

陈立锋,王林青,朱鹏程,等.双“8”字无碳小车 RSSR 机构优化设计[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):50-55. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.008

Chen L F, Wang L Q, Zhu P C, et al. Optimal Design of RSSR Mechanism for Double “8” Carbonless Car[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition), 2020,35(4):50-55. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.008

# 双“8”字无碳小车 RSSR 机构优化设计

陈立锋<sup>1\*</sup>,王林青<sup>1,2</sup>,朱鹏程<sup>1,2</sup>,封鸿璋<sup>1</sup>,田雪峰<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**基于 RSSR 机构的无碳小车的轨迹调节缺乏数据参考使得轨迹调节困难的问题,本文在对无碳小车结构方案分析的基础上,采用优化设计方法,提出了一种轨迹高重合度的无碳小车设计方法.首先,基于无碳小车结构方案,建立了小车四杆机构中杆长参数间的函数关系;其次,根据无碳小车运行轨迹的仿真结果,提出了一种轨迹重合度的评价方法;然后,以轨迹重合度最优为目标,以 RSSR 机构中曲柄、连杆和摇杆的长度为变量,建立了小车运行轨迹的优化模型;最后,利用等分区间法获得了曲柄、连杆和摇杆等参数值的最优组合解,并对优化前后小车运行轨迹进行对比分析,发现优化后的运行轨迹重合度明显优于优化前的运行轨迹.本文建立的轨迹高重合度的无碳小车设计方法对无碳小车的设计具有工程指导意义.

**关键词:**无碳小车;轨迹重合度;RSSR 机构;优化设计

**中图分类号:**TH122      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2020)04-0050-06

## Optimal Design of RSSR Mechanism for Double “8” Carbonless Car

Chen Lifeng<sup>1</sup>, Wang Linqing<sup>1,2</sup>, Zhu Pengcheng<sup>1,2</sup>, Feng Hongzhang<sup>1</sup>, Tian Xuefeng<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Because of the lack of data reference for the trajectory adjustment of carbonless car based on RSSR mechanism, it was difficult to adjust the trajectory. In view of this problem, based on the analysis of the structure scheme of the carbonless car, the optimization design method was adopted to propose a design method of carbonless car with high trajectory coincidence. Firstly, the functional relationship between the length parameters of the RSSR mechanism was established based on the structure scheme of the carbonless car. Secondly, according to the simulation results of the running track of the carbonless car, an evaluation method of the trajectory coincidence was proposed. The optimization model, which the trajectory coincidence of the carbonless car was regarded as the objective function and the lengths of the crank, linkage and rocker as variables, was established. Finally, the optimal parameters combination of the crank, linkage and rocker was obtained by using the equal partition method. By compare of the running trajectory coincidence of the optimal car and the initial car, the result shows that the trajectory coincidence of the car with the optimization parameters is better than the initial car. It is illustrated that the optimization design method has engineering significance for the design of the carbonless car.

**Keywords:** carbonless car; trajectory coincidence; RSSR mechanism; optimal design

收稿日期:2019-04-23

基金项目:湖南省教育厅重点资助项目(19A170);湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化资助项目(2018GK4013)

\*通信作者,E-mail: hnustchen@163.com

为增强大学生的工程实践能力、提高学生的动手能力和培养学生提高能源转化率的思想等,教育部高等教育司发文举办工程训练综合能力大赛<sup>[1]</sup>.无碳小车绕桩竞赛是每届工训大赛的比赛项目之一<sup>[2]</sup>.各院校十分重视对无碳小车的设计及分析,其设计大致有2种形式.早期出现的是数学计算后直接进行实车调试,高文英等<sup>[3]</sup>使用扇形轨迹计算法设计了S型无碳小车,经过多次调试后得到了满足比赛要求的无碳小车,但在调试过程中缺乏理论指导,使得设计周期较长;王政等<sup>[4-7]</sup>在理论设计后通过仿真分析,获得小车的理论轨迹及结构参数,大大缩短了调试周期;田国富等<sup>[8]</sup>使用 MATLAB 软件对初步设计的无碳小车轨迹进行编程仿真,在仿真的基础上发现改变曲柄长度等参数可以实现轨迹的调整,这为实地调车提供了数据指导;张春等<sup>[9]</sup>建立了小车的动力学模型,优化了转向系统的参数值,通过仿真及竞赛实战验证了优化效果;刘洋等<sup>[10]</sup>也建立了小车的数学模型,设计了一种新型的微调机构,并借助 Mathematica 软件对小车的运动轨迹进行仿真优化,在调车过程中效果明显;崔素华等<sup>[11-12]</sup>运用解析法对 RSSR 机构进行运动学分析,建立了函数关系,并利用 ADAMS 软件实现了机构仿真及优化,其研究方法与成果对提高 RSSR 机构的设计效率、减少设计周期具有重要意义;H.G.Sun 等<sup>[13]</sup>在三维笛卡尔坐标系下进行数学建模,研究了 RSSR 机构的运动参数关系,并进行了动力学分析,对 RSSR 机构设计具有一定的参考价值.

目前,无碳小车的设计、模拟仿真等已接近成熟,但是其中还存在许多问题,如无法获取某一参数值的细微变化对小车轨迹的影响规律,无法获取多周期内轨迹的有效调整方式等<sup>[14-17]</sup>.为解决多周期内轨迹调节较困难的问题,本文提出了一种轨迹重合度的评价方法,并以转向机构中曲柄、连杆和摇杆的长度为变量建立了小车运行轨迹的优化模型,通过等分区间法获得了小车运行轨迹的最优解及其对应的转向机构的参数值,使用 MATLAB 模拟仿真后论证了优化设计的可行性,为无碳小车的设计制造提供数据参考.

## 1 数学建模

### 1.1 结构原理

针对双“8”字运行轨迹的要求,本文利用空间连杆机构来实现小车的转向运动,无碳小车的整车结构如图1所示<sup>[18]</sup>,小车三维实体模型如图2所示,图1和图2中的构件1、构件2、构件3分别为 RSSR 机构的曲柄、连杆和摇杆,构件4为转向轮轴,构件5为绕线轴,构件6为主动齿轮,构件7为从动齿轮,构件8和构件9分别为左右驱动轮.砝码在下降的过程中,由绳线带动绕线轴5旋转,绕线轴5和齿轮6固连,通过齿轮6和齿轮7的啮合传动带动后轮8和后轮9旋转,从而驱动小车前进;同时通过空间曲柄摇杆机构(RSSR)带动转向轮轴4左右摆动,从而实现小车转向.无碳小车结构初选参数:后轮轮距  $a = 92.3 \text{ mm}$ ,后轮半径  $R = 63 \text{ mm}$ ,后轮轴与驱动轴间的距离  $d_1 = 43 \text{ mm}$ ,后轮轴与绕线轴间的距离  $d_2 = 113 \text{ mm}$ ,绕线轴半径  $r = 3 \text{ mm}$ ,曲柄长度  $L_1 = 26 \text{ mm}$ ,连杆长度  $L_2 = 77.5 \text{ mm}$ ,摇杆长度  $L_3 = 37 \text{ mm}$ .

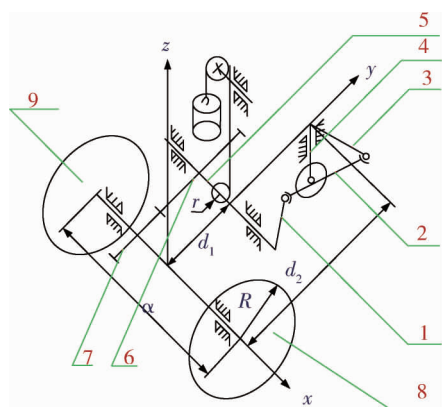


图1 无碳小车结构

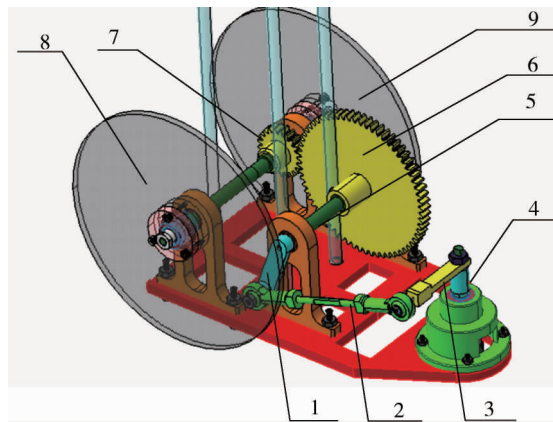


图2 三维实体模型

### 1.2 函数关系

为了分析无碳小车的运动轨迹,对 RSSR 机构进行结构分析,建立了如图3所示的空间直角坐标系,图中A点为摇杆  $L_3$  与连杆  $L_2$  的铰接点,B点为连杆  $L_2$  与曲柄  $L_1$  的铰接点,C点为曲柄  $L_1$  与主动轴的连接

点,  $D$  点为摇杆  $L_3$  与从动轴的连接点. 设曲柄  $L_1$  的输入角为  $\alpha$ , 摇杆  $L_3$  的输出角为  $\beta$ , 各连接点的坐标为  $A(X_A, Y_A, Z_A), B(X_B, Y_B, Z_B), C(X_0, 0, 0), D(0, Y_0, 0)$ .

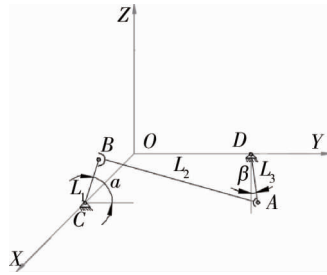


图3 空间 RSSR 机构

由空间两点间距离公式, 可得连杆杆长为

$$L_2^2 = (X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2. \tag{1}$$

根据三角关系可得,  $A$  点坐标为

$$(X_A, Y_A, Z_A) = (L_3 \cos\beta, Y_0 + L_3 \sin\beta, 0). \tag{2}$$

$B$  点坐标为

$$(X_B, Y_B, Z_B) = (X_0, L_1 \sin\alpha, L_1 \sin\alpha). \tag{3}$$

将式(2)和式(3)代入式(1)可得四杆机构各杆长间的关系为

$$L_1^2 - L_2^2 + 2L_3^2 + Y_0^2 - 2Y_0L_1\cos\alpha = (2L_1L_3\cos\alpha - 2Y_0L_3)\cos\beta + 2L_3^2\sin\beta. \tag{4}$$

令  $\sigma = L_1^2 - L_2^2 + 2L_3^2 + Y_0^2 - 2Y_0L_1\cos\alpha$ ,  $\lambda = 2L_1L_3\cos\alpha - 2Y_0L_3$ ,  $\mu = 2L_3^2$ , 可得摇杆输出角与曲柄输入角之间的函数关系为

$$\beta = \arcsin\left(-\frac{\sigma}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}}\right) - \arccos\left(\frac{\lambda^2}{\sqrt{\lambda^2 + \mu^2}}\right). \tag{5}$$

## 2 仿真与优化

### 2.1 建立轨迹重合度的评价方法

由于难以获取小车运行轨迹的规律, 无法对轨迹重合度进行评价, 在调试过程中缺乏理论指导, 这对小车的轨迹调试造成很大的困难, 因而建立轨迹重合度的评价方法可为小车的运行调试奠定理论基础. 根据四杆机构的函数关系, 利用 MATLAB 对无碳小车运行轨迹进行模拟分析, 基于模拟结果, 可获得轨迹重合度的表述方法.

以小车始发点为原点, 且以始发点轨迹的切线方向为  $x$  轴建立如图 4 所示的直角坐标系, 水平线与  $x$  轴平行. 在一个运行周期内, 令轨迹交叉点的坐标分别为  $A'(x_1, y_1), B'(x_2, y_2)$ . 将轨迹交叉点的连线定义为轨迹中心线, 轨迹中心线与水平线的夹角为  $\theta$ , 且以逆时针方向为正.

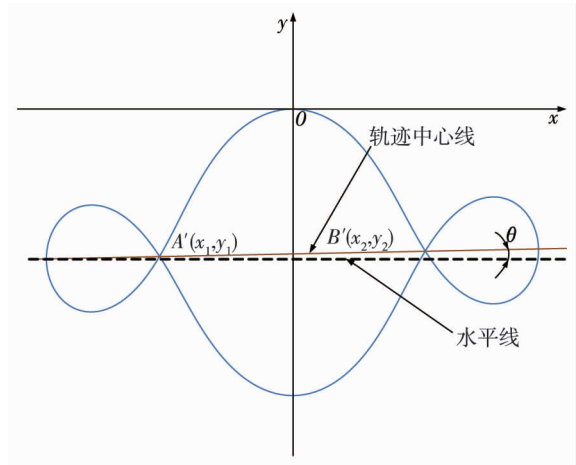


图4 轨迹中心线

RSSR 机构参数不同, 无碳小车的运行轨迹也不尽相同, 基于运动轨迹, 通过计算  $A', B'$  点的坐标即可获得轨迹中心线与水平线的夹角. 图 5 和图 6 分别为  $(L_1, L_2, L_3) = (26.2, 77.7, 37.2)$  和  $(L_1, L_2, L_3) = (25.8, 77.6, 36.8)$  时无碳小车第一个周期的运行轨迹, 通过计算可知图 5 中夹角  $\theta \approx 1.8^\circ$ , 图 6 中夹角  $\theta \approx 5.8^\circ$ . 小车的多个周期运行轨迹分别如图 7 和图 8 所示.

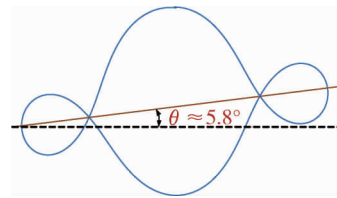
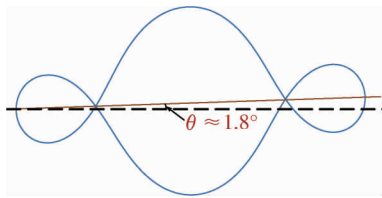


图 5  $(L_1, L_2, L_3) = (26.2, 77.7, 37.2)$  的第一个周期运行轨迹

图 6  $(L_1, L_2, L_3) = (25.8, 77.6, 36.8)$  的第一个周期运行轨迹

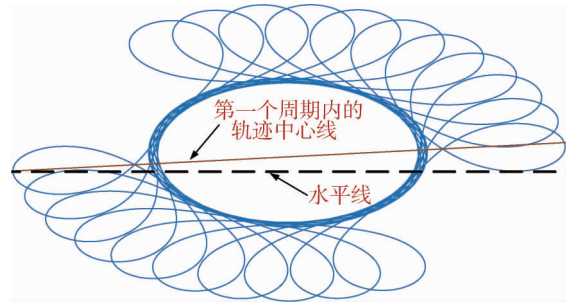
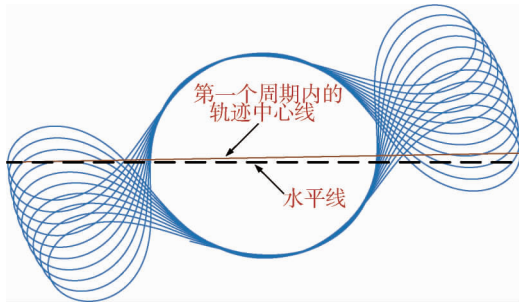


图 7  $(L_1, L_2, L_3) = (26.2, 77.7, 37.2)$  的多个周期运行轨迹

图 8  $(L_1, L_2, L_3) = (25.8, 77.6, 36.8)$  的多个周期运行轨迹

由图 7 和图 8 可知:随着夹角的增大,轨迹重合度变差.结合图 5 和图 6 可知:根据小车第一个周期的运行轨迹即可判断轨迹的重合度,轨迹重合度和轨迹中心线与水平线的夹角  $\theta$  有关,且夹角越大,小车的轨迹重合度越差.数学上常以斜率  $K$  表示直线的倾斜程度,即夹角  $\theta$  的大小,中心线的斜率  $K$  与轨迹交叉点的坐标  $A'(x_1, y_1)$ ,  $B'(x_2, y_2)$  间的关系为

$$K = \tan\theta = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2). \tag{6}$$

当  $K > 0$  时,多个周期的运行轨迹沿逆时针方向旋转,且  $K$  越大,旋转角度越大,即轨迹重合度越差;当  $K < 0$  时,多个周期的运行轨迹沿顺时针方向旋转,且  $K$  越小,旋转角度越大,即轨迹重合度越差;当  $K = 0$  时轨迹的重合度达到最优.为了统一表示,本文以轨迹中心线斜率的绝对值  $|K|$  作为轨迹重合度的评价指标,轨迹重合度随着  $|K|$  的增大而变差.

### 2.2 结构优化设计

根据初选结构参数得到第一个周期内的双“8”运动轨迹,运动轨迹如图 9 所示.基于轨迹重合度的评价方法,可得轨迹中心线斜率的绝对值  $|K| = 0.0277$ ,且第一个周期的运动轨迹沿逆时针方向旋转,多个周期的运动轨迹如图 10 所示.

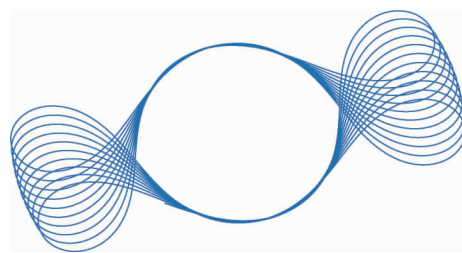
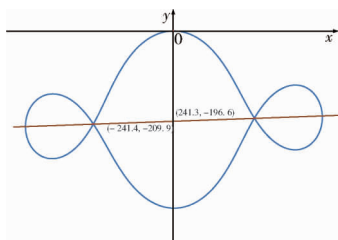


图 9 初选数据下的第一个周期的轨迹

图 10 初选数据下的多个周期的轨迹

由图 10 可知:初选参数下的运行轨迹重合度较差.为得到重合度较好的运行轨迹,以中心线斜率的绝对值  $|K|$  最小为目标建立 RSSR 机构优化模型:

$$\begin{aligned} \min f &= |K|. \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 25.8 \leq L_1 \leq 26.2; \\ 77.3 \leq L_2 \leq 77.7; \\ 36.8 \leq L_3 \leq 37.2. \end{cases} \end{aligned} \tag{7}$$

采用等分区间法分别将 3 个自变量的取值区间 5 等分,选取各等分点的参数值进行组合,共有  $5^3$  即 125 组数据,等分点的示意图如图 11 所示.

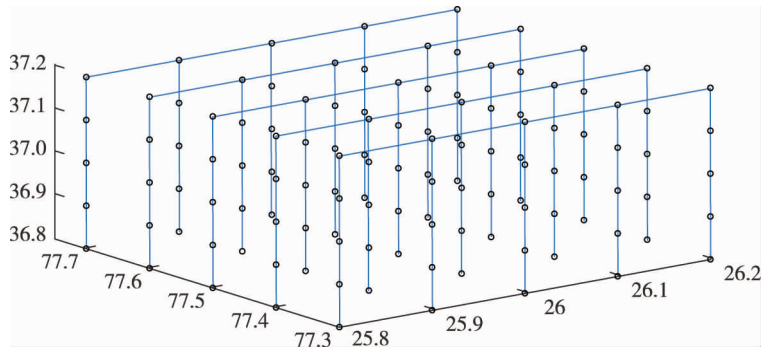


图 11 参数取值

运用 MATLAB 对以上 125 组参数下的运行轨迹重合度进行分析,运行结果如表 1 所示.

表 1 125 组结构参数下的运行结果

序号	$x_1$	$y_1$	$x_2$	$y_2$	$ K $
1	-241.4	-206.3	241.2	-195.1	0.023 2
2	-240.6	-195.6	240.4	-192.4	0.006 7
3	-239.5	-185.1	239.3	-189.9	0.010 0
4	-238.4	-174.8	238.2	-187.2	0.026 0
5	-237.0	-164.8	237.3	-184.6	0.041 7
6	-241.6	-207.7	241.4	-195.2	0.025 9
7	-240.8	-197.0	240.5	-192.5	0.009 3
8	-239.7	-186.4	239.5	-190.0	0.007 5
...	...	...	...	...	...
78	-240.1	-191.5	239.8	-191.8	0.000 6
...	...	...	...	...	...
121	-242.7	-258.1	244.9	-208.3	0.102 1
122	-242.7	-246.6	244.1	-205.8	0.083 8
123	-242.5	-235.3	243.3	-203.3	0.065 9
124	-242.1	-224.3	242.4	-200.7	0.048 7
125	-241.5	-213.4	241.4	-198.2	0.031 5

以  $|K|$  最小为目标,获得最优组合解为  $(L_1, L_2, L_3) = (26.0, 77.7, 37.2)$ , 此时运行轨迹中心线斜率的绝对值  $|K| = 0.000 6$ . 优化前后运行多个周期的轨迹如图 12 所示,由图 12 可见,优化后的运行轨迹高度重合.

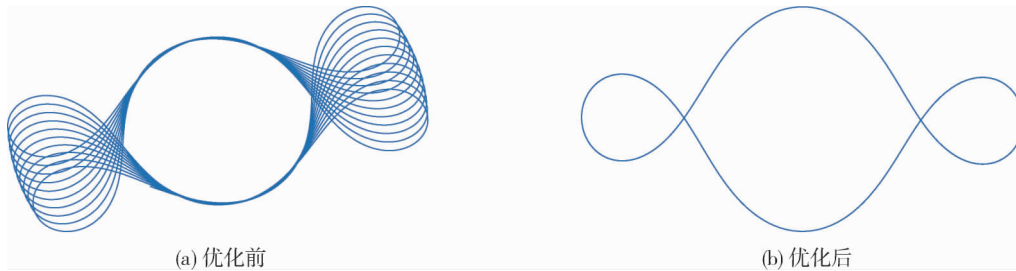


图 12 优化前后的运行轨迹

### 3 结论

1) 建立了无碳小车的数学模型,明确了小车四杆机构各参数间的函数关系.

2) 根据四杆机构的函数关系,基于模拟运行轨迹,分析了轨迹中心线与水平线的夹角与轨迹重合度之间的关系,确定了将轨迹中心线斜率的绝对值  $|K|$  作为轨迹重合度的评价指标,且轨迹重合度随着  $|K|$  的增大而变差.若  $K > 0$ ,则小车的运行轨迹沿逆时针方向旋转;若  $K < 0$ ,运行轨迹沿顺时针方向旋转.

3) 建立了无碳小车轨迹优化模型,通过等分区间法得到了小车运行轨迹的最优解,即  $L_1 = 26 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 77.7 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 37.2 \text{ mm}$ , 将其与初选值进行比较后确认该运行轨迹最佳.

4) 本文选择的优化设计分析方法和所得结论可以适用于工训大赛的多种比赛形式,并对其设计和调车过程具有重要的理论指导意义.

#### 参考文献:

- [1] 余江鸿,邱显焱,汤迎红.基于学科竞赛的机械设计课程设计教学改革与实践[J].机械设计,2018,35(s2):258-260.
- [2] 李元良,张洪双,曹钊源,等.无碳小车轨迹的逆向分析方法[J].机械设计,2017,34(8):76-79.
- [3] 高文英,王娜,陈璐,等.S型无碳小车的参数优化与试验[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2018,30(3):41-43.
- [4] 王政,何国旗,胡增.基于 ADAMS 软件的无碳小车转向机构设计[J].湖南工业大学学报,2013,27(5):28-32.
- [5] 季元进,任利惠,顾建.利用变心齿轮传动的无碳小车的机构创新设计[J].机械设计,2014,31(3):71-74.
- [6] 曹斌,张海波,朱华炳.基于槽轮机构的8字轨迹无碳小车设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(6):661-665.
- [7] 胡增,何国旗,王政,等.基于 Adams 软件的单轮驱动无碳小车车轮布局设计[J].湖南工业大学学报,2013,27(4):53-56.
- [8] 田国富,徐远,孙书会.新型无碳小车的设计与仿真[J].机械制造,2018,56(10):49-52.
- [9] 张春,郑应彬,马永昌.三轮式重力势能小车大角度转弯性能优化[J].机械设计,2014,31(10):50-55.
- [10] 刘洋,姜吉光,谢醇.基于“轨迹分析法”的无碳小车微调机构的创新设计[J].机械传动,2015,39(12):83-87.
- [11] 崔素华,张景梅,杨松林,等.RSSR 机构的 ADAMS 参数化建模及优化技术研究[J].河北工业科技,2019,36(1):1-6.
- [12] Tank E, Parlaktas V. A new type of compliant spatial four-bar (RSSR) mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(5): 593-606.
- [13] Sun H G, Zhou Y. Kinetic Analysis of Spatial RSSR Mechanism by Analytical Method[J]. Advanced Materials Research, 2011, 215: 320-326.
- [14] 吴新良,刘建春,郑朝阳.重力驱动的避障小车设计与制造[J].机械设计,2014,31(10):25-28.
- [15] 黄伟,孙笑,黄飞虎.以正弦机构控制转向的无碳自行车研究[J].机械设计,2018,35(8):30-35.
- [16] 孙亚军.基于空间 RSSR 机构 FSAE 赛车后轮悬架与转向机构的优化设计[D].太原:太原理工大学,2017.
- [17] 韩书葵,节茂岩,林传熙,等.“双8字”无碳小车寻迹原理研究及结构设计[J].机械传动,2019,43(3):60-64.
- [18] 陈雷,刘同义,许同乐.基于 RSSR 机构的无碳小车运动分析及优化[J].山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(1):51-55.