机车电传动 2017 年第 3 期 (2017-05-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №3,2017(May 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)03–0081–06

城轨列车地面再生能量吸收装置容量的选择

李义国[1]，赵　勤[1]，王军平[1]，李　杰[2]

（1. 宁波市轨道交通集团有限公司，浙江 宁波　315101；
2. 杭州市地铁集团有限责任公司，浙江 杭州　310017）

摘　要：以理论模拟数据计算为先导，以试验数据计算为基础，结合宁波 1 号线一期及二期车辆的运营能耗统计数据，对选择合理的地面能馈装置容量对运营和车辆的重要性做了相应的评估，同时对地面再生吸收装置容量的合理选取做出了相应的论证，提供了微调数据基础。

关键词：再生能量吸收装置；地面能馈装置；运营能耗；容量选择；城轨列车

中图分类号：U239.5；U260.359　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.018

Capacity Choice of Ground Regenerative Braking Energy Absorption Equipment for Metro Vehicle

LI Yiguo[1], ZHAO Qin[1], WANG Junping[1], LI Jie[2]

(1. Ningbo Rail Transit Group Co.,Ltd., Ningbo Zhejiang 315101, China ;
2. Hangzhou Metro Group Limited Liability Company, Hangzhou, Zhejiang 310017, China)

Abstract: Based on the theoretical and test data calculation, and combining the first and second phase vehicle of Ningbo line 1 operation energy consumption statistical data, the importance of reasonable choice of ground energy recovering equipment capacity to the metro operation and vehicle was evaluated, while the choice of ground regenerative energy absorption equipment capacity was verified, which provided the basis of data fine tuning.

Keywords: regenerative energy absorption equipment; ground energy recovering equipment; operation energy consumption; capacity choice; metro vehicle

0　引言

近年来，随着我国城市的规模扩大和人口增加，交通拥挤、空气污染、能源消耗、土地资源利用等已成为城市发展中的突出问题。轨道交通作为一种载客量大、绿色环保、单位能耗低、节约土地资源的运输方式，成为城市发展的必然选择。同等运能下，轨道交通能耗较低，但因其运量大、线路多，总能耗也不容忽视，约占全国总用电量的 3‰[1]。为节能需要，采用再生制动方式的电制动，将列车产生的再生能量全部回馈到直流母线并供给同一供电区间内的其他列车使用，节能的同时，进一步降低了车辆的维护工作量，同时也提高了车辆的运行可靠性[2]。再生制动能量吸收装置主要有电阻耗能型、电容储能型、飞轮储能型、逆变回馈型等[3]。国内主流主要采用逆变回馈型。但因受到线路条件、列车参数、供电系统参数和运营组织的复合影响，前期仿真很难准确量化实际运营中的制动反馈能量，因此地面吸收装置容量的选择便成为一个难题。从系统及列车保护、成本投入等综合考虑，目前普遍的解决方案均为设置地面吸收装置，并保留一定容量的制动电阻（车载或地面），相当一部分制动能量仍然被制动电阻消耗而浪费。

为选取合适容量的地面吸收装置，制动能量被完全吸收，并在取消制动电阻的前提下保证再生制动的持续性、系统的稳定性，实现较高的投产比，本文以宁波地铁公司的科研试验为依托，通过详实的试验数据论述了地面能馈装置容量为何会影响列车制动性、

收稿日期：2016–12–01；修回日期：2017–04–13

安全可靠性及闸瓦寿命，同时归纳总结地面能量反馈装置容量选择的经验公式，供同行参考。

1 通过仿真定义参考基准容量

线路、供电系统、车辆系统为定量输入，运行图为变量输入，二者都是仿真计算的必要前提。

取宁波 3 号线和宁奉线的设计线路、供电系统参数及 1 号线二期列车的实际参数作为输入，结合一系列对数列车运行为运营组织输入，利用仿真软件模拟计算宁波 3 号线和宁奉线各站列车最大制动功率，从而为选择地面再生能量反馈吸收装置所需的容量提供参考依据，见表 1、表 2。

表 1 宁奉线不同行车对数下再生制动能量反馈装置计算容量 kW

地铁站	4 对 /h	8 对 /h	10 对 /h	13 对 /h	15 对 /h	最大值
姜山	1 774	1 790	2 066	1 748	2 142	2 142
甬江村	1 937	1 789	1 864	1 882	1 695	1 937
鄞州工业园西	2 286	1 779	2 324	3 033	2 500	3 033
方桥	2 288	2 600	2 255	3 380	1 780	3 380
竹产业园	1 774	1 911	1 784	1 560	1 690	1 911
蒋家	2 256	2 201	1 502	1 830	1 865	2 256
大成	2 064	2 065	1 659	3 266	2 029	3 266
金海路	2 372	2 330	2 117	2 196	2 053	2 372

表 2 3 号线不同行车对数下再生制动能量反馈装置计算容量 kW

地铁站	6 对 /h	8 对 /h	10 对 /h	12 对 /h	15 对 /h	20 对 /h	24 对 /h	28 对 /h	30 对 /h	最大值
陈婆渡	2 012.8	1 822.2	1 763.1	1 786.4	1 543.5	1 325.1	2 397.0	2 113.4	1 894.3	2 113.4
鄞州大道	1 575.0	1 673.2	1 868.6	2 106.0	2 053.3	1 458.9	4.9	3 518.3	2 743.0	3 518.3
万达广场	1 349.2	2 216.7	2 303.0	1 203.0	1 412.0	−261.4	−920.9	3 610.9	1 919.9	3 610.9
麦德龙	1 457.0	3 089.6	2 148.0	1 858.4	1 735.8	1 737.8	838.9	2 982.9	−41.1	3 089.6
樱花公园	1 958.8	2 255.3	2 286.1	2 754.9	1 605.1	1 882.1	2 302.7	−434.2	1 194.8	2 754.9
明楼	1 963.0	2 263.5	2 048.2	2 099.3	1 704.4	1 638.8	654.7	−25.4	2 363.0	2 363.0
甬江北	1 623.3	2 162.9	2 248.1	1 207.0	1 987.1	1 880.5	487.9	896.3	2 667.6	2 667.6
外漕村（二期）	1 816.7	1 382.5	1 593.7	2 037.6	1 109.8	130.0	1 050.5	2 937.2	1 812.4	2 937.2
团桥（二期）	1 769.1	1 490.9	1 491.0	2 438.8	2 250.4	1 209.9	1 952.0	258.2	2 748.8	2 748.8
骆驼北（二期）	2 114.8	1 701.3	1 922.1	1 649.0	2 506.6	954.8	2 075.6	2 023.6	3 371.2	3 371.2

据表 1、表 2 的数据可见，当行车对数小于等于 15 对时，2.2 MW 的容量即可；28 至 30 对时则至少需要 3.5 MW 的容量。考虑远期容量要求，则可取 3.5 MW。

根据表 1、表 2 的仿真数据，下面的试验采用 1.8 MW 峰值容量的地面吸收装置，以探索出合理的容量确定方法。

试验 1：列车电制动反馈能量全部被吸收，记录减速度（总制动力）、电制动力、气制动力和接触网网压，为后续试验的分析做参照基准。

试验条件：

地面吸收装置　　无

车载制动电阻　　斩波定值为 1 850 V，车载制动电阻容量完全满足制动需求

负载　　AW3

制动速度　　30 km/h，55 km/h，80 km/h

制动给定　　100% 全常用制动

从图 1~ 图 3（图中 FIE 为列车电制动力，FIM 为列车气制动力，F 为列车总制动力）可见，3 种情况下列车电制动能力均已发挥到最大值 312 kN。由于不满足整列车制动力需求，在拖车上补充 40 kN 的气制动力。图中初期有 1.2 s 的电制动建立时间：制动力从 0 线性上升至 312 kN，斜率低于冲击限制标准，以减小乘坐的不舒适感；之后的 1.5 s 为气制动响应及补充到位的时间。当列车制动到电空转换点约 7 km/h 左右的时候可以看到，总制动力出现了一个尖峰，是由电空转换期

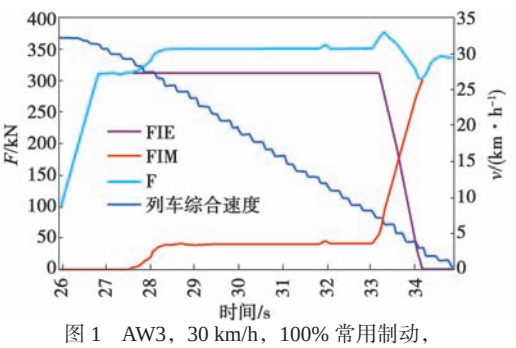

图 1 AW3，30 km/h，100% 常用制动，再生制动能量 100% 被回收制动力波形

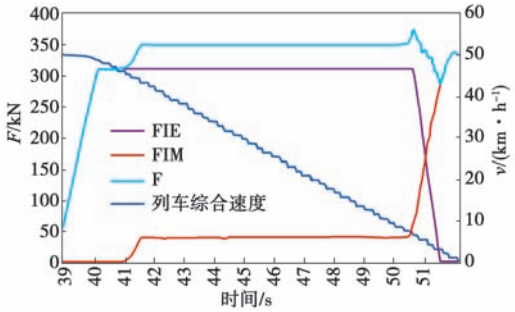

图 2 AW3，55 km/h，100% 常用制动，再生制动能量 100% 被回收制动力波形

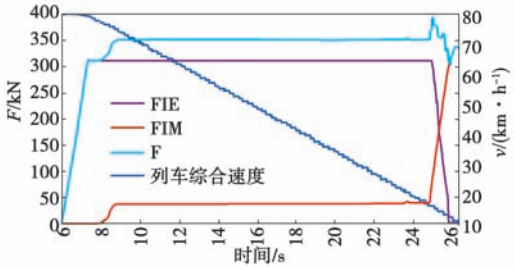

图 3 AW3，80 km/h，100% 常用制动，再生制动能量 100% 被回收制动力波形

的电制动延迟下降引起。如适当调节电制动力的下降斜率，让电制动力下降速度再快一些，或调整电制动力退出的时间点，让退出命令再早点发出，均可消除该尖峰。但实际上该波动幅度较小，持续时间较短，冲击可控，不需再做调整。

图 4 引入制动斩波电压，以便观察电制动反馈能量被全部吸收时，制动斩波电压的状态。该工况下，制动斩波电压基本维持在 1 850 V 上下，制动力发挥正常、符合预期。

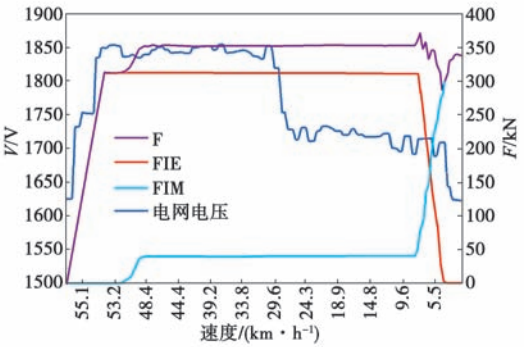

图 4　AW3，55 km/h，100% 常用制动，再生制动能量 100% 被回收斩波电压及制动力波形

试验 2：选取差异化的地面吸收装置，在制动物理位置、制动初速度及制动给定相同的条件下，评估列车运行的安全性、可靠性和列车的制动性能，见图 5~图 7（图中 FIE 为列车电制动力，FIM 为列车气制动力，F 为列车总制动力，*V* 为接触网网压）。

试验条件：

地点　　中和路站（地面吸收装置容量分别为 1.8MW,1.0MW,0.5MW 及 0MW）

负载　　AW3

进站制动速度　　55 km/h

制动给定　　100% 全常用制动

车载电阻

软件屏蔽制动电阻（开通阈值设定为 2 000 V）

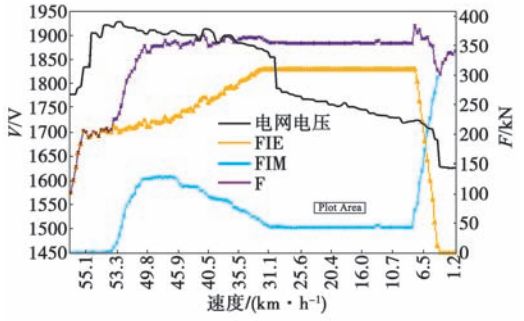

图 5　AW3，55 km/h，100% 常用制动，1.8 MW 地面吸收装置下的网压及制动力波形（制动时间 15.4 s）

图 5 为 1.8 MW 的地面吸收装置制动力波形，可以看到在 55 km/h 至 30 km/h 期间，由于地面吸收装置容量不足以完全吸收制动反馈的再生能量，导致网压抬升并在 1 900 V 上下振荡。牵引系统的电制动能力随着电压的升高，降容振荡输出，气制动力 FIM 跟随补充，

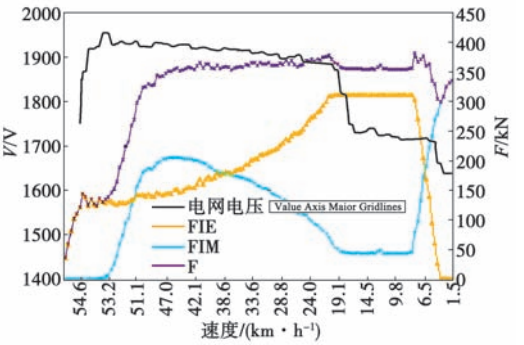

图 6　AW3，55 km/h，100% 常用制动，1.0 MW 地面吸收装置下的网压及制动力波形（制动时间 13.5 s）

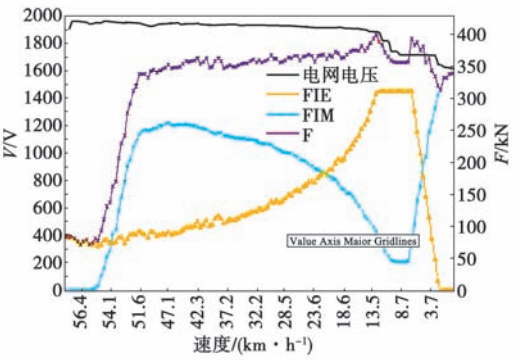

图 7　AW3，55 km/h，100% 常用制动，0.5 MW 地面吸收装置下的网压及制动力波形（制动时间 13.2 s）

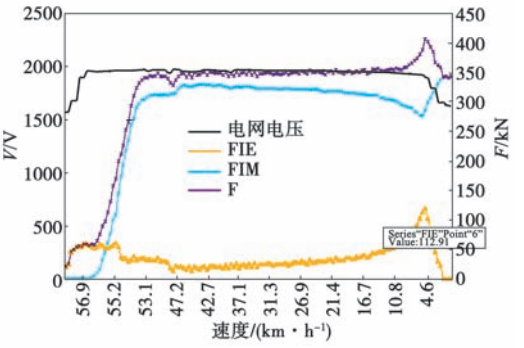

图 8　AW3，55 km/h，100% 常用制动，0 MW 地面吸收装置下的网压及制动力波形（制动时间 14.7 s）

导致列车制动力 F 和减速度在 30 km/h 前短时振荡。虽然在基值 350 kN 附近小幅度波动，但仍会引起乘客的不舒适感。

在图 6、图 7 中，因地面吸收装置吸收能力严重不足，列车网压几乎在整个制动过程中大幅波动，导致制动力 *F* 持续振荡，舒适性严重受到影响。减速度分别为 –1.1258 m/s^2、–1.17m/s^2，将会引起列车严重欠标。

图 8 中，无地面吸收装置，斩波开通阈值 2 000 V，故仍存在少量电制动力 FIE。如果完全屏蔽，FIE 将为 0，施加纯空气制动。但若长期如此，将导致闸瓦过热、异味、性能下降，在影响列车安全的同时，因其平均减速度为 –1.1m/s^2，欠标也将频繁出现。

从试验数据可以看出，再生制动能量被吸收得越不完全，接触网网压上升率越大，对列车制动性能的影响越大。由于列车辅助用电系统的存在，接触网网

机车电传

压基本被牵制在 2 000 V 以下[4]，高速断路器才不会跳闸，列车的可靠性可以得到保证，但由于闸瓦热容量的问题，将给列车带来不同程度的安全隐患。

试验 3：选取差异化的地面吸收装置容量，在制动物理位置、制动初速度及制动给定相同的条件下，对列车制动闸瓦的磨耗做一具体的评估。

试验条件同试验 2 条件。

该试验采集了一辆拖车上的闸瓦制动能量，单位为 MJ。由制动力分配原则及制动能力计算可知，闸瓦使用以拖车为主，故以拖车作为研究对象。

由于数据记录采样仅能做到 100 ms，计算结果将有一定的误差，但不影响对趋势的分析。

见图 9~ 图 12，当地面吸收装置选择的容量分别为 0.5 MW 、1.0 MW、1.8 MW 及“容量足够大”时，一辆拖车的所有闸瓦所消耗能量经计算分别为 4.71 MJ, 4.25 MJ, 3.87 MJ, 1.79 MJ；以电制动再生能量全被吸收时一辆拖车所有闸瓦所消耗的能量 1.79 MJ 为基准计算，当制动再生能量不完全被吸收时，其闸瓦磨耗分别为完全吸收时的 2.63、2.4、2.1 倍。根据 1 号线二期制动系统供应商的试验报告：单个闸瓦上每消耗 1 MJ 能量，其损耗量为 0.36 cm^3。可见，如选择容量不当，将影响闸瓦寿命，增加运营成本。

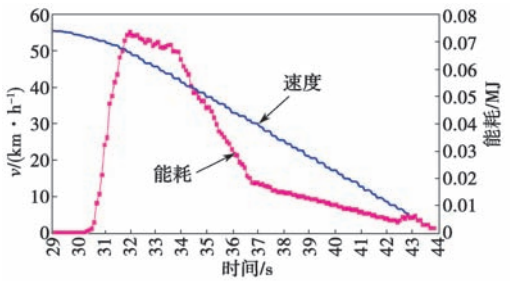

图 9 AW3，55 km/h，100% 常用制动，地面吸收装置 1.8 MW 的速度、能耗波形

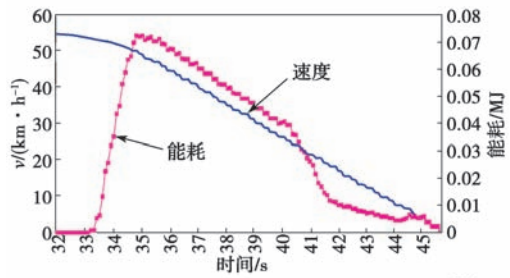

图 10 AW3，55 km/h，100% 常用制动，地面吸收装置 1.0 MJ 的速度、能耗波形

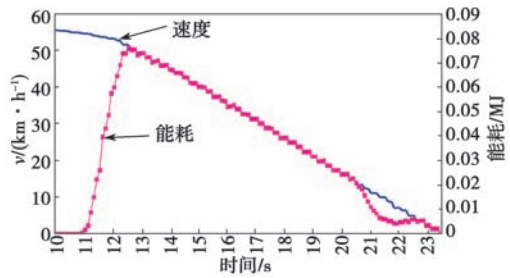

图 11 AW3，55 km/h，100% 常用制动，地面吸收装置 0.5 MJ 的速度、能耗波形

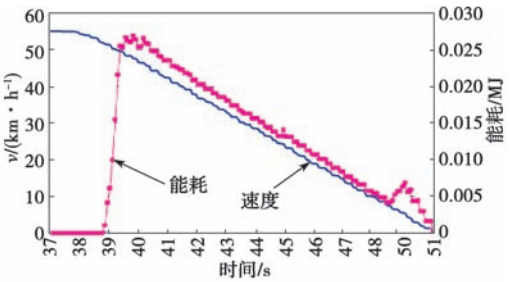

图 12 AW3，55 km/h，100% 常用制动，制动能量完全被吸收的速度、能耗波形

试验 4：在 1 号线二期中和路站牵引所设一地面吸收装置，列车在不同的车站进站制动停车。评估列车制动停车点至地面吸收装置的距离对吸收能力的影响。

试验条件：

地点　中和路站（地面吸收装置容量为 1.8 MW）

负载　AW3

制动进站站名分别为

中河路站，松花江路，大碌站，邬隘站，宝幢站

进站制动速度　50 km/h

制动给定　100% 全常用制动

车载电阻　斩波开通阈值为 1 850 V

地面吸收装置　启动阈值 1 750 V

因地面吸收装置容量所限，无法完全吸收列车的再生能量，其剩余部分将由车载制动电阻予以消耗。试验时记录列车制动电阻斩波电压、电流、接触网电压 *V*、再生电流、列车速度等参数，间接计算出列车总的制动再生反馈能量 T_consu-MJ、地面吸收装置吸收能量 G_consu-MJ、列车车载制动电阻消耗能量 2R_consu-MJ，用以评估临站地面吸收站的吸收能力。试验数据参考图 13~ 图 17 和表 3。

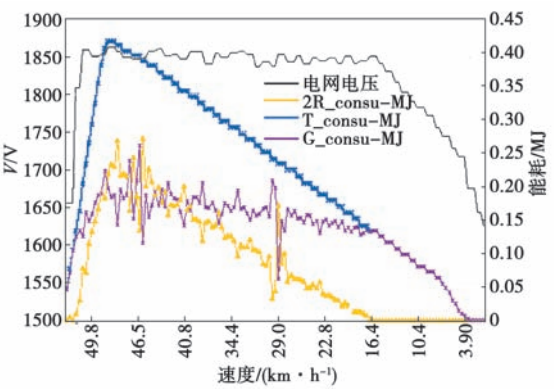

图 13 宝幢站 50 km/h，100% 常用制动斩波电压、耗能波形

图 15~ 图 17 分别为列车在大碌站、松花江路站和中河路站，以 50 km/h 进站制动停车时的曲线。其 G_consu-MJ、R_consu-MJ 基本一致，车载制动电阻斩波退出的速度均为 30 km/h。即在 5 km 左右的区间，地面站吸收装置的吸收能力对距离不敏感；而图 13、图 14 中，制动电阻分别在 16 km/h、24 km/h 退出，即超过一定的距离，车载电阻吸收的再生能量比例大幅度增加，地面站吸收装置的吸收能力随着距离的增加显

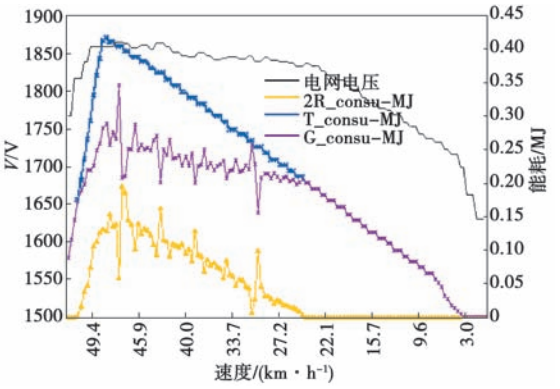

图 14　乌隘站 50 km/h，100% 常用制动斩波电压、耗能波形

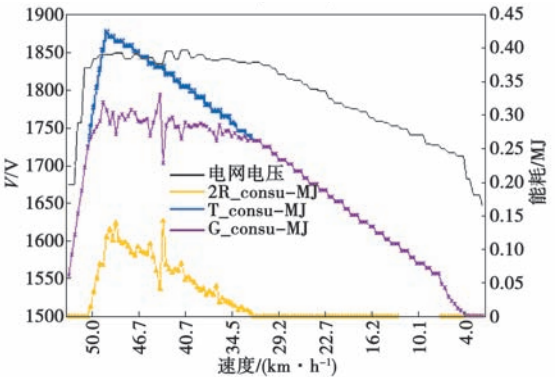

图 15　大碶站 50 km/h，100% 常用制动斩波电压、耗能波形

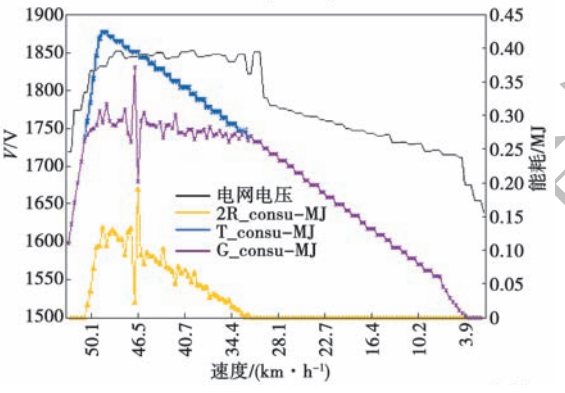

图 16　松花江路站 50 km/h，100% 常用制动斩波电压、耗能波形

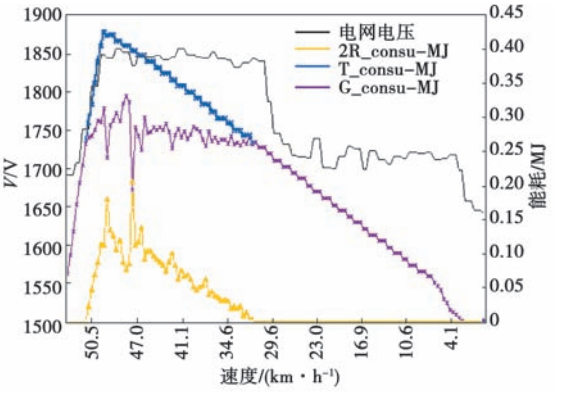

图 17　中和路站 50 km/h，100% 常用制动斩波电压、耗能波形

著递减。从表 3 则可更直观地看到吸收能力是如何受到距离的影响的。

综上，各车站地面吸收装置如均选 1.8 MW 的容量，进站制动列车产生的不能被本站地面吸收装置吸收的剩余再生能量将被附近十几公里内的任意站的地面吸收装置吸收。而在列车的实际运营中，进站制动列车的制动再生反馈能量有相当一部分会被在同一条线上运营的处于牵引状态的列车所吸收，一般称其为临车吸收车。因此，容量的选取需结合运行图的变化予以综合考虑，有必要对既有线按实际运营图运营的列车的制动再生能量的临车吸收率做一些调查和研究。

表 3　地面和车载电阻能量吸收情况

时间	速度 /（km·h^{-1}）	距中河路站距离 /km	站名	地面吸收站吸收能量 /MJ	车载电阻吸收能量 /MJ	总耗能（不包括机械耗能）/MJ
11:32:57	50.5	0	中河路	25.816	3.924	29.740
11:41:02	50.1	2.387	松花江	25.834	3.650	29.484
13:43:50	50.0	4.535	大碶站	25.745	3.342	29.087
13:46:57	49.5	6.921	邬隘	22.650	5.840	28.490
13:54:21	49.8	13.23	宝幢	17.990	11.054	29.044

注：地面能量反馈装置设在中和路站，故列车在中和路站制动时，理论上可以认为列车和地面站距离为 0。

2　回收再生反馈能量的意义及临车吸收率的分析

在软件建模、正线试验的基础上，通过分析既有线的实际运营数据，对成果进行完善、修正。目前宁波 1 号线总计站点 29 个，正线运营列车 24 列，每列车往返一个行程 138 min 27 s（运营间隔约 6~6.5 min），每列车每天平均运营 16 h，均采用车载制动电阻型式。以 1 号线列车目前的运营图，AW2 载荷，进站制动速度 55 km/h，制动减速度 –1.0 m/s^2 计算，每列车运营一天，根据理论计算其进站制动停车所产生的再生能量大约为 3 518 kW·h。另外，因运营时列车区间制动没有一定的规律，计算比较困难，假设该部分能量为进站制动的 0.1 倍，则每列车运营一天产生的总再生制动能量为 3 870 kW·h；而根据实际运营统计数据，24 列车运营一天能耗数据统计如表 4。

表 4　宁波 1 号线实际运营能耗统计表

运营列车数	牵引吸收	再生利用	辅助系统消耗
24 列	140 792 kW·h	66 967 kW·h	49 203 kW·h
总能耗	里程	再生占比	公里能耗
123 028 kW·h	14 141 km	47.5 %	8.70 MJ

从表 4 统计数据可以计算出每列车每天实际平均回收（被临车相互吸收）的再生能量为 2 790 kW·h。以 1 号线列车目前的运营图，每列车运营一天，根据理论计算其进站制动停车所产生的再生能量大约为 3 518 kW·h，如将列车在区间的非停车制动再生能量考虑进去，基本可以算出临车吸收率大约在 72%~79%，其中 21%~28% 的制动能量由车电阻消耗，即为地面吸收装置所需要吸收的对象。如有效利用该部分被车载电阻消耗的能量，以当前电价计算，宁波 1 号线运营 1 年至少有 500~700 万元的回收价值。

广电牵动

3 容量选择

根据上述理论计算和实际运营统计数据，基本可以确定 B 型车以 6~6.5 min 的初期运营间隔，列车再生制动能量的 21%~28% 被车载制动电阻所消耗浪费，至此真正需要治理回收的对象基本明确。结合列车制动功率曲线（见图 18）及列车进站制动要求速度（因列车限界所限，一般为 55 km/h) 和制动减速度要求 (一般为 –0.8~–1 m/s^2)，就可以大致计算出所需地面吸收装置的容量为

$P_{min}=(V_{jz}/V_{zd})\times P_{zd}\times(1-M)$; $P_{max}=P_{zd}\times(1-M)$

式中：P_{min}、P_{max} 分别为所选地面站吸收装置容量的最小值和最大值；V_{jz}/V_{zd} 为 进站制动速度 / 列车最大运行速度；P_{zd} 为列车 AW3 载荷、减速度考虑 –1 m/s^2 时最大运行速度制动时的制动功率；M 为临车吸收率（B 型车一般为 72%~79%，可取中间值 75%）。

从实际运营的经验和列车中远期运营规划来说，列车运营间隔越小，也即运营密度越高，临车吸收率也大致成升高的趋势。也就意味着以近期运营图为基础所选的地面吸收站容量可满足中远期运营图需求。

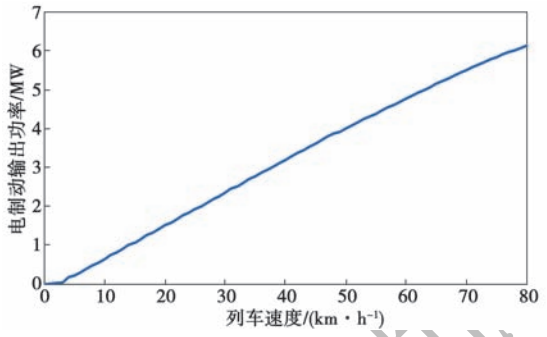

图 18 宁波 1 号线二期列车电制动输出功率对列车速度曲线图（AW3， DC 1 500 V）

其次，根据试验 4“进站制动列车的不能被本站吸收装置吸收的剩余再生能量将被附近十几公里内的任意站的吸收装置吸收”的结论，结合列车制动再生功率曲线为三角波形式，而地面吸收装置周期性的可变占空比矩形波输出形式，对所选容量可做微小的修正。

4 结语

本文以设计院的建模仿真为基础，选取一容量较为保守的地面吸收装置，在既有项目的线路和车辆条件下，进行了大量的对比性试验。阐述了合理选择地面吸收站容量对列车制动性能、对位精度、闸瓦磨耗、运营可靠性及节能等方面的重要意义，进而结合实际运营数据和理论计算，进一步细化了吸收对象，对地面吸收装置容量的选择进行了量化分析。同时对地面吸收站和列车制动停车站点的相对距离如何影响吸收装置吸收能力的衰减做了较为量化的分析，为容量选择的修正提供了微调数据基础。

参考文献：

［1］江亿 . 从实际运行数据出发开展地铁站节能工作［R］. 北京：清华大学，2015.

［2］张文丽，李群湛，刘炜，等 . 地铁列车再生制动节能仿真研究［J］. 变流技术与电力牵引，2008(3)：41–44.

［3］Sone s, Ashya M. An Innovative Traction System from the View Point of Braking［J］. Journal of Vascular & Interventional Radiology, 1998, 17(8)：36–41.

［4］铁路应用—牵引系统的供电电压：IEC 6085［S］. 第三版，2007.

［5］北京纵横机电技术开发公司 . 闸瓦 1：1 制动动力试验总结报告［R］. 北京：北京纵横机电技术开发公司，2013.

作者简介：李义国（1974–），男，工程师，从事轨道车辆技术管理工作。

机车电传动

动态消息

全球首个“铁路移动检修工厂”宝鸡中车时代造

近日，由中车株洲所旗下时代电气子公司宝鸡时代研发生产的 JJC 接触网检修作业车收获铁路总公司 36 列车订单。这是全球首个采用集中检修作业模式的接触网作业车，它将生产车间、办公室以及厨房、宿舍等生活设施都搬到了检修作业现场，堪称“铁路移动检修工厂”。

JJC 接触网检修作业车由 2 台牵引车和 10 台作业车固定编组组成，最高运行速度 120 km/h。车辆顶部安装着 175 m 长的贯通升降作业平台，能实现接触网 3 个杆距段同时作业，可同时满足接触网检修作业天窗修和集中修的需求。与传统的检修作业车相比，JJC 型接触网集中检修作业车具有综合作业效率大幅提升、大大减少人员投入、作业环境有效改善诸多优势。

随着我国铁路运输的不断发展，接触网检修作业模式也在不断优化，宝鸡时代研制的 JJC 型接触网集中检修作业车的投放运用很好地满足了接触网集中检修作业模式这一新的市场需求，填补国内外产品空白，为提升铁路供电检修科学化水平提供了优质设备和服务保障，也将在接触网施工作业中产生良好的经济效益和社会效益。

（朱一迪）