

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.014

# 一次性卫生用品生产线调向装置圆柱凸轮机构 CAD/CAM 系统

韩江, 何长青, 夏链

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**结合摆动从动件圆柱凸轮机构在一次性卫生用品生产线上调向装置中的应用,针对圆柱凸轮设计和制造的技术难题,根据摆动从动件圆柱凸轮轮廓曲面的方程,基于两重包络法,推导出非等径加工摆动从动件圆柱凸轮的刀具轨迹方程。并根据布尔差运算原理和展成法加工原理,基于三维软件的二次开发接口,完成了圆柱凸轮的三维参数化精确建模和CAD/CAM系统开发。应用结果表明该系统能准确加工出调向装置中的圆柱凸轮,且成本低。该系统的开发能有效提高圆柱凸轮的设计和制造效率。

**关键词:**摆动从动件圆柱凸轮;调向装置;非等径加工;CAD/CAM

中图分类号:TS735.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)04-0067-05

## CAD/CAM System for Cylindrical Cam Mechanism of Adjusting Device in Disposable Sanitary Products Production Line

HAN Jiang, HE Changqing, XIA Lian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Combining cylindrical cam mechanism with oscillating follower used in adjusting device in the disposable sanitary products production line, in view of the technical problems of cylindrical cam design and manufacture, according to the equation of profile surface of cylindrical cam with oscillating follower, the toolpath equation of unequal diameter machining was derived based on double envelope principle. And in accordance with Boolean calculation and generation method and redevelopment interface for 3D software, the precision 3D parameterization modeling and CAD/CAM system of cylindrical cam were realized. The application results showed that the system could accurately process the cylindrical cam in adjusting device, and the cost was low. The development of the system could effectively improve the efficiency of the design and manufacture of cylindrical cam.

**Key words:** cylindrical cam with oscillating follower; adjusting device; unequal diameter machining; CAD/CAM

圆柱凸轮机构是一种存储和传递信息的零件,具有体积小、构件数目少、响应快、承载重等优点,因此,以圆柱凸轮为核心的自动机械已广泛应用于纺织机械、包装机械、罐装机械、印刷机械等各个领域<sup>[1]</sup>。

圆柱凸轮可分为直动从动件圆柱凸轮和摆动从动件圆柱凸轮,其中直动从动件圆柱凸轮可展开成平面图形进行设计和加工,但平面展开法用于设计和加工摆动从动件圆柱凸轮的轮廓曲面是存在误差的<sup>[2]</sup>。而基于从动件滚子与圆柱凸轮之间的运动规律,根据

展成法设计和加工摆动从动件圆柱凸轮可有效改善平面展开法所导致的理论误差。

在加工圆柱凸轮轮廓曲面的过程中,按从动件滚子直径与加工所用刀具直径之间的大小关系可分为等径加工和非等径加工。等径加工是指滚子直径与刀具直径相等,非等径加工是指滚子直径大于刀具直径<sup>[3]</sup>。等径加工圆柱凸轮轮廓曲面时,刀具与工件再现滚子与圆柱凸轮之间的相对运动规律,因此该加工方法不存在理论误差。但是等径加工存在不足之处:

收稿日期:2016-02-15;修回日期:2016-04-10

作者简介:韩江(1963),男,河南洛阳人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为数控技术。E-mail:hanjiang626@126.com

一是不一定有等径刀具可选;二是加工时工具和工件之间的机械磨损,造成刀具直径变化;三是对于滚子直径尺寸较大的大型圆柱凸轮,大直径的等径刀具价格昂贵<sup>[4]35</sup>。因此,开展圆柱凸轮的非等径加工的研究具有重要的现实意义。

本文结合摆动从动件圆柱凸轮机构在一次性卫生用品生产线上调向装置中的应用,针对其设计和制造的技术难题,分析和推导了等径和非等径加工摆动从动件圆柱凸轮的刀具轨迹方程,在此基础上,利用SolidWorks二次开发接口,根据布尔减运算原理和展成法加工原理,实现了圆柱凸轮的三维参数化精确建模,并完成了圆柱凸轮CAD/CAM系统的开发。

### 1 摆动从动件圆柱凸轮在调向装置中的应用

在一次性卫生用品生产线上,为了实现卫生用品从位置 $N$ 到位置 $N_1$ 的转移,同时实现卫生用品绕其几何中心旋转 $90^\circ$ ,采用了如图1所示的调向装置。调向装置包括主轴部分、吸板、摆杆部分、摆动从动件圆柱凸轮。装置运动过程中,随着主轴的旋转,摆杆部分和吸板随之转动。摆杆部分绕圆柱凸轮轴线旋转时,凸轮轮廓曲面驱使摆杆绕摆杆摆动轴旋转,从而带动吸板和卫生用品旋转。实际装置中,主轴同时驱动多个摆杆部分和吸板组成的分支机构,可以提高生产效率,图1中仅画出其中的一个分支机构。

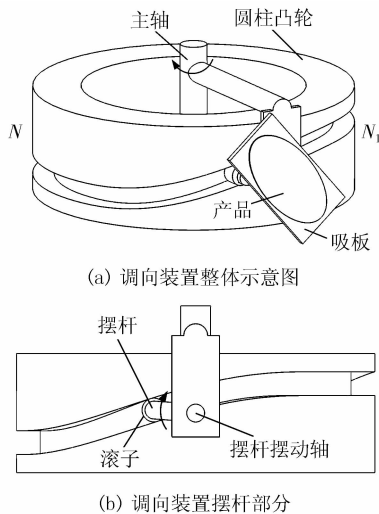


图1 调向装置示意图

Figure 1 Adjusting device

摆动从动件圆柱凸轮作为这套装置的核心零件,其设计、制造和轮廓曲面的质量,直接影响装置的运行状况,因此有必要对其进行详细的研究,并开发相应的CAD/CAM系统,以提高其设计制造效率和轮廓曲面质量。该装置中的摆动从动件圆柱凸轮机构,圆柱凸

轮固定不动,摆杆部分作为运动部件,且摆杆摆动轴线始终过圆柱凸轮轴线。本文以一般情况下的摆动滚子从动件圆柱凸轮机构作为研究对象。

### 2 等径加工原理及刀具轨迹方程

用等径刀具加工摆动从动件圆柱凸轮时,一般用数控机床轴的联动模拟从动件滚子与圆柱凸轮之间的运动规律,从而展成加工出圆柱凸轮。摆动从动件圆柱凸轮机构的运动可分解为2个运动:一个运动是圆柱凸轮绕其轴线的转动 $A$ ,另一个运动是从动件滚子在摆杆摆动的平面内作的圆弧运动。其中滚子所作的圆弧运动,可由2个相互垂直的直线运动 $X$ 和 $Y$ 合成<sup>[5]</sup>。

摆动从动件圆柱凸轮机构如图2所示, $OXYZ$ 是加工坐标系,固定不动,原点 $O$ 为凸轮几何中心点, $OX$ 过原点 $O$ 指向摆杆摆动轴线, $OZ$ 垂直并指向摆杆摆动平面, $OY$ 沿凸轮轴线且其正方向符合右手螺旋法则。 $OX_1Y_1Z_1$ 为固连在凸轮上的局部坐标系,在初始位置 $\varphi=0$ 时,2个坐标系重合, $OX_1Y_1Z_1$ 随凸轮一起以匀角速度 $\omega_A$ 相对于 $OXYZ$ 绕 $Y$ 轴旋转。 $P$ 点为滚子圆柱面上任意一点,其到 $OXY$ 面的距离为 $h$ ,是一个变量,变化范围从滚子外端面到内端面。参考点 $B$ 是滚子外截面与滚子轴线的交点, $h_1$ 为点 $B$ 到 $OXY$ 面的距离,是一个固定值。其中, $a$ 是摆杆摆动轴线到圆柱凸轮轴线的中心距, $R$ 为滚子半径, $l$ 是摆杆的长度。

根据圆柱凸轮机构的运动要求,设定摆杆摆角与圆柱凸轮转角的关系表达式为:

$$\Psi = f(\varphi) \tag{1}$$

式中: $\Psi$ 为摆杆的摆角, $\varphi$ 为圆柱凸轮的转角。

如图2所示,滚子轴线绕 $Y$ 轴旋转形成的曲面称为理论轮廓曲面,滚子包络出的上下2个曲面称为实际轮廓曲面。根据参考文献[6]可求得摆动从动件圆柱凸轮的实际轮廓曲面方程为:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= h \cdot \sin \varphi + (a - l \cdot \cos \Psi - M \cdot R \cdot \sin \beta) \cdot \cos \varphi; \\ y_1 &= l \cdot \sin \Psi + M \cdot R \cdot \cos \beta; \\ z_1 &= h \cdot \cos \varphi - (a - l \cdot \cos \Psi - M \cdot R \cdot \sin \beta) \cdot \sin \varphi; \\ \beta &= \arctan \frac{l \cdot \cos \Psi \cdot f'(\varphi)}{h + l \cdot \sin \Psi \cdot f'(\varphi)}. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中: $\beta = \delta \pm \pi/2$ ;  $\delta$ 为滚子与凸轮轮廓曲面接触角; $M = \pm 1$ 各代表一个轮廓曲面。

由式(2)可知,当其中 $R=0$ 时,方程所形成的曲面为理论轮廓曲面。当 $h = h_1$ ,即可得到刀具参考点在 $OX_1Y_1Z_1$ 的轨迹方程:

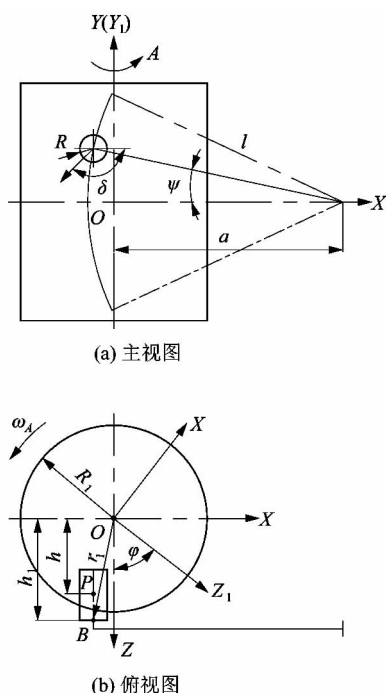


图2 摆动从动件圆柱凸轮机构示意图

Figure 2 Cylindrical cam mechanism with oscillating follower

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= h_1 \cdot \sin \varphi + (a - l \cdot \cos \Psi) \cdot \cos \varphi; \\ y_1 &= l \cdot \sin \Psi; \\ z_1 &= h_1 \cdot \cos \varphi - (a - l \cdot \cos \Psi) \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由图2可知,  $z^2 + y^2 = z_1^2 + y_1^2 = r_1^2$ , 在坐标系  $OXYZ$  中, 对于刀具参考点  $B$ ,  $z = h_1$ , 由式(3)可得其在加工坐标系  $OXYZ$  的轨迹方程为:

$$\left. \begin{aligned} x &= a - l \cdot \cos \Psi; \\ y &= l \cdot \sin \Psi; \\ z &= h_1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

圆柱凸轮转角为  $\varphi$  时, 由式(1)可知,  $x$  和  $y$  都是以  $\varphi$  为参变量的值。当  $\varphi$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  变化时,  $x$  和  $y$  相应变化, 从而合成刀具在摆杆平面内的圆弧运动。

### 3 非等径加工原理及刀具轨迹方程

#### 3.1 两重包络加工法原理

目前, 圆柱凸轮的轮廓曲面有3种非等径加工方式: 刀位补偿加工法、仿自由曲面加工法和两重包络加工法。刀位补偿加工法属于线加工, 加工效率高, 但存在一定的加工误差。仿自由曲面加工法属于点位加工, 容易实现, 但加工效率低且误差较大。两重包络加工法不存在原理性误差, 虽加工效率低但可精确加工出圆柱凸轮轮廓曲面, 且可选的刀具直径范围广。

如图3所示, 两重包络定义如下: 空间曲面  $S_0$  以参

数  $\alpha_1$  运动, 形成单参数曲面族  $\{S_0\}$ , 假设  $\{S_0\}$  的包络  $S_1$  存在, 则称  $S_1$  为单参数曲面族  $\{S_0\}$  的一次包络, 并称  $S_0$  为母面; 再使一次包络  $S_1$  以参数  $\alpha_2$  运动, 又形成了以  $S_1$  为母面的单参数曲面族  $\{S_1\}$ , 又假定它的包络  $S_2$  存在, 则称  $S_2$  为单参数曲面族  $\{S_0\}$  的两重包络<sup>[4]36</sup>。

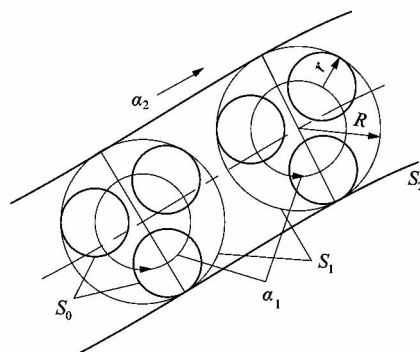


图3 两重包络加工法原理

Figure 3 Principle of double envelope process

两重包络法加工圆柱凸轮的方案如下: 设非等径刀具半径为  $r$ , 等径刀具半径为  $R$  (等径刀具半径与滚子半径相等,  $r < R$ ), 则非等径刀具轴线到等径刀具轴线的距离为  $(R - r)$ 。当非等径刀具绕等径刀具轴线回转时, 即可包络出半径等于  $R$  的等径圆柱刀面, 再使等径刀面按滚子运动规律做展成运动, 即可包络出圆柱凸轮轮廓曲面。由此可知两重包络法的优点是任意半径小于等径刀具的非等径刀具都可以加工出圆柱凸轮轮廓曲面, 加工刀具的选择范围很大。

#### 3.2 非等径加工轨迹方程

两重包络法加工中, 一般先用非等径刀具进行开槽和粗加工, 再用另一非等径刀具基于两重包络法进行半精加工和精加工, 这样的工艺可使精加工的加工余量均匀, 加工出的轮廓曲面精度更高<sup>[7]</sup>。

虽然两重包络法存在诸多优点, 但用一系列非等径加工刀位包络出一个等径加工刀位, 空刀量会明显增多, 因此, 需考虑对两重包络法做进一步改进。如图4所示,  $P_1$  点为等径刀具轨迹上的任意一点, 在非等径刀具包络等径刀面时, 仅保留  $P_1$  点的矢量垂直方向的2个非等径刀位  $P_R$  和  $P_L$ , 当  $P_1$  点沿等径刀具轨迹运动时, 2个非等径刀位  $P_R$  和  $P_L$  即可分别加工出上下2个轮廓曲面, 2个非等径刀位中心点形成的2条刀具轨迹  $l_R$  和  $l_L$ , 即为非等径加工刀具轨迹。

对于刀具轨迹  $l_R$  和  $l_L$ , 可以看作是图2所示机构滚子半径为  $(R - r)$  时, 滚子外端面与实际轮廓曲面的接触点形成的轨迹。由此可知, 式(2)中,  $h = h_1$  且  $R$  变为  $(R - r)$  时, 即可得到非等径刀位中心点在  $OX_1Y_1Z_1$  轨迹方程:

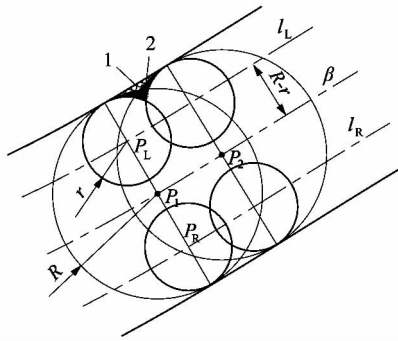


图4 非等径加工摆动从动件圆柱凸轮示意图

Figure 4 Cylindrical cam with oscillating follower for unequal diameter machining

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= h_1 \cdot \sin \varphi + [a - l \cdot \cos \Psi - M \cdot (R - r) \cdot \sin \beta] \cdot \cos \varphi; \\ y_1 &= l \cdot \sin \Psi + M \cdot (R - r) \cdot \cos \beta; \\ z_1 &= h_1 \cdot \cos \varphi - [a - l \cdot \cos \Psi - M \cdot (R - r) \cdot \sin \beta] \cdot \sin \varphi; \\ \beta &= \arctan \frac{l \cdot \cos \Psi \cdot f'(\varphi)}{h_1 + l \cdot \sin \Psi \cdot f'(\varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由  $z^2 + y^2 = z_1^2 + y_1^2 = r_1^2$ , 在坐标系  $OXYZ$  中, 对于 2 个非等径刀位中心点,  $z = h_1$ , 由式(5)可得其在加工坐标系  $OXYZ$  的轨迹方程为:

$$\left. \begin{aligned} x &= a - l \cdot \cos \Psi - M \cdot (R - r) \cdot \sin \beta \cdot \cos \varphi; \\ y &= l \cdot \sin \Psi; \\ z &= h_1; \\ \beta &= \arctan \frac{l \cdot \cos \Psi \cdot f'(\varphi)}{h + l \cdot \sin \Psi \cdot f'(\varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(5)~(6)中,  $M = \pm 1$  各代表一条非等径刀具轨迹。

由图4可知, 当采用非等径刀具包络出完整的等径刀面时, 2个相邻等径刀面间的毛刺为网格区域1, 但当采用改进两重包络加工法时, 毛刺会增大, 增加部分为黑色区域2, 因此为了保证加工精度, 当采用改进两重包络法加工时, 要相应的减小加工步长。

### 4 圆柱凸轮 CAD/CAM 系统开发

#### 4.1 圆柱凸轮 CAD

圆柱凸轮建模时, 选用等径法建模, 即选用与滚子直径相等的刀具模型, 按照等径加工刀具参考点的运动轨迹进行建模, 这种建模方法相比于非等径法建模效率高, 占用电脑资源少。建模过程中, 刀具模型中心点初始位置与坐标原点  $O$  重合, 这样方便对刀具进行平移操作。圆柱凸轮参数化建模的步骤如下:

1) 根据圆柱凸轮机构的尺寸参数创建刀具模型

和圆柱凸轮模型。

2) 将  $\varphi$  按适当的步长  $\Delta\varphi$  增加, 对圆柱凸轮模型按  $\Delta\varphi$  角进行旋转操作。

3) 根据式(2)得到对应于  $\varphi$  的刀具中心位置坐标值  $(X, Y, Z)$ , 对刀具模型进行复制, 然后对复制的刀具模型进行平移, 让其由原点  $O$  移动到坐标点  $(X, Y, Z)$ 。

4) 让旋转后的圆柱凸轮模型减去平移后的刀具模型, 实现对圆柱凸轮模型的一次删减。

将  $\varphi$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  按步长  $\Delta\varphi$  取一系列离散点, 然后在每一个离散点让圆柱凸轮基体和刀具模型重复 2)、3)、4) 的步骤, 即可完成对摆动从动件圆柱凸轮的实体模型创建。等径法建模过程如图5所示。

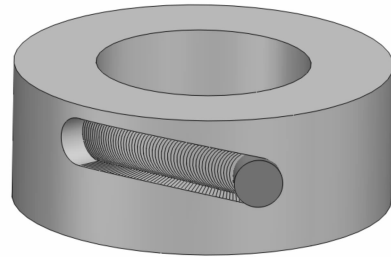


图5 等径法建模过程

Figure 5 Modeling process of equal diameter method

#### 4.2 圆柱凸轮 CAM

摆动从动件圆柱凸轮数控加工时采用一个旋转轴  $A$  和 2 个直线轴  $X, Y$  的联动控制, 将式(4)或式(6)中的凸轮转角  $\varphi$  按适当的步长取一系列离散的加工刀位点, 选用直线插补指令加工相邻的刀位点。在数控加工中, 当指定轴含有旋转轴时, 刀具的实际进给速度  $V_c$  随刀具位置的变动而变化, 导致其与编程进给速度  $V$  不相等, 进而使刀具切削速度时刻变化, 降低了圆柱凸轮轮廓曲面的加工精度, 因此需要根据滚子与圆柱凸轮的运动关系对编程进给速度  $V$  进行必要的修正。设程序指定的  $X, Y$  和  $A$  轴的增量值分别为  $\Delta x, \Delta y$  和  $\Delta A$ , 由文献[8]可知编程进给速度应按下式进行修正:

$$V = V_c \sqrt{\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta A^2}{\Delta y^2 + (\Delta x + \frac{\Delta A \pi z}{180})^2 + (\frac{\Delta A \pi x}{180})^2}} \quad (7)$$

得到了加工过程需要的  $X$  轴、 $Y$  轴和  $A$  轴及进给速度的值, 其余加工参数根据实际需求确定, 并采用直线插补指令进行加工, 进而得到 NC 代码。非等径加工 CAM 界面如图6所示。

#### 4.3 圆柱凸轮 CAD/CAM 系统

该系统基于 SolidWorks 二次开发平台, 对圆柱凸



图 6 非等径加工 CAM 界面

Figure 6 Unequal diameter machining CAM interface  
 圆柱凸轮 CAD/CAM 系统进行设计与开发。设计的圆柱凸轮 CAD/CAM 系统总体结构如图 7 所示。

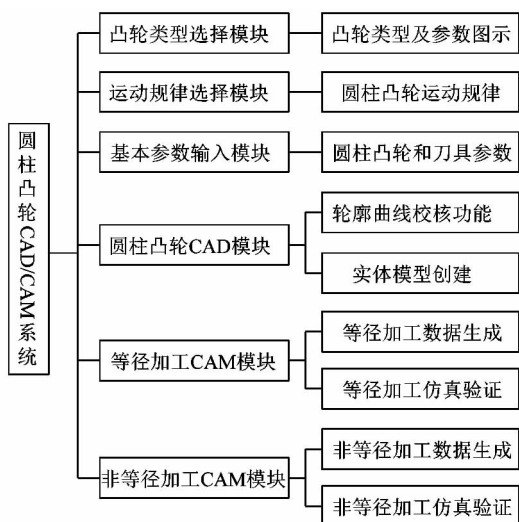


图 7 圆柱凸轮 CAD/CAM 系统总体结构图

Figure 7 General structure of cylindrical cam CAD/CAM system

圆柱凸轮 CAD/CAM 系统各模块的功能如下:

1) 基本参数选择和输入模块。该模块用于选择凸轮类型和从动件运动规律,完成圆柱凸轮机构和刀具基本参数的输入。如图 8 所示,为摆动从动件圆柱凸轮机构参数设置界面。

2) 圆柱凸轮 CAD 模块。该模块主要完成理论轮廓线的校核计算和圆柱凸轮的实体模型创建,理论轮廓线的校核项目包括最大压力角和最小曲率半径。

3) 圆柱凸轮 CAM 模块。该模块包括等径加工 CAM 和非等径加工 CAM,主要完成圆柱凸轮等径加工和非等径加工代码生成和保存。加工出的摆动从动件圆柱凸轮如图 9 所示。

## 5 结论

本文根据等径和非等径加工摆动从动件圆柱凸轮



图 8 摆动从动件圆柱凸轮机构参数设置界面

Figure 8 Parameter setting interface of cylindrical cam mechanism with oscillating follower



图 9 摆动从动件圆柱凸轮

Figure 9 Cylindrical cam with oscillating follower  
 的刀具轨迹方程,基于 SolidWorks 的二次开发接口,采用展成法模拟圆柱凸轮和刀具的相互运动关系,依据布尔差运算原理,完成了圆柱凸轮 CAD/CAM 系统的开发,实现了摆动从动件圆柱凸轮的参数化建模和加工仿真,并将其成功运用到了一次性卫生用品生产线的调向装置的设计中。

## 参考文献:

- [1] 刘民杰,孟国庆,阎兵.槽形圆柱凸轮的范成法数控加工[J].现在制造技术与装备,2008(2):40-41.
- [2] 陈俊华,辛勇.摆动从动件圆柱凸轮凹槽轮廓线的 3D 展开法[J].农业机械学报,2007,38(7):121-124.
- [3] 牛兴华,迟荣兰,陈红.槽形圆柱凸轮的刀具轨迹及生成方法[J].农业机械学报,2007,38(1):203-205.
- [4] 何有钧,邹慧君,郭为忠,等.空间凸轮廓面的非等价加工方式的基本原理[J].机械制造,2001,39(8):35-37.
- [5] 陈俊华.摆动从动件空间凸轮设计及非等径加工研究[D].南昌:南昌大学,2011:117-125.
- [6] 李炼成,杨昂岳.摆动滚子从动件圆柱凸轮的解析设计[J].国防科技大学学报,1992,14(4):100-105.
- [7] 高秀兰,雷改丽,白静,等.圆柱滚子空间凸轮的两重包络法加工分析与改进[J].轻工机械,2005,23(2):78-80.
- [8] 陈立群,曾宪良,刘兴国.圆柱凸轮加工进给速度的修正及编程[J].陕西科技大学学报,2000,18(1):35-39.
- [9] 叶修梓,陈超群.SolidWorks 高级教程:二次开发与 API[M].北京:机械工业出版社,2009.