

· 应用型系列教材 ·

总主编 吴国华

简明电力系统分析

主 编 刘学军 孙玉梅

副主编 王选诚 杨 明 贾振江



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

简明电力系统分析

主 编：刘学军 孙玉梅

副主编：王选诚 杨 明 贾振江

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书包括电力系统稳态分析和暂态分析两部分内容。全书共有 8 章, 主要内容包括电力系统的基本概念, 电力系统元件的参数及等效电路, 简单电力系统的潮流分析, 电力系统潮流的计算机算法, 电力系统功率平衡、频率调整和电压调整, 电力系统对称故障分析, 电力系统不对称故障分析, 电力系统的稳定性分析。

为了便于读者自学和应用, 在书后附录中给出了短路电流运算曲线和部分习题参考答案, 并附有与教材配套课件。为便于教师教学和读者自学还有电子版的教案、习题详解、自测题、期末复习提要和电力系统综合实验指导书。

本书可以作为电力系统及其自动化专业和电气工程及其自动化专业的本科教材, 也可以供从事电力系统规划、设计运行和研究的工程技术人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

简明电力系统分析 / 刘学军, 孙玉梅主编. —北京: 电子工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-121-30872-7

I. ①简… II. ①刘… ②孙… III. ①电力系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020209 号

策划编辑: 贺志洪

责任编辑: 贺志洪 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京七彩京通数码快印有限公司

装 订: 北京七彩京通数码快印有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.75 字数: 500 千字

版 次: 2016 年 12 月第 1 版

印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254609 或 hzh@phei.com.cn。

序

——加快应用型本科教材建设的思考

一、应用型高校转型呼唤应用型教材建设

“教学与生产脱节，很多教材内容严重滞后现实，所学难以致用。”这是我们在进行毕业生跟踪调查时经常听到的对高校教学现状提出的批评意见。由于这种脱节和滞后，造成很多毕业生及其就业单位不得不花费大量时间“补课”，既给刚踏上社会的学生无端增加了很大压力，又给就业单位白白增添了额外培训成本。难怪学生抱怨“专业不对口，学非所用”，企业讥讽“学生质量低，人才难寻”。

2010年，我国《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》指出：要加大教学投入，重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模。2014年，《国务院关于加快发展现代职业教育的决定》进一步指出：要引导一批普通本科高等学校向应用技术类型高等学校转型，重点举办本科职业教育，培养应用型、技术技能人才。这表明国家已发现并着手解决高等教育供应侧结构不对称问题。

转型一批到底是多少？据国家教育部披露，计划将600多所地方本科高校向应用技术、职业教育类型转变。这意味着未来几年我国将有50%以上的本科高校（2014年全国本科高校1202所）面临应用型转型，更多地承担应用型人才，特别是生产、管理、服务一线急需的应用技术型人才的培养任务。应用型人才作为高等教育人才培养体系的重要组成部分，已经被提上我国党和国家重要的议事日程。

兵马未动、粮草先行。应用型高校转型要求加快应用型教材建设。教材是引导学生从未知进入已知的一条便捷途径。一部好的教材既是取得良好教学效果的关键因素，又是优质教育资源的重要组成部分。它在很大程度上决定着学生在某一领域发展起点的远近。在高等教育逐步从“精英”走向“大众”直至“普及”的过程中，加快教材建设，使之与人才培养目标、模式相适应，与市场需求和时代发展相适应，已成为广大应用型高校面临并亟待解决的新问题。

烟台南山学院作为大型民营企业南山集团投资兴办的民办高校，与生俱来就是一所应用型高校。2005年升本以来，其依托大企业集团的背景，坚定不移地实施学校地方性、应用型的办



学定位；坚持立足胶东，着眼山东，面向全国；坚持以工为主，工管经文艺协调发展；坚持产教融合、校企合作，培养高素质应用型人才；初步形成了自己校企一体、实践育人的应用型办学特色。为加快应用型教材建设，提高应用型人才培养质量，今年学校推出的包括“应用型系列教材”在内的“百部学术著作建设工程”，可以视为南山学院升本 10 年来教学改革经验的初步总结和科研成果的集中展示。

二、应用型本科教材研编原则

编写一本好教材比一般人想象的要难得多。它既要考虑知识体系的完整性，又要考虑知识体系如何编排和建构；既要有利于学生学，又要有利于教师教。教材编得好不好，首先取决于作者对教学对象、课程内容和教学过程是否有深刻的体验和理解，以及能否采用适合学生认知模式的教材表现方式。

应用型本科作为一种本科层次的人才培养类型，目前使用的教材大致有两种情况：一是借用传统本科教材。实践证明，这种借用很不适宜。因为传统本科教材内容相对较多，理论阐述繁杂，教材既深且厚。更突出的是其忽视实践应用，很多内容理论与实践脱节。这对于没有实践经验，以培养动手能力、实践能力、应用能力为重要目标的应用型本科生来说，无异于“张冠李戴”，严重背离了教学目标，降低了教学质量。二是延用高职教材。高职与应用型本科的人才培养方式接近，但毕竟人才培养层次不同，它们在专业培养目标、课程设置、学时安排、教学方式等方面均存在很大差别。高职教材虽然注重理论的实践应用，但“小才难以大用”，用低层次的高职教材支撑高层次的本科人才培养，实属“力不从心”，尽管它可能十分优秀。换句话说，应用型本科教材贵在“应用”二字。它既不能是传统本科教材加贴一个应用标签，也不能是高职教材的理论强化，其应有相对独立的知识体系和技术技能体系。

基于这种认识，我以为研编应用型本科教材应遵循三个原则：一是实用性原则，即教材内容应与社会实际需求相一致，理论适度、内容实用。通过教材，学生能够了解相关产业企业当前的主流生产技术、设备、工艺流程及科学管理状况，掌握企业生产经营活动中与本学科专业相关的基本知识和专业知识、基本技能和专业技能，以最大限度地缩短毕业生知识、能力与产业企业现实需要之间的差距。烟台南山学院研编的《应用型本科专业技能标准》就是根据企业对本科毕业生专业岗位的技能要求研究编制的基本文件，它为应用型本科有关专业进行课程体系设计和应用型教材建设提供了一个参考依据。二是动态性原则。当今社会科技发展迅猛，新产品、新设备、新技术、新工艺层出不穷。所谓动态性，就是要求应用型教材应与时俱进，反映时代要求，具有时代特征。在内容上应尽可能将那些经过实践检验成熟或比较成熟的技术、装备等人类发明创新成果编入教材，实现教材与生产的有效对接。这是克服传统教材严重滞后生产、理论与实践脱节、学不致用等教育教学弊端的重要举措，尽管某些基础知识、理念或技术工艺短期内并不发生突变。三是个性化原则，即教材应尽可能适应不同学生的个体需求，至少能够满足不同群体学生的学习需要。不同的学生或学生群体之间存在的差异，显著地表现在对不同知识理解和技能掌握并熟练运用的快慢及深浅程度

上。根据个性化原则,可以考虑在教材内容及其结构编排上既有所有学生都要求掌握的基本理论、方法、技能等“普适性”内容,又有满足不同的学生或学生群体不同学习要求的“区别性”内容。本人以为,以上原则是研编应用型本科教材的特征使然,如果能够长期得到坚持,则有望逐渐形成区别于研究型人才培养的应用型教材体系特色。

三、应用型本科教材研编路径

1. 明确教材使用对象

任何教材都有自己特定的服务对象。应用型本科教材不可能满足各类不同高校的教学需求,其主要是为我国新建的包括民办高校在内的本科院校及应用技术型专业服务的。这是因为:近10多年来我国新建了600多所本科院校(其中民办本科院校420所,2014年)。这些本科院校大多以地方经济社会发展为其服务定位,以应用技术型人才为其培养模式定位。它们的学生毕业后大部分选择企业单位就业。基于社会分工及企业性质,这些单位对毕业生的实践应用、技能操作等能力的要求普遍较高,而不刻意苛求毕业生的理论研究能力。因此,作为人才培养的必备条件,高质量应用型本科教材已经成为新建本科院校及应用技术类专业培养合格人才的迫切需要。

2. 加强教材作者选择

突出理论联系实际,特别注重实践应用是应用型本科教材的基本质量特征。为确保教材质量,严格选择教材研编人员十分重要。其基本要求:一是作者应具有比较丰富的社会阅历和企业实际工作经历或实践经验。这是对研编人员的阅历要求。不能指望一个不了解社会、没有或缺乏行业企业生产经营实践体验的人,能够写出紧密结合企业实际、实践应用性很强的篇章。二是主编和副主编应选择长期活跃于教学一线、对应用型人才培养模式有深入研究并能将其运用于教学实践的教授、副教授等专业技术人员担纲。这是对研编团队负责人的要求。主编是教材研编团队的灵魂。选择主编应特别注意理论与实践结合能力的大小,以及“研究型”和“应用型”学者的区别。三是作者应有强烈的应用型人才培养模式改革的认可度,以及应用型教材编写的责任感和积极性。这是对写作态度的要求。实践中一些选题很好却质量平庸甚至低下的教材,很多是由于写作态度不佳造成的。四是在满足以上三个条件的基础上,作者应有较高的学术水平和教材编写经验。这是对学术水平的要求。显然,学术水平高、教材编写经验丰富的研编团队,不仅可以保障教材质量,而且对教材出版后的市场推广将产生有利的影响。

3. 强化教材内容设计

应用型教材服务于应用型人才培养模式的改革,应以改革精神和务实态度,认真研究课程要求,科学设计教材内容,合理编排教材结构。其要点包括:

(1) 缩减理论篇幅,明晰知识结构。编写应用型教材应摒弃传统研究型人才培养思维模式下重理论、轻实践的做法,确实克服理论篇幅越来越多、教材越编越厚、应用越来越少的弊端。一是基本理论应坚持以必要、够用、适用为度,在满足本学科知识连贯性和专业课需要的前提下,精简推导过程,删除过时内容,缩减理论篇幅;二是知识体系及其应用结构应清晰明了、符合逻辑,立足于为学生提供“是什么”和“怎么做”;三是文字简洁,不拖泥带水,内容编排留有余地,为学生自我学习和实践教学留出必要的空间。



(2) 坚持能力本位, 突出技能应用。应用型教材是强调实践的教材, 没有“实践”、不能让学生“动起来”的教材很难产生良好的教学效果。因此, 教材既要关注并反映职业技术现状, 以行业企业岗位或岗位群需要的技术和能力为逻辑体系, 又要适应未来一定期间内技术推广和职业发展要求。在方式上应坚持能力本位、突出技能应用、突出就业导向; 在内容上应关注不同产业的前沿技术、重要技术标准及其相关的学科专业知识, 把技术技能标准、方法程序等实践应用作为重要内容纳入教材体系, 贯穿于课程教学过程的始终, 从而推动教材改革; 在结构上形成区别于理论与实践分离的传统教材模式, 培养学生从事与所学专业紧密相关的技术开发、管理、服务等必需的意识 and 能力。

(3) 精心选编案例, 推进案例教学。什么是案例? 案例是真实典型且含有问题的事件。这个表述的含义: 第一, 案例是事件。案例是对教学过程中一个实际情境的故事描述, 讲述的是这个教学故事产生、发展的历程。第二, 案例是含有问题的事件。事件只是案例的基本素材, 但并非所有的事件都可以成为案例。能够成为教学案例的事件, 必须包含问题或疑难情境, 并且可能包含解决问题的方法。第三, 案例是典型且真实的事件。案例必须具有典型意义, 能给读者带来一定的启示和体会。案例是故事但又不完全是故事。其主要区别在于故事可以杜撰, 而案例不能杜撰或抄袭。案例是教学事件的真实再现。

案例之所以成为应用型教材的重要组成部分, 是因为基于案例的教学是向学生进行有针对性的说服、思考、教育的有效方法。研编应用型教材, 作者应根据课程性质、课程内容和课程要求, 精心选择并按一定书写格式或标准样式编写案例, 特别要重视选择那些贴近学生生活、便于学生调研的案例。然后根据教学进程和学生理解能力, 研究在哪些章节, 以多大篇幅安排和使用案例。为案例教学更好地适应案例情景提供更多的方便。

最后需要说明的是, 应用型本科作为一种新的人才培养类型, 其出现时间不长, 对它进行系统研究尚需时日。相应的教材建设是一项复杂的工程。事实上从教材申报到编写、试用、评价、修订, 再到出版发行, 至少需要 3~5 年甚至更长的时间。因此, 时至今日完全意义上的应用型本科教材并不多。烟台南山学院在开展学术年活动期间, 组织研编出版的这套应用型系列教材, 既是本校近 10 年来推进实践育人教学成果的总结和展示, 更是对应用型教材建设的一个积极尝试, 其中肯定存在很多问题, 我们期待在取得试用意见的基础上进一步改进和完善。

2016 年国庆前夕于龙口

前 言

电力系统分析是电气工程及其自动化专业一门重要的专业课程，同时也是学习其他专业课程的基础。通过该课程的学习，既可让学生系统地学习电力系统的有关基础理论，为后续专业课程及相关专题学习奠定基础，又可以培养学生综合运用基础知识解决工程实际的能力。

本书阐述了电力系统的基本理论知识，内容包括电力系统稳态分析和暂态分析。本书的特点体现了综合性和工程性，突出了电力系统的基本理论和基本运算的讲解，适当降低了理论深度，注意讲清楚研究问题的思路和方法，启发学生创新思维和主动学习。用电磁学、磁路和电路的物理概念深入浅出讲解电力系统的专业知识，减少烦琐的公式推导。在保证体系完整，理论严谨的基础上，保证基础、分清主次、突出重点、力求简明、加强应用。为培养学生综合应用基础理论解决电气工程实际问题的能力，增强创新思维能力，在每章后有丰富的思考题和习题，并附有部分习题参考答案。为便于读者自学和教师教学附有与教材配套的课件和电子版的教案、习题详解、自测题和复习提要等教学参考资料。本书还有电子版电力系统分析综合实验指导书，可供实践能力的培养。

本书共分8章，主要内容包括电力系统的基本概念，电力系统元件的参数及等效电路，简单电力系统的潮流分析，电力系统潮流的计算机算法，电力系统有功功率平衡和无功功率平衡、频率调整、电压调整，电力系统对称故障分析，电力系统不对称故障分析，电力系统的稳定性分析。

本书参考教学学时数：理论学时 64 学时左右，实验学时 8 学时左右。

编写分工：烟台南山学院孙玉梅编写了第 1、2 章，王选诚编写了第 5 章，杨明编写了第 3、4 章及附录，其余部分由刘学军编写。

本书由刘学军、孙玉梅担任主编，王选诚、杨明、贾振江担任副主编。全书由刘学军教授统稿。

北华大学段惠达教授仔细阅读了书稿，并提出了宝贵意见。南山电力总公司东海电厂高级工程师王家明也阅读了书稿，提出了宝贵意见，并提供了有价值的参考资料。

在本书的编写过程中，参考、引用了国内外许多专家、学者的著作文献，马凤军女士参与了本书的插图绘制和文字录入工作，刘畅和杜洋参加了部分章节的编写工作，在此一并表示衷心感谢。

本书为电气工程及其自动化专业的本科教材，也可供电气类其他专业使用，还可以供从事电力系统规划、设计运行和研究的工程技术人员参考。

由于编者水平和实践经验有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第1章 概述	1
1.1 电力系统的组成及接线方式	1
1.2 电力系统的负荷和负荷曲线	4
1.3 电力系统运行特点和要求	7
1.4 电力系统的电压等级和额定电压	9
1.5 电力系统中性点运行方式	11
1.6 柔性交流输电系统	17
1.7 高压直流输电简介	22
1.8 我国电力系统发展概况	25
第2章 电力系统元件的参数和等效电路	29
2.1 电力线路的参数和等效电路	29
2.2 变压器的参数和等效电路	42
2.3 发电机的参数及等效电路	47
2.4 电力系统的等效电路	50
第3章 简单电力系统潮流分析	69
3.1 电力网络的电压降落和功率损耗	69
3.2 输电线路的运行特性	78
3.3 开式电网的潮流分析	80
3.4 简单闭式电网的潮流分布计算	87
第4章 电力系统潮流的计算机算法	101
4.1 电力网络的数学模型	101
4.2 高斯-塞德尔法潮流计算	107
4.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算	112
4.4 P-Q 分解法	120
第5章 电力系统的功率平衡、频率调整和电压控制	125
5.1 电力系统有功功率平衡和频率变化	125
5.2 电力系统频率调整	130
5.3 电力系统有功功率最优分布	138
5.4 电力系统中无功功率平衡和电压变化	141
5.5 电力系统的电压管理和调整	147



5.6 无功功率的经济分配	165
第6章 电力系统对称故障分析	172
6.1 短路的基本概念	172
6.2 无限大容量电源供电的三相短路的分析与计算	174
6.3 同步发电机暂态分析的简化模型	181
6.4 电力系统三相短路实用计算	185
第7章 电力系统不对称故障的分析计算	207
7.1 对称分量法及其应用	207
7.2 电力系统各元件的序阻抗和等效电路	211
7.3 电力系统简单不对称故障分析	220
第8章 电力系统的稳定性	248
8.1 稳定性的基本概念	248
8.2 电力系统的静态稳定	254
8.3 简单电力系统的暂态稳定性分析	261
8.4 提高电力系统稳定性的措施	266
附录A 短路电流运算曲线	275
附录B 有关的法定计量单位名称与符号	280
附录C 常用网络变换的基本公式	282
附录D 部分习题参考答案	283
附录E 自测题	290
自测题 1	290
自测题 2	294
自测题 3	297
自测题 4	301
参考文献	304

第1章 概述

内容提要

本章讲述了电力系统的组成、运行特点和要求，介绍了电力系统负荷曲线和年最大负荷小时数等概念，分析了电力系统的电压等级及额定电压及电能的质量评价，最后介绍了国内外电力系统发展概况。

学习目标

- ①了解电力系统的组成及接线方式。
- ②理解电力系统负荷和负荷曲线的概念。
- ③了解电力系统运行特点和要求。
- ④掌握电力系统的电压等级和设备的额定电压。

1.1 电力系统的组成及接线方式

电能可以方便地转化为其他形式的能，同时使用方便，易于精确控制。电能传输效率高，易于分配和输送，以电能代替其他的能源，可以提高能源的利用效率，是节能的一个重要途径。

电能是二次能源，是由一次能源经加工转换而成的能源，一次能源中煤、石油、天然气统称化石能源，化石能源不可再生，严重污染环境，破坏生态平衡。人们已认识到必须利用新能源和可再生能源以谋求电力工业可持续发展。新能源和可再生能源是指除常规化石能源和大中型水电之外的太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能、小水电、核能等。

1. 电力系统、电力网和动力系统

发电厂内发电机把各种形态的能源转换成电能，电能经过变压器和不同电压等级的电力线路输送并分配到用户，再通过各种用电设备转换成机械能、热能、光能和化学能等。这些生产、变换、输送、分配和消耗电能的发电机、变压器、变换器、电力线路及各种用电设备连接在一起组成的统一整体称为电力系统。电力系统加上发电厂的动力部分称为动力系统。动力系统包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网及用热设备，水力发电厂的水库和水轮机，核电厂的核反应堆等。电力系统中除发电机和用电设备外的部分称为电力网。它包括各级升降压变电站和各级输电线路。可见电力网是电力系统的组成部分，而电力系统又是动力系统的组成部分。三者之间关系如图 1-1 所示。

2. 一次接线和二次接线

在电力系统中，发电机、变压器、架空线路、电缆和用电设备等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电气设备称为主设备或一次设备。由它们组成的系统又称一次系统，或称

一次接线或电气主接线。对主设备进行测量、监视、保护和控制的设备称为二次设备，由二次设备组成的系统称为二次系统或二次接线。

3. 电力系统的接线图

电力系统的接线图分为电气接线图和地理接线图两种。电力系统的地理接线图反映了各发电厂和变电所的相对地理位置以及电力线路的路径。如图 1-2 所示为一幅简单电力系统地理接线图。电气接线图是用标准的电气元件符号将一次设备按设计要求连接的电路。它能够详细地描述电力系统各元件之间的电气联系，但不能反映各个发电厂和变电所的地理位置关系。如图 1-1 即为某电力系统主接线图。

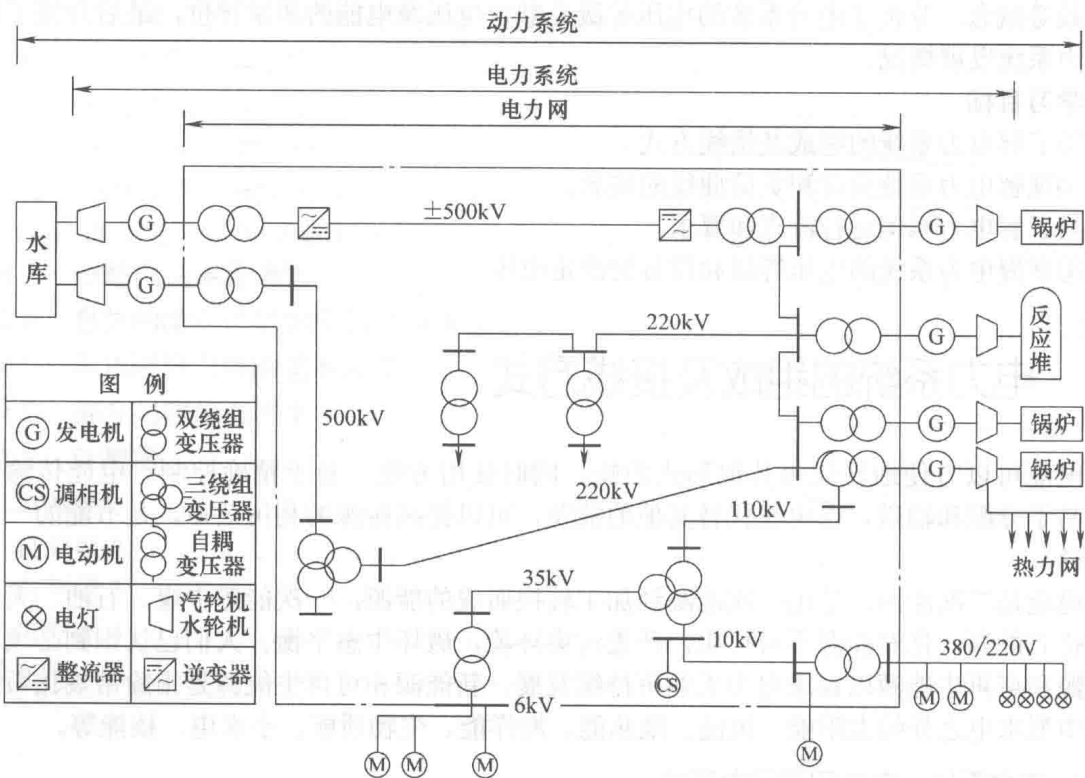


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网的示意图

4. 电力系统的基本参量和电力网的结构及接线图

(1) 电力系统的基本参量

电力系统的基本参量有装机容量、年发电量、最大负荷、额定频率和最高电压等级。

- ①装机容量。电力系统总装机容量是指系统中实际安装的发电机组额定有功功率总和，以千瓦（kW）、兆瓦（MW）、吉瓦（GW）计。
- ②年发电量。电力系统的年发电量是指该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，以兆瓦时（MWh）、吉瓦时（GWh）、太瓦时（TWh）计。
- ③最大负荷。最大负荷一般指规定时间，如一天、一月或一年内，电力系统总有功功率负荷的最大值，以千瓦（kW）、兆瓦（MW）、吉瓦（GW）计。
- ④额定频率。按国家标准，我国所有交流电力系统的额定频率均为 50Hz。国外也有 60Hz 的。

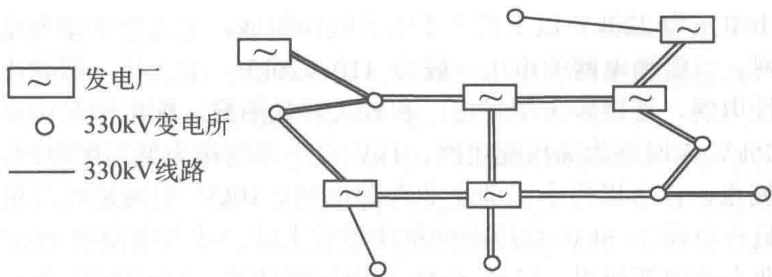


图 1-2 电力系统的地理接线图

⑤最高电压等级。如图 1-1 所示，同一电力系统中的电力线路往往有几种不同电压等级。所谓最高电压等级是指该系统中最高电压等级的电力线路的额定电压，以千伏（kV）计。例如，图 1-1 所示系统最高电压等级为 500kV。

(2) 电力网的结构与接线方式

1) 电力网的结构

电力网主要由变压器和不同电压等级的电力线路组成。一个大的电力网（联合电力网）由许多子电力网互连组成。如美国和加拿大电力传输系统互相连接形成一个大电网，称为北美互连电网。

电力网采用分层结构，一般可以划分为一级输电网、二级输电网、高压配电网和低压配电网，如图 1-3 所示。

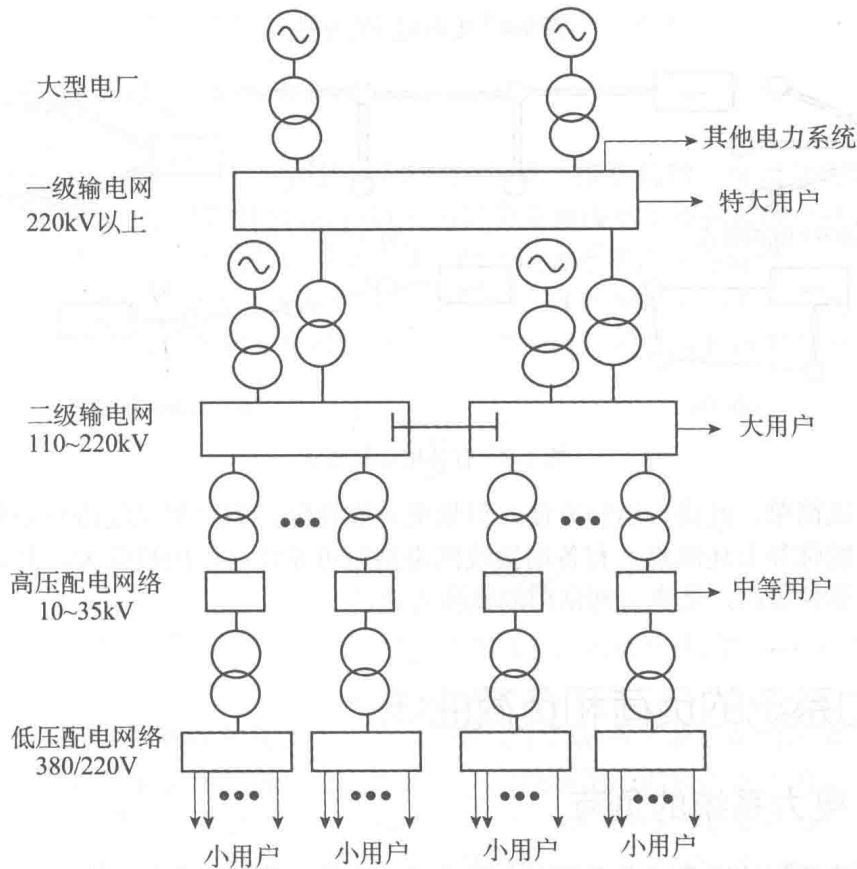


图 1-3 电力网结构

一级输电网由电压为 220kV 以上的主干电力线路组成，它连接大型发电厂、特大容量用户及相邻子电力网。二级输电网的电压一般为 110~220kV，它上接一级输电网，下接高压配电网，是一区域性电网，连接较大型发电厂和较大容量用户。配电网是向中等用户和小用户供电的网络。6~35kV 电网称为高压配电网，1kV 以下电网称为低压配电网。35kV 高压配电网适用于农村和城市，也可以用于工业企业内部电网。10kV 电网是较常用的电压较低一级的高压配电网。只有负荷中 6kV 高压电动机比重较大时，才考虑使用 6kV 配电方案，3kV 配电网只限于工业企业内部使用，已被 6kV 配电网所代替。220/380V 低压配电网使用最为广泛。

2) 电力网的接线方式

电力网的接线方式大致可以分为无备用接线和有备用接线两类。如图 1-4 所示，无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络。如图 1-5 所示，有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式和环式及两端供电网络。环式和两端供电网络又称闭式网络，其他则称为开始网络。

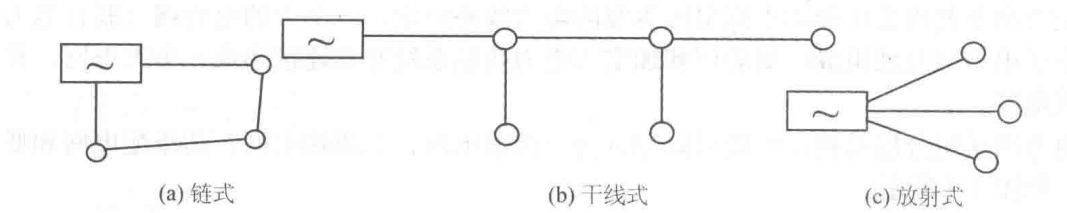


图 1-4 无备用接线方式

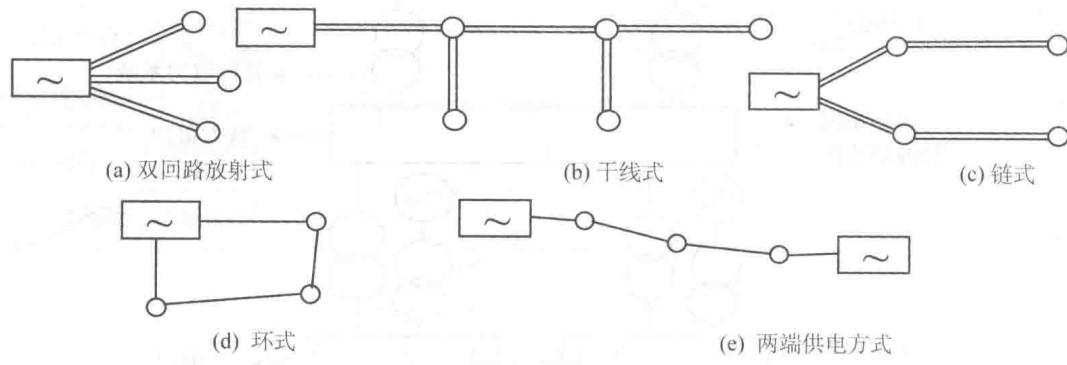


图 1-5 有备用接线方式

无备用接线简单、经济、运行方便，但供电可靠性低，利用架空线路自动重合闸装置，在一定程度上能弥补上述缺点。有备用接线网络供电可靠性高，但投资大，且操作复杂。其中闭式网络可靠性更高，是电力网常用的接线方式。

1.2 电力系统的负荷和负荷曲线

1.2.1 电力系统的负荷

电力系统的负荷是指系统中所有用电设备消耗功率的总和，也称电力系统的综合用电负荷。可分为动力负荷和照明负荷。根据用户性质，可分为工业负荷、农业负荷、交通运输负

荷和人民生活用电负荷等。

电力系统的供电负荷是指电力系统的综合负荷加上电力网的功率损耗，即发电厂供出的负荷。电力系统的发电负荷是指电力系统的供电负荷加上发电厂的厂用电，即发电机应发出的功率。各用电设备的有功功率和无功功率随电压和系统频率的变化而变化，其变化规律不尽相同。综合用电负荷随电压和频率的变化规律是各用电负荷变化规律的合成。图 1-6 (a) 和图 1-6 (b) 所示分别是某电力系统综合用电负荷的电压特性曲线和频率特性曲线。

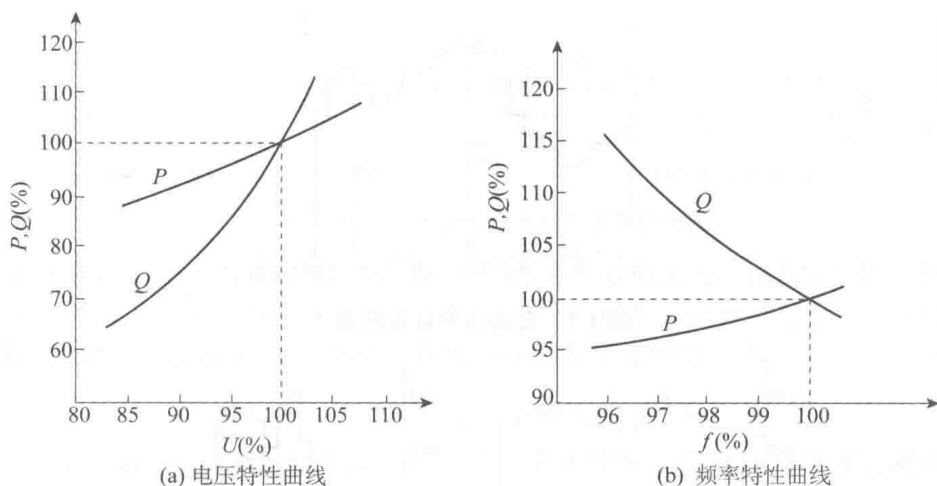


图 1-6 某电力系统综合用电负荷的特性曲线

1.2.2 负荷曲线

负荷曲线是指某一段时间内负荷随时间变化的规律。按负荷种类可以分为有功功率负荷曲线和无功功率负荷曲线；按时间长短可以分为日负荷曲线和年负荷曲线；按计量地点可以分为个别用户、电力线路、变电所、发电厂以致整个电力系统的负荷曲线。

图 1-7 所示为电力系统的负荷曲线，用来描述一天 24 小时负荷的变化情况。曲线最大值称为日最大负荷，最小值称为最小负荷。有功负荷曲线所包围的面积称为电力系统的日用电量。即

$$W_d = \int_0^{24} p dt \quad (1-1)$$

平均负荷为：

$$P_{av} = \frac{W_d}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} p dt \quad (1-2)$$

负荷率定义为平均负荷 P_{av} 与最大负荷 P_{max} 之比 K_m ，表示负荷曲线平坦的程度，即

$$K_m = P_{av} / P_{max} \quad (1-3)$$

不同行业的有功负荷曲线差别很大，三班制连续生产的重工业负荷曲线如图 1-8 (a) 所示，负荷曲线平坦，最小负荷达最大负荷的 85%；一班制生产的轻工业负荷，如图 1-8 (b) 所示。负荷变化幅度较大。最小负荷仅为最大负荷的 13%~14%；图 1-8 (c) 为农业加工负荷，每天用电 12 小时，但在夏季出现排灌负荷时，负荷曲线较为平坦。图 1-8 (d) 为市政生活负荷曲线，其特点是存在照明电力高峰。尽管不少行业的负荷曲线有较大的变化幅度，

但整个电力系统的负荷曲线还是比较平坦的。这是因为不同行业负荷曲线上的最大值不是在同一时刻出现的，而电力系统负荷曲线是各行业负荷曲线相加得到的。因此电力系统负荷曲线最大值恒小于各行业负荷曲线的最大值。在实际计算时，各行业最大负荷相加后，应乘以一个小于 1 的同时系数才能得到电力系统的最大综合负荷。

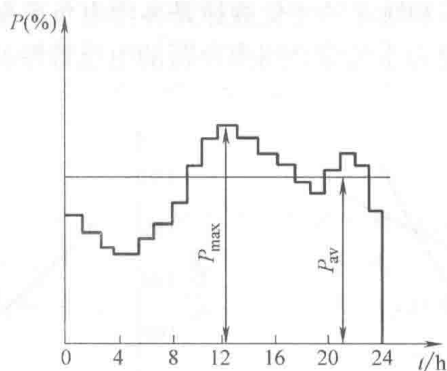


图 1-7 有功功率日负荷曲线

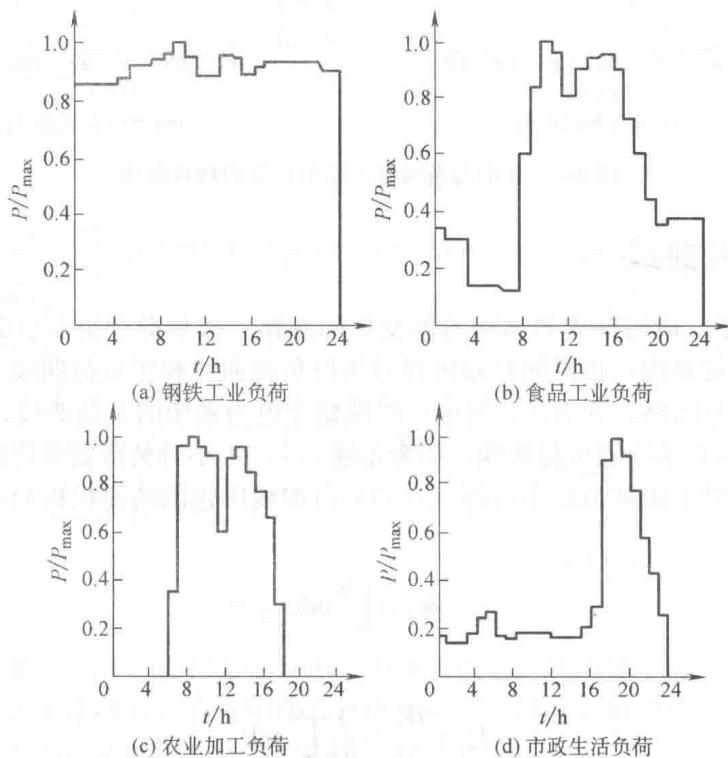


图 1-8 四种行业的有功功率日负荷曲线

负荷曲线对电力系统运行有重要意义，依据它安排日发电计划和确定系统运行方式。如图 1-9 (a) 所示，年最大负荷曲线是描述一年内每月或每日最大有功功率负荷变化情况。它主要用来安排发电设备检修，同时也为制定发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。

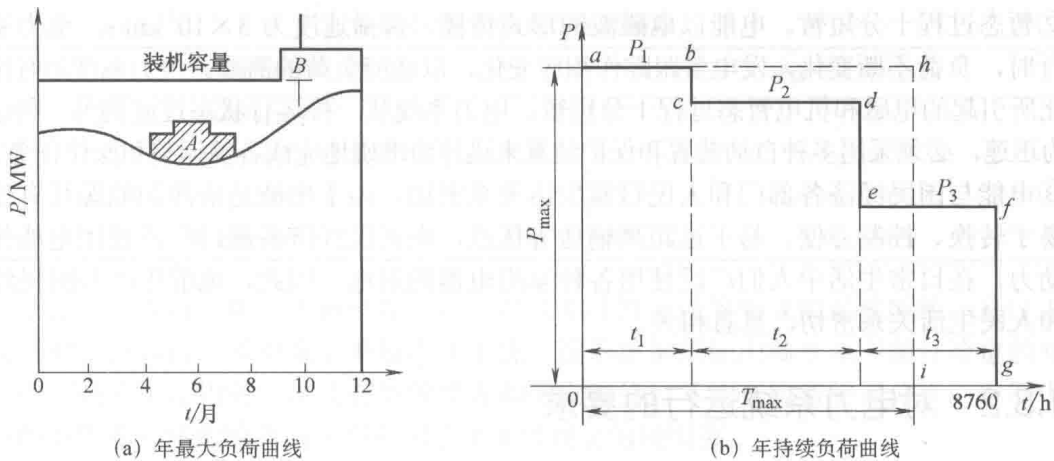


图 1-9 年最大负荷曲线和年持续负荷曲线

年持续负荷曲线由一年中系统负荷按其数值大小及其持续时间由大到小排列而成，如图 1-9 (b) 所示。在安排发电计划时，进行可靠性估算和电网规划与运行的能量损耗计算等方面常用该曲线。根据该曲线可以计算系统负荷的全年耗电量。即

$$W_d = \int_0^{8760} p dt \tag{1-4}$$

如果负荷等于最大值 $P_{\max}$ ，经过 $T_{\max}$ 小时后所消耗的电能恰好等于全年实际耗电量，则称 $T_{\max}$ 为年最大负荷损耗利用小时数，即

$$T_{\max} = \frac{W_d}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} p dt \tag{1-5}$$

$T_{\max}$ 为年最大负荷利用小时数，随负荷性质和特点各类负荷的 $T_{\max}$ 可查表 1-1。

表 1-1 各类用户的年最大负荷利用小时数

负荷类型	$T_{\max}$ (h)	负荷类型	$T_{\max}$ (h)
市政生活	2 000~3 000	二班制企业用电	6 000~7 000
一班制企业用电	1 500~2 200	农灌用电	1 000~1 500
二班制企业用电	3 000~4 500		

在设计电网时，用户的负荷曲线往往未知，但如果知道用户的性质，可以通过查有关技术手册选择适当 $T_{\max}$ 值，即可以估算出用户全年耗电量为

$$W_d = P_{\max} T_{\max} \tag{1-6}$$

1.3 电力系统运行特点和要求

1.3.1 电力系统运行的特点

①电能不能大量存储。电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的。发电厂在任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消耗的电能与变换、输送和分配过程中电能损耗的电能总和。即发电容量和用电容量随时保持平衡。