

开环轨迹无碳小车设计与误差分析

张晓敏¹, 张子涵², 李航³, 樊智勇¹

(1. 中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300; 2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;
3. 湘潭大学国际交流学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为实现无碳小车开环轨迹运动,设计并制作了一种基于凸轮机构的无碳小车,可以通过更换凸轮实现不同开环轨迹的运动。首先,结合小车功能要求,设计出小车的整体结构和基本参数,其次,根据已知坐标点利用贝塞尔曲线对理论轨迹进行拟合,获得前轮转角曲线及推程曲线并将其极坐标化得到理论凸轮轮廓,经凸轮原理分析,对凸轮轮廓包络处理,获得实际凸轮轮廓曲线。最后,根据小车实际运行轨迹在MATLAB中进行参数反推仿真,模拟误差产生方式,得出最优调整方案。结果表明,凸轮基圆直径和转向偏距对开环运动轨迹均有影响,其中,凸轮基圆直径对整体运动轨迹影响较大,可作为整体轨迹修正参数;转向偏距对中后程运动轨迹产生旋转偏移,可作为局部轨迹修正参数。文中所述模型及对轨迹误差的研究具有普适性,对开环轨迹小车调试具有较高的指导意义。

关键词:无碳小车;开环轨迹;贝塞尔曲线;MATLAB仿真;误差分析

中图分类号:TH16;TH112 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2025)01-0178-06

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20240725.040

Design and Error Analysis of Open-Loop Trajectory Carbon-Free Trolley

ZHANG Xiaomin¹, ZHANG Zihan², LI Hang³, FAN Zhiyong¹

(1.Engineer and Technology Training Centre, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2.School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3.School of International Exchange, Xiangtan University, Hu'nan Xiangtan 411105, China)

Abstract:In order to realize the open-loop trajectory motion of the carbon-free trolley, we designed and fabricated a carbon-free trolley based on cam mechanism, which can realize the motion of different open-loop trajectories by replacing cams. Firstly, the overall structure and basic parameters of the trolley are designed in combination with the functional requirements of the trolley. Secondly, the theoretical trajectory is fitted according to the known coordinate points using Bessel curves to obtain the front wheel angle curves and pushover curves, and then the theoretical cam contour is obtained by polarization, and the cam contour is enveloped by the analysis of the cam principle, so as to obtain the actual cam contour curve. Finally, according to the actual running trajectory of the trolley, parameter inversion simulation is carried out in MATLAB to simulate the way of generating errors and derive the optimal adjustment scheme. The results show that the cam base circle diameter and steering offset have influence on the open-loop trajectory, in which the cam base circle diameter has a greater influence on the overall trajectory, which can be used as the overall trajectory correction parameter; The steering offset produces rotational offset to the middle and backward trajectories, which can be used as the local trajectory correction parameter. The model and the study of trajectory error described in the paper are universal and of high guiding significance for the commissioning of open-loop trajectory trolley.

Key Words:Carbon-Free Trolley; Open-Loop Trajectory; Bessel Curve; MATLAB Simulation; Error Analysis

1 引言

为实现碳达峰碳中和的绿色发展目标,推广绿色无碳的设计理念,在2023年第8届中国大学生工程实践创新能力大赛中,提出了一种以绿色能源为主题的开环长征路线赛道。

在往届无碳小车大赛中,有诸多研究者对闭环路径的无碳小车进行了研究与设计。文献^[1]采用空间连杆机构RSSR对小车进行转向控制,并对多周期小车运动进行仿真,得出重合度与轨迹斜率 K 之间的关系;文献^[2]也采用RSSR机构对无碳小车进行设

来稿日期:2023-11-04

基金项目:教育部第二批新工科研究与实践项目(E-CXCYYR20200910);天津市普通高等学校本科教学质量与教学改革研究计划项目(B201005902, B231005901);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3122017020);中国民航大学教育教学改革与研究项目(CAUC-2022-B2-022)

作者简介:张晓敏,(1985-),男,天津人,博士研究生,讲师,主要研究方向:机械创新设计与智能制造;
樊智勇,(1979-),男,天津人,硕士研究生,教授,主要研究方向:虚拟仿真技术

计,并提出用MATALB对路径进行仿真和调试;文献^[3]提出用槽轮结合齿条结构来控制转向,分析出8字型轨迹前轮转角变化规律;文献^[4]采用凸轮机构对小车进行设计,通过对微调机构的设计,提高了调车效率;文献^[5]对凸轮控制转向进行研究,并通过实际运动验证了设计的可行性;文献^[6]对无碳小车运动时产生的误差进行研究,得出了分析与优化方案;文献^[7]提出一种拉格朗日有限元法,结合罚函数对凸轮轮廓分析计算。其他学者也分别从凸轮推杆转向^[8]、三维软件仿真^[9]、基于RSSR的曲柄槽轮^[10]、槽轮^[11]、不完全齿轮^[12]及曲柄滑块^[13]角度对无碳小车进行研究设计。

相较于往届闭环赛道,本届开环赛道不仅在赛道形式上进行了创新,同时对小车尺寸也有一定的限制,对小车整体设计及运动性能提出了更高的要求。而现有关于无碳小车的研究均基于闭环赛道,对开环赛道的运动仿真和误差调节并不适用。

这里基于长征开环路线对小车轨迹及各项结构参数进行数学分析及数值仿真,得出凸轮轮廓;同时结合实际运行路线,在MATLAB中调节各项参数,模拟误差产生方式,从而得出最优调整方案。

2 结构设计

2.1 小车整体设计

本小车整体设计包括:控制转向的前叉和推杆机构、修正凸轮误差的微调机构、平衡力矩的离合机构、减速传动机构、动力转化传动机构及具有差速功能的驱动轮部件,如图1所示。

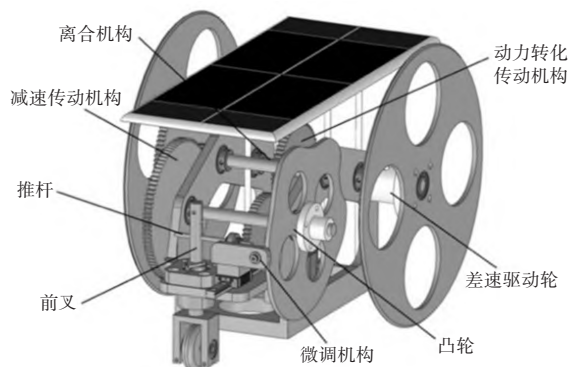


图1 小车整体设计三维模型

Fig.1 Overall Design 3D Model of Trolley

2.2 传动机构

本车设计了两组传动齿轮,一组为动力传输齿轮,另一组为两级减速齿轮,如图2所示。经测量,初赛和决赛阶段,小车运动轨迹长度分别约为18000mm和20500mm。

为保证凸轮旋转一周后,小车能够运行完初赛及决赛的全程,故设计小车主动轮和从动轮直径为185mm。

考虑到实际运行时轨迹长度的误差,故对凸轮设计冗余量,由传动比式可得(1):

$$i = \frac{l_0}{\pi d} \quad (1)$$

代入轨迹长度及小车参数可得后轮至凸轮间传动比为36,为保证齿轮啮合的紧凑性,将两级减速齿轮传动比均设置为6:1,

据此确定出I、II、III轴的位置,同时使传动更加紧凑,设计动力传输齿轮齿比为1:1,达到整车设计需求。

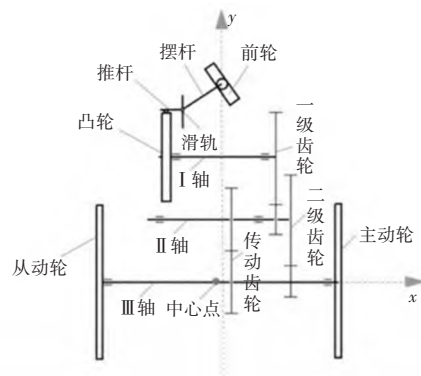


图2 小车机构简图

Fig.2 Sketch of Trolley Mechanism

2.3 微调机构

考虑到零件加工过程中会产生误差,导致小车实际运动轨迹偏离理论轨迹,因此设计微调机构用于轨迹修正,如图3所示。通过旋动细牙螺钉调节推杆与凸轮的间距,减小凸轮因加工产生的偏差,实现小车运动轨迹的校正。

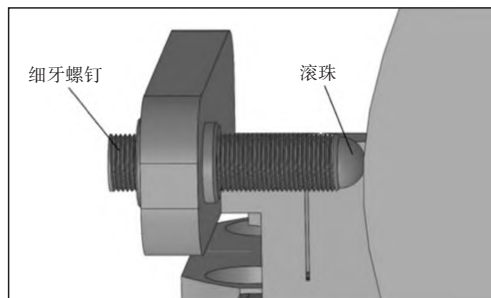


图3 小车微调机构

Fig.3 Trolley Fine-Tuning Mechanism

3 小车运动轨迹理论分析与仿真

3.1 小车理论运动轨迹拟合及数学分析

为展现小车在场地上的运动轨迹,分别在前轮、主动轮和从动轮三轮上设定跟踪点进行轨迹曲线研究。

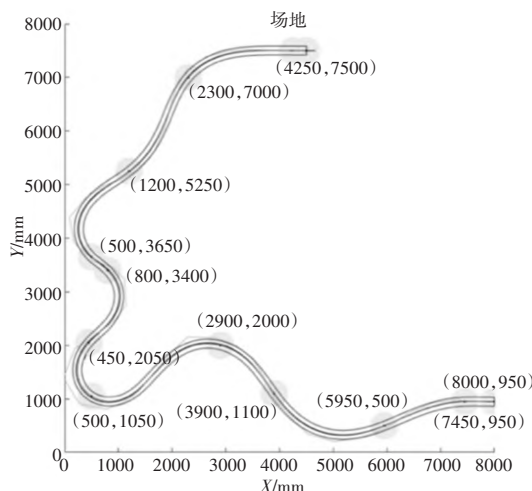


图4 理论运动轨迹拟合曲线

Fig.4 Theoretical Motion Trajectory Fitting Curve

首先建立(8000×8000)的平面直角坐标系,将所要求的打卡点及辅助点依次确定,如表1所示。再将每相邻两打卡点细分为5个新控制点,通过贝塞尔曲线方程和拉格朗日中值定理,连接成一段光滑连续的曲线,如图4所示。

表1 长征路线场地打卡点坐标
Tab.1 Coordinates of the Long March
Route Site Punch Point

序号	标志点	坐标 X/mm	坐标 Y/mm
1	附加点1	8000	950
2	瑞金	7450	950
3	突破第三道封锁线	5950	500
4	血战湘江	3900	1100
5	占领遵义	2900	2000
6	附加点2	450	2050
7	巧渡金沙江	500	1050
8	飞夺泸定桥	800	3400
9	爬雪山	500	3650
10	过草地	1200	5250
11	大会师	2300	7000
12	延安	4250	7500

在这里中为达到良好的拟合精度,选用六阶贝塞尔方程对曲线迭代求解,推导过程如下:

$$P_i^k = \begin{cases} P_i & k=0 \\ (1-t)P_i^k - 1 + tP_{i+1}^k & k>0 \end{cases}$$

$$t \in [0, 1]$$

$$B(t) = P^6(t) =$$

$$\sum_{i=0}^6 C_6^i (1-t)^{6-i} t^i P_i =$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (1-t)^6 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 6(1-t)^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6(1-t) & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^6 \\ t^5 \\ t^4 \\ t^3 \\ t^2 \\ t^1 \\ t^0 \end{bmatrix}$$

$$j = \{0, 1, 2, \dots, 6\}$$

式中: C_6^i —组合数, $P_0, P_1, P_2, \dots, P_6$ 表示6个控制点。

其中,中间曲线为前轮运动曲线,两侧曲线为后轮运动曲线。将小车的运动方式简化放大分析,如图5所示。

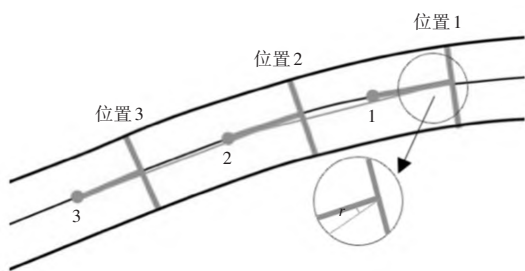


图5 小车运动轨迹分析
Fig.5 Trajectory Analysis of the Trolley

小车从位置1运动到位置3,历经三个转折点1,2,3,最初小车前轮指向点1,到下一位置2时,小车前轮指向点2,因此小车转

过的角度即位置1时小车中心点与位置2时小车前轮的连线所夹角 γ ,由位置2转向位置3同理。在各控制点间插入更多控制点即可获得连续光滑的前轮转角曲线,将图中密集的前轮位置点连线叠加,即得到了小车前轮运动路线,两后车轮在这一变化中连接而成的曲线即为后轮运动曲线。

3.2 小车推程计算

为探究小车在理论轨迹上的运动方式,取整体路径上的部分左转路径进行研究分析,如图5所示。

小车在密集的线段间运动过程中,各点处后轮与轨迹均相切,通过 MATLAB 可以计算出理论运动轨迹上各点处的曲率半径 R_0 。

由三角函数可以计算得出,前轮的转角方程:

$$\theta = \arctan \frac{L_0}{R_0 - d_2} \quad (2)$$

将求得的前轮转角函数关系式带入 MATLAB 中求解,得到前轮转角曲线,如图6所示。

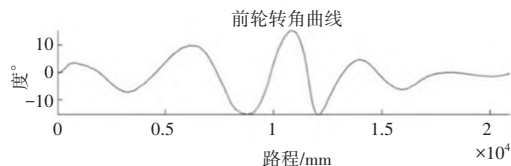


图6 理论轨迹前轮转角曲线
Fig.6 Theoretical Trajectory Front Wheel Angle Curve

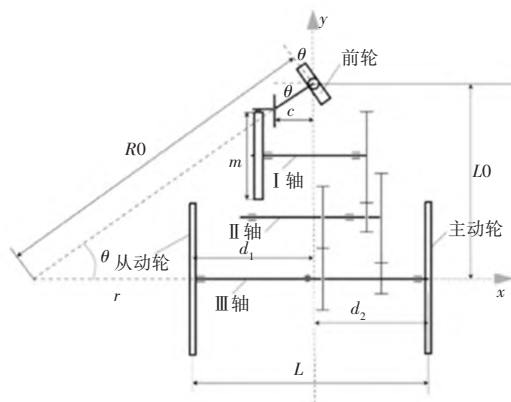


图7 机构运动分析简图

Fig.7 Motion Analysis Sketch of Mechanism

结合式(2)和图7分析可知,在左转状态下,小车的推程可由三角函数推算得出式(3),联立式(2)和式(3)可得推程位移式(4):

$$\tan \theta = \frac{s}{e} \quad (3)$$

$$s(\theta) = e \cdot \tan \arctan \frac{L_0}{R_0 - d_2} = e \cdot \tan \arctan \frac{L_0}{L + r - d_2} \quad (4)$$

式中: s —推程位移; e —转向偏距,即前轮中心点至滑轨距离; m —凸轮直径; d_2 —主动轮偏距; L —车宽; L_0 —车长; r —从动轮到前轮法线交点间距离; R_0 —主动轮与前轮法线交点间距离其中,相关设计参数,如表2所示。

由方程(4),可计算出推程位移曲线,如图8所示。

表2 机构相关参数
Tab.2 Mechanism-Related Parameters mm

d_1	d_2	L_0	m	e
81.5	85.5	158	150	26.5

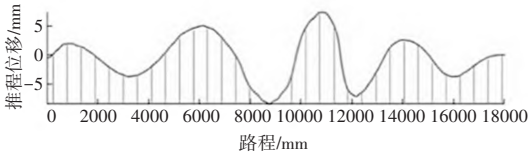


图8 推程位移曲线
Fig.8 Pushover Displacement Curves

3.3 实际路线反推仿真

凸轮^[15]的表面起伏反应了推程位移的变化,理论凸轮的可由基圆半径 $\frac{m}{2}$ 与推程位移叠加而成。对此,首先将推程位移曲线转化为凸轮角 θ -凸轮极径 ρ 的曲线,再将其与凸轮角 θ -基圆半径 $\frac{m}{2}$ 的直线叠加,获得理论凸轮曲线方程式:

$$\rho(\theta)' = \frac{m}{2} + \rho(\theta) \quad (5)$$

将所得理论凸轮曲线极坐标化获得理论凸轮,如图9所示。外侧凸轮,考虑到滚珠半径的影响,故对所得理论凸轮进行包络处理,获得实际凸轮,如图9中内侧凸轮。

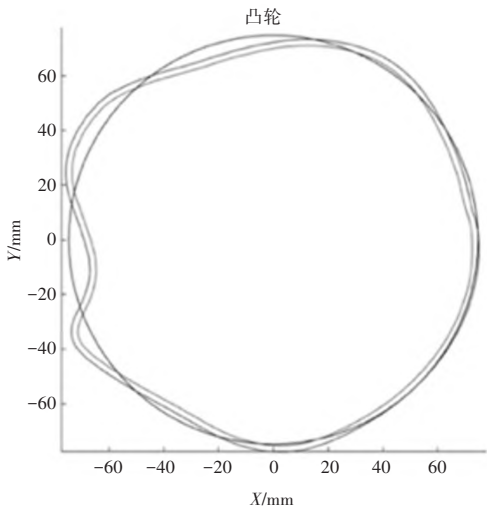


图9 理论凸轮与实际凸轮轮廓曲线
Fig.9 Theoretical and Actual Cam Profile Curves

3.4 实际路线反推仿真

为探究已产生偏差的实际运动轨迹调整方法,对已求凸轮参数进行修改并反推仿真,计算实际运动路线。

首先,将修改后的设计参数输入MATLAB,将其代入式(5)求得新的凸轮曲线方程 $\rho(\theta)''$,再将新凸轮曲线方程逆坐标化获得推程位移方程,代入式(4)和式(2)求得对应的曲率半径 R' 和转角 θ' 。

在这里中初始发车方向向量设为 $(-1,0)$,实际运动曲线由前轮转角积分得出,小车运动随时间步推进,每历经一段时间步,小车车身转动 α 角,如图10所示。

由此可以得出式(6)和式(7),求出前轮单位微元转角上小车

运动路程 dl ,得出小车在单位微元上转过的角度 α_i ,对此进行积分运算,获得实际运动路线。

$$dl = m \cdot i \cdot d\theta_i' \quad (6)$$

$$a_i = \frac{dl}{R'} \quad (7)$$

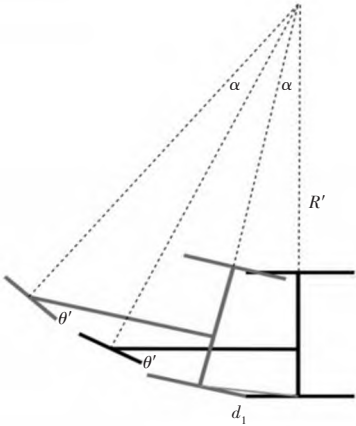


图10 反推实际轨迹原理图
Fig.10 Backpropagation of the Actual Trajectory Schematic

4 误差分析与调整方案

4.1 误差来源分析

太阳能小车是一种由太阳能—电能—机械能三步能量转化的机械结构无碳小车。鉴于本小车一体化设计一体化成型,故其误差主要来源于凸轮加工误差及人为装配误差。

(1)凸轮加工误差。凸轮通常使用线切割、激光切割或3D打印进行加工,其中切割法会产生 $(\pm 0.01 \sim \pm 0.2)$ mm的轮廓偏移,使凸轮基圆半径发生变化;3D打印法在打印过程中由于材料影响,会发生收缩且打印喷嘴打印精度对凸轮实际基圆大小也会产生影响,故实际凸轮变化曲线方程变化,如式(8)所示。

$$\rho(\theta)' = \frac{m}{2} + \rho(\theta) + randi \quad (8)$$

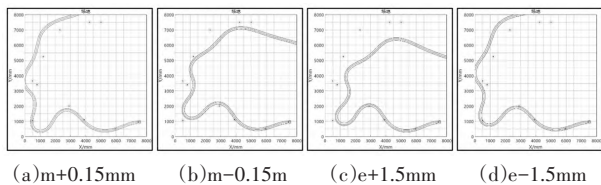
其中, $randi$ 为 $[-0.4, 0.4]$ 间随机数,实际取值以加工误差为准。

(2)人为装配误差。由小车整体三维模型、小车机构简图及推程位移方程可以得出:装配过程中,由于前轮及后驱动轮径向位置无法精确达到设计标准。故实际 e 和 d_2 相比理论值存在偏差,根据式(2)~式(4)计算得出的曲率半径 R 和转角 θ 与理论值也不相同,因此根据式(6)、式(7)对路径积分得出的结果无法与理想轨迹对应。

以上误差会对小车实际运动轨迹产生影响,为消除误差,通常采取提高零件加工精度或通过增加微调装置,手动进行误差补偿的方式,使小车恢复理论运动轨迹。在小车实际运动过程中,会产生各种偏离的轨迹曲线,为了实现对已产生误差的运动轨迹的分析及修正,结合MATLAB进行误差值反推仿真,得到最佳修正方案。

4.2 实际误差分析与调整方案

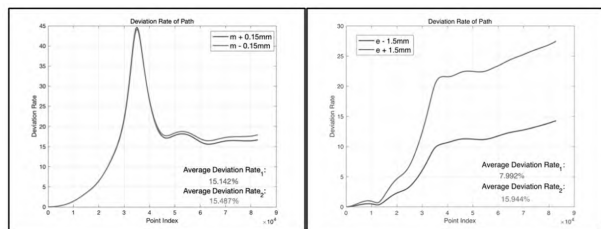
在实际调车过程中常遇到以下四种轨迹偏差,如图11所示。



(a)m+0.15mm (b)m-0.15mm (c)e+1.5mm (d)e-1.5mm

图11 调车过程中的轨迹偏差

Fig.11 Trajectory Deviations During the Actual Shunting Process



(a)凸轮基圆直径误差率分析 (b)前轮转向偏距装配误差率分析
图12 轨迹偏差误差率分析

Fig.12 Analysis of Trajectory Deviation Error Rates

注:取多种凸轮加工产生的误差均值0.15mm为研究对象,取与上述误差形观相似的装配误差值1.5mm。

首先在控制点间分别插入1000个调整点提高路线拟合精度,接着采用欧几里得范数对轨迹误差进行分析,求出实际轨迹点集与对应理论轨迹点集间向量模,最后将其与理论轨迹路线步进长度作商,求得单位点偏差率,通过累加平均获得平均偏差率。

分析图11可知,受凸轮加工误差影响,小车实际运动轨迹绕出发点发生旋转偏移;受装配误差影响,小车实际运动轨迹绕打卡点7巧渡金沙江发生旋转偏移。从误差量分析,凸轮加工偏离设计值0.15mm与装配偏离设计值1.5mm实际运动轨迹相似,说明凸轮加工精度对小车轨迹影响较大,故在实施加工时需预设补偿量,确保加工精度。

从图12(a)中可知,凸轮加工误差对轨迹前程影响呈指数型增长,当小车运动至打卡点5占领遵义后误差率陡然上升,至打卡点7巧渡金沙江误差率升至最高,达45%,由此处运动至打卡点8飞夺泸定桥误差率陡然降低,之后趋于平缓,在16%上下浮动。在打卡点5至打卡点8之间,小车转弯半径减小,运动时前轮转角加速度提高,使整车运动速度加快,滚珠在凸轮上发生滑移,将凸轮加工误差影响效果放大,误差率升高。对比图中两条曲线可知,加工时凸轮产生正偏差相较于产生负偏差,平均误差率更小,故设计加工时可允许正公差加工,方便实际调车更正。

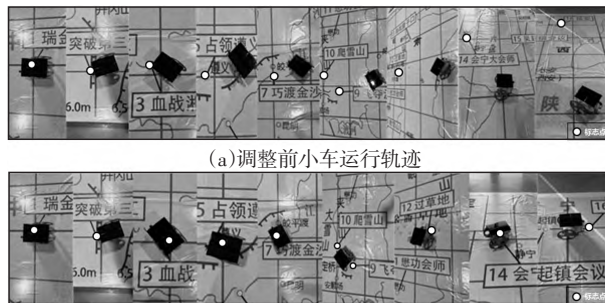
从图12(b)中可知,装配误差在小车出发至打卡点3突破第三道封锁线时影响较小,自此往后至打卡点7巧渡金沙江误差率呈大斜率线性上升,而后误差率呈小斜率线性上升,至运动终止误差率达最大。

对比图中两条曲线可知,装配时转向偏距小于设计值相较于大于设计值,平均误差率更小,故可从靠近推杆方向装配前轮,减小误差对运动轨迹的影响。

5 实物测试

为验证上述分析及结论的合理性,对小车进行实物制造及模拟测试。鉴于零件加工及小车装配时不可避免产生误差,故模拟测试轨迹为验证调整方案的可行性。

通过跟踪相机对小车调整前后运行轨迹进行定时照相,得出小车运行过程图像,如图13所示。



(a)调整前小车运行轨迹

(b)调整后小车运行轨迹

图13 实物测试运行图像对比

Fig.13 Comparison of Physical Test Run Images

受零件加工误差及装配误差叠加影响,调整前小车运行轨迹图13(a)与图11(b)、图11(c)相似,故尝试通过顺时针向内调节细牙螺钉对基圆直径进行初步修正,同时将转向偏距 e 向负方向调节,最终使运动轨迹更接近理想轨迹,成功覆盖10个规定打卡点,如图13(b)所示。验证了MATLAB仿真辅助调节的可行性。

6 总结

这里结合第8届中国大学生工程实践与创新能力大赛的赛程规定,提出了一种开环轨迹太阳能小车的设计方法,可以在不改变车体其他零部件的情况下,仅更换不同形状的凸轮实现小车不同开环轨迹的运动。

(1)根据赛程规定打卡点,结合贝塞尔曲线和拉格朗日中值定理,拟合出理论运动路径,通过理论数学分析和数值仿真求解出理论凸轮。

(2)结合实际运动轨迹反推MATLAB中各项参数获得最佳修正方案,大大加快了调车速度,同时经过实物测试,验证了数值仿真的准确性。

(3)这里研究发现,基圆直径与转向偏距的大小对小车开环轨迹运行具有较大影响,故应在小车设计过程中增加凸轮及转向偏距修正装置。同时,在加工中需设置补偿量,减少调车负担。

文中提到的小车设计方案、实际轨迹规划仿真以及偏离轨迹调节方案具有通用性,可以为将来其他小车的设计和轨迹调节提供工程指导。

参考文献

- [1] 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.
(Chen Lifeng, Wang Linqing, Zhu Pengcheng, 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.)
- [2] 王大伟,侯佳豪,郭成源,等.基于RSSR机构的双“8”字避障无碳小车的设计[J].机械设计,2020,37(5):20-26.
(Wang Dawei, Hou Jiahao, Guo Chengyuan, et al. Design of a double 8-typed obstacle-avoiding carbonless car based on the RSSR mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(5):20-26.)
- [3] 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.
(Xu Dongzhen, Chen Weian, Li Mingxian, et al. Structural design of carbon-free cars for realizing multiple 8-shaped paths [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(2): 39-46.)
- [4] 张楷锬, 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(S1): 24-28.
(Zhang Kaixi, Xiu Fengyi, Zhang Yu, et al. Design of double 8-shaped trajectory carbon-free car based on cam mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(S1): 24-28.)
- [5] 黄海龙, 朱宏. 基于凸轮机构的S轨迹环形赛道无碳小车设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(5): 136-140.
(Huang Hailong, Zhu Hong. Design of carbon-free car on S-shaped circular track based on cam mechanism [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(5): 136-140.)
- [6] 钟樟榕, 万金贵, 朱文华. 无碳小车误差分析与优化方向[J]. 机械设计与制造, 2022(10): 246-250.
(Zhong Zhangrong, Wan Jingui, Zhu Wenhua. Error analysis and optimization for carbon-free car [J]. Mechanical Design & Manufacture, 2022 (10): 246-250.)
- [7] Nga T T N, Xuan T D, VanSy N. Design general cam profiles based on finite element method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(13).
- [8] 何荣华, 肖健聪, 杜凯强, 等. S环形无碳小车结构设计与分析[J]. 机械设计, 2023, 40(3): 48-54.
(He Ronghua, Xiao Jiancong, Du Kaiqiang, et al. Structural design and analysis of S-ring carbonless trolley [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(3): 48-54.)
- [9] 李瑾. 基于三维运动仿真的无碳小车通用设计方法[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(6): 46-48+52.
(Li Jin. Universal design method of carbon-free car based on 3D motion simulation [J]. Mechanical Design and Research, 2022, 38(6): 46-48+52.)
- [10] 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.
(He Long, Zhang Ya, Wang Furong, et al. Structural design and motion analysis of carbon-free trolleys based on the RSSR mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(11): 77-81.)
- [11] 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.
(Liu Yifan, Xia Yinli, Liang Zhenhai, et al. Track simulation and structural design of the double 8-typed carbon-free car based on MATLAB [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(7): 8-13.)
- [12] 韩书葵, 节茂岩, 林传熙, 等. “双8字”无碳小车关键结构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 241-245+249.
(Han Shukui, Jie Maoyan, Lin Chuanxi, et al. The key structure design and system of “double 8-shaped” trajectory carbon-free car [J]. Mechanical Design and Manufacture, 2020(3): 241-245+249.)
- [13] 张强, 陈兵奎, 刘晓宇, 等. 无碳小车S型轨迹的参数调节策略研究[J]. 机械传动, 2019, 43(12): 7-17.
(Zhang Qiang, Chen Binkui, Liu Xiaoyu, et al. Study on the parameter adjustment strategy of S-shaped carbon-free car [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(12): 7-17.)
- [14] Hoang H P, Ngoc Q L. Development of the design and fabrication system for planar cam mechanisms[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 4796.
- [15] Jensen W P. Cam Design and Manufacture, Second Edition [M]. CRC Press: 2020-08-27.

(上接第177页)

- [2] Kim H S, Seo T W, Seo M, et al. Vibration reduction of flexible rope-driven mobile robot for safe faade operation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics: A Joint Publication of the IEEE Industrial Electronics Society and the ASME Dynamic Systems and Control Division, 2021, 26(4): 1812-1819.
- [3] 王恒, 蒋科坚. 基于分段速度规划的机器人臂运动平滑减振方法[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 222-229.
(Wang Heng, Jiang Kejian. Smooth vibration reduction method for robot arm motion based on segmental velocity planning [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 222-229.)
- [4] 李琳, 古智超, 张铁. 面向机器人笛卡尔空间的轨迹运动自适应抑振控制[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 499-506.
(Li Lin, Gu Zhichao, Zhang Tie. Adaptive vibration suppression control for trajectory motion in cartesian space of industrial robot [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(3): 499-506.)
- [5] 付晓东, 陈力. 全弹性平面运动机器人的高精度运动控制和振动抑制算法研究[J]. 计算力学学报, 2021, 38(2): 199-205.
(Fu Xiaodong, Chen Li. Research on high precision motion control and vibration suppression algorithm of elastic-base flexiblejoint and flexiblelink planar motion robot [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(2): 199-205.)
- [6] Ogawa-Morita T. Design and development of cartesian robot for machining with error compensation and chatter reduction [J]. International Journal of Electronics Engineering Research, 2020, 12(2): 95-100.
- [7] 杨太玮, 郑旭东, 徐文福, 等. 考虑迟滞及变形影响的主被动混合驱动绳驱空间机械臂运动学建模及求解[J]. 机器人, 2022, 44(1): 45-54+65.
(Yang Taiwei, Zheng Xudong, Xu Wenfu, et al. Kinematics modeling and solution of hybrid active-passive cable-driven space manipulator considering the effects of hysteresis and deformation [J]. Robot, 2022, 44(1): 45-54+65.)
- [8] 刘茜, 刘传凯, 朱安, 等. 空间机械臂运动控制的地面仿真验证技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 58-67.
(Liu Qian, Liu Chuankai, Zhu An, et al. Ground simulation and verification method for motion control of space manipulator [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 58-67.)
- [9] 史洪松, 敖昕. 一种液压驱动机械臂多关节力矩控制方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(7): 391-395.
(Shi Hongsong, Ao Xin. Multi-joint torque control method of hydraulically driven manipulator [J]. Computer Simulation, 2022, 39(7): 391-395.)
- [10] 袁明新, 王丽丽, 陈卫彬, 等. 融合输入整形和滑模的锻造机器人振动抑制[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 102-111.
(Yuan Mingxin, Wang Lili, Chen Weibin, et al. Vibration suppression for forging robots based on input shaping and sliding mold [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1): 102-111.)