

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

新能源机车 技术与应用

New Energy Locomotive Technology and Application

陈维荣 李 奇 戴朝华◎著



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

新能源机车技术与应用 / 陈维荣等著. —成都:
西南交通大学出版社, 2020.12
“十三五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5643-7927-8

I. ①新… II. ①陈… III. ①新能源—机车—研究
IV. ①U267.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 267464 号

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
Xinnengyuan Jiche Jishu yu Yingyong
新能源机车技术与应用

陈维荣 李 奇 戴朝华 / 著

出 版 人 / 王建琼
责任编辑 / 何明飞
封面设计 / 曹天擎

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)
发行部电话: 028-87600564 028-87600533
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 240 mm
印张 19 字数 273 千
版次 2020 年 12 月第 1 版 印次 2020 年 12 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7927-8
定价 180.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序 言

FOREWORD

随着城市化进程的不断加快，城市人口持续增加，交通拥堵已成为各大、中城市所面临的巨大问题。为了缓解交通拥堵以及由此引起的环境污染等问题，发展轨道交通已经成为未来城市发展的重要趋势。轨道交通行业的快速发展为我国城市建设和经济发展提供了重要支撑，在国家经济建设中具有举足轻重的地位。轨道交通的高能耗引发的能源与经济问题逐渐受到重视，学界正积极探索如何实现轨道交通领域的绿色节能和可持续发展新途径。

近年来，世界范围内的能源短缺和环境污染问题日益严重，对经济的可持续发展带来严重的影响。加大研发和利用清洁、可再生能源已成为世界能源发展的必然趋势。面对环境保护、能源安全等问题的挑战，合理利用新能源技术，研发绿色、清洁、环保的新一代轨道交通工具，已经成为我国交通产业节能减排的重要发展方向。

陈维荣教授所带领的研究团队，长期从事轨道交通新能源技术与应用的研究与教学工作。该研究团队在燃料电池、储能以及太阳能轨道机车的优化控制、能量管理等方面做了大量的基础研究工作，取得了一系列创新性成果。特别是研究团队在我国率先开展了大功率燃料电池在轨道交通中的应用，开创了氢能轨道交通研究方向，并于 2013 年成功研制出我国首辆燃料电池调车机车，2016 年成功研制出世界首

列燃料电池/超级电容混合动力有轨电车,促进了我国新能源轨道交通技术的发展。

本书是陈维荣教授及其团队多年研究成果以及本领域的相关技术进展的总结与归纳,阐述了燃料电池、太阳能、储能在轨道交通中应用的关键技术与应用现状,具有重要的学术与应用价值,也对从事新能源轨道交通技术领域的科研人员和工程技术人员具有重要的参考价值。

A handwritten signature in black ink, reading '陈维荣' (Chen Weirong).

2020 年 10 月

前 言

PREFACE

在全球能源危机和气候变暖的背景下，可再生能源的开发、多元化与高效的能源利用已经成为人类可持续发展的必然选择。太阳能、风能、氢能、生物质能、地热能、潮汐能、核能等新能源发电技术已经在发电、建筑、交通等各个领域得到广泛的应用。

轨道交通行业的快速发展为中国城市建设和经济发展提供了重要支撑，在国家经济建设中具有举足轻重的地位。由于轨道交通的里程长、运量大，其能源消耗不容忽视，已经成为交通运输行业耗能大户。为促进我国轨道交通的可持续发展，发展环保、高效的新能源轨道交通具有显著的社会效益和巨大的潜在经济效益。

新能源机车是一种以新能源作为动力源的新型供电制式轨道机车，是轨道交通节能减排的重要途径之一。目前，新能源机车已朝着研发多样化、产品集中化和大规模运营化迈进，形成以燃料电池电动机车和储能式电动机车为主，其他多种新能源机车为辅，且城市轨道交通应用与工程作业机车应用同步发展的创新局面。相对传统的电力机车和内燃机车而言，以燃料电池、储能式、混合动力和太阳能电动机车为代表的新能源机车具有低/无排放、节能清洁和低噪声等优点，可广泛应用于站场调车、工程作业车和城市有轨电车等领域。

本书重点介绍了作者所在的科研团队长期从事新能源机车研究所取得的研究成果和本领域的一些技术进展总结，以及中国首辆燃料电池电动机车和世界首列燃料电池/超级电容混合动力有轨电车的工程应用经验。全书围绕燃料电池、锂电池、超级电容及太阳能电池的基本原理与核心技术，

以及新能源在机车车辆应用的关键技术展开，共分为7章：第1章详细介绍了新能源机车的主要类型、发展现状与发展趋势；第2、3章分别讨论燃料电池、动力蓄电池与超级电容的基本原理、核心技术以及典型应用；第4、5、6章分别介绍燃料电池电动机车、储能式电动机车以及燃料电池混合动力机车的系统结构、控制与管理技术以及典型应用；第7章介绍了轨道交通车载太阳能发电技术及其初步应用。

本书第1章由陈维荣撰写，第2、4章由李奇、韩莹、张雪霞撰写，第3章由张雪霞和郭爱撰写，第5、6、7章由戴朝华、韩莹、陈维荣撰写，全书由陈维荣统稿。在本书的写作工程中，得到了中车唐山机车车辆有限公司孙帮成、李明以及中车四方机车车辆股份有限公司李艳昆的大力支持，研究生彭飞、卜庆元、王天宏、孟翔、张国瑞、燕雨、尹良震、邱宜彬、蒲雨辰等也为本书的完成做出了贡献。在此，向他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。同时，还要特别感谢钱清泉院士对本书相关研究工作的指导和支持。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金（52077180，51977181，52007157）、四川省科技计划项目（19YYJC0698）、教育部霍英东教育基金会高等院校青年教师基金（171104）的资助，在此致谢。

由于作者水平有限，书中可能存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2020年11月于成都

目 录

CONTENTS

第 1 章	绪 论	001
1.1	新能源机车的研究意义	001
1.2	新能源机车的分类与优势	012
1.3	新能源机车的发展现状	019
1.4	新能源机车的发展趋势	030
第 2 章	燃料电池技术	033
2.1	燃料电池技术概述	033
2.2	燃料电池工作原理	037
2.3	燃料电池系统机理模型	040
2.4	控制系统	055
2.5	工程应用	074
第 3 章	动力蓄电池与超级电容技术	079
3.1	动力蓄电池	079
3.2	超级电容	090
3.3	动力蓄电池管理技术	097
3.4	混合动力系统结构及管理策略	110
3.5	工程应用	129
第 4 章	燃料电池电动车	134
4.1	燃料电池机车概述	134
4.2	整车动力系统	135
4.3	控制系统	145
4.4	车载储氢系统及其安全性	151

第 5 章 储能式电力机车	156
5.1 储能式有轨电车概述	156
5.2 储能式有轨电车动力系统拓扑结构	158
5.3 车地一体化动力系统容量配置模型	159
5.4 车地一体化动力系统容量配置方案	173
5.5 工程应用	184
第 6 章 燃料电池混合动力机车	189
6.1 燃料电池混合动力机车概述	189
6.2 燃料电池混合动力系统拓扑	189
6.3 机车用燃料电池混合动力系统	194
6.4 混合动力能量管理策略	197
6.5 有轨电车运行控制	213
6.6 混合动力系统整车试验	217
6.7 混合动力机车应用前景	222
第 7 章 太阳能技术在轨道交通中的应用	224
7.1 太阳能技术在轨道交通中的应用概述	224
7.2 光伏组件及单体输出特性	230
7.3 车载光伏发电系统接入方案	238
7.4 车载光伏发电系统样车	244
7.5 车载光伏发电系统全局最大功率追踪策略	254
7.6 车载光伏发电系统能量管理策略	274
参考文献	279

1.1 新能源机车的研究意义

1.1.1 能源与环境

工业革命以来的技术进步发掘了人类利用能源的巨大潜能，源源不断的能源投入奠定了工业化进程的基础，经济对能源的依赖程度不断提高，以煤炭、石油和天然气为代表的常规化石能源被大量消耗，能源危机日趋严重^[1,2]。据估计，化石能源将在 21 世纪上半叶迅速地接近枯竭^[1]，同时，化石能源的消耗所带来的空气污染、全球气温升高等生态环境问题也日益突出。20 世纪初期英国伦敦“雾都”的形成，我国当前有时出现的雾霾天气以及全球的温室效应，高碳化石能源的大规模利用皆是其主要原因^[1,6,7]。因此，积极开发新能源和可再生能源，减少常规高碳化石能源消耗，减少温室气体排放，已成为许多国家在能源领域的国家战略。

改革开放后，中国经济高速增长，国内生产总值（GDP）从 1978 年到 2019 年的年均增速达 9.66%，但这一过程伴随着巨量能源消耗和高昂环境成本的问题^[2-4]。图 1.1 所示为 2019 年世界主要国家的基础能源消耗量和 CO₂ 排放量。从图中可知，与世界其他国家相比，我国无论能源消耗量还是 CO₂ 排放量都处于世界最高。并且，中国目前处于快速工业化和城市化进程阶段，而且该进程还将持续一段时期，未来我国能源消耗和废物排放仍可能持续增长，由此也会带来能源短缺和生态环境问题^[2]。

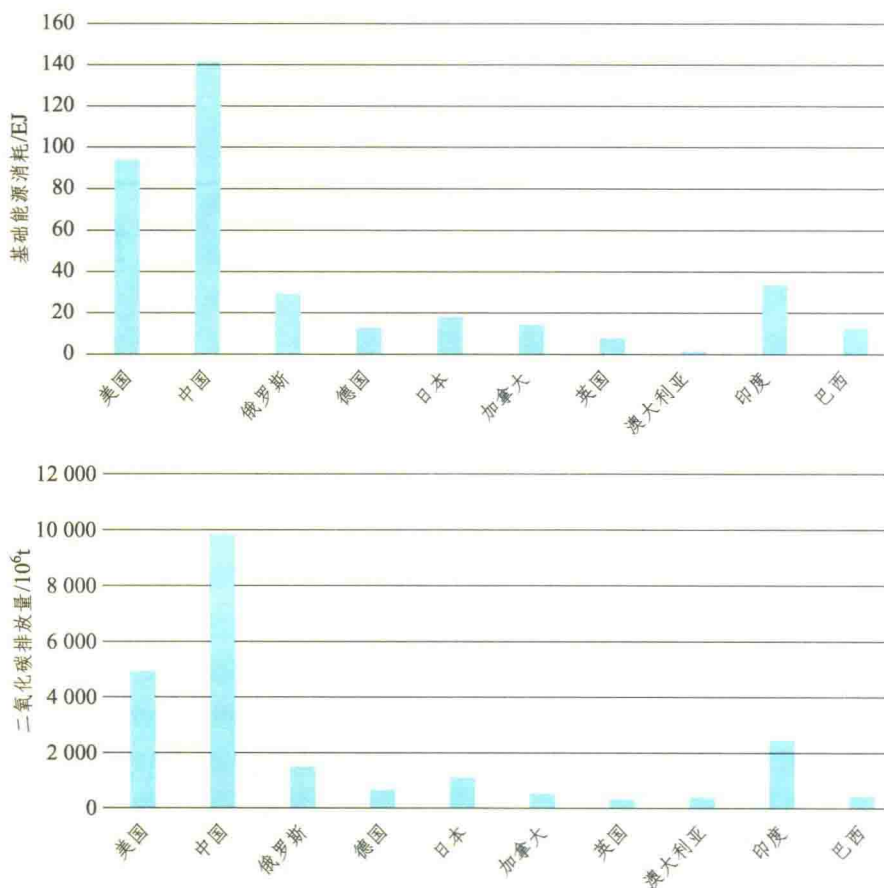


图 1.1 2019 年世界主要国家能源消耗、CO₂ 排放量（据 BP 世界能源统计）

2020 年 9 月 22 日，我国在第七十五届联合国大会上明确提出，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这是中国首次提出碳中和目标，也是中国在《巴黎协定》之后为世界气候变化做出的一次明确部署。从碳排放情况看，这意味着中国的净碳排放需要从 100 多亿吨降至零吨，这是一项巨大的挑战。实际上，中国早已认识到采用新能源、减少碳排放的重要性并从政策上进行部署，如国家“十二五”相关规划中，新能源有关的产业都被列为重点

发展和战略性新兴产业而加以扶持，进行规模化发展。可再生能源发展“十三五”规划中明确指出：“‘十三五’时期要不断完善可再生能源扶持政策，创新可再生能源发展方式和优化发展布局，加快促进可再生能源技术进步和成本降低，进一步扩大可再生能源应用规模”。此外，国家对于环境问题的重视程度逐渐提升，在党的十八大确立的“五位一体”总体布局中再次提升了生态文明的战略地位，要把生态文明建设融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程。因此，立足于中国国情，为实现可持续发展，在绿色发展理念的指导下，积极开发利用新能源，优化能源消费结构，是目前可以同时解决能源与环境问题的唯一途径。

1.1.2 轨道交通与经济社会

随着城市化进程的不断加快，城市人口持续增加，交通问题已成为各大、中城市面临的问题。为了缓解交通拥堵以及由此引起的环境污染等问题，应选择优先发展公共交通^[6-8]。随着城市交通需求的不断增长，应大力发展与城市基础建设、土地利用状况以及资源和环境承受能力相匹配的交通运输方式。轨道交通具有运量大、准点率高和节能环保的特点，已经成为未来城市公共交通系统的发展趋势。

城市交通可以分为城市对外交通和城市内部交通。城市对外交通是指一个城市与其他城市和地区之间的交通，城市内部交通则是指城市范围内各种人和物的流动^[7]。因此，轨道交通也包括城市对外交通和对内交通。对外交通通常称为铁路交通，包括干线铁路、城际铁路、市域铁路和市郊铁路；对内交通则称为城市轨道交通。二者相辅相成，互为补充，共同促进城市经济的快速发展。

铁路主要承担城市间的货物和客流运输，具有安全、经济、运量大、高效、节能、省地等优势，是国民经济发展的主动脉。截止到2019年年底，我国铁路运营里程已达13.9万千米，输送旅客36.6亿人次，输送货物43.9亿吨。铁路运输系统的不断发展和提高，已成为改善民生

和推动经济发展的重要力量。

城市轨道交通属于城市公共交通，是对公交系统的有效补充。我国从 20 世纪 80 年代开始陆续对城市轨道交通建设做出相关规划，目前我国运营的城市轨道交通线路已经发展成为以地铁、轻轨为主，多种制式协调发展的格局。截止到 2019 年年底，中国内地 40 座城市已经建成 208 条城市轨道交通运营线路，总里程 6 736.2 km，地铁占比为 77.07%，轻轨占比为 3.08%，现代有轨电车、磁悬浮和市域快轨占比分别为 6.03%、0.86%和 10.63%。

轨道交通行业的快速发展为中国城市建设和经济发展提供了重要支撑，在国家经济建设中具有举足轻重的地位。然而，轨道交通的建设和运营维护成本很高。同时，虽然城市轨道交通人均能耗仅仅相当于公交车的 1/2，但是由于运量大，其总能耗也非常大，已成为交通运输行业耗能大户。2018 年，第三届中国城市轨道交通节能技术高峰论坛指出，未来我国地铁的年耗电量将达到 400 亿千瓦时，约占全国总电耗的 5%。其中，2019 年广州市地铁全年运营总能耗就达到了 17.24 亿千瓦时。轨道交通的高能耗引发的能源与经济问题不容小觑，因此学界正积极探索如何实现轨道交通领域的绿色节能。

我国已在国家层面制定了战略规划，把在轨道交通行业推广应用新能源和可再生能源作为行业节能减排的长远性目标，以加快轨道交通行业的低碳化，构建更加绿色、环保、可持续发展的轨道交通系统。

1.1.3 新能源技术

世界的现代化进程，得益于化石能源的广泛应用，然而全球经济的迅速发展对能源的需求不断上升，加速了世界能源短缺进程，加重了全球空气污染程度，对全球经济的可持续发展造成了严重威胁，而克服能源危机的有效出路则是大力发展新能源。

新能源一般是指在新技术基础上加以开发利用的可再生能源，是相对传统能源说的其他能源，包括太阳能、风能、生物质能、地热能、潮汐能、氢能、核能等，目前主要以太阳能和风能为主。新能源具有安

全、绿色、清洁、可再生等特点，符合低碳经济的概念和环境保护要求，目前已经在发电、汽车、建筑等各个领域得到广泛的应用。

图 1.2 所示为 2010—2019 年全球光伏发电、风力发电装机容量。从图中可以看出，全球新能源，在近 10 年内，装机容量呈较大幅度增长。图 1.3 为 2011—2019 年我国清洁能源发电装机容量及发电量。从图中可知，我国清洁能源的装机容量快速增加，能源重心正在向清洁能源倾斜。9 年时间，我国清洁能源的发电机容量及发电量增长近 2 倍，光伏和风能的装机容量目前已居世界第一，已经成为世界清洁能源大国^[9]。



图 1.2 2010—2019 年全球光伏、风电装机容量

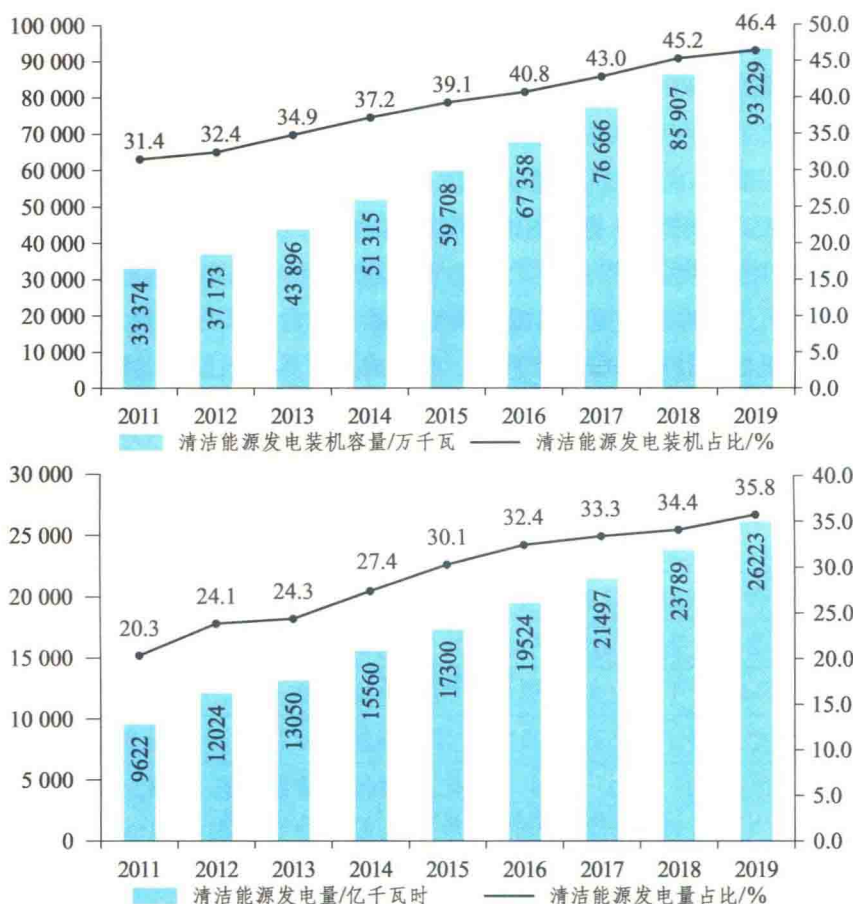


图 1.3 2011—2019 中国清洁能源装机容量与发电量

太阳能具有经济、长久、普遍、洁净安全且蕴量丰富等特点，在社会生活中已具有多种不同的利用形式，如太阳能照明、太阳能取暖、太阳能空气集热器以及太阳能光伏发电等^[10,11]。其中，太阳能光伏发电技术近 20 年来受到世界各国的密切关注。光伏发电是将太阳能转化为电能的技术，发电系统主要由光伏电池板、控制器和逆变器三大部分构成。光伏电池板将接收到的太阳能经过高频直流变换后变成高压直流电，然后经过逆变器逆变后变成可以直接利用或是向电网输出与电网电压同幅的正弦交流电流。与常规的发电技术相比，太阳能光伏发电几乎不受

地域条件的限制,具有安全可靠、无噪声、无污染、维护简单、使用寿命长等优点,既可以一家一户分散供电,又可以大规模集中供电或并网运行,有望成为未来能源的主力军之一。中国太阳能资源极其丰富,主要集中在青藏高原、甘肃北部、宁夏北部和新疆南部等地,特别是西藏地区,太能辐射总量最高值达到 $9\,210\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,仅次于撒哈拉大沙漠,居世界第二。目前,我国已经建成多个典型光伏发电应用项目,如深圳园博园光伏发电系统、西藏羊八井并网光伏电站、内蒙古伊泰集团太阳能聚光光伏电站等。此外,光伏发电系统还可以与生物质能发电系统或风力发电系统等组合进行发电。

目前,风能的主要利用方式是风力发电,在新能源的开发和利用过程中占据了重要地位。据估计,全球的风能总量有 2.7 万亿千瓦,其中可利用的约为 200 亿千瓦,因此风力发电是各个国家都大力发展的一种新能源,已经有超过 100 个国家开始用风力发电,世界风能累计装机增长速度增长超过 20%^[12,13]。在许多国家,风能已经成为重要的电力供应^[14],如西班牙预计在 2020 年风力发电量占到电力供应的 15% 以上,丹麦风能发电量超过了电力供应的 20%,葡萄牙、德国等国家的风力发电量所占份额也较高。我国地域辽阔,地形复杂多样,又紧邻太平洋,具有极其丰富的风力资源,据估计可开发利用的风能储量约达到 10 亿千瓦,因此大力发展风力发电对我国调整能源结构、实现节能减排具有重大的意义。“十三五”规划期间,我国的风电装机容量迅速增长,目前装机容量世界第一。

水能的利用目前主要采取水力发电。开发水能对于江河的综合治理和综合利用具有重要作用,能够促进国民经济的发展。除了具有清洁环保、可再生的优点外,水力发电能够在几分钟内迅速启动投入运行,在几秒钟内完成增减负荷的任务,适应电力负荷变化的需要^[15]。在电力系统承担调峰、调频、负荷备用和事故备用等任务,有助于提高系统的可靠性和经济性。

生物质能指太阳能以化学形式贮存在生物质中的能量,直接或间接来源于绿色植物的光合作用,是煤炭、石油和天然气之后世界能源消费

总量第4位的能源,在人类的能源利用史上已经有几千年的历史。但是随着技术的进步和环境及社会发展的需求,现代生物质的利用不仅仅是简单燃烧,而是基于现代技术的高效利用^[16,17]。生物质能转化方法主要包括燃烧、热化学法、生物化学法和物理化学法等,可转化为二次能源,即热量或电力、固体燃料(木炭或成型燃料)、液体燃料(生物柴油、生物原油、甲醇、乙醇和植物油等)和气体燃料(氢气、生物质燃气和沼气等)^[18]。

在所有的新能源中,氢能被认为是人类社会的终极能源^[19,20]。这是因为氢能具有如下特点:

(1) 氢的资源丰富。在地球上的氢主要以化合物(如水)的形式存在,地球表面的70%以上被水覆盖,水就是地球上无处不在的氢矿。

(2) 氢具有可再生性。氢和氧经化学反应产生电能或热能,并生成水,而水又可电解再转化为氢和氧,如此循环。

(3) 氢气具有可储存性。氢可以像天然气一样很容易地被大规模储存。这是氢能和电能、热能最大的不同,在电力过剩的地方和时段,可以用氢的形式将电能或热能经转化后储存起来。

(4) 氢能是最环保的能源之一。利用低温燃料电池,通过电化学反应将氢转化为电能和水,过程中不排放 CO_x 和 NO_x ,没有任何污染;使用氢燃料内燃机也是减少污染的有效方法之一。

氢能由于具有以上特点,可以同时满足资源、环境和可持续发展的要求,是其他能源所不能比拟的,所以备受重视,它已经成为许多国家的研发重点和热点。美国、加拿大、日本以及欧盟的许多国家,早已开展了关于氢能利用的研究,发展氢能已成为国家能源战略。美国从2002年开始了加氢站的投运,美国能源部累计投入9亿美元用于氢能和燃料电池发展计划。日本一直以来以构建氢能社会为发展目标,其加氢站密度世界第一,制定和出台了一系列的国家政策及规划,明确了氢能产业发展路线图,投入巨额财政资金用于氢能研发,并通过立法的方式来体现对新能源产业的重视。在我国,截止到2019年,已有20余省市出台氢能产业发展规划,其中广东、上海、江苏、山东等地处于领先地位。

同时,我国多家大型企业参与了氢能产业建设与投资,包括国家能源集团、国家电投集团、中石油、中石化、中广核集团等。

氢能的开发利用技术主要从 3 个方面开展:氢的规模制备^[21]、氢的储运^[22]及相关燃料电池的研究^[23]。氢的规模制备是氢能应用的基础,氢的规模储运是氢能应用的关键,而燃料电池则是氢能利用最好的方式。可以说,燃料电池技术的最新发展及其诱人的前景,让全世界都看到了氢作为新能源大规模应用的可行性和发展前景。

燃料电池的应用领域非常广泛,它具有常规蓄电池(如锂离子电池)的积木特性,即可由多套燃料电池系统按串联、并联的组合方式向外供电。因此,燃料电池既适合用于固定式发电,也可用作各种形式的分散电源、可移动电源和动力电源(如汽车、机车、船舶等)^[24,25]。其中,质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有发电时不产生污染、工作温度低、启动快、功率密度高等优点,在移动电源、备用电源、交通动力和分布式发电中都具有很好的应用前景,已成为燃料电池中最具发展潜力的类型^[26,27]。近年来,实用型 PEMFC 的研究成功把燃料电池又一次推到了应用开发的顶峰,燃料电池的应用已经进入了工业化规模应用的阶段。除了北美、欧洲、东亚的工业国外,许多发展中国家也在加紧燃料电池的开发利用。我国燃料电池技术虽然发展较晚,但国家从“十五”规划到“十三五”规划,从国家“863”计划、国家“973”计划到国家科技支撑计划、国家重点研发计划等重大/重点项目,均对燃料电池技术给予了大力支持。我国燃料电池技术发展较快,取得了许多重大进展,并在逐步缩小与国外先进水平的差距,部分领域已经开始处于领先地位。

我国大力发展以氢能为代表的新能源,可显著降低对环境的污染,有利于保护生态环境,促进“资源节约型和环境友好型”社会建设,促使我国形成清洁可持续的能源结构,降低我国能源的对外依存度,巩固能源安全基础,促进产业结构优化升级与国民经济和社会的可继续发展。