

文章编号:1671-1637(2013)03-0040-07

轻轨车辆电气耦合轮对导向控制技术

孙效杰,陆正刚

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

摘要:针对独立车轮自导向性能差的问题,应用改进电轴技术在轻轨车辆电机单独驱动独立车轮中,形成一种电气耦合轮对型式,以无形的电轴替代传统的机械轴,改善导向性能。从电路分析理论出发,分析了新型耦合轮对的耦合性能和影响因素,确定电气耦合轮对是一种对左右车轮转角差自动施加反馈控制的技术,且轮对耦合的强弱可通过调节电容与电阻实现,调节电容方案因能耗低而优于调节电阻方案。建立电气耦合轮对和弹性阻尼耦合轮对轻轨车辆横向动力学模型,分析了轮对的转向行为。仿真结果表明:电气耦合轮对耦合力矩最大达到近 $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$,耦合能力强;直线上受扰动后,2种车辆的横移量与摇头角自行趋于0,通过曲线时,横移量稳定值小于 8 mm ,摇头角小于 0.2° ,因此,2种耦合轮对车辆具有直线对中能力和曲线通过性能;通过小曲线时,电机因电气耦合而造成的最大耗能功率低于 140 W ,系统能耗低。

关键词:车辆工程;轻轨车辆;电轴技术;耦合轮对;导向性能

中图分类号:U270.33

文献标志码:A

Steering control technology of LRV with electrical coupled wheelset

SUN Xiao-jie, LU Zheng-gang

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A new coupled wheelset was proposed by electrical coupled method to improve the self-steering behavior of independently rotating wheel. The improved electrical shaft system was applied in LRV(light railway vehicle) with motor independently driven wheels to construct the ECW(electrical coupled wheelset). An invisible electrical shaft replaced the conventional mechanical shaft between the motor-driven wheels. The coupled capacity and influencing factors of ECW were studied based on circuit analysis theory. It was ascertained that oriented mechanism of ECW was an active feedback control technology, and the rotating angular difference between left and right wheels was taken as feedback signal. The coupled capacity was adaptive by adjusting capacitance or resistance. It was better method for regulating capacitance than resistance as low power consumption. The numerical models of LRVs with ECW and EDCW(elasto-damper coupled wheelset) were established to simulate the steering behavior. Simulation result indicates that the maximum coupled torque of ECW is near to $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, so the coupled ability is more powerful. LRVs with ECW and EDCW finally run along the center line of straight track after inputting a excitation, and their lateral displacements and attack angles are respectively less than 8 mm and 0.2° while vehicle runs on curve track, so they have good centering ability and curve negotiation. It's a low-power cost for electrical coupled system to produce coupled torque, and the maximum consumption power of motor is no more than 140 W when vehicle runs on the

收稿日期:2013-01-18

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG11B02)

作者简介:孙效杰(1984-),男,安徽亳州人,同济大学工学博士研究生,从事车辆系统动力学研究。

导师简介:陆正刚(1966-),男,江苏新沂人,同济大学教授,工学博士。

small radius curve track. 3 tabs, 8 figs, 13 refs.

Key words: vehicle engineering; LRV; electrical shaft technology; coupled wheelset; steering behavior

Author resumes: SUN Xiao-jie(1984-), male, doctoral student, +86-21-69583693, sxjlm2003@163.com; LU Zheng-gang(1966-), male, professor, PhD, +86-21-69582154, luzhenggang@tongji.edu.cn.

0 引言

当今轻轨车辆上广泛应用独立车轮以有效降低地板面高度,但因独立车轮自导向性能不如传统轮对,需要施加其他技术使其恢复自导向能力,最简单的导向措施就是采用其他方式把车轮重新耦合起来。研究人员想到通过机械、磁力、液力、电气等方式把独立车轮再次耦合起来,形成耦合轮对^[1-7]。国外低地板轻轨车辆制造商 ADtranz(已被 Bombardier 收购)生产的 GT6N、Citadis 家族的 Arpège 和 Solfège 转向架与意大利 AnsaldoBreda 生产的 Sirio 转向架都采用横轴将左右车轮耦合起来,其中 GT6N 和 Sirio 还加装了机械差速器^[8]。这些技术是实现左右车轮之间类似刚性轮对具有相同的角速度,以恢复导向性能;Combino 和 Sirio 转向架的牵引电动机纵向布置于车轮外侧,通过螺旋圆锥齿轮驱动同侧前后车轮,人为地造成机械上的纵向耦合;中国北车集团长春轨道客车股份有限公司生产的国内当前唯一一款自主开发研制的 100% 低地板轻轨车辆转向架采用与 Combino 类似技术,双电机纵向布置驱动同侧前后车轮^[9]。纵向耦合独立车轮转向架轮轨间存在纵向蠕滑力矩以实现自导向,且纵向蠕滑力矩的大小与横向耦合独立车轮转向架在同一数量级上^[10]。

随着电力电子技术的发展,通过电气控制技术替代机械结构耦合成为发展的必然趋势。电气控制导向技术可分为两类:有额外的导向装置和无专门导向装置。前者研究的代表如 Mei 等提出一种基于左右车轮转速差与轮对摇头速度的主动导向与稳定性控制方案^[2];池茂儒提出磁流变耦合器方案^[3];任利惠等提出基于速差并补充线路曲率的主动导向控制方案^[4]。上述方案包含额外的导向装置,如磁流变耦合器与摇头力矩作动器,通过对导向装置的控制,实现车轮导向。后者无额外的导向装置,如任利惠等提出的轮毂电机驱动独立车轮导向控制方案^[5];孙效杰等提出电气耦合轮对(Electrical Coupled Wheelset,简称 ECW)概念^[6-7],应用电轴技术实现驱动车轮间的耦合。这些方案中牵引电机集成牵引与导向的功能,不需要

额外的导向装置,可简化转向架机械结构。

虽然电气耦合轮对自动反馈调节牵引电机的转矩,实现车轮间耦合^[6-7],需要实测左右车轮转速作为反馈控制信号的控制系统^[5]比较简单,但通过调节电阻改变轮对间耦合强度,存在系统能耗大的弊端。本文在电气耦合轮对的基础上重点研究了一种采用改进电轴技术的耦合轮对技术,在转子电路串入电容,系统不但耦合能力增强,而且通过调节电容改变耦合能力,系统能耗低。

1 电轴技术原理

1.1 改进的电轴技术

在带公共变阻器的电轴系统中,双电机是拖动电机也是同步电机,因此,系统结构简单。另一方面,因为在转子电路中并入电阻,依靠改变电阻大小实现调节平衡转矩,能耗大,功效低。改进的带公共变阻器电轴系统^[11]见图 1, M_1 和 M_2 是型号、参数完全相同的绕线异步电机,两电机定子端并联接于同一个交流电源上,转子电路先串入电容,再并入变阻器。当左右负载转矩相同时,电机 M_1 和 M_2 同步旋转,转子间无相位差角,无平衡电流;当负载不等时,有平衡电流出现,能量流动于两电机之间产生附加转矩,使得负载较大的一侧输出电机转矩增大,负载较小的一侧降低。电轴系统依据负载的变化自动平衡转矩输出,达到两电机同步运行。

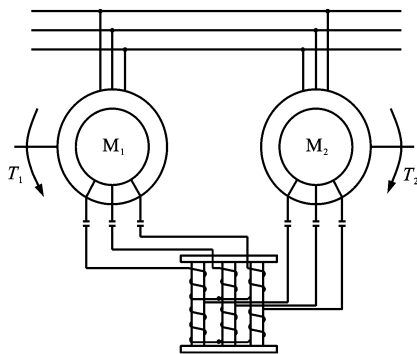


图1 改进的电轴系统

Fig. 1 Improved electrical shaft system

采用 T 形等效电路,分析转子电路三相绕组均接成星形的改进电轴系统(图 2),其电压平衡方程为

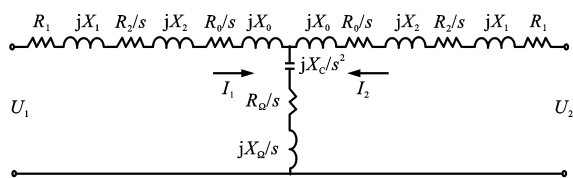


图2 改进的电轴系统一相等效电路

Fig. 2 Single-phase equivalent circuit of improved electrical shaft system

$$\begin{cases} I_2 Z_2 + (Z_2 + Z_1) I_1 = U_1 \\ I_1 Z_2 + (Z_2 + Z_1) I_2 = U_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{R_2}{s} + \frac{R_0}{s} + j(X_1 + X_2 + X_0)$$

$$Z_2 = \frac{R_n}{\sqrt{s}} - j\left(\frac{X_n}{\sqrt{s}} - \frac{X_c}{s^2}\right)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为电机 M_1 、 M_2 的定子相电压; I_1 、 I_2 分别为电机 M_1 、 M_2 的转子电流; R_1 、 R_2 、 R_0 分别为电机定子电阻、转子电阻、感应变阻器电阻; X_1 、 X_2 、 X_0 分别为电机定子感抗、转子感抗、感应变阻器感抗; R_n 、 X_n 、 X_c 分别为转子电路中串入的电阻、感抗、容抗; s 为转差率; j 为虚数单位。

当负载不同时, 负载大的一侧电机的转子转角必然滞后于负载小的电机转子转角某一电角度, 即位差角 θ 。假定电机 M_1 负载大于电机 M_2 , 则两电机定子相电压满足

$$U_1 = U$$

$$U_2 = U_1 e^{-j\theta}$$

电机 M_1 和 M_2 的电磁转矩 T_1 、 T_2 分别为

$$T_1 = \frac{mU^2}{2n_0} \left\{ \left[\frac{R(1-\cos(\theta))}{X^2+R^2} + \frac{(R+2R_n/\sqrt{s})(1+\cos(\theta))}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2 + (R+2R_n/\sqrt{s})^2} \right] + \left[\frac{X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2 + (R+2R_n/\sqrt{s})^2} - \frac{X}{X^2+R^2} \right] \sin(\theta) \right\} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{mU^2}{2n_0} \left\{ \left[\frac{R(1-\cos(\theta))}{X^2+R^2} + \frac{(R+2R_n/\sqrt{s})(1+\cos(\theta))}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2 + (R+2R_n/\sqrt{s})^2} \right] - \left[\frac{X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2 + (R+2R_n/\sqrt{s})^2} - \frac{X}{X^2+R^2} \right] \sin(\theta) \right\} \quad (3)$$

$$X = X_0 + X_1 + X_2$$

$$R = R_1 + \frac{R_2}{s} + \frac{R_0}{s}$$

式中: n_0 为电机同步转速; m 为电机的相数; U 为电机定子额定相电压。

当电轴系统负载不同时, 两电机电磁转矩中存在附加转矩, 负载小的一侧为制动性转矩分量, 负载大的一侧是拖动性转矩分量。决定电轴系统平衡负载能力的是电磁转矩差 ΔT , 即平衡转矩

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{mU^2 \sin(\theta)}{n_0} \cdot \left[\frac{X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2 + (R+2R_n/\sqrt{s})^2} - \frac{X}{X^2+R^2} \right] \quad (4)$$

从式(4)中得出: 改进的电轴系统随着位差角 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大而平衡转矩增大, 耦合能力强。平衡转矩受制于电机供电电压、转速、定转子阻抗和转子电路串入阻抗等参数。其中电机转子电路串入阻抗 X_c 和 R_n , 方便用于调节平衡转矩的大小, 特别是调节容抗 X_c 时仅有无功功率消耗, 较调节电阻 R_n 方式能效高。

1.2 参数对耦合能力的敏感度

电机铭牌参数: 额定功率 P_n 为 55 kW, 额定电压 U 为 380 V, 同步转速 n_0 为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 额定转差率 s_n 为 0.025, 应用数值计算分析各参数对电轴系统耦合能力的影响。

从图3可知: 电轴耦合能力与两电机转子间位差角成正弦函数关系, θ 为 90° 时耦合能力最大; 耦合能力对电机转速 n 敏感度最大, 降低电机转速(提高转差率)能提高数倍平衡转矩, 因此, 一旦系统耦合能力不足, 最直接有效的措施就是减低转速; 改进的电轴系统平衡转矩在串入电容 $C=0.1 \text{ F}$, $R_n \leq 0.1 \Omega$ 附近区域最大; 调节电阻与电容均可改变系统耦合能力, 因容抗不消耗有功功率, 所以选作调节控制量, 用于改变耦合能力的手段。

2 电气耦合轮对

传统刚性轮对因左右车轮刚性固结于车轴上, 动轴可采用单个电机驱动; 独立车轮因左右车轮可自由转动, 单个电机驱动时必须通过其他方式把动力传递到另一侧。双电机驱动的独立车轮转向架已在轻轨车辆中广泛应用, 见表1。

将改进的电轴技术应用在独立车轮轮对双驱动电机上, 车轮旋转存在电气耦合关系, 不再完全独立, 平衡转矩使得两者同步。这个耦合器不是机械实物, 而是由无形的电磁场构成, 因此, 应用电轴技

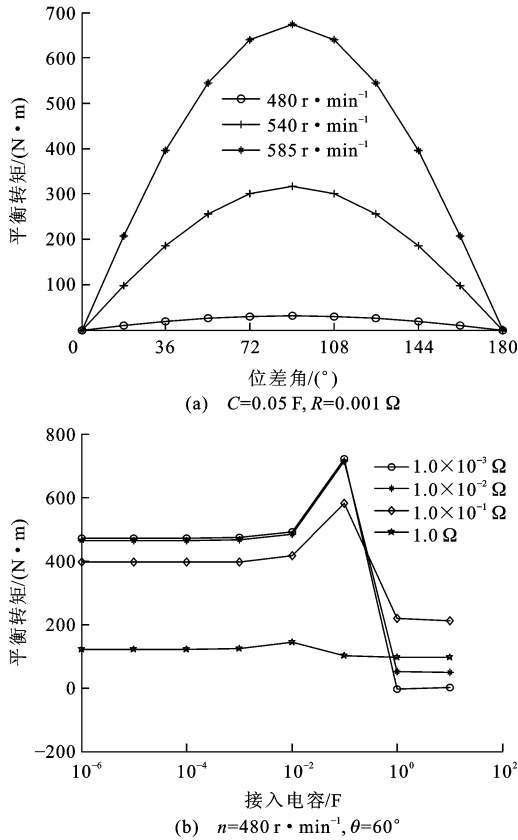


图3 耦合能力的参数敏感度分析

Fig. 3 Parameter sensitivity analysis on coupled ability

表1 双电机驱动独立车轮对转向架

Tab. 1 Bogies with IRW driven by double motors

转向架	驱动电机	生产商	运营城市
Eurotram	四电机	Bombardier	斯特拉夫堡
Incentro	四电机	Bombardier	南特
R3.1	四轮毂电机	Siemens AG	法兰克福
Tram 2000	两轮毂电机	Bombardier	布鲁塞尔
Variotram	四轮毂电机	ABB Henschel	开姆尼斯

术于双电机拖动的独立车轮中,构成了一种新颖且简单的耦合轮对型式——电气耦合轮对。

2.1 电气耦合轮对的导向机理

电机驱动的独立车轮具有横向位移(y_w)、摇头角(ψ)和左右车轮点头角(β_L, β_R)4个自由度,其中横移与摇头方程与传统轮对一致,不再列出,其点头运动的动力学方程为

$$I_{wy}\ddot{\beta} + f_1\lambda\left(y_w - \frac{r_0 b}{R\lambda}\right) + \frac{f_1 b r_0}{V}\dot{\psi} + \frac{f_1 r_0^2}{V}\dot{\beta} = T \quad (5)$$

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{\beta}_R - \dot{\beta}_L}{2}$$

$$T = \frac{T_R - T_L}{2}$$

式中: T_L, T_R 分别为左右独立车轮驱动转矩; V 为

车辆速度;其他变量意义见表2。

表2 轻轨车辆动力学模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of LRV dynamics model

变量名称	符号	数值
轮对质量/kg	m_w	1 250
构架质量/kg	m_t	2 500
车体质量/kg	m_c	22 000
轮对转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{wx}/I_{wy}/I_{wz}$	700/100/700
构架转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{tx}/I_{ty}/I_{tz}$	1 500/1 000/2 500
车体转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_{cx}/I_{cy}/I_{cz}$	$4\times 10^4/2\times 10^6/2\times 10^6$
每轴箱一系(纵/横/垂向)刚度/($\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)	$K_{px}/K_{py}/K_{pz}$	10/5/1
每轴箱一系阻尼/($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	$C_{px}/C_{py}/C_{pz}$	5/5/1
每构架一侧二系刚度/($\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)	$K_{sx}/K_{sy}/K_{sz}$	0.25/0.25/0.40
每构架一侧二系阻尼/($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	$C_{sx}/C_{sy}/C_{sz}$	1/60/60
滚动圆跨距之半/m	b	0.75
轴距之半/m	L_t	1
定距之半/m	L_h	5
一系悬挂横向跨距之半/m	L_{py}	1
二系悬挂横向跨距之半/m	L_{sy}	1
车轮半径/m	r_0	0.3
纵/横向蠕滑系数	f_1/f_2	$1.149\ 4\times 10^7/9.671\ 5\times 10^6$
车轮等效锥度	λ	0.2

采用双电机驱动的独立车轮,当引入电轴系统构成电气耦合轮对时,式(4)与式(5)之间存在如下关系

$$\begin{cases} \Delta T = 2T \\ \theta = 2p\mu\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: p 为电机极对数; μ 为齿轮传动比($\mu>1$)。

把式(6)代入式(4)整理后得到

$$T = \frac{mU^2 \sin(2p\mu\beta)}{2n_0}.$$

$$\left[\frac{X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2}{(X+2X_n/\sqrt{s}-2X_c/s^2)^2+(R+2R_n/\sqrt{s})^2} - \frac{X}{X^2+R^2} \right] \quad (7)$$

T 是关于两车轮旋转机械转角差 β 的函数,因此,电气耦合轮对相当于独立车轮间加入了一种基于机械转角差 β 为反馈量的主动控制技术。反馈控制的比例系数与电机参数、同步转速、齿轮减速比和转子接入的阻抗相关。

2.2 电气耦合轮对的同步性能

55 kW 绕线异步电机,转子电路串入电容和电

阻分别为 $C=1.0 \times 10^{-1} \text{ F}$, $R_{\Omega}=1.0 \times 10^{-3} \Omega$ 时, 构成电气耦合轮对。仿真不同负载时, 在电磁平衡转矩作用下的系统同步能力见图 4, t 为时间, n_1 、 n_2 分别为 M_1 、 M_2 的转速。两电机负载在 t 为 2 s 和 t 为 4 s 时突变, 其中 $t=2 \text{ s}$ 时, M_2 负载阶跃增大, $T_2=1.5 T_1$, 车轮在电轴系统作用下转速振荡下降后保持同步; $t=4 \text{ s}$ 时, M_1 阶跃减小, $T_2=2 T_1$, 车轮转速较 $t < 2 \text{ s}$ 低工况下经过微小振荡后继续同步。可见, 采用电轴系统构成的电气耦合轮对同步能力强, 转速下降后同步能力上升, 与理论分析结果一致。

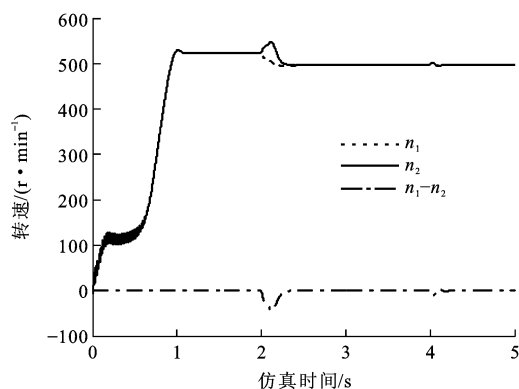


图 4 不同负载下的电气耦合轮对同步性能

Fig. 4 Coupled abilities of ECW under different loads

2.3 单个轮对横向稳定性

式(7)中的正弦函数按照泰勒级数展开, 忽略高次项, 化为机械转角差 β 的线性函数, 为

$$T = \frac{mU^2 p \mu \beta}{n_0} \left[\frac{X + 2X_{\Omega}/\sqrt{s} - 2X_C/s^2}{(X + 2X_{\Omega}/\sqrt{s} - 2X_C/s^2)^2 + (R + 2R_{\Omega}/\sqrt{s})^2} - \frac{X}{X^2 + R^2} \right] \quad (8)$$

轮对线性化后的微分方程转化为状态方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{x}^T = (\dot{y}_w, y_w, \dot{\psi}, \psi, \dot{\beta}, \beta)$$

式中: \mathbf{x} 为状态变量; \mathbf{A} 为状态矩阵。

自由独立车轮和考虑一系悬挂的独立车轮, 状态矩阵 \mathbf{A} 的 3 对特征根(横移、摇头与点头)中横移的一个特征根始终为 0, 说明独立车轮无论有无悬挂系统其横向运动状态都是不确定的, 缺乏自导向能力^[12]; 考虑一系悬挂时, 按表 2 参数计算, EDCW^[13](耦合扭转刚度为 $200 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)和 ECW(55 kW 电机, $R_{\Omega}=1.0 \times 10^{-3} \Omega$, $C=1.0 \times 10^{-2} \text{ F}$)状态矩阵横移的特征根分布情况见图 5, 分布情况相近, 速度低于 $170 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时特征根均具有

负实部, 说明二者是稳定的, 具有自导向能力。

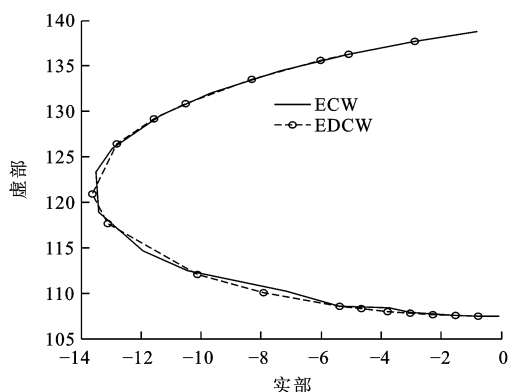


图 5 EDCW 和 ECW 的横移特征根分布

Fig. 5 Eigenvalue loci of lateral displacements of EDCW and ECW

3 车辆导向性能

3.1 EDCW 和 ECW 轻轨车辆模型

将轮对、构架与车体等部件视为刚体, 不考虑各部件的弹性变形; 只考虑单独一辆车的运动, 忽略相邻车辆之间的作用; 假设轮对采用锥形踏面和刀口状轨面。在上述假设基础上采用 MATLAB/Simulink 建立采用 EDCW 和 ECW 轻轨车辆动力学模型, 见图 6, 将整个车辆系统分割成相对独立的子系统, 以降低建模复杂度。

在 2 种模式车轮的车辆模型中, EDCW 耦合扭转刚度与阻尼分别为 $1 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 和 $10 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$; ECW 选择 55 kW 的绕线异步电机, $R_{\Omega}=1.0 \times 10^{-3} \Omega$, $C=1.0 \times 10^{-2} \text{ F}$, 电机不经过齿轮传动而直接驱动车轮。除耦合方式不同外, 两模型其他方面均相同, 模型参数见表 2。

3.2 直线对中性能

0.1 s 时, 在线路上设置一横向 4 mm 激励, 激发车辆系统的振动。一段时间后, 车辆在不平顺的直线轨道上运行, 根据轮对的运动情况考察轮对的直线对中能力, 见图 7。由图 7 可知, 弹性阻尼耦合独立车轮转向架和电气耦合独立车轮转向架的导向轮对在最终后都回到了轨道中心线, 摇头角稳定在 0, 因此, 具有较好的直线对中能力。

3.3 曲线通过性能

车辆以恒定速度 $V=36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行, 通过一段“直线-入缓和曲线-圆曲线-出缓和曲线-直线”的线路, 圆曲线半径为 150 m, 超高为 0.1 m。

比较 EDCW 和 ECW 车辆一位导向轮对通过相同线路的横移量与冲角, 见图 8, 电气耦合轮对与弹性阻尼耦合轮对的导向轮伴随着横移与冲角通过曲

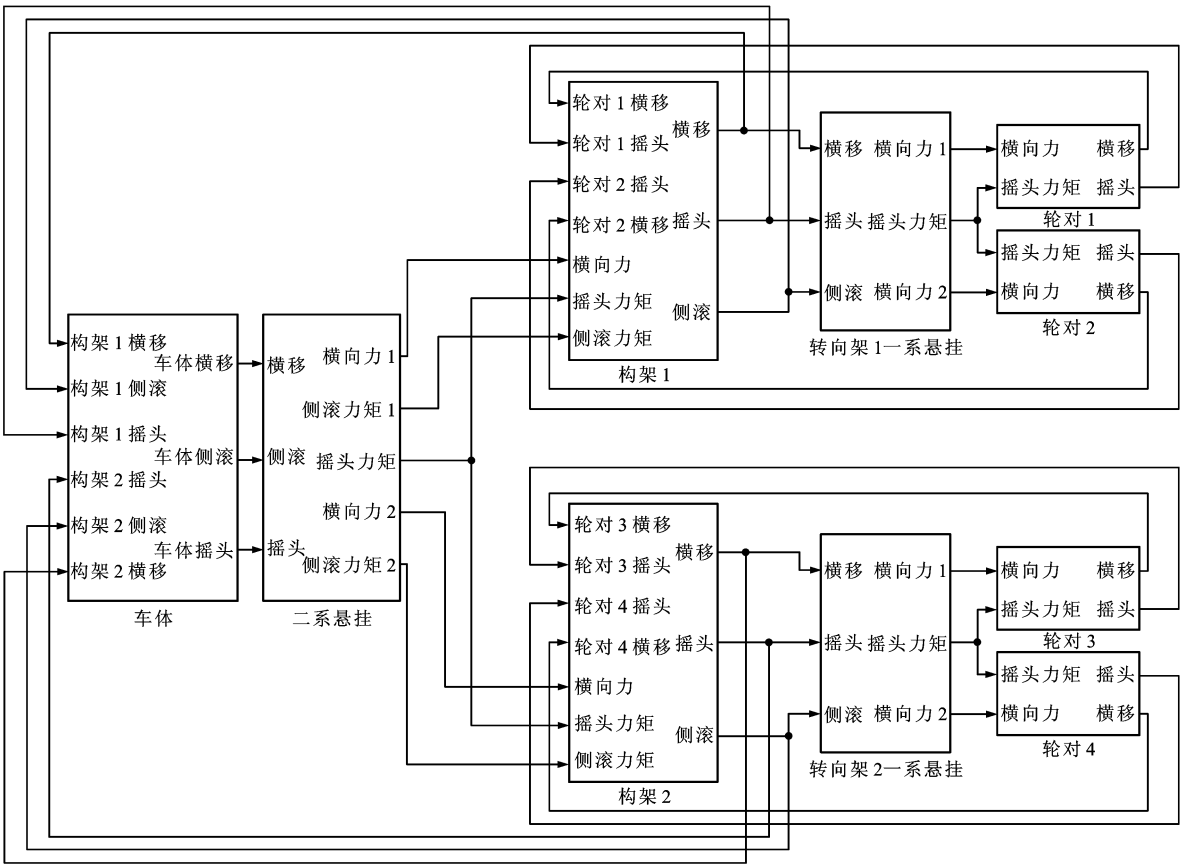


图 6 车辆动力学模型

Fig. 6 Dynamics model of LRV

线,且横移稳定值在 7 mm 左右,摇头角小于 0.2°,数值基本一致,说明二者均具有曲线通过性能,因此,构造电气耦合是一种有效的改善独立车轮导向性能的技术。表 3 反映 ECW 轻轨车辆 4 个轮对曲线通过时,车轮横移在 8 mm 附近,轮缘尚未接触钢轨,且冲角小于 0.2°,数值较小,可降低轮轨磨耗;由于采用串入容抗的方式,使得耦合系统电阻较低即可实现近 1 kN·m 的耦合力矩,耦合能力强;电机因耦合导向而消耗的最大功率不超过 140 W,能耗较低。

表 3 ECW 轻轨车辆各轮对状态

Tab. 3 Wheelsets states of LRV with ECW

轮对	最大横移/ mm	最大冲角/ (°)	最大耦合 力矩/(N·m)	最大电机耦合 消耗功率/W
1	8.1	0.149	741.5	71.6
2	7.9	0.183	706.4	63.6
3	8.2	0.172	904.2	136.7
4	7.8	0.195	925.6	126.9

4 结 语

ECW 具有较强的耦合能力,最大耦合力矩近 1 kN·m,采用 ECW 和 EDCW 的车辆均具备直线

对中能力和曲线通过能力,且电机因耦合而消耗的功率低于 140 W,因此,ECW 作为一种新的耦合轮对技术,结构简单,控制方便,可以有效改善独立车轮导向性能,在城市轨道车辆中具有应用价值。文中分析仅限于电气耦合轮对性能原理的理论分析和数值仿真,控制耦合强度以适应不同线路状况是下一步研究的重点,还需深入研究实际电机安装布置与牵引传动系统设计等问题。

参 考 文 献 :

References :

[1] BENINGTON C K, GREENHORN J W R. A proposal for improving the performance of a two-axle rail-guided vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1971, 13(3): 157-167.

[2] MEI T X, GOODALL R M. Practical strategies for controlling railway wheelsets independently rotating wheels[J]. Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(3): 354-360.

[3] 池茂儒. 耦合轮对车辆动力学性能的研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.

CHI Mao-ru. A study on dynamics performance of the vehicle with coupled wheelset[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)

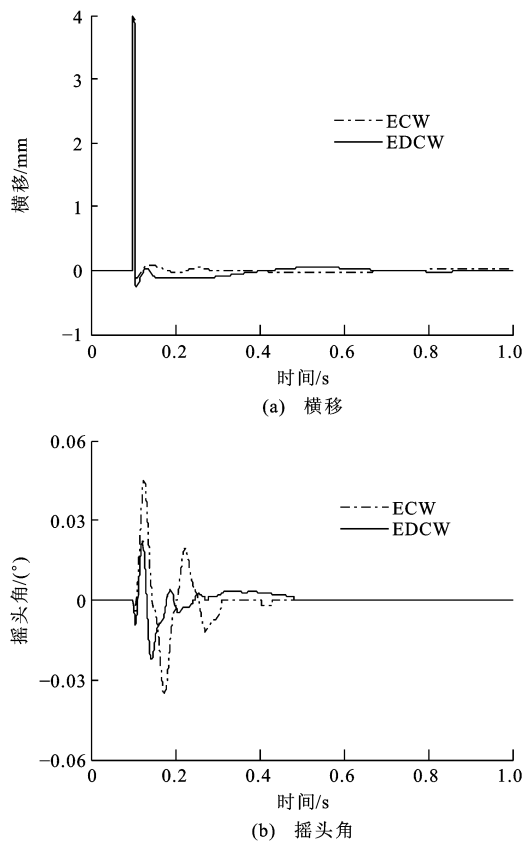


图 7 耦合轮对对中能力

Fig. 7 Centering abilities of coupled wheelsets

- [4] 任利惠, 周劲松, 沈 钢. 一种基于转速反馈的独立轮对的主动导向控制方法[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(1): 90-93.
REN Li-hui, ZHOU Jin-song, SHEN Gang. An approach of active steering of independently rotating wheelsets based on feedback of wheels rotation speed[J]. China Railway Science, 2006, 27(1): 90-93. (in Chinese)
- [5] 任利惠, 周劲松, 沈 钢. 采用轮毂电机的独立车轮轮的主动导向控制[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 77-83.
REN Li-hui, ZHOU Jin-song, SHEN Gang. The active steering control of the independent wheelset with the hub motors[J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 77-83. (in Chinese)
- [6] 孙效杰. 电气耦合独立车轮转向架导向技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
SUN Xiao-jie. A study on steering technology of bogie with electrical coupling independently rotating wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [7] SUN Xiao-jie, LU Zheng-gang, ZHOU Wen-xiang. A new coupled wheelsets of railway vehicles[C]//IWNICKI S. Proceedings of the 22nd IAVSD Symposium. Manchester: Manchester Metropolitan University, 2011: 1-6.
- [8] 王 欢, 戴焕云, 池茂儒. 国外 100% 低地板轻轨车动力转向架纵览[J]. 内燃机车, 2007(12): 1-6.
WANG Huan, DAI Huan-yun, CHI Mao-ru. Motor bogie of foreign LRV with all-low-floor[J]. Diesel Locomotives, 2007(12): 1-6. (in Chinese)

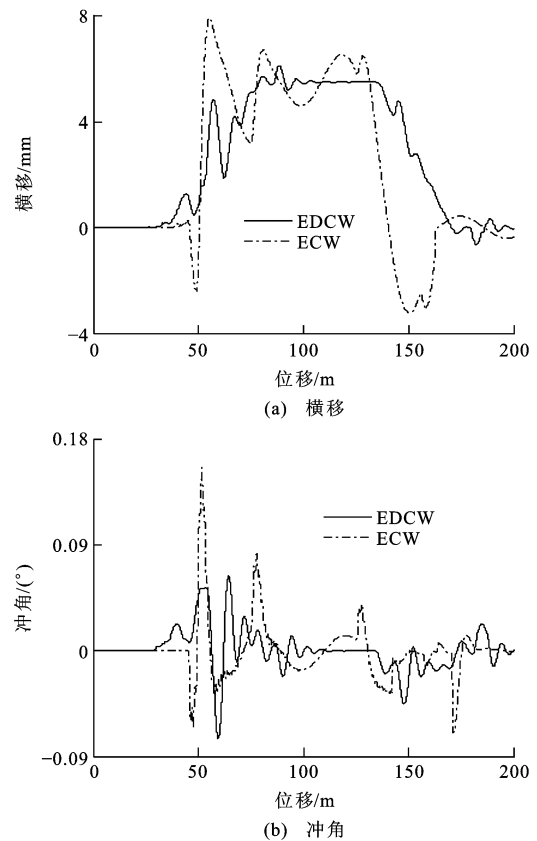


图 8 耦合轮对曲线通过性能

Fig. 8 Curving performances of coupled wheelsets

- [9] 赵明花. 低地板车辆的研制[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(5): 13-16.
ZHAO Ming-hua. Development and manufacture of low-floor vehicles[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(5): 13-16. (in Chinese)
- [10] 许明春, 曾 京. 纵向耦合独立旋转车轮转向架导向机理[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 43-50.
XU Ming-chun, ZENG Jing. Guiding mechanism of longitudinal coupling bogie with independently rotating wheels[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 43-50. (in Chinese)
- [11] AKAYLEH A, ABDALLAH S. The systems of synchronous rotation in the base of electromagnetic working shaft with insertion capacitances in the rotors coils[J]. Jordanian Journal of Applied Science: Natural Sciences, 2005, 7(1): 1-10.
- [12] 任利惠. 独立车轮导向技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
REN Li-hui. The study on method to enhancing steering capability of independently rotating wheels[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [13] 王军平, 黄运华, 陈 倩, 等. 弹性阻尼耦合轮对动力学特性分析[J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(4): 44-49.
WANG Jun-ping, HUANG Yun-hua, CHEN Qian, et al. Analysis of dynamic characteristics of elasto damper coupled wheelset[J]. Railway Locomotive and Car, 2012, 32(4): 44-49. (in Chinese)