

浮动平底推杆-盘形凸轮组合机构的轮廓设计

吕楚奇¹, 吴秋平¹, 李延平¹, 常勇^{1,2}

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学工程训练中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 盘形凸轮的基本尺寸已得到解决, 但还存在确定凸轮轮廓线的难题。选择“反转法”, 应用旋转变换的数学手段, 推演了凸轮轮廓的参数方程, 并运用 MasterCAM X7 软件, 对凸轮轮廓线做了数控仿真校验, 完成了浮动平底推杆-盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓设计, 进一步完善了该组合机构的结构设计。

[关键词] 平底推杆; 盘形凸轮; 反转法; 数控仿真; 轮廓设计

[中图分类号] TH 112.2

Cam Profile Design of Floating Flat Pushrod - Disc Cam Combined Mechanism

LYU Chu-qi¹, WU Qiu-ping¹, LI Yang-ping¹, CHANG Yong^{1,2}

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Engineering Training Center, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: It is still a difficulty to determine the profile of the disc cam in spite of some progresses have been achieved on setting the basic dimension of the cam. In this paper, the “Kinematic Inversion” was employed the rotational matrix method was further applied to derive the parameter equation for the cam profile. The verification of the numerical control (NC) was realized by the simulation carried out based on the software MasterCAM X7. It notes that the design of cam profile for floating flat pushrod-disc cam combined mechanism can be accomplished as per the results from simulation. Conclusion is drawn that the work performed in this paper is beneficial to the design of this mechanism.

Keywords: flat pushrod; disc cam; kinematic inversion; NC simulation; profile design

0 引言

盘形凸轮机构因具有结构简单、尺寸紧凑和运动刚性好等诸多优点, 在轻工、纺织、印刷、包装和农业等领域得到了广泛应用。因此, 其设计问题长期以来吸引了国内外机构学工作者的关注^[1-13]。其中, 华大年^[1], 王知行和李瑰贤^[2], Schoenherr J^[3], Navarro O 等^[4]的研究可以视为该领域的杰出代表。与先前研究所围绕的对象机构为摆动、直动滚子推杆盘形凸轮机构不同, 2010 年, 常勇、杨富富等^[5-9]将盘形凸轮机构的研究延伸至做平面运动滚子推杆-浮动滚子推杆的情形, 并将浮动滚子推杆-盘形凸轮机构的尺寸综合概括为 I、II 两大类尺寸综合问题, 取得了较为系统的理论研究成果。随后又解决了该机构的凸轮轮廓设计问题, 为后续的研究和工程应用奠定了基础。

[收稿日期] 2015-11-01

[修回日期] 2016-04-21

[基金项目] 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610390010); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01302)

[作者简介] 吕楚奇(1991—), 男, 硕士生。从事凸轮机构分析设计; 通信作者: 常勇(1964—), 男, 教授, 从事凸轮与连杆机构学, 机构分析等研究。

浮动平底推杆—盘形凸轮组合机构是浮动滚子推杆—盘形凸轮组合机构的重要演化形式, 文献 [9] 解决了浮动平底推杆—盘形凸轮组合机构的第Ⅱ类尺寸综合问题, 但是, 该机构构型的凸轮轮廓设计问题, 迄今尚未获得圆满地解决。本文拟在解决第Ⅱ类尺寸综合问题基础上, 采用“反转法”, 并结合旋转变换数学手段, 推演得到凸轮轮廓方程, 解决浮动平底推杆—盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓设计问题。

1 问题描述

浮动平底推杆—盘形凸轮组合机构如图 1 所示。0 为机架; 1 为凸轮, 为输入件; 2 为平底连杆; 3 为摇块; 4 为摇杆, 为输出件; s_{2i} ($i=0, \cdots, m$, 其中 0 为起始位置, m 为终止位置) 为连杆时变长度; r_0 为凸轮基圆半径; K 为平底、凸轮接触点; C 为平底、连杆焊点; O_2 为连杆、摇杆铰接点; θ_2 为任意位置连杆位置角; $\beta(\varphi)$ 为摇杆角位移, 具体表达式决定于往程、返程取用的运动规律。

对象机构凸轮轮廓设计问题的描述:

已知: 机架长度为 l_0 ; 摇杆长度为 l_4 ; b 为平底推杆与摇杆的距离; 摇杆往程起始为 $O_{20}A$, 终止位置为和 $O_{2m}A$; 行程角为 β_m ; 初位角为 θ_{40} ; 推程、回程运动角分别为 Φ_0 和 Φ'_0 ; 远、近休止角分别为 Φ_s 和 Φ'_s ; 摇杆推程、回程角位移分别为 $\beta = \beta(\varphi)$ 和 $\beta_r = \beta_r(\varphi)$, 其中 φ 为凸轮转角。凸轮 1、摇块 4 和机架 0 在 O_1 点处构成复合铰链, 平底线 GG' 与连杆线 O_1O_2 垂直。

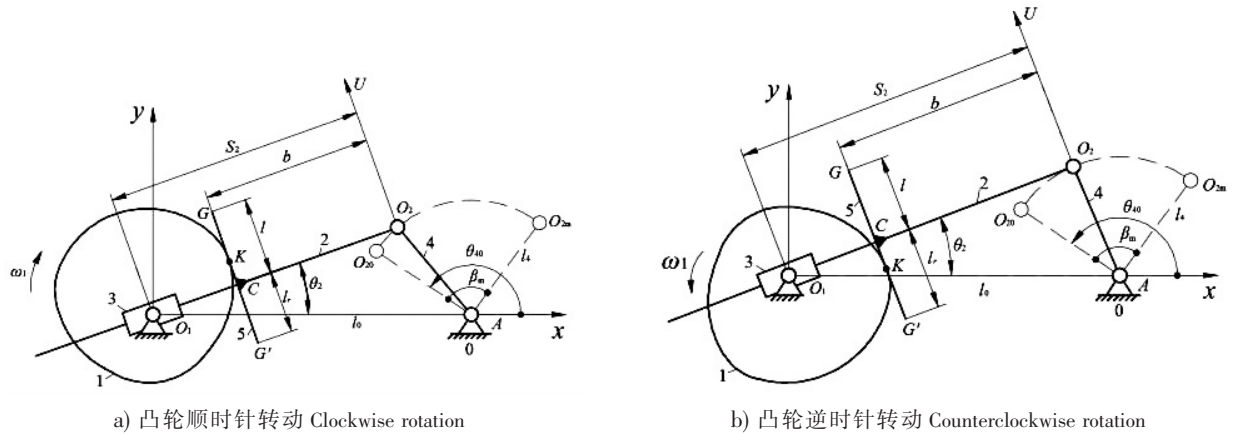


图 1 浮动平底推杆—盘形凸轮组合机构
Fig.1 The combined mechanism floating flat pushrod—disc cam

2 凸轮轮廓的参数方程

2.1 凸轮顺时针转动

根据图 1 中的几何关系, 得 $s_{20} = [l_0^2 + l_4^2 - 2l_0l_4\cos(180^\circ - \Phi_0)]^{1/2}$, $s_{2m} = [l_0^2 + l_4^2 - 2l_0l_4\cos(180^\circ - \Phi_0 + \beta_m)]^{1/2}$ 。

机构处于任一位置, 有 $s_{2i} = [l_0^2 + l_4^2 + 2l_0l_4\cos(\theta_{40})]^{1/2}$, $\theta_2 = \arccos[(l_0^2 + s_{2i}^2 - l_4^2)/(2l_0s_{2i})]$, $\theta'_2 = d\theta_2/d\varphi = l_4\beta' [l_4 + l_0\cos(\theta_{40} - \beta)] / [l_0^2 + l_4^2 + 2l_0l_4\cos(\theta_{40} - \beta)]$ 。式中, $\beta' = d\beta(\varphi)/d\varphi$, 具体表达式决定于往程、返程的运动规律。

由机构的三心定理^[14]可确定, 在任意位置时绝对瞬心 P_{20} 和相对瞬心 P_{12} 的坐标, 如图 2 所示。然后由瞬心点与接触点之间的数学关系, 推导得到 K' 点的坐标方程, 即凸轮轮廓方程, 其步骤如下:

根据图 2 中的几何关系可求得:

绝对瞬心 P_{20} 的坐标

$$\begin{cases} x_{P_{20}} = l_0 \tan(\theta_{40} - \beta) / (\tan(\theta_{40} - \beta)) + \cot\theta_2, \\ y_{P_{20}} = -l_0 \tan(\theta_{40} - \beta) \cot\theta_2 / [\tan(\theta_{40} - \beta) + \cot\theta_2]. \end{cases} \quad (1)$$

相对瞬心 P_{12} 的坐标

$$\begin{cases} x_{P_{12}} = [\pm |\theta'_2| / (\pm |\theta'_2| - 1)] x_{P_{20}}, \\ y_{P_{12}} = [\pm |\theta'_2| / (\pm |\theta'_2| - 1)] y_{P_{20}}. \end{cases} \quad (2)$$

该机构运动周期分为往程、返程、近休、远休四段, 其中式 (2) 取 “+” 时为远休坐标方程, 取 “-” 时为近休坐标方程; 值得注意的是往、返程均包含同摆和异摆区间段, 其中式 (2) 取 “+” 时为异摆区间段坐标方程, 取 “-” 时则为同摆区间段坐标方程。

同时可得到点 O_1 、 P_{12} 间距离

$$|O_1 P_{12}| = (x_{P_{12}}^2 + y_{P_{12}}^2)^{1/2}. \quad (3)$$

接触点 K 、 P_{12} 间距离

$$|P_{12} K| = s_{2i} - s_{20} + r_0. \quad (4)$$

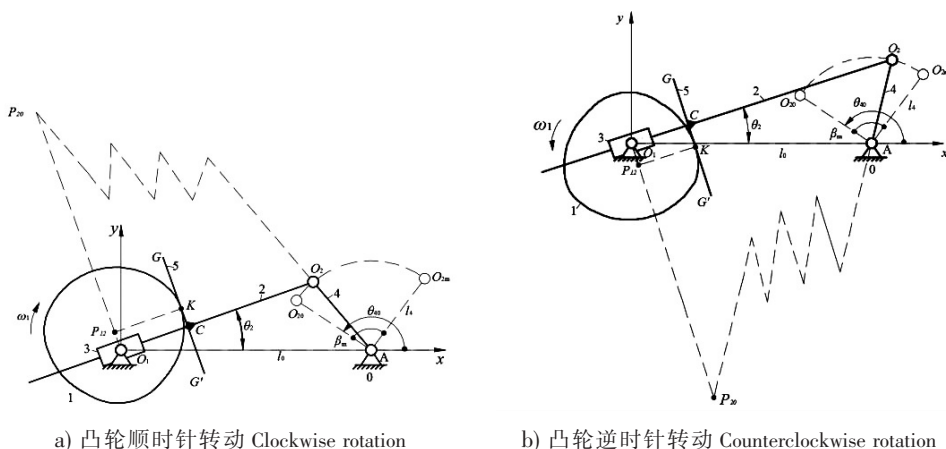


图 2 绝对瞬心 P_{20} 、相对瞬心 P_{12} 位置图

Fig.2 The position of absolutely instantaneous center and relative instantaneous center position

联立式 (1) ~ 式 (4), 得 K 点坐标

$$\begin{cases} x_K = (s_{2i} - s_{20} + r_0) (\cos\theta_2 \mp \sin\theta_2), \\ y_K = (s_{2i} - s_{20} + r_0) (\sin\theta_2 \pm \cos\theta_2). \end{cases} \quad (5)$$

其中: x_K 中 “-” 和 y_K 中 “+” 对应往程, 反之对应返程; 当它们皆取 “-” 则对应凸轮远、近休程。

据 “反转法” 原理^[15], 从动构件系统 5-2-3-4 绕 O_1 逆时针转 “ $-\varphi$ ” 角, K 反转至 K' , K' 为对应凸轮轮廓点, 如图 3 所示。

K' 点的坐标

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中, \mathbf{R}_φ 为旋转矩阵, $\mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos(\eta\varphi) & -\sin(\eta\varphi) \\ \sin(\eta\varphi) & \cos(\eta\varphi) \end{bmatrix}$, 式中, η 为转向系数, 凸轮顺时针转动时, $\eta=1$, 反之 $\eta=-1$ 。

将式 (5) 代入式 (6), 得

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta\varphi) & -\sin(\eta\varphi) \\ \sin(\eta\varphi) & \cos(\eta\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (S_2 - S_{20} + r_0) (\cos\theta_2 \mp \sin\theta_2) \\ (S_2 - S_{20} + r_0) (\sin\theta_2 \pm \cos\theta_2) \end{bmatrix}.$$

亦即

$$\begin{cases} x'_K = (s_2 - s_{20} + r_0) [(\cos\theta_2 \mp \sin\theta_2) \cos(\eta\varphi) - (\sin\theta_2 \pm \cos\theta_2) \sin(\eta\varphi)], \\ y'_K = (s_2 - s_{20} + r_0) [(\cos\theta_2 \mp \sin\theta_2) \sin(\eta\varphi) + (\sin\theta_2 \pm \cos\theta_2) \cos(\eta\varphi)]. \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 即为凸轮顺时针转动时的工作轮廓的参数方程。

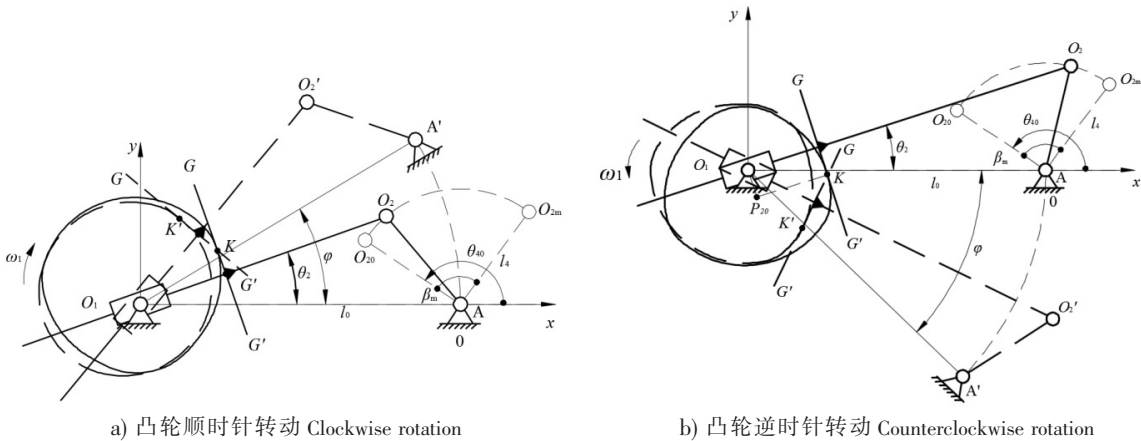


图 3 机构“反转”原理图
Fig.3 The principle of rotation of the mechanism

2.2 凸轮逆时针转动

式 (7) 适用于凸轮逆时针转动, 取 $\eta = -1$, 将 $\eta = -1$ 代入式 (7), 即为凸轮逆时针转动时的凸轮轮廓参数方程。

3 设计实例

设计浮动平底推杆-盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓。例题诸已知条件与文献 [8] 综合示例完全相同。已知: 凸轮顺时针转动, 取 $\theta_{40} = 140^\circ$, $l_0 = 140\text{ mm}$, $l_4 = 50\text{ mm}$, $\beta_m = 80^\circ$, $\Phi_0 = \Phi'_0 = 150^\circ$, $\Phi_s = \Phi'_s = 30^\circ$, 往程、返程皆取摆线运动规律, 取 $r_0 = 50\text{ mm}$ 。

解 往程、返程皆取用摆线规律, 则计算式为

$$\beta_g = 50^\circ \times [\varphi/150^\circ - (0.5/\pi) \sin(2 \times \pi \times \varphi/150^\circ)], \quad (8)$$

$$\beta_r = 50^\circ \times \{ 1 - [(\varphi - 180^\circ)/150^\circ + (0.5/\pi) \times \sin(2 \times \pi/150^\circ) \times (\varphi - 180^\circ)] \}。 \quad (9)$$

将给定条件与式 (8)、(9) 分别代入式 (7), 得到凸轮轮廓, 如图 4 所示。其中: 往程为 $a \sim b$ 段; 远休程为 $b \sim c$ 段; 返程为 $c \sim d$ 段; 近休程为 $d \sim a$ 段。

4 仿真验证

在 MasterCAM X7^[16] 环境下, 通过 Fplot 构建浮动平底推杆-盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓曲线, 对其进行切削仿真。由于本文仅限于凸轮轮廓曲线的设计及求解, 并不考虑加工工艺的要求, 因此仅在二维平面上进行刀具的轨迹模拟, 并将刀具轨迹与凸轮轮廓进行比较, 如图 5 所示。可以发现刀具轨迹基本与设计实例求解得到的凸轮轮廓曲线吻合, 但是在某些轮廓线段有微小的偏离, 如图 5a 所示。探究其原因, 发现产生的微小偏离是由刀具半径引起的, 当进行更细化的分段编程的时候, 即对产生偏离的轮廓线段进行刀具半径补偿, 能够解决偏离问题, 得到如图 5b 所示的刀具轨迹。

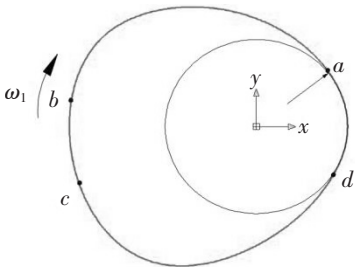


图 4 浮动平底推杆-盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓
Fig.4 Cam profile of floating flat pushrod-disc cam combined mechanism

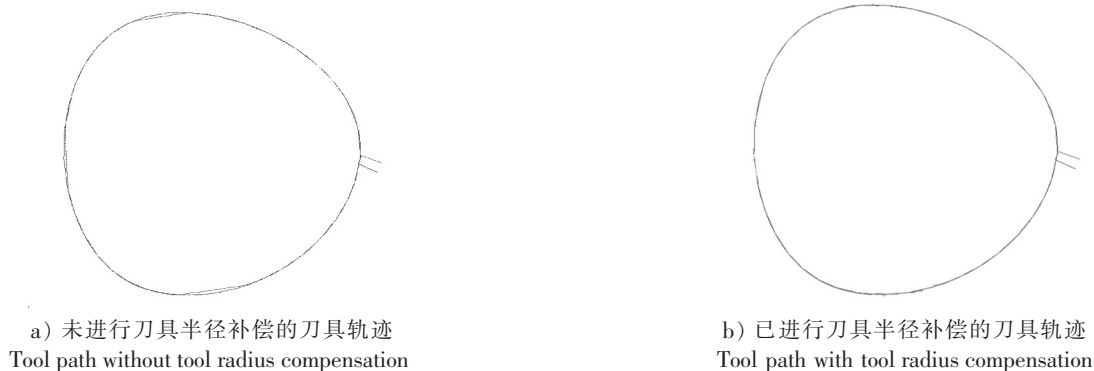


图 5 刀具轨迹

Fig.5 Tool path

[参 考 文 献]

- [1] 华大年. 按许用压力角设计最小尺寸摆动从动杆平面凸轮的解析法. 机械工程学报 1982, 18(4): 74-79.
- [2] 王知行, 李瑰贤. 关于直动滚子从动件盘形凸轮机构基本尺寸的讨论. 机械工程学报, 1986, 22(4): 88-93.
- [3] SCHOENHERR J. Synthesis of planar cam mechanisms with lowest demensions. Mechanisms and Machine Theory, 1993, 28(3): 317-325.
- [4] NAVARRO O, WU C J, ANGELES J. Size-minimization of planar cam mechanisms. Mechanisms and Machine Theory, 2001, 36(3): 371-386.
- [5] 常勇, 杨富富. 作平面运动滚子从动件盘形凸轮机构的第Ⅱ类机构综合问题. 机械工程学报, 2010, 46(1): 35-41.
- [6] 常勇, 杨富富. 作平面运动滚子从动件形锁合凸轮机构的第Ⅱ类机构综合问题. 机械工程学报, 2012, 48(1): 39-46.
- [7] 常勇, 杨富富, 胡志超, 等. 作平面运动滚子从动件盘形凸轮机构的广义第Ⅱ类机构综合问题. 机械工程学报, 2012, 48(15): 47-57.
- [8] 常勇, 林荣富, 李延平. 作平面运动平底从动件盘形凸轮机构第Ⅱ类机构综合. 农业机械学报, 2013, 44(7): 286-292.
- [9] 林荣富, 常勇. 作平面运动滚子从动件盘形凸轮机构的第Ⅱ类凸轮轮廓设计. 机械设计, 2013, 30(1): 28-32.
- [10] 马喜川, 常勇, 李延平. 支撑函数在机构学中的若干重要应用. 机械设计, 1996, 13(10): 24-26.
- [11] 常勇. 作平面复杂运动滚子从动件平面凸轮轮廓线设计. 机械设计, 1996, 13(9): 15-19.
- [12] 常勇, 徐继杨, 黎庆. 推导凸轮轮廓线外凸性判据和曲率半径公式的一种新方法. 黑龙江商学院学报 (自然科学版), 1996, 12(2): 43-50.
- [13] 常勇, 屈成龙. 作平面运动负半径滚子推杆-盘形凸轮组合机构的凸轮轮廓设计. 机械设计与研究, 2014, 30(3): 38-41.
- [14] 郑文纬, 吴克坚. 机械原理. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [15] 石永刚, 吴央芳. 凸轮机构设计与应用创新. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [16] 卢志伟, 曹岩. 基于 MasterCAM X6 的圆柱凸轮的建模和数控仿真. 组合机床与自动化加工技术, 2013(2): 111-116.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)