工刀具路径图  
Fig. 10 Tool path display

```

P0
(0711.nc)
G90G01F300.0
X2.000000
Z1.000000
G92Z1.002000
G90G01X1.945608F300.0
Z0.324113F1.0
X1.945608 Z0.124113
X1.942176 Z0.125331
X1.938785 Z0.126506
X1.935433 Z0.127640
  
```

图 11 加工 NC 代码  
Fig. 11 Machining NC code

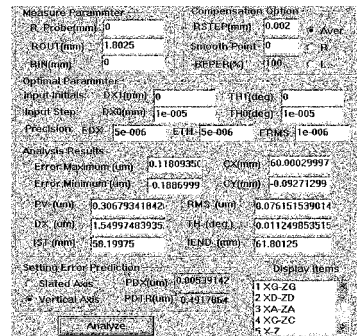
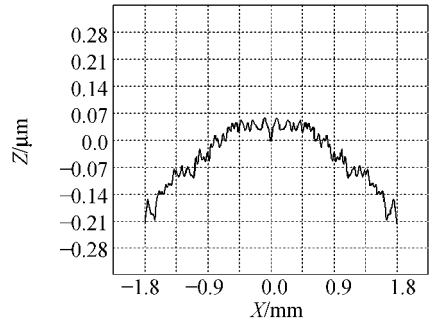


图 12 加工误差分析结果  
Fig. 12 Error analysis results



通过输入非球面光学参数,利用设计模块获得曲线轮廓坐标值,为加工工作准备,图 8 为用户输入光学参数及镜面几何参数,进入加工模块,选择直轴磨削功能,弹出直轴磨削界面输入加工参数如图 9 所示,图 10 为加工刀具路径,图 11 为生成的 NC 代码。通过 RS232 方式把 NC 程序输入到机床 SGT100,进行加工。加工完成后进入测量模块,把测量的数据保存后,进入分析模块。图 12 为误差分析曲线,曲线显示 PV 值为 0.3068  $\mu\text{m}$ ,同时产生补正数据为补正加工作好准备。经验表明,要使 PV 值在 0.1  $\mu\text{m}$  以下至少要进行三

次以上的补正加工。总结超精密加工,必须认真考虑以下几个方面加工因素:

- (1)正确无误的 NC 代码;
- (2)合理的工艺工序安排(平面加工、粗加工、半精加工及精加工);
- (3)优质材料的选择;
- (4)根据加工材料及工艺选择刀具;
- (5)对刀,刀具中心检测;
- (6)NC 通讯及数控系统,需选择满足控制精度要求的数控系统;
- (7)切削参数优化( $S, F, T$ );
- (8)测量技术,是超精密加工的眼睛和度量标准;
- (9)分析技术,是误差分析的关键;
- (10)环境因素:温度,湿度,尘埃,噪音,振动,清洁,冷却,润滑,排屑等;
- (11)操作技能及经验,是超精密加工成功与效率的保证。

## 6 结 论

深入研究了直轴磨削非球面镜面模具超精密加工技术。首先对直轴磨削加工原理进行了研究,建立了直轴磨削数学模型,然后推导出磨削的算法,接着对直轴磨削硬件技术及软件技术包括系统组成及结构进行了分析,开发了小型超精密镜面加工机 SGT100 及非球面镜面直轴磨削超精密计算机辅助加工系统(SGTCAM V1.0)。通过实例操作加工出镜面模具零件,由测量模块测量及分析模块分析,求得实际加工的误差曲线及补正数据。由于篇幅有限,超精密测量模块及误差分析模块及超精密补正加工技术另外用专题进行讨论。实践证明本文研究开发的硬件系统 SGT100 及软件系统 SGTCAM 不仅能够从技术指标如加工出来的模具形状精度及表面粗糙度,达到目前国际大型精密机床水准,而且开发成本降低到五分之一,有着非常广阔的市场前景。

## 参考文献:

- [1] 中川 威雄. 产学协同研究によるもの作り加工技術の研究[M]. ファイテック株式会社,2002.  
TAKEO Nakagawa. *Research on advanced manufacturing technology of IER promotion*[M]. Fine Tech. Corp. of Japan,2002.
- [2] 鈴木 浩文. 光通信用マイクロ非球面ガラスレンズの加工技術[M]. 丰桥技术科学大学,日本技术情报协会セミナーテキスト,2001.  
SUZUKI H. *Machining technology of micro aspheric lens of optic products*[M]. Toyohashi University of Technology of Japan, Seminar Report of Information association of Japan,2001.
- [3] 鈴木 浩文. 非球面光学部品の超精密加工に関する研究[D]. (日)东北大学博士论文,1997.  
SUZUKI H. *Research on ultra-precision manufacturing of aspheric optical products*[D]. *Doctoral Thesis of Tohoku University(Japan)*,1997. (in Chinese)
- [4] 罗松保. 非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J]. 光学 精密工程,2003,11(1):75-78.  
LUO S B. *Ultra-precision machining equipment and technology of aspheric optics*[J]. *Optics and Precision Engineering*, Feb.,2003,11(1):75-78. (in Chinese)
- [5] 李圣怡. 超精密加工机床及其新技术发展[J]. 国防科技大学学报,2000,22(2):95-100.  
LI SH Y. *Ultra-precision machine tools and development of the latest technology*[J]. *Journal of National University of Defense Technology*,2000,22(2):95-100. (in Chinese)
- [6] 荣烈润. 面向 21 世纪的超精密加工技术[J]. 机电一体化,2003,2:6-10.  
RONG L R. *The ultra-precision machining technique toward the 21st century*[J]. *Mechatronics*,2003,2:6-10. (in Chinese)
- [7] 吴明根. 我国超精密加工廉价化对策[J]. 航空精密制造技术,1998,34(1):132-136.  
WU M G. *Strategy of Cheap for Ultra-precision Manufacturing*[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*,1998,34(1):132-136. (in Chinese)
- [8] 赵惠英. 超精密切削工艺参数分析研究[J]. 航空精密制造技术,2003,39(5):3-9.

- ZHAO H Y. Analysis on the technical parameter in nanometer ultra-precision cutting[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003, 39(5): 3-9.
- [9] 杨福兴. 非球面光学零件的超精密磨削技术[J]. *机械工艺师*, 1998(6): 13-14.
- YANG F X. Ultra-precise grinding technology for non-sphere optic elements[J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 1998, (6): 13-14. (in Chinese)
- [10] MCKEOWN P A. Ultraprecision high stiffness CNC grinding machines for ductile mode grinding of brittle materials[J]. *SPIE*, 1990, 1320: 301-313.
- [11] 刘家豪. 超精密加工的关键技术及发展趋势[J]. *机电工程*, 2001, 18(5): 19-21.
- LIU J H. The ultra-precision machining technology and it's domestic and international progress[J]. *Mechanical & Electrical Engineering*, 2001, 18(5): 19-21. (in Chinese)
- [12] 罗松保. 非球面曲面的超精密加工与测量技术的研究[J]. *制造技术与机床*, 2003, 9: 58-61.
- LUO S B. Research on ultra-precision machining and measuring technology for aspherical surface[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2003, 9: 58-61. (in Chinese)

作者简介: 欧阳渺安(1965—), 男, 华中科技大学博士, 华南理工大学博士后, 佛山职业技术学院副教授, 高级工程师, 长期从事 CAD/CAM、智能产品建模技术的研究, 2004 年 7 月至 2005 年 8 月在日本从事 NEDO Japan 项目合作, 主编教材 2 部, 发表学术论文近 30 篇。E-mail: oyma@21cn.com