

浮动推杆形锁合凸轮机构广义第Ⅱ类综合问题

范武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] 以共轭凸轮、槽道凸轮机构为研究对象, 引据“浮动坐标系”、“瞬时、整程区域套”和“往程、返程”等重要概念, 对主、副凸轮机构展开分割、归并性研究。利用“整程区域套”生成原理、“精练搜索范畴”等概念, 取用等距离散化策略, 给出滚子中心允许选择区域、凸轮基圆半径许用取值范围的求解方法, 解决了浮动滚子推杆形锁合凸轮机构的广义第Ⅱ类尺寸综合问题, 并用算例进行了验证。

[关键词] 形锁合凸轮机构; 往程/返程; 瞬时/整程选择区域; 精练搜索范畴

[中图分类号] TH 112.2

The Broad-sense Type II Synthesis Task of Positive-drive Cam Mechanisms with Floating Pushrod

FAN Wu¹, 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: Conjugate-cam and groove-cam mechanisms with floating roller pushrod are used as research object in this paper. Based on the concepts “floating coordinate system”, “instantaneous and whole nested region” and “forward and return travel”, the main and auxiliary cam were studied respectively and comprehensively. The generating principle of “whole nested region”, a key concept of a “simple searching domain” and an equidistant dispersion strategy were put forward. The method for solving the allowable area for roller center and value range of the cam’s base circle radius was obtained. The broad-sense type II size synthesis task of positive-drive cam mechanisms with floating roller pushrod was solved accurately. Moreover, a mathematical example of mechanism synthesis was provided by using the proposed approach in the paper.

Keywords: positive-drive cam mechanisms; forward travel/ return travel; instantaneous/ whole choice region; simple searching domain

0 引言

文献[1]提出浮动滚子推杆盘形凸轮机构Ⅰ类/Ⅱ类综合问题及其准确描述, 通过引入“浮动数轴”、“瞬时/整程区间套”等概念, 得到解存在性、存在特征的解析公式, 解决了浮动滚子推杆力锁合凸轮机构的狭义第Ⅱ类尺寸综合问题。文献[2]引入“往程/返程”和“向径标刻线”等概念, 揭示了形锁合机构在综合路径、方法步骤等方面的显著差异, 解决了浮动滚子推杆含共轭、槽道

[收稿日期] 2016-12-26

[修回日期] 2017-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51475209&51175224); 福建省自然科学基金项目(2010J01302&2006J0169)

[作者简介] 范武(1991—), 男, 硕士生, 从事凸轮机构分析、设计及软件开发。通信作者: 常勇(1964—), 教授, 硕导, 从事凸轮与连杆机构学, 机构的起源与进化理论等研究, E-mail:changyong@jmu.edu.cn。

和等径等形锁合凸轮机构的狭义第Ⅱ类尺寸综合问题。文献 [3] 通过引入“浮动坐标系”“瞬时/整程选择区域”和“最经济搜索带域”等概念, 取用离散降维快速求解方法, 解决了浮动滚子推杆(力锁合) 盘形凸轮机构的广义第Ⅱ类尺寸综合问题^[3]。

较之力锁合机构, 形锁合机构因运动精度高、受力好、冲击功耗小等优点而得到广泛应用, 尤其在高速场合优越性更加凸显。因此, 本文以最具代表性的共轭凸轮、槽道凸轮机构为研究对象, 拟研究解决形锁合凸轮机构的广义第Ⅱ类尺寸综合问题。

1 问题的表述

浮动滚子推杆共轭凸轮、槽道凸轮机构如图 1 所示。

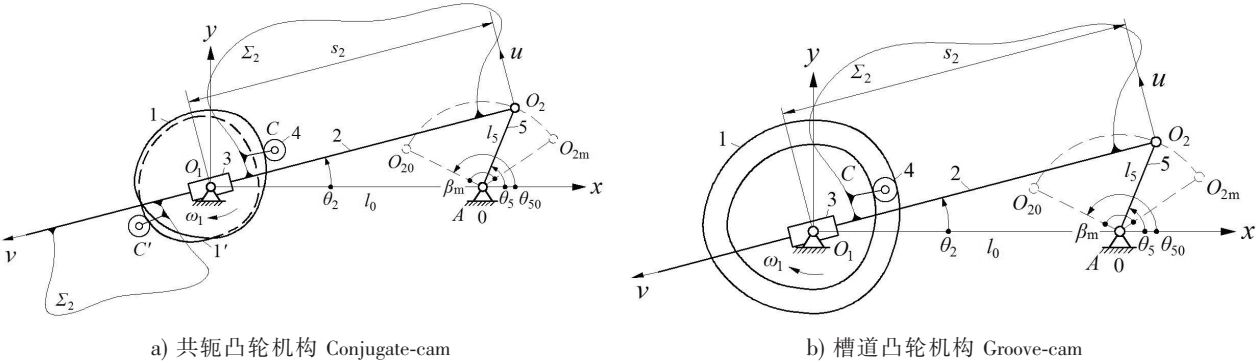


图 1 浮动滚子推杆形锁合凸轮机构

Fig.1 Positive-drive cam mechanisms with floating roller pushrod

其中: 0—机架; 1—凸轮; 2—连杆; 3—摇块; 4—滚子; 5—摇杆; O_1 —凸轮轴心; C —滚子中心; O_2 —摇杆与连杆处铰链; A —摇杆与机架处铰链; O_{20} —铰链 O_2 初始位置; O_{2m} —铰链 O_2 终止位置; l_0 —机架长度; l_5 —摇杆长度; s_2 —连杆时变长度; β_m —摇杆行程角; θ_1 —凸轮转角; θ_5 —摇杆方位角; θ_{50} —摇杆初位角; θ_2 —连杆方位角; ω_1 —凸轮转速; Σ_2 —连杆平面。

已知: 机架和摇杆长度 l_0 、 l_5 ; 摇杆往程起始、终止位置 (返程终止、起始位置) $O_{20}A$ 、 $O_{2m}A$; 摇杆初位角 θ_{50} ; 行程角 β_m ; 往程、返程运动规律 $\beta = \beta(\theta_1)$ $\beta_r = \beta_r(\theta_1)$; 往程、返程运动角 Φ_0 、 Φ_{0r} ; 第一、第二休止角 Φ_s 和 Φ_{sr} ; 推程许用压力角 $[\alpha]$; 凸轮、摇块复铰在机架 O_1 点, 滚子中心拓展演化到连杆平面 Σ_2 上。

求解: 滚子中心 $C(C')$ 在连杆平面 Σ_2 上允许选择区域, 凸轮基圆半径 $r_0(r_0')$ 许用取值范围, 最优尺寸解等。

考虑到该机构在凸轮顺时针/逆时针转动条件下, 解决尺寸综合问题的方法、手段一致, 故以凸轮顺时针为例展开研究。

2 机构解存在性的求解确定

文献 [2] 中“坐标系的选取、准备性概念和解析公式”一节, 仍为本文重要理论基础, 其中公式 (1) — (10) 通用。而其中的“浮动数轴”变换成“浮动坐标系”, 系指固连于连杆平面 Σ_2 上, 以 O_2 为原点的直角坐标系 O_2uw ^[3]。机构运动时, O_2uw 随连杆平面做平面运动, 即“浮动”, 如图 1 所示。

2.1 共轭凸轮机构

在以 u 、 v 为轴的坐标系中, u_C 、 v_C 是主滚子中心 C 的坐标, $u_{C'}$ 、 $v_{C'}$ 是副滚子中心 C' 的坐标, u_{O_1} 、 v_{O_1} 是凸轮轴心 O_1 的坐标。

如图 1a, 共轭凸轮机构显著的形态特征:

1) 主/副滚子, 主/副凸轮;

2) $v_c < v_{o_1}$ 和 $v_{c'} > v_{o_1}$, 主/副滚子中心 C 和 C' , 沿 v 轴居于凸轮轴心 O_1 左右两侧。

往程中, 主凸轮驱动主滚子带动机构运动, 副凸轮和副滚子起锁合作用。返程中, 恰反之。

2.1.1 主凸轮机构

2.1.1.1 满足 $\alpha \leq [\alpha]$ 条件解集的求解原理

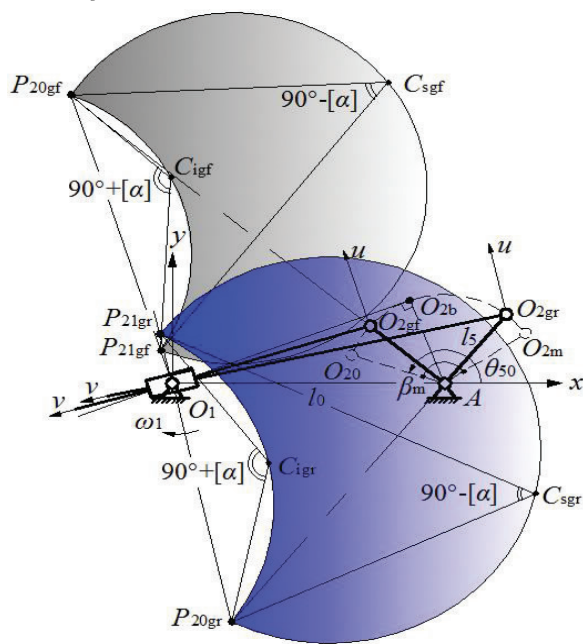
任一瞬时, 在 Σ_2 上, 以连杆的绝对瞬心 P_{20} 和凸轮与连杆的相对瞬心 P_{21} 的连线 $P_{20}P_{21}$ 为弦, 往 v 轴负向作优弧 $\{C_{sg}\}$ 、劣弧 $\{C_{ig}\}$, 使以下公式成立:

$$\angle P_{20}C_{sg}P_{21} = 90^\circ - [\alpha], \quad (1)$$

$$\angle P_{20}C_{ig}P_{21} = 90^\circ + [\alpha]. \quad (2)$$

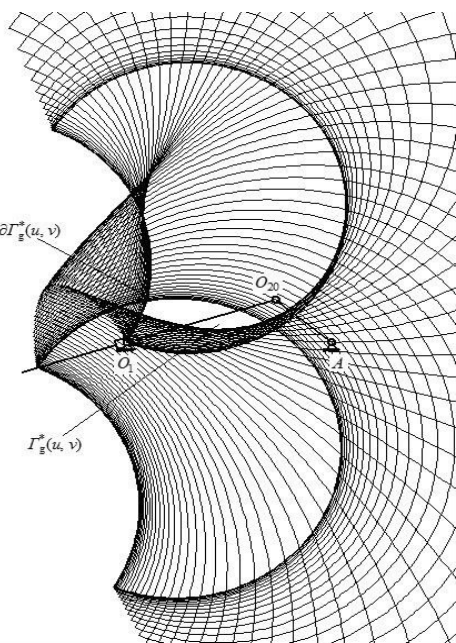
该瞬时 C 的解集是“瞬时区域套” $\Gamma_g(u, v)$, 即 $\{C_{sg}\}$ 、 $\{C_{ig}\}$ 围成的“盈月形区域”, 边界记 $\partial\Gamma_g(u, v)$, 如图 2a 所示, 其中下标: s 表示优弧; i 表示劣弧; g 表示往程。

整个往程 C 的解集是“往程区域套” $\Gamma_g^*(u, v)$, 即 $\Gamma_g(u, v)$ 截交围成的“公共内部区域”, 边界记 $\partial\Gamma_g^*(u, v)$, 如图 2b 所示。



a) “瞬时区域套” $\Gamma_g(u, v)$ 的生成原理

Generating principle of “instantaneous nested region” $\Gamma_g(u, v)$



b) “往程区域套” $\Gamma_g^*(u, v)$ 的生成原理

Generating principle of “forward nested region” $\Gamma_g^*(u, v)$

图 2 主滚子中心“瞬时、往程区域套”的生成原理

Fig.2 Generating principle of “instantaneous and forward nested region” of main roller center

其中: 下标“f”、“r”分别表示前半区段、后半区段。

2.1.1.2 “往程精练搜索范畴”与等距离散化

据图 2a, 任一瞬时, $\partial\Gamma_g(u, v)$ 的最小、最大 u 坐标值 u_{gmin} 、 u_{gmax} 必出现在 $\Gamma_g(u, v)$ 最左端、最右端处, 即

$$\begin{cases} u_{gmin} = \eta(l_{21} + \zeta l_{20})/2 + (-l_{20} + \zeta l_{21})\sec[\alpha]/2, \\ u_{gmax} = \eta(l_{21} + \zeta l_{20})/2 - (-l_{20} + \zeta l_{21})\sec[\alpha]/2. \end{cases} \quad (3)$$

式中: η —行程系数, 往程 $\eta=1$, 返程 $\eta=-1$; ζ —区段系数, 前半区段 $\zeta=1$, 后半区段 $\zeta=-1$; l_{21} 为连线 $P_{20}P_{21}$ 的长度; l_{20} 为连线 O_1P_{20} 的长度。

整个往程对 θ_1 搜索, 解得 u_{gmin} 最大值 $(u_{gmin})_{max}$ 、 u_{gmax} 最小值 $(u_{gmax})_{min}$, 即整个往程 $\partial\Gamma_g^*(u, v)$ 的最小、最大 u 坐标值。

得到“往程精练搜索范畴”

$$u_g \in [(u_{gmin})_{\max}, (u_{gmax})_{\min}] \quad (4)$$

1) 对“往程精练搜索范畴”作等距离散化处理。

以 $u_g = (u_{gmin})_{\max}$ 为基准, 自下而上对“往程精练搜索范畴”作等距离散化处理, 得直线序列 $\{u_g = u_{gj}\}$ 。

取毗邻直线 $u_g = u_{gj}$ 、 $u_g = u_{g(j+1)}$ 的间隔为

$$\Delta u_g = [(u_{gmax})_{\min} - (u_{gmin})_{\max}] / (100q), \quad (5)$$

式中: $q = 1, 2, \dots$, 根据求解精度要求确定。

$$u_g = u_{gj} = (u_{gmin})_{\max} + (j-1)\Delta u_g, (j = 1, 2, \dots, 100q+1)。 \quad (6)$$

2) 等距离散化 θ_1 , 取间距为 $\Delta\theta_1 = [1/(10^{p-1})]$, 式中: $p = 1, 2, \dots$, 据精度要求确定。

$$\theta_1 = \theta_{1k} = 0^\circ + (k-1)\Delta\theta_1, (k = 1, 2, \dots, \Phi_0/\Delta\theta_1 + 1), \quad (7)$$

于是得到“往程瞬时边界序列” $\{\partial\Gamma_g(\theta_1)\}$ 。

2.1.1.3 “往程区域套” $\Gamma_g^*(u, v)$ 的确定

剖析 $\{u_g = u_{gj}\}$ 与 $\{\partial\Gamma_g(\theta_1)\}$ 的关系。

I. $u_{g\text{fmin}} < u_{gj} < u_{p_{21\text{gf}}}$ 或 $u_{p_{21\text{gr}}} < u_{gj} < u_{g\text{rmax}}$ 时, $u_g = u_{gj}$ 与 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 有两交点 C_{s1g} 、 C_{s2g} ($v_{C_{s1g}} < v_{C_{s2g}}$), 皆交 $\{C_{sg}\}$ 上。

II. $u_{p_{21\text{gf}}} \leq u_{gj} \leq u_{p_{20\text{gf}}}$ 或 $u_{p_{20\text{gr}}} \leq u_{gj} \leq u_{p_{21\text{gr}}}$ 时, $u_g = u_{gj}$ 与 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 有两交点 C_{s1g} 、 C_{i2g} ($v_{C_{s1g}} < v_{C_{i2g}}$), 分别交 $\{C_{sg}\}$ 、 $\{C_{ig}\}$ 上。

注: $u_{p_{20}}$ 、 $u_{p_{21}}$ 分别是绝对瞬心 P_{20} 、相对瞬心 P_{21} 的 u 坐标

如图3所示, 设 $u_g = u_{gj}$ 与 O_1P_{20} 交于 O_j 点, 令 $\tau_c = l_{O_jC} > 0$ (O_j 至 C 的距离), 则 $v_c = s_2 - \tau_c$ 。

属于情形 I, 有

$$\begin{cases} v_{C_{s1g}} = s_2 - \tau_{C_{s1g}}, \\ v_{C_{s2g}} = s_2 - \tau_{C_{s2g}} \end{cases} \quad (8)$$

属于情形 II, 有

$$\begin{cases} v_{C_{s1g}} = s_2 - \tau_{C_{s1g}}, \\ v_{C_{i2g}} = s_2 - \tau_{C_{i2g}} \end{cases} \quad (9)$$

当 $u_{gj} \leq 0$ 时

1) $\theta_1 \in [0^\circ, \theta_1^*]$, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 左部, 皆交于 $\{C_{sg}\}$ 上。

据式 (1), C_{s1g} 、 C_{s2g} 求解方程 $\tau_c^2 - (l_{20} - l_{21})\tan[\alpha]\tau_c + (l_{20} - \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj}) = 0$, 解得:

$$\tau_{C_{s1g}} = \{(l_{20} - l_{21})\tan[\alpha] + [(l_{20} - l_{21})^2\tan^2[\alpha] - 4(l_{20} - \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj})]^{1/2}\}/2, \quad (10)$$

$$\tau_{C_{s2g}} = \{(l_{20} - l_{21})\tan[\alpha] - [(l_{20} - l_{21})^2\tan^2[\alpha] - 4(l_{20} - \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj})]^{1/2}\}/2. \quad (11)$$

将式 (10)、式 (11) 代入式 (8), 搜索解得 $v_{C_{s1g}\text{flmax}} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{\text{flmax}}$ 和 $v_{C_{s2g}\text{flmin}} = (s_2 - \tau_{C_{s2g}})_{\text{flmin}}$ 。

2) 当 $\theta_1 \in [\theta_1^*, \Phi_0]$ 时, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 中部, 分别交于 $\{C_{sg}\}$ 、 $\{C_{ig}\}$ 上。

据式 (1) 和式 (2), C_{s1g} 、 C_{i2g} 求解方程

$$\tau_c^2 - (l_{20} + l_{21})\tan[\alpha]\tau_c - (l_{20} + \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj}) = 0,$$

$$\tau_c^2 + (l_{20} + l_{21})\tan[\alpha]\tau_c - (l_{20} + \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj}) = 0。$$

解得

$$\tau_{C_{s1g}} = \{(l_{20} + l_{21})\tan[\alpha] + [(l_{20} + l_{21})^2\tan^2[\alpha] + 4(l_{20} + \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj})]^{1/2}\}/2, \quad (12)$$

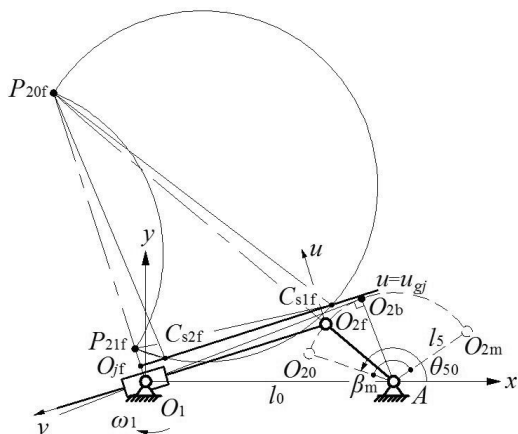


图3 $\Gamma_g(u, v)$ 解析公式的求解确定

Fig.3 Determination of analytic formula of $\Gamma_g(u, v)$

$$\tau_{C_{i2g}} = \{ -(l_{20} + l_{21}) \tan[\alpha] + [(l_{20} + l_{21})^2 \tan^2[\alpha] + 4(l_{20} + \eta u_{gj})(l_{21} - \eta u_{gj})]^{1/2} \} / 2. \quad (13)$$

将式 (12)、(13) 入式 (9), 搜索解得: $v_{C_{s1g}rmax} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{rmax}$ 和 $v_{C_{i2g}rmin} = (s_2 - \tau_{C_{i2g}})_{rmin}$ 。当 $u_{gj} > 0$ 时, 先令 $l_{21}(\theta_1) - u_{gj} = 0$, 搜索 θ_1 , 得到 θ_{1gf}^* 和 θ_{1gr}^* 。

1) 当 $\theta_1 \in [0, \theta_{1gf}^*]$ 时, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 中部, 分别交于 $\{C_{sg}\}$ 、 $\{C_{ig}\}$ 上。

据式 (1) 和式 (2), C_{s1g} 、 C_{i2g} 求解方程

$$\tau_C^2 - (l_{20} - l_{21}) \tan[\alpha] \tau_C - (l_{20} - \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21}) = 0,$$

$$\tau_C^2 + (l_{20} - l_{21}) \tan[\alpha] \tau_C - (l_{20} - \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21}) = 0。$$

解得

$$\tau_{C_{s1g}} = \{ (l_{20} - l_{21}) \tan[\alpha] + [(l_{20} - l_{21})^2 \tan^2[\alpha] + 4(l_{20} - \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21})]^{1/2} \} / 2, \quad (14)$$

$$\tau_{C_{i2g}} = \{ -(l_{20} - l_{21}) \tan[\alpha] + [(l_{20} - l_{21})^2 \tan^2[\alpha] + 4(l_{20} - \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21})]^{1/2} \} / 2. \quad (15)$$

将式 (14)、(15) 入式 (9), 搜索解得 $v_{C_{s1g}fmax} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{fmax}$ 和 $v_{C_{i2g}fmin} = (s_2 - \tau_{C_{i2g}})_{fmin}$ 。

当 $\theta_1 \in [\theta_{1gf}^*, \theta_1^*]$ 时, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 左部, 皆交于 $\{C_{sg}\}$ 上。据式 (8)、(10) 和 (11), 解得 $v_{C_{s1g}flmax} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{flmax}$ 和 $v_{C_{s2g}flmin} = (s_2 - \tau_{C_{s2g}})_{flmin}$ 。

2) 当 $\theta_1 \in [\theta_1^*, \theta_{1gr}^*]$ 时, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 中部, 分别交于 $\{C_{sg}\}$ 、 $\{C_{ig}\}$ 上。据式 (9)、式 (12) 和式 (13), 解得 $v_{C_{s1g}rmax} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{rmax}$ 和 $v_{C_{i2g}rmin} = (s_2 - \tau_{C_{i2g}})_{rmin}$ 。

当 $\theta_1 \in [\theta_{1gr}^*, \Phi_0]$ 时, $u_g = u_{gj}$ 穿过 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 右部, 交于 $\{C_{sg}\}$ 上。

据式 (1), C_{s1g} 、 C_{s2g} 求解方程 $\tau_C^2 - (l_{20} + l_{21}) \tan[\alpha] \tau_C + (l_{20} + \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21}) = 0$, 解得:

$$\tau_{C_{s1g}} = \{ (l_{20} + l_{21}) \tan[\alpha] + [(l_{20} + l_{21})^2 \tan^2[\alpha] - 4(l_{20} + \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21})]^{1/2} \} / 2, \quad (16)$$

$$\tau_{C_{s2g}} = \{ (l_{20} + l_{21}) \tan[\alpha] - [(l_{20} + l_{21})^2 \tan^2[\alpha] - 4(l_{20} + \eta u_{gj})(\eta u_{gj} - l_{21})]^{1/2} \} / 2. \quad (17)$$

将式 (16)、式 (17) 代入式 (8), 搜索解得

$$v_{C_{s1g}rlmax} = (s_2 - \tau_{C_{s1g}})_{rlmax}, v_{C_{s2g}rlmin} = (s_2 - \tau_{C_{s2g}})_{rlmin}。$$

据上, 对 θ_1 搜索, 比较 $\partial\Gamma_g(\theta_1)$ 上交点 v 坐标最小值 $v_{C_{2gj}}^*$ 、下交点最大值 $v_{C_{1gj}}^*$, 即:

$$u_{gj} \leq 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_{C_{1gj}}^* = (v_{C_{1gj}max})_{max} = \max\{v_{C_{s1g}flmax}, v_{C_{s1g}rmax}\}, \\ v_{C_{2gj}}^* = (v_{C_{2gj}min})_{min} = \min\{v_{C_{s2g}flmin}, v_{C_{i2g}rmin}\}. \end{cases}$$

$$u_{gj} > 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_{C_{1gj}}^* = (v_{C_{1gj}max})_{max} = \max\{v_{C_{s1g}flmax}, v_{C_{s1g}fmax}, v_{C_{s1g}rmax}, v_{C_{s1g}rlmax}\}, \\ v_{C_{2gj}}^* = (v_{C_{2gj}min})_{min} = \min\{v_{C_{s2g}flmin}, v_{C_{i2g}fmin}, v_{C_{i2g}rmin}, v_{C_{s2g}rlmin}\}. \end{cases}$$

对应 $u_g = u_{gj}$ 的 $\Gamma_g^*(u, v)$ 边界点坐标为 $(u_{gj}, v_{C_{2gj}}^*)$ 和 $(u_{gj}, v_{C_{1gj}}^*)$, 遍历搜索 u_{gj} , 解得 $\partial\Gamma_g^*(u, v)$ 。

如图 4 所示, 选取不同 $[\alpha]$ 对应不同的“往程边界曲线” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 。取 $[\alpha]_1 > [\alpha]_2 > [\alpha]_3$, 得“往程边界曲线族” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 。

于是, 得到如下重要结论:

1) 不同 $[\alpha]$, “往程边界曲线” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 形态相似但互不重叠。

2) 随 $[\alpha]$ 减小, $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 不断收缩, 且 $[\alpha]$ 小者的恒嵌套于 $[\alpha]$ 大者的内部。

当 $[\alpha]$ 逐渐减小至 $[\alpha]_{g^{**}}$ 时, $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 收缩成一点 C^{**} , 若主滚子中心 C 取 $C^{**}(u^{**}, v^{**})$, 对应 $[\alpha]$ 取得最小值, 即最优压力角 $[\alpha]_{g^{**}}$ 对应的 C^{**} 为最优主滚子中心。

引入 $O_2 u v$ 到 $O_3 x y$ 的坐标变换

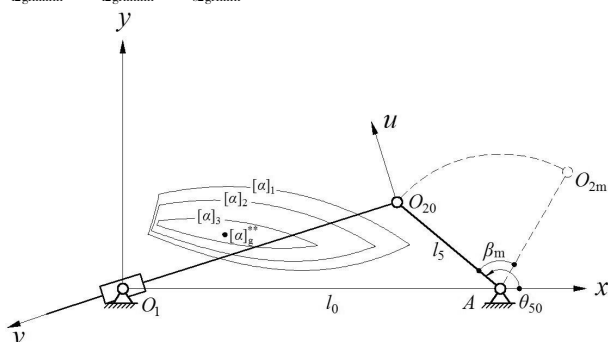


图 4 “往程边界曲线族” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 的规律特征

Fig.4 Regular characteristic of “forward boundary curve family” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$

$$\begin{cases} x_{C_{gj}} = s_{20}\cos\theta_{20} - u_{gj}\sin\theta_{20} - v_{C_{gj}}^* \cos\theta_{20}, \\ y_{C_{gj}} = s_{20}\sin\theta_{20} + u_{gj}\cos\theta_{20} - v_{C_{gj}}^* \sin\theta_{20}. \end{cases} \quad (18)$$

C 取 $\partial\Gamma_g^*(u,v)$ 上点时, 凸轮基圆半径

$$r_0 = (x_{C_{gj}}^2 + y_{C_{gj}}^2)^{1/2}. \quad (19)$$

一维搜索所有 $(x_{C_{gj}}, y_{C_{gj}})$, 得到凸轮最小及最大基圆半径

$$\begin{cases} r_{0\min} = \min\{(x_{C_{gj}}^2 + y_{C_{gj}}^2)^{1/2}\}, \\ r_{0\max} = \max\{(x_{C_{gj}}^2 + y_{C_{gj}}^2)^{1/2}\}. \end{cases}$$

同理, 将坐标 $C^{**}(u^{**}, v^{**})$ 代入式 (18)、式 (19), 可得凸轮最优基圆半径 $r_{0\text{opt}} = r_0^{**}$ 。

2. 1. 2 副凸轮机构

2. 1. 2. 1 满足 $\alpha \leq [\alpha]$ 条件解集的求解原理

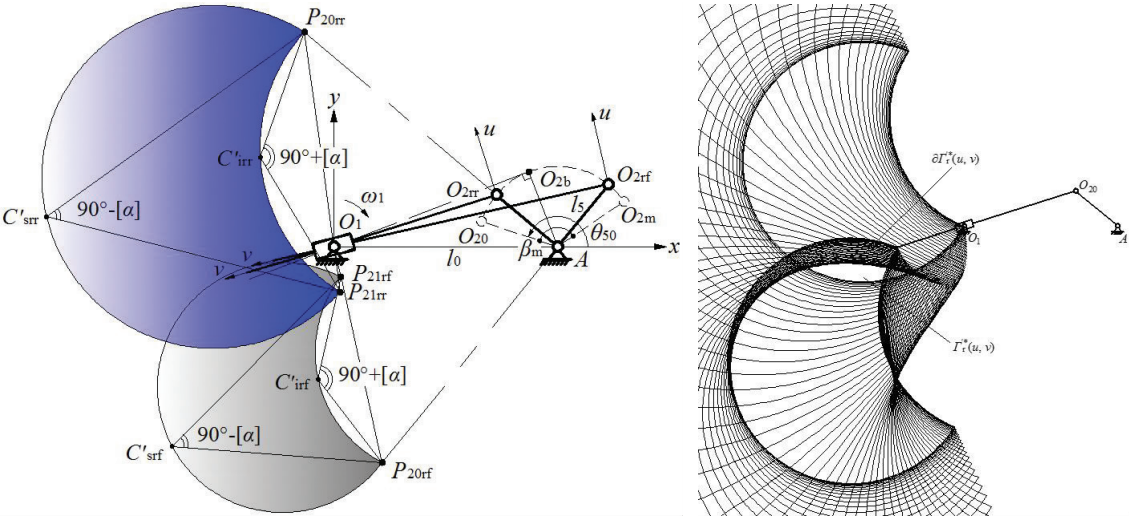
任一瞬时, 在 Σ_2 上以 $P_{20}P_{21}$ 为弦, 往 v 轴正向作优弧 $\{C'_{\text{sr}}\}$ 、劣弧 $\{C'_{\text{ir}}\}$, 使以下公式成立:

$$\angle P_{20}C'_{\text{sr}}P_{21} = 90^\circ - [\alpha], \quad (20)$$

$$\angle P_{20}C'_{\text{ir}}P_{21} = 90^\circ + [\alpha]. \quad (21)$$

同理, 该瞬时 C' 的解集是“瞬时区域套” $\Gamma_r'(u,v)$, 即 $\{C'_{\text{sr}}\}$ 、 $\{C'_{\text{ir}}\}$ 围成的“盈月形区域”, 边界记 $\partial\Gamma_r'(u,v)$, 如图 5a 所示。

整个返程 C' 的解集是“返程区域套” $\Gamma_r'^*(u,v)$, 即 $\Gamma_r'(u,v)$ 截交围络的“公共内部区域”, 边界记 $\partial\Gamma_r'^*(u,v)$, 如图 5b 所示。



a) “瞬时区域套” $\Gamma_r'(u,v)$ 的生成原理
Generating principle of “instantaneous nested region” $\Gamma_r'(u,v)$

b) “返程区域套” $\Gamma_r'^*(u,v)$ 的生成原理
Generating principle of “return nested region” $\Gamma_r'^*(u,v)$

图 5 副滚子中心“瞬时、返程区域套”的生成原理

Fig.5 Generating principle of “instantaneous and return nested region” of auxiliary roller center

2. 1. 2. 2 “返程精练搜索范畴”与等距离散化

将式 (3) 一式 (6) 中的 u_g 、 $(u_{\text{gmin}})_{\max}$ 、 $(u_{\text{gmax}})_{\min}$ 替换为 u_r 、 $(u_{\text{rmin}})_{\max}$ 、 $(u_{\text{rmax}})_{\min}$, $\partial\Gamma_r'^*(u,v)$ 的最小、最大 u 坐标值为 $(u_{\text{rmin}})_{\max}$ 、 $(u_{\text{rmax}})_{\min}$; 将式 (3) 中 $\eta = -1$, l_{20} 、 l_{21} 代之以 l_{20r} 、 l_{21r} 。其中 $\theta_1 = \theta_{1kr} = \Phi_0 + \Phi_s + (k_r - 1)\Delta\theta_1$, ($k_r = 1, 2, \dots, \Phi_{0r}/\Delta\theta_1 + 1$), 可以得到“返程瞬时边界序列” $\{\partial\Gamma_r'(\theta_1)\}$ 。

2. 1. 2. 3 “返程区域套” $\Gamma_r'^*(u,v)$ 的确定

剖析 $\{u_r = u_{ij}\}$ 与 $\{\partial\Gamma_r'(\theta_1)\}$ 彼此的关系。

I. $u_{P_{21rf}} < u_{ij} < u_{r\text{fmax}}$ 或 $u_{r\text{min}} < u_{ij} < u_{P_{21rf}}$ 时, $u_r = u_{ij}$ 与 $\partial\Gamma_r'(\theta_1)$ 有两交点 C'_{s1r} 、 C'_{s2r} ($v_{C'_{s1r}} > v_{C'_{s2r}}$),

皆交于 $\{C'_{sr}\}$ 上。

II. $u_{P_{20rf}} \leq u_{ij} \leq u_{P_{21rf}}$ 或 $u_{P_{21rf}} \leq u_{ij} \leq u_{P_{20rf}}$ 时, $u_r = u_{ij}$ 与 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 有两交点 C'_{s1r} 、 C'_{i2r} ($v_{C'_{s1r}} > v_{C'_{i2r}}$), 分别交于 $\{C'_{sr}\}$ 、 $\{C'_{ir}\}$ 上。

设 $u_r = u_{ij}$ 与 O_1P_{20} 交于 O_j' 点, 再令 $\tau_{C'} = l_{O_j'C'} > 0$ (O_j' 至 C' 的距离), 则 $v_{C'} = s_2 - \tau_{C'}$ 。

属于情形 I 时, 有

$$\begin{cases} v_{C'_{s1r}} = s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}}, \\ v_{C'_{s2r}} = s_{2r} + \tau_{C'_{s2r}}. \end{cases} \quad (22)$$

属于情形 II 时, 有

$$\begin{cases} v_{C'_{s1r}} = s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}}, \\ v_{C'_{i2r}} = s_{2r} + \tau_{C'_{i2r}}. \end{cases} \quad (23)$$

当 $u_{ij} \geq 0$ 时

1) $\theta_1 \in [\Phi_0 + \Phi_s, \theta_{1r}^*]$, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 右部, 皆交于 $\{C'_{sr}\}$ 上。

将式 (10) — 式 (11) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Cs2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{s2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (22), 搜索解得

$$\begin{aligned} v_{C'_{s1rflmin}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{flmin}, \\ v_{C'_{s2rflmax}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{s2r}})_{flmax}. \end{aligned}$$

2) 当 $\theta_1 \in [\theta_{1r}^*, \Phi_0 + \Phi_s + \Phi_{0r}]$ 时, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 中部, 分别交于 $\{C'_{sr}\}$ 、 $\{C'_{ir}\}$ 上。

将式 (12) — 式 (13) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Ci2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{i2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (23), 搜索解得

$$\begin{aligned} v_{C'_{s1rrmin}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{rrmin}, \\ v_{C'_{i2rrmax}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{i2r}})_{rrmax}. \end{aligned}$$

当 $u_{ij} < 0$ 时, 先令 $l_{21r}(\theta_1) - u_{ij} = 0$, 搜索 θ_1 , 得到 θ_{1rf}^* 和 θ_{1rr}^* 。

1) 当 $\theta_1 \in [\Phi_0 + \Phi_s, \theta_{1rf}^*]$ 时, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 中部, 分别交于 $\{C'_{sr}\}$ 、 $\{C'_{ir}\}$ 上。

将式 (14) — 式 (15) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Ci2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{i2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (23), 搜索解得

$$\begin{aligned} v_{C'_{s1rflmin}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{flmin}, \\ v_{C'_{i2rflmax}} &= (s_{2r} + \tau_{C'_{i2r}})_{flmax}. \end{aligned}$$

当 $\theta_1 \in [\theta_{1rf}^*, \theta_{1rr}^*]$ 时, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 右部, 即皆交于 $\{C'_{sr}\}$ 上。

将式 (10) — 式 (11) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Cs2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{s2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (22), 搜索解得: $v_{C'_{s1rflmin}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{flmin}$, $v_{C'_{s2rflmax}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{s2r}})_{flmax}$ 。

2) 当 $\theta_1 \in [\theta_{1rr}^*, \theta_{1rf}^*]$ 时, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 的中部, 分别交于 $\{C'_{sr}\}$ 、 $\{C'_{ir}\}$ 上。

将式 (12) — 式 (13) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Ci2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{i2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (23), 搜索解得: $v_{C'_{s1rrmin}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{rrmin}$, $v_{C'_{i2rrmax}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{i2r}})_{rrmax}$ 。

当 $\theta_1 \in [\theta_{1rr}^*, \Phi_0 + \Phi_s + \Phi_{0r}]$ 时, $u_r = u_{ij}$ 穿过 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 右部, 皆交于 $\{C'_{sr}\}$ 上。

将式 (16) — 式 (17) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 τ_{Cs1g} 、 τ_{Cs2g} 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_{ij} 、 $\tau_{C'}$ 、 $\tau_{C'_{s1r}}$ 、 $\tau_{C'_{s2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (22), 搜索解得: $v_{C'_{s1rrlmin}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{s1r}})_{rlmin}$, $v_{C'_{s2rrlmax}} = (s_{2r} + \tau_{C'_{s2r}})_{rlmax}$ 。

据上结果, 一维搜索 θ_1 , 比较确定所有 $\partial\Gamma'_r(\theta_1)$ 上交点 v 坐标最小值 $v_{C'_{1rj}}^*$ 、下交点最大值 $v_{C'_{2rj}}^*$, 即:

$$u_{ij} \geq 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_{C'_{1rj}}^* = (v_{C'_{1rjmin}})_{\min} = \min\{v_{C'_{s1rflmin}}, v_{C'_{s1rrmin}}\}, \\ v_{C'_{2rj}}^* = (v_{C'_{2rjmax}})_{\max} = \max\{v_{C'_{s2rflmax}}, v_{C'_{i2rrmax}}\}. \end{cases}$$

$u_{ij} < 0$ 时,
$$\begin{cases} v_{C'_{1ij}}^* = (v_{C'_{1jmin}})_{\min} = \min\{v_{C'_{s1rflmin}}, v_{C'_{s1rfmmin}}, v_{C'_{s1rrlmin}}, v_{C'_{s1rrlmin}}\}, \\ v_{C'_{2ij}}^* = (v_{C'_{2jmax}})_{\max} = \max\{v_{C'_{s2rflmax}}, v_{C'_{s2rfmmax}}, v_{C'_{s2rrlmax}}, v_{C'_{s2rrlmax}}\}. \end{cases}$$

遍历搜索 u_{ij} , 解得 $\partial\Gamma_r'^*(u, v)$ 。

返程起始瞬时 $\partial\Gamma_r'^*(u, v)$ 在 O_1xy 系中坐标为

$$\begin{cases} x_{C'_{ij}} = s_{2m}\cos\theta_{2m} - u_{ij}\sin\theta_{2m} - v_{C'_{ij}}^* \cos\theta_{2m}, \\ y_{C'_{ij}} = s_{2m}\sin\theta_{2m} + u_{ij}\cos\theta_{2m} - v_{C'_{ij}}^* \sin\theta_{2m}. \end{cases}$$

C' 取 $\partial\Gamma_r'^*(u, v)$ 上点时, 凸轮基圆半径 $r_0' = (x_{C'_{ij}}^2 + y_{C'_{ij}}^2)^{1/2}$ 。

搜索所有点 $(x_{C'_{ij}}, y_{C'_{ij}})$, 比较得到凸轮最小、最大基圆半径

$$\begin{cases} r_{0min}' = \min\{(x_{C'_{ij}}^2 + y_{C'_{ij}}^2)^{1/2}\}, \\ r_{0max}' = \max\{(x_{C'_{ij}}^2 + y_{C'_{ij}}^2)^{1/2}\}. \end{cases}$$

与 2.1.1 中“往程边界曲线族” $\partial\Gamma_{g[\alpha] \sim}^*(u, v)$ 类似, 选取不同 $[\alpha]$ 对应不同“返程边界曲线” $\partial\Gamma_{r[\alpha]}'^*(u, v)$, 存在最优副滚子中心 $C'^*(u'^*, v'^*)$ 、最优压力角 $[\alpha]_r'^*$ 、最优基圆半径 r_{0opt}' , 不再详述。

2.2 槽道凸轮机构

如图 1b, 槽道凸轮机构显著的形态特征:

- 1) 滚子, 主、副轮廓的凸轮;
 - 2) $v_C < v_{O1}$, 即滚子中心 C 沿 v 轴居于凸轮轴心 O_1 左侧。
- 往程中, 凸轮主轮廓驱动滚子从而带动机构运动。返程中, 恰反之。

2.2.1 “整程精练搜索范畴”的求解确定

据前述分析, “整程精练搜索范畴”是“往程、返程精练搜索范畴”的交集。据式 (3), 在往程、返程中, 对 θ_1 —维搜索, 解得 $(u_{gmin})_{\max}$ 、 $(u_{gmax})_{\min}$ 和 $(u_{rmin})_{\max}$ 、 $(u_{rmax})_{\min}$ 。

于是, 得到“整程精练搜索范畴”

$$u_C \in [(u_{\min})_{\max}, (u_{\max})_{\min}], \tag{24}$$

其中

$$\begin{cases} (u_{\min})_{\max} = \max\{(u_{gmin})_{\max}, (u_{rmin})_{\max}\}, \\ (u_{\max})_{\min} = \min\{(u_{gmax})_{\min}, (u_{rmax})_{\min}\}. \end{cases} \tag{25}$$

将式 (5) 和式 (6) 中的 u_{gj} 、 $(u_{gmin})_{\max}$ 、 $(u_{gmax})_{\min}$ 替换为 u_j 、 $(u_{\min})_{\max}$ 、 $(u_{\max})_{\min}$, 公式仍成立。

2.2.2 凸轮主轮廓

据图 2, 与凸轮主轮廓 (内轮廓) 对应的滚子中心 C 的解集、凸轮基圆半径 r_0 的许用取值范围, 取决于往程。

参据第 2.1.1.1 节, 令 $u_{gj} = u_j$, 解得 $v_{C_{1gj}}^*$ 和 $v_{C_{2gj}}^*$ 值。

2.2.3 凸轮副轮廓

与凸轮副轮廓 (外轮廓) 对应滚子中心 C 的解集, 取决于返程。

任一瞬时, 在 Σ_2 上以 $P_{20}P_{21}$ 为弦, 往 v 轴负向作优弧 $\{C_{sr}\}$ 、劣弧 $\{C_{ir}\}$, 使以下公式成立:

$$\angle P_{20}C_{sr}P_{21} = 90^\circ - [\alpha], \tag{26}$$

$$\angle P_{20}C_{ir}P_{21} = 90^\circ + [\alpha]. \tag{27}$$

如图 6a 所示, 由 $\{C_{sr}\}$ 、 $\{C_{ir}\}$ 围成的“盈月形区域”, 称为“瞬时区域套” $\Gamma_r(u, v)$, 边界记 $\partial\Gamma_r(u, v)$ 。

如图 6b 所示, 整个返程, 由 $\Gamma_r(u, v)$ 彼此截交、围成的“公共内部区域”, 称为“返程区域套” $\Gamma_r^*(u, v)$, 边界记 $\partial\Gamma_r^*(u, v)$ 。

参据 2.1.2.2 节, 得到“返程瞬时边界序列” $\{\partial\Gamma_r(\theta_1)\}$ 。

代入式 (28), $\eta = -1$, 一维搜索, 解得:

$$v_{C_{s1rflmax}} = (s_{2r} - \tau_{C_{s1r}})_{flmax}, v_{C_{s2rflmin}} = (s_{2r} - \tau_{C_{s2r}})_{flmin} \circ$$

2) 当 $\theta_1 \in [\theta_{1r}^*, \theta_{1r}^*]$ 时, $u = u_j$ 穿过 $\partial\Gamma_r(\theta_1)$ 的中部, 即分别交于 $\{C_{sr}\}$ 、 $\{C_{ir}\}$ 上。

将式 (12) — 式 (13) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 $\tau_{C_{s1g}}$ 、 $\tau_{C_{i2g}}$ 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_j 、 τ_C 、 $\tau_{C_{s1r}}$ 、 $\tau_{C_{i2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (29), $\eta = -1$, 一维搜索, 解得:

$$v_{C_{s1rrmmmax}} = (s_{2r} - \tau_{C_{s1r}})_{rrmmmax}, v_{C_{i2rrmmmin}} = (s_{2r} - \tau_{C_{i2r}})_{rrmmmin} \circ$$

当 $\theta_1 \in [\theta_{1rr}^*, \Phi_0 + \Phi_s + \Phi_{or}]$ 时, $u = u_j$ 穿过 $\partial\Gamma_r(\theta_1)$ 的右部, 皆交于 $\{C_{sr}\}$ 上。

将式 (16) — 式 (17) 中的 u_{gj} 、 τ_C 、 $\tau_{C_{s1g}}$ 、 $\tau_{C_{s2g}}$ 、 l_{20} 、 l_{21} 替换为 u_j 、 τ_C 、 $\tau_{C_{s1r}}$ 、 $\tau_{C_{s2r}}$ 、 l_{20r} 、 l_{21r} , 并代入式 (28), $\eta = -1$, 一维搜索, 解得:

$$v_{C_{s1rrlmax}} = (s_{2r} - \tau_{C_{s1r}})_{rlmax}, v_{C_{s2rrlmin}} = (s_{2r} - \tau_{C_{s2r}})_{rlmin} \circ$$

据上计算结果, 搜索 θ_1 , 比较 $\partial\Gamma_r(\theta_1)$ 上交点 v 坐标最小值 $v_{C_{2j}}^*$ 、下交点最大值 $v_{C_{1j}}^*$, 即

$$u_j \geq 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_{C_{1j}}^* = (v_{C_{1jmax}})_{\max} = \max\{v_{C_{s1rflmax}}, v_{C_{s1rrmmmax}}\}, \\ v_{C_{2j}}^* = (v_{C_{2jmin}})_{\min} = \min\{v_{C_{s2rflmin}}, v_{C_{i2rrmmmin}}\} \circ \end{cases}$$
$$u_j < 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_{C_{1j}}^* = (v_{C_{1jmax}})_{\max} = \max\{v_{C_{s1rflmax}}, v_{C_{s1rrmmmax}}, v_{C_{s1rrlmax}}\}, \\ v_{C_{2j}}^* = (v_{C_{2jmin}})_{\min} = \min\{v_{C_{s2rflmin}}, v_{C_{i2rrmmmin}}, v_{C_{i2rrlmin}}\} \circ \end{cases}$$

2.2.4 “整程选择区域” $\Gamma^*(u, v)$ 、凸轮基圆半径 r_0 许用取值范围的确定

根据第 2.2.2 节和第 2.2.3 节, 得到与 $u = u_j$ 对应的“整程交集区间套” $[v_{C_{1j}}^*, v_{C_{2j}}^*]$ 。其中

$$\begin{cases} v_{C_{1j}}^* = \max\{v_{C_{1gj}}^*, v_{C_{1ij}}^*\}, \\ v_{C_{2j}}^* = \min\{v_{C_{2gj}}^*, v_{C_{2ij}}^*\} \circ \end{cases}$$

搜索 u_j , 即可求得 $\partial\Gamma^*(u, v)$, 如图 7 所示。

将式 (18) — 式 (19) 中 $x_{C_{gj}}$ 、 $y_{C_{gj}}$ 、 $v_{C_{gj}}^*$ 替换为 x_{C_j} 、 y_{C_j} 、 $v_{C_j}^*$, 即可得凸轮的理论基圆半径 r_0 , 对所有 (x_{C_j}, y_{C_j}) 一维搜索, 计算比较得到凸轮最小、最大基圆半径 r_{0min} 、 r_{0max} 。

与第 2.1.1 节中“往程边界曲线族” $\partial\Gamma_{g[\alpha]}^*(u, v)$ 特征相似, 对于槽道凸轮机构, 同样存在最优滚子中心点 $C^{**}(u^{**}, v^{**})$ 、最优压力角 $[\alpha]^{**}$ 、最优基圆半径 r_{0opt} , 不再详述。

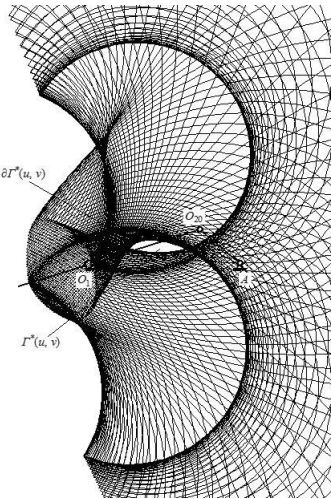


图 7 “整程选择区域” $\Gamma^*(u, v)$ 的生成原理
Fig.7 Generating principle of “whole choice region” $\Gamma^*(u, v)$

3 机构综合示例

德国进口高速印刷机机构。已知: $l_0 = 140 \text{ mm}$, $l_5 = 50 \text{ mm}$, $\theta_{50} = 140^\circ$, $\beta_m = 80^\circ$, 摇杆往程/返程皆选摆线规律, $\Phi_0 = 150^\circ$, $\Phi_{or} = 160^\circ$, $\Phi_s = 20^\circ$, $[\alpha] = 40^\circ$, 凸轮顺时针转动, 求解:

- 1) 共轭机构主、副滚子中心 C 、 C' 的 $\Gamma_g^*(u, v)$ 、 $\Gamma_r'^*(u, v)$ 和 r_0 、 r_0' 取值范围, 最优尺寸解;
- 2) 槽道机构滚子中心 C 的 $\Gamma^*(u, v)$, 对应 r_0 许用取值范围, 最优尺寸解。

解: 据式 (3)、式 (4), 令 $\eta = 1$, 搜索解得“往程精练搜索范畴” $u_g \in [-13.3455, 26.3233]$; 再令 $\eta = -1$, 解得“返程精练搜索范畴” $u_r \in [-25.6028, 6.3487]$ 。

1) 基于“往程、返程精练搜索范畴”, 遍历搜索, 得主、副滚子中心 C 、 C' 的 $\Gamma_g^*(u, v)$ 、 $\Gamma_r'^*(u, v)$ 形态分布, 如图 2b、图 5b 所示。

据上, 计算比较 $\Gamma_g^*(u, v)$ 、 $\Gamma_r'^*(u, v)$ 所有边界点, 解得 $r_0 \in [23.9835, 94.6672]$, $r_0' \in [23.2046, 83.5519]$ 。

以 $[\alpha]$ 为变量, 搜索解得 $C^{**}(7.7277, 64.5440)$, $[\alpha]_g^{**} = 34.6601^\circ$, $r_{0\text{opt}} = 42.8147 \text{ mm}$; $C'^{**}(-12.6675, 201.8140)$, $[\alpha]_r^{**} = 35.4033^\circ$, $r_{0\text{opt}}' = 33.6983 \text{ mm}$ 。

2) 据式(24)、(25), 得到“全程精练搜索范畴” $u_c \in [-13.3455, 6.3487]$ 。通过编程求解, 得到滚子中心 C 的“全程区域套” $I^*(u, v)$, 如图7所示。通过计算比较, 解得 $r_0 \in [37.4920, 76.0819]$ 。以 $[\alpha]$ 为基底参数, 搜索解得 $C^{**}(-2.1362, 50.7729)$, $[\alpha]^{**} = 37.2243^\circ$, $r_{0\text{opt}} = 55.9233 \text{ mm}$ 。

4 结论

1) 以典型的共轭凸轮、槽道凸轮形锁合机构为例, 丰富发展了“广义第Ⅱ类尺寸综合问题”的内涵外延, 拓展延伸了机构综合的“对象空间”和“解集空间”。

2) 基于“瞬时、全程选择区域”和“往程、返程”等重要概念, 对主、副凸轮机构展开分割、归并性研究, 给出了主、副滚子中心允许选择区域, 主、副凸轮基圆半径许用取值范围和最优尺寸解的求解方法。

3) 通过算例求解, 验证了该研究方法的有效性及其可行性。

[参考文献]

- [1] 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[J], 机械工程学报, 2010, 46(21): 37-41.
- [2] 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[J], 机械工程学报, 2012, 48(1): 39-46.
- [3] 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[J], 机械工程学报, 2012, 48(15): 47-57.
- [4] 常勇, 李延平, 刘国祥. 按许用压力角设计最小尺寸作平面复杂运动滚子从动件平面凸轮机构的解析法[J], 机械工程学报, 1991, 27(4): 37-41.
- [5] 华大年. 按许用压力角设计最小尺寸的摆动从动杆平面凸轮机构的解析法[J], 机械工程学报, 1982, 18(4): 74-79.
- [6] 常勇, 林荣富, 李延平. 浮动平底推杆共轭凸轮机构的第Ⅱ类机构综合问题研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 333-340.
- [7] 常勇, 林荣富, 李延平. 做平面运动滚子从动件盘形凸轮机构的深度广义第Ⅱ类综合问题[J]. 中国机械工程, 2014, 25(16): 2149-2158.
- [8] 王知行, 李瑰贤. 关于直动滚子从动件盘形凸轮基本尺寸的讨论[J], 机械工程学报, 1986, 22(4): 88-93.
- [9] SCHOENHERR J. Synthesis of planar cam mechanisms with lowest dimensions[J]. Mechanism and Machine Theory, 1993, 28(3): 317-325.
- [10] DASGUPTA ANIRVAN, GHOSH AMITABHA. On the Determination of basic dimensions of a cam with a translating roller-follower[J]. Journal of Mechanical Design, Trans ASME, 2004, 126(1): 143-147.
- [11] 吕庸厚, 沈爱红. 组合机构设计与应用创新[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)