

贺威俊 高仕斌
张淑琴 王 勋

编著



电力牵引供变电技术

Dianli Qianyin

Gongbiandian Jishu



西南交通大学出版社

<http://press.swjtu.edu.cn>

电力牵引供变电技术

贺威俊 高仕斌 编著
张淑琴 王 勋

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了交流与直流电力牵引供变电技术的基本理论、电气设备与主系统工作原理、设计计算、运行分析和实际知识。全书共分六章,内容包括:交、直流高压电器与开关设备;交、直流牵引变电所电气主结线与配电装置;供变电系统常规控制、信号、监测电路与操作电源;变电所微机监控与综合自动化系统;交、直流牵引变电所设计等。全书以交流电力牵引供变电系统技术为主体,对现代城市地铁、轻轨交通和工矿直流电力牵引供变电系统相关主要内容,也做了必要的阐述。

本书具有取材新颖、重点突出、理论与实际并重和注重能力培养等特点,是高等学校电气工程及其自动化(铁道电气化)专业教材,也可作为工业自动化、交通工程、电力系统自动化等专业以及其他相近专业的参考教材。同时也可供铁道电气化、电力系统及其自动化、城市轨道交通电气化、电力部门和工矿电气化运输部门运行管理、设计与科研等有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引供变电技术 / 贺威俊等编著. —成都: 西南交通大学出版社, 1998 (2005.9 重印)
ISBN 7-81104-151-0

I. 电... II. 贺... III. 电气化铁道—供电装置
IV. U223

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 006228 号

电力牵引供变电技术

贺威俊 高仕斌 张淑琴 王 勋 编著

*

责任编辑 张 雪 林 贞

责任校对 韩松云

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 18.75

字数: 470 千字

1998 年 1 月第 1 版 2005 年 9 月第 2 次印刷

ISBN 7-81104-151-0/U·016

定价: 25.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

重印说明

《电力牵引供变电技术》自 1998 年 1 月出版以来，已使用近八年。由于该教材的内容和体系完善，反映了近年发展较快的电力牵引供变电系统内容，深受教师、学生和现场工程技术人员的欢迎，作为专业骨干课程教材显示出长久的生命力。为满足高校教学和现场需求，现重新排版予以出版，并更正了原教材中的个别错漏之处。

2005 年 8 月

前 言

本书是根据铁道部电力牵引与铁道电气化专业教学指导委员会 1994 年上海会议确定的教材编写计划编著的。为适应近年来经济建设和教育改革深入发展的需要,原 1982 年编写出版的《电气化铁道供变电工程》试用教材,已确定按《电力系统分析》和《电力牵引供变电技术》分册编写。本书在原教材的基础上,从内容广度、深度、覆盖面和新技术应用等方面,做了较大变动和补充,它是电气工程及其自动化(铁道电气化)专业的教学用书,适合于新修订教学计划中规定为 70~80 总学时(含必修课、课程设计、实验和部分选修课学时总计)的教学安排使用,也可作为相近专业的教学和参考用书。

电气工程及其自动化(铁道电气化)专业的培养目标,明确规定了电力与控制系统(即强电与弱电)并重的方针,作为本专业的主干专业课程之一。《电力牵引供变电技术》除讨论电力系统中、低压(10~220 kV)输电和变配电设备主系统及其控制的一般原理、特性外,还着重介绍单相工频交流电力牵引和直流电力牵引供电系统特殊设备及其控制、监测等二次设备的工作原理与特性,该系统对三相电力系统的影响与内在联系等特殊问题,以后者作为主线贯穿于全书。

本书编撰中,着力从教学改革的全局统筹考虑。首先从本课程在专业培养中的重要地位与作用,确定了教材的内容和体系。此外,力图以教材为载体,指导并推进本课程有关各教学环节的改革与相互协调配合。为此,教材和附录中增加了相应内容,以期进行探索。编者认为,专业课教学应贯彻理论与实践并重、注重能力培养的方针,本课程必须改革教学方法(如采用电化教学等)、精讲多练、加强实践性教学环节,把分析计算、设计实验(上机)能力的培养落到实处。而在整个多环节教学过程中,课堂讲授和教材必然要发挥主导作用。

基于以上认识,规划和重订了本书内容。全书共分六章,主要包括:高压电器与高压开关设备;牵引变电所和供电装置电气主结线与高压配电装置;供变电系统的常规控制、信号、监测电路和操作电源,变电所微机监控与综合自动化系统;交流与直流牵引变电所设计等。最后附有关本课程教学实验(含仿真)项目、课程设计与要求的建议,以及常用电气设备与仪表技术数据。为便于自学和加深理解,每章后附有思考题和习题纲要,其中带*者可作为选做题(教师可参照纲要要求给出习题,或由学生自行设计某些习题)。

与原《电气化铁道供变电工程》教材相比较,本书加强和充实了主设备和控制系统(二次接线)的理论和运行分析;首次增加了现代城市地铁、轻轨交通与工矿运输直流电力牵引供变电系统内容;加强了对高速、重载电力牵引供电设备及控制特点的介绍;为充分反映新技术、新设备、新成果在本学科领域的应用和发展,新增加一章系统介绍微机数字监控与综合自动化原理及运行的内容,并增加了可靠性技术应用和不对称、非线性电力牵引负荷在电度量、对电能质量影响等方面特殊问题的分析介绍。与此同时,对某些传统内容或相对陈旧的技术,在保证基本原理介绍的前提下,作了精简和删节。

本书各章节的编著者为:第一、第三(第七节除外)、第五、第六(第九节除外)章和附录

一,西南交通大学贺威俊教授;第二章(第七、第八节除外),西南交通大学高仕斌副教授,其中第七节由华东交通大学王勋副教授,第八节由王勋、贺威俊共同完成;第四章,西南交通大学张淑琴、贺威俊教授,其中第一、第五节和第二节四、五部分与第三节第三部分,主要由张淑琴完成;第三章第七节、第六章第九节和附录二、由王勋完成。全书由贺威俊主编,并负责统稿和校阅。由西南交通大学简克良教授担任本书主审。书稿完成后,邀请有关院校、设计、运行管理等部门的同行专家进行了认真的评阅、审议,西南交通大学钱清泉教授、李治教授分别对部分章节作了重点审阅,与会专家对本书一致给予肯定,并提出了宝贵意见。

在本书调研和编写过程中,西南交通大学教务处和电气工程学院领导给予了多方面鼓励和支持,同时得到西南交通大学铁道电气化和继电保护教研室有关老师、西南交通大学微机保护与综合自动化研究室同仁的大力支持,铁道部天津电气化设计研究院、第二设计院电化处、成都铁路局供电科、华东交通大学电气工程系、成都电业局等单位提供了必要的资料和有益的建议,特别是铁二院电化处沈彬振总工、倪幼真和贺蓉工程师、西南交通大学分校张秀峰副教授和天津电化院王立天高工等,给予了多方面协助和关注,特此一并致以衷心地感谢。

作者还要向西南交通大学出版社领导和有关人员对本书出版的全力支持表示感谢,特别是对责任编辑张雪、林贞同志在本书编辑过程中认真负责和精益求精的工作作风,深为敬佩。使本书在荣获铁道部“九五”计划重点教材立项(现已审批)的情况下,得以顺利出版。

由于编著者水平所限,书中可能存在某些缺点和错误,敬希读者和使用单位批评指正。

本书写成时,正值西南(唐山)交通大学建校100周年(1896—1996),谨以此作为母校百年校庆献礼!

作 者

1996年10月于成都

主要文字符号与缩写词意义

一、常用物理量文字符号

A ——电度量, 热脉冲
 B ——磁感应强度, 电纳
 C ——电容, 热稳定系数
 c ——比热
 d ——故障点
 $E(e)$ ——电势(e 为瞬时值), 弹性模量
 F ——力, 不可靠度
 f ——频率, 单位长度上的力, 误差
 G ——地, 地电位
 H ——磁场强度, 高度
 $I(i)$ ——电流(i 为瞬时值), 断面二次矩
 J ——转动惯量
 j ——经济电流密度
 K ——系数
 L ——长度, 自感
 M ——互感, 转矩, 力矩
 m ——质量
 P ——有功功率, 可用度, 荷载

Q ——无功功率, 热量, 热效应
 R ——电阻, 可靠度, 钢轨
 S ——视在功率, 截面
 T ——时间, 温度, 周期, 时间常数
 t ——时间, 时限, 温度
 $U(u)$ ——电压(u 为瞬时值)
 V ——速度, 风速
 W ——绕组匝数, 截面系数
 X ——电抗, 未知量
 Z ——阻抗
 ω ——角频率
 Δ ——增量, 附加分量
 θ ——温度
 τ ——温升
 α, β ——换热系数, 相位, 相角
 δ ——相位差, 误差
 ρ ——电阻率
 φ ——相角
 Φ ——磁通

二、常用元器件、设备文字符号

B ——变压器
 C ——电力系统
 D ——二极管, 电动机
 F ——发电厂, 负荷开关
 G ——发电机, 隔离开关
 DL ——断路器
 GDL ——直流快速自动开关
 DWY ——稳压二极管
 LH ——电流互感器
 DLH ——直流电流互感器
 qB ——牵引变电所
 YH ——电压互感器
 DYH ——直流电压互感器
 J ——继电器

RCT ——硅整流机组
 SCR ——可控硅管
 T ——晶体三极管
 UJT ——单结晶体管
 RD ——熔断器
 HQ ——合闸线圈
 HC ——合闸接触器
 $FQ(TQ)$ ——分(跳)闸线圈
 LJ ——电流继电器
 SJ ——时间继电器
 XJ ——信号继电器
 $KK(WK)$ ——控制开关, 控制键
 $KM(XM)$ ——控制(信号)系统小母线
 $YK(YX)$ ——遥控(遥信)

三、常用下角注文字符号

b——保护	max——最大
ch——充电	min——最小
cj——冲击	jy——绝缘
d——短路	g——工作
e——额定	gh——关合
eq——等效, 等值	kd——开断
f——负荷, 放电	p——平均
fz——非周期分量	r——发热, 热稳定
j——基准, 断电器	x——相
h——电弧	Z——周期分量
hf——恢复	xu——容许
js——计算	zd——整定
dw——动稳定	t——某时刻

四、常用缩写词意义

AT——Auto-Transformer(自耦变压器)
BT——Booster Transformer(吸流变压器)
DF——Direct Feeding(直接供电)
SS——Sub - Station(变电所)
SP——Section Post(分区所)
SSP——Sub - Section Post (开闭所、辅助分区所)
FSP——Feeder Switching Post(馈线开闭所)
LRT——Light Rail Transit(轻轨快速运输)
CVT——Capacitive Voltage Transformer(电容式电压互感器)
GIS——Gas Insulated Switchgear(全封闭组合电器)
MTBF——Mean Time Between Failure(故障间平均时间)
MTTR——Mean Time to Repair(平均修复时间)
MTTF——Mean Time to Failure(故障前平均时间)
MPS——Minimal Path Set(最小路集)
IAS——Integrated Automat System(综合自动化系统)
SCS——Microcomputer Based Supervisory Control System(微机监控系统)
UIAS——Unmanned operation and Integrated Automation for Substation(变电所无人值班综合自动化)
ALF——Analog Low - path Filter(模拟低通滤波器)
VFC——Voltage - Frequency Conversion(压—频转换)
RTU——Remote Terminal Unit(远动终端)
SCADA——Supervisory Control and Data Acquisition(监控和数据采集系统)
LAN——Local Area Network(局域网)

目 录

第一章 概 论

第一节 电力牵引类型及其发展	1
第二节 电力牵引供电系统组成与功能	4
第三节 电力牵引供电系统一次电气设备和监控设备简介	7
思考题	9

第二章 高压电器与开关设备

第一节 高压电器的作用及分类	10
第二节 交、直流电弧的形成及熄弧原理与方法	11
第三节 断路器开断短路电流的工作状态及暂态分析	18
第四节 高压断路器的构造及工作原理	23
第五节 高压断路器的操动机构	45
第六节 SF ₆ 全封闭组合电器(GIS)	50
第七节 熔断器与高压负荷开关	55
第八节 直流快速自动开关	57
第九节 高压互感器	61
思考题与习题纲要	78

第三章 电气主结线与高压配电装置

第一节 电气主结线的功能、基本要求与设计原则	80
第二节 电气主结线的基本结线形式	82
第三节 牵引负荷侧电气结线特点	86
第四节 交流牵引变电所和供电装置电气主结线	87
第五节 直流牵引变电所主结线构成、特点及其运行	94
第六节 确定主结线方案的技术经济分析与比较	105
第七节 主结线与一次供电系统可靠性分析	112
第八节 配电装置类型及对其基本要求	121
第九节 屋内配电装置	122
第十节 屋外配电装置	129
思考题与习题纲要	136

第四章 供变电系统控制、信号、监测电路与操作电源

第一节 控制方式和二次接线概述	138
第二节 高压开关的控制、信号回路	143
第三节 中央信号系统	155
第四节 测量系统与绝缘监测电路	163
第五节 弱电选线控制简介	172
第六节 交、直流自用电系统与操作电源	175
思考题与习题纲要	186

第五章 微机监控与综合自动化系统

第一节 传统监控系统工作模式及其存在的问题	188
第二节 微机监控与综合自动化系统概述	190
第三节 模拟量输入、输出通道	193
第四节 开关量输入、输出通道与输入方式	203
第五节 牵引变电所综合自动化系统典型结构形式与主要功能	207
第六节 监控系统实时数据处理、开关控制的实现及应用软件设计	214
思考题与习题纲要	223

第六章 交流与直流牵引变电所设计

第一节 概 述	225
第二节 电器与载流导体的发热和负载能力	225
第三节 短路电流通过导体时的发热和电动力计算	229
第四节 选择电气设备时短路计算点的确定	236
第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择	237
第六节 开关设备的选择	247
第七节 仪用互感器的选择	250
第八节 直流牵引变电所设计的若干问题	256
第九节 交流牵引变电所电气主结线设计示例	263
第十节 接地装置的设计	270
思考题与习题纲要	275

附录一 本课程教学实验项目和课程设计内容、要求示例	277
---------------------------	-----

附录二 常用导体与电气设备技术数据	279
-------------------	-----

参考文献	290
------	-----

第一章 概 论

在我国，电力牵引是一种新型有轨运输牵引动力形式。在干线铁路、城市交通运输和工矿运输中有着广泛的应用。本章将简要介绍电力牵引类型及其发展、牵引变电所和供电装置的结构类型、供变电系统主要电气设备与监控设备的作用，同时指出本课程教学的目的与任务。

第一节 电力牵引类型及其发展

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、电动车组和城市电动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地下铁道、城市交通轻轨运输系统和工矿运输系统。有轨运输电力牵引具有一系列优点：一是它本身不带燃料，为非自给式牵引动力，并由大容量电力系统供电，机车或动力车总功率大，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。二是不造成空气和环境(噪声)污染。三是电力牵引的总效率(包括发电厂、输变电和供电系统以及机车、电动车辆效率在内)，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(电力牵引是指全部或部分为水电厂供电)。例如按 20 世纪 90 年代初我国水电发电量约占全国发电量 27%，计算得到的当时电力牵引加权平均总效率为 29.5%，而现代内燃机车总效率约为 22%~24%，汽车运输则更低。因而采用电力牵引可有效节约能源，并降低运营成本。四是随着信息技术、微电子技术的广泛应用，电力牵引系统易于实现全面自动化和信息化，从而大力提高劳动生产率和经济效益。当然，电力牵引也存在某些缺点，主要是其一次投资费用较同类运输工具要高些。

从上可知，电力牵引的综合优势是明显的，自 20 世纪 50 年代以来，铁路牵引动力电气化已成为世界范围内铁路技术革命的方向、铁路现代化的标志。到 1995 年，全世界铁路电气化里程占铁路总里程的比例已达 19% 以上，比十几年前增长 5%~6%。与此同时，许多大城市的公共交通运输模式，在经历了多种运输工具的运营实践、比较后，发展地下铁道和城市轻轨交通电力牵引，已日益引起人们的广泛重视。

一、我国铁路发展电力牵引的适应性和重大意义

我国铁路 1961 年首先在西部地区建成第一条单相工频交流电气化线路，三十多年来，从山区铁路发展到东部繁忙干线，电气化铁路通车里程已达 1 万公里，1994 年底电力牵引

里程占铁路总里程的比例为 15%，承担铁路总运输工作量的比重为 24.8%。预计到 2000 年，铁路电气化里程将达 1.8 万公里，占全国铁路总里程的比例提高到 27%，完成铁路总运输工作量的比重，则增至 42%。到那时，配合内燃线路的发展，我国铁路运输的紧张状况将有所缓解，并将有效促进铁路技术的进步。

新近修订的“铁路主要技术政策”，在确定铁路技术发展的总原则中，明确提出应以提高运输能力为中心，保证运输安全为前提，不断提高运输质量和效益。为此，采取的重要战略措施之一是积极进行牵引动力改革，大力发展电力牵引，合理发展内燃牵引；加速繁忙干线的电气化，逐步提高电力牵引承担运输总工作量的比重，并在各种牵引形式中占主导地位。国家和铁路部门制定的国民经济与社会发展近期及远景规划中，也进一步肯定了上述方针与政策。

我国制定铁路大力发展电力牵引的政策并积极推进实施，是和我国地广人多、地貌复杂（山区、高原多）、资源分布不均衡，以及铁路网的长度和密度远不能适应国民经济发展，长期以来铁路运输一直成为制约国民经济发展的瓶颈等具体情况密切相关的。按照我国国情和国家的财力、物力，要又快又省地提高铁路运输能力、有效地解决铁路运能和不断增长的运量之间的矛盾，必须从铁路本身的技术改革，首先是牵引动力改革和适当增建新线与改善路网结构两方面着手。根据我国和世界各国铁路技术改革的长期实践经验证明，大力发展电力牵引、加速繁忙干线电气化，是在最短时间内提高铁路运输能力的一条有效途径。

发展电力牵引，对我国铁路的适应性和重要意义主要表现在以下几方面：

(1) 提高运输能力和效益，主要取决于对列车重量、密度和速度（称为铁路运输三要素）的优化组配。我国铁路基本上是采用客、货共线的运输模式，在线路固定、设备定型的情况下，运输三要素是相互制约的。一般来说，在扩大铁路输送能力方面，主要依靠提高行车密度和列车重量；在加速客、货列车运行速度和加速机车车辆周转方面，提高行车速度是重要因素。

为适应社会主义市场经济的需求，根据不同线路和运输模式的特点，尤其对于客、货共线繁忙的干线铁路，提高客、货列车速度和货物列车重量，积极增加行车密度都是刻不容缓的现实任务。

牵引动力的类型和功率是提高列车重量的主要因素，也是提高行车速度、密度的关键。电力机车不带原动机，机车功率主要受牵引电机绝缘材料和悬挂空间的限制。目前国产 SS-4 电力机车功率（货运用）为 8 轴、双节 6 400 kW，最高速度 100 km/h，国外已达 12 轴 10 000 kW 以上，最高速度 120 km/h；国产 SS-8 客运电力机车最高时速可达 170 km/h，功率为 3 600 kW。而内燃机车功率（电传动式），则因柴油机、交流发电机、整流器和传动、辅助设备体积大，受车体空间限制以及柴油机加工技术要求极高等条件影响，其单节（机）功率不可能做到很大。国产主型 DF₄ 内燃机车功率为 2 430 kW，最高速度可达 120 km/h。引进的 ND₅ 或国产 DF₈ 内燃机车功率均为 2 944 kW 或稍大些（DF₈）。最高时速 170 km/h 的 DF₁₁ 内燃机车轴功率为 3 040 kW。

在站线长度允许的情况下，如列车重量为 4 000 t，则牵引动力在平原 6‰限坡下，可采用 SS-3 电力机车或 DF₈ 内燃机车；列车重量增至 5 000 t 时，根据试验需采用 SS-4 电力机车或功率更大的内燃机车牵引（4‰限坡用单机，6‰限坡用双机）。我国主型货运电力、内燃机车技术特性列于表 1.1。

我国主型货运电力、内燃机车技术特性

表 1.1

技术参数		电 力 机 车		内 燃 机 车	
		SS-3/SS-1	SS-4	DF ₄	ND ₅
机车功率/kW		4 800/4 200	6 400	2 430	2 944
启动牵引力/N		470 736/487 408	627 648	401 597	450 141
最低计算速度/km/h		47.2/41.2	51.0	20.0	22.2
各种限坡下的启动 牵引重量(t)	4‰	/5 350	6 900	4 400	4 950
	6‰	/4 200	5 400	3 450	3 850
	12‰	/2 350	2 950	1 950	2 100

在同等牵引重量情况下,列车速度与机车技术特性密切相关。由表中可知,电力牵引的最低计算速度(限度下)比内燃牵引高一倍以上。电力机车不需加水 and 燃料,机车整备时间短,启动时间短(约 1 min,内燃为 2 min)。此外,电力机车具有有效的电气制动手段,能使列车在长大下坡道上高速行驶时,且空气制动的制动力迅速降低的情况下,保证以较高速度保持安全运行。综合上述各项因素,电力机车牵引的列车技术速度、旅行速度都比内燃机车高。

行车密度牵涉的制约因素较多。电力机车牵引力大,行车速度高,有利于减小双线自动闭塞条件下追踪列车间隔时间,以提高行车密度。

从以上分析可知,采用电力牵引对列车重量、密度、速度三者的优化组配十分有利,从而达到提高铁路运输能力的目的。据研究结果表明,我国沿海三大干线铁路,采用电力牵引后运输能力可达到:旅客列车 45~50 对,重车方向年输送能力为 90~120 Mt,并可提高客运速度至 140~160 km/h 及以上。与采用内燃机车牵引相比,运输能力有较大提高。

对于大运量的煤运和客运繁忙区段,我国已先后修建了大秦电力牵引重载运输专线,列车载重量达 10 000 t 以上,在广深铁路开通了时速为 160 km/h 的准高速铁路,并积极进行时速为 250 km/h 以上高速试验区段的试验、研究。可以预见,随着我国铁路运输的发展和运量的不断增长,电力牵引将发挥日益重要的作用。

(2) 铁路电气化为快速、又好又省地缓解我国铁路运输紧张状态提供了有效途径。我国铁路网总长目前为 60 000 km,与国土面积相比较是极不相称的。在短期内要大量投资修建足够的铁路新线是不可能也是不现实的。因为新建铁路要形成运输能力所需周期较长,且新建铁路投资巨大,双线约为 1 200~1 600 万元/km,单线为 600~700 万元/km(20 世纪 90 年代前期)。而铁路电气化的全部单位造价分别约为上述的 1/9~1/10 和 1/7~1/8,建成投产的周期一般为 2~3 年,投资回收期为 8~10 年。结合上述电力牵引对提高运输能力的显著效果,对现有铁路实现电气化和修建电气化新线,其相对投资实际较省,且见效快,综合效益极为有利。

(3) 铁路牵引动力电气化适应我国能源资源结构状况,并可大幅度实现节能。铁路牵引动力现代化的决策必须以国家的能源资源结构和能源政策为依据,并应尽量节约能源消耗。我国一次能源资源以水力和煤炭最丰富,原油储量十分有限。我国能源工业的方针是,以发展电力为中心,以煤炭为基础,积极发展新能源,改善能源结构。为此,我国用以发电的能源占一次能源的比重逐年有所增长,预计到 2000 年可达 33% 以上,其中以火电和水电为主。从能源增长速度看,近十年来电力工业一直保持 9%~10% 的年增长率,1995 年总装机

容量已达 2.1 亿 kW，年发电量为 1 万亿 kW·h，目前一批大型水电厂正在加紧建设。而同期内原油的增长速度一直较慢，石油的消耗量却日益增长，供需缺口的趋势逐渐扩大。

随着发电用一次能源结构的变化，水电及高参数、高热效率火电厂在总发电量中所占比例日益提高，其直接效果是国家宏观的能源利用率增高。对铁路运输采用电力牵引带来的好处是，电力机车总效率可相应提高。据计算，到 2000 年水电占全国发电量比例估计为 40%，则由此得到的电力机车加权平均总效率可达 32% 以上，按 20 世纪 80 年代中期统计，电力牵引完成每万吨·公里运输量折合标准煤的燃料消耗约为内燃牵引的 90% 左右，其年运营费用约为内燃牵引的 70%（主要是省燃料和机车维修费），其节能效果十分可观。

铁路电气化导致对通信线路干扰，对电力系统产生某些不利影响等缺陷。随着现代技术的不断发展，已经获得或正在寻求有效的解决途径。

二、我国城市公共交通电力牵引发展简况

我国大城市的公共交通运输，最早采用有轨电车和公交汽车，以后发展为汽车运输和无轨电车。从 20 世纪 60 年代初开始，个别大城市修建了少量地下铁道。由于汽车数量激增，成为主导运输工具，造成交通堵塞、空气污染、噪声严重，并日益成为城市的一大公害。

近年来，大规模经济建设的迅速发展，大城市结构及其经济布局产生了巨大变化，其辐射城乡的作用日益突出，促使城市流动人口大增，人们出行、活动更为频繁。据统计，个别特大城市每天客运量已突破 1 000 万人次，一般大城市主通道高峰期客流量达 1~3 万人次的现象经常出现且已成为大城市普遍存在的公共交通困扰问题。

城市公共交通存在的困扰问题，必须从客运工具革新和运输模式方面加以调整解决。目前，国内外较多采用的公交客运工具有三种：一是大运量的地下铁道，其单向最大小时客运能力为 3~6 万人次；二是中等客运量的轻轨交通运输 LRT(Light Rail Transit)，它是利用轨道作为车辆导向，采用先进信号、调度集中的现代化电力牵引运输系统，其单向最大小时客运能力为 1~3 万人次；三是低客运量的公共汽车、电车，其小时客运能力为 0.4~0.8 万人次。利用这几种运输工具的优化匹配，可因地制宜地构成各种公共交通运输模式，从而达到预期效果。

限于我国的经济条件，地下铁道的造价昂贵，金属、建材消耗量很大，目前只在少数几个特大或中心城市兴建，且工期长、工程量大。据研究比较并结合我国国情，一般大城市采用中等运量的轻轨交通方式。由于其造价较低，线路建在地面或高架(也可少量在地下)，采用立体交叉，车道为半封闭或全封闭的专用轨道，车辆可单行或联挂编列，运营灵活、安全，是一种既经济，又适应性强，具有发展前景的现代城市交通运输系统。目前国内已有若干大中城市在研究筹建或正进行轻轨交通的设计和组织实施。

第二节 电力牵引供变电系统组成与功能

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、牵引网、分区所、开闭所等部分组成;地下铁道与城市轻轨交通的直流电力牵引供电系统则由主变电所、直流牵引变电所、牵引网等组成。各系统组成结构及其与电力系统(一次供电)联系示意图如图 1.1 所示。

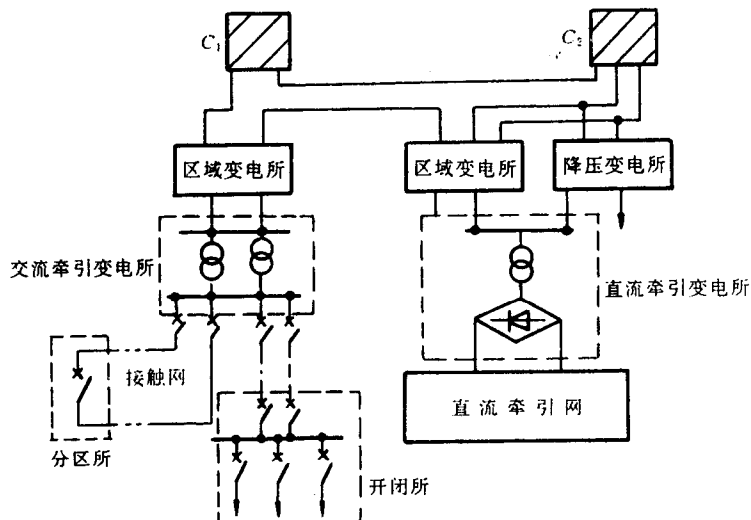


图 1.1 交流与直流电力牵引供电变电系统构成

C_1 、 C_2 —发电厂和电力系统

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 $2\times 25\text{ kV}$ 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。

地下铁道与轻轨交通直流电力牵引供电系统的牵引网供电额定电压,我国采用 750 V 、 $1\,500\text{ V}$ 两种等级,这是由地铁和城市交通线路受净空(特别是地铁)限制、牵引电机整流子换相和大功率硅整流元件反向电压水平,以及安全因素等条件综合考虑确定的。牵引网的接触导线采用接触网和接触轨(第三轨)两种方式。干线和工矿运输直流电力牵引则采用 $3\,300\text{ V}$ 、 $1\,650\text{ V}$ 两种额定电压。

为了对电力牵引供电变电系统各种供电装置的功能与作用有全面的了解,下面简要予以介绍。

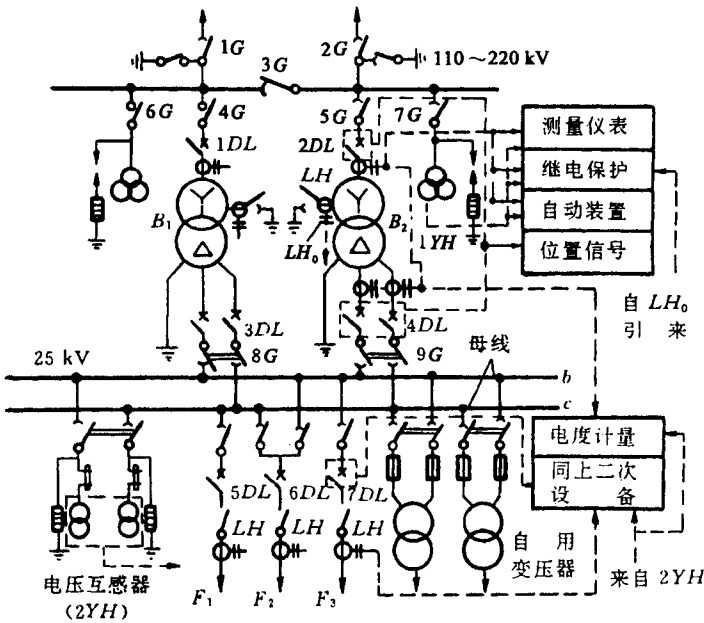
一、交流牵引变电所(简称牵引变电所)

交流牵引变电所是交流工频单相电力牵引供电系统的重要环节,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。

根据交流牵引网的不同供电方式和牵引变电所为抑制单相牵引负荷造成电力系统的不对称影响,可采用不同接线方式与结构的主变压器,区分为三相牵引变电所(一般 $Y/\Delta-11$ 接线主变压器)、单相牵引变电所(含 V/V 形接线方式主变压器),三相一二相牵引变电所(采用特种接线方式,用以变相的平衡变压器)。相对于牵引网不同供电方式而言,则区分为一

般(直供、BT 方式)供电方式牵引变电所和自耦变压器(AT)供电方式牵引变电所。不同供电方式的牵引变电所，其主电气设备和结构也不尽相同。

一般供电方式牵引变电所电气主结线结构和主设备情况，如图 1.2 所示。



注：LH、LH₀ 分别为电流互感器和零序电流互感器，图中虚线为二次线电缆。

图 1.2 牵引变电所主结线与二次设备示意图

二、分区所(SP)

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，如图 1.1 左侧所示。分区所的作用可简述如下：

- (1) 可以使两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。

三、开闭所(SSP)

交流电力牵引系统开闭所，实际上是起配电作用的开关站，一般在下面两种情况或系统中设置。

一是在离牵引变电所较远的铁路枢纽地区，由于站线多，接触网相应复杂，客货运交会、编组和机车整备作业繁忙，致使该地区故障几率增多。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，如图 1.1 所示。

另一种情况是在 AT 供电方式的复线牵引网供电臂中间设置开闭所，由于 AT 供电方式供电电压增高($2\times 25\text{ kV}$)，供电臂距离增长，可达 $40\sim 50\text{ km}$ ，为提高供电灵活性(如接触网停电检修等)，缩小事故停电范围，需在牵引变电所与分区所之间设置开闭所。

四、自耦变压器站

工频单相交流电气化铁道如采用自耦变压器(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。大致和铁路区间的距离一样，应尽量把自耦变压器设于沿铁路的各站场上。同时，应与分区所、开闭所合并，以利运行管理。

五、直流电力牵引系统主变电所和直流牵引变电所

(一)主变电所

主变电所从电力系统的区域变电所或城市降压变电所接受电能，向地铁和城市轻轨交通沿线直流牵引变电所、降压变电所集中供电，并以环网和双电源进线方式保证牵引、电力负荷的不间断供电。主变电所一般设在电气化线路的两端或中间，供电电压为 $10\sim 35\text{ kV}$ 。条件允许时也可从城市降压变电所直接向直流牵引变电所等供电。

(二)直流牵引变电所

直流牵引变电所从环网供电线路的双电源受电，经整流机组变压器降压、分相后，按一定整流接线方式由大功率硅整流器(或可控硅整流器)把三相交流电变换为与直流牵引网相应电压等级的直流电，并向电动车组或电动车辆供电，如图 1.1。整流机组是直流牵引变电所的重要环节，为降低整流直流中的脉动分量和整流变压器一次侧的谐波含量，一般应采用 12 相脉动的整流接线方式。现代整流机组的单机功率可达 $3\ 500\text{ kW}$ 以上。

地铁、城市轻轨交通直流牵引变电所有时常与向车站、区间供电的降压电力变电所合并，形成牵引、降压混合变电所。此时，主电路结构和电气设备与一般直流牵引所相比有所不同。

在有再生电能需向交流电网返送的情况下，直流牵引变电所必须增设可控硅逆变机组(包括交流侧的自耦变压器)，其功能和设备也相应增加，运行、技术都较复杂。直流牵引变电所间距离仅几公里，一般不设分区所和开闭所。

第三节 电力牵引供变电系统一次 电气设备和监控设备简介

为保证安全供电和运行需要，交、直流牵引变电所和各种供电装置中设有各种类型一次电气设备和监控设备。通常把转换与分配电能的设备和载流导体，如变压器、整流器和断路器等称为一次电气设备，包括以下几种：