

# 地面吸收系统在地铁列车再生制动试验中的应用

徐 顺

(南车青岛四方机车车辆股份有限公司技术工程部, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 地铁列车在工厂试验线进行再生电制动试验时所产生的能量若不能及时被其它用电设备或车辆所消耗, 将导致线网网压过高造成再生制动试验失败; 针对地铁列车再生制动能量特点, 采用电阻耗能型地面集中吸收系统, 通过在线实时跟踪、检测、逻辑运算判定和控制, 达到自动判定识别列车再生制动工况, 同时具有数据处理、数据传输及监控系统, 实现再生制动能量与吸收功率大小同步的自动控制, 现车试验持续吸收功率达 1 600 kW, 维持了线网电压稳定, 确保再生制动试验顺利进行。

**关键词:** 再生制动; 吸收电阻; 能量吸收; 自动跟踪

## Ground Absorption System Application of Regeneration Braking Test in Subway Train

Xu Shun

(CSR Qingdao SiFang Locomotive & Rolling Stock Co., LTD., Engineering Department, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** The regenerative braking energy will increase the trolley voltage too high to halt if the energy can't be absorbed by other equipments or metro cars when the metro is running test at factory. The system, which could absorb the energy by resistors that are concentrated at test room, is adopted on account of the characteristic of metro regenerative braking. It has the function of identifying the state of regenerative braking by real-time auto-track online, detecting, logically operation and decision-making and control. The data processing, communication and monitor are also adopted to control the efficiency of regenerative braking. The continual absorbed power at the trial vehicle is 1 600 kW, maintain the stability of trolley voltage and insure the commission of the metro to be continued.

**Keywords:** regenerative braking; resistor absorption; absorb energy; autotrack

### 0 引言

地铁列车采用 DC1500V 或 DC750V 直流电源供电, 与地铁运营干线牵引供电相比: 厂内试验电源容量小、单线试验没有上下行线用电平衡, 因此, 再生制动工况时所产生的能量若不及时释放而导致网压迅速抬高, 造成列车 VVVF 过压保护停止工作, 使列车试验项目无法进行; 地铁再生制动产生的反馈能量一般为牵引能量的 30% 甚至更多<sup>[1]</sup>。根据现车测试, 试验列车速度达 40 km/h 时再生制动无吸收的情况下, 网压瞬间提升 25% 以上, 已超过列车 VVVF 和 SIV 保护设定值, 同时, 过高的网压对牵引变电所也造成影响, 其过压保护也可能动作跳闸。因此, 需要设置实时自动跟踪的动态吸收系统, 解决列车再生制动产生的网压过高问题。

### 1 电阻吸收系统结构与原理

针对列车再生制动时向电网回馈的能量, 我们采用在牵引变电所设置电阻吸收系统进行消耗。电阻吸收系统结构如图 1 所示主要由三部分组成: 开关柜、斩波控制柜、吸收电阻柜。

其中开关柜主要完成电网电压制式选择、电源的通断、电压和电流检测等功能; 斩波控制柜主要完成设备投入判断、斩波调节、监控、遥控、保护及数据处理等功能; 吸收电阻柜主要实现能量的消耗。试验时首先选择电网制式, 确认电压等级为 DC1500V 或 DC750V; 通入控制电源使控制系统投入工作,

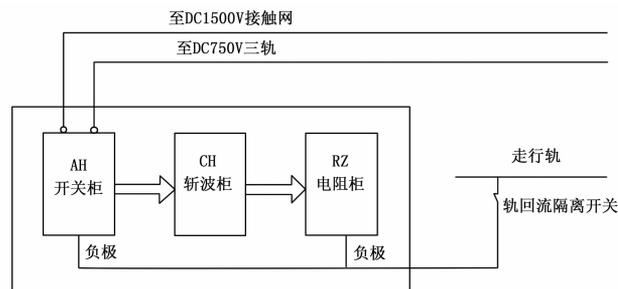


图 1 电阻吸收系统构成示意图

合上主断路器, 启动微机监控系统, 微机监控系统自动检测各个传感器信号, 判定线网试验列车是否处于再生制动状态。一旦确认列车处于再生制动状态并需要吸收能量时, 斩波器立即投入工作, 将再生制动产生的能量通过电阻消耗, 吸收装置采用斩波器和吸收电阻配合, 根据车辆制动级位大小实时调节斩波器导通比, 使吸收功率根据再生制动能量的大小实时变化, 从而将线网电压维持在某一设定值范围内, 保证列车再生制动试验顺利进行。

#### 1.1 电阻吸收系统基本功能

(1) 能对试验列车的运行工况进行有效、准确地实时检测, 当列车处于启动、加速、惰行、停止工况时, 吸收系统不投入工作, 保证其不反向吸收牵引所能量, 若在线试验列车已处于再生制动工况且制动能量不能被试验列车制动电阻吸收造成网压过高时, 吸收系统立即启动, 快速吸收再生制动能量, 且能根据吸收功率的大小自动调节导通比, 维持网压在一定的

收稿日期: 2014-02-19; 修回日期: 2014-03-28。

作者简介: 徐 顺(1960-), 男, 山东济南人, 高级工程师, 主要从事电动车组电器调试工艺方向的研究。

范围内恒定。

(2) 具有本地和远控功能，可以接受牵引所的微机远程控制命令并实时反馈执行和运行状态；同时还具有数据处理、数据传输等功能。

(3) 具有完善的保护装置和措施，设有过压、过流、过热、短路等保护。当直流控制电源发生故障时，系统迅速推出运行并发出故障报警信号。

### 1.2 主电路系统设计

主电路系统见图 2，由电压制式选择开关 (HS)、电动隔离开关 (QS)、电压检测传感器 (YH1、YH2)、斩波器 (RT1~8)、吸收电阻 (RZ1~8)、电流检测传感器 (LA1、LA2、LA3、LA4、LA5、LA6-1、LA6-2) 等构成。装置由 8 个独立的吸收支路组成，每一支路由一个 IGBT 斩波器控制，构成八相二重恒压吸收控制系统。吸收采用恒压吸收方式，利用斩波器和吸收电阻相互配合，再根据再生制动时线网电压的变化调节斩波器导通比，从而改变吸收功率，达到网压在设定范围内稳定<sup>[2]</sup>。吸收系统根据交流电压 (牵引所 10 kV 交流侧电压互感器 YH3 提供)、直流网压 (由电压传感器 YH1 测得) 的变化及受流网电流 (由电流传感器 LA6-1 或 LA6-2 测得) 的极性进行综合判断，在确定在线车辆已处于再生制动状况后，开通各相斩波器吸收制动车辆的回馈电流。根据线网再生反馈电流的大小，自动调节斩波器的导通角，改变各相电阻等效阻值，实现吸收功率平衡，稳定线网电压，确保列车再生制动试验顺利进行。当列车由再生电制动转为其它工况运行时，经系统判断，自动关断各相斩波器，使吸收设备处于待命状态。

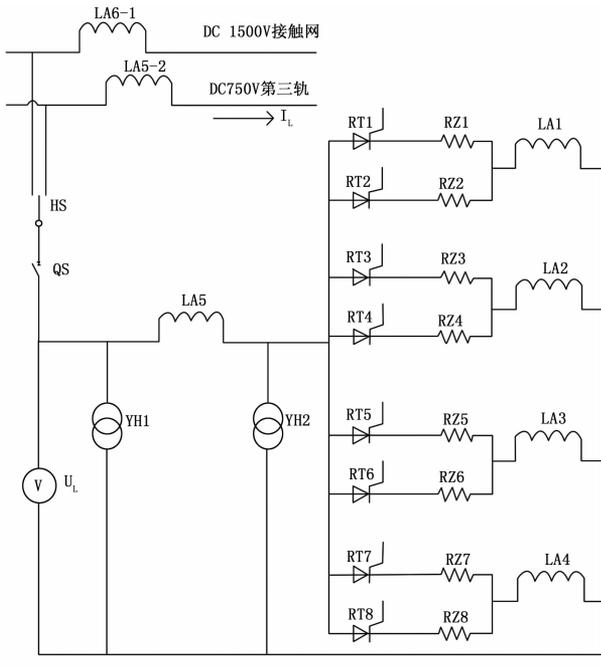


图 2 主电路系统图

### 1.3 控制系统设计

控制系统采用双微机控制，是电阻吸收系统的核心，解决的主要问题是准确快速地判断在线试验列车处于再生制动状态且再生能量未被车载电阻所吸收和斩波器控制分配每个吸收支路电阻来吸收试验列车的再生能量；根据吸收系统设备的特

点，设计上、下两级控制完成在线实时跟踪、检测、逻辑运算判定及控制，达到自动判定识别列车再生制动工况并有效实施吸收，其组成原理如图 3 所示。

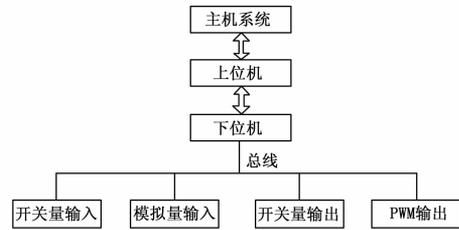


图 3 控制系统构成示意图

控制系统针对供电电压为 DC1500 V /DC750V 的试验线路，设定为两路转换，将网压波动范围取为 900~1 900 V/500~1 000 V，根据 VVVF 特性设置斩波器的控制电压为 1 620~1 700 /810~850 V，设计时可根据地铁试验线路的实际情况进行调整。

(1) 列车再生制动工况的判断。列车的再生制动工况通过比较线网电压  $U_L$  大小和网流  $I_L$  方向判断。当网压  $U_L \geq 1 700/850$  V (斩波器设定的控制电压) 同时网流  $I_L$  方向反向即与牵引工况相反则判定为再生制动工况，吸收系统投入。

(2) 斩波器的控制。该装置采用 PID 闭环控制实现网压恒定，基准电压的设定和网流方向的判定是关键，其基准电压值设计高于线网空载电压，且需在斩波器的控制电压范围之内。系统根据牵引变电所 LA6-1 (DC1500V 系统) 或 LA6-2 (DC750V 系统) 测得的电流极性和 YH3 测得的电压信号进行综合判断，当在线试验列车处于再生制动状况，其再生能量没有被其他设备吸收时，系统首先根据交流侧电压变化与基准电压进行比较，当交流侧电压检测值低于对应 DC750V (DC1500V) 时的值，系统执行基准电压与直流侧检测电压 (由电压传感器 YH1 测得) 进行比较，只要直流侧检测电压大于基准电压，系统投入工作状态，开通斩波器；根据牵引网再生反馈电流的大小，自动调节斩波器的导通角，改变各相电阻等效阻值，实现吸收功率平衡，稳定网压。当交流侧电压检测值高于对应 DC750V (DC1500V) 时的值，系统执行基准电压加上交流  $\Delta U$  作为新的基准值与直流侧检测电压进行比较，只要直流侧检测电压大于该判断基准电压，系统投入工作状态，开通斩波器；根据牵引网再生反馈电流的大小，自动调节斩波器的导通角，改变各相电阻等效阻值，实现吸收功率平衡，稳定网压。系统采用了交、直流电压相对判断的方式，在设定基准电压以上进行比较，合理解决了电网波动的影响。系统还可以根据吸收功率的大小控制斩波器的投入数目，整个制动过程，可以根据线网电压变化及再生功率大小，实现实时控制<sup>[3]</sup>。

(3) 保护控制。系统具有过压、过流、过热、短路、失压及安全操作等保护。故障必须经人工判断处理后，设备才能再投入工作。上述故障均为电子快速保护。吸收装置具有对控制电源的监视功能，当直流控制电源发生故障时，系统迅速切断线路接触器，发出故障报警信号。通讯系统具有远地和本地遥控、遥信功能，通过 RS485 标准通信口与变电所综合自动化系统接口。

(下转第 2300 页)

建立这样完整的实时反射内存网后，系统内的设备间数据通信都是直接通过反射内存写入、读取数据，与以往从以太网通过 UDP 来接收数据相比，实时性有了很大提高。系统设备间数据流示意图如图 6 所示。

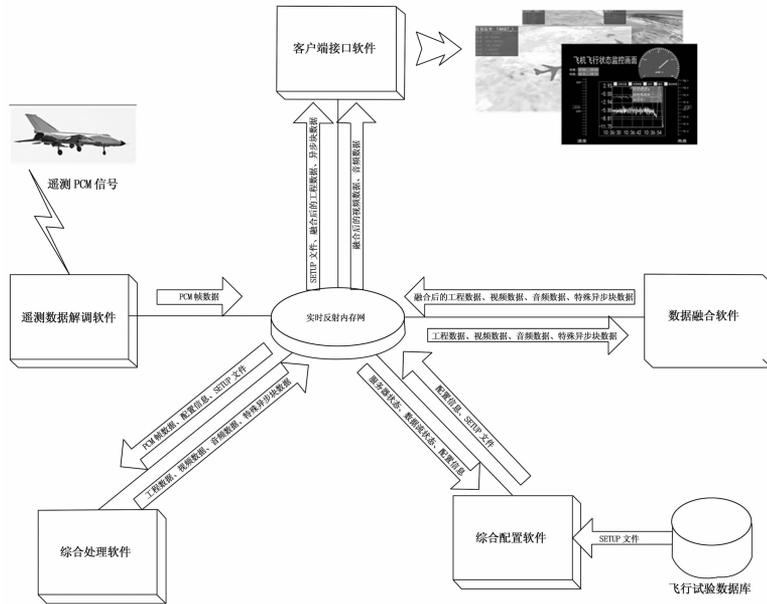


图 6 数据流示意图

#### 4 系统的应用与分析

由实时反射内存网络技术构建起来的试飞实时监控系统是

一种能够在确定的时间内执行计算或处理功能并对外部的异步事件做出响应的试飞实时监控系统，其通信的确定性和可预测性，使得能够设计出系统延迟时间短、运行效率高，实时性能好的监控系统。实时反射内存网的诸多技术优势使其成为实现试飞实时监控系统的一种理想技术，非常适合用于构建良好的分布式试飞实时监控系统。

采用该项技术进行设计的试飞实时监控已在某基地飞行试验中应用，经验证，该系统具有通信实时性好，数据传输速度快（传统采用以太网的监控系统数据延迟（从解调后到显示到画面）为 200 ms 以上，而采用实时反射内存网的监控系统，数据延迟只有 70 ms），传输可靠性高的特点，满足飞行试验和武器试验的需要，取得了良好的效果，实践证明是一种成熟、有效的试飞实时监控系统。

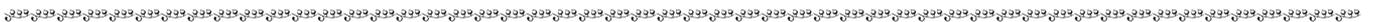
#### 参考文献：

[1] 周自全. 飞行试验工程 [M]. 北京：航空工业出版社，2010

[2] 白效贤, 杨廷梧, 等. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策 [J]. 测控技术, 2010, 29 (11): 6-9.

[3] VMIPCI/SW-RFM1-ABC-940 Driver for the PCI bus, Reflective Memory Interfaces on the Windows NT 4.0, Windows 2000 and Windows XP Operating Systems, User's Manual [Z]. VMIC, 2002.

[4] VMIPCI-5565, Ultrahigh-Speed Fiber-Optic, Reflective Memory with Interrupts [Z].



(上接第 2296 页)

#### 2 再生制动能量电阻吸收系统应用效果

通过试验线列车再生制动试验测试，广州地铁 5 号线车辆的试验中对电阻吸收系统的 DC1500V 系统进行验证，完成 4 列车的动态试验，在列车 60 km/h、100%电制动时吸收电流 800 A、网压 1 735 V，吸收功率约 1 500 kW；北京地铁 8 号线车辆的试验中对吸收系统的 DC750V 系统进行验证，在列车 60 km/h 电制动投入时吸收电流 1 885 A、网压 850 V，吸收功率约 1 600 kW。列车再生制动时，再生电流回馈至电网会使网压升高，经检测控制系统判定网流方向反向和网压到达斩波器的启动电压（1 700 V/850 V）时，IGBT 开通，吸收支路吸收制动电流并使网压下降。调节过程中 IGBT 由 PWM 信号发生器产生的 PWM 脉冲驱动，其中 PWM 脉冲的占空比是通过 PID 调节器得到的，当网压大于斩波器关断电压（1 620 V/810 V）时，占空比才大于零，否则为零，占空比的大小与网压成正比，同时 PWM 信号发生器会产生相应占空比的 PWM 脉冲控制 IGBT 的通断，但 IGBT 要在网压大于斩波器的启动电压和网流反向时才开通，开通后即对电网电压进行调节。从列车试验测试结果可知，吸收装置根据设置参数或测定参数要求，能够快速地进行电流跟踪和恒压运算，当车辆制动级位较低时，即回馈电流较小，经控制单元运算后调节斩波器的导通

比，使斩波器处于低开通状态；随着制动极位的增加，控制系统经 PID 实时运算，快速调节斩波器导通比，以维持网压的相对稳定，直至网压低于设定的吸收电压值关闭斩波器。整个吸收过程可以根据网压变化及再生功率大小实现实时控制。达到了预期的吸收效果，满足了地铁车辆再生制动工况试验要求。

#### 3 结论

再生制动能量电阻吸收系统解决了列车再生制动试验时向线网回馈能量造成网压过高致使列车 VVVF 过压保护无法完成再生制动试验的问题，同时也解决了车载制动电阻发热造成车载设备温升高的问题。目前，电阻吸收系统在公司内动态试验线已投入使用，实现了列车再生制动能量自动跟踪吸收，提高了列车试验能力和试验工艺水平。

#### 参考文献：

[1] 王彦峥、苏鹏程. 城市轨道交通再生电能回收技术方案的研究 [J]. 电气化铁道, 2004, (2): 37-40.

[2] 孙延焕. 再生制动吸收设备的应用介绍 [J]. 电气化铁道, 2005, (3): 40-43.

[3] 刘培栋、王卫东. 再生制动吸收装置在重庆轻轨中的应用 [J]. 都市轨道交通, 2006, 19 (3): 84-86.