

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.06.037

# 现代有轨电车 储能式供电能耗与配套供电

杨 锐 陈德胜 张剑涛

(北京城建设计研究总院有限责任公司 北京 100037)

**摘 要** 储能式供电是现代有轨电车的重点技术发展研究方向和热点问题,列车自带储能装置可为车辆提供牵引电源和辅助电源而脱网运行。通过对储能式供电的技术特点、能耗与充电、供电需求的关系的分析研究,对有轨电车储能式供电车辆与供电系统的配合提出思路。

**关键词** 现代有轨电车;储能式供电技术;供电系统

**中图分类号** U482.1;U266.2 **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2013)06-0148-04

随着城市发展规划对现代有轨电车建设要求的提高,在某些无法使用架空接触网的地段(如市政广场、著名景点、重点景观规划区域等)研究采用去架空接触网供电制式。与架空接触网相比,去架空接触网对城市景观影响小,并能够大幅提高工程的景观效果,符合现代有轨电车作为城市新型轨道交通工具的定位要求。

作为去架空接触网牵引供电制式的重要技术种类,储能式供电近年来随着元件、原材料的技术进步而发展迅速,如超级电容和蓄电池的新型电极材料、电解液等,并且随着国内有轨电车的建设热潮,得到比较好的发展和应用。

下面分析储能式供电技术的特点,并就储能式供电车辆对供电系统的要求和匹配性做出分析。

## 1 现代有轨电车储能式供电技术

### 1.1 技术类型和发展方向

根据所选取的储能元件及其工作原理的不同,储

能式供电一般分为超级电容供电、蓄电池供电、超级电容+蓄电池供电三大类。通过在可靠电源处的短时高功率充电,快速获得电源并储存,在列车运行时根据牵引电机的需求提供正向脉冲功率,制动时接受反向脉冲功率,这对储能装置在稳定电压条件下的电流指标要求较高。超级电容的功率特性突出,蓄电池的能量特性更优。在技术发展的过程中,由于有轨电车要求功率特性与能量特性并重,所以超级电容和蓄电池供电技术也在相互融合中发展,以便更好地满足轨道交通的牵引供电需求。

#### 1.1.1 超级电容供电技术

超级电容采用双电层原理,一般选用石墨电极,正电荷与负电荷分布在两个不同相之间的接触面上,以正负电荷之间的极短间隙排列在相反的位置上,这个电荷分布层叫做双电层,因此电容量非常大。随着超级电容器放电,正、负极板上的电荷被外电路泄放,电解液界面上的电荷相应减少(见图1)。

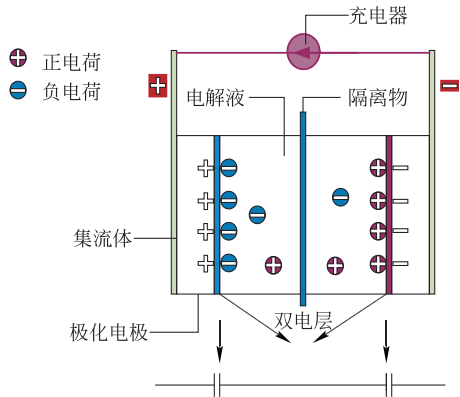


图1 超级电容供电原理

超级电容的充放电过程始终是物理过程,内阻很低,充放电流可达数千安培,充电速度快。可将单体超

收稿日期: 2013-10-25 修回日期: 2013-11-01

作者简介: 杨锐,男,工程师,从事轨道交通供电系统设计, yangrui@buedri.com

基金项目: 北京市科委科技计划课题(Z090506006309017)

级电容器进行串并联组合,配置双向变流器及控制装置,应用于列车的牵引供电。在已投入运营的沈阳浑南新区现代有轨电车局部线路上,采用了超级电容供电技术。

1.1.2 蓄电池供电技术

车载动力蓄电池正极采用锂离子金属聚合物电极的居多,利用正、负极之间的氧化还原反应,靠锂离子的移动完成装置的充、放电过程(见图2)。锂离子蓄电池的充、放电过程均为氧化还原反应,单位体积质量下储存电量较高,通过单体蓄电池的串并联组合,配置双向变流器和控制装置,应用于列车牵引供电。另外,超级电容储能与蓄电池储能可组合使用,构成超级电容+蓄电池供电,两种储能系统分别满足不同的列车功率需求。

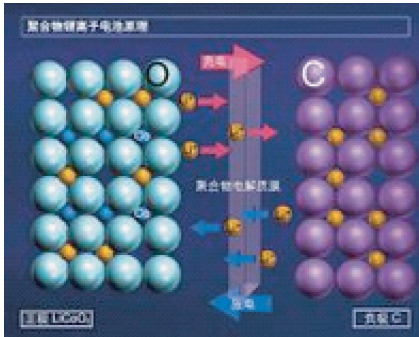


图2 蓄电池供电原理

2 技术特点与关键技术问题

超级电容供的电核心特征为:充电电流大,充电速度快,在充、放电过程中电极损耗较小,循环寿命较长。单个超级电容储能模块的最大持续充电电流能够达到500~600A,可根据车辆参数和线路条件来确定储能模块的数量,整车的连续充电电流为1500~2400A。采用恒定功率充电时,充电时间能够与车辆停站时间较好地结合,控制在25~30s以内。超级电容供电可满足有轨电车按固定线路循环运行、线路中不允许车辆长时间停留的要求(见图3)。

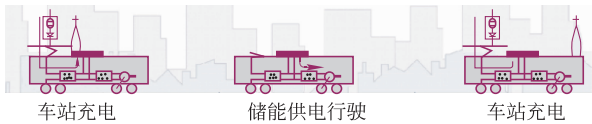


图3 储能式车辆运行

蓄电供电技术的核心特点是储存的能量高,近年来在公共交通领域应用较多。对于轴重有限的车辆而言,加装储能装置意味着降低有效载客能力。在相同

的安装空间和载荷条件下,蓄电池装置存储的能量是超级电容的5~6倍以上。由于受到充电电流的限制(一般不超过800A),蓄电池在车站充电的时间略长,若完全利用停站时间充电,则需要在首末站进行较长时间的补充充电(分钟级)。

超级电容供电与蓄电池供电两类技术在实际应用中,要在满足运营需要和控制车辆质量的前提下,尽可能实现储能装置的能量平衡。对于为车辆配套的供电系统而言,须针对这种宽度很窄的纯脉冲负荷进行供电匹配设计。

3 储能供电的运行能耗分析

3.1 牵引能耗

车辆(5模块,AW2)满载70t,启动加速度按照1.1m/s<sup>2</sup>计,在不考虑坡度的情况下,不同速度下所需的牵引力如图4所示。由图可知,从列车启动至速度达到25km/h这段时间内,牵引力最大,达到100kN左右,此时阻力为3.9kN左右。

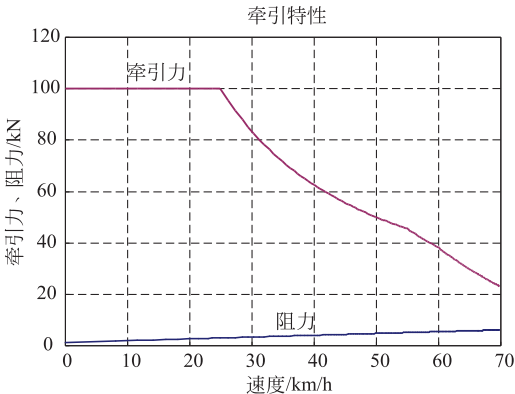


图4 列车牵引力与速度曲线

以车辆全重、车辆牵引力及牵引阻力、旅行速度24km/h、区间最高行驶速度40km/h、牵引电机额定功率700kW为基础,考虑线路坡度的情况,计算得出某工程区间的能耗,如表1所示。由此可推算出有轨电车满载时的情况(按5模块计),平直道时每公里牵引能耗约为6.4kW·h,线路坡度3%时每公里牵引能耗约为12.4kW·h。

表1 某工程区间能耗

名称	间距/m	线路纵坡	牵引能耗/kW·h
区间1	674	3%,255 m	5.61
区间2	319	1.1%,300 m	3.1
区间3	539	2.1%,375 m	4.93
区间4	488	0.15%,445 m	3.32

3.2 制动能耗

储能式有轨电车由于质量较大,且为钢轮车辆,所以制动时无法完全采用电制动。根据车辆运行速度,低速制动过程中会产生一定的牵引损耗,一部分能量被回收至储能电源内,表2为以40 km/h速度常规制动时的列车运行情况。有轨电车以40 km/h速度制动一次,牵引能耗约为1.1 kW·h。经计算,制动时超级电容可通过双边变流器吸收制动能量约为0.28 kW·h,该次制动时的净牵引能耗为0.82 kW·h。

表2 某工程制动能耗

速度/(km/h)	牵引能耗/kW·h	坡度/%	距离/m	时间/s
40	1.1	3	114	19.6

3.3 辅助用电功率

5模块的车辆辅助系统按负载50 kW计算,其中空调正常负载35 kW。若车辆旅行速度24 km/h,在所有辅助系统均运行的情况下,每公里损耗约为2.08 kW·h。

3.4 每辆车运行功率

假设车辆在夏季运行,区间长度800 m,坡度3%,车辆以40 km/h常规制动3次,并考虑车辆启动时的额外损耗,模拟计算得出该区间每辆车运行所需的功率约为17.1 kW·h。

4 储能装置容量配置与配套供电系统

从目前国内外100%低地板车辆的顶部安装空间来看,用于放置储能装置的空间为3~4 m<sup>3</sup>。根据目前储能技术的现状,超级电容可以配置到13~18 kW·h,蓄电池可以配置到160~220 kW·h(含冷却系统)。在工程中,容量配置宜按照区间最大净能耗、允许停站时间并遵循以下原则进行综合考虑:满足最大区间能耗要求,包括极端情况;满足储能元件处在健康工作状态;满足单辆车运行一个完整交路后,能量损耗与能量补充能够基本平衡。

4.1 容量配置

假设某工程A、B、C三站两区间的车辆应用储能式供电技术,对容量选择和供电系统配套设计进行分析。A-B区间的长度800 m,坡度3%,车辆以40 km/h常规制动3次;B-C区间长度600 m,坡度1%,考虑车辆以40 km/h制动3次。

根据前面的计算,可知A-B区间能耗约17.1 kW·h, B-C区间能耗约8.2 kW·h;停站时间为25 s;作为辅助能耗,空调、照明等全负荷运行;充电装置工作DC 500~900 V。根据能耗计算,单个区间最大能耗为17.1 kW·h,

储能装置的储能量应大于17.1 kW·h,所以超级电容采用最大容量配置为18 kW·h。蓄电池根据其最佳工作容量可选择40~50 kW·h,电池工作在“浅充浅放”的状态,以提高使用寿命。

4.2 供电系统配套技术

车辆利用停站时间,通过架空安装的充电装置进行充电。

4.2.1 充电装置设置

超级电容方案:由于A-B区间能耗已经接近超级电容的最大配置容量,因此A、B、C这三站均设置充电装置。蓄电池方案:在B站设置充电装置即可。

4.2.2 充电参数

有轨电车应尽量结合列车停站时间进行充电,以减少对运营的影响,充电时间为25 s。充电电压可选择DC 1500 V和DC 750 V两种,从系统能力匹配和工程造价角度出发,选择DC 750 V电压等级。根据车辆所需充电功率的负荷特性来确定充电电流。

按照假设的工程条件和能耗,2个区间共计耗能25.3 kW·h。经计算,可得出单个充电装置的电流约为2 400 A。上述计算只是模拟了3站2区间的简单情况,要延伸到整条线路,对车辆运行能耗和充电功率进行更大范围的分析,并重新寻找平衡点。一般来说,线路越长,对于充电功率的要求会稍微降低。在工程应用中,充电功率要在以上分析的基础上,根据车辆牵引特性综合确定。较为理想的储能装置能耗与充电关系如图5所示。

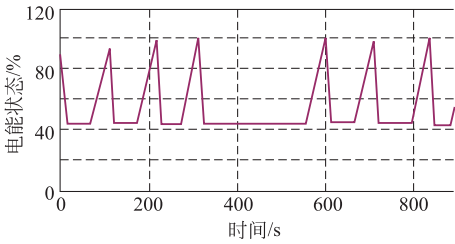


图5 储能电源容量变化曲线

5 结语

对于储能式供电的现代有轨电车,在车辆牵引特性的基础上,根据线路条件和系统要求对车辆运行能耗进行分析是十分必要的,牵引能耗与充电功率之间的动态平衡对提高整个系统的效率、降低成本有着重要意义。

对于能耗特别大的区间,如上述示例中的A-B区间,也可以通过减少相邻车站间距的方式来平衡能量,线路分段考虑能耗与充电,并在整条线路达到平衡。同时,也可

以降低充电电流,上述示例中的充电电流为2 400 A,如果将分析范围再扩大到5~6个区间,该电流将进一步缩小,这对控制牵引变电所的容量、造价有重要意义。

分析能耗并动态平衡能耗与充电,有助于在满足功能要求的前提下,提高系统效率和节约能源。

参考文献

[1] 聂晶鑫,郭育华. 超级电容储能装置在城市轨道交通中的应用[J]. 电气化铁道, 2011(2):48-50.  
 [2] 陈新斌, 陈中杰, 陈超录, 等. 储能式电力牵引轻轨车电气牵引系统研制[J]. 车辆电传动, 2013(1):73-78.  
 [3] 马奎安, 陈敏. 超级电容器储能系统充电模式控制设计[J]. 机电工程, 2010(7):85-88.

[4] 邹焕青, 蓝正发. 超级电容应用于蓄电池电力工程车的理论研究[J]. 电力车辆与城轨车辆, 2011(4):28-31.  
 [5] 李媛媛, 陈英放. 超级电容在电动车上的应用[J]. 江西能源, 2008(2):16-19.  
 [6] 康继光, 卫振林. 电动汽车充电模式与充电站建设研究[J]. 电力需求侧管理, 2009(11):64-66.  
 [7] 刘自发, 张伟. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工程学报, 2012(22):39-45.  
 [8] 全国汽车标准化委员会. QC/T 741—2006 车用超级电容器[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.  
 [9] 全国汽车标准化委员会. QC/T 743—2006 电动汽车用锂离子蓄电池[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(编辑:郭洁)

# Energy Storage, Power Consumption and Power Supply of Modern Tram

Yang Rui    Chen Desheng    Zhang Jiantao

(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

**Abstract:** Energy storage type power supply is the focus of the research trend and a hot issue of research on the technological development of modern trams. Train with energy storage device can supply traction power and auxiliary power for off-grid operation. This paper proposed the ideas of coordination the streetcar energy storage type power supply vehicle and power supply system based on the analysis of the technical characteristics, energy consumption, charging and the supply demand relationship of energy storage power supply.

**Key words:** modern tram; energy storage power supply technology; power supply system

(上接第142页)

参考文献

[1] 徐正和. 现代有轨电车的崛起与探索[J]. 现代城市轨道交通, 2005, 2(2):12-15.  
 [2] 卫超, 顾保南. 欧洲现代有轨电车的发展及其启示[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(1):11-15.  
 [3] 王喆, 王伟. 城市既有铁路专支线现代有轨电车改造探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2012, 9(5):11-15.  
 [4] 吴江, 莫逸凭. 共生式产品整合设计研究[J]. 包装工程, 2011, 32(24):65-68.  
 [5] 陈为. 产品形态中的仿生设计及其应用[J]. 包装工程, 2010, 31(4):46-49.  
 [6] 王海霞, 董宁, 徐伯初. 高速列车涂装设计的感性转向: 车体涂装设计的文化与心理学视角[J]. 西南交通大学学报: 社会科学版, 2012, 13(4):61-64.  
 [7] 徐伯初, 李洋, 管聪颖. 高速列车造型的美学特征分析[J]. 包装工程, 2012, 33(2):23-26.  
 [8] 付璐, 付黎明. 价值工程在汽车车身造型中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(3):161-163.

(编辑:王艳菊)

# Analysis on Foreign Modern Tram Appearance Design

Wang Wei<sup>1,2</sup>    Wang Zhe<sup>3</sup>

- (1. School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 2. School of Art and Communication, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
- 3. Traffic & Urban Planning and Design Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Limited Company, Chengdu 610031)

**Abstract:** By referring to the conceptual modern trams latest designed in the French port city Marseille, silk industry center Lyon, champagne capital Reims and Australian culture and fashion capital Melbourne and so on, foreign design methods and practices of modern trams are analyzed from five aspects as follows: regional culture of bionic design, emotional design, city environment, form and the beauty of technology. The analysis is to provide a reference for appearance design of modern trams to reflect culture and city images of our country.

**Key words:** modern tram; appearance design; regional culture; bionic design; emotional design; urban environment synthesis