地铁车辆电制能力及电空配合问题研究

王好德　滕聪　张禹
（西安市轨道交通集团有限公司　陕西　西安　710018）

摘要：本文主要介绍了西安地铁 4 号线列车电制动能力和电空配合问题，并进行列车能耗和电空配合问题分析，最后针对性提出解决方法，为西安地铁后续新线车辆应用提供指导。

关键词：地铁车辆；电制动；能耗数据

0 引言

西安地铁 4 号线地铁车辆采用 4 动 2 拖 6 辆编组型式，列车牵引 / 电制动系统采用中车永济电机公司提供成熟的异步交流传动系统，无速度传感器矢量控制方式。空气制动系统采用克诺尔公司生产稳定产品—EP2002 制动系统，架控方式。2018 年 12 月 26 日西安地铁 4 号线开通试运营，为了解和掌握 4 号线地铁车辆电能消耗情况，本文对列车电制动能力及电空配合问题进行分析并提出解决方案。

1 4 号线地铁车辆电制动能力和运行能耗

1.1 车辆电制动能力

地铁车辆电制动能力通常是在常用制动指令施加时进行的考核与验证，在保证各种载荷工况及满足车辆制动减速度前提下，提出电制动能力需求。在 80km/h 速度等级下，车辆全常用制动（B7 级位）工况的平均减速度大于等于 1.0 m/s^2，4 号线地铁车辆在载荷 AW3/AW2/AW0 不同工况下的电制动能力如图 1 所示，车辆在 AW3 工况，整列车可提供 382kN 电制动力（95.5kN/ 辆动车 x4 辆），70 ～ 5km/h（电空转换点）速度范围内完全由电制动满足车辆停车 1.0 m/s^2 减速度需求；在 AW0-AW2 工况，80 ～ 5km/h 速度范围内完全由电制动满足车辆 1.0m/s^2 减速度需求；远远超于合同对电制动能力的要求（75 ～ 5km/h 电制动能力要求）。

1.2 地铁车辆能量消耗统计与分析

结合西安地铁 4 号线车辆电能消耗统计数据，主要包含列车牵引消耗、再生能量、SIV 消耗，可以计算得出单列车月度消耗量和再生电能的再生率，因 2020 年西安地铁承担防疫，选用 2019 年 1 ～ 10 月电能消耗进行统计分析，具体统计如表 1 和表 2 所示。

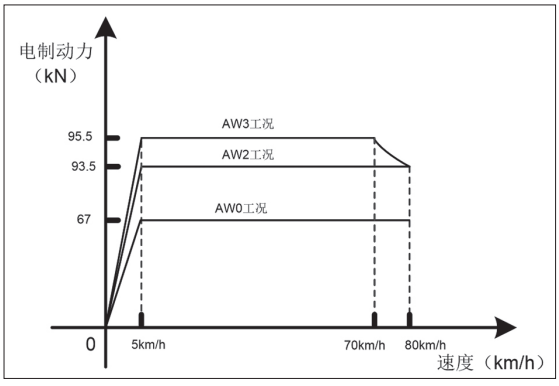


图 1 地铁车辆电制动能力

表 1 4 号线地铁车辆 1 ～ 5 月电量消耗统计

	1 月路份	2 月路份	3 月路份	4 月路份	5 月路份
牵 R 引 (kW)	6233587	5169330	5405982	5519437	5706427
再偺生 芰量 (kW)	3167828	2539710	2787270	2873477	30114507
SIV 消 (kW)	1061241	775199	596037	606834	715932
月露度认消 牧量 (kW)	4127003	3404819	3214749	3252794	3407852
运诵行欣里锍程 (km)	581210	399647	436609	445192	457875
再偺生	33.7%	32.9%	34%	34.2%	34.6%

表 2 4 号线地铁车辆 6 ～ 10 月电量消耗统计

	6 月路份	7 月路份	8 月路份	9 月路份	10 月路份
牵 R 引 (kW)	5547352	5733408	5808139	5614538	5793331
再偺生 芰量 (kW)	3032921	3157343	3242383	3041508	3182945
SIV 消 (kW)	1061241	937672	964525	842044	629768
月露度认消 牧量 (kW)	3281800	3513737	3530281	3415074	3340154
运诵行欣里锍程 (km)	443218	456222	455790	446339	456780
再偺生	35.3%	35.5%	35.8%	35.1%	35.1%

由表 1 和表 2 可知，各月份月度消耗量约 340 万 kW 数量级（除 1 月份含调试车辆外），10 个月月度消耗量平均值为 345 万 kW。各月份消耗量差异主要是 SIV 消耗，牵引消耗和再生能量也基本完全一致，均在同一个数量级数值内。

同时，随着运营列车数量增加（32 列增加至 42 列运营车），更充分利用列车电制动，再生率也逐渐提升。3 月和 4 月再生率均约为 34%，5 月和 6 月再生率分别提升至 34.6%和 35.3%。但 2 月份再生率仅为 32.9%，是由于春节保障、元宵节特殊保障等特殊运行时刻表（如延长运营时间、行车间隔大），导致再生能量不能被充分吸收。

2 地铁车辆电空配合遇见问题和解决方法

西安地铁 4 号线列车制动力由空气制动系统计算与管理，制动系统接收到 TCMS 转发的信号系统或司机控制器的制动指令时，根据列车载荷和恒定的制动减速度进行制动力的计算与分配，优先采用电制动，电制动不足先后由拖车的空气制动、动车的空气制动补足。列车速度 5km/h 为电空制动转换点，此时电制动逐渐退出，空气制动逐步增加，直至列车停稳。

2.1 高速和低速电空配合问题

在 AW0-AW3 工况下，车辆运行至 80km/h，车辆进行

制动和惰行工况频繁切换，制动期间有部分空气制动补充；在惰行运行期间，有较大空气制动补充，导致车辆冲击较大，舒适性降低。电制动转矩下降与空气制动上升斜率不一致，导致空气制动系统进行制动力管理时，出现空气制动补充，具体如图 2 所示。

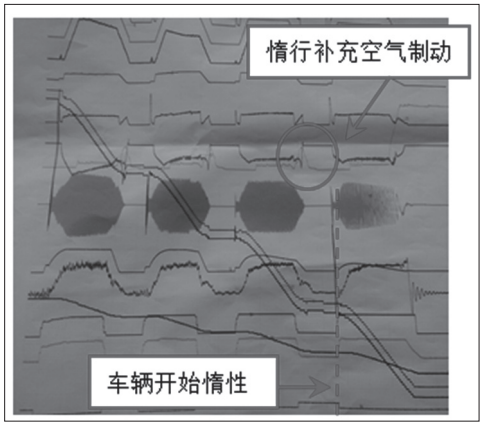


图 2 高速运行工况切换电空配合问题

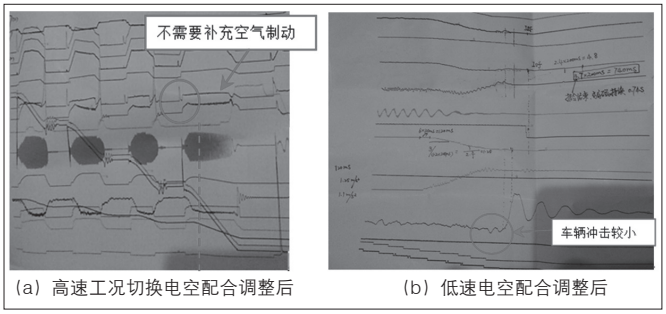
低速电空配合问题主要是空气制动系统空走时间，与电制动衰退下降斜率不匹配。通常空气制动属于机械制动，响应速度较慢；电制动响应速度较快，在接收到制动指令后，延迟 100 ～ 400ms 不等时间、一定斜率下降电制动力。

2.2 电空配合问题解决方法

高速电空配合：①调整电制动的转矩值下降斜率为（1.1m/s^3）与空气制动上升斜率（1.0m/s^3），惰行区段不需要补充空气制动，空气制动和电制动匹配良好；②在进行牵引和制动工况直接切换时，制动指令发出起，牵引系统提供 3.9s 虚拟值信号给空气制动系统，之后电制动能力上升至最大值，期间车辆惰行处理，空气制动不进行任何处理。

低速电空配合：①牵引系统延迟信号时间调整为 120ms，电制动下降斜率为 1.1 m/s^3，冲击较小，车辆电空配合较好；②网络 TCMS 接收 5km/h 速度信号延迟 100ms ～ 188ms 信号；③在停车时牵引 VVVF 逆变装置的励磁电流下降完毕后门极关闭，有效防止了西安地铁 1、2 号线电机过电流保护（MMOCD），弱磁持续衰退时间为 0.74s。

高速和低速电空配合问题参数调整后，车辆冲击减小，不再需要补充空气制动，电空切换过渡平滑，具体如图 3 所示。



（a）高速工况切换电空配合调整后　（b）低速电空配合调整后

图 3 电空配合调整后输出特性

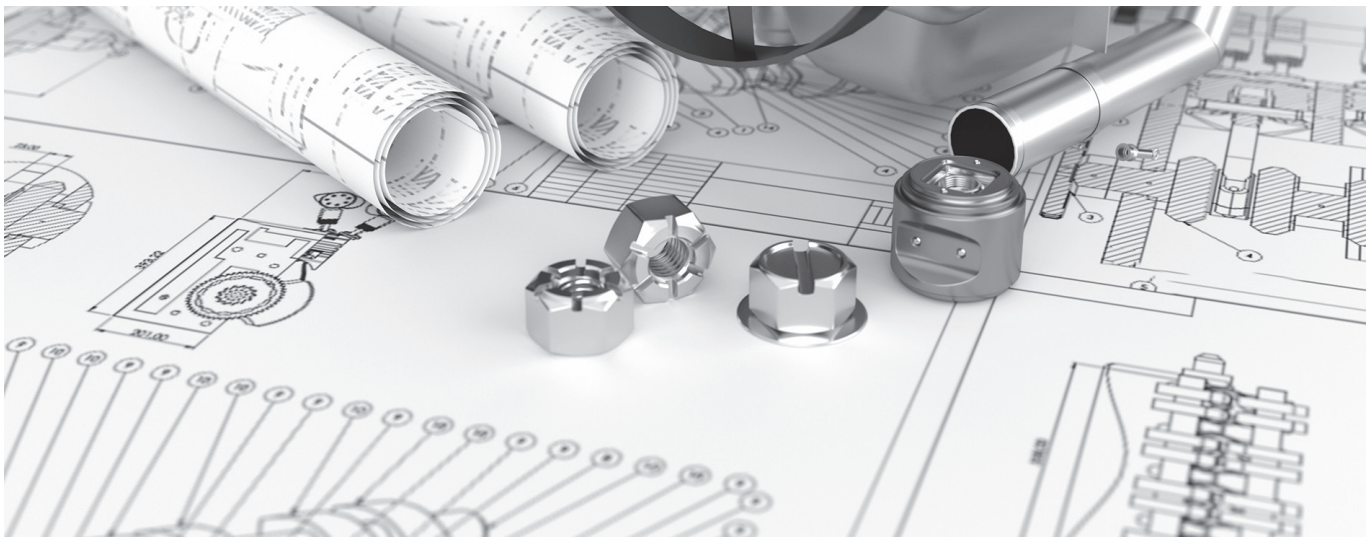
3 结语

西安地铁 4 号线地铁车辆 4 动 2 拖编组型式，车辆动力强劲、电制动能力强，通过进行电制动能力分析和能量消耗分析，通过压缩行车间隔思路，充分使正线列车吸收再生能量，提高车辆再生利用率。最后进行电空配合问题分析，提出解决方法，对西安地铁新线地铁车辆应用具有指导意义。

参考文献：

[1] 王好德 . 浅谈 4 号线电客车防空转滑行控制策略 [J]. 西安地铁科技交流 ,2018（6）:58-60.

[2] 王好德 . 浅析西安 4 号线地铁车辆性能及接口问题处理 [J]. 西安地铁科技交流 ,2019(1):51-53.

[3] 王好德 .4 号线电客车运行情况和能耗浅析 [J]. 西安地铁科技交流 ,2019(5):51-54.

作者简介：王好德（1983-），男，研究生，高级工程师，从事地铁车辆技术管理和节能降耗工作研究。