



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210268

基于“轨迹坐标”的竞赛小车凸轮设计

梁国栋¹, 霍海涛¹, 王 怡², 石纪新³

- (1. 天津科技大学工程训练中心, 天津 300222;
2. 天津科技大学教学质量监控与评估中心, 天津 300222;
3. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 以设计实现中国大学生工程实践与创新大赛基础赛道运行轨迹小车用凸轮为目的, 介绍一种基于“轨迹坐标”的竞赛小车凸轮设计方案. 该方案不同于传统设计思路, 综合运用 Inventor、AutoCAD 和 UG NX 设计工具软件中的简单功能, 采用规划优化、分析计算、Excel 数据整理、建模和仿真等设计手段, 通过利用轨迹坐标映射出凸轮轮廓线的方法, 解决有各种避障运行轨迹要求的小车凸轮的复杂设计问题. 这种设计凸轮的方法, 可以应对赛题的各种轨迹变化, 对于其他机构的设计也提供了有益的设计思路和方向.

关键词: 无碳小车; 凸轮; 工程基础赛道; 轨迹; 坐标法; 曲率半径

中图分类号: TP235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2022)03-0054-05

Cam Design of Racing Car Based on “Trajectory Coordinates”

LIANG Guodong¹, HUO Haitao¹, WANG Yi², SHI Jixin³

- (1. Engineering Training Center, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2. Teaching Quality Monitoring and Assessment Center, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
3. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to design and realize the cam for the basic circuit in Chinese University Students' Engineering Practice and Innovation Ability Competition, in this article we introduce a cam design of race car based on the “trajectory coordinates”. Different from the traditional design, our new design has resolved the complex cam design problem of the car with various obstacle avoidance track requirements, by comprehensively using the simple functions in Inventor, AutoCAD and UG NX, adopting such design methods as planning optimization, analysis and calculation, Excel data sorting, modeling and simulation, and applying trajectory coordinates to mapping the convex contour. Therefore, this cam design method can deal with the problem of various trajectory changes and also provides a very beneficial design idea and direction for the design of other mechanisms.

Key words: carbon-free trolley; cam; engineering basic circuit; trajectory; coordinate method; radius of curvature

中国大学生工程实践与创新大赛是列入《教育部评审评估和竞赛清单(2021 年版)》(教政法厅函〔2021〕2 号)的重要赛事^[1]. 大赛里工程基础赛道中的势能无碳小车和热能小车绕障行驶竞赛项目, 绕障的难度逐届增加, 从早期的“8 字形轨迹”“直道 S 形轨迹”, 逐步提高为“双 8 字形轨迹”“环道 S 形轨迹”, 直至 2021 年的新“环形轨迹”和

新“8 字形轨迹”, 每次竞赛的绕桩难度较上一次都明显提升, 导致绕桩轨迹越来越复杂. 实际上, 轨迹的变化对于小车的根本影响是凸轮轮廓的变化. 为了设计出满足竞赛小车运行轨迹要求的凸轮, 本文介绍一种基于“轨迹坐标”的竞赛小车凸轮设计方案. 文中所述凸轮机构的设计方法, 能够全面应对赛题避障轨迹的变化^[2], 解决有各种避障运行轨迹要

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-03-20

基金项目: 天津市教育科学重点课题资助项目(HE1022)

作者简介: 梁国栋(1973—), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, calton@tust.edu.cn

表 1 规划轨迹上的采样点坐标示例

Tab. 1 Example of coordinates of sampling points on the track

X/mm	Y/mm
3 731.488 5	-6 374.937 7
3 706.503 7	-6 361.012 7
3 755.892 4	-6 389.857 8
3 803.012 5	-6 422.285 0
3 779.724 3	-6 405.676 1
3 680.946 8	-6 348.168 4
3 573.676 4	-6 308.832 5

3 结构参数与轨迹参数的假设与确定

3.1 小车部分结构名称与参数

小车运行示意图如图 4 所示。

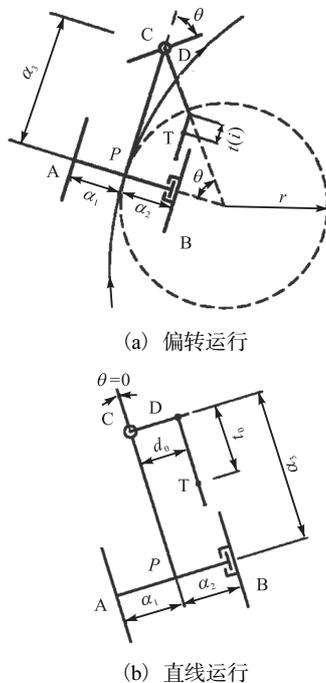


图 4 小车运行示意图

Fig. 4 Schematic diagram of running car

图 4 中: A 为小车的主动轮(左后轮); B 为小车的从动轮(右后轮); C 为小车的导向轮(前轮); D 为转向杆, 转向杆的高度与凸轮的基圆圆心保持水平; T 为转向控制凸轮, 凸轮设计在从动轮一侧. P 为后轴中心点; α_1 为主动轮与导向轮中心的距离, α_2 为从动轮与导向轮中心的距离, $\alpha_1 = \alpha_2 = 55 \text{ mm}$; α_3 为导向轮中心与后轴水平中心的距离; θ 为导向轮的转向偏角, 如图所示前进方向, 向右偏转为“+”, 向左偏转为“-”; t_0 为导向轮偏转角为 0° 时, 凸轮基圆中心与导向轮中心的距离, 也是凸轮基圆半径; $t(i)$ 为凸轮每转过 1° 时的凸轮向径; d_0 为导向轮的中心与凸

轮厚度中心在 X 轴方向的距离; r 为采样点处的轨迹曲线的曲率半径。

3.2 求解转向偏角变量

与小车的运行轨迹和转向控制凸轮的轮廓线都有关联的变量是导向轮的转向偏角 θ . 小车的导向轮的转向偏角 θ 和运行轨迹是一一对应的, 同时导向轮转向偏角 θ 的偏转大小受到与凸轮和导向轮相连接的转向杆的控制. 凸轮向径 $t(i)$ 对转向杆产生的推程与导向轮的转向偏角 θ 也是一一对应的. 因此, 转向偏角 θ 是凸轮设计过程中的主要变量之一, 由图 4 分析可知:

$$\tan \theta = \frac{\alpha_3}{r} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan \frac{\alpha_3}{r} \quad (2)$$

$\theta = 0^\circ$ 时, 小车沿直线方向运行。

3.3 轨迹曲线任意一点处曲率半径的求解

在曲线上的某个点处的微小区域, 可以找到一个与其曲率相等的圆, 该圆的半径就是曲线上该点处的微小区域的曲率半径^[6]。

也可从微分的角度理解, 就是尽可能地把一段曲线微分, 直到最后近似为一个圆弧, 此圆弧所对应的半径即为曲线上该点的曲率半径^[7]。

轨迹曲线上每个采样点位置都存在曲率半径 r , r 是凸轮设计过程中的主要变量之一. 在取得的 360 个轨迹采样点的坐标中, 通过依次选取相邻的 3 个采样点的坐标, 可以计算出每个采样点的曲率半径。

假设轨迹上相邻的 3 个采样点坐标分别为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) , 设 (X_2, Y_2) 对应的曲率半径为 r , 对应圆心坐标为 (X_0, Y_0) , 位置关系如图 5 所示。

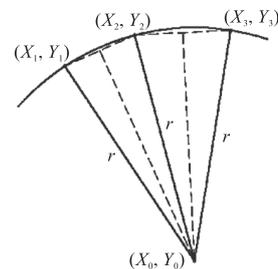


图 5 轨迹上相邻三点坐标

Fig. 5 Coordinates of adjacent three points on track

依据图 5 中关系, 可列出如下方程:

$$\begin{cases} (X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 = r^2 \\ (X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 = r^2 \\ (X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 = r^2 \end{cases} \quad (3)$$

解这个方程组可得出圆心坐标 (X_0, Y_0) 的具体数值,进而可计算得到曲率半径 r 。

由于运算量比较大,使用 Microsoft Visual C++ 制作了曲率半径计算工具(如图 6 所示),应用该计算工具可节约大量计算时间。



图 6 轨迹采样点曲率半径的计算工具

Fig. 6 Radius of curvature calculation tool for sample points on track

将 360 个采样点的曲率半径计算结果按照 X 坐标顺序进行列表,结果见表 2。

表 2 采样点曲率半径计算结果示例

Tab. 2 Example of radius of curvature calculation results for the sampling points

X/mm	Y/mm	r/mm
5 088.627 2	-7 102.521 1	297.331 66
5 084.514 2	-7 074.225 1	298.252 74
5 077.710 2	-7 046.452 0	299.183 25
5 068.285 9	-7 019.455 3	300.576 05
5 056.338 8	-6 993.476 1	302.411 86
5 041.991 3	-6 968.741 3	304.837 23
5 025.389 2	-6 945.459 6	308.841 48

3.4 凸轮坐标参数的确定

凸轮的向径是凸轮回转中心与推杆之间的距离,也就是凸轮轮廓边上某一点距离凸轮回转中心的长度^[8]。通过图 4 中小车与转向凸轮推杆的受力与运动状态分析和解析计算,可计算得到凸轮向径。

$$t(i) = t_0 - d_0 \tan \theta = t_0 - \frac{d_0 \alpha_3}{r} \quad (4)$$

凸轮旋转一圈对应小车行走一个周期的轨迹,以 1° 为分度,凸轮每转过 1° 找到对应轨迹上的一点。按照此操作,将凸轮旋转的一周均匀地分成 360 份,每一份看作 1° ^[2]。在一个周期的轨迹运行过程和一个凸轮旋转周期($0^\circ \sim 360^\circ$)中,轨迹上选取的 360 个点的坐标与凸轮转角的每 1° 相对应。通过确定每 1° 对应的凸轮向径,可计算得到凸轮轮廓上对应点的坐标 (T_x, T_y) 。

$$\begin{cases} T_x = t(i) \cos i \\ T_y = t(i) \sin i \end{cases} \quad i = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, \dots, 360^\circ \quad (5)$$

设凸轮基圆半径 $t_0 = 60 \text{ mm}$ 。当曲率半径为

297.33 mm 时,设此时凸轮对应的角度为 0° ,通过式(4)可得该点凸轮向径,即凸轮长度约为 41.18 mm。

通过式(5)计算可得凸轮轮廓上点的坐标,示例见表 3。

表 3 凸轮轮廓上点的坐标计算结果示例

Tab. 3 Example of coordinate calculation results with points on cam profile

r/mm	凸轮旋转角度/ $(^\circ)$	凸轮长度/ mm	T_x/mm	T_y/mm
297.331 66	0	41.182 81	41.182 81	0
298.252 74	1	41.254 06	41.247 78	0.719 98
299.183 25	2	41.325 50	41.300 33	1.442 24
300.576 05	3	41.431 41	41.376 43	2.168 35
302.411 86	4	41.569 19	41.467 93	2.899 72
304.837 23	5	41.748 12	41.589 25	3.638 59
308.841 48	6	42.036 03	41.805 76	4.393 96

4 凸轮的生成

将计算出的凸轮轮廓上点的坐标用 Excel 软件整理成坐标列表,然后导入 AutoCAD 软件中,生成凸轮轮廓的二维曲线图,结果如图 7 所示。

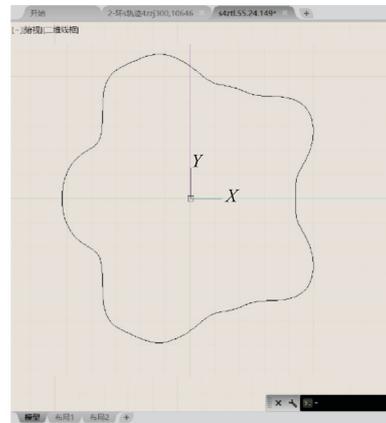


图 7 凸轮轮廓的二维曲线图

Fig. 7 Two dimensional curve of cam profile

将在 AutoCAD 中生成的凸轮轮廓的 DWG 文件导入三维软件 UG NX 中进行拉伸建模^[9],生成凸轮轮廓三维建模图(图 8),该图可用于凸轮的加工制造。凸轮厚度设计为 3 mm。

本方案的凸轮轮廓线是依靠映射小车运动轨迹的方法获得的。为了保证作为摆动从动件的推杆的运动规律平稳,在确保小车能够通过比赛规则规定的障碍物的情况下,需要通过采用调整小车的规划轨迹的方法找到一条轨迹,使通过该轨迹映射获得的凸轮轮廓线平滑无死角。

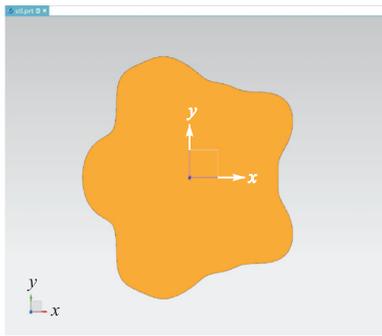


图8 凸轮轮廓三维建模图
Fig. 8 3D modeling diagram of cam profile

通过观察可知,设计出的凸轮轮廓线整体没有出现锐角和直角,内外转角均能够平滑过渡,有利于提高运行轨迹与设计轨迹的拟合度和推杆的平稳运动,设计合理.

将本文设计的凸轮加工成型,并与其他零件一起组装成热能驱动小车,该小车的实物图如图9所示.

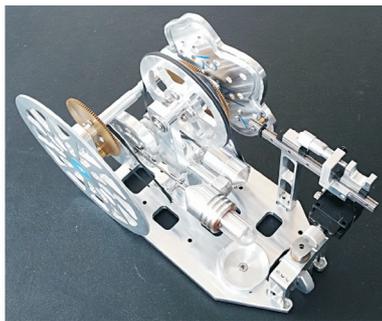


图9 热能驱动小车实物图
Fig. 9 Photo of thermal energy-driven trolley

5 运动轨迹仿真

将小车的 α_1 、 α_2 、 α_3 、 t_0 、 θ 、 r 、 S 等参数及坐标代入MATLAB程序,对后轴中点P的运行轨迹进行仿真,得到仿真轨迹如图10所示.

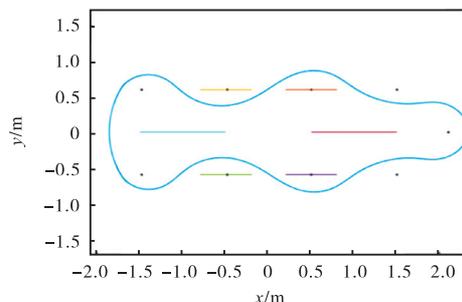


图10 后轴中点P的MATLAB仿真运行轨迹
Fig. 10 Simulation of running track for midpoint P in MATLAB

仿真结果表明,小车运行时不会与障碍桩、隔板和边框发生触碰,可实现有效避障,小车轨迹规划合理,参数选择适当.

如果要得到更高的轨迹拟合度,可以采用提高轨迹采样点数量和对应的凸轮一周均分份数的办法.文中设计时使用的360均分法,无论是在仿真过程中,还是在制作的凸轮的实际运行过程中,其结果均验证了此数量能够满足使用要求.

6 结 语

本文以2021年中国大学生工程实践与创新大赛基础赛道的环道S形运行方式的运行轨迹为例,利用在规划轨迹路径上的采样坐标,采用轨迹中相邻三点的坐标计算出中间点处曲率半径,运用规划、分析、计算、归纳和仿真等设计手段,介绍了一种能够普遍适用于各种运行轨迹的凸轮设计方法.该设计方法区别于传统设计思路,综合运用了多种强大设计工具软件中的简单功能,相互组合接力,解决了小车用于各种避障运行轨迹的凸轮的复杂设计问题.采用此设计方案制作凸轮的势能小车和热能小车,在天津赛区的竞赛中取得了一等奖的成绩.该研究结果对于全国性竞赛项目中的该类型竞赛题目的解答有十分重要的参考意义.该凸轮的设计方法,对于其他机构,尤其是带有凸轮的机构,也提供了十分有益的设计思路 and 方向.

参考文献:

- [1] 2021年中国大学生工程实践与创新大赛组委会.中国大学生工程实践与创新大赛赛事简介[EB/OL].(2021-09-08)[2021-12-20].<http://www.gcxl.edu.cn/new/index.html>.
- [2] 孙国鑫,周述生,乔戈滨,等.适用于“双8”轨迹的凸轮机构及其设计方法[J].机械设计,2019,36(6):30-35.
- [3] 第七届全国大学生工程训练综合能力竞赛组委会.第七届全国大学生工程训练综合能力竞赛:工程基础赛道命题与运行[EB/OL].(2021-06-08)[2021-12-20].<https://www.cauc.edu.cn/gcxlzx/info/1034/1114.htm>.
- [4] 胡仁喜. Autodesk Inventor 2014 基础培训教程[M].北京:电子工业出版社,2014:28-60.
- [5] 李海慧. 中文版 AutoCAD 2011 宝典[M].北京:电子工业出版社,2011:39-43.
- [6] 宋艾琪. 轮廓线特征提取与局部曲率计算的研究[D].

(下转第66页)

- review.net/pdf?id=HJWLFGWRb.
- [8] CHOI J, SEO H, IM S, et al. Attention routing between capsules[C]//IEEE. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). New York: IEEE, 2019: 848–856.
- [9] 彭豪, 李晓明. 多尺度选择金字塔网络的小样本目标检测算法[J/OL]. 计算机科学与探索: 1–13[2021–11–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5602.tp.20211102.1150.002.html>.
- [10] SRIVASTAVA R K, GREFF K, SCHMIDHUBER J. Highway networks[EB/OL].[2015–11–03]. <https://arxiv.org/abs/1505.00387>.
- [11] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//IEEE. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2016: 770–778.
- [12] 张学鹏, 王远军. 采用密集多尺度卷积网络的胰腺分割方法[J/OL]. 小型微型计算机系统: 1–7[2021–11–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP.20211109.1016.002.html>.
- [13] SZEGEDY C, VANHOUCKE V, IOFFE S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision[C]//IEEE. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New York: IEEE, 2016: 2818–2826.
- [14] HAHN T, PYEON M, KIM G. Self-routing capsule networks[J]. Advances in neural information processing systems, 2019, 32: 7658–7667.
- [15] MAZZIA V, SALVETTI F, CHIABERGE M. Efficient-CapsNet: capsule network with self-attention routing[EB/OL]. [2021–11–16]. <https://arxiv.org/abs/2101.12491>.
- [16] 刘林嵩, 全明磊, 吴东亮. SA-CapsNet: 自注意力胶囊网络[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(10): 3005–3008.
- [17] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2020, 42(8): 2011–2023.
- [18] NAIR V, HINTON G E. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines[EB/OL]. [2021–06–13]. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3104322.3104425>.
- [19] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[EB/OL]. [2021–06–13]. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3045118.3045167>.
- [20] RAJASEGARAN J, JAYASUNDARA V, JAYASEKARA S, et al. DeepCaps: going deeper with capsule networks[C]//IEEE. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New York: IEEE, 2019: 10725–10733.

责任编辑: 郎婧

(上接第 58 页)

- 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016: 43.
- [7] 同济大学数学系. 高等数学: 上册[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 168–174.
- [8] 焦飞, 陈力航, 戴孟莲, 等. 基于圆柱凸轮机构的“8 字形”无碳小车设计[J]. 机械传动, 2018, 42(4): 71–75.
- [9] 高雨辰, 汪海溟. UG NX 10.0 三维数字化辅助产品设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 73–78.

责任编辑: 周建军