

基于凸轮控制的无碳小车关键结构分析与设计

肖晓萍 张立红 陈聪聪
西南科技大学工程技术中心
DOI:10.32629/er.v3i7.2984

[摘要] 本文设计一种基于凸轮机构的双8字无碳小车。通过分析双8字运行轨迹及合理假设,建立了基于圆弧加三次B样条轨迹的数学模型,同时由估计各弧段长度设计凸轮特征参数,结合从动件推杆运动规律应用解析法建立凸轮轮廓线数学模型,利用MATLAB软件生成凸轮轮廓线,最后制作小车实物,通过测试验证了小车行驶平稳,轨迹重复精度较高,也说明了设计方法的可行性和正确性。

[关键词] 无碳小车; 凸轮; B样条; MATLAB软件; 双8字轨迹

引言

双8无碳小车是以重力势能驱动的具有方向控制功能的纯机械自行小车,其需以双8字轨迹交替绕过直线上依次放置间距为 $350 \pm 50\text{mm}$ 三个障碍桩(直径 20mm)并能连续行驶,以成功完成双8字绕行圈数和绕过障碍桩数量评定成绩。

针对8字形轨迹无碳小车的设计,目前已有转向机构主要有:凸轮机构^[1-2]、曲柄连杆机构^[3]、曲柄滑块机构^[3]以及不完全齿轮^[4]。在转向机构参数优化分析上通常采用先设定机构参数,再通过微调机构后期调试^[5]或者建立运行轨迹方程以及小车轨迹方程再利用MATLAB仿真得到运行轨迹^[5],又或者由SolidWorks、UG建立三维模型,然后通过自身软件设定约束条件进行轨迹的运动仿真或将模型导入ADAMS中进行运动轨迹的仿真优化设计参数^[6]这三种方法。上述设计无碳小车在比赛中能够行驶出预期轨迹且运行平稳,也取得了较好的成绩,但仍存在几点不足:(1)运行轨迹的分析不足,为计算简单方便绝大部分采用标准圆形轨迹或圆形加正余弦函数组合轨迹作为小车行驶路径,对一定重力势能下小车整体运行轨迹长度缺乏比较;(2)对转向机构的设计分析不足,尤其是对凸轮设计方法、设计过程。

因此,本文针对双8字形无碳小车行走要求,提出基于凸轮控制转向机构的

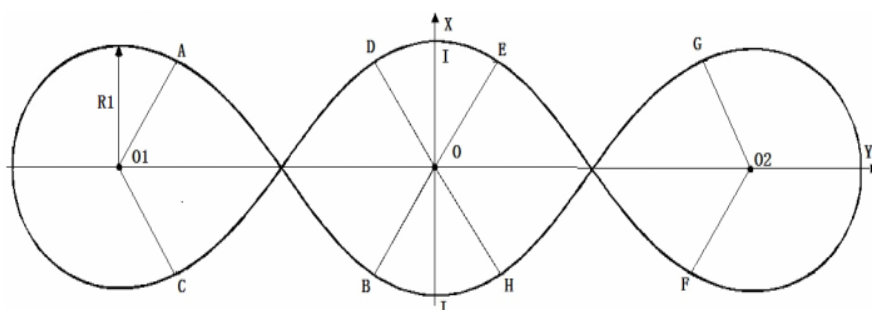


图1 双8字理想轨迹

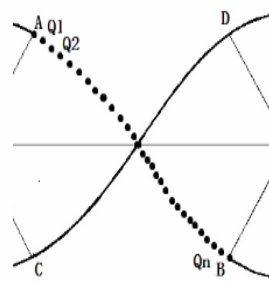


图2 截取曲线上点图

无碳小车设计方案。首先,对双8字运行轨迹特征进行分析,合理设计运行轨迹并抽象成数学模型,计算轨迹总长度。然后,分析凸轮机构运行特征,在保证运行轨迹圆弧段和过渡段曲率及切线连续的情况下,形成凸轮设计特征参数,采用解析法设计凸轮轮廓线,最后制作实物分析运行轨迹,验证所用方法的合理性、准确性。

1 理论轨迹分析

竞赛仅要求实现无碳小车在三个障

碍桩之间走双8字轨迹,但并未规定其轨迹参数,因而需要选择行驶轨迹并进行轨迹计算,从而为凸轮机构设计提供理论依据。

1.1 理论轨迹的确定

考虑到前轮转向轮绕障碍桩时转弯半径不变,因此选择前轮轴心为研究对象。如图1所示,一个双8字轨迹的曲率中心的所在侧会发生四次变化。为防止小车前轮在转向过渡时出现速度突变,过渡线段通常采用切线或者正、余弦曲线段^[1-4]

进行连接,采用切线连接虽然轨迹长度短但在连接处其转向角会出现突变,有可能导致小车偏离原轨迹,虽采用正余弦曲线在连接处较为平稳,但文献中鲜有描写保证连接平滑的计算方法,而且作为重力势能一定下鲜有考虑总轨迹长度与圈数关系。为满足轨迹曲线自由设计、总轨迹长度短和连接更光滑无速度突变等要求,选用三次B样条曲线来拟合。

1.2理论轨迹数学模型的确定

假设凸轮廓廓曲线特征值与半个双8字轨迹长度存在比例关系以及为提高小车前轮在最大转弯半径处的稳定性,选取在距离圆心直线IJ上偏离300方向截取(∠DOI=300),截取线分别为A01、O1C、DH、BE和O2F、O2G,由此把轨迹分成圆弧和不规则曲线两部分。如上图1所示,该理论轨迹由四段半径为R1的圆(规则圆)以及四段B样条曲线AB、CD、EF和GH组成,预设大圆弧半径设为R1=60-175mm,相邻两圆弧圆心距设为350mm。

1.2.1三次B样条曲线AB数学模型的建立

以AB为例,首先在AB之间选取若干点Q1, Q2... Qn,对于三次均匀B样条曲线型值点和控制点Pi(i=1,2,...,n)关系^[7]为:

$$P_{i-1} + 4P_i + P_{i+1} = 6Q_i \quad (1)$$

观察发现该方程组有n个方程,n+2个未知数,因此需要补充端点的边界条件。由B样条曲线始末端点位置与圆弧段末端点曲率相等且已知可得: $Q_1 = \frac{1}{2}(P_3 - P_1)$, $Q_n = \frac{1}{2}(P_{n+2} - P_{n-1})$ 。根据文献^[7],从而反求控制点Pi。

然后再根据三次B样条曲线数学模型,第i段参数形式:

$$f_{k,3}(t) = \sum_{i=0}^3 P_{i+k} B_{i,3}(t) \quad t \in [0,1] \quad (2)$$

其中: k=0,1...m。基函数

$$B_{i,3}(t) = \frac{1}{3!} \sum_{j=0}^{3-i} (-1)^j C_4^j (t+3-i-j)^3$$

将上述表达式由MATLAB编制即可得到AB段B样条曲线,同理据此方法可得出

CD、EF和GH曲线数学表达式及曲线,如上图3所示。

1.2.2理想轨迹各段长度的计算

$$\text{圆弧AC: } L_{AC} = \frac{2\pi R_1}{360} \times \angle A O_1 C = \frac{2}{3} \pi R_1$$

$$\text{圆弧DE: } L_{DE} = \frac{2\pi R_1}{360} \times \angle D O E = \frac{1}{3} \pi R_1$$

$$\text{圆弧BH: } L_{BH} = L_{DE}$$

$$\text{圆弧GF: } L_{GF} = L_{AC}$$

三次均匀B样条曲线长度:

$$L_{DC} = L_{GH} = L_{EF} = L_{AB} = \int_{k=0}^m f_{k,3}(t) dt$$

假设 R1=175mm,小车理想轨迹长度 $L = 2(L_{AC} + L_{BH} + L_{AB} + L_{DC}) = 2920.2mm$,与文献相比,采用B样条曲线,理想轨迹长度少了,在其它参数相同情形下,理论圈数多。

2 无碳小车关键性结构设计

双8字无碳小车主要原理是利用定滑轮将重锤的重力势能转化为前轴动能,通过其上的齿轮传动将动力一方面传递给后轴上的驱动轮驱使小车前进,另一方面通过转向机构驱使前轮转向,实现小车连续性、周期性避障。

无碳小车结构设计的优劣性对双8字轨迹的重复精度起着至关重要的影响,其主要包括转向机构、能量转换机构、传动机构、差速机构与微调机构五大部分,而转向机构决定了小车能否正确行使出理想的双8字轨迹,是无碳小车设计的关键。

2.1转向机构

转向机构是由转向装置带动导向轮使其在任一时刻产生符合理想轨迹所需偏角的一组机构,其运动需具有

周期性和连续性。本文采用盘形外凸轮加连杆组合可实现转向机构的运动要求。转向机构由凸轮、摆杆和前叉组成,驱动轴带动凸轮旋转使得压在凸轮上的摆杆有规律的摆动,通过前叉使得前轮偏转,进而引导小车行驶出双8字轨迹。

为使凸轮旋转两周小车刚好行驶出一个完整的双8字轨迹,且前轮需依次完成4次转向,所以在设计的过程中采用对称结构形式的凸轮。凸轮旋转一周,完成半双8字轨迹,根据理想轨迹组成,可确定凸轮廓廓线所对应的推程运动角 δ_1 、远休止角 δ_2 、回程运动角 δ_3 、近休止角 δ_4 以及推杆行程h。令 $L = L_{AB} + L_{CD} + L_{BH} + L_{AC}$, 则:

$$\text{推程运动角: } \delta_1 = \frac{L_{CD}}{L} \times 360^\circ$$

$$\text{远休止角: } \delta_2 = \frac{L_{AC}}{L} \times 360^\circ$$

$$\text{回程运动角: } \delta_3 = \frac{L_{AB}}{L} \times 360^\circ$$

$$\text{近休止角: } \delta_4 = \frac{L_{BH}}{L} \times 360^\circ$$

推杆行程:

$$h = 2L_3 \tan \theta, \quad \theta = \arctan \frac{L_1}{\sqrt{R^2 - L_1^2}}$$

L1前轮与后轮中心距,R曲线曲率半径。

根据无碳小车运动状况,从动件推杆在推程中选择等加速等减速运动规律,回程选择简谐运动规律,另外为了保证凸轮运动的平稳性,在一个推程h中前半段作等加速运动,后半段作等减速运动,从而得到凸轮旋转一周推杆在各阶段的位移S(δ)如下:

$$S(\delta) = \begin{cases} \frac{2h\delta^2}{\delta_1^2} & 0 \leq \delta \leq \frac{\delta_1}{2} \\ h - \frac{2h}{\delta_1^2}(\delta_1 - \delta)^2 & \frac{\delta_1}{2} \leq \delta \leq \delta_1 \\ h & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_1 + \delta_2 \\ \frac{h}{2}[1 + \cos \frac{\pi}{\delta_3}(\delta - \delta_1 - \delta_3)] & \delta_1 + \delta_2 \leq \delta \leq \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \\ 0 & \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq \delta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

在给定凸轮基圆半径 r_b ，根据上述结果，由下式得出凸轮理论和实际轮廓曲线方程分别为：

$$\begin{cases} x_{理} = (S + S_0)\sin \delta + e\cos \delta \\ y_{理} = (S + S_0)\cos \delta - e\sin \delta \end{cases}$$

$$\text{和} \begin{cases} x_p = x_{理} + \frac{r_r dy^2}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \\ y_p = y_{理} + \frac{r_r dx^2}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $S_0 = \sqrt{r_b^2 - e^2}$ ， e 为偏心距， r_r

为滚子半径， S 为从动件推杆运动方程。

最后运用MATLAB软件编制程序，绘制凸轮轮廓，如下图所示。

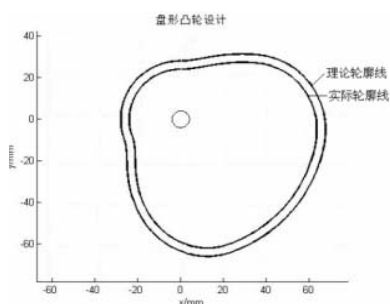
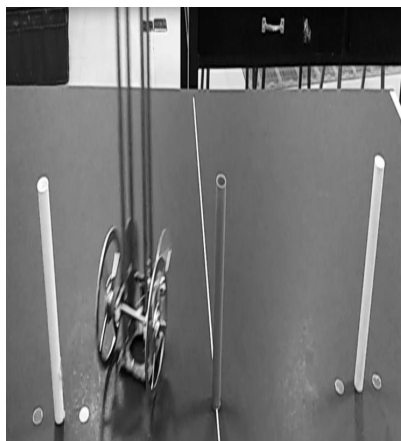


图4 凸轮理论和实际轮廓曲线图

3 实验验证



(a) 实物小车



(b) 小车测试现场

图5 小车实物及现场测试

按照上述设计参数以及小车质量与强度要求，小车主要采用铝、45钢和3D打印材加工制作，如下图5所示。经过现场调试，修改小车的运行轨迹与仿真轨迹较为吻合，最多可以跑20圈，但由于小车零件加工精度、场地不平整以及安装等因素的影响，小车的运行稳定性不太好，有时可能会出现最左或最右一个轨迹圆向上或向下稍偏，另外两个轨迹圆不偏；又或者最左或最右一个轨迹圆无偏差，而两外两个向上或向下稍偏的情况。这些都需要对微调机构进行仔细调节。

4 结论

本文设计了一种基于凸轮机构的双8字无碳小车，通过分析双8字运行轨迹及合理假设，建立了基于圆弧加三次B样条结合的轨迹模型，同时根据估计各弧段长度得出了凸轮的设计特征参数，结合从动件推杆运动规律生成了凸轮轮廓线，最后制作了小车实物样机，通过测试，小车运行较为平稳，轨迹重复精度较高，从而验证了方法的可行性和正确性。

基金项目：

本项目得到西南科技大学国家级实验教学示范中心教育教学研究与改革专项项目基金资助(18xnx06)。

[参考文献]

[1]唐伟,李旭波,黄渊,等.基于凸轮的“双八字”无碳小车结构设计与优化[J].南方农机,2019,50(21):44-46.

[2]张连兆,刘富成,王硕,等.基于凸轮的“双8”字无碳小车设计[J].南方农机,2019,50(9):131-132+148

[3]申鑫泽,臧志成,赵文汇,等.基于RSSR机构的双8无碳小车结构设计与轨迹仿真[J].机械研究与应用,2019,32(05):38-41+46.

[4]韩书葵,节茂岩,林传照,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,(03):241-245+249.

[5]郝小峰,刘贾铨,张振军.基于不完全齿组合机构“8字形”无碳小车的创新设计[J].山东工业技术,2016,(1):235.

[6]张艳丽,田顺,姚逸帆.双“8”字形无碳小车轨迹分析及结构设计[J].西安文理学院学报(自然科学版),2020,23(01):24-29.

[7]任菲,王家润,仇建伟,等.闭合B样条曲线控制点的快速求解算法及应用[J].计算机工程与设计,2011,32(004):1374-1378.

作者简介：

肖晓萍(1979--),女,汉族,江苏泰州人,博士,高级实验师,主要从事机械设计、数字设计与制造等方向的研究。