

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.03.006

一种重力势能驱动小车的设计与实现

屈 伸¹, 李斯瑞¹, 靳 松²

(1. 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 工程训练中心, 北京 100081)

摘 要: 结合大学生工程训练综合能力竞赛要求, 开发了一种以重力势能驱动的具有方向控制功能的自行小车。该小车能按“S”轨迹自动行走并依次绕过赛道上设置的等间距障碍物, 还能通过简单调节结构参数, 适应障碍物的间距变化。通过对小车的机械系统进行精心设计和详细分析, 从小车结构、装配以及调试等方面探讨了如何提高小车的运行精度以及稳定性等问题。实验结果表明: 小车结构简单、运行平稳、轨迹准确, 可较好地实现“S”轨迹自行越障功能, 对此类小车的设计和工作性能提高有一定的参考价值。

关键词: 无碳小车; 重力势能驱动; 运行轨迹; 结构设计; 装配调试

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)03-0030-05

Design and Implementation of a Vehicle Driven by Gravitational Potential Energy

Qu Shen¹, Li Sirui¹, Jin Song²

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Engineering Training Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A vehicle driven by gravitational potential energy which control the direction by itself is developed based on the requirement of National Undergraduate Engineering Training Comprehensive Ability Competition. The vehicle can run in “S” track automatically and bypass equidistance obstacles on the track, and adapt the spacing change of obstacles through adjusting structure parameter. Through carefully design and detailedly analysis of vehicle mechanical system, investigates the issues of improving vehicle running accuracy and stability from aspects of vehicle structure, assembly and adjustment. The experimental result shows that the vehicle has the advantages of simple structure, stable operation, accurate trajectory and smooth obstacle-crossing by “S” track, which provides reference for the vehicle design and working performance improving.

Keywords: carbon-free vehicle; gravity potential drive; running trajectory; structure design; assembly and adjustment

全国大学生工程训练综合能力竞赛是教育部高等教育司举办的全国性大学生科技创新实践竞赛活动。重力势能驱动的自行越障小车(也称无碳小车)项目是培养学生综合能力和素质的非常重要的环节之一,已连续3届作为竞赛内容。由于受装配误差、

车轮与地面的滑移以及不同运行场地地面特性差别等因素的影响,小车轨迹偏差的优化调试方案和小车多次行驶轨迹的同一性成为影响小车性能的关键因素。本课题组结合大学生工程训练综合能力竞赛要求,从无碳小车的结构、装配等方面探讨影响小

收稿日期: 2015-03-25

作者简介: 屈 伸(1994-),男,湖南长沙人,北京理工大学学生,主要研究方向为车辆设计, E-mail: 316698322@qq.com

通信作者: 靳 松(1972-),男,山东菏泽人,北京理工大学技师,主要从事数字化制造理论与加工技术方面的教学与研究,

E-mail: 1016236512@qq.com

车运行精度及稳定性等问题,并对小车参数调试流程进行优化分析。

1 小车运动轨迹设计

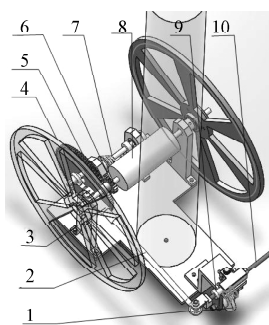
根据竞赛要求,无碳小车为三轮结构,能以“S”轨迹行走并自动连续绕过赛道上设置的等间距障碍物(障碍物为直径20 mm、高度200 mm的塑料圆管),且在一定范围内能适应桩间距的变化。由于障碍物等间距,因此,小车的运行轨迹一般选择周期曲线,小车每运行1个周期,绕过2个障碍物。在方案设计中,选择余弦曲线作为小车的运行轨迹,即

$$y = A \cos(\pi x) \quad (1)$$

由式(1)可知,振幅 A 越小,小车行走的直线距离越长,理论上绕过障碍物的数量越多,但因轨迹误差撞到障碍物的可能性也越大; A 越大,小车行走的直线距离越短,虽撞到障碍物的可能性小,但绕过障碍物的数量也越少。因此,振幅 A 的选取需要综合考虑设计目标以及轨迹误差的影响。该设计中,初选振幅 A 为400 mm,设计目标为18个周期,即绕过障碍物的数量为36个,则小车运行轨迹方程为 $y=0.4\cos(\pi x)$ 。运用第一类曲线积分公式得到轨迹总长度 $S=44\ 580$ mm,1个周期的轨迹长度 $s=2\ 500$ mm。

2 小车机械系统设计

图1为本文所设计的无碳小车机械结构图。



1- 前轮; 2- 连杆主动齿轮/曲柄圆轮; 3- 连杆调节旋钮;
4- 后轮; 5- 大齿轮; 6- 小齿轮; 7- 绕线飞轮;
8- 差速器; 9- 摇臂调节旋钮; 10- 摇臂

图1 无碳小车的机械结构图

Fig. 1 Mechanical structure of carbon-free vehicle

无碳小车主要由原动机构、传动机构、行走机构、转向机构和调整机构组成。其工作原理为:重物(砝码)在降落的过程中,将势能转化为动能并通过绳索带动绕线轮转动。绕线轮的转动分2路输出:一路通过齿轮机构驱动后轮转动,实现小车的

行走;另一路驱动空间四杆机构的曲柄转动,使得摇杆带动前轮获得一定角度的连续往复摆动,从而实现小车的转向。当障碍物的间距发生变化时,可通过调整空间四杆机构的连杆和摇杆的长度来实现给定的轨迹要求^[1]。

2.1 原动机构设计

原动机构的作用是将给定的重力势能转化为机械能。原动机构如图2所示,重物与绕线轮用绳索连接,并通过定滑轮支撑,绳索缠绕在绕线轮上。当重物在重力作用下下降时,绳索通过定滑轮拉动绕线轮转动。在原动机构设计中,为了减少摩擦损失、提高效率,定滑轮通过滚动轴承支撑。此外,因动、静摩擦系数不同,小车启动时需要的力矩较大。但若按启动力矩设计绕线轮直径,则小车在行驶过程中一直处于加速状态,速度过快易引起小车侧翻或因重物晃动而影响行走。因此,为了保证小车行走的稳定性,将绕线轮设计成“圆锥+圆柱”的变径结构。圆锥部分直径较大,可获得较大的力矩,用于小车启动。圆锥面上的螺旋槽便于绳索的缠绕。

由于绕线轮与转向机构的曲柄同步转动,绕线轮转动1周,小车行走1个周期。因此,绕线轮的直径 d 与设计目标(小车绕过障碍物的数量)有关。根据比赛规定,重物下降400 mm,绕线轮转过的圈数 $N=400/(\pi d)$ 。由于 $N=18$ 圈,可得直径 $d=7.078$ mm。考虑到绕线轴圆锥部分耗线较长,因此,初选直径 $d=7$ mm。

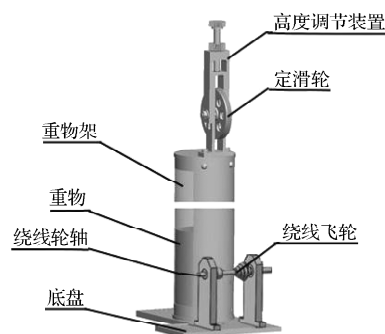


图2 原动机构的机械结构图

Fig. 2 Structure of driving mechanism

2.2 传动机构设计

传动机构的作用是将绕线轮的运动和动力传递到转向机构和行走机构。为了保证小车具有较高的效率和轨迹精度,优先考虑高精度、高效率、结构紧凑以及路径短的传动方式。因此,绕线轮与行走机构(后轮)之间采用一级齿轮传动,而绕线轮与转向机构(空间四杆机构)的原动件(曲柄)采用直连方式^[2]。

2.3 转向机构设计

转向机构是实现小车预定曲线轨迹的关键部件。依据构件和运动副数目尽可能少的原则,选用空间四杆机构作为小车的转向机构,如图3所示。曲柄与绕线轴固连做旋转运动,通过连杆可使摇杆和前轮获得1个周期性的往复摆动,从而实现小车行走过程中的转向^[3]。

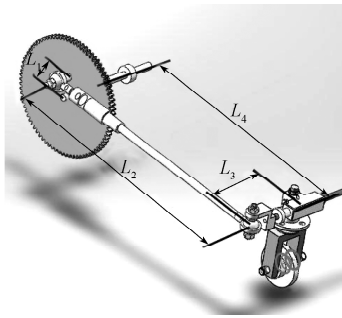


图3 小车转向机构模型

Fig. 3 Model of vehicle steering system

2.3.1 确定前轮的最大摆角

设小车后轮轴的中心点为运动参考点,即该点按余弦轨迹曲线 $y=0.4\cos(\pi x)$ 运动。当参考点运动到最大振幅时,前轮的摆角最大值(见图4)为

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{L}{\rho_{\min}}\right), \quad (2)$$

式中: L 为小车前、后轮的轴距,根据小车结构, L 取值150 mm;

ρ_{\min} 为参考点在最大振幅处的曲率半径。

根据曲率公式,余弦轨迹曲线 $y=0.4\cos(\pi x)$ 的曲率函数为

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

可得 $\rho_{\min} = 1/\kappa = 254$ mm, 因此,前轮的最大摆角 $\theta_{\max} = 30.56^\circ$ 。

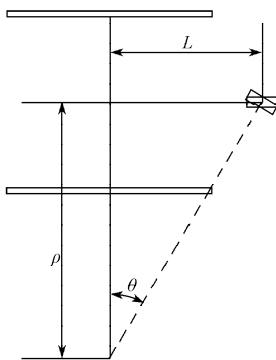


图4 前轮的最大摆角示意图

Fig. 4 Maximum steering angle of front wheel

2.3.2 确定各构件的长度

为了保证小车在行走过程中轨迹中心线不偏离障碍物连线,转向机构应无急回特性,即前轮的最大左右摆角相等,且从一个极限摆角到另一个极限摆角所对应曲柄的转角为 180° 。为简化设计,转向机构中曲柄的回转轴线与摇杆的摆动平面等高,且当曲柄水平向前和水平向后分别对应于摇杆的2个极限摆角位置,如图5所示。

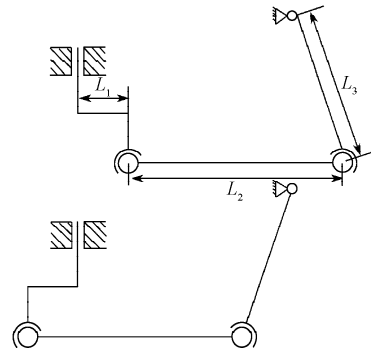


图5 转向机构极限位置示意图

Fig. 5 Limit position of steering system

根据图3和图5所示转向机构中的几何关系,考虑结构尺寸,给定 $L_1=15$ mm, $L_2=185$ mm, $L_3=44$ mm, $L_4=175$ mm。考虑到加工、装配误差的影响以及竞赛变障碍物间距的要求,小车必须具有一定的调整功能,因此,在设计空间四杆机构时,将连杆和摇杆设计成长度可调结构。连杆和摇杆调整机构均采用螺距为0.5 mm的细牙螺纹,同时将连杆和摇杆的调整螺母均匀分度(连杆分30格,摇杆分20格),则连杆和摇杆每格的长度调整精度为0.5 mm。在小车调试过程中,两者相互配合实现轨迹修正和满足障碍物间距要求,取得较好的调节效果。

2.4 行走机构设计

行走机构主要是指3个车轮,本方案采用后轮驱动。设计时需综合考虑尺寸、轴系结构以及材料等因素。由摩擦理论可知,滚动摩擦阻力 F_f 、摩擦力矩 M_f 、正压力 F_N 及车轮半径 R 之间的关系为

$$F_f = \frac{M_f}{R} = \frac{\delta F_N}{R}, \quad (4)$$

式中滚动摩擦系数 δ 主要取决于接触面的变形程度,由于比赛场地质地较硬,可视 δ 为常数。由此可以看出,车轮直径越大,摩擦阻力就越小。但车轮直径过大会导致重量增加。因此,经综合考虑,取后轮直径为200 mm,材料为钢制^[4-5]。

如前所述,小车行走1个周期的路程应与1个周期的轨迹曲线长度相等。后轮直径 d_2 、从绕线轮到

后轮轴的传动比 i 及 1 个周期的轨迹曲线长度 s 之间的关系为

$$i = \frac{\pi d_2}{s} = 0.25, \quad (5)$$

即小车行走 1 个周期, 绕线轮转 1 转, 后轮转 4 转。初选主动轮齿数 $Z_1=80$ 个, 从动轮齿数 $Z_2=20$ 个。

由于小车是沿着曲线行走, 两后轮转速肯定不同, 采用差速器、单轮驱动等实现差速。通过实际调试发现, 使用差速器稳定性较好, 因此在后轮轴加装差速器。前轮兼有行走和转向 2 项功能, 直径过大会增大转向阻力和行驶阻力, 降低转向灵活性。因此, 经综合考虑并参考实际调试情况, 取前轮直径 $d_1=30$ mm。

2.5 设计装配综合方案

方案设计、理论计算和结构设计对小车性能至关重要。在势能一定的情况下, 如何减少能量损失、如何从理论上满足设计要求、如何从结构上保证装配后与理论尽可能相符, 这都是设计需要考虑的问题。例如绕线轮、齿轮机构、空间连杆机构、调节机构的设计, 材料选择以及外购件选型等均属于此类问题。由于竞赛有小车拆装要求, 因此, 从结构方面, 应更多地考虑零件的安装基准、定位、固定以及关键尺寸的保证等问题, 确保制作出来的小车和理论设计要求尽可能的接近, 可以有效提高装配效率, 节省调试时间。

装配质量的好坏直接影响小车的轨迹精度和可靠性。装配前后需要注意的事项如下: 装配前应擦拭各零部件, 保证零部件清洁; 装配时, 应保证联接部分紧密可靠, 运动部件运转灵活、平稳、无冲击、无卡滞现象、无异常振动和噪音; 差速器、齿轮、轴承及关节处涂润滑脂; 对于无需拆卸的紧定螺钉, 最好涂螺纹胶并保证一定的固化时间, 等等。装配完成后的小车实物如图 6 所示。

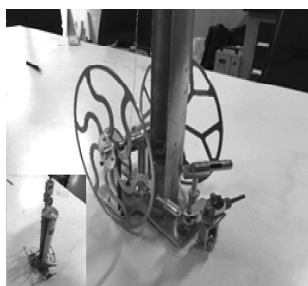


图6 无碳小车实物

Fig. 6 Carbon-free vehicle

3 小车轨迹偏差分析与调试

由于加工、装配误差及间隙的影响, 小车的实

际运行轨迹与理论轨迹曲线必然会存在偏差, 若偏差是因系统误差引起, 可通过调试来修正。因此, 掌握一定的调试方法, 对于提高效率 and 性能非常有益。

3.1 轨迹偏差理论分析

轨迹偏差的理论分析具体如下:

1) 摇臂长度会影响轨迹振幅的大小, 从而影响周期的长短。借助 SolidWorks 软件分析得到, 摇臂长度与前轮偏转极限位置夹角之间的关系如图 7 所示。

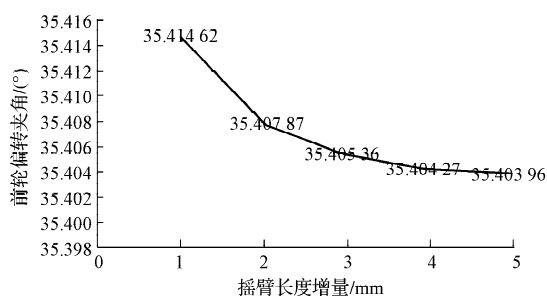


图7 摇臂长度对前轮偏转极限位置夹角的影响

Fig. 7 Influence of rocker length on turning limit position angle of front wheel

由图 7 可知, 当摇臂长度逐步增加时, 相应的前轮偏转极限位置夹角会随之减小, 幅值依次为 $35.414\ 62^\circ$, $35.407\ 87^\circ$, $35.405\ 36^\circ$, $35.404\ 27^\circ$, $35.403\ 96^\circ$ 。可定性分析出, 摇臂长度的增加会影响前轮的对中性, 减小前轮偏转极限位置夹角, 从而减小轨迹振幅。

同时, 由于曲柄旋转 1 周所对应的后轮转过圈数固定, 小车单个周期的总路程与各杆长参数无关, 振幅的减小带来轨迹周期的增大。

2) 连杆的长度会影响轨迹中线的曲直。改变摇臂的长度与人工装配过程中的误差都会改变前轮的对中性, 连杆长度的调试是修复前轮对中性的最优解决方法。

3) 发车角度会影响小车的前进方向。在调试过程中, 如果发现轨迹中线为直线但与障碍物连线不重合, 则是因为小车的发车角度不当所致, 选择合适的发车角度可以解决该问题。

3.2 调试操作方法

3.2.1 轨迹周期的精准化与轨迹中线的调直

由于制造装配误差和车轮与地面的相对滑动, 小车在调试初期会出现轨迹中线呈曲线以及周期略大于或小于理论周期的情况。在前轮与前轴粘合固定完毕后, 合理的调试方法为通过摆放标记记录小车运动轨迹的振幅最大点, 观察多个振幅最大点的连线以得出轨迹中线弯曲特性, 分析后调节连杆长度中和弯曲特性, 以二分法的形式最终调直轨迹。在轨迹调直后观察实际周期长度, 通过调长摇臂增长轨迹, 或缩短摇臂减短轨迹, 再调节连杆调直轨迹中线。两步骤以二

分法为原则交替重复进行,最终实现误差缩小,在18个周期内不会对轨迹造成明显影响。

3.2.2 重复运行轨迹一致性保证措施

在轨迹调节正确之后,需要对发车进行精确定位以保证多次发车的成功率,发车定位分为以下3个步骤:

1) 曲柄角度定位。本车后轴安装了差速器,故对差速器加装锁扣,以保证每次发车时后轴所处位置相同。与后轴联动的原动轴在重物绕线达到标准位置时,其所在的角度也将得到固定,曲柄角度从而得到固定。但是在非整数齿轮比的情况下,如果绕线轮的直径发生了变化,当差速器锁止于预定位置时,其原动轴可能会因为传动比的非整数特点而锁止于另一角度,这时需要重新进行定位。

2) 发车角度定位。本车通过在车前方固连一激光笔,每次发车记录激光笔射向的位置。在发车曲柄角度固定的前提下,多次重复发车,最终实现轨迹中线与各杆连线高度重合。记录此时激光笔射向的位置,即为正确发车角度。

3) 发车距离定位。多次观察小车在振幅最大处时与被绕过杆的前后位置差,调节发车前后位置。调节完毕后,激光定位点需要进行微调。

4 结论

结合工程训练综合能力竞赛要求,利用所学理论知识和掌握的实践技能,开发了一种以重力势能驱动的具有方向控制功能的自行小车,可按“S”轨迹自动行走并依次绕过赛道上设置的等间距障碍物。小车利用绳索驱动,齿轮机构带动后轮实现行走,空间四杆机构实现转向。小车具有结构简单、效率高、运行平稳、轨迹准确、调试容易等优点。无论是在1 m障碍物间距还是变间距性能测试中,均取得了较

好的成绩,最好成绩是直线行走距离32 m,绕过31个障碍物,基本达到了预期的目标。

参考文献:

- [1] 曾思龙,温煜,倪柏杨.无碳小车转向机构的创新性设计[J].硅谷,2013(10):36-37.
Zeng Silong, Wen Yu, Ni Boyang. Creative Design of Steering Mechanic System of Carbon-Free Car[J]. Silicon Valley, 2013(10): 36-37.
- [2] 李刚,周致成,袁航,等.S型专项运动无碳小车的改进设计研究[J].汽车实用技术,2014(2):13-16.
Li Gang, Zhou Zhicheng, Yuan Hang, et al. Sports Car Without Carbon S-Shaped Turn Improve the Design Study [J]. Automobile Applied Technology, 2014(2): 13-16.
- [3] 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.
Wu Xinliang, Liu Jianchun, Zheng Chaoyang. Design and Manufacturing for Gravity-Driven and Obstacle-Free Vehicle [J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(10): 25-28.
- [4] 陈晓东,石雁南,张莉莉.无碳小车的设计、制作与创新实践[J].实验室研究与探索,2013,32(12):92-95.
Chen Xiaodong, Shi Yannan, Zhang Lili. The Design, Manufacture and Innovative Practice of Carbon-Free Car [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(12): 92-95.
- [5] 王斌,王衍,李润莲,等.“无碳小车”的创新性设计[J].山西大同大学学报:自然科学版,2012,28(1):59-62.
Wang Bin, Wang Yan, Li Runlian, et al. The Design of “Carbon-Free Vehicle” [J]. Journal of Shanxi Datong University: Natural Science, 2012, 28(1): 59-62.

(责任编辑:邓彬)