

动车组牵引系统地面模拟线路运行的试验方法

郑 钢^{1,2}, 邹档兵¹, 黄 浩¹, 丁 懿¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司 轨道交通技术中心, 湖南 株洲 412001;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 结合仿真技术以及动车组背靠背试验台的特点, 提出一种地面模拟动车组牵引系统线路运行的试验方法, 将实际的线路数据输入仿真软件, 通过软件仿真得出列车运行的时间、速度等数据, 并将这些数据导入到地面试验系统中, 模拟动车组牵引系统的线路运行。这种试验方法使得动车组牵引系统在地面就能对线路运行性能进行试验验证, 便于及早发现问题进行整改, 对牵引系统的性能进行了更为全面可靠的验证, 为牵引系统设计提供参考。

关键词: 动车组; 牵引系统; 模拟线路; 地面试验; 试验台

中图分类号: U266.2; U260.14

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.016

Test Method of the Ground Simulation Line Operation for EMUs Traction System

ZHENG Gang^{1,2}, ZOU Dangbing¹, HUANG Hao¹, DING Yi¹

(1. Technology Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Combined with simulation technology and characteristics of the EMUs back-to-back test bench, a test method of simulation line operation for EMUs traction system was put forward, in which the actual line operation data was input to simulation software, then the train running time and speed data and other data were obtained by the simulation software and input to the test system to simulate the line operation. This method provided a chance for testing the EMUs traction system on the ground, making the traction system problems discovered as soon as possible, which was much more reliable and comprehensive for verifying the performance of the traction system, and provided a reference for the traction system design.

Keywords: EMUs; traction system; simulation line; ground test; test bench

0 引言

随着经济社会的发展, 动车组成为一种应用越来越广泛的交通工具。牵引系统作为动车组的核心系统之一, 需要对其进行一系列的试验验证。在动车组线路运行中, 动车组在站与站之间根据线路条件进行牵引、惰行、制动运行, 体现在牵引系统上的就是加速

度大小、电机温升等性能。目前牵引系统在地面仅要求进行各部件的型式试验以及地面组合试验, 各部件温升仅考核其额定工作点, 试验难以覆盖线路实际运行情况, 也就无法在地面试验阶段了解线路运行时的电机温升情况、加速度大小等参数。而在动车组进行整车型式试验阶段验证线路运行性能时, 牵引系统各部件都已安装固定在列车上, 如果出现问题很难进行整改。

因此为了提前在地面对牵引系统的线路运行情况进行验证, 本文提出了一种试验方法, 并将对这种试验方法进行详细介绍, 并以永磁高速动车组牵引系统为例进行分析。

1 背靠背试验台

背靠背系统在交流传动系统中应用广泛也最为成熟^[1]。以 IEC 61377-3:2002 中给出的背靠背试验系统为基础, 搭建互馈式交流传动试验系统, 由 2 套电源侧并联的变压器-变流器-牵引电机背靠背组成, 其原理如图 1 所示。

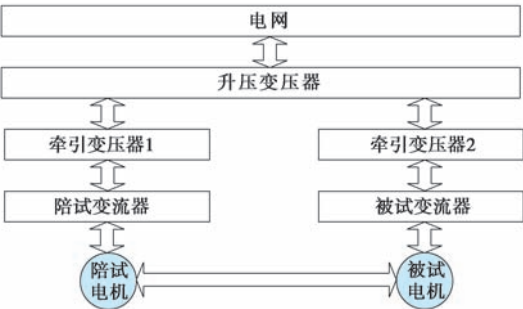


图 1 背靠背试验台原理图

背靠背试验台分为陪试系统和被试系统, 2 个系统通过变速箱进行速度和功率匹配。在动车组牵引系统地面模拟线路运行的试验台中陪试系统控制电机的速度, 被试系统根据线路情况控制被试牵引变流器的力矩输出。陪试变流器和电机技术参数如表 1 所示。

表 1 背靠背试验台陪试系统技术参数

陪试系统	项目	参数值
陪试变流器	输入电压	2 121 V/50 Hz
	额定输入电流	1 297 A
	输出电压频率	0~150 Hz
	额定输出电流	430 A
陪试电机	额定功率	1 225 kW
	额定电压	2 105 V
	额定电流	407 A

2 动车组线路运行的模型

基于以下假设, 对动车组实际运行进行合理简化^[2]：
①动车组在 2 个站之间以恒力牵引-恒功牵引-恒速-制动的方式运行, 即先在所在站从 0 加速到一定速度, 然后恒速运行, 最后制动减速到 0 到达下一站。
②动车组都是以匀加速进行速度提升, 以匀减速进行速度下降。

动车组线路运行模型的速度-时间曲线如图 2 所示。

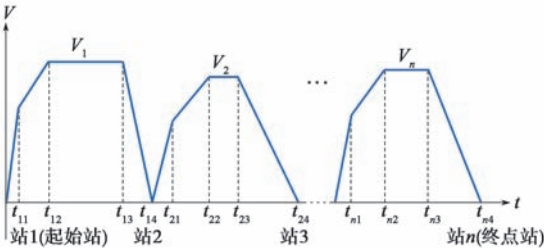


图 2 动车组的速度-时间曲线

图 2 中的 t_{ij} 为第 i 站中的第 j 个时间点, v_i 为第 i 站中恒速运行速度。

3 动车组牵引系统地面模拟线路试验的步骤

基于背靠背的牵引传动试验台, 并结合仿真技术, 将实际的线路数据输入仿真软件; 仿真得到的数据导入到地面试验系统中, 模拟动车组牵引系统的线路运行。动车组牵引系统地面模拟线路试验主要采取以下 4 个步骤:

- ①基于动车组的线路运行的简化模型, 根据实际线路的坡道、站间距、阻力等参数对动车组的实际运行进行仿真, 得出动车组仿真运行的时间点 t_{ij} 、恒速的速度 v_i 等数据。
- ②将仿真数据输入被试控制系统, 被试系统根据仿真参数和牵引制动包络线进行力矩给定:
 - a. 当在加速时间段时根据动车组的牵引包络线输出牵引力;
 - b. 当在恒速时间段时根据动车组受到的总阻力施加力, 若总阻力为正则施加牵引力, 若总阻力为负则施加制动力, 若总阻力为零则不施加力;
 - c. 当在减速时间段时根据动车组的制动包络线输出制动力。
- ③同时将仿真数据输入陪试控制系统, 陪试系统根据 t_{ij} 和 v_i 计算速度的升降斜率, 控制试验系统的速度。
- ④使②、③保持同步, 进行动车组的模拟线路试验。对应的流程图如图 3 所示。

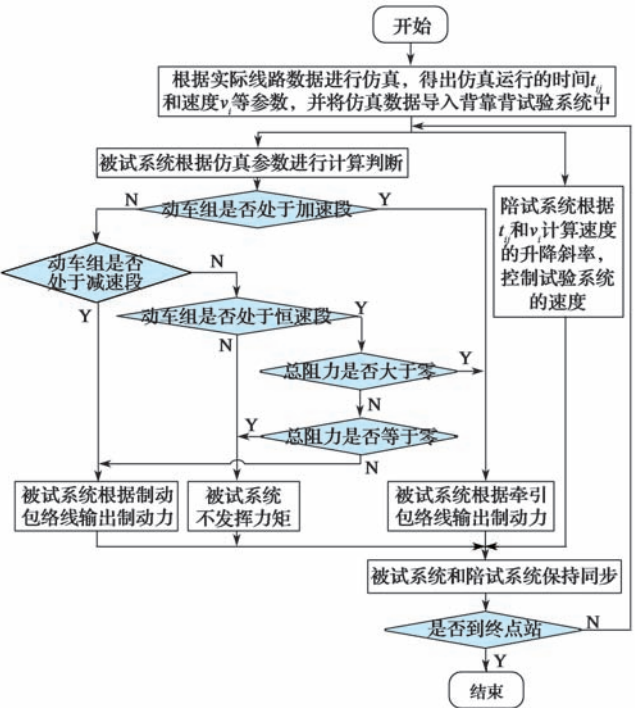


图 3 地面模拟线路试验流程图

4 地面模拟线路运行的具体实例

下面以永磁高速动车组牵引系统为例, 模拟动车组牵引系统在大西线(大同到西安)原平到曲阳段(以

下简称大西线)的运行情况,该段线路长 86.7 km。为了验证动车组牵引系统在实际线路运行时牵引电机的温升性能,提前在地面对动车组牵引系统的线路运行进行了试验验证。

4.1 牵引制动特性曲线

永磁高速动车组的最高设计运行速度可以达到 385 km/h,最高持续运行速度为 350 km/h^[3]。采用的阻力公式为

$$\omega=3.26+0.0386 \times v+0.001203 \times v^2 \tag{1}$$

式中:ω—阻力,N/t;v—运行速度,km/h。

其牵引制动特性曲线^[4]如图 4 所示。

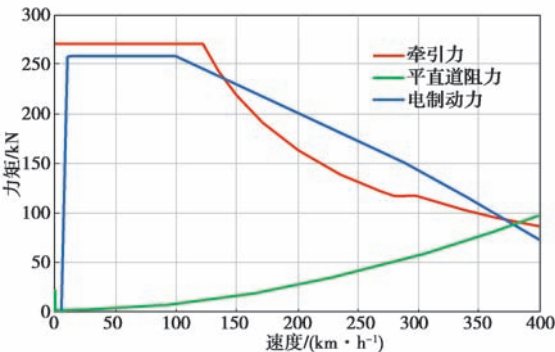


图 4 牵引制动特性曲线

4.2 地面模拟线路运行试验

根据永磁高速动车组的阻力、牵引制动特性、电机特性对其进行牵引仿真计算^[5-6],得出仿真数据如表 2 和表 3 所示。

表 2 仿真数据

区间	里程 /m	从 0~121 km/h 的加速时间 /s	从 121~300 km/h 的加速时间 /s	恒速时间 /s	制动时间 /s	停站时间 /s
原平→阳曲	86 665	62	171	746	171	120
阳曲→原平	86 665	67	334	731	154	120
总计	173 330	129	505	1 477	325	240

根据表 2 和表 3 的仿真数据,并结合线路试验的模型,得出动车组在大西线运行一个来回(原平—阳曲—原平)的速度—时间曲线如图 5 所示。

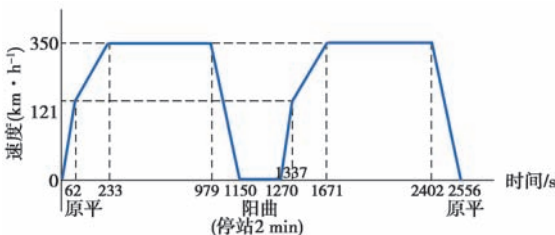


图 5 动车组在大西线运行速度—时间曲线

陪试系统根据速度—时间曲线控制速度,被试系统结合速度—时间曲线以及总阻力施加力矩,使陪试系统和被试系统线路模拟的程序同步运行,在地面对动车组的大西线运行进行模拟。

4.3 地面试验结果

在地面对动车组牵引系统进行了大西线的线路运行模拟,试验条件如下:

表 3 线路阻力

站名	里程/m	坡道/‰	总阻力/kN	站名	里程/m	坡道/‰	总阻力/kN
原平	0	-1.0	71.9	阳曲	0	9.0	117.6
	1 750	15.5	147.3		3 636	-6.0	49.1
	2 700	-4.3	57.0		5 036	4.0	94.8
	4 700	-2.0	67.4		8 365	1.0	81.1
	6 950	-9.7	32.2		11 165	11.5	129.1
	11 700	0.0	76.5		14 015	30.0	213.6
	17 850	10.0	122.2		17 615	2.0	85.6
	20 100	5.4	101.1		21 566	-13.9	12.9
	22 200	13.0	135.9		23 566	3.5	92.5
	24 500	-4.0	58.2		25 566	-19.0	-10.4
	26 500	-11.9	22.1		31 766	-16.5	1.1
	29 100	-19.5	-12.6		34 766	3.1	90.7
	31 500	1.0	81.1		38 016	10.0	122.2
	35 500	14.5	142.8		40 016	-3.0	62.8
	36 700	3.0	90.2		42 716	-19.7	-13.6
	39 150	6.2	104.6		45 016	-6.2	48.3
	41 650	19.7	166.5		47 516	-3.0	62.8
	43 950	3.0	90.2		49 966	-14.5	10.1
	46 650	-10.0	30.8		51 166	-1.0	71.9
	48 650	-3.1	62.3		55 166	19.5	165.6
	51 900	16.5	151.8		57 566	11.9	130.9
	54 900	19.0	163.3		60 166	4.0	94.8
	61 100	-3.5	60.5		62 166	-13.0	17.1
	63 100	13.9	140.0		64 466	-5.4	51.8
	65 100	-2.0	67.4		66 566	-10.0	30.8
	69 051	-30.0	-60.5		68 816	0.0	76.5
	72 651	-11.5	24.0		74 966	9.7	120.8
	75 501	-1.0	71.9		79 716	2.0	85.6
	78 301	-4.0	58.2		81 966	8.3	114.2
	81 630	6.0	103.9		83 966	-15.5	5.6
	83 030	-9.0	35.4		84 916	1.0	81.1
	86 666		117.6		86 666		76.5

①到站停站 2 min,连续进行了 5 个往返(原平—阳曲—原平),试验进行 3 h;

②电机强迫通风冷却,冷却风量 0.5 m³/s,环境温度为 18.5℃。

牵引电机对应的温度变化曲线如图 6。

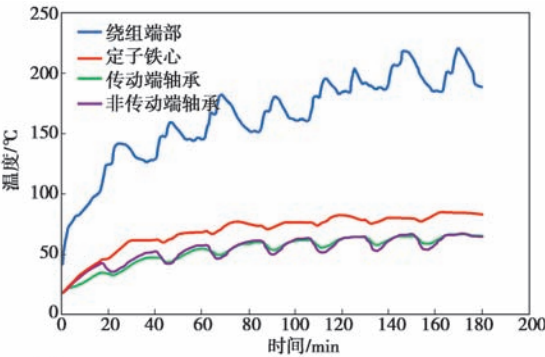


图 6 模拟试验中牵引电机温度变化情况

结合图 6 的试验结果,可得站间运行最高温度和设计最高温度对比结果如表 4 所示。

表 4 模拟运行的最高温度和设计最高温度对比

牵引电机测量 温度点	运行最高 温度 /℃	设计最高允许 温度 /℃	结论
绕组	222	240	符合设计要求
铁心	88	120	符合设计要求
传动端轴承	72	80	符合设计要求
非传动端轴承	71	80	符合设计要求

由表 4 可知, 该牵引电机绕组、铁心、传动端和非传动端在地面模拟线路运行过程中最高温度都低于设计的最高允许温度, 符合电机的设计要求。

5 整车线路试验

2016 年 4 月永磁高速动车组在大西线进行了整车线路试验, 在实际线路上对牵引系统的温升性能进行验证, 试验条件如下:

- ①动车组实际线路运行试验在原平—阳曲—原平区间内进行, 到站停站 2 min 左右, 完成了 5 个往返运行, 试验进行 3 h;
- ②电机强迫通风冷却, 冷却风量 0.5 m³/s, 环境温度 为 21℃。

牵引电机温度变化情况如图 7 所示。

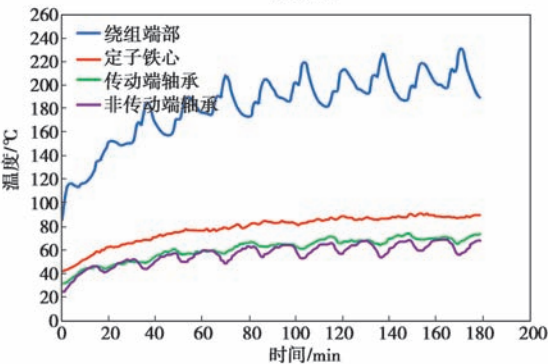


图 7 牵引电机在实际线路运行中的温度变化情况

结合动车组牵引系统地面模拟试验和实际线路运行试验的结果, 进行对比可得牵引电机在 2 种方式运行下的最高温度对比情况, 如表 5 所示。

表 5 实际运行的最高温度和模拟运行最高温度对比

牵引电机测量 温度点	实际运行最 高温度 /℃	模拟运行最 高温度 /℃	实际运行和模拟运行 最高温度差值 /℃
绕组	231	222	9
铁心	94	88	6
传动端轴承	79	72	7
非传动端轴承	77	71	6

由温度变化曲线以及最高温度的对比结果可知, 实际运行和模拟运行 2 种运行方式下, 牵引电机的温度变化总体趋势一致, 都在设计的最高温度运行范围之内, 虽然两者存在一定误差, 但误差在可接受范围之内, 地面模拟试验能很好地模拟动车组实际线路运行。

6 结语

结合动车组的线路仿真, 通过背靠背的陪试系统控制速度和被试系统控制力矩, 并使两者同步运行, 在地面模拟了动车组牵引系统的线路运行情况。本文以某型号动车组为例, 对提出的试验方法进行了实际应用, 通过地面模拟线路试验的结果对动车组牵引系统的电机温升性能进行了验证, 牵引电机线路运行的温度变化符合设计要求。同时通过动车组整车线路试验与地面模拟线路试验的对比分析, 可知地面模拟线路试验能很好地模拟动车组实际线路运行。本文为动车组牵引系统在地面模拟线路运行提供了一种试验方法, 可为牵引系统在地面验证其线路运行性能提供借鉴方法。

参考文献:

[1] 李芬. 单相背靠背绿色节能试验系统关键技术研究 [D]. 武昌: 华中科技大学, 2010: 100-101.

[2] 王坚, 赵东飞, 何海兴, 等. 两种过分相形式下 CRH380AL 型动车组京沪线运行仿真研究 [J]. 机车电传动, 2016(4): 29-32.

[3] 冯江华. 高速动车组永磁同步牵引系统的研制 [J]. 机车电传动, 2016(4): 1-5.

[4] 符敏利, 陈致初, 王健, 等. 高速动车组永磁牵引电动机研制 [J]. 机车电传动, 2016(3): 1-4.

[5] 彭其渊, 石红国, 魏德勇. 城市轨道交通列车牵引计算 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.

[6] 康雄. 高速动车组列车牵引仿真计算研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 64-66.

作者简介: 郑 钢 (1988-), 男, 主要从事动车组牵引系统的研发工作。