ISTE WILEY

智能电网关键技术研究与应用丛书

电网储能技术

Energy Storage in Electric Power Grids

[法] 贝努瓦·雷恩（Benoît Robyns）
布鲁诺·弗朗索瓦（Bruno François）
戈捷·德力尔（Gauthier Delille）
克里斯多夫·索德蒙（Christophe Saudemont） 著
杨凯 刘皓 高飞 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

▶ 作者简介

Benoît Robyns是法国里尔高级工程师学院（HEI）研究主任，里尔电气工程及电力电子实验室（L2EP）“电力系统”团队负责人。

Bruno François是法国里尔中央理工学院教授，里尔电气工程及电力电子实验室“电力系统”团队成员。

Gauthier Delille是法国克拉马尔法国电力公司研究工程师。

Christophe Saudemont是法国里尔高级工程师学院教授，里尔电气工程及电力电子实验室“电力系统”团队成员。

智能电网关键技术研究与应用丛书

电网储能技术

Energy Storage in Electric Power Grids

[法] 贝努瓦·雷恩（Benoît Robyns）
布鲁诺·弗朗索瓦（Bruno François）
戈捷·德力尔（Gauthier Delille）
克里斯多夫·索德蒙（Christophe Saudemont） 著

杨 凯 刘 皓 高 飞 侯朝勇 闫 涛
许守平 范茂松 尹秀娟 张明杰 耿萌萌 译

机械工业出版社

本书共分7章展开论述，依次介绍了规模化电能储存面临的技术经济性问题、典型储能技术的最新进展、电力系统中的储能应用场景，以及这些应用场景中储能系统的能量管理策略和程序构建方法。本书重点在于提出了一套基于模糊逻辑的能量管理程序开发方法，利用这套方法能够实现间歇性能源/储能装置的系统能量管理，完成不同运行模式之间的转换控制。

本书的特点是理论方法与实际案例相结合，辅以详尽直观的图表、数据，使读者不仅能够掌握相关的理论知识，更能够通过不同应用场景的实例，掌握能量管理设计方法。

本书专业性较强，适合从事储能系统设计、运行、管理控制等专业人员阅读，也可供相关领域的研究生和教师使用。

Copyright © ISTE Ltd 2015.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Energy Storage in Electric Power Grids, ISBN 978 - 1 - 84821 - 611 - 2, by Benoît Robyns, Bruno François, Gauthier Delille, Christophe Saudemont, 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 - 2015 - 7360 号。

图书在版编目（CIP）数据

电网储能技术/（法）贝努瓦·雷恩等著；杨凯等译. —北京：机械工业出版社，2017.8

（智能电网关键技术研究与应用丛书）

书名原文：Energy Storage in Electric Power Grids

ISBN 978-7-111-57508-5

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①贝…②杨… Ⅲ. ①电能 - 储能 - 研究 Ⅳ. ①TM910

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 177953 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：刘星宁 责任编辑：刘星宁

责任校对：刘秀芝 郑 婕 封面设计：鞠 杨

责任印制：李 昂

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 12印张 · 231千字

0 001—3000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 57508 - 5

定价：69.00 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 序

储能技术是能源互联网和可再生能源产业发展的关键技术之一，近年来储能技术取得长足进步，逐渐具备了大规模市场化运营的能力。在这种情况下，尤其在多源、多负荷条件下如何实现储能系统与新能源、电力系统之间的协调控制和高效管理成为急需解决的问题。本书围绕以上问题展开了详细的论述，全面分析了当前在电网中应用的储能技术种类、应用场景以及应用控制策略等，使读者能够深入了解储能技术在电网中的应用。

本书得到了中国电力科学研究院专著出版基金的大力资助，在此深表谢意。本书翻译的分工如下：杨凯、范茂松负责第 1 章，高飞、耿萌萌负责第 2 章，刘皓、尹秀娟负责第 3 章，闫涛负责第 4 章，许守平负责第 5 章，侯朝勇、张明杰负责第 6、7 章。杨凯负责全书的统稿和校对。在本书的翻译过程中，翻译组的各位同事通力合作，群策群力，在完成繁重的教学和科研工作的同时，力争给读者提供最准确的译文表述，以及最有价值的专业知识。与此同时，在翻译过程的各个环节都得到了机械工业出版社刘星宁编辑的大力帮助和指导，值此译稿完成之际致以深深谢意。

储能技术涉及多学科、多领域的专业知识，尽管译者竭力求证，但受到水平和专业领域所限，本书难免存在错误和不妥之处，恳请读者不吝赐正。

译者

于中国电力科学研究院

原 书 序

由于气候原因，能源转型目前在全球范围内已成为驱动更负责任的经济增长革新的必然，因此，本书在许多方面都颇具价值。本书解决了基于可再生能源的新建发电系统在大规模扩散过程中遇到的主要技术障碍，如陆地和海上风电场、太阳能、甚至是微型水力系统。本书的重点是储能，即能够保证基于风和阳光等自然条件的间歇性能源正常生产的唯一解决办法。

大多数有关这一主题的书籍详细描述了储能技术的先进性，不过本书即使不是唯一一本，也是少数几本书中的一本，它将一种或多种基于可再生能源的电源与储能装置相结合，讲述了多种系统的能量管理问题，目的是将现有电网中此类系统和谐地整合在一起。Robyns 教授和其合著者的最大贡献是，通过本书循序渐进地提出一套完整的管理程序开发方法，对结合了间歇性能源与储能装置的系统进行能量管理。这些管理程序由模糊逻辑控制，而其控制法则则基于专门知识。利用这种方法，可以同时追求多个目标，并且完美控制不同运行模式之间的转换。此外，对整个设计过程的描述则具体到实施和实验确认等细节。本书给出了几个组合示例，例如，与惯性储能相结合的变速风力发电机，以及纳入风电机组和绝热压缩空气储能的电网。在后面这个示例中，经济优化也是管理程序的目的之一。

因此，本书具有无可争辩的现实意义，而且毫无疑问，它将成为通过可再生能源和能量及功率储存装置发电的系统管理程序设计参考书。

Eric MONMASSON
法国塞吉－蓬图瓦兹大学

原书前言

电能储存是一个长期存在的问题，这一问题至今仍没有完全解决，尤其是从经济角度来看。到目前为止，电力生产一直主要依赖于灵活资源（基于不可再生燃料的水力和火力资源）进行及时生产。可再生能源的发展以及可降低二氧化碳排放量的输送手段的需求，已经在储能方面引起了新兴趣，已成为可持续发展的重要组成部分。本书有助于更好地了解现有储能技术以及正在开发的那些储能技术，特别是关于这些技术的管理及其经济性的提高。

本书的目的是：

1）展示电能储存在智能电网可持续发展背景下的重要性。

2）显示电能储存可以提供的各种服务。

3）介绍利用一般教育方式构建储能管理系统所采用的方法工具。这些工具都是基于因果形式主义、人工智能和明确的优化技术，将贯穿全书并结合具体案例进行介绍。

4）通过大量有关可再生能源并入电网的具体和有教育意义的例子，对这些方式方法进行说明。

第 1 章介绍电能储存的一些问题，电能不能直接以交流电流进行储存。这一观察已形成了当前的电力系统，该系统是以发出就消耗的电力为基础的。然而，间歇性可再生能源的发展以及朝着更加智能化电网发展的趋势，特别是就能量分布而言，有利于这种能量的储存。本章将介绍储能可以为电网提供的各种服务，从而促进其经济性提高并解决其管理问题。本章将引入基于人工智能的管理设计方法；这特别适用于复杂系统的管理，这些系统中包括与发电量、用电量和电力网方面等相关的多种不确定性，定位于多个目标，并要求进行实时处理，这是未来智能电网的一项重大挑战。

第 2 章将对目前在工业领域或以示范形式所使用的各种电能储存技术进行简要说明，并通过一些实例对这些技术进行说明，对它们的主要特性进行介绍，并将其进行相互比较。

第 3 章将对电力系统组件的一般特性进行检查，并将对输电和配电网络管理模式进行介绍，着重介绍其平稳运行所需要的一些服务，其中包括与电压和频率控制有关的辅助服务。同时，本章将讨论储能对这些服务的潜在贡献。显然，这些网络运营商、能量生产商和用户以及由电力市场自由化产生的新参与者都与这些服务直接相关。最后，本章将以具体示例展示储能对拥堵处理以及孤网突发不稳定时动态频率控制的贡献。

第 4 章对模糊逻辑进行介绍，这是本书其余部分所采用的一种人工智能方法。模糊逻辑的基本概念将应用于惯性储能系统的管理，该系统是向孤立现场供电的风能/柴油发电机混合系统的组成部分。

第 5 章将开发一种方法，能够使某一系统电力管理程序的系统设计纳入电能储

存系统。由于这种方法是于模糊规则所表示的系统专门知识，因此，这种方法及其图形创建，都不需要数学模型。输入可以是随机的，管理可以同时瞄准多个目标。由于运行模式是由模糊变量来确定的，所以，它们之间的转换是渐进性的。最后，这种方法通过朝着荷电状态（SoC）进行收敛且利用实时处理对其复杂性加以限制，而得以对储能进行管理。将其应用于惯性储能系统与变速风力发电机的关联，该关联构成了一个系统，能够供给辅助服务或以独立方式进行工作。我们将利用一个实验性应用来讨论这种类型的管理程序的实时实现，并将利用实验性试验对管理程序的不同变化形式进行比较。

在第6章中，一种能量管理程序的设计方法将被用于多源和多储能系统。本章研究的多源设施由一台风力发电机、一个可预见且可控制的源及两个拥有不同特性的储能系统组成。尽管风力发电机源具有随机性，且相关的发电量预测具有误差，但本章的目标是让该设施成为生产计划的一部分，进而纳入一个经典的网络，并通过参与变频控制对网络的稳定性做出贡献。本章将在不同的多源系统拓扑结构上对该管理程序的设计方法进行检验，以说明其系统化和模块化的特性。本章还将借助量化指标对各种拓扑结构的性能进行比较。

第7章讲述了纳入具有可再生风能发电量电力网的绝热压缩空气储能的管理和经济性提高。本章的目的是分析中功率和高功率储能装置（从数十兆瓦至数百兆瓦）如何提高电力网的经济性、用途和益处。本章将利用前面几章中所介绍的管理建构方法开发一种实时储能管理策略，以最大限度地提供服务，并使盈利能力最大化。此外，本章还将对管理程序的三种变体进行比较：一种管理程序只限于基于某一天为第二天所计划供需的传统经济性提高，另一种是基于模糊逻辑的实时管理程序，最后一种则是第二种管理程序的布尔型变体。模拟结果表明，如果经济储能收益成为具有实时管理系统服务的一部分，则这种收益具有重要的意义。

在本书所检验的一些示例中，假设储能系统的一些量度特性（功率、能量和动态）是预先规定的。通过纳入能量管理，可以采用与管理程序参数相同的方式对这些特性相对应的参数进行优化，其目的在于通过将智能纳入管理程序而简化这一量度及相关成本，这对经济可行条件下的储能发展构成了一种挑战。本书所介绍的一些示例可以扩展到其他类型的间歇性可再生能源（光伏发电、小型水电、海洋发电等）以及其他储能技术中。此外，还可以考虑其他目的，例如，储能系统老化，以控制这些系统的演进。

目　录

译者序
原书序
原书前言

第 1 章　电能储存的相关问题 …… 1
1.1　电能储存面临的困难 …… 1
1.2　电能储存的原因 …… 2
1.3　电网储能的增值 …… 4
1.4　储能管理 …… 6
1.5　参考文献 …… 8

第 2 章　储能的最新发展 …… 11
2.1　概述 …… 11
2.2　储能技术 …… 11
2.3　储能系统的特性 …… 12
2.3.1　储能容量 …… 12
2.3.2　最大功率和时间常数 …… 12
2.3.3　能量损失和效率 …… 13
2.3.4　老化 …… 13
2.3.5　成本 …… 13
2.3.6　能量和比功率 …… 13
2.3.7　响应时间 …… 14
2.3.8　灰色能量 …… 14
2.3.9　能量状态 …… 15
2.3.10　其他特性 …… 15
2.4　水力储能 …… 15
2.4.1　水力储能原理 …… 15
2.4.2　练习：黑湖电站 …… 16
2.5　压缩空气储能 …… 19
2.5.1　压缩空气储能原理 …… 19

2.5.2 第一代和第二代压缩空气储能 …… 19
2.5.3 绝热压缩空气储能 …… 21
2.5.4 空气储能 …… 22
2.5.5 液压气动储能 …… 22
2.6 热态储能 …… 23
2.6.1 显热储能 …… 23
2.6.2 潜热储能 …… 24
2.7 化学储能 …… 24
2.7.1 电化学储能 …… 24
2.7.2 氢气储能 …… 28
2.8 动能储能 …… 29
2.9 静电储能 …… 30
2.10 电磁储能 …… 30
2.11 储能技术的对比性能 …… 31
2.12 参考文献 …… 32

第3章 电力系统中储能的应用和价值 …… 34
3.1 概述 …… 34
3.2 电力系统介绍及其运行 …… 36
3.2.1 发电装置 …… 37
3.2.2 电网 …… 39
3.2.3 需求 …… 41
3.2.4 电力系统运行的基础知识 …… 42
3.3 储能可提供的服务 …… 51
3.3.1 概述 …… 51
3.3.2 并入输电网所需的服务 …… 52
3.3.3 为输电系统运营商提供的潜在附加服务 …… 53
3.3.4 储能为配电系统运营商提供的潜在服务 …… 55
3.3.5 为集中式发电业主提供的服务 …… 64
3.3.6 为可再生能源分散式发电商提供的服务 …… 66
3.3.7 为用户提供的服务 …… 71
3.3.8 从市场活动中获取的利益 …… 75
3.4 储能对处理拥堵事件贡献的示例 …… 77
3.4.1 电网充电状态的指标 …… 77
3.4.2 电网演进愿景 …… 77
3.4.3 布列塔尼拥堵事件的处理 …… 78

3.5　储能对孤岛电网频率控制提供动态支持的示例…… 79
3.5.1　服务背景和潜在利益…… 79
3.5.2　什么是欠频甩负荷…… 79
3.5.3　动态支持的技术规范…… 80
3.5.4　详细研究动态支持所采用的方法…… 81
3.5.5　第一阶段：理论方法…… 82
3.5.6　第二阶段：动态模拟…… 85
3.5.7　第三阶段：实验室执行…… 85
3.5.8　经济价值决策…… 87
3.5.9　结论…… 88
3.6　总结…… 88
3.7　参考文献…… 88

第4章　模糊逻辑及其在混合风－柴油机系统动能储存管理中的应用 …… 94
4.1　概述…… 94
4.2　模糊逻辑介绍…… 94
4.2.1　模糊推理原理…… 94
4.2.2　模糊逻辑与布尔逻辑…… 95
4.2.3　模糊管理程序的阶段…… 97
4.2.4　模糊推理示例 …… 100
4.3　孤立网络中风动能储能与柴油发电机的组合 …… 103
4.3.1　概述 …… 103
4.3.2　能量管理策略 …… 103
4.3.3　模糊逻辑管理程序 …… 105
4.3.4　使用模糊管理程序的模拟结果 …… 106
4.3.5　简单滤波的模拟结果 …… 108
4.4　结论 …… 110
4.5　参考文献 …… 111

第5章　配有储能系统的风力发电管理程序构建方法…… 112
5.1　概述 …… 112
5.2　能量系统的研究 …… 112
5.3　管理程序开发方法 …… 113
5.4　规范 …… 113
5.4.1　目标 …… 113
5.4.2　限制 …… 114

5.4.3 实施动作 …… 114
5.5 管理程序结构 …… 115
5.5.1 输入值 …… 115
5.5.2 输出值 …… 115
5.5.3 管理程序开发工具 …… 115
5.6 各种运行状态的确定：功能图 …… 117
5.6.1 N1 功能图 …… 118
5.6.2 N1.1 功能子图 …… 118
5.6.3 N1.2 功能子图 …… 119
5.6.4 N1.3 功能子图 …… 120
5.7 隶属函数 …… 120
5.8 运行图 …… 122
5.8.1 N1 运行图 …… 123
5.8.2 N1.1 运行子图 …… 123
5.8.3 N1.2 运行子图 …… 124
5.8.4 N1.3 运行子图 …… 124
5.9 模糊规则 …… 125
5.10 实验验证 …… 125
5.10.1 管理程序的植入 …… 125
5.10.2 实验配置 …… 127
5.10.3 实验结果和分析 …… 128
5.11 总结 …… 131
5.12 参考文献 …… 132

第 6 章 混合多源/多储能系统的管理程序设计 …… 134
6.1 概述 …… 134
6.2 含风力发电的混合多源系统管理程序的构建方法 …… 135
6.2.1 系统规格的确定 …… 135
6.2.2 管理程序架构 …… 136
6.2.3 功能框图定义 …… 138
6.2.4 隶属函数的确定 …… 140
6.2.5 运行图的确定 …… 144
6.2.6 模糊规则提取 …… 145
6.3 混合多源系统中不同变量特性的比较 …… 145
6.3.1 模拟系统的特点 …… 145
6.3.2 不同混合源变量的模拟 …… 147

6.3.3　根据不同指标对混合电源的特性进行比较 …… 154
6.4　结论 …… 154
6.5　附录 …… 155
6.5.1　输出值波动范围 …… 155
6.5.2　模糊规则 …… 156
6.6　参考文献 …… 157

第7章　并网型绝热压缩空气储能的能量管理和经济性提升 …… 159
7.1　概述 …… 159
7.2　储能提供的服务 …… 160
7.2.1　储能规划 …… 160
7.2.2　频率控制 …… 160
7.2.3　拥塞管理 …… 160
7.2.4　易变的可再生能源发电保障 …… 161
7.3　监管策略 …… 161
7.3.1　方法 …… 161
7.3.2　目标、限制和实施动作 …… 162
7.3.3　管理程序结构 …… 162
7.3.4　功能图的确定 …… 163
7.3.5　隶属函数的确定 …… 166
7.3.6　运行图的确定 …… 168
7.3.7　模糊规则的提取 …… 170
7.3.8　指标 …… 170
7.4　服务的经济价值 …… 170
7.4.1　购买/销售机制 …… 170
7.4.2　频率控制计费 …… 170
7.4.3　额外服务计费 …… 171
7.5　应用 …… 171
7.5.1　测试电网 …… 171
7.5.2　储能用于辅助服务时的贡献收益 …… 172
7.5.3　模糊管理程序与布尔管理程序的利益对比 …… 175
7.6　结论 …… 177
7.7　致谢 …… 177
7.8　参考文献 …… 177

第 1 章

电能储存的相关问题

1.1 电能储存面临的困难

在过去的 150 年间，电能载体已高度发达，这种载体已非常实用，在使用过程中没有污染，如果是由可再生能源发电，则几乎不会产生污染。变压器可以对电压和电流波的幅值随意进行调节，由于使用变压器，在非常高的电压下远距离输送电能则成为可能。变压器所提供的这种可能性逐渐可以解释为什么采用交流电压和电流可以使电网一直得以发展。

电能载体的薄弱点在于不能直接储存电流。它可以储存静电能量（在电容器中）或磁能（在超导线圈中），但这些解决方案的储能容量相当有限。为了获得很大的储能容量，必须将电能转换为另一种形式的能量。水轮泵站以势能的形式储能，能够储存大量的能量，但这些泵站所处区域必须要保证两个液压储罐之间存在显著的高度差。铅酸蓄电池的电化学储能早已用于机载应用和应急电源；而飞轮的动能储存已经在固定应用上使用了数十年，诸如应急电源和一些机载应用，包括卫星。

电化学电池使得连续储存电能成为可能。惯性能量储存要求可在变速运行的机械中使用，即在可变频率下运行。由于电网是在固定频率下以交流电压和电流的形式供电，这些储能技术的实施在电子功率出现之前仍颇为复杂。电子功率于 20 世纪 60 年代出现，目前用于随意转换电流和电压的形式和特性。

即使发电与用电之间的距离有数百千米之遥，电网管理也是基于发电量直接消耗这一原理进行设计，电能储存的困难对此进行了解释。核电设施能够产生理想的恒定功率，且有利于水力储能的发展。随着核电设施的发展，这种方法已在法国逐步形成。

能量直接消耗的优点是具有较高的整体能量收益。事实上，储能所需的能量转换因所采用的储能技术不同，产生的损失也大不相同。这些损失介于 10% ~50% 之间，甚至更多。然而，如果所储存的能量来自于一个源，而该源的能量不储存就会失去（源自于风能或光伏的能量就属于这种情况），从这个角度看待收益这一概念则是正确的。

最后应指出的是，电能可以被储存，之后以另一种能量形式被使用。国内电网

中的热水箱就是这种情况，其最终使用的是热能和通过电解制造的氢气。某些负荷具有一种储能容量，能够控制电网的供电，如超市冷藏库的制冷装置或电动汽车中的储能蓄电池。

1.2 电能储存的原因

电网管理主要基于发电量直接消耗这一原理。由于用电量是可变的，这种方法要求发电量恒定地适合于用电量。图 1.1 和图 1.2 所示为典型的家庭和商业用户的特征，说明了用电量的可变特性取决于每天的时间、季节和负荷类型。

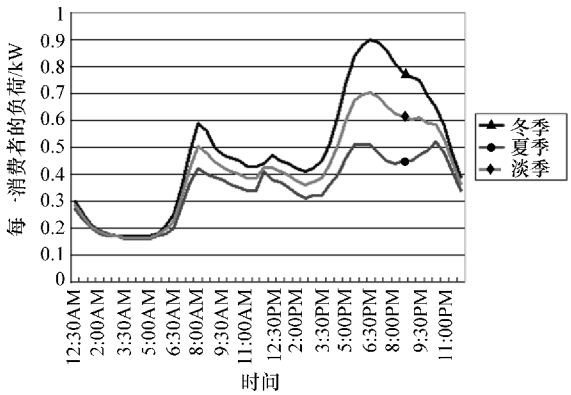


图 1.1 家庭用户的典型特征，不包括电加热［法国输电公司（RTE)］

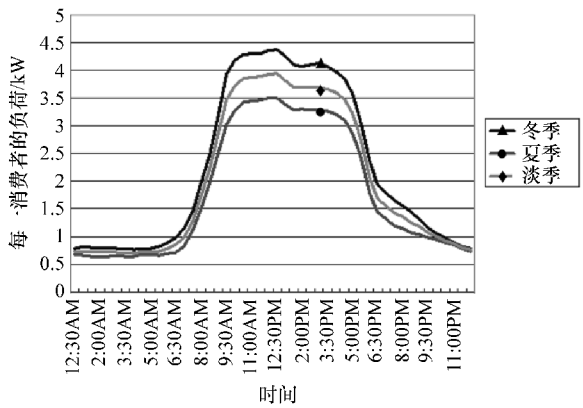


图 1.2 第三产业和个体用户的典型特征（法国输电公司）

由于可再生能源的发展，电网不得不面对适应高度间歇性发电的问题，风能、光伏能和海洋能以及小型径流式水力发电的能量就属于这种情况［ROB 12c］。图 1.3 所示为 300kW 风力发电机超过 5min 的发电量。除了很高的可变性外，还记录下了 3s 内 100kW 的波动。图 1.4 所示为一天内光伏设施的发电量；云层的出现导致这一发电量有较大的可变性。

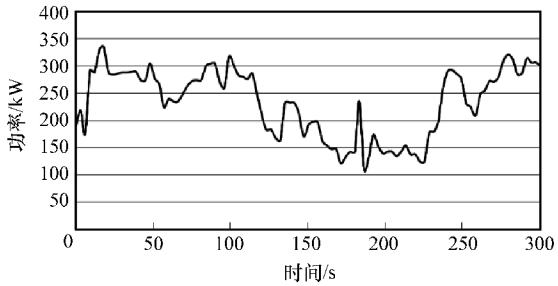


图 1.3　300kW 固定转速风力发电机的发电量示例

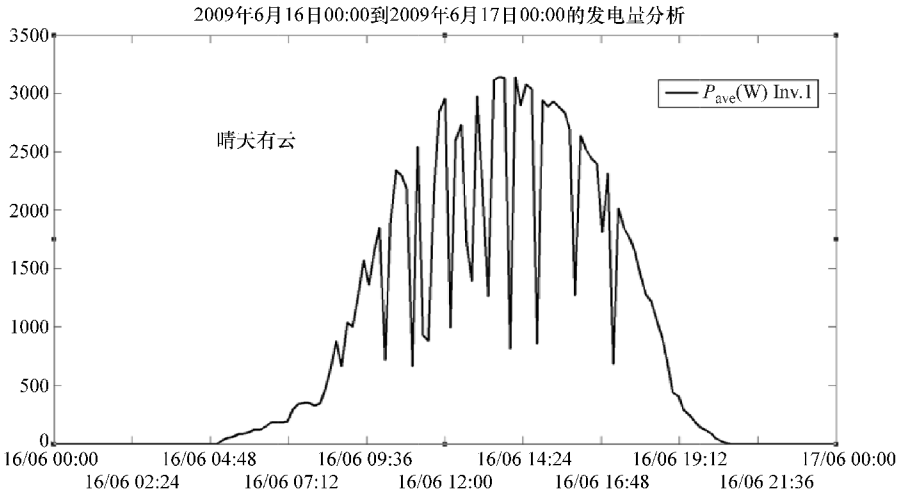


图 1.4　晴天有云的特征（来源：Auchan）

水力资源也显示了很大的波动。例如，海浪是一种丰富的资源，但其变化大且快，如图 1.5 所示。一条河流的流量在几个月甚至几年的时间内会有显著的波动，如图 1.6 所示，甚至在暴雨后出现洪水的情况下，一条河流的流量在几个小时内也会发生显著的波动。因此，小型径流式水力发电设施，如果没有配备上游水坝或溢洪道，当出现这些波动时，则会产生无法控制的可变功率［ROB 12c］。

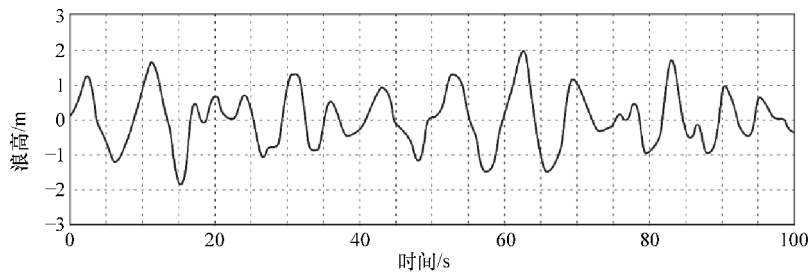


图 1.5　浪高变化［MOU 08］