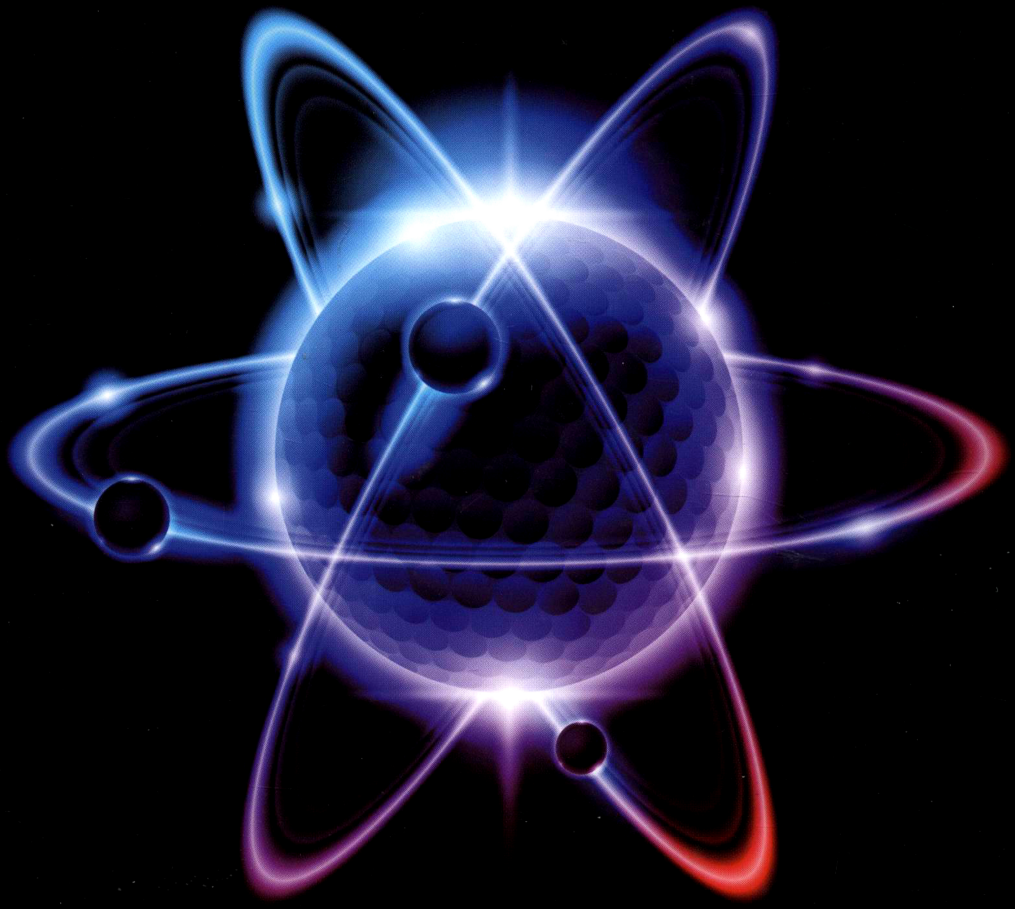
ISTE WILEY

储能科学与技术丛书

储能技术及应用

ENERGY STORAGE



[法] 伊夫·布鲁内特（Yves Brunet） 等著
唐西胜 徐鲁宁 周龙 韩娜 译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

储能科学与技术丛书

储能技术及应用

[法] 伊夫·布鲁内特（Yves Brunet） 等著

唐西胜 徐鲁宁 周 龙 韩 娜 译

机 械 工 业 出 版 社

本书主要讲述了储能在电力系统、交通运输、新能源发电和移动电子设备中的应用；介绍了现在主要的储能技术，包括各种储氢技术与燃料电池、电化学储能、超级电容器与微电源等；分析了主要储能技术的性能特点、材料与关键技术，以及在典型应用系统中的技术经济性等。

本书适合于面向智能电网、新能源汽车与移动式电子应用的储能科研、规划、设计与运行的工程师，以及高等院校从事储能与应用的教师与研究生阅读。

Copyright © ISTE Ltd 2011.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Energy Storage, ISBN: 978-1-84821-183-4, by Yves Brunet, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记　图字：01-2011-2077 号。

图书在版编目（CIP）数据

储能技术及应用/（法）伊夫·布鲁内特（Yves Brunet）等著；唐西胜等译. —北京：机械工业出版社，2018.4

（储能科学与技术丛书）

书名原文：Energy Storage

ISBN 978-7-111-59622-6

Ⅰ.①储…　Ⅱ.①伊…②唐　Ⅲ.①储能－技术－研究　Ⅳ.①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 067221 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂　责任编辑：付承桂　任　鑫

责任校对：郑　婕　封面设计：鞠　杨

责任印制：张　博

河北鑫兆印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.25 印张 · 2 插页 · 262 千字

0 001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-59622-6

定价：79.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务

服务咨询热线：010－88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010－68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010－88379203　　金　书　网：www.golden－book.com

封面无防伪标均为盗版　　教育服务网：www.cmpedu.com

译者的话

随着智能电网、新能源发电、电动汽车与移动式设备的发展，对储能技术及其应用系统的需求越发迫切。近年来，国内储能相关的研究、开发与应用工作越来越多，但尚缺少一本全面介绍储能技术及其应用的专著或译著，这也是译者想把本书介绍给国内读者的一个重要原因。

本书由来自法国科研院所和电力公司的 19 位作者共同编写而成，他们将各自不同的专业技术背景有机结合起来，从微观到宏观，为我们展现了一个纷繁而奇特的储能世界。本书共 9 章，第 1 ~4 章主要介绍了储能在电力系统、交通运输、新能源发电和移动式设备中的应用；第 5 ~7 章介绍了几种主要的储氢与燃料电池技术；第 8 章和第 9 章重点分析了典型的电化学储能与超级电容器的性能特点、关键技术及其应用。

本书第 2 章与第 9 章由周龙翻译，第 3 章由韩娜翻译，第 5 ~7 章由徐鲁宁翻译，其余部分由唐西胜翻译，博士研究生刘文军和苗福丰也参与了部分翻译工作。全书由唐西胜统稿。

感谢中国科学院电工研究所的齐智平研究员、中国科学院宁波材料技术与工程研究所的张一鸣博士和 ABB 中国研究院的张国驹博士在本书翻译过程中给予的指导与帮助。

储能技术门类庞多，涉及多学科、多领域的专业知识，尽管译者竭力求实，但受水平和专业领域所限，加之部分技术处于前沿，本书难免存在错误和不妥之处，恳请读者不吝赐正。

唐西胜

于中国科学院电工研究所

目　录

译者的话

概论 …… 1

第 1 章　应用于电力系统的储能技术 …… 11

1.1　简介 …… 12

1.2　储能技术应用于发电环节 …… 13

1.2.1　“大功率储能”可以使发电收益最大化 …… 13

1.2.2　“大功率储能”可以减轻发电系统的运行和经营风险 …… 14

1.2.3　储能的辅助服务 …… 15

1.3　储能技术应用于间歇式电源 …… 16

1.3.1　不含储能的调频 …… 16

1.3.2　储能对功率/频率的调节作用 …… 18

1.3.3　储能的其他辅助功能 …… 20

1.4　储能技术应用于输电系统 …… 21

1.4.1　投资控制与阻塞管理 …… 21

1.4.2　调频与平衡机制 …… 21

1.4.3　电压调节与电能质量 …… 21

1.4.4　系统安全与故障恢复 …… 22

1.4.5　其他可能的应用 …… 22

1.5　储能技术应用于配电系统 …… 23

1.5.1　储能对电网规划的作用 …… 23

1.5.2　其他应用 …… 26

1.6　储能技术应用于电力零售 …… 27

1.6.1　利用储能降低采购成本 …… 28

1.6.2　利用储能降低采购成本风险 …… 28

1.7　储能应用于电力用户 …… 28

1.7.1　储能的削峰作用 …… 28

1.7.2　储能对移峰用电的作用 …… 29

1.7.3　储能对供电质量和供电连续性的作用 …… 30

1.7.4 无功补偿…… 32
1.8 储能技术应用于电力平衡机制…… 32
1.9 结论…… 34
1.10 参考文献 …… 36
第 2 章 交通运输：铁路，公路，航空，海运 …… 39
2.1 简介…… 40
2.2 电能是二次能源…… 40
2.2.1 陆地交通…… 40
2.2.2 航空运输…… 43
2.2.3 铁路运输…… 44
2.2.4 海上运输…… 44
2.3 电能：主要或唯一的能量来源…… 44
2.3.1 电动汽车…… 44
2.3.2 重型货车与客车…… 51
2.3.3 两轮机动车…… 51
2.3.4 导引型车辆（火车、地铁、有轨电车、无轨电车） …… 52
2.3.5 海上交通——游艇…… 53
2.4 电能与其他能源互为补充——混合动力…… 53
2.4.1 并联结构…… 54
2.4.2 串联结构…… 56
2.4.3 路耦合…… 57
2.4.4 混合动力的轨道机车…… 57
2.5 结论…… 58
2.6 参考文献…… 60
第 3 章 光伏发电系统中的储能技术…… 61
3.1 简介…… 62
3.2 独立光伏发电系统…… 62
3.2.1 基本原理…… 62
3.2.2 不可或缺的环节：储能…… 62
3.2.3 光伏发电系统的市场…… 63
3.2.4 独立光伏发电系统中储能的容量配置…… 64
3.2.5 选择适宜的储能技术…… 64
3.3 铅酸蓄电池寿命受限…… 66
3.3.1 蓄电池的能量管理…… 67
3.3.2 具有发展前景的锂离子电池技术…… 68

3.4 并网光伏发电系统 …… 70
3.4.1 不断发展的电网 …… 70
3.4.2 多样化的储能系统 …… 71
3.4.3 储能接入并网：电力部门要解决的重要问题 …… 72
3.5 参考文献 …… 73
第 4 章 移动式应用与微能源 …… 74
4.1 各种移动式应用场合的能源需求 …… 75
4.1.1 “微”功率（su-Watt） …… 75
4.1.2 “大”功率（几瓦的功率） …… 76
4.1.3 能量需求 …… 76
4.1.4 满足特定供电需求的持续时间 …… 78
4.2 供能微型化所带来的新特点 …… 79
4.3 电容储能 …… 80
4.4 电化学储能 …… 80
4.4.1 一次电池 …… 81
4.4.2 蓄电池 …… 81
4.4.3 燃料电池 …… 83
4.5 碳氢化合物 …… 83
4.5.1 功率 MEMS …… 84
4.6 热电 …… 89
4.7 摩擦发电 …… 89
4.8 放射源 …… 90
4.9 捕获环境能 …… 90
4.9.1 太阳能 …… 90
4.9.2 热能 …… 90
4.9.3 化学能：生活能源 …… 91
4.9.4 机械能 …… 91
4.9.5 应答机 …… 92
4.10 其他相关的电子设备：板载供电 …… 93
4.11 参考文献 …… 94
第 5 章 储氢 …… 100
5.1 简介 …… 101
5.2 储氢概述 …… 101
5.2.1 相关能量参数 …… 101
5.2.2 密度与比密度 …… 102

5.3 压力储氢 …… 104
5.3.1 储氢容器 …… 104
5.3.2 网络配送 …… 105
5.4 低温储氢 …… 105
5.4.1 交通运输的液氢储存 …… 105
5.4.2 固定式液氢储存 …… 106
5.5 固态储氢 …… 106
5.5.1 物理（化学）吸附方式的物理储氢 …… 106
5.5.2 化学储氢 …… 108
5.6 其他储氢模式 …… 110
5.6.1 硼酸盐 …… 111
5.6.2 硼酸盐和氢化物的混合物 …… 111
5.6.3 混合储氢 …… 111
5.7 讨论：技术、能量、经济层面 …… 112
5.8 参考文献 …… 113
第 6 章 燃料电池：原理和功能 …… 115
6.1 什么是单体或电池？ …… 116
6.2 化学能 …… 117
6.3 化学反应详解 …… 119
6.4 质子交换膜燃料电池 …… 123
6.5 固体氧化物燃料电池 …… 123
6.6 碱性燃料电池 …… 124
6.7 不同类型燃料电池对比 …… 125
6.8 催化剂 …… 127
6.9 关键因素 …… 128
6.10 结论：储能的应用 …… 129
第 7 章 燃料电池：运行系统 …… 131
7.1 简介：什么是燃料电池系统？ …… 132
7.2 空气供给系统 …… 134
7.2.1 总体需求 …… 134
7.2.2 选择适合燃料电池系统的压缩机 …… 135
7.3 气体加湿系统 …… 137
7.3.1 总体需求 …… 137
7.3.2 合适的加湿方式 …… 138
7.3.3 膜交换器和焓轮 …… 138

7.3.4 带有蓄水容器的系统 …… 139
7.4 电堆终端的固态变换器 …… 140
7.5 寿命、可靠性和诊断 …… 141
7.5.1 故障及其原因 …… 141
7.5.2 燃料电池性能的实验方法 …… 142
7.5.3 诊断方法和策略 …… 143
7.6 参考文献 …… 144
第 8 章 电化学储能：一次电池与蓄电池 …… 147
8.1 蓄电池概述：工作原理 …… 148
8.2 应用 …… 150
8.2.1 运用储能管理电力系统和交通系统的整体构架 …… 150
8.2.2 储能技术发展历程 …… 151
8.2.3 锂离子电池是混合动力汽车的核心 …… 151
8.2.4 锂离子电池技术是光伏发电应用的核心 …… 152
8.2.5 法国在储能市场中的地位 …… 153
8.3 电池技术发展历史 …… 157
8.3.1 铅酸电池 …… 157
8.3.2 Ni-Cd（镍镉电池） …… 159
8.3.3 Ni-MH（镍氢电池） …… 159
8.3.4 Nickel-Zinc（镍锌电池） …… 160
8.3.5 Na-S（钠硫电池） …… 161
8.3.6 氧化还原（液流）电池 …… 161
8.3.7 Zebra 电池 …… 161
8.3.8 锌-空电池（Zinc-air） …… 162
8.3.9 锂电池 …… 162
8.4 应用需求 …… 165
8.4.1 混合动力汽车和电动汽车 …… 165
8.4.2 光伏发电应用 …… 166
8.4.3 移动式电子设备 …… 166
8.5 聚焦锂离子电池技术 …… 167
8.5.1 基本原理 …… 167
8.5.2 正极材料的发展 …… 167
8.5.3 负极材料的发展 …… 169
8.5.4 该领域的主要参与者 …… 171
8.5.5 电解质的研发 …… 171

8.6 锂离子电池的处理和再循环利用 …… 173
8.7 其他电池 …… 174
8.7.1 微型电池，印刷电池等 …… 174
8.7.2 电解质 …… 176
8.7.3 摇椅微型电源 …… 176
8.7.4 制造技术 …… 176
8.7.5 印制电池 …… 177
8.8 参考文献 …… 178
第9章 超级电容器：原理、容量配置、功率接口及应用 …… 181
9.1 简介 …… 182
9.2 超级电容器：双电层电容器 …… 183
9.2.1 基本原理 …… 183
9.2.2 电气模型——主要参数 …… 185
9.2.3 热模型 …… 188
9.3 超级电容器组的容量配置 …… 189
9.3.1 以能量作为选择依据 …… 189
9.3.2 以功率作为选择依据——兼顾效率 …… 190
9.4 功率接口 …… 191
9.4.1 电压均衡 …… 191
9.4.2 固态变换器 …… 193
9.5 应用 …… 195
9.5.1 概述 …… 195
9.5.2 超级电容器作为主电源 …… 195
9.5.3 混合电源系统 …… 196
9.6 参考文献 …… 199
作者名单 …… 201

概论[㊀]

㊀ 概论由 Yves Brunet 撰写，可以参考 Yves Brunet 的另一本书《Low Emission Power Generation Technologies and Energy Management》（ISTE/John Wiley，2009）的“Energy storage：applications related to the electricity vector”一章。

能量之源：能量密度

能量都是存储起来的，或者在特定的地理区域内，或者在更大的规模上（如太阳）。存储的能量可以按照需求使用，直至用完（“可再生”能源只有在人类这个时间尺度上能够再生，才有意义）。本书将能源区分为一次能源与二次能源。一次能源是指早就“自然”存在着的化石能源，对此我们只需要支付采掘费用。而二次能源则是指人造的能源，为此我们不但需要支付采掘费用，还需支付存储费用。能源的更替周期见表 1。

表 1　能源的更替周期

能源	更替周期
生物质能	几年
海洋热能梯级利用	几百年
化石能源	几百万年
潮汐/波浪能	几小时
地热能	几天至几年
热质（蓄热材料）	几小时
蓄电池	几分钟
超导储能	几秒
电容器	几秒
抽水蓄能	几小时

（资料来源：W. A. Hermann，Quantifying Global Energy Resources，Science direct，Elsevier 2005）

本书将重点关注二次能源的储存。

能够被开发利用的能源不但以不同的形式存储在自然界中，而且存储的密度也大不相同（见图 1）。

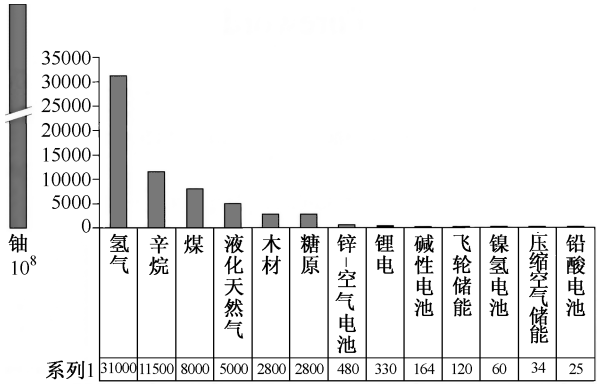


图 1　不同的储能材料或储能器件的能量密度有很大不同（图中显示了化石能源相对于二次能源在能量密度上的巨大优势。核能的能量密度尤其高，每千克铀裂变可以产生 10^8 W · h 的能量）

通过下面几个简单的例子可以直观地看出电能产生的效用，对于 1kW·h 的电能，可以做以下事情：

1）一辆百千米油耗 8L 的汽车行驶 1km。

2）电冰箱运行一天所需的电能。

3）为一个家庭提供一夜的照明。

4）生产 200g 钢或 100g 塑料。

在法国，平均每个人的年用电量为 40MW·h，即每人每小时用电 4.5kW·h。

储能的变换

根据应用场合的不同，存储的能量可以以功率[单位为瓦(W)]或能量㊀[单位为焦耳(J)或瓦时（W·h)]的形式释放出来，而能量则是功率在一定时间长度上的累积。储能装置能够将存储的能量以一定的功率立即释放出来，这在实际应用中是非常有用的。

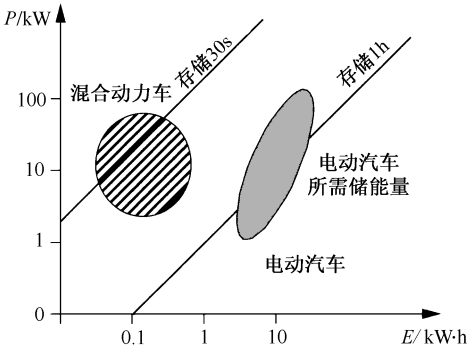


图 2　电动汽车的储能需求（混合动力汽车关注储能所能提供的功率，而纯电动汽车则既关注功率也关注能量。对于混合动力汽车，所需的储能量约为 12W·h/kg，功率约为 500W/kg，能够在 2s 内以 10kW 的功率提供 300W·h 的能量，储能装置的寿命预期为 15 年）

对于储能的应用策略不同，导致了不同的储能解决方案（见图 2）。

能量存储在储能装置中，经过能量的转换和变换后，以最适宜于应用的形式供给用户。电能是能量的存储形态之一，无疑也是目前所知的最灵活和便捷的应用形式（见图 3）。

储能涉及的问题既有技术上的，也有经济上的，而相应的解决方法与其具体的应用目标密切相关（参见第 1～5 章）。以电力存储为目的的储能技术，并不是一种权宜之举，尤其是在电网中的应用。目前，至少有两种截然不同的储能应用需求可以说明这个问题。

1）移动式应用，如移动电话和各种手持设备等。储能的目的是确保设备的正常运行，或者是作为功率“缓冲器”，在设备需要脉冲功率时提供足够高的功率输出。

2）固定式应用，如应用于电网中的储能，需要较高的能量和功率。

㊀ 3600J = 1W·h，1MW·h = 0.0857 toe（吨当量油），1tep = 11.7MW·h。——作者注

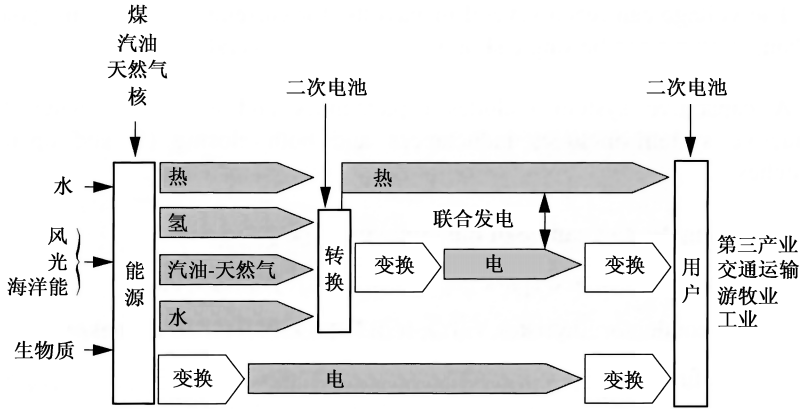


图 3　储能装置的运行原理

储能的脉冲应用案例㊀

脉冲功率系统需要在很短的时间内将存储的能量释放出来。能量一般以电磁的形式（电场或磁场）存储起来，在快速开关的作用下能够在非常短的时间内（毫秒级）提供能量。因此，对于特定容量的储能量 W，输出功率 $P = W/t$ 会非常大。

例如，对于串联电容器储能系统（Marx Generators，马克斯发生器），影响能量释放的主要因素有

1）储能电路的电气特性（R，L，C）。

2）充电电路的阻抗特性（R，L，C）。

3）储能系统的初始状态。

4）开关系统的特性（R，L，t）。

脉冲应用类储能系统的电压可以达到几百万伏，峰值放电电流可以达到几百万安培，脉冲可能是单脉冲，或者是几千赫兹的脉冲序列。

电容储能系统一般包括电容器组与闭合开关（V），而电感储能系统（见图 4）则包括储能电感、闭

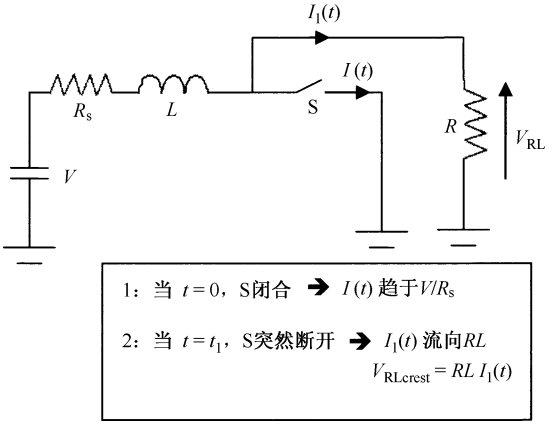


图 4　电压型电感储能系统（其基本原理是在电感中产生电流，并迫使电流在特定时刻流经一个电阻，该系统需要分段能力强的开关）

㊀ 感谢 Jean-Claude BRION（Europulse 公司）对本节的校对。——作者注

合开关（*I*）与断路开关（*V*）。

开关装置可以采用以下类型：

1）气态开关：高压火花间隙、引燃管、闸流管等。

2）半导体开关：晶闸管、GTO、IGBT、MOSFET、SRD（超快速恢复二极管）等。

3）固态开关：熔断器。

对于电容储能系统，马克斯发生器通过先对电容器并联充电，然后再串联放电，可以获得很高的电压值如图 5 所示。

脉冲式的能量已经在工业和科研领域获得了诸多应用，诸如雷达、粒子加速器、强磁场、激光、电炮（电子射线武器）等。

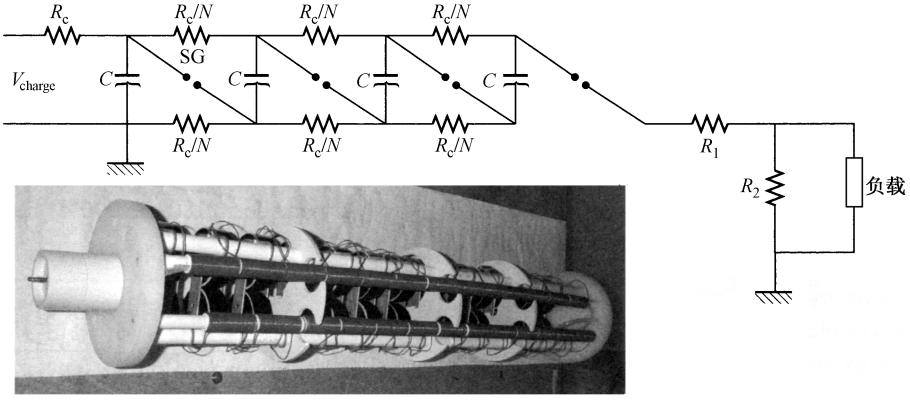


图 5　马克斯发生器原理图和实物图（其中电容器为 13 只，5.2nF，40kV，6kJ/s；V_{max} = 350kV，上升时间为 15ns，脉冲宽度为 50ns，脉冲频率为 115Hz）

储能的电网应用案例

本书的第 1 章将对这部分进行详细分析，这里仅对储能应用于电网的基本性能进行简述。由于电能很难被高效和大量地存储，因此时刻保持发电和用电的平衡对于电力系统来说是非常重要的，而用电量是随着每天不同时段或季节不断波动的（见图 6），因此能量存储的问题将会在电网中更加突出。储能通过将发电存储起来并用于之后其他时段，有效地打破了发电和用电的这种耦合关系。

因此，有必要将能量以某种形式存储起来（如机械能、热能、化学能等），并在需要时将储存的能量通过变换装置（如蓄电池、发电机等）转换为电能释放出来。能量变换装置大多是基于电力电子器件的，其转换效率（80% ~90%）关系到储能系统的成本与经济性。

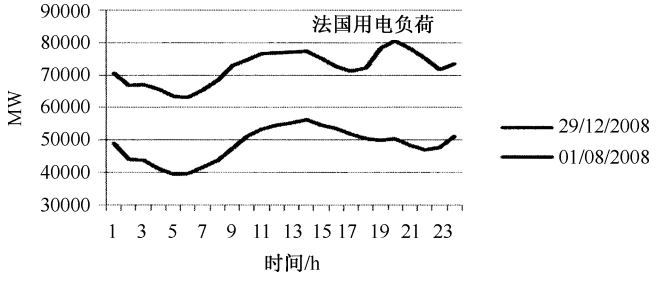


图 6　法国的用电情况（资料来源：RTE）

储能可以应用于电能的各个环节，包括发电、输电、配电和用电等，如图 7 所示。

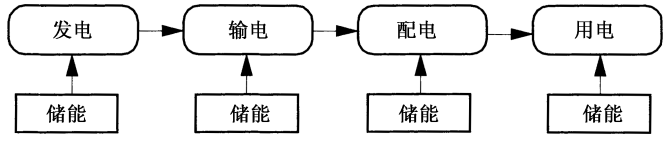


图 7　储能在电网中可能应用的环节

储能应用于电力系统，不仅要在技术性能上满足要求，还要具有一定的经济效益，如图 8 所示。在日益开放的电力市场中，能源的价格在一年中甚至一天中的不同时段很可能不同（遵循供需平衡的市场原则），而用电峰谷之间的电价差是决定储能在多大程度上获利的重要因素。储能作为增强电力系统柔性的重要手段，同时也要受到以下几个因素的制约：

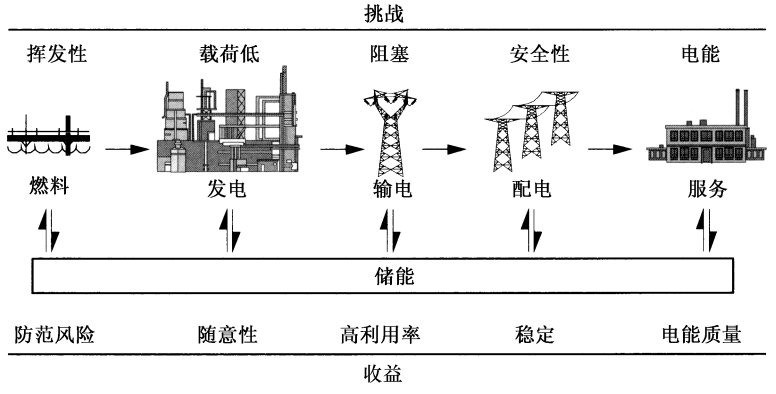


图 8　储能是解决电网问题的有效手段（来源：Energy Storage，The Missing Link in the Electricity Value Chain：An ESC White Paper，Published by the Energy Storage Council，May，2002）

1）储能系统的成本与所采用的储能技术类型及其实际配置容量紧密相关。

2）即使是同类型的储能技术，在不同的电力市场中或不同的运营商，其效益也是不同的。