

新型低地板独立轮对转向架主动控制研究

银豪,王腾飞,肖茂,汪慧明

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:低地板车辆的运行稳定性、上下车的方便性受到人们的关注。研究了基于轮毂电动机控制转速以及电磁阀控制轮对摇头角兼容的新型转向架,采用两种模式控制的转向架均可以克服独立轮对转向架的缺点,采用合理的控制目标,可以通过小曲线半径,在直线上实现对中。分析了不同电动机控制策略对横移量的影响。

关键词:列车;独立轮对;主动控制;电动机调速

中图分类号:U260.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0168-03

Research on Active Control of New Low Floor Independent Wheelset Bogies

YIN Hao, WANG Tengfei, XIAO Mao, WANG Huiming

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The operational stability of low floor vehicles and the convenience of getting on and off are attracted people's attention to. This paper makes a study of a new type of bogie in which its speed is controlled by the hub motor and the wheelset angle is controlled by the solenoid valve. The two mode controlling the bogies can be used to overcome the shortcomings of the independent wheelset bogies. The reasonable control targets are adopted so that the alignment can be realized in the straight line through the small curve radius. The influence of the different motor control strategies on the lateral displacement is analyzed.

Keywords: train; independently rotating wheel; active control; motor speed regulation

0 引言

独立轮对转向架由于可以降低地板高度,提高列车运行稳定性以及乘客上下车的方便性得到广泛的关注与研究。该技术的基本思想就是将两车轮通过滚动轴承安装在轴桥上,中间所连的轴桥不必转动因此可以将轴降低,不必与轮心处于同一高度,降低了地板的高度^[1]。轮毂电动机技术是将牵引电动机的转子与车轮轮毂直接相连或者将牵引电动机直接与车轮融为一体,通常每个轮子都设立一个电动机,便于控制^[2]。电动机调速目前有成熟的磁场定向控制与直接转矩控制,两者具有控制原理上的差异及控制效果上的优缺点^[3-4]。

独立轮对技术虽然解决了低地板的问题,但其没有纵向蠕滑力而失去导向能力。在直线上不易对中,偏离钢轨一侧运行容易偏磨,在曲线上不能趋于径向而贴靠轮缘,其导向主要依靠轮对与钢轨之间的挤压而产生的轮缘力来作用,严重时易造成脱轨^[5]。关于独立轮对的可行性,文献[6-7]介绍了后独立轮对转向架在横向上具有较小值,即前轮对采用传统轮对,后轮对采取独立轮对方式使独立轮对技术具有发展前景。文献[8]基于轮毂电动机导向技术分析了轮毂电动机导向性能的控制策略,电控系统可以使得在曲线上具有良好的导向性能。文献[9]介绍了几种典型的独立轮对转向架导向技术,总结了实现独立轮对导向的措施。文献[10]基于独立轮对主动控制

目标,设计出主动差速器连接结构实现了机械耦合。

本文从直线对中与曲线导向出发,设计一种基于转速差主动控制与电磁力矩法兼容的新型转向架。曲线导向时,可采取转速差控制或电磁转矩控制来提高曲线导向性能。在直线段,控制左右轮毂电动机转速一致达到与传统轮对相同的直线对中性能。

1 结构原理图

设计采用车轮用轴桥相连,轴桥的高度低于轮心的高度,从而降低地板高度。方案如图1所示。

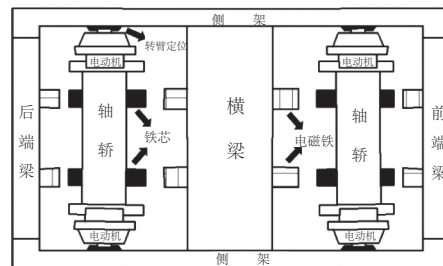


图1 新型转向架结构原理图

图1中4个轮毂电动机与轮对组合为一体,轴桥相连以保证左右车轮的摇头角一致,轴桥的高度低于轮心的高度从而降低地板高度。轴箱采用转臂式定位,保证纵向与横向具有一定刚度。4个轮毂电动机通过传感器送入

作者简介:银豪(1995—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为机车车辆设计理论。

ECU 的信号经过处理后传出控制信号,对电动机进行调速。轴桥两边设有铁芯,前端梁、后端梁以及横梁上装有电磁铁。采用转速差控制时,通过对左、右两轮的转速实施控制实现导向。采用电磁阀控制时,通断相应的电磁线圈,对轴桥产生相应的转矩来实现转向架的径向功能,在直线上,控制目标使得左、右侧转速一致,实现与传统轮对相同的直线对中,解决传统独立轮对的偏磨缺陷。

在 catia 平台上建立三维模型结构示意图,见图 2。

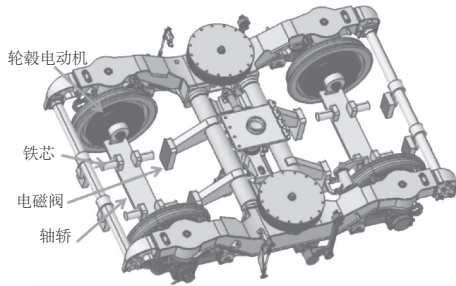


图 2 新型独立轮对转向架 catia 示意图

2 主动导向原理

2.1 曲线的导向原理

传统轮对左、右轮的角速度相等,过曲线时产生了对导向有利的纵向蠕滑力矩。由于过曲线时内、外侧车轮滚过的距离不同,传统轮对设有踏面锥度保证内、外侧车轮在角速度相同情况下滚过的距离不同,使得轮对相对于轨道中心有一定的偏移,对于高速下过小曲线不利,通过控制左、右轮速差或摇头力矩可使轮对偏移量为 0。

现考虑轮对摇头角速度和横移速度对各方向蠕滑率的贡献,考虑轮对横移 y ,摇头角 ψ 和车轮角速度 w 3 个变量时,以速度 v 过半径为 R ,超高为 θ 的曲线时其动力学方程:

$$m\ddot{y} + \frac{2C_{22}\dot{y}}{v} - 2C_{22}\psi + 2k_{22}y = m\left(\frac{v^2}{R} - g\theta\right) \quad (1)$$

$$I_z \ddot{\psi} + \frac{2C_{11}b\lambda}{r_0} \left(y - \frac{r_0 b}{\lambda R} \right) + \frac{2C_{11}b^2\dot{\psi}}{v} - \frac{C_{11}br_0 w_L}{v} + \frac{C_{11}br_0 w_R}{v} + K_\psi \psi + M_\psi = 0 \quad (2)$$

$$I_y w_L - C_{11}\lambda \left(y - \frac{r_0 b}{\lambda R} \right) - \frac{C_{11}br_0}{v} \dot{\psi} + \frac{C_{11}r_0^2 w_L}{v} = T_L \quad (3)$$

$$I_y w_R + C_{11}\lambda \left(y - \frac{r_0 b}{\lambda R} \right) + \frac{C_{11}br_0}{v} \dot{\psi} + \frac{C_{11}r_0^2 w_R}{v} = T_R \quad (4)$$

其中: C_{11} 与 C_{22} 分别为纵向与横向蠕滑系数; v 为前进速度; k_{22} 为一系横向刚度; I_z 与 I_y 分别为摇头转动惯量与点头转动惯量; b 为车轮滚动圆横向跨距之半; r_0 为车轮名义半径; m 为轮对质量; w_L 与 w_R 分别为左、右车轮转速, T_L 与 T_R 分别为作用在左、右车轮上的转动力矩; M_ψ 为电磁转矩作用于轴桥上的转矩, K_ψ 为摇头刚度。

1) 采用转速差控制

对式(2)分析,采用转速差控制时, $M_\psi = 0$,忽略摇头角刚度,当轮对在圆曲线上达到稳态,控制横向偏移量 $y = 0$,推出转速控制方程如下:

$$w_R - w_L = \frac{2bv}{Rr_0} \quad (5)$$

采用转速控制需要保证左、右轮上转动转矩相等,即式(3)、式(4)右端 $T_L = T_R$,两式相减同样获得式(5)的控制目标。当系统实时检测出当前车速及曲线半径,即可对左、右轮毂电动机发出控制指令,控制曲线导向。

2) 采用电磁阀控制

当采用电磁阀控制时,需保证左、右车轮转速一致,若不采用电磁阀控制轴桥偏转,当以速度 v 通过半径为 R 的曲线时,其轮对偏移轨道中心的距离为:

$$y = \frac{r_0 b}{\lambda R} \quad (6)$$

由式(6)可知,当曲线半径过小,横向偏移量会很大,轮缘与钢轨接触时造成轮缘偏磨,容易脱轨。对式(2)分析,当左、右车轮转速相同时,忽略摇头刚度的影响,电磁阀的控制力矩为:

$$M_\psi = \frac{2C_{11}b^2}{R} \quad (7)$$

与转速差控制不同,此时只需要检测曲线半径即可完成曲线导向,使得理论横移量为 0。通过计算偏转力矩大小控制电磁阀线圈电流的大小,其横向蠕滑力使得轮对回正,实现径向功能。

通常,前轮对容易向外偏移,轮缘容易贴靠外轨(图 3),只考虑前轮。

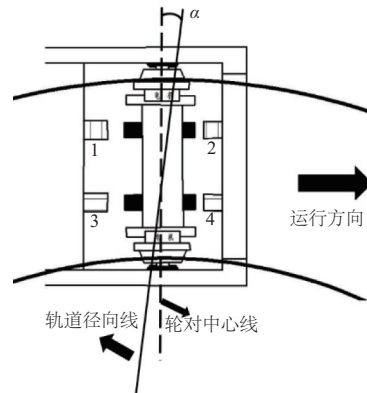


图 3 前轮通过曲线状态图

前轮对轮缘贴靠外轨,摇头偏转角 α 为负,控制电磁线圈 2、3 通电,轴桥产生顺时针的转矩,当偏转角达到正值时,产生朝向曲线内侧的蠕滑力使得轮缘不会接触。根据产生的横向蠕滑力方向,控制电磁阀的策略如表 1 所示。

表 1 前轮对电磁阀控制表

轮对状态	电磁线圈通电规律
偏外	2,3 通电,1,4 断电
偏内	1,4 通电,2,3 断电

2.2 直线对中原理

独立轮对不会产生纵向蠕滑力,从而就不会产生蛇形

运动,这对于提高列车的稳定性以及临界速度大有优势,但是由于无纵向蠕滑力,便无法实现直线对中。当轮对在干扰力的作用下偏离轨道中心时,通常重力复原力与横向蠕滑力方向相反,力平衡后,轮对便无法回到轨道中央,造成轮对的单侧偏磨。直线上行驶时,相当于 $R=\infty$,采用转速差控制策略时,分析式(6)可知,此时 $w_L=w_R$,即与传统轮对类似,采用电磁阀控制策略时,由于控制前提是左、右车轮转速一致,与传统轮对运行原理一致。

2.3 控制策略图

采用转速差控制和电磁转矩控制两种控制方案实现过小半径曲线的导向以及直线的对中。控制流程如图4所示。

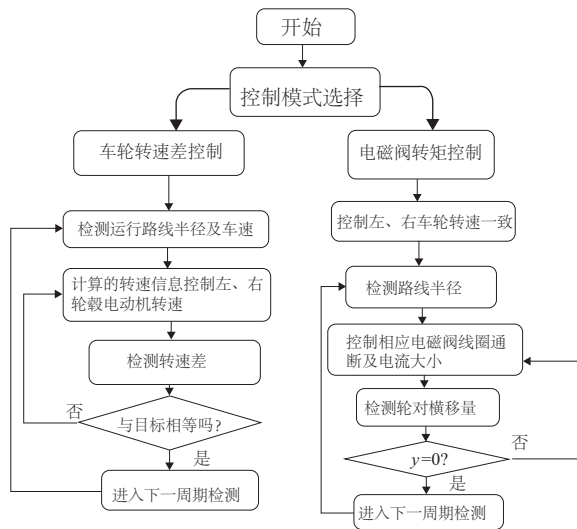


图4 新型转向架控制流程图

3 转速差主动控制仿真

基于轮对转速差的主动控制,从电动机调速策略上,磁场定向控制是在转子坐标系下控制 dq 轴坐标的电流达到跟随效果。直接转矩控制是基于电压型逆变器输出的电压空间矢量对电动机定子磁场和转矩的控制作用上。针对该新型独立轮对曲线导向,电动机调速方法对轮对横向偏移量的影响,采用simulink对轮对横移量进行分析。仿真设置参数见表2所示。

表2 仿真参数表

参数	值
车轮名义半径(r_0)/m	0.46
车速(v)/(m/s)	30
曲线半径(R)/m	300
滚动圆跨距之半(b)/m	0.75
超高角度(θ)/(°)	5.7
等效锥度/ λ	0.05

$t=0.1$ s时,左、右两轮接收速度差指令对两轮转速进

行差速控制,纵轴为横移量变化,图5为采用6扇区的直接转矩控制,0.1s之前轮对横移量处于最大的23mm,过小半径曲线时横移量很大,容易导致轮缘接触。转速差控制后,横移量恢复0mm位置,在其上、下波动,最大幅值超过5mm。图6采用细分扇区后的直接转矩控制,横移量的波动幅值在2.5mm左右,两种直接转矩控制横移量响应迅速,没有超调量,能够迅速过渡到目标值。图7采用电流滞环控制,转速差控制后,横移量能够稳定在0mm处,横移量波动幅值很小,但是在瞬态具有一定的超调量,即瞬态响应性能不如直接转矩的性能。

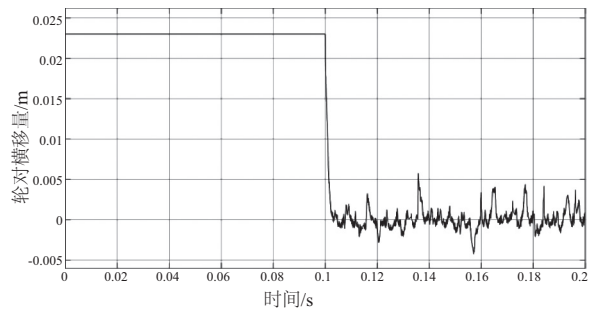


图5 直接转矩控制下横移量变化

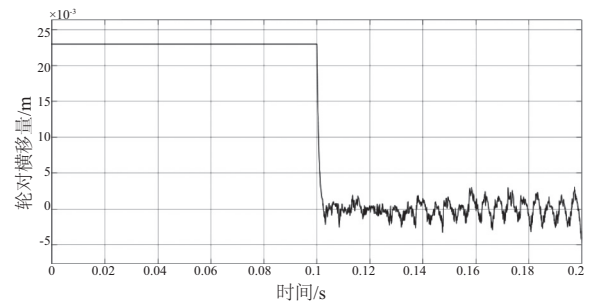


图6 细分扇区的直接转矩控制下横移量变化

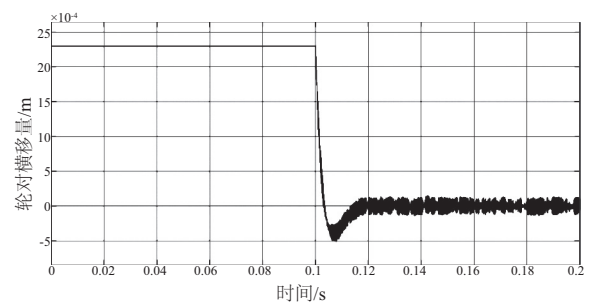


图7 磁场定向控制下横移量变化

4 结语

新型独立轮对转向架在低地板等优势的基础上,采用轮毂电动机转速控制与电磁阀摇头转矩控制两套控制策略,实时监测路线半径及车速,可以通过小半径曲线,在直线上对中。通过理论与仿真分析得出以下结论:

1) 采用主动控制两侧车轮转速或通过电磁线圈控制摇头力矩均可使独立轮对车轮通过小半径曲线和直线对中。

(下转第192页)