

光学非球曲面中高频面形误差的控制与补偿技术研究*

Research on Control and Compensation Technology of MHF Form Error for Aspherical Surface

北京航空航天大学仪器光电学院 李成贵
北京航空精密机械研究所 杨辉 张建明 庞长涛

[摘要] 本文分析了非球曲面中、高频面形误差的产生原因及作用机理,对面形精度有直接影响的切削刀具、切削参数、加工路径、切削状态、测量方法、工作环境等因素,提出了优化选择的规则和控制策略;给出了减小误差的补偿原理和编程设计方法,并在数控机床进行了编程补偿试验,结果证明面形误差得到了有效控制。

关键词: 非球曲面 面形误差 误差控制 补偿技术

[ABSTRACT] The reasons and function mechanism of aspheric surface figure error in middle and high frequencies are analyzed. Considering the influences of cutting tool, cutting parameters, machining path, cutting condition, measuring method, and machining environment etc., the optimal selection rules and control strategy are put forward. To decrease the cutting error, the compensation principle and programming design method are also proposed. By testing the programming compensation in the numerical control machine tool, the results show that surface figure error is effectively controlled.

Keywords: Aspheric surface Surface figure error Error control Compensation technique

超精密加工非球曲面光学元件的表面质量,主要包括粗糙度、波纹度和面形精度,三者是根据表面测量的空间尺度和频率段来划分的,它们的形成机理不同,对零件使用性能的影响也有很大差异。

(1) 低频段: 误差空间周期 $L > 33\text{mm}$, 通常将低频段的误差称为面形 (Figure), 它对光束质量的影响主要集中在导致光斑中心亮度和均匀性的降低, 但不会引起中心亮度的展宽。在强光系统中会引起激光束的偏离, 降低会聚光束的能量并影响激光光斑的形状。对低频段误差的评价可以用传统光学评价指标, 如特征均方根值 RMS (Root Mean Square)、峰谷值 PV (Peak-to valley) 来描述。

(2) 中频段: 误差空间周期 $0.12\text{mm} < L < 33\text{mm}$, 中频段的误差称为波纹度 (Ripple 或 Waveness), 它将引起

中心亮度的降低并使其展宽, 在强光系统中是引起非线性自聚焦的重要原因, 对激光系统的安全运行存在着很大的危害。中频段误差的评价用传统的评价指标, 如 RMS 和 PV 来描述是很困难的, 现已多用功率谱密度函数 PSD (Power Spectral Density) 曲线, 以及表面波像差的相移评价算法来描述。

(3) 高频段: 误差空间周期 $L < 0.12\text{mm}$, 高频段的误差通常称为粗糙度 (Roughness), 它极大地降低了光斑的中心亮度, 虽不影响光束质量, 但将影响薄膜的损伤阈值和增加散射能耗, 从而引起激光能量的损失。对高频段误差的评价一般用表面粗糙度 R_a 或均方根粗糙度 R_q 来描述。

对于光学表面而言, 面形误差反映光线经表面后走向的准确性, 波纹度和粗糙度则与表面散射有关, 特别地, 波纹度与小角散射有关。对于成像系统, 小角散射会产生像散, 使像面模糊, 降低系统的分辨率; 对于反射系统, 波纹度反映了表面的不均匀程度, 它会造成镜面反射及散射不均, 对其应用的影响至关重要。

由此可见, 各段频率的误差形成机理不同, 对表面质量的影响效果差别也很大。本文通过非球曲面表面形貌误差形成机理与相关控制策略的研究, 实现金刚石车削表面的有效参数控制, 把中、高频面形误差的影响降低到最小。

1 中、高频面形误差的控制措施

在超精密数控车削加工中, 工艺参数因素很多, 下面就如何提高面形质量, 以及在加工过程中应考虑的一些影响因素, 提出几条对策和措施^[1]。

1.1 切削刀具的选用

在微量切削中, 为保证被加工工件的表面粗糙度及面形质量, 最重要的是要求刀具刃口锋利, 刃口半径越小越能获得极微量的切削。尤其做镜面加工时, 刀具做微量切削, 根据锋利度好的刀具能正确地将机床的移动复映给工件的“母性”复映原理, 即将正确制作的刀具形状精确复映到工件上的加工方法, 刀具研磨的优劣直接影响工件的表面质量。一般要求金刚石刀具的前刀面、后刀面研磨出表面粗糙度值 R_a 为 $0.02 \sim 0.06 \mu\text{m}$,

* 2010 年教育部留学回国人员科研启动基金资助项目资助。

刀具的刃口半径 $\rho < 0.1 \mu\text{m}$ 。对于非球面类零件的车削,在零件的成形过程中,刀具的切削点在一定范围内依次变化,所以加工此类零件还要求刀具的切削刀具具有很高的形状精度。此外,还应根据切削材料的不同选用不同几何角度的金刚石刀具,如铝、铜等有色金属,常用 $0^\circ \sim 5^\circ$ 前角的刀具;锆等红外材料的切削,多选用 -25° 前角的刀具;刀具后角通常为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

1.2 工艺路线的制定

在加工过程中,应充分考虑超精密加工的特点,制定相应的工艺路线,保证零件的加工精度。首先适量分配粗、精加工各阶段的切削余量。其次,要合理安排热处理工序,适时进行人工时效及冷冻处理,避免材料本身内部应力释放影响零件加工前后的稳定性。第三,合理设计零件的装夹方式,避免装夹变形量大于零件的微量切削量;通常多采用负压吸附、用胶粘合等方法;对于刚性差的零件,还应考虑加辅助结构等方案。

1.3 切削参数的选取

在非球曲面的超精密车削过程中,由于材料的不同必然要选用不同的切削参数。这里以硬铝材料为例,通常情况下主轴的转速值对整个切削效果的影响不大,在 $600 \sim 1200 \text{r/min}$ 的范围中,均可取得不错的切削效果。相对主轴转速来说,进给量和吃刀深度的选取在很大程度上影响切削效果。选取相对较快的进给量和相对较大的吃刀深度虽然会提高加工效率,但大的切削力也影响了切削过程中的稳定性,不利于加工出很好的表面质量;过小的吃刀深度又使切削时机床及刀架的刚性影响切削的平稳性,同样不利于产生好的切削效果。根据试验,在加工过程中,尤其是超精加工时,进给量多选用 $0.003 \sim 0.01 \text{mm/r}$;吃刀深度以 $0.002 \sim 0.005 \text{mm}$ 为宜。

1.4 数控系统的应用

在曲面类零件加工过程中,需要严格控制各坐标的相对位置。因为数控系统的功能直接或间接地影响到整个加工质量,为此针对超精密加工的要求,机床的数控系统采用 UMAC (Universal Motion and Automation Controller) 控制器,每块运动控制卡可控制多轴步进电机或直线电机,支持多卡共用,以实现更多轴的控制,同时具有数据精度高、运算速度快、顺序控制、良好的通用性、内置丰富的插补算法、优良的伺服控制算法等多种功能。

在数控软件方面,国外现有的开放性数控系统软件有欧共体的 OS-ACA、美国的 OMAC 和日本的 OSEC。编制过程中,不仅需要考虑切削参数等的设定,对于刀具路径、进给方式等过程参数的设定也应与其他因素一并考虑制定。

1.5 切削状态的环境条件

在超精密加工过程中,加工环境(如温湿度、空气洁

净度等)的变化会影响到高精度零件的表面质量。湿度的容许范围与温度的容许范围有关, $\pm 5\%$ 的湿度控制范围适应于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的温度控制范围。超精密加工应在高洁净度室内进行,灰尘的混入会使镜面划伤和使工件精度受到损害。在超精密研磨中,研磨剂的颗粒可小至 $100 \mu\text{m}$,而灰尘的微粒竟比研磨剂的颗粒大数十倍至数百倍。通常要求洁净度为 100 级(每立方英尺的空气内含大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的灰尘粒不超过 100 个)以上的洁净室。

为此,本课题研究所处的试验环境为恒温恒湿洁净间,温度波动控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,湿度控制在 $55\% \sim 65\%$,洁净间洁净度为 100~10000 级。

环境振动也是超精加工中所必须考虑的一个重要因素。在加工中,既要保证加工过程本身不出现振动,同时还要将外部环境的振动隔开。因此,一般采用带防振沟的隔振地基和把机床放在地下室,都是一种有效的隔振措施。但是,频率较低的振动不能有效隔离。用隔振气垫隔振具有灵活性和能隔离低频率振动的效果。隔振气垫能有效隔离高于 2Hz 的低频振动。为了避免机床部件在运动过程中机床底座的倾斜,隔振气垫应具有自动调平装置。

另外,在加工中选用适当的切削液,并合理选取切削液喷施的方向,以及切屑的排除方式,同样可以改善加工表面的质量。

1.6 检测与误差补偿

由于超精密加工机床的制造精度所限,若要获得很高的形状精度,必须使用在线检测及误差补偿技术,实现数控系统的全闭环控制。如双频激光干涉仪具有高分辨率(如 ZYGO AX10MTM2/20 的分辨率为 1.25nm)与高稳定性,测量范围大,很适合作为机床运动线位移传感器;德国 Heidenhain 公司生产的 LIP401 光栅尺,材料长度为 220mm ,分辨率为 2nm ,采用 Zerodur 材料制成几乎达到零膨胀系数,动静尺间隙为 $(0.6 \pm 0.1) \text{mm}$,也常作超精密机床运动检测。另外,采用一些高精度的接触式表面轮廓仪或光学测量方法,测定加工工件的加工误差,通过专门开发的误差补偿软件对加工中产生的误差进行补偿,也可以达到逐步修正加工误差的目的。

1.7 其他影响因素

除上述影响因素外,超精密加工的质量还取决于操作者的加工经验和技术水平。只有熟悉了机床各方面的特性,具备了较高的技术水平、相关的加工知识、丰富的加工经验和熟练的操作技能等条件,才能做到有的放矢,根据不同的情况加工出符合要求的高精度零件。

2 误差补偿原理与编程设计

为获得高精度的非球面形精度,除上述控制手段

外,还必须采用补偿技术。下面介绍超精密数控加工的具体补偿方法。

2.1 补偿原理和步骤

轴对称非球面补偿加工综合应用了之前研究的检测和自动编程成果,先通过检测结果对零件精度进行评估,再利用自动编程对零件综合误差进行有目的补偿,从而达到所需的零件精度^[2]。基于LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 在线测量的补偿原理可分为以下步骤,如图1所示。

第1步:如图1(a)所示,通过测量轴对称非球面的子午截线,获得非球面的面形测量数据。

第2步:对测量数据作奇异值剔除、数据处理及零件重构,得到如图1(b)所示的轴对称非球面仿真图。

第3步:重构工件图与理想(或最优拟合)非球面比较,得到如图1(c)所示的零件面形精度图。

第4步:对如图1(c)所示的零件面形精度图上的离散点进行3次样条插值,得到如图1(d)所示连续且接近真实的偏差曲线。

第5步:对图1(d)所示偏差表面的子午截线进行单向滤波,负值部分用零表示,得到图1(e)所示连续的正偏差表面。

第6步:将图1(e)所示正偏差表面子午截线的最大值 δ_{\max} 与 $3\mu\text{m}$ (从工艺角度考虑确定的最佳切削量)比较,如果 $\delta_{\max} < 3\mu\text{m}$,则正偏差表面子午截线向上平移,使 $\delta_{\max} = 3\mu\text{m}$;反之,向下平移,负的部分用零表示,同样使 $\delta_{\max} = 3\mu\text{m}$ 。这样就得到如图1(f)所示的补偿加工余量,通过作测量与加工的坐标变换,获得补偿加工所需的余量去除函数。

第7步:读取一次加工的NC (Numerical Control) 程序,取得各插补点的坐标值 $(X_{\text{刀}}, Z_{\text{刀}})$,对插补点作刀具半径逆补偿,得到工件表面相应的坐标 $(X_{\text{工件}}, Z_{\text{工件}})$,将工件坐标值 $(X_{\text{工件}}, Z_{\text{工件}})$ 代入上一步求得的余量去除函数,就获得其对应插补点 $X_{\text{刀}}$ 坐标下 $Z_{\text{刀}}$ 的偏差值 ΔZ ,用 $Z_{\text{刀}} + \Delta Z$ 代替原来的 $Z_{\text{刀}}$,生成新的NC程序。这个NC程序就是补偿加工程序。

把补偿加工程序载入数控系统,使用MDI (Manual Data Input) 操作方式进行加工,便可以获得优于一次加工精度的轴对称非球面。

2.2 补偿加工程序的设计

获得加工余量的函数后,下面将通过编制补偿加工的NC程序实现对切削余量的去除。

由于加工余量函数是工件表面的点与该点误差之间的一一对应关系,而补偿加工的NC程序中每个插补点与刀具轨迹中心一一对应。因此,实现补偿加工的关键问题是要求取NC程序中每个插补点所对应的加工

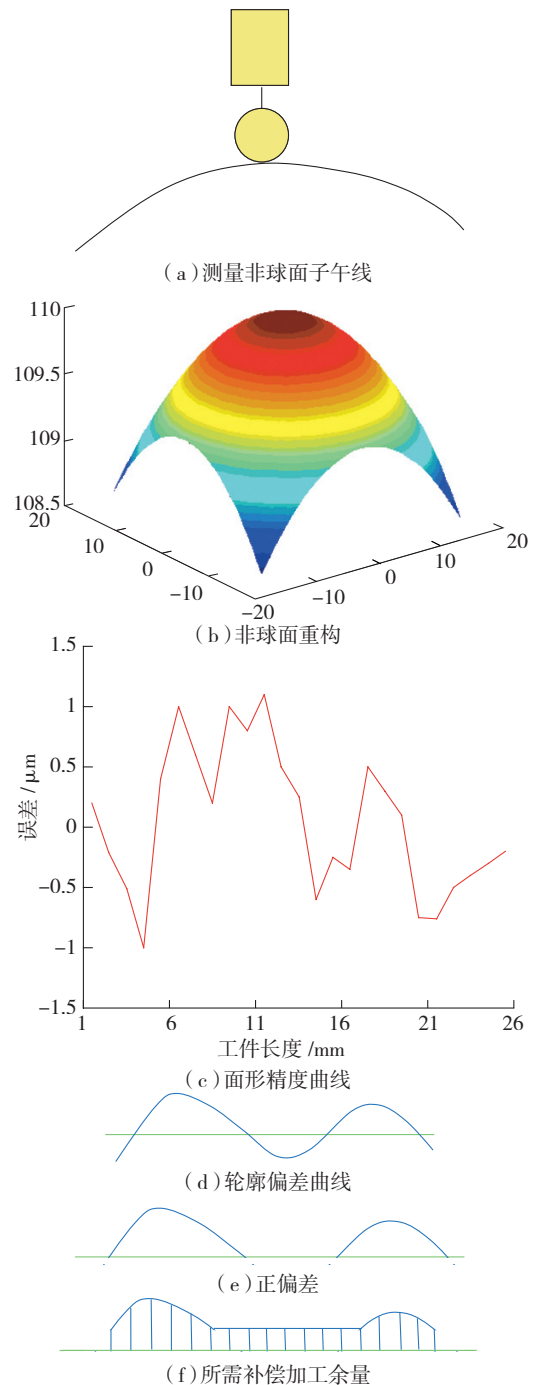


图1 基于LVDT在线测量的补偿加工原理

Fig.1 Compensation cutting principle based on online LVDT measurement

余量,而两者之间的桥梁便是刀具半径逆补偿。所谓刀具半径逆补偿,就是已知刀具中心轨迹上点的坐标,反求当刀具在该点时所加工工件对应点的坐标,其方法同测头半径补偿相类似。生成补偿加工NC程序的具体思路是:通过刀具半径逆补偿,获得加工时插补点映射到工件表面的坐标,再把该坐标值代入加工余量函数,便得到该插补点对应的切削量^[3]。其流程图如图2所示。

从图 2 所示的程序框图可以看出,在生成补偿加工的 NC 程序之前,需要读取一次加工程序中各个插补点的坐标值,由于 NC 程序以文本方式存储,若要从中提取浮点数,必须经过读出、转换及识别等过程,这样既复杂又容易出错。

具体采取措施^[4]:考虑到一次加工程序是通过自动编程生成,通过软件编程上的技巧,把自动编程的程序作为基类,补偿加工时直接继承,在原插补点的坐标值基础上,加上各点的切削加工余量,就生成了补偿加工的 NC 程序。

图 3 为补偿加工程序界面及生成的程序,从界面上可以看出,与自动编程过程非常相像,这是因为在编写补偿加工程序时,以自动编程的程序作为基类而实现得到的。

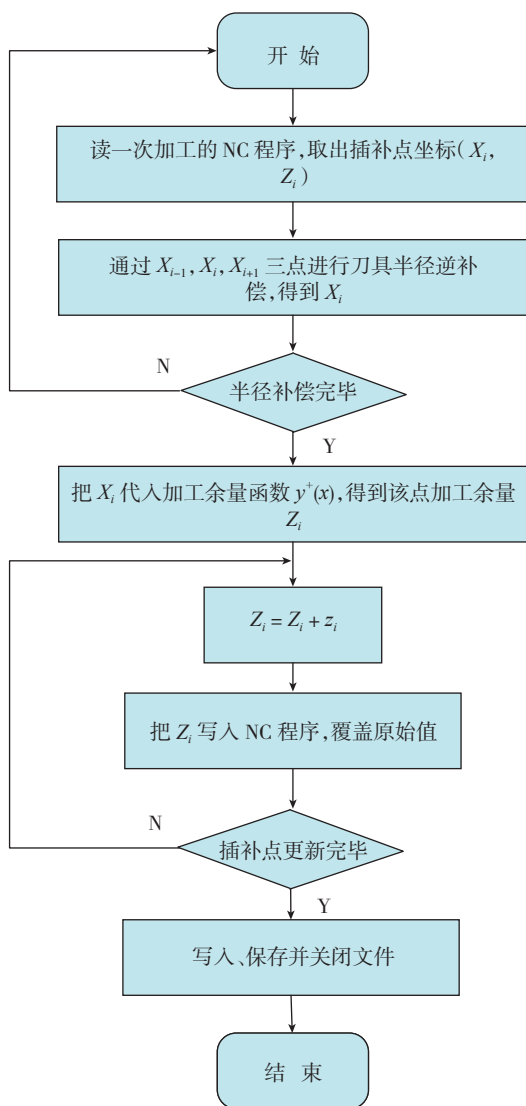


图2 生成补偿加工NC程序的流程图
Fig.2 Flow chart of generating compensation machining NC program

3 加工误差控制与补偿试验

本研究的自动编程软件是针对 Nanosys-300 复合加工系统的非球面超精密车削设计的,主要由 5 部分组成:插补计算、刀具半径补偿、工艺参数选择、编程误差分析及辅助功能。

为验证误差补偿技术的可行性,在加工时有意引入刀具半径误差:刀具实际半径 ToolRadius=0.536mm,自动编程时把刀具半径改为 ToolRadius=1mm,这样加工后即可产生足够的误差,经过 LVDT 在线测量后,通过二次加工的办法对误差进行补偿。

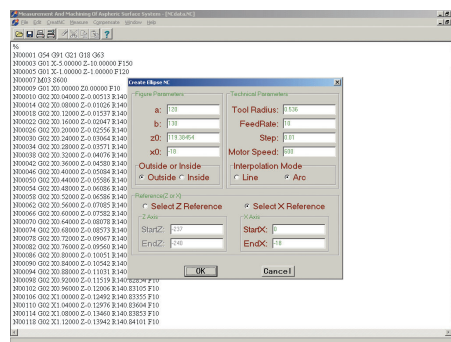


图3 补偿加工程序界面及生成的程序
Fig.3 Man-machine interface and generating compensation machining NC program

下面是使用本自动编程软件,加工的非球面零件。

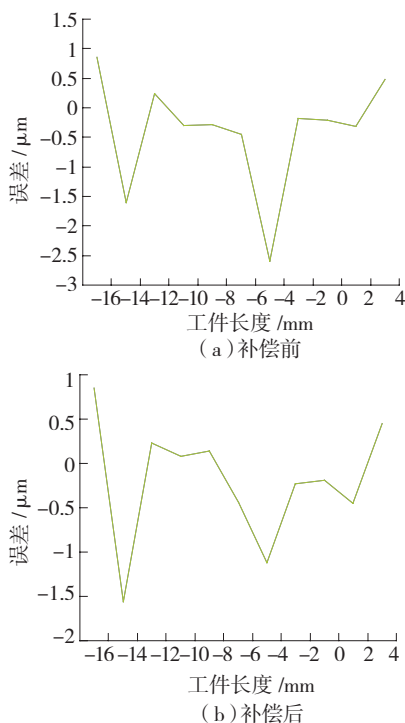


图 4 补偿前后的误差曲线
Fig.4 Error curves of pre- and post- compensation

(下转第 94 页)

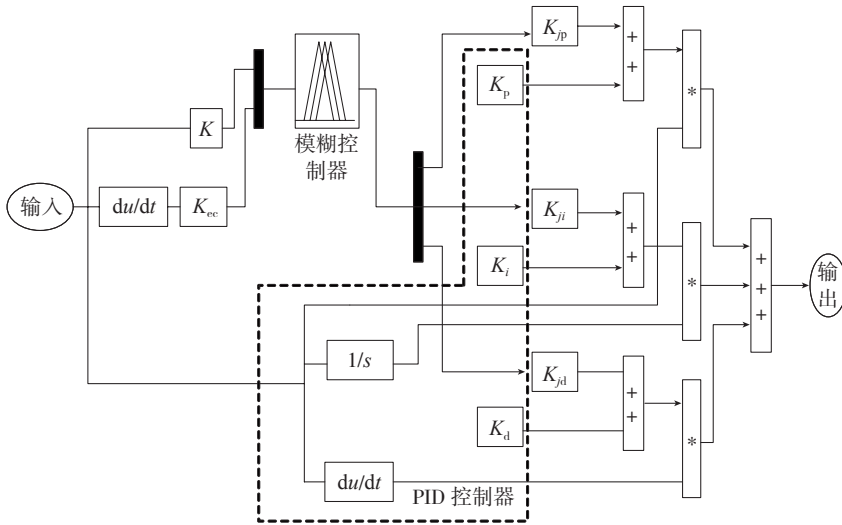


图2 模糊PID控制器
Fig.2 Fuzzy PID controller

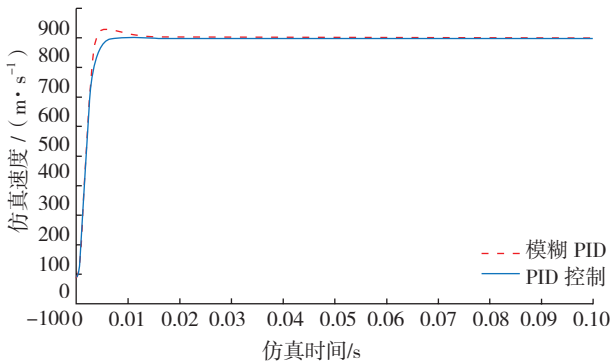


图3 空载时速度比较波形
Fig.3 Speed wave without load

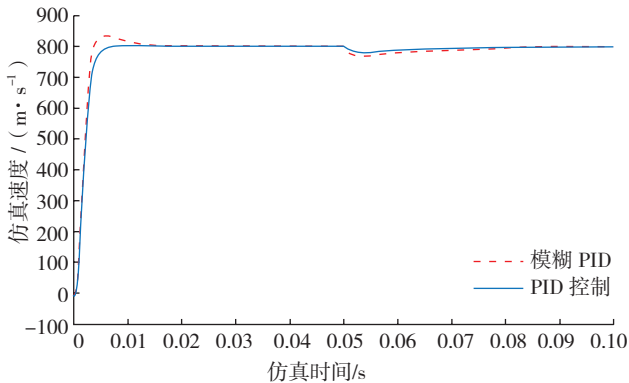


图4 突加负载时速度比较波形
Fig.4 Speed wave with sudden load at 0.05s

4 结论

模糊PID控制器解决了PID控制快速和超调相互矛盾的问题,并且设计简单,容易实现,适用于非线性系统和复杂时变系统。速度调节在整个控制系统中占主导地位,要求能够准确地跟踪目标速度指令。在实际控制过程中,永磁同步电机很容易受到外界的干扰,模型

参数也会因为温度的变化而产生相应的变化,这就要求速度控制器在负载扰动和控制对象参数变化的情况下具有一定的自适应能力。从仿真结果看出,模糊PID控制器对永磁同步电机可达到较好的控制效果。

参考文献

[1] 何杰,王家军. 基于SVPWM的永磁同步电机系统建模与仿真. 机电工程, 2009, 26(7): 77-82.
[2] 李宁,陈桂. 运动控制系统. 北京: 高等教育出版社, 2004.
[3] 冯东青, 谢宋. 模糊智能控制. 北京: 化工工业出版社, 1998: 83-95.

(责编 夏宛)

(上接第91页)

(1) 加工方式: 车削; 旋转椭球面: $a=120\text{mm}$, $b=130\text{mm}$; 加工凹面的加工范围: $0\sim 25\text{mm}$ 。

(2) 输入自动编程软件的参数。

①形状参数: $a=120$, $b=130$, $z_0=0$, $x_0=0$, 加工非球面内侧 (Inside);

②工艺参数: 刀具半径 ToolRadius=1mm, 进给速度 FeedRate=5mm/min, 初始步长 Step=0.01mm, 主轴转速 MotorSpeed=600r/min, 加工范围: $0\sim 25\text{mm}$ (沿 x 轴方向), 插补方式: 直线插补。

(3) 补偿前后的误差曲线(使用轮廓仪检测)如图4所示,对比可以看出,综合误差提高了 $1\mu\text{m}$ 。

4 结论

面形控制是一个反复迭代的闭环控制过程,其输入量是实测面形与标准面形之间的偏差,输出量是面形控制执行器的控制驱动信号与实时面形信息。在实际的车削加工中,确定合适的工艺参数,根据面形偏差实时计算去除函数,并通过合理的工艺控制以及计算机数控算法,进行误差补偿,可以有效减小光学元件的面形误差。

参考文献

[1] 庞长涛. 非球面超精密加工在线检测及误差补偿技术研究[D]. 北京: 北京航空精密机械研究所, 2005.
[2] 庞长涛, 张建明, 罗松保, 等. 非球面超精密加工自动编程技术研究. 制造技术与机床, 2005(12): 57-60.
[3] Pollicove H M, Fess E M, Schoen J M. Deterministic manufacturing processes for precision optical surface. SPIE, 2003, 5078: 90-96.
[4] 康桂文, 张飞虎. 磁流变抛光光学表面加工面形控制技术研究. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 77-79. (责编 深蓝)