DOI: 10.3901/JME.2014.13.178

二次旋转曲面精密磨削原理与运动控制方法*

胡德金

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 针对旋转抛物面、旋转双曲面等非球面精密磨削加工技术难题,在旋转球面精密磨削方法研究基础上,提出旋转抛物面、旋转双曲面等非球面的展成与摆动复合的精密磨削新原理,使磨削主轴旋转中心线与曲线上磨削点的法线重合、磨削主轴的摆动中心点始终保持在旋转曲面的旋转轴上,从而避免原理性误差,通过理论分析证明该原理的可行性。对非球面展成与摆动复合精密磨削新原理的运动控制模型进行了讨论,构建具有在线自动检测功能的非球面精密磨削样机,应用在线自动检测功能,克服磨削过程中砂轮损耗对磨削精度的影响,实现磨削、检测自动化操作,一次参数设定就可完成整个磨削过程,提高了磨削效率。试验结果表明,磨削精度达到了令人满意的效果。

关键词: 二次旋转曲面;展成精密磨削;运动控制模型;在线检测

中图分类号: TG156

Principle and Control Method for Precisely Grinding Quadratic Rotated Conicoid

HU Dejin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The new principle of precision generating and swing grinding the quadratic rotated conicoid is introduced based on the spherical surface grinding method. Grinding spindle rotation center line coincides with the normal line of the ground point on the quadratic rotated conicoid, the swing center point is always in the rotation axis of the quadratic rotated conicoid. Through the theoretical analysis, the proof of principle is feasible. And further on, the motion control model of precision generating and swing grinding the quadratic rotated conicoid is discussed; the precision grinding machine is constructed. The grinding experiment results are satisfactory.

Key words: quadratic rotated conicoid, generating precision grinding, movement control model, automatic detection

0 前言

球面、非球面等特殊旋转曲面精密加工技术在航空航天、光学系统、能源工程等领域具有广阔的应用前景。根据不同应用场合,球面、非球面精密加工一般通过精密磨削(或精密车削)、研磨、抛光等工序组成,而精密磨削是关键、是基础。围绕球面、非球面等特殊二次旋转曲面精密加工原理、加工方法、加工技术等问题我国许多科研工作者做了大量的研究工作。

郭东明等^[1]认为:数米直径的大型光学零件的

加工,精度虽在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 的要求,但在目前一般条件下却难以到达,其制造不但要有特殊的加工设备和环境条件,同时还要有高精度的在线(或在位)检测及补偿控制技术的支持。

康念辉等^[3]为提高大中型非球面的磨削精度,研究了轴对称非球面磨削过程的误差模型,并对误差进行补偿。运用多体系统理论,建立了非球面磨削成形的统一误差模型,并对磨削成形的抛物面面形误差进行辨识并进行补偿,补偿一次可以使口径 210 mm 的抛物面面形误差收敛至 $5 \mu\text{m}$ (峰谷值)以内。

李圣怡等^[3]认为:一些高精度瞄准系统要求小型化,可以用少量非球面镜代替复杂光学系统,这

* 国家重点实验室基金资助项目(MSVMS201104)。20140116 收到初稿,20140424 收到修改稿

些非球面反射镜可在特殊的超精密数控研抛机床上用“计算机控制的光学表面定量点加工方法(Optical surface processing methods of quantitative point of a computer-controlled, CCOS)”加工。

董申等^[4]针对大型光学非球面制造难度大的特点, 根据非球面的轴对称性, 在对非球面方程及曲率分析基础上, 采用二轴超精密磨削机床, 给出两种砂轮加工光学非球面的几何模型, 分析了形成光学非球面造型误差的主要影响参数, 并通过计算机仿真, 得到了一系列有价值的结果。

朴承镐等^[5]针对现行球面光学零件加工的基本工序中存在的问题, 提出了用轨迹成型法加工球面光学零件的新原理, 并进行了深入研究。为了保证用轨迹成型法加工光学零件的面形精度, 对精密磨削机床影响工件面形误差因素进行了理论分析。推导出机床调整机构可消除误差的公式, 以误差公式计算出的误差值来调整机床的微调机构, 可达到减少面形误差, 进而保证面形精度的目的^[6]。

王凌云等提出用圆盘形刀具来加工这类非球面的方法。用几个不同半径的圆盘刀具, 采用分段“接力式”的加工方式, 实现对非球面的加工。该项研究针对工程上常用的二次旋转曲面镜曲率小, 非球度小的特点, 对用圆盘形刀具加工非球面进行了探索, 从中对多种可作为母线的曲线进行分析、比较和计算, 最后得到的结论是, 当母线具有某些几何特性时, 它所形成的凹旋转曲面可以用圆盘形刀具来加工^[7]。

奥林帕斯光学公司一项专利介绍了使用一对杯形砂轮加工球面透镜的方法。其中球面透镜可以绕自身轴线旋转, 一对杯形砂轮对称地分列在球面透镜的两边, 一边自转一边以相对的方向沿透镜对称球面方向旋转, 完成透镜球面的磨削^[8]。

本文作者前期对高硬材料球面精密磨削加工原理、加工方法、加工工艺、智能控制方法等内容开展了一系列的理论与试验研究^[9-11], 在此基础上, 进一步开展了旋转抛物面等二次旋转曲面精密磨削原理和方法的研究。

目前, 虽然相关技术和理论问题取得了一定的进展, 但还缺乏有效的在线或实时检测, 许多场合需要人工进行长时间的修磨, 才能达到需要的面形精度和表面粗糙度, 时至今日, 非球面精密加工问题仍然是先进制造技术领域研究热点。

1 展成摆动式旋转曲面精密磨削原理

一条平面曲线绕同一平面上的定直线旋转一周所形成的曲面称为旋转曲面。曲线称为旋转面的母线, 定直线称为旋转曲面的轴。这种定义是《高等数学》教材中所描述的, 只要建立适当的坐标系, 使曲线在某个坐标平面内, 旋转轴为坐标轴, 根据定义就可以得到相应的旋转曲面方程:

在直角坐标系 Oxy 平面上的曲线 C , 其方程为

$$f(x, y) = 0$$

$$z = 0$$

曲线 C 绕 y 轴旋转一周所形成曲面的方程为

$$f(y, \pm\sqrt{x^2 + z^2}) = 0$$

形成的旋转曲面如图 1 所示。

图 1 二次旋转曲面

本文针对由圆、抛物线、双曲线等曲线经旋转形成的球面、非球面等特殊旋转曲面的精密加工问题进行了讨论。

1.1 旋转球面展成摆动精密磨削原理

用任一平面与球体相截, 截平面是一个正圆平面, 正圆平面的圆心 O' 处于通过该点的球面法线上(图 2), 正圆平面的圆周线在球面上。以这一正圆圆周线绕 y 坐标轴旋转一周就形成了如图 3 所示的有一定宽度的环状球面, 环状球面的宽度等于正圆圆周线直径, 形成的环状球面直径与正圆圆周线圆心到旋转中心的距离有关, 距离越远, 形成的环状球面直径就越大。

图 2 球面形成原理图

图 3 包络线形成的球面

据此原理, 本文提出了一种定中心展成摆动精密磨削内球面的新原理和新方法, 其原理如图 4 所示: 待磨削内球面工件在工件坐标系 $Oxyz$ 内以 n_1 速度绕 y 坐标轴做低速旋转运动; 加工坐标系 $O'x'y'z'$ 坐标原点 O' 设在球面工件球心点上, 砂轮轴上的砂轮磨具以 n_2 速度做高速旋转运动, 并绕坐标原点 O' 在 $O'x'y'$ 坐标平面内成一定交叉角度往复摆动, 控制砂轮磨具的摆动半径 R 就可以加工出所需尺寸的球面工件。因为砂轮磨具的旋转中心点始终在球面法线上, 所以, 工件旋转运动、砂轮磨具高速旋转运动、砂轮摆动运动以及砂轮沿法线方向的进给运动的合成所形成的曲面一定是一个旋转球面。

图 4 展成摆动球面磨削原理图

提出的展成摆动磨削球面原理的优点如下: 由于砂轮磨具的摆动中心固定在加工坐标系 $O'x'y'z'$ 坐标原点 O' (球心) 上, 砂轮磨具的进给方向始终在法线方向, 不存在机床原理上的误差对加工精度的影响。

1.2 旋转抛物面展成摆动精密磨削原理

应用上述原理, 可以实现旋转抛物面的磨削加工。因为旋转抛物面是抛物线绕坐标轴旋转一周所形成的曲面。也就是说, 只要在平面坐标系内解决了特殊二次曲线的加工问题, 通过工件本身的旋转就解决了二次旋转曲面的加工问题。

如图 5 所示, 设抛物线方程为

$$y = \frac{1}{4} px^2 \quad (1)$$

该抛物线 C 绕 y 坐标轴旋转一周所形成的抛物面顶点在坐标系 $Oxyz$ 内坐标原点 O 上。

在 Oxy 坐标平面内的抛物线的 M_0 点做法线,

根据高等数学曲率中心公式, 抛物线在对应点 $M_0(x_0, y_0)$ 的曲率半径中心 $O_2(x_2, y_2)$ 的坐标为

$$\begin{aligned} x_2 &= x - \frac{y'(1+y'^2)}{y''} \\ y_2 &= y + \frac{1+y'^2}{y''} \end{aligned} \quad (2)$$

图 5 旋转抛物面磨削示意图

对式(1)抛物线方程求一阶导数和二阶导数

$$y' = \frac{1}{2} px \quad y'' = \frac{1}{2} p$$

代入式(2)中得抛物线在对应点 $M_0(x_0, y_0)$ 的曲率半径中心 $O_2(x_2, y_2)$ 坐标

$$\begin{aligned} x_2 &= -\frac{1}{4} p^2 x_0^3 \\ y_2 &= y_0 + \frac{4 + p^2 x_0^2}{2p} \end{aligned} \quad (3)$$

另, 根据高等数学曲率半径公式

$$\rho(x) = \frac{\sqrt{(1+y'^2)^3}}{y''} \quad (4)$$

抛物线在对应点 $M_0(x_0, y_0)$ 的曲率半径为

$$R_2 = \frac{2}{p} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{4} p^2 x_0^2\right)^3} \quad (5)$$

为了后续讨论和控制上的简化, 取法线与 y 坐标轴相交点 O_1 为圆心, 以为半径 R_1 作一个圆 C' 。只要证明在抛物线切点 M_0 上、圆心在法线上的圆半径 R_1 小于抛物线在 M_0 点的曲率半径 R_2 , 就可以应用球面磨削方法, 选择合适的砂轮磨具直径, 采用展成摆动磨削原理磨削旋转抛物面。

抛物线对应 M_0 点的法线与 y 坐标轴交于 O_1 点, 其坐标: $x=x_1=0, y=y_1$, 由法线方程

$$(y - y_0) = -\frac{(x - x_0)}{y'} \quad (6)$$

得到

$$y_1 = y_0 + \frac{x_0}{y'} = y_0 + \frac{2}{p} \quad (7)$$

以 O_1 为圆心的圆半径 R_1

$$R_1^2 = (y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2$$

代入 $x_1=0$ 和式(7)中的 y_1 得到

$$R_1 = \frac{2}{p} \sqrt{1 + \frac{1}{4} p^2 x_0^2} \quad (8)$$

从式(3)可见, 对应 Oxy 坐标平面内的抛物线 C 的 M_0 点曲率半径中心 $O_2(x_2, y_2)$ 在第二象限。比较式(5)和(8), 不难看出, 以抛物线对应点 M_0 法线与 y 坐标轴交点为圆心 O_1 、以为半径的 R_1 小于抛物线对应点 M_0 的曲率半径 R_2 。因此, 可以选择适当的砂轮直径、采用磨削旋转内球面相同的、以展成摆动磨削方法来磨削旋转抛物面而不会发生干涉。

1.3 旋转双曲面展成摆动精密磨削原理

应用同样原理可以磨削二次旋转双曲面。如图 6 所示, 实轴为 y 轴的双曲线标准方程为

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

其一阶导数和二阶导数分别为

$$y' = \frac{a^2 x}{b^2 y} \quad y'' = \frac{a^4}{b^2 y^3}$$

图 6 旋转双曲面磨削原理示意图

在 Oxy 坐标平面内双曲线的 P_0 点做法线, 法线与实轴 y 坐标轴的相交点为 $Q_1(0, y_1)$ 。

根据曲率中心式(2), 代入 y' 和 y'' 得双曲线在对应点 $P_0(x_0, y_0)$ 的曲率半径中心 $Q_2(x_2, y_2)$ 坐标

$$\begin{aligned} x_2 &= -\frac{(a^2 + b^2)x_0^3}{b^4} \\ y_2 &= \frac{(a^2 + b^2)y_0^3}{a^4} \end{aligned} \quad (10)$$

根据曲率半径公式(4), 双曲线在对应点 $P_0(x_0, y_0)$ 的曲率半径

$$R_2 = a^2 b^2 y_0^3 \sqrt{\left(\frac{1}{a^4} + \frac{x_0^2}{b^4 y_0^2} \right)^3} \quad (11)$$

双曲线对应 P_0 点的法线与 y 坐标轴交于 Q_1 点, 其坐标: $x=x_1=0, y=y_1$, 由法线方程式(6)得

$$y_1 = y_0 + \frac{x_0}{y'} = \frac{(a^2 + b^2)y_0}{a^2} \quad (12)$$

连接 $Q_1 P_0$, 即为以 O_1 为圆心的圆半径 R_1

$$R_1^2 = (y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2$$

代入 $x_1=0$ 和式(12)中的 y_1 , 得到

$$R_1 = b^2 y_0 \sqrt{\frac{1}{a^4} + \frac{x_0^2}{b^4 y_0^2}} \quad (13)$$

从式(10)可见, 对应 Oxy 坐标平面内的双曲线 C 的 P_0 点曲率半径中心 $Q_2(x_2, y_2)$ 在第二象限。比较式(11)和(13), 不难看出, 以双曲线对应点 P_0 法线与 y 坐标轴交点为圆心 Q_1 、以为半径的 R_1 小于双曲线对应点 P_0 的曲率半径 R_2 。因此, 同样可以采用磨削旋转内球面相同的、以展成摆动磨削方法来磨削旋转双曲面而不会发生干涉。

关于其他二次曲面展成摆动精密磨削原理将在后续论文中讨论。

2 旋转曲面精密磨削运动控制模型

2.1 旋转曲面精密磨削在线检测与运动控制

磨削旋转内球面时, 砂轮磨具主轴摆动中心 O_1 点在 y 坐标轴上坐标值 y_1 不变化、磨削半径 R_1 随球径变化而变化。但磨削旋转抛物线曲面和双曲面时, 由于曲面上每一点曲率随 x 变化而变化, 所以, 运动控制模型中, 砂轮磨具主轴摆动中心 O_1 点在 Y 坐标轴上的坐标值 y_1 、磨削半径 R_1 、摆动角度 α 都随 x 变化而变化。

在磨削过程中, 砂轮磨具的损耗是不可避免的, 只有在运动控制模型中包含必要的在位检测手段, 根据实际检测结果, 判断砂轮磨具损耗量, 才能进一步准确控制加工精度。

在位检测装置示意图如图 7 所示。磨削与检测实物照片如图 8 所示。图 7 中, 传感器 2 固定在检测装置的检测转臂 3 的前端, 检测时, 检测转臂 3 由图中虚线位置转到砂轮磨具 4 的前端, 传感器 2 最高点位于砂轮磨削主轴旋转中心线上, 轴向移动砂轮磨削主轴, 当传感器 2 接触到旋转曲面 1 表面时, 旋转曲面 1 在该法线上对应点到旋转坐标轴交点之间的距离即为检测的磨削半径 R_1 , 在曲线母线上取若干个样本值, 就可以进一步模拟出二次曲线方程对应的精准坐标值。

在运动控制模型中包含了 y_0, y_1, R_1, α 等参数, 其中磨削主轴摆动角度 α 即为曲线对应点切线的倾角

$$\alpha = \arcsin \frac{x_0}{R_1} \quad (14)$$

图7 在位检测示意图

1. 旋转曲面 2. 检测传感器 3. 检测转臂 4. 砂轮磨具

在磨削过程中, 根据二次曲线方程计算 y_0 , 根据式(7)和(12)计算 y_1 , 根据式(8)和(13)计算 R_1 , 根据式(14)计算 α 。其运动控制流程图如图9所示。磨削开始前, 根据砂轮磨具的直径, 加工起始位置设定在 x 坐标接近坐标原点位置, 但不能为 0, 砂轮磨具主轴与旋转曲面的旋转轴必须保持一定角度, 即砂轮磨具主轴中心线与曲线交点切线的倾角 α 不为 0。

图9 旋转曲面展成摆动磨削运动控制流程图

2.2 旋转曲面展成摆动精密磨削试验

为了验证二次旋转曲面展成摆动精密磨削原理的正确性, 应用所构建的旋转曲面展成摆动精密磨削装备和在线自动检测装置进行了试验。

图10左图是用展成磨削法磨削的外球面, 球径 600 mm, 球面球度误差 $\leq 10 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a \leq 0.045 \mu\text{m}$ 。图9右图上部为用展成摆动法磨削的内球面、口径 500 mm、内径 300 mm、表面材料 Ni60, 硬度 60 HRC, 球面宽度 40 mm, 表面先车削, 留 0.2 mm 磨削余量; 砂轮采用圆筒金刚石砂轮、外径 30 mm、内径 20 mm、粒度 $149 \mu\text{m}$; 30 min 磨削完毕,

在线自动检测圆度误差不大于 $2 \mu\text{m}$, 面形精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。然后把磨削好的内球面放在已磨削好的外球面上, 注满水或煤油观察, 未见泄露, 进一步用压缩空气在接合处吹, 约有 10% 结合处有少量气泡, 说明贴合度良好。

图10 用展成法磨削的外球面和内球面照片

图11左图为以该原理研制的二次旋转曲面展成摆动精密磨削装备, 右图为精密磨削的内球面与外球面密封吸合演示照片, 下部为被吸住的内球面。

图11 展成摆动旋转曲面磨削装备及磨削效果照片

3 结论

(1) 展成摆动磨削的摆动中心在旋转曲面的旋转中心轴上, 磨削点法线与砂轮磨具主轴中心线始终保持重合, 不存在加工原理上误差。

(2) 展成摆动磨削旋转内球面时, 摆动中心在旋转轴上位置固定, 摆动角度与磨削半径没有直接关系; 磨削旋转抛物面、旋转双曲面时, 旋转轴上的摆动中心坐标 y_1 、摆动角 α 、磨削半径 R_1 随 x

变化而变化, 只需两个直线运动, 一个摆动就可以实现旋转曲面的精密磨削, 与五轴联动加工相比机床结构和运动控制变得更简单。

(3) 磨削旋转内球面时, 砂轮磨具端面四周与球面接触; 磨削旋转抛物线曲面、旋转双曲面时, 砂轮磨具端面中心与旋转曲面相切的一条磨削带相接触, 这有利于砂轮端面与工件之间的冷却和排屑。

参 考 文 献

- [1] 郭东明, 刘战强、蔡光启, 等, 中国先进加工制造工艺与装备技术中的关键科学问题[J]. 数字制造科学, 2005, 13(4): 1-36.
GUO Dongming, LIU Zhanqiang, CAI Guangqi, et al. Crucial technical problems in China's advanced machining, manufacturing and relevant equipment technologies[J]. Digital Manufacture Science, 2005, 13(4): 1-36.
- [2] 康念辉, 李圣怡, 郑子文. 基于多体系统理论的非球面磨削误差模型与补偿技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 143-149.
KANG Nianhui, LI Shengyi, ZHENG Ziwen. Error model and compensation technology of aspheric grinding based on multibody system theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 143-149.
- [3] 李圣怡, 戴一帆. 超精密加工机床新进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 7-14.
LI Shengyi, DAI Yifan. New development of the ultraprecision machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 7-14.
- [4] 韩成顺, 董申, 唐余勇. 大型光学非球面超精密磨削的几何模型研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 741-745.
HAN chengshun, DONG Shen, TANG Yuyong. Geometric model of the ultra-precision grinding of large optical aspheric surfaces[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 741-745.
- [5] 朴承镐, 高文信, 蔡立. 轨迹成型法精密磨削加工机床的精度分析[J]. 光学技术, 1999(1): 54-57.
PIAO Chenghao, GAO Wenxin, CAI Li. Precision analysis of precisely grinding machining machine for locus shaping method[J]. Optical Technology, 1999(1): 54-57.
- [6] 朴承镐, 蔡立, 高文信. 轨迹成型法加工球面光学零件新原理的研究[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1998, 21(2): 1-5.
PIAO Chenghao, CAI Li, GAO Wenxin. The study of machining technique of locus shaping method for spherical optical parts[J]. Changchun Inst. Opt. & Fine Mech. Jun., 1998, 21(2): 1-5.
- [7] 王凌云, 王醒华, 裴喜亮. 用圆盘形刀具加工二次旋转非球面[J]. 长春理工大学学报, 2006, 29(3): 46-48, 75.
WANG Lingyun, WANG Xinghua, PEI Xiliang. Use discal cutting tools to process revolving non-sphere surface[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2006, 29(3): 46-48, 75.
- [8] Olympus Optical Co. Ltd. Spherical lens grinding device - uses pair of cup type grinding wheels mounted on two independent spindles positioned at opposite sides of lens: JP8132341-A[P].2003-05-05.
- [9] 李冬冬, 许明明, 胡德金, 等. 基于动态阈值的模糊自适应控制高硬度球面磨削[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(6): 17-22.
LI Dongdong, XU Mingming, HU Dejin, et al. Fuzzy adaptive control optimization of high hardness sphere grinding based on dynamic threshold[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(6): 17-22.
- [10] XU K Z, WEI C J, HU D J. Geometric error compensation of spherical surface grinding system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225: 473-482.
- [11] HOU H Y, LI D D, WEI C J, et al. Process optimization in two spherical surface grinding processes using trajectories analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225: 2177-2188.

作者简介: 胡德金, 男, 1947 年出生, 教授。主要研究方向为精密加工、特种加工和装备自动化。曾获国家科技奖二等奖、省部级一、二等科技奖、中国专利奖等科技奖励 18 项、获授权发明专利 32 项, 1998 年起享受国务院颁发的政府特殊津贴。

E-mail: djhu@sjtu.edu.cn