

开环轨迹太阳能小车设计与仿真分析

刘江宁^a, 周 帅^b, 刘洋洋^a, 李向阳^a

(沈阳航空航天大学 a. 工程训练中心, b. 国际教育学院, 沈阳 110136)

摘要: 为了满足太阳能小车开环轨迹运动要求, 提出了一种太阳能小车的设计制作方法。首先, 通过使用 B 样条曲线, 将特征点坐标拟合出理想的开环轨迹曲线, 并利用 MATLAB 软件对规划轨迹进行分析和优化, 生成凸轮轮廓线。其次, 根据总体功能要求, 设计太阳能小车的整体结构、传动机构及转向微调机构。然后, 运用仿真软件对凸轮轨迹进行仿真分析和优化, 并组装小车电路模块。最后, 进行小车实际行驶测试, 通过调整微调机构改变前轮偏移角度, 提高小车的轨迹运行精度。实验结果表明, 制作的小车运行稳定, 能够顺利通过所有预定特征点。

关键词: 太阳能小车; 开环轨迹; 凸轮轮廓; 微调机构; 仿真分析

中图分类号: TH112

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2025.05.006

Design and simulation analysis of open-loop trajectory solar-powered car

LIU Jiangning^a, ZHOU Shuai^b, LIU Yangyang^a, LI Xiangyang^a

(a. Engineering Training Center, b. College of International Education, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To meet the requirements for open-loop trajectory motion of a solar-powered car, a design and fabrication method was proposed for a solar-powered car. Firstly, by using B-spline curves, the characteristic points were fitted to generate an ideal open-loop trajectory curve. MATLAB software was then utilized to analyze and optimize the planned trajectory to produce the cam profile. Next, based on the overall functional requirements, the overall structure, transmission mechanism, and steering fine-tuning mechanism of the solar-powered car were designed. Subsequently, simulation software was employed to perform simulation analysis and optimization of the cam trajectory, and the car's circuit modules were assembled. Finally, actual driving tests of the car were conducted. To improve the trajectory accuracy of the car, the front wheel offset angle was modified by adjusting the fine-tuning mechanism. Experimental results demonstrate that the car fabricated using this method operates stably and successfully passes through all predetermined characteristic points.

收稿日期: 2025-01-06 修回日期: 2025-04-15 接受日期: 2025-04-20

基金项目: 辽宁省教育厅基础科研项目(项目编号: JYT2020073)。

作者简介: 刘江宁(1985—), 男, 江苏泗阳人, 实验师, 主要研究方向为激光加工、逆向工程, E-mail: ljndzyx@163.com。

Key words: solar-powered car; open-loop trajectory; cam profile; fine-tuning mechanism; simulation analysis

太阳能小车的设计理念是推广低碳环保,实现可持续发展的目标^[1]。以往的太阳能小行驶路线大多是闭环路线,从S型轨迹、双8字形轨迹发展到多桩环形轨迹^[2-4]。本文太阳能小车的路线采用开环轨迹路线,打卡指定特征点,包括A—J 10个点位,并利用传感器打卡记录,同时语音播报。

1 小车行驶轨迹分析

1.1 打卡点位

太阳能小车打卡点位及坐标如表1所示。

表1 打卡点位及坐标

序号	特征点	坐标x/mm	坐标y/mm
1	A	5 588	713
2	B	4 463	375
3	C	2 925	825
4	D	2 175	1 500
5	E	375	788
6	F	600	2 550
7	G	375	2 738
8	H	900	3 938
9	I	1 725	5 250
10	J	3 188	5 625

1.2 拟合行驶曲线

小车转向轮的转弯半径 R_0 可以表示为

$$R_0 = \frac{1}{K} = \frac{[\varphi'^2(t) + \omega'^2(t)]^{\frac{3}{2}}}{[\varphi'(t)\omega''(t) + \omega'^2(t)\varphi''(t)]} \quad (1)$$

式中: K 为行驶轨迹的曲率; $\varphi(t)$ 为 x 坐标与变量 t 之间的函数; $\omega(t)$ 为坐标与变量 t 之间的函数。

在设计凸轮时,行驶距离 S 与轨迹曲率 K 阶数相等。由于凸轮加速度不应有突变情况,则凸轮廓线应具有2阶连续性,所以行驶路线

的方程应该有4阶及以上连续性。高次多项式曲线计算复杂,同时容易产生震动^[5]。贝塞尔曲线修改不方便,不容易达到连续性要求^[6-8]。

B样条曲线在逼近特征多边形上具有更高的精度,克服了多项式曲线在解决此类问题上的不足,可以满足要求。 m 阶 n 次B样条曲线公式^[9]为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_{j+i} N_{i,m}(t), \quad t \in [0, 1] \quad (2)$$

式中: P_{j+i} 为控制点数; $N_{i,m}(t)$ 中, i 为第 i 个 m 阶B样条函数。

B样条曲线连续方程为

$$\sum_{i=0}^5 P_{j+i} N_{i,m}(1) = \sum_{i=0}^5 P_{j+i+1} N_{i,m}(0) \quad (3)$$

式(3)中,每两条连续曲线的7个控制点 P_j 到 P_{j+6} 均符合上述公式。经计算,其应符合以下条件

$$\begin{bmatrix} N'_{0,6}(1) \\ N'_{1,6}(1) \\ N'_{2,6}(1) \\ N'_{3,6}(1) \\ N'_{4,6}(1) \\ N'_{5,6}(1) \\ N'_{5,6}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N_{0,6}(0) \\ N_{1,6}(0) \\ N_{2,6}(0) \\ N_{3,6}(0) \\ N_{4,6}(0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于该样条曲线具有4阶连续性,式(4)可以表示为

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^5 \sum_{i=0}^5 P_{j+i} N'_{i,m}(1) = \sum_{i=0}^5 \sum_{i=0}^5 P_{j+i+1} N'_{i,m}(0) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^5 P_{j+i} N'_{i,m}(1) = \sum_{i=0}^5 P_{j+i+1} N'_{i,m}(0) \end{cases} \quad (5)$$

可得其应满足以下条件

$$\begin{bmatrix} N'_{0,6}(1) \\ N'_{1,6}(1) \\ N'_{2,6}(1) \\ N'_{3,6}(1) \\ N'_{4,6}(1) \\ N'_{5,6}(1) \\ N'_{5,6}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N'_{0,6}(0) \\ N'_{1,6}(0) \\ N'_{2,6}(0) \\ N'_{3,6}(0) \\ N'_{4,6}(0) \\ 0 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} N'_{0,6}(1) \\ N'_{1,6}(1) \\ N'_{2,6}(1) \\ N'_{3,6}(1) \\ N'_{4,6}(1) \\ N'_{5,6}(1) \\ N'_{5,6}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N_{0,6}^{(4)}(0) \\ N_{1,6}^{(4)}(0) \\ N_{2,6}^{(4)}(0) \\ N_{3,6}^{(4)}(0) \\ N_{4,6}^{(4)}(0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于样条曲线通过起点和终点时,在6个控制点 P_i 到 P_{i+5} 中,3个点 P_{i+1} 、 P_{i+2} 和 P_{i+3} 需重合并作为自身曲线初始点,且5个点 P_i 、 P_{i+1} 、 P_{i+2} 、 P_{i+3} 和 P_{i+4} 共线,可知其需满足如下方程

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^5 P_{i+j} N_{j,6}(0) = P_{i+1} \\ P_i + P_{i+4} = 2P_{i+1} \\ P_{i+1} = P_{i+2} = P_{i+3} \end{cases} \quad (7)$$

将上述方程联立求解,并选择合适的起始点位和控制点,得到小车的初始运行轨迹。

为了增大小车行驶过程中对特征点的覆盖面积,尽可能增大踩点概率,经过多次优化,调整轨迹平滑度,得到太阳能小车的最终行驶轨迹,如图1所示,图1中圆点为10个需打卡的点位。

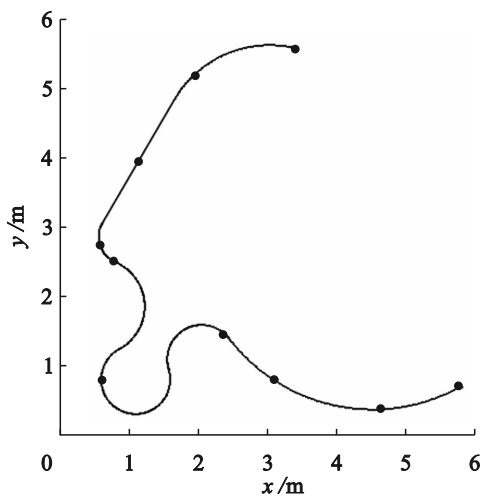


图1 太阳能小车的最终轨迹

2 小车结构设计

2.1 整体结构设计

小车结构包括:用于安装小车各部件的车架、小车的前轮及控制转向的前叉、小车的后轮及后轮传动机构、齿轮啮合形成的减速传动机构、小车动力机构、控制转向的凸轮机构及微调机构^[10-12]。小车整体结构如图2所示,小车部分零件参数如表2所示。

2.2 传动机构

为了保证传动精度与平稳性,在设计传动机构时应该尽可能减少传动齿轮数量及传动

级数。本文中小车传动机构齿轮采用两级传动,第一级传动为动力传动齿轮,第二级传动机构为减速机构,传动机构简图如图3所示。经过计算,小车打卡所有点位坐标行驶距离为13 150 mm。

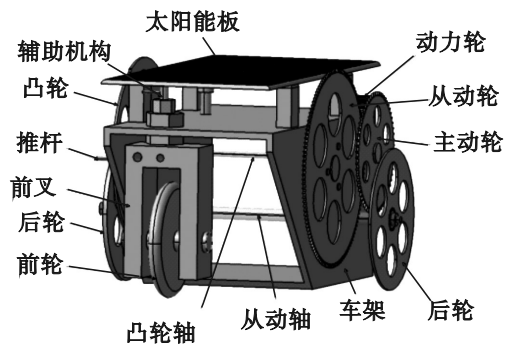


图2 小车整体结构

表2 小车部分零件参数表

序号	名称	方程/设计值	数值
1	模数/mm	0.5	0.5
2	齿轮1齿数 z_1 /个	107	107
3	齿轮2齿数 z_2 /个	12	12
4	齿轮3齿数 z_3 /个	218	218
5	齿轮4齿数 z_4 /个	44	44
6	后轮直径 d_1 /mm	97.5	97.5
7	前轮直径 d_2 /mm	50	50
8	中心距 $1a_{12}$ /mm	$(z_1 + z_2) \times m/2$	65.5
9	中心距 $2a_{34}$ /mm	$(z_3 + z_4) \times m/2$	32.6

传动机构的总传动比为

$$n_{\text{总}} = \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} \quad (8)$$

式中: $z_1=107$, $z_2=12$, $z_3=218$, $z_4=44$,可计算出 $n_{\text{总}}=44$ 。

大齿轮采用不锈钢、小齿轮采用黄铜材料,保证了齿轮的强度,同时对齿轮与左后轮进行简化设计,减少了小车传动机构的零部件数量,同时减小了小车的质量。

2.3 微调机构

小车主要是由太阳能提供动力,再由电机传递到机械传动部件,驱动小车行驶。但由于小车及零部件在制造、装配过程中可能出现误

差,尤其是凸轮的加工及装配误差,导致小车无法按照设计轨迹正常行驶。因此,设计了一种微调机构,通过旋转螺母调整推杆和凸轮的间隙,微调小车的前轮转角,矫正了上述误差,确保小车能够按照规划的轨迹行驶,微调机构如图 4 所示。

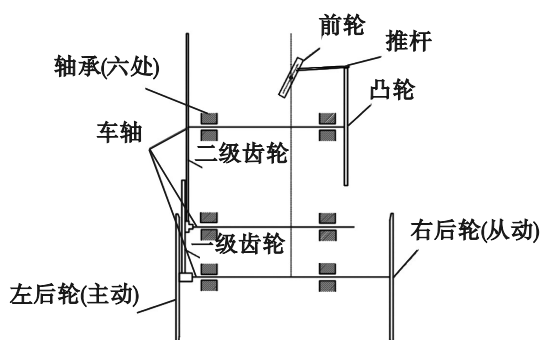


图 3 传动机构简图

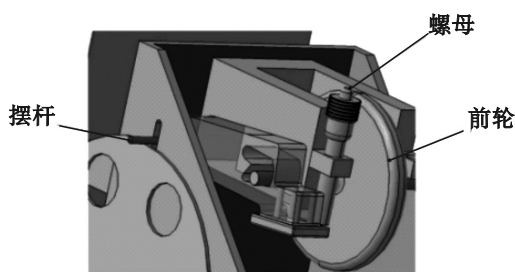


图 4 微调机构图

3 凸轮的优化设计

3.1 凸轮廓线的设计

开环轨迹路线不规整,部分点位之间的曲率变化较大。间歇运动机构结构复杂、拆装繁琐、精度要求高^[13],无法很好地发挥机构的作用。而凸轮机构具有可靠性高、运动控制精确、结构紧凑等优点,可以确保小车按照上述轨迹的行驶。小车的机构运动简化图如图 5 所示。

其中: L_1 为前后两轮轴的距离; L_2 为 2 个后轮外表面之间的距离; α 为前轮转动角度; R_0 为转弯半径; r 为凸轮基准直径; m 为凸轮内侧与前轮轴之间垂直方向的距离。凸轮廓线的具

体计算方法如下:

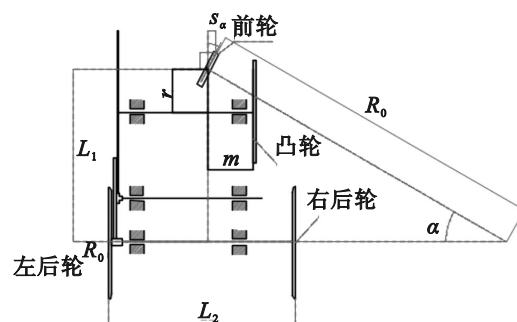


图 5 小车的机构运动简化图

小车凸轮的半径是根据凸轮轮廓表面与推杆直接接触而导致的推拉方式确定的,选用与凸轮接触的推杆直径为 3 mm。

当车体左转时,推杆与凸轮内表面轮廓线之间为点接触,经过计算得出每个点的曲率 ρ ,轨迹上各点的曲率半径 R_0 为

$$R_0 = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

则可得到凸轮半径的计算公式。

$$r_1 = r - \frac{(m + 1.5)L_1}{R_0} \quad (10)$$

当右转时,推杆与凸轮外表面轮廓线之间点接触,可得到凸轮半径的计算公式。

$$r_1 = r + \frac{(m + 1.5)L_1}{R_0} \quad (11)$$

依据小车行驶轨迹的总长度 s ,计算出小车各段轨迹 s_i 及所占总体轨迹的比例,由此可以计算出各段轨迹所占凸轮的角度为

$$\alpha = \frac{s_i}{s} \times 360^\circ \quad (12)$$

凸轮的基准直径 r 与凸轮的轮廓密切相关, r 变大,凸轮的基圆半径就变大,整个凸轮就变大,凸轮的轮廓变化率变小,则压力角变小。同时,凸轮的轮廓与凸轮内侧与小车中心线的距离 k 和小车前、后两轮的轴距 d 相关,距离 k 变大,凸轮的轮廓变化率变大,则压力角变大。轴距 d 变大,凸轮的轮廓变化率变小,则压力角变小。测量小车基准直径 r 后,凸轮的材料选择厚度为 1 mm 的钢板。

3.2 凸轮的优化与仿真

在利用 MATLAB 进行拟合分析时,参数的设置尤为重要。首先,设定初始参数 r 为 35 mm、 m 为 35 mm、 L_1 为 125 mm,通过 MATLAB 进行拟合分析,得到凸轮仿真轮廓线如图 6a 所示。在此参数组合下,凸轮轮廓的曲率变化较大,导致压力角偏大,这可能会增加传动机构的磨损并影响小车的运动平顺性^[14-15]。

为进一步优化凸轮轮廓,将参数调整为 r 为 40 mm、 m 为 30 mm、 L_1 为 125 mm 时,分析得到凸轮仿真轮廓线如图 6b 所示。与图 6a 相比,图 6b 中的凸轮轮廓曲率略有减小,但优化效果并不显著。

进一步综合考虑小车凸轮的压力角、运动平顺性及整体尺寸的限制,对参数进行优化调整,最终选取 r 为 45 mm、 m 为 25 mm、 L_1 为 115 mm,通过 MATLAB 拟合分析得到优化后的凸轮仿真轮廓线,如图 6c 所示。优化后的凸轮轮廓曲率变化更加平缓,压力角显著减小,能够有效降低传动机构的摩擦损耗,增强小车的运动稳定性,提高运行效率。

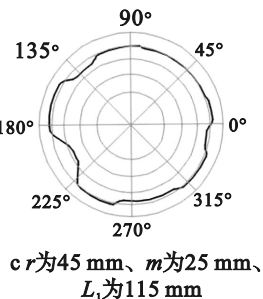
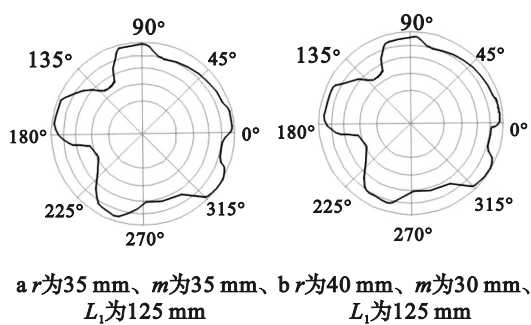


图6 凸轮仿真轮廓线

4 电路模块设计

小车电路结构如图7所示。小车所用的太阳能板由多个光伏电池组成,当太阳光照射到太阳能板时,光子与光伏电池中的半导体材料相互作用,产生光生伏特效应,从而将光能转化为电能。在小车运行前,电能通过充电储存在超级电容中。

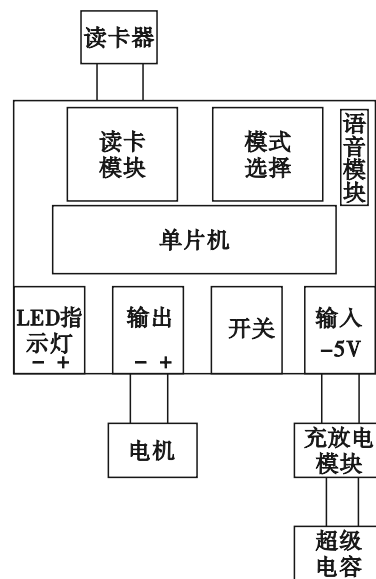


图7 电路结构

当小车开始运行时,需要将超级电容调为放电档,使用的超级电容模组最大电压为 7.5V。为避免实验过程中主控板因电压过大而被烧坏,在实际调试过程中需要利用充放电模块对电能进行调节,将主控板的供电电压调为 5V,最大输出电流为 2A。最后,通过电机将电能转化为机械能,驱动齿轮带动小车前进。

5 仿真与行驶验证

5.1 仿真实验

使用 MATLAB 软件对行驶轨迹进行分析,其中曲率最大值 k_{\max} 为 0.002 796,那么曲率半径的最小值 R_{\min} 为 361.14 mm,小车车长 L_1 为 110 mm,主动轮与小车中心的距离 d_1 为 60 mm,可以计算

出小车最大转角 θ_{\max} 为 20.07° ,转向部分设计合理。

同时,使用MATLAB软件分析凸轮轮廓线的曲率半径,曲率最大值 k_{\max} 为0.348,曲率半径的最小值 R_{\min} 为2.87 mm,推杆机构工作稳定、可靠,凸轮设计具有可行性。

最后,将点位信息输入MATLAB中进行小车行驶路线仿真,验证小车的理论设计的正确性,通过输入小车电机转速、传动比及凸轮轮廓线等参数后,输出的小车仿真轨迹如图8所示。

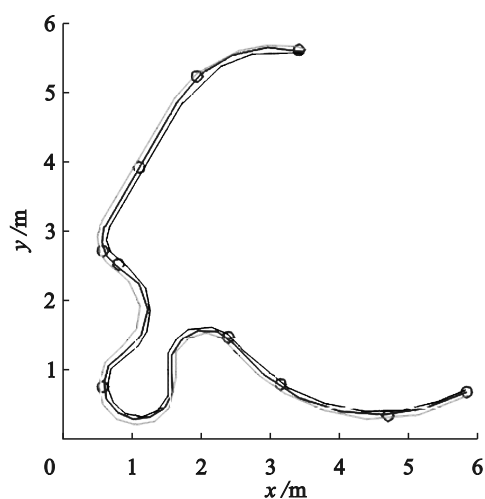


图8 小车仿真轨迹

5.2 实际行驶验证

在保证小车性能稳定的前提下,简化小车结构,选择质量较小、强度满足要求的材料,车架采用铝合金型材,车轮、凸轮、部分齿轮采用1 mm厚不锈钢板切割制成,小车外壳采用3 mm厚的亚克力板制成。辅助太阳能电池板、超级电容模组、稳压、充电电路PVB板等零部件,小车外形图如图9所示。

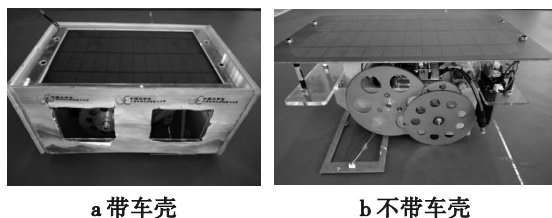


图9 小车外形图

在规定的路线图上,进行实际行驶验证。经过微调机构、发车位置、角度的调整,小车行驶稳定,能够打卡、播报全部10个特征点。

6 结论

利用B样条曲线对固定打卡点进行轨迹拟合,用MATLAB软件分析优化后得到凸轮结构,最后设计得到小车的方法整体效率较高,可以根据所需行驶轨迹的不同而快速调整凸轮形状,规划出不同的运动轨迹。采用不锈钢板材料切割制成的凸轮,材料硬度高,凸轮边缘不易磨损,可以保证重复实验时的精度。研究发现,凸轮基圆直径及转向推程对小车行驶轨迹影响较大,因此,在设计小车时应该设置转向微调机构,以满足小车轨迹调整的需要。

本文的小车设计、制作、微调及仿真方案具有通用性,可以为以后工程小车类竞赛及无碳小车的设计提供一定的参考。

参考文献(References):

- [1] 张楷铨,修峰翼,张予,等.基于凸轮机构的“双8”字型轨迹无碳小车设计[J].机械设计,2020,37(增刊1):24-28.
- [2] 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.
- [3] 王书贤,钱伟,张弛,等.基于Matlab的S形无碳小车优化设计[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(2):222-227.
- [4] 何隆,张亚,王芙蓉,等.基于RSSR机构的无碳小车结构设计与运动分析[J].机械传动,2022,46(11):77-81.
- [5] 梁岗,吴章杰,於伟坤.基于四次贝塞尔曲线的起重转弯非圆曲线轨道优化设计[J].机械工程学,2020,56(19):253-264.
- [6] 姜献峰,梁友栋.有理Bézier曲线的几何连续条件及其应用[J].高等学校计算数学学报,1992(4):52-65.

- [7] 余星宝,杨慧斌,周玉凤,等.改进 A*的 4 阶贝塞尔曲线路径规划[J].轻工机械,2020,38(6):64-67.
- [8] 王肖,涂建秋,李富贵,等.基于贝塞尔曲线的飞行器末端协同制导[J].战术导弹技术,2024(5):151-159,167.
- [9] Gordon W J,Riesenfeld R F. B-spline curves and surfaces [C]//Computer Aided Geometric Design. Florida,1974:95-126.
- [10] 刘一樊,夏寅力,梁镇海,等.基于 MATLAB 的双“8”字无碳小车轨迹仿真分析及其结构设计[J].机械设计,2020,37(7):8-13.
- [11] 徐东镇,陈伟安,李明贤,等.走出多个“8”字形轨迹的无碳小车机构设计[J].机械设计,2020,37(2):39-46.
- [12] 李林松,伍文广.基于 Matlab 的无碳小车转向机构优化设计[J].机械传动,2019,43(2):59-63.
- [13] 刘其南,林权,林立,等.一种结构新颖的“S 环形”无碳小车结构设计[J].现代制造技术与装备,2020,56(10):81-84.
- [14] Chen L, Liu T Y, Xu T L. Kinematics analysis and optimization of carbon-free vehicle of “8”-shaped trajectory based on spatial RSSR mechanism [J]. Science Research, 2019, 7(1):1-7.
- [15] 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.

(责任编辑:吴萍 英文审校:侯宁)