

· 应用型系列教材 ·

总主编 吴国华

发电厂电气主系统

主 编 郭东旭 张新玉 辛 涛
副主编 马祥坤 苏 凤 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>

· 应用型系列教材 ·

发电厂电气主系统

主 编 郭东旭 张新玉 辛 涛
副主编 马祥坤 苏 凤 贾振江

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

全书分为 10 章, 内容紧密结合发电厂及变电站的实际情况, 主要包括发电、变电和输电的电气主系统的构成、设计和运行的基本理论和计算方法, 相应地介绍主要电气设备的原理和性能、设备选择以及接地装置等。编写过程严格按照最新版本的国家标准规范要求, 以反映最新的技术, 结合先进性与实用性。书中配有典型电气实例图, 通过电气设备在主电路图中的应用, 即学即用, 由浅入深, 通俗易懂。真正将企业应用很好地结合于教学内容之中。

本书除了可作为应用型本科教材外, 高职高专院校等相关专业也可选用, 包括电气工程及其自动化、测控技术与仪器、电力系统自动化、机械制造及其自动化、机电一体化技术等相关专业, 也可作为电力系统领域的广大工程技术人员和科技工作者的学习参考用书。

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

发电厂电气主系统 / 郭东旭, 张新玉, 辛涛主编. —北京: 电子工业出版社, 2017.6
ISBN 978-7-121-30880-2

I. ①发… II. ①郭… ②张… ③辛… III. ①发电厂—电气设备—高等学校—教材
IV. ①TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 021476 号

策划编辑: 贺志洪

责任编辑: 胡辛征

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1092 1/16 印张: 18.25 字数: 490 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 43.80 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。

质量投诉请发邮件至 zlbs@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, 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、技术技能型人才。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。

军马未动、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。一部好的教材是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，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“应用型本科系列教材”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。高职教材虽然也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学习差异，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。这是研编团队的领导人要求。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、服务等必须的意识 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。这个表述的涵义：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，必须包含有问题或疑难情境，并且可能包含有解决问题的方法。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本科系列教材，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

为了实现应用型本科人才的培养目标，更好地满足电力工业快速发展的人才需求。本书在内容处理上既注意体现电力领域的最新技术，又注意本科学生的知识和能力结构，以应用型本科教育工科专业为背景，按照发、输、变、配电的完整过程，着重叙述发电、变电和输电的电气主系统的构成、设计和运行的基本理论和计算方法，相应地介绍了主要电气设备的原理和性能、设备选择以及接地装置等。在讲述基础理论和设计计算方面以“必需、够用”为度，既有理解分析，又有例题验证，利于培养和训练学生分析问题和解决问题以及开拓创新能力。将企业工作中所用到的专业知识应用于教学中，书中的案例大部分来源于企业，而且采用的技术较为先进且与实用性相结合。在编写的过程中严格按照最新版本的国家标准规范要求，以反映最新的技术，将先进性与实用性相结合。书中配有典型电气实例图，通过电气设备在主电路图中的应用，即学即用，由浅入深，通俗易懂。真正将企业应用很好地结合于教学内容之中。

本书是作者在多年从事生产技术工作，把生产实际经验与多年相关课程的教学、科研融入一体的基础上编写的。本书既可作为应用型本科教材外，还可作为高职高专院校电气工程及其自动化、电力系统自动化、机电一体化技术等相关专业的教材（教师可以根据专业来选择需要讲解的内容），也可作为企业培训人员、电力设备安装与维修人员，以及工厂技术人员的学习用书。本书共分 10 章。第 1 章介绍发电厂，第 2 章介绍高低压设备，第 3 章介绍发电、变电和输电的电气部分，第 4 章介绍导体的发热与电动力，第 5 章介绍电气主接线及设计，第 6 章介绍厂用电接线及设计，第 7 章介绍导体和电气设备的选择，第 8 章介绍配电装置，第 9 章介绍发电厂和变电站的控制与信号，第 10 章介绍电气装置的接地。书中标有“*”为选学内容。

本书由烟台南山学院郭东旭编写第 2、3 章，烟台南山学院辛涛编写第 4 章，烟台南山学院苏凤编写第 10 章，辽宁石油化工大学张新玉编写第 1、5、6、7、9 章，山东南山铝业股份有限公司马祥坤编写第 8 章。本书由郭东旭副教授统稿。

在本书编写过程中，作者参考了多位同行专家的著作以及设计规范、设计标准图册等。

在此特别对在编写过程中给予大力帮助的烟台南山学院孙玉梅教授、山东南山热电有限公司贾振江高级工程师表示感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在缺点和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

言 语

目 录

第 1 章 发电厂	1
1.1 概述	1
1.2 电力系统及能源	7
1.3 火力发电厂及其生产过程	13
1.4 水力发电厂及其生产过程	18
1.5 核能发电厂	21
1.6 其他发电	24
复习思考题 1	25
第 2 章 高低压设备	26
2.1 概述	26
2.2 高压断路器	32
2.3 少油断路器	38
2.4 真空断路器	41
2.5 SF ₆ 断路器	44
2.6 高压断路器	48
2.7 低压断路器	49
2.8 隔离开关	54
2.9 负荷开关	60
2.10 电流互感器和电压互感器	62
复习思考题 2	71
第 3 章 发电、变电和输电的电气部分	72
3.1 发电厂的电气部分	72
3.2 高压交流输变电	79
复习思考题 3	86

第4章 导体的发热与电动力	87
4.1 导体发热和散热的计算	87
4.2 导体的长期发热与载流量	91
4.3 导体的短时发热	93
4.4 导体短路的电动力	97
复习思考题 4	104
第5章 电气主接线及设计	105
5.1 电气主接线设计原则和程序	105
5.2 电气主接线的基本接线形式	108
5.3 发电厂和变电所主变压器选择	125
5.4 限制短路电流的方法	128
复习思考题 5	132
第6章 厂用电接线及设计	133
6.1 概述	133
6.2 发电厂的厂用电接线	135
6.3 不同类型发电厂和变电所用电典型接线分析	141
6.4 厂用变压器的选择	150
6.5 厂用电动机的选择和自启动校验	155
复习思考题 6	163
第7章 导体和电气设备的选择	165
7.1 电气设备选择的一般条件	165
7.2 高压断路器的选择	170
7.3 隔离开关的选择	173
7.4 电流互感器的选择	175
7.5 电压互感器的选择	178
7.6 高压熔断器的选择	179
7.7 导体与电缆的选择	181
7.8 限流电抗器的选择	184
7.9 电缆、支柱绝缘子和穿墙套管的选择	186
复习思考题 7	192
第8章 配电装置	193
8.1 概述	193
8.2 成套配电装置	200
8.3 屋内配电装置	208

8.4 屋外配电装置	214
复习思考题 8	215
*第 9 章 发电厂和变电站的控制与信号	218
9.1 发电厂和变电站的控制	218
9.2 二次回路接线图	220
9.3 断路器的传统控制方式	226
9.4 火电厂的计算机监控系统	235
9.5 变电站的计算机监控系统	236
复习思考题 9	240
第 10 章 电气装置的接地	241
10.1 概述	241
10.2 接地和接地装置	242
10.3 电气装置的接地电阻	246
10.4 接地装置的布置	248
10.5 防雷装置的接地装置要求	254
10.6 接地装置的测试	254
复习思考题 10	256
附录	257
参考文献	277

第 1 章 发电厂

本章概述了与发电厂电气有关的基本知识和基本问题，为学习本课程奠定初步的基础。首先介绍了我国电力工业发展概况、电力系统的基本知识及能源，然后简介典型的发电厂的生产过程，最后讲述了其他形式的发电厂。

1.1 概述

1. 我国电力工业发展概况

电力发展和应用的程度，是衡量国民经济发展水平和社会现代化水平高低的重要标志之一。电力发展必须超前国民经济的增长。人类在开发能源中不断前进，继 17 世纪广泛利用蒸汽机后，18 世纪发现了电能，19 世纪中叶制成了发电机。从 19 世纪末开始，电力应用得到了快速发展。1875 年，世界上最早的发电厂——巴黎北火车站电厂建成，用于照明供电；1878 年，法国建成第一座水电厂；1879 年，美国旧金山实验电厂开始发电，成为世界上最早出售电力的电厂；1882 年，法国开始进行远距离高压直流输电，同时英国、日本、俄罗斯相继修建了发电厂。

我国电力工业发展历程如下。

(1) 新中国成立前的电力工业

我国电力工业始于 1882 年，当年建成的第一个发电厂是上海乍浦路电灯厂，装机只有 16 马力 (11.8kW)。我国大陆最早兴建的水电站是位于云南省昆明市郊的石龙坝水电站，电站一厂于 1910 年 7 月开工，1912 年 4 月发电，装机容量为 480kW。到 1949 年底新中国成立时，全国发电装机容量仅有 185 万 kW，发电量为 43 亿 kW·h，分别居世界第二十一位和第二十五位。

(2) 新中国成立初期的电力工业

从 1950 年至 1978 年间，国产 10 万 kW、12.5 万 kW、20 万 kW、30 万 kW 汽轮发电机组和国产 15 万 kW、22.5 万 kW、30 万 kW 水轮发电机组相继制成并投产。1960 年全国发电装机容量突破 1000 万 kW，居世界第九位；1965 年新中国建设第一座大型水电站（新安江水电站）；1969 年，我国修建的第一座百万 kW 级的大型水电站（刘家峡水电站）开始发电，1974 年底水电站全部建成；1974 年国产第一台 30 万 kW 火电机组（江苏望亭电厂）投产发电。

(3) 改革开放后的电力工业

至 1978 年底, 全国发电装机容量达到 5712 万 kW, 年发电量达到 2566 亿 kW·h, 居世界第七位。1972 年中国第一条 330kV 线路(刘家峡—陕西关中, 534km)建成, 将陕、甘、青电网互联, 初步形成了西北电网。与此同时, 东北、京津唐、华东、华中电网形成了 220kV 主干网架。各种能源的发展历程如下:

① 火电。

2000 年以前, 我国的火电厂是以 30 万 kW 机组为主, 2000 年以后, 主要建设 30 万 kW 及以上高参数、高效率、调峰性能好的机组, 引进和发展超临界机组。至 2006 年底, 全国火电装机达到 48405 万 kW, 约占总容量 77.82%; 火电发电量达到 23573 亿 kW·h, 约占全部发电量 83.17%。

② 水电。

实行改革开放以来, 我国规划并建设了葛洲坝、白山、龙羊峡、漫湾、广蓄、天生桥、五强溪、小浪底、二滩、天荒坪、三峡、龙滩、瀑布沟等一批巨型水电站, 迈入世界水电建设前列。至 2006 年底, 全国水电装机达到 12857 万 kW, 约占总容量 20.67%; 水电发电量达到 4167 亿 kW·h, 约占全部发电量 14.70%。目前我国是世界上水电在建规模最大、发展速度最快的国家。

③ 核电。

1994 年浙江秦山电站一期 30 万 kW 国产机组和广东大亚湾电站(装机容量 2×90 万 kW, 法国机组)的投产运行实现了我国核能发电零的突破。到 2006 年底全国核电装机 670 万 kW, 约占总容量 1.08%; 核电发电量 543 亿 kW·h, 约占全部发电量 1.92%。

④ 新能源。

从 1992 年到 2001 年, 我国的新能源发电装机容量以年均 44.55% 的速度发展, 至 2001 年底, 装机容量已达 37 万 kW。2003 年年底我国太阳能电池的累计装机已经达到 5 万 kW。2004 年底, 我国已建风电厂 43 个(除台湾地区), 1292 台机组, 累计装机容量 76.4 万 kW。

⑤ 电网。

全国已经形成华北(山西、河北、北京、天津及内蒙古部分地区)、东北(黑龙江、吉林、辽宁及内蒙古部分地区)、华东(上海、江苏、浙江、安徽)、华中(河南、湖南、湖北、江西)、西北(陕西、甘肃、青海、宁夏)、川渝(四川、重庆)和南方联营(广东、广西、云南、贵州)七个跨省区电网, 及山东、福建、海南、乌鲁木齐和拉萨五个独立的省级电网。2006 年, 1000kV 交流特高压试验示范工程和云南至广东 ± 800 kV 特高压直流输电示范工程奠基仪式已分别举行, 标志着交、直流特高压试验示范工程建设已拉开帷幕。

2. 发展现状

(1) 我国发电装机容量和发电量连续 10 年居世界第 2 位。改革开放以后, 我国电力建设不断跨上新台阶。目前, 全国发电装机容量达到 2.36 亿 kW, 发电量超过 10000 亿 kW·h, 均居世界第 2 位。

(2) “西电东送、南北互供、全国联网”格局已基本形成。

我国资源分布不平衡。东部地区经济发展快, 一次能源缺乏, 西部地区资源丰富; 南方多水电, 而北方多火电。因此必须加快跨区、跨省电网建设, 形成全国联合电网。到 2010 年, 全国将形成结构合理、层次分明、各区域电网联系较为紧密的互联电网。2010 年以后, 在金

沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江以及黄河上游水电、“三西”煤电基地电力外送的基础上，全国电网将形成以三峡电力系统为核心，以坚强的区域电网网架和跨大区输电网架为基础、区域电网间联系紧密的全国互联电网。预计到2020年，这一电网可将西部1亿kW左右的电力送到东部，大区之间的电力互送达到7000万kW至8000万kW。在电力发展中我国始终坚持统一规划，包括统一规划电源布局，统一规划全国电网、区域电网，统一规划一次系统和二次系统，统一规划送端和受端电网等。要进一步加强电网结构和大区间的联网建设。除在建工程外，还有华东电网江苏、安徽的第三条和第二条过江通道及浙江沿海第二回500kV输电工程、东北电网的第三通道工程、川渝电网的成都500kV环网及二滩送出加强工程等建设。

(3) 电力设备的制造水平大大提高。

国产第一台30万kW和60万kW火电机组（引进美国制造技术）先后于1974年（江苏望亭电厂）和1989年（安徽平圩电厂）投产发电。现在，国内已能批量制造60万kW、100万kW火电机组和70万kW水电机组、百万千瓦核电机组、5MW风电机组以及超高压交直流输电设备。另外，国内一些企业已经具备为百万千瓦级核电站提供设备的能力。大部分1000kV特高压交流设备、±800kV特高压直流设备实现了国产化，已经能制造60万kW、100万kW级的超超临界机组。太阳能光伏电池等其他新能源装备的研制和生产也都取得了重要进展。

(4) 电力科技水平大大提高。

电力科技水平大大提高，与世界先进水平日渐接近。我国电力工业立足于科技兴电，相继建成了一批具有世界先进水平的重点实验室和装置，完成了一批重大科研课题，掌握和解决了大机组建设和全国联网等大电力系统的建设和运行等一系列问题。

另外，我国拥有自主知识产权的高温气冷堆核电技术，并已应用。大功率电力电子技术在电力系统中取得了重大成就，串补、可控串补成功应用于超高压系统。高压超导电缆的研制与应用取得新的成果，达到国际先进水平。部分电网建成了数字化变电站、500kV无人值班、500kV电网区域控制中心，建成了以实时数字仿真系统为核心的电网仿真系统。成功研制出变电站巡检机器人，并达到国际先进水平，成功研制出厘米级微发电系统，并与国际水平相当；成功研制出百瓦级的行波热声发电机；在国际首创“全永磁悬浮风力发电技术”；在快中子热核聚变方面的研究取得了重大的发展。

(5) 电力环境保护得到加强。

环境排放得以控制、生态保护日益加强，使电力发展的经济效益、社会效益与环境效益渐趋统一。2015年，发电企业加快节能减排升级改造步伐，不断降低能耗水平和污染物排放强度，持续降低碳排放强度，五大发电集团全部提前完成“十二五”减排目标。2015年，华能集团全部煤机实现达标排放，累计2069万kW机组完成超低排放改造；大唐集团超低排放机组占燃煤机组总装机容量的25%，容量居行业首位；华电集团完成超低排放改造和建设38台机组共1221.5万kW；国电集团加快推进重点区域和企业环保治理，2126万kW机组实现超低排放；合并后的国家电投集团776万kW机组实现超低排放；截至2015年底，国华电力完成25台机组共1309万kW超低排放改造，占比达到36.8%，居行业首位。

(6) 在利用外资、引进设备、引进技术、实施走出去战略等方面都取得了巨大的成就。

在地热、风力、潮汐、太阳能、生物质能等新能源发电方面，经多年的科技攻关及建设示范性电站或试验电站，已掌握了设计、制造和运行技术。我国最大的地热电站——西藏羊

八井第一、二地热电站总装机容量 2.518 万 kW；我国最大的风电场——内蒙古赤峰赛罕坝风电场总装机容量 17 万 kW；我国第二大风电场是新疆达坂城风电场，其总装机容量 14 万 kW；我国最大的潮汐电站——浙江省江夏潮汐电站总装机容量 3200kW；我国最大的垃圾焚烧电厂——上海浦东垃圾焚烧电厂总装机容量 1.7 万 kW。

3. 我国电力工业与世界先进水平的差距

(1) 发电设备技术结构不合理，调峰能力弱。

① 燃煤机组发电量占全国总发电量的比重大，机组技术装备水平较低，整体能效偏低。

② 发电量中水电、核电及新能源发电比重较低。水电开发程度低，远低于世界平均水电开发率，抽水蓄能机组比例低。

③ 供热机组的容量比例与世界先进水平相比仍然较低。

④ 大机组的比重过小，30 万 kW 及以上机组只占总容量的 45.2%，平均机组容量仅为 5.82 万 kW。

⑤ 发电设备技术参数相对落后，我国超临界机组只占火电总装机容量的 4.3%，燃气-蒸汽联合循环机组的比例过低，仅占火电总装机容量的 2.3%。

(2) 电网建设与电源建设不协调，供电可靠性偏低。我国电力建设长期以来“重发轻供”的情况十分突出。近年来，电网建设与电源建设不协调、电网建设严重滞后。部分电网网架结构不够坚强，出现窝电和缺电并存的现象；配电网仍不能满足用电需求增长的需要；供电可靠性偏低。

(3) 人均拥有装机容量和人均占有发电量较低。目前我国人均拥有装机容量和人均占有发电量不到世界平均水平的一半，约为发达国家的 1/6 和 1/10。

(4) 技术经济指标平均水平不高。火电厂平均发电煤耗、供电煤耗、厂用电率、电网线损率等仍较高。其中，与国际先进水平相比，火电厂供电煤耗约高 $50\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，火电厂每千瓦时耗水率约高 40%，输电线损率高 2%~2.5%。

(5) 火电厂的污染物排放量高。火电厂的二氧化硫、氮氧化物和大量粉尘的排放尚未得到有效控制。目前我国每年煤电发电排放的二氧化硫已达近 1000 万 t。

(6) 发供电设备质量问题较多，性能欠佳。

(7) 发电厂用人过多，人员整体素质和效率不高，效益偏低。

4. 发展趋势

我国电力工业在“十一五”期间，将实现电力投产规模为 1.65 亿 kW 左右，关停凝汽式火电小机组 1500 万 kW 的主要发展目标。“十一五”期间我国电力工业发展的基本方针如下所述。

(1) 大力开发水电

水能资源是可再生的、清洁的能源；水电站的发电成本低，水库可以综合利用；在电力系统中，有一定比重的水电装机容量对系统调峰和安全经济运行极为有利。我国大陆水利资源理论蕴藏量和可开发装机容量均居世界首位，理论蕴藏量在 1 万 kW 及以上的河流共 3886 条，技术可开发装机容量 54164 万 kW，经济可开发装机容量 40180 万 kW。

优先并加快开发水电，是我国电力发展的基本方针，也是西部开发、西电东送的主要内容。我国水电建设将按照流域梯级滚动开发方式，重点开发黄河上游、长江中上游及其干支流、红水河、澜沧江中下游和乌江等流域。在东北、华北、华东等火电比重较大的电力系统，

为适应系统调峰要求，将要建设相当规模的抽水蓄能电站。我国近期在建和拟建的大型水电站有十几座。近10~15年内我国将新增50万kW机组120多台，到2020年，水电装机容量将增加到25000万kW。

(2) 优化发展煤电

火电厂的厂址不受限制，建设周期短，能较快发挥效益，燃煤火电仍是发电装机容量的主要组成部分。我国有丰富的煤炭、石油和天然气资源。煤电发展的重点是建设大型、高效、低污染燃煤火电机组，鼓励建设超临界、超超临界大容量机组，新建燃煤机组的单机容量要在60万kW及以上。预计2020年燃煤火电装机将达7.1亿~7.85亿kW。

(3) 积极发展核电

核电是一种“安全、可靠、高效、经济、清洁”的能源。发展核电是实施电力可持续发展战略的长远大计。加快核电发展有利于电力结构调整，是解决我国能源资源不足的一项重要战略措施。根据我国电力工业发展规划，未来20年我国将成为全世界最大的新核电厂建设基地。到2020年，核电容量将要达到4000万kW，还要新建31台百万千瓦级核电机组，约占整个电力装机容量的4%。

我国目前已经形成了浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾三个核电基地，拥有11台核电机组、约870万kW的装机容量。但是距世界水平仍有很大差距，目前全球核电占电能的比重为17%，已有17个国家核电在本国发电量中的比重超过25%，而我国核发电量占总量不到2%，远不到世界平均水平，更远远低于法国85%、美国20%的水平。核电在沿海地区是发展的必经之路，主要是沿海经济发达而一次能源短缺的广东、福建、浙江、江苏、辽宁、山东等省需要建设一批单机百万千瓦级的核电站；同时也探索在内地发展核电，主是在江西、湖南、安徽、吉林等省建设核电站。

(4) 适当发展天然气发电

天然气发电是燃气轮机联合循环的主要应用领域。利用天然气发电的地区将主要是华南、华东、华北等经济发达、能源贫乏地区以及产气的西北、川、渝地区。据预测，2010年天然气发电装机2800万~3000万kW，2020年天然气发电装机6000万~7000万kW。

(5) 加快新能源发电

新能源发电主要包括风力发电、潮汐发电和太阳能发电，也包括地热发电和垃圾、生物质能发电等。在新能源发电中，以风力发电为主。预计到2010年，新能源发电将占全国装机容量1%以上。

(6) 加强电网发展

在继续大力发展电源的同时，只有高度重视电网的建设，才能促进煤电就地转化和水电大规模开发。我国将加强各跨省区电网建设，不断扩大跨省区的联网送电，提高资源使用效率和优化配置。重点建设西北与川渝联网，华中与西北、华北加强联网，华北与西北、华东联网，以及东北与华北加强联网等项目，形成北、中、南三大输电通道，实现全国主要大区电力系统之间的联网。电网将主要建设±500kV交直流系统、750kV交流系统，重点研制800kV直流和交流百万伏级输变电系统。

(7) 重视生态环境保护，提高能源效率

在开发能源的同时，采取有效措施节约能源、降低损耗（煤耗、水耗、线损等），提高能源利用效率。实行电力发展与环境保护相协调的方针，使电力建设与环境保护“同步规划、同步实施、同步发展”。