

基于Sobol方法的无碳小车凸轮转向机构装置优化设计

税国民¹ 赵旺初¹ 李策¹ 江彬¹ 王瑞青²

(1. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

(2. 东华大学 物理学院, 上海 201620)

摘要:【目的】无碳小车调试普遍需通过反复调整以减小轨迹偏差, 效率较低。对小车进行误差分析能对路线偏差溯源, 从误差来源优化小车, 能将传统“试错调试”转向“数据驱动设计”, 提高调试效率。【方法】采用Sobol方法对凸轮转向机构参数进行敏感性分析, 基于分析结果优化了小车结构, 调整了加工方法, 提高了关键零部件的制造精度, 并通过仿真与实物模型验证了优化的有效性。【结果】结果显示, 优化后的小车打卡点数从最佳6个提升至稳定8~9个, 实现了显著改进, 为新能源车和无碳小车的性能优化提供了支持和工程实践参考。

关键词: 无碳小车; 误差分析; 凸轮转向机构; 全局敏感性分析; 结构优化; Sobol方法

中图分类号: TH112 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.009

0 引言

在历届中国大学生工程实践与创新能力大赛中, 第十三届新能源车赛项较往届无碳小车赛项增设了更高难度要求: 小车需按序经过10个指定点位。

尽管新能源车与无碳小车在基础结构及凸轮设计上具有共性, 且近年来相关研究不断涌现^[1-8], 但调试环节仍依赖“试错法”, 需反复调整结构与凸轮以优化绕桩表现。试错法可在一定程度上提升小车表现, 但其局限性显著, 调试流程烦琐低效, 且过度依赖经验而缺乏理论指导, 导致调试工作盲目性较强。究其原因, 试错法未充分考虑理论与实际运行间的偏差。此类偏差源于多方面因素, 包括设计模型简化、材料性能波动及加工精度不足等。其中, 作为控制运动方向的核心部件, 转向机构的零件加工质量与装配定位精度不足会直接引起轨迹偏差, 这是路线误差的主要成因。因此, 对转向机构进行系统性误差分析, 是提升调试效率的关键。

对无碳小车进行误差分析, 既可得出轨迹调试的理论依据, 亦可推动设计优化以提升性能。然而, 传统误差分析方法实施难度较高, 相关研究仍存在不足。钟樟榕等^[9]基于机械结构与运动方程归纳出典

型误差类型, 并通过仿真识别出两种主要随机误差, 提出通过提高零件加工精度以优化制造的思路。然而, 该方法需全面优化所有关键零件, 周期长、成本高, 且难以保障装配精度。考虑到不同的转向机构零件尺寸和装配尺寸参数(以下简称尺寸参数)对小车运行线路精准度的影响程度存在差异, 因此, 对尺寸参数进行敏感性分析, 能够系统地评估这些参数变化对小车运行线路的影响程度, 从而为后续的调试工作提供理论依据, 为优化设计提供方向。

针对凸轮转向机构多参数耦合导致的轨迹偏差的非线性问题, 传统局部敏感性分析方法(如单参数扰动法)难以量化参数间的交互效应; 全局分析方法中的Morris方法适用于输入参数数量较多或模型计算成本较高的情况, 计算量小但准确性不高。而Sobol方法^[10-11]避免了上述敏感性分析方法的局限性, 具有明显优势, 其通过方差分解, 可同时评估参数的独立贡献(1阶灵敏度)与多参数协同效应(总效应灵敏度); 适用于非线性模型, 且无须依赖参数线性假设。这一特性与凸轮转向机构设计中关键尺寸参数的多因子耦合特性高度契合, 可为精准识别敏感参数提供理论支撑。

本文使用Sobol方法对凸轮转向机构中的相关参

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220604029121121)

作者简介: 税国民, 男, 2003年生, 四川绵阳人; 主要研究方向为机械工程; 1135530049@qq.com。

赵旺初(通信作者), 男, 1990年生, 江西九江人, 工程师; 主要研究方向为自动化机械设备研发及制造; wangchuzhao@dhu.edu.cn。

引用格式: 税国民, 赵旺初, 李策, 等. 基于Sobol方法的无碳小车凸轮转向机构装置优化设计[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 72-78.

SHUI Guomin, ZHAO Wangchu, LI Ce, et al. Optimized design of cam steering structure for carbon-free car based on Sobol method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 72-78.

数进行全局敏感性分析, 识别并提取出对最终路线结果产生显著影响的敏感参数; 根据分析结果, 对影响敏感参数的零件设计和加工方法进行优化, 实现了零件加工质量与装配精度的双重提升, 不仅提高了小车的运行精度, 还提高了小车运行的稳定性。仿真和实物运行结果均与分析结果表现一致, 即验证了通过Sobol方法分析出关键参数进而优化小车精确运行的可行性。

1 小车凸轮转向机构参数化

小车的定点打卡是通过小车行进并结合凸轮控制前轮转向角度而实现的, 其凸轮转向机构工作原理如图1所示。前轮转向角 γ 计算式为

$$\gamma = \arctan \frac{(R+s)+r-a-c}{b} \quad (1)$$

式中, R 为凸轮基圆半径; s 为凸轮推程; r 为推杆半径; a 为推杆与摆动轴在滑轨方向上的距离; b 为摆动轴与转动轴在垂直滑轨方向上的距离; c 为凸轮轴与转动轴的中心距。

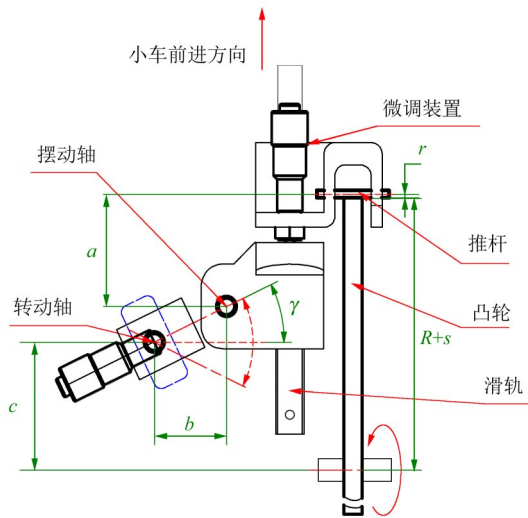


图1 凸轮推杆结构

Fig. 1 Cam-follower mechanism

尺寸参数 R 、 s 、 r 、 a 、 c 和 b 常会因加工方法或装配精度等因素影响产生偏差。由式(1)可知, 尺寸偏差会使实际前轮转向角(以下简称实际转角)与理论前轮转向角(以下简称理论转角)存在偏差, 最终导致小车轨迹终点产生偏移, 如图2所示。小车终点坐标 (x, y) 计算式为

$$\begin{cases} x = \frac{L}{\sin \gamma} \cos \frac{l \sin \gamma}{L} \\ y = \frac{L}{\sin \gamma} \sin \frac{l \sin \gamma}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为前后轮轴线中心距; l 为小车行进的路程。

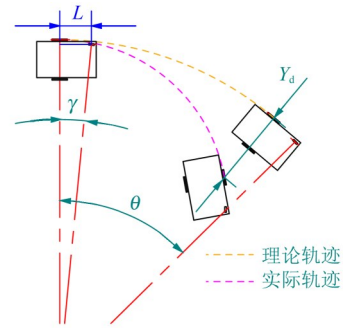


图2 小车运行原理

Fig. 2 Principle of the car operation

小车运行的实际终点 $q(x', y')$ 与理论终点 $p(x_0, y_0)$ 之间的偏差值 Y_d 计算式为

$$Y_d = \sqrt{(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2} \quad (3)$$

凸轮基圆半径 R 的尺寸精度受装配或加工方法的影响; 采购轴自身精度不够会影响推杆半径 r 值; 前轮座装配定位精度直接影响参数 c 、 b 值; 尺寸 a 为尺寸链的封闭环, 其值由 R 、 r 和 s 的值共同确定, 故不考虑尺寸 a 的影响。现重点分析在不同推程 s 情况下 R 、 r 、 c 、 b 这4个关键尺寸参数对轨迹终点偏差值 Y_d 的影响敏感度。

2 关键尺寸参数敏感性分析

2.1 Sobol全局敏感性分析方法

Sobol方法是基于方差的敏感性分析方法, 其原理是: 将多变量函数 Y_b 表示为常数项 f_0 、单因子作用项 $f_u(X_i)$ 和多因子共同作用项 $f_{1,2,\dots,n}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的形式[式(4)], 并计算参数在单因子作用或多因子共同作用下对函数输出方差的贡献情况, 以评定其敏感性。

$$Y_b = f_0 + \sum_{i=1}^n f_u(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{ij}(X_i, X_j) + \dots + f_{1,2,\dots,n}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

输出函数的方差 $V_{\text{var}}(Y_b)$ 可分解为单因子作用方差 V_i 和多因子共同作用方差 $V_{1,2,\dots,n}$, 即

$$V_{\text{var}}(Y_b) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,n} \quad (5)$$

参数1阶灵敏度 S_i 和总效应灵敏度 S_{Ti} 分别为

$$S_i = \frac{V_i}{V_{\text{var}}(Y_b)} \quad (6)$$

$$S_{Ti} = \frac{E_{X_{-i}}[V_{X_i}(Y_b|X_{-i})]}{V_{\text{var}}(Y_b)} \quad (7)$$

式中, V_i 为由参数 X_i 引起的方差, $V_i = V_{\text{var}, X_i}[E_{X_{-i}}(Y_b|X_i)]$ 。

1阶灵敏度表示在其他参数不变的情况下, 每个

参数对输出的贡献情况。总效应灵敏度是考虑所有参数共同作用下单个参数对模型输出结果的影响大小^[12]。

2.2 全局敏感性分析

2.2.1 关键尺寸参数的取值范围

R 、 r 、 c 和 b 这4个关键尺寸参数因相关零件的加工方法或装配工艺等因素会产生一定偏差。基圆半径 R 主要受激光切割工艺和装配定位误差的影响；前轮座装配定位精度直接影响参数 c 和 b 的值。结合小车加工实际，其凸轮加工偏差在 $-0.3\sim 0.1\text{ mm}$ ^[13]，由装配定位引起的误差来源于螺钉与孔之间的间隙，使零件偏离原位置 $-0.3\sim 0.3\text{ mm}$ 。推杆的光轴直径 $2r$ 公差范围是h7。各取值范围如表1所示。

表1 关键参数的取值范围

Tab. 1 Range of values for key parameters 单位:mm

参数	理论值	上限	下限
R	74.00	73.90	73.70
r	1.00	1.00	0.995
c	42.50	42.80	42.20
b	20.00	20.30	19.70

2.2.2 方差计算

一般用蒙特卡洛方法近似分析得到方差计算结果^[14]。

在各参数的取值范围内取 N 个随机数，生成两次，分别得到两个不同矩阵 A 、 B ，结果分别为

$$A = \begin{bmatrix} 73.649 & 0.994\ 4 & 41.893 & 19.703 \\ 73.758 & 0.977\ 3 & 42.002 & 20.662 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 74.341 & 0.997\ 9 & 42.732 & 20.171 \\ 73.754 & 0.980\ 5 & 42.447 & 20.099 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 74.417 & 0.981\ 4 & 42.562 & 20.138 \\ 73.786 & 0.987\ 0 & 43.058 & 19.939 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 74.257 & 0.972\ 3 & 43.368 & 19.024 \\ 74.253 & 0.971\ 6 & 41.760 & 19.674 \end{bmatrix}$$

为估计每个参数的全局敏感性，还需生成 i 个 AB^i 矩阵。其中，模型参数个数对应 i 值。 A 矩阵的第 i 列替换为 B 矩阵的第 i 列，得到 AB^i ，即

$$V_{\text{var}, X_i}[E_{X_i}(Y_b|X_i)] \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(B)_j [f(AB^i)_j - f(A)_j] \quad (8)$$

$$E_{X_i}[V_{X_i}(Y_b|X_i)] \approx \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N [f(A)_j - f(AB^i)_j]^2 \quad (9)$$

$$AB^1 = \begin{bmatrix} 74.417 & 0.994\ 4 & 41.893 & 19.703 \\ 73.786 & 0.977\ 3 & 42.002 & 20.662 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 74.257 & 0.997\ 9 & 42.732 & 20.171 \\ 74.253 & 0.980\ 5 & 42.447 & 20.099 \end{bmatrix}$$

$$\vdots$$

$$AB^4 = \begin{bmatrix} 73.649 & 0.994\ 4 & 41.893 & 20.138 \\ 73.758 & 0.977\ 3 & 42.002 & 19.939 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 74.341 & 0.997\ 9 & 42.732 & 19.024 \\ 73.754 & 0.980\ 5 & 42.447 & 19.674 \end{bmatrix}$$

A 、 B 和 AB^i 矩阵的 j 行均为一个样本，对应一个函数结果 $f(A)_j$ 、 $f(B)_j$ 和 $f(AB^i)_j$ 。使用式(8)、式(9)所示的蒙特卡洛方法可近似得到Sobol方法中的方差数值大小，再与总方差作比，即可获得当前理论转角下各参数的灵敏度数据。

蒙特卡洛方法的估计分析、结果可信度与 N 有关。图3所示为各尺寸参数的1阶灵敏度随样本数 N 的变化。由图3可知，在 N 大于1500后，各尺寸参数的1阶灵敏度随着 N 的增大而趋于稳定。故后文在使用蒙特卡洛方法分析时， N 取1500。

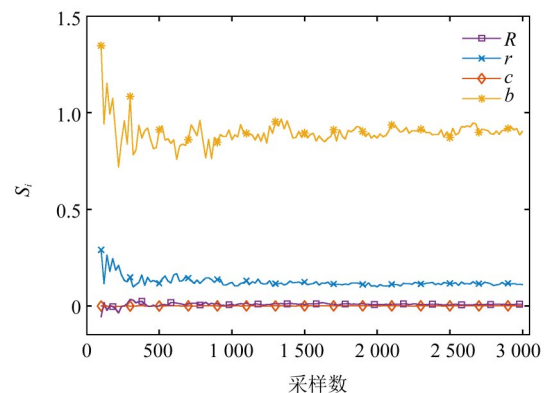


图3 各尺寸参数的1阶灵敏度随样本数 N 的变化

Fig. 3 Variation of the first-order sensitivity of dimensions parameters with the sample size N

实际小车运行过程中，凸轮推程是变化的，前轮转角 γ 也随之变化。不同推程 s 下，各参数的敏感性可能不同。分析不同推程下的各参数敏感性，结果可信度高。

图4所示为小车理论轨迹时前轮转角 γ 的变化情况，其范围为 $(-13^\circ, 3^\circ)$ 。计算该范围内不同理论转角 γ 对应的不同终点位置与理论终点位置的偏差值，同时分析不同理论转角下各参数敏感度，结果分别如图5和图6所示。

由图5可知，在理论转角小于 -3° 时，参数 c 的1

阶灵敏度非常高, 最高达到了 0.9; 参数 R 的 1 阶灵敏度相对参数 b 和 r 的较高, 最高达到了 0.15; 在前轮转角为 $(-3^\circ, 1^\circ)$ 时, 参数 R 和 c 的 1 阶灵敏度出现先下降再升高的现象; 推杆半径 r 的 1 阶灵敏度不高, 影响几乎可以忽略; 参数 b 在前轮转角 0° 左右时, 1 阶灵敏度表现也不高, 相对参数 R 和 c 而言, 其 1 阶灵敏度还是较小, 故对 b 的微调作用不大, 可去掉该微调结构。

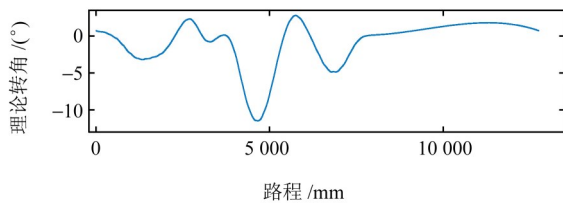


图4 转角变化曲线

Fig. 4 Variation curve of the rotation angle

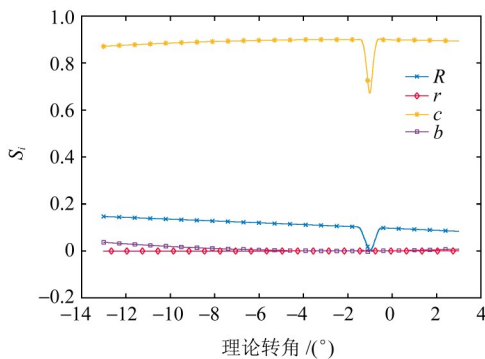


图5 1阶灵敏度随理论转角值变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the first-order sensitivity with the theoretical rotation angle

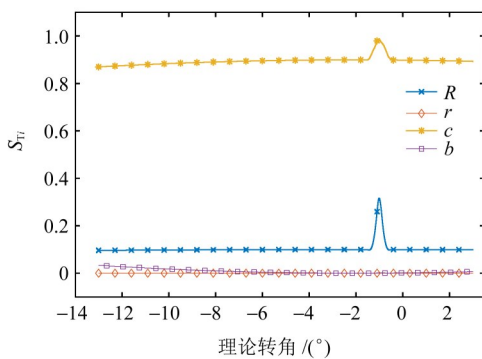


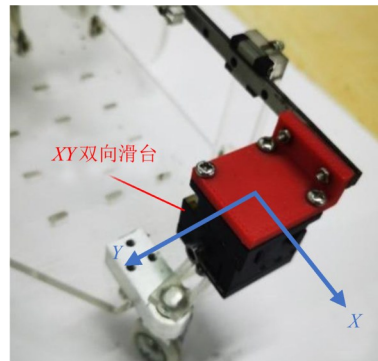
图6 总效应灵敏度随理论转角值变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the global sensitivity with the theoretical rotation angle

由图6可知, 参数 R 和 c 的总效应灵敏度与其 1 阶灵敏度表现相似, 在前轮转角为 $(-1.5^\circ, 0.5^\circ)$ 时出现急剧增大后又下降到较高位的现象; 参数 b 和 r 的总效应灵敏度与其 1 阶灵敏度表现相似。

3 结构与加工方法优化

图7(a)所示为小车转向机构初稿设计方案。采用 XY 双向滑台结构, 可调节参数 a 和 b 的值。但根据 Sobol 方法分析结果, 装配尺寸 b 对小车路线的影响几乎可以忽略, 因此, 去掉对尺寸 b 的微调结构, 在尺寸 a 上采用可调微分头结构[图7(b)], 可简化转向机构并减少冗余调试。



(a) 优化前



(b) 优化后

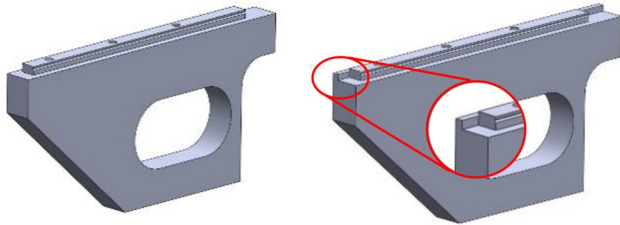
图7 转向机构优化

Fig. 7 Optimization of the steering structure

小车前轮转角是通过凸轮驱动滑块在导轨上的直线运动进行控制的, 滑块的直线运动方向理论上与小车驱动轮行进方向平行, 但前期方案在直线导轨的装配过程中无法保证其平行度[图8(a)], 使理论参数 R 和 b 值在行进中出现动态偏差。因此, 导轨立板结构优化设计时, 在导轨安装面上增加了凸台结构[图8(b)], 保证了导轨安装时与导轨立板平行; 同时, 在加工方面可通过数控加工中心加工导轨立板, 以提高零件尺寸精度。

如图9所示, 为了保证转向机构在小车底板上装配的精度, 在底板上设计并加工出用于定位凸轮推杆转向组件的凸台, 使得尺寸 b 和 c 等于台阶间的距离, 直接由加工工艺保证精度。该方案有效减小了更换凸轮等要求重复安装凸轮转向组件时, 由安装定位出现的尺寸参数 b 和 c 的误差, 以及原螺钉和孔

之间的间隙误差。此外,使用数控加工中心制造凸轮,提高了凸轮轮廓的精度(图10)。通过优化设计并结合精密加工,零件加工质量与装配精度均得到提升。



(a) 优化前 (b) 优化后

图8 导轨立板结构优化

Fig. 8 Optimization of the rail plate structure

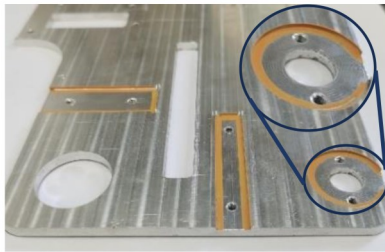


图9 底板结构设计优化和加工方法调整

Fig. 9 Optimization of the base plate structural design and adjustment of processing methods



图10 凸轮加工方法调整

Fig. 10 Adjustment of cam processing methods

4 验证

4.1 仿真验证

仿真路线可由设计的凸轮理论廓线推导出。根据理论廓线可得凸轮推程 s 。根据式(1)可得前轮转角离散值,在凸轮转过 $\Delta\theta$ 内,前轮转角的改变量为 $\Delta\gamma$;当 $\Delta\theta$ 足够小时,认为 $\Delta\gamma$ 趋于0,此时小车的运动轨迹为圆弧;根据式(2)可得各相对坐标系 B 下的圆弧终点;再根据式(10)坐标转换得到绝对坐标系 A 下的终点,连接各终点得到轨迹的离散点集,即可得到仿真轨迹结果。

$${}^A P = {}^A B R \cdot {}^B P + {}^A P_B \quad (10)$$

式中, ${}^A B R$ 为 B 坐标系相对于 A 坐标系的姿态矩阵;

${}^A P_B$ 为 B 坐标系相对于 A 坐标系的位置矩阵。

仿真时,以各参数的理论值为初值,分别取理论值与各参数变化区间长度的10%的差值作为实验值,并与其他关键参数理论值组合,如表2所示。其中,实验序号1是理论值组合。然后,通过Matlab软件对组合情况进行轨迹仿真,得出的结果如图11所示。

表2 各关键参数的理论值与实验值

Tab. 2 Experimental values and theoretical values of each key parameter

序号	R/mm	r/mm	c/mm	b/mm
1	74.00	1.000 0	42.50	20.00
2	73.98	1.000 0	42.50	20.00
3	74.00	0.999 5	42.50	20.00
4	74.00	1.000 0	42.44	20.00
5	74.00	1.000 0	42.50	19.94

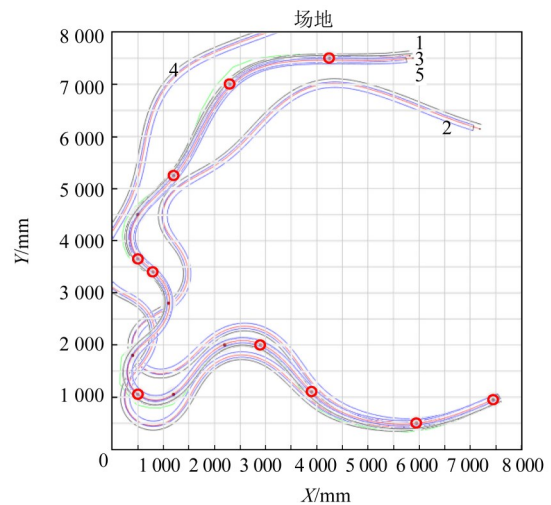


图11 轨迹仿真线路图

Fig. 11 Circuit diagram of the trajectory simulation

由图11可知, R 尺寸出现偏差和 c 尺寸出现偏差的小车在运行了约1/4时已明显与理论轨迹不吻合; r 和 b 尺寸即使出现偏差,在整个运行中也能做到和理论轨迹基本重合。由仿真验证可见, R 和 c 对实际路线影响较大,而 r 和 b 的影响几乎可忽略不计,与关键参数对轨迹偏移的敏感性分析结果吻合。

4.2 实物验证

仿真测试中,小车能按照既定路线运行。但值得注意的是,实际运行时,小车仍然会受到各种因素的影响。在保证小车优化前后的测试环境不变的情况下,进行30次实物运行试验,并统计每次试验中小车打卡的点数,统计结果如图12所示。

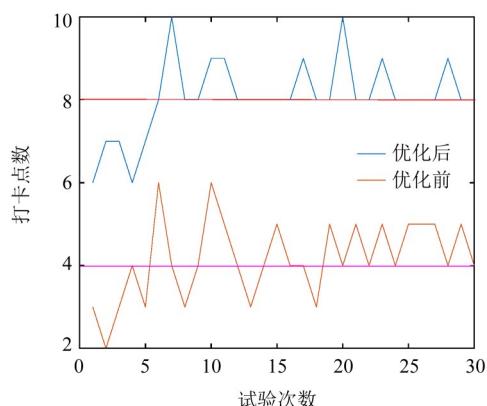


图12 打卡总数对比图

Fig. 12 Comparison chart of total check-in counts

图12中, 橙色线为优化前小车打卡点数随试验次数的变化, 其平均打卡点数为4; 蓝色线为优化后小车打卡点数随试验次数的变化, 其平均打卡点数为8。由实物运行试验结果可看出, 优化前的小车表现出显著的不稳定性, 打卡总数波动大, 易受外界因素干扰, 增加了人为调试的频率。相同测试环境下, 在对仿真结果指示出的高敏感性参数调试5次后, 优化后的小车表现出较高的稳定性, 打卡总数可稳定在8~9。优化前后的试验数据表明, 优化措施得当且有效。

5 总结

1) 针对现有研究在无碳小车误差分析方面的不足, 本文在现有的“误差溯源-参数敏感性分析-结构工艺协同优化”框架基础上, 进一步引入 Sobol 全局敏感性分析方法, 系统性量化关键参数对轨迹偏差的影响。相较于传统归纳, 本文通过蒙特卡洛采样生成多维参数空间, 结合 Sobol 方法精确计算尺寸 c 、 R 等参数的独立作用与交互效应, 为优化提供数据驱动的科学依据, 显著提升了分析的客观性与精度。

2) 参数敏感性分析结果表明, 尺寸 c 的总效应灵敏度高达 0.9, 显著影响轨迹偏移; 尺寸 R 的总效应灵敏度为 0.15, 影响次之; 而尺寸 b 和 r 的总效应灵敏度趋近于 0, 影响可忽略。基于此, 优化策略应聚焦于高敏感参数 c 和 R 的精确控制, 从设计源头提升运行稳定性。

3) 结合敏感性分析结论, 实施针对性优化, 基于尺寸 b 和 r 的低敏感性, 取消对尺寸 b 的微分调节机构, 简化转向机构并减少冗余调试。对于较高敏感性参数 R , 可通过调整凸轮加工方法以提高其尺寸精度。高敏感性参数 c 由多零件装配组合而成, 在改

善导轨立板和底板加工工艺、提高零件的尺寸精度时, 还需优化导轨立板和底板结构, 提高其装配精度, 才能保证高敏感性参数 c 的精度。

4) 仿真结果体现了与 Sobol 方法对关键参数分析结果的高吻合度。实物验证过程中, 根据敏感性分析结果, 对影响敏感参数的零件加工或装配工艺进行优化, 实现了零件加工质量与装配精度的双重提升, 不仅提高了小车的运行精度, 还提高了小车运行的稳定性。最终实现了小车从最佳打卡 6 个点到稳定打卡 8~9 个点的提升。

参 考 文 献

- [1] 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.
LIU Yang, JIANG Jiguang, XIE Chun. Innovative design of the carbon-free car fine-tuning mechanism based on the trajectory analysis method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (12): 83-87.
- [2] 李瑾. 基于 B 样条曲线的无碳小车轨迹及结构设计[J]. 机械设计, 2023, 40(12): 114-118.
LI Jin. Trajectory and structural design of carbon-free car based on B-spline curve [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40 (12) : 114-118.
- [3] 黄海龙, 朱宏. 基于凸轮机构的 S 轨迹环赛道无碳小车设计 [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.
- [4] 杨浩然, 赵旺初, 胡家豪. 基于速度瞬心的无碳小车复杂轨迹运行方案与虚拟样机仿真[J]. 机械设计, 2023, 40(7): 15-19.
YANG Haoran, ZHAO Wangchu, HU Jiahao. Complex trajectory operation scheme and virtual prototype simulation of carbon-free car based on instantaneous center of velocity [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(7): 15-19.
- [5] 方流, 吴奕凡, 牟子豪, 等. “8”字轨迹无碳小车凸轮逆向仿真分析与设计[J]. 机械设计, 2023, 40(11): 106-111.
FANG Liu, WU Yifan, MOU Zihao, et al. Reverse simulation analysis and design of “8”-shaped trajectory carbon-free car's cam [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(11): 106-111.
- [6] 王广胜, 王利锋, 焦士辉, 等. 基于 MATLAB 的“8”字形无碳小车轨迹仿真及其设计方法[J]. 机械设计, 2023, 40(9): 115-121.
WANG Guangsheng, WANG Lifeng, JIAO Shihui, et al. Track simulation and design method of 8-shaped carbon-free cars based on MATLAB [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40 (9) : 115-121.
- [7] 周彦博, 罗强, 张益维, 等. 打卡“长征”路线的无碳小车结构及轨迹仿真设计[J]. 机械传动, 2024, 48(5): 75-82.
ZHOU Yanbo, LUO Qiang, ZHANG Yiwei, et al. Carbon-free car structure and trajectory simulation design for clocking the “Long

- March" route [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48 (5): 75-82.
- [8] 何隆, 张亚, 王芙蓉, 等. 基于RSSR机构的无碳小车结构与运动分析[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.
- [9] 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]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022(10): 246-250.
- [10] SALTELLI A. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models[M]. Hoboken: Wiley, 2004: 20-78.
- [11] SOBOL' I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1/2/3): 271-280.
- [12] 萨特利, 拉托, 安德烈斯, 等. 全局敏感性分析[M]. 吴琼莉, 丁义明, 易鸣, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2018: 136-147.
SALTELLI A, RATTO M, ANDRES T, et al. Global sensitivity analysis[M]. WU Qiongli, DING Yiming, YI Ming, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 136-147.
- [13] 华建民, 匡余华. 高功率工业CO₂激光切割工艺技术参数分析[J]. *南京工业职业技术学院学报*, 2011, 11(4): 11-13.
HUA Jianmin, KUANG Yuhua. Parameter analysis of high power industry CO₂ laser cutting technology [J]. *Journal of Nanjing Institute of Industry Technology*, 2011, 11(4): 11-13.
- [14] BILAL N. Implementation of Sobol's method of global sensitivity analysis to a compressor simulation model[C]//International Compressor Engineering Conference, 2014: 2385.

Optimized design of cam steering structure for carbon-free car based on Sobol method

SHUI Guomin¹ ZHAO Wangchu¹ LI Ce¹ JIANG Bin¹ WANG Ruiqing²

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2. College of Physics, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: [Objective] The calibration of carbon-free vehicles typically necessitates repeated adjustments to mitigate trajectory deviations, resulting in low operational efficiency. Conducting an error analysis on the vehicle enables tracing the sources of trajectory deviations, thereby facilitating the structural optimization through the error source identification. This approach transforms conventional trial-and-error calibration into a data-driven design methodology. [Methods] Sobol sensitivity analysis was implemented to evaluate structural parameters of the cam steering mechanism. Based on analytical outcomes, the vehicle's structure was optimized, manufacturing methods were adjusted, and the fabrication precision of critical components was enhanced. The optimization effectiveness was subsequently validated through both simulation models and physical prototypes. [Results] The results demonstrate that the optimized vehicle's target acquisition performance is improved significantly, with scoring points increasing from a maximum of 6 to a stable range of 8 to 9. It provides a foundation and engineering insights for performance optimization of both new energy vehicles and carbon-free vehicles.

Key words: Carbon-free car; Error analysis; Cam steering structure; Global sensitivity analysis; Structural optimization; Sobol method