

现代有轨电车系列丛书

现代有轨电车 供电系统

中车唐山机车车辆有限公司 组编
周福林 李虎 王兆家 杲晓锋 等编著



- ◎ 现代有轨电车项目决策参考
- ◎ 现代有轨电车系统解决方案
- ◎ 现代有轨电车工程建设实施指导

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

系列丛书

现代有轨电车供电系统

中车唐山机车车辆有限公司 组编

周福林 李 虎 王兆家 杲晓锋 刘 炜
杨小凤 吕高腾 任俊利 金富达

编著



机械工业出版社

本书是“现代有轨电车系列丛书”之一，全书共分五章。第1章从有轨电车起源开始，阐述了有轨电车及其供电模式；第2章从系统构成、外部电源引入、牵引供电系统和接触网系统等部分对现代有轨电车供电系统进行了详细论述；第3章对近些年国内外新型供电技术进行了延伸性系统论述；第4章结合沈阳浑南新区和苏州高新技术开发区的现代有轨电车项目进行了工程化方案说明；第5章介绍了现代有轨电车的节能应用技术。

本书总结了国内多个现代有轨电车建设案例，对现代有轨电车供电系统建设前期研究的科学性、规范性具有一定的指导意义。可作为有轨电车供电设计的本科、硕士研究生参考资料，也可供有轨电车运营管理等人员阅读，同时还可以作为高校轨道车辆专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代有轨电车供电系统/周福林等编著. —北京：机械工业出版社，
2017. 10

(现代有轨电车系列丛书)

ISBN 978-7-111-58140-6

I. ①现… II. ①周… III. ①有轨电车-供电系统 IV. ①U482.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 238830 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：何月秋 责任编辑：何月秋 徐 强

责任校对：刘秀芝 封面设计：马精明

责任印制：李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 7 印张 · 158 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58140-6

定价：49.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

“现代有轨电车系列丛书” 编写委员会

主 任 吴胜权

副主任 黄振晖 王贵国

委 员 (排名不分先后,按拼音排序)

曹 源	常胜利	董伟力	付稳超	杲晓锋
赫宏联	黎冬平	李 虎	刘威伟	孙桐林
王冬卫	王艳荣	王兆家	杨雪峰	臧晓艳
张 华	张建华	张天白	赵 云	周福林

“现代有轨电车系列丛书” 审查委员会

主 任 侯志刚

委 员 周军年 尹叶红 陈 亮 黄烈威 周新远
王文平 郭良金 李 娇 叶 彬 王洪奇
杨 光 甄大伟 张晓海



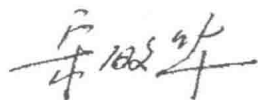
序

当前，我国城镇化进程正在不断推进，随着城市数量和规模的不断扩大，交通拥堵、环境污染及能源短缺等问题也日益突出，大力发展城市轨道交通已成为大多数城市的共识。现代有轨电车作为一种现代化交通方式，已在欧洲成功实现复兴，并逐渐成为当前国内关注的热点，许多城市都开始积极规划和建设有轨电车，天津泰达、上海浦东、沈阳浑南新区和苏州高新区等已相继开通了现代有轨电车系统。

《国务院关于城市优先发展公共交通的指导意见》中明确的总体发展目标是：科学研究确定城市公共交通模式，根据城市实际需要合理规划建设以公共汽（电）车为主体的地面公共交通系统，包括快速公共汽车、现代有轨电车等大容量地面公共交通系统，有条件的特大城市、大城市有序推进轨道交通系统建设。有别于传统有轨电车，现代有轨电车在控制、牵引供电和车辆技术上进行了更新，其载客量适中、安全舒适、快速便捷、节能降噪特点更加凸显，是城市轨道交通中低运量的典型制式，适合于大城市城市轨道交通网络的补充，中小城市和新规划城市的城市公共交通的骨干交通。因此，现代有轨电车将在我国迎来更大的发展。

现代有轨电车已被证明是一种成熟、安全的技术，但与所有交通制式一样，现代有轨电车自有其适用范围，过度夸大它的作用和放大它的缺点都不是科学的做法，唯有扎实做好基础工作才能保障现代有轨电车的持续健康发展。但我国现代有轨电车的相关工作还比较薄弱，存在着缺少建设实施标准、缺乏规划建设统筹和功能定位界定不清等问题，迫切需要更多的研究来推动相应产业和技术的发展。

本系列丛书是对2016年出版的《城市现代有轨电车工程基础》的进一步完善，更加深入地介绍了现代有轨电车工程的理论体系，包括前期规划设计、商务合作模式、建设施工、通信信号工程、机电工程、车辆制造和运营管理等内容。书中内容更加翔实，对人们全面系统地了解现代有轨电车系统及其配套工程具有较高的参考价值。



中国城市轨道交通协会副会长兼秘书长
中国城市轨道交通协会现代有轨电车分会会长



前言

随着人口膨胀和城市化进程的加快，交通拥挤、环境污染等“城市病”已成为制约城市进一步发展的瓶颈。世界各国经验表明，发展大容量轨道交通是解决城市交通问题的重要方向。20世纪70年代以来，有轨电车新技术取得突破性进展，现代有轨电车在世界范围内掀起复兴建设热潮，成为重要的轨道交通制式之一。我国城市轨道交通正处于大规模快速发展时期，这从根本上为现代有轨电车的发展提供了长效需求。《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》指出：“科学制定城市轨道交通技术路线，规范建设标准，有序推进轻轨、地铁、有轨电车等城市轨道交通网络建设”。国家发展和改革委员会依据其课题研究成果向国务院上报发展政策建议，支持中等城市发展现代有轨电车。截至2014年年底，有25个省（区、市）的72座城市提出了建设有轨电车线路的意向或规划，超过40座城市开展了有轨电车的路网规划工作，规划线路达到50条以上，规划里程超过1300km，总投资将超过3000亿元。可以预见的是，未来二三十年，现代有轨电车在我国将迎来重要的发展机遇期。

国内从事现代有轨电车研发、生产的企业已有多家，通过引进、吸收和自主创新等途径创造出了不错的成绩。但是，我国在现代有轨电车领域的发展并不连贯，没有成体系的理论和文件，迫切需要对系统线路供电系统进行更多的研究，充分剖析和阐述现代有轨电车的发展历程、供电系统各组成部分的工作原理、国内应用情况和发展现状，为轨道交通规划设计人员、高校车辆工程专业、有轨电车运营管理人员提供学习借鉴。

本书参考了国内外大量相关文献以及国内外现代有轨电车系统设计、建设的实际资料，介绍了现代有轨电车供电系统的发展历程以及当前国内外技术的应用现状，并且对有轨电车供电系统进行了详细的梳理与分析；同时对供电制式的创新发展进行了说明，对国内已开通运营有轨电车典型线路的规划设计进行了具体说明。可以作为有轨电车供电设计的本科生、硕士研究生的参考资料，也可供有轨电车运营管理等人员阅读，同时还可以作为高校轨道交通车辆专业师生的参考书。

本书共分5章，由周福林、李虎牵头组织，周福林、李虎、王兆家、杲晓锋、刘炜、杨小凤、吕高腾、任俊利、金富达编著。第1章从有轨电车起源开始，阐述了有轨电车及其供电模式的不同发展阶段（周福林、李虎、王兆家编著）。第2章从有轨电车系统构成、外部电源引入、牵引供电系统和接触网系统等部分对现代有轨电车供电系统进行了详细论述（李虎编著）。第3章结合近些年国内外新型供电技术展开了延伸性系统论述（周福林、杲晓锋、王兆家、杨小凤编著）。第4章结合国内沈阳浑南新区和苏州高开区现代有轨电车项目进行了工程化方案说明（李虎、吕高腾、金富达编著）。第5章对现代有轨电车节能应用技术开展了基础研究（周福林、刘炜、任俊利编著）。本书参考总结了国内多个建设研究的

案例，对现代有轨电车供电系统建设前期研究的科学性、规范性具有一定的指导意义。

在编写本书时参考了国内外发表的部分文章、资料和书籍，目的是将国内外现代有轨电车的最新技术展现给读者，编者在此对有关作者表示诚挚的谢意。同时，对所有给予该书指导、支持和帮助的同志们表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，遗漏、不足和参考文献未列全之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，谨表谢意。

编者



目 录

序

前言

第 1 章	概述	1
1.1	供电系统发展历程	1
1.2	行业标准现状	3
1.3	有轨电车供电发展现状	3
第 2 章	现代有轨电车接触网供电技术	5
2.1	有轨电车供电系统构成	5
2.2	外部电源供电方式	6
2.2.1	集中供电方式	7
2.2.2	分散式供电方式	7
2.2.3	混合式供电	8
2.2.4	外部电源供电方式比较	8
2.3	主变电所或电源开闭所	9
2.4	牵引供电系统	10
2.4.1	牵引变电所	10
2.4.2	供电制式	11
2.5	动力照明供电系统	11
2.5.1	负荷分级	12
2.5.2	降压变电所	12
2.5.3	中压主接线	12
2.5.4	低压主接线	14
2.5.5	低压配电形式	15
2.6	杂散电流腐蚀防护系统	16
2.7	电力监控系统	16
2.8	接触网系统	16
2.8.1	接触网概述	16
2.8.2	架空接触网的组成和结构	18
2.8.3	接触轨式接触网	25
2.9	供电节能设计	27

2.9.1	节能概述	27
2.9.2	供电系统设计与节能	28
2.10	有轨电车与地铁和轻轨供电系统的差异分析	30
第3章	现代有轨电车新型供电技术	31
3.1	基于特殊第三轨供电技术——APS 供电技术	31
3.1.1	APS 供电技术的发展历程	31
3.1.2	APS 系统的基本构成	33
3.1.3	APS 系统的运行原理	33
3.1.4	APS 特殊第三轨设计制造技术	35
3.1.5	直流开关柜及其控制技术	35
3.1.6	受电靴受流技术	35
3.1.7	再生制动方式	36
3.2	基于特殊第三轨供电技术——TramWave 供电技术	37
3.2.1	TramWave 供电技术的发展历程	37
3.2.2	TramWave 系统结构	38
3.2.3	系统运行原理	40
3.2.4	关键技术分析	41
3.2.5	环境适应性	42
3.3	基于无线供电的电磁感应供电	43
3.3.1	无线供电的发展	43
3.3.2	庞巴迪 Primove 系统	44
3.3.3	无线感应供电关键技术	46
3.4	车载储能式供电技术	49
3.4.1	蓄电池供电	49
3.4.2	超级电容器供电	50
3.4.3	混合型蓄能装置供电	51
3.4.4	快速充电蓄能装置供电	51
3.5	无接触网受流技术综合比较	52
第4章	国内应用案例	54
4.1	沈阳市浑南新区现代有轨电车一期工程	54
4.1.1	工程概述	54
4.1.2	设计原则	54
4.1.3	执行标准	55
4.1.4	供电系统与各专业设计接口	55
4.1.5	外部电源及系统参数	59
4.1.6	中压供电网络	60
4.1.7	变电所	65
4.1.8	牵引网	71

4.1.9	电力监控系统	76
4.1.10	杂散电流腐蚀防护	78
4.1.11	正线动力照明	80
4.1.12	系统谐波计算与分析	81
4.2	苏州高新区现代有轨电车工程	81
4.2.1	供电系统概述	82
4.2.2	执行规范及主要设计原则	82
4.2.3	供电方案和供电电源	83
4.2.4	牵引变电所设置方案	84
4.2.5	牵引网系统	88
4.2.6	继电保护及自动装置	91
4.2.7	系统防雷、过电压保护	91
4.2.8	回流及杂散电流防护方式	92
4.2.9	电力监控系统 (SCADA)	92
第5章	现代有轨电车供电系统节能技术	94
5.1	轨道交通节能技术发展现状	94
5.2	现代有轨电车系统节能技术	97
	参考文献	100

第 1 章

概 述

1.1 供电系统发展历程

有轨电车，顾名思义是由电力驱动的，在轨道上行驶的轻型小编组轨道交通车辆，一般最多不超过4节（见图1-1）。

1879年德国工程师西门子首次在柏林工业博览会上尝试使用电力带动轨道车辆。此后，1880年到1890年间，德国柏林、意大利罗马和美国里士满都相继进行了有轨电车的商业化探索，并建立了有轨电车系统。距今为止，有轨电车的发展主要经历了3个阶段。



图 1-1 传统有轨电车

第一阶段：快速发展阶段（1890—1930）

代表工业文明的有轨电车一出现，就很快打败了马车、人力车等交通方式，成为当时城市的主要交通出行方式。20世纪初包括欧洲、北美、日本和印度在内，几乎世界上每一个大城市里都拥有有轨电车系统，到1920年，英国拥有5000km线路、1.4万辆有轨电车，美国拥有2.5万km线路，而我国的天津、上海、北京和大连等诸多城市也相继引入了有轨电车。

第二阶段：衰退阶段（1930—1960）

随着汽车产业高速发展及技术变革的冲击，全世界范围内的有轨电车线路大量被拆除，在北美、法国、英国、西班牙及我国等地几乎完全消失。有轨电车作为“落后”的交通工具退出了历史舞台。有轨电车惨遭淘汰主要因如下：

1) 汽车的冲击。一方面随着汽车工业的发展，私人汽车、公共汽车等路面交通工具数量急剧增长，有轨电车作为城市公共交通工具的重要性下降。另一方面随着大量汽车涌上街头，城市道路面积严重不足，有轨电车由于占用道路面积较广，反而成为城市交通发展的障碍。

2) 技术落后。旧式有轨电车行驶在道路中间, 与其他车辆混合运行, 又受路口红绿灯的控制, 运行速度很慢, 正点率低, 而且噪声大, 加减速性能较差。

第三阶段: 全球复兴阶段 (20 世纪 70 年代至今)

20 世纪 70 年代, 随着汽车行业的迅速发展, 带来了越来越严重的交通拥堵、环境污染和能源危机等问题, 迫使欧美许多发达国家重新选择有轨电车作为发展城市公共交通的重点。根据欧洲交通行业协会的统计, 2005 年有 125 个城市开通运营现代有轨电车, 到 2010 年已有 137 个城市开通有轨电车, 车辆需要以每年 5% 的速度增长。

全球汽车保有量高速增长。20 世纪初以来, 尤其是第二次世界大战后, 汽车取代了传统有轨电车成为城市的主导交通方式, 进入了快速成长的爆发期。根据美国汽车行业权威杂志 Wardsauto 发布的数据: 1950 年到 1970 年, 全球汽车保有量每 10 年翻一番, 1970 年达到 2.5 亿辆。自 1970 年以来, 全球汽车数量几乎每 15 年翻一番, 到 2011 年 8 月, 全球保有量突破 10 亿辆。

公交优先的发展战略逐渐成为各国的共识。如前所述, 20 世纪进入 60 年代后, 城市小汽车发展过量, 公共交通萎缩, 造成城市交通拥挤, 道路交通事故增多和城市空气、噪声等污染日趋严重, 使城市交通陷入了混乱的状态。因此, 日益恶化的城市交通问题迫使发达国家不得不重视城市公共交通的发展。

现代有轨电车在传统有轨电车基础上发展而来的。1968 年法兰克福和汉诺威两座城市为了解决城市交通问题, 计划修建地铁系统, 由于工程规模大、实施时间长和资金迟迟不能到位, 因此有人提出把有轨电车线路及车型进行技术改造与部分新建地铁线路结合起来的建设方案, 研制出新一代有轨电车系统。

经过全面技术改造后, 现代有轨电车性能有了较大的提高。经过了全面的技术改造, 不仅在车体外观设计上更加美观, 车辆性能也较传统有轨电车有了进一步的改善。与传统有轨电车相比, 现代有轨电车具有运量大、换乘方便、运行速度快和噪声低等优点。

现代有轨电车的发展趋势: 低地板 VS 高地板。传统有轨电车以及初始的现代有轨电车属于高地板车辆, 其地板面距轨面一般在 800 ~ 1000mm, 而地板高度为 300 ~ 350mm 的为低地板。高地板车辆由于需要建造高站台, 不仅建设投资耗费较高, 而且也影响了市容和交通, 不便于乘客上下车。因此, 当 1984 年首辆德国 DUEWAG 公司为日内瓦制造的低地板车面世后, 很快低地板有轨电车就占据了主流趋势, 按技术复杂程度低地板有轨电车主要有三个发展阶段:

1) 第一代低地板轻轨车低地板占车长的 10% ~ 50%, 中间车辆部分有一个低地板入口, 低地板面积占整车面积的 10% ~ 15%。随后该车经过改进可占整车面积的 50%。

2) 第二代低地板轻轨车辆低地板部分占整车的 60% ~ 70%, 但车内还需要台阶向高地板区过渡。

3) 第三代低地板轻轨车辆为 100% 低地板。如果动力转向架电采用独立车轮, 则动力转向架上方的中间通道也可以做成低地板, 两侧车轮突起部分可设置座椅, 从而实现 100% 低地板, 地板面距轨面通常仅为 350mm。

100% 低地板最大的优势是其便利性。其无须设置站台、方便乘客上下车, 特别是便于残疾人和儿童上下车。由于其是 100% 的低地板, 乘客可以方便地在车内移动, 因此可以有效地缩短车辆站停时间, 缓解高峰时段的客流压力。

100%低地板成为现代有轨电车的主流。1990年2月,世界上第一辆100%低地板轻轨车辆在德国的不莱梅正式投入使用。由于其显著的便利性及综合性能,100%低地板车辆逐渐成为现代有轨电车的主流。2000年之后大部分有轨电车都是100%低地板形式。经过近20年的发展,目前世界上共有约30种型号的6000多列100%低地板轻轨车在近20个国家的60多个城市运行。

100%低地板技术复杂,造价较高。100%低地板有轨电车是现代有轨电车技术发展的巅峰水平,应用了独立车轮动力转向架、模块化结构、铰接式连接和弹性车轮等复杂技术,技术难度较高,因此价格一般较非100%低地板有轨电车更为昂贵。同时,有轨电车的发展也伴随着供电模式和供电设备的不断升级,目前全世界范围内形成了百家争鸣的多形式供电技术。

1.2 行业标准现状

目前全国已有多个城市陆续建成有轨电车并运营,但此前有轨电车行业一直缺乏统一的技术规范。2016年10月,中国土木工程学会城市轨道交通技术工作委员会联合中国城市轨道交通协会有轨电车分会,以及来自全国20多家知名有轨电车设计、施工、车辆及运营单位的专家,参与制定了《现代有轨电车交通工程技术标准》(简称《标准》)。

该标准征求意见稿已于2016年12月份发布,待完成意见征集后将填补我国现代有轨电车行业技术统一标准的空白。《标准》指出,有轨电车可采用全封闭、半封闭和混行路权。《标准》还明确,有轨电车运输能力应与相交路口的通行能力相匹配,其骨干线路远期设计高峰行车对数不应小于20km/h,且宜采取必要的硬件保障措施和行车优先策略。《标准》还对有关乘客舒适度的相关问题进行了明确,运输能力按照6人/m²车厢站席标准进行配置,超员标准为8人/m²。同时,《标准》还明确指出对供电系统节能的相关要求,避免设计过程中过分保守造成公共投资的巨大浪费。

沈阳浑南新区现代有轨电车作为国内首个一次性成网运行的有轨电车项目,项目的设计是在国内地铁和轻轨等项目建设的经验基础上开展的,其供电系统具体设计原则与地铁轻轨设计理念相似,包括以下几个方面:

- 1) 供电系统满足定位匹配、技术成熟、景观和谐和投资经济的要求。
- 2) 中压网络接线满足开闭所一个电源退出运行时,相邻开闭所电源承担两个供电分区内的非高峰时的全部供电负荷。
- 3) 牵引变电所的布点满足车辆运行和杂散电流腐蚀防护要求,并考虑周边地块景观的协调。
- 4) 牵引网采用上下行并联方式,利于优化架空接触网景观。
- 5) 供电系统正常运行方式下,继电保护应满足灵敏性、可靠性和速动性要求。

1.3 有轨电车供电发展现状

有轨电车系统经过三个世纪的发展,车辆技术和环境适应性得到了极大的提高,无论从车辆性能、舒适性、环保要求还是外观等方面都发生了根本性的改进。与建设地铁相比,

100%低地板现代有轨电车更具有造价低廉、走行部转弯灵活和乘客上下车方便等优势。

与此同时，目前国内尚无关于现代有轨电车系统建设的标准体系，通过同地铁和轻轨系统的差异化分析和设计，明确现代有轨电车系统需要遵循的原则，在保证工程设计科学性、经济性和合理性的基础上，开展供电系统及其同其他系统的接口设计工作。随着国内外新技术、新产品和新设计理念的不断涌现，现代有轨电车系统的运行可靠性和设计水平也在不断完善和提高。供电系统作为轨道交通最重要的基础系统之一，在项目设计阶段需要给予重点关注。随着国内现代有轨电车项目陆续开展规划设计和建设运营，供电系统的设计理论、方法及相关仿真分析软件也亟须不断完善和改进，从而在工程设计中发挥更大的作用。

随着城市轨道交通的不断发展，城市轨道交通线路与市政道路的结合日益紧密，出现了城市轨道交通线路不封闭且人、车混行的特殊线路形式，如大连市 202 路轨道交通线。由于考虑到行人的安全，对于人、车混行路段，传统的接触轨的技术形态变得不再适用，目前只有架空接触网还兼具通用性。由于国家大力提倡绿色出行，并要求穿越风景名胜区和文物保护区等特殊区域的城市轨道交通线路不能对周围环境造成破坏和产生影响，因此架空接触网供电方式也不能较好地满足城市景观的要求。对于人、车混行且环境保护要求比较特殊的城市轨道交通线路，以上两种传统的供电方式均不能完全满足要求。为了适应城市在发展过程中对轨道交通线路的升级需求，需要对牵引供电方式进行系统升级。

第 2 章

现代有轨电车接触网供电技术

电力是保证现代有轨电车正常运行及各种设备系统不间断工作的能源，一般取自于城市电网，且大部分均为一级负荷，要求比较高。通常引入双路独立电源，保证不间断供电。

现代有轨电车的供电系统负责提供车辆及设备运行的动力能源，一般包括高压电源系统、牵引供电系统和动力照明供电系统。高压电源系统是城市电网对现代有轨电车系统变电所的供电方式，一般视各城市的情况而定；牵引供电系统供给有轨电车车辆运行的电能，由牵引变电所和牵引网组成；动力照明供电系统提供车站和区间各类照明、扶梯、风机、水泵等动力机械设备电源和通信、信号、自动化等设备电源，由降压变电所和动力照明配电线路组成。

2.1 有轨电车供电系统构成

现代有轨电车供电系统广义上包括外部电源系统、电车内部供电系统和杂散电流腐蚀防护系统以及电力监控系统。其系统结构如图 2-1 所示。

有轨电车供电系统负责向车辆及供电设备供电，一般情况分为两大部分，一部分为外部电源系统，另一部分为电车内部供电系统。有轨电车作为城市电网的一个特殊用户，一般不需要单独建立电厂，直接从城市电网取电。城市电网对有轨电车进行供电，外部电源供电可以采用集中供电、分散供电和混合供电方式。

有轨电车内部供电系统由牵引供电系统和动力照明供电系统构成。牵引供电系统中的整流站即牵引变电所将中压环网的交流电整流为适合电车应用的低压直流电。馈线再将整流站的直流电送牵引网或者接触轨等，电车通过受流器与其接触获得电能。动力照明供电系统为车站及其区间各类动力机械设备电源以及通信、自动化等设备供电。降压变电所通过照明配电线路向动力照明系统供电。

按不同供电服务功能，牵引供电系统进一步可划分为外部电源、主变电所或电源开闭

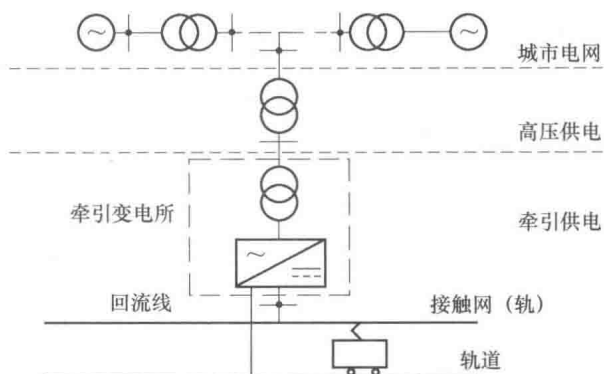


图 2-1 有轨电车供电系统组成

所、中压供电网络、牵引供电系统、动力照明供电系统、杂散电流腐蚀防护系统和电力监控系统。

(1) 外部电源 顾名思义，现代有轨电车的外部电源就是为现代有轨电车系统的主变电所或电源开闭所供电的外部城市电网电源。

现代有轨电车系统作为城网的特殊用户，一条线其用电范围多在 10~40km，呈线状分布。根据线路实际情况，其外部电源方案可选择采用集中式供电、分散式供电或混合式供电形式。

(2) 主变电所或电源开闭所 主变电所的功能是接受城网高压电源，经降压为牵引变电所、降压变电所提供中压电源，主变电所适用于集中式供电。电源开闭所的功能是接受城市中压电源，为牵引变电所、降压变电所转供中压电源，电源开闭所适用于分散式供电。

(3) 中压供电网络 通过中压电缆，纵向把上级主变电所和下级牵引变电所、降压变电所连接起来，横向把全线的各个牵引变电所、降压变电所连接起来，便形成了中压网络，其功能类似于电力系统中的输电线路。

(4) 牵引供电系统 牵引供电系统的功能是将交流中压电压经降压整流变成直流 1500V 或直流 750V 电压，为电动列车提供牵引供电。它包括牵引变电所与牵引网。

牵引变电所可以分成正线牵引变电所、车辆段或停车场牵引变电所。正线牵引变电所又分为车站牵引变电所和区间牵引变电所。牵引变电所一般采用设备安装在建筑物内的形式，另外也有少量的箱式牵引变电所。

牵引网包括接触网与回流网。接触网有架空接触网和接触轨两种悬挂方式。大多数工程利用走行轨兼作回流网，少数工程单独设置回流轨。

(5) 动力照明供电系统 动力照明供电系统的功能是将交流中压电压降压变成交流 220V/380V 电压，为运营需要的各种机电设备提供低压电源。它包括降压变电所和动力照明配电系统。

根据设置的位置不同，降压变电所可以分成车站降压变电所、车辆段或停车场降压变电所以及控制中心降压变电所。根据主接线形式的不同，降压变电所又可以分成一般降压变电所和跟随式降压变电所。当降压变电所与牵引变电所合建时，将形成牵引降压混合变电所。另外，有的地面线路采用了箱式降压变电所。

(6) 杂散电流腐蚀防护系统 杂散电流腐蚀防护系统的功能是减少因直流牵引供电引起的杂散电流并防止其对外扩散，尽量避免杂散电流对现代有轨电车系统本身及其附近结构钢筋、金属管线的电腐蚀，并对杂散电流及其腐蚀防护情况进行监测。尽管杂散电流腐蚀防护系统涉及多个专业，由于直流牵引供电系统是产生杂散电流的根源，因而通常将杂散电流腐蚀防护系统归由供电系统设计。

(7) 电力监控系统 电力监控系统的功能是实时对现代有轨电车系统各变电所、接触网设备进行远程数据采集和监控。在现代有轨电车控制中心，通过调度端、通信通道和执行端（变电所综合自动化系统），对主要电气设备进行遥控（含遥调）、遥信和遥测，实现对整个供电系统的运营调度和管理。

2.2 外部电源供电方式

外部电源就是为主变电所或者电源开闭所供电的城市电网电源，其供电方式有集中式供

电、分散式供电和混合式供电三种。

2.2.1 集中供电方式

采用集中供电时,需要设立专用的主变电所或者电源开闭所集中为牵引变电所、降压变电所供电,中压环网等级一般采用 35kV 或者 10kV 电压,其原理图如图 2-2 所示。

集中供电方式可分为两级电压制 [110kV/35kV (或 33kV)] 和三级电压制 [110kV/35kV (或 33kV)/10kV]。两级电压制中牵引变电所和降压变电所均由 35kV 电源供电。全线变电所分为若干供电段,每供电段由 3~4 个牵引变电所或降压变压器组成,每一供电段由一个牵引变电所或者降压变电所直接从主变电所引出两路电源,其余变电所(跟随降压变电所除外)采用环路连接的方式从相邻变电所引入两电源,如图 2-3 所示。

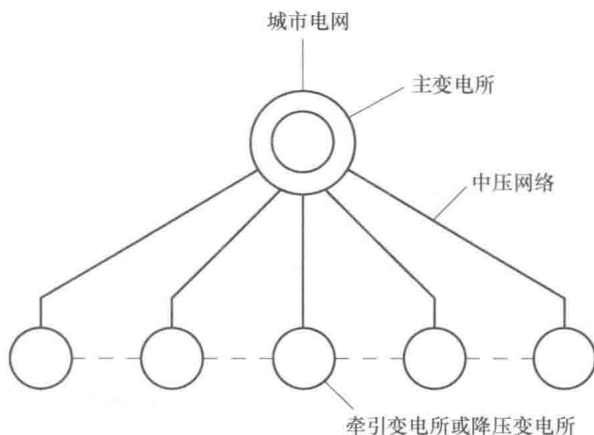


图 2-2 集中供电方式

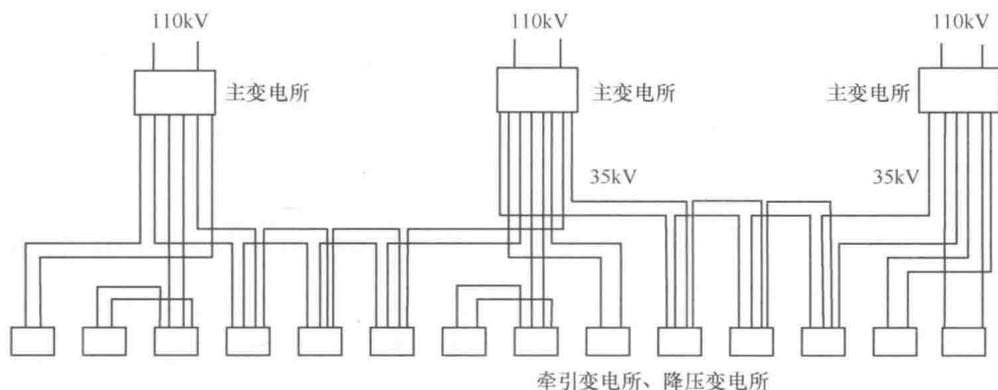


图 2-3 两级电压制集中式供电方式环网接线

三级电压制中,将牵引变电所供电和降压变电所的供电分开,如图 2-4 所示。牵引变电所采用 35kV (或 33kV) 电压供电,另外设 35kV (或 33kV)/10kV 中心降压变电所,向全线降压变电所供电。牵引变电所 35kV (或 33kV) 侧单母线接地,一般以两个牵引变电所为一个单元分组,每个单元的两个牵引变电所从主变电所或 35kV 开关站的不同 35kV 母线或者不同的主变电所分别引入一电源,两整流站之间设有联络电缆,作为备用电源,互为备用。

两级制供电方式的可靠性不低于三级制供电方式,而且其工程投资和运营成本等方面优势也很明显。但是从谐波影响来看,三级制的谐波分量小于两级制供电方式。从近些年国内有轨电车开通建设运营线路统计数据来看,现代有轨电车牵引变电所普遍采用 10kV 三相交流供电,故集中供电方式宜采用三级制式供电。

2.2.2 分散式供电方式

采用分散式供电方式时,不需设立专门的主变电所或者电源开闭所。各牵引变电所以及