



2014—2015

动力与电气工程 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN POWER
AND ELECTRICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编 中国电机工程学会 编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

TK-12
1

2014—2015

动力与电气工程

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN
POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编

中国电机工程学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

2014—2015 动力与电气工程学科发展报告 / 中国科学技术协会主编; 中国电机工程学会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2016.2
(中国科协学科发展研究系列报告)
ISBN 978-7-5046-7082-3

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 动力系统—学科发展—研究报告—中国—2014—2015 ② 电气工程—学科发展—研究报告—中国—2014—2015 IV. ① O19-12 ② TM-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025921 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	夏凤金
装帧设计	中文天地
责任校对	杨京华
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	600千字
印 张	27.5
版 次	2016年4月第1版
印 次	2016年4月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7082-3 / O · 189
定 价	110.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)



2014—2015

动力与电气工程学科发展报告

首席科学家 周孝信

编 审 组

组 长 郑宝森

副组长 周孝信 谢明亮

编 写 组

组 长 梁曦东 陈小良

专题编写组

组 长 (按姓氏笔画排序)

王伟胜 王成山 朱法华 汤 涌 吴金城
闵 勇 汪映荣 赵争鸣 高克利 盛 况
蔡宁生

成 员 (按姓氏笔画排序)

卜广全 王月明 王文卓 王为民 王志峰
王明政 王海茹 王煦嘉 戈志华 孔祥玉

邓 桃	石文辉	申旭辉	史宏达	冯 英
朱家玲	伍晶晶	庄 烨	刘 宏	刘 彬
汤必强	许月阳	许世森	许洪华	孙 栩
孙 锐	孙献斌	李 斌	李 鹏	(中国电力科学研究院)
李 鹏	(天津大学)		李庆峰	杨国生
杨勇平	杨海瑞	肖俊峰	张 兴	张子富
张搏宇	陈晓明	孟玉婵	林 宏	周 纓
周泽昕	周勤勇	郑 彬	赵文瑛	赵志刚
胡 伟	郦建国	侯俊贤	俞卓平	姜卫红
姚宇平	姚志强	姚建国	骆仲泱	莫 华
倪益民	高 飞	高 翔	郭 宇	郭 俊
郭庆来	黄 炜	曹枚根	曹学武	崔利群
董玉杰	游小杰	蒙绍新	雷 霄	穆云飞

学术秘书 曹枚根 刘 佳

党的十八届五中全会提出要发挥科技创新在全面创新中的引领作用，推动战略前沿领域创新突破，为经济社会发展提供持久动力。国家“十三五”规划也对科技创新进行了战略部署。

要在科技创新中赢得先机，明确科技发展的重点领域和方向，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口十分重要。从2006年开始，中国科协所属全国学会发挥自身优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才队伍，持续开展学科发展研究，通过对相关学科在发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作、人才队伍建设等方面的最新进展的梳理和分析以及与国外相关学科的比较，总结学科研究热点与重要进展，提出各学科领域的发展趋势和发展策略，引导学科结构优化调整，推动完善学科布局，促进学科交叉融合和均衡发展。至2013年，共有104个全国学会开展了186项学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告186卷，先后有1.8万名专家学者参与了学科发展研讨，有7000余位专家执笔撰写学科发展报告。学科发展研究逐步得到国内外科学界的广泛关注，得到国家有关决策部门的高度重视，为国家超前规划科技创新战略布局、抢占科技发展制高点提供了重要参考。

2014年，中国科协组织33个全国学会，分别就其相关学科或领域的发展状况进行系统研究，编写了33卷学科发展报告（2014—2015）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，近几年来，我国在基础研究、应用研究和交叉学科研究方面取得了突出性的科研成果，国家科研投入不断增加，科研队伍不断优化和成长，学科结构正在逐步改善，学科的国际合作与交流加强，科技实力和水平不断提升。同时本次学科发展报告也揭示出我国学科发展存在一些问题，包括基础研究薄弱，缺乏重大原创性科研成果；公众理解科学程度不够，给科学决策和学科建设带来负面影响；科研成果转化存在体制机制障碍，创新资源配置碎片化和效率不高；学科制度的设计不能很好地满足学科多样性发展的需求；等等。急切需要从人才、经费、制度、平台、机制等多方面采取措施加以改善，以推动学科建设和科学研究的持续发展。

中国科协所属全国学会是我国科技团体的中坚力量，学科类别齐全，学术资源丰富，汇聚了跨学科、跨行业、跨地域的高层次科技人才。近年来，中国科协通过组织全国学会

开展学科发展研究，逐步形成了相对稳定的研究、编撰和服务管理团队，具有开展学科发展研究的组织和人才优势。2014—2015 学科发展研究报告凝聚着 1200 多位专家学者的心血。在这里我衷心感谢各有关学会的大力支持，衷心感谢各学科专家的积极参与，衷心感谢付出辛勤劳动的全体人员！同时希望中国科协及其所属全国学会紧紧围绕科技创新要求和国家经济社会发展需要，坚持不懈地开展学科研究，继续提高学科发展报告的质量，建立起我国学科发展研究的支撑体系，出成果、出思想、出人才，为我国科技创新夯实基础。

A stylized handwritten signature in black ink, reading '韩爽' (Han Shuang).

2016 年 3 月

动力与电气工程学科是现代科技领域中推动经济社会发展的核心学科和关键学科，主要包括工程热物理、热工学、动力机械工程、电气工程等专业门类。近年来，随着能源与资源、环境污染和气候变化之间的矛盾日益突出，能源与电力的开发利用与资源环境的协调发展成为世界普遍关注的焦点。作为能源与电力工业的基础学科，动力与电气工程学科主要研究和解决电能的生产、传输、分配与控制的科学机理、关键技术、工程方法和技术途径，它的发展与进步同样备受关注。动力与电气工程学科自身发展及与其他学科的交叉融合是推动能源与电力工业技术进步的重要源泉，同时能源与电力发展的新需求、新形势也会带动学科各相关专业的发 展进步。

进入 21 世纪以来，以传统化石能源为基础的能源发展方式难以为继，世界各国都在积极探索新的能源与电力生产、传输、配置及消费模式。电力作为清洁高效的二次能源，将长期处于我国能源发展战略的中心地位。“十二五”期间，我国在发电、输变电、配用电等领域均取得了较快发展，不仅有效缓解了能源供需的矛盾，还在节能减排、提高能源利用效率、应对气候变化等方面成效显著。面对国际能源供需格局新变化、能源发展新趋势，新一轮能源革命在世界范围内孕育、发展，在通信、信息技术、云计算、大数据和互联网+等交叉学科和新兴技术的推动下，传统的电能生产、转换、传输、存储、配置、使用等将面临新的挑战，动力与电气工程学科和电力科技迎来了重要的战略发展期。

中国电机工程学会是我国能源与电力行业有着悠久历史的学术团体，一直致力于服务广大电力科技工作者和促进学科与行业科技进步。2009 年 1 月，在中国科学技术协会学会学术部的领导和组织下，学会第一次组织完成了《2009—2010 动力与电气工程学科发展报告》的编撰。近年来，学会充分发挥各分支机构、会员单位、相关高校、科研机构及广大会员的专家智力优势，积极探索建立了学科发展研究的常态机制，形成了包括学科发展研究、专业发展研究报告的编撰体系。为总结“十二五”期间动力与电气工程学科进展，分析“十三五”电力科技的发展趋势，为电力行业、企业“十三五”电力科技发展服务，2014 年 7 月，学会组织了专家研究团队，启动了 2014—2015 动力与电气工程学科发展研究工作。在各相关单位和各位编写专家的大力支持下，历时一年半完成了报告编撰工作。

本报告由一个综合报告和八个专题报告组成，八个专题分别是清洁高效发电技术、电力环保技术、可再生能源发电技术、核能发电技术、输电技术及系统、智能配用电技术、电力电子技术、输变电装备及技术等技术领域。本报告立足我国电力工业的科技发展与进步，总结了过去五年动力与电气工程学科领域的重大技术进展，对比分析了国内外相关领域关键技术的发展差距和技术路线，并对学科发展趋势进行了分析预测，提出了本学科领域未来应重点关注的技术方向、重大课题设置建议及促进学科发展的政策建议。

本报告由中国科学院院士周孝信担任首席科学家，国内有关高等院校、科研院所、电力企业及设备制造厂商等单位一大批国内著名专家、学者共同参与了报告的编写工作。正是因为他们在繁忙的本职工作之余，倾尽全力为学科发展与行业科技进步笔耕不辍才成就了本报告。在此，特向各位编写专家以及参与研讨和通过各种方式提出宝贵意见和建议的专家表示最诚挚的感谢。动力与电气工程学科涉及的专业技术领域和范围非常广泛，尤其是近年来学科间的交叉、融合明显加快，还衍生了许多新的专业、新的技术。尽管在本报告制订编写框架之初和编写过程中征求了多方面的意见，但限于篇幅，内容不能面面俱到，难免挂一漏万。此外，由于编制时间仓促、资料不全等原因，报告中肯定存在不足和疏漏，相关观点也仅代表专家组的意见，如有不妥，肯望读者提出宝贵意见和建议，为学科发展报告滚动修订提供不竭动力。

新一轮能源革命已经启航，进一步提升我国在世界能源新格局中的核心竞争力是历史赋予我们的战略发展机遇。希望本报告能为政府、行业和各电力企业制订未来科技发展战略与规划，为广大能源与电力科技工作者把握学科发展规律与发展趋势提供借鉴和参考。

中国电机工程学会

2015 年 11 月

序 / 韩启德

前言 / 中国电机工程学会

综合报告

动力与电气工程学科发展研究 / 3

一、引言 / 3

二、最新研究进展 / 5

三、国内外进展比较 / 27

四、发展趋势及展望 / 32

专题报告

清洁高效发电技术发展研究 / 55

电力环保技术发展研究 / 110

可再生能源发电技术发展研究 / 156

核能发电技术发展研究 / 197

输电技术及系统发展研究 / 229

智能配用电技术发展研究 / 284

电力电子技术发展研究 / 329

输变电装备及技术发展研究 / 364

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report / 411

Current Status and Development Trend of Power and Electrical Engineering / 411

Reports on Special Topics / 414

Current Status and Development Trend of Clean and Efficient Power Generation
Technology / 414

Current Status and Development Trend of Power Environmental Protection Technology / 415

Current Status and Development Trend of Renewable Energy Power Generation
Technology / 417

Current Status and Development Trend of Nuclear Power Generation Technology / 418

Current Status and Development Trend of Power Transmission Technology and System / 419

Current Status and Development Trend of Intelligent Power Distribution and Utilization
Technology / 421

Current Status and Development Trend of Power Electronics Technology / 422

Current Status and Development Trend of Power Transmission and Transformation
Equipment / 424

索引 / 427

综合报告



动力与电气工程学科发展研究

一、引言

电能是目前最便于控制与变换的能量形式，对保证当代社会的正常运行具有不可替代的重要作用，是维系现代人类文明的基础，其利用水平是社会文明程度的重要标志之一。作为动力与电气工程学科的主要研究领域，电能的产生、传输、分配与使用是能源领域最为重要的分支之一，是推动能源与电力工业技术进步的重要源泉，长期以来一直得到社会各界的广泛关注与高度重视。伴随着我国经济的腾飞，我国的能源与电力工业也经历了前所未有的高速发展，这同样离不开动力与电气工程学科自身的巨大技术进步。

随着中国经济发展进入“新常态”，经济结构逐步由要素驱动、投资驱动向创新驱动转变，电力需求增速将放缓，但增长动力更加多元化，这也迫切要求动力与电气学科发展能够主动适应新形势。2014年，中央明确提出能源生产与消费革命的宏伟目标，电力作为清洁高效的二次能源，将长期处于我国能源发展战略的中心地位，动力与电气工程学科正面临着全新的机遇与挑战。

从电能的生产环节来看，在大幅增加风电、太阳能、地热能等可再生能源和核电等清洁能源，保证2020年实现我国非化石能源占一次能源消费比重达到15%目标的同时，发展化石能源清洁高效利用也是实现我国绿色低碳战略的重要途径。我国固有的资源禀赋决定了当前及未来一段时间内煤炭仍将是主要的一次能源形式，是我国的基础能源。因此，清洁高效发电技术和电力环保技术仍将成为节能减排、缓解环境压力的关键一环。

从电能的传输环节来看，我国资源与负荷中心的逆向分布决定了大容量、远距离输电的内在需求，而大规模间歇式可再生能源的消纳也对电网结构与控制水平提出了新的挑战，特高压交流、特高压直流、柔性直流等先进输电技术是近十多年我国电力系统发展的重中之重，与之相关的大规模交直流混联系统的调度与控制技术、先进输变电装备技术、

大容量电力电子技术等也取得了令人瞩目的成就。

从电能的分配与使用环节来看，先进配用电技术的发展提高了终端用户能效与供电可靠性，支撑了未来分布式光伏的高比例接入与电气化交通的进一步普及，同时直流配网与节能等技术也成为关注热点。随着智能电网发展与电力市场改革的推进，以需求侧响应为代表的用户互动技术得到了快速发展。

大容量电力电子技术贯穿发电、输电、配用电各环节，在过去 5 年取得了重要进步，在发电侧的新能源并网、输电侧的直流技术与柔性交流输电技术、配用电侧的直流配网技术与先进节能技术等方面都有重要应用。

中国建设和运行着世界上规模最大、增速最快、先进技术广泛应用、运行特性复杂的电力系统，从而整体上带动了我国动力与电气工程学科快速发展。过去 5 年间，我国在特高压输电及装备、发电装备制造与煤炭清洁高效燃烧、特大电网调度运行与安全控制等多个方面取得了国际领先或国际一流的科技成就；在风力发电设备、柔性直流输电技术、新一代核电技术等方面实现了自主创新和技术突破。部分标志性成果经历了由“中国制造”到“中国创造”的转变过程。“智能电网”、“能源互联网”等概念的不断兴起，不仅成为社会各界高度关注的热点，也正是本学科大有作为的新兴领域。

学科是社会分工在科学技术领域的一种体现，本学科发展报告的定位是面向本学科相关行业技术进步与技术发展所进行的回顾、总结、思考与建议。报告将从电能生产、电能传输、电能配用以及贯穿上述各个环节的大容量电力电子技术四个方面展开（基本结构如图 1 所示），对我国动力与电气工程学科过去 5 年的主要进展进行梳理与总结。通过国内外研究进展的比较，希望从宏观上对本学科的技术发展水平进行初步的判断。在此基础上，进一步分析了本学科发展的主要推动因素，并结合国家重大战略需求对学科未来发展趋势进行判断，提出了推动学科更好更快发展的若干建议。

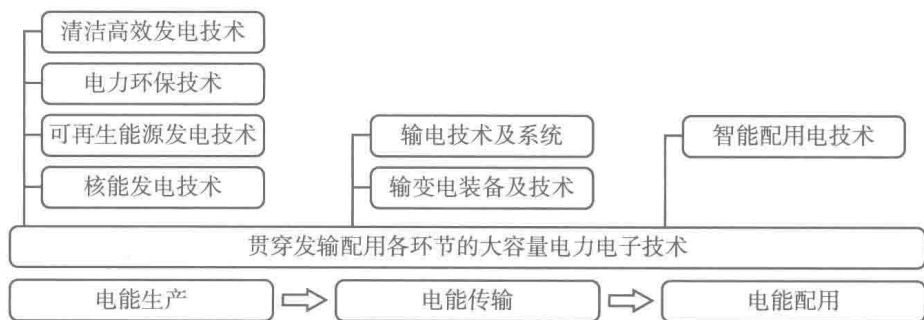


图 1 学科发展报告的基本结构

二、最新研究进展

（一）电能生产环节

目前用于发电的能源主要有煤炭、石油、天然气、核能、水能、风能、太阳能等。“十二五”期间，中国的总装机容量和年发电量超过美国，跃居世界第一位。截至2014年底，我国全国发电装机容量136019万kW，其中，火电91569万kW（含煤电82524万kW、气电5567万kW），占全部装机容量的67.4%；水电30183万kW（含抽水蓄能2183万kW），占全部装机容量的22.2%；核电1988万kW，占全部装机容量的1.5%；并网风电9581万kW，占全部装机容量的7.0%；并网太阳能发电2652万kW，占全部装机容量的2.0%。

截至2014年底，我国年发电量超过5.5万亿kW·h，其中全口径火电发电量4.17万亿kW·h，占发电总量的75.5%，同比下降0.7%；水电发电量1.07万亿kW·h，占发电总量的19.4%，同比增长19.7%；并网风电发电量1563亿kW·h，占发电总量的2.8%，同比增长12.2%；全国核电发电量1262亿kW·h，占发电总量的2.3%，同比增长13.2%；并网太阳能发电量231亿kW·h，同比增长171%。

由于煤炭资源占我国已探明化石能源资源的绝大部分，且我国在燃煤火电经济性、可调度性、可靠性、技术成熟度上具有较强的比较优势，所以目前我国仍主要以燃煤发电为主，但燃煤火电带来的环境问题日益严峻，因此清洁高效发电技术和电力环保技术得到了高度重视与快速发展，这也将是本节阐述的重点。除燃煤外，随着“十二五”规划的建设，我国可再生能源装机容量和核电装机容量均增长迅速，尤其以风力发电和太阳能发电为代表的新能源得到了跨越式发展，在本节也将针对这些领域的学科进展进行总结。

1. 清洁高效发电技术

受资源结构限制，在当前和未来一段时间内，我国一次能源结构将仍以煤炭为主，因此清洁高效发电技术对于降低能源消耗、减少环境污染、优化能源结构和促进可持续发展具有重要意义。“十二五”期间，我国清洁高效发电技术取得了积极进展。

（1）粉煤（PC）发电技术。

我国在超超临界发电技术方面发展迅速，目前已经完全具备锅炉、汽轮机等主要本体设备及给水泵等辅机设备的设计制造能力，设备性能参数、系统设计体系和运行维护水平基本达到或接近国际先进水平。为了进一步提高超超临界机组的能源利用效率，我国已开始尝试将再热温度提高至610℃甚至620℃。截至2013年底，我国煤电机组中超（超）临界机组比重已达35.5%，相比2010年提高了8.7%，600℃超超临界机组台数居世界首位，机组发电效率可超过45%。我国已具备独立设计制造1000MW级超超临界机组的能力，2013年装机容量大于300MW的燃煤机组平均供电煤耗为311.3g/(kW·h)，远低于美国，与日本相当，处于世界领先水平，其中上海外高桥电厂三期工程的2台1000MW机组，供

电标准煤耗率达到了 $274.8\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，为目前世界最高水平。

二次再热超超临界机组，可以在 600°C 等级一次再热超超临界机组基础上将发电热效率提高约 2%，发电煤耗降低约 $14\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，较大幅度降低温室气体和污染物排放。我国从 2009 年开始二次再热技术研究，突破了高参数 $28\sim 31\text{MPa}/600^\circ\text{C}/620^\circ\text{C}/620^\circ\text{C}$ 的 600MW 和 1000MW 机组研制关键技术，目前已具备自主开发和制造能力，首台 1000MW 超超临界二次再热示范机组于 2015 年 9 月 25 日在国电泰州电厂通过 168h 满负荷试运行，是现今国内首台世界最大的二次再热五缸四排汽汽轮机组，额定参数为 $31\text{MPa}/600^\circ\text{C}/610^\circ\text{C}/610^\circ\text{C}$ ，设计发电煤耗 $256.2\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，综合参数为世界最高水平。

在国家科技支撑计划等项目支持下，我国在褐煤和准东煤清洁高效利用方面也取得了进步。根据国内褐煤丰富但水资源匮乏的特点，国内部分设计院、发电集团及制造企业等开展了大量的褐煤预干燥及水回收技术，即煤中取水发电技术研究工作，近期新建的 600MW 等级褐煤锅炉机组基本采用了超临界参数，华能九台电厂 $2\times 660\text{MW}$ 超临界机组是目前国内褐煤发电的最高水平，机组燃用全水分 32.8% 褐煤，蒸汽参数 $25.4\text{MPa}/569^\circ\text{C}/571^\circ\text{C}$ ，电厂发电效率达到 43.75%，供电煤耗为 $298.28\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。新疆地区也将准东煤 20% 的掺烧比例提高到 80% 甚至更高比例，超越了国外燃用类似准东煤的最好水平。

700°C 超超临界机组是目前燃煤发电技术发展的前沿，能源局、科技部都进行了专项立项支持，并于 2010 年成立了国家 700°C 超超临界燃煤发电技术创新联盟，制定了详细的技术路线和示范计划，初步确定示范电厂机组初参数为 $35\text{MPa}/700^\circ\text{C}/720^\circ\text{C}$ ，力争 600MW 示范机组发电效率高于 50%。

(2) 循环流化床 (CFB) 发电技术。

相比粉煤发电技术，循环流化床 (CFB) 发电技术具有煤种适应性强、负荷调节范围大、燃烧稳定、低成本实现低 SO_2 和低 NO_x 排放等优点，是国际上公认的商业化程度最好的清洁煤发电技术之一。在我国，高效、低污染地利用劣质煤发电对于大型循环流化床锅炉有着重大需求。经过多年科研攻关，我国在超临界循环流化床发电技术方面取得重要进展。针对循环流化床燃煤锅炉普遍存在的风机压头高带来的厂用电高和高浓度物料循环引起的燃烧室局部磨损影响机组可用率两大缺陷，根据清华大学建立的循环流化床定态设计理论于 2007 年提出了提高物料循环质量、降低物料床存量的低床压降节能型循环流化床技术，并在“十二五”国家科技支撑项目的支持下发展到 100MW 等级以上容量，进入电力市场。2014 年 4 月 14 日，具有自主知识产权的 600MW 四川白马示范工程通过 168 小时满负荷试验，这是世界上第一台 600MW 超临界循环流化床锅炉（目前国外最大容量的 CFB 锅炉为波兰 Lagisza 电厂的 460MW 机组），其成功运行在世界上引起巨大反响，表明我国在循环流化床燃烧技术的研究和开发以及工程实施达到了世界领先水平。

(3) 整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电技术。

IGCC 在热力学原理上更符合能量梯级利用的原则，供电效率高，污染物排放水平极