

# 新编实用电气技术

谈文华 等编著



机械工业出版社

364811

7M  
7-5

# 新编实用电气技术

谈文华 等编著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

这是一本介绍电气技术的实用读物，兼具普及与提高作用。有助于改善电工队伍的技术状况、提高素质、保障安全、促进生产。全国有50多位电业、科技及培训部门具有多年实际工作经验的工程技术人员、技师、专家和教授参加了编写与审订。

全书分十章，系统地介绍了各类供用电设备的施工安装、运行维护、检修测试及节电节能等方面的实用技术。书中内容丰富、题材充实，结合生产、注重实用，简炼扼要、通俗易懂。此外，书末附录有似简明手册，尤其适于广大电工在实际工作中查找应用。

本书属广大电工在实际工作中常用的工具书与参考书，又可作为对各行行业电工，包括高低压安装维修电工、变配电值班电工、内外线电工以及电业职工和农村电工进行技术培训的综合性教材；也是初、中级电工自学成才的适用读物；同时，还可供各部门电气技术人员和安技人员，大中专或技校师生，以及日常接触电器的各类人员阅读。

### 新编实用电气技术

谈文华等编著

责任编辑：吴柏青 责任校对：贾立萍  
封面设计：肖 晴 版式设计：霍永明  
责任印制：王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 36<sup>3</sup>/<sub>4</sub>·插页 2·字数 902 千字

1992年12月北京第1版·1992年12月北京第1次印刷

印数 00,001—12,400·定价：18.00元

ISBN 7-111-03529-1/TM·442

**主 编**

谈 文 华

**副 主 编**

胡 榕 徐少强 孙立军 张 瑶

**编 著 人 员**

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 蔡泽发 | 崔景云 | 于德福 | 陈殿松 | 余继荣 | 肖树阳 |
| 马士林 | 余 刚 | 闵汉强 | 谈晓彬 | 柏 涛 | 刘砚青 |
| 谭国强 | 顾国生 | 朱玉库 | 李 竞 | 刘绍祥 | 吴光亚 |

## 编 委 会 名 单

|     |     |     |     |     |      |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 主 任 | 金辅夏 |     |     |     |      |     |
| 副主任 | 张伯盛 | 张耀臣 |     |     |      |     |
| 编 委 | 王 瑞 | 关有成 | 黄从参 | 肖伯凡 | 李华文  | 翟俊豪 |
|     | 陈光汉 | 欧 材 | 肖宏正 | 刘延辉 | 徐 健  | 郭增力 |
|     | 胡兆福 | 王榆青 | 施玉芳 | 王建中 | 潘宏祥  | 戴竹林 |
| 顾 问 | 谈萍舟 | 丁秀珍 | 陆 逵 | 张金升 | 吴毅光  |     |
| 主 审 | 林 信 | 李致恒 |     |     |      |     |
| 审 稿 | 蔡若吾 | 郑文彬 | 曲 义 | 傅昌锟 |      |     |
| 编 著 | 谈文华 | 胡 榕 | 徐少强 | 孙立军 | 张 瑶等 |     |
| 协 编 | 周欣康 | 杨绍璠 | 陈炳生 | 董立山 | 吴安关  | 董其国 |
|     | 万有顺 | 刘学用 | 孙德林 | 钟惠良 | 谈才昌  | 刘玉华 |
|     | 江宝华 | 詹 宏 | 常德元 | 江林生 | 黄 坚  | 曹永安 |
| 整 理 | 陈 洁 | 谈笑君 | 徐涛茜 | 王雪芳 | 章敏敏  |     |

# 前 言

电力在现代工农业生产、科学实验及人民生活等各个领域中获得极为广泛的应用。离开了电力，要想实现人类社会的物质文明与精神文明是不可能的，若缺乏一支技术过硬的强有力的电工队伍，要想实现我国的现代化同样也是办不到的。

众所周知，电气工种属一种特殊工种，必须经考核持有合格证方能上岗；而电气事故，对企业、部门或个人来说乃一大灾难，于国于民，十分有害。党和政府历来都很重视安全生产与劳动保护，并把它作为消除生产中的不安全因素、防止伤亡事故、保障职工健康及顺利完成各项任务的一种政策性措施。

近几年来，各地区各部门虽然对各行业电工在技术培训和安全管理方面做了许多工作，取得了不少成绩；但培训内容与方式较为单调或重复，适用教材短缺、系统性教材更少，每年的培训、考核和发证工作尚未能注重实质性提高，甚至流于形式的现象也还程度不同地存在，致使实践中暴露的问题仍是不少，各种各样的电气事故屡有发生，严重地威胁着电网的安全运行。这反映了电气技术与安全知识还普遍地较为缺乏，现有电工队伍的技术素质和安水平亟待提高。

随着我国现代化建设事业的不断发展，各部门、各行业从事电气工作的技术队伍迅速扩大；发供电设施和用电设备容量的增大；新产品、新工艺的涌现，以及电气技术的更新和自动化程度的提高，对广大城乡电工的技术素质与安全技能也同时提出了更高的要求。

鉴于上述情况，为更好地贯彻“安全第一”的生产方针，加强培训、讲求实效；切实提高广大电工的实际技能和安全水平，努力实现安全经济的发供用电局面；为满足各行业安装维修电工、变配电值班电工以及内外线电工等能卓有成效地学习和更新电气技术知识的需要，针对基层电工的实际状况与发展要求，结合历年来工厂与农村的用电实践，以及电工培训工作的特点，在认真总结经验教训、分析各类电气事故原因及寻求对策的基础上，编写了这本《新编实用电气技术》。

撰稿时本着结合生产、讲求实用、条理清晰、层次分明的原则，系统地介绍了供用电设备的施工安装、运行维护、检修测试及节电节能等方面的实用技术，尤其还注意了对新技术、新工艺、新产品的介绍，且书中对电气设备与元器件统一采用了符合新国家标准的图形符号和文字符号。选材上既突出重点又兼顾全面，既强调内容的专一性，又注重全书的系统性。使该书既可供各地举办电工培训班时作为综合性教材，又可供为各类专业电工（如安装维修电工或变配电值班电工）办班时作为选学教材；既能利于城乡电工在实际工作中作为工具书经常参考应用，又可作为广大电工悉心钻研、自学成才的适用读本。

书中每章每节以及节内各条目，既可独立，编写时又考虑了前后内容的连贯性和整体的系统性；书末附录有似简明手册，分别计算及精选了众多电工常用数据及技术资料，同时列成表格形式，清楚醒目。这就有利于各行业电工在日常工作中针对实际难点或异常情况，查找书中相关内容或附录中数据与资料，解决问题，保障安全，搞好生产。

成书过程中，承蒙中国电机工程学会城市供用电专委会，全国农村电气化学会，中国科

技情报研究所《电工技术》杂志编辑部、培训部，《供用电》杂志编辑部，《农村电气化》杂志编辑部，以及山东工业大学、潍坊发电厂、山东省电力局、济南供电局、枣庄电业局、徐州电业局、常州供电局等单位，还有宋永亮、陈学杰、赵培臣、张超、周季平、沈镜明、张佐民、马法华等同志的支持与帮助，在此一并表示由衷的感谢。

电气技术属于一门综合性技术，它所涉及的领域广、专业门类多，加之时间仓促、水平所限，书中疏漏不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

1991年8月

# 目 录

|                               |     |                      |     |
|-------------------------------|-----|----------------------|-----|
| 前 言                           |     | 第六节 照明装置的安装与使用       | 283 |
| 绪 论                           | 1   | 第六章 电气仪表与计量          | 297 |
| 第一章 电力网与变电所                   | 7   | 第一节 电气仪表的分类与测量误差     | 297 |
| 第一节 电力系统概述                    | 7   | 第二节 电气仪表的选用和维护校验     | 304 |
| 第二节 变配电所的设置                   | 13  | 第三节 安装式电气仪表          | 311 |
| 第三节 变配电所的主结线                  | 20  | 第四节 电能表与电能计量装置       | 324 |
| 第四节 变配电所的结构与布置                | 26  | 第五节 携带式电气仪表          | 340 |
| 第五节 变配电所的二次回路                 | 34  | 第七章 交流电动机            | 351 |
| 第六节 变配电所的倒闸操作和事故处理            | 43  | 第一节 异步电动机参数与运行特性     | 351 |
| 第七节 变配电所的运行维护                 | 53  | 第二节 电动机的选择安装和运行维护    | 360 |
| 第二章 电力变压器                     | 62  | 第三节 电动机的故障检测与检修工艺    | 376 |
| 第一节 变压器基本知识                   | 62  | 第四节 单相异步电动机          | 392 |
| 第二节 变压器的安装试验与投运               | 74  | 第八章 电力拖动控制电路         | 404 |
| 第三节 变压器的运行和维护                 | 91  | 第一节 电动机的起动、调速及制动     | 404 |
| 第四节 变压器的检修                    | 95  | 第二节 电动机常用控制电路及保护方式   | 418 |
| 第五节 变压器油                      | 104 | 第九章 低压电器及配电屏         | 432 |
| 第六节 特殊变压器                     | 111 | 第一节 低压电器分类和选用原则      | 432 |
| 第三章 断路器及开关柜                   | 124 | 第二节 常用低压电器的安装与使用     | 438 |
| 第一节 油断路器                      | 124 | 第三节 低压成套配电装置         | 463 |
| 第二节 真空断路器和SF <sub>6</sub> 断路器 | 134 | 第十章 节电和无功补偿          | 468 |
| 第三节 高压开关柜                     | 140 | 第一节 节电途径与提高功率因数      | 468 |
| 第四节 母线和绝缘子                    | 152 | 第二节 电容器容量选择及接线方式     | 474 |
| 第四章 架空线路与电缆线路                 | 160 | 第三节 电容器的安装和检修        | 480 |
| 第一节 架空线路的作用及构成                | 160 | 第四节 电容器的运行与维护        | 484 |
| 第二节 架空线路的技术要求                 | 171 | 第五节 电力变压器的经济运行       | 490 |
| 第三节 架空线路施工技术                  | 180 | 附录 电工常用数据及技术资料       | 500 |
| 第四节 架空线路的运行维护                 | 200 | 表 1 电气技术文字符号(国家标准    |     |
| 第五节 外线电工常用工具                  | 206 | GB7159—87)           | 500 |
| 第六节 电缆线路及其敷设工艺                | 216 | 表 2 主结线和二次回路常用图形符号   | 501 |
| 第七节 电缆线路的运行和测试                | 227 | 表 3 工厂用电需用系数和低压设备电   |     |
| 第五章 内线工程和照明                   | 236 | 流计算公式                | 504 |
| 第一节 内线工程的原则和环节                | 236 | 表 4 室内外高低压配电装置的最小安   |     |
| 第二节 接户进户和量电配电                 | 241 | 全距离                  | 505 |
| 第三节 室内线路的一般要求                 | 249 | 表 5 6~10kV变电所高低压电器及母 |     |
| 第四节 室内配线的操作工艺                 | 265 | 线选择                  | 506 |
| 第五节 电气照明的技术要求                 | 277 | 表 6 6~10kV线路、断路器及电容器 |     |

|                               |     |                                 |     |
|-------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 的保护配置要求 .....                 | 507 | 表32 塑料(橡皮)绝缘电线(电缆)              |     |
| 表7 SL1系列电力变压器技术数据 .....       | 507 | 的安全载流量 .....                    | 538 |
| 表8 S7与S9系列电力变压器技术数据 .....     | 508 | 表33 架空电力线路的预防性检查周期 .....        | 540 |
| 表9 变压器的临界负载系数及经济运行区域 .....    | 511 | 表34 架空导线常见故障原因及处理方法 .....       | 541 |
| 表10 电力变压器的继电保护配置和熔体选择 .....   | 513 | 表35 常用电气仪表的符号含义和校验周期 .....      | 541 |
| 表11 变压器试验项目及绝缘电阻要求 .....      | 514 | 表36 电流表和电压表的常见故障及处理 .....       | 543 |
| 表12 变压器油的检验项目与标准 .....        | 516 | 表37 万用表和绝缘电阻表的常见故障及处理 .....     | 544 |
| 表13 电力变压器的故障现象与原因分析 .....     | 517 | 表38 新老系列关系对照及部与新系列电动机技术数据 ..... | 546 |
| 表14 查找变压器故障的试验项目和检查方法 .....   | 518 | 表39 直接起动电动机的接线及配套控制设备 .....     | 551 |
| 表15 互感器的故障处理和预防性试验 .....      | 519 | 表40 减压起动电动机的接线及控制设备配套表 .....    | 552 |
| 表16 交流弧焊机的常见故障及处理方法 .....     | 520 | 表41 电动机起动设备常见故障及消除方法 .....      | 554 |
| 表17 10~35kV 高压断路器技术数据 .....   | 521 | 表42 异步电动机的常见故障与处理 .....         | 557 |
| 表18 油断路器的常见故障、原因及处理办法 .....   | 522 | 表43 异步电动机的检修项目及质量标准 .....       | 559 |
| 表19 隔离开关的特性要求和常见故障处理 .....    | 522 | 表44 单相电容电动机技术参数和绕组排列 .....      | 560 |
| 表20 阀型避雷器适用场所及其技术规范 .....     | 523 | 表45 常用电扇及其电动机的技术数据 .....        | 562 |
| 表21 金属排与金属棒的安全载流量 .....       | 524 | 表46 电扇的常见故障及处理方法 .....          | 563 |
| 表22 配电屏安装允许偏差和屏面元件间距 .....    | 525 | 表47 单相电钻技术数据及常见故障处理 .....       | 564 |
| 表23 设备基础用混凝土水灰比与成分比 .....     | 526 | 表48 常用熔丝、熔断器及自动开关的技术数据 .....    | 565 |
| 表24 钢筋混凝土电杆规格和杆高选择 .....      | 527 | 表49 低压电器的常见故障及修理方法 .....        | 567 |
| 表25 架空线路交叉跨越及对建筑物的距离规定 .....  | 528 | 表50 常用照明电光源的性能特点及适用场所 .....     | 570 |
| 表26 LJ、LGJ型裸铝绞线技术数据与载流量 ..... | 530 | 表51 室内照明灯距地面的高度要求 .....         | 572 |
| 表27 6~35kV架空线路的允许负荷与负荷矩 ..... | 531 | 表52 荧光灯的常见故障及检查处理方法 .....       | 572 |
| 表28 高低压架空电力线路的电压损失率 .....     | 532 | 表53 功率因数与负载的关系和经济功率因数 .....     | 574 |
| 表29 低压架空线路允许负荷矩及导线截面选择 .....  | 533 | 表54 改善功率因数后可提高出力的百分值 .....      | 575 |
| 表30 低压绝缘电线的敷设方式及型号与用途 .....   | 534 | 表55 补偿电容器技术数据及试验项目与标准 .....     | 575 |
| 表31 低压绝缘电线的规格及载流量 .....       | 536 | 参考文献 .....                      | 578 |

## 绪 论

电是物质运动的一种形式。从实质上讲，它是一种能量，具有作功的本领，故也俗称电力。电力的广泛应用，是人类社会逐步走向高度文明的重要标志。

当代电力科学及电力事业的发展突飞猛进。在我们为祖国的现代化而勤奋工作、刻苦学习、努力掌握好电气技能的同时，回顾一下世界电力科学及我国电力事业的初期发展过程，至为必要。这不单纯是一份历史唯物主义教材，可以提高大家的辩证唯物史观与认识问题的能力；更能让我们珍惜先辈们的艰苦创造成果，从“电”这一侧面了解有着4000多年文明史的华夏民族如何艰难地一步步迈向今天，以激发民族自豪感及爱国热情；同时也利于我们学习电气基本理论知识，为掌握电气技术与提高实际技能创造一个良好的气氛与开端。

“电”这个名称，由来于古希腊语里“琥珀”一词。公元前6世纪的古希腊艺匠们，在用一种称作琥珀的松树脂化石琢磨成各种装饰品时，曾发现琥珀制品具有能够吸引毛发、细屑等轻微物体的奇怪现象。限于当时的宗教统治和科学水平尚无法解释，便认为琥珀内存在一种魔力或神力。自然哲学家泰勒斯则称这种力为“琥珀力”。经过漫长岁月直到公元1600年，英国皇家医科大学校长、女皇伊丽莎白一世的御医、实验家吉尔伯特，在进行大量实验后发现不单是琥珀，还有其它好多种物体在经过摩擦后都具有这种吸引力。为突出说明这一现象，他引用希腊语里“琥珀”的词根创造了一个新名词，读音与希腊语里“琥珀”的发音完全一样，并以此将这种吸引力命名为“ELECTRICAM”（音译“依勒克曲肯”，意为“琥珀”）；1646年科学家布朗克在他的著作中，又按照英语词法将其改写为现在许多西方国家所用的“ELECTRICITY”；而我国约在1851年将它译为中文时译作“电”，从此便开始了将这种“奇特力量”称之为“电”的年代。

人类对“电”的认识，起源于“磁”。而磁现象的发现，得归功于我们华夏民族。早在4000多年前（公元前21世纪）的轩辕黄帝时代，我们的祖先就发现了一种能够吸铁的特殊“石头”（即天然磁石）。它是一种天然矿物，因为具有吸铁的性能，便形象地用“慈母恋子”的比喻将它取名为“慈石”（即磁石）。其后又利用它制成了举世闻名的“司南”（即指南针），成为我国古代四大发明之一；大自然中的雷电，就是天然产生的一种“电”现象。汉代学者王充，是世界上最早研究雷电的科学家。在其名著“论衡”中，他列举了许多事实说明雷电是一种自然现象。同时指出它起源于太阳，是“太阳之激气”而与鬼神无关。1900多年前的王充就能够破除迷信，用朴素的唯物观点来说明这一自然现象，实在是难能可贵，也是我们民族的骄傲和对人类的贡献。

此后，在源源的历史长河中又经过了约13个世纪，萌生了西方对电力科学的实验与研究，同时取得了一个又一个突破性进展。公元1269年，著名西方学者马里古特发表了《关于磁石的书信》；1600年英国医学家兼实验家吉尔伯特在上述《书信》影响下，经过大量实验与研究后发表了巨著《磁石论》，从而开创了崭新的电磁宇宙观，为电气研究指出了方向；至1672年，德国的格里凯又发表了关于硫磺球试验的论著，详细说明了摩擦起电的原因。

1746年荷兰莱顿大学教授麦申布略克发现了一种能把电荷储存起来的“容器”，并命名

为“莱顿瓶”；1749年，由美国著名科学家、文学家富兰克林精心实验的结果，认为“电”是一种“流体”且具有不同的特性，并将经过摩擦后的毛皮或火漆棒带的电称为“负电”，丝绸或玻璃棒上带的另一种电称为“正电”。从此，这两种性质截然相反且一直被称作“玻璃电”与“琥珀电”的不同电性有了正式名称；1752年，富兰克林又和他的儿子一起冒着生命危险用风筝做了一次“天电传输”试验，这次震撼世界的“风筝实验”的成功，验证了雷与电的内在关系，从而证明了雷与电这两种物质的同一性。

1775年意大利物理学家伏特研制成功了一种能够产生电的器具——“电盒”，同时又提出了维持电荷运动的原动力问题。经潜心、刻苦的研究与试验，他进而创造出了震古烁今的“电堆”，也就是原电池的雏型——“伏打电池”。1782年他又研制成功“蓄电池”。虽然这类电源十分原始，但电池的发明，却是由静电发展到动电的重大转机，促使电的研究得到了极其迅速的发展；1785年法国军事要塞建筑专家、物理学家库仑提出了用数学公式明确地表达两个带电体之间相互作用关系的“库仑定律”，使得后来的电学研究能够以数学为基础来进行。

1807年丹麦学者奥斯特发现了导体通电后，它附近的小磁针就会发生偏转的现象，但不知缘故。13年后（1820年7月），他又用强力电池进一步反复试验，结果证实了这种使磁针偏转的“电流磁效应”，他断言：当导体中有电流通过时，周围就会伴随有磁场产生。同时写出了《关于电的冲突对磁针作用的实验》为题的传单。这一“电能生磁”的重大发现，揭示了电现象与磁现象之间的内在联系，从而奠定了电磁学研究的基础。

1822年法国物理学家安培用原子、分子或分子团内存在着一种“环形电流”（也称分子电流）的理论，创造了关于“磁性起源”的假说并解释了上述现象；他发表了名为《新的电动力学的实验》的研究报告书，提出了关于电流使磁针受到力的作用的“电动力学”原则，以及判定由电流产生磁场方向的“安培游泳者定律”（即今所称之安培右手定则或右螺旋定则）。它指出了电与磁既具有同一性，且电磁作用应采用“电流的相互作用”的提法加以统一描述。麦克斯韦曾对此给予了高度评价：“这个成功，使他确实成了电气方面的牛顿”。

1826年，出生在英国爱尔兰（世居英国的德国侨民）的著名物理学家欧姆，企图采用数学形式来描述电气并提出以此作为电的一般法则的设想。在安培支持下，他于动电的电流研究中引入了“电阻”这一概念；后又以坚定的信念溯本穷源，在进行了大量实验后终于发现了控制电流的规律，归纳出了在任一通有电流的闭合电路中，电流强度与电动势成正比、而与电路总电阻成反比的这一举世闻名的“欧姆定律”；并在1827年5月发表了《动电路的数学研究》论文，明确提出了（后经基尔霍夫加以定形的）欧姆定律公式。但却遭到了“黑格尔派”的攻击，说它是“幻想的产物”。欧姆不屈服于权威名流的压力据理驳斥，同时得到了俄国楞次、英国惠斯顿、美国亨利等学者的支持。欧姆终生未娶，献身科学，在不如意的环境中度过了简朴的一生，最终不幸因中风而倒在了讲台上；经另一位德国科学家基尔霍夫（也译克希荷夫）进一步精心研究的结果，又提出了解决任意电路、特别是复杂电路的“KCL”与“KVL”，即后人所称的基尔霍夫第一定律（节点电流定律）与第二定律（回路电压定律）。

1827年，美国科学家亨利在前人研究的基础上研制成功了强力电磁铁，并采用圆筒形线圈进行试验，以观察一个回路中接通与切断电流时的火花变化。他总结试验结果并撰写了名为《螺旋状长导线内的电气自感》的论文，从而发现并提出了“自感”现象；1828年德国科

学家高斯在柏林召开的研究磁暴的科学工作者大会上，结识了有志探究地磁的年轻人韦伯。后经韦伯协助，高斯设计制成了测磁针、磁侧角计等，并采用磁偏角、磁倾角和磁强度这三个要素来描述地磁；5年后进而提出了测定地磁强度的报告，且据此画出了地球的等磁力线图。渊博的知识与非凡的才能，还使他在数学与天文领域内都作出了巨大贡献。高斯掌握十几种外国文字，直到60多岁还在开始自学俄文。他在科学上作出的无与伦比的贡献，博得了数学家、物理学家和天文学家三顶桂冠。

1831年8月英国物理学家、化学家法拉第，在进行了长达9年的反复研究后终于发现了磁也能生电、即“动磁生电”的规律。这就进一步明确了电与磁的关系并提出了“磁力线”的概念。这一极为重要的新发现是电学发展史上的光辉里程碑。正是这项“电磁感应”的伟大发现，为后来的发电机、变压器及电动机等电气设备的发明奠定了理论基础，使人类获得了打开电能宝库的钥匙，从此跨入了一个崭新的时代。法拉第才华横溢，在科学上创立了丰功伟绩。尤其是他的巨著《电气的实验研究》从指导科学发展的意义上说，人们都认为超过了牛顿和伽利略。但他谢绝封爵，贫困自守，一直过着十分简朴的生活。法拉第所取得的一系列成就，却意外地受到了他的恩师、化学家戴维的嫉妒与非难。但法拉第却始终始终以友谊为重，从不失师生礼节。这种豁达大度的高尚品格与风度，曾被后人传为佳话。

1833年，俄国科学院院士楞次在论文中阐述了磁场变化“不能突变”的观点，并说明这是由于受感应电动势的反抗作用而引起的。所以这条“楞次定律”也常被称为“电磁惯性定律”。同时由此提出了确定感生电动势方向的“楞次定则”，它较用右手定则判定感生电动势方向具有更加普遍的意义；此外，楞次还对电流通过导体时导体发热现象进行了研究。1884年，他与英国物理学家、当时年仅22岁的焦耳几乎同时在不同地点发表了关于“电流热效应”的研究成果，即电阻上产生的热量与所通过电流的平方、电阻大小及通电时间三者成正比（后人称之为“焦耳—楞次定律”）。

1856年，年仅24岁的英国科学家麦克斯韦在剑桥大学的哲学杂志上发表了“论法拉第力线”一文。他将电学先辈们所发现的全部电磁现象描绘成一个定性概念，并采用时间—空间关系的严密公式来加以表达。当时已经66岁的法拉第看到这篇论文后，十分喜悦地高度赞扬了他对电磁现象的真知灼见；麦克斯韦除把库仑定律、安培定律及法拉第定律综合起来外，还提出了所谓“位移电流”。1860年他又发表了《电磁场的力学》等重要论文，在原有电磁学理论中引进了“场”的概念，并建立了麦克斯韦电磁场（微分）方程。这是电学发展史上又一光辉的里程碑。他认为这是由于空间里某种称为“以太”的物质传播了电磁力的作用，从而否定了名噪一时的牛顿“超距作用”；1873年，他又用过渡方程说明了在空间里随时间变化的电场和磁场是相互依存的观点，认为变化的电场能产生磁场，反之亦然。从而推论出电磁场将以光速在真空中传播能量，以及光的电磁性质。14年后的1887年，德国科学家赫兹成功地进行了用人工方法产生电磁波的实验，从而证实了麦克斯韦预言的正确性。对此，相对论创始人爱因斯坦曾说过：“在我的学生时代，最使我着迷的课题是麦克斯韦理论”，“狭义相对论的起源要归功于麦克斯韦的电磁场方程”。

1881年在巴黎召开的国际电气会议上，经德国科学家韦伯倡导，为表彰与纪念科学家们在电力科学上建树的丰功伟绩，会议制订并决定了以伏特、库仑、安培、欧姆及法拉第等人名分别作为电压（电势）、电量、电流、电阻及电容的国际实用单位；其后，在同样的会议上又决定将亨利、高斯与特斯拉、麦克斯韦、韦伯以及赫兹等人名分别作为电感、磁感应强度、

磁通量以及交流电或电磁波频率的国际实用单位。

理论是实践的基础，理论指导实践。随着电力科学的不断发展，自19世纪70年代起，在电力应用技术方面的发明创造也同时获得了惊人的兴起与突破。1876年俄国的雅普罗奇科夫进行了所谓“电蜡烛”的交流电试验。1879年举世闻名的美国科学家、发明家爱迪生经过数千次试验，发明并多次改进了白炽灯，这就使发展中的电力应用事业受到了极大鼓舞；次年他又发明了熔丝（当时用的是锌丝）；19世纪的最后一个冬天，他在创造“维太放映机”的基础上进一步发明了活动电影，从此开始了把实物影象生动而逼真地搬上银幕的时代。爱迪生一生的各项发明创造，包括发电机自动电报机、打字机、留声机以及新型（镍铁碲）蓄电池等等，达到了总计近2000项的惊人数字。对人类作出了不朽的贡献，实堪称“伟大的发明家”。

当时世界上已出现了单相交流电及单相同步发电机，但仅是应用在照明上；工业上用的交流电动机，最初也只为单相交流异步电动机，由于它不能自行起转，其使用便受到了很大限制。1881年巴黎国际博览会展出了爱迪生创造的发电机；1882年法国的盖拉勒和英国的格布斯发明了磁路式变压器；1885年，世界上第一台实际可供使用的单相闭合磁路的铁心变压器在欧洲诞生，并在两年后应用到单相交流设备上；同年，根据意大利人弗兰利发现的“旋转磁场”现象所制造的两相交流发电机问世。

1888年，俄国工程师德布罗夫斯基和德尔伏创建了三相交流制。次年，三相交流电由试验到应用获得成功，并首建了第一条三相制线路。不久三相发电机及电动机相继问世，这就为三相交流制在世界上的普遍应用奠定了基础。自1890年制成采用三柱铁心的三相变压器后，三相异步电动机就得到了广泛应用，工业动力便很快被它所代替。这就使得电能在工业生产上的应用获得了迅速发展，且逐步取代了蒸汽等动力源。到20世纪初，人类便结束了自1796年由英国瓦特发明蒸汽机起所开创的“蒸汽时代”，跨入了面貌全新、更为先进的“电气时代”。可见单就三相交流制的电力应用技术及电力事业的实际创建与发展来说，世界上从创造、试验到普遍应用，时间并不算长，至今仅为100年而已。

19世纪中叶到20世纪初，我国还处在清王朝腐朽没落的封建统治时期，在当时曾掀起的“洋务运动”中，主张“中学为本、西学为用”的有识之士提倡学习西方科学技术。正是在这种情况下，西方的近代电磁学及有关电力知识的书籍和资料等便逐步被译成中文介绍到国内来，为我国电力应用事业的发展准备了思想与理论基础。当时著名的爱国维新人士谭嗣同曾撰写了《论电灯之益》一文，论述了电是一门现代科学以及电灯的优越性，主张并赞扬开办电厂以给人们带来光明。我国开始应用电力的年代，实际上与世界其它先进国家也很相近；和国外一样，我国的电力应用同样也是先从照明开始的。

在1873年维也纳万国博览会上，展出了一台用瓦斯原动机拖动的发电机并带动一台水泵运转，引起了参观者的极大兴趣。这是世界上电力开始在工业上应用的前奏。1879年美国旧金山一个小型实验厂开始发电；同年4月11日，我国上海虹口一家外商仓库里有台10马力（合7.6kW）发电机运转成功。一个月后，曾任美国第18任总统的格兰特将军到我国访问，在5月11日上海的欢迎会上，便用这台发电机使电弧灯发出了耀眼的光亮。这是电力在我国土地上的首次应用。

1882年，英国伦敦发电厂继旧金山发电厂以后，成为世界上第二个发电厂。不久，设备比较完善的美国纽约珍珠街的爱迪生发电厂（容量30kW）于同年9月建成发电。也就在这一

年,由英商创办的上海电光公司从美国订购到发电设备,在上海乍浦路创建了我国第一个小型发电厂。于7月26日开始发电、且在南京路、江西路口竖起了我国第一根电线杆;到1883年6月,上海外滩的路灯便首先采用电弧灯代替了煤油灯。起初由于电气设备事故较多,清政府上海道台竟愚昧而蛮横地认为这是“妖术”,曾命令禁止中国人使用电灯。但科学的新生事物有着强大生命力,总是不可战胜的。自1890年开始装用爱迪生发明的白炽灯后,到1893年上海就已装有电灯6300多盏。1894年上海公共租界工部局在斐伦路(今九龙路)兴建了虹口发电厂,装了5台交流发电机;5年后又增建一台257kW机组并采用当时最新式的水管锅炉;1907年9月,我国第一台汽轮发电机(美国派生斯公司制造,容量800kW)装好并投入运行。1911年又兴建了杨树浦发电厂,全部装用汽轮发电机,并于1913年4月建成发电;至1928年8月,美国国际电气债券股份有限公司以1800万两白银买下了全部资产及营业权,同时改名为“上海电力公司”。

广州是我国最早应用电力的第二个城市。1888年两广总督张之洞向国外订购了一台发电机,在总督衙门旁兴建发电厂。7月18日发电机运到且随带电灯100盏,5天后这些电灯就在总督衙门亮了起来;1890年旧金山华侨黄秉常集股筹办“广州电灯公司”,安装了两台74kW发电机。到1891年时,广州街上、店铺及公共场所已装有电灯700多盏。1905年英商旗昌洋行创办了“奥恒电灯公司”,并于1920年在长堤建成了装有两台2500kW汽轮发电机的五仙门电厂。

北京是我国电力事业最早发展的第三个城市。1888年慈禧太后“还政退居”时曾下旨修建西苑(今中南海),并建15kW发电厂以装电灯。厂址就设在今国务院门口称“西苑电灯公所”,1890年初西苑宫廷里便亮起了北京最早的电灯;同时慈禧又下旨修建颐和园,并在宫门外东南角建造发电厂。1900年八国联军攻占北京,东交民巷成为使馆特区,3年后建起了英租界电灯公司,装机700kW(后于1922年改称为“北京电灯服务有限公司”)。1904年在北京顺城街26号成立的“京师华商电灯公司”,是我国官商合办且规模较大的发电厂,当时聘请曾留学德国的陈德培任工程师。第一台150kW发电机购自上海瑞生洋行,到1912年时共装机6台2960kW。同年,北京已装有各种电灯3万余盏。1919年华商电灯公司又在石景山建发电厂,两年后的10月10日一台2000kW机组投运,同时建成了我国第一条33kV高压输电线路,开始向北京城区供电。

由上可见,我国电力应用事业从1879年开创起,1882年便建厂发电,初期发展几乎与国外同步。到1924年全国就建有发电厂219座,共装机30.1万kW;1932年增加到665座,装机89.3万kW;1936年时已装机104.5万kW,全年发电31亿kW·h,占当时世界的第14位。1937年抗战爆发后,工商界经济重心由沿海移向内地,西南地区电力工业相应地有了较大发展;但关内却在八年抗战中遭到了严重破坏;当时东北三省自1931年“九·一八”事变被日寇侵占后,日本军国主义为掠夺资源曾大力开发水电和兴建火电厂。这样,到1945年抗战胜利时全国发电装机总容量反增为293万kW(其中水电108万kW)。此后又经历了三年解放战争,至新中国成立时,全国发电装机仅为185万kW,年发电量43亿kW·h,已退居世界第25位。

此后,我国电力事业便获得了新生并取得很大发展。据联合国统计日报公布的数字,1986年我国的发电量就已超过了英国、法国和加拿大,年均增长速度达到14.3%,超过世界上工业发达国家(一般为4.7%~13.2%);1990年全国发电量已达6212亿kW·h,为解放时

的44.5倍，跃居世界第4位。解放前全国只有几个规模小得可怜的地区电网，且大部分是以城市为中心的孤立电网，80%以上的电力设施集中在沿海几省的大中城市。60~70年代，我国规划建设了众多大中型电力工程，如在黄河上游我国自行设计建造了水电建设史上第一座百万容量级大型水电站——刘家峡水电站。自1969年4月第一台机组发电到1979年全部建成，共装机122.5万kW；输变电工程不断上马、投运，各地区电网也已逐渐发展成为以220kV输电线路为网架（骨干）的全省统一电网或跨省电网；进入80年代，尤其是改革开放以来，电力工业的发展犹如雨后春笋、骏马奔驰，其成果更令人鼓舞。

许多发电及电网工程被列为国家重点建设项目，其中好些已如期投产；世界闻名的长江葛洲坝水利枢纽工程胜利建成，全国最大的水电站——葛洲坝水电站于1988年12月全部完工，共装机271.5万kW；全国最大的火电厂——谏壁发电厂10台机组投运，装机162.5万kW，年发电量达100亿kW·h；尤为令人赞叹的是，在历史上罕见的1976年唐山大地震灾区，竟重新矗立起了容量达163万kW的唐山发电厂；我国第一台60万kW大型火力发电机组，也于1985年在内蒙的元宝山电厂投产。除水电火电外，多种类型的其它发电工程也异军突起：自行设计建造了我国第一座秦山核电站，同时第二座大亚湾核电站也正在紧锣密鼓；建成了我国第一座利用潮汐发电的浙江江厦潮汐电站（装机5台共3200kW）；出现了全国最大的200kW风力发电机组——福建平潭风力电站；我国第一座开发利用地热资源的西藏羊八井地热电站（容量1.3万kW）投运，等等。与发电工程相配套的电网建设也同步进行，继1981年12月建成平顶山—武汉我国第一条500kV超高压输电线路及变电工程之后，由葛洲坝—上海500kV直流输电线路也已建成，仅华东段长度即为566.4km，换流容量达120万kW。80年代末，全国220kV及以上线路已达78,441km，其中500kV线路有7,029km。电力事业的发展为国民经济的起飞创造了先行条件，工农业生产的增长自不待说，人民生活用电也同时有了根本性的改观。据资料介绍，1988年全国拥有民用电风扇14,546万台（每百人占有13.4台）、电视机14,344万台（每百人占有13.2台）、洗衣机7,464万台（每百人占有6.8台）、电冰箱1,927万台（每百人占有1.8台）。民用电设备的大幅度增加，突出地改变了全国总用电量中民用电比例历来仅占3%~5%的落后状况，这也从一个侧面反映了人民生活水平及国家电气化程度的提高。

目前，我国发电厂的总装机容量早已突破1亿kW大关；全国有容量为100万kW以上的火电厂9座，1500万kW以上的区域性大电网4个；110kV及以上变电设备容量已达32,344万kVA；110kV及以上输电线路总长达18,448km，可绕地球4圈半。尽管我们已经获得了长足的进步，但由于国家底子薄、人口多，天灾人祸、起步又晚，尚属发展中国家。能源的人均占有量还很低，年发电量虽已占世界第4位，但人均占有量仅为560kW·h，只及世界平均值（2440kW·h）的23%，即1/4还不到。对已经取得的成绩，我们可引以自豪，但要纵观世界发展趋势，切勿坐井观天、夜郎自大、沾沾自喜，而应坚定信念，顽强拼搏，不断进取。奋战在电力建设战线上的勇士们已经为我们描绘了一幅祖国电力工业大好发展的宏伟蓝图，愿各行各业从事电气工作的同志们认真钻研电气技术，努力掌握好电气技能，用好电、管好电，齐心协力保障电网的稳定运行，实现安全经济地发供用电的局面，为国家现代化多作贡献。

# 第一章 电力网与变电所

## 第一节 电力系统概述

### 一、电力系统的形成及电力生产的特点

#### (一) 能源与电能

能源是发展社会生产和提高人民生活水平的重要物质基础。它是指产生机械能、热能、光能、电磁能、化学能等各种形式能量的资源。能源分为两大类：一类是自然界中以其固有形态存在的能量资源，如原煤、原油、天然气、核原料、植物燃料、水能、风能、太阳能、地热能、海洋热能、潮汐能等等，叫做一次能源；另一类是由一次能源直接或间接转换为其它形式的能源，如电能、汽油、煤油、柴油、重油、煤气、焦炭、蒸汽、热水、沼气、余热、氢能等等，叫做二次能源。一般称二次能源为高级能源。显然，电能是一种极为宝贵的高级能源。它是现代工农业生产、科学实验及人民生活等各个领域广泛应用的主要能源与动力。离开了电力，要想实现人类社会的物质文明与精神文明是不可能的；没有足够的电力，要实现我国的现代化也是难以想象的。

#### (二) 电力系统的形成

现代工农业及整个社会生活中所应用的电力，绝大部分是由生产电能的工厂——发电厂发出来的。但发电厂的生产离不开煤炭、石油或水力资源，而具备兴建发电厂必备条件的地方、往往并不是用电户大量集中的地区，故通常要实行远距离输电。但发电机发出的电压一般不可能太高（由于受绝缘结构、制造技术与运行安全等因素限制，通常仅为10.5、13.8或15.75kV），为了能够将电能输送得远些、以增大输电容量并减少输电损耗，就必须通过变电所将电压升高（如升到110、220或500kV）；经输电线路将电力输送到了需大量用电的地区后，又要把输电电压降低到配电电压（如10kV或35kV等），然后再经配电线路分配到各用电单位和住宅区去。电力送到用户处后，由于安全和制造因素，各种用电设备因面广量大、从制造成本及用电安全考虑，大都制造成低电压的，故要求供给低电压电源。因此，还要把电压再行降低，方能适应各种不同用电设备的使用要求。如大容量高压电动机用3kV或6kV电压，低压交流电动机一般用380V电压，普通照明及家用电器一般用220V电压，工矿企业的安全照明及某些手提式电器仅用36V或24V电压等。所以必须建设具有不同电压等级的各级变电所，将电压逐级降低，以供实际应用。

由以上的概略介绍可见，电力从生产到供给用户应用，通常都要经过“发电、输电、变电、配电及用电”这五个环节。电力从生产到应用的全过程，客观上就形成了电力系统。严格地讲，由发电厂里的发电机、输配电线路、变配电所及用电户的各种用电设备所组成的整体，称之为电力系统。

各种不同电压等级的电力线路和变配电所组成了电力网，也叫电力网络（简称电网）。它是电力系统的一个重要组成部分，承担了将电力由发电厂发出来之后供应给用电户的工作，即输电、变电与配电（统称为供电）的任务。电力网及电力系统示意图见图1-1所示。

### (三) 电力生产的特点

电能是发电厂生产出来的一种产品，也属于商品，习惯上常称之为电力（严格讲，电力实指电功率，单位 kW；而电能则属一种高级能源）。电力的生产，具有与其它工业产品生产所不同的特点，主要从以下两个方面可以看出：

1. 电力的生产、输送、分配以及转换为其它形式能量的过程是同时进行的。这一电力的生产（发电）、供电和用电在同一时间内完成的特点，决定了发电、供电、用电时刻都要保持平衡，发供电随用电的瞬时增减而增减。

任何其它产品的生产、运输与销售（使用），都是既有联系、又独立存在。电力则不同，停止了用电，供电也就随之停止，发电也随之停止。这就是说，它的生产、运输、销售（使用）是十分紧密地联系在一起的，任何一个环节都不能孤立存在，而且在时间上它是瞬时的，其间没有周转期和间歇期。

2. 电力生产是高度集中的、统一的。在一个地区内生产同类产品的各工厂，可以隶属于各个行业，仅接受本行业的计划、技术、业务领导，可以生产不同规格的产品、具有各自不同的销售方式。但电力产品则截然不同，在一个电网里不管有多少个发电厂、供电局，也不管这些厂、局的隶属关系如何，都必须接受电力网的统一调度，有着统一的质量标准（如周波、电压等）、统一的行业管理。在电力技术与业务上受电网的统一指挥和领导，电力也由电网统一分配和销售。总之，在一个电力网内，必须统一指挥、统一调度、统一管理电力的生产和销售。这是电力生产的客观规律，世界各国也都是如此。

## 二、电能的优越性和能源紧张的对策

### (一) 电能的优越性

电能与其它形式的能源相比较，显著地具备以下四个方面的优越性：

1. 易于生产 由于现代电力技术的发展，可以较容易地将多种形式的其它能源转变为电能。所以，电能是一种最易于生产的人工能源（即二次能源）。

此外，电能的生产过程较其它人工能源的生产过程更容易控制与管理，其生产规模也可以扩充。一般地说，将其它形式的能源转变为电能的有效利用率也比生产其它人工能源的有效利用率高。

2. 便于传输 在任何国家和地区，能源的产地和能源的消费地区总是相距较远。所以，能源的远距离传输一般很难避免。例如，我国的西南地区有着巨大的水力资源，但这些天然能源的产地，距大量消费能源的华中及华东地区却很远。因此，为了开发这些能源，就必须解决能源的远距离传输问题。

由于电能可以沿导体以近似于光速的速度传送，所以它是一种目前最适宜于远距离传输的能源。此外，当使用超高电压传输电能时，不仅传输距离远、传输容量大，而且在传输过

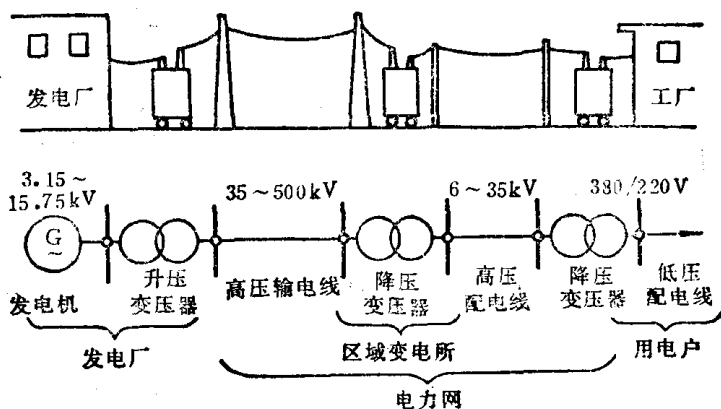


图1-1 电力网及电力系统示意图