

G. 培克曼 著
「奥地利」 P. V. 吉利

蓄热技术及其应用

机械工业出版社

714608

TK11/08

蓄热技术及其应用

[奥地利] G.培克曼 P.V.吉利 著

程祖虞 奚士光 译

H45/03



C0227020

76 77

社

本书由奥地利工学博士G.培克曼和教授、工学博士P. V. 吉利两人合著。全书共有八章：第一至三章讲蓄热的任务、理论、系统和应用原理，第四至八章讲蓄热器的构造和蓄热技术在工业企业、采暖、降温、火力发电厂、热电厂和水陆空运输工具等方面的具体应用实例及设计。

本书不但在理论上分析阐述较深，而且对应用技术汇集较广，是目前在蓄热和节能技术方面一本较有价值的书。

本书的主要读者对象为从事工业锅炉、火力发电厂、热电厂、核电站以及各工厂的能源、动力和城市供热系统的技术人员及管理人员并大专院校有关专业的师生。

Thermal Energy Storage
Basics-Design-Applications to Power
Generation and Heat Supply
G. Beckmann P. V. Gilli
Springer-Verlag

1984

• • •
蓄热技术及其应用
〔奥地利〕G.培克曼 P. V. 吉利 著
程祖虞 奚士光 译

责任编辑：王琳 责任校对：孙志筠
封面设计：姚毅 版式设计：张伟行

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•
开本 787×1092¹/₃₂·印张9¹/₄·字数199千字
1989年2月北京第一版·1989年2月北京第一次印刷
印数 0,001—1,600·定价4.40元

•
ISBN 7-111-00686-0/TK·30

译 者 的 话

在历史上蓄热技术的应用可以追溯到很早以前，而它在工业上的应用则始于19世纪，到20世纪30年代在欧洲已广泛地采用了蓄热技术，主要用以节约能源。目前，欧洲在研究和应用蓄热技术方面仍处于领先地位。

现在我国对能源节约给以极大地重视。近年来，随着我国节能工作的广泛开展，蒸汽（或热水）蓄热技术已在节能、经济、环保、增产等方面愈来愈显示出它的综合效益，如蒸汽蓄热器已在各地工业锅炉房的供热系统中逐渐推广应用，但和工业先进的国家相比，无论在研究、设计、制造和推广应用方面都还存在着不小的差距。国内迄今尚未出版过较系统的蓄热技术方面的专著。有鉴于此，为促进我国蓄热技术的研究、设计与应用，我们翻译了这本有关蓄热技术问题的专著。

在我们所看到的国外几本蓄热技术著作中，本书在理论上分析阐述较深，在应用上汇集的示例面广量多，编写方法及层次安排较合理，是当前在蓄热技术方面一本有价值的专著。

本书内容丰富，阅后既可使人了解国外在蓄热技术方面的进展现状，又可使人广开思路，引导探索蓄热技术在我国各领域中的应用。

本书原名《热能的储存——基本原理、设计以及在电力生产和供热方面的应用》(Thermal Energy Storage——Bas-

ics-Design-Applications to Power Generation and Heat Supply), 是能源丛书之一, 该丛书的主编人为: M. 格林农 (M. Grenon), S. 史利乃华生 (S. Srinivasan), G. 伏依特 (G. Woite)。

本书原文中有些文句极其简炼, 内容上所涉及的专业面很广, 限于译者的水平和知识面, 在理解和翻译方面如有不妥之处, 欢迎读者指正。

本书第一至三章由奚士光翻译, 第四至八章由程祖虞翻译, 并由程祖虞负责总校订。

在翻译过程中承郭俊椿同志大力帮助, 特此致谢。

程祖虞 奚士光

一九八六年十月

序 言

本书论述了热能储存的基本原理和它在工业、采暖（包括热电联产）、平抑高峰负荷和车辆驱动等方面的应用，从而达到节能和替代燃油的目的。

近年来计划建设的和已经建成的蓄热系统大量增加，这是因为核电站、太阳能利用、新的容器制造工艺的应用有所增加，以及在发电、工业、家庭和车辆等方面有替代燃油的需要，故而使得热能储存的重要性相应地增加。

在此，我们十分感谢各公司的友好帮助，为我们编写本书提供了所需的图纸、照片资料和数据。

G. 培克曼和 P. V 吉利
于维也纳和格拉茨，1983年12月

目 录

第一章 引言	1
1.1 蓄能的基本任务	1
1.2 蓄能装置的经济参数	3
1.3 优化	7
1.3.1 单一能源转换装置的能源供应系统	7
1.3.2 多能源的能源供应系统	8
1.3.3 基本负荷厂的优化	17
1.4 热能储存的历史	22
第二章 基本原理	30
2.1 分类	30
2.2 在饱和液体中储存显热	34
2.2.1 变压蓄能	35
2.2.2 蒸汽储汽罐蓄能	39
2.2.3 膨胀式蓄能	42
2.2.4 间接的变压蓄能	45
2.3 在加压的(过冷的)液体中储存显热	46
2.3.1 蓄能容量	46
2.3.2 型式	49
2.3.3 蓄能介质	51
2.4 在固体中储存显热	53
2.4.1 型式	53
2.4.2 固态蓄热介质	54
2.5 潜热蓄能	56
2.5.1 蓄能容量	56
2.5.2 蓄能介质	57
2.5.3 充能与放能设备	61

2.6 压力气体蓄能	64
2.7 其它蓄热系统	69
2.7.1 吸收蓄热	69
2.7.2 热化学蓄热	74
2.8 蓄能容量的比较	75
2.8.1 能量密度	75
2.8.2 焓密度	77
2.9 蓄热的效率	78
2.9.1 滞止损失	78
2.9.2 充能和放能损失	80
2.9.3 总蓄能损失	84
第三章 蓄能系统	85
3.1 发电厂的蓄能系统	85
3.1.1 基本原理	85
3.1.2 蒸汽发电厂中的流量蓄能系统	88
3.1.3 燃气轮机发电厂的流量蓄能系统	90
3.1.4 燃气轮机泵送蓄能系统(压缩空气蓄能)	90
3.1.5 气压泵送蓄能	92
3.1.6 热泵蓄能系统	92
3.1.7 汇集式泵送蓄能系统	93
3.2 储存效率	95
3.2.1 定义	95
3.2.2 泵送蓄能系统	96
3.2.3 流量蓄能系统	97
3.2.4 给水蓄能	99
3.2.5 蓄能电厂中的损失	102
3.3 充能和放能功率的限制	105
3.3.1 蓄能装置设计的限制	105
3.3.2 蓄能装置组成部分的限制	105
3.3.3 热力方面的限制	106

3.4 蓄能电厂中的控制和负荷分配.....	109
3.4.1 独立的蓄能装置.....	109
3.4.2 汇集式的蓄能装置.....	112
3.4.3 设有缓冲蓄热装置的蒸汽发电厂.....	114
第四章 蓄能的容器.....	116
4.1 容器的形状.....	117
4.1.1 材料的优化利用.....	117
4.1.2 表面积优化.....	119
4.1.3 限度.....	121
4.1.4 优化概论.....	122
4.2 内部装置.....	124
4.2.1 变压式蓄热器的内部装置.....	124
4.2.2 置换式蓄热器的内部装置.....	127
4.3 焊接压力容器.....	129
4.4 地下式压力容器.....	131
4.4.1 由盐穹窿建成的压缩空气储气器.....	132
4.4.2 建在岩洞中的热水置换式蓄热器.....	133
4.4.3 建在岩洞中的热水变压式蓄热器.....	133
4.4.4 柔性可变形的容器.....	138
4.5 预应力压力容器.....	139
4.5.1 总论.....	139
4.5.2 预应力混凝土压力容器.....	141
4.5.3 预应力铸铁容器.....	143
4.6 非受压容器.....	150
4.6.1 非受压高温容器.....	150
4.6.2 非受压低温容器.....	152
第五章 工业中的热能储存.....	157
5.1 概论.....	157
5.2 固体蓄热.....	159
5.2.1 再生式换热器.....	159

5.2.2 从热的废气中回收热能	164
5.2.3 从固体产品中回收热能	165
5.3 热水蓄热	169
5.3.1 喷射泵	169
5.3.2 结合废热锅炉热能的蓄热	171
5.3.3 工业上蒸汽的和热水的管网中的蓄热	172
5.4 结论	179
第六章 房屋采暖和降温中的热能储存	180
6.1 概论	180
6.2 采暖锅炉	181
6.3 电力采暖	184
6.4 太阳热	185
6.4.1 总论	185
6.4.2 显热蓄热	186
6.4.3 太阳能池	187
6.4.4 潜热蓄热	188
6.4.5 被动系统	188
6.5 热泵	191
6.5.1 总论	191
6.5.2 缓冲蓄热	191
6.5.3 低温的潜热蓄热器	192
6.5.4 低温的地下土层蓄热	193
6.5.5 浓度差蓄能	194
6.6 区域采暖	196
6.6.1 总论	196
6.6.2 热力站和蓄热装置的运行方式	198
6.6.3 废物焚化站中的热水蓄热	202
6.6.4 燃气轮机热电联产动力站中的热水蓄热	202
6.6.5 蒸汽热电联产动力站(背压机组)中的热水蓄热	202

6.6.6 抽汽热电联产动力站中的热水蓄热	206
6.6.7 燃气轮机和蒸汽轮机联合的热电联产动力站 中的热水蓄热	208
6.6.8 区域供热和给水蓄热的联合	209
6.7 大规模的季节性蓄热	209
6.8 结论	211
第七章 具有蓄能装置的发电厂	212
7.1 概论	212
7.2 蒸汽泵送蓄能	213
7.3 燃气轮机发电厂中的蓄能	214
7.3.1 气压泵送蓄能	214
7.3.2 压缩空气蓄能	216
7.3.3 供开式循环燃气轮机快速起动的空气蓄能	223
7.4 燃煤发电厂中的蓄热	226
7.4.1 已建的高峰和瞬时备用机组	227
7.4.2 对燃煤发电厂中蓄热的新建议	232
7.5 核电站中的蓄热	240
7.5.1 给水蓄热	242
7.5.2 间接式给水蓄热	242
7.5.3 蒸汽蓄热系统	242
7.5.4 可超负荷的汽轮机与单独的调峰汽轮机的比较	243
7.5.5 给水蓄热和蒸汽蓄热的组合式(串级)	244
7.5.6 汇集式蒸汽泵送蓄热	246
7.6 太阳能电站中的蓄热	247
7.6.1 概论	247
7.6.2 具有直接式蓄热的单回路循环太阳能蒸汽 动力站	249
7.6.3 具有间接式蓄热的单回路循环太阳能蒸汽动 力站	254
7.6.4 双回路循环太阳能蒸汽动力站	255

7.6.5 太阳能开式循环燃气轮机·····	256
7.6.6 太阳能闭式循环燃气轮机·····	258
7.7 结论·····	259
第八章 热能储存应用于交通工具·····	260
8.1 概论·····	260
8.2 空中和海上运输工具·····	261
8.2.1 热水火箭·····	261
8.2.2 蒸汽弹射器·····	262
8.2.3 鱼雷·····	262
8.3 铁道车辆·····	263
8.3.1 压缩空气机车·····	263
8.3.2 热化学蓄能机车·····	266
8.3.3 蓄汽机车·····	266
8.4 城市交通车·····	270
8.4.1 应用压缩空气蓄能的城市交通车·····	270
8.4.2 应用热化学蓄能的城市交通车·····	271
8.4.3 应用潜热和显热蓄能的城市交通车·····	272
8.5 结论·····	274
参考文献 ·····	275

第一章 引言

1.1 蓄能的基本任务

二次能源的供应系统包括一次能源、能源转换系统和二次能源的用户。由于在能量的供应和需求之间会有时间性的、有时是局部的差异。所以蓄能的基本任务就是要克服这些差异〔1.1~1.32〕[⊖]。这项任务目前已作为一个专门研究的课题，并有其独立的专题科学讨论会和论文集〔1.1~1.16, 1.30, 1.32〕。

假使这种差异是由于能量需要量的变化（突然多或少）引起的，那么这种高峰负荷问题就可以用蓄能的方法来解决，至少可起到缓和的作用。由于建设一座蓄能装置的投资费用相对要比建设一座高峰负荷厂的低；尽管蓄热装置会有储存损失，但由于储存的能量是来自燃料费用低的带基本负荷工厂的多余能量，所以它还是能够降低燃料费用的。

如果供需之间的差异是由于一次能源和能源转换装置之类的原因引起的，则蓄能装置的任务是使能源产量均衡，即不但要削减能源输出量的高峰，还要填补输出量的低谷（即填谷）。功率变化是某些一次能源的典型特性，如太阳能电站和潮汐电站的有规则的（周期性的）变化和风力、水力以及太阳能电站的随机变化。

蓄能的任务还包括：

⊖ 方括号内为参考文献的编号，参考文献附在书末。

当电厂发生突然停役时即刻起到备用的作用，特别在备用装置起动发电以前的期间内起到弥补作用；

在负荷变化率增高时起到调节或缓冲的作用，以使能源转换装置能以较低的负荷变化率来满足负荷的需要；

在用户处或靠近用户处蓄能，不仅在能量转换阶段还可在其分配系统中减少高峰负荷和设备费用。

图1-1示出了二次能源供应系统的一些典型组成部分。在

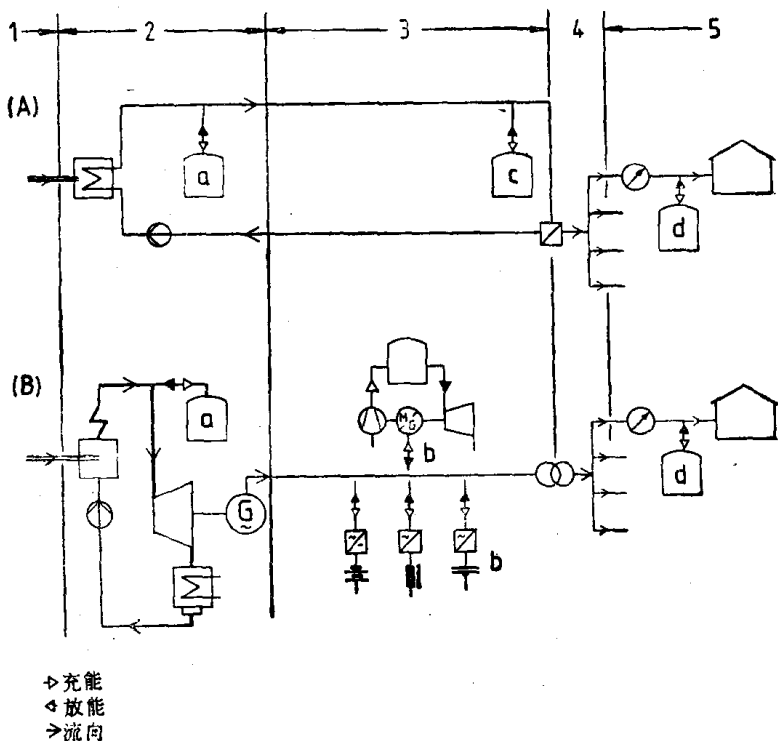


图1-1 二次能源供应系统的组成部分

(A)供热系统 (B)供电系统 1—一次能源 2—能源转换 3—二次能源输送 4—二次能源分配 5—二次能源用户 a—汇集式蓄能 b—电网中蓄能 c—在分配前蓄能 d—在表计后蓄能

供热系统 (A) 中, 储存的是热能; 它可以设置在热力站内部, 也可以设在长距离输送管的终端(在负荷分配系统之前)或用户处。输热管道本身也是一个容量相当大的蓄能系统。在供电系统 (B) 中, 能量可以储存在电站内部(汇集的蓄能)或在电网中某一地方, 甚至在用户处(在电表以后)。电网本身实际上并无蓄能容量。

汇集的蓄能可以是热力的或机械的; 在网路中蓄能可以采用泵唧送热力、气力或水力的蓄能方法, 或者是直接的蓄能, 如电化学的、电磁的或蓄在电容器中。用户处的蓄能可以是热力的、电化学的或机械的。

1.2 蓄能装置的经济参数

对一蓄能装置的详尽评价不仅要包括对几个可能的蓄能和带高峰负荷系统的经济比较, 还应当包括对该能源系统中一个或几个蓄能系统的规模进行优化。有时, 经济因素以外的其他原因(如灵活性、可用率、运行方便性等)会对装设蓄能系统有决定性的作用。

必须指出, 对蓄能装置的优化工作较之对不带蓄能的单纯能量转换装置的优化, 需要进行更为细致的工作并对负荷的需要量及其随时间而变化的特点要有更多的了解。对于蓄能装置, 不仅其释放功率是必须进行选择的参数, 其蓄能容量和充蓄功率同样也是必须选择的参数。参数的数目应按每项投资本身的得益来确定, 而有许多典型的情况则可用一般的方式来处理。

设置一座蓄能装置的费用包括两部分: 一部分取决于其容量; 另一部分取决于其(释放和充蓄)功率。

(a) 与容量有关的费用:

储存容器及其内衬、保温材料 and 支架等；
储存的介质。

(b) 与释放功率有关的费用：

储存容器内、外的释放能量的设备；

释放能量的管道；

膨胀作功的发动机和发电机（或扩大主机）；

废热排放系统（或扩大主系统）。

(c) 与充蓄功率有关的费用：

储存容器内、外的充蓄能量的设备；

充蓄能量的管道；

压缩机与电动机（仅指泵送储存）。

其余费用项目如建筑、基础、控制、安装、投运等就难以归入以上各类费用中了。通常可将 (a) 与 (b) 两项相加[⊖]后得到投资费用再除以释放功率后，即可得到投资费用和比投资费用

$$c_{st} = N_d c_{pow} + E_{st} c_{cap} \quad (1-1)$$

$$c_{st} = c_{pow} + d c_{cap} \quad (1-2)$$

式中 c_{st} ——蓄能装置的建设费用（美元）；

N_d ——释放功率（kW）；

c_{pow} ——与释放功率有关部分的费用（美元/kW）；

E_{st} ——储存容量（kW·h）；

c_{cap} ——与容量有关部分的费用〔美元/(kW·h)〕；

c_{st} ——比投资费用， $c_{st} = c_{st}/N_d$ ；

d ——满负荷释放能量的持续时间； $d = E_{st}/N_d$ (h)，
（或“释放能量小时数”）。

表1-1中列出按梅瑟许密脱-别尔考-勃洛姆（Messer-

⊖ 原文误为(b)与(c)两项相加。——译者注

Schmidt-Balkew-Blom)的资料(MBB, (6. 20))中所提几种型式用于应付电力高峰负荷的蓄能装置的比投资费用。这些数据与释放能量的小时数 d 之间的关系示于图1-2中。从图上可以看出热能储存较适用于短时期的蓄能(每天或者每周储存几小时), 而水力泵唧蓄能(如有合适厂址的话)则更适合用于长时期的蓄能(每周的或季节性的储存达12小时以上直到几百小时)。

蓄能装置的燃料费用为

$$b_{s,t} = s_o / \eta_{s,t} \quad (1-3)$$

式中 $b_{s,t}$ ——燃料费用〔美元/(kW·h)〕;

s_o ——充入电能的费用〔美元/(kW·h)〕;

$\eta_{s,t}$ ——储存效率(转换效率)。

表1-1 高峰负荷蓄能系统的技术经济特性

	燃料或充入 能 源	比投资费用① $C_{s,t}$		转换效率
		与功率有关部分 $C_{pow}(\text{DM/kW})$	与容量有关部分 $C_{cap}(\text{DM}/(\text{kW} \cdot \text{h}))$	
燃气轮机 (连同燃料储存)	油	400	0.1	0.26~0.30②
压缩空气蓄能 (带燃烧室)	非高峰负荷时的电力 油, 天然气	240	25	0.55③
气力加压蓄能 (不带燃烧室)	非高峰负荷时的电力	300~380	70~150	0.65~0.7
水力泵唧蓄能	非高峰负荷时的电力	550	25	0.5~0.75
先进的蓄电池	非高峰负荷时的电力	190~665	57~170	0.7
飞 轮	非高峰负荷时的电力	450~500	100~150	0.7
热能储存 (热水)	非高峰负荷时的电力	215~285	70~100	0.7~0.95

① DM系 1977年时的联邦德国马克(6.20); 1DM (1977)=0.44美元(1977)。

② 指热效率。

③ 定义见第7.3.2节。