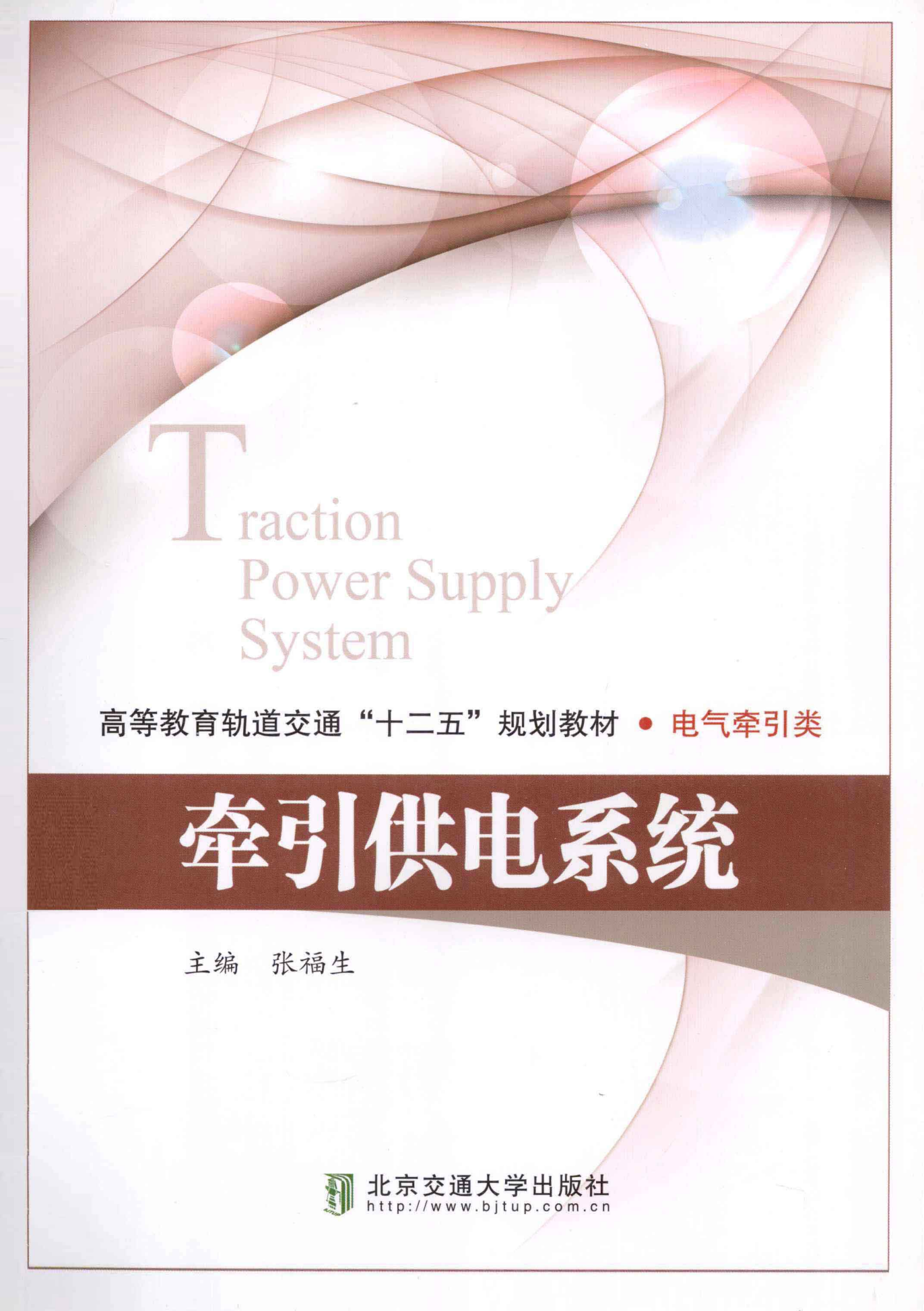




# Traction Power Supply System

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 电气牵引类

# 牵引供电系统

主编 张福生



北京交通大学出版社  
<http://www.bjtup.com.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电

# 牵引供电系统

张福生 主编

北京交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要介绍了牵引供电系统的主要结构和工作原理,系统讲述了牵引供电系统的供电方式、负荷计算及变压器选择、牵引网阻抗计算、短路计算及高压设备选择、牵引供电一次系统及二次系统、防雷与接地、电压损失与电能损失,以及相关电能质量等问题。

本书可作为铁路院校相关专业的教学和相关培训教材使用,也可供相关工程技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

牵引供电系统/张福生主编. —北京:北京交通大学出版社, 2013. 6

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1481-4

I. ①牵… II. ①张… III. ①电力牵引-供电-高等学校-教材 IV. ①TM922. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 115985 号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:李晓敏

出版发行:北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经销:全国新华书店

开本: 185×260 印张:15.5 字数: 387 千字

版次: 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-5121-1481-4/TM·49

印数: 1~3 000 册 定价: 34.00 元

---

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

# 高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

## 编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：陈 庚 姜久春

委 员：（按姓氏笔画排序）

方 进 王立德 刘文正

刘慧娟 吴俊勇 张晓冬

周 晖 黄 辉

## 编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：孙秀翠

成 员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥 郝建英 高 琦 徐 琤

# 总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年),到2020年,中国铁路网规模将达到12万千米以上。其中,时速200千米及其以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展的需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市钢轨交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市钢轨交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市钢轨交通网络,钢轨交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国钢轨交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市钢轨新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视钢轨交通的研究和发展,建有“钢轨交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决钢轨交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系专家和教授编写了这套“高等教育钢轨交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书才得以成功出版。在此，向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国钢轨交通人才的培养贡献绵薄之力。由于钢轨交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新快，教材中难免会有诸多的不足，在此诚请各位同仁、专家不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

**编委会**  
**2013 年 5 月**

# 出版说明

为促进高等钢轨交通专业电力牵引类教材体系的建设,满足目前钢轨交通类专业人才培养的需要,北京交通大学电气工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事钢轨交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育钢轨交通‘十二五’规划教材”。本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。本系列教材得到从事钢轨交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。本系列教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《工程电磁场》、《电机学》、《电传动控制系统》、《电力系统分析》、《电力系统继电保护》、《高电压技术》、《牵引供电系统》、《城市钢轨交通供电》。希望本套教材的出版对钢轨交通的发展、钢轨交通专业人才的培养,特别是钢轨交通电气牵引专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会  
2013年5月

# 前 言

为了贯彻国家“科教兴国”战略和落实教育部“面向二十一世纪教育振兴行动计划”，积极发展高等教育，培养社会主义现代化建设需要的专门人才的需要，编写了此书。

全书分12章。首先，在概论中简要地介绍了电气化铁路的发展历程，并重点介绍了牵引供电的供电方式及牵引供电系统设计时所需要进行的主要工作。其次，根据牵引供电系统组成的结构和设计思路，依次讲述了牵引变压器及其选择、牵引供电的负荷计算、接触网及牵引网阻抗、短路计算、牵引供电一次系统及二次系统、防雷接地。最后，根据牵引供电系统的特殊性，单独列章讲述了牵引供电系统的电压损失和电能损失计算、其对通信系统的影响计算和谐波功率因数负序等有关问题。

在编写过程中，重点突出实用原则，理论分析和计算以够用为度，略掉空泛的概念性的内容，使学生学之有物。在文字叙述上，力求深入浅出，明白易懂；尽量配以简明清晰的插图，做到图文并茂。为更加便于学生复习和自学，我们配套编写了本教材的自学辅导书和习题集。

本书第1章、第2章、第4章、第7章、第9章、第10章由石家庄铁道大学张福生编写，第3章和第11章由兰州交通大学张红生编写，第5章由华东交通大学的刘仕兵编写，第6章由华东交通大学的刘仕兵和何人望编写，第8章、第12章由石家庄铁道大学崔跃华编写。全书由张福生统稿。

限于编者水平和时间有限，书中难免疏漏之处，肯请读者批评指正。

编 者  
2013年5月

# 目 录

|                                |    |                               |     |
|--------------------------------|----|-------------------------------|-----|
| 第 1 章 概论 .....                 | 1  | 4.3 接触网设备与结构 .....            | 50  |
| 1.1 电气化铁路的发展概况 .....           | 1  | 复习参考题 .....                   | 61  |
| 1.2 牵引供电系统组成 .....             | 3  | 第 5 章 牵引网阻抗的计算 .....          | 62  |
| 1.3 牵引供电系统供电方式 .....           | 5  | 5.1 牵引网的阻抗 .....              | 62  |
| 1.4 牵引供电系统设计的<br>一般知识 .....    | 9  | 5.2 单线区段牵引网阻抗 .....           | 66  |
| 复习参考题 .....                    | 13 | 5.3 双线牵引网阻抗 .....             | 70  |
| 第 2 章 牵引变电所 .....              | 14 | 5.4 AT 牵引网阻抗 .....            | 73  |
| 2.1 单相接线变压器 .....              | 15 | 复习参考题 .....                   | 76  |
| 2.2 单相 Vv 接线变压器 .....          | 17 | 第 6 章 短路的计算 .....             | 77  |
| 2.3 三相 Vv 接线变压器 .....          | 19 | 6.1 三相对称短路的分析计算 .....         | 77  |
| 2.4 三相 YNd11 接线牵引<br>变压器 ..... | 20 | 6.2 三相不对称短路的分析计算 .....        | 93  |
| 2.5 斯科特变压器 .....               | 26 | 6.3 牵引供电系统短路的<br>分析计算 .....   | 98  |
| 2.6 其他几种类型的牵引<br>变压器简介 .....   | 30 | 复习参考题 .....                   | 109 |
| 复习参考题 .....                    | 32 | 第 7 章 牵引供电系统一次系统 .....        | 110 |
| 第 3 章 牵引负荷计算 .....             | 33 | 7.1 高压电器设备 .....              | 110 |
| 3.1 牵引供电负荷简介 .....             | 33 | 7.2 电气设备选择与校验 .....           | 130 |
| 3.2 机车电流和能耗 .....              | 35 | 7.3 牵引供电系统电气主接线 .....         | 136 |
| 3.3 牵引负荷电流计算 .....             | 36 | 7.4 牵引供电系统的装置布置 .....         | 149 |
| 3.4 牵引变压器容量计算 .....            | 40 | 7.5 牵引变电所的运行维护和<br>检修试验 ..... | 153 |
| 3.5 牵引负荷计算样例 .....             | 43 | 复习参考题 .....                   | 157 |
| 复习参考题 .....                    | 45 | 第 8 章 牵引供电系统的二次系统 .....       | 159 |
| 第 4 章 接触网 .....                | 46 | 8.1 控制方式和二次接线简介 .....         | 159 |
| 4.1 接触网的组成 .....               | 46 | 8.2 高压开关控制信号回路 .....          | 163 |
| 4.2 接触悬挂的类型 .....              | 48 | 8.3 中央信号装置 .....              | 164 |
|                                |    | 8.4 继电保护装置 .....              | 165 |

|                                   |            |                           |            |
|-----------------------------------|------------|---------------------------|------------|
| 8.5 综合自动化系统·····                  | 173        | 11.2 电磁感应·····            | 212        |
| 8.6 自用电系统·····                    | 177        | 11.3 危险电压·····            | 215        |
| 复习参考题·····                        | 178        | 11.4 杂音干扰·····            | 217        |
| <b>第9章 防雷与接地·····</b>             | <b>180</b> | 11.5 减轻对通信线路影响的措施·····    | 218        |
| 9.1 过电压与防雷·····                   | 180        | 复习参考题·····                | 219        |
| 9.2 电气装置的接地·····                  | 188        | <b>第12章 牵引供电电能质量·····</b> | <b>220</b> |
| 复习参考题·····                        | 198        | 12.1 谐波·····              | 221        |
| <b>第10章 牵引供电系统的电压损失和电能损失·····</b> | <b>199</b> | 12.2 功率因数·····            | 224        |
| 10.1 牵引供电系统电压损失的计算和改善措施·····      | 199        | 12.3 负序·····              | 228        |
| 10.2 牵引供电系统电能损失·····              | 203        | 复习参考题·····                | 232        |
| 10.3 导线的选择·····                   | 207        | <b>附录A 模拟试题·····</b>      | <b>233</b> |
| 复习参考题·····                        | 209        | A1 模拟试题一·····             | 233        |
| <b>第11章 牵引网对通信线路的影响·····</b>      | <b>210</b> | A2 模拟试题二·····             | 235        |
| 11.1 静电感应·····                    | 210        | <b>参考文献·····</b>          | <b>237</b> |

# 第1章

# 概 论

## 【本章内容概要】

概述世界电气化铁路发展历程及其特点；介绍牵引供电制式的分类、牵引供电方式，牵引供电系统设计的程序、要求及设计内容。

## 【本章学习重点与难点】

学习重点：牵引供电系统组成；牵引供电系统供电方式。

学习难点：牵引供电系统供电方式。

## 1.1 电气化铁路的发展概况

### 1. 电气化铁路发展历程

1879年5月31日在德国柏林的世界贸易博览会上，由西门子-哈克斯公司展出了世界上第一条电气化铁路，迄今已有130多年的历史。低能耗、高效率、高速度的电力牵引已成为世界各国铁路发展的趋势。20世纪90年代法国、德国、日本等国家在客运方面向高速发展。法国高速列车2007年4月3日在行驶试验中达到时速574.8 km，打破了1990年由法国高速列车创下的时速515.3公里的有轨铁路行驶世界纪录。

磁悬浮高速列车也在德国、日本相继出现。一列载人的日本磁悬浮列车于2003年12月2日在428 km长的山梨试验线上创下了581 km/h的新的世界速度记录，从而打破了1999年在同一试验线上创下的552 km/h的世界纪录。

1961年8月15日，中国第一条电气化铁路宝成线宝鸡—凤洲段正式通车，从此揭开了中国电气化铁路建设的序幕。1998年5月，广深线成为中国第一条准高速电气化铁路，时速为200 km。2006年京沪线开始施工，设计时速350 km。到2012年全国铁路营业里程达到11万 km，双线、电化率均达到50%以上，时速200 km以上的客运专线达到1.3万 km，其中时速300～350 km的为8 000 km，快速客运网总规模达到26 000 km以上。

### 2. 电气化铁路的特点

电气化铁路以电力牵引技术为基础，它综合了现代的通信技术、计算机技术、电子技术、自动化技术和冶金技术等学科的成果，其突出特点是高速、高效、安全。电气化铁路是21世纪世界铁路发展的主流，具有航海、航空和汽车运输无法比拟的优势，主要特点有以下三个方面。

(1) 运输效率高，运量大，运行成本低。相比内燃机车，电力机车本身不带燃料，为非

自给式牵引动力,机车的总功率大,具有启动和加速快、过载能力强、运输能力大的优点。中国国产功率最大的货运内燃车  $DF_{8B}$  牵引功率为 3 100 kW,而典型的货运电力机车  $SS_{4B}$  牵引功率为 6 400 kW,  $HXD1$  型电力机车机车牵引功率更是达到了 9 600 kW。可以说,铁路要想客车高速、货车重载,线路电气化是必然的趋势。据有关资料介绍,电气化高速铁路的列车密度可达到每间隔 4 ~ 5 min 发出一列,每天可开行 200 ~ 240 列列车,每年可运送旅客 6 000 万 ~ 8 000 万人。其劳动生产效率是其他运输方式无法相比的。

(2) 能耗低,有利于环境保护。电气化铁路由于采用电能作为能源,它基本上无粉尘、油烟、废气等污染,这无疑对改善生态环境和人民的健康状况是有益的。

(3) 安全、舒适、准时。铁路的旅客车厢空间大,可以给旅客的旅行生活提供很大的活动场所。尤其是豪华车厢,其设施可以和星级宾馆相比,为旅客创造安静、舒适的环境。列车的运行受天气、地面运输环境的影响较小,基本上是全天候运输作业,列车的准点率也较高,而这也是飞机和汽车难以实现的。

### 3. 牵引供电制式的分类

按牵引供电制式,可分为直流制、低频单相交流制、单相工频交流制。

#### 1) 直流制

早期的电气化铁路采用直流供电,最初只能供 600 V 的直流,供近距离使用。随着人们对大功率机车的需求和长距离电气化铁路的需要,直流供电电压逐步提高,最高达到 3 000 V。这对供电的经济性有利,但限于技术水平,电力机车在技术上存在困难,主要是牵引电动机换相困难。直流机车普遍采用串励直流牵引电动机,这是因为串励直流电动机的机械特性特别适合电力牵引的需要,机车的电动机直接连接在电网上取流,通过控制电阻和电动机的串并联来对机车进行启动、调速和制动的控制,这在当时是比较可行的。

世界铁路直流电气化历史很长,约有 10 万公里。在单相工频交流制推广以后,除原有直流系统的铁路扩建外,新干线已经很少再采用直流制。但是市郊铁路、城市交通、地下铁道、工矿企业内部运输等供电距离短的地方仍为直流供电,而且使用直流动车和直流机车。

通常有轨电车和地铁的直流电压是 600 V 和 750 V,铁路使用 1 500 V 和 3 000 V。日本、荷兰、印尼、澳大利亚、马来西亚的一些地区,法国的少数地区使用 1 500 V 的直流电。荷兰实际使用的电压大约有 1 600 V 到 1 700 V。意大利、比利时、捷克北部、斯洛伐克、波兰、前南斯拉夫、前苏联使用 3 000 V 直流电。

采用直流供电的系统和电力机车比较简单,但是因为电压低、电流大,所以它需要较粗的导线,供电距离较短,变电所的密度比较大,直流线路有显著的能量损耗。

#### 2) 低频单相交流制

鉴于提高输送功率和供电距离的需要,人们不得不进一步提高供电电压。但是高压直流输电在当时有其固有的困难,人们便开始试验高压交流供电,且机车使用单相交流串励换相器电动机,该电动机工作特性与直流串励电动机接近。供电和机车可以各自选择最佳额定电压。但是单相交流串励换相器电动机换相条件差,要求低频电源,所以铁路要求专用低频发电厂。另外,该种电机结构复杂、维修不便,所以使用这种供电制的国家很少,有德国、瑞典、瑞士、挪威、奥地利等。供电电压主要是 15 kV,频率是  $16\frac{2}{3}$  Hz。美国使用 11 kV 或 12.5 kV,频率是 25 Hz。各国该电流制的铁路总计里程近 3 万公里,新建铁路已经不再使用

这种方式。

### 3) 单相工频交流制

20 世纪 50 年代前期, 整流器机车出现, 并以其优越性而很快得到推广。供电制式出现了单相工频供电制, 接触网电压采用 25 kV, 频率为工频 50 Hz, 这使得铁路供电既简单又经济。这一时期, 我国电气化铁路开始起步, 所以就采用了这种制式, 机车性能和供电的经济性均较好。

单相工频整流器机车装有变压器和单相整流器, 电机采用串励直流脉动牵引电动机, 可以让接触网和电动机各自选定最有利的额定电压。在这段时间里, 电力电子技术和微电子技术的发展使电力机车技术提高到了一个新的阶段。直流机车的控制得到了很大发展, 我国从 SS<sub>1</sub> 型一直发展到 SS<sub>9</sub> 型, 其控制方式和保护功能得到了不断地提升。后来, 在单相工频交流供电的基础上, 又出现了交流传动机车, 即所谓“交-直-交”电力机车, 采用接触网单相交流供电, 整成直流后逆变成三相交流电, 供给三相异步电动机牵引之用, 和谐号和动车组就是典型的代表。

## 1.2 牵引供电系统组成

牵引供电系统是由牵引变电所、牵引网及其他辅助供电设施组成的供电系统。

牵引变电所从电力系统取得电能, 并将电压变换成适合机车使用的电压, 然后供给牵引供电回路, 牵引供电回路将电能供给电力机车使用。

牵引供电回路是由牵引变电所、馈电线、接触网、电力机车、钢轨、回流线、大地, 牵引变电所接地网组成的闭合回路。

### 1. 牵引变电所

牵引变电所的主要任务是将电力系统输送来的 110 kV 或是 220 kV 三相交流电变换为 27.5 (或 55) kV 单相电, 然后经馈电线将单相供电送至接触网上。电压变化由牵引变压器完成, 三相交流电变为单相交流电, 是通过牵引变压器的电气接线来实现的。牵引变电所通常设置两台变压器, 采用双电源供电, 以提高供电的可靠性。变压器的接线方式目前采用三相 Yd11 接线、单相 V/V 接线、单相接线及三相-两相斯科特变压器等。牵引变电所还设置有串联和并联的电容补偿装置, 用以改善供电系统的电能质量, 减少牵引负荷对电力系统和通信线路的影响。

### 2. 牵引供电回路

电力牵引供变电系统是指从电力系统接受电能, 通过变压、变相后, 向电力机车供电的系统。牵引供电回路是由牵引变电所、馈电线、接触网、电力机车、钢轨、大地或回流线构成。另外, 还有分区所、开闭所、自耦变压器站等, 如图 1-1 所示。

### 3. 开闭所

开闭所 (SSP) 是指设有开关, 能进行电分段或变更馈线数目的开关站。

为了增加枢纽地区供电的可靠性和缩小事故的影响范围, 一般设置开闭所。

枢纽地区的供电, 分为由里向外供和由外向里供两种方式。由里向外供在枢纽内设置牵引变电所, 将电能从电力系统引入牵引变电所, 再由牵引变电所变换电压, 将电能由牵引

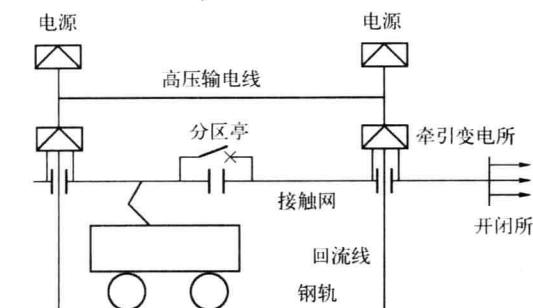


图 1-1 牵引供电系统示意图

变电所引出至牵引供电系统，供给机车电能。“由外向里供”方式在枢纽内不设牵引变电所，是从其他的牵引变电所将电能引入枢纽地区，供给机车电能。这种供电方式将使枢纽地区的供电极为复杂。AT 供电方式时，供电臂较长，在供电臂中部也设开闭所。开闭所应有来自不同牵引变电所的（单线区段）或同一牵引变电所的不同馈线段（双线区段）的两回进线。

开闭所应尽量设置在枢纽地区的负荷中心处，以减少馈线的长度，防止馈线与接触网的交叉干扰。

#### 4. 分区所（SP）

接触网通常在两相邻牵引变电所的中央断开，将相邻的牵引变电所中间的两个供电臂分为两个供电分区。在中央断开处设开关设备可以将两个供电分区连通，此处的开关设备称为分区所。分区所可使相邻的接触网供电区段（同一供电臂的上、下行或两相邻变电所的两供电臂）实现并联或单独工作。如果分区所两侧的某一区段接触网发生短路故障，牵引变电所馈线断路器及分区所断路器在继电保护的作用下自动跳闸，将故障段接触网切除，而非故障段的接触网仍照常工作，从而使事故范围缩小一半。必要时还可以实现越区供电，增加了供电的灵活性和运行的可靠性。

#### 5. 自耦变压器站

电力牵引供电系统采用自耦变压器供电方式时，在沿线每隔 10 ~ 15 km 设置一台自耦变压器。设置时尽量将自耦变压器设于沿铁路的各站场上。同时，尽量与分区所、开闭所合并，以便于运行管理。

#### 6. 牵引网

牵引网是由接触网和回流回路构成的供电回路，完成对电力机车的送电任务。采用 BT 供电方式时，还要有回流线。采用 AT 供电方式时，还有正馈线和保护线。

(1) 供电线：接触网与牵引变电所之间的电连接线。

(2) 接触网：一种特殊的输电线，架设在铁路上方，机车受电弓与其摩擦受电。

(3) 回流线：与钢轨并联、起回流作用的导线。

(4) 分相绝缘器（电分相）：串在接触网上，目的是把两相不同的供电区分开，并使机车光滑过渡，主要用在牵引变电所出口处和分区处。

(5) 分段绝缘器（电分段）：分为纵向电分段和横向电分段，前者用线路接触网上，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。

(6) 供电分区: 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, 也称为供电区。

## 1.3 牵引供电系统供电方式

牵引供电系统首先从电力系统取得电能, 然后由牵引变电所向牵引网供电, 牵引网向电力机车供电, 因为铁路运输的特殊性, 牵引供电系统供电方式遵循一定的要求。

### 1. 电力系统对牵引变电所的供电

在电力牵引区段, 牵引供电的可靠性, 关系到铁路运输的可靠性, 牵引供电一旦停电, 用电区段的铁路就要陷于瘫痪, 导致运输混乱, 造成国民经济重大损失。因此, 《铁路电力牵引供电设计规范》(TB 10009—2005) 规定电力牵引应为一级负荷, 牵引变电所应有两路电源供电; 当任一路故障时, 另一路仍应正常供电。其中两路电源一般来自电力系统的不同变电站(或电厂)。当确有困难时, 可来自同一变电站的不同回路的两段母线。在确定牵引供电方式时, 要考虑供电的可靠性、电源容量及供电的经济性。牵引变电所进线电源的电压等级应为 110 kV 或 220 kV。

### 2. 牵引变电所对牵引网的供电

我国铁路运输分为单线区段和双线区段。

单线区段中, 牵引变电所馈出线有两条, 分别向上行和下行接触网供电。牵引变电所对接触网的供电方式有单边、双边供电和越区供电 3 种。单边供电和双边供电为正常的供电方式。其中单边供电是指供电臂只从一端的变电所取得电流的供电方式, 而双边供电则是指供电臂从两端相邻的变电所取得电流。越区供电是一种非正常供电方式(也称事故供电方式), 是指当某一牵引变电所因故障不能正常供电时, 相邻牵引变电所通过本身的供电臂, 再经分区所的开关设备给故障变电所供电臂临时供电的情况。但是, 不同电力系统供电的接触网分相装置区段, 应加强绝缘, 严禁将两个电力系统接通。

双线区段的供电情况与单线区段类同, 但牵引变电所馈出线有 4 条, 分别向两侧上、下行接触网供电。牵引变电所同一侧上、下行实现并联供电, 提高供电臂末端电压。越区供电时, 通过分区所内的开关设备去实现。

单边供电因其保护和操作简单, 得到了广泛的应用。双边供电非常复杂, 我国没有应用。现在仅介绍我国常用的单线区段的单边供电和双线区段的并联供电。

#### 1) 单线区段的单边供电方式

单线区段一般采用单边供电方式, 是指各牵引变电所相互独立, 接触网的供电分区由牵引变电所从一边供应电能, 相邻两个牵引变电所之间的供电臂(每个接触网供电分区通常称为一个供电臂)相互绝缘, 机车只从相关的某个牵引变电所取电的供电方式。对于两个异相牵引端口的牵引变电所, 通常在牵引变电所出口两馈线相连的接触网上及分区的接触网上设分相绝缘器。当某一牵引变电所因故障失电时, 可将分区所的开关合上进行越区供电。单线区段普遍采用这种供电方式, 如图 1-2 所示。

## 2) 双线区段的单边末端并联供电

由于双线区段牵引变电所同一侧的上下行接触网均供应同相电,故可在接触网供电端用分区所中的断路器连接起来,形成单边末端并联供电,如图 1-3 所示。

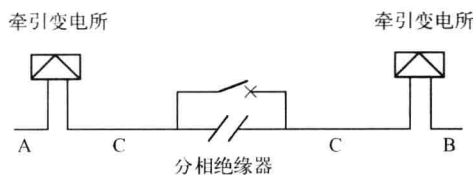


图 1-2 单边供电

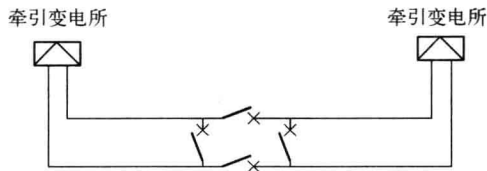


图 1-3 双线区段单边末端并联供电

单边末端并联供电时,电力机车由上下行接触网线路并联供电,使分配在每条接触网中的电流减小,或是说并联线路使得阻抗变小,从而使接触网的电压损失和电能损失减小。

当某一供电臂故障时,为了保证另一供电臂正常供电,需通过继电保护装置自动将末端并联的断路器打开,这样缩小了停电的区域;如果是某一牵引变电所故障,则接通两供电分区相连的断路器,实现由另一牵引变电所的越区供电。双线区段普遍采用这种供电方式。

## 3) 双线区段的单边全并联供电

单边全并联供电是在每个车站利用负荷开关将上下行接触网并联,形成并联网络。并联负荷开关可自动投切,也可由设于车站的远动终端由电力调度控制,如图 1-4 所示。

全并联供电的优点是:比末端并联供电能更有效地减小接触网阻抗,降低接触网电压损失和电能损失,另一方面又能对接触网的短路故障进行更有效的保护。

## 3. 牵引网的供电方式

牵引网的供电方式有直接供电方式、带回流线的直接供电方式、自耦变压器供电方式、吸流变压器供电方式和同轴电力电缆供电方式。

### 1) 直接供电方式

牵引变电所将电能通过馈电线传输到接触网,接触网通过受电弓连接到机车的变压器一次侧,然后通过钢轨流回牵引变电所,如图 1-5 所示。直接供电方式供电距离单线一般 30 km 左右,双线一般 25 km 左右。这种方式优点是结构简单、投资少,其主要缺点是机车电流会经由钢轨、大地流回牵引变电所,对通信线路产生很大影响,钢轨电位较高。

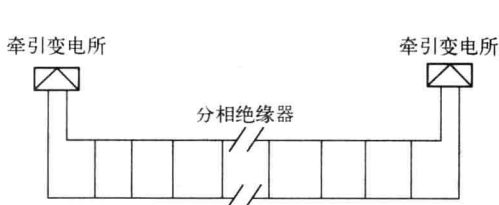


图 1-4 双线区段的单边全并联供电

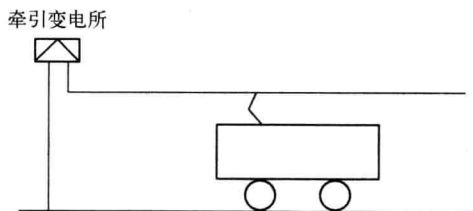


图 1-5 直接供电方式

### 2) 带回流线的直接供电方式

带回流线的直接供电方式简称 DN 供电方式,它是在直接供电方式的基础上,在接触网

支柱上架设一条与钢轨并联的回流线，如图 1-6 所示。

增加回流线后，原来流经钢轨、大地的电流，大部分改由架空回流线流回牵引变电所，其方向与接触网中馈线电流方向相反，架空回流线与接触网距离较近，两个电流互相耦合，显著地削弱了接触网和回流线周围空间的交变磁场，从而使牵引电流在邻近的通信线路中的电磁感应影响大大减小，因此，对邻近通信线路的影响大为降低，钢轨电位也有所降低。

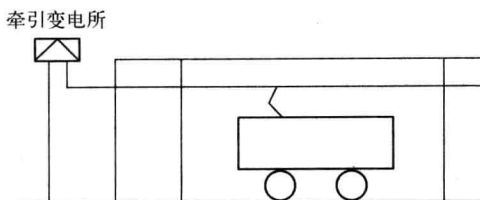


图 1-6 带回流线的直接供电方式

### 3) 自耦变压器供电方式

自耦变压器供电方式又称为 AT 供电方式。自耦变压器（Auto-Transformer）是一种电力变压器，并接与接触网（C）、钢轨（T）和正馈线（F）之中。这种方式由接触网、钢轨、正馈线和自耦变压器组成供电回路，并在接触网和正馈线之间每隔 10 ~ 15 km 并入一台自耦变压器，其中心抽头与钢轨连接，为了减少对通信线路产生的电磁干扰，正馈线与接触悬挂同杆架设于接触网支柱的田野侧。55 kV AT 供电模式于 1960 年代在日本新干线率先得到应用并发展，我国在 1980 年修建的京秦线几乎照搬了这种模式，如图 1-7 所示。法国、前苏联则采用  $2 \times 27.5$  kV AT 供电模式。近年来，这种模式在我国高速铁路中广泛采用，如图 1-8 所示。55 kV AT 供电模式供电能力比  $2 \times 27.5$  kV AT 供电模式要好。无论是哪种模式，其供电电压提高一倍，牵引网阻抗变小，都使供电距离增长，且对通信的影响是相似的。

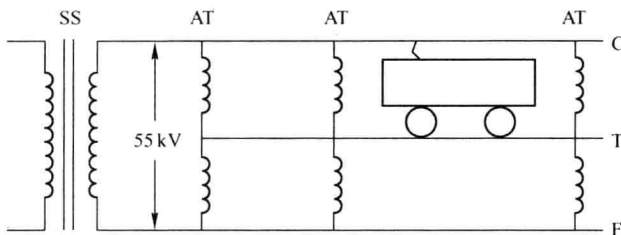


图 1-7 55 kV AT 供电模式

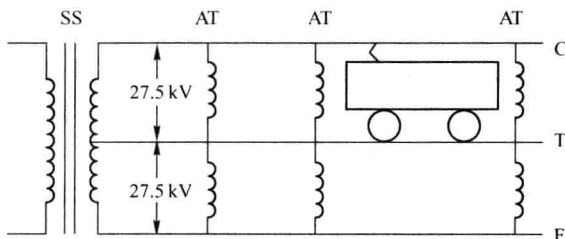


图 1-8  $2 \times 27.5$  kV AT 供电模式

实际的 AT 供电方式往往还增加一根接地保护线（PW，Protective Wire）。在 AT 处，保护线与接触悬挂金属支座或双重绝缘子中部相连，并与钢轨连接，在自动闭塞区段则与钢轨电路中的信号扼流线圈中点相连。保护线电位一般在 500 V 以下，正常情况下不流过牵引电