

采用局部反卷积算法提高数控光学加工的效率

李锐钢 邓伟杰 闫 锋

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

摘要 数控光学加工的收敛效率与很多因素有关, 例如算法、参数设置和磨头磨料等。提出一种高效的局部反卷积加工算法, 把面形误差划分成待加工区域和非加工区域, 对每一待加工区域进行加工轨迹规划, 在局部区域内沿加工路径进行反卷积运算得到磨头驻留时间分布, 依据最接近点原则对各加工区域进行衔接。大大提高了磨头的有效加工时间与总运行时间的比率, 从而使整体加工效率也大大提高, 并且中频误差也得到了一定程度的抑制。

关键词 光学加工; 收敛效率; 局部反卷积; 中频误差

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s116003

Increasing the Efficiency of CCOS by Local Deconvolution Algorithm

Li Ruigang Deng Weijie Yan Feng

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

Abstract The convergent efficiency of computer-controlled optical surfacing (CCOS) relates to many factors such as algorithm, parameter settings, tool and abrasive. A kind of local deconvolution algorithm with high efficiency is put forward, firstly plotting the error figure to manufacturing area and non-manufacturing area, and programming the manufacturing trace in each manufacturing area, then doing deconvolution in local area along the manufacturing path, thus getting the dwell time of the tool in each area, lastly according the nearest point criterion to switch from one manufacturing area to the other. The ratio of the efficient manufacturing time to the total running time of the tool is raised greatly, so the whole manufacturing efficiency is increased, and the mid-frequency error is restricted to some extent.

Key words optical manufacturing; convergent efficiency; local deconvolution; mid-frequency error

OCIS codes 220.4610; 080.4228; 350.4600

1 引 言

光学系统中采用非球面元件可以更好地校正像差和提高成像质量, 同时可以减轻系统重量和缩小系统体积, 由于这些益处, 人们在光学设计中越来越多的采用非球面元件。光学系统为了获得更高的分辨率以及更多的信息和能量, 增大光学元件的口径是其中主要手段之一, 目前航天光学遥感器、地基天文观察望远镜等系统中广泛使用大口径非球面反射镜, 而且非球面反射镜的口径有日益增大的趋势^[1~4]。非球面反射镜的制造技术目前主要有数控光学加工、应力盘加工、磁流变加工和离子束抛光

等^[5~8]。数控光学加工技术(CCOS)利用小磨头通过控制驻留时间对光学元件进行研磨或抛光; 应力盘加工技术用于大口径非球面元件的制造, 通过磨头的主动变形来吻合理论面形, 同时磨头又具有适当的刚度可以完成面形误差修整; 磁流变加工技术利用磁流变液的磁特性对光学元件进行抛光, 优点是可以很好的控制边缘效应和中频误差, 同时“磨头”理论上是近似零磨损的。无论哪种非球面元件的制造技术, 效率都是至关重要的因素之一。提高非球面元件加工效率的方法有很多, 诸如: 提高磨头压力、提高磨头转速和改进加工算法精度等。本文

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 李锐钢(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: Liruigang@sohu.com

以数控光学加工技术为例,提出一种局部反卷积算法,大大提高了加工的效率,该方法在较大口径非球面元件的制造中优势更明显,并且该方法对中频误差有一定程度的抑制。

2 计算机控制光学表面成形技术 (CCOS)原理

计算机控制光学表面成形技术(CCOS)是一种子孔径的数控光学加工技术^[9],其原理是根据定量的面形检测数据,建立加工过程的控制模型,由计算机控制小磨头按照一定的轨迹、切削速度、压力和驻留时间,对光学元件进行研磨或抛光,以获得相应的面形。CCOS技术制造非球面的流程如图1所示。

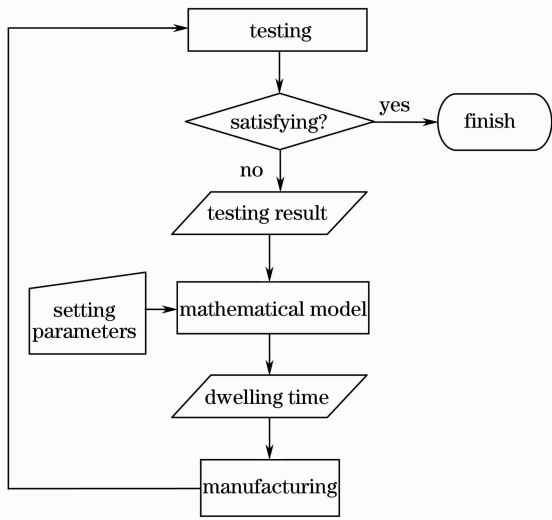


图1 CCOS技术流程

Fig.1 Flow chart of CCOS

由CCOS技术的定义表述可以看出,其核心技术包括两个主要方面:一方面是面形误差检测技术;另一方面是数学控制模型。

光学表面的研磨和抛光受多种因素影响,定量控制比较困难,到目前为止,描述光学表面加工最成功的模型仍是早年提出的Preston假设^[10],即

$$\Delta Z(x,y) = kP(x,y)V(x,y), \quad (1)$$

式中 $\Delta Z(x,y)$ 为磨头与工件接触区域中某点 (x,y) 单位时间内的材料去除量; $P(x,y)$ 为磨头与工件间的相对压力; $V(x,y)$ 为磨头与工件间的相对运动速度; k 为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)

定义磨头的工作函数(去除函数)是当磨头的对称轴坐标与工件坐标相对不变的情况下单位工

作时间内工件和磨头相互作用区域内材料平均去除量的分布函数,用 $R(x,y)$ 表示,则有

$$R(x,y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z(x,y) dt = \frac{1}{T} \int_0^T kP(x,y)V(x,y) dt, \quad (2)$$

式中 T 为加工周期。再定义 $D(x,y)$ 为磨头的驻留时间函数,表示磨头中心在点 (x,y) 处的停留时间。这样,如果磨头在工件表面上移动并且在表面各区域停留相应的时间,然后将每一区域材料的去除量进行叠加即可确定整个工件表面的材料去除量的分布函数 $E(x,y)$,即

$$E(x,y) = \iint_{\text{path}} R(x,y) \cdot D(x-\xi)(y-\eta) d\xi d\eta, \quad (3)$$

(3)式表明在CCOS加工过程中,材料的去除量等于小磨头的工作函数 $R(x,y)$ 与其驻留时间函数 $D(x,y)$ 沿其运动路径的卷积,这就是CCOS过程中最重要的理论依据。通常(3)式写成为

$$E(x,y) = R(x,y) * * D(x,y), \quad (4)$$

式中 $**$ 表示二维卷积。 $R(x,y)$ 与磨头的尺寸、材料、相对压力及速度等因素有关,可以通过计算机模拟及工艺实验求得,而 $E(x,y)$ 就是通常测得的面形误差分布函数,它们都可以看做是已知量。这里我们所关心的是如何求得磨头的驻留时间函数 $D(x,y)$,并在此基础上生成控制文件以指导CCOS加工。因此,数控加工的问题就变成了根据磨头工作函数和面形误差分布来求解驻留时间的问题,求解驻留时间函数 $D(x,y)$ 的过程是一个反卷积的过程。

对于反卷积求解驻留时间 $D(x,y)$ 两个重要因素就是面形误差分布函数 $E(x,y)$ 和磨头工作函数 $R(x,y)$ 。 $E(x,y)$ 的获得需要准确快速的检测技术,不是本文讨论的内容。对于工作函数 $R(x,y)$,在理想的情况下 δ 函数是最好的选择,但磨头总是有尺寸的,所以更切合实际的近似情况应该是具有强中心峰值的高斯分布函数。磨头的平转动运动形式产生的去除函数具备此特征,所谓平转动是指磨头整体绕主轴做转动,但磨头自身平动而不发生转动。磨头平转动运动的工作原理图如图2所示,王权陡等^[11]在2000年推导了磨头平转动运动形式下的工作函数,如公式(5)所示,典型的平转动运动形式的磨头工作函数如图3所示。

$$R(r) = \begin{cases} 2eKP \arccos\left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2Re}\right) & r - e < R \leq r + e \\ 2\pi eKP & 0 \leq R \leq r - e \end{cases}, \quad (5)$$

式中 e 为磨头平转动偏心量, K 为 Preston 系数, P 为磨头压力, r 为磨头半径。

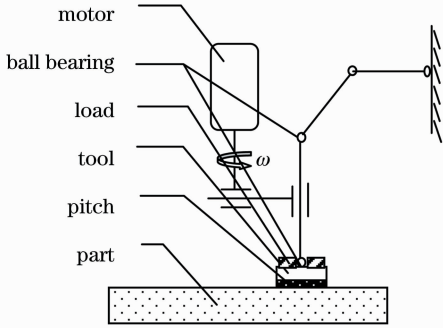


图2 平转动式磨头运动原理图

Fig. 2 Motion principle of polishing tool in planar rotary model

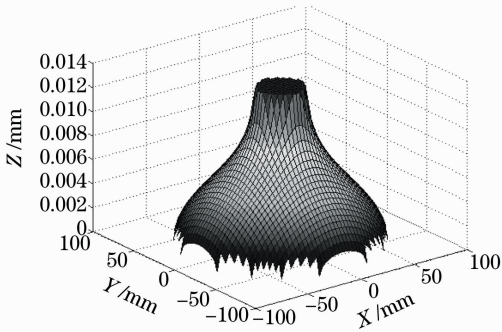


图3 典型的平转动磨头工作函数

Fig. 3 Typical work function of planar rotary tool

3 局部反卷积思想的提出

面形误差一般是“高”“低”分散交错分布的,图4(a)是一个误差分布的示意图,矩形区域代表“高”的区域,其他区域为相对较“低”的区域。另外,数控加工的面形误差收敛是一个逐渐逼近的过程,不可能一个加工周期内把面形误差值收敛为零,不存在那样高超的收敛算法,而且即使存在也会使单一加工周期无限长,不可能在现实情况下去实现。郑立功等^[12]在2006年提出了阻尼迭代算法^[12],该算法首先为误差分布点设定收敛系数 C_{ps} , 误差值高于 $PV \times (1 - C_{ps})$ 的点被去除,而误差值低于 $PV \times (1 - C_{ps})$ 的点保留不动。收敛系数 C_{ps} 是归一化的,1代表所有误差点都覆盖,即区域内的点100%都加工;0代表没有点被选择,实际上就是没

有加工。除了设置收敛系数 C_{ps} ,还设置了调整系数 C_a 值来确定被加工区域去除的误差量,调整系数 C_a 也进行了归一化,1代表被加工点要收敛到误差为零为止,0代表不加工。设置了 C_{ps} 和 C_a 后,在加工点上会去除的量值为 $PV \times C_{ps} \times C_a$ 。在大多数的情况下, C_{ps} 和 C_a 的值选择在0到1之间,所以单次加工过程不会覆盖整个面形区域,而面形误差也不会在一个周期内完全收敛。

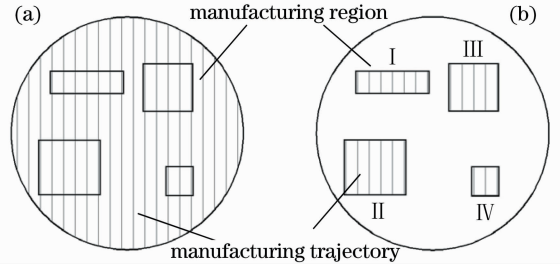


图4 面形误差分区示意图

Fig. 4 Schematic of partition of the surface-profile error

在每一加工周期开始之前,根据阻尼迭代算法对面形误差先设置收敛系数 C_{ps} 和调整系数 C_a , 确定加工的区域和想要收敛的程度,对应的物理情况就是磨头在整个面形误差区域内根据加工轨迹遍历一个周期,如图4(a)所示,行进到要加工的区域(矩形区域),磨头进行加工;对不加工的区域,磨头只有进给运动。可以看出,当待加工误差区域很分散的时候,磨头经过非加工区域并不发生磨削(抛光)加工,非加工区域的磨头进给运动对误差收敛并没有起任何作用。

为了提高数控光学加工的效率,可以采用局部区域反卷积的方法使磨头避开非加工区域,而只针对待加工区域进行加工,如图4(b)所示。首先,对面形误差根据阻尼迭代算法中提到的方法进行区域划分,分成待加工区域和非加工区域,这里关心的只是待加工区域。然后,规划加工轨迹点,只保留待加工区域的加工轨迹点,剔除非加工区域的轨迹点。对每一局部待加工区域按加工路径进行反卷积运算得出局部的驻留时间分布。进行光学加工时,磨头直接进入某一待加工区域,假定区域I,进行加工;完成区域I的加工后,根据距离最短原则确定下一待加工区域,假如为区域III,进行加工,完成后再以此类推,直到所有的待加工区域都完成加工为止。局部反卷积法光学加工的流程图如图5所示。

采用局部反卷积法可以有效地提高磨头运行效率。假设按同样的加工轨迹进行光学加工,对元件进行一个加工周期的总运行时间 T 由两部分组成:磨头

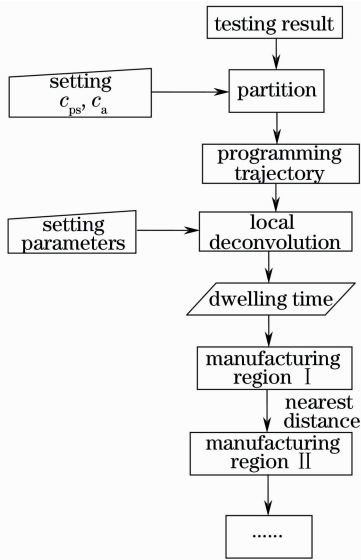


图 5 局部反卷积算法流程

Fig. 5 Flow chart of local deconvolution algorithm

纯加工时间 T_M 和磨头沿加工轨迹行进的时间 T_P , $T = T_M + T_P$; 而磨头沿加工轨迹行进的时间 T_P 又可分为待加工区域行进时间 T_{PA} 和非加工区域行进时间 T_{PB} 。磨头纯加工时间与每一加工周期总运行时间的比值是衡量磨头运行效率的一个有效的参数, 采用局部反卷积法后对每一周期来说节省的时间就是非加工区域的行进时间 T_{PB} , 提高的效率就是

$$\frac{[T_M / (T_M + T_{PA})] - [T_M / (T_M + T_{PA} + T_{PB})]}{T_M / (T_M + T_{PA} + T_{PB})} \times 100\% = \frac{T_{PB}}{T_M + T_{PA}} \times 100\%. \quad (6)$$

对较大口径光学元件(口径大约 0.6~1.5 m)的光学加工来说局部反卷积法提高效率的作用相对更加明显, 因为对口径较大的元件来说, 磨头在工件上行进的时间在总时间中占的比重更大, 从而采用局部反卷积法后节省时间的效果也就相对更突出。

4 加工实例

针对 $1000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 体育场形非球面反射元件进行了模拟加工实验, 图 6 是初始面形误差图, 均方根值为 $1.221 \lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$ 。

旧版算法的加工轨迹如图 7(a) 所示, 经过计算加工路径总长度约 34787 mm, 磨头行进速度为 10 mm/s, 则进给消耗的时间为 3478.7 s, 单个加工周期磨头纯加工时间约 3 h (10800 s), 二者总时间为 14278.7 s, 磨头纯加工时间与总时间的比值为 0.756。图 7(b) 是按局部反卷积法进行区域划分后的加工轨迹规划, 经过计算加工路径总长度约

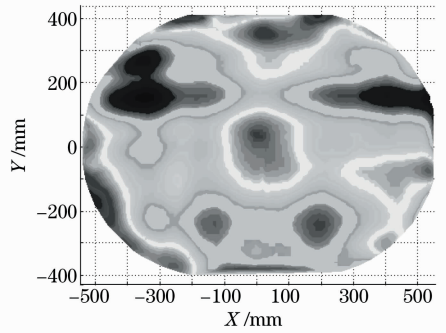


图 6 初始面形误差图

Fig. 6 Initial surface-profile error

12599 mm, 进给消耗的时间为 1259.9 s, 比旧版算法缩短了 2218.8 s, 磨头纯加工时间不变仍为 3 h, 总时间 12059.9 s, 磨头纯加工时间与总时间的比值为 0.896, 与旧版算法相比此比值提高了 18.5%。新算法的采用大幅提高了磨头有效作用时间占有的比重, 缩短了总研制周期, 整体制造效率极大提高。

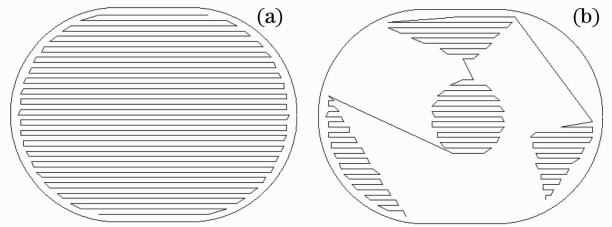


图 7 加工轨迹对比图

Fig. 7 Comparison of two manufacturing trajectories

图 8 是经过若干加工周期后加工结果, RMS 达到 0.330λ , 原有面形误差中的中低频误差都得到了很好的抑制, 这是因为局部反卷积法进行区域划分后对误差不断进行针对性局部修整的结果。

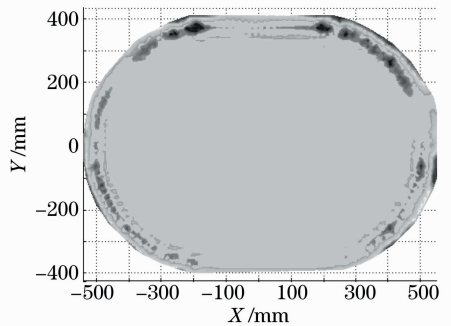


图 8 几个周期后的加工结果

Fig. 8 Result after several manufacturing cycles

5 结 论

常规的加工反卷积算法的加工轨迹需要覆盖整个镜面, 对于较大口径元件(例如大于 600 mm 口径)来说磨头的加工路径上的行进时间也是一个可观的

数值,然而行进的轨迹点并不都是有效加工点,从而造成时间上的浪费。因此,本文提出了局部反卷积算法提高磨头有效运行时间在总运行时间中占有的比重来提高加工效率。根据面形误差设置收敛系数进行区域划分,在每一待加工区域进行局部反卷积运算,求解得到局部驻留时间分布。执行光学加工代码时,磨头只在待加工区域进行有效运行,各个加工区域之间的衔接采用距离最短原则来实现。理论和实验都表明该方法大大提高了磨头的有效加工时间与总运行时间的比值,采用局部反卷积算法的仿真实验中的磨头有效加工时间与总运行时间的比值达到0.896,比旧版算法的比值0.756大幅度提高。另外,通过多个周期的光学加工后面形误差中的中频部分也得到一定程度的抑制。局部反卷积算法对于较大口径元件在误差收敛的中前期效果更明显,因此此阶段面形误差中主要以中低频误差为主。

参 考 文 献

- 1 Min Wang, Francois Chateaufneuf, Christian Proulx. Optical design of compact multichannel and all-reflective system for infrared imaging[C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801226
- 2 Dun Gong, Hong Wang, Tie-yin Tian *et al.*. Optical design of a reflecting telescope with a large field[C]. *SPIE*, 2009, **7281**: 72810M
- 3 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of

- space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
- 李旭阳,李英才,马臻等.大F数长焦距空间相机光学系统设计[J].*光学学报*,2010,**30**(7):2093~2097
- 4 Ma Hongtao, Han Bing, Zhang Xiaohui *et al.*. Design of hyper long focal length in the short structure optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3503~3505
- 马洪涛,韩冰,张晓辉等.超长焦距短结构光学系统设计[J].*光学学报*,2009,**29**(12):3503~3505
- 5 Robert A. Jones, Wiktor J. Rupp. Rapid optical fabrication with CCOS[C]. *SPIE*, 2010, 1990, **1333**: 34
- 6 Xiao Luo, Ligong Zheng, Xuejun Zhang. Fabrication of large off-axis asymmetry aspherics using stressed lap with orbital tool motion[C]. *SPIE*, 2010, **7654**: 765408
- 7 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~205
- 戴一帆,石峰,彭小强等.光学镜面磁流变确定性修形的实现[J].*光学学报*,2010,**30**(1):198~205
- 8 Pradeep Subrahmanyam, George Gardopee, Yogesh Verma *et al.*. Rapid fabrication of lightweight SiC aspheres using reactive atom plasma (RAP) processing[C]. *SPIE*, 2007, **6666**: 66660A
- 9 W. J. Rupp. The development of optical surfaces during the grinding process[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(6): 743~748
- 10 F. W. Preston. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *J. Soc. Glass Technol.*, 1927, **11**: 214
- 11 Wang Quandou, Liu Mincai, Zhang Hongxia. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing[J]. *Opt. Technol.*, 2000, **26**(1): 32~34
- 王权陡,刘民才,张洪霞.数控抛光技术中抛光垫的去除函数[J].*光学技术*,2000,**26**(1):32~34
- 12 Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Novel resistance iterative algorithm for CCOS[C]. *SPIE*, 2006, 6288 62880N

栏目编辑:胡冰