

圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮的非等径加工^{*}

陈俊华^{1,2} 辛勇²

(1. 浙江大学宁波理工学院机电与能源工程分院, 宁波 315100; 2. 南昌大学机电工程学院, 南昌 330029)

【摘要】 通过对空间凸轮机构圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮工作过程的分析, 指出了常用的平面展开及偏距加工法存在误差。将圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮机构的运动过程进行分解, 提出从动件运动轨迹的 3-D 展开法, 并在此基础上提出了一套圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮非等径加工的“仿摆线”加工法, 有效地解决了圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮非等径加工的难题。

关键词: 圆锥滚子 摆动从动件 圆锥凸轮 3-D 展开法 非等径加工

中图分类号: TP391.73; TH132.47 **文献标识码:** A

Non-equalization Machining Method for Conical Cam with Oscillating Tapered Roller Follower

Chen Junhua^{1,2} Xin Yong²

(1. *Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China* 2. *Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China*)

Abstract

This paper focuses on the analysis of running conditions and machining processes of conical cam with oscillating follower. Common errors were pointed out in the biased distance cutting. By analyzing the motion of oscillating tapered roller follower of conical cam, a new “3-D curve expansion” model of conical cam was presented through outline. Based on this model, a machining method for trochoidal milling was proposed with non-equalization diameter cutter. This new method is a creative and effective way for non-equalization diameter machining for conical cam with oscillating tapered roller follower.

Key words Tapered roller, Oscillating follower, Conical cam, 3-D expansion, Non-equalization diameter machining

引言

空间凸轮已被广泛应用于机械设备的各个领域, 与平面凸轮机构相比, 空间凸轮机构具有体积小、结构紧凑、刚性好、分度数大和传动扭矩大等优点, 但由于空间凸轮廓面是复杂的空间曲面, 其设计、制造极为繁杂, 因此制约了它在更大范围的应用。特别是圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮的非等径加工(凸轮凹槽轮廓面需用小刃具进行单侧面加工时称为非等径加工或非等价加工)则更是难以实现。

近年来, 为了寻求理论上的凸轮机构廓面的精确制造方法, 近代微分几何中的包络理论和空间啮合理论被普遍采用。Hsieh J F 等^[1]根据凸轮廓面上滚子纯滚动条件, 通过矩阵变换导出空间凸轮的廓面方程; Hsieh J^[2]和 Grant B^[3]提出了圆柱凸轮加工的理论方案; Stanislav M^[4]和 Lee J N 等^[5]提出了五轴加工空间凸轮的方法。李俭等^[6]应用单参数曲面族包络面理论在三维空间推导了圆锥凸轮轮廓面的解析表达式, 并用数学模型分析了直动圆锥滚子从动件圆锥凸轮机构的压力角、主曲率等几何

收稿日期: 2008-04-16 修回日期: 2008-06-19

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50645032)、浙江省自然科学基金资助项目(Y105686)、宁波市科研攻关资助项目(200703B1003018)和宁波市自然科学基金项目(2008A610038)

作者简介: 陈俊华, 副教授, 南昌大学博士生, 主要从事机械 CAD/CAM 的应用研究, E-mail: cjh@nit.zju.edu.cn

与动态特性,并对数控加工方法进行了研究。

然而,目前所见的研究工作主要局限在分析和精确计算上,这些方法导出的轮廓面方程理论上都具有较高的准确性,但实际应用过程均非常复杂,且几何直观性不强,因此对于摆动从动件圆锥凸轮制造所需的信息目前还都停留在理论分析上,使其实际应用受到很大限制。

1 工作过程及存在误差分析

1.1 工作过程分析

圆锥凸轮一般分为直动从动件圆锥凸轮和摆动从动件圆锥凸轮两种类型;从动件又分为圆柱滚子和圆锥滚子两种。对直动从动件圆锥凸轮凹槽的设计和加工,可将圆锥表面展开成扇形平面图形,按展开的平面图形进行设计和加工,但这种方法不能用于摆动从动件圆锥凸轮凹槽的设计和加工。

图1即为圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮机构的三维模型图,摆杆摆动轴线与圆锥凸轮母线垂直交叉,而摆杆摆动轴线与圆锥凸轮转动轴线为两空间交叉直线,圆柱可视为圆锥的特例。 MN 为二轴线的公垂线,以公垂线与凸轮转动轴线的交点 N 为坐标原点,摆杆摆动轴线方向为 Z 轴,公垂线方向为 Y 轴, X 轴按右手法则确定,建立右手笛卡尔坐标系。

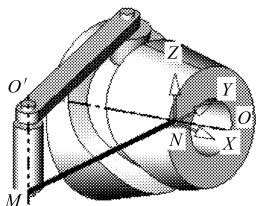


图1 圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮机构

Fig.1 Mechanism of conical cam with oscillating follower

摆动从动件圆锥凸轮的凹槽为三维空间轮廓,它是按一定运动规律环绕在圆锥凸轮上。在圆锥凸轮机构的工作过程中,圆锥凸轮转动带动摆动从动件按其设计的运动规律,绕其旋转轴在摆动平面上作往复摆动,而从动件滚子的中心线在摆动过程中大多数情况下会偏离圆锥凸轮旋转轴,且偏离的距离越大,圆锥滚子与凸轮凹槽啮合的深度就越浅,凹槽的截面宽度也就越小,即环绕在圆锥凸轮上的凹槽其截面是变化的。

摆动从动件圆锥凸轮的凹槽为三维空间轮廓,它是按一定运动规律环绕在圆锥凸轮上。在圆锥凸轮机构的工作过程中,圆锥凸轮转动带动摆动从动件按其设计的运动规律,绕其旋转轴在摆动平面上作往复摆动,而从动件滚子的中心线在摆动过程中大多数情况下会偏离圆锥凸轮旋转轴,且偏离的距离越大,圆锥滚子与凸轮凹槽啮合的深度就越浅,凹槽的截面宽度也就越小,即环绕在圆锥凸轮上的凹槽其截面是变化的。

1.2 误差分析

1.2.1 等径加工误差

当摆动从动件圆锥凸轮槽宽度不大、精度要求不高时,一般均采用范成法加工,即用相同形状和尺寸的刀具替代圆锥凸轮机构的从动件圆锥滚子(称为等径加工),以数控的形式模仿圆锥凸轮与从动件圆锥滚子两者之间实际工作时的相对运动关系,从而加工出符合设计要求的圆锥凸轮。

通常按展开的平面曲线进行数控编程加工^[7]。由于平面曲线是二维的,其中一个方向是凸轮转角的展开,另一个方向是从动件相对凸轮轴向的位移(即图1中 X 向的位移),加工过程是这两个方向运动的合成,在数控中称二联动加工。刀具替代圆锥凸轮机构的从动件圆锥滚子,以数控的形式进行加工时,一个运动为圆锥凸轮的转动,另一个运动为刀具沿凸轮轴方向的运动,刀具中心线始终通过圆锥凸轮旋转轴,则加工的凸轮凹槽的截面宽度始终不变,这与工作过程分析中凹槽的截面宽度随从动件偏离凸轮轴的距离而变化相矛盾,因此按平面展开曲线进行加工存在凹槽的截面宽度误差。

1.2.2 非等径加工误差

当摆动从动件圆锥凸轮凹槽精度要求较高,仅靠粗加工无法满足精度要求,或没有与从动件滚子尺寸相等的刀具时,通常称此类凸轮加工为非等径加工。

通常采用“偏距”法加工,图2所示为“偏距”加工摆动从动件圆锥凸轮的回程部分凹槽,假设槽宽为16 mm,粗加工后凹槽单侧面留0.5 mm的加工余量,用直径为5 mm的铣刀“偏距”精加工。

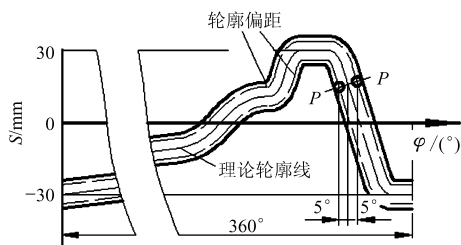


图2 “偏距”加工

Fig.2 Cutter motion path of “offset” machining

如图2所示,在槽宽截面 $P-P$ 上,“偏距”加工点与凸轮凹槽理论轮廓线(即中心线)上的加工点对应的凸轮转角不同(图中所示为 $\pm 5^\circ$),则圆锥凸轮上各加工点对应的铣刀中心线互不平行,也不在同一平面上。在 $P-P$ 截面上可近似看成如图3所示的状态,若上部槽宽达到尺寸要求,由于“偏距”加工点与理论加工点的铣刀中心线相对凸轮转角偏差 $\pm 5^\circ$,则下部槽宽必小于尺寸要求,必将形成从动件与“偏距”法加工的凹槽之间的误差区域(图3),文献^[8]亦指出“偏距”法存在加工误差。

为切实解决这一难题,以圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮机构为研究对象,提出将机构的运动过程分解为摆杆的摆动和摆杆相对于圆锥凸轮的旋转两个运动,并将摆杆的旋转运动进行展开,提出了圆锥凸轮凹槽轮廓线的“3-D展开法”^[9-10],并在此基础上制定了一套非等径刀具的“仿摆线”加工法,有效解决了高精度摆动从动件圆锥凸轮的加工问题。

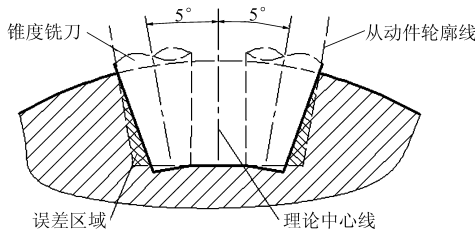


图3 误差示意图

Fig.3 Interference between follower and trough

2 圆锥凸轮轮廓线的 3-D 展开

圆锥凸轮绕其轴线 OO' 转动,转动过程中圆锥凸轮机构(包括圆锥滚子从动件及摆杆机架)上各点到公垂线 MN 的垂足 N 点的距离不变,位置随圆锥凸轮转角 φ 变化,用凸轮轮廓设计中常用的反转法进行分析,设圆锥凸轮不动,从动件(滚子)、摆杆机架绕 N 点, YZ 平面以反方向转动一周,如图4所示。

将机架的转动沿该双点划线展开成直线,其与摆杆摆动的平面垂直,如图5所示。

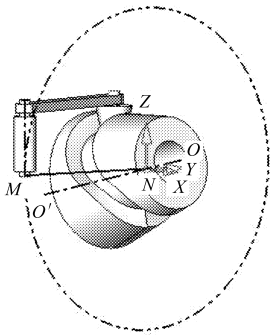


图4 摆杆相对运动轨迹
Fig.4 Relative motion path of oscillating bar

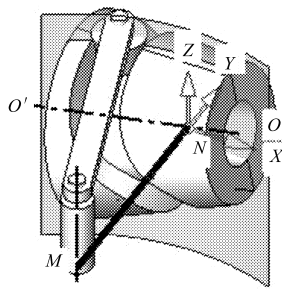


图5 圆柱曲面展开
Fig.5 Expansion of spatial curved surface

该直线方向(即圆锥凸轮转角 φ 展开方向)平行于坐标的 Z 轴方向,摆动从动件随圆锥凸轮转动所作的圆弧摆动则展开成圆柱面上的三维运动。

凸轮旋转带动摆杆的摆动,根据机构的运动轨迹要求,可建立以凸轮转角为变量的摆动从动件(滚子)的位移一般关系表达式

$$S = f(\varphi) \quad (1)$$

式中 S ——摆杆滚子的位移

根据式(1)可画出位移曲线(分段曲线)图,设位移为 ± 30 mm,图6为摆动从动件位移随圆锥凸轮转角的运动关系曲线。

图6中位移曲线上任意一点的 (φ, S) 值,均能在图5的圆柱展开面上找到其对应点,并根据坐标变换求得 (X, Y, Z) 值为

$$\begin{cases} X = S \\ Y = \sqrt{l^2 - S^2} - a \\ Z = \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中 l ——摆杆长度

a ——公垂线 MN 的长度

摆杆摆角 ψ 与位移 S 之间的几何关系如图7所示,以摆杆长 l 为半径作摆动圆弧,位移 S 为 X 坐标值。

平面的位移曲线实际上是摆动从动件展开的三维运动轨迹线在 XZ 平面上的投影。若已知平面的位移曲线,将其投影至以摆杆长 l 为半径的圆柱面上,所得 3-D 曲线即为摆动从动件运动的 3-D 轨迹展开线,如图8所示。

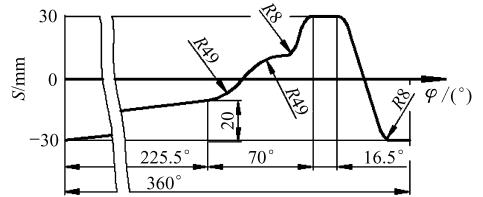


图6 位移曲线

Fig.6 Displacement curve

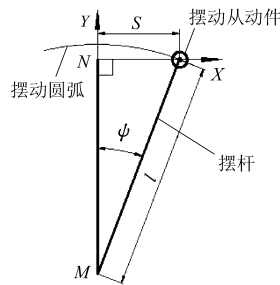


图7 位移与摆角的几何关系示意图

Fig.7 Geometrical relationship between oscillating motion and angle

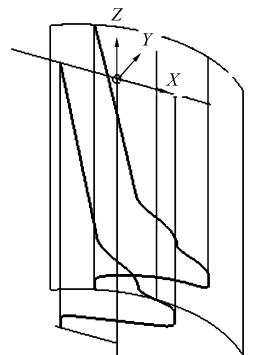


图8 从动件运动轨迹线展开

Fig.8 Expansion of motion path

因此,3-D 曲线上任意一点的 Z 坐标值为空间凸轮转角 φ 的值;而其 X 、 Y 坐标值为当空间凸轮转过 φ 值时,摆动从动件作的圆弧摆动的位置。

3 非等径“仿摆线”加工方案

根据上述得到的摆动从动件运动的三维轨迹展开线,即可采用范成法加工摆动从动件圆锥凸轮的凹槽。

对所得从动件运动轨迹展开线进行移动、旋转,如图9所示,可参照文献[10]进行数控编程加工,在此着重对圆锥凸轮的非等径加工方案进行分析、研究。

3.1 摆线加工

摆线式加工是一种新的刀位轨迹策略,所谓摆线它描述了一类曲线,即圆上一固定点随着圆沿曲线滚动时生成的轨迹,由于切削的过程中刀具总是

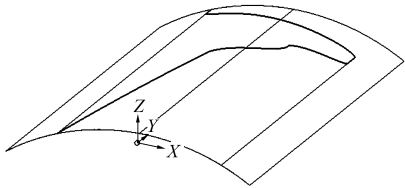


图9 从动件运动的三维轨迹示意图

Fig.9 Sketch map of 3-D motion path of follower

沿一条具有固定曲率的曲线运动,使得刀具运动总能保持一致的进给率^[11]。

在摆线式加工基础上开发的次摆线加工刀路与摆线式加工刀路极为相似,区别仅在于次摆线刀路由直线(即 troch step, 简称摆步)和圆组成(图 10),当摆步值很小时,次摆线在数控编程上有明显的优越性,它编程容易且程序简短,相对提高了数控系统的处理速度。

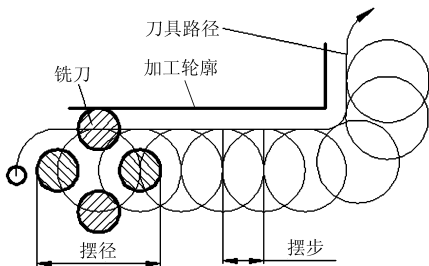


图10 次摆线加工

Fig.10 Trochoidal milling

3.2 非等径仿摆线加工

由于“偏距”法加工将造成圆锥凸轮凹槽下部槽宽小于要求尺寸,形成从动件与凹槽的干涉区域,致使从动件卡死。为此提出非等径“仿摆线”加工方案:在凹槽中心线(即圆锥凸轮理论轮廓线)上,刀具沿凹槽中心线走一个摆步及一个圆周、又一个摆步一个圆周的(就像用绳线串起一个又一个铜钱),每个摆步的长度可以不同,但每个圆周的大小完全相同,3-D曲线摆步越小精度越高,如图 11 所示。当刀具走过一个摆步后,凸轮工件暂停转动,铣刀在摆杆摆动平面上作圆周运动,且该圆周的圆心在凹槽中心线上,在整个圆周运动过程中凸轮工件不动,此时对应的加工点的铣刀轴线相互平行,如图 11 中 P-P 所示,则不会产生“偏距”法加工造成

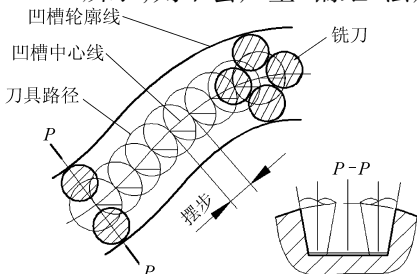


图11 “仿摆线”加工

Fig.11 Imitated trochoidal milling

的误差,且保证了从动件偏离圆锥凸轮轴线时所加工的凹槽与圆锥滚子的精确配合。

对应圆锥凸轮凹槽的 3-D 展开线,可生成如图 12 的圆锥凸轮的非等径加工刀路。为保证凹槽精度,每一个摆步应足够小,改变圆周的大小,即可保证圆锥凸轮凹槽的加工精度要求。

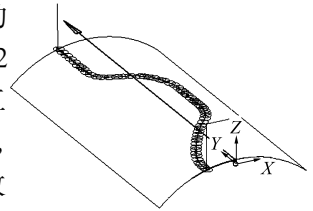


图12 实际加工示意图

Fig.12 Practical CAM programming

3.3 应用 CimatronE 软件进行数控编程加工

假设加工如图 1 所示摆动从动件圆锥凸轮机构, S 变化范围为 ±30 mm, l 为 100 mm, φ 变化范围为 0~360°, 摆杆旋转轴到圆锥凸轮旋转轴的距离为 95 mm, 位移曲线如图 6 所示。

应用 CimatronE 软件生成刀路,并后置处理,设定程序段序号为“0”即生成程序段序号均为“N0”的数控程序,得到了三轴数控程序,但该程序是由展开及变换后的从动件运动轨迹生成的,无法直接用于加工,故数控程序也应做相应的编辑。用 A(转动轴)替换该程序中的 Y,用 Y 替换该程序中的 Z, X 不变;并手工加入 Z 向的进、退刀,删除一部分“N0”,其余“N0”用“M98 P2 G90 G01”替换,并根据空间凸轮凹槽宽度尺寸及加工刀具尺寸,手工编写圆加工子程序“O0020”,完成整个四轴加工的数控程序的编辑。如图 12 所示,在每一个直线加工程序段中插入调用圆加工子程序指令,该圆的圆心既是上一个直线的终点,也是下一个直线的起点。这样即可得到用于空间凸轮凹槽非等径加工的四轴数控程序:

```

%
O0100
G90 G54 G00
Y100.0 S1000 M03
G00 X-34.876 A0.0 Y-0.519 Z100.0 M08
Z1.0
G01 Z-12.F150
M98 P2 G90 G01 X-34.81 A4.609 Y-0.501 F500
M98 P2 G90 G01 X-34.69 A9.217 Y-0.469
M98 P2 G90 G01 X-34.585 A11.514 Y-0.441
...
M98 P2 G90 G01 X-34.804 A340.446 Y-0.499
M98 P2 G90 G01 X-34.836 A350.207 Y-0.508
M98 P2 G90 G01 X-34.876 A360.0 Y-0.519
G00 Z100.0
M30

```

```

%
调用的圆加工子程序
%
O0020
G91 G01 X5. F600.
G02 X0. Y0. I-5. J0.
X-5.
M99
%
```

4 结束语

“仿摆线铣削”的编程加工方案,遵循摆动从动件相对于空间凸轮运动的规律,提出了在摆动从动件空间凸轮机构的运动过程中按 3-D 原则展开的方

案基础上,用独特的方式,基于通用的 CAM 软件,通过对数控程序的编辑,得到了能完全实现摆动从动件空间凸轮非等径数控加工的四轴程序。在通用四轴数控机床上,加工出完全符合精度要求的摆动从动件空间凸轮凹槽。

本方案避免了“偏距”法加工凹槽产生的误差,提高了凹槽的加工精度,不仅适用于圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮的非等径加工,也适用于任何摆动从动件空间凸轮。设定不同的摆径值,使凸轮凹槽表面保留不同的加工余量,使用任意直径小于槽宽的标准铣刀、带柄小砂轮磨头或硬质合金旋转锉等,可完成粗加工、半精加工和精加工各道工序,满足槽宽尺寸的不同精度要求,降低了加工成本,解决了空间凸轮非等径加工存在的问题。

参 考 文 献

- 1 Hsieh J F, Psang D L. Application of homogenous transformation matrix to measurement of cam profiles on coordinate measuring machines[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(8): 1 593~1 606.
- 2 Hsieh J. Design and machining of cylindrical cam with meshing indexing disc[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2007, 221(3): 341~350.
- 3 Grant B, Soni A H. A survey of cam manufacture methods[J]. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 1979, 101(4): 455~464.
- 4 Stanislav Makhanov. Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine: Part 1. spatial optimization[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2007, 75(5): 210~230.
- 5 Lee J N, Lee R S. Interference-free toolpath generation using enveloping element for five-axis machining of spatial cam[J]. *Materials Processing Technology*, 2007, 188(12): 10~13.
- 6 李俭,殷国富. 圆锥滚子直动从动件圆锥凸轮机构廓面方程的解析方法[J]. *机械设计*, 2003, 20(11): 13~15.
Li Jian, Yin Guofu. Analytical method of profile equation of cam mechanism with translating conical follower[J]. *Machine Design*, 2003, 20(11): 13~15. (in Chinese)
- 7 肖尧先,陶友青,柯映林,等. 摆动从动件空间凸轮 CAM 技术[J]. *机械科学与技术*, 2002, 21(3): 509~511.
Xiao Yaoxian, Tao Youqing, Ke Yinglin, et al. CAM technology of spatial cams with oscillating cylindrical-roller followers [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2002, 21(3): 509~511. (in Chinese)
- 8 Nishioka M. Tool diameter offset and the offset error of cylindrical cam[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 2003, 12: 3 403~3 409.
- 9 Chen Junhua, Wu Yijie. Analysis of 3D curve expansion of conical cam with oscillating tapered roller follower[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 8(11): 1 789~1 794.
- 10 陈俊华,辛勇. 摆动从动件圆柱凸轮 3D 展开的研究[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(7): 121~124.
Chen Junhua, Xin Yong. Research of cylindrical cam with oscillating follower 3D spread[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7): 121~124. (in Chinese)
- 11 Wu Y J, Leng H B, Zhao Z R, et al. Research on control method for machining non-cylinder pin hole of piston[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2006, 7(12): 2 073~2 078.