

自动寻迹车机构设计及运动仿真分析

王信信, 高文中, 冯 萧

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:设计了自动寻迹车的主要机构,用 Pro/E 软件建立了各机构和整车三维实体模型及运动仿真模型,并进行了运动仿真分析,生成了车轮中心位置的轨迹曲线,对寻迹车进行全局碰撞仿真检测,结果表明:寻迹车运行平稳,无干涉现象。对车轮进行速度测量时,发现寻迹车右转弯速度高于左转弯速度。实车中、高速试验时,右转弯易偏离轨道。对此提出了速度控制策略,通过硬、软件结合,解决了左、右转弯速度不等的问题,样机试验表明,寻迹车在直行、起伏路面、坡道和转弯时,运行平稳,工作可靠。

关键词:自动寻迹车;机构设计;运动仿真;轨迹曲线;控制策略

中图分类号:H113.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)03-0081-08

0 引言

自动寻迹车是指安装有光学或电磁等自动导引装置,具有安全避障并能沿预定轨迹行驶的运输车。自动寻迹车不仅可以用于生产车间或仓库的零部件运输,也可完成一些危险环境下某些危险品的运输工作,对提高现代化工厂物料运输的自动化程度和生产效率具有重要意义^[1-2]。现提出一种后轮单边驱动,前轮单边转向的寻迹车机构设计方案。对寻迹车的驱动系统、转向系统、制动系统、底盘等机构进行了设计,采用 Pro/E 5.0 软件建立了各机构及整车三维实体模型和运动仿真模型,并对寻迹车进行了运动仿真分析,验证了寻迹车机构设计的合理性和运行时的平稳性。同时在仿真中发现了右转弯速度高于左弯速度的问题,在实际试验时,中、高速右转弯易偏离轨道。对此提出了速度控制策略,通过硬、软件结合,解决了左、右转弯速度不等的问题,样机试验表明,寻迹车在直行、起伏路面、坡道和转弯时,运行平稳,工作可靠,验证了控制策略的正确性。

1 自动寻迹车机构设计

寻迹车机构设计主要包括机构方案设计、驱动系统机构设计、转向系统机构设计、制动系统机构设计、底盘机构设计。

1.1 寻迹车机构方案设计

按照驱动方式划分,主要有:单舵轮驱动式、差速驱动式、双舵轮驱动式、多舵轮驱动式^[3]。单舵轮驱动式主要用于三轮车型:一个舵轮,两个从动定向轮。其中舵轮具有驱动和转向的功能。这种机构的优点:用途广泛,对地面平整度要求不高。缺点:转向时稳定性差。差速驱动主要用于三轮或四轮车型:两个固定驱动轮,一个或两个从动万向轮,靠两个驱动轮之间的差速实现转向。这种机构的优点:全方位转向,有较强的灵活性。缺点:控制算法较复杂,对地面的平整度要求较高。双舵轮驱动主要用于四轮车型:两个舵轮,两个从动万向轮。其中舵轮具有驱动和转向的功能。这种机构的优点:全方位转向,有很强的灵活性。缺点:控制算法复杂,对地面的平整度要求较高,结构复杂,制造和维修成本高。多舵轮驱动用于多轮重载车型,运动模型较复杂。

鉴于以上几种机构的优缺点,考虑到设计的自动寻迹车采用光电导引,轨道铺设在车体中间位置的

收稿日期:2016-05-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.2017.03.16

作者简介:王信信(1989-),男,硕士研究生,主要从事机电一体化研究。E-mail:799211015@qq.com

王信信,高文中,冯萧.自动寻迹车机构设计及运动仿真分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(3):81-88.

正下方,若采用三轮车型或四轮菱形车型中间轮正好在轨道纸上行驶,对轨道造成污染和破坏,由于本寻迹车的载重量不超过 70 kg,转向允许半径较大,导引定位精度和总体工作要求不是很苛刻,又考虑到制造和维修成本低,研发周期短等多方面因素,最终设计了如图 1 所示的后轮单边驱动,前轮单边转向的寻迹车机构方案。

1.2 驱动系统机构设计及机构模型的建立

驱动系统是由驱动轮、驱动电机、减速器、链轮、链条等组成。根据各组成部分的结构尺寸和安装尺寸,建立了驱动系统的机构模型如图 2 所示。

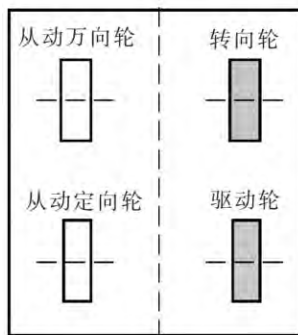


图 1 寻迹车机构方案示意图

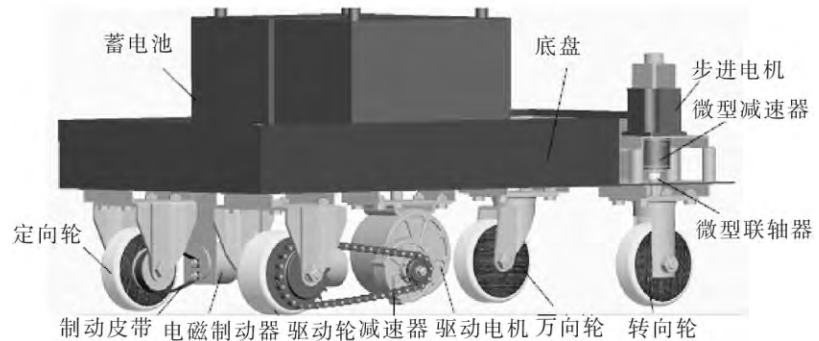


图 2 寻迹车机构模型图

1.3 转向系统机构设计及机构模型的建立

转向系统是由步进电机、微型减速器、微型联轴器、转向轮等组成。根据各组成部分的结构尺寸和安装尺寸,建立了转向系统机构模型如图 2 所示。

1.4 制动系统机构设计及机构模型的建立

制动系统由电磁制动器、制动皮带、驱动轮、定向轮等组成。根据各组成部分的结构尺寸和安装尺寸,建立了制动系统机构模型如图 2 所示。

1.5 底盘机构设计及机构模型的建立

底盘是用来固定寻迹车的驱动系统、转向系统、制动系统、车身、辅助轮、蓄电池等。寻迹车的后轮都是定向的,前轮都是万向的。根据各组成部分的结构尺寸和安装尺寸,建立了底盘机构模型如图 2 所示。

1.6 建立整车模型

将寻迹车的各主要机构和辅助机构模型组装成整车模型,整车模型如图 3 所示。其中控制柜里安装 PLC 控制器、A/D 转换模块、接线端子排、控制电路板、变压模块、电机驱动器、触摸屏、急停按钮、电源开关、报警装置等。

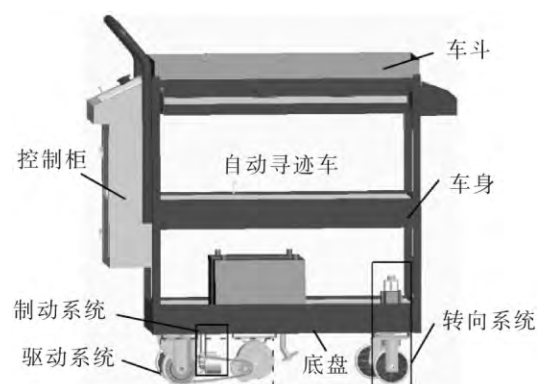


图 3 寻迹车整车模型图

2 寻迹车机构运动仿真分析

运动仿真是使用 Pro/E 机构设计功能创建机构,定义寻迹车的特定运动副,创建使其能够运动的伺服电动机,实现机构的运动模拟。为了达到寻迹车真实的运动模拟,对寻迹车进行动态分析,就是在相应机构上定义重力、阻尼等特征,对机构设置材料、密度等基本属性特征,使其更加接近现实的机构^[4]。

2.1 创建寻迹车运动模型

将基础元件定义为刚性连接。驱动轮、定向轮与固定支架轴定义为销钉连接。转向轮、万向轮与活动支架轴定义为销钉连接,活动支架与固定板定义为销钉连接。寻迹车车体与路面定义为 6DOF 连接,各个车轮与路面定义为凸轮连接,根据寻迹车的工作原理,寻迹车沿着路面上铺设的轨道行驶,因此在轨

道的正中间位置的上方草绘了一条曲线,在寻迹车的底盘几何中心线上建立了两个点,这两个点与曲线定义为槽连接。在装配完成后对寻迹车模型进行静态干涉检查,一切都准确无误后完成寻迹车运动模型的创建。

2.2 仿真过程和仿真结果分析

对寻迹车的各个零部件设置了质量属性并在车斗内放置了一个重物,来模拟寻迹车的车体和负载的质量,整车的质量约为 120 kg,并且定义了重力方向(垂直于路面向下)。通过车轮与地面建立的凸轮连接关系,车轮与地面的摩擦力使得寻迹车行走。车轮是尼龙车轮,路面是水泥路面,通过查阅相关资料,车轮与地面的凸轮连接参数:恢复系数 $e=0.1$,静摩擦系数 $\mu_s=0.25$,动摩擦系数 $\mu_k=0.2$ 。在驱动轮转动轴上添加旋转伺服电动机,在转向轮的转向轴上添加旋转伺服电动机^[5]。

寻迹车有低速、中速、高速 3 个挡位,低速挡驱动轮的角速度是 318.3 deg/s,实际速度是 1 km/h,中速挡驱动轮的角速度是 795.8 deg/s,实际速度是 2.5 km/h,高速挡驱动轮的角速度是 1 273.2 deg/s,实际速度是 4 km/h。

2.2.1 在路面上直行的运动仿真

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 318.3 deg/s,此时的速度是寻迹车的低速挡。定义转向轮的转向轴伺服电动机的角速度是 0 deg/s,并且锁定转向轴。仿真分析类型定义为动态分析。对驱动轮和定向轮的转动轴进行速度测量,测量结果如图 4 所示。从测量值上可以看出定向轮与驱动轮的角速度值非常接近,说明寻迹车直行运动很稳定,符合实际情况,同时也说明了仿真设置的正确性。

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 1 273.2 deg/s,此时是寻迹车行走的最高速度,转向轮的设置不变。以每个车轮的轴心作为轨迹跟踪点,生成车轮中心的运动轨迹曲线,观察寻迹车行走的稳定性。仿真分析类型定义为动态分析,通过回放功能对寻迹车进行全局碰撞检测,结果表明整个运动过程中无干涉现象,寻迹车直行运动仿真的轨迹曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,寻迹车在直行运动过程中,4 个车轮运动轨迹曲线波动很小,接近于直线,仿真结果表明寻迹车在路面上可以正常行走并且运行稳定。

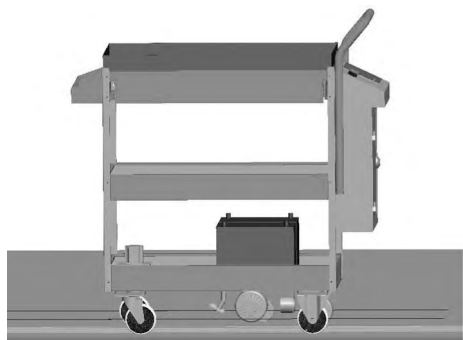


图4 寻迹车直行运动仿真车轮速度测量值

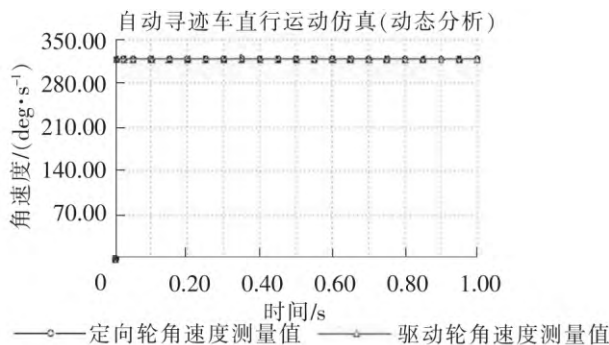


图5 寻迹车直行运动仿真轨迹曲线

2.2.2 在路面上左转弯的运动仿真

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 318.3 deg/s,转向轮的转向轴伺服电动机的角速度是 28 deg/s,方向是逆时针旋转。仿真分析类型定义为动态分析,对驱动轮和定向轮的转动轴进行速度测量,测量结果如图 6 所示。驱动轮的速度是 318.3 deg/s,定向轮的速度约是 182 deg/s。寻迹车在左转弯时定向轮在轨道的内侧转弯半径小,驱动轮在轨道的外侧转弯半径大,测量的速度值符合实际情况。测量的速度值浮动很小,近似直线,说明寻迹车左转弯时速度很稳定,同时也说明了仿真设置的正确性。

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 1 273.2 deg/s,转向轮的转向轴伺服电动机的角速度是 111.1 deg/s,转弯开始时前 0.45 s,转动方向是逆时针旋转,后 0.45 s,转动方向是顺时针旋转。仿真分析类型定义为动态分析,通过回放功能对寻迹车进行全局碰撞检测,结果表明整个运动过程中无干涉现象,寻迹车左转弯运动仿真的轨迹曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,寻迹车在左转弯运动过程中,4 个车轮运动轨迹曲线波动很小,非常平滑,没有出现侧移现象,仿真结果表明寻迹车在最高速度时可以正常左转弯并且运行稳定。

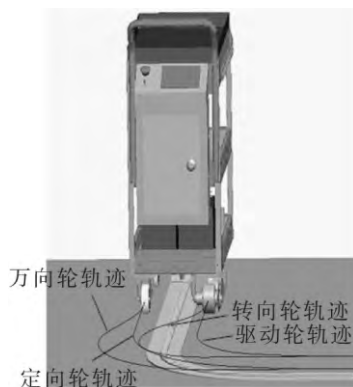


图 6 寻迹车左转弯运动仿真车轮速度测量值

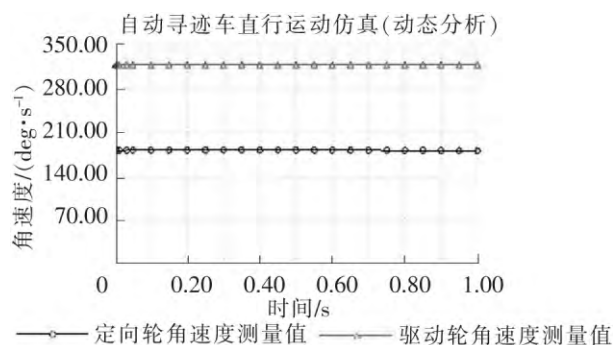


图 7 寻迹车左转弯运动仿真轨迹曲线

2.2.3 在路面上右转弯的运动仿真

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 318.3 deg/s , 转向轮的转向轴伺服电动机的角速度是 48 deg/s , 方向是顺时针旋转。仿真分析类型定义为动态分析。对驱动轮和定向轮的转动轴进行速度测量, 测量结果如图 8 所示。驱动轮的速度是 318.3 deg/s , 定向轮的速度是 497.5 deg/s 。寻迹车在右转弯时驱动轮在轨道的内侧转弯半径小, 定向轮在轨道的外侧转弯半径大, 测量的速度值符合实际情况。测量的速度值浮动很小, 近似直线, 说明寻迹车右转弯时速度很稳定, 同时也说明了仿真设置的正确性。

定义驱动轮伺服电动机的角速度是 1273.2 deg/s , 转向轮的转向轴伺服电动机的角速度 192.3 deg/s , 转弯开始时前 0.26 s , 转动方向是顺时针旋转, 后 0.26 s , 转动方向是逆时针旋转。仿真分析类型定义为动态分析, 通过回放功能对寻迹车进行全局碰撞检测, 结果表明整个运动过程中无干涉现象, 寻迹车右转弯运动仿真的轨迹曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 寻迹车在右转弯运动过程中, 4 个车轮运动轨迹曲线波动很小, 非常平滑, 没有出现侧移现象, 仿真结果表明寻迹车在最高速度时可以正常右转弯并且运行稳定。但是在实际试验测试中, 由于车速太快, 寻迹传感器来不及对轨道进行识别, 造成寻迹车容易失去控制, 偏离轨道。

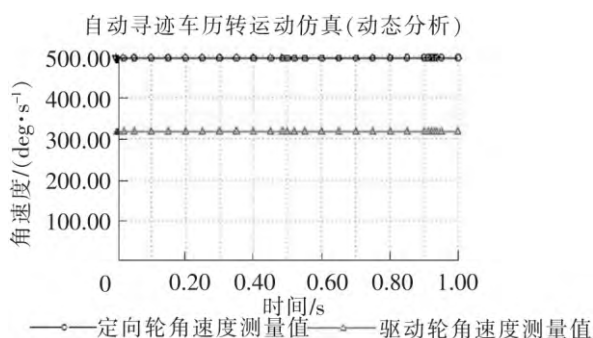
图 8 寻迹车右转弯运动仿真
车轮速度测量值

图 9 寻迹车右转弯运动仿真轨迹曲线

2.2.4 在坡度为 14% 的普通路面上的运动仿真

将寻迹车与路面的槽连接改为寻迹车车体中心平面与轨道中心平面对齐的平面连接, 其余连接类型不变。14% 的路面坡度换算为角度值: $\arctan 0.14 = 8^\circ$, 即地面与水平面的夹角为 8° 。定义驱动轮伺服电动机转动的角速度是 1145.9 deg/s , 寻迹车实际行走的速度是 3.6 km/h , 在此速度情况下, 观察寻迹车在爬坡时的运行状况。定义转向轮的转向轴伺服电动机转动的角速度是 0 deg/s , 并且锁定转向轴。仿真分析类型定义为动态分析, 通过回放功能对寻迹车进行全局碰撞检测, 结果表明整个运动过程中无干涉现象, 寻迹车爬坡运动仿真的轨迹曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出, 寻迹车在爬坡过程中, 4 个车轮

运动的轨迹曲线都比较平滑,波动较小,没有出现跳跃现象,仿真结果表明寻迹车在坡度为 14% 的普通路面上爬坡时运行稳定。

2.2.5 在起伏路面上的运动仿真

方案(5)与方案(4)的连接类型相同。为了模拟寻迹车在复杂路面上运行的情况,设计了起伏路面:凹坑深度为 50 mm,与车轮半径相等,凹坑斜面与水平面的夹角为 8° ;设计凸起路面的高度为 50 mm,凸起斜面与水平面的夹角为 10° 。仿真设置与方案(4)相同,仿真结果表明整个运动过程中无干涉现象,寻迹车在起伏路面上运动仿真的轨迹曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,寻迹车在行走过程中,无论是过凹坑还是过凸起路面,4 个车轮运动的轨迹曲线都比较平滑,波动较小,没有出现明显的跳跃现象,仿真结果表明寻迹车在起伏路面上运行稳定。

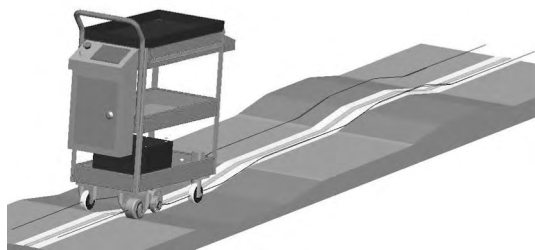


图 10 寻迹车爬坡及在起伏路面上运动仿真的轨迹曲线

2.3 仿真结论

从仿真的结果可以看出,在各种路况中行走时,均无干涉现象,验证了寻迹车机构设计的合理性。通过观察寻迹车在各种路况中运动的轨迹曲线,都比较平滑,波动较小,验证了寻迹车运行的稳定性。存在的问题:寻迹车右转弯的速度高于左转弯的速度。

3 寻迹车速度控制策略

在实际测试试验中,寻迹车左转弯时,驱动轮在轨道的外侧,转弯半径大,无论是哪个速度挡位,都能平稳地转弯。寻迹车右转弯时,驱动轮在轨道的内侧,转弯半径小,低速挡能较平稳地转弯,中、高速挡不能平稳地转弯,寻迹车容易失去控制偏离轨道。为了保证寻迹车转弯时的快速性和平稳性,设计一种速度控制策略:左弯转时驱动轮按设定的速度挡位运行,右转弯时驱动轮按设定的速度挡位进行降速运行,使得右转弯速度与左转弯速度相等。如:在运动仿真过程中,寻迹车低速挡左转时,驱动轮速度设置为 1 km/h,测量的定向轮速度约为 0.57 km/h。寻迹车低速挡右转时,将驱动轮速度设置为 0.57 km/h,测量的定向轮速度约为 1 km/h,这样就能保证左、右转弯速度相等。通过运动仿真测量的速度数据来设置转弯时驱动轮速度,驱动轮速度控制如表 1 所示。通过控制系统硬、软件结合,解决左、右转弯速度不相等的问题。

表 1 驱动轮速度控制表

km/h

挡位	转向	驱动轮速度 v_1	定向轮速度 v_2
低速挡	左转弯	1	0.57
	右转弯	0.57	1
中速挡	左转弯	2.5	1.42
	右转弯	1.42	2.5
高速挡	左转弯	4	2.28
	右转弯	2.28	4

4 寻迹车控制系统硬、软件设计

4.1 硬件设计

硬件设计包括:控制器、触摸屏的选择及相关电路设计,寻迹模块、测速模块、障碍检测模块、转向模块、驱动模块、制动模块、供电模块的设计,自动寻迹车控制系统的硬件设计框图如图 11 所示。

自动寻迹车以 PLC 为控制器,采用触摸屏操作和显示监控信息。寻迹传感器获取轨道信息并送到 PLC 中,PLC 运算后发出控制信号到驱动器中,驱动步进电机转动,步进电机通过传动机构带动转向轮转动,转向传感器获取转向信息,送到 PLC 中判断转向轮是否转到预定位置。与此同时,PLC 发

出控制信号到驱动器中,使驱动电机通过链轮链条带动驱动轮转动,测速传感器获取驱动轮速度信息,送到 PLC 中判断是否达到设定的速度。当寻迹车转弯时,转向传感器首先会判断转向轮的转向,如果是左转,驱动轮会按照原先设定的速度挡位行走。如果是右转,驱动轮会按照表 1 中的速度行走。

4.2 软件设计

软件设计包括:自动寻迹、自动控制、手动控制、站台停靠、避障、报警、触摸屏控制等功能的软件程序设计以及通过软件程序解决寻迹车左、右转弯速度不相等的问题,使得寻迹车运行平稳。速度控制流程图如图 12 所示。

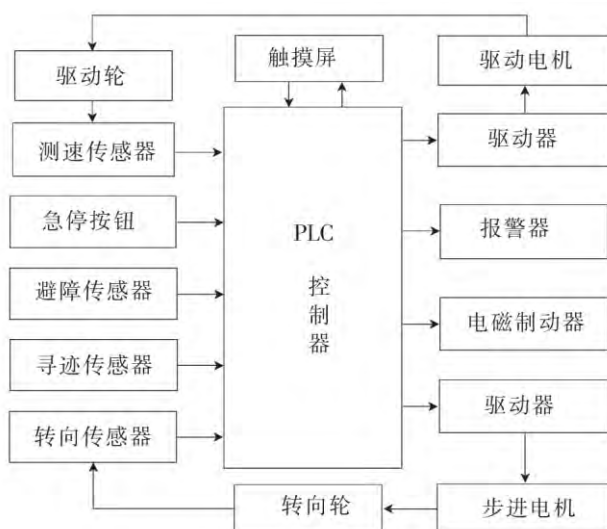


图 11 硬件设计框图

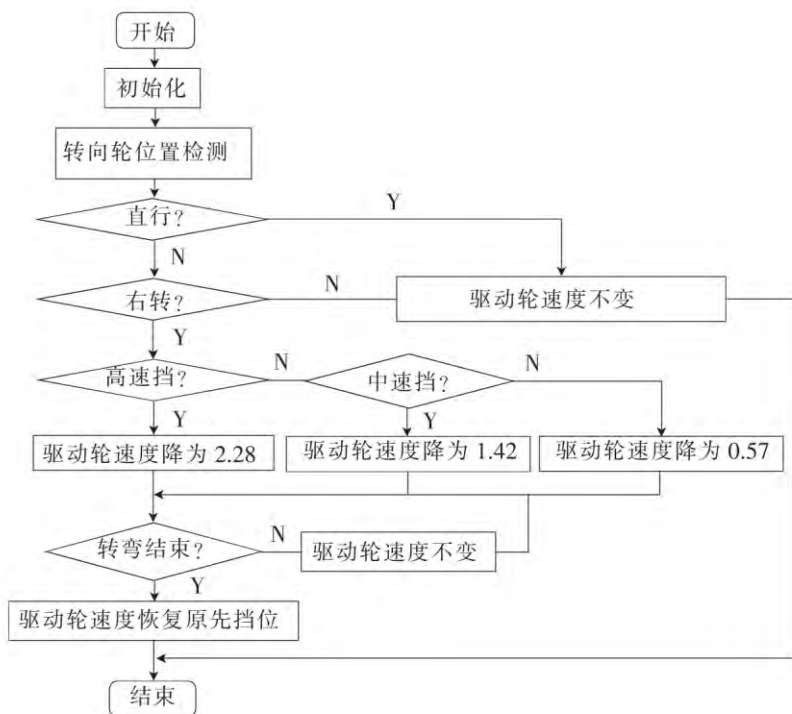


图 12 速度控制流程图

5 样机试制及试验测试

试制的寻迹车样机如图 13 所示。经试验测试,寻迹车在低、中、高速挡左转弯时,运行平稳,在低速挡右转弯时,运行比较平稳,在中、高速挡右转弯时,运行不平稳,容易失去控制,偏离轨道。将速度控制策略应用到寻迹车中,经试验测试,寻迹车在直行、起伏路面、坡道和转弯时,运行平稳,弯道上没有出现误动作。寻迹车在左、右转弯时,通过光电传感器测量的驱动轮和定向轮的速度如表 2 所示,从表 2 中数据

可以看出,左、右转弯的速度基本相等。表 2 中的试验测试速度数据与表 1 中的仿真计算速度数据基本吻合,验证了通过运动仿真测量的速度数据来设置转弯时驱动轮速度的可行性,同时也验证了仿真的正确性。两者速度数据存在差异的原因:建立的寻迹车三维模型与实车样机存在差异;进行运动仿真时,车体运动与实车样机运行存在差异,而且条件比较理想化,考虑的因素较少(如路面的平整度以及摩擦力可能是变化的),与实际试验时的条件存在差异;实际试验时,光电传感器的安装误差以及测量精度等。



图 13 寻迹车样机

表 2 驱动轮、定向轮速度测量表

km/h

挡位	转向	驱动轮速度 v_1	定向轮速度 v_2
低速挡	左转弯	0.99	0.55
	右转弯	0.56	0.98
中速挡	左转弯	2.49	1.40
	右转弯	1.41	2.51
高速挡	左转弯	4.01	2.29
	右转弯	2.27	3.97

6 结论

设计了自动寻迹车的机构方案及各主要机构,建立了寻迹车的三维实体模型及运动仿真模型。进行了机构运动仿真分析,从仿真的结果可看出,寻迹车在各种路况中运行平稳,无干涉现象,机构设计合理,但发现了右转弯的速度比左转弯的速度高。实车中、高速试验时,右转弯易偏离轨道。对此提出了速度控制策略,通过硬、软件设计解决了左、右转速度不等的问题。通过样机试验表明,寻迹车在直行、起伏路面、坡道和转弯时,运行平稳,工作可靠。经工程训练中心现代加工车间试用,控制效果良好。

参 考 文 献

- [1]江正川. 自动导引运输车控制系统设计实现[J]. 科技向导, 2014(8):166-167.
- [2]毕超. 基于激光循迹与 PLC 控制的自动导引车控制系统研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2014.
- [3]武启平,金亚萍. 自动导引车(AGV)关键技术现状及其发展趋势[J]. 制造业自动化, 2013, 35(5):106-109.
- [4]夏元白,夏文鹤. 机械运动仿真与动力分析从入门到精通 Pro/E Wildfire 5.0[M]. 北京:电子工业出版社, 2015:52-53.
- [5]曹瑞奎. 电动自行式高空作业车四轮独立驱动控制系统研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2012.

Mechanism Design and Motion Simulation Analysis of Auto-track-searching Vehicle

Wang Xinxin, Gao Wenzhong, Feng Xiao

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The main mechanism of Auto-track-searching vehicle was designed, using Pro/E software to establish three-dimensional entity model and motion simulation model of various parts as well as the vehicle. The motion simulation analysis was carried out, locus curves of the center position of wheels were generated, and the global collision simulation test of the vehicle was carried out. The results showed that the track vehicle ran smoothly, and there was no interference phenomenon. When the wheels speed were measured, it was found that the track vehicle turn-right speed was higher than turn-

left. When real vehicle was tested at medium and high speed, it deviated easily from track when turning right, thus speed control strategy was proposed. The problem was solved through combination of hardware and software, and the prototype experiment showed that track vehicle ran smoothly and reliably in the straight line, over ups and downs, and at ramps and turns.

Key words: auto-searching for track vehicle; mechanism design; motion simulation; locus curves; control strategy

(上接第 80 页)

(2) RC 保护装置和 MOA 保护装置对中性段产生的过电压治理均产生了良好效果。

(3) 两种保护装置各有优缺点,可根据列车、线路、气候等实际因素选择使用合适保护装置。

参 考 文 献

- [1]秦晓灵. 电力机车过关节式电分相过电压分析与防护[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [2]Gilbert S, Hoang LH. Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink power system blockset[R]. IEEE Power Engineering Society-Winter Meeting, 2000:31-35.
- [3]谢书勇. 真空断路器操作过电压的保护装置—阻容保护器[J]. 高压电器,1997,33(6):38-43.
- [4]梁朝阳. 机车通过关节式电分相过电压研究[J]. 电气化铁道,2012,23(3):8-10.
- [5]李庆铃. 氧化锌避雷器运行状况研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2008.

Research Programme of Over-voltages of Electric Locomotive Passing Articulated Phase Insulator

Zhang Yuan, Huang Yanquan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Over-voltages frequently happen when the electric locomotive passes the articulated phase insulator, which causes tripping of substations and serious influence on safe operations of the overhead contact system and traction substations. In this paper, two kinds of over voltage control schemes are listed. These two kinds of protective devices are RC protection device and MOA protection device. The Matlab/Sim Power Systems are used to simulate the process of the electric locomotive passing the articulated phase insulator which are added two kinds of protection schemes. Based on the simulation results, the best treatment plan is found according to the actual situation.

Key words: electric locomotive; articulated phase insulator; over-voltages; protection scheme