



# 基于超级电容的 新型有轨电车充电系统 研究与实践

JIYUCHAOJIDIANRONGDE  
XINXINGYOUGUIDIANCHECHONGDIANXITONG  
YANJIUYUSHIJIAN

赵 军 主编

中国建筑工业出版社

# 基于超级电容的新型有轨电车 充电系统研究与实践

赵 军 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于超级电容的新型有轨电车充电系统研究与实践/  
赵军主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-112-20951-4

I. ①基… II. ①赵… III. ①有轨电车-充电-研究  
IV. ①U482.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 161990 号

采用新型车载超级电容作为动力的有轨电车是未来城市发展的一种新方向, 本书针对现代有轨电车的充电形式与客车超级电容进行研究与案例描述。本书的主要内容包括: 城市轨道交通发展概述, 超级电容技术与发展, 成套充电装置的结构及系统研究应用, 地面预储能式充电系统研究与应用, 储能式有轨电车及充电装置的实际应用情况。本书可供有轨电车的设计人员, 制造厂家等使用。

责任编辑: 付 娇 王 磊 石枫华

责任校对: 李欣慰 刘梦然

基于超级电容的新型有轨电车充电系统研究与实践

赵 军 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 272 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-20951-4

(30592)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 本书编写委员会

主 编：赵 军

副 主 编：范晓云

主要编写人：曾海涛 吴金鹏 谢 颖 钟 勇  
何治新 张 宇 吴生阳 邵宜祥  
谭诗干 彭云华

编 写 人：李鲲鹏 赵云云 邓晓博 陈中杰  
尚江傲 刘 超 丁秋迪 石 磊  
田 炜 孙祖勇 龙 乐 李施为  
李嘉庆 王 义 曾彬华 马献花

主 编 单 位：广州有轨电车有限责任公司

参 编 单 位：（排名顺序不分先后）

广州地铁设计研究院有限公司

广州中车有轨交通研究院有限公司

中铁电气化局集团有限公司

国电南瑞科技股份有限公司

深圳通业科技股份有限公司

广州白云电气设备股份有限公司

## 序

随着城市交通的不断发展，现代新型储能式有轨电车将成为城市综合交通发展战略框架中的重要组成，在实现城市道路交通资源优化配置中扮演着重要的角色，尤其是无架空供电网的车载储能式有轨电车备受人们的关注，采用新型车载超级电容作为牵引动力的有轨电车是未来城市公共交通发展的新模式。

广州市率先采用了国际上第一条新型车载超级电容有轨电车进行了运营示范，经过4年的实践检验，证明了以新型车载超级电容为牵引动力的现代有轨电车是安全可靠、经济高效、环境友好的城市轨道交通系统。超级电容车载新能源驱动系统是城轨交通领域的又一次技术创新，对促进我国城市轨道交通的发展具有重要意义。

本书从目前现代城市轨道交通发展现状开始进行研究，对新型超级电容有轨电车的车载电源、车载能耗系统特点、以实际线路进行能耗仿真研究，进而对运营线路的地面充电装置结构、系统基本设计、控制策略、软件设计等进行了应用研究，并以实际的典型案例—广州市海珠区环岛线为例，对新型超级电容有轨电车项目的建设和设计进行了剖析，为现代有轨电车项目建设提供了具有实际意义的经验。

中国工程院院士



2017年4月

## 前 言

随着城市化进程的加快，城市人口逐渐上升，流动人口以及道路车辆的增加，使得城市交通车辆急剧增长，城市道路的发展滞后导致了交通拥堵、事故频发等一系列问题。此外，机动车辆的快速发展也对城市环境有明显的影响，汽车尾气污染日益加剧。随着城市交通的不断发展，现代新型储能式有轨电车作为城市综合交通发展战略框架中的重要组成部分，在限制小汽车的使用和实现城市道路资源优化配置中扮演着重要的角色，尤其是无轨式架空网供电的车载储能式有轨电车备受人们的关注。

采用新型车载超级电容作为动力的有轨电车是未来城市发展的一种新方向。其相应的充电装置作为电网和超级电容储能介质的接口，是有轨电车可靠运行的基本保障，是整个供电系统的核心装置。有轨电车充电装置主要采用传统多脉波整流技术，由于其固有的特性，会导致整流器交流输入电压畸变、电流谐波含量高、输出电压纹波大等问题，对电网造成一定的影响。

本书共分为 5 章，第 1 章概述我国城市轨道交通的发展情况。第 2 章首先介绍了超级电容的基础知识，对目前最先进的超级电容车载储能电源系统从结构、主要参数、特性等方面进行描述；其次对目前基于超级电容储能电源的现代有轨电车与地面线路建设相关的机械、电气相关特性以及车载能耗系统进行研究；最后对超级电容现代有轨电车进行在不同速度下的能耗仿真，以及车辆能耗与地面充电站配置之间的相关建议和分析。第 3 章主要论述了多脉波整流和基于移相载波的多重 DC/DC 变换技术，介绍了成套充电装置的硬件设计、控制策略及仿真、系统的软件设计。以及采用 PWM 整流及输入输出共地 Buck TL 变换器的成套充电装置的原理及方案设计介绍，实现自适应充电的控制逻辑，故障管理机制，且可远程监控设备状态，便于维护及使用。第 4 章结合有轨电车的发展情况及技术特点，详细介绍了充电系统的各部分设计分析及要求，绘制并阐述了整套系统的原理单线图，对于主回路主要元器件作了选型分析和计算分析，也介绍了控制系统的整体架构，控制逻辑流程图以及各部分控制算法和策略。最后，对研制的样机的各项功能进行详细的测试和验证，结果证明了本方案的正确性和可行性，并提出了对系统的总结和展望。第 5 章主要介绍了新型储能式有轨电车及其配套充电装置在国内的实际应用情况，并对能耗情况、在充电站故障情况下的列车越站能力和应急救援组织方案进行了分析、阐述。每一章都采用通用的术语，对相关的问题都给出了详细的解释，可为相关技术人员以及今后对相关方向的研究提供参考。本书也可作为现代新型储能式有轨电车充电系统技术的入门教程或参考书。

由于编者水平有限，本书中的错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

本书在编写过程中，参阅了许多国内外的文献资料，在此特向作者和编著者表示诚挚的谢意。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 城市轨道交通发展概述</b> .....	1
1.1 我国城市轨道交通发展规划 .....	1
1.2 城市轨道交通的分类 .....	1
1.2.1 城市地铁系统 .....	2
1.2.2 快速公交系统 .....	2
1.2.3 有轨电车系统 .....	3
1.3 有轨电车的供电方式 .....	3
1.3.1 全线架空接触网 .....	4
1.3.2 局部架空接触网+储能装置 .....	4
1.3.3 地面供电 .....	4
1.3.4 电磁感应供电 .....	4
1.3.5 全线储能供电 .....	5
1.4 车载储能有轨电车的储能模式 .....	5
1.4.1 蓄电池模式 .....	5
1.4.2 超级电容模式 .....	6
1.4.3 超级电容+蓄电池模式 .....	6
1.5 国内外有轨电车研究状况 .....	7
1.5.1 国内有轨电车研究情况 .....	7
1.5.2 国外有轨电车研究情况 .....	8
1.6 我国有轨电车的开通运行情况 .....	8
<b>第 2 章 超级电容储能装置技术应用</b> .....	13
2.1 超级电容的基本原理 .....	13
2.1.1 超级电容的分类 .....	13
2.1.2 超级电容的工作原理 .....	14
2.1.3 超级电容的数学模型 .....	15
2.1.4 超级电容的主要性能指标 .....	17
2.1.5 超级电容的性能特点 .....	17
2.1.6 超级电容的应用特性 .....	18
2.1.7 超级电容储能电源的特点 .....	18

2.1.8	超级电容储能电源的相关参数	20
2.1.9	以超级电容为主的复合储能电源	21
2.2	现代储能式有轨电车基本特性及车载能耗系统	22
2.2.1	现代有轨电车机械参数概况	23
2.2.2	现代有轨电车车载能耗分析	25
2.3	现代储能式有轨电车能耗仿真与计算	27
2.3.1	仿真的主要参数介绍	27
2.3.2	车辆能耗仿真	29
2.3.3	以超级电容为主的复合储能电源对比仿真	31
<b>第3章</b>	<b>成套充电装置的结构及系统研究应用</b>	<b>36</b>
3.1	系统配电方案	36
3.2	充电站主接线方案选择	37
3.3	成套充电装置	38
3.3.1	多脉波整流技术和 DC/DC 变换技术	39
3.3.2	成套充电装置硬件设计	49
3.3.3	控制策略及仿真	72
3.3.4	成套充电装置软件设计	90
3.4	PWM 整流+DC/DC 斩波方案	95
3.4.1	PWM 整流原理	95
3.4.2	输入输出共地 Buck TL 变换器	110
3.4.3	充电装置远程监控	116
3.4.4	完备的故障诊断及管理机制	116
3.4.5	自适应充电技术	116
<b>第4章</b>	<b>地面预储能式充电系统研究与应用</b>	<b>117</b>
4.1	直充式供电系统对电网的影响分析	117
4.1.1	直充式供电系统对电网功率需求的现状	117
4.1.2	地面储能式充电系统研究的目的与意义	118
4.2	地面预储能式充电系统的研究目标及参数指标	118
4.2.1	车辆的基本情况	118
4.2.2	车载储能装置参数	119
4.2.3	充电装置应满足的主要技术参数要求及性能要求	120
4.3	充电系统的方案及功能设计	120
4.3.1	充电系统设计方案	121
4.3.2	充电系统功能性设计	127
4.4	充电系统各部分设计及选型计算	128
4.4.1	充电系统硬件设计	128
4.4.2	控制系统设计	141



4.5	样机安装及验证 .....	144
4.5.1	样机安装 .....	144
4.5.2	测试负载系统 .....	144
4.5.3	样机 HMI 界面 .....	146
4.5.4	样机验证结果 .....	148
<b>第 5 章</b>	<b>储能有轨电车及充电装置的实际应用情况 .....</b>	<b>157</b>
5.1	国内总体应用情况 .....	157
5.2	广州海珠试验段应用情况 .....	157
5.2.1	运营总体情况 .....	157
5.2.2	储能电源应用情况 .....	158
5.2.3	充电站应用情况 .....	159
5.2.4	充电站故障救援分析 .....	160
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>169</b>

# 第 1 章 城市轨道交通发展概述

城市化的不断推进和城市人口的剧烈增长造成了严重的环境污染、交通堵塞等问题，发展公共交通、坚持可持续发展的绿色交通是解决这些问题的有效措施。环境友好的城市轨道交通作为城市综合交通发展战略的重要组成部分，在限制小汽车的使用和实现城市道路资源优化配置中扮演着重要的角色。

## 1.1 我国城市轨道交通发展规划

“十三五”时期是我国全面建成小康社会的决胜阶段，是城市经济各方面发生深刻变化的时期。一带一路国家战略的实施，城镇化的快速发展和都市群的突起，以及加强基础设施投资拉动经济增长的态势，使轨道交通呈现多元化的旺盛需求，为城市轨道交通事业引领城市发展提供了前所未有的机遇。

“十二五”时期（2011~2015年）是我国城市轨道交通事业发展很不平凡的5年，各城市经过顽强拼搏、开拓创新，在建设和运营方面开创了新局面，5年中新建成线路长度达到2012km。据中国城市轨道交通协会统计，截至2015年年末，国内已有26座城市开通了轨道交通运营线路，比“十一五”末期增加了13座城市，投入运营的线路总长度达到3612km，在城市轨道交通网络化、创新技术的发展，新产品、新设备的制造以及安全运营等方面都取得了很大的成就。

据一些研究机构的统计，“十三五期间”，国内规划建设城市轨道交通的城市将达到80座，已批准立项的40多座，主要大中型城市都在积极规划建设轨道交通。至2020年，全国规划建设的城市轨道交通网通车总长度将在6600km以上，比“十二五”新增3000km以上，建设总投资规模将达到2万亿元。

“十三五”时期是我国城市轨道交通事业发展大有作为的重要战略机遇期，要在十八届五中全会精神指引下，继续贯彻创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念，适应新常态，把握新常态，引领新常态，把发展基点放在创新与管理上，使城市轨道交通事业发展既要有速度，也要有增量，更要有质量和效益。纵观未来，大城市的户籍松绑、城市群都市圈的发展、国家级新区的建设，将为我国城市轨道交通的加速发展，创造崭新的发展空间。

## 1.2 城市轨道交通的分类

根据原建设部于2007年发布的《城市公共交通分类标准》CJJ/T 114—2007中的定义，城市轨道交通为采用轨道结构进行承重和导向的车辆运输系统，依据城市交通总体规划的要求，设置全封闭或部分封闭的专用轨道线路，以列车或单车形式，运送相当规模客

流量的公共交通方式。

《城市公共交通分类标准》中还明确城市轨道交通包括：地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车、磁浮系统、自动导向轨道系统、市域快速轨道系统。此外，比较常用的还有介于轨道交通和常规公交的一种新型运营系统——快速公交系统。下面对比较典型的地铁系统、快速公交系统以及有轨电车系统进行详细的介绍。

### 1.2.1 城市地铁系统

地下铁道泛指建在地下的干线铁路。但是作为城市轨道交通，只有具有一定规模的运量，按运行图行车，运行于地下的旅客列车，才叫做地下铁道。由于地下铁道一般建在城市里，加上具体线路的建设条件不同，它的延长线或部分线路，甚至整条线路可能建在地面或高架，也统称为地下铁道，如北京的13号线和上海的3号线都是地面或高架线路形式，但由于它的技术制式如车辆、信号、通信、线路都和其他地铁线路一致，故也把北京13号线、上海3号线称之为地铁系列的线路。也有人怕混淆地铁概念，又把这类线路笼统叫做城市轨道交通。世界上第一条地下铁道于1863年在伦敦诞生。

### 1.2.2 快速公交系统

快速公交系统（Bus Rapid Transit，简称BRT）是一种介于轨道交通与常规公交之间的新型运营系统，它利用现代公交技术配合智能交通的运营管理，使传统的公交系统基本达到轨道交通的服务水平，其投资及运营成本又较轨道交通低，与常规公交接近（图1-1）。



图 1-1 BRT 车辆与站台

BRT的发展历史可以追溯到20世纪60年代，当时人们就在探索，能否有一种既具有轨道交通容量大、快速等优点，又具有常规公交灵活、尤其是造价低廉等优点的，介于两者之间的新型现代化交通方式。巴西的库里蒂巴市最早应用BRT，到目前为止，在南北美洲、欧洲、亚洲共39个城市发展了BRT系统，它已经成为现代城市改善交通状况的战略举措之一。

BRT系统的主要技术特征有：

(1) 车辆选用公共汽车，结合公交运营的各个环节采取新技术和优先措施，实现公交的快速服务功能。

(2) 按长度划分,可简单地将 BRT 车辆分为 12m 标准车型与 18m 铰接车型,其中 12m 标准车型额载按 120 人计,18m 铰接车型额载按 170 人计;采用特殊橡胶轮胎,降低了运行噪声与振动,提高了乘坐舒适度;采用铰接,保证了巨型公交车能绕着狭窄的街角转弯。

(3) 道路:无钢轨,采用沥青、混凝土(或带草坪),因此项目建设和运营成本低,建设周期短,一般 1~2 年。

(4) 在保证专有路权的条件下,平均运送速度为 20~40km/h,一般适用于高客流、高密度区域的地面公共交通,可适应的单向客运量为 0.6 万~1.3 万。

(5) 如采用普通公交模式,则车内买票,运行效率没有得到提高;地铁模式,需在车站加设票亭和闸机,增加了车站的规模,工程费用较高。

### 1.2.3 有轨电车系统

有轨电车是采用电力驱动并在轨道上行驶的轻型轨道交通车辆。有轨电车是一种公共交通工具,亦称路面电车,简称电车,属轻铁的一种(以电力推动的列车,亦称为电车)。但通常全在街道上行走,列车只有单节,最多五节。另外,某些在市区的轨道上运行的缆车亦可算作路面电车的一种。由于电车以电力推动的关系,车辆不会排放废气,因而是一种无污染的环保交通工具。有轨电车运量比公共汽车略大,一般在地面行驶,是路权可以与汽车共用的有轨电车系统。有轨电车按照车轮形式又分为钢轮系统和胶轮系统。

1879 年,德国工程师西门子在柏林的博览会上首先尝试使用电力带动轨道车辆。此后俄国的圣彼得堡、加拿大的多伦多都进行过开通有轨电车的商业尝试。匈牙利的布达佩斯在 1887 年创立了首个有轨电车系统,1888 年美国弗吉尼亚州的里士满也开通了有轨电车。

有轨电车在 20 世纪初的欧洲、美洲、大洋洲和亚洲的一些城市风行一时。随着私家车、公共汽车及其他路面交通从 1950 年代起的普及,传统有轨电车系统开始衰落,主要原因在于载客量小、机动性差、技术落后、噪声大、车站扩建困难和信号优先困难。传统有轨电车在路面行驶,容易发生脱轨现象,动力性能欠佳,转弯半径要求大,车地板面较高。

随着技术的发展,钢轮系统和胶轮系统的新型有轨电车开始出现。新型有轨电车于 20 世纪 90 年代后期率先在法国发展起来。随着在法国、德国、西班牙等多个西欧国家成功建设运营,新型有轨电车以崭新的形象、舒适的服务迅速吸引了国内城市的关注和研究。由于造价比地铁低、无污染、乘坐舒适快捷、建设周期较短而被许多国家的大、中城市所接受,近年来不断得到发展和推广。现代有轨电车的平均速度可达每小时 20km(考虑半专有路权或专有路权),比公交汽车快 30%,运载量每小时最高可达 1.5 万人次,比公交车多一倍,可以作为地铁的补充和疏散型交通工具。

## 1.3 有轨电车的供电方式

车辆牵引供电方式主要分为四类:传统架空接触网、局部接触网+储能供电、全线储能供电、地面供电。全线储能供电又分为全线超级电容供电和全线蓄电池供电。地面供电又分为电磁感应式供电和接触轨式供电。

### 1.3.1 全线架空接触网

架空接触网供电技术在国内外应用已经十分成熟，现代有轨电车的架空接触网与传统铁路和大部分地铁所采取的供电方式原理基本相同，主要由支柱及基础、支持装置、定位装置和接触悬挂几部分组成。其工作原理为列车通过车顶受电弓从架空接触网取得电流，电流通过钢轨回流至相邻的变电所，通常架空接触网架设形式为简单弹性悬挂，供电电压为直流 750V。

架空接触网供电方式作为目前应用最为广泛的轨道交通供电方式，优点是：①建设成本低，平均双线投资成本约 250 万~350 万元/km；②施工简单、维修方便、运营可靠。缺点是：①景观性受影响，不适合对景观需求较高的线路；②钢轨回流制导致杂散电流会对周边金属管线产生影响。

### 1.3.2 局部架空接触网+储能装置

局部架空接触网+储能装置的牵引供电方式最早是由于需要兼顾供电系统可靠性、经济性以及有轨电车沿线景观而研发的。常用的车载储能装置分为超级电容和蓄电池两种。

超级电容作为储能装置的优点是：①充电快，可在很短时间内完成充电；②节能效果十分可观，除了再生制动的正常节能效果外，能耗还可降低 20%；③造价相对地面供电系统而言比较低，约为 650 万~700 万元/车，正常使用寿命较长，一般为 8~10 年。缺点是：①能量密度低，质量、体积较大，占车辆设备空间较大，如果车辆设备空间受限，则不能安装大容量的超级电容；②超级电容若是质量不过关，会存在安全隐患，而且更换成本比较高；③线路站间距对车载储能装置的容量和自重影响较大。

沈阳浑南有轨电车线路和成都 IT 大道有轨电车均采用局部架空接触网+储能装置，尤其成都 IT 大道项目对影响的接触网进行了美观设计，采用大雁形状，与周围环境融为一体。此种方式的优点有：①与超级电容相比，单体电压高、能量密度高，同样的质量和体积能带来较大的能量输出，特别适用于车辆设备空间有限的情况；②造价相对地面供电系统而言比较低，约为 650 万~700 万元/车。缺点是：①蓄电池均为进口件，若是质量不过关或发生剧烈冲撞，极易发生火灾或爆炸，而且其更换成本比较高；②充电时间较长，正常使用寿命较短，一般为 5 年。

### 1.3.3 地面供电

2012 年 10 月大连机电引进安萨尔多百瑞达 SIRIO 系统低地板车辆生产平台技术，并于次年中标珠海有轨电车 1 号线项目。随后，大连机电在珠海投资建立现代有轨电车和 Tram Wave 地面供电系统生产基地。

地面供电的优点是：①该系统供电模块组具有自己的电路安全环及安全诊断系统，负极回流不经过车轮及钢轨，有效地避免了杂散电流的危害；②取消了平交路口和沿线的限高要求，对其他社会车辆影响减小。缺点同样较为突出：①建设成本高，双线投资成本约为 4000 万~5000 万元/km；②故障率高，运营维护成本高，后期运营维护成本约为架空接触网的 8~10 倍；③供电稳定性受雨雪天气的影响，不利于极端天气情况下的正常运营。

### 1.3.4 电磁感应供电

现代有轨电车电磁感应供电方式是利用电能和磁能相互转化原理实现能量传输，当感应系统检测到有车辆通过时接通电源，线圈产生的磁场被列车底部安装的受流器感应，并转化为电能供给车辆牵引系统。线路沿线敷设 DC750V 供电电缆，每隔一段距离在线路

侧埋设一套逆变装置；一次侧线圈敷设在地面两条走行轨中间，二次侧线圈安装在列车上。首先将 DC750V 逆变为高频交流电，输入地面的一次侧线圈，当列车上的二次侧线圈与一次侧线圈位置重合时，二次侧线圈感应高频交流电，经整流和逆变后为列车的交流电机供电。只有当列车进入相应区段时，地面一次侧线圈才接通电源，其他时刻地面一次侧线圈处于断电状态。其供电分区是随车辆运行而改变的，从而保障沿线人员和车辆的安全。

### 1.3.5 全线储能供电

有轨电车全线储能供电是指有轨电车整个区间都由车载储能进行供电。相比传统全线架空接触网或者其他形式的供电模式，全线车载储能供电的优点是：①减少了地面供电部分的建设成本；②景观效果更佳；③运营维护方便，既减少日常维修量、控制人员配置，且有效控制备品备件及试验检测工器具的种类和数量。缺点是：①超级电容是新一代高科技产品，实践应用时间短；②价格相对较高，增加了设备运行的成本投入及后续设备使用寿命到期后的更换成本；③储能装置体积、重量较大，对于车辆轴重的影响较大，而车体结构轻量化设计是有轨电车技术发展的重要方向；④安装或使用不当，容易引起电解质泄漏，存在一定的安全隐患；⑤电容的使用寿命和回收问题。

同时，综上所述，全线架空接触网应用最为广泛、成熟，建设和后期运营、维护成本最低，不受雨雪等极端天气影响，可有效保证列车连续、正常运营。但架空接触网在沿线整体环境衬托下显得突兀。车载储能供电方式由于景观性好，在逐步开始国产化和产品质量过关的情况下，渐渐发展成为一种重要的供电方式。

## 1.4 车载储能有轨电车的储能模式

目前车载储能有轨电车的储能模式一般包括蓄电池储能、超级电容储能以及混合储能的储能模式。

### 1.4.1 蓄电池模式

蓄电池储能是目前使用较为广泛的储能技术之一，蓄电池在技术方面是目前蓄能技术中最为完善，也是目前产量最大的储能装置，它通过将电能转换为化学能实现电能储存。它在技术以及价格方面有着无可比拟的优势，在轨道交通制动能量回收以及局部无网运行列车作为动力能源方面已有一定的应用。近年来，随着市场对蓄能装置的要求越来越高，蓄电池在技术方面也得到了很快的发展，各种生产方式及工艺的不断完善，使得蓄电池的设计制造水平不断提升。

基于铅酸蓄电池的经济性、产业化发展成熟、使用简单等优势，蓄电池早就走进了生活的各个角落，在社会中占主流地位，不可动摇。铅酸蓄电池广泛应用于国防、航空、通信、交通等众多领域，它的技术进步，促进了信息、通信、汽车等相关产业的发展。目前，逐渐被大家所推崇的电动汽车大多还是以蓄电池为主。近年来，社会对可再生能源大力发展，以光伏发电和风力发电为例，由于光伏发电和风力发电的间歇性，使得光伏发电和风力离网发电系统必须配合蓄电池使用，以保证发电系统的正常供电。我国太阳能储能电池技术已经与日本、澳大利亚产品的性能相当，达到了国际先进水平。

铅酸蓄电池已成为社会生产经营活动和人类生活中不可或缺的产品。尽管蓄电池以其

先导性、高性价比等优势被社会广泛接受和发展，但是由于其本身的局限性，蓄电池比能量低、充电速度慢、使用寿命短、对温度敏感度高特性，使得人们将目光投入对环境更加友好以及性能更加能满足目前市场需求的储能装置。

#### 1.4.2 超级电容模式

超级电容器，目前应用较多的一般为双电层电容器（Electrical double layer capacitor，简称 EDLC），该超级电容器是基于德国科学家亥姆霍兹提出的双电层理论，是 20 世纪 60 年代发展起来的一种基于新材料和新工艺的新型能源器件，且具有很大大电容密度的新型储能元件。它是一种电化学元件，但在其储能的过程中并不发生化学反应，这种储能过程是可逆的，正因为此超级电容器可以反复充放电数十万次。但其能量密度远低于电池，成本太高，充电时间长，放电时间快，不足以得到推广应用。经过近些年的研究，超级电容的单位能量密度不断得到提升，体积不断缩小，成本也得到大幅度下降，超级电容开始用于商业用途。在汽车、电力、铁路、通信、国防、消费性电子产品等方面有着巨大的应用价值和市场潜力，被世界各国广泛关注。

超级电容器由于具有其他储能器件所不可比拟的优越性，因此具有广泛的应用领域。如用作微型计算机、系统主板和钟表等的备用电源，内燃机、太阳能电池等的辅助电源，电动汽车电源，还可用于航天航空等领域。目前，在超级电容器产业化方面，美国、日本、俄罗斯处于领先地位，几乎占据了整个超级电容器市场。这些国家的超级电容器产品在功率、容量、价格等方面各有自己的特点与优势。从目前的情况来看，实现产业化的超级电容器基本上都是双电层电容器。

#### 1.4.3 超级电容+蓄电池模式

目前，随着有轨电车的日益发展，对功率负载的限定也愈发严格，大部分生产厂商都要求电动汽车电源具有很高的电能输送能力。蓄电池正是凭借着技术成熟、输送能力稳定而一直在市场上占主导地位。然而，驱动大功率负载时，由于蓄电池的功率密度小，给电动汽车的发展带来了严重影响。而超级电容本身具有功率密度大、寿命长、充放电速度快等优势，可以完全弥补蓄电池在应用上的不足。

利用超级电容充电速度快、使用寿命长、放电电流大的优势，若再利用蓄电池能量密度大的特点来弥补超级电容能量密度小的不足，采用超级电容加蓄电池的混合储能方式，在目前可以充分发挥两种常用储能电源的优势，保证有轨电车实际发展的需求。

针对超级电容的固有缺点，一般都会考虑选择一种能量密度较高的辅助储能器件对主储能电源进行补充，以提高车辆的综合续航能力，减少充电站数量。目前，国内外常用于轨道交通的电源系统，主要有铅酸电池、磷酸铁锂电池、电池电容、钛酸锂电池。上述几种蓄电池的主要特性比较如表 1-1 所示。

常用蓄电池特性参数

表 1-1

单体	铅酸电池	磷酸铁锂电池	电池电容	钛酸锂电池
能量比 (Wh/kg)	30~40	80~100	40~80	80~90
额定电压 (V)	2.0	3.2	3.0	2.3
快充时间	3~5h	快充对寿命影响很大，不推荐	10~15min	10~15min

续表

单体	铅酸电池	磷酸铁锂电池	电池电容	钛酸锂电池
慢充时间	10~15h	5h	—	—
使用温度(°C)	-20~50	-20~50	-20~50	-20~60
循环次数	300~500	2000~3000	>30000	>20000

通过上表的分析,从能量密度、充电速度、循环寿命几个因素来综合考虑,只有电池电容、钛酸锂电池能满足有轨电车辅助储能器件的要求。在选用中,应根据实际工程需要从各个方面综合考虑。

采用以超级电容为主电源的复合电源系统具有以下几个主要优势:

- (1) 续航能力得到极大的提高,地面充电站数量大幅减少;
- (2) 应急能力强,充电站故障时,能无需救援续航到下一个充电站,而不影响正常行车;
- (3) 能很好地吸收车辆制动时产生的大电流,能量回收效率高,对系统不产生损伤;
- (4) 系统得到实际运营的验证,寿命长、环保性好。

## 1.5 国内外有轨电车研究状况

### 1.5.1 国内有轨电车研究情况

#### 1. 中车株洲电力机车有限公司

中车株洲电力机车有限公司与德国西门子合作,2012年8月研制了国内首列车载超级电容储能式现代有轨电车,该车型2013年12月在广州海珠环岛线正式进行商业运营。该车体宽度为2.65m,设计最高时速80km,最高运营时速70km,最大载客量320人。每辆车均能双向单独运行。采用中车株洲电力机车有限公司自主研发的超级电容储能电源,一次充电续航能力可达2km,充电时间少于30s。该公司研制的超级电容储能式有轨电车在江苏淮安、武汉大汉阳等城市已经正式商业运营。

#### 2. 长春轨道客车股份有限公司

长春轨道客车股份有限公司在沈阳浑南新区有轨电车项目上采用了超级电容,用于车辆通过平交道口,受存储能量限制,在使用超级电容时要关闭空调。

#### 3. 唐山轨道客车有限责任公司

唐山轨道客车有限责任公司与德国的 LogoMotive 合作开发了混合动力 100%低地板有轨电车,适用于部分区间无网的工况。储能采用锂电池加超级电容的方式,储能电源通过各自的双向 DC/DC 给主电路供电。电池负责车辆匀速运行时维持牵引及辅助系统供电,电容负责提供车辆启动加速阶段能量输出及制动阶段能量回收。电池采用苏州星恒 IFP32/101/192—40HA 锂电池组,230 节串联,工作电压 DC 480V;超级电容采用 Maxwell 公司的 BMOD0615 储能模块,电压 DC 48V,容量 165F,储能电源为 2 并 10 串,总电压 DC 480V,电容 33F。采用储能电容启动,车辆限速 25km/h,匀速运行阶段由蓄电池提供能量。

#### 4. 浦镇城轨车辆有限责任公司

浦镇城轨车辆有限责任公司与庞巴迪合作,采用蓄电池实现无网运营,可在限速



50km/h 的条件下运行 2km。

#### 5. 大连机车车辆有限公司

大连机车车辆有限公司与意大利的 AnsaldoBreda 合作, 引进了 TramWave 无触网系统, TramWave 系统采用磁力方式实现供电模块的导通和断开, 受电靴内装有永磁铁用以吸住安装在导电模块内部的柔性金属带。当受电靴离开供电区域时, 柔性金属带受重力作用回落, 供电轨表面失电。TramWave 系统的建设成本是架空网方式的 3 倍左右。

### 1.5.2 国外有轨电车研究情况

#### 1. Siemens 公司

Siemens 在 1997 年前后就开始了储能电源的研究, 最初应用在供电系统, 用于平抑接触网电源; 2005 年, Siemens 将储能技术应用于里斯本的 CombinoPlus 低地板上, 采用的是超级电容加蓄电池技术。超级电容采用 Maxwell 的超级电容, 单体 2600F, 总储能 0.85kWh; 蓄电池工作电压 DC520V, 储能电源均通过双向 DC/DC 电源向车辆供电。限速 30km/h 可在平直道上运行 970m。

#### 2. Bombardier 公司

Bombardier 于 2003 年采用了超级电容加蓄电池的方式实现无网运行, 其 5 模块低地板安装了两套超级电容及锂电池, 车辆限速 20km/h, 运行 800m, 应用在德国 Mannheim, 其锂电池是与加拿大大学合作研制的专用产品, 采用水冷方式冷却。

2008 年, 德国莱茵地区决定采用 19 辆 Bombardier Variobahn 有轨电车, 车上的 Mitrao 节能装置采用 Batscap 超级电容器 (Maxwell) 与逆变器组成一套装置。30m 长的有轨电车配备 2 套装置, 能以 20 km/h 的速度离开架空线行驶 800m。

#### 3. Alstom 公司

2007 年, 法国尼斯采用了 Citadis 302 型有轨电车, 装有 DC540V, 200kW SAFT NiMH 蓄电池组, 能以 80Ah 供电 27kWh。车上的空调设备也可由蓄电池供电, 但如果车辆在没有架空供电的区段停留超过 3min 的话, 车上的空调设备自动停用, 以节省能耗。蓄电池的正常使用寿命预期约 5 年。

另一种无网技术是 2008 年 Alstom 和法国巴黎运输局合作开发的 STEEM 系统, 用在巴黎 T3 有轨电车线上, 超级电容器安装在 Citadis 402 型有轨电车的车顶上, 总容量为 2.16kWh, 其中 1.62kWh 可以使用的最大功率为 360kW。整个装置的重量为 720kg。在停站时的充电时间不超过 20s。

#### 4. CAF 公司

西班牙的 CAF 车载储能电源采用蓄电池加超级电容。采用快速充电方案, 车上的超级电容器在进站制动时, 可利用再生电能充电, 停站时站上的架空电源再进行快速充电。在 Zaragoza 市中心有一个区段不架设架空线。将有 21 辆 Urbos III 型有轨电车采用这种方式运行。同样的技术也用于我国台湾高雄的项目。在塞维利亚地铁枢纽有轨电车项目中全部采用超级电容供电, 储能 8.2kWh, 部分无网, 区段最长 1200m。

## 1.6 我国有轨电车的开通运行情况

有轨电车作为一种典型的城市交通方式, 最早出现在 19 世纪 80 年代的德国柏林附