

光学微结构的超精密加工技术

李荣彬, 杜雪, 张志辉, 高栋, 赵伟明
(香港理工大学工业及系统工程学系先进光学制造中心)

摘要: 微结构光学元件在光电产品及光通讯产品中的应用日益广泛. 采用多轴超精密机床加工光学微结构, 可达到亚微米级形状精度和纳米级表面光洁度的高精度水平. 详细介绍了光学自由曲面及光学微结构的超精密加工技术, 并开发了适合超精加工微型槽和微透镜列阵的刀具轨迹自动生成软件.

关键词: 超精密加工; 微结构光学元件; 刀具轨迹生成器

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-6030(2003)01-0057-05

Ultra-Precision Machining of Optical Microstructures

Lee W B, To S, Cheung C F, Gao D, Chiu W M

(Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industrial and Systems Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Optical microstructures are crucial to the development of complex and micro-optical-electro-mechanical devices used in many photonics products. The fabrication of high quality optical microstructures is based on ultra-precision freeform machining technology which allows direct machining of freeform surfaces with sub-micrometric form accuracy and nanometric surface finish. The application of ultra-precision freeform machining to the fabrication of optical microstructures is addressed, and the methodologies for the development of the tool path generator for two optical products are discussed.

Keywords: ultra-precision machining; optical microstructure; tool path generator

光电产品的发展日新月异. 传真机、扫描机、激光指示器、光电显示器、光纤通讯等产品已形成了一个数以万亿计的全球市场. 据光电科技工业协进会(PIDA)统计^[1], 2001年全球光电年产值达159 768亿美元, 2002年全球光电年产值达174 289亿美元, 预计2003年及2004年全球光电年产值将分别增至200 009亿美元及224 950亿美元, 相对2001年, 其增幅高达25.2%及40.8%. 其中, 日本拥有世界最强的光电产业, 几乎所有光电产品都居领导地位, 除了产品成本高之外, 其竞争力可以说是世界首位. 美国的光电产业很明显是在光通讯及激光领域上较具影响力, 主要是因为美国在光纤通讯及激光方面的研究是全世界起步最早的, 而且其本身也提供良好的市场供光纤通讯及激光发展. 至于我国光电产业的发展, 强势领域都属价格

低廉的成熟性产品, 对于关键光学元件的加工技术还无法突破.

光学元件是光电产品的重要组成部分之一, 主要是指相机(包括数码相机和传统相机)、数码投影机、光碟机、影像扫描机、激光印表机、传真机、影印机、光通讯元件及显示器等所用的镜片与镜头组. 其中, 自由曲面和微结构光学元件已成为用于光电及通讯产品的关键零部件. 具有代表性的自由曲面光学元件主要有: V形微槽列阵(V-groove array, 如图1), 主要用于光纤连接器及显示器; 微镜列阵(micro lens array, 如图2), 主要用于显示器的背光板; F-theta镜(f-theta lens mould insert, 如图3), 主要用于激光打印机及扫描机等; 其它不规则的自由曲面光学元件(如渐进式镜片等). 相对于球面及非球面镜片而言, 自由光学曲面元

收稿日期: 2003-05-31.

基金项目: 中华人民共和国香港特别行政区创新科技基金会资助项目(ITS/201/01).

作者简介: 李荣彬(1952—), 男, 香港理工大学工业及系统工程学系主任, 讲座教授. 主要研究领域有制造策略、超精密加工技术及材料科学等.

件的制作极为困难. 金刚石车、铣、磨削集成的多轴超精密机床的发展, 给创新自由曲面光学元件以及发展

微结构光学器件, 提供了更先进的制造设备.

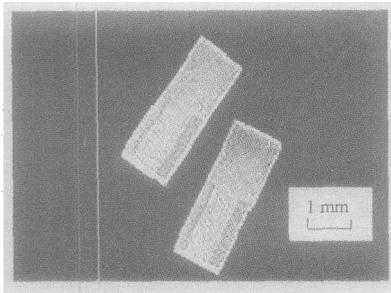


图1 微槽列阵光纤接头

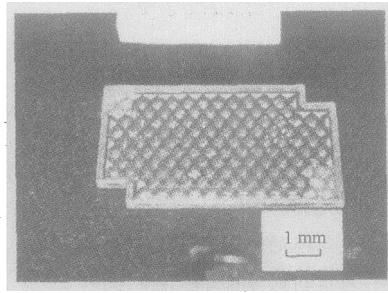


图2 微镜列阵

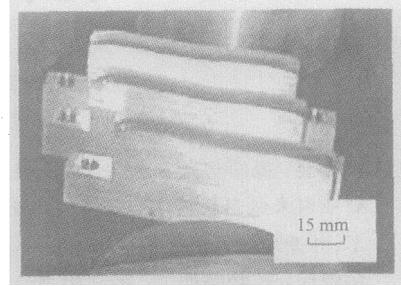


图3 F-theta 透镜模芯

至今, 光学自由曲面和光学微结构的超精密加工技术尚属起步阶段. 本文详细介绍了光学自由曲面和光学微结构的超精密加工技术及其应用, 并研制了光学微结构超精密加工刀具轨迹自动生成软件.

1 多轴超精密加工技术

自由曲面光学元件的设计和制造与传统光学元件(如球面和非球面光学透镜)有很大的差别. 传统的球面和非球面光学透镜有回转对称轴, 用传统的2轴超精密车床就可以加工. 光学自由曲面有以下两种常见

的类型: 一种表面结构较大, 没有对称轴, 形状复杂(如 f-theta 透镜); 一种表面结构微小, 如光纤接头的微槽结构、透镜光栅和梯级光栅等. 传统的加工设备和加工技术很难满足高精度光电产品中复杂自由曲面的加工要求^[2]. 美国 Precitech 公司生产的超精密多轴自由曲面加工机床可以加工具有非对称轴的光学自由曲面和光学微结构器件, 不需要抛光等后续加工就可以使加工精度达到亚微米级的形状精度和纳米级的表面光洁度. 图4所示为“飞刀”铣削加工光学自由曲面, 图5所示为“飞刀”加工微槽结构, 图6所示为磨削加工.

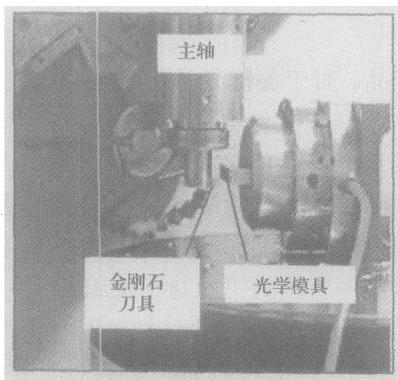


图4 “飞刀”铣削

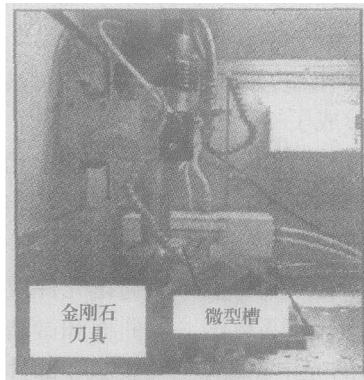


图5 “飞刀”加工微型槽

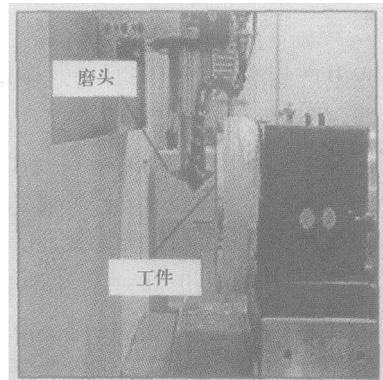


图6 磨削加工

目前, 多轴超精密加工技术方面的研究报道还比较少. 有关自由曲面加工方面的研究工作大多针对普通多轴数控机床和加工中心, 一般都集中在提高刀具轨迹的均一性和减小计算的复杂性^[3], 减少刀具轨迹的干涉^[4,5]等方面. Tseng 和 Sue^[6]总结了加工自由曲面刀具轨迹生成的4种主要方法: 参数法^[7-9], 笛卡尔法^[10], 表面偏置法^[11,12], 立方逼近法^[6, 13, 14]. 有关自由曲面加工方面更详细的综述可以参考文献^[15]和^[16]. 以上所述的自由曲面加工方面的研究工作都是

针对端面铣削或球头铣削加工, 目前在多轴超精密机床上用单晶金刚石刀具加工 F-theta、微型沟槽和微透镜阵列等光学曲面的研究相对还是比较少.

香港理工大学先进光学制造中心引入了一台大型超精密5轴自由曲面加工中心(Freeform 705G, 如图7), 适合于加工多种类型的光学元件及精密零件. 其加工精度形状精度为亚微米级, 表面光洁度为纳米级. 可进行三维自由曲面的铣削、磨削及飞刀加工, 当然也可进行二维的超精密切削. 加工设备除了拥有3个线

性运动轴(X、Y、Z)外,还拥有两个旋转轴 B 轴和 C 轴. 由于线性轴采用静油压导轨且配有反弹气垫,因而线性轴的移动具有极高的精度、重复性、刚度及平稳度. 其位置的反馈精度可达到 8.6 nm. 加工设备的控制系统由 Precitech 公司的 UltraPath™ 数码信号控制系统控制. 主轴是气浮轴承,其最高转速为 10 000 r/min. 最大工件可加工直径为 700 mm. 3 个方向的导轨行程分别为 350 mm(X) × 150 mm(Y) × 250 mm(Z).

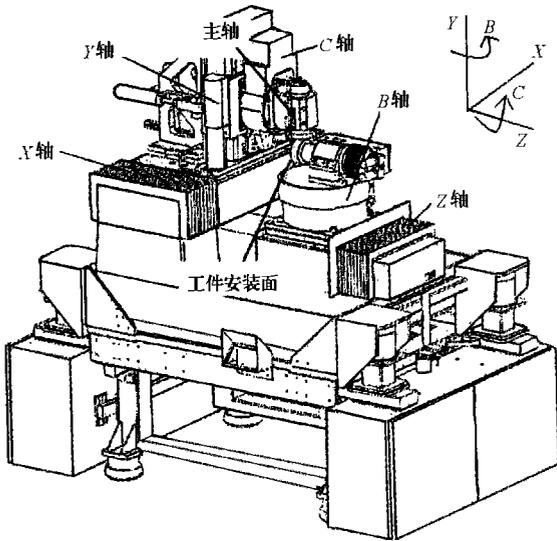


图 7 大型超精密 5 轴自由曲面加工设备

2 光学微结构刀具轨迹生成器

大多数数控机床的数控系统都具有圆弧插补功能,可以实现球面加工. 非球面和“衍射”光学透镜具有几何对称轴,并可以用统一的光学方程式表达,比较容易实现数控编程. 目前市场上已经有针对非球面和“衍射”光学透镜加工的数控编程软件,如 Taylor Hobson Pneumo 公司生产的超精密金刚石车床就配有用于加工非球面光学透镜的数控编程(TPG), Diffsys 软件可以进行“衍射”透镜数控编程. 光学自由曲面和光学微结构在光学产品领域是一个新概念,目前还没有统一算法对光学自由曲面和光学微结构进行设计和制造,数控编程比较困难. 虽然有些光学设计软件(如 Focus Software 公司的 ZEMAX 以及 Optical Research Associate 公司的 Code V)可用来进行光学自由曲面的设计,但输出格式都不适合数控编程. 很多商用 CAD/CAM 软件(如 MasterCAM 和 Unigraphics 等)大都针对通用数控机床或加工中心,适合对端面铣削或球头铣

削加工的数控编程. 通常采用单晶金刚石“飞刀”加工光学自由曲面和光学微结构,不适合用普通的 CAM 软件进行自动数控编程. 目前市场上还没有直接通过光学自由曲面和光学微结构的设计结果来获得数控加工程序的软件. 光学自由曲面和光学微结构与普通自由曲面的数控加工相比有以下不同点:加工精度要求很高,刀具半径和形状误差的补偿量以及表面精度补偿都要达到微米或亚微米级的精度. 为此笔者研制了一套针对加工光学微结构的刀具轨迹生成器.

图 8 是光学微结构刀具轨迹生成器的基本功能模块示意图. 图 9 和图 10 分别表示加工光纤通讯 V-Groove 接口部件和微透镜阵列数控程序生成及仿真过程.

由图 8 可见,光学微结构刀具轨迹生成器主要由 7 大模块组成. 信息数据管理模块主要用来对用户要求、产品特征、工件材料、刀具信息、加工参数等光学微结构刀具轨迹生成过程中所需要的所有信息进行分析和处理. 光学微结构设计模块是指将光学设计结果转换成便于生成数控代码的表达方式. 加工方法选择与切削参数优化模块主要是确定加工过程中加工路径(如 ZIG 和 ZIG-ZAG 方式),并对进刀、退刀、切削走刀、快速走刀、切削用量等有关加工参数进行选择和优化. 数控程序生成模块根据光学微结构的设计结果和切削参数来自动生成加工光学微结构的数控程序. 数控程序检验与修改模块对数控程序进行词法、语法等方面的检查,并可根据需要对自动生成的数控程序进行适当的修改. 数控加工仿真模块是对数控程序进行刀具轨迹和三维动态仿真. 输出模块对已经检验正确的数控程序、切削参数的优化结果以及仿真结果等内容按用户的要求输出.

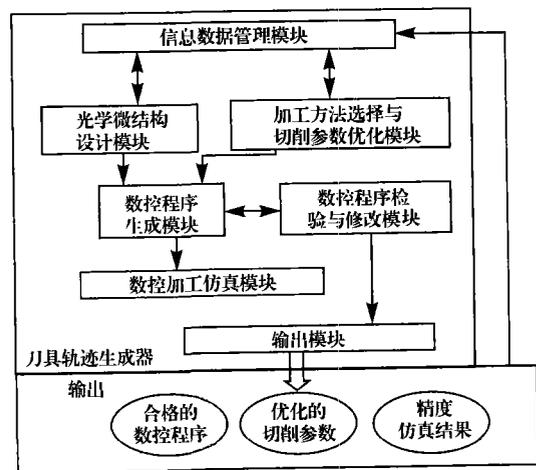


图 8 光学微结构刀具轨迹生成器的基本功能模块

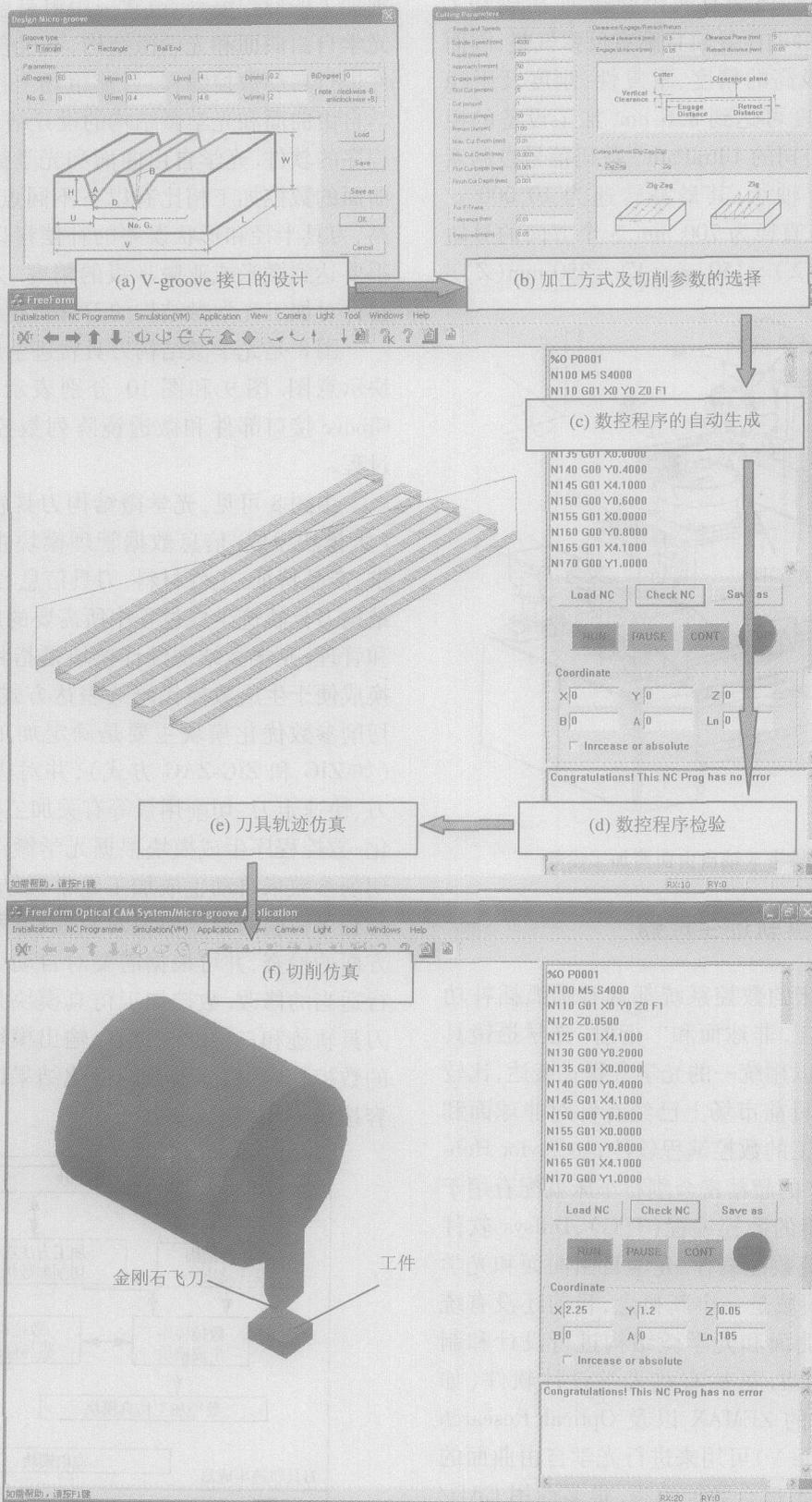


图9 光纤通讯 V-Groove 接口部件数控程序的生成及仿真

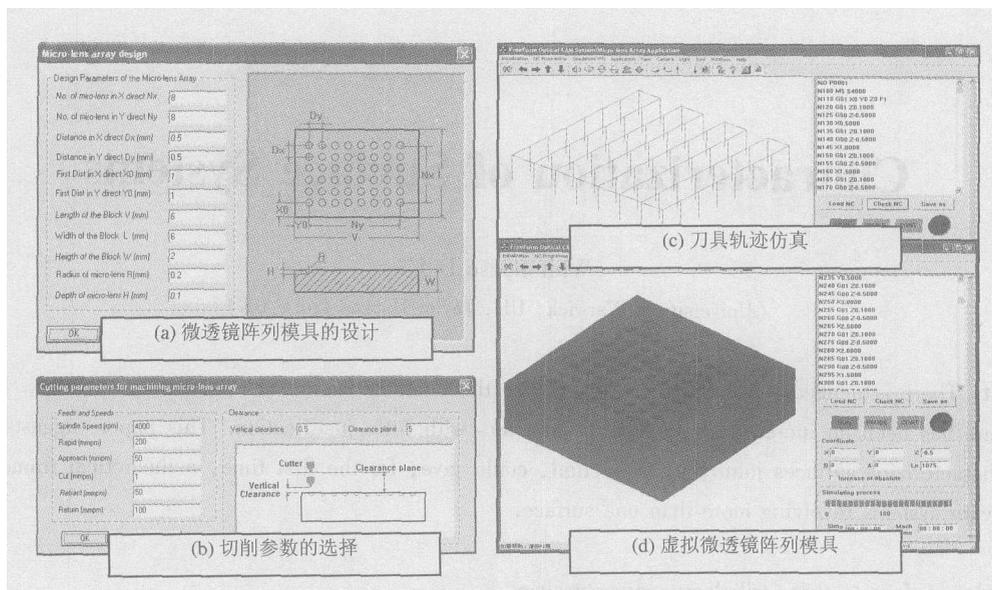


图 10 微透镜阵列的数控加工程序生成和刀具轨迹仿真

3 结 语

本文综述了自由曲面光学元件的市场趋势及加工技术,并介绍了笔者开发的一套光学微结构刀具轨迹生成软件,该软件可用于超精密 5 轴数控机床上加工光纤通讯元件和微透镜阵列。

参考文献:

- [1] 李鸿均. 全球光电产业发展概况. 光讯, 2002, 97: 1-6.
- [2] Kurgano J, Suzuki H, Kimura F. Generation of NC tool path for subdivision surface[A]. Proc CAD/Graphics' 2001[C]. Kunming, China. 2001: 676-682.
- [3] Dragomatz D, Mann S. A classified bibliography of literature on NC milling path generation[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(3): 239-247.
- [4] Balasubramaniam M, Ho S, Sarma S, et al. Generation of collision-free 5-axis tool path using haptic surface[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34: 267-279.
- [5] Kim T J, Sarma S. Toolpath generation along directions of maximum kinematic performance: A first cut at machine-optimal paths[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34: 453-468.
- [6] Tseng Y J, Sue Y R. Machining of free-form solids using an octree volume decomposition approach[J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(1): 49-72.
- [7] Loney G C, Ozsoy T M. Machining of free form surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1987, 19(2): 85-90.
- [8] Choi B K, Jun C S. Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1989, 21(6): 371-378.
- [9] Elber G, Cohen E. Toolpath generation for freeform surface models[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(6): 490-496.
- [10] Huang Y, Oliver J H. Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1994, 9: 281-290.
- [11] Kim K I, Kim K. A new machine strategy for sculptured surfaces using offset surface[J]. International Journal of Production Research, 1995, 33(6): 1683-1697.
- [12] Tang K, Cheng C C, Dayan Y. Offsetting surface boundaries and 3-axis gouge-free surface machining[J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(12): 915-926.
- [13] Lee K, Kim T J, Hong S E. Generation of toolpath with selection of proper tools for rough cutting processes[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(11): 823-831.
- [14] You C F, Chu C H. An automatic path generation method of NC rough cut machining from solid models[J]. Computers in Industry, 1995, 26: 161-173.
- [15] Jensen C G, Anderson D C. A review of numerically controlled methods for finish-sculptured-surface machining[J]. IIE Transactions, 1996, 28: 30-39.
- [16] Austin S P, Jerard R B, Drysdale R L. Comparison of discretization algorithms for NURBS surfaces with application to numerically controlled machining[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(1): 71-83.