

储能技术应用潜力与 经济性研究

ENERGY STORAGE

APPLICATION POTENTIAL AND
ECONOMIC EVALUATION

刘 坚◎著



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

储能技术应用潜力与 经济性研究

刘 坚◎著



ENERGY STORAGE
APPLICATION POTENTIAL AND
ECONOMIC EVALUATION



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

储能技术应用潜力与经济性研究 / 刘坚著.

北京: 中国经济出版社, 2016. 9

ISBN 978 - 7 - 5136 - 4366 - 5

I. ①储… II. ①刘… III. ①储能—技术—研究 IV. ①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 210331 号

责任编辑 姜 静

责任审读 贺 静

责任印制 马小宾

封面设计 华子图文

出版发行 中国经济出版社

印刷者 北京艾普海德印刷有限公司

经销者 各地新华书店

开 本 710mm × 1000mm 1/16

印 张 12.75

字 数 182 千字

版 次 2016 年 9 月第 1 版

印 次 2016 年 9 月第 1 次

定 价 48.00 元

广告经营许可证 京西工商广字第 8179 号

中国经济出版社 网址 www.economyph.com 社址 北京市西城区百万庄北街 3 号 邮编 100037

本版图书如存在印装质量问题, 请与本社发行中心联系调换 (联系电话: 010 - 68330607)

版权所有 盗版必究 (举报电话: 010 - 68355416 010 - 68319282)

国家版权局反盗版举报中心 (举报电话: 12390)

服务热线: 010 - 88386794

序

全球经济的持续低迷正在孕育着一次深刻的产业转型，储能技术正在日益成为当前电力及能源系统转型的重要支撑。过去三年，主流储能技术成本下降了50%左右；过去一年，国内外储能产业规模增长超过100%。随着储能成本的进一步下降，可以预计电动汽车及电网储能项目数量还将持续快速增长，从而持续推动电力及能源系统变革。近期参与调峰、调频、辅助新能源并网的储能项目不断出现，酝酿中的微电网、电力需求侧管理、调峰调频电价及电改政策正在推动不同储能商业模式的确立，这是一个充满希望的产业。

但是挑战也十分严峻，新能源与火电发展的博弈，微网项目征集后的补贴难产，电力需求侧试点的补偿力度与市场期望的巨大差异，电力体制改革的步履蹒跚与艰难，仍在进行的低效电网建设和火电建设，都使得产业发展充满了不确定性，使得市场化进程仍步履维艰。

由于技术及产业基础、能源政策环境的差异，美国、日本、德国、澳大利亚等重点国家按照各自国情制定了与之相适应的储能发展战略及激励政策，建立了相对完整的政策支持体系以支持市场化的进程。但中国储能产业起步较晚，直接推动储能发展的政策仍较有限，加之目前储能技术路线多样，各类储能间技术成熟度及经济性有很大差异，所适应的应用场景各不相同，增大了储能扶持政策的制定难度。目前国内仍缺少充分反映电力及能源系统实际特点的经济评价模型，导致市场机制性政策也很难落地，非市场的行为在一定程度上增加了产业发展的风险。

刘坚博士的这本书，以储能技术发展潜力及经济性作为切入点，结

合我国国情，梳理了发展各类储能技术的适用场景、资源条件及成本效益。综合而言，该书在以下三方面特色突出：

第一，研究全面性。该书不仅涵盖了当前主流的电储能技术，而且将诸如储热、储氢、抽水蓄能等各类大规模储能技术纳入对比分析，有助于读者对储能在能源系统中的作用有总体判断。

第二，应用场景研究。该书分别从储能技术特点和应用需求两个角度分析了各类储能技术近中期内所适应的应用场景，对于储能技术路线选择，尤其制定储能在电力系统中的应用路线图有重要参考意义。

第三，潜力与经济性研究。应用潜力与经济性一直是储能研究的难点。该书基于大量文献及合理假设，对各类储能技术在我国的发展潜力及成本效益做了初步研究，并对相关市场价格机制、政策措施及商业模式研究进行了有益探索。

总而言之，该书有助于读者对当前储能行业发展现状和未来发展趋势有一个总体认识，其聚焦的储能技术应用潜力及经济性也是推动我国储能产业持续发展急需解答的问题，其研究成果也将对我国后续研究制定储能发展战略及扶持政策提供重要的决策支持。

是以为序。

俞振华

中关村储能产业联盟理事长

2016年10月于北京

前 言

清洁高效的能源系统已成为各国能源转型的发展趋势和努力方向。不论是推动高比例可再生能源发展还是实现能源互联网，储能技术都是能源转型浪潮中不可或缺的重要元素。尤其对于电力工业而言，储能是智能电网和分布式能源系统的核心组成部分，储能技术不仅具备增强电网稳定安全运行的能力，还能够提高电力系统运行的效率，更是实现大规模可再生能源发电并网的重要条件。同时，以锂电池为代表的电化学储能技术的突破，对推动我国新能源汽车产业的发展和电动汽车的普及应用具有重大现实意义。

相比近年来可再生能源领域的蓬勃发展，我国储能技术研发和市场推广仍较缓慢。美国、日本、德国等发达国家正在通过战略规划、市场机制设计、财税补贴等方式推动储能技术研发、建立标准体系、刺激产业发展。在我国，储能技术从“十二五”时期开始逐渐受到重视，示范项目数量快速增加，先后建成全球最大的光伏储能离网电站——青海玉树曲麻莱光伏储能电站和风光储输示范工程——张北风光储示范工程，装机规模不断扩大。到2015年底，全国抽水蓄能装机容量达到2273万千瓦，较2010年提升34%，电化学储能更是实现快速发展，装机容量达到10.5万千瓦，约占全球总装机量的10%。然而，与储能发展速度较快的国家相比，除抽水蓄能外，我国大多数储能技术仍处于研发示范阶段，储能应用也仍以移动通信基站、应急备用电源和偏远地区离网项目为主，电网级大型储能应用规模仍然较少，需求侧户用、工商业储能应用也受到电价政策的限制而发展缓慢。未来储能技术在电力系

统的不同环节、电力系统发展的不同阶段都有不同的定位，只有统筹研究储能各个环节和各个时期的发展机制，把握各类储能技术适应的应用场合和经济性，理清储能项目利益相关方和商业模式，才能合理优化储能在发电侧、用户侧、电网侧的作用，从而为未来储能产业政策的制定提供依据。

本书第一章首先从国内外储能发展现状出发，对当前各类储能技术的总体发展趋势及各国储能领域的政策进行梳理。第二章分别描述物理储能、电化学储能、储热、储氢四大类储能方式的储能技术特点、优缺点和关键问题。第三章从电力系统运行的需求出发，分析了各类储能技术应用场景的特点，并提出了与之相匹配的储能技术。第四章分析了我国发展储能电站及电动汽车的资源潜力。第五章分别从储能技术成本及电力系统应用效益两方面分析了储能应用的经济性。第六章对国内外与储能相关的电力市场政策机制及商业运营模式进行了分析对比。第七章提出了推动我国储能发展的政策建议。

在此要特别感谢国家发展改革委能源研究所王仲颖副所长、任东明研究员、时璟丽研究员、周伏秋研究员，以及清华大学电机系胡泽春副教授、中国储能联盟俞振华理事长、中国化学与物理电源行业协会储能应用分会刘勇秘书长，他们对本书内容提出供了宝贵建议。由于储能经济性研究涉及能源、电力、经济等多方面专业领域问题，本书疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

笔者

2016年7月于北京

目 录

第一章 储能发展现状

一、储能背景	1
二、储能发展概述	2
三、储能政策	7

第二章 储能技术特点分析

一、物理储能	37
二、电化学储能	44
三、储热	54
四、储氢	60

第三章 储能技术电力系统应用场景

一、发电侧应用	76
二、输配电侧应用	84
三、用户侧应用	87

第四章 电力系统储能应用潜力

一、储能电站建设规模 93

二、电动汽车储能规模 98

第五章 储能成本效益评估

一、国内外储能经济性研究进展 113

二、国内外储能应用收益研究进展 114

三、成本分析 118

四、效益分析 130

五、经济性评价方法及模型 136

六、经济性评价案例分析 144

第六章 储能市场机制及运营模式

一、储能背景 150

二、国外电力市场 150

三、国内电力市场 155

四、市场机制对储能的激励作用 160

五、运营模式 165

第七章 政策措施

一、制订储能产业中长期发展规划，明确储能产业发展规模和建设布局
..... 173

二、加快储能示范项目布局，降低储能技术成本 174

三、加强储能技术创新与全产业链发展 174

四、建立反映储能价值的电力市场价格机制 175

五、推进储能技术标准体系建设	176
----------------------	-----

附 录

附录 1 全球十大抽水蓄能项目	177
附录 2 全球典型电化学储能项目	179
附录 3 储能技术特性及应用场景	180

参考文献 / 188

储能发展现状

一、储能背景

储能是使能量转化为在自然条件下比较稳定的存在形态，再通过介质或设备把能量存储起来以备在需要时释放的过程。在能源的开发、转换、运输和利用过程中，能量的供应和需求之间往往存在着数量上、形态上、分布上和时间上的差异。应用储能技术存储和释放能量可以弥补这些差异，从而平衡能源供需、提高能源利用效率。按形态的不同可将能源分为机械能、热能、化学能、辐射（光）能、电磁能、核能等类型。其中除辐射能外，各类能源均可以存储在常规能量形式中，如机械能储存在动能或势能中，电能储存在感应场能或静电场能中，热能储存在潜热或显热中，而化学能和核能本身就是纯粹的储能形式。

在工业生产和日常生活中，储能往往具有重要的应用价值。例如，古人在冬季从湖泊和河流采取天然冰，储存于绝热良好的库房，用于保存食物、冷却饮料等；化学电池早在 19 世纪已经开始广泛应用于通信、电器和交通领域；当前太阳能集热器、高温相变蓄热器、蓄热式电锅炉

也已普遍应用于城乡供热和取暖。对于传统电力工业而言,电力的发、输、配、用需要瞬时完成,而电力需求又随着昼夜、四季更替不断变化,这对电力供需的实时平衡带来了挑战。近年来,随着可再生能源发电规模的不断提升,风能、太阳能发电出力因自然条件变化而具有的不确定性,进一步加剧了电力供需平衡的难度。若能将发电低谷时的电能存储起来供峰期使用,将有效降低电力负荷峰谷差,降低系统投资成本,提高系统运行效率及可再生能源利用率。目前,抽水蓄能已广泛应用于电力系统,而压缩空气、各类电池、飞轮、超级电容等新型储能技术也逐渐受到各方关注。本章将首先对全球储能的发展现状进行回顾,而后对国内外主要储能相关政策进行综述。

二、储能发展概述

截至2016年4月,全球储能总装机容量为145.92吉瓦。其中,抽水蓄能为142吉瓦,占全部储能装机容量的97%,主要分布在日本、中国、美国、印度、德国、西班牙及奥地利等国家;电化学储能装机容量为1075兆瓦,^①占全部储能装机容量的0.74%,主要分布于美国、日本、中国、韩国、智利、德国和英国等国家;储热装机容量为1.72吉瓦,^②占全部储能装机容量的1.18%,主要分布于西班牙、美国、南非、智利、瑞典、意大利和爱尔兰等国家;机械储能装机容量为1.36吉瓦,^③占全部储能装机容量的0.93%,主要分布在德国、英国、美国、捷克、加拿大、西班牙和奥地利等国;储氢装机容量为2.87兆瓦,主要分布在德国和法国。

① 包括锂钠硫电池、离子电池、液流电池、镍氢电池、铅酸电池、钠—氯化镍电池及超级电容。

② 包括冰蓄冷储能、熔融盐储能及其他储热。

③ 包括压缩空气储能、飞轮储能。

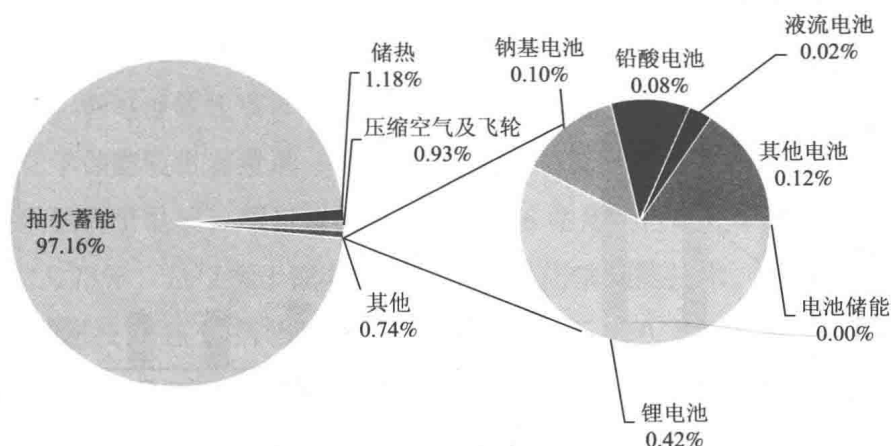


图 1-1 全球储能技术装机比重

图 1-1 为目前全球各类储能技术装机比重。在各类技术中，抽水蓄能是技术成熟、成本较低、使用规模最大的电力系统大容量储能方式。抽水蓄能电站由可逆水泵、水轮机和上下两个水库组成。在电力系统负荷低谷时，利用电力系统剩余的电能，从电站下游水库抽水至上游水库，把电能转换为水的重力势能存储起来。在负荷高峰时，从上游水库引水，驱动水轮机发电，把势能转化为电能，向电力系统供电。抽水蓄能技术已有近百年发展历史，大型抽水蓄能电站容量达百万千瓦。目前抽水蓄能电站主要分布在亚洲、美国及欧洲。日本现有抽水蓄能装机容量 25.37 吉瓦，占全球抽水蓄能总装机容量的 17.9%，是全球抽水蓄能装机容量规模最大的国家。2016 年上半年我国抽水蓄能装机容量为 23.64 吉瓦，位居全球第二。美国抽水蓄能装机容量为 20.36 吉瓦，位居全球第三。以上三国抽水蓄能装机占全球抽水蓄能总装机容量的 48.8%（如图 1-2 所示）。

不同类型抽水蓄能机组的性能差异较大，就调峰而言，常规水电、燃油、燃气机组及燃煤机组都具有电力调峰功能，但抽蓄机组调峰爬坡速度更快，调节质量更佳。对于一个区域电网而言，区域内的电源结构

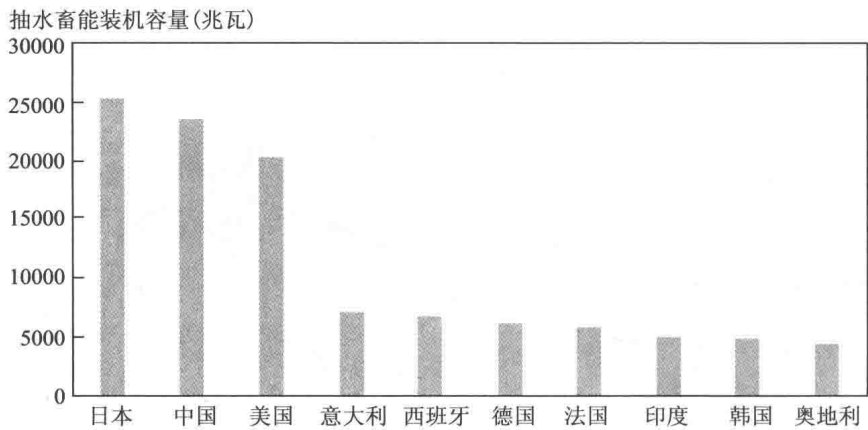


图 1-2 主要抽水蓄能国家装机量

决定了系统对抽水蓄能的需求。多数发达国家抽水蓄能比例占本国电源装机的比例在 5% ~ 10%。但也有例外，如美国抽水蓄能比例仅占电源装机容量比重的 2.2%，其调峰主要由燃气发电承担。法国是全球核电比例最高的国家，但抽水蓄能比例仅为 3.7%，周边国家丰富的水电和抽水蓄能资源是其调峰的主要资源。近年来发达国家水电资源开发率基本在 50% 以上，法国、日本、瑞士等国已接近 90%，随着常规水电资源开发殆尽，改造或新建对厂址要求不高的抽水蓄能电站已成为提高电力系统调峰能力的理想选择。

在我国，抽水蓄能是目前最成熟、最经济（单位千瓦造价约 3000 ~ 5000 元）、使用寿命最长（机组寿命 25 年，水工建筑物寿命 60 年以上）的电力系统储能技术，并已大规模应用于系统调峰、调频及备用领域。截至 2015 年底，全国抽水蓄能装机容量达到 2274 万千瓦，占全部电源装机容量的 1.5%，是当前各类储能技术中当之无愧的绝对主力。国务院《能源发展“十二五”规划》提出，到 2020 年全国抽水蓄能装机规模达到 7000 万千瓦；国家发改委《关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意见》提出，到 2025 年，全国抽水蓄能电站总装机容量达到约 1 亿千瓦，占全国电力总装机容量的比重达到 4% 左

右；远期来看，全国可开发抽水蓄能规模为 1.27 亿千瓦。

电化学储能方面，在纳入美国能源部统计的全球 516 项电化学储能项目中，锂电池储能项目为 296 项，总装机容量为 615.9 兆瓦，超过全部电化学储能装机容量的一半；钠基电池（包括钠硫电池、钠氯化镍电池及钠离子电池）项目装机容量为 147.6 兆瓦，占电化学储能装机容量的 13.73%，是仅次于锂电池的第二大电化学储能技术。其他主流电化学储能技术还包括铅酸电池（110.9 兆瓦，10.32%）、镍基电池（30.4 兆瓦，2.83%）及液流电池（24 兆瓦，2.24%）等。就储能容量而言，电化学储能总容量为 1818 兆瓦时，平均持续放电时间为 1.69 小时。其中，钠基电池储能容量最高，为 984 兆瓦时，占比 54.1%，平均放电时间为 6.67 小时；锂电池储能容量为 552 兆瓦时，占比 30.36%，平均放电时间为 0.9 小时；铅酸电池储能容量为 151.9 兆瓦时，占比 8.35%，平均放电时间为 1.37 小时；液流电池储能容量为 66.1 兆瓦时，占比 3.63%，平均放电时间为 2.75 小时。全球电化学储能技术分布如图 1-3 所示。

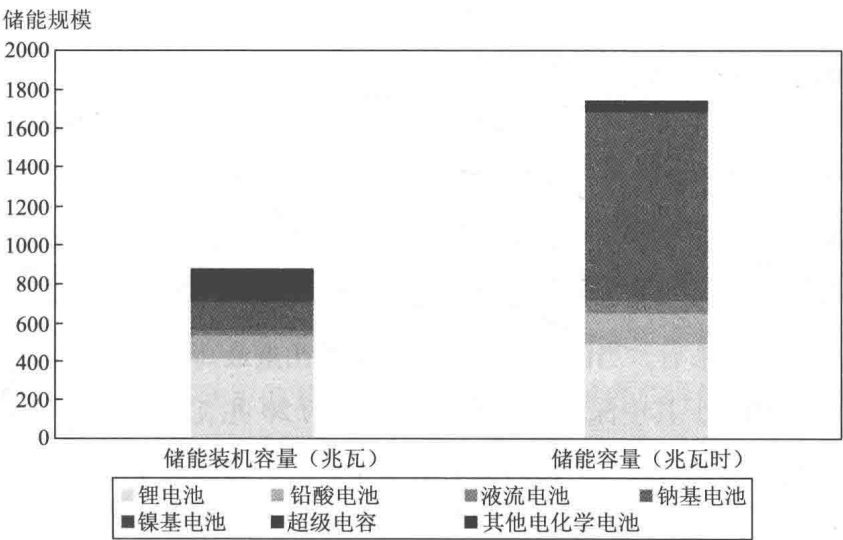


图 1-3 全球电化学储能技术占比

就储能容量（兆瓦时）来看，截至 2016 年 4 月，全球电化学储能装机总容量为 1.82 吉瓦。日本的全球电化学储能容量达到 584 兆瓦时（以钠硫电池、锂电池和铅酸电池为主），也是全球电化学储能装机规模最大的国家，占全球总装机容量的近 2/3；美国电化学储能容量为 396 兆瓦时（以锂电池为主），位居第二；意大利电化学储能容量为 285 兆瓦时（以锂电池、氯化镍电池为主），位居第三。上述三国占全球总装机容量的 70%。全球主要电化学储能国家装机规模如图 1-4 所示。

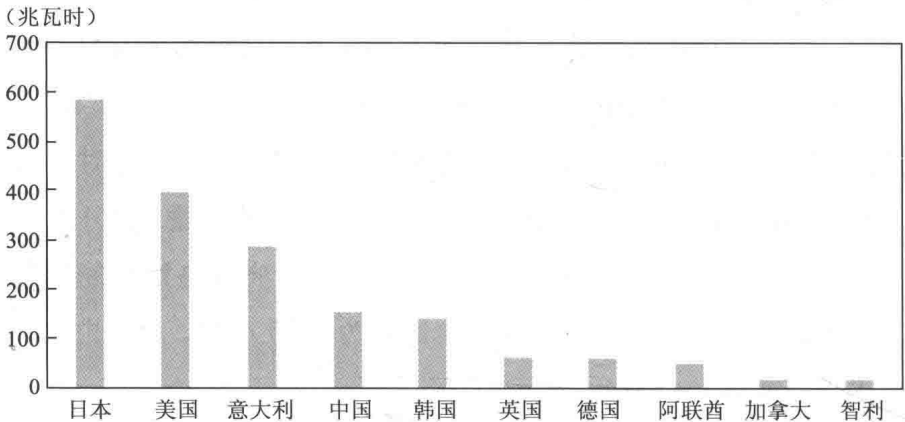


图 1-4 全球主要电化学储能国家装机规模

截至 2015 年底，我国电化学储能装机容量为 50.42 兆瓦，储能容量为 151.77 兆瓦时，位居全球第四。目前我国电化学储能平均放电时间为 3 小时，主要应用于可再生能源发电并网、微电网及电力系统调频等领域。国内电化学储能技术以锂离子电池为主，占全部电化学储能容量的 81%；其次为液流电池，占全部电化学储能容量的近 20%。就电化学储能应用来看，当前工商业用户侧储能比重最高，占全部电池储能容量的近 50%，其中深圳比亚迪坪山总部的 20 兆瓦/40 兆瓦时储能电站是目前全球最大的用户侧储能电站项目，主要通过工业园区峰谷电价降低用户电费成本。其他主要应用领域包括可再生能源发电并网、电动汽车光伏储能充电站等。例如，国家电网在河北建设的张北风光储电

站，一期工程储能装机达到 14 兆瓦/63 兆瓦时，也是全球最大的发电侧储能项目，项目采用锂电池和液流电池对电站内的风电、光伏发电进行出力平滑。然而，从总体上看，我国目前的储能项目大多处于示范和研发阶段，推动产业规模化发展的财税和价格政策仍未出台，一定程度上导致了储能产业增速缓慢。

在各类电化学储能技术中，锂电池和液流电池储能已在我国进入商业化推广阶段，特别是全钒液流电池技术应用已居世界前列。国电龙源 5 兆瓦/10 兆瓦时储能电池系统是迄今为止全球规模最大的全反液流电池储能系统应用示范工程。该项目储能电池系统采用模块化设计，单个电堆的额定输出功率为 22 千瓦，由 16 个 22 千瓦电堆组成 352 千瓦的单元模块系统，再以此构建 5 兆瓦液流储能电池系统。该储能系统与国电龙源卧牛石 50 兆瓦风电场配套，实现跟踪计划发电、平滑风电出力，提高了电网消纳波动性可再生能源的能力。

三、储能政策

（一）国际储能政策

从全球范围看，储能技术还处在发展前期。因不同国家电力市场发展状况以及相关政策不同，储能在不同国家的发展路径也不同。欧美及日本已将储能产业上升到战略新型产业的层面，通过政府扶持、政策导向、资金投入等多种方式积极促进产业发展。例如，美国在推动电力市场完善与成熟的过程中，出台了一些促进储能进入电力市场参与公平竞争的法令；在联邦政策的基础上，加州和纽约州更是将储能包含在本州的分布式发电/负荷削减的激励政策中。与美国不同，德国和日本则直接出台专门的储能补贴政策。其中，德国于 2013 年正式确立了光伏储能补贴政策，以提供相当于户用储能设备成本 30% 的补贴，并通过德