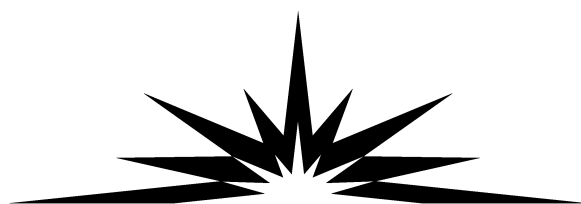


中国可持续能源项目

大卫与露茜尔·派克德基金会
威廉与佛洛拉·休利特基金会
能 源 基 金 会
项目资助号：G-1006-12630



中国电力行业低碳技术中长期发展战略规划

分报告二

低碳电力技术及其国内外发展现状分析

华北电力大学
2011 年 6 月

目 录

第一章 发电环节低碳技术及其国外发展现状分析	1
1.1 洁净煤低碳发电技术及其国外发展现状分析.....	1
1.1.1 超临界和超超临界发电技术.....	1
1.1.2 循环流化床技术.....	3
1.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术.....	7
1.1.4 整体煤气化联合循环发电技术.....	9
1.1.5 燃煤电厂碳捕集和封存技术.....	12
1.2 常规低碳发电技术及其国外发展现状分析.....	15
1.2.1 核电技术.....	15
1.2.2 水电技术.....	18
1.3 新兴低碳发电技术及其国外发展现状分析.....	20
1.3.1 风力发电技术.....	20
1.3.2 太阳能发电技术.....	22
1.3.3 生物质能发电技术.....	25
1.4 国外低碳发电技术政策保障分析.....	27
1.4.1 加强低碳技术创新方面.....	27
1.4.2 积极发展低碳能源方面.....	28
第二章 电网环节低碳技术及其国外发展现状分析	31
2.1 低碳输电技术及其国外发展现状分析.....	31
2.1.1 柔性交流输电技术.....	31
2.1.2 超导输电技术.....	34
2.1.3 特高压输电技术.....	37
2.2 低碳配电技术及其国外发展现状分析.....	39
2.2.1 配电自动化技术.....	39
2.2.2 柔性配电技术.....	41
2.3 低碳调度技术及其国外发展现状分析.....	43
2.4 低碳储能技术及其国外发展现状分析.....	44
2.4.1 飞轮储能技术.....	46
2.4.2 压缩空气储能技术.....	47
2.4.3 超导储能技术.....	49
2.4.4 超级电容器储能技术.....	50
2.5 国外低碳电网技术政策保障分析.....	52
第三章 电能消费终端低碳技术及其国外发展概况	55
3.1 智能用电技术及其国外发展现状分析.....	55
3.2 电动汽车技术及其国外发展现状分析.....	58
3.2.1 纯电动汽车.....	59
3.2.2 混合动力电动汽车.....	61
3.2.3 燃料电池电动汽车.....	63

3.3 国外低碳用电技术政策保障分析.....	65
第四章 国外发展低碳电力技术的经验总结分析	68
4.1 技术发展内容总结.....	68
4.2 技术发展阶段总结.....	70
4.3 相关政策保障总结.....	72
第五章 中国低碳发电技术的发展现状分析	76
5.1 洁净煤低碳发电技术的发展现状分析.....	76
5.1.1 超临界和超超临界发电技术.....	76
5.1.2 循环流化床技术.....	78
5.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术.....	81
5.1.4 整体煤气化联合循环发电技术.....	82
5.1.5 燃煤电厂碳捕集与封存.....	84
5.2 常规低碳发电技术的发展现状分析.....	85
5.2.1 核能发电.....	85
5.2.2 水力发电.....	87
5.3 新兴低碳发电技术的发展概况.....	89
5.3.1 风力发电.....	89
5.3.2 太阳能发电.....	91
5.3.3 生物质能发电.....	92
5.4 中国低碳发电技术发展的障碍分析.....	93
5.4.1 政策障碍.....	93
5.4.2 技术障碍.....	94
5.4.3 市场障碍.....	96
第六章 中国电网环节低碳技术的发展现状分析	97
6.1 低碳输电技术的发展现状分析.....	97
6.1.1 柔性交流输电技术.....	97
6.1.2 超导输电技术.....	99
6.1.3 特高压输电技术.....	101
6.2 低碳配电技术的发展现状分析.....	103
6.2.1 配电自动化技术.....	103
6.2.2 柔性配电技术.....	105
6.3 低碳调度技术的发展现状分析.....	106
6.4 低碳储能技术的发展现状分析.....	107
6.5 电网环节低碳技术发展的障碍分析.....	108
6.5.1 政策障碍.....	108
6.5.2 技术障碍.....	109
6.5.3 管理障碍.....	110
第七章 中国电能消费终端低碳技术的发展现状分析	112
7.1 中国电能消费现状及趋势.....	112
7.1.1 电能消费现状.....	112

7.1.2 电能消费趋势	115
7.2 智能用电技术的发展现状分析.....	116
7.3 电动汽车技术的发展现状分析.....	118
7.4 电能消费终端低碳技术发展的障碍分析.....	122
7.4.1 政策障碍.....	122
7.4.2 技术障碍.....	124
7.4.3 管理障碍.....	126

第一章 发电环节低碳技术及其国外发展现状分析

1.1 洁净煤低碳发电技术及其国外发展现状分析

1.1.1 超临界和超超临界发电技术

(1) **技术发展背景。**随着燃煤装机总量的增加，全球将面临严峻的经济与资源、环境与发展的挑战。提高燃煤机组的效率、减少总用煤量、降低污染物排放一直是调整火电结构，实现可持续发展的重要任务。而随着电力工业装机中高效、清洁的火电机组比例偏低，结构性矛盾突出，供电煤耗偏高等问题的突出，迫切需要研制出新一代发电设备来装备电力工业。新一代发电设备应具备可靠、大型、高效、清洁、投资低等性能；能够替代现有的 300MW 和 600MW 亚临界机组，成为装备电力工业的主流机型；同时设备制造企业经过努力后能够具备生产能力，能够形成规模生产和市场竞争局面。通过分析发现，在多种技术路线中，通过提高常规发电机组的蒸汽参数来提高效率、降低排放的超临界和超超临界发电技术，由于可实现维护能源安全及 CO₂ 减排的目的且投资额相对不高受到各国青睐。

(2) **特点及减排作用。**根据进入汽轮机高压缸的主蒸汽的热力状态不同，锅炉包括“亚临界”和“超临界”两种。亚临界机组的典型参数为 16.7MPa/538°C/538°C，其发电效率约为 38%。超临界机组的典型参数为 24.1MPa/538°C/538°C，对应的发电效率约为 41%。超临界机组的热效率比亚临界机组的高 2%~3%左右，而超超临界机组的热效率比超临界机组的高 4%左右。目前全球运行的发电厂，平均发电

效率在 35% 以下，平均单位电能(kWh)煤耗约 320 克标准煤；亚临界机组的发电效率在 38% 左右，平均单位电能煤耗约 310 克标准煤；超临界机组的发电效率在 41% 左右，平均单位电能煤耗约 300 克标准煤；以三菱、日立为代表的日本超超临界机组发电效率在 48% 左右，单位电能煤耗约 265 克标准煤。如果采用超超临界技术发电，和现在运行的机组效率相比，单位电能至少可以节煤 50 克。由此可见，超临界和超超临界发电技术对于节约资源消耗、减少 CO₂ 排放、实现煤电产业的低碳化可持续发展具有重要意义。

(3) 国外发展现状分析。自 20 世纪 50 年代在美国和德国开始投入商业运行以来，至今超临界机组已大量投运，并取得了良好的运行业绩，拥有较多的商业运行经验。从发展历程看，美国和前苏联是超临界机组最多的国家，而发展超超临界技术较为领先的主要是日本、德国和丹麦，超超临界机组的热效率可达 45%~47%，最大单机容量 1050MW。表 1-1 介绍了国外超临界和超超临界发电技术的发展概况。由表可知，目前国外机组的特点是：在保证高可靠性、高可用率的前提下采用更高的蒸汽参数；采用变压运行方式，提高机组的灵活性；配置先进的烟气净化装置，实现清洁发电。为进一步降低能耗和污染物排放，在材料工业发展的支持下，超（超）临界机组正朝着更高参数的技术方向发展，在保持其可用率、可靠性、运行灵活性和机组寿命等的同时，进一步提高蒸汽参数，以获得更高的效率和环保性能。

表 1-1 国外超临界和超超临界发电技术发展概况

国家	发展现状	未来研发计划
美国	机组数量较多，容量最大，普遍采用二次中间再热	研究机组的高温高强度合金材料
俄罗斯	是世界超临界机组数目最多的国家（占总发电量的 40%）	研发高参数超临界机组（预计电站效率可以达到 44%~46%）
日本	采用变压运行机组获得最快的启动速度，可靠性高，经济性好	研究采用奥氏体钢和镍基合金将蒸汽初压提高到 34.5MPa，初温提高到 625~640℃
欧盟	以机组的高效率为主要目的，大多采用一次再热	目标使下一代机组效率达到 52%~55%，使 CO ₂ 的排放降低 15%，并降低燃煤电厂的投资

1.1.2 循环流化床技术

(1) 技术发展背景。随着采煤总量不断的增加，煤质不断变差，普通锅炉一方面很难适应劣质煤的燃烧，普遍存在出力不足、热效率低等问题；另一方面燃烧排放的烟气有害物质也大幅度增加，难以将其控制在合理范围内。随着能源供应形势的紧张和煤价的一路上扬，如何解决煤炭燃烧设备降低 NO_x、SO₂ 等大气污染物排放、缓解温室气体效应、降低设备投资、提高劣质煤利用效率与处理固体垃圾燃料之间所存在的矛盾，成为煤炭燃烧和综合利用设备发展和应用的关键所在。循环流化床（circulating fluid bed, CFB）是高速、高浓度的循环流态化技术，既可满足劣质煤燃烧的要求，提高燃烧效率，又能有

效控制大气污染物的排放。在这样的客观背景下，CFB 锅炉就成为多数发电企业为解决以上矛盾的首选燃烧设备。

(2) **特点及减排作用。**CFB 锅炉的很多独特优点，是传统锅炉技术所无法实现的。正是由于这些技术优点，使其得以快速发展和广泛应用。首先，CFB 锅炉独特的燃烧方式可以实现炉内脱硫脱硝，无需另行安装烟气脱硫脱硝装置，烟气污染物排放大大低于现行排放标准，并能满足更严格的环保要求。其次，CFB 锅炉的燃料适应性广，不仅可以高效燃用烟煤、褐煤、贫煤、无烟煤等适于常规锅炉的煤，还可以燃用常规锅炉不能适应的煤矸石、泥煤、石油焦、油页岩、废旧轮胎、垃圾等劣质燃料。第三，CFB 锅炉燃烧稳定，调峰性能好。由于 CFB 锅炉内大量的灰与燃料、石灰石粉混合呈循环流动状态燃烧，热容量大，因此，CFB 锅炉不会在运行中突然熄火，不投油最低稳燃负荷大大低于常规燃煤锅炉，可以达到 30%，调峰性能好。第四，CFB 锅炉不需脱硫脱硝工艺用水，大大节约水资源。第五，根据国外大型 CFB 锅炉电站的运营经验看，CFB 锅炉投资与运作成本均低于具有脱硫脱硝功能的常规燃煤机组。总之，作为一项高效能、低成本的清洁燃烧技术，CFB 具有燃烧效率高、燃料适应性广、负荷变化适应性强、低污染排放等优点，体现出良好的经济、社会和环保效益。

(3) **国外发展现状分析。**由于 CFB 锅炉电站与相同规模与功能的常规燃煤电站相比有诸多优越性，所以 CFB 技术发展迅速，表 1-2 为国外 37 台容量大于 150MW 的典型 CFB 锅炉一览表，其中 250MW CFB 锅炉已具有稳定运行 12 年的业绩。国外 CFB 锅炉炉型

及容量发展历程见图 1-1，根据各国经验，循环流化床未来将朝着大型化、超临界方向发展，开发 600MW 级以上大型电站循环流化床锅炉。此外也有研究人员认为深度脱硫是循环流化床锅炉技术今后发展中需要解决的一个重要问题。能源综合利用是循环流化床锅炉今后发展的另一个重要方向。能源综合利用包含有三方面内容：其一是以 CFB 锅炉为平台对一些低级能源资源综合优化利用；其二是循环流化床锅炉与其它能源或原材料加工系统集成从事能源高效利用；其三是 CFB 锅炉燃烧后产生的灰渣综合利用。

表 1-2 国外典型大型 CFB 锅炉

电厂	发电功率/MW	台数	燃料	投运时间
美国 Texas-New Mexico 电力公司	165	2	褐煤	1990
加拿大 Nova Scotia 电力 公司	180	1	石油焦/煤	1993
法国 Gardanne 电站	250	1	次烟煤	1996
波兰 Zeran 电厂	150	2	烟煤	1996/2001
泰国国家电力公司(NSP)	150	2	(无)烟煤	1998
韩国东海 Tonghae 电厂	220	2	无烟煤	1998/1999
美国 AES Warrior Run	208	1	烟煤	1999
波兰 Turow 电站	235	3	褐煤	1998/2000
美国 Warrior Run	208	1	烟煤	2000

美国 Bay Shore 电力公司	180	1	石油焦	2000
匈牙利 AES Borsodi	150	1	褐煤/烟煤	2001
波兰 Turow 电站	262	3	褐煤	2002
美国 JEA 电站	300	2	石油焦/煤	2002
波多黎各 Guayama 电厂	255	2	烟煤	2002
美国 Red Hills 电厂	250	2	褐煤	2002
土耳其 Can 电厂	167	2	褐煤	2004
美国 Seward 电厂	290	2	废煤	2004
美国 Gilbert 电厂	268	1	烟煤	2004
美国 Spurlock 电厂	290	1	烟煤	2008
美国 Sandow 电厂	315	2	褐煤	2009
美国 CLECO 电厂	330	2	石油焦/煤	2009
波兰 Lagisza 电厂	460	1	烟煤	2009

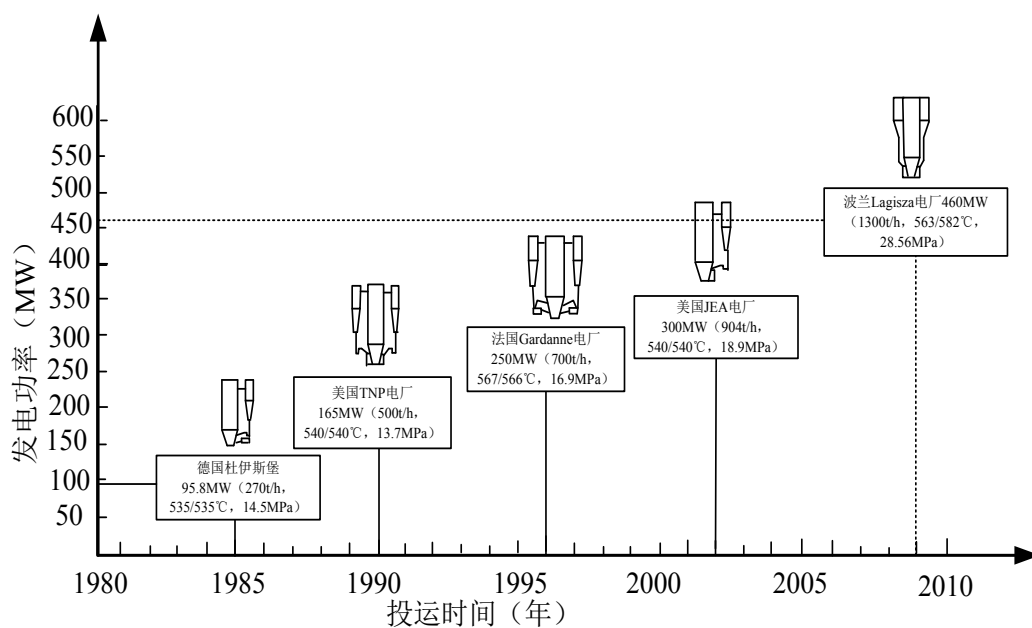


图 1-1 国外大型 CFB 锅炉的发展历程

1.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术

(1) **技术发展背景**。如何在整体上提高电站效率和大幅度减少燃煤发电造成的污染排放物，科研人员不断开拓新思路新方法。考虑到流化床燃烧既可以在常压下工作，也可以在增压下工作，后者称为增压流化床燃烧(PFBC)技术。采用增压(6~20个大气压)燃烧后，燃烧效率和脱硫效率较常压流化床燃烧得到进一步提高。同时，燃煤联合循环发电技术也被公认为在19世纪末至20世纪初最具吸引力的燃煤电站技术。因此，既满足增压又满足联合循环条件的增压流化床燃烧联合循环(Pressurized Fluidized Bed Combustion-Combined Cycle, PFBC-CC)技术，由于具有高效、洁净的特点，到世界各国的广泛重视。

(2) **特点及减排作用**。PFBC-CC发电技术具有以下特点：1) 燃烧效率高，在商业机组上测得的燃烧效率在99%以上。2) 发电效率高，商业机组的运行实践证明其发电效率比常压燃煤热力发电机的效率高出8%~10%，可达40%~42%。3) 低污染。在商业机组的测定结果表明PFBC-CC的氮氧化物、硫化物及颗粒排放浓度可以满足严格的环保控制要求。由于发电效率提高，CO₂的排放量也大大减少。4) 增压锅炉结构紧凑，占地面积小，现场施工费用低，可降低投资。5) 运行条件好。由于增压运行，炉内高空气压力和密度使床的表观流速大大降低，减轻了床内磨损。低流速和高床深使气体在床内的停留时间大大延长，从而提高了燃烧效率和脱硫剂的利用率。正因为具有以上特点，PFBC-CC成为21世纪主要的洁净煤发电技术之一。目

前国外正在推广应用的增压流化床技术 ,即使在蒸汽循环采用超临界参数的情况下 ,联合循环效率仅能达到 45% ,而采用增压流化床燃烧联合循环技术 ,通过燃气/蒸汽联合循环发电 ,其循环效率在采用超临界蒸汽参数的条件下可望达到 50% ,发电效率明显提高 ,并可大幅减少燃煤对环境的污染。

(3) 国外发展现状分析。自 20 世纪 80 年代末 PFBC-CC 建成商业电站以来 ,发展迅速。目前德国、芬兰、美国、西班牙和日本等国也正积极推进 PFBC-CC 技术的中试研究 (表 1-3) ,瑞典长期致力于发展 PFBC-CC 技术 ,目前在这一技术领域居世界领先地位 ,世界上已投运瑞典的 VARTAN 电站、西班牙的 ESCATRON 电站和美国的 TIDD 电站等三座 PFBC-CC 电站都是瑞典的产品。由表可知 ,与相同参数的常规煤粉凝汽式电站相比 ,PFBC-CC 电站的发电效率可高出 2~4 个百分点。同时 ,PFBC-CC 电站既适用于新建电站 ,也适用于改造已有的旧电站 ,可增加 20% 的电站输出功率 ,投资比新建电站可减少 20% ~ 40%。

表 1-3 国外 PFBC-CC 机组发展概况

国 家	日本		瑞士		美国		西班牙	德国
项 目	TOMAT ON	OSA KI	KARI TA	VART AN	TID D	WAKA M	ESCATR ON	COTTB US
总 发	85	250	360	135	70	71	79	62

电								
量								
/M								
W								
效				89				
率	40.1	42	42.5	(供	36.4	37.5	35	——
/%				热)				

目前已进入商业应用的第一代 PFBC-CC 电站采用的是增压鼓泡流化床技术，其最大弱点是流化床内燃烧温度在 900℃左右，过高的温度使煤的燃烧过程易引起结渣，也可使流化床内脱硫过程的效率下降，从根本上限制了燃气透平的进口温度，使燃气循环效率不能进一步提高，以至发电效率难以超过 42%。而由美国提出的第二代 PFBC-CC (advanced PFBC, APFBC)，可将部分煤在气化炉气化后送入辅助燃烧室燃烧，产生的高温燃气再与 PFBC 的 850℃左右燃气混合，送入燃气轮机，把燃机进气温度提高到 1150℃~1200℃，使热效率从现有 PFBC 的 42%提高到 45%~48%。体积更小，排放更清洁，其发电成本比常规的燃粉煤电厂加脱硫装置低 20%，可以说 APFBC 是 PFBC-CC 技术未来的发展趋势。

1.1.4 整体煤气化联合循环发电技术

(1) 技术发展背景。煤炭在一次能源中的特殊地位，使得人们投入大量精力研究，以提高其利用效率。从系统构成及设备制造的角度来看，整体煤气化联合循环 (Integrated Coal Gasification Combined Cycle, IGCC) 技术与传统的燃煤机组不同，多装燃气轮发电机组、

气化系统、废热锅炉、气体净化装置、脱硫和 CO_2 等装置，其全厂控制系统更为复杂。IGCC 发电技术是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。正是由于 IGCC 继承和发展了当前热力发电系统几乎所有技术，将空气分离技术、煤的气化技术、煤气净化技术、燃气轮机联合循环技术以及系统的整体化技术有机集成，才使得在当时的背景下在众多洁净煤技术中脱颖而出，被公认为是世界上最清洁的燃煤发电技术。

(2) **特点及减排作用。**IGCC 发电技术把煤炭气化和煤气净化与联合循环发电技术结合在一起，具有明显特点：1) 发电热效率高。目前国际上 IGCC 电厂的净效率已达到 43% 以上，比常规亚临界燃煤电厂效率高 5~7 个百分点，随着燃气初温的进一步提高，IGCC 的净效率能达到 50% 或更高。2) 优越的环保特性。在气化过程中脱硫率 $\geq 98\%$ ，脱氮率可达 90%，粉尘几乎为零， CO_2 达到零排放。3) 耗水量少。比常规汽轮机电站少 30%~50%，这使它更有利于在水资源紧缺的地区发挥优势，也适于矿区建设坑口电站。4) 易大型化，单机功率可达到 300~600MW 以上。5) 能综合利用煤炭资源，组成多联产系统，能同时生产电、热、燃料气和化工产品。从 IGCC 的减排效果看，由于可以实现在燃料燃烧前 CO_2 的分离和捕集，切煤气压力及 CO_2 浓度较高（达 35%~45%，普通燃煤机组排烟浓度一般为 14%~16%），因而脱除 CO_2 比烟气中更容易。燃煤电站锅炉排烟中 CO_2 浓度一般为 14%~16%，不利于回收利用。IGCC 电站可以实现在燃料燃烧前 CO_2 的分离和捕集，因而脱除 CO_2 比烟气中更容易，另外煤

气净化脱硫工艺中也可以同时分离和除去 CO_2 。IGCC 比同容量常规电站每单位电力所排放的 CO_2 量减少 10%~15%。IGCC 电站的热效率高 (大型 IGCC 电站效率已达 42%~46%) , 有利于减少 CO_2 和其他污染物的排放 (通常电站效率每提高 1% , CO_2 的排放将减少 2%)。未来的 IGCC 电站将朝着实现 CO_2 的微排放或零排放方向发展 , 从根本上解决现有燃煤电站效率低下和污染严重的主要问题。

(3) 国外发展现状分析。由于 IGCC 发电系统把环境友好的煤气化技术和高效的燃气蒸汽联合循环发电技术相结合 , 实现了煤炭资源的高效、洁净利用 , 具有高效、洁净、节水、燃料适应性广、易于实现多联产等优点 , 并且与未来 CO_2 近零排放、氢能经济长远可持续发展目标相容 , 是当今国际上最引人注目的新型、高效的洁净煤发电技术之一。自 20 世纪 70 年代开始研发 , 进入二十世纪 90 年代 , 美国、日本、欧盟等国家和地区都提出了相应的 IGCC 发电发展计划 , IGCC 开始进入商业示范阶段 , 纯粹以发电为目的的 200~300MW 等级燃煤 IGCC 示范电站有 4 座 , 即美国的 Tampa、Wabash River 电站、荷兰 Buggenum 电站和西班牙 Puertollano 电站 , 见表 1-4。这些电站在调试过程中都遇到许多技术问题 , 经不断改进取得以下主要进展 : 供电效率达到 42%~43% (设计效率为 43%~45%) ; 比投资费用降低到 1500~2200\$/kW ; 污染物排放远远低于 NSPS 标准 , 完全能够满足 21 世纪初、中期的需要 ; 可大幅度减少 CO_2 排放 , 满足新标准的要求。通过多年的持续研究和发展 , 国外 IGCC 发电技术已经取得了初步的成效 , 基本走过了商业示范阶段 , 技术成熟 , 具备了大规模商业

化开发的条件。随着对发电效率及环保要求的不断提高 ,人们在 IGCC 系统热力循环研究思路有了很大突破 ,采用不同循环、不同技术、不同产品有机结合 ,产生出新的复合 IGCC 发电技术。如 :日本整体煤气化燃料电池联合循环(IGFC)计划。该计划通过煤气化 ,利用燃料电池、燃汽轮机和蒸汽轮机技术 ,提高资源利用效率 ,降低排放浓度 ,全厂发电效率将达到 60%。

表 1-4 国外典型的 4 座 IGCC 电站

国家	荷兰	美国	美国	西班牙
电厂	Buggenum	Wabash River	Tampa	Puerrollano
气化炉类型	Shell	Destec	Texaco	Prenflo
投运时间/年	1994	1995	1996	1997
净功率/MW	253	265	250	300
净效率/%	43	40	42	45
燃机初温/°C	1105	1260	1288	1250
汽机功率/MW	128	104	121	145
总投资/亿美元	4.62	3.58	5.06	6.91

1.1.5 燃煤电厂碳捕集和封存技术

(1) 技术发展背景。目前 ,在全球范围内 ,化石燃料、土地使用等人类活动每年会导致 300 亿吨 CO₂ 气体排放到大气层中 ,其中化石燃料的排放占到 60% ,直接造成全球气温逐步明显上升。控制气候变化最根本的方法是提高能源利用效率 ,优化能源消费结构等 ,但化

石燃料在未来较长的一段时期内仍将是主要的能源供给。因此在减排形势日益严峻的情况下，碳捕集与封存（Carbon Capture and Storage, CCS）技术无疑是直接减少 CO₂ 排放的最直接方法。IEA 研究表明，到 2050 年将温室气体浓度限制在 450ppm 的所有减排技术中，仅 CCS 技术就需贡献 20%。当前，包括 IEA 在内的全球主要能源研究机构 and 主要碳减排积极倡导组织和国家已经一致将 CCS 技术作为未来应对全球气候变化的技术途径之一。

（2）特点及减排作用。CCS 技术应用于燃煤电厂，意味着在煤燃烧后进行净化处理，其效果与其他洁净煤技术一同构成减少 CO₂ 排放、控制全球温室效应的重要手段。CCS 的技术优势是在减排过程中不用对现行的能源结构做出显著调整，从而减小了经济波动。根据 IPCC 的调查，CCS 技术的应用，可使化石燃料电站的 CO₂ 排放量降低 85%~95%，从而减少 20%~40% 的全球 CO₂ 排放量，这将对气候变化产生积极的影响。要实现从现在高碳的发电方式转变为未来零排放发电的低碳目标，CCS 潜力巨大。相关研究预计，全球从 2010 年到 2050 年 CO₂ 的实际潜在储存能力至少将达到 16800 亿吨，2050 年的储存量为 1447 亿吨，其中中国和美国分别为 259.44 亿吨和 261.14 亿吨，占全部储存量的 36%。到 2020 年、2030 年、2050 年，发电厂的捕获量将分别占有所有 CO₂ 捕获量的 53%、70%、80%，其余的捕获量来自燃料加工处理和制造业（如合成氨、钢铁、水泥的生产）。

（3）国外发展现状分析。CCS 自 2000 年起迅速发展到现在，已成为广受重视的解决气候变化的重要技术。IEA 在 2008 年世界能

源展望中提出的蓝色情景分析中预测，到 2050 年 CCS 将对燃煤和燃气发电厂有重大贡献。各国政府也对此做出响应，纷纷设立专项资金，以供发展 CCS 技术之用。其中包括欧盟提供的 80 亿美元，澳大利亚 CCS 旗舰计划的 20 亿美元，以及奥巴马政府刺激计划中用于 CCS 的 24 亿美元。在最近刚刚通过的《美国清洁能源与安全法案》中，也特意将分派给各公司用于温室气体减排补助中的 26% 专门用于资助 CCS 等公共项目。按照澳大利亚全球 CCS 研究所的统计，目前世界上约有 270 个 CCS 项目，其中 70 个达到每年封存超过 100 万 t CO₂ 的商业级规模，图 1-2 列举了截至目前全球分地区的 CCS 项目（数据来源于美国电力研究院<EPRI>）。

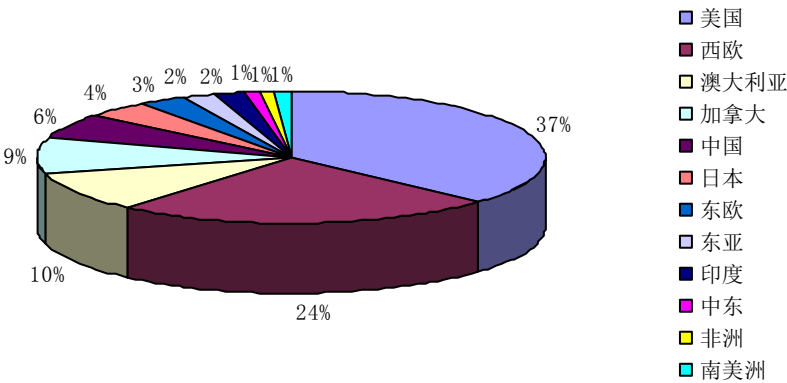


图 1-2 全球分地区 CCS 项目统计

美国、欧盟、澳大利亚、加拿大、挪威等国家或政府间组织都制订了相应的研究规划，开展 CCS 技术的理论、试验、示范和应用研究，并且已经有了成功的实例。其中，由图 2-2 可以看出美国走在世界最前列，针对 CCS 技术的科研规划和项目组织实施较为周密完善，其未来发展重点之一是降低 CCS 系统因地区差异带来的高成本（捕获所占比例最大）。从发展趋势看来，欧盟预计在 2015 年前建成 12

个 CCS 示范项目 ,而 G8 集团则预计在 2020 年建成 20 个商业化项目。除此之外的许多国家 ,如澳大利亚、印尼、墨西哥、沙特阿拉伯 ,都制定了相应的技术研究规划 ,拟开展 CCS 技术的理论、试验、示范及应用研究。

1.2 常规低碳发电技术及其国外发展现状分析

1.2.1 核电技术

(1) **技术发展背景**。随着国际原油价格的不断攀升和全球变暖影响的不断扩大 ,核电正在受到国际社会越来越多的关注。近年来举办的各类国际峰会都将应对气候变化提上日程 ,随之各国相继制定了相应的温室气体排放控制目标。要实现减排目标 ,主要依靠发展核能、水能以及以风能、太阳能、生物质能为代表的新兴低碳能源。相对于其他非化石能源 ,核电作为清洁、安全、高效的能源 ,具有更大的自身优势。许多国家开始重新评估核电 (因为事故经历过一段冷藏期) 在能源结构中的战略地位 ,把发展核电作为满足能源需求、增进能源安全和低碳发展的重要路径 ,核电复苏的态势已经出现。

(2) **特点及减排作用**。核电自产生至今近 50 年 ,已向人类展现了突出优点 : 1) 可望永续利用。核能可以大规模取代化石能源 ,是“取之不尽用之不竭”的能源。2) 是清洁能源。一座 100 万 kW 的压水堆核电站 ,每年只需消耗低浓铀 25~30 吨 ,不排放 CO_2 和 SO_2 。而一座同样规模的燃煤电厂 ,每年要耗煤 250 万吨 ,排出 650 万吨 CO_2 , 1700 吨 SO_2 , 450 吨氮氧化合物 , 32 万吨灰尘。美国由于使用核电 ,

自 1973 年以来每年少排放 CO₂ 达 4700 万吨。3) 安全性强。核电站的核安全是有保证的。全世界核电机组运行至今，除 1979 年美国三哩岛和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站两起事故，核电站安全记录良好。无论是生产过程中的人员伤亡，还是对环境的不良影响都远低于其他工业部门。4) 经济性日益提高。虽然建设费用昂贵曾是阻碍核电发展的重要因素，但随着核电技术的成熟，经济效益愈发明显。核电的能源优势主要体现在对化石燃料的替代前景上，正是由于其具备大规模替代潜力，所以减排优势最为明显。一方面，化石燃料是主要的温室气体排放源和污染源，日益严峻的气候状况使得各国相继制定严格的能源政策；另一方面，由于常规化石燃料的供给潜力不能满足未来的能源需求，许多国家为了保障能源供应，一直致力于开发可替代能源，如核能、可再生能源等，但可再生能源的供给能力远不能满足能源需求，目前具有大规模替代能力和前景的只有核电。出于以上两方面的考虑，核电成为是优化能源结构的优先选择。首先，核能量密度高，能连续稳定地提供大量电力，一座 100 万千瓦的核电站每年需要补充 30 吨左右的核燃料，而同样规模的燃煤电厂每年需要 300 万吨煤，如此大规模的化石燃料燃烧带来的排放量可以转由核电的“零”排放替代，无疑为国家减排计划的推进提供了有力支撑；其次，与常规化石燃料在世界分布不均不同，核能发电所需的燃料铀，在世界广泛分布，燃料供应充足；最后，利用核能代替其他化石燃料发电，既可以提供电力满足能源需求，又可以增加其他工业所需的煤炭、石油、天然气的供应量，使得能源资源得到进一步优化配置。

(3) 国外发展现状分析。自 1954 年苏联建成世界上第一座电功率 5000kW 实验性核电厂 ,1957 年美国建成功率 9 万 kW 的希平港原型核电站以来 , 世界核电已取得了长足发展。根据世界核协会 (WNA) 提供的资料 , 截止 2010 年 5 月 1 日 , 全球有 29 个国家 (立陶宛伊格纳利纳核电站于 2009 年底关闭) 共运行着 438 台机组 , 总净装机为 374.1GW , 2009 年核电发电量为 2558TWh (见图 1-3) , 较上年增长 0.44% , 占到全球总发电量的 14% , 较 2008 年下降 1 个百分点 , 为最近六年来最低。其中法国和美国是核电发展最为成功的国家 , 法国核电比重在 2009 年达到了 76.2% , 是全球核电份额最高的国家 ; 美国拥有占全球 27% 的装机容量 , 生产了占全球 31% 的发电量 , 是核电运行绩效最高的国家。虽然频繁的地震等自然灾害导致部分核电机组停运 , 同时新建投运机组较少 , 使得全球核发电量自 2007 年以来一直处于下降趋势 , 但是根据各国已经公布的数据 , 预计未来核电将会呈现大幅增长态势 , 核电比重将会进一步扩大。目前全球有 13 个国家正在建设 54 台核电机组 , 总净装机容量为 56.1GW ; 有 28 个国家计划建设 148 台核电机组 , 总装机容量为 162GW ; 有 36 个国家拟议建设 342 台核电机组 , 总装机容量为 363.2GW。

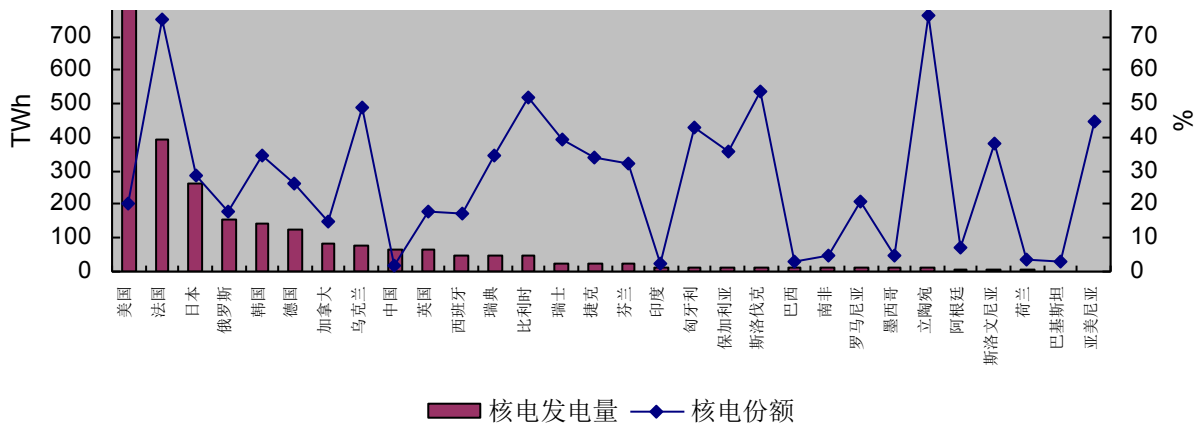


图 1-3 各国核电发电量及核电占比 (2009 年)

1.2.2 水电技术

(1) **技术发展背景。**在能源需求和节能减排的压力下，积极发展新能源和可再生能源，减少化石能源消耗，成为改善各国能源结构和解决温室气体排放问题的重要途径。与其它可再生能源相比较，水电不仅技术成熟、成本经济、效率高、电能质量好，在大规模商业化开发和温室气体减排方面具有更大的优势。

(2) **特点及减排作用。**许多大型水电站，尤其流域开发的龙头水电站具有多年调节性能，调峰能力强不仅给电网的电力调度带来方便，同时也可带来降低化石能源发电量，减少相应的温室气体排放。与火电 (燃煤燃油) 相比较，水电的运营成本极低，且不产生任何污染物和有害气体，是减少大气污染的清洁能源。与核电相比较，水电又是完全的对人体无害，不用担心附近居民的身体受到伤害。随着各国在降低 CO₂ 排放方面的压力和责任越来越大，开发利用水能资源是

优化能源结构，转变经济增长方式，实现经济社会可持续发展的必然选择。

(3) 国外发展现状分析。作为目前最成熟、供应最稳定的可再生能源清洁发电技术，水力发电在世界各地得到广泛应用，在全球能源供应体系中占有重要地位。世界各国在其发展过程中都重视优先开发水电，已建成大批包括抽水蓄能电站在内的巨型水电站。截止2008年，全球水电装机已经达到848456MW，发电量3045000GWh/年，占到全球电力供应的20%。不少经济发达国家的水电资源已接近全部开发，例如日本、瑞士、法国、西班牙、挪威、意大利等国家的水电开发程度达到95%以上，目前水电建设主要集中在发展中国家。发展中国家过去由于政治、经济和社会等原因，对水能资源的开发较缓慢，水电开发利用程度不高，但80年代中期以来，一些国家如巴西、巴拉圭、墨西哥、印度、委内瑞拉、土耳其等水电开发速度大大加快，水电开发利用程度迅速提高。同时，由于大型水电资源有限及个别发达国家已近开发极限，小水电以其资源分布广泛、因地制宜开发利用、解决偏远地区用电问题等优点，世界各国纷纷加大了对小水电的开发力度。目前，世界小水电在整个水电的比重大体维持在5~6%，发展速度与水电同步。截止2008年世界水电资源及发展概况见表1-5。

表 1-5 世界水电资源发展概况(GWh/年；MW)

理论蕴藏量	经济可开发量	经济开发量	水电装机	发电量	在建装机	规划装机
-------	--------	-------	------	-----	------	------

非	2590234	1303246	848434	21486	94124	7489	24236-84048
洲							
亚	19701583	7654565	4487377	329737	1107622	130479	224368-241699
洲							
大							
洋	633384	195987	88644	13470	40259	160	416-2489
洲							
欧	2900767	1120541	752348	178814	530999	2408	11029-13820
洲							
北	7574535	1763478	1014910	167042	664244	5940	18435-43645
美							
南	5696000	2615299	1536197	137908	607577	11327	65693-75556
美							
世	39096600	14653115	8727911	848456	3044825	157803	34176-461257
界							

1.3 新兴低碳发电技术及其国外发展现状分析

1.3.1 风力发电技术

(1) **技术发展背景。**缓解能源危机、开发新能源、应对气候变化成为世界各国能源发展战略的重大举措。风能是太阳能的一种转化形式，是一种不产生任何污染排放的可再生自然能源。与太阳能、生物、地热和海洋能发电相比，风电是当前技术和经济上最具商业化规

模开发条件的新能源。作为地球上最古老、蕴藏量最大、分布范围最广的可再生能源之一，风电的开发利用，成为解决能源问题、气候问题的另一有效途径。

(2) **特点及减排作用。**首先，风力资源蕴藏量巨大，全球风能约为 $2.74 \times 10^9 \text{MW}$ ，其中可用来发电的风力资源约有 100 亿千瓦，几乎是现在全世界水力发电的 10 倍，目前全世界每年燃烧煤所获取的能量仅有风力一年提供能量的三分之一。其次，风力资源是可再生的资源，如果能够实现风力资源的大规模开发利用，则能够有效缓解由煤炭、石油短缺所导致能源危机。第三，风力资源分布广泛，一般说来，3 级风就有利用的价值，风速大于每秒 4 米就可用于发电。清洁、无污染作为风力发电最重要的一个特性，是其快速发展的重要原因。风力发电过程中本身不排放任何温室气体，即使计算风力发电设备建造时的温室气体排放，设备运行 6 个月的减排量就可抵消，而且一套风力发电设备的使用寿命一般为 20 年，因此风力发电具有显著的减排效果。据测算，2008 年全球风力发电达 260TWh，相当于减少 1.58 亿吨的 CO_2 排放。大力发展风力发电，减少电煤、电油的消耗，是电力行业实现低碳化发展的重要途径之一。

(3) **国外发展现状分析。**近年来，由于温室气体减排效果显著，风电呈现快速发展趋势，装机容量逐年上升。截止 2009 年 12 月底，全球风电总装机容量已经超过了 1.5 亿千瓦，风力发电在全球能源消耗量中的比重也已占到 12%。2009 年风电新增装机 3800 万千瓦，增长率达到了 42.3%，高于过去十年的平均增长速度。近年来世界风

电机组增长状况如图 1-4。其中，海上风电以其风速大且稳定性高而备受推崇。自 1991 年丹麦建设了首个沿海风电场以来，全世界已经建成的海上风电场已有 30 余座，截止 2009 年底，全球累计装机容量超过 210 万千瓦，仅 2009 年新增 69 万千瓦。风力发电技术已基本成熟，经济性已接近常规能源，在今后相当长时间内将会保持较快发展。据全球风能理事会最新报告预测，到 2012 年，全球的风电市场增长将达 155%，总装机容量达 2.4 亿千瓦，亚洲将会取代欧洲成为最大的风电区域市场。风电已经成为最具潜力的清洁电力新能源之一。

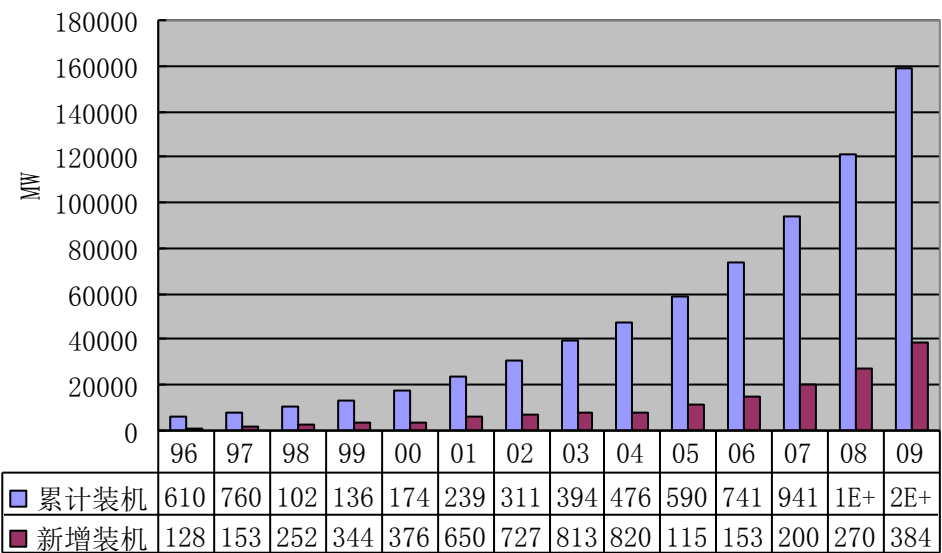


图 1-4 1996~2009 年世界风电装机容量统计 (单位：MW)

1.3.2 太阳能发电技术

(1) 技术发展背景。面对全球范围的能源危机和环境压力，用可再生能源来代替资源有限、污染环境的常规能源是发展的必然趋势。作为所有化石能源和多种可再生能源的源头，太阳能以其储量的“无限性”、存在的普遍性、开发利用的清洁性以及逐渐显露出的经济

性等优势，成为解决化石能源带来的能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径，是人类理想的替代能源。随着技术的进步和环境问题的凸显，太阳能发电从最初的航天器电源，逐步发展为可大规模利用的新兴低碳能源。因具备独特的优势，太阳能开发利用在 21 世纪得到长足的发展，并将在世界能源结构转移中担纲重任，成为 21 世纪后期的主导能源。

(2) 特点及减排作用。首先，太阳能储量的“无限性”。太阳能是取之不尽的可再生能源，可利用量巨大。太阳每秒钟放射的能量大约是 $1.6 \times 10^{23} \text{ kW}$ ，其中到达地球的能量高达 $8 \times 10^{13} \text{ kW}$ ，相当于 $6 \times 10^9 \text{ t}$ 标准煤。按此计算，一年内到达地球表面的太阳能总量折合标准煤共约 1.892×10^{13} 千亿 t，是目前世界主要能源探明储量的一万倍。太阳的寿命至少尚有 40 亿年，相对于人类历史来说，太阳可源源不断供给地球的时间可以说是无限的。相对于常规能源的有限性，太阳能具有储量的“无限性”，取之不尽，用之不竭。这就决定了开发利用太阳能将是人类解决常规能源匮乏、枯竭的最有效途径。其次，太阳能存在的普遍性。虽然由于纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀，但相对于其他能源来说，太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性，可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。第三，太阳能利用的清洁性。太阳能像风能、潮汐能等清洁能源一样，其开发利用时几乎不产生任何污染，加之其储量的无限性，是人类理想的替代能源。

(3) 国外发展现状分析。太阳能发电技术包括光伏发电和太阳

能热发电。光伏发电最初作为独立的分散电源使用，近年来并网光伏发电的发展速度加快，市场容量已经超过了独立使用的分散光伏电源。2008 年，全世界光伏发电装机已经达到了 3956MW，并呈现快速增长的趋势（见图 1-5），太阳能光伏发电已经进入商业运行时期。作为太阳光伏发电的主要组件，太阳能电池产量也呈现快速发展，如图 1-6 所示，目前，国际上太阳能电池制造生产已经形成了欧洲、日本、中国、美国四足鼎立之势。大规模的太阳能热发电应用始于美国加州，而新近开发的项目集中于南欧、北非和中东地区。美国拥有全球最大规模的太阳能热发电装机，截止 2009 年 3 月，已经投入商业运行的有 419MW，其次为西班牙，装机容量为 220MW。目前太阳能热发电在建项目有 1200MW，大部分集中于美国 and 西班牙两国。太阳能光热发电的关键技术尚未成熟，产业发展还处于起步阶段；光伏发电已经进入大规模市场化阶段，未来将保持快速发展趋势，近期光伏发电的主要市场是发达国家的并网发电和发展中国家偏远地区的独立供电。

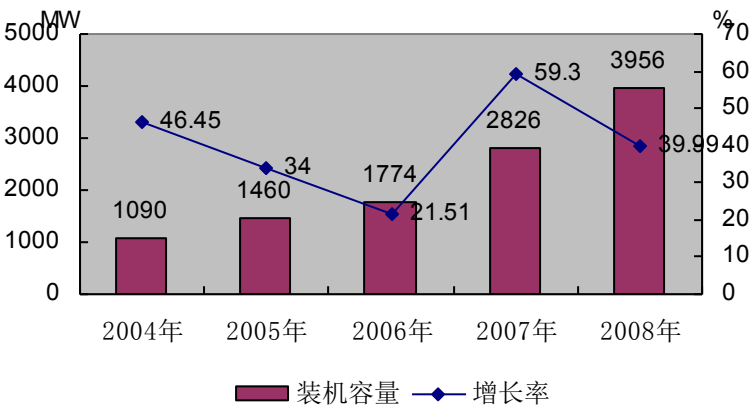


图 1-5 2004~2008 年世界太阳能光伏发电机组装机容量增长情况

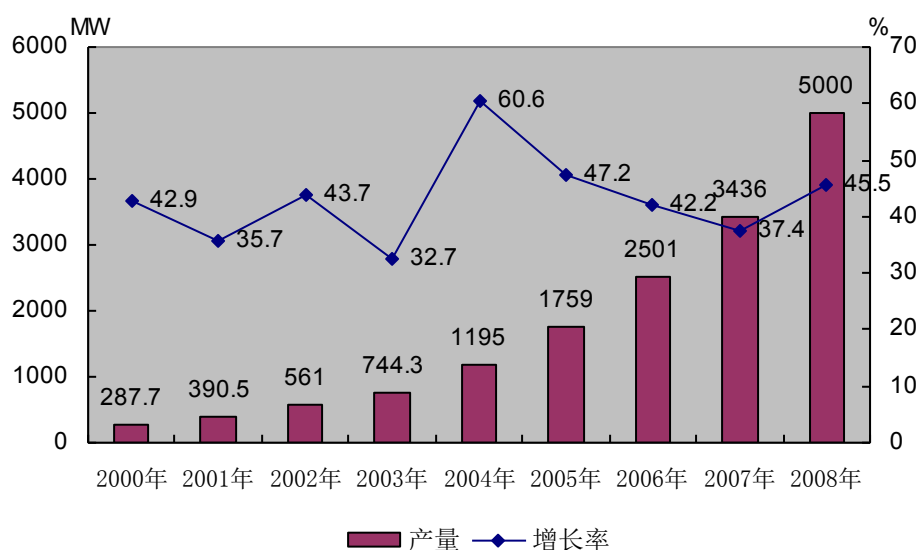


图 1-6 2000~2008 年世界太阳能电池产量增长情况

1.3.3 生物质能发电技术

(1) **技术发展背景。**近年来传统化石能源供应紧张和环保问题日益突出，已经成为制约经济社会可持续发展的主要瓶颈。新能源作为保障能源安全和应对气候问题的重要途径而备受关注。其中，生物质能消费目前位居世界能源消费总量的第4位，仅次于煤炭、石油和天然气。国外发电行业对新能源市场中资源丰富、可再生性强、有利于改善环境和可持续发展的生物质资源的开发利用给予了极大的关注。

(2) **特点及减排作用。**生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，是以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，是取之不尽、用之不竭的能源资源，是人类利用最早的能源之一。生物质能具有可再生性、种类多样性、低污染性、分布广泛、储量丰富等特点。据生物学家估计，生物质能的年产量相当于世界目前总能耗的10倍，随着农林业的发展，生物质资源

还将越来越丰富。生物质能发电主要利用农业、林业和工业废弃物、甚至城市垃圾为原料，采取直接燃烧或气化等方式发电。首先，生物质能发电稳定性高，与小水电、风电和太阳能发电的间歇性比起来，生物质能发电质量好、可靠性高，可以作为小水电、风电、太阳能发电的补充能源，具有较高的经济价值。其次，全面建设小康社会的目标下，农村能源结构由传统生物质能利用为主向现代化方向转化，生物质能发电是这种转化的重要途径。第三，生物质能发电具有环保性。生物质的硫、氮含量远低于煤炭、石油等能源，燃烧时温室气体排放很少（CO₂近零排放），能有效地减缓温室效应。同时，大力发展生物质能发电，可以减轻经济发展对化石燃料的依赖，保障国家能源安全。

（3）国外发展现状分析。生物质能发电主要有三种利用方式，分别是生物质直燃发电、生物质气化发电和沼气发电。自从1988年在丹麦诞生了世界第一座秸秆生物燃料发电厂，此后生物质能发电在许多国家开始大规模发展。至今，在丹麦已有130座秸秆发电厂，秸秆发电等可再生能源已经占到全国能源消费量的24%以上。在美国，生物质能发电装机也已经达到1050万千瓦，预计到2015年装机量将达到1630万千瓦。日本的城市垃圾焚烧发电技术发展也很快，垃圾焚烧处理的比例已经接近100%。表1-6列出了部分国家生物质能发电现状及未来的发展目标。

表 1-6 部分国家生物质能发电概况

国家	发电方式	主要发电厂	现状及发展目标
----	------	-------	---------

丹麦	直燃和 气化发电	世界第一座 秸秆生物燃料 发电厂	正在实施生物质热电联产计划，已建立 130 多家秸秆发电厂。
美国	直燃、气 化和混合 燃烧发电	Kettle falls 电 厂、Vermont 生物质气化工 程等	已建 350 座生物质发电站,生物质能发电总装机容量已超过 10500MW，单机容量达 10~25MW，到 2015 年，生物质发电将达到 16300MW 的装机容量。生物质能的消耗量占到本国一次性能源的 4%。
荷兰	直燃发电	——	生物质占可再生能源的 60%。可再生能源长期发展战略中将生物质发电作为主要 5 条途径之一
奥地利	直燃发电	——	成功地推行燃烧木材剩余物的区域供电计划，目前已有容量为 1000~2000kW 的 80~90 个区域供热站，年供应 10×10 ⁹ MJ 能量。
瑞典	气化发电	Carnamo 气化 电厂	利用造纸厂的黑液、秸秆和林产工业废弃物等来发电。

1.4 国外低碳发电技术政策保障分析

1.4.1 加强低碳技术创新方面

纵观各发达国家的低碳政策，加强低碳技术创新上各有侧重点。低碳技术的研发中，欧盟的目标是追求国际领先地位，开发出廉价、清洁、高效和低排放的世界级能源技术。英、德两国将发展效率更高、

能应用清洁煤技术的低碳发电站技术作为减少 CO₂ 排放的关键 ,调整产业结构 ,建设示范低碳发电站 ,加大资助发展清洁煤技术、CCS 技术等研究项目 ,以找到大幅度减少碳排放的有效方法。德国还制定了 CO₂ 分离、运输和埋藏的法律框架。

日本政府为了达到减排目标 ,采取综合性的措施与长远计划 ,改革工业结构 ,资助基础设施以鼓励节能技术与低碳能源技术创新的私人投资。对可以大规模削减温室气体的 CCS 技术予以大力支持 ,从 2009 年开始进行大规模试验 ,并在 2020 年前投入实用。此外 ,日本还持续投资化石能源的减排技术装备 ,如投资燃煤电厂烟气脱硫技术装备 ,形成了国际领先的烟气脱硫环保产业。

美国政府在《清洁空气法》、《能源政策法》的基础上提出了清洁煤计划 ,其目标是充分利用技术进步 ,提高效率 ,降低成本 ,减少排放。为了能更加高效环保利用储量丰富的煤炭资源 ,政府已投入相当资金 ,用于将先进清洁煤技术从研发阶段向示范阶段和市场化阶段推进。“清洁煤发电计划”主要支持企业与政府建立伙伴计划 ,共同建设示范型清洁煤发电厂 ,对具有市场化前景的先进技术进行示范验证 ;通过税收优惠等政策措施 ,对经过示范验证可行的先进技术进行大规模商业化推广 ,通过税收补贴使新技术的生产成本具有市场竞争力。

1.4.2 积极发展低碳能源方面

欧盟积极发展可再生能源 ,着力提高其市场份额 ,要求到 2020 年各成员国可再生能源使用量占各类能源总使用量的 20% (目前为 8.5%)。英国政府目前减排的重要举措是发展风能与生物质能 ,并把

可再生能源技术的研究开发和示范放在首位。为此，英国提出了分三步走的目标：1）近期目标的重点是有竞争力的、可尽快实现出口的技术领域，包括近海风能、主动和被动式太阳能装置、水电以及垃圾能等；2）中期目标（到 2015 年）是确保实现 2010 年可再生能源发展目标的新技术以及有出口前景的技术，包括生物残留物、近海风能、能源作物、燃料电池以及太阳光电等；3）远期目标（2015 年以后）的重点是在执行研究和开发计划过程中发现的潜在能源技术，包括燃料电池、与建筑一体化的光电装置以及太阳能热电技术等。

德国政府通过《可再生能源法》保证可再生能源的地位。确定了以下几个重点领域：1）大力发展风能，促进现有风力设备更新换代；开展了一项海上风力园实验项目。2）制定《可再生能源发电并网法》，对可再生能源发电的并网与价格提供保护；鼓励沼气能的发展；制定了《可再生能源供暖法》，促进可再生能源用于供暖；制定《热电联产法》，积极推广热电联产技术，规定了以热电联产技术生产的电能获得补贴，要求到 2020 年将热电联产技术供电比例较目前水平翻一番。

意大利政府为支持可再生能源的发展，从 1992 年对可再生能源发电厂的电价实行保护价收购，扶持可再生能源的发展。1999 年后，意大利通过立法的形式开始实行“绿色证书”制度。“绿色证书”是指通过利用可再生能源向国家电网输送电力并由国家电网管理局认可后颁发的证书。规定年产量或进口量在 1 亿千瓦时以上的不可再生能源企业，必须按实际产量的一定比例向电网输送可再生能源，且比例逐

年提高。“绿色证书”可用于交易，生产商可通过购买“绿色证书”的方式完成任务。通过绿色证书，限制高碳能源的使用，激励具有低碳的可再生能源发展。

日本强调核电与太阳能发电技术的利用。在核电站建设方面，日本计划兴建的 13 座核电站中，将有 9 座在 2017 年之前投入使用。在太阳能方面，提出未来太阳能的发展目标，强化了太阳能的研制、开发与利用，计划在未来 3 年至 5 年内，将家用太阳能发电系统的成本减少一半，而太阳能发电量是目前的 10 倍，到 2030 年是目前的 40 倍。为实现这个目标，日本政府在积极推进技术开发降低太阳能发电系统成本的同时，进一步落实包括补贴在内的鼓励政策，强化太阳能利用世界第一的位置。

美国对可再生能源与清洁能源给予高度重视。美国政府提出的“先进能源计划”，强调增加可替代能源和清洁能源技术的投入。在该计划中，美国政府在 2007 年财政预算中对清洁能源技术研究经费增加 22%。一是扩大核电能力，在 30 年没有新建核电站之后，美国重新启动了这一能源的开发，包括鼓励兴建先进的核电厂，资助研究与开发先进核反应堆技术，建立全球核能合作伙伴关系；二是加强生物燃料的研究与运用，推进生物燃料技术和降低生物燃料成本的研究；三是积极发展“氢经济”，美国根据“能源政策法”批准了研究经费达 12 亿美元的“总统氢燃料计划”，以加快氢燃料的开发以及相关基础设施建设。

第二章 电网环节低碳技术及其国外发展现状分析

2.1 低碳输电技术及其国外发展现状分析

低碳输电技术对于减排的主要作用首先体现在降低电能输送过程中的损耗；其次能够充分利用现有输电线路的能力，提高电能输送效率。这样，一方面可以减少电能输送过程中所排放的温室气体，另一方面也可减少部分源自化石能源发电的电能损耗，从而间接降低发电环节的 CO_2 排放。加快建设输电网络，着力提高电网大范围、大规模、高效率优化配置资源的能力，是提高电力工业整体效率的治本之策。输电网的节能减排要在现有基础上有新突破，最终赖以解决问题的关键还是技术手段的进步，而先进适用技术和通用设计居其核心地位。与节能减排相关的先进适用技术主要包括柔性交流输电技术、超导技术、特高压输电技术等。

2.1.1 柔性交流输电技术

(1) **技术发展背景。**21 世纪的输电系统运行将承担更大的来自环境保护和电力市场等方面的压力。这些压力所产生的需求可以概括为以下三个方面：增大输送能力——随着用电需求的持续增长对原有电网的输送能力提出了挑战。保持系统稳定——灾变性电力系统事故给供电区内的社会生活带来的影响十分严重，如何在电力系统被迫更长距离输送更多电力的同时仍能保持系统的稳定性，成为输电系统建设运营的另一重要任务。优化系统运行——随着功率输送的变化频率逐渐加大，电力系统的控制变得更复杂，需要对整体系统的潮流进

行优化。这种优化需要跨区域综合考虑系统全局运行的情况。柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmissions System, FACTS) 的出现 , 为满足上述需求提供了重要技术支撑 , 且从根本上改变了交流输电网过去基本只依靠机械型、慢速、间断及不精确的控制和优化技术措施的局面。

(2) **特点及减排作用**。作为新能源、清洁能源的大规模接入电网系统的关键技术之一 , 柔性交流输电技术主要有如下几个特点 : 1) 可以使电能储存起来 , 在电力系统运行中电能的储存与取用可以在不改变电能形态的情况下实现 ; 2) 装置与系统并联可以对系统电压和无功功率进行控制 , 装置与系统串联可以对电流进行控制 ; 3) 电压、无功功率、有功功率、系统阻抗、系统功率潮流可以平滑调节 ; 4) 线路的输送能力可增至接近导线的热极限 ; 5) 备用发电机组容量可从典型的 18% 减少到 15% , 甚至更少 ; 6) 消除电力系统振荡 , 提高系统的稳定性。由于采用具有单独或综合功能的电力电子控制装置 , 柔性交流输电技术比常规的输电控制技术更具优越的快速性能和灵活的控制性能。其减排作用有以下几点 : 1) 可以充分利用现有输电线路的能力和资源 , 提高电能输送效率 , 减少因输电阻塞电能的生产而带来的 CO₂ 排放。现行电力系统由于稳定条件限定的输送功率的极限偏低 , 输电线路的能力远未被充分利用 , 采用柔性交流输电技术 , 理论上可使输电线路的输送功率极限大大提高 , 甚至接近导线的热稳极限 , 从而提高输电线路资源的利用率 (例如 : 一条 500kV 线路的安全送电极限为 1000 ~ 2000kW , 线路的热极限为 3000kW , 采用柔

性交流输电技术后，可使输送能力提高 50%~100%)。2) 提高电网和输电线路的安全稳定性和运行经济性 , 从而在保障电力系统可靠性的同时，降低电能输送损耗。采用柔性交流输电技术有助于实现全系统的优化控制，扩大输电网络的安全运行区域，提高系统的安全稳定水平；有助于控制电网中的潮流大小和方向，实现潮流的合理流动并获得最大的安全裕度和最小的输电成本，实现电网的经济运行；有助于限制电网和设备故障的影响范围，减少事故恢复时间及停电损失。

(3) 国外发展现状分析。FACTS 技术及其控制器发展迅猛，升级换代快速。当前已形成第一代、第二代和第三代 FACTS 控制器并存发展的局面。FACTS 技术按其接入系统方式可分为并联型，串联型和综合型。静止无功补偿器 (SVC)、静止无功发生器 (SVG)、静止同步补偿器 (STATCOM)、晶闸管投切串联电容器 (TCSC)、统一潮流控制器 (UPFC) 等都是基于 FACTS 技术的产品。鉴于 FACTS 对未来输电技术发展、电力建设和运行可能产生的重大影响，美国、日本、巴西以及德国、瑞典、意大利、英国等欧洲一些发达国家已投入大量的资金和人力对此进行研究和开发，包括对现行电网的评估、硬件设备开发及 FACTS 装置在各电力公司的协调配置等，并已取得了不小的成就 (见表 2-1)。

表 2-1 国外 FACTS 装置的应用概况

FACTS 装置	SVC	SVG	STATCOM	TCSC	UPFC
首次投运时间/年	1977	1980	1986	1992	1998
首次投运国家	美国	日本	美国	美国	美国

世界上第一台 SVC 设备由 GE 公司制造 , 于 1977 年在 Tri State GT 系统投入运行 , 到目前为止 , 世界上已投运的 SVC 已超过 180 台。世界上第一台 SVG 设备 (20Mvar) 于 1980 年在日本投入运行 , 该装置采用了晶闸管强制换流的电压型逆变器。世界上首台采用大功率 GTO 作为逆变器元件的 STATCOM(± 1 Mvar) 于 1986 年 10 月在美国投入运行 ; 1996 年容量为 ± 100 Mvar STATCOM 在美国 500kV Sullivan 变电站投入运行。世界上第一个可控串补工程项目则是 1992 年在美国西部的一条 230kV 线路上安装的 165Mvar TCSC 装置 , 其后 , 1994 年美国西北部的 Slatt 变电站 500kV 线路上安装了 208Mvar 的 TCSC 装置投入工业运行。在综合型设备方面 , 1998 年世界上首台大容量的 UPFC 装置 (± 320 MVA , 由 160MVA 的 SSSC 和 160MVA 的 STATCOM 组成) 在美国 500kV Inez 变电站运行。

2.1.2 超导输电技术

(1) **技术发展背景。**超导技术在电力系统中的应用是多方位的 , 也是世界各国极为重视的超导应用研究主攻方向之一 , 它包括超导电机、超导变压器、超导限流器以及超导储能装置等 , 而联接这些众多电力设备的超导电缆是组成超导电力系统的重要纽带。随着电能消费密度的不断增长 , 送电通道越来越紧张 , 常规输电技术越来越难满足大城市高密度大容量送电的要求。比如日本东京、大阪、名古屋等大城市 , 中心的电力消费密度已达到 $80 \sim 100 \text{ MW/km}^2$, 高密度大容量送电问题十分突出 , 这也是东京电力公司大力开展超导电力电缆研究的原因之一。

(2) **特点及减排作用。**与普通电力电缆相比，超导电缆具有很大的优越性：1) 节省占用空间，节约成本且输电能力极强；2) 线路阻抗较低，允许采用相对较低电压进行长距离输电；3) 采用地下输电，可避免超高压高空输电所带来的噪声、电磁污染和可能产生对人身安全的隐患，保护生态环境；4) 输电损耗较小（比常规电缆降低20%~70%），可大幅度提高输电效率，节省能源资源；5) 具有较强的抗磁干扰能力。超导电缆的发展经历了直流低温超导电缆、交流低温超导电缆、交流高温超导电缆（HTS）等几个阶段。随着大城市用电负荷的日益增加，往往需要采用地下电缆将电能输往城市负荷中心，此时采用超导输电电缆有明显的优势，是解决大容量、低损耗输电的一个重要途径。目前，HTS已成为超导电缆的发展主流，并逐步走向并网运行阶段。HTS电缆适用于百万千瓦级以上的远距离电力输送，可以大幅度降低电力在输电线路上的损耗，是解决输电网大容量、低损耗输电、节约输电走廊、提高输电能力和长距离输电的一个重要途径。在配电网和密集的城市建筑区，用HTS电缆取代常规电缆，不但能将传输容量提高3倍以上，而且能将总费用降低20%，电网线损降低70%以上，从而显示出巨大的减排潜力。除了可以大幅度减少输电损耗外，HTS电缆还可以提高输电能力，尤其在受环境保护的制约下，可使资源利用最大化。HTS电缆是满足不断增加的电力需求、降低损耗、提高电力系统运行的稳定性和可靠性、改善电能质量、最终降低电力系统运行成本和温室气体排放，从根本上推进电力工业可持续发展的重要技术。

(3) 国外发展现状分析。超导输电无需高压，可将输电损耗、电磁污染、占用走廊宽度降至最低，代表了世界最先进的技术方向，自从发现高温超导体，尤其是发现 Bi 系高温超导体以来，高温超导电力应用的可能性一直强烈地吸引着各个发达的工业化国家。从目前看来，高温超导电力电缆的应用是其中研究发展较快的一个方向，极有可能首先广泛运用于电力系统中。在近期的高温超导电缆的研究发展中，尤以美国、丹麦和日本的工作具有代表性（见表 2-2）。从发展趋势上看，由于存在集肤效应（当交变电流通过导体时，电流将趋于导体表面流过），超导电缆应用于交流输电系统所带来的效益将大打折扣，而超导直流输电被看成是在不增加电力电压等级的情况下满足未来电力需求持续增长的重要解决方案。

表 2-2 国外部分高温超导电缆项目

主要承担者	主要技术参数	目标及进展
美国 Southwire	30m/12.5kV/1.25kA 冷绝缘	1999 年并网，对 Southwire 的公司总部、研究中心和生产厂区供电
美国 Southwire	约 305m	替换俄亥俄州哥伦布市输电网络中的一段充油电缆
美国 AMSC	约 600m	计划并网于纽约州长岛地区
美国 IGC	350m/34.5kV/0.8kA	2006 年并网，首个运行于地下电网的实际线路
丹麦 NKT	30m/30kV/2kA	2001 年并网，演示 HTS 的性能，收集安装运

行的数据		
日本住友	100m/66kV/1kA	2002 年在东京电力试验场完成通电、负荷变动和耐压等试验
古河电工	500m/77kV/1kA	2004 年完成野外送电试验
韩国 LG	22.9kV/1.25kA	2004 年完成使用方式及接入系统分析

2.1.3 特高压输电技术

(1) **技术发展背景**。随着经济和用电需求的急剧增长，原有电压等级电网在传输长度、传输容量和限制短路电流等方面均难以满足要求，各国相继制定了发展特高压的计划。特高压输电可解决大容量远距离输电、大容量区域电网互联及主干系统潮流增加所带来的系统稳定和短路电流水平增加等难题，是一种节省线路走廊、降低输电损失的高效率输电方式。这使得发展特高压输电技术渐呈必然趋势。

(2) **特点及减排作用**。特高压电网是由 1000kV 交流和 ± 800 kV 直流系统组成。特高压交流电网将作为骨干网架，跨接各大区域电网，是实现跨大区跨流域输电、水火电互济调节和整体能源资源优化配置的主要能源通道，同时作为接受以直流传输的远方电力的坚强受端，一回特高压交流线路可输送电力 5000MW 左右，是 500kV 交流线路输送能力的 5 倍。特高压直流输电则定位于大水电基地和大煤电基地的超远距离、超大容量外送，一回特高压直流线路可输送电力 6400MW，是 ± 500 kV 直流线路输送能力的 2 倍以上，输电距离可达 2500km。特高压输电技术具有输电容量大、输电成本经济、送电距

离长、电网结构简化、短路电流小，输电走廊占用少且利用率高以及可以提高供电质量等优点。采用特高压输电有利于提高电网的安全性和可靠性、有利于在较大范围内优化电力资源配置，有利于节省线路走廊和节约土地资源，有利于节省电网建设投资和运行费用，有利于减少煤电对环境污染的影响。采用特高压输电是在电网建设中落实建立资源节约和环境友好型社会的重要举措，其中特高压交流与直流输电在电网中的应用应是相辅相成和互为补充的，需根据具体情况区别选择。

(3) 国外发展现状分析。上世纪 60 年代起，美国、前苏联、意大利、日本等国家先后制定了特高压输电计划，并相继建成了特高压输电试验室、试验场，对特高压输电可能产生的工程问题（如过电压、可听噪声、无线电干扰、生态影响等）进行了大量研究，取得了重要进展。前苏联已建成 1150kV 特高压输电线路 2362km，其中埃基巴斯图兹—科克切塔夫—库斯坦奈共 900km 长的线路及 3 座变电站曾投入商业运行，运行时间累计超过 5 年。日本已建成 1000kV 同杆并架线路 427km，并于 1996 年建成新榛名特高压设备实物验证站，且首次在世界上实现了双回路 1000kV 输电线路建设。美国曾建设 1500kV、1100kV 特高压试验线路进行研究，因负荷增长缓慢而未上特高压输电工程。此外一些经济增长较快的国家（如印度、巴西、南非等）也在积极研究特高压输电技术。经过各国特高压技术的研究、试验，技术问题已不是特高压输电发展的限制性因素。特高压电网的发展进程主要取决于用电负荷的增长情况。

2.2 低碳配电技术及其国外发展现状分析

低碳配电技术对于减排的贡献在于降低电能配送过程中的损耗。这样,一方面可以减少电能配送过程中所排放的温室气体,另一方面,也可减少部分源自化石能源发电的电能损耗,从而间接降低发电环节的 CO₂ 排放。

2.2.1 配电自动化技术

(1) **技术发展背景。**随着经济的发展,用户对用电质量的要求日益提高。配电网中由光照及其它电力系统干扰引起的电压骤降,容易破坏用户端昂贵的敏感性电子设备。此外,在电力市场环境下,调度中心、电厂、用户等市场主体之间的交易数据庞杂,接入电力数据网络的控制系统种类较多。因此,配电网需要一套信息化、数字化、自动化信息管理平台,实现配电设备运行状态和配电网络实时监控,确保配电可靠性、稳定性。

(2) **特点及减排作用。**配电自动化技术利用现代计算机及通信技术,集成配电网的实时运行、电网结构、设备、用户以及地理图形等信息,构成完整的自动化系统,实现配电网运行监控及管理的自动化、信息化。配电自动化功能包括配电网运行自动化、配电网管理自动化两个方面的内容。其中,配电网运行自动化功能是指实现配电网实时监控、自动故障隔离及恢复供电、自动读表等功能;配电网管理自动化功能是指实现离线的或实时性不强的设备管理、停电管理、用电管理等功能。配电自动化技术能够实现配网系统正常运行及事故情

况下的检测、保护、控制，能实时监控、协调、管理配电网各环节的设备与全配电网的优化运行，提高供电可靠性、改善电能质量、降低电能损耗和提高运行管理水平及经济效率。配电自动化技术对于提高供电可靠性、保证配电网安全经济运行，稳定电压，降低电能损耗，推迟电网建设投资具有重要作用。第一，提高供电可靠性。配电自动化技术能够利用馈线自动化系统的故障隔离及自动恢复供电功能，减少故障停电范围；通过提高电网正常的施工、检修和事故抢修工作效率，减少计划及故障停电时间；通过对电网的实时监视，及时发现、处理事故隐患，实施状态检修，提高设备可靠性，避免停电事故的发生。第二，提高电压质量，降低损耗。配电自动化系统可以通过各种现场终端实时监视供电电压的变化，及时地调整运行方式，调节变压器分接头档位或投切无功补偿电容器组等措施，保证用户电压在合格的范围内；同时，还能够使配电网无功功率就地平衡，减少线路损耗。第三，推迟建设投资。采用配电自动化技术后可有效地调整峰谷负荷，提高设备利用率，压缩备用容量，减少或推迟基本建设投资。

（3）国外发展现状分析。近年来，配电自动化已成为电力自动化技术的一个热点，引起了科研、制造单位的广泛注意和重视。国内外供电企业也纷纷试点或大面积推广配电自动化技术，以提高供电可靠性、供电质量、用户满意度以及管理效率。目前，工业发达国家的配电自动化发展已形成集变电所自动化、馈线分段开关测控、电容器组调节控制、用户负荷控制和远程抄表等系统于一体的配电网管理系统。多数发达国家已完成了计算机系统与配电设备结合的配电自动

化系统。配电自动化系统的发展趋势是采用面向对象的分布式开放系统与组件技术，建设类似于计算机硬件总线的供电企业信息软总线 (MB Message Bus)，使各自动化系统以及应用程序(组件)之间能够像计算机硬件模块(显示器，鼠标，内存条等)一样，很方便地互插互联。各国配电自动化应用现状如表2-3所示。

表 2-3 国外配电自动化技术发展概况

国家	发展现状
美国	美国长岛电力公司形成了以配电网故障快速隔离和负荷转移为主的配电网馈线自动化系统，在 4 年内避免了 595675 个用户的停电事故。
日本	日本在主要城市的配电网络上投入配电自动化系统。其中大规模的配电自动化系统可控制约 4000 个以上的中压开关，中小规模的配电自动化系统也可控制约 1500 个中压开关。
英国	英国伦敦电网公司 1998 年起，先后安装了 3500 个现场终端，基本实现了配电变电所出线断路器，线路分段开关的远程监控，做到了配电网故障及时检测，处理及修复，年平均户停电时间由 1995 年的 94 分钟，降低到 2000 年的 52 分钟。

2.2.2 柔性配电技术

(1)技术发展背景。目前城市和农村配网存在低功率因数和谐波污染问题。大量无功电流在电网中的流动导致线路损耗增大，变压器利用率降低，用户电压跌落严重；谐波污染则会使用电设备所处的环境恶化，也对周围的通信系统和公用电网以外的设备带来危害。因

此，需要在配电网中引入高新技术，减少谐波畸变，消除电压波动和闪变、各相电压的不对称和供电的短时中断，从而提高供电可靠性和电能质量。

(2) **特点及减排作用。**柔性配电技术是在中、低压配电系统中引入的包括电力电子技术、微处理机技术、控制技术的一种新型综合技术。它通过远程控制获得配电网中各种设备及相关的馈线负荷的运行数据，能够及时检测电网中可能存在的各种潜在问题，改正功率因子，有效控制无功电流，减少谐波污染，提高供电可靠性。柔性配电技术独立工作时可满足特殊负荷对供电质量的严格要求，与配网自动化技术相结合时，可实现无瞬时停电、实时控制的柔性化配电，满足用户对电能质量更高层次的要求。柔性配电技术是降低线路线损，实现节能减排目标的有效途径。在配电环节，存在用户配电终端电压过高、用户低压侧功率因数低等问题，如对于白炽灯等电阻负荷，当电压超过额定电压 5% 时，亮度基本不变，用电量将增加 10.25%；对于配电变压器，进线电压过高，使线路无功电流增大，线路有功损耗增大。此外，用户低压侧功率因数过低，也会导致大量的无功电流在高压侧得到补偿，致使线路电能损耗增大。而利用柔性配电技术，能够有效控制电压变化，减少用户段的电能浪费；降低配电网中的谐波损耗，调整用户电压侧的功率因素，降低线损，优化整个电网的运行状况。

(3) **国外发展现状分析。**目前，世界各国已投入大量资金和人力进行柔性配电技术的研究开发，包括对现行网络的评估、硬件设

备的开发及柔性配电技术装置在电力系统中的应用等。至今，多数国外发达国家（美国、日本及欧盟等国）的电力公司在配电系统中引入柔性配电技术，包括固态切换开关、静态串联补偿设备静止无功发生器的投入运行。与柔性输电技术相比，柔性配电技术仍处于起步阶段，世界各国在未来的发展中，不断加大该技术的研发，降低技术应用设备的成本，完善设备性能。

2.3 低碳调度技术及其国外发展现状分析

（1）**技术发展背景。**电力市场环境下，随着电力系统的进一步扩大和复杂，需要调度人员在很短的时间内掌握电力系统的运行状态，并做出正确的判断。而原有的技术设备很难满足这种要求。此外，随着可再生能源的大规模发展，具有间歇性、不稳定性的新能源发电容量比重日益增加，严重威胁电力系统的稳定性。因此，在新的环境下，需要一种基于低碳的智能化调度技术，能够在满足安全性约束的条件下，有效管理电网实时运行状态的急剧变化，解决新能源的大规模并网问题。

（2）**特点及减排作用。**智能调度技术采用调度数据集成技术，有效整合并综合利用电力系统的稳态、动态和暂态运行信息，实现电力系统正常运行的监测与优化、预警和动态预防控制、事故的智能辨识、事故后的故障分析处理和系统恢复，紧急状态下的协调控制，实现调度、运行和管理的智能化、电网调度可视化等高级应用功能，并兼备正常运行操作指导和事故状态的控制恢复，包括电力市场运营、电能质量在内的电网调整的优化和协调。智能化调度是对现有调度控

制中心功能的重大扩展 ,对于有效地提高电网调度运行人员驾驭现代化大电网的能力 ,保障电网的安全、稳定、经济、优质运行 ,具有十分广阔的应用前景 ,是未来电网发展的必然趋势。调度智能化的最终目标是建立一个基于广域同步信息的网络保护和紧急控制一体化的新理论与新技术 ,当发现有危及系统静态安全的预想事故时 ,调用安全约束调度软件 ,以系统控制量调整最小或生产费用最低或网损最小为目标函数 ,提出解除有功、无功、电压越限并使系统进入新的安全状态的对策 ,间接实现节能减排的目标。

(3) 国外发展现状分析。目前 ,国外的智能调度尚处于研发、试点阶段。1997 年 Dyliacoo 博士提出了面向调度值班的电网调度智能机器人 (Automatic Operator) 的概念 ,2008 年 PJM 提出了理想调度 (Perfect Dispatch) 的概念 ,主要侧重于有功调度 ,进行各种时间维度计划的协调、实时计划与 AGC 的配合。PJM 认为广域测量技术是保证大电网安全的重要手段 ,也是实现智能输电网的基础 ,因此 PJM 目前主要从同步相量技术和先进控制中心的研究建设着手开展智能调度的工作。此外 ,世界上已出现了把电力系统实时运行的能量管理系统和配网调度控制中使用的自动控制系统以及在电力工业各部门中用于管理和规划的管理信息系统结合起来的综合自动化系统 ,把不同层次的电力系统调度自动控制功能和日常生产的计划管理功能在信息共享和功能互补上很好地结合了起来 ,使电力系统运行的安全性、经济性水平提高到一个新的水平。

2.4 低碳储能技术及其国外发展现状分析

新兴能源的大规模并网，为人类提供了大量的清洁电力。然而，风能、太阳能等新兴能源具有不稳定性和不连续性的特性，限制了新兴能源的大规模发展。因此，发展低碳储能技术，收集不稳定的电力，在适当的时候平稳释放，对于促进新能源的大规模开发利用，优化发电结构，降低电力工业 CO₂ 排放意义重大。低碳储能技术主要包括飞轮储能技术、压缩空气储能技术、超导储能技术、超级电容器储能等。各类低碳储能技术的特性如表 2-4 所示。

表 2-4 各种低碳储能技术特性分析

技术类型	优势	劣势	应用方向
飞轮储能技术	大容量，成本低、寿命长、 瞬时功率大、响应速度快、 安全性能好、维护费用低、 环境污染小、不受地理环境 限制	低能量密度	调峰，频率控制，电 能质量调节，配电系 统稳定性
压缩空气储能 技术	大功率，大容量，低成本	场地要求特 殊，需要燃 气	调峰发电厂，系统备 用电源
超导储能技术	大容量，响应速度快，转换 效率高，比容量/比功率大	高制造成 本，低能量 密度	UPS，电能质量调 节，输配系统稳定性
超级电容器储 能技术	寿命长，效率高，充电速度 快且模式简单，使用寿命	低能量密度	电能质量调节，输电 系统稳定性(与柔性

2.4.1 飞轮储能技术

(1) **技术发展背景。**目前，大部分可再生能源（如太阳能、风能、潮汐能、海浪能等）均存在储存问题，受到蓄电池寿命及效率的制约，至今尚不能广泛应用。此外，在电网用电低谷期，电厂发电设备低负荷运行，不能充分利用发电能力，造成数额较大的发电损失。因此，需要引入储能技术，一方面，提高电网对可再生能源的接纳能力；另一方面，在电网负荷低谷的时候从电网获取电能充电，在电网负荷峰值时刻向电网送电，充分利用电网负荷低谷时的发电能力。

(2) **特点及减排作用。**飞轮储能技术是利用电动机带动飞轮高速旋转，将电能转化成机械能储存起来，在需要时飞轮带动发电机发电的一种技术。飞轮储能具有储能容量大、效率高、成本低、寿命长、瞬时功率大、响应速度快、安全性能好、维护费用低、环境污染小、不受地理环境限制等，是目前最有发展前途的储能技术之一，适用于电网调频和电能质量保障。飞轮储能技术发展到一定程度后，能在很大程度上解决新能源发电的随机性、波动性问题，实现新能源发电的平滑输出，有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化，使大规模风电和太阳能发电方便可靠地并入常规电网。飞轮储能技术的广泛应用，有利于电力系统节能减排目标的实现。一方面，基于飞轮储能技术的储能电站，具有便捷的能量存储和释放，可在任意时间间隔、以任意的规模进行，就近分散放置，零排放、低噪声，

适应环境保护的要求 ,可作为电力系统的调峰电站 ,保证供电可靠性 ; 另一方面 ,飞轮储能技术的发展有助于风力发电的大规模应用。风力发电由于风力资源的不确定性造成供电不稳定。传统而言 ,主要利用风力/柴油机组、风力/蓄电池机组进行储能调节。而飞轮储能系统在技术和经济上均优于柴油发电、蓄电池 ,因此 ,该技术的应用可降低成本 ,提高储能调节效率 ,促进风力发电的大规模并网 ,减少电力系统中常规能源发电比例 ,提高能源的利用效率 ,减少温室气体的排放。

(3) 国外发展现状分析。在国外飞轮储能技术应用方面 ,主要包括可再生能源发电及新能源汽车两个领域的应用。一方面 ,飞轮储能技术能够提高电网对可再生能源的接纳能力 ,国外部分公司或研究机构已尝试将飞轮储能引入风力发电。目前 ,全球至少有 3000 套基于飞轮储能的大功率绿色电源安全运行了上千万小时。另一方面 ,发达国家已成功将飞轮储能技术应用于电动汽车 ,如美国飞轮系统公司已用最新研制的飞轮电池成功地把一辆克莱斯勒 LHS 轿车改成电动轿车 ,一次充电可行驶 600km ,由到 96km/h 加速时间为 6.5 秒。在未来发展中 ,国外将加大飞轮储能技术的研发工作 ,推广飞轮储能技术的应用领域。

2.4.2 压缩空气储能技术

(1) 技术发展背景。在大力发展风力发电的同时 ,需要解决风电间歇性、不稳定性等问题。利用风能压缩空气并储存在容器或者地下洞穴 ,而后利用这些储存的空气带动发电机发电 ,可以确保让风力发电厂在无风状态下仍旧正常工作。

(2) **特点及减排作用。**压缩空气技术是指在电网负荷低谷期利用电能，将空气高压密封在报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井中，在电网负荷高峰期释放压缩的空气推动汽轮机发电。压缩空气储能常用于调峰用燃气轮机发电厂，对于同样的电力输出，采用压缩空气储能的机组所消耗的燃气要比常规燃气轮机少 40%。采用压缩空气技术对节约燃料、减少碳排放有重要的作用。第一，利用燃煤电站的低谷电能或风电站的富余电力用于压缩空气操作大大降低成本。涡轮机组由于脱离了压缩操作的负荷使得电力的产能提高 2.5 倍，这种效应通过提高压缩空气的压力可进一步加强。第二，利用压缩储能技术建立压缩空气蓄能电站，替代传统的发电厂，可提高发电效率，实现削峰填谷的作用，大大减少温室气体的排放。第三，利用压缩空气技术，消除风力发电的间断性、不稳定性问题。压缩空气技术，能够将风能以一种可以控制的能量存储，在此基础上，将其转化为电能，有利于消除能量转换环节间的相互影响，提高能量转换效率。

(3) **国外发展现状分析。**目前全世界仅有两家压缩空气发电厂。美国阿拉巴马州的压缩空气发电厂创建于 17 年前，而德国的压缩空气发电厂则已有 30 年历史。日本的压缩空气试验电站正在建设中，以色列则处于概念设计阶段。德国、美国、日本的压缩空气蓄能电站情况如表 2-5 所示。目前随着分布式电力系统的发展，国外开始关注 8~12 兆瓦微型压缩空气储能系统 (micro-CAES) 的研发。

表 2-5 国外压缩空气蓄能电站主要参数

电厂参数	德国 Huntorf	美国 Alabama	日本 sunagawa
容量 (MW)	290	110	35
发电小时数	2	26	6
压缩/发电时间比	4	1.6	1.17
地理状况	盐性	盐性	沙质泥盐

2.4.3 超导储能技术

(1) **技术发展背景**。现代工业的发展对供电的可靠性、电能质量提出了越来越高的要求。由于电力技术的发展，长时间的电力中断事故发生几率很小，而瞬态电力故障（如闪变、电压骤升/骤降、瞬态断电等）日渐突出，这对于依赖智能设备的许多商业用户和制造企业危害极大。从技术角度讲，治理瞬态电能质量问题的有效手段是利用快速响应的有功功率补偿技术，由于超导储能技术具有功率快速补偿这一独特优势，弥补了常规电力系统中缺乏电能存取的弱点，它在进行输/配电系统的瞬态质量管理、提高瞬态电能质量及电网暂态稳定性和紧急电力事故应变等方面具有不可替代的作用，因此受到企业和研究界的广泛关注。

(2) **特点及减排作用**。超导储能技术是利用超导线圈直接储存电磁能，需要时再将电磁能返回电网或其他负载的一种电力设施，一般由超导线圈、低温容器、制冷装置、变流装置和测控系统部件组成。超导储能技术具有响应速度快（ms 级），转换效率高（ $\geq 96\%$ ）、比容量（ $1\sim 10\text{Wh/kg}$ ）/比功率（ $104\sim 105\text{kW/kg}$ ）大等优点，其发展主流

是小型分布式储能系统,适用于电网的快速功率支撑、系统动态性能、可靠性和电能质量改善等场合。超导储能技术可用于调节电力系统峰谷,降低甚至消除电网的低频功率振荡,改善电网的电压和频率特性,调节无功和功率因素,保障系统稳定和提高电能质量。超导储能技术与包括风能等可再生能源及分布式发电领域结合,可提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动。此外,超导储能技术可长期无损耗低储存能量,其转换效率超过 90%,超导储能技术的应用,可以促进清洁能源的高效利用,推动新能源产业的快速发展,改善能源构成比例,促进节能减排。

(3) 国外发展现状分析。目前,超导储能技术的研究开发已经成为国际上在超导电力技术研发方面竞相研究的热点,一些主要发达国家(如美国、日本、德国等)在超导储能技术的研发方面投入了大量的人力和物力,推动着超导储能技术的实用化进程和产业化步伐。世界上 1-5MJ/MW 低温超导储能系统装置已形成产品,100MJ 超导储能系统已投入高压输电网中实际运行,5GWh 超导储能系统已通过可行性分析和技术论证。一些主要发达国家(如美国、日本、德国等)在超导储能系统方面投入了大量的人力、物力,推动着超导储能系统的实用化进程和产业化步伐。美国各地区的电力公司已安装十几套超导储能装置长期运行于电网中,极大提高电网的稳定性、可靠性,输电容量及负载容量。

2.4.4 超级电容器储能技术

(1) 技术发展背景。电能是当代社会不可或缺的重要资源,而

储能设备的优劣直接影响着电力设备的充分应用。近年来，随着便携式设备、可再生电源系统以及电动车的大量开发利用，蓄电池的使用日益增加。传统的蓄电池存在着循环寿命差、高低温性能差、充放电过程敏感、深度放电性能容量恢复困难、环境污染等问题，已越来越无法满足人们对储能系统的要求。超级电容器储能技术的研发为解决以上问题提供了新的技术途径。

(2) **特点及减排作用。**超级电容器是一种电化学元件，储能过程中不发生化学反应且是可逆的，可反复充放电，不会造成环境污染。超级电容器充电速度快且模式简单，可以采用大电流充电，能在几十秒到数分钟内完成充电过程；使用寿命长，低温性能优越，超级电容器充放电过程中容量随温度的衰减非常小；具有非常高的功率密度，为电池的 10~100 倍，适用于短时间高功率输出；具备较大的电荷存储能力。鉴于其优良特性，超级电容器非常适合在多种系统中应用。与蓄电池相比，它具有较高的比功率，且对环境无污染。可以说，超级电容器是一种高效、实用、环保的能量存储装置。当前，电力系统中出现无功功率不平衡引起的供电电压方面的问题，包括电压波动和闪变、电压波形畸变、三相不平衡等，以及电力系统故障、操作等引起的电压凹陷、电压凸起等问题。上述问题，在一定程度上，导致输配电线路损耗增加，造成发电能源浪费。利用超级储能技术，能够补偿电网无功功率，提供有功功率，以消除电压跌落、闪变、电压谐波、电压三相不平衡等电能质量问题，使负荷侧不受这些电压扰动的影响，提高电力系统运行效率。此外，超级电容器储能技术应用于电动

汽车中，可降低电动汽车的使用成本，促进电动汽车产业的发展，减少常规能源的消耗，降低汽车尾气的排放，实现节能减排目标。

(3) 国外发展现状分析。目前，世界各国正在积极开展超级电容器储能技术研究工作，在该技术领域处于领先地位的国家有俄罗斯、日本、德国和美国。多数国家成立了超级电容器储能技术发展规划，满足电化学电池和燃料电池电动汽车要求，如欧共体制定的“电动汽车超级电容器发展计划”。国外超级电容器储能技术的应用集中于超级电容车技术和电动车制动能量回收技术，一些企业已经把超级电容应用到汽车上，降低汽车的使用成本。对于超级电容器，国外未来研究的方向和重点是：利用超级电容器的高比功率特性和快速放电特性，进一步优化超级电容器在电力系统中的应用技术，扩大超级电容器在电动汽车的应用，如环保型交通工具、电站直流控制、车辆应急启动装置、脉冲电能设备等。此外，在光伏发电领域、风力发电领域，超级电容器以其快充快放等特点为改进和发展关键设备提供了有利条件。

2.5 国外低碳电网技术政策保障分析

实施电网环节低碳技术的建设于推广，需要从国家层面给予政策保障。美国政府大力推行减排政策，将发展可再生能源与未来国家能源安全相系，政府最高优先级的工作之一就是加速低碳电网技术的研发与应用。2009年1月，奥巴马政府将电网技术作为其新能源经济“救市计划”中至关重要的组成部分，并制定了雄心勃勃的短期和长期目标。在2009年2月17日批准的经济刺激计划中，政府决定拨款110

亿美元用于低碳电网技术的研发和试点。2009年4月，美国副总统拜登又公布了一项总数约40亿美元的电网技术投资资助计划，以协助电网管理者转变运行方式，增加储能、加快可再生能源并网等。能源部确定了电网技术、规模储能和电网监控三个示范领域，且要求必须与拥有电网设施的电力公用事业机构合作开展，鼓励由产品和服务供应者、终端用户、州和市级政府组成联合开发团队，同时项目承担方须分担至少50%非联邦资金。2009年5月，能源部又宣布对参与电网建设的硬件和软件企业提供1000万美元资助，电网投资项目资助最多可达2亿美元，较原来提高10倍。

在低碳电网技术的研究方面，欧盟已经搭建技术平台。2010年3月11日，欧洲议会通过决议增加欧盟对低碳技术的投入。决议主要内容有：1）在现有的欧盟第七研发框架计划（FP7）和竞争力与创新框架计划（CIP）对低碳技术资助的基础上，欧盟年度预算每年拿出20亿欧元发展低碳技术；欧委会和欧盟成员国尽快制定落实资金的日程表，确保资助经费在2010年得到落实。2）欧洲投资银行（EIB）增加对能源项目的贷款，并将低碳技术示范应用项目列为优先贷款项目。3）欧委会加强与欧洲投资银行的合作，尽快（最迟在2011年前）提出有关可再生能源及能源效率项目资助机制和智能电网发展方面的建议。4）夯实低碳技术的研究基础，促进教育和培训；足够数量和质量的人力资源对于促进新技术的发展和应用非常重要。5）加强国际合作，特别是与新兴国家和发展中国家在低碳技术开发和应用方面的合作。

作为低碳经济的最早提倡者，英国近年发布了低碳能源国家战略白皮书——《英国低碳转变计划》。该计划明确指出，为了促进清洁能源的发展，英国需要建立一个更大、更智能的电网。加大新建线路投资，对目前的输电网进行扩容，保证各类清洁能源的接入。在电网侧，改进针对电网企业的激励监管机制，促进输电网和配电网的建设，完善电网开放机制；在配电侧，通过安装包括智能电表在内的智能技术，实现用户与电网互动的同时，满足各类小型可再生能源机组的并网要求；针对可再生能源的间歇性特点，加强对系统监测技术的投入，提高电网调度机构对系统进行实时检测和正确决策的能力。保证电网环节低碳技术投资者的利益，调动各方的积极性，从机制上保证低碳技术发展目标的实现。此外，英国能源监管机构煤气和电力市场办公室成立了5亿英镑的基金，用于支持低碳电网技术的大规模试验。该基金通过推广电网低碳技术的运用（包括可以灵活管理电力供给和需求的“智能电网”），帮助英国14个地区的原有电网适应发电量的增加以及电力交通工具使用量的上升。基金将覆盖电网低碳技术成本的90%，而成本其他部分则由地区电网运营商承担。

第三章 电能消费终端低碳技术及其国外发展概况

3.1 智能用电技术及其国外发展现状分析

(1)**技术发展背景**。智能电网的建设不仅是传统电网和特定系统的升级和改造，而且需要实现需求侧相应，实现系统和用户的双向互动。因此，智能用电新技术就成为实现智能电网的重要组成部分。智能用电是与电力用户联系最为紧密的环节，智能用电的建设直接关系到电网的能源使用效率，经济运行和有序用电，并对电网建设、节能环保、电能质量管理产生深远的影响。与传统用电相比，智能用电的最大特点在于电网与用户之间的实时交互响应。通过电网公司与电力用户之间的实时双向互动，用户可以查询其用电信息，并根据电价和电网的负荷状态，灵活调整家用电器启用时间，并实现分布式电源接入，提高用电的经济性和安全性；电网公司可以获取用户的用电信息，提供优化用电策略，引导用户科学用电，调节电网负荷，提高电网设备的利用效率。智能用电技术涵盖了高速实时通信、智能电表、智能采集、双向交互和需方响应等多方面的技术，是计算机应用技术、现代通信技术、高级量测技术、控制理论和图形可视化等学科交叉的技术集群。各项智能用电技术的特点如表 3-1 所示。

表 3-1 各项智能用电技术的特点

智能用电技术	技术特点及功能
高速通信技术	骨干大容量的光纤通信网络；同步时钟对时功能；具有强大抗干扰能力；可实现语音、视频、数据传输的公网通信；信息安

	全加密
	双向独立计量；快速切换、电价实施结算；特定数据冻结功能；
智能电表技术	负荷数据保存及检索功能；兼具备智能水、气表功能；自我诊断、自我评价自、自我修复、自我矫正
智能采集技术	用电侧信息的实施采集、统计、分析；用电实时监测及引导合理用电；电能质量在线监测、分析、预警；信息的五分传输
交互终端技术	人机交互平台；家电自主监测；信息自主查询；信息发布机可视化交互沟通
	用户主动参与市场竞争；基于负荷特征接入或退出分布式电源；
需方相应技术	用户获得连续即时的计量信息、负荷信息、电价信息；为调度、规划、运行提供景区负荷信息

(2) **特点及减排作用。**智能用电技术的研发和应用，对于用电环节的节能减排有着重要的促进作用，对于电力行业低碳化发展有着积极的推进作用。与传统用电模式相比，智能用电技术的减排效果主要有两方面，一方面是可以降低系统化石燃料发电容量需求，在降低温室气体排放量的同时降低化石燃料的对外依存度和用户的用电费用支出。建立在高速双向通信技术及智能交互终端基础之上的智能用电技术，可实现实时用电信息反馈，使得用电需求和供电能力能更好的相匹配，从而提高电力系统供需的实时平衡能力和供电可靠性水平，方便风力发电、太阳能发电等分布式电源的接入，减少化石燃料发电容量需求。通过智能用电技术，实现用户用电信息的实时采集与高速传输，获得有关用户用电模式的信息，并迅速及时地向用户提供

规范的反馈信息 ,通过需求侧响应技术来引导用户达到最优的用电模式 (选择绿色洁净电能 ; 消减用户的用电负荷 ; 将用电负荷由高峰时段转移到低谷时段或者其他时段)。这就意味着伴随着高速通信技术、智能采集技术、智能电表技术及智能交互终端技术的应用 ,可以使得终端用电设备明显的节能节电 ,同时伴随着用电时间的转移 ,还可提高整个系统的用电效率 ,起到节能减排的效果。

另一方面是可以降低系统备用容量需求 ,提高整个系统发电容量的利用效率 ,以此降低整个系统的运行成本和碳排放 ,实现供电可靠性的有效管理。通过对终端用电数据的收集及反馈 ,及时发布系统用电信息 ,利用智能交互终端引导用户改变用电模式及用电时段 ,可将系统高峰用电负荷转移至非高峰时段 (腰荷时段或者基荷时段) ,或者直接减少用户用电需求。由于系统中的非高峰或者低谷时段的发电效率是比较高的而发电碳排放是比较低的 ,因此 ,将高峰用电转移至非高峰或者低谷用电就可以显著节约发电侧耗用一次能源并且降低发电的碳排放。对于整个系统而言 ,如果将高峰用电负荷转移至非高峰时段 ,发电机组的发电效率就可以由高峰时段的不到 30%达到非高峰时段的接近 40% ,并且明显降低发电碳排放量。随着越来越多的清洁能源与可再生能源发电 (也包括核电和清洁天然气发电) 的并网以逐步替代燃煤发电 ,系统中的基荷发电所产生的碳排放将会越来越低 ,如果用电负荷能够转移至基荷时段 ,那么就能够实现更大的 CO₂ 减排。

(3) 国外发展现状分析。目前 ,随着智能电网的建设 ,智能

用电已经从概念发展到了实验推广阶段,世界各国纷纷开展智能用电项目的试点工作。意大利电力公司于 2001 年就安装和改造了 3000 万台智能电表,建立起了智能化计量网络。同时欧洲其他国家也将智能用电作为了一项革命进行推广:英国政府披露,到 2020 年每个英国家庭都将安装智能电表以降低能源消耗,同时为智能用电铺平道路。美国对于智能电网的研究始终走在世界的前列,2008 年美国科罗拉多州的波尔得(Boulder)宣布成为全美第一个智能电网城市,家庭用户可以和电网互动,了解实时电价,合理安排用电;同时电网还可以根据实际情况进行电力的实时调配,提高供电可靠性。智能电网发展的趋势不可逆转,智能用电技术的研究和应用必将为智能电网建设注入强劲的动力。

3.2 电动汽车技术及其国外发展现状分析

从全球变暖的成因上分析,交通工具是主要原因之一。近 10 年,全球二氧化碳排放总量增加了 13%,而源自交通工具的碳排放增长率高达 25%,预计到 2050 年,全球交通工具碳排放将比目前增长 30%到 50%。当今世界交通工具已成为全球石油危机和温室气体排放的主要原因之一,发展清洁能源汽车迫在眉睫。电动汽车代表了新能源汽车发展的方向,已成为各国产业竞争的战略制高点,以发展新能源汽车为突破口,全面推进低碳交通,是全球摆脱石油依赖以及降低 CO₂ 排放的最重要途径之一(图 3-1)。此外,从电能利用角度看,电动汽车的大规模应用相当于在用户侧安装了储能装置,其充电的灵活性(可在负荷低谷期充电)可有效提高用电效率,减少电能的损耗。

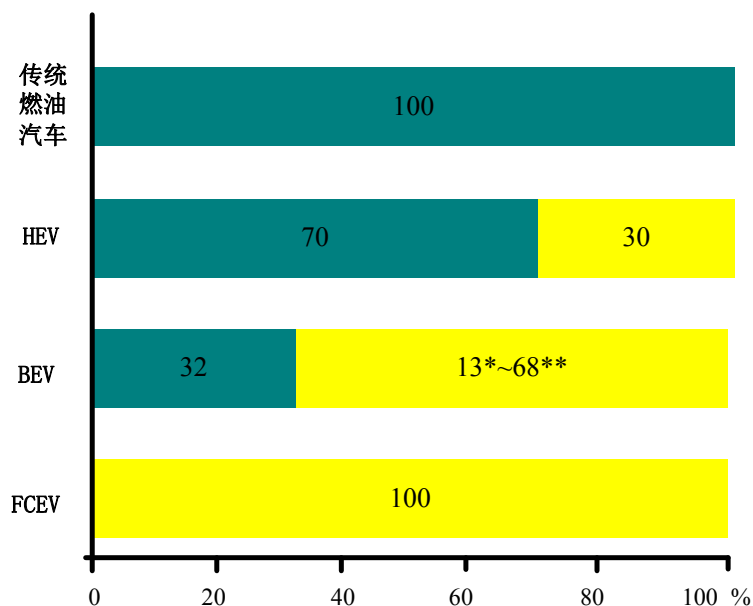


图 3-1 电动汽车减排潜力评估

注：以传统燃油汽车 CO₂ 排放水平作为基准(*煤电情景<假设电能完全来自燃煤发电>；
**天然气情景<假设电能完全来自燃气发电>)

3.2.1 纯电动汽车

(1) **技术发展背景**。纯电动汽车的产生，可以追溯到一百多年前，由于当时电池和电机的发展较内燃机成熟，而且石油的运用还没有普及，使得电动汽车在早期的汽车领域占有举足轻重的位置。到了 20 世纪末 21 世纪初，由于能源短缺和环境问题日益突出，曾由于性能不如燃油汽车而淡出人们视线的纯电动汽车，又由于其低污染、低排放的特点又重新受到世界各国的重视。

(2) **特点及减排作用**。纯电动汽车是指完全由单一动力蓄电池提供电力驱动的电动汽车。它利用蓄电池作为储能动力源，通过电池向电动机提供电能，驱动电动机运转从而驱动汽车。纯电动汽车具无污染、噪音小、结构简单、能效高等优点，较内燃机汽车有节能、环

保的优势，可有效缓解能源资源紧张、大气污染严重等问题，但同样电池问题（价格高、寿命短、外形尺寸和重量大、充电时间长等）又是长期困扰纯电动汽车发展的一大障碍。目前市场广泛采用的是铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池，它们已达到的实际性能指标和市场平均价格。纯电动汽车是有效解决能源短缺、环境污染、电力紧张等突出问题的有效途径之一。首先，从自身角度来讲，纯电动汽车减少了温室气体的排放。与传统的燃油汽车相比，纯电动汽车主要的优点就是，它本身不排放污染大气的有害气体。纯电动汽车由电能代替燃油等提供动力，具有更高的能源利用效率。即使按所耗电量换算为发电厂的排放，除硫和微粒外，其它污染物也显著减少；同时电厂大多建于远离人口密集的城市，对人类伤害较少，而且电厂是集中的排放，有益于 CO₂ 等温室气体的集中捕集与封存。其次，从平衡电网峰谷负荷角度来讲，纯电动汽车可以充分利用晚间用电低谷时富裕的电力充电，使发电设备日夜都能充分利用，大大提高能源利用效率；同时也能引导处于联网状态的电动汽车在日间用电高峰时段向电网释放多余电能，协助电网满足高峰负荷需求，减少新建发电机组的投入，间接的降低社会碳排放。最后，向蓄电池充电的电能可由水力、核能、太阳能、风力、潮汐能及生物质能等清洁能源发电提供，从而减少煤炭、石油等高碳资源的利用，降低温室气体的排放。

（3）国外发展现状分析。由于电池技术等问题的困扰，纯电动汽车技术不如混合动力汽车技术成熟，发展较慢。但经历了长期的发展，纯电动企业也已由实验研究发展到了市场推广阶段，并在美国、

日本、欧盟等国家率先得到商业化推广应用，首先是在适合其运行特点的领域开展了示范应用，主要以集团化公共服务用车为主，如东京电力公司营业服务用车、美国纽约曼哈顿邮政用车、英国垃圾清运车、法国波尔多市政用车等。目前世界上有近 4 万辆纯电动汽车在运行（如图 3-2 所示），主要用于公共运输系统。除公共交通系统外，纯电动私人家用轿车也已经开始步入商业化阶段。在 2008 年的北京车展上，比亚迪、长城和吉利分别展出了纯电动汽车比亚迪 E6、长城欧拉和吉利熊猫；标志电动汽车 106 车型应经在欧洲各国尤其是政府部门中拥有了大量用户；日产公司宣布将在 2010 年下半年销售 LEAF（叶子）纯电动汽车；丰田 FT-EV 纯电动汽车将于 2012 年实现批量生产。纯电动汽车在使用阶段零排放、综合能源利用效率高、能够彻底摆脱对石油的依赖，是解决汽车能源和环境问题的根本途径，将是未来发展的重要方向。

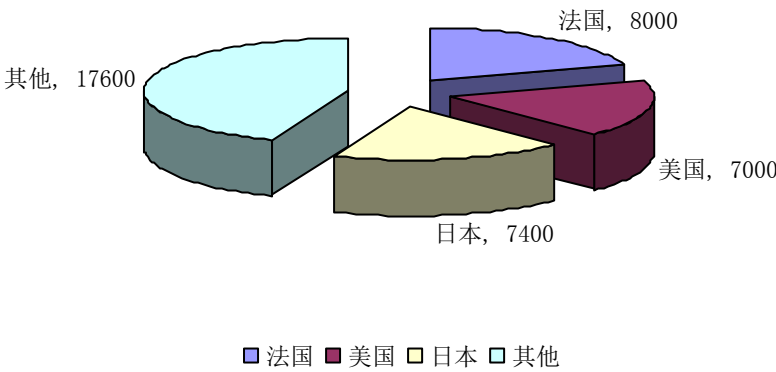


图 3-2 纯电动汽车发展概况

3.2.2 混合动力电动汽车

（1）技术发展背景。20 世纪 90 年代以来，为解决能源和环境

问题，各种电动汽车脱颖而出，但由于纯电动汽车在技术上、材料上存在棘手问题，以及电池的能量密度与汽油相差甚远，远未达到所需要的数值，在这种情况下，一种集电动汽车与燃油汽车优点于一体的准绿色汽车——混合动力电动汽车（HEV）成为缓解矛盾的关键。

（2）**特点及减排作用。**混合动力电动汽车又称为第二代电动汽车，它是指由两种或两种以上的蓄能器、能源或转换器作驱动能源，其中至少有一种能提供电能的车辆称为混合动力电动汽车，简单的说混合动力电动汽车就是由内燃机和电动机两套动力驱动装置组成，是由内燃机汽车到纯电动汽车的一种过渡车型，这样既克服了纯电动汽车续驶里程短和充电时间长的缺点，又降低了内燃机燃料消耗导致的温室气体排放，唯一的缺点在于有两套动力，再加上两套动力的管理控制系统，结构复杂，技术较难，价格较高。根据推进系统能量流和功率流的配置结构关系来分，混合动力电动汽车主要分为串联、并联及混联式混合动力电动汽车三类。与传统的内燃机汽车相比，混合动力电动汽车具有以下特点及减排优势：1）根据平均需用功率来确定内燃机的最大功率，此时处于最优工作状况，燃料充分燃烧，能源转换效率最高、油耗低、污染排放少。2）内燃机持续恒定功率工作，需要大功率内燃机功率不足时，由电池补充，负荷较低时，富裕的功率可以发电并为电池充电，这样实现了燃料能源的最高效利用。3）因为有了电池，在制动、下坡、怠速时可以方便回收额外能量，降低燃油消耗。4）在繁华市区，可以关停内燃机，由电动机单独驱动，实现温室气体的“零”排放。

(3) 国外发展现状分析。正是因为节能、环保方面的诸多优势，使得混合动力电动汽车成为业界关注的焦点。自 1995 年起，世界各大汽车集团陆续投入巨资研发混合动力电动汽车：日本丰田公司在 1997 年率先向市场推出“先驱者”(Prius) 混合动力汽车，并在日本、美国和欧洲各国市场上均获得较大成功，目前已在世界 20 多个国家上市，累计产销量已超过 150 万辆。之后丰田又于 2001 年相继推出了混合动力面包车和皇冠轿车，随后日本本田、美国福特、通用和欧洲一些大公司，也纷纷向市场推出轿车、面包车、货车各种类型的混合动力汽车。目前日本国内拥有的混合动力电动汽车已超过 7 万辆，预计在 2010 年底将达到 210 万辆。同时美国市场上售出混合动力汽车接近 7 万辆，美国已有近 20 个城市在试用混合动力公共汽车。混合动力电动汽车已成为一股不可阻挡力量，在改变着汽车产品的结构和构成，并大量的走向实用化。据《Auto Mfg & Production》(汽车制造与生产) 期刊报导，2010 年全球混合动力电动汽车总量将达 100 万辆，2015 年将占到世界汽车市场 15% 的份额，到 2020 年这一数字将增长到 25%。混合动力电动汽车在未来相当长的时间内发展前景十分广阔。

3.2.3 燃料电池电动汽车

(1) 技术发展背景。燃料电池自 1839 年问世以来，首先应用于航天和军事用途。近 20 年来，由于石油危机和大气污染日趋严重，以质子交换膜式为代表的燃料电池技术受到各大汽车集团的重视。由于能够从根本上解决纯电动汽车续航里程段的问题，同时实现温室气

体近乎零排放,使得各大汽车集团纷纷投入巨资研发各类型的燃料电池电动汽车。

(2) **特点及减排作用。**燃料电池电动汽车又称为第三代电动汽车,它是以电动机为动力、用燃料电池作为能源转换装置、利用氢气和空气中的氧在催化剂的作用下在燃料电池中经电化学反应将化学能转换成电能并以此作为主要动力源驱动的汽车。在当前可用于代替汽油和柴油发动机的电动汽车技术中,燃料电池电动汽车由于安静、能源转换效率高、零污染(或低污染)排放等特点,同时续驶里程完全可以和内燃机汽车相媲美,被认为是21世纪首选的洁净、高效的运输工具。燃料电池电动汽车的主要缺点是初置成本较高、燃料(氢)的提取和储存困难。与传统的内燃机汽车相比,燃料电池电动汽车具有明显的减排效果:1)燃料电池由氢和氧发生电化学反应产生电能,生成物为清洁的水,不污染环境,实现了温室气体的零排放。2)燃料电池电动汽车以氢气、甲烷、天然气、甲醇等为燃料,没有活塞或涡轮等机械部件及中间环节,燃料的能量转换效率较高,通常可达60%~80%,是内燃机汽车的2~3倍,实现了能源的高效利用。3)燃料电池电动汽车的燃料多样化且来源广泛,并且可以从可再生能源获得,不依赖石油燃料,实现了石油等高碳燃料的高效替代。

(3) **国外发展现状分析。**目前,美国、日本、欧盟等一些发达国家的燃料电池电动汽车已有试验阶段转向了市场推广阶段,同时戴姆勒、福特、通用、本田、现代、起亚、雷诺日产和丰田等汽车厂商也已经联合签署了关于燃料电池车的开发和市场进入等发展方向

在内的基本意向书，这使得全球在零排放（或低排放）的燃料电池汽车量产实用化上，又向前迈出了一大步。德国戴姆勒—奔驰公司以现有“B 级”为原型的燃料电池电动汽车，已于 2009 年底开始少量生产，2010 年投入欧洲及美国市场，并且到 2014 年可达到 3000 量氢燃料电池的年产能。本田开发的“FCX Clarity”燃料电池汽车于 2008 年向北美市场租售了 200 辆左右。2008 年上半年，大众的帕萨特氢燃料电池电动汽车已经成功服务与 2008 年北京奥运会，作为奥运会的马拉松导航车，其能量转换效率高达 80%，是普通内燃机汽车的 3 倍，最高时速可达 145 公里/小时，一次续航里程达 235 公里。根据能源及汽车行业的发展趋势判断，燃料电池电动汽车的未来保守产出为：西门子公司估计 400 万辆，奔驰公司估计 250 万辆，德国联邦政府宣布 100 万辆。

3.3 国外低碳用电技术政策保障分析

为促进用电环节的低碳技术推广及应用，世界各国纷纷出台相关政策，包括法律法规、战略规划及财政补贴等，以促进智能用电技术的推广及电动汽车的普及。电动汽车在国外起步较早，目前在很多国家都已经形成了一定的规模。这主要得益于各国政府在大力扶持大型汽车集团的同时，制定了环保和节能法规，采取投资税收优惠、政府补贴促进消费的政策。建立严格的空气污染治理法律和节能法规，限定非电动汽车的生产与消费；制定各种研发计划、优惠政策，投入资金，鼓励研究、生产、经销和消费电动汽车。

1976 年 7 月，美国国会通过《电动汽车和复合汽车的研究开发

和样车试用法令》，以立法、政府资助和财政补贴等手段加速发展电动汽车。1990 年，加利福尼亚州在为防止大气污染而制定的限制法规中规定，到 1998 年“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的 2%；到 2000 年，“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的 5%；到 2003 年，“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的 10%。法规的强力推行，促进了电动车小批量、商业化生产和实践应用。此后，美国还出台了一系列鼓励开发生产电动汽车的政策。

日本是电动汽车技术发展速度最快的少数几个国家之一。1996 年，日本通产省制定的电动汽车购买鼓励政策规定，电动汽车的购买者和租赁企业将获得相当于电动汽车与普通燃油汽车价格之差 50% 的补贴。自 1998 年开始，由日本环境厅提供给地方政府和私人企业的另一项电动汽车购买津贴的补贴额，分别达到了车辆成本的 50% 和 25%。此外，在日本凡购买电动汽车的用户可减免汽车购置税、固定资产税、特别土地保护税等。2007 年，日本贸易部表示在未来的五年之间将耗资 17 亿美元，致力于降低电动汽车价格，开发便宜的混合动力车型。此外，日本还实施了严格的车辆排放标准和法规，以刺激市场对电动汽车的需求。

目前，法国电动汽车的普及程度和保有量都位居世界前列。法国政府在政策上支持鼓励开发电动汽车和充分利用电力资源，而且为电动汽车的发展提供资助。法国政府与汽车制造商签订协议，在 20 个城市推广使用电动汽车。目前，法国已有 10 余个城市运行电动汽车，且具有比较完善的充电站等服务设施，政府机关则带头使用电动汽

车。法国政府为了推广电动汽车的使用，还采取了“企业购买电动汽车的第一年可以免税”的政策。同时，电动汽车生产厂家每生产一辆电动汽车，法国电力公司将提供 1 万法郎的补助，以扩大电力的使用范围。

第四章 国外发展低碳电力技术的经验总结分析

通过对国外低碳电力技术发展情况的总结，可以看出，为有效应对全球气候变化，实现可持续发展的战略目标，世界各国在促进低碳电力技术发展方面已积累了丰富的经验。本节主要从技术的发展内容、发展阶段及政策保障三个层面对国外发展经验进行立体性总结，为我国低碳技术的研发与应用提供有益参考。

4.1 技术发展内容总结

发达国家多根据本国经济发展的现状、技术的传统和技术上的比较优势来确定本国的低碳电力技术发展路线，现阶段各类技术的发展概况如图 4-1 所示。现从发电、电网和用电三个环节对国外低碳电力技术的发展内容进行总结。

在发电环节，一方面继续对现有的化石燃料机组进行低碳化改造，朝大容量、高参数、环保型、清洁燃烧方向发展，如运用增压流化床燃烧联合循环技术，提高现有煤的燃烧效率。对于新建燃煤电厂采用超超临界机组，在保证高可靠性、高可用率的前提下采用更高的蒸汽参数。考虑到 CCS 技术昂贵，且这些技术的应用会大大降低发电厂的整体效率，大规模部署的先决条件是对现有 CCS 技术及其经济可行性进行示范。利用水电技术成熟、成本经济、效率高、电能质量好，和在大规模商业化开发和温室气体减排方面的优势，继续加大对于水电的投资。在提高第三代核电国产化水平的同时，未来重点开发第四代核反应堆。提高风能的竞争力、促进近海资源与深层水潜力

的开发、促进大规模风电并网。提高太阳能光伏发电技术的竞争力，大幅度降低成本，提高设备的效率，为大规模部署光伏技术进行创新技术示范。按照技术的成熟水平，对不同的生物能开展示范及推广计划，确保期在能源结构中占到相当比例。

在电网环节，运用柔性交流输电技术，实现电网灵活、快速、持续及精确的控制；在一些重点区域运用高温超导输电技术，减少线损；继续发展特高压输电技术达到节省线路走廊、降低输电损失的目标。同时利用配电网自动化技术，建立“数字化”配网，实现系统资源共享，最大程度降低配网损耗。在此基础上与柔性配电技术结合，实现无瞬态停电、实时控制的柔性化配电，满足用户对电能质量更高层次的要求，并且研究电网调度的智能化。在高效储能方面，以可再生能源系统应用为切入点，逐步开发大容量电池储能系统，替代铅酸电池系统，为区域电网平滑负荷、提高配电网供电可靠性、UPS 等应用奠定基础。

在用电环节，运用高速实时通信、智能电表、智能采集、双向交互和需方响应等智能用电技术，真正提高供需双方信息沟通的互动性和实时性。同时，大力发展各种类型的电动汽车技术，使其成为配电系统不可分割的一部分，提供储能，平衡需求，紧急供电，提高电力系统的稳定性。

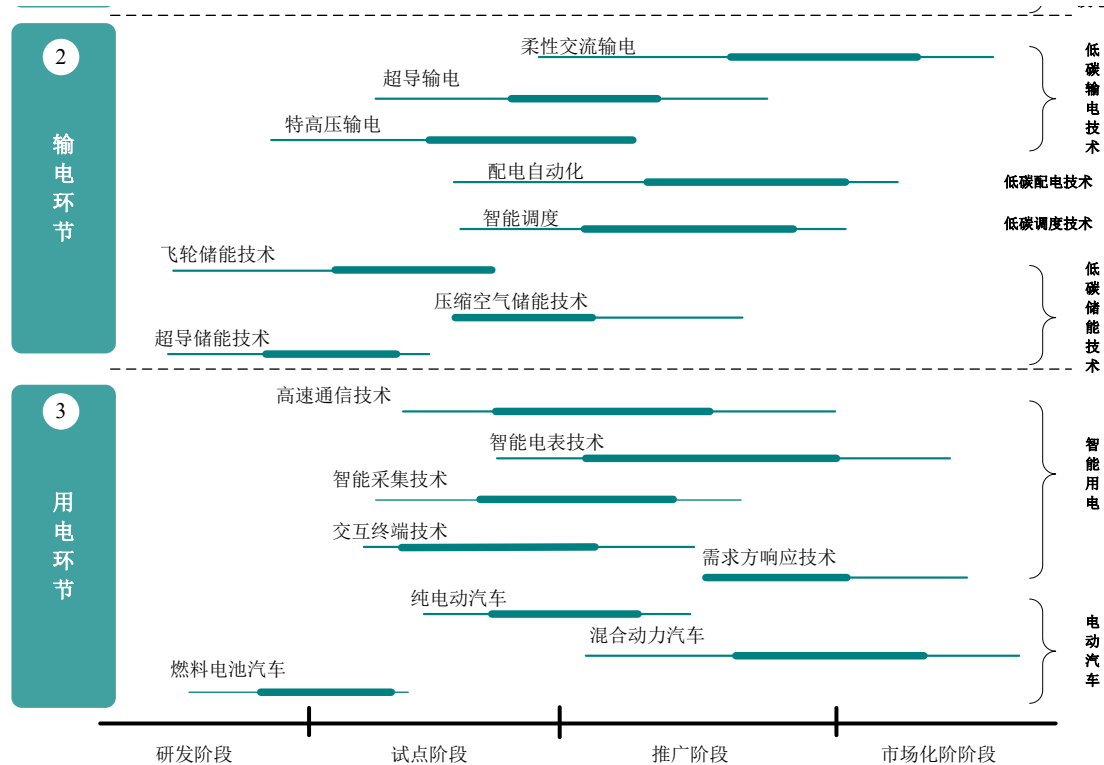


图 4-1 电力行业低碳技术发展技术路径图

4.2 技术发展阶段总结

国外在低碳电力技术的各发展阶段（研发阶段、试点阶段、推广阶段及大规模应用阶段）通过规划引导、政策激励、产业扶持和资金支持等措施，积极推动低碳电力技术的发展。

（1）研发阶段

为促进低碳电力新技术的研发，许多国家制定了相应的能源发展

战略和规划，以明确未来发展目标，积极引导低碳技术的发展。美国、日本、澳大利亚、印度、巴西等国都已制定了明确的低碳电力技术发展目标，同时还直接出台了多项政策指导方针，以法律法规的形式明确了低碳新技术的发展计划，从而引导各企业加大对低碳电力新技术的研发投入（其中包括政府直接资助），以促进技术的成熟与应用。主要活动包括：1）基础与应用研究，这指的是在研究中心、大学、私营部门机构中开展的概念与应用研究；2）小规模实验计划。主要由新技术最初的小规模实验、研究实验室中的开发等组成。此类工作的成果是要证明技术的可行性并评估子系统与部件的可操作性；3）对原料、部件等设备的测试。此外，发达国家还十分重视低碳技术研发阶段的人才培养工作，这为低碳电力技术的进一步成熟提供了有力支撑。

（2）试点阶段

为促进低碳电力技术的推广，克服发展初期技术资金不足、发展滞后等问题，各国政府积极引导科研机构与企业联合研发，利用科研单位的技术优势和企业的资金优势共同推进技术突破。同时，由政府牵头，积极开展各项技术的试点应用，实际论证科研项目的实施效果，以点带面，催进周边地区及相关技术链的发展，为技术的成熟和下一阶段的推广工作打下良好基础。

（3）推广阶段

在推广阶段，由于低碳电力技术与传统电力技术相比生产成本较高，为弥补二者的差距，国外政府一般采用税收和财政补贴政策：加

大对发电企业与基础设施企业的财政补贴,使产业内企业更积极的投入到低碳电力技术的推广工作中去;对消费者购买低碳电力产品进行补贴,弥补其与传统电力产品的成本差距,降低消费者的购买成本。同时加大对传统高污染技术的限制,增加税收,提高成本,以限制其发展。除了对低碳技术的进行直接的财政补贴外,国外政府还对相关产业制定税收优惠和财政补贴,促进整个产业链的共同发展。目前,税收和补贴政策已经成为各国政府支持低碳电力技术发展的最主要措施。

(4) 规模化阶段

为加速低碳电力技术的规模应用,许多国家都为低碳电力技术的发展提供了强有力的资金支持,对技术研发、项目建设、产品销售和最终用户提供补贴,并引导社会资金投向低碳电力,有力地推动了低碳电力的规模化发展。同时,各项低碳电力技术由政府主导逐步转向自主研发,政府职能主要转向宏观调控以加强监督管理,以构建一个具有竞争性的低碳电力市场环境。在这一阶段,各国政府十分注重加强与相关企业的联系,做好基础设施建设规划,做好市场服务。

4.3 相关政策保障总结

通过对各国促进低碳发电技术发展的政策分析,发现虽然各国的具体政策不尽相同,但都主要通过“推动力”和“引导力”的有机结合来促进低碳技术的发展,形成世界低碳技术发展政策实施与发展的脉络框架(图4-2)。

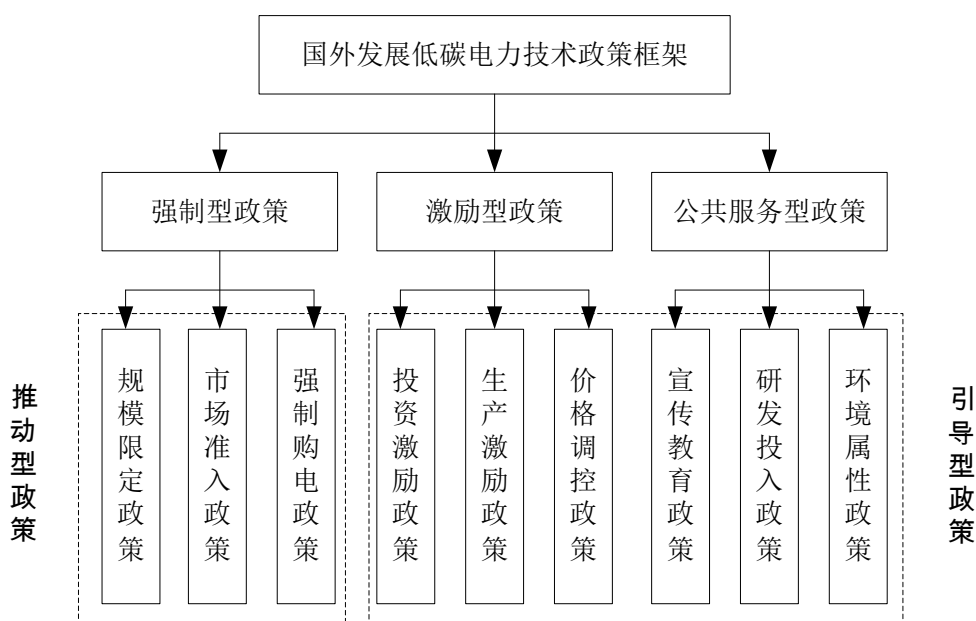


图 4-2 国外发展低碳电力技术的政策框架

1) **推动型政策**。推动型政策主要包括规模限定政策、市场准入政策和强制购电政策三类。美国可再生能源配额制(RPS)要求实施地区的电力消费中必须有规定比例的可再生能源电力；日本可再生能源配额制规定，到 2010 年每个电力零售商销售电量的 1.35%必须来自可再生能源；德国规定，电力公司必须允许风电就近上网并包销电量；西班牙规定，能源供给企业必须收购可再生能源电力并给予合理的补偿。强制性购电政策是保障低碳能源消费的硬性措施。美国 1978 年通过的公共电力管制政策要求公用电力公司每年必须按“可避免成本”购买合格发电设施所发电力；日本 1995 年的“电力事业法”修订案规定电力公司必须按当地售价收购风电等。

2) **引导型政策**。引导型政策主要包括“激励型”与“公共服务型”政策，其中，激励型政策包括投资激励、生产激励和价格调控，涉及低碳技术发电“生产前—生产—市场—消费”4 个阶段，主要是采用经济手段，吸引低碳技术研发投资，大力支持其发展；公共服务型政策

包括宣传教育、研发投入、环境属性政策等，通过引导投资商、生产者和消费者正确认识低碳技术发电的高效性、战略性与成长性，优化其发展前景。

投资激励政策旨在通过拓宽融资渠道、投资补贴、税收减免等手段拓宽融资渠道，提高投资商投资低碳技术的积极性。目前世界各国低碳发电技术的发展资金来源除政府财政出资和银行贷款外，还有私有资本投资。丹麦大多数风机是由私人或专风能利用合作社购买的，超过 15 万丹麦家庭或者是风机的持有者或者占有一定股份；德国政府对新能源发电项目给予适当投资补贴；比利时工业与贸易部给予近海风电 25%~30% 的投资补贴，同时扣除资本费用、免征消费税和营业税等。**生产激励政策**主要是通过补贴、奖励等措施提高生产商的积极性，提高低碳技术发电总产出。德国 1989 年按电量给予税收返还性质的补贴，支持新能源示范项目，并对风况不好的地方提供补贴；加拿大从 2003 年开始执行激励政策，为低碳能源发电提供差异性补贴。**价格调控政策**主要是通过政府定价降低实际消费价格，扩展低碳能源市场。德国是利用价格调控政策促进新发展比较成功的国家，在新能源发展的不同阶段采取不同的电价，通过《可再生能源法》规定“保护价格”和收购时间；丹麦也曾执行价格补贴与分摊政策。**宣传教育**是政府对低碳技术进行信息发布、环保性宣传，以提高消费者消费自觉性。低碳技术的推广具有明显的生态效益，其普及应建立在公众对这种优势的充分了解之上，故一些国家和组织将宣传教育列为促进发展的重要政策。欧盟曾在增加可再生能源的使用和市场份额

额的项目中划拨专项经费用于可再生能源信息的传播；《2010 年可再生能源欧洲共同体战略和行动计划》的“启动方案”，通过发放宣传材料、奖励等手段吸引社会对可再生能源的投资；加强可再生能源的信息服务、信息传播，并且将它们列为《欧洲共同体战略白皮书》的重要行动计划。研发投入政策通过加强财政投入支持国际技术合作，大力推进低碳产业的技术进步和技术成熟，为低碳能源发展提供技术保障。欧洲各新能源公司每年投入到科研、技术开发的资金达到公司产值的 10%~20%；丹麦政府在 1976~1996 年对风电的研发投入总计 3.5 亿丹麦盾；澳大利亚于 1995~1997 年花费数百万美元进行风力发电试验。环境属性政策是要求常规能源支付污染造成的环境与卫生保健成本、促进电力行业公平竞争的政策，主要有征收生态税、碳税和气候税等，如英国征收的气候费、丹麦实行的二氧化碳税返还政策、荷兰对矿石燃料使用者征收的碳税、瑞典的环境津贴等。

第五章 中国低碳发电技术的发展现状分析

5.1 洁净煤低碳发电技术的发展现状分析

根据 2020 年电力发展规划，我国发电装机容量将从目前的 4 亿 kW 增加到 2020 年 9 亿 kW，其中燃煤机组将达到 5.8 亿 kW。我国的能源结构决定了电力工业以煤电为主的格局在未来相当长时间内难以从根本上改变。随着煤电对环境和电力工业可持续发展的制约性日趋明显，实现我国电力工业低碳化发展的首要任务逐渐演变为解决煤电的清洁利用问题。

5.1.1 超临界和超超临界发电技术

国外成功运行的实践证明，发展大容量、高参数的超临界和超超临界机组是当今世界火电发展的重要趋势之一。我国超临界技术的研究和发展开始于 20 世纪 80 年代，电力部门在“七五”、“八五”和“九五”期间先后引进近 20 套超临界机组。“十五”期间，国家对火电机组的技术构成做出了重大调整，要求发展大容量超临界机组，以带动机械行业的技术进步。近 20 年来，我国已投运了 17.48GW 的常规超（超）临界机组（见表 5-1），这些机组投运后在提高发电煤炭利用率和降低污染方面发挥了一定的作用，通过这些机组的成功运行，积累了丰富的应用经验，为我国超临界和超超临界机组的应用奠定了基础。

表 5-1 我国已投运的超临界机组主要参数

发电厂	制造厂或国家	台数	功率/MW	参数/MPa/°C/°C
-----	--------	----	-------	--------------

华能石洞口二厂	ABB	2	600	24.20/538/566
国华盘山电厂	前苏联	2	500	23.54/540/540
华能南京电厂	前苏联	2	320	23.54/540/540
国电外高桥电厂	西门子	2	900	23.53/542/568
华能营口电厂	前苏联	2	320	23.54/545/545
华能伊敏电厂	前苏联	2	500	23.54/545/545
国华绥中电厂	前苏联	2	800	23.54/538/566
漳州后石电厂	三菱	6	600	24.40/542/569
华能玉环电厂	三菱/西门子	4	1000	26.25/600/600
华能邹县电厂	BHK/日立	2	1000	25/600/600

数据来源：《超超临界发电技术研究与应用》

我国超临界和超超临界发电技术虽比发达国家起步晚了十年，但国内电力市场提供的巨大发展空间，使其呈现出良好的发展势头。目前，我国 600℃ 超超临界燃煤发电技术水平和建成的机组台数都居世界首位，且已基本具备 600℃ 超超临界机组整体设计、制造和运行能力，建立了完整的设计体系，拥有相应的先进制造装备和工艺流程。我国 1000MW 超超临界机组是单轴机组，压力比日本高，温度比德国高，是当今国际上容量最大、参数最高、同比效率最高的超超临界机组，其总体技术水平居国际前列。截至 2009 年底，我国已建及在建的超临界、超超临界机组包括：600MW 级超临界机组 180 多台、1000MW 超超临界机组 30 台、660MW 超超临界机组 26 台、600MW 超超临界机组 8 台，全国在运百万 kW 超超临界机组 21 台，是世界

上拥有百万 kW 超超临界机组最多的国家¹。随着超（超）临界机组的大量投运，我国火力发电机组的全国平均供电煤耗从 2000 年的 392g/kWh 降至 2009 年的 340g/kWh，带来了显著的经济效益和环保效益。

我国现有火电机组总体技术水平与世界先进水平相比仍有较大差距，煤耗高、水耗大、污染排放较为严重，提高燃煤机组效率、节水、降低污染物排放是当前我国火电技术发展和结构调整的一项迫切和重要的任务。发展清洁、高效的超超临界发电技术是我国电力工业技术进步和升级换代、缩小与发达国家技术与装备差距的主要措施。超超临界发电机组将是未来 20~30 年中装备我国电力工业的主要机型，也是目前可在较短时间内形成为我国电力工业提供新一代主力装备的能力、规范化地实现洁净煤发电的最为现实和快捷的途径之一。我国政府、产业部门、发电企业及其他电力公司对超超临界发电技术给予了高度重视，近年来在研究开发、示范及推广应用 3 个层次上均取得了较大进展。为整合研发资源和力量，2010 年国家能源局提出了创建“国家 700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟”的工作思路，现已完成组建方案和技术路线设计等工作，下一步将按照计划目标开展研究工作，争取到“十二五”末期具备建立示范电站的条件。超超临界发电技术在我国有着广阔的发展前景，预计未来 15 年超临界和超超临界机组在国内新增火电市场的份额可达 70%以上。

5.1.2 循环流化床技术

¹ 数据来源：中国电力行业年度发展报告 2010

循环流化床 (CFB) 锅炉因为其燃料适用性广、负荷调节性强以及环保性能优良而得到了越来越多的重视。在我国能源与环境的双重压力下，循环流化床锅炉在我国得到了快速的发展。自 1996 年引进国外技术建成 100MW CFB 电站以来，经过消化吸收，已实现国产化并已建成一批 100MW 等级高压和超高压 CFB 电厂。2006 年 4 月，再次引进的法国阿尔斯通公司的首台 300MW 亚临界循环流化床锅炉机组在四川内江白马建成投运。国内 CFB 锅炉的发展进程如图 5-1 所示。截至 2008 年底，我国已投运的 CFB 锅炉已超过 3000 台，总容量达 67000MW，占全国煤电装机总容量的 11.61%。其中，锅炉容量在 100~200MW 之间的超过 100 台，已投运的 300MW CFB 锅炉 13 台 (见表 5-2)，在建的 300MW CFB 锅炉 64 台²，超过了世界上其他国家的总和。此外，由西安热工研究院和哈尔滨锅炉厂开发研制的国产 330MW CFB 锅炉，已于 2009 年 1 月在分宜发电厂通过 168h 试运后投入商业运行。

表 5-2 我国 600MW 超临界锅炉主要参数

电厂名称	锅炉型号	台数	燃用煤质
白马示范电站	ALSTOM-1025/17.5	1	贫煤
云南红河电厂	HG-1025/17.4-L.HM	2	褐煤
云南巡检司电厂	HG-1025/17.4-L.HM	2	褐煤
云南国电开远电厂	SG-1025/17.4	2	褐煤
秦皇岛热电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤

² 数据来源：《大容量循环流化床技术的发展方向及最新进展》

内蒙古蒙西电厂	SG-1025/17.4	2	烟煤
广东宝丽华电力有限公司	SG-1025/17.4-II16	2	无烟煤

在 CFB 锅炉大型化研发方面，国内与国外先进技术虽有一定差距，但在国家有关部门的支持下，已取得长足进展，特别是研制燃用劣质煤的 CFB 锅炉，积累了丰富的经验。国内大型锅炉制造厂在国家科技支撑计划科研项目的支持下，正开展 600MW 超临界 CFB 锅炉的研发工作，并相继提出了各自的 600MW 超临界 CFB 锅炉方案，目前有关部门正在抓紧落实 600MW 超临界 CFB 锅炉的示范工程点。我国已成为世界上 CFB 锅炉数量最多、总装机容量最大、发展速度最快的国家，已投运 CFB 机组在提高锅炉效率、降低厂用电、提高燃烧水平、攻克辅机常见故障等方面积累了丰富的经验。大量循环流化床锅炉机组的装备对于优化我国电力结构、改善电力供应品质、提高我国整体资源利用效率以及降低污染物排放方面发挥出了不可替代的作用。

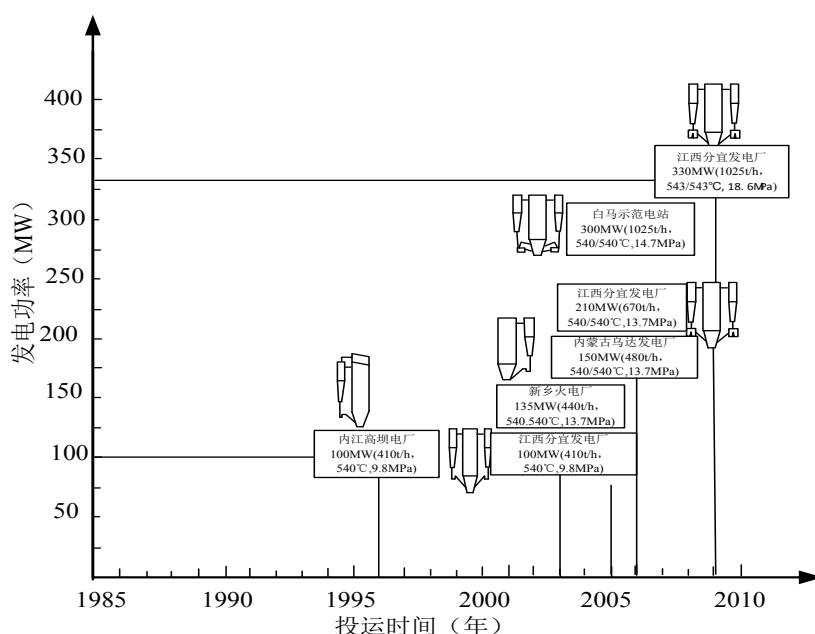


图 5-1 我国 CFB 锅炉发展进程

总体而言，我国的循环流化床锅炉燃烧技术紧跟国际发展前沿，用户已经能够接受自主技术的大容量循环流化床锅炉，但在锅炉容量、整体技术、配套技术以及工艺制造水平尚有一些差距，迫切需要加紧开发和应用大容量循环流化床锅炉技术。由于超（超）临界技术是当前燃煤火电能够大幅度提高效率，CFB 技术在大容量化的同时，正积极联合超（超）临界技术协同发展。世界上第 1 台 460MW 超临界 CFB 锅炉已经投入运行，我国第 1 台 600MW CFB 锅炉也已开始建造。按此方向发展，有利于循环流化床锅炉充分发挥其固有特点的同时，促进燃煤火电行业的发展。我国正积极投身 800MW 超超临界 CFB 锅炉的研发过程中，它的研发可使循环流化床技术达到超超临界需要的高蒸汽参数，从而可达到超过 50% 的最高发电效率，代表了当前循环流化床技术的最高水平。此外，CFB 锅炉已证明具有远高于煤粉炉的负荷调节特性，冷却型分离器 CFB 锅炉具有频繁调负荷的能力。随着我国电网峰谷差逐年加大，作为一项良好的解决方案，调峰 CFB 锅炉正得到越来越广泛的应用。

5.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术

PFBC-CC 的发电能力比相同蒸汽参数的单汽轮机发电增加 20%，效率提高 3%~4%，特别适于改造现有常规燃煤电站。正是如此，我国对 PFBC-CC 的理论研发工作从 80 年代初就开始起步。在“八五”、“九五”期间，采用国内技术和装备在徐州贾汪发电厂建成 PFBC-CC 中试电站（15MW），标志着已从实验室基础研究走向了工

业化试验。为加快 PFBC-CC 技术的研发进程，我国在“九五”期间采取技贸结合方式，引进国外先进技术建设一座 100MW 级的增压流化床联合循环试验电站，并在此基础上逐步实现国产化、大型化和新一代 PFBC 技术的开发研究。2001 年，我国建成国内首座 150MW 的 PFBC-CC 商业示范电站。经过多年的努力，我国掌握了 PFBC-CC 发电技术的核心部分——PFBC 锅炉系统的关键技术，达到了国外同类实验室规模的试验研究水平，为开展 PFBC-CC 技术的国产化、大型化研究创造了技术条件。

我国北方城市区域供热电站、旧煤粉电站增容技术改造领域以及沿海经济发达地区新建大型火电厂的 PFBC 市场较为明显，未来发展利用前景也较为广阔。对于第二代 PFBC-CC，我国在“八五”期间也进行了部分关键技术的初步研究，如喷动流化床部分气化炉、低热值煤气燃烧室、过滤式高温除尘器等，并在 1996~2000 年间进行了第二代 PFBC-CC 技术的工业研究。2002~2010 年间，我国成功推广应用 150MW 等级的 PFBC-CC 电站，国家相关部门计划到 2020 年建立 300MW 以上的 PFBC-CC 大型示范电站。成功运用 PFBC-CC 技术对我国实现煤的高效、清洁利用发电技术产生重大的影响。

5.1.4 整体煤气化联合循环发电技术

IGCC 因其高效性和低污染性成为最具发展前途的洁净煤发电技术之一。我国于 1978 年开始研究 IGCC 技术，并将其列入国家重点科技发展项目。1994 年 4 月，国家三部委成立 IGCC 领导小组，启动 IGCC 示范项目。1999 年在烟台立项建设我国首台 300~400MWIGCC

示范电站。2007 年，国家筛选了珠三角的东莞市，长三角的杭州市和京津塘三角的天津市等三个自主开发技术的 IGCC 电站示范项目，并列入“十一五”国家 863“以煤气化为基础的多联产示范工程”重大项目。2009 年 7 月 6 日，我国首座自主开发、设计、制造并建设的 IGCC 示范工程项目——华能天津 IGCC 示范电站在天津临港工业区正式开工，预计 2011 年底建成投运，工程投运后发电效率可达 50%以上，并实现污染物的近零排放。IGCC 发电技术在我国的发展历程见图 5-2。根据 2010 中国 IGCC 多联产峰会官方网站的统计，我国在华北、华东和华南地区已经至少拥有 12 个 IGCC 发电及多联产项目。

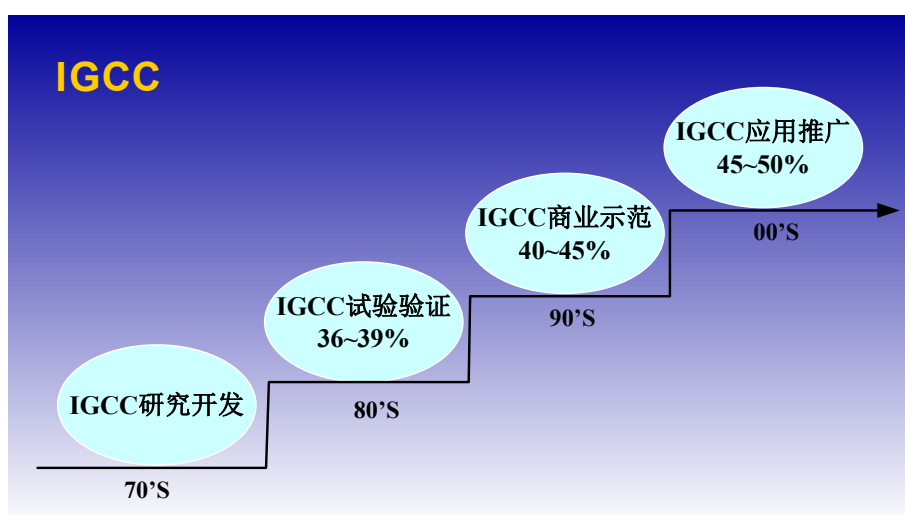


图 5-2 我国 IGCC 的发展历程

我国目前已具备国产化 IGCC 项目中主要关键设备的能力。首先，已引进了 Texaco，SHELL 和 GSP 气化炉，且可与相关气化炉的设计与制造单位合作设计并部分制造 Texaco 和 GSP 气化炉。其次，我国已成功研制了容量在 1000~1500t/d 煤的水煤浆对置喷嘴形式的喷流床气化炉，其气化性能比 Texaco 气化炉更为良好，且具有自主知识产权，并可设计和制造 2000~2500t/d 的气化炉，以适应 250MW 等

级的 IGCC 电站的需要。第三，我国已试验成功干煤粉供料的 36t/h 气化炉，气化性能优于 SHELL 气化炉，并且拥有自主知识产权³。总之，目前我国已经具备了部分生产与 200~400MW 等级 IGCC 电站匹配的 IGCC 电站关键设备的能力。

IGCC 发电技术的发展是未来煤炭能源系统的基础，应用前景广泛，市场潜力巨大，加快 IGCC 发电技术的应用和推广具有战略意义。它不仅可以促进我国低碳核心技术的研发、推广和相关装备制造业的发展；而且有利于促进我国工业结构的转型升级，抢占低碳经济和绿色能源技术制高点，增强我国在低碳经济领域的话语权，提升未来我国参与制定全球新的经济规则的主动权。IGCC 已不存在障碍性技术难题，但目前的造价较高，开发高效率低成本的关键技术、打破技术垄断及加快自主技术的工程化是降低 IGCC 造价的有效手段。以建设示范电站为依托，走以自主开发为主、适当引进的技术路线，在有条件的领域加大自主创新技术及其工程化的力度，进一步降低造价、提高效率，并控制 CO₂ 是我国 IGCC 未来的发展主题。

5.1.5 燃煤电厂碳捕集与封存

近年来我国就 CCS 技术进行了众多研发工作，包括国家基础科学研究(973)计划、高技术发展(863)计划在内的国家重大课题都对 CCS 的研究进行了立项，并取得了重大进展。2005 年，国家开始对 CCS 技术进行全面规划部署，CCS 技术被编入《国家中长期科技发展规划纲要(2006~2020)》。2005 年 12 月，我国科技部同英国和欧盟

³ 数据来源：《有关我国发展 IGCC 的再思考》

展开 CCS 项目合作。2007 年 11 月 20 日，我国启动了“燃煤发电二氧化碳低排放英中合作项目”，该燃烧后捕集示范项目是对华能北京高碑店热电厂进行碳捕集改造，设计 CO₂ 回收率大于 85%，年回收 CO₂ 能力为 3000 吨。该示范项目已于 2008 年 7 月 16 日正式投产。短短几年内我国在 CCS 技术研发方面的进展令世界瞩目，碳捕集技术方面已部分进入世界前列。截止到 2010 年 8 月，已投产或在建中的一些规模 CCS 工程见表 5-3。

表 5-3 我国已投产或在建的电厂 CCS 工程

电厂名称	CO ₂ 捕集量	投运时间/年
华能北京热电厂	3000 吨/年	2008
华能上海石洞口第二电厂	120000 吨/年	2009
华能天津 IGCC 示范电站	2000 吨/天	2011/2015
中电投重庆双槐电厂	10000 吨/年	2010

据国际能源署 (IEA) 的预测，在几十年内世界的一次能源需求的大部分仍将来自化石能源。为了实现将全球的 CO₂ 减排目标，CCS 的贡献率将达 20%左右。国家发改委能源研究所的研究表明，我国要想实现大幅度的碳减排，需要在 2030 年后实现 CCS 的商业化利用。目前国内 CCS 处于示范工程阶段，未来 CCS 技术研发和相关产业将有极大的发展前景。

5.2 常规低碳发电技术的发展现状分析

5.2.1 核能发电

核电已经成为满足电力增长需求、调整能源结构和应对气候变化的一个重要选择。我国是世界上少数几个拥有比较完整核工业体系的国家之一。我国核能事业开始于 1955 年，但核能发电起步较晚，上世纪七十年代开始设计工作，到 1985 年开始建设我国大陆第一座核电厂（即秦山核电厂）并于 1994 年投入运行。其后，除 1996 年开工建设的秦山二期电厂是自主设计外，先后从法国引进大亚湾 2*984MW 和岭澳一期轻水核电站；从加拿大引进秦山三期 2*720MW 重水核电站；从俄罗斯引进田湾 2*1060 核电站。据中国电力企业联合会统计，截止 2009 年底，我国已建成核电机组 11 台，总装机容量约 908 万 kW，占全国发电装机容量的 1.04%；核电的发电量为 700 亿 kWh，占全国发电总量的 1.95%。截止 2009 年底，我国已投产的核电站如表 5-4 所示。

表 5-4 我国已投产的核电厂

机组名称	单机容量 (MW)	始建时间	投产时间
秦山一期	300	1985.3	1994.4
秦山二期	2×650	1996.6	2002.5
秦山三期	2×700	1998.6	2003.7
大亚湾	2×984	1997.8	1994.5
岭澳一期	2×984	1997.5	2003.1
田湾一期	2×1060	1999.10	2007.11

近年来，我国核电迎来了高速发展的新机遇。面对能源压力，政府在制订“十一五”规划时，把发展核电列为保证未来能源供应的重要

手段 ,并做出了在 2020 年前后核电装机容量达到 4000 万 kW 的规划。面对这样的历史性机遇 ,核电发展战略的选择再次成了焦点 :我国先后核准了 10 个核电项目 ,共 28 台机组 ,总装机容量为 3140 万 kW ,已开工建设核电机组 20 台 (如图 5-3) ,总装机容量 2192 万 kW。此外 ,还有 21 台机组已明确开展前期工作。我国已成为世界目前在建核电规模最大的国家。

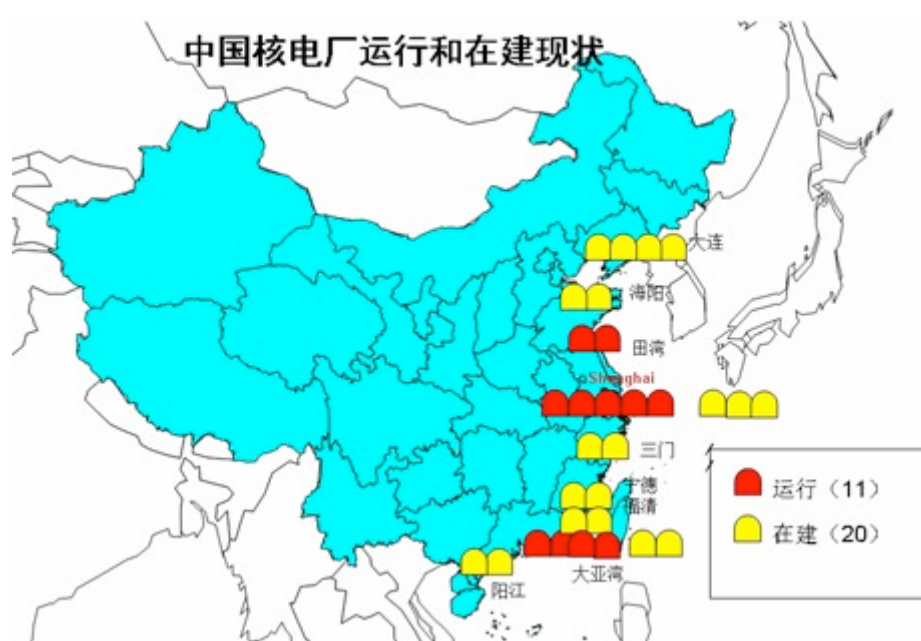


图 5-3 我国核电厂运行和在建现状

目前 ,我国在核电自主设计、自主制造、自主建设和自主运营方面 ,以及厂址资源储备、核燃料供应和运行安全性、经济性等方面 ,都已基本具备了核电大规模发展的基础和条件。为努力提高核电的装机比例 ,国家正在调整核电中长期发展规划 ,加强沿海核电发展 ,科学规划内陆地区核电建设 ,力争 2020 年核电站电力总装机的比例达到 5%以上。

5.2.2 水力发电

水资源作为可再生清洁能源，是中国能源的重要组成部分，在能源平衡和能源工业的可持续发展中占有重要地位。从 1910 年开工建设第一座水电站—石龙坝水电站，到 2010 年以小湾 4 号机组投运为标志，总装机容量突破 2 亿千瓦，我国水电建设前后共经历 100 年的发展。建国以来我国水电总装机容量共经历了四个阶段的发展见图 5-4。

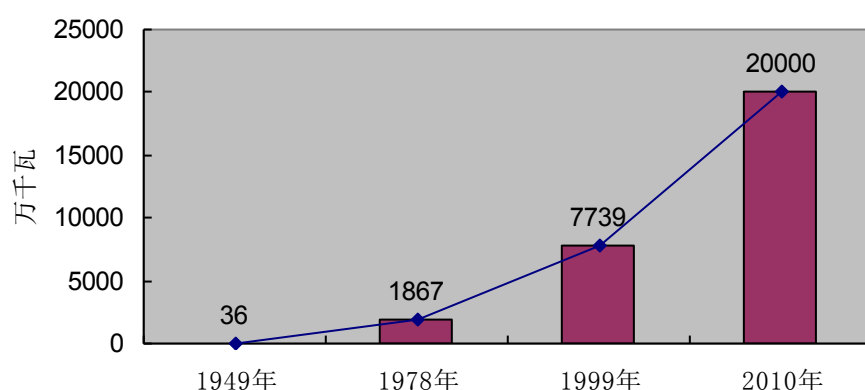


图 5-4 建国以来我国水电的阶段化发展

特别是进入新世纪后，国家从经济快速发展、能源可持续供应、环境保护以及西部大开发等方面考虑，制定了优先开发水电的方针，水电建设迎来了前所未有的发展机遇。2004 年，以公伯峡 1 号机组投产为标志，我国水电装机容量突破 1 亿千瓦，超过美国成为世界水电第一大国。随后，溪洛渡、向家坝、小湾、拉西瓦等一大批巨型水电站相聚开工建设，跨世纪的世界第一大水电工程—三峡水电站也将全面竣工。我国用了 10 年左右的时间，实现了水电装机容量比建国 50 年的总和将近翻了两番的超越。据中国电力企业联合会统计，截止 2009 年底，我国水电装机总量为 1.96 亿千瓦，占总装机容量的 22.46%；全年累计发电 5717 亿 kWh，占全部发电量的 15.53%。其中小水电总装机容量约为 5100 万 kW，年发电量 1600 多亿 kWh，占我

国水电装机和发电量比例均在 30%以上。

目前，中国不但是世界水电装机第一大国，也是世界上在建规模最大、发展速度最快的国家，已逐步成为世界水电创新的中心。从水能资源的储量看，中国水电开发水平远低于世界上水能资源相对丰富的国家。在可见的未来 30 年内，我国水电仍将快速发展，所占比例将以进一步提升。

5.3 新兴低碳发电技术的发展概况

5.3.1 风力发电

我国的风力发电始于 20 世纪 50 年代后期，到了 70 年代中期，在世界能源危机的影响下，特别是在农村、牧区、海岛等地方对电力迫切需求的推动下，我国对风力发电的研究、试点和推广利用给予了重视与支持，但在这一阶段，风电设备都是独立运行的。直到 1986 年，在山东荣城建成了我国第一座并网运行的风电场后，从此并网运行的风电场建设进入了探索和示范阶段，但其特点是规模和单机容量均较小。到 1990 年已建成 4 座并网型风电场，总装机容量为 4.215MW，其最大单机容量为 200kW。在此基础上，风力发电从 1991 年起开始步入了逐步推广阶段，到 1995 年，全国共建成了 5 座并网型风电场，装机总容量为 36.1MW，最大单机容量为 500kW。1996 年后，风力发电进入了扩大建设规模的阶段，其特点是风电场规模和装机容量均较大，最大单机容量为 1500kW。据中国可再生能源学会风能专业委员会最新统计，中国风电产业持续快速增长，到 2009 年

底，我国除台湾省外新增风电装机 1380.3 万 kW，累计装机容量 2580.53 万 kW，跻身世界风电装机容量超 10GW 的行里，并超过印度，成为亚洲第一、世界第四的风电大国。按照目前的发展速度，2010 年底中国风电累计装机容量有望达到 30GW，超越位居第二三位的德国和西班牙，成为仅次于美国的风电大国。2000 年-2009 年我国风电装机情况如图 5-5 所示⁴。

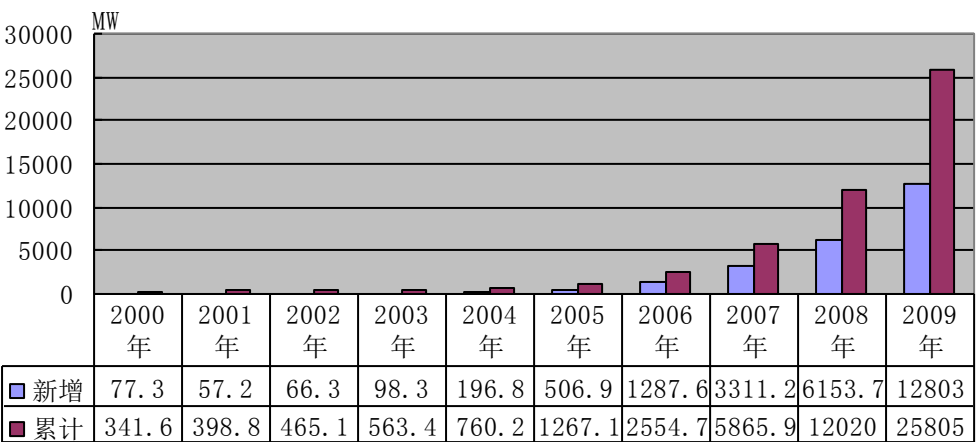


图 5-5 2000-2009 年我国风电装机容量（单位：MW）

我国的海上风电起步时间较短，还缺乏海上风电场建设的经验，尚不具备海上风电场风电机组设备的自主生产能力，严重制约了我国海上风电的发展。但近几年我国开始重视海上风电的开发，海上风电产业发展迅猛，风电热潮持续不断。从 2005 年开始，我国在浙江岱山、河北黄骅、上海以及江苏如东和东台等地筹建海上风电场，其中最引人注目的当属在建的上海东海大桥两侧 1000m 以外沿线海上风电场，预计安装 50 台单机容量 2MW 的风机，总投资预计 30 亿元，建成后预计年上网电量 25851 万 kWh。

4. 中国可再生能源学会风能专业委员会（CWFA）

5.3.2 太阳能发电

我国的太阳能发电研究始于 1958 年 ,并于 1971 年首次成功地将太阳能电池应用于我国发射的东方红二号卫星上。2000 年以前我国的太阳能发电事业尚处于雏形 ,受到价格和太阳能电池产量的限制 ,太阳能发电装机容量徘徊不前。我国光电产业的大发展在 2000 年以后 ,主要是受到国际大环境的影响、国际项目/政府项目的启动和市场的拉动 ,尤其是 2002 年 ,原国家计委启动了“西部省区无电乡通电计划”即“送电到乡”工程 ,大大刺激了光伏工业的发展 ,年装机容量有了较大的增长 ;2007 年我国已建成了 205kW 的太阳能聚光光伏示范电站 ,同年兆瓦及光伏电站发电示范工程正式并网发电 ;到 2009 年底我国太阳能发电累计装机容量约为 290MW (如图 5-6)。

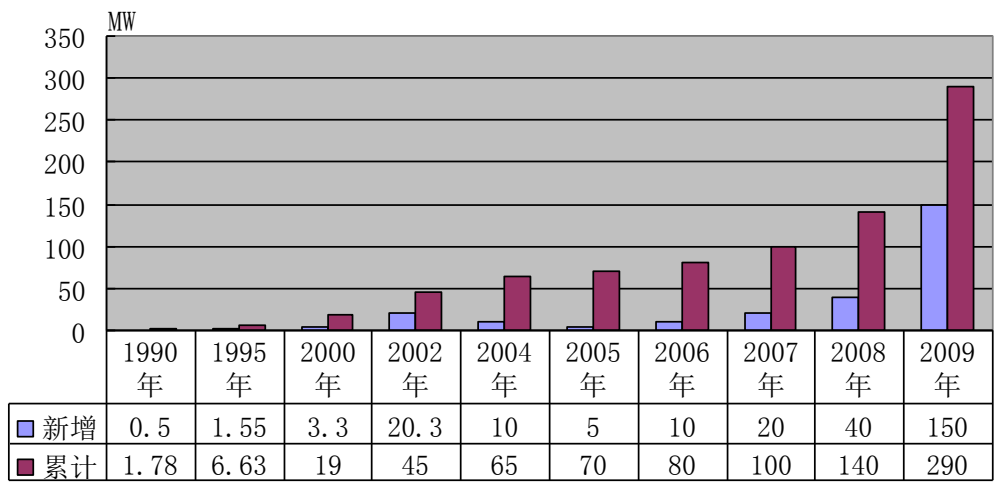


图 5-6 1990-2009 年我国光伏系统的年装机容量和累计装机容量⁵

目前我国已是太阳能电池的最大生产国 , 2008 年产量达 2000MW , 但由于发电成本较高 , 国内光伏发电市场发展依然缓慢。

5 《关于 2020 年我国非化石能源占一次能源消费比重达到 15%的初步研究》

2008 年中国的光伏安装量为 40MW，仅占全球安装量的 0.73%，占国内太阳能电池产量的 1.54%，太阳能光伏系统累计装机容量不足世界的 1%。2009 年以来，随着财政部出台的光电建筑补贴政策和金太阳示范工程项目等，各光伏企业迫切需要开拓国内市场，陆续开展光伏电站建设。预计到 2010 年底，我国光伏发电总容量达到 30 万 kW，到 2020 年达到 180 万 kW⁶。

5.3.3 生物质能发电

我国的生物质能发电技术研究最早开始于 1987 年。1998 年，1MW 谷壳气化发电示范工程建成投入运行；2000 年，6MW 秸秆气化发电示范工程建成投入运行，为我国更好地利用生物质能源奠定了良好的基础。为推动生物质能发电技术的发展，2003 以来，国家先后批准了河北晋州、山东单县、江苏如东和湖南岳阳等多个秸秆发电项目，并于 2006 年颁布了《可再生能源法》，实施生物质发电优惠上网电价等有关配套政策，从而使生物质发电特别是秸秆发电发展迅速。截止到 2008 年底，我国生物智能发电总装机为 315 万 kW，其中蔗渣发电约 170 万 kW，垃圾发电约 20 万 kW，其余为秸秆等农林废弃物气化发电和沼气发电等，在建项目 30 多个，已经入立项程序 106 项。

近年来我国生物智能发电项目增长较快，但整体来讲经济效益较差，多靠国家政策补贴予以发展，但仍无法弥补生物质能发电的高成本与低收益产生的差价。虽然我国在引进国外垃圾焚烧发电技术和设

6. 《可再生能源中长期发展规划》

备的基础上，经过消化吸收，现已基本具备制造垃圾焚烧发电设备的能力，但总体来看，在生物质发电的原料收集、净化处理、燃烧设备制造等方面与国际先进水平还有一定差距。

我生物质资源丰原丰富，开发潜力巨大，未来生物质发电装机容量将会快速增长。根据国家“十一五”规划纲要提出的发展目标，到2010年底将建设生物质发电550万kW装机容量，同时已公布的《可再生能源中长期发展规划》也确定了到2020年生物质发电装机3000万kW的发展目标。

5.4 中国低碳发电技术发展的障碍分析

近年来，洁净煤技术、常规低碳发电技术和新兴低碳发电技术的推广应用对于缓解我国温室气体排放起到了重要的促进作用，国家大力支持发电企业的洁净煤技术应用投入，同时对水电、风电等低碳能源的开发利用从法规政策、技术支持到市场规范都给予了重要指示和引导。然而，就低碳能源的开发现状而言，仍存在制约其发展的种种障碍。

5.4.1 政策障碍

1) **法律体系不够健全**。国家法律政策导向对低碳能源的开发利用起着至关重要的作用，通过政规制为低碳能源同常规能源竞争创造公平的市场环境，引导和激励各类经济主体积极参与低碳能源的开发利用，对于加快其发展进程十分重要。然而我国低碳能源的相关法律体系还不完整，2005年出台的《中华人民共和国可再生能源法》，

虽然体现了国家责任和全社会支持相结合、政府引导和市场运作相结合、当前需求和长远发展相结合等三项立法原则，但却缺乏相应细则的具体法律实施保障，这就直接影响到政策的执行，以至于难以快速形成促进低碳能源产业发展的良好环境。

2) 政策激励措施力度不够。在现有技术水平和政策环境下，除了水电有能力参与市场竞争外，大多数低碳能源开发利用成本高，再加上资源分散、规模小、生产不连续等特点，在现行市场规则下缺乏竞争力，亟需政策扶持和激励。目前，我国已出台的《可再生能源产业指导目录》、《可再生能源发电管理办法》、《可再生能源上网电价及费用分摊管理办法》，对低碳能源的开发利用给予了一定的优惠政策。但从总体上看，目前国家对低碳能源发展的优惠政策还比较少，体系不够完整，支持力度不足，相关政策间的协调性和稳定性不强，尚未形成促进低碳能源可持续发展的长效机制。

3) 政策的落实性有待加强。根据 2008 年中国电力监管委员会开展的可再生能源电量收购和电价政策执行情况专项检查看，《可再生能源法》及其配套规章实施以来，可再生能源发电建设步伐逐年加快、发展环境明显改善。然而，相关政策在执行过程中也存在可再生能源发电项目接入系统工程建设管理和可再生能源电量收购以及合同签订不够规范的现象。这在一定程度上影响到低碳能源开发与有效利用之间的协调性，同时可能降低投资主体的积极性，从而制约低碳技术的发展。

5.4.2 技术障碍

1) 技术开发能力和产业体系薄弱。尽管我国在某些低碳能源领域(水力发电、陆上风电等)的技术水平较高,也形成了一定的产业规模,但低碳能源利用总体水平仍然不高。我国小水电装备制造业虽有了一定的工业基础,但设计规范陈旧、设备使用率低、寿命短,加之存在公平上网、电价等问题,对小水电的发展产生了不利影响;生物质能使用方式落后,发电上网政策不到位,集中发电和供热的技术还没有完全掌握;太阳能光伏发电尽管未来市场很大,但现实市场较小,加上受技术和成本问题的影响,在我国尚不能大规模推广应用;太阳能热利用市场庞大但技术单一,企业众多但科研投入少,有关政策尚未到位,难以与国际太阳能热水系统技术水平接轨。此外,低碳资源评价、技术标准、产品检测和认证等体系不完善,尚未形成支撑低碳能源产业发展的技术服务体系,也是制约其大规模发展的重要因素。

2) 能源资源和条件限制。常规低碳发电技术和新兴低碳发电技术的长足发展,与我国能源资源禀赋和开发条件关系密切。新兴低碳技术所依赖的风能、太阳能和生物能资源虽然具有可再生性,但开发这些能源,却要受到相应的资源和条件限制,如自然气候条件、矿产资源条件、国土资源条件等。风电项目必须选择在风力资源丰富的沿海或西部地区;太阳能发电项目投资在日照时间长、晴天多的区域效率更高。此外,在目前新能源利用和转化率低的情况下,规模化的低碳能源发电项目都需要大量用地:太阳能发电需要大面积场地获得太阳光能;风力发电场的占地规模动辄千亩以上;生物能则需要有大

面积适应作物生长的土地；核能的选址则更加复杂。

5.4.3 市场障碍

1) **市场保障机制不够完善。**长期以来，我国低碳能源发展缺乏明确细致的发展目标，尚未形成连续稳定的市场需求。虽然国家逐步加大了对低碳能源开发的支持力度，但由于没有建立起强制性的市场保障政策，无法形成稳定的市场需求，低碳能源发展缺少持续的市场拉动，致使新技术发展缓慢。低碳能源发电技术在进入市场的初期，市场规模对其经济性具有决定性的影响，如风力机和光伏电池销售量增加一倍售价可降低 20%，竞争力可大幅提升。我国大部分低碳能源发电技术市场规模小，缺乏统一的技术标准、设计规范、质量保证机制和信息服务，阻碍了市场需求的进一步扩大。

2) **投融资体系不够健全。**低碳能源是高新技术产业和新兴产业，其开发成本相对高昂，技术研发和产业培育需要大量的投入。因此，除了需要有政府的扶持政策外，还需开拓确保资金需求的融资渠道及其融资方式。为加快推进低碳能源的开发利用，我国已设立了可再生能源发展专项基金。但从总量看，国家对低碳能源的投入仍然不足，尚未形成稳定的政府资金投入机制。此外，还缺乏必要的民间资产引导性政策支持，这不利于一次性投资较大、短期内难以获利的低碳能源项目的建设运营和加速发展。

第六章 中国电网环节低碳技术的发展现状分析

6.1 低碳输电技术的发展现状分析

6.1.1 柔性交流输电技术

随着新建电厂的不断并网发电，我国电力系统总装机容量上了新的台阶，然而输电网络建设滞后于电厂建设带来的种种问题也日趋突出。许多长距离输电线输送的功率受到稳定极限的限制，导致送端的发电厂窝电现象突出，发电厂的容量不能得到充分应用。我国的电力系统普遍缺乏控制调节无功功率和电压的手段，特别是缺乏快速的动态无功功率补偿装置。目前在 500kV 变电站安装有一定数量的静止无功补偿器(SVC)装置，但由于大多是可投切的电容器组(TSC)或电抗器(TSR)，而真正可快速连续调节的电抗器(TCR)较少，因而远不能满足系统对动态无功功率和电压控制的要求。在负荷中心，现有许多投切电容器用于提高负荷的功率因数，维持节点电压，但一旦系统电压降低，这种投切电容将恶化系统的动态电压稳定性。这种情况唯有通过安装大容量的 SVC 装置或 STATCOM 装置来改善。

在 FACTS 技术研究和应用方面，我国整体水平位于世界前列。在固定串补(FSC)、可控串补(TCSC)、静止无功补偿(SVC)、可控并联电抗(CSR)、静止同步补偿(STATCOM)等技术方面，取得了丰硕成果和应用经验。在故障电流限制技术(FCL)、统一潮流控制技术(UPFC)等方面，也已开展相关研究。1985 年，华北电力学院研制出

中国第一台基于晶闸管的新兴静止无功发生器试验样机。1994 年，清华大学与河南省电力局签订了合作研制中国首台 20MVA STATCOM 工业装置的合同，代表了中国在工程应用领域正式研制 FACTS 技术装置的新开端。1996 年，作为第一阶段的成果，基于 GTO 的 300kVA STATCOM 模型样机在河南省郑州孟砦变电站投入运行。现场测试获得的良好静态和动态特性表明 STATCOM 装置在提高系统性能方面的有效性和装置本身设计的正确性。1999 年 3 月，20MVA STATCOM 工业装置成功地在河南省洛阳朝阳 220kV 变电站投入运行，这标志着中国 FACTS 技术发展进入了一个新的阶段。2006 年 2 月，上海电网在黄渡分区实施的 $\pm 50\text{MVar}$ STATCOM 示范工程正式投运，该示范工程的顺利投运，对提高受端电网的暂态电压稳定性，减少系统负荷损失具有重要作用，也为 FACTS 技术的实用化、产业化起到示范和推动作用。

在研制成功大容量 STATCOM 后，FACTS 技术的发展出现了两个明显的趋势：一是不断采用新器件。电力电子技术发展相当迅速，新型器件不断涌现，从而导致了 FACTS 不断采用新器件来进一步提高性能，提高可靠性，拓宽应用范围。二是装置多样化，应用范围更广。一方面继续向高压大容量方向发展，另一方面，向中低压配电网的应用发展，旨在提高用户侧的电能质量，即柔性配电技术和用户电力技术。当前，我国电力系统的发展面临种种挑战，包括环境限制、负荷需求增长、用户对供电可靠性和经济性要求日益严格等，发展跨区域大电网的趋势日益明朗，而由此出现的系统

震荡、系统稳定控制、交直流混合电网协调等问题，迫切要求提高输电系统的输电能力和调控能力，减少输电损失。应用柔性交流输电技术是目前电力系统输电技术的发展方向之一，在未来的发展中，将柔性交流输电技术应用于系统薄弱环节可增强系统稳定性，适合远地负荷、小岛、海上钻井等孤立网络，尤其适用于风力发电系统。

6.1.2 超导输电技术

超导输电技术包括超导变压器、超导限流器、超导电缆等系列超导电力技术，其中超导电缆是联接超导电力系统的重要纽带，因其与普通电力电缆相比具有截流能力大、损耗低和体积小的优点而为人们所瞩目。随着我国用电需求的不断增长，普通电缆输送过程中的电能损失愈渐严重，为降低线路损耗、落实国家节能减排战略，我国自“九五”以来即开展高温超导电缆的研究。1998 年中国科学院电工研究所与西北有色金属研究院和北京有色金属研究总院合作，成功研制了长 1m、1000A 的高温超导直流输电电缆模型，2000 年又完成长 6m、2000A 高温超导直流输电电缆的研制和实验。“十五”期间，在国家“863”计划的支持下，中国科学院电工研究所于 2003 年研制出长 10m、10.5kV/1.5kA 三相交流高温超导输电电缆。在此基础上，2004 年中国科学院电工研究所与甘肃长通电缆公司等合作研制成功长 75m、10.5kV/1.5kA 三相交流高温超导电缆，并安装在甘肃长通电缆公司为车间供电运行。2004 年 4 月，中国第一组实用高温超导电缆在昆明普吉变电站正式运行(设计参数见表 6-1)，这也是世界上第三组并网运行的超导电缆。改电缆在性能指标上优于目前已经投运的美国和丹

麦的两组电缆系统 ,标志着我国超导输电研究从成果到产业化取得了新的重大突破。

表 6-1 我国首套投运高温超导电缆设计参数⁷

序号	设计参数	性能指标
1	额定电压/kV	35
2	额定电流/kA	2
3	短路电流/kA	20
4	电流型式	三相交流
5	长度 (含终端) /m	36.64
6	超导体交流损耗/W•(相•m) ⁻¹	< 1.0
7	超导电缆本体长度/m	33.5
8	电缆本体质量/kg•(相•m) ⁻¹	9.2
9	电缆外径/mm	111.7
10	绝缘材料	交联聚乙烯 (XLPE)
11	相同距离/mm	856
12	绝缘规范	负荷 35kV 级 IEC 规范
13	弯曲直径/m	3.0
14	终端质量/(kg/个)	30
15	终端尺寸/m	长 1.2 , 宽 1.335
16	运行海拔/m	2000

超导技术是 21 世纪具有战略经济意义的高新技术之一 , 其应用

⁷数据来源 : 《我国首套高温超导电缆并网运行情况》

将大大提高电力工业的发展水平、促进电力工业的重大变革。高温超导电缆作为超导电力技术的一个重要应用方面，它的研究、开发和应用，将会为国民经济发展做出重要贡献，并对人类社会产生积极而深远的影响。目前，我国高温超导电缆主要应用于短距离、大电流的输电场合。随着科学技术的进步，未来将应用于大容量远距离输电，替换海底电缆，实现离岸风电场接入等领域。

6.1.3 特高压输电技术

特高压输电技术代表当今世界输电技术的最高水平，具有输电容量大、送电距离长、线路损耗低、工程投资小、土地利用效率高和联网能力强等优势。我国自 1986 年开始便立项研究特高压交流输电技术，取得了一些重要成果，并培养了一批有较高理论水平和实践经验的工程技术人员。1994 年，武汉高压研究所建成了我国第一条百万伏级特高压输电研究线段；750kV 超高压电网从 2005 年 9 月 26 日投产以来，安全稳定运行至今，为实现更高一级电压等级的技术装备和工程建设奠定了基础。2005 年，国家电网公司和南方电网公司分别提出建设 1000kV 级交流和 ± 800 kV 级直流系统，推进了特高压输电技术进入试验阶段。目前，我国已完成了特高压输电中过电压与绝缘配合、电磁环境等重大关键技术研究，特高压设备研制工作全面展开。2006 年 8 月，经过一系列的研究工作，国家电网公司开始建设我国首个特高压交流试验示范工程，2009 年 1 月，该工程（晋东南—南阳—荆门的特高压交流试验示范工程）建成投运。特高压直流工程方面，我国目前在建或拟建的 15 回特高压直流工程项目情况如表 6-2

所示。总之，我国特高压输电技术的试验研究能力和工程实践水平已得到全面提升。

表 6-2 我国在建或拟建的特高压直流输电工程⁸

电源	外送容量/GW	特高压直流输电线路/回	投产年份
金沙江水电	41.0	6	2012-2018
四川水电	10.8	1	2014
云南水电	25.0	4	2009-2015
呼盟-北京	6.4	1	2020
哈密-郑州	6.4	1	2020
俄罗斯水电	6.4	1	2020
哈萨克火电	6.4	1	2020

截至 2010 年 3 月底，我国特高压交流试验示范工程已累计送电 123.18 亿 kWh，其中，华北火电送华中电网 90.03 亿 kWh，华中水电送华北电网 33.15 亿 kWh，发挥了重要的送电和水火互济、事故支援联网功能，促进了节能减排和能源资源的优化配置⁹。特高压输电具有远距离、大容量、低损耗的优势，是实现能源资源优化配置的有效途径，能够取得良好的社会经济综合效益。发展特高压电网，可以推动我国电力技术创新和电工制造业的技术升级。我国特高压输电技术的未来发展主要围绕特高压交流输电技术和特高压直流输电技术的适用范围进行探讨。首先，在近距离大容量输电方面，国外经验表明，当输电距离超过经济输电距离（约为 800~1000km）时，特高压直流

⁸.资料来源：《特高压直流输电技术发展综述》李晓黎等

⁹.数据来源：《智能电网知识读本》刘振亚主编

输电才会比特高压交流输电更经济，因此，近距离大容量输电宜采用特高压交流输电方式。其次，在远距离大容量输电方面，以“西电东送”和“北电南送”为例，采用特高压直流输电方式具有明显的经济性。第三，在大区主干网方面，为了解决由电网输电容量增大引起短路电流过大的问题，未来将构建更高一级电压等级的主网架，最终形成特高压交流主干环网。第四，在大区电网互联方面，由于特高压交流输电方式联网对互联电网的同步能力要求很高，易导致交流短路容量的明显增加。从国内外的实践经验来看，在大区联网场合，特高压直流比特高压交流更具优势。

6.2 低碳配电技术的发展现状分析

6.2.1 配电自动化技术

配电自动化包括馈线自动化、变电站自动化、配电管理系统等，该技术是一项庞大复杂的、综合性很强的系统性工程，包含电力行业中与配电系统有关的全部功能数据流控制。我国于上世纪 80 年代末开始配电网自动化工作，90 年代初部分城市进行配电网自动化方案的制定和柱上开关的研制工作。1996 年开始在部分城市进行配电网自动化系统性试点工作。由于当时技术、装备等方面的条件不成熟，国内外均无相关标准指导，部分城市根据本地区具体情况和应用要求，参考国外经验，进行了小规模试点。1998 年我国城网改造工作启动，为配网自动化的发展提供了机遇。1999 年国家电力公司颁布的《10kV 配网自动化发展规划要点（试行）》和《配网自动化终端设

备通用技术条件》促进了配网自动化的进程。

目前我国不少地区正大力开展配电自动化技术的应用工作。各地区根据自身的实际情况和管理模式，制定符合要求的配电系统：1) 上海浦东金藤小区采用南瑞集团研制的主站系统，小区内全电缆线路，子站采用施耐德公司生产的环网开关和 FTU，实现了 SCADA、故障隔离、网络重组等功能，运行可靠性高，但投资大。2) 山东蓬莱、衡水采用烟台东方电子公司的主站系统和子站系统，应用了 FTU、TTU(配变终端) 和专线通信方式，实现了配电、调度自动化一体化，具有 SCADA、DAS 功能。3) 大连在中山区和甘井子区进行了配电自动化的改造，中山区以地埋电缆为主，甘井子区以架空线为主，采用东方电子的 DF9000 配电自动化系统，实现了 SCADA、DA、DAS、GIS 等功能，通信方式采用无线通信和电话拨号通信。4) 枣庄、银川采用烟台东方电子公司开发的 DF9000 配电自动化系统，应用了 FTU、TTU，以光纤、双绞线通信，实现了 SCADA、DA、DAS、DMS、GIS，其中枣庄还配置了 TCM(用户电话投诉处理) 和 GPS(卫星定位系统) 功能。

配电自动化技术具有实时性好、自动化水平高、管理功能强之特点，能提高供电可靠性和电能质量、改善对用户的服务，具有显著的经济优越性和良好的社会综合效益。随着全球范围内电力工业的市场化改革，供电企业将面临诸如进一步提高供电可靠性，降低企业运营成本，以及为用户提供更加优质的服务等许多新的压力。如何使配电自动化技术适应电力市场环境的要求，并通过实施配电系统的综合自

动化来降低供电企业的运行成本，同时提高对客户的服务质量，将成为今后供电企业和科研工作者共同关注的问题。我国配网自动化尚处于起步阶段，国内城市配网馈线自动化率不足 10%，而国外配网自动化的比例达到 60%~70%。目前我国城市配网自动化的试点工作正在大力推进，未来覆盖范围将延伸至县级区域。配电自动化是当前国内外电力行业前沿技术之一，配电自动化系统的建设是目前提高县城 10kV 配电网络供电可靠性的直接技术手段，具有非常可观的经济效益和社会效益。

6.2.2 柔性配电技术

随着新能源并网规模逐步加大，电力系统的稳定性受到挑战，电能质量问题至关重要。柔性配电 (DFACTS) 技术已成为改善电能质量的有力工具。目前已开发出的 DFACTS 电能质量调节装置有许多种，主要包括补偿器、有源滤波器装置和固态开关设备，以及低压直流配电系统和各种具有储能单元的电能变换设备。经过多年 DFACTS 领域的深入研究，我国成为继美、日、德之后，第四个掌握制造大容量 DFACTS 装置核心技术的国家。国家电网公司南京自动化研究院已研制出用于配电系统的静止无功发生器 DSTATCOM 样机。

电力系统早期主要采用无源滤波器解决谐波等电能质量问题。近年来，开始采用有源滤波器、快速电压调节器解决电压波动和谐波等问题。随着现代电力电子技术的快速发展，以该技术为核心的各种新型补偿设备将迅速得到推广应用。我国在未来的发展中，将不断推

进柔性配电技术在电网中的应用 ,在逐步实现城市配网自动化的基础上 ,有序推进农村配网自动化 ,解决当前配网中的谐波污染等问题。

6.3 低碳调度技术的发展现状分析

低碳调度技术主要指智能调度技术 ,通过综合利用人工智能、通信、自动控制等技术 ,发挥互联电网调度智能化的优势 ,提升电网的输送能力 ,更好地满足经济社会发展的需要。在低碳调度技术发展应用方面 ,国内重点开展了电网动态安全监控、在线安全稳定评估与预警、在线调度辅助决策等方面的研发与推广应用工作。比较有代表性的是国家电力调度通信中心的“跨区域电网动态稳定检测预警系统”和华东电网的“广域动态监视分析和保护控制系统”。2009年初 ,国家电网公司启动了智能电网调度技术支持系统的研发工作 ,该系统结合大电网安全稳定运行、节能发电调度、调度管理等实际业务需求 ,将电网实时监视控制、不同时序和空间的信息采集、安全稳定分析预警和辅助决策等智能化应用功能集成在一起 ,建成后可提高特大互联电网的安全稳定预警和决策水平。

目前 ,国家电网公司已在江苏、河南、四川等地开展了低碳发电调度的试点工作 ,并取得了初步的成效。如江苏电网采取大小机组替代发电的办法 ,构建从发电、输变电到用电的“全流程”节能降耗链 ;河南电网实行“差别电量”计划 ,建立“以大代小”机制配合低碳发电调度办法的推进。此外 ,国家电网公司确定了包括北京海淀、河北衡水、辽宁沈阳在内的三个智能化调度试点。其中 ,衡水电网智能调度支持系统进入设备调试阶段 ,预计2011年可进入实用化阶段。在未来的发

展中，我国将进一步推进智能化调度试点工作，逐步形成区域电网的智能化调度，最终建立包括国家级调度、区域级调度、省级调度、地市级调度、县级调度在内的5级调度机构的智能化调度体系。

6.4 低碳储能技术的发展现状分析

低碳储能技术包括飞轮储能技术、压缩空气储能技术、超导储能技术、超级电容器储能技术等。在我国，储能技术的推广应用刚刚起步，虽然推广应用的面很小，但效益明显，潜力很大。在国家“863”和“973”计划项目的支持下，我国成功研制出第一台用于电力系统稳定控制的高温超导磁储能实验装置；在国家“985 工程”建设项目的支持下，研制出永磁体磁悬浮飞轮储能实验装置，实现了以储能装置为基础的新型电力系统稳定控制器，并已在电力系统动态模拟试验环境下进行了试验，无论在控制器的鲁棒性上还是控制效果上，都取得了比常规电力系统稳定器好得多的控制效果。

目前，国内飞轮储能技术研究广泛，理论研究丰富，但工程应用研究进展缓慢。我国的飞轮储能技术还停留在实验室研究阶段，与国外技术水平差距在十年以上；在压缩空气储能技术发展方面，我国已经积极开展相关研究，但还未实现该技术在电力系统中的应用；在超导储能技术发展方面，高温超导和电力电子技术的发展促进了超导储能装置在电力系统中的应用。在分布式发电系统中，超导储能常用于孤岛型的风力发电系统和光伏电池发电系统，随着风力发电向规模化、产业化发展及装置成本的降低，超导储能也会在并网型风电系统中大量应用；在超级电容器储能技术发展方面，该技术已经不断应用

于诸如高山气象台、边防哨所等的电源供应场合。总的说来，我国大部分低碳储能技术尚处于试验示范阶段甚至初期研究阶段，距离大规模推广应用还有较大距离，尤其在可靠性、效率、成本、规模化和寿命等方面存在诸多问题。

储能技术正朝着转换高效化、能量高密度化和应用低成本化方向发展，通过试验示范和实际运行日趋成熟，在电力系统中发挥出调峰、电压补偿、频率调节、电能质量管理等作用，确保了系统安全、稳定、可靠的运行。基于我国能源分布特点，国家电网已基本形成“西电东送、南北互供、全国联网”的格局。为确保大电网的安全性和可靠性、加强区域电网峰谷负荷的自调节性、提高输变电能力、解决跨区域供需矛盾、增加供电可靠性、改善用户电能质量并满足可再生能源系统的需要，我国将以开发 100kW 级全钒液流、钠流电池储能系统和液氮温区运行超导储能技术为重点，加快建设 10GW 级抽水蓄能混合式电站，实现电力系统的优化配置和电网的可持续发展。

6.5 电网环节低碳技术发展的障碍分析

我国电力市场的发展十分迅速，这为各种电力电子设备的发展提供了巨大的空间，从我国低碳电网技术的发展现状看来，近年来的发展速度相对见长，降损及减排效果可观，然而与发达国家相比仍有滞后。制约其发展的因素是多方面的，主要包括政策障碍、技术障碍及管理障碍。

6.5.1 政策障碍

1) **战略定位及发展规划尚未明确。**如同低碳能源发展需要战略规划一样,作为其有效利用的关键,电网环节的低碳技术也需要制定相应的战略规划,以保证其长远健康发展。目前,我国部分电网企业已制定了超高压输电等低碳技术的跨区域发展规划,从企业层面给予了低碳输电技术发展的有力支撑,同时也正逐步展现战略规划的重要意义。然而,从国家层面上看,宏观的战略定位及发展规划目前仍处于缺失状态,这就使得低碳技术的发展缺乏完善的总体战略层面定位,也影响到其长远发展。

2) **激励性政策力度不够。**为促进低碳技术的发展,我国在低碳能源开发利用领域制定了种种相关政策。然而,针对电网环节的低碳技术,则缺乏促进其发展的投融资优惠、税收优惠、财政补贴等激励性政策。从整体上看,我国在鼓励低碳技术发展方面仍缺乏有效的激励手段,现有的相关政策也远未发挥应有的作用。而包括金融机构在内的服务机构对低碳技术的支持也明显不足,直接导致低碳技术发展缺少足够的资金。目前,输电环节技术研发项目极少纳入各级政府财政预算和计划,这也是导致其发展缓慢,产业化、商品化程度低的一个重要因素。

6.5.2 技术障碍

1) **设备制造能力有待加强。**近年来,我国电网环节输电技术取得了较大进展,超导输电技术、特高压技术、配电自动化等技术的研发应用都正。然而,与国外发达国家相比,我国电网环节低碳技术发展相对滞后。设备制造能力的不足,是阻碍低碳技术在电网环节应

用的重要原因。例如，在柔性交流输电技术发展方面，国产设备生产尚处于起步阶段，国外设备价格高昂，阻碍了该技术的应用；在柔性配电技术发展方面，由于技术研发能力有限，电力电子装置价格普遍偏高，这对于其在配电网中的应用具有明显的影响。

2) **技术标准认证体系不够完善**。技术标准认证体系的完善可以减少相关企业的投资风险，促进技术的规范化、标准化研发与应用，有效促进低碳技术产业化发展。目前，我国在电网环节低碳技术的研发和推广方面，缺乏完善的细致的标准认证体系，如针对静止无功补偿器、静止无功发生器、静止同步补偿器、固态切换开关、静态串联补偿设备等装置缺乏统一技术标准；相关装置的关键零部件缺乏统一的标准，影响输电环节低碳技术的推广应用。

6.5.3 管理障碍

导致我国电网环节低碳技术发展相对滞后的另一个重要原因是，缺乏一套完善的管理模式，规范、促进各项技术的研发。我国电网环节低碳技术的研发及应用，目前尚处于起步阶段，在投融资体系管理、人才管理等方面尚不完善。

1) **投融资体系有待完善**。随着智能电网建设目标的提出，我国电网企业陆续公布了庞大的电网投资计划。然而，庞大的投资金额在促进电网环节低碳技术发展方面，仍存在资金利用率相对较低、效果相对不明显等问题。导致该问题的主要原因在于，缺乏一套完善的投融资管理体系。一方面，目前我国的电网投资主体单一，国家投资主体不明确，政府投资责任虚化，从属于政府的国有投资企业无法行

使投资主体的职责，也无须对投资的效果和风险负责，不能从内在机制上形成投资风险约束。另一方面，从我国目前电网企业的融资现状来看，已经具备一些市场经济的特征，但仍表现出较强的计划经济传统性，这在一定程度上影响了电网环节低碳技术的应用。

2) **人才力量相对薄弱**。技术人才是促使技术发展的关键。从电网环节低碳技术研发人才现状分析，目前我国在该研究领域的人才总量少，整体实力相对薄弱，具有创新能力的人才、复合型技术人才以及总体设计人才相对匮乏。此外，现有的人才管理、使用体制不能适应新环境的要求，缺乏吸引人才、使用人才、留住人才的机制与政策；科研基础服务公共平台建设和中介机构发展缓慢等问题也普遍存在。

第七章 中国电能消费终端低碳技术的发展现状分析

7.1 中国电能消费现状及趋势

7.1.1 电能消费现状

自改革开放以来，我国全社会用电总量呈现快速增长趋势。1978年，全社会用电总量为 2498 亿 kWh，到 2009 年达到 36587 亿 kWh，是 1978 年的 14.6 倍，年均增长率达到 8.74%。改革开放以来，我国用电总量的增长共经历了 4 个阶段：1)“六五”、“七五”、“八五”期间，我国逐步扭转了单纯发展重化工业的思路，轻工业得以快速发展，用电增速呈现先降后升的态势，尤其是在 1990 年小平南巡讲话的带动下，我国经济掀起了新一轮发展高潮，期间年均增长分别达到 6.52%、8.62%和 10.05%，是改革开放以来最长的增速上升周期。2)“九五”期间，受经济结构调整和亚洲金融危机影响，用电增速明显放缓，年均增长 6.44%，尤其是 1998 年，增速仅为 2.8%，为改革开放以来的最低水平。3)进入“十五”以来，受积极的财政货币政策和扩大内需政策拉动，我国经济驶入快速增长轨道，经济结构出现重型化，用电需求持续高速增长，年均增长 12.96%，尤其是 2003 年、2004 年达到了改革开放以来用电增长高峰，增速分别为 15.3%和 15.46%。“十一五”前两年，我国用电继续保持快速增长势头，增速均高于 14%。4)2008 年，受冰灾、地震、全球金融危机等因素影响，我国用电增速明显回落，前三季度仅同比增长 9.7%，增速同比回落至 5.5%；10 月，我国电力工业出现 4.65%的负增长，为 10 年来首次出现单月负增长；11

月，部分省市用电增幅同比下降超过 30%。2009 年，随着工业经济的逐步企稳回升，全社会用电实现 36587 亿 kWh，比 2008 年增长

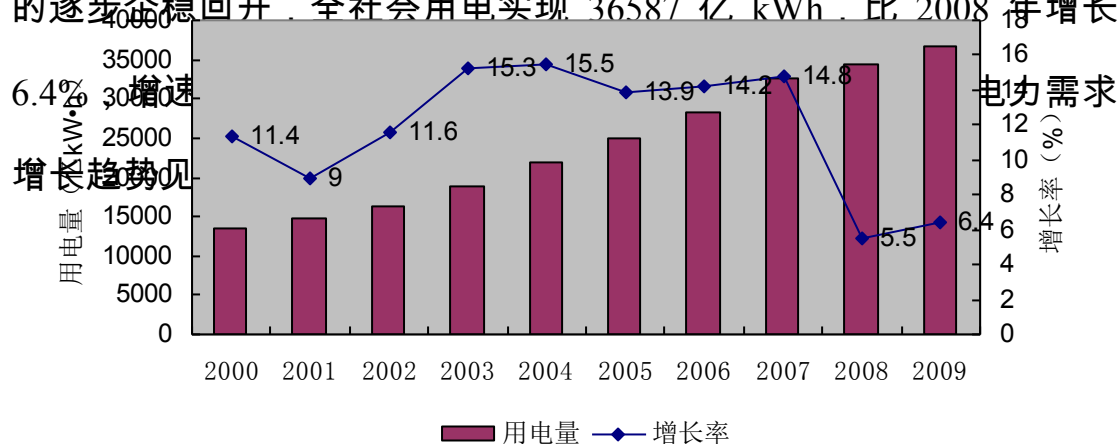


图7-1 全国全社会用电量增长趋势

人均用电方面，2009 年全国人均用电量 2741kWh，是 1978 年的 10.6 倍。从人均用电增长历程来看，我国人均用电量在不到 30 年的时间里实现了 3 次翻番：从 1978~1989 年历时 11 年，人均用电量由 250kWh 增长到 500kWh；从 1989~2000 年历时 11 年，人均用电量由 500kWh 增长到 1000kWh；从 2000~2006 年历时 6 年，人均用电量由 1000kWh 增长到 2000kWh。而人均用电量实现第三次翻番仅用时 6 年，比主要发达国家都要短。从我国人均用电量与人均 GDP 的对比来看，二者呈现出比较一致的变化趋势，即当人均用电量翻番时，人均 GDP 也大致翻一番左右。具体来看，我国人均用电量翻番的前两个阶段，人均 GDP 分别增长 2.3 倍和 2.5 倍，而第三个翻番阶段，人均 GDP 仅增长了 1.7 倍，说明我国电力消费强度较前两个阶段有所

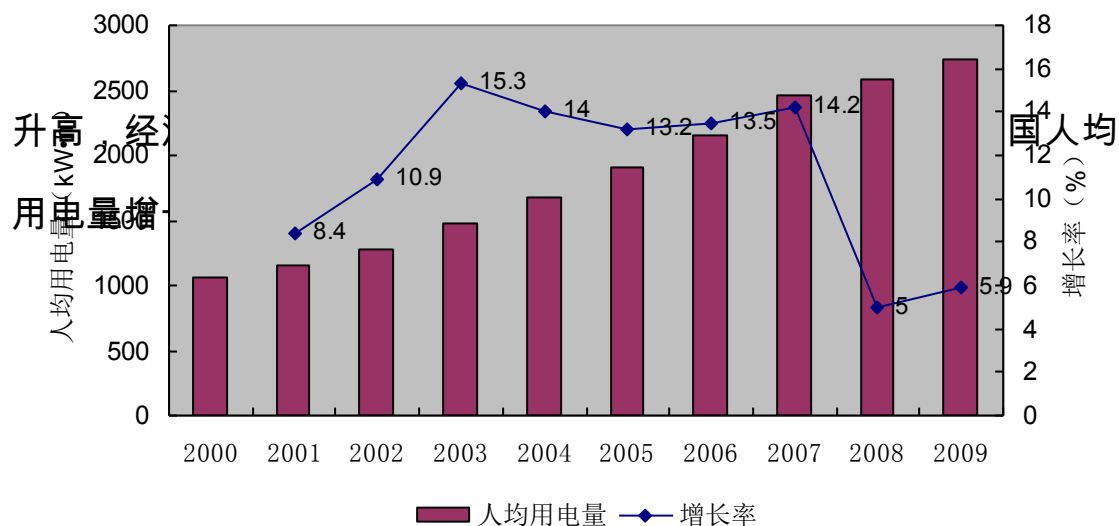


图7-2 全国人均用电量增长趋势

用电结构方面，自改革开放以来，用电结构明显改善，居民和三产用电比重稳步提高。1978~1985 年，全国用电结构比较稳定，第二产业用电量占到 82%以上，第一产业和第二产业用电比重略有下降，居民生活用电比重略有上升。1986 年以来，第一产业用电比重呈缓慢下降趋势，至 2009 年为 2.59%。第二产业用电比重先将后升，其中 2001 年达到最低点，为 72.51%，至 2009 年又升至 74.14%，用电结构的重工业化趋势十分明显。第三产业由于基础薄弱，发展速度较快，用电比重持续上升，2002 年达到 11.21%，之后由于进入重工业化阶段，第二产业加速发展，使得第三产业用电比重有所下降，到 2009 年比重降为 9.56%。居民生活用电增长最快，并与 1991 年开始超过第三产业用电，居民生活用电已从基本的照明和电视机、洗衣机等家电发展到厨房、卫浴、空调等用电功率较大的大型家用电器，到

2009 年居民用电比重达到 12.49%。2000 以来全国各产业用电结构变化趋势如图 7-3。

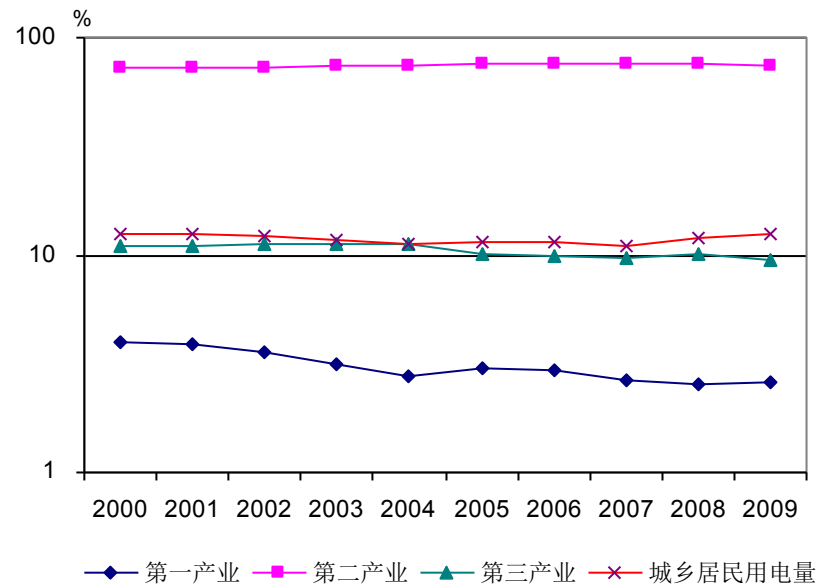


图7-3 全国各产业用电结构变化趋势

7.1.2 电能消费趋势

未来一段时期，我国将进入全面建设小康社会阶段，经济发展进入持续快速发展阶段。党的十七大提出，到 2020 年实现人均 GDP 比 2000 年翻两番，未来 10 余年我国经济仍将保持年均 7.0~8.0%左右的增长速度。

从用电结构上看，从工业化进程来看，我国将沿着资源节约型、环境友好型的新型工业化道路，经历工业化中期、工业化后期，到 2020 年基本实现工业化，这期间工业化仍将是我国用电增长的重要推动力量，工业用电占主导地位的用电格局短时间内不会发生改变。从城市化进程来看，根据国际经验，城市化率在 30%~70%之间为中级阶段，城市化水平呈现加速趋势。我国城镇化率 1996 年为 30.48%，

1996~2007 年平均每年提高 1.31 个百分点，按这样的速度发展，到 2020 年我国城镇化率将接近 60%，城镇化将继续促进以住房、汽车等为核心的消费升级，从而带动电力需求的快速增长，人均生活用电水平将得到极大提高，居民生活用电比重将会持续上升。

从技术进步的角度来看，我国提出了建设创新型国家的重大战略抉择，把科技进步作为经济社会发展的首要推动力量，力争到 2020 年科技进步贡献率达到 60%以上。技术进步尤其是电能利用技术进步将促进电气化水平提高，预计到 2020 年我国电力在终端能源消费比重将达到 24%左右；另一方面，技术进步将促进产值电耗下降，预计到 2020 年，我国电耗水平将较目前下降 25%左右。总体上看，由于我国仍将处于经济快速发展时期，技术进步仍将促进用电量的增长。综上所述，在工业化和全面建设小康社会的带动下，预计我国到 2020 年全社会用电量将达到 6.5~7.5 万亿 kWh，年均增速将达到 5.5%~6.6%；人均用电量将达到 4500~5200kWh。

7.2 智能用电技术的发展现状分析

智能用电作为智能电网的重要组成部分，是实现电网与客户实时交互响应、增强电网综合服务能力、提高用电效率、促进节能减排的重要手段。我国电网建设普遍存在“重发输电，轻配用电”的状况，用电系统建设相对薄弱，自动化、信息化、智能化程度不高，这就难以实现用电系统的信息化、自动化、标准化管理，以及电力企业和电力用户的双向信息交互。20 世纪 90 年代中期，各网省电力公司开始对用电系统的标准化、自动化建设进行有益探索。在标准化建设方面，

浙江、黑龙江等省相继出台了关于现场管理终端和低压集中抄表系统一系列标准和技术规范。在应用方面，江苏、浙江等省在低压用户集中抄表系统方面做出一定的探索。在大用户、台区抄表中大量使用的负荷管理终端和配变监测终端，由于采用了 GPRS 公网通信、230M 无线或光纤等方式，得到了广泛的应用，积累了丰富的运行经验，取得了良好的经济效益。2006 年起，黑龙江、河北等省积累的新一代低压用户集抄系统的建设经验，也为实现智能用电的建设打下了坚实的基础。

近年来智能用电技术在我国得到了有力推广，北京、上海、天津、重庆、江苏泰州、河北廊坊等地陆续开展了具有用电信息采集、双向互动服务、分布式电源管理、电动汽车有序充电、智能家居等功能的智能用电小区试点。国家电网公司于 2009 年 11 月启动的“智能用电小区关键技术研究”项目在 2010 年 10 月通过验收。该项目首次明确了以“友好互动、清洁环保、安全可靠”为特征的智能用电小区概念，构建了完整、系统的关键技术体系架构，在智能用电小区功能模型、通信方式、商业模式、关键设备、软件架构等关键技术研究上达到国际先进水平，为智能用电小区的研究、建设、推广和运营奠定了理论和实践基础。该项目研发的智能用电交互终端、智能用电交互机顶盒、智能插座等核心设备和主站系统拥有自主知识产权，可为用户提供个性化、多样化、便捷化、互动化的服务。通过智能插座采集分析家电用电信息为用户提供最优用电建议，并可实现家用电器远程控制、电动汽车充放电、物业智能管理等功能；通过光纤复合低压电缆入户，

用户可同时享受电话、电视、上网等三网合一服务；通过智能交互终端，用户可在家中查询电价和家庭用电信息并缴纳电费。该项目相关研究成果已在国家电网公司智能电网试点工程及上海世博会国家电网馆中得到应用，对智能电网建设、发展低碳经济发挥了促进和示范作用。

我国智能用电技术的发展和建设是一个持续、渐进、丰富和完善的过程。在智能用电技术研究的整体思路须遵循“明确目标，滚动修正，持续提升、深化完善”的科学发展观。因此智能用电的发展既要立足于目前发展期的现实，又要兼顾未来成熟期的前景；既要满足近期需要，又要适应未来发展。智能电网发展的趋势不可逆转，智能用电新技术的研究和应用必将为智能电网建设注入强劲的动力。

7.3 电动汽车技术的发展现状分析

汽车产业是国民经济重要的支柱产业，产业链长、关联度高、就业面广、消费拉动大，在国民经济和社会发展中发挥着重要作用。在应对气候变化的国际环境下，全球都在全力部署低碳技术的发展与应用，电动汽车是其中举足轻重的技术之一。我国也在积极走向可持续的发展道路，在温室气体减排的政策领域提出了到 2020 年单位国内生产总值（GDP）二氧化碳排放比 2005 年下降 40~45% 的目标，并将其与加快经济发展方式转型、激发内生创新活力紧密联系。在这样的背景下，具有重要社会价值和深远战略意义的电动汽车技术在我国面临着难得的发展机遇。

我国的电动汽车技术从 20 世纪 70 年代起步，90 年代进入发展

期。在各大汽车制造公司的联合推动下，经过“八五”、“九五”、“十五”三个五年计划取得了一系列科研成果，得到了飞速发展。“十五”期间，国家设立了电动汽车重大科技专项，选择新一代电动汽车技术为主攻方向，组织企业、高等院校和科研机构，以官、产、学、研四位一体的方式联合攻关。专项确定了“三纵三横”的研发布局，以燃料电池汽车、混合动力电动汽车、纯电动汽车三种车型为“三纵”，多能源动力总成控制系统、驱动电机及其控制系统、动力蓄电池及其管理系统三种共性技术为“三横”，全面构筑我国电动汽车自主开发技术平台（如图 7-4 所示）。截止到 2010 年 2 月，工信部已经在《节能与新能源汽车示范推广应用工程推荐车型目录》中分 7 个批次发布了 57 个车型的乘用车和商用车，其中纯电动汽车 29 种，混合动力电动汽车 28 种

¹⁰。

10.数据来源：工业和信息化部，2009~2010，《车辆生产企业及产品公告》

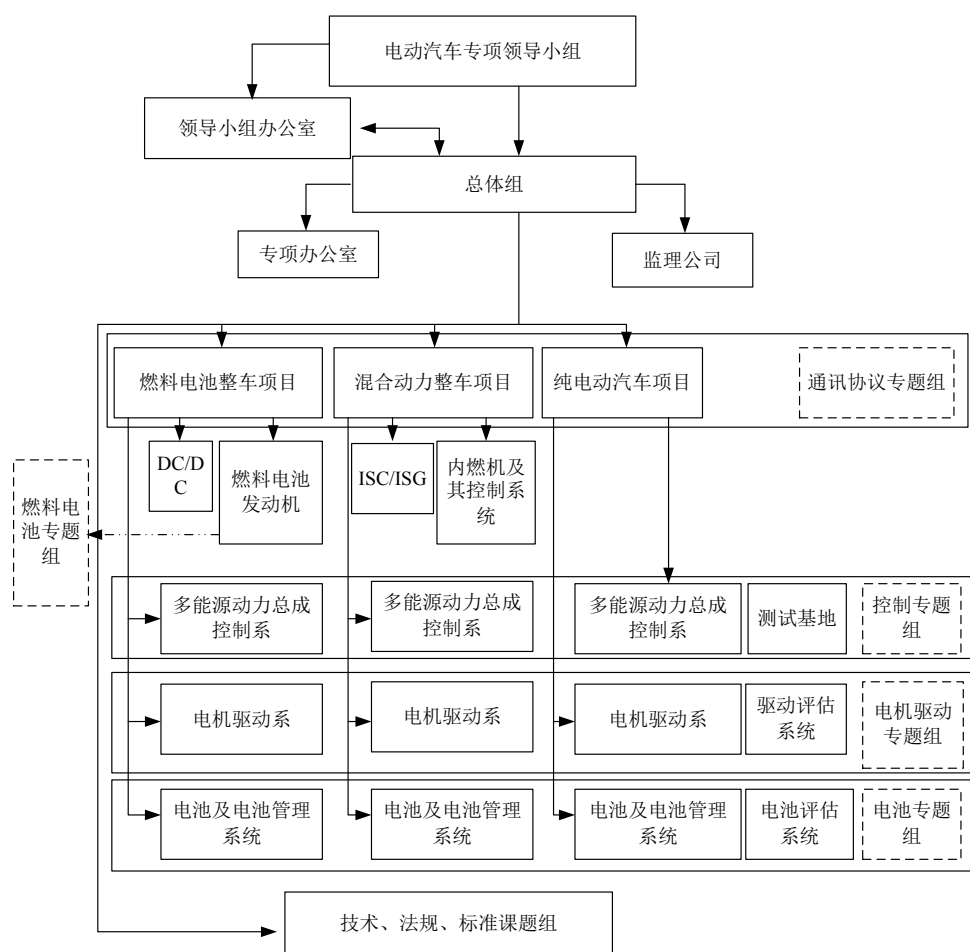


图 7-4 我国电动汽车自主开发技术平台组织体系

根据我国电动汽车的发展现状看来(表 7-1),当前的总体发展状况可概括为:1)纯电动汽车技术成熟,已在特定区域推广应用。近年来,纯电动车已经开始成为我国汽车行业的一个重点发展方向,我国在纯电动汽车的电池和电机技术上发展迅速,动力蓄电池、高功率镍氢电池、锂离子等电池的性能有了较大提高,已能为整车提供基本符合要求的产品。2)混合动力汽车技术渐趋完善,进入商业化推广阶段。混合动力汽车是我国新能源汽车的研究热点,已经实现小规模的产业化生产。3)燃料电池汽车技术处于新的突破前期,正在成为新的研发重点。清华大学、同济大学已分别开发出与国际水平相接近的燃料电池电动客车和电动轿车,整车操控性能、行驶性能、安全性

能、燃料利用率等均达到国际先进水平。与此同时，我国车用燃料电池发动机也取得重大突破，进入世界前列；大功率车用动力蓄电池性能显著提高，形成产业基础；驱动电机技术性能先进，与整车集成化程度逐步加强；车辆电控技术异军突起，电动化汽车底盘发展迅速，带动了传统汽车的技术进步。

表 7-1 我国电动汽车发展现状

年份	概况
2001 年	电动汽车重大科技专项正式启动，并在电动汽车关键单元技术、系统集成技术和整车技术上取得重要进展。
2003 年	北京、天津、武汉、深圳等 7 市及国家电网公司开展了新能源汽车小规模示范运行考核，取得了较好的效果。
2008 年	奥运期间，集中投入了 595 辆自主研发的混合动力、纯电动汽车和燃料电池电动汽车，实现了我国电动汽车规模化、集中化、高强度的成功应用。
2009 年	科技部、财政部、发改委、工信部四部门组织启动了“十城千辆”工程，计划 3 年多的时间推广示范 6 万辆电动汽车。

从远期来看，《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》明确指出，电动汽车的相关技术将是一段时期内交通运输行业的重点研究领域之一。正在起草的科技部“十二五”规划中，电动汽车也将继续享有重要地位。从电动技术的分类看来，由于我国锂离子动力电池技术已达国际先进水平，产业化条件基本成熟，纯电动汽车无论是在技术还是企业参与度上都更有优势，其零排放、零污染的环保

优势和相对其他类型电动汽车而言的价格优势也更容易被公众认可。混合动力电动车是我国目前可以小批量生产、替代燃油汽车、减少废气排放较现实的电动车。未来混合式电动车在其特定市场范围内的商业化生产将持续增长，增长速度取决于价格因素。我国燃料电池汽车在整车操控性能、行驶性能、安全性能、燃料利用率等均达到国际先进水平，但现阶段由于其成本高、价格昂贵以及技术方面的制约，再加上配套设施如加氢站和输送管道等的不完善，近几年内难以实现真正意义上的产业化。总之，混合动力汽车在目前的高油价时期虽然具有更好的燃油经济性，并且能满足高排放标准的要求，但是由于只是对现有汽车技术的相对改进，所以仅能作为一种过渡路线；而纯电动汽车和燃料电池汽车在使用过程中能够实现零排放，并完全摆脱了对石油资源的依赖，将成为我国电动汽车发展的最终目标。

7.4 电能消费终端低碳技术发展的障碍分析

我国人口众多，电能消费前景广阔，这为我国智能用电技术和电动汽车的发展创造了特有的市场条件。由现状分析可知，我国在智能用电和电动汽车方面已经开展了大量工作，政府和企业都投入了相当的人力物力，也取得了可观的成果。但迄今为止，智能用电还未能快速推广，电动汽车也未真正实现商业化运作，也即电能消费终端低碳技术的优先发展优势还未充分体现，其主要原因在于技术发展过程中面临着种种障碍，以下以电动汽车技术为例进行说明。

7.4.1 政策障碍

1) 尚未明确电动汽车中长期发展规划。规划和政策滞后，是影响我国电动汽车发展的最重要原因。我国电动汽车的发展，目前的情况是政策滞后于市场和企业的发展，未有效发挥政府与政策对电动汽车发展的先导作用。虽然已经出台了一系列电动汽车产业政策，但由于缺少对电动汽车产业发展的长远规划，使得政策变动较大，对各类型电动汽车扶持力度不足，覆盖面较小，政策支持体系调整落后于产业发展。此外，由于政策规划不明朗，电动汽车产业发展技术路线图以及产业路径在业界还未达成共识。在技术路线图方面，形成了先发展纯电动汽车、从混合动力电动汽车开始发展、多种技术共同发展等三种主要观点；在产业发展方面，出现了自主研发、市场换技术和进口零部件采购集成三种路径。采用何种技术路线及产业路径直接影响到我国电动汽车的产业化发展，因此政策规划须适当超前、充分发挥行业引导作用。

2) 电动汽车的产业化缺乏财税政策支持。根据电动汽车发展现状，我国财税政策支持主要停留在示范运行阶段，对产业化和大规模发展后电动汽车的购置税和进口税等，缺乏相应的政策支持。此外，随着以电动汽车为首的新能源汽车成为“十二五”期间的重点扶持对象，2010 年中央财政、各地方财政纷纷明确拿出“重金补贴+政府扶持”的双重刺激措施。按照初步规划，未来我国将投资 1000 亿元支持新能源汽车产业的发展。补贴资金看似庞大，从市场发展看来，却存在研发投入多，市场投入少；远期投入多，中期投入少；整车投入多，关键零部件投入少等局面，这在一定程度上制约了电动汽车的产业化

发展，因此与欧美等发达国家相比，中国的电动汽车产业补贴政策尚有缺憾。

3) 充电配套设施建设缺乏政策明示。与电动汽车发展息息相关的是充电配套措施。目前我国的充电站很少，虽然国内各大电网和能源公司已陆续提出了充电站建设规划，但大规模电动汽车基础设施建设尚未全面展开，这给电动汽车的推广应用带来了极大的不便，严重影响电动汽车的消费需求。充电站建设运营存在的投资规模大、经济性难以保障、投资回收期长等问题，降低了各利益相关方投资建设的积极性。这就需要政府出台相应政策，以提升各方投资积极性，进一步完善我国电动汽车充电配套设施建设，使其与电动汽车产业发展和市场需求相协调。

7.4.2 技术障碍

1) 汽车工业基础薄弱。虽然我国在新兴的电动汽车（尤其是 BEV）领域与欧美日等汽车工业发达国家的技术差距不大，但电动汽车发展（尤其是 HEV）毕竟还是建立在现有汽车工业基础之上。由于我国传统汽车制造技术水平仍然与世界先进国家存在较大差距，主要在设计研发、关键零部件制造以及整车安装三大方面较为落后。其中，在整车和底盘设计研发方面的落后尤为突出，这主要是由于起步较晚，造成了积累较少、缺少完整的汽车设计实验数据库等问题。在核心零部件方面，发动机、变速箱等关键部件的研发水平、制造工艺等方面与国际先进水平差距较大。从整车安装来看，中国企业采用人工操作的比例仍较大，尽管这能够给本土企业带来成本优势，但是也

会导致产品品质不够稳定。

2) 电池技术尚未成熟。比较我国动力电池技术指标和美国先进电池联合会 (USABC) 制定的长期研发目标可以发现, 当前技术尚无法完全满足电动汽车大规模应用的要求, 其首要矛盾是在能量密度、寿命和经济性三个方面无法取得完美平衡。现阶段被广泛应用于先进电动汽车上的动力电池技术主要是镍氢动力电池技术和锂离子动力电池技术。我国是锂离子电池的生产大国, 约占全球 25% 的市场份额, 具有较好的产业基础。从整体来看, 国内的锂离子动力电池生产技术距离国际先进水平仍有差距, 某些核心技术和材料 (如隔膜、电解液用高纯度六氟磷酸锂等) 尚未形成产业化生产能力, 电池产品在某些重要性能指标 (包括能量密度、寿命、一致性和安全性等) 仍落后于国际先进水平。

3) 电机和电控仍需优化。与电池相比, 电机与电控系统虽然对电动汽车性能和成本的影响相对较小, 但对于高性能的电动汽车来说至关重要。高性能的电动汽车对电机系统的要求很高, 需要电机能够具有恒功率输出、高功率密度、较大的转速范围、快速的转矩响应特性、高能量效率、在不同环境下保持可靠性、成本低等特征。目前, 国内生产的电机在能源效率、控制精度和可靠性等方面仍落后于国际先进水平, 在产品研发和制造工艺上需要进一步提升; 电控系统中的某些关键部件 (如功率开关元件 IGBT 等) 主要依赖进口, 国内设计的电控系统往往存在自动化程度不高、操作性差、故障率高等问题。

4) 技术标准及检测认证体系有待完善。技术标准与检测认证

体系是推广电动汽车及其相关产业的重要措施。我国已制定一系列电动汽车的相关标准，初步形成了电动汽车技术的标准体系。但仍存在技术标准较低，标准制定围绕电动汽车本身，车用燃料标准、充电设施电流电压标准、基础设施标准缺乏等问题。此外，虽然我国已建成数个新能源汽车检测试验基地，但技术发展较国际先进水平相对滞后，检测技术有待提高，缺乏具有公正性、权威性的国内检测体系。如我国车用电池技术相对先进，但在对大功率动力蓄电池检测等方面，国内在检测方法和检测设备方面均较为落后；在电池寿命检测方法方面国内也缺乏相关的研究和标准。以上问题增加了相关企业技术研发以及产业推广的风险，阻碍了电动汽车的大规模发展。

7.4.3 管理障碍

1) 缺乏有效的市场管理机制。电动汽车真正步入市场并健康发展，需要政府、电动汽车生产厂家、电池配套厂商、电力企业等相关部门的通力合作，其中有效的市场管理机制，是引导其健康快速发展的关键。近年来我国电动汽车发展迅速，随着发展规模的扩大，电动汽车市场中的种种问题逐步凸显，如充电站投资主体不明确，充电站充电电价标准不一，便捷安全的收费方式有待进一步研究等，因此从电动汽车技术、充电设备的研发到建充电服务体系的完善，我国还有较长的路要走。

2) 技术人才激励机制有待完善。技术人才在电动汽车产业发展中起着主体作用，如何对其进行激励成为管理的中心问题。多年来，为调动电动汽车技术人才的积极性和创造性，我国有过大量的探索与

实践，如提高薪酬待遇、专业技术任职资格评审、科技进步奖励等方式。但激励手段缺乏针对性，绩效期望值过高，激励方式不当等问题普遍存在，针对技术人才的激励体系尚不完善，有效的激励机制尚未形成。此外，至今多数电动汽车厂商尚未形成一套系统有效的考核体系，建立科学、公正、公平的激励机制已显得十分迫切。