

The Selection of Modern Tram's Braking Mode

Xiangfei Kong^{1, #}, Zhiping Liu¹, Weixiang Xu^{2, #}

1. Department of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University Haibin College, Cangzhou, Hebei, 061000

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044

#Email: kongxiangfei.888@163.com; wxu@bjtu.edu.cn

Abstract

The modern tram has mezzo transport volume and less pollution, which could solve traffic congestion problems, cooperated with the subway and other vehicles in the large and medium-sized city. The modern tram has become the first solution to solve the traffic congestion problem. This paper based on the analysis of relevant information and combined with the present application of tramcar at home and abroad. Through analysed the tramer's braking mode and its characteristics, this paper introduced the viewpoint that use super capacitors can not only store electrical energy which regenerative braking could not fed back to the Overhead Contact System but also can provide the power of tramcar. According to the situation of modern tramcar's practical application, this paper presented the basic design principles of modern tramcar's braking mode and then designed the two braking models of modern tramcar. From analysis of the two different braking models the conclusion which electro pneumatic brake system will be firstly adopted in the modern tramer's breaking mode is arrived.

Keywords: Modern Tram; Super Capacitor Energy Storage; Brake Mode; Braking System

现代有轨电车制动模式的选择*

孔祥飞¹, 刘志萍¹, 徐维祥²

1. 北京交通大学海滨学院 交通运输系, 河北省沧州市 061000

2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044

摘 要: 现代有轨电车有着适中的运量, 污染小, 能配合地铁等交通工具有效地解决大中型城市交通拥挤问题等优点。现已成为我国大中型城市解决城市交通拥堵问题首选的解决方案。

本文在搜集分析大量资料的基础上, 结合现代有轨电车在国内外应用的现状, 通过对现代有轨电车制动方式及特点的分析, 提出采用超级电容储存再生制动无法反馈到接触网的电能并为有轨电车提供牵引电能这一观点; 依据现代有轨电车的实际应用情况, 制定出现代有轨电车制动模式设计的基本原则, 进而设计出现代有轨电车两种制动模式; 通过对采用两种不同制动模式的制动系统的对比分析得出现代有轨电车的制动系统可优先考虑采用电-空制动系统这一结论。

关键词: 现代有轨电车; 超级电容储能; 制动模式; 制动系统

引言

为了解决大、中型城市交通拥堵问题, 大力发展以城市轨道交通体系作为城市公共交通运输网络的主体已经是公认的理念。截止 2012 年 8 月末, 我国已有 15 个城市累计开通 62 条城市轨道交通运营线路, 总运营里程达到 1777km, 其中地铁线网总长度已达 1465km, 轻轨 241km, 现代有轨电车 41km。地铁、轻轨与有轨电车在运能、站距、最高运行速度、最小曲线半径上有着不同的特点, 它们共同组成城市轨道交通网络^[1]。现代有轨电车系统是特大型和大型城市轨道交通网络的补充, 是中小型城市公共交通运输网络的骨干, 通过合理的交通规划现代有轨电车能够很大程度上提高现有的地面公共交通的服务

*基金资助: 受国家自然科学基金面上项目(61272029)及北京交通大学海滨学院大学生创新创业训练计划项目资助

能力^[2]。随着地铁线网的完善，兴建有轨电车线路作为城市轨道交通网络及地面公共交通网络的补充已经成为现在大中型城市的选择。

据统计，截止 2011 年，目前近 50 个国家 400 多个城市在运营有轨电车系统，主要分布在欧洲、北美等地区，在澳大利亚、日本等国也得到广泛应用。目前现代有轨电车系统在我国公共交通系统仅处于起步阶段^[3]。现代有轨电车具有较少的投资，适中的运量，较好的乘坐舒适性，较少的后期维护费用，运营安全，污染小，造型美观，能配合地铁等公共交通工具有效地解决大中型城市交通拥挤问题等优点，现已成为我国大中城市提高地面公共交通系统服务能力的首选。

现代有轨电车必须符合城市公共交通运行高安全性、高运量、高密度的特点，有轨电车的站间距一般在 1km 左右，由于站间距短，有轨电车的调速和制动都比较频繁。为了提高运行速度，有轨电车必须具有启动快，加速性能好，制动距离短的特点，这就要求有轨电车的制动装置有结构简单、安全可靠、操纵灵活、加速迅速、运行平稳、制动力大、停车平稳、检修维护方便等特点。

1 现代有轨电车制动方式及特点分析

1.1 电制动

1.1.1 电制动的基本原理

电制动是车辆在常用制动下的优先选择，电制动又有再生制动和电阻制动两种形式。现代有轨电车制动时优先选择再生制动，当接触网不能再吸收再生制动能量时，才自动转换为电阻制动。

在车辆制动时，电车停止从接触网受电，将其动能通过电机（将电动机改变为发电机工作状态）转换为电能，当电机转换的电压高于接触网电压时再通过变换器反馈至电网上供其他电车使用。当两个牵引变电所区间无其它车辆吸收反馈能量或者车辆的速度降低到某个数值后电机转换的电压低于接触网电压时，电机产生的能量无法反馈到接触网，车辆无法实现再生制动，再生制动自动切换为电阻制动，把这部分电能通过电阻变成热能。

1.1.2 再生制动优缺点

现代有轨电车制动时优先选择再生制动，再生制动的优缺点对比如表 1 所示：

表 1 再生制动优缺点的对比

再生制动的优点	再生制动的缺点
制动力控制精确，响应速度快	最大制动力受限，达不到制动效果
车辆速度高时，再生制动产生的电能可以返回到接触网。	接触网中无车辆运行或反馈能量的车辆与同区间车辆距离太远时再生制动不能发挥其应有作用
再生制动装置占用空间小，减轻了机械装置的负担，维护保养更容易。	车辆低速运行时，再生制动无法使用。

在现实应用中，再生制动产生的能量不能够被充分的利用，为了达到车辆的制动要求，需要采取措施将再生制动产生的能量吸收或消耗掉。本文建议采用储能装置储存再生制动无法反馈到接触网中的电能并为有轨电车提供牵引电能。

为有轨电车提供牵引电能的车载储能装置应至少具备如下特征：

- （1）功率密度高：能够适应有轨电车牵引/制动过程中产生的短时大功率负荷特征。
- （2）能量密度高：能够存储足够的电能完成一定区段的车辆运行需要，且储能装置的重量不能太大；否则将增加列车牵引能耗。
- （3）使用寿命长：有轨电车在运行的过程中牵引、制动频繁，将导致储能装置充放电频繁。因此，从经济成本考虑，需要储能装置具有较长的使用寿命。

(4) 环境适应性强：有轨电车在室外运行，环境严酷，需要储能装置具有较强的适应能力，保障设备运行的高可靠性。

(5) 充电速度快：充电时间过长，将影响有轨电车的正常运行。

不同电能储存方式的优缺点对比如表 2 所示^[4]：

表 2 不同电能储存方式的优缺点对比

电能储存方式	优点	缺点
蓄电池储能	成本低，技术成熟	寿命短，功率密度低，效率低，储存有轨电车再生制动时产生的较高的脉冲式电流存在着技术上的问题
锂电池储能	能量密度高，转换效率高	生产成本低，制造大容量的锂电池技术上较困难，需要特殊的包装和配备必要的内部过充保护电路
超导储能	能量密度高，转换效率高，响应迅速	超导材料的制造成本高，维持低温费用昂贵
飞轮储能	设备使用寿命长，能量密度高，转换效率高	装置制造复杂，造价较高
超级电容储能	设备使用寿命长，充放电线路简单，功率密度高，能量密度高，频繁充放电能力强	造价较高

本文建议采用超级电容储能的方式储存再生制动无法反馈到接触网中的电能。采用这种技术的车辆可以在无接触网的区间内运行，如步行街、城市商业区，大大增加了现代有轨电车使用的灵活性，不仅可以充分利用电能而且可以更好缓解城市公共交通的压力。

1.2 摩擦制动

当车辆降低到某一速度时，电制动的能力随之降低，电制动产生的制动力已经不能满足制动的需求，这时采用摩擦制动来达到车辆的制动要求。摩擦制动分为空气制动，液压制动，电磁制动三种方式。

1.2.1 空气制动

目前国内大部分地铁、城轨车辆的制动系统均采用空气制动系统。下表为空气制动优缺点的对比^[5]：

表 3 空气制动优缺点的对比

空气制动的优点	空气制动的缺点
装置结构简单，安装维护简单。使用安全，可靠性高，使用寿命长 工作介质为空气，成本低，无污染	气缸的低速稳定性不如液压缸 输出力比液压缸小
利用空气的可压缩性，可储存能量，实现集中供气	由于空气有压缩性，气缸的动作速度易受负载的变化而变化
输出力及工作速度的调节非常容易	

1.2.2 液压制动

低地板有轨电车的地板面与轨道面之间的距离较小，普通气动制动系统由于部件体积较大，难以在低地板车辆上安装，而液压系统体积相对较小，可就近安装到转向架上。液压制动装置优缺点对比^[5]：

表 4 液压系统的优缺点

液压制动装置优点	液压制动装置缺点
液压制动装置体积较小，重量较轻，易实现模块化安装，更有利于车辆的整体布局。	液压制动装置制动效率较低
液压控制系统可以安全、可靠并快速地实现频繁的带负载启动和制动，且具有很大的调速范围	对流体介质的清洁度管理要求较高
液压控制系统的负载刚性大，精度高	漏油容易污染环境，液压系统必须密封严密无外泄露
传动介质兼有润滑作用，有利于延长元件的工作寿命	由于流体介质的工作温度范围和闪点的限制，系统存在工作温度上、下限和抗燃、防爆等技术要求
通过管道进行能量分配和传递比机械方式方便。	由于液压系统中诸环节多具有非线性特性，故系统的设计和分析较电气控制复杂
用蓄能器很容易实现液压能的储存和系统消振	以液压方式实现信号的检测、处理和传递不如电气方式方便

1.2.3 电磁制动

在转向构架侧梁下安装有电磁铁，制动时将电磁铁放下，使磨耗板与钢轨吸住，车辆的动能通过磨耗板与钢轨的摩擦转换为热能。电磁制动能得到较大的制动力，因此常被用于紧急制动。

1.2.4 结论

通过比较空气制动，液压制动，电磁制动这三种制动方式，可以得出如下结论：

- (1) 空气制动装置具有结构简单，可靠性高，易操作等优点。但是空气制动装置占用空间较大、气缸低速稳定性差和气缸输出力小。
- (2) 液压制动系统具有体积相对较小，反应速度快，输出制动力大等优点。也有制动效率低，对系统密封性要求高，维护检修繁琐的缺点。
- (3) 电磁制动能得比其他两种方式都大的制动力，因此常被用于紧急制动。

2 现代有轨电车制动模式的组合

所谓制动模式，即指车辆在常用制动、紧急制动以及停放制动等各种情况下，应采用什么样的制动方式组合（包括某一种单独制动方式）更加合适。选择合理的制动模式，对节能、减少维护费用和时间、提高乘坐舒适度都有着重要的意义^[6]。

《轻轨交通车辆通用技术条件》(GJ/T5021-1995)中对车辆制动基本要求为：“车辆和车组的常用制动平均减速度不低于 1.1m/s^2 ，紧急制动平均减速度不低于 1.3m/s^2 ”，对制动方式的要求为：“采用再生制动、电阻制动和空气制动协调配合的方式，并设有停放制动装置”。

目前，世界上大多数城市轨道交通车辆采用这样的制动方式：常用制动时一般优先使用电制动，列车制动所需不足的制动力由摩擦制动装置提供；列车紧急制动时，一般不使用电制动，而由摩擦制装置动单独提供紧急制动力。

一般来说现代有轨电车的制动系统必须满足常用制动、停放制动、紧急制动、保持自动四种制动情况。

2.1 现代有轨电车制动模式设计的基本原则

- (1) 牵引与制动的控制应符合以下要求：制动指令应优先于牵引指令；牵引及制动力变化时的冲击率应符合人体对加、减速变化的适应性^[7]。
- (2) 优先采用电制动进行制动控制。电制动中的再生制动产生的电压高于接触网的电压时把电能反馈到接触网中，当电压低于接触网的电压时产生的电能储存在储存装置或由电阻消耗掉。
- (3) 电制动力不足时采用摩擦制动。当车辆速度低于某一数值时，电制动的能力随之降低，这时电制动产生的制动力已经不能满足制动的需求，这时采用摩擦制动来实现车辆的制动。
- (4) 电制动与摩擦制动混合控制的原则。电制动和摩擦制动之间的切换应该是平滑的，在常用制动状态下，摩擦制动用来填补所要求的制动需求和已达到的电制动力之间的差额。当电制动出现故障丧失制动能力时，摩擦制动应能自动投入使用，并应保证车辆在各种运行状态下所需的制动力。

表 5 现代有轨电车制动模式组合方式设计

制动模式	制动方式		
	常用制动	紧急制动	停放制动
模式一	电制动+空气制动	空气制动+电磁制动	空气制动
模式二	电制动+液压制动	液压制动+电磁制动	液压制动

3 现代有轨电车制动模式

依据现代有轨电车制动模式设计的基本原则，进而设计出现代有轨电车制动模式的组合方式，见表 5。

4 现代有轨电车制动系统的选择

在现代有轨电车制动模式设计的基本原则下，结合实际应用情况，分别把采用模式一的电-空制动系统和采用模式二的电-液制动系统进行分析比较。

4.1 电-空制动系统

目前国内大部分地铁、城轨车辆的制动系统均为电-空制动系统。车辆的制动系统及其他的一些子系统所使用的压缩空气都是由空气压缩机产生的，制动系统利用空压机产生的高压气体，通过电信号来控制气信号，再用气信号控制相关的执行元件执行动作。先进的电-空制动系统则是应用计算机对车辆的各种数据进行处理后发出的电信号控制相关的执行元件。电-空制动系统的供气设备除了向制动装置供气以外还向车辆的其他用气设备供气，使用电-空制动系统可更好的降低现代有轨电车车辆的整体设计难度。

电-空制动系统应具有以下基本功能：

- (1) 空气制动应满足车辆控制系统对制动机要求，制动机应具有常用级、紧急级和备用级三套机构^[8]。
- (2) 制动和缓解作用快，空走时间段，从而可缩短制动距离^[9]。
- (3) 设有空重车调节装置，根据乘客的多少自动调节制动力，以便于制动时得到恒定的减速度，减少列车冲动，使停车平稳。
- (4) 电制动与空气制动相互配合。电制动力不足时，空气制动自动补偿，使整个制动过程的制动率基本保持不变，从而提高旅客舒适度。
- (5) 必需设有紧急制动装置，应设置独立的紧急制动按钮，当车辆出现故障时，能实行紧急制动保证行车安全。
- (6) 除了装有常用制动装置外，还设有备用制动装置，且独立于制动系统，当常用制动装置发生故障时，仍能保障车辆正常运行。
- (7) 组成系统的各个装置应具有可靠性高、模块化程度高、结构简单、检修方便等特点。

4.2 电-液制动系统

低地板有轨电车是现代有轨电车的发展方向，对于低地板有轨电车来说，其总体布局紧凑，车内、车下、车顶空间受到车辆限界的严格限制。由于电-空制动系统的体积稍大，安装在低地板有轨电车内较为不便。而液压系统体积相对较小，设计安装时较为简单。液压系统反应速度快，易实现模块化安装，并可取消车与车之间相连的软管，对车辆的整体布局更加有利。

电-液制动系统应具有以下基本功能：

- (1) 液压制动能够补充电制动以达到车辆要求的制动效果
- (2) 液压制动可以与电磁制动一起实现紧急制动
- (3) 在电制动失效时，液压制动可提供常用和紧急制动
- (4) 电-液制动系统可执行停放制动

电-液制动系统应具有以下基本特点：

- (1) 设有空重车调节装置，根据乘客的多少自动调节制动力，以便于制动时得到恒定的减速度，减少列车冲动，使停车平稳。
- (2) 电制动与液压制动相互配合。电制动力不足时，液压制动自动补偿。
- (3) 必需设有紧急制动装置。设置独立的紧急制动按钮，当车辆出现故障时，能实行紧急制动保证行车安全。
- (4) 除了装有常用制动装置外，还设有备用制动装置，且独立于制动系统，当常用制动装置发生故障时，仍能保障车辆正常运行。

(5) 组成系统的各个装置应具有可靠性高、模块化程度高、结构简单、检修方便等特点。

4.3 电-空制动系统、电-液制动系统的比较

4.3.1 设计安装

在电-空制动系统、电-液制动系统同时满足制动要求的情况下，电-空制动系统的技术相对成熟，价格较低。

液压制动系统体积较小，系统相对独立，可很好地解决低地板有轨电车空间紧张的问题。在相同功率的前提下，液压制动系统体积较小，可更好的安装在低地板有轨电车的转向架上。

目前液压制动系统相对与空气制动系统有着技术不够完善，装置造价昂贵的缺点。而空气制动系统由于其技术成熟，造价较低将会是首选。

4.3.2 制动时旅客的舒适性

我国国家标准：《城市轨道交通技术规范》(GB 50490-2009)规定：“牵引及制动力变化时的冲击率应符合人体对加、减速度变化的适应性。”

低地板有轨电车主要在街道表面运行、其运行路线与行人和车辆有交叉，发生紧急情况时，优先考虑的是将车辆停下来避免行人受到危害，因此对于低地有轨电车的减速度要求很高。

空气制动系统的冲击率一般控制在 1.5m/s^3 以内，而液压制动系统的冲击率一般控制在 $4\text{--}6\text{m/s}^3$ （标准里规定最大可以达到 8m/s^3 ）^[5]。

因此当紧急减速时制动力变化的冲击率液压系统比空气制动系统高，采用液压制动系统的车辆在紧急制动时旅客的舒适性较差。

4.3.3 风源

电-空制动系统的供气设备除了向制动装置供气以外还向车辆的空气悬挂设备、车门控制装置以及气动喇叭、刮雨器、受电弓气动控制设备等设备进行供气。

采用电-液制动系统时没有专门的风源向其他需要外部力驱动的设备供风，必须设置相关的供风设备以满足其他设备的供风需求。从这个方面看电-空制动系统有着无法比拟的优势。

4.3.4 车辆测重

电-空制动系统测重容易、准确而且不需要增加额外的测量设备

电-液制动系统的车重测量的精确性受环境、线路的影响，有时需要增加额外的测量装置。

4.3.5 日常维修与保养

电-空制动系统：日检时需要对空压机单元及空气干燥器、各类气管和单元制动机进行检查。要求外观正常，紧固件无松动。电-液制动系统检修时，需要对液压设备进行清洗，日常维修量较大。

4.3.6 环保

电-控制的系统在使用维护过程中不会产生任何污染，而电-液制动系统在日常维护过程中需要对液压设备进行清洗，污染较严重。因此，无污染的电-空制动系统是最先考虑的方案。

综上所述，现代有轨电车采用电-空制动系统更有优势。

5 结论

本文通过对现代有轨电车的制动方式及特点进行分析，结合目前实际应用情况，制定出设计现代有轨电车制动模式的四个基本原则并得到两个制动模式的设计方案。提出了采用储能装置储存再生制动无法反

馈到接触网中的电能并为有轨电车提供牵引电能这一新的观点。最后，通过对电-空制动系统和电-液制动系统进行对比分析，得出现代有轨电车的制动系统可优先考虑电-空制动系统这一结论。本文所提出的采用储能装置储存再生制动无法反馈到接触网中的电能并为有轨电车提供牵引电能的观点是在搜集大量资料基础上经过理论分析得到的，具体效果还未得到实际应用的检验。

References

- [1] Yaotian Chi. The Revival of the Tram [J] Electric Traction, 2013
- [2] Yuejia Shui. A new Tram System in Dalian Application Practice [J] Urban Public Transport, 2013
- [3] liying He. Modern Tramway Development in Green Public Transport of China [J] Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012
- [4] Shijie Cheng, Jinyu Wen, Haishun Shun. Energy Storage Technology and its Application in the modern power System [J] Electrotechnical Application, 2005
- [5] Wei Wang. The Study on Application of Hydraulic Brake System in City LRV [D] Beijing Jiaotong University, 2008
- [6] Ronghua Zhao. The Simulation Model design and study of City Rail Traffic Ground Braking Resistors [D] Beijing Jiaotong University, 2007
- [7] GB50490-2009, Technical Specification of City Rail Traffic[S] China Planning Press, 2009
- [8] GJ/T 5021-1995, General Technical Requirements for Light Rail Vehicles [S] China Planning Press, 2009
- [9] Qingzhong Ceng, Zhengsheng Han. Mass Transit Vehicles [M] Southwest Jiao Tong University press, 2006

【作者简介】



¹孔祥飞（1992-），男，汉族
Email: kongxiangfei.888@163.com

²刘志萍（1983-），女，汉族，硕士，讲师，交通运输规划管理运输物流方向，2003年7月至2007年9月，天津工程师范学院汽车工程系攻读学士学位；2007年9月至2009年7月，北京交通大学交通运输学院攻读硕士学位；2009年8月至今，北京交通大学海滨学院交通运输系任教；

Email: zpliu@bjtuhbxy.cn

³徐维祥（1956-），男，汉族，博士，教授。研究方向：交通运输系统分析与集成；信息系统理论与技术、数据挖掘理论与方法；交通运输规划与管理；运输管理现代化与信息技术、交通运输宏观决策与运输系统优化、电子商务；系统工程；智能交通工程、运输与物流。

2012年9月任北京交通大学海滨学院副院长。

Email: wxxu@bjtu.edu.cn