



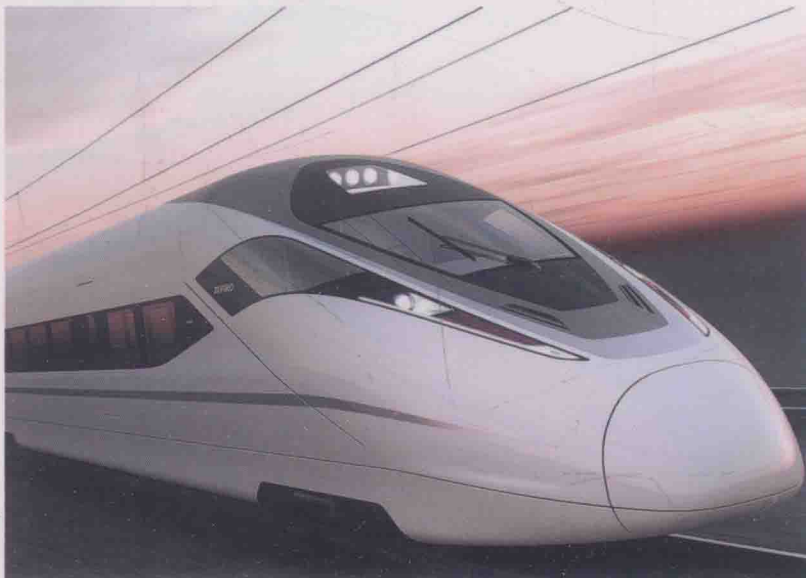
新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

轨道交通装备和 工程技术 现状与应用前景

齐 群 江 伟 张薇琳 孙 健 邓 烨 编著

GUIDAO JIAOTONG ZHUANGBEI HE GONGCHENG JISHU
XIANZHUANG YU YINGYONG QIANJING



SPM

南方出版传媒

广东经济出版社



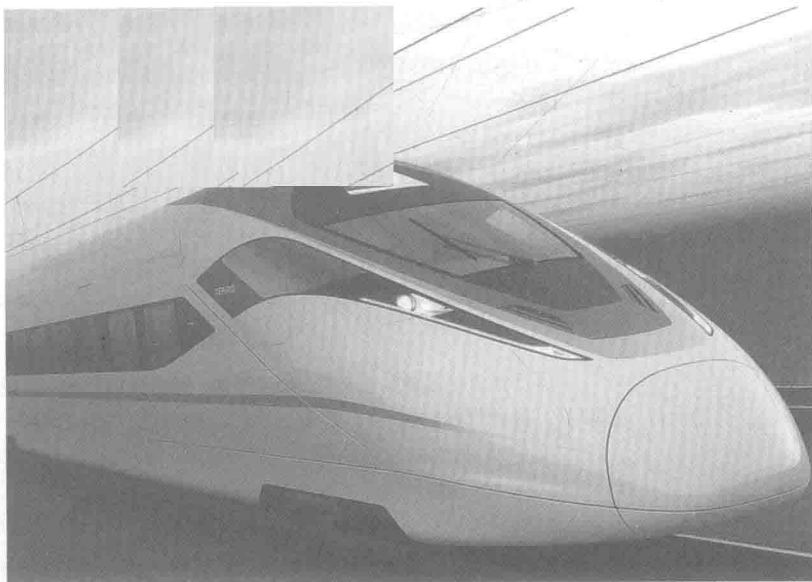
新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

轨道交通装备和 工程技术 现状与应用前景

齐 群 江 伟 张薇琳 孙 健 邓 烨 编著

GUIDAO JIAOTONG ZHUANGBEI HE GONGCHENG JISHU
XIANZHUANG YU YINGYONG QIANJING



SPM

南方出版传媒

广东新华书店

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

轨道交通装备和工程技术现状与应用前景 / 齐群等编著. —广州: 广东经济出版社, 2015. 5

(新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书)

ISBN 978-7-5454-3649-5

I. ①轨… II. ①齐… III. ①轨道交通-研究-中国 IV. ①U

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 248922 号

出版 发行	广东经济出版社 (广州市环市东路水荫路 11 号 11~12 楼)
经销	全国新华书店
印刷	中山市国彩印刷有限公司 (中山市坦洲镇彩虹路 3 号第一层)
开本	730 毫米 × 1020 毫米 1/16
印张	14.5
字数	245 000 字
版次	2015 年 5 月第 1 版
印次	2015 年 5 月第 1 次
书号	ISBN 978-7-5454-3649-5
定价	32.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与承印厂联系调换。

发行部地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 38306055 37601950 邮政编码: 510075

邮购地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 37601980 邮政编码: 510075

营销网址: <http://www.gebook.com>

广东经济出版社常年法律顾问: 何剑桥律师

· 版权所有 翻印必究 ·

“新兴产业和高新技术现状与前景研究”丛书编委会

- 总 主 编：金 碚 中国社会科学院工业经济研究所原所长、
学部委员
- 李京文 北京工业大学经济与管理学院名誉院长、
中国社会科学院学部委员、中国工程院院士
- 副 主 编：向晓梅 广东省社会科学院产业经济研究所所长、
研究员
- 阎秋生 广东工业大学研究生处处长、教授
- 编 委：
- 张其仔 中国社会科学院工业经济研究所研究员
- 赵 英 中国社会科学院工业经济研究所工业发展
研究室主任、研究员
- 刘戒骄 中国社会科学院工业经济研究所产业组织
研究室主任、研究员
- 李 钢 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 朱 彤 中国社会科学院工业经济研究所能源经济
研究室主任、副研究员
- 白 玫 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 王燕梅 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 陈晓东 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 李鹏飞 中国社会科学院工业经济研究所资源与环境
研究室副主任、副研究员

- 原 磊 中国社会科学院工业经济研究所工业运行
研究室主任、副研究员
- 陈 志 中国科学技术发展战略研究院副研究员
- 史岸冰 华中科技大学基础医学院教授
- 吴伟萍 广东省社会科学院产业经济研究所副所长、
研究员
- 燕雨林 广东省社会科学院产业经济研究所研究员
- 张栓虎 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 邓江年 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 杨 娟 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 柴国荣 兰州大学管理学院教授
- 梅 霆 西北工业大学理学院教授
- 刘贵杰 中国海洋大学工程学院机电工程系主任、教授
- 杨 光 北京航空航天大学机械工程及自动化学院
工业设计系副教授
- 迟远英 北京工业大学经济与管理学院教授
- 王 江 北京工业大学经济与管理学院副教授
- 张大坤 天津工业大学计算机科学系教授
- 朱郑州 北京大学软件与微电子学院副教授
- 杨 军 西北民族大学现代教育技术学院副教授
- 赵肃清 广东工业大学轻工化工学院教授
- 袁清珂 广东工业大学机电工程学院副院长、教授
- 黄 金 广东工业大学材料与能源学院副院长、教授
- 莫松平 广东工业大学材料与能源学院副教授
- 王长宏 广东工业大学材料与能源学院副教授

总序

人类数百万年的进化过程，主要依赖于自然条件和自然物质，直到五六千年之前，由人类所创造的物质产品和物质财富都非常有限。即使进入近数千年的“文明史”阶段，由于除了采掘和狩猎之外人类尚缺少创造物质产品和物质财富的手段，后来即使产生了以种植和驯养为主要方式的农业生产活动，但由于缺乏有效的技术手段，人类基本上没有将“无用”物质转变为“有用”物质的能力，而只能向自然界获取天然的对人类“有用”之物来维持低水平的生存。而在缺乏科学技术的条件下，自然界中对于人类“有用”的物质是非常稀少的。因此，据史学家们估算，直到人类进入工业化时代之前，几千年来全球人均经济增长率最多只有0.05%。只有到了18世纪从英国开始发生的工业革命，人类发展才如同插上了翅膀。此后，全球的人均产出（收入）增长率比工业化之前高10多倍，其中进入工业化进程的国家和地区，经济增长和人均收入增长速度数十倍于工业化之前的数千年。人类今天所拥有的除自然物质之外的物质财富几乎都是在这200多年的时期中创造的。这一时期的最大特点就是：以持续不断的技术创新和技术革命，尤其是数十年至近百年发生一次的“产业革命”的方式推动经济社会的发展。^①新产业和新技术层出不穷，人类发展获得了强大的创造能力。

^① 产业革命也称工业革命，一般认为18世纪中叶（70年代）在英国产生了第一次工业革命，逐步扩散到西欧其他国家，其技术代表是蒸汽机的运用。此后对世界所发生的工业革命的分期有多种观点。一般认为，19世纪中叶在欧美等国发生第二次工业革命，其技术代表是内燃机和电力的广泛运用。第二次世界大战结束后的20世纪50年代，发生了第三次工业革命，其技术代表是核技术、计算机、电子信息技术的广泛运用。21世纪以来，世界正在发生又一次新工业革命（也有人称之为“第三次工业革命”，而将上述第二、第三次工业革命归之为第二次工业革命），其技术代表是新能源和互联网的广泛运用。也有人提出，世界正在发生的新工业革命将以制造业的智能化尤其是机器人和生命科学为代表。

当前，世界又一次处于新兴产业崛起和新技术将发生突破性变革的历史时期，国外称之为“新工业革命”或“第三次工业革命”“第四次工业革命”，而中国称之为“新型工业化”“产业转型升级”或者“发展方式转变”。其基本含义都是：在新的科学发现和技术发明的基础上，一批新兴产业的出现和新技术的广泛运用，根本性地改变着整个社会的面貌，改变着人类的生活方式。正如美国作者彼得·戴曼迪斯和史蒂芬·科特勒所说：“人类正在进入一个急剧的转折期，从现在开始，科学技术将会极大地提高生活在这个星球上的每个男人、女人与儿童的基本生活水平。在一代人的时间里，我们将有能力为普通民众提供各种各样的商品和服务，在过去只能提供给极少数富人享用的那些商品和服务，任何一个需要得到它们、渴望得到它们的人，都将能够享用它们。让每个人都生活在富足当中，这个目标实际上几乎已经触手可及了。”“划时代的技术进步，如计算机系统、网络与传感器、人工智能、机器人技术、生物技术、生物信息学、3D 打印技术、纳米技术、人机对接技术、生物医学工程，使生活于今天的绝大多数人能够体验和享受过去只有富人才有机会拥有的生活。”^①

在世界新产业革命的大背景下，中国也正处于产业发展演化过程中的转折和突变时期。反过来说，必须进行产业转型或“新产业革命”才能适应新的形势和环境，实现绿色化、精致化、高端化、信息化和服务化的产业转型升级任务。这不仅需要大力培育和发展新兴产业，更要实现高新技术在包括传统产业在内的各类产业中的普遍运用。

我们也要清醒地认识到，20 世纪 80 年代以来，中国经济取得了令世界震惊的巨大成就，但是并没有改变仍然属于发展中国家的现实。发展新兴产业和实现产业技术的更大提升并非轻而易举的事情，不可能一蹴而就，而必须拥有长期艰苦努力的决心和意志。中国社会科学院工业经济研究所的一项研究表明：中国工业的主体部分仍处于国际竞争力较弱的水平。这项研究把中国工业制成品按技术含量低、中、高的次序排列，发现国际竞争力大致呈 U 形分布，即两头相对较高，而在统计上分类为“中技术”的行业，例如化工、材料、机械、电子、精密仪器、交通设备等，国际竞争力显著较低，而这类产业恰恰是工业的主体和决定工业技术整体素质的关键基础部门。如果这类产业竞争力不

^① 【美】彼得·戴曼迪斯，史蒂芬·科特勒. 富足：改变人类未来的 4 大力量. 杭州：浙江大学出版社，2014.

强，技术水平较低，那么“低技术”和“高技术”产业就缺乏坚实的基础。即使从发达国家引入高技术产业的某些环节，也是浅层性和“漂浮性”的，难以长久扎根，而且会在技术上长期受制于人。

中国社会科学院工业经济研究所专家的另一项研究还表明：中国工业的大多数行业均没有站上世界产业技术制高点。而且，要达到这样的制高点，中国工业还有很长的路要走。即使是一些国际竞争力较强、性价比较高、市场占有率很大的中国产品，其核心元器件、控制技术、关键材料等均须依赖国外。从总体上看，中国工业品的精致化、尖端化、可靠性、稳定性等技术性能同国际先进水平仍有较大差距。有些工业品在发达国家已属“传统产业”，而对于中国来说还是需要大力发展的“新兴产业”，许多重要产品同先进工业国家还有几十年的技术差距，例如数控机床、高端设备、化工材料、飞机制造、造船等，中国尽管已形成相当大的生产规模，而且时有重大技术进步，但是，离世界的产业技术制高点还有非常大的距离。

产业技术进步不仅仅是科技能力和投入资源的问题，攀登产业技术制高点需要专注、耐心、执着、踏实的工业精神，这样的工业精神不是一朝一夕可以形成的。目前，中国企业普遍缺乏攀登产业技术制高点的耐心和意志，往往是急于“做大”和追求短期利益。许多制造业企业过早走向投资化方向，稍有成就的企业家都转而成为赚快钱的“投资家”，大多进入房地产业或将“圈地”作为经营策略，一些企业股票上市后企业家急于兑现股份，无意在实业上长期坚持做到极致。在这样的心态下，中国产业综合素质的提高和形成自主技术创新的能力必然面临很大的障碍。这也正是中国产业综合素质不高的突出表现之一。我们不得不承认，中国大多数地区都还没有形成深厚的现代工业文明的社会文化基础，产业技术的进步缺乏持续的支撑力量和社会环境，中国离发达工业国的标准还有相当大的差距。因此，培育新兴产业、发展先进技术是摆在中国产业界以至整个国家面前的艰巨任务，可以说这是一个世纪性的挑战。如果不能真正夯实实体经济的坚实基础，不能实现新技术的产业化和产业的高技术化，不能让追求技术制高点的实业精神融入产业文化和企业愿景，中国就难以成为真正强大的国家。

实体产业是科技进步的物质实现形式，产业技术和产业组织形态随着科技进步而不断演化。从手工生产，到机械化、自动化，现在正向信息化和智能化方向发展。产业组织形态则在从集中控制、科层分权，向分布式、网络化和去中心化方向发展。产业发展的历史体现为以蒸汽机为标志的第一次工业革命、

以电力和自动化为标志的第二次工业革命，到以计算机和互联网为标志的第三次工业革命，再到以人工智能和生命科学为标志的新工业革命（也有人称之为“第四次工业革命”）的不断演进。产业发展是人类知识进步并成功运用于生产性创造的过程。因此，新兴产业的发展实质上是新的科学发现和技术发明以及新科技知识的学习、传播和广泛普及的过程。了解和学习新兴产业和高新技术的知识，不仅是产业界的事情，而且是整个国家全体人民的事情，因为，新兴产业和新技术正在并将进一步深刻地影响每个人的工作、生活和社会交往。因此，编写和出版一套关于新兴产业和新产业技术的知识性丛书是一件非常有意义的工作。正因为这样，我们的这套丛书被列入了2014年的国家出版工程。

我们希望，这套丛书能够有助于读者了解和关注新兴产业发展和高新产业技术进步的现状和前景。当然，新兴产业是正在成长中的产业，其未来发展的技术路线具有很大的不确定性，关于新兴产业的新技术知识也必然具有不完备性，所以，本套丛书所提供的不可能是成熟的知识体系，而只能是形成中的知识体系，更确切地说是有待进一步检验的知识体系，反映了在新产业和新技术的探索上现阶段所能达到的认识水平。特别是，丛书的作者大多数不是技术专家，而是产业经济的观察者和研究者，他们对于专业技术知识的把握和表述未必严谨和准确。我们希望给读者以一定的启发和激励，无论是“砖”还是“玉”，都可以裨益于广大读者。如果我们所编写的这套丛书能够引起更多年轻人对发展新兴产业和新技术的兴趣，进而立志投身于中国的实业发展和推动产业革命，那更是超出我们期望的幸事了！

金 碚

2014年10月1日

前 言

轨道交通具有绿色、环保、安全、智能、便捷、准时、客运量大等优点，随着我国城市化进程的加快，城市地铁、轻轨、区域城际轨道、高速铁路等轨道交通，在全国掀起了建设高潮。本书介绍了轨道交通车辆、信号、通信及牵引供电等系统技术装备的基本工作原理、现有技术和发展展望。其中张薇琳编写第一章、第二章和第三章；齐群编写第四章的第一、二、三节和第五章的第一节、第二节；邓烨编写第四章的第四节；江伟编写第五章的第三、四节和第六章；孙健编写第七章；全书由齐群统稿。

目 录

第一章 轨道交通牵引供电技术概述	001
一、牵引供电系统的组成	002
二、牵引供电方式	005
三、城市轨道交通供电系统发展	010
第二章 牵引变电所主要电气设备	019
一、电气设备概述	019
二、牵引变压器	021
三、整流机组	027
四、高压开关设备	035
五、互感器	041
六、避雷装置	045
七、成套设备	047
第三章 接触网	050
一、接触网概述	050
二、柔性接触网	052
三、刚性接触网	055
四、第三轨式接触网	059
第四章 电力监控系统	064
一、电力监控系统的基本组成与功能	064
二、电力监控系统的硬件构成	067
三、电力监控系统的软件构成	069

第五章 轨道交通通信系统	073
一、概述	073
二、铁路调度通信网	077
三、高速铁路综合数字移动通信系统 GSM - R	083
四、城市轨道交通通信系统	094
第六章 轨道交通信号与控制系统	121
一、概述	121
二、铁路信号基础设备	128
三、联锁及闭塞设备	144
四、列车运行控制系统	157
五、行车调度指挥控制系统	166
六、城市轨道交通信号系统	170
第七章 轨道交通车辆	181
一、动力集中式列车	181
二、动力分散式列车	193
参考文献	218

第一章 轨道交通牵引供电技术概述

电力牵引是利用电能作为牵引动力，将电能转换为机械能，驱动铁路列车、电动车组和城市轨道交通车辆等有轨运输工具运行的一种运输形式。

电力牵引按其牵引网供电电流制式不同，分为工频单相交流制、低频单相交流制和直流制。我国电气化铁路采用工频单相交流制电力牵引，直流制电力牵引仅用于城市轨道交通系统和工矿运输系统。

电力牵引运输具有以下一系列优点：

(1) 电力牵引机车本身不带燃料，可使用二次能源，为非自给式牵引动力，并由大容量电力系统供电，连接全国电网，能源有保证。

(2) 机车或动车组总功率大，具有启动和加速快、过载能力强、运输能力大等特点，能满足各种现代交通运输对快速、大运输能力的需要。

(3) 不造成空气和环境（噪声）污染。

(4) 电力牵引的总效率高，节约能源。电力牵引在全部或部分为水电供电的情况下，包括发电厂、输变电和供电系统以及机车、车辆效率在内，比用内燃机为动力的内燃机车和汽车等运输工具的总效率要高出几个至几十个百分点。因而采用电力牵引可有效节约能源，并降低运营成本。

(5) 安全性高。随着信息技术、微电子技术的广泛应用，电力机车可实现实时检测故障、自动驾驶、遥测及遥控等，电力牵引系统易于实现全面自动化和信息化，从而大大提高了劳动生产率和经济效益。

城市轨道交通的供电系统，由变电所、接触网（接触轨）和回流网三部分构成。变电所通过接触网（接触轨），由车辆受电器向电动客车馈送电能，回流网是牵引电流返回变电所的导体。

牵引网的供电制式主要指电流制、电压等级和馈电方式。目前，城市轨道

交通的直流牵引电压等级有 DC600V、DC750V 和 DC1500V 等多种。我国国家标准《地铁直流牵引供电系统》规定了 DC750V 和 DC1500V 两种电压制式。但是,从减少城市轨道交通牵引供电系统的电能损失和电压损耗、延长供电距离以降低牵引变电站的数量及投资、降低受流接触网的悬挂重量、降低结构复杂性及投资等方面而言,采用 DC1500V 的牵引供电电压制式比采用 DC750V 的牵引供电电压制式显然要经济得多。高耐压电力电子变流器件的不断发展,如 4500V 的 GTO、3300V 的 IGBT 等,为采用 DC1500V 供电的城市轨道交通牵引传动系统提供了可靠的技术保障。因此,今后我国的城市轨道交通牵引传动系统的供电电压制式的发展趋势应该是逐步采用统一的 DC1500V。

一、牵引供变电系统的组成

电力牵引供变电系统是指从电力系统或一次供电系统接受电能,通过变压、变相或换流(将工频交流变换为低频交流或直流电压)后,向电力机车负荷提供所需电流制式(交流或直流)的电能,并完成牵引电能传输、配电等全部功能的完整系统。工频交流单相电力牵引供电系统主要由牵引变电所和牵引网组成。牵引网实行单相供电,由馈电线、接触网、轨道电路及回流线等组成。为使电能有效、可靠地供给电力机车,牵引网上还安装有分相绝缘器、分段绝缘器等设备,供电系统中还设有分区所、开闭所等。我国规定牵引网额定电压为 25kV,额定频率为 50Hz。

交流电气化牵引供电系统组成结构如图 1-1-1 所示,牵引供电构成的回路是:牵引变电所—馈电线—接触网—电力机车—钢轨和大地—回流线—牵引变电所。城市轨道交通的直流电力牵引供电系统则主要由牵引变电所和牵引网组成。

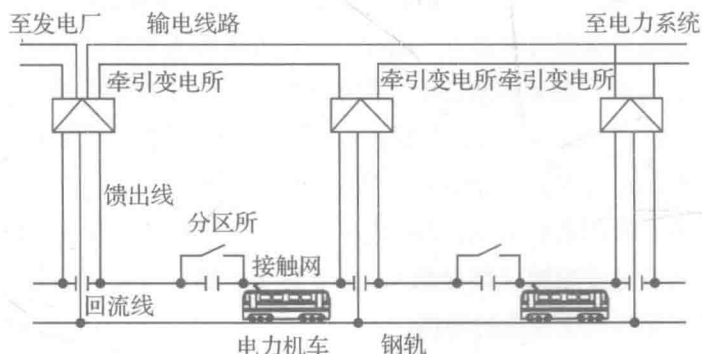


图 1-1-1 电气化铁道供电系统示意图

交流电力牵引供电系统,因牵引网对抑制通信干扰采取的技术措施不同而区分为直接供电方式、带回流导线的供电方式、带吸流变压器(BT)的供电方式,以及 $2\text{kV} \times 25\text{kV}$ 自耦变压器(AT)供电方式,不同供电方式的系统和装置结构有所不同。

(一) 牵引变电所

牵引变电所是交流工频单相电力牵引供变电系统的重要环节,它完成变压、变相和向牵引网供电等功能,并实现三相交流一次供电系统与单相电力牵引系统的接口与系统变换。牵引变电所停电后,可由相邻变电所实现越区供电,但牵引网电压水平将下降。

(二) 接触网

按电力机车集电方式的不同,接触网可分为:架空单线式、架空复线式和接触轨(第三轨)三种方式。交流电气化铁道一般采用架空单线式,城市无轨电车则采用架空复线式,第三轨方式则普遍应用于地下铁道。

架空接触网是一种悬挂在电气化铁道钢轨上方并和轨面保持一定距离的链型或单导线系统,专为电力机车或电动车组提供电力的特殊供电回路,机车通过受电弓与接触网滑动接触取得电能。正常供电时,由牵引变电所馈线到接触网末端的一段供电线路,称为供电分区,也称为供电臂。由于牵引负荷常处于运动之中,对于接触网的要求除了提供数量足够并符合质量标准的电能外,还应保证牵引负荷受流的稳定性。

(三) 馈电线

馈电线是连接牵引变电所和接触网的导线,也称馈出线。馈电线一般采用钢芯铝绞线,将变电所的电能输送给接触网。

(四) 回流线

回流线是牵引供电回路中的一部分,是将轨道和牵引变电所主变压器接地相之间连接的导线,通过其将流经电力机车的负荷电流引入变电所。

(五) 轨道

轨道除了作为电力机车的导轨外,同时是牵引供电系统中回流电路的一部

分,在供给机车的电流中有一部分是流入大地的,轨道的作用就是将大地中的回流导入变电所。

(六) 分区所

交流电气化铁道上为了增加供电的灵活性,提高运行的可靠性,在两个牵引变电所的供电区中间常加设分区所,实现作用如下:

(1) 可以使相邻的供电区段实现并联工作或单独工作。当实现并联工作时,分区所的断路器闭合,否则打开。

(2) 当相邻牵引变电所发生故障而不能继续供电时,可以闭合分区所的断路器,由非故障牵引变电所实行越区供电。

(3) 双边供电的供电区内发生牵引网短路事故时,可由分区所的断路器切除事故点所在处的一半供电区,非事故段仍可照常工作。

(七) 开闭所

交流电力牵引系统开闭所,实际上是起配电作用的开关站,是在牵引网有分支引出时,为不影响电力牵引安全,保证可靠供电而设置带保护断路器等设施的控制场所。在离牵引变电所胶原的铁路枢纽地区,由于站线多,接触网相应复杂,客货列车运行、编组和机车进出库作业繁忙,致使该地区故障概率增大。为保证枢纽供电可靠性,缩小事故范围,一般将接触网横向分组及分区供电,由开闭所的多路馈线向接触网各分组和分区供电。因此,一般在枢纽站、编组场、电力机务段和折返段等处需设置开闭所。

此外,在复线 AT 牵引网中,由于 AT 供电方式供电电压增高 ($2\text{kV} \times 25\text{kV}$),供电臂距离增长,可达 $40 \sim 50\text{km}$,为提高供电灵活性有时为了进一步缩小接触网事故停电范围和降低牵引网电压损失和电能损失,也可在分区所与牵引变电所直接增设开闭所,也称辅助分区所。

开闭所的主要设备是断路器。电源进线一般设两条回路,复线时可由上、下行牵引网各引一条回路,出线则按需要设置。当出线数量较多时,也可将开闭所母线实行分段。单线时如就近无法获得第二电源,也可只引一路电源。

(八) 自耦变压器站

自耦变压器站简称 AT 所,是 AT 牵引网的重要组成部分。将自耦变压器(AT)按一定间隔距离跨接在 AT 牵引网的接触网、正馈线和钢轨间,起着支

撑 $2\text{kV} \times 25\text{kV}$ 馈电系统的作用。

工频单相交流电气化铁道如采用 AT 供电方式时,在沿线需每隔 $10 \sim 15\text{km}$ 设置一台自耦变压器。自耦变压器设于沿铁路的各站场上,同时将分区所和开闭所合并,以利运行管理。

(九) 分相绝缘器和分段绝缘器

分相绝缘器又称电分相,串在接触网上,目的是把两相不同的供电区分开,并使机车平滑过渡,主要用在牵引变电所出口处和分区所处。分段绝缘器又称电分段,分为纵向电分段和横向电分段,前者用于线路接触网上,后者用于站场各条接触网之间。通过其上的隔离开关将有关接触网进行电气连通或断开,以保证供电的可靠性、灵活性和缩小停电范围等。

二、牵引供电方式

交流电力牵引供电系统因牵引网对抑制通信干扰采取的技术措施不同而采取不同的供电方式。牵引供电系统的供电方式主要包括直接供电方式、带回流线的供电方式、带吸流变压器 (BT) 的供电方式,以及 $2\text{kV} \times 25\text{kV}$ 自耦变压器 (AT) 供电方式。

牵引网的供电方式则包括单边供电、上下行并联供电和双边供电方式。

(一) 牵引供电系统的供电方式

1. 直接供电方式 (TR 供电方式)

直接供电方式是在牵引网中不增加特殊防护措施的一种供电方式,是结构最简单的一种。电气化铁路最早大都采用这种供电方式,它的一根馈线接在接触网 (T) 上,另一根馈线接在钢轨 (R) 上,如图 1-2-1 所示。这种供电方式结构简单,投资最省,牵引网阻损较小,能耗也较低。供电距离单线一般

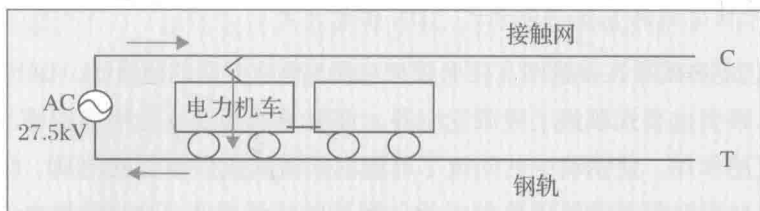


图 1-2-1 直接供电方式原理图