低碳电力系统理论与应用

康重庆　陈启鑫　夏　清　著

科学出版社

低碳电力系统理论与应用

康重庆　陈启鑫　夏清　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍低碳电力系统的理论、方法与关键技术。全书分为六篇，第一篇(第1～4章)介绍低碳电力技术的基本概念、电力系统碳排放的计算方法；第二篇(第5～7章)介绍碳捕集电厂的运行模型与优化决策方法；第三篇(第8～10章)介绍电力系统碳排放流分析理论；第四篇(第11～14章)和第五篇(第15～19章)分别围绕电力系统的调度和规划两大关键业务，介绍低碳电力调度和低碳电力规划的模型与方法；第六篇(第20～22章)介绍促进可再生能源消纳的低碳技术。

本书可供电力规划、电力计划、电力调度、电力市场交易、电力营销以及低碳发展、气候变化等相关领域专业科技人员和管理人员，以及高等院校有关专业教师、研究生和高年级本科生阅读参考，也可作为电力系统相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

低碳电力系统理论与应用/康重庆，陈启鑫，夏清著. —北京：科学出版社，2019.5

ISBN 978-7-03-060700-3

Ⅰ.①低… Ⅱ.①康…②陈…③夏… Ⅲ.①电力工业-节能-研究-中国 Ⅳ.①F426.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第040096号

责任编辑：刘宝莉 罗 娟 / 责任校对：郭瑞芝
责任印制：师艳茹 / 封面设计：陈 敬

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2019年5月第一次印刷 印张：24 1/4
字数：490 000

定价：168.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

在全球气候变化问题加剧的时代背景下，发展低碳经济已经逐渐成为国际社会的共识。作为一个发展中国家，我国也面临着低碳化发展的严峻挑战，面临着巨大的碳减排压力。国际能源署(IEA)公布的数据显示，十多年前我国已成为世界上碳排放量最大的国家。电力行业则是国民经济中最大的碳排放部门，所排放的 CO_2 占我国化石燃料燃烧碳排放的比例超过了40%。因此，发展低碳电力技术，无疑将是我国推动低碳经济、满足碳减排要求、实现电力行业可持续发展的一个关键战略。

在低碳经济时代，传统电力行业将面临外部环境与内在发展模式的重要转变，这也将对电力系统未来的运行与调度、投资与规划模式产生根本性的影响。这些影响可以概括为以下三个方面：首先，各类低碳调控手段与经济机制的引入，如碳税、碳配额、碳交易机制等，将为电力行业形成全新的外部政策、经济环境，对碳排放赋予碳成本，也对碳减排赋予碳收益；其次，碳减排势必成为电力行业的重要目标，这对未来电力行业的发展形成碳约束；再次，各类低碳技术的引入，如风电、光伏、生物质发电等可再生能源发电技术，以及碳捕集技术等，将使电力系统中出现大量的低碳电源，这些低碳电源将具有明显区别于传统电源的技术特性，都将对传统的电力系统运行、规划工作提出新的挑战。

为此，我们从2008年开始，针对低碳电力技术领域开展了基础性、系统化的研究工作。2009年初我们在《电网技术》期刊上发表了《低碳电力技术的研究展望》，是国内该领域的第一篇综述与观点性论文，明确了低碳电力技术的概念和分析框架，分析了该领域的理论难点、关键问题与应用前景，该论文发表后迅速得到学术界、业界的关注。该论文作者之一陈启鑫博士于2010年完成了该领域的第一篇博士学位论文《低碳电力系统的理论与方法研究》，系统地分析了低碳电力系统的基本特征、关键要素，提出了体系化的低碳电力系统分析理论与方法，为后续开展相关研究奠定了坚实的理论基础；该博士论文于2013年获得全国百篇优秀博士论文提名奖。在随后的研究中，我们专注于对低碳电力系统中的各个具体技术难题进行深入研究，相关成果已在国内外学术期刊上发表了数十篇论文，涉及发电侧的碳捕集电厂、电网侧的碳排放流理论、业务层的低碳电力调度与低碳电力规划问题，同时涵盖了应用层的低碳技术促进清洁能源消纳等各个主题，从而由点到面地不断完善理论体系；并结合我国电力行业低碳化发展的工程化需求，解决了低碳电力系统中的实际工程问题，为我国电力行业的碳减排工作做出了自己的贡献。

在此过程中，我们深刻地认识到，唯有将实践应用作为创新与发展的源泉，在

研究探索中不断发现问题、解决问题，才能抽象并升华出具有更广泛意义的科学理论，形成具有实际应用价值的分析方法，并反过来指导进一步的研究工作。这也是我们一贯秉承的原则。回顾 2008 年以来我们的研究工作，大致可分为以下五个方面：

(1) 厘清了低碳电力技术的研究框架，构建了低碳电力系统的基本概念体系；分析了电力系统发、输、配、用不同环节之间的低碳互动机制与关联关系，提出了面向不同环节的碳排放计算方法；构建了电力系统的综合低碳能力集，并利用其映射关系测评电力系统各环节所实现的减排潜力，从而将电力系统的碳减排视角从传统的发电环节扩展到电网侧、用户侧，拓展了电力系统碳减排的途径与技术。

(2) 围绕备受关注的低碳技术——碳捕集与封存技术，对碳捕集电厂的运行机理进行了细致的分析与基础性建模，研究了碳捕集电厂电碳协调的灵活运行方式与控制技术，定义了碳捕集电厂的电碳特征函数，提出了碳捕集电厂利用其灵活运行能力参与电力市场与碳市场的优化决策技术，并提出了考虑实物期权的碳捕集电厂投资效益分析方法，为更加优化地运营碳捕集电厂、更加全面地认识碳捕集电厂的成本效益提供了理论模型和分析工具。

(3) 将网络分析技术引入碳排放的分析中，首次提出了电力系统碳排放流的基本概念，构建了电力网络碳排放流的理论体系，提出了碳排放流的一般化分析方法及灵敏度分析技术，得到了改变网络拓扑情况下用户用电行为的碳增益；在此基础上，将碳排放流理论扩展到不同形式的电力交易中，从而可以对电力交易行为的碳排放流动关系进行精准测算。

(4) 围绕电力系统的调度和规划两大关键业务，提出了面向低碳目标的新型电力调度生产模式，构建了低碳电力调度的优化决策数学模型，挖掘了碳捕集电厂在电力系统运行中的低碳效益，并将碳排放流理论应用于电网的优化调度。提出了面向低碳目标的新型电源规划模型，勾画出电力行业未来的碳排放轨迹与减排路径，分析了碳捕集电厂对于解决电力行业碳锁定效应的贡献，并将碳排放流理论应用于电网的规划设计之中。

(5) 深入研讨了低碳电力技术促进高比例可再生能源消纳的技术路径，提出了碳捕集电厂与风电的协调运行模式，可利用弃风电量低成本捕集 CO_2；构建了可灵活运行的电热集成系统，通过多能协同挖掘系统的调峰能力；提出了促进可再生能源消纳的输电网规划新方法，实现了网-源的协同规划运行。

本书正是上述研究成果的总结。在研究过程中，我们坚持以低碳电力系统为研究对象，围绕国际上的学术研究前沿与工程实践中的重大需求，不断总结思考，通过多学科的交叉融合突破思维定式，并引导方法论的变革与创新，发展新的研究工具与分析方法；在实践探索中，不断地汲取新的理念，提炼有价值的理论问题，扩展新的研究视角，丰富原有的理论体系，力图实现理论、方法、工具三者之间的紧密

互动与融合，为低碳电力领域后续的研究工作提供一个可发展的理论框架、一个可借鉴的方法体系和一系列可实际应用的研究工具。

本书在撰写过程中，重点突出精、新、简、实的特点，在叙述方法上力求理论与工程实际相结合，而在具体的数学推导与公式描述中则尽量简明扼要，不盲目追求纯粹的数学表述，而更加突出研究工作的背景、目的、逻辑、价值，以便于具有高等数学、概率论等工科数学基础的读者都能够理解本书的基本内容。

本书的部分研究工作先后得到了国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项项目（2016YFB0900100）、国家自然科学基金（51107059、51622705、51620105007）、高等学校博士学科点专项科研基金（20100002110007）的资助，特此致谢。

本书是作者近年来科学研究工作的总结，部分内容取材于作者课题组所培养的陈启鑫、周天睿、陈新宇博士，丁然、季震硕士，以及张宁、孙彦龙、杜尔顺等的学术论文或学位论文。本课题组的博士生程耀华、侯庆春、卓振宇、李海和黄武靖等协助完成对本书初稿的校对。清华大学电机工程与应用电子技术系为本书的撰写提供了良好的条件，作者在此一并表示感谢。

我们希望本书能够起到抛砖引玉的作用，能为电力系统的研究人员提供一些参考，推动我国低碳电力系统的研究成果与工程实践向更高的水平发展。尽管本书在撰写过程中已经对体系安排、素材选取与文字叙述竭尽全力、精益求精，但是，由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，我们真诚地期待读者对本书进行批评和指正。

目　录

前言

第一篇　低碳电力技术基本问题

第 1 章　电力行业低碳化的问题与挑战 …… 3
1.1　低碳发展的背景 …… 3
1.2　低碳发展的核心理念 …… 4
1.3　中国的低碳电力之路 …… 6
1.4　电力系统低碳化的技术途径 …… 6
1.5　低碳电力技术的研究框架 …… 10
第 2 章　电力系统碳排放基本概念与碳排放量计算 …… 14
2.1　电力系统碳排放的基本概念 …… 14
2.2　电力系统发电侧碳排放计算方法 …… 16
2.3　电力系统宏观碳排放的计算 …… 21
2.4　电力系统碳排放的结构分析模型 …… 27
第 3 章　电网侧碳排放分析与低碳效益评估模型 …… 33
3.1　电网的低碳效益 …… 33
3.2　电网环节的 SF_6 排放分析 …… 34
3.3　电网低碳效益的评估模型 …… 37
3.4　算例分析 …… 40
第 4 章　电力系统低碳水平综合评价指标体系与方法 …… 44
4.1　指标体系的构建原则 …… 44
4.2　电力系统低碳化水平评价指标体系框架 …… 45
4.3　电力系统低碳化水平综合评价指标体系 …… 45
4.4　电力系统低碳化水平评价方法与模型 …… 53
4.5　电力系统低碳化水平评价的实证分析 …… 62
参考文献 …… 65

第二篇　碳捕集电厂专题

第 5 章　碳捕集电厂的运行机理与基础模型 …… 69
5.1　碳捕集与封存技术及其在电厂中的应用 …… 69

5.2 碳捕集与封存技术的基本原理 …… 69
5.3 碳捕集系统及其实施流程 …… 70
5.4 碳捕集电厂的灵活运行方式 …… 72
5.5 碳捕集电厂的能量流分析 …… 77
5.6 碳捕集电厂的模型描述 …… 80
5.7 碳捕集电厂的运行特性与状态分析 …… 86
5.8 算例分析 …… 89
第 6 章 碳捕集电厂的灵活运行优化决策 …… 93
6.1 低碳环境下碳捕集电厂的运行模式 …… 93
6.2 碳捕集电厂的灵活运行决策模型 …… 94
6.3 算例分析 …… 99
第 7 章 碳捕集电厂的投资效益分析与风险评估 …… 105
7.1 概述 …… 105
7.2 碳捕集的实物期权价值 …… 106
7.3 碳捕集激励措施的作用机制 …… 109
7.4 碳捕集电厂的投资效益分析 …… 110
7.5 碳捕集技术面向风险规避的效益评估 …… 112
7.6 算例分析 …… 114
参考文献 …… 122

第三篇 碳排放流专题

第 8 章 电力系统碳排放流基本理论与计算方法 …… 127
8.1 电力系统碳排放流的基本概念 …… 127
8.2 电力系统碳排放流的度量指标 …… 128
8.3 基于交/直流潮流计算的碳排放流分析 …… 134
8.4 电力系统碳排放流的矩阵计算方法 …… 136
8.5 电力系统碳排放流的递推算法 …… 146
8.6 递推算法与矩阵算法相结合的协同计算 …… 152
第 9 章 电力系统碳排放流的灵敏度分析 …… 154
9.1 电力系统碳排放流灵敏度的主要分类 …… 154
9.2 机组碳势灵敏度分析 …… 155
9.3 节点注入灵敏度分析 …… 156
9.4 支路开断灵敏度分析 …… 160
9.5 算例分析 …… 162
第 10 章 电量合约下的碳排放流分析 …… 167

10.1 概述 …… 167
10.2 基于碳排放流的用电碳排放辨析 …… 168
10.3 系统电量与碳排放流中基础分量与合约分量的分解 …… 174
10.4 面向合约分析的等值网络改进 …… 176
10.5 系统合约下碳排放流的分析示例 …… 179
参考文献 …… 188

第四篇　低碳电力调度专题

第 11 章　低碳电力调度方式及其决策模型 …… 193
11.1 电力调度的不同阶段与对应模式 …… 193
11.2 节能发电调度的低碳化效益评估 …… 193
11.3 低碳电力调度的内涵剖析 …… 200
11.4 电源的电碳调度特性分析 …… 200
11.5 低碳电力调度的决策模型 …… 203
11.6 算例分析 …… 205
第 12 章　考虑碳捕集电厂的电力系统低碳运行 …… 210
12.1 碳捕集电厂在电力系统中的运行特性 …… 210
12.2 考虑碳捕集电厂的电力系统低碳运行模型 …… 211
12.3 算例分析 …… 214
第 13 章　碳捕集电厂提供辅助服务的效益分析 …… 223
13.1 碳捕集电厂对于系统调度的作用机制 …… 223
13.2 碳捕集电厂提供辅助服务的机理与潜力分析 …… 224
13.3 碳捕集电厂在系统调峰中的运行效益分析 …… 225
13.4 碳捕集电厂在联合市场中的运行效益 …… 230
第 14 章　基于碳排放流的配电网优化调度及其工程应用 …… 236
14.1 概述 …… 236
14.2 配电网中碳排放流计算的特殊问题 …… 237
14.3 面向低碳的配电网优化运行方法 …… 238
14.4 算例分析 …… 240
14.5 工程应用 …… 243
参考文献 …… 246

第五篇　低碳电力规划专题

第 15 章　基于碳排放轨迹模型的电力行业碳减排模式分析 …… 251
15.1 电力行业的碳排放前景 …… 251

15.2 基于总碳排放额度约束的碳排放轨迹模型 …… 252
15.3 基于标准碳排放轨迹模型的碳减排模式分析 …… 254
15.4 我国电力行业碳减排场景分析 …… 255
第 16 章 考虑各类低碳要素的宏观电源结构规划 …… 258
16.1 传统电源规划 …… 258
16.2 面向低碳目标的电源结构规划模式 …… 258
16.3 低碳电源结构规划的建模分析 …… 260
16.4 算例分析 …… 267
第 17 章 含碳捕集电厂的低碳电源规划 …… 277
17.1 建模思路与方法 …… 277
17.2 含碳捕集电厂的低碳电源规划模型 …… 278
17.3 算例分析 …… 285
17.4 灵敏度分析 …… 290
第 18 章 基于碳排放流的低碳电网规划 …… 293
18.1 用户侧碳排放分摊的公平性系数 …… 293
18.2 基于碳排放流的低碳电网规划模型 …… 295
18.3 求解算法 …… 296
18.4 算例分析 …… 298
第 19 章 考虑碳排放流的电源电网优化规划方法 …… 305
19.1 不同碳排放约束对电源电网规划决策的影响 …… 305
19.2 低碳环境下的电源电网规划基本思路 …… 306
19.3 考虑碳排放流的电源电网规划模型及其求解 …… 307
19.4 算例分析 …… 314
参考文献 …… 324

第六篇 可再生能源消纳专题

第 20 章 碳捕集电厂促进可再生能源消纳的模型与效益——以风电为例 …… 329
20.1 碳捕集电厂在可再生能源消纳中的作用 …… 329
20.2 碳捕集电厂与风电联合运行方式 …… 329
20.3 碳捕集电厂与风电联合运行效益分析 …… 331
20.4 碳捕集电厂与风电联合运行优化模型 …… 332
20.5 算例分析 …… 337
第 21 章 消纳可再生能源的电热集成系统调度模型——以风电为例 …… 342
21.1 面向可再生能源消纳的电热集成系统 …… 342
21.2 区域储热系统建模 …… 347

21.3　提升热电联产机组灵活性的电热系统调度模型 …… 350
21.4　算例分析 …… 355
第 22 章　促进可再生能源消纳的低碳电网规划方法——以风电为例 …… 363
22.1　低碳化发展对常规电网规划流程的影响 …… 363
22.2　电网环节低碳要素的分析与建模 …… 364
22.3　促进可再生能源消纳的低碳电网规划模型 …… 367
22.4　算例分析 …… 370
参考文献 …… 374

第一篇　低碳电力技术基本问题

第 1 章　电力行业低碳化的问题与挑战

1.1　低碳发展的背景

1.1.1　全球气候变化

能源是现代经济发展的基础，随着近年来世界经济的快速发展，各个国家对能源的需求迅猛增长。无论是工业制造、居家生活、交通运输还是商业建筑，无论是经济活动还是日常生活，都需要消耗大量的能源来维持系统的正常运作。而在现阶段，世界各国主要的能源形式还是煤、石油和天然气等化石燃料，它们都含有大量碳元素，人们通过燃烧化石燃料从中获取能量，代价就是产生大量的二氧化碳等废气，污染环境，破坏人类赖以生存的生态环境。

在全球经济通过大量能源消耗不断增长的同时，随之而来的负面影响开始慢慢累积和体现，全球气候变化就是其中最受关注的一项。据联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）观测数据显示[1]，1901～2012 年全球陆地和海洋表面平均温度升高约 0.85℃。

我国气候变化趋势与全球的总趋势基本一致。《第三次气候变化国家评估报告》[2]显示，1909～2011 年我国陆地区域平均温度上升了 0.9～1.5℃。最近 60 年平均每 10 年升高约 0.23℃，几乎是全球的 2 倍。此外，近 50 年来我国降水分布格局也发生了明显变化，西部和华南地区降水增加，而华北和东北大部分地区降水减少。高温、干旱、强降水等极端气候事件有频率增加、强度增大的趋势。根据趋势预计，未来我国区域气温将持续上升。未来极端气候事件面临频发，暴雨、强风暴潮、大范围干旱发生的频次和强度增加，洪涝灾害的频率呈上升趋势，海平面将继续上升。

可见，全球气候变化触及生态安全、水资源安全和粮食安全等各个层面，对地球生态系统与人类社会造成巨大影响，带来巨大的经济损失，加剧了极端气候灾害发生的风险，并严重威胁人类的生存环境[3]。

1.1.2　能源问题与能源危机

全球能源资源主要有煤炭、石油、天然气等化石能源和水能、风能、太阳能、海洋能等清洁能源。受世界人口增长、工业化、城镇化等诸多因素拉动，全球能源消费呈现总量和人均能源消费量持续“双增”态势，1956～2016 年，全球一次能源年

消费总量从 53.8 亿 t 标准煤增长到 189.6 亿 t 标准煤，60 年时间增长了 2.5 倍，年均增长 2.1%。

世界能源消费结构长期以化石能源为主，但随着电气化水平提高，越来越多的煤炭、天然气等化石能源转换成电能，电能占终端能源消费的比重逐步提高，化石能源在世界终端能源消费结构中的比重持续下降。1973～2012 年，煤炭、石油在世界终端能源消费中的比重分别下降了 3.6%、7.5%，而电能所占比重从 9.4%增长到 18.1%，仅次于石油占比，居第二位。

全球化石能源资源虽然储量大，但随着工业革命以来数百年的大规模开发利用，正面临资源枯竭、污染排放严重等现实问题。能源危机是指能源供应短缺或价格上涨而影响经济发展的严重情况。这通常涉及石油、电力或其他自然资源的短缺。从消费者的观点来看，能源危机提高了生活成本，降低了生活水平；从全社会和国家的角度来看，能源危机可能引发社会动乱，使得人类社会的发展减缓甚至倒退。

根据相关统计报告，地球上的石油资源将会在有限的时间内枯竭，在世界能源消费以石油、煤炭、天然气为主导的条件下，如果能源消费结构不改变，那么能源危机将不可避免。因此，人类必须预计到非再生矿物能源资源枯竭可能带来的危机。若化石能源与原料链条中断，必将导致世界经济危机和冲突的加剧，最终葬送现代市场经济。为了实现社会的可持续发展，人类必须积极采取有效措施解决好能源的供应问题。

1.2 低碳发展的核心理念

为应对全球气候变化和能源问题，实现人类社会的可持续发展，发展低碳经济已经成为世界各国的共同选择。各国都致力于大规模开发可再生能源、提高能源利用效率、减少温室气体排放，以促进整个社会经济向高能效、低能耗和低碳排放的模式转型。

我国是能源消费大国，目前的能源消费总量已位居世界第一。与发达国家相比，我国单位国内生产总值(gross domestic product，GDP)能耗过高。2006 年，我国碳排放量已超越美国居于全球首位，使我国在国际气候谈判中面临巨大的政治与舆论压力。在此背景下，我国政府对节能减排工作高度重视，制定了一系列的低碳发展目标。发展低碳经济，无疑将是我国政府面临的长期而艰巨的任务。

1. 低碳经济发展理念

温室气体将使地球表面变得更暖，类似于温室截留太阳辐射并加热温室内空气的作用，这种影响称为“温室效应”。《京都议定书》中规定控制的 6 种温室气体

为二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF_6)。

温室气体是典型的全球性公共产品,其减排需要全世界合作与协同。在经济发展、能源需求与长期可持续发展间找到平衡点,就需要在能源系统的运作中引入低碳的理念。

2003 年,在英国政府公布的能源白皮书 *Our Energy Future—Creating A Low Carbon Economy*[4] 中,首次提出了低碳经济的发展理念,倡导通过减少碳排放,改善全球气候条件;通过提高能源供应的多样化,调整能源结构,降低能源的供应与经济风险;并大力发展低碳技术,引领科技创新。此后,低碳经济迅速受到世界各国、各界的广泛重视,并得到大力扶持。提高碳的利用效率与降低碳排放量是驱动低碳经济的核心因素,也是发展低碳经济的必然要求。低碳经济发展理念强调经济发展应基于低能耗、低排放与低污染,其核心是技术创新、制度创新和发展观的改变。低碳经济的提出,刮起了一股涉及生产模式、生活方式、价值观念和国家权益的全球性革命风暴,代表了从工业文明向生态经济文明的巨大进步[5,6]。IPCC 甚至预言,低碳经济将成为继蒸汽技术革命、电力技术革命、信息技术革命、生物技术革命之后,第五波改变世界经济的浪潮。

2. 低碳发展是世界各国的共识

应对气候变化,实现低碳发展已经形成全球共识。世界各国政府为应对气候变化问题做出了积极的努力。

1979 年联合国召开第一次世界气候大会,1988 年建立了 IPCC,1990 年建立政府间谈判委员会,达成《联合国气候变化框架公约》,并规定每年举行一次缔约方大会。在 1997 年的第三次缔约方大会上通过了著名的《京都议定书》,确定了各缔约方的减排承诺;2007 年在印度尼西亚召开的第十三次缔约方大会则形成了妥协性的"巴厘岛路线图",明确了 2020 年发达国家减排 25%～40%,2050 年全球减排 50%的中远期目标;2011 年在南非召开的第十七次缔约方大会则确定了《京都议定书》第二承诺期各缔约方的减排承诺;2015 年 12 月 12 日在巴黎气候变化大会上通过的《巴黎协定》,成为人类历史上应对气候变化的第三个里程碑式的国际法律文本,形成了 2020 年后的全球气候治理格局。从环境保护与治理上来看,《巴黎协定》的最大贡献在于明确了全球共同追求的"碳减排硬指标"。截至 2019 年 2 月,共有 194 个缔约方签署了《巴黎协定》。该协定指出,各方将加强对气候变化威胁的全球应对,把全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2℃之内,并为把升温控制在 1.5℃之内而努力。只有全球尽快实现温室气体排放达到峰值,21 世纪下半叶实现温室气体近零排放,才能降低气候变化给地球带来的生态风险以及给人类带来的生存危机。

1.3 中国的低碳电力之路

1. 我国电力行业的碳排放特点

我国电力行业的碳排放特性主要如下：

(1) 发电碳排放总量大且增长迅速。2016 年，我国发电碳排放量约为 38.13 亿 tCO_2，是美国同行业碳排放量的 2 倍，超过全欧洲的碳排放总量。与此同时，我国 2016 年电力行业的碳排放相对于 1995 年增加了 4.29 倍。

(2) 发电碳排放强度高。我国电源结构以煤炭为主体，煤炭发电装机占总装机容量的比例超过 70%，低碳电源比例较小；而煤电的碳排放占发电总排放的比例超过 95%。这种电源结构直接导致我国的发电碳排放强度居高不下。

(3) 电网侧的温室气体来源主要是电网输电损耗和输变电设备中的 SF_6 泄漏，SF_6 的温室效应是等量 CO_2 的约 24000 倍。

(4) 用电侧虽然不直接产生碳排放，却是产生碳排放的主要驱动力。通过合理的需求侧管理，可优化用电方式，从而间接减少碳排放。

2. 我国发展低碳电力的必要性

我国电力行业的碳排放特点充分说明了在我国实施低碳电力发展战略是当务之急，具有重要的战略意义。

(1) 电力行业是碳减排的主战场，对于低碳经济的实施与发展具有重要影响。同时，电力行业的碳减排潜力巨大，优化空间明显，只有大力发展低碳电力，才能实现电能生产向低碳目标的转变。

(2) 随着减排压力的持续增加，我国将面临日益严峻的挑战，且可能在不久的将来面临强制性、可量化的减排计划，而发展低碳电力是应对国际压力、确保完成国家碳减排宏观目标的重要途径。

(3) 发展低碳电力，是实现电力行业可持续发展的重要途径。低碳电力以降低碳排放为重要目标，这将有利于改善电源结构，改变我国当前对化石能源，尤其对煤炭依存度过高的状况，从而实现能源结构的多元化，形成清洁的能源供应体系；其次，发展低碳电力有利于促进发电技术更新换代，提高能效，引入各种清洁发电技术，降低污染；最后，发展低碳经济有利于提高电能生产、传输与消费的效率，促进节能，减缓资源消耗。

1.4 电力系统低碳化的技术途径

电力系统中各个环节均可通过机制改善、技术升级等措施实现独立的低碳效