

## 电动开启汽车门锁的传动机构连杆轨迹研究

王炎<sup>1</sup> 杭鲁滨<sup>1</sup> 刘哲<sup>2</sup> 陈勇<sup>2</sup> 王思玲<sup>3</sup> 汪千升<sup>1</sup> 王明远<sup>1</sup> 白乐乐<sup>1</sup>

(1 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201600)

(2 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 200120)

(3 上海恩坦华汽车门系统有限公司, 上海 200120)

**摘要** 汽车门锁作为汽车车身的重要附件,其操作性和可靠性关系到汽车的安全和使用性能。针对未来新型汽车对车门开启功能的新要求,以现有汽车侧门锁为研究对象,提出一种可实现电动解锁功能的传动运动链;针对电动开启运动链中连杆传动机构在解锁运动过程中与齿条传动匹配问题,以理论接触点期望轨迹为一条平滑曲线为目标;基于单开链方法,构建具有解耦降次特征的运动学方程组;采用优化-连续法,同时考虑机构运转平稳、尺寸合理等条件,求解出传动机构连杆末端输出点最佳逼近期望轨迹的机构尺寸,为新型汽车门锁传动链研发提供参考。

**关键词** 汽车门锁 连杆轨迹 单开链 优化-连续法

## Research on the Connecting Rod Trajectory of Transmission Mechanism of Electric Car Door Lock

Wang Yan<sup>1</sup> Hang Lubin<sup>1</sup> Liu Zhe<sup>2</sup> Chen Yong<sup>2</sup> Wang Siling<sup>3</sup> Wang Qiansheng<sup>1</sup>

Wang Mingyuan<sup>1</sup> Bai Lele<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

(2 Pan Asia Automotive Technology Center Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

(3 Shanghai Entanhua Automobile Door System Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract** The automobile door lock is an important accessory for the car body, and its operability and reliability are related to the safety and performance of the car. Aiming at the new requirements of the new car door opening function in the future, the existing car side door lock is taken as the research object, and a transmission kinematic chain that can realize the electric unlocking function is proposed. Aiming at the problem that the connecting rod transmission mechanism in the electric opening movement chain is matched with the rack drive during the unlocking movement, the desired trajectory of the theoretical contact point is a smooth curve as the target. Based on the single open chain method, a kinematic equation system with decoupling and descending characteristics is constructed. The continuous-optimization method is adopted, and considering the conditions of stable operation and reasonable size, the solution output point of the connecting rod meets the optimal size of the desired trajectory, which provides a reference for the development of the new automobile door lock motion chain.

**Key words** Car door lock Connecting rod trajectory Single open chain Optimization-continuous method

## 0 引言

汽车门锁是汽车的重要附件,其操作性和可靠性直接关系到汽车的使用和安全性能。目前,汽车发展趋势朝向轻量化、智能化和安全化,作为汽车

组成部分的汽车门锁系统也必须顺应这样的发展趋势。当前,国内普通车锁供大于求,而电动开启智能门锁研究基本处于初始阶段<sup>[1-4]</sup>。

针对目前无人驾驶汽车技术和市场上对电动开启需求的增长,基于现有门锁开关门机构设计的技

术, 以达到无需人为手动拉开车门, 车门自行打开目标, 提出一种利用电机、传动机构及执行机构组合运动链, 实现具有电动开启功能的新型智能门锁设计思路。所开发的整套电动解锁运动链由电机、齿轮—齿条机构、棘爪开启操作连杆传动机构、棘轮、棘爪组成, 其中, 操纵棘爪电动开启的传动机构可视为铰链平面四杆机构。整套新型智能门锁中动力和运动传输综合性能由组成电动开启运动链中齿条特征型面与铰链传动四杆机构连杆理论接触点轨迹的匹配程度决定。结合门锁机构自动开启变接触状态、变拓扑结构、动力特性时变等实际情况, 经过校企多次联合实验测试分析, 得知该理论接触点的轨迹为一条近似直线的平滑曲线时, 其两者间的传动效果最佳。

针对接触点轨迹曲线的近似实现, 可归纳为平面连杆机构轨迹生成问题, 其运动综合问题一直是机构学界研究的热点<sup>[5-8]</sup>。杨廷力<sup>[9]</sup>用连续法研究了再现计时轨迹铰链四杆机构的近似运动综合, 该方法克服了初值不易选取等问题, 实现了全局最优解的求解。聂雪华<sup>[10]</sup>和于红英<sup>[11]</sup>分别采用傅里叶描述子提取连杆特征参数和基于 B 样条曲线的综合方法, 建立电子图谱来研究四杆机构轨迹综合问题, 但是, 要求图谱库必须具备足够数量、覆盖面广泛的轨迹类型, 其工作量较大。孔宪文<sup>[12]</sup>提出了机构近似运动综合的广义逆矩阵—连续法, 利用该方法进行四杆机构近似运动综合, 可使所需计算量减小。

为使铰链传动机构连杆上某特定点的运动能最佳逼近期望的轨迹, 使得整个电动开启运动链传动更平稳有效, 同时考虑机构运转灵活轻便、结构尺寸合理; 基于有序单开链建模及优化—连续设计法, 解决了汽车门锁操作机构尺度综合问题, 为后续整个电动开启门锁运动链的设计提供了参考。

### 1 电动开启传动链的建立与分析

建立新型电动开启汽车门锁传动链示意图, 如图 1 所示, 整个运动链的机构简图如图 2 所示。可知整个电动开启传动链分别由平面传动四杆机构 ABCD、蜗轮蜗杆以及齿轮齿条、齿条特征型面组成; 其运动链的输入端通过电机带动蜗轮蜗杆传递到齿条齿轮机构, 再由齿条特征型面与连杆末端理想接触点 F 的期望轨迹实现力和动作的传递; 运动链的输出端通过棘爪杆 CD 与棘爪棘轮相连接, 实现棘轮棘爪分离解锁动作。由此形成完整的开启回路, 实现以单电机形式驱动完成电动开启功能。

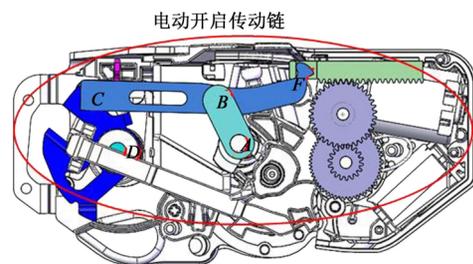


图 1 电动开启运动链示意图

针对输入端齿轮齿条与平面传动机构 ABCDF 连杆末端接触点 F 轨迹匹配问题, 为实现平稳传动, 需对连杆机构各结构参数进行优化反求。研究满足期望轨迹的平面传动机构尺寸, 即求解传动机构各杆件参数, 以及 A、B 点位置。

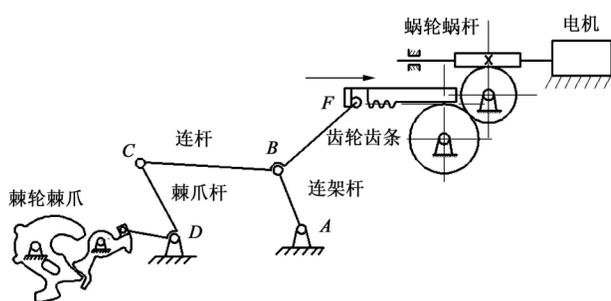


图 2 电动开启机构运动链的机构简图

## 2 传动机构运动学模型的建立

### 2.1 传动机构模型及参数

研究传动四杆机构连杆末端输入轨迹点问题, 可将机构等价如图 3 所示平面四杆机构 ABCD 及连杆末端理想输出点 F, 设各连杆长度分别为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ , BF 与 BC 间形成夹角为  $\beta$ , 长度为  $l_5$ ; 输入关节角为  $\theta$ , 其初始输入角为  $\theta_0$ 。

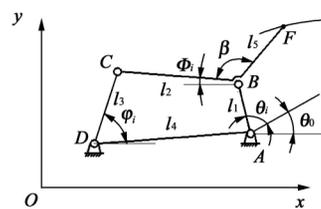


图 3 传动机构机构简图

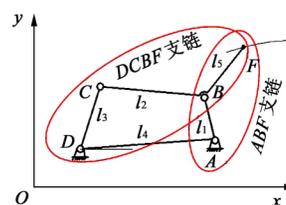


图 4 传动机构单开链划分示意图

基于有序单开链方法, 将机构运动链分成 ABF 和 DCBF 两条支链进行机构尺度结构参数解耦建模, 如图 4、图 5、图 6 所示, 并以优化—连续法求满足期望轨迹的传动机构全部尺寸。

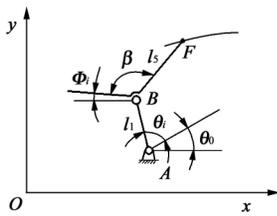


图5 ABF单开支链

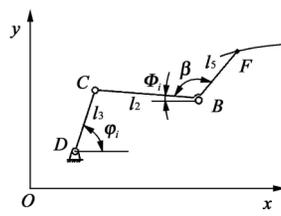


图6 DCBF单开支链

## 2.2 基于单开链运动学建模

为了求解ABF支链各杆件及A、B位置等参数,将ABF支链各杆件在x和y轴上投影,如图5所示,可得支链ABF连杆末端轨迹点F的坐标为

$$\begin{cases} F_{ix} = A_x + l_1 \cos(\theta_0 + \theta_i) + l_5 \cos(\Phi_i + \beta) \\ F_{iy} = A_y + l_1 \sin(\theta_0 + \theta_i) + l_5 \sin(\Phi_i + \beta) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)方程移项后两边同时平方再相加,即可消去运动变量 $\Phi_i$ ,即有

$$[F_{ix} - A_x - l_1 \cos(\theta_0 + \theta_i)]^2 + [F_{iy} - A_y - l_1 \sin(\theta_0 + \theta_i)]^2 = l_5^2 \quad (2)$$

将式(2)展开后,整理可得

$$(A_x - F_{ix})^2 + (A_y - F_{iy})^2 + l_1^2 - l_5^2 + 2l_1[(A_y - F_{iy})\sin\theta_i + (A_x - F_{ix})\cos\theta_i]\cos\theta_0 + 2l_1[(A_y - F_{iy})\cos\theta_i - (A_x - F_{ix})\sin\theta_i]\sin\theta_0 = 0$$

其中, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。将式中的后 $n-1$ 个方程( $i=2, 3, \dots, n$ )分别减去第1个方程( $i=1$ ),并令 $x_1 = A_x, x_2 = A_y, x_3 = l_1 \cos\theta_0, x_4 = l_1 \sin\theta_0$ ,整理可得ABF支链运动学综合方程组

$$\begin{cases} f_{i-1}(x) = F_{i1}x_1x_3 + F_{i2}x_1x_4 + F_{i3}x_2x_3 + F_{i4}x_2x_4 + \\ F_{i5}x_1 + F_{i6}x_2 + F_{i7}x_3 + F_{i8}x_4 + F_{i9} = 0 \\ (i=2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $F_{i1} = \cos\theta_i - \cos\theta_1, F_{i2} = -\sin\theta_i + \sin\theta_1, F_{i3} = -F_{i2}, F_{i4} = F_{i1}, F_{i5} = F_{ix} - F_{ix}, F_{i6} = F_{iy} - F_{iy}, F_{i7} = F_{iy} \sin\theta_1 - F_{iy} \sin\theta_i + F_{ix} \cos\theta_1 - F_{ix} \cos\theta_i, F_{i8} = F_{iy} \cos\theta_1 - F_{iy} \cos\theta_i - F_{ix} \sin\theta_1 + F_{ix} \sin\theta_i, F_{i9} = -\frac{1}{2} [(F_{ix} - F_{ix})^2 + (F_{iy} - F_{iy})^2]$ 。

为求DCBF支链各杆件及D、C、B位置等参数,如图6所示,可根据上述原理及步骤,得到支链DCBF上连杆末端轨迹点F的坐标

$$\begin{cases} F_{ix} = D_x + l_3 \cos\varphi_i + l_2 \cos\Phi_i + l_5 \cos(\Phi_i + \beta) \\ F_{iy} = D_y + l_3 \sin\varphi_i - l_2 \sin\Phi_i + l_5 \sin(\Phi_i + \beta) \end{cases} \quad (4)$$

同理,将式(4)进行上述变换处理,可消去运动变量 $\varphi_i$ ,整理可得

$$\begin{aligned} & \{[(F_{ix} - l_5 \cos(\theta_i + \beta)) - D_x]^2 + \{[(F_{iy} - l_5 \sin(\theta_i + \beta)) - D_y]^2 + l_2^2 - l_3^2 - 2l_2\{[(F_{ix} - l_5 \cos(\theta_i + \beta)) - D_x]\cos\theta_i + 2l_2\{[(F_{iy} - l_5 \sin(\theta_i + \beta)) - D_y]\sin\theta_i = 0 \end{aligned}$$

同理,将式中的后 $n-1$ 个方程( $i=2, 3, \dots, n$ )分别减去第1个方程( $i=1$ ),并令 $y_1 = D_x, y_2 = D_y, y_3 = l_2 \cos\Phi_i, y_4 = l_2 \sin\Phi_i$ ,整理可得支链DCBF运动学综合方程组

$$\begin{cases} f_{i-1}(y) = F_{i1}y_1y_3 + F_{i2}y_1y_4 + F_{i3}y_2y_3 + F_{i4}y_2y_4 + \\ F_{i5}y_1 + F_{i6}y_2 + F_{i7}y_3 + F_{i8}y_4 + F_{i9} = 0 \\ (i=2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (5)$$

式中,系数 $F_{ij}(i=2, 3, \dots, n; j=1, 2, \dots, 9)$ 可由式(4)得到。

由上所述,根据式(3)、式(5),其 $l_1, l_2, l_3, l_5, \beta, A_x, A_y, D_x, D_y$ 共9个待定综合结构参数,可由连杆末端F点的期望轨迹坐标进行综合求解,进而得到传动连杆机构尺寸构型。基于单开链建模方法,构建具有解耦特征的降维降次非线性代数方程组运动学综合,可使整个求解过程变得更加容易。

## 2.3 优化目标函数的建立及求解

为使连杆末端输出点F能最佳地逼近期望轨迹上的点,先将机构近似综合问题归结为无约束问题,采用连续法求出梯度方程组的全部解,进而得到最优解<sup>[13]</sup>。

(1) 支链ABF建立优化问题的模型为

$$\min F(x) = \sum_{i=2}^n [f_{i-1}(x)]^2 \quad (6)$$

式中, $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ ;  $f_{i-1}(x)$ 由式(3)确定。

将上式分别对变量 $x_1, x_2, x_3, x_4$ 求偏导,整理得梯度方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=2}^n f_{i-1}(x) (F_{i1}x_3 + F_{i2}x_4 + F_{i5}) = 0 \\ \sum_{i=2}^n f_{i-1}(x) (F_{i3}x_3 + F_{i4}x_4 + F_{i6}) = 0 \\ \sum_{i=2}^n f_{i-1}(x) (F_{i1}x_1 + F_{i3}x_2 + F_{i7}) = 0 \\ \sum_{i=2}^n f_{i-1}(x) (F_{i2}x_1 + F_{i4}x_2 + F_{i8}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为含4个方程和4个变量的多项式方程组。每个方程的次数均为3,该方程组的总次数 $T_D = 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ 。采用二元齐次化法,将变量分为 $(x_1, x_2)$ 和 $(x_3, x_4)$ 两组,由方程组Bezout定理<sup>[14]</sup>,可知式(7)的Bezout数等于 $(\lambda_1 + 2\lambda_2)^2 (2\lambda_1 + \lambda_2)^2$ 中 $\lambda_1^2 \lambda_2^2$ 项的系数,经计算有 $B_N = 33$ 。根据初始方程组构造原则,初始方程组可构造为

$$\begin{cases} G_1(x) = (x_1 + x_2)(x_3^2 - 1) = 0 \\ G_2(x) = (x_1 - x_2)(x_4^2 - 4) = 0 \\ G_3(x) = (x_1^2 - 9)(x_3 + x_4) = 0 \\ G_4(x) = (x_2^2 - 16)(x_3 - x_4) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由于初始方程组(8)与待解方程组(7)具有相同的齐次结构特征, 而待解方程组(7)的  $B_N = 33$ , 故初始方程组(8)有 33 组解, 建立式(7)方程组的同伦方程组为

$$H(t, x) = (1 - t)F(x) + t\gamma G(x) \quad t \in [0, 1] \quad (9)$$

以式(8)方程组的 33 组解为初始点, 对式(9)同伦方程组全部 33 条同伦路径进行跟踪, 可求出梯度方程组的全部解<sup>[15]</sup>。将其中每个实数解代入式(6), 求出满足设计要求的支链  $ABF$  的全部尺寸。

(2) 类似的支链  $DCBF$  建立优化问题的模型为

$$\min F(y) = \sum_{i=2}^n [f_{i-1}(y)]^2 \quad (10)$$

式中,  $y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$ ;  $f_{i-1}(y)$  由式(5)确定。

分别对上式中变量  $y_1, y_2, y_3, y_4$  求偏导, 整理得梯度方程组, 同上, 将变量分为  $(y_1, y_2)$  和  $(y_3, y_4)$  两组, 构造初始方程组, 求解梯度方程组可得支链  $DCBF$  的全部尺寸。

将两条支链综合结果进行组合, 便可得到机构的全部尺寸设计方案。

### 3 传动角约束条件分析

电动开启汽车门锁中电机功率和输出转矩常常较小, 而所需的开启力较大。机构最小传动角需满足  $\gamma \geq [\gamma]$ , 从而达到机构运转传动效率高、传动省力的目的<sup>[6]</sup>。机构的传动角和连杆  $BC$  与摇杆  $CD$  的夹角有关, 在操作机构在运动过程中,  $\gamma_{\min}$  为

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_4 - l_1)^2}{2l_2l_3} \quad (11)$$

则传动角约束条件为

$$\gamma_{\min} \leq [\gamma] \quad (12)$$

### 4 操作机构优化设计结果分析

根据汽车门锁机构空间位置受限、初始姿态确定等实际情况约束, 由实验得到输入角  $\theta_i$  与轨迹点  $F$  如表 1 所示。

表 1 输入角  $\theta_i$  与轨迹点  $F_i$  坐标之间对应关系

点序号 $i$	输入角 $\theta_i / (^\circ)$	期望轨迹点 $(x, y)$ 坐标/mm
1	128	(52.29, 28.68)
2	124	(53.18, 29.48)
3	120	(54.13, 30.19)
4	116	(55.13, 30.82)
5	112	(56.17, 31.36)
6	108	(57.24, 31.82)
7	104	(58.35, 32.18)
8	100	(59.48, 32.46)

将表 1 中期望轨迹点参数代入支链  $ABF$  优化目标函数  $F(x)$  的梯度方程组, 再以式(7)为初始方程组, 以式(9)建立同伦方程组, 求出梯度方程组的全部实数解; 将所有实数解代入式(6)检验其目标函数值, 得出支链  $ABF$  的尺寸设计方案。然后计算运动变量  $\beta$ , 将其与表 1 中各期望轨迹点参数代入支链  $DCBF$  优化目标函数  $F(y)$  的梯度方程组; 建立同伦方程组, 求出梯度方程组的全部实数解, 将所有实数解代入式(10)检验其目标值, 得到支链  $DCBF$  的尺寸设计方案。

最后, 以式(12)为约束条件, 进行可行性方案筛选, 得出符合实际要求的操作机构全部尺寸设计方案。

经过求解确定出一组符合条件的连杆机构尺寸参数, 如表 2 所示。利用得到的传动机构全部尺寸, 绘制出传动机构初始位置的尺度示意图, 如图 7 所示。由所得机构尺寸进行输出轨迹点反求, 得到实际轨迹点如表 3 所示, 绘制期望轨迹点与实际轨迹点曲线如图 8 所示。

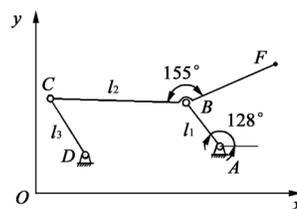


图 7 优化后四杆传动机构尺度示意图

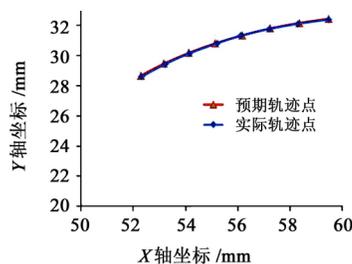


图 8 预期轨迹点和实际轨迹点对比图

表 2 求解对应的机构尺寸参数

参数	结果	参数	结果
$(A_x, A_y)/\text{mm}$	(47, 6.2)	$l_3/\text{mm}$	20.0
$(D_x, D_y)/\text{mm}$	(6.0, 3.6)	$l_5/\text{mm}$	29.6
$l_1/\text{mm}$	16.7	$\beta / (^\circ)$	155.1
$l_2/\text{mm}$	41	$\theta_0 / (^\circ)$	128.0

表 3 各实际轨迹点  $F_i$  坐标 mm

点序号 $i$	实际轨迹点坐标	点序号 $i$	实际轨迹点坐标
1	(52.32, 28.61)	5	(56.22, 31.34)
2	(53.23, 29.46)	6	(57.22, 31.79)
3	(54.16, 30.17)	7	(58.31, 32.13)
4	(55.15, 30.81)	8	(59.46, 32.41)

基于求解的传动机构尺寸,结合现有门锁机构中实际空间位置和所需开启力的大小,设计出符合力放大倍数的齿轮齿条机构,由此形成完整的传动运动链样机,如图9所示。



图9 新型电动开启运动链实物模型

## 5 结论

针对解锁传动机构连杆末端输入点最优轨迹匹配求解,完成解锁机构的尺度综合,为实现电动开启功能汽车门锁设计奠定基础。完成了以下工作:

(1) 基于汽车侧门锁电动解锁新需求,提出了一种可实现电动开启功能的解锁运动链,并对其运动链中传动机构特性提出了连杆末端输入点期望轨迹。

(2) 基于单开链方法,构建了具有解耦特征的运动学模型,减少了同伦连续法方程组求解的跟踪路径,提高了传动机构尺寸优化和运动综合求解的规模和效率。

(3) 基于所设计真实车门锁机构,同时满足运动要求和传动性要求,运用优化—连续设计方法,结合约束条件下的梯度优化和连续法全局优化,实现了满足约束条件的期望轨迹近似再现,为后续整个运动链的设计提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 王锡雄, 阚树林, 曹召锋. 轿车一体化关门系统设计[J]. 机械制造, 2014, 52(6):13-17.
- [2] 李俊, 张宗华. 汽车卡板式门锁的锁紧机构设计与分析[J]. 汽车零部件, 2012(9):111-112.
- [3] 李春风, 尹明德. 基于Pro/E的汽车门锁系统的3D建模及运动仿真和动力分析[J]. 机械工程师, 2008(12):78-80.
- [4] DIMIG S J. Modular vehicle door lock and latch system and method: US 6530251 B1[P]. 2003-01-28.
- [5] 刘安心, 杨廷力. 平面四杆机构的运动综合研究[J]. 机械科学与技术, 1995(1):5-11.
- [6] SHARIATI M, NOROUZI M. Optimal synthesis of function generator of four-bar linkages based on distribution of precision points[J]. Meccanica, 2011, 46(5):1007-1021.
- [7] SMAILI A, DIAB N. A new approach to shape optimization for closed path synthesis of planar mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(9):941-948.
- [8] ULLAH I, KOTA S. Optimal synthesis of mechanisms for path generation using fourier descriptors and global search methods[J]. Journal of Mechanical Design, 1997, 119(4):504-510.
- [9] 刘安心, 杨廷力. 平面连杆机构近似运动综合研究[J]. 机械科学与技术, 1997(2):214-224.
- [10] 聂雪华, 王枫红. 采用傅里叶描述子提取连杆曲线特征参数的方法研究[J]. 机械传动, 2015(6):49-53.
- [11] 于红英, 赵彦微, 许栋铭. 平面铰链四杆机构的轨迹综合方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1):40-47.
- [12] 孔宪文. 用广义逆矩阵及连续法进行连杆机构的近似运动综合[J]. 机械科学与技术, 1999(1):38-40.
- [13] 刘安心, 杨廷力. 平面连杆机构近似综合的连续-优化法[J]. 机械设计与研究, 1996(3):6-7.
- [14] 刘安心, 杨廷力. 连续法在机构运动综合中的应用[J]. 机械设计, 1995(7):7-9.
- [15] 李霞. 非线性方程组的同伦算法及应用[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2005:1-7.
- [16] 胡建平. JX1030汽车门锁机构的计算分析[J]. 江苏理工大学学报, 1998(1):28-32.

收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-09-22

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金会项目(1617)

上海工程技术大学研究生科研创新项(18KY0111,17KY0104)

作者简介: 王炎(1992—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 研究方向为机构学。

通信作者: 杭鲁滨(1965—), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 研究方向为并联机器人机构、现代机构学、非标装备设计。