

# 交流电传动轨道车牵引系统设计

李勇斌<sup>1</sup>, 李博韬<sup>2</sup>, 李国锋<sup>1</sup>, 周秀芳<sup>3</sup>, 黄坚<sup>3</sup>

(1. 中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710015;

2. 上海电机学院 电子信息学院, 上海 201306;

3. 江苏今创车辆有限公司, 江苏 常州 213012)

**摘要:** 针对国内首台交流传动重型轨道车牵引系统研制, 完成整车交流电传动系统方案设计, 并运用干线机车牵引计算方法, 完成整车牵引/制动特性和牵引系统各关键部件的主要技术参数计算, 通过系统级半实物仿真测试和整车台架滚动试验, 验证了牵引系统设计的符合性。

**关键词:** 轨道车; 交流电传动系统; 牵引特性; 持续牵引力; 持续速度

**中图分类号:** TM921    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19131

## Design of AC Drive System for Railway Motor Trolley

LI Yongbin<sup>1</sup>, LI Botao<sup>2</sup>, LI Guofeng<sup>1</sup>, ZHOU Xiufang<sup>3</sup>, HUANG Jian<sup>3</sup>

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710015, Shaanxi, China; 2. School of Electronic Information,

Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 3. Jiangsu KTK Locomotive &

Rolling Stock Co., Ltd., Changzhou 213012, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aiming at the development of the first AC traction system of heavy duty railway motor trolley in China, the design of AC drive system for the whole vehicle was completed, the technical parameters of each key part of the traction system were calculated by using the locomotive calculation standard, and the traction/electric braking characteristics was designed. The compliance of the traction system design was verified by the system level semi-physical simulation test and the rolling test of whole vehicle bench.

**Key words:** railway motor trolley; AC electric drive system; traction characteristics; continue tractive effort; continue speed

随着高铁运营里程的快速发展, 铁总提出确保在窗口时间内完成百公里 2.5%~3.5% 长大坡道高铁线路检修需求, 而现有铁路检修用重型轨道车牵引系统多为机械、液力或直传动, 持续牵引力小且无电阻制动功能。长大坡道牵引力不足会导致无法在窗口时间内完成牵引作业任务, 在空气制动长时投入工况闸瓦和轮对踏面产生的高温和剧烈磨损会带来轮对弛缓和制动过温失效危险。为满足高铁线路安全检修需求, 文献[1]研制完成一种新型交流牵引系统并应用在功率 1 040 kW、最高运行速度 120 km/h 的铁路重型轨道车上, 通过 5 000 km 线路运行考核

测试, 具备长大坡道持续大牵引力爬坡和持续大转矩电阻制动下坡能力, 满足高铁线路检修需求。交流电传动系统(以下简称电传动系统)由柴油机、主辅发电机组、牵引变流器系统、轨道车控制系统和辅助系统组成。交流牵引系统与传统直流系统相比具有牵引制动功率大、恒功率速度范围宽、启动牵引力大、黏着利用率高、维护方便等优点。交流传动轨道车属国内首次研制, 牵引计算暂无明确标准执行, 本文借鉴干线交流机车牵引计算规程<sup>[2]</sup>, 阐述了轨道车交流牵引系统计算方法, 并通过半实物仿真测试和整车台架滚动验证了计算的符合性。

# 1 牵引系统方案设计

整车设计输入技术指标如下:柴油机输出功率  $P=1\ 040\ \text{kW}$ ;控制方式轴控;轴式 B0-B0;整车装备质量(黏着重量)  $P_\mu=80\ \text{t}$ ;轴重  $20\ \text{t}$ ;牵引整流输出直流母线电压  $U_{dc}=1\ 800\ \text{V}$ ;半磨耗轮径  $D_k=880\ \text{mm}$ ;齿轮传动比  $\mu_c=94/23$ ;最高运行速度  $v_{\max}=120\ \text{km/h}$ ;启动牵引力  $F_{q\max}\geq 200\ \text{kN}$ ;

持续牵引力  $F_c\geq 150\ \text{kN}$ ;全转速范围转矩精度偏差  $\leq 5\%$ 。

## 1.1 主电路方案

借鉴文献[3]中 EMD-HXN3 型干线内燃机车牵引系统主电路方案,牵引逆变器架控模式改进为轴控方式<sup>[4]</sup>,牵引电机故障损失冗余能力由 50% 提升到 25%,相比架控单轴电机的控制也更为精准。电传动系统原理图如图 1 所示。

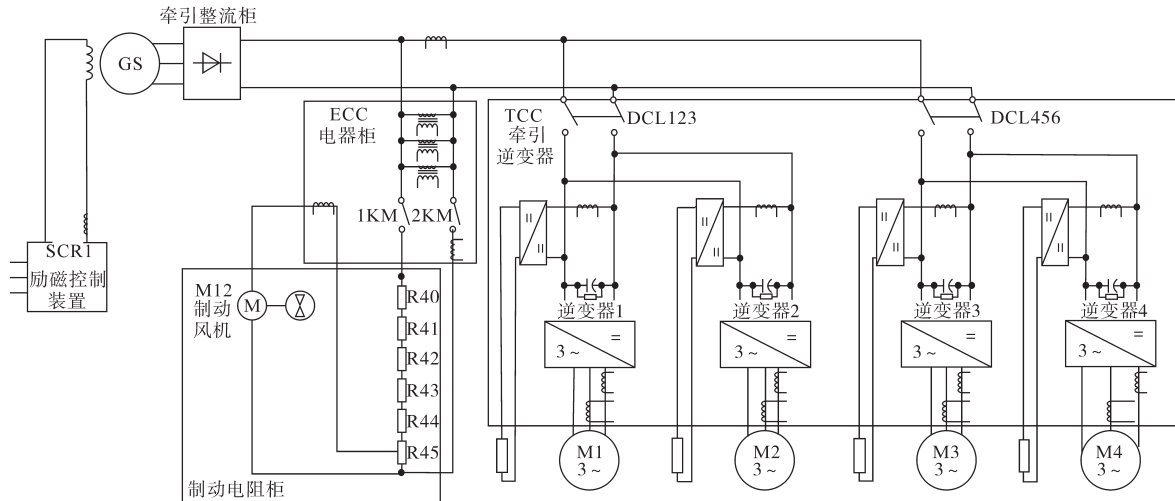


图1 电传动系统原理图

Fig.1 Diagram of electric traction system

依据主电路方案和整车设计输入参数,计算出图 1 电传动系统原理图中主发电机、牵引电机关键参数作为主发电机、整流装置、牵引逆变器和牵引电机及制动电阻柜设计依据,并依据干线机车的牵引制动特性经验公式计算出轨道车的牵引和制动特性参数曲线,并通过牵引逆变器软件控制算法实现轨道车牵引制动输出特性。

## 1.2 系统关键参数计算

1) 轮轴标称功率( $P_z$ )。标称功率作为轨道车 4 台牵引电机的额定输出功率初步计算依据,由公式:

$$P_z = (P - P_f) \times \eta \quad (1)$$

式中: $P_z$ 为轨道车轮轴标称功率,kW; $P$ 为轨道车柴油机功率,kW; $P_f$ 为轨道车辅助功率,kW,一般取  $P \times 10\%$  计算<sup>[2]</sup>; $\eta$ 为轨道车电传动系统效率,内燃机车  $\eta$  通常取 0.84。

计算出轮轴标称功率  $P_z$  结果为

$$P_z = (1040 - 104) \times 0.84 = 786.2\ \text{kW}$$

则 1/4 轮轴标称功率即计算得到牵引电机额定功率  $P_m$  为

$$P_m = P_z / 4 = 196.6\ \text{kW}$$

2) 持续速度( $v_c$ )。持续速度是考核机车最大牵引力所能持续运行的最低速度,通常作为牵引特性恒转矩和恒功曲线拐点,是机车牵引特性设计关键参数之一,由计算公式:

$$P_z = F_c \times v_c / 3.6 \quad (2)$$

推导出:

$$v_c = 786.2 \times 3.6 / 150 = 18\ \text{km/h}$$

式中: $F_c$ 为持续牵引力,取 150 kN; $v_c$ 为持续速度,km/h。

3) 黏着牵引力( $F_\mu$ )。黏着牵引力是机车满载牵引工况,轮对不破坏轨道黏着发生空转所能产生的最大临界牵引力,做为机车最大启动牵引力设计指标参考。

根据计算公式:

$$F_\mu = \mu \times P_\mu \times 9.81\ \text{kN} \quad (3)$$

$$\mu = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (4)$$

当  $v=0$  时,经计算得到启动黏着牵引力为

$$F_\mu = (0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v}) \times P_\mu \times 9.81\ \text{kN} = 256\ \text{kN}$$

式中: $F_\mu$ 为黏着牵引力,kN; $P_\mu$ 为轨道车黏着重量,取值 80 t; $\mu$ 为黏着系数; $v$ 为轨道车速度,km/h。

4)启动牵引力( $F_{q\max}$ )。启动牵引力是机车可发挥的最佳启动牵引性能指标,也是牵引特性设计关键参数之一,由计算公式:

$$F_{q\max} = F_{\mu} \times \lambda \quad (5)$$

式中: $F_{q\max}$ 为启动牵引力,kN; $\lambda$ 为牵引力系数,为使轨道车在既满足 $F_{q\max} \geq 200$  kN又不破坏黏着基础上能发挥最佳启动牵引能力,选取 $\lambda=0.86$ 。

则启动牵引力 $F_{q\max}$ 计算结果为

$$F_{q\max} = 256 \times 0.86 = 220 \text{ kN}$$

5)主发电机额定输出功率( $P_e$ )<sup>[4]</sup>。额定输出功率是发电机设计主要参数之一,由公式:

$$P_e = (P - P_f) \times \eta_e \quad (6)$$

式中: $P_e$ 为主发额定输出功率,kW; $P$ 为柴油机输出功率,kW; $\eta_e$ 为主发电机效率,取0.93。

得到主发电机额定输出功率 $P_e$ 计算结果为

$$P_e = (1040 - 104) \times 0.93 = 870 \text{ kW}$$

6)主发电机额定输出电压( $U_e$ )。额定输出电压是发电机设计关键参数,由公式:

$$U_e = U_{dc} / 1.28 \quad (7)$$

得到主发电机额定输出电压 $U_e$ 计算结果为

$$U_e = 1800 / 1.28 = 1406 \text{ V}$$

式中: $U_e$ 为额定输出电压,V; $U_{dc}$ 为牵引整流输出直流母线电压,V。

7)牵引电机启动转矩( $T_q$ )。根据计算公式:

$$F_{q\max} = \frac{2\mu_c Z T_q \eta_g}{D_k} \quad (8)$$

推导出牵引电机启动转矩计算值为

$$\begin{aligned} T_q &= \frac{F_{q\max} D_k}{2\mu_c Z \eta_g} \\ &= \frac{220 \times 880}{2 \times 4.08 \times 4 \times 0.975} \\ &= 6083 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

式中: $\mu_c$ 为齿轮传动比; $Z$ 为牵引电机台数,取值4; $T_q$ 为牵引电机启动转矩,N·m; $\eta_g$ 为齿轮箱效率,取0.975。

8)牵引电机额定转速( $n$ )。由计算公式:

$$v_c = \frac{60\pi D_k n}{1000000\mu_c} \quad (9)$$

推导出牵引电机额定转速计算结果为

$$\begin{aligned} n &= \frac{1000000\mu_c v_c}{60\pi D_k} \\ &= \frac{1000000 \times 4.08 \times 18}{60 \times \pi \times 880} \\ &= 443 \text{ r/min} \end{aligned}$$

9)牵引电机额定转矩( $M_n$ )。额定转矩是电

机设计关键参数之一,由计算公式:

$$F_c = \frac{2\mu_c Z M_n}{D_k} \eta_g \quad (10)$$

式中: $M_n$ 为牵引电机额定转矩。

取 $F_c=150$  kN,牵引电机额定转矩计算结果为

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{F_c D_k}{2\mu_c Z \eta_g} \\ &= \frac{150 \times 880}{2 \times 4.08 \times 4 \times 0.975} \\ &= 4148 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

10)牵引电机恒功最高转速( $n_{p\max}$ )。由计算公式:

$$v_{p\max} = \frac{60\pi D_k n_{p\max}}{1000000\mu_c} \quad (11)$$

推导出牵引电机恒功最高转速计算结果为

$$n_{p\max} = \frac{1000000\mu_c v_{p\max}}{60\pi D_k} = 2953 \text{ r/min}$$

11)牵引电机额定功率( $P_m$ )。由公式:

$$M_n = \frac{9550 P_m}{n} \quad (12)$$

推导出牵引电机额定功率 $P_m$ 计算结果为

$$P_m = \frac{n M_n}{9550} = 197 \text{ kW}$$

### 1.3 牵引制动特性

牵引制动特性代表轨道车的牵引和制动性能,同时也是轨道车控制软件计算的依据。

#### 1.3.1 牵引特性

牵引特性由启动牵引力曲线、持续牵引力曲线和恒功牵引力曲线三部分组成,如下式:

$$\begin{cases} F_{q1} = F_{q\max} \\ F_{q2} = F_c \times v_c / v \\ F_{q3} = F_c \times (120/v) / v \end{cases} \quad (13)$$

式中: $F_{q1}$ 为轨道车启动牵引力; $F_{q2}$ 为轨道车持续牵引力; $F_{q3}$ 为恒功牵引力。

则牵引力 $F_q$ 为

$$F_q = \min(F_{q1}, F_{q2}, F_{q3}) \quad (14)$$

根据式(13)、式(14),可以得到0~120 km/h轨道车牵引力 $F_q$ 的曲线数据。

#### 1.3.2 能耗制动特性

能耗制动特性由最大制动力曲线、恒力矩制动曲线和恒功率制动力曲线组成,如下式:

$$\begin{cases} F_{z1} = 219 \times (v - 3) / 7 \\ F_{z2} = F_c \\ F_{z3} = 3.6 \times P_z / v \end{cases} \quad (15)$$

式中: $F_{z1}$ 为恒力矩制动力; $F_{z2}$ 为轮周最大制动力;

$F_{z3}$ 为持续轮周制动力。

则制动力 $F_z$ 为

$$F_z = \min(F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}) \quad (16)$$

根据式(15)、式(16),可以得到120~5 km/h区间轨道车制动力 $F_z$ 曲线数据,且 $v < 5$  km/h区间制动力线性归零。

上述计算结果形成表1牵引计算数据和表2能耗制动数据。

表1 牵引计算数据

Tab.1 Traction calculation data

列车牵引力 $F_q/kN$	机车速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	牵引电机转矩 $M/(N \cdot m)$	牵引电机转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	牵引电机功率 $P/kW$
220	0	6 083	2	2
84	30	2 325	740	197
51	50	1 395	1 233	197
21	120	581	2 958	197

表2 能耗制动计算数据

Tab.2 Dynamic braking calculation data

列车制动力 $F_z/kN$	机车速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	牵引电机转矩 $M/(N \cdot m)$	牵引电机转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	牵引电机功率 $P/kW$
0	0	0	2	0
150	3	3 936	74	30
150	18	4 245	443	197
83	32	2 190	789	197

### 1.3.3 牵引/制动特性曲线

根据表1、表2计算数据,绘制出牵引制动特性曲线如图2所示。

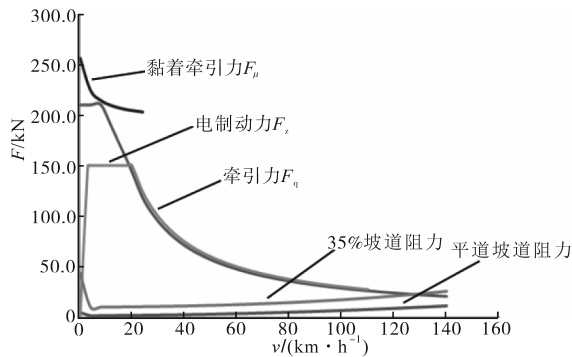


图2 牵引/制动特性

Fig.2 Traction / braking characteristics

图2中,轨道车启动牵引力 $F_{qmax}=220$  kN,恒功率持续速度 $v_c=18$  km/h,恒功率速度点牵引力 $F_c=200$  kN,恒制动力 $F_{z1}=150$  kN,5~20 km/h为恒制动力区,20 km/h以上为恒功制动力区。

通过以上计算,我们得到了整车牵引系统关键参数。并将其作为牵引系统大部件电气设计依据。

## 2 牵引系统控制

将图2的牵引制动特性曲线算法植入轨道车牵引控制器内部,通过软件控制牵引逆变器驱动牵引电机,让轨道车按照设计好的特性曲线运行。

牵引控制包含牵引和能耗制动两种特性工况。在牵引工况时,文献[5]控制器保证各档位控制轨道车按牵引特性运行,图3为牵引工况控制框图。在能耗制动工况时,控制器保证轨道车按照能耗制动特性曲线运行,图4为制动工况控制框图。

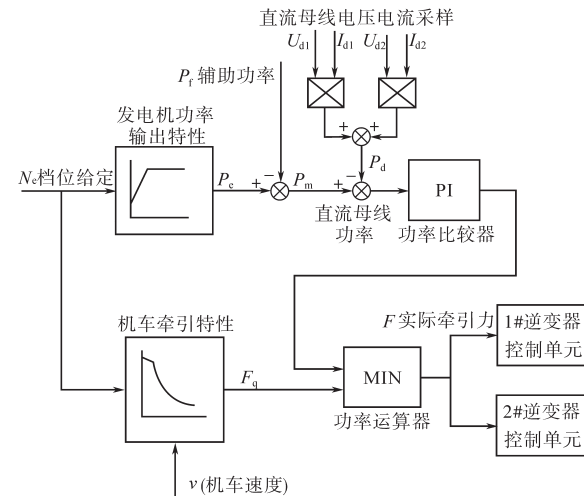


图3 牵引工况控制框图

Fig.3 Diagram of traction control mode

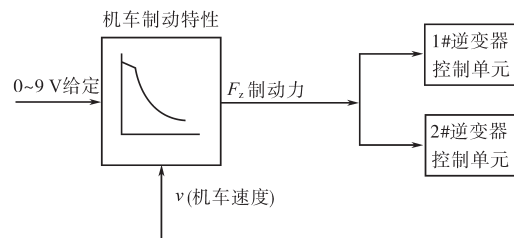


图4 制动工况控制框图

Fig.4 Diagram of dynamic braking control mode

牵引逆变器全速度范围内采用转子磁场定向的间接矢量控制,分段矢量控制的控制框图如图5所示,电机在整个速度范围分为低速区L、中速区M和高速区H,不同速度区段的划分如图6所示。

控制算法和调制算法相互独立,实现励磁电流给定单元、转矩指令给定单元、复矢量电流控制、电压重构、磁链观测器、弱磁控制策略、磁场定向校正策略、相角控制器和二次脉动抑制等,具有优良的动、静态性能。

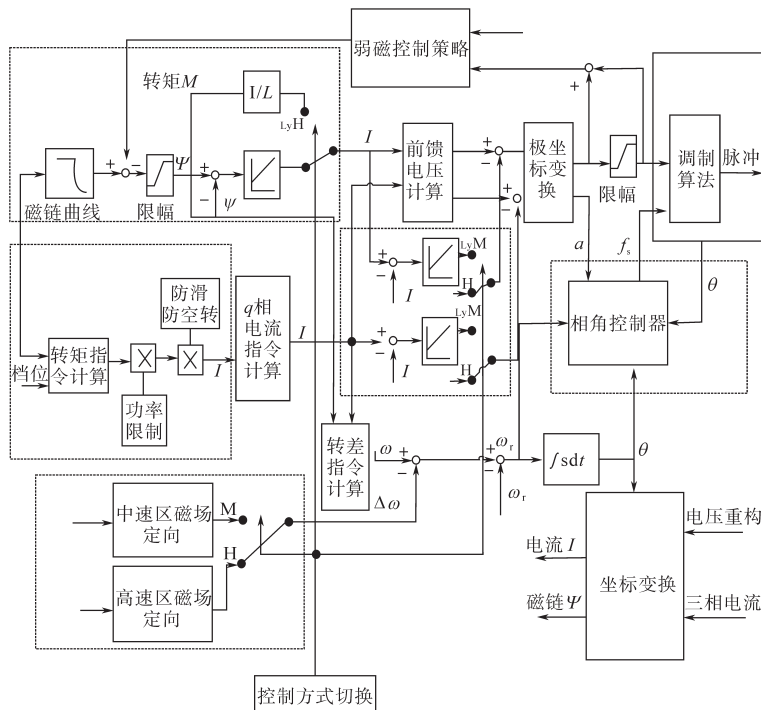


图5 矢量控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of the vector control

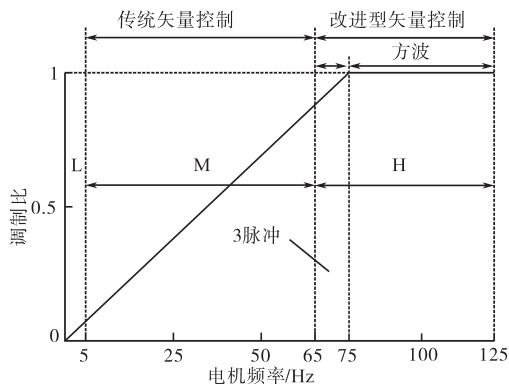


图6 电机全速度范围内的控制策略

Fig.6 Full speed range control strategy of motor

### 3 试验数据及分析

#### 3.1 牵引系统 HiGale 半实物仿真

1) 牵引档位切换特性。测试工况: 牵引电机转速固定 200 r/min, 由 LCU 控制输出 0→8 档, 档位间切换对应不同的转矩值, 半实物仿真监控界面观测的电机转矩和时间波形如图 7 所示。表 3 中数据为 1~8 档时刻的仿真牵引转矩测试数据。

表 3 仿真牵引转矩测试数据表

Tab.3 Simulation of traction torque test data

档位	机车速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	牵引电机 转矩/(N·m)	列车牵引 力/(kN)	牵引电机转 速/(r·min <sup>-1</sup> )	牵引电机 功率/kW
1	18	120	4.3	443	5
2	18	380	13.7	443	17
5	18	1 650	60.0	443	75
8	18	4 280	150.0	443	198

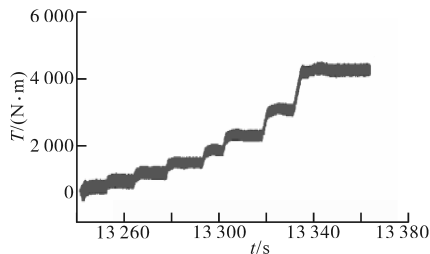


图7 牵引特性

Fig.7 Traction characteristics

2) 牵引扫频特性。测试工况: 固定 8 档位, 转速扫频上升和下降过程为 5 km/h→120 km/h→5 km/h, 半实物仿真监控界面观测的电机电流波形如图 8 所示。

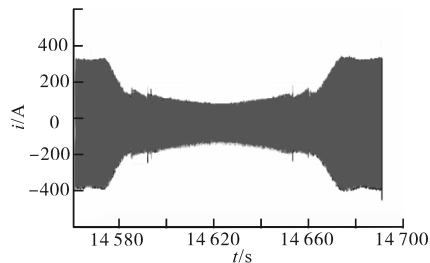


图8 5 km/h→120 km/h→5 km/h 速度扫描仿真试验波形

Fig.8 Speed & current for 5 km/h→120 km/h→5 km/h of speed scanning

3) 制动档位切换特性。测试条件: 母线电压  $U_{dc}=1 200 V$ ; 制动工况, 牵引电机转速保持在 200 r/min, 由 LCU 控制输出 0 档→4 档→0 档, 档位间

切换对应不同的转矩值,半实物仿真监控界面观测的转矩波形如图9所示。表4中数据为1~4档位能耗制动仿真测试数据。

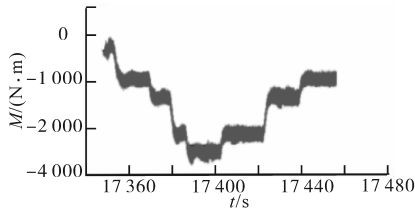


图9 给定转速为200 r/min能耗制动仿真波形  
Fig.9 Speed & torque for 200 r/min of dynamic braking

表4 仿真能耗制动测试数据表

Tab.4 Simulation of Dynamic Braking test data

档位给定	机车速度/(km·h <sup>-1</sup> )	牵引电机转矩/(N·m)	列车牵引力/kN	牵引电机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	牵引电机功率/kW
1	40.6	-270	60.0	1 000	28
2	40.6	-420	80.0	1 000	44
3	40.6	-680	119.0	1 000	71
4	40.6	-1 814	150.0	1 000	190

4)制动扫频特性。测试工况:制动工况,档位固定4档,转速扫频上升和下降过程为5 km/h→120 km/h→5 km/h,半实物仿真监控界面观测的电机转矩波形如图10所示。

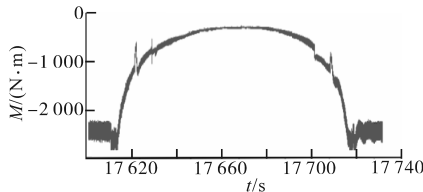


图10 5 km/h→120 km/h→5 km/h速度扫频制动仿真波形  
Fig.10 Speed & torque for 5 km/h→120 km/h→5 km/h of dynamic Braking

仿真结论:1)波形数据显示,轨道车全转速范围牵引电机电流和转矩波形平滑稳定;牵引电机转矩和功率与设计值偏差<1%;2)牵引满手柄8档位,能耗制动满手柄4档位,速度扫描波形和数据显示,波形平滑,速度切换点稳定无冲击。

### 3.2 台架滚动试验

轨道车整车通过地面滚动试验台<sup>[6]</sup>牵引运行试验,全面验证电传系统牵引和制动功率特性设计符合性。

1)牵引档位切换特性。图11为不同转速下牵引电机转矩、电流波形。测试工况:轨道车运行速度固定在5 km/h,50 km/h,65 km/h和70 km/h,司机控制器输出1档→8档,档位间切换对应不同的转矩值,采用DL850波形记录仪观测电机

电流波形。表5中数据为轨道车各运行速度下8档

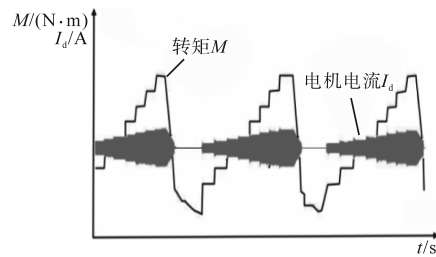


图11 不同转速下牵引电机转矩、电流波形  
Fig.11 Current & torque for different speeds

表5 牵引转矩测试数据表

Tab.5 Traction torque test data

档位给定	机车速度/(km·h <sup>-1</sup> )	牵引电机转矩/(N·m)	列车牵引力/kN	牵引电机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	牵引电机功率/kW
8	5	5 846	210	187	114
8	50	2 269	80	744	199
8	65	1 395	50	1 416	199
8	70	538	19.5	1 966	191
8	90	713	26	2 621	196

2)牵引扫频特性。测试工况:档位固定8档,转速扫频上升和下降过程为120 km/h→50 km/h→120 km/h,DL850波形记录仪实测的电机电流、转矩波形如图12所示。

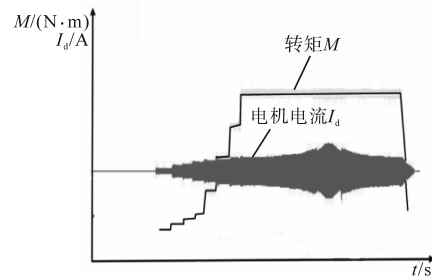


图12 牵引满功率扫频试验波形

Fig.12 Torque & current for full power traction of speed scanning mode

3)制动档位切换特性。制动工况:5 km/h→30 km/h→120 km/h制动加载波形,档位间切换对应不同的转矩值,DL850波形记录仪观测的电机

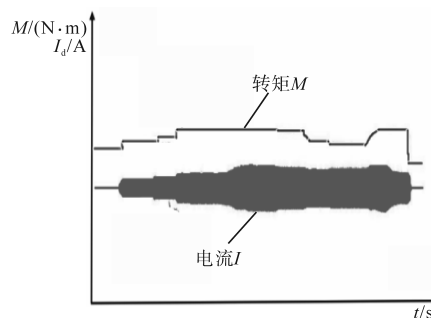


图13 满功率能耗制动试验波形

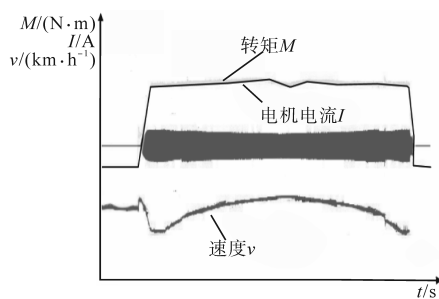
Fig.13 Torque & current for full power dynamic braking

表6 能耗制动测试数据表

Tab.6 Dynamic braking test date

档位 给定	机车 速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	牵引电机 转矩/( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	列车牵引 力/ $\text{kN}$	牵引电机 转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	牵引电机 功率/ $\text{kW}$
4	5	-3 936	143	185	48
4	20	-2 809	102	745	139
4	60	-1 333	48	1 311	164
4	90	-940	34	1 962	173
4	120	-714	26	2 616	175

4) 制动速度扫频特性。测试工况:制动工况,档位固定4档,转速扫频的上升和下降过程为  $40\text{ km/h}\rightarrow 120\text{ km/h}\rightarrow 40\text{ km/h}$ , DL850 波形记录仪实测的电机电流、转矩、速度波形。速度扫描恒功特性如图 14 所示。

图 14  $40\text{ km/h}\rightarrow 120\text{ km/h}\rightarrow 40\text{ km/h}$  能耗制动扫频Fig.14 Torque, current & speed for  $40\text{ km/h}\rightarrow 120\text{ km/h}\rightarrow 40\text{ km/h}$  of dynamic braking speed scanning mode

综合以上,得出整车台架试验结论如下:①波形数据显示,轨道车持续速度点牵引电机电流和转矩波形平滑稳定;牵引电机转矩和功率与设计值偏差  $< 5\%$ 。②牵引满手柄8档位,能耗制动满手柄4档位,速度扫描波形和数据显示,波形平

滑,速度切换点稳定无冲击。③恒功区内速度平稳,功率波动范围  $< 2.5\%$ 。

## 4 结论

通过对比牵引计算数据和仿真试验数据及整车台架测试真实数据,轨道车牵引和制动工况各档位切换在  $7\sim 18\text{ km/h}$  速度范围内转矩平稳,偏差  $< 5\%$ ;  $18\sim 120\text{ km/h}$  恒功率区牵引转矩平稳,电流稳定,波动范围  $< 2.5\%$ 。牵引和能耗制动满手柄扫频过程电流稳定、转矩平稳。

一种新型交流传动重型轨道车牵引系统设计参数,通过试验数据测试满足设计要求。

### 参考文献:

- [1] 李祥奎. HXN5 型内燃机车长大上坡道起车操纵方法的探讨[J]. 上海铁道科技, 2015, 36(2): 45-46.
- [2] 康雄, 孙建方, 孟葳, 等. TB/T 1407.1—2018. 列车牵引计算规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [3] 王大伟, 朱建伟. HXN3 型大功率交流传动内燃机车牵引系统[J]. 内燃机车, 2008, 40(11): 20-22.
- [4] 韩红彬, 王楠, 王晓丽, 等. 出口南非内燃机车交流电传动系统[J]. 铁道机车与动车, 2017, 49(6): 5-8.
- [5] 郝金伟. HXN5 型大功率交流传动内燃机车[J]. 机车电传动, 2009, 49(2): 1-5.
- [6] 张锡光, 赵敏会. 滚动试验台试验替代正线试运行可行性分析[J]. 铁道机车与动车, 2017, 49(7): 22-25.

收稿日期: 2019-01-04

修改稿日期: 2019-08-07