

地热和地热发电技术指南

西藏地热工程处 译

水利电力出版社

地热和地热发电技术指南

西藏地热工程处 译

水利电力出版社

目 录

作者名单

译校者名单

中译本序

前言

第1章 导论	(1)
第2章 资源特性: 勘探、评价和开发	(5)
2.1 地热区的地质学和地球物理学	(5)
2.1.1 引言	(5)
2.1.2 地热系统勘探	(9)
2.1.3 各类系统的实例	(39)
2.1.4 致谢 (译文略)	(53)
2.1.5 参考书刊目录	(53)
2.2 热储中热量和质量的传递	(53)
2.2.1 热量的热对流传递	(53)
2.2.2 地热储内部的质量和热量传递	(55)
2.2.3 热储中的压力降和压力恢复	(57)
2.2.4 与火成活动相关地热系统的含热量	(59)
2.2.5 水热对流系统的含热量	(60)
2.2.6 岩石的力学性质	(61)
2.2.7 岩石致裂方法	(62)
2.2.8 参考文献目录	(63)
2.3 地热系统中的流体流和热量传输物理学	(63)
2.3.1 引言	(63)
2.3.2 理论发展	(65)
2.3.3 天然条件下的地热系统	(68)
2.3.4 开发状态下的地热系统	(68)
2.3.5 结论	(70)
2.3.6 参考文献目录	(70)
2.4 地热资源钻探	(70)
2.4.1 回转钻进	(71)
2.4.2 地热井井场	(71)
2.4.3 钻头与钻井液	(71)
2.4.4 下套管与注水泥	(73)
2.4.5 井流的引喷	(73)

2.4.6	钻井成本	(74)
2.4.7	先进的钻进方法	(80)
2.4.8	致谢(译文略)	(81)
2.4.9	参考文献目录	(81)
2.5	录井	(81)
2.5.1	引言	(81)
2.5.2	地球物理测量	(82)
2.5.3	地质观察	(88)
2.5.4	测井方法的某些局限性	(89)
2.5.5	生产井测井实例介绍	(90)
2.5.6	参考文献目录	(91)
2.6	热储-地热井系统的流动分析	(91)
2.6.1	井管内流动	(91)
2.6.2	地热井-热储组合系统的特性	(98)
2.6.3	垂直两相流中两相的缔合形式	(111)
2.6.4	地热系统的热动力可用率	(113)
2.6.5	地热流体的地面输送	(118)
2.6.6	参考文献目录	(127)
第3章	地热能的可用功	(128)
3.1	引言	(128)
3.2	地热储	(128)
3.3	汽轮机进口和出口处的热力状态	(130)
3.4	典型地热发电装置	(131)
3.5	热力学系统	(135)
3.6	大气	(135)
3.7	热力学第二定律和熵增	(135)
3.8	基本控制方程式	(136)
3.8.1	热力学第一定律	(136)
3.8.2	热力学第二定律	(137)
3.9	作功的能力	(139)
3.10	能量散失和利用系数	(140)
3.11	排放到大气中的热流量	(141)
3.12	数字实例	(141)
3.13	化石燃料	(146)
3.14	作为度量作功能力尺度的能量和循环效率	(147)
3.15	历史的题外话	(149)
3.16	可用功的图解表示法	(150)
3.16.1	通用 $T-S$ 图	(150)
3.16.2	蒸汽的 $T-S$ 图	(150)

3.16.3	自由排放的损失	(152)
3.16.4	排出口温度和排放热量的温度变化.....	(153)
3.16.5	通用焓熵图.....	(154)
3.16.6	蒸汽的焓熵图 绝热膨胀	(155)
3.16.7	T-s图中的绝热膨胀	(157)
3.16.8	焓熵图	(157)
3.17	关于热物理性质的注释	(157)
3.17.1	水质	(158)
3.17.2	水溶液	(159)
3.17.3	碳氢化合物 —— 异丁烷	(160)
3.18	符号一览表	(161)
3.19	参考文献目录	(161)
第4章	发电系统	(162)
4.1	扩容蒸汽汽轮机循环.....	(162)
4.1.1	引言.....	(162)
4.1.2	循环热力学	(164)
4.1.3	某些特殊设计的特点.....	(182)
4.1.4	汽轮机的特性和设计要求.....	(187)
4.1.5	地热汽轮机的控制	(197)
4.1.6	地热汽轮机的材料选择.....	(206)
4.2	双工质循环.....	(210)
4.2.1	引言	(210)
4.2.2	工质的热物理特性	(211)
4.2.3	循环热力学	(217)
4.2.4	轴流式有机流体汽轮机.....	(224)
4.2.5	地热原水热交换器	(230)
4.2.6	直接接触式双工质循环	(254)
4.3	化石燃料-地热混合循环	(291)
4.3.1	引言.....	(291)
4.3.2	混合能量转换系统的热力学分析	(292)
4.3.3	地热预热系统	(296)
4.3.4	化石燃料过热系统	(301)
4.3.5	设计原则和经济分析准则.....	(304)
4.3.6	结论	(310)
4.3.7	参考文献目录	(311)
4.3.8	符号表.....	(311)
4.4	用于地热能发电的全流系统的发展现状.....	(312)
4.4.1	引言	(312)
4.4.2	井口流体的特性	(312)

4.4.3	能量转换的原理	(313)
4.4.4	地热水化学成分的影响	(333)
4.4.5	一种可能的全流系统	(334)
4.4.6	参考文献目录	(335)
4.4.7	参考书刊目录	(335)
4.4.8	符号表	(335)
第5章	地热电站的废热排放	(336)
5.1	引论	(336)
5.1.1	引言	(336)
5.1.2	典型冷却系统和一般设计要点	(338)
5.1.3	废热利用	(340)
5.1.4	水的可用性和有关法律	(342)
5.1.5	参考文献目录	(343)
5.2	凝汽器	(343)
5.2.1	总述	(343)
5.2.2	凝结温度对地热电站性能的影响	(345)
5.2.3	直接接触式凝汽器	(346)
5.2.4	表面式凝汽器	(349)
5.2.5	参考文献目录	(376)
5.3	排热系统和设备	(377)
5.3.1	概述	(377)
5.3.2	直流式冷却系统	(377)
5.3.3	冷却水库和冷却水池	(378)
5.3.4	喷水池和喷水渠	(381)
5.3.5	冷却塔	(385)
5.3.6	参考文献目录	(406)
5.4	分相冷却	(406)
5.5	可变功率或“浮动”功率冷却概念	(406)
5.6	加利福尼亚州 Heber和Niland 的50MW(e) 发电厂冷却设备的方案设计	(408)
5.6.1	概述	(408)
5.6.2	Heber发电厂	(410)
5.6.3	Niland发电厂	(412)
5.6.4	Heber发电厂采用的湿-干式冷却塔	(413)
5.6.5	参考文献目录	(414)
5.7	环境温度波动的影响	(414)
5.7.1	引言	(414)
5.7.2	理想情况	(415)
5.7.3	实际系统的特性	(418)
5.7.4	设计工作点的选择	(418)

5.7.5 参考文献目录.....	(420)
第 6 章 地热发电系统的材料选择原则	(421)
6.1 引言.....	(421)
6.2 地热动力循环.....	(421)
6.3 地热系统中的金属腐蚀方式.....	(422)
6.4 地热流体中的腐蚀性组份.....	(423)
6.5 金属材料在地热系统中的工作特性.....	(425)
6.5.1 金属在井口和扩容液流中的性能	(425)
6.5.2 金属在凝结水流中的性能	(430)
6.5.3 金属与液态水为主地热源的蒸汽接触时的性能	(430)
6.6 非金属材料.....	(431)
6.7 参考文献目录.....	(431)
第 7 章 经济分析	(432)
7.1 经济分析的目的.....	(432)
7.2 基本概念和术语.....	(432)
7.3 成本会计.....	(437)
7.4 定义.....	(437)
7.5 收益表.....	(438)
7.6 分析方法.....	(440)
7.6.1 净现值法	(440)
7.6.2 单位成本的决定	(440)
7.6.3 内部利润率	(441)
7.6.4 差别分析法	(441)
7.6.5 回收期	(441)
7.6.6 固定借入率	(442)
7.6.7 应用资本回收因素的分析.....	(443)
7.6.8 成本效果、效益-成本和价值分析法	(443)
7.6.9 敏感性分析	(444)
7.7 地热发电中的技术和财务因素的敏感性.....	(445)
7.7.1 井口温度的影响	(445)
7.7.2 流量.....	(447)
7.7.3 井的成本.....	(448)
7.7.4 电站容量.....	(448)
7.7.5 转换效率.....	(450)
7.7.6 负荷系数.....	(450)
7.7.7 热力循环.....	(450)
7.7.8 财务因素.....	(451)
7.8 通货膨胀.....	(451)
7.9 参考文献目录.....	(453)

7.10 参考书刊目录	(453)
第8章 方案选择和初步设计最优化的准则	(454)
8.1 方案选择的准则	(454)
8.1.1 引言	(454)
8.1.2 市场因素	(456)
8.1.3 运行因素	(461)
8.1.4 筹资和现金流动	(465)
8.1.5 选择过程小结	(465)
8.2 初步设计最优化	(466)
8.2.1 引言	(466)
8.2.2 现代工艺水平规范的某些特点	(468)
8.2.3 现行软件的局限性	(468)
8.2.4 系统设计的选择准则	(469)
8.2.5 电厂-地热田供选择方案的综合分析	(470)
8.2.6 电厂边界条件假定——与热储的匹配	(475)
8.2.7 井的结构设计的影响	(479)
8.2.8 系统分析——采用计算机的设计最优化	(480)
8.2.9 采用LBL GEOTHM规范的最优化	(481)
8.2.10 热力学最优化作为成本最优化的先导	(486)
8.2.11 GEOTHM 举例	(487)
8.2.12 实例问题的分析结果	(491)
8.2.13 总结和结论	(499)
8.2.14 所用符号	(500)
8.2.15 参考文献目录	(501)
8.3 设备部件的生产定点和采购	(501)
8.3.1 设计人员面临的问题	(501)
8.3.2 可用的设备和部件	(502)
8.3.3 需要改装或新开发的设备和部件	(503)
8.3.4 采购工作的管理	(505)
8.3.5 适用的规范和标准	(505)
第9章 环境研究	(507)
9.1 法规和适用的法律	(507)
9.1.1 总体展望	(507)
9.1.2 地热能污染控制法规	(508)
9.1.3 1972年联邦水污染控制法修正案 (FWPCA)	(509)
9.1.4 洁淨空气法及其修正案	(510)
9.1.5 安全饮用水法案	(510)
9.1.6 1976年资源保护和回收法案	(511)
9.1.7 有毒物质控制法案	(511)

9.1.8	1972年噪声控制法案	(511)
9.1.9	与地热污染控制有关的其他联邦法律	(511)
9.1.10	州立和地方污染控制法律和条例	(513)
9.2	地热能工作的致污效应	(513)
9.2.1	污染源	(513)
9.2.2	地热流体中的致污组份	(518)
9.2.3	地热工作产生的噪声	(519)
9.2.4	地热致污组份的环境效应	(521)
9.3	EPA 提出的致污组份排放极限	(529)
9.3.1	概说	(529)
9.3.2	空气致污物质的极限	(529)
9.3.3	水致污组份的限额	(530)
9.3.4	场地清整废料的限制	(531)
9.3.5	噪声限制	(531)
9.4	空气污染控制工艺	(531)
9.4.1	Stretford过程	(531)
9.4.2	铁触媒过程	(533)
9.4.3	EIC过程	(535)
9.4.4	Dow充氧处理过程	(540)
9.4.5	固体吸附剂过程	(540)
9.4.6	Claus过程	(540)
9.4.7	过氧化氢过程	(541)
9.4.8	臭氧过程	(542)
9.4.9	燃烧炉-涤气器过程	(542)
9.4.10	触媒-涤气器过程	(543)
9.4.11	氘过程	(543)
9.5	液体、固体和噪声污染控制技术	(543)
9.5.1	废水处理技术	(543)
9.5.2	废水排放技术	(548)
9.5.3	固体废料排除	(557)
9.5.4	噪声控制	(558)
9.6	环境监测	(559)
9.6.1	空气和水的点源监测	(559)
9.6.2	环境空气监测	(560)
9.6.3	周围水质监测	(560)
9.6.4	地下水监测	(561)
9.6.5	场地清整废料	(562)
9.6.6	噪声监测	(562)
9.6.7	空气和水质的基线监测	(562)

9.7	废水和废气标准的未来发展	(563)
9.8	参考文献目录	(564)
第10章	世界各地的地热电站	(565)
10.1	引论	(565)
10.1.1	历史的回顾	(565)
10.1.2	能量转换系统	(565)
10.1.3	电站性能因素	(566)
10.2	中国(译文略)	(568)
10.3	萨尔瓦多	(568)
10.3.1	概述	(568)
10.3.2	Ahuachapan	(568)
10.3.3	萨尔瓦多其他热区	(574)
10.4	冰岛	(574)
10.4.1	地质特征	(574)
10.4.2	Namafjall	(575)
10.4.3	Krafla	(577)
10.4.4	Svartsengi	(578)
10.5	意大利	(579)
10.5.1	概述	(579)
10.5.2	Larderello (Boraciferous地区)	(579)
10.5.3	Monte Amiata	(584)
10.5.4	Travale	(585)
10.6	日本	(585)
10.6.1	综述	(585)
10.6.2	Matsukawa	(586)
10.6.3	Otake	(589)
10.6.4	Onuma	(589)
10.6.5	Onikobe	(590)
10.6.6	Hatchobaru	(590)
10.6.7	Kakkonda	(591)
10.6.8	Mori和Otake双工质试验电站	(591)
10.6.9	Mori	(592)
10.6.10	日本的其他远景区	(592)
10.7	墨西哥	(592)
10.7.1	综述	(592)
10.7.2	Pathe	(593)
10.7.3	Cerro Prieto	(593)
10.7.4	墨西哥地热发电的未来展望	(597)
10.8	新西兰	(598)

10.8.1	引言	(598)
10.8.2	Wairakei	(598)
10.8.3	Kawerau	(603)
10.8.4	Ohaki (Broadlands)	(604)
10.8.5	新西兰的其他地热区	(604)
10.9	菲律宾	(605)
10.9.1	展望	(605)
10.9.2	Tiwi	(605)
10.9.3	Makiling Banahaw (Los Banos)	(606)
10.9.4	Leyte (Tongonan)	(606)
10.9.5	菲律宾其他地热远景区	(607)
10.10	土耳其	(608)
10.10.1	引言	(608)
10.10.2	Kizildere	(608)
10.10.3	土耳其正在勘探的其他地热区	(609)
10.11	苏维埃社会主义共和国联盟	(610)
10.11.1	综述	(610)
10.11.2	Pauzhetka	(611)
10.11.3	Paratunka	(612)
10.11.4	Bolshoye-Bannoye	(614)
10.11.5	潜在的苏维埃地热电站	(616)
10.12	美国	(616)
10.12.1	历史背景	(616)
10.12.2	Geysers —Sonomaand Lake (加利福尼亚州)	(617)
10.12.3	Magmamax 双双流体循环电站— East Mesa (加利福尼亚州)	(625)
10.12.4	Republic Geothermal—East Mesa (加利福尼亚州)	(628)
10.12.5	Southern California Edison—Brawley (加利福尼亚州)	(628)
10.12.6	加利福尼亚州 Imperial Valley 规划中的地热电站	(628)
10.12.7	双沸腾双工质循环电站—爱达荷 Raft River 电站	(629)
10.12.8	夏威夷地热项目—Puna 地热电站	(629)
10.12.9	新墨西哥州 Valles Caldera 扩容蒸汽示范电站	(630)
10.12.10	美国其他潜在的地热电站	(630)
10.13	世界各国计划中的地热电站	(631)
10.13.1	调查综述	(631)
10.13.2	亚速尔 (葡萄牙)	(632)
10.13.3	智利	(632)
10.13.4	哥斯达黎加	(632)
10.13.5	危地马拉	(632)
10.13.6	洪都拉斯	(633)

10.13.7 印度尼西亚	(633)
10.13.8 肯尼亚.....	(634)
10.13.9 尼加拉瓜.....	(634)
10.13.10 巴拿马	(634)
10.14 参考文献目录.....	(634)
全书参考文献汇总	(635)

第1章 导 论

J. Kestin R. DiPippo

撰写本资料汇编的倡议由能源部的地热分部提出，并由指定为项目负责人的 Clifton B. McFarland 先生转达给我。这还是加速能源技术各个领域里的研究工作早期的事情。这时关于地热能转换成电能的知识虽已存在，但它是不协调的，分散的。

建议的要点是在布朗大学组织一个小组，以期由精心选择的专家来编写这本资料汇编。同意参加本项工作的工程师和科学家们对与地热发电有关的能量转换技术的某一专门方面都有深刻的理解，但不是整个都了解。我自己以及我的同事 Ronald DiPippo 和 H. Ezzat Khalifa 所从事的第一件工作就是组织一系列的专家研讨会。这种叫做 CATMEC* 的研讨会一共举行过 9 次。会议参加者是从有可能成为本书的作者里挑选的，另外也挑选了一些由于其他任务过忙而不能成为更积极的参与者但又愿向本编写组贡献知识的那些专家。随着时间的推移，重点越来越清楚的和综合性的总体理解涌现了。《原始资料汇编》就是试图把这种有关地热能特点的综合和重点鲜明的理解传递给读者。编辑组希望《原始资料汇编》能对对地热感兴趣的各类人员都是有用的，因为它汇集了许多领域专家的专门知识，它从地质学开始，通过化学和化学工程、机械工程，一直到经济学和政策的制订等。例如，汽轮机设计者将能够获得有关含水层特性的知识，经济学家将会找到有关热力学“可用功”对于评价有可能采用的装置，或者推行现行规章制度和法律的重要性的指示。总之，《汇编》对从各必要领域里汲取来的专家知识的统一给予了特别的注意，以期获得有关地热能的完整见解。因此《汇编》应能表明它对勘探地热能的地质学家、地热储的管理人员、从事模拟热储动态编码的数学家是有用的，对电站及其部件设计感兴趣的机械和化学工程师、从事热力学性质研究的物理学家、冶金工作者、经济学家以及环保人员和计划人员等，只要他们的部门利益与地热能有关系或直接相关，本书均将有益于他们。

在规划本《汇编》的内容时，尽管强调了专门知识的综合，但是放在读者手中的这本书毕竟不是出自一个人的手笔。因此《汇编》象一本百科全书，或者更接近一本手册，而不是一本教科书或一篇专题论文。三十九位作者，不管是单人执笔或者多人合作，都被赋予以各自的风格自发写作的自由。编辑组认为，与其把一系列条条框框强加给作者，倒不如作出对于本书预期的那一类读者无需做出完整综合这一判断。为此，例如，每位作者都有以他自己选定的方式安排他的参考文献的自由。在所有的专章里，参考文献都不汇总在一处，我们只是要

* CATMEC 是 Centers for the Analysis of Thermal / Mechanical Energy Conversion Concepts 会议的缩写。次会议的时间和地点如下：CATMEC-1和-2（非正式），1976年早期，首都华盛顿；CATMEC-3，1976年11月，Providence；CATMEC-4，1977年1月，Berkley；CATMEC-5，1977年4月，盐湖城；CATMEC-6；1977年7月，首都华盛顿；CATMEC-7，1977年11月，Providence；CATMEC-8，1978年2月，San Diego；CATMEC-9，1978年8月，Providence。第3至第9次会议记录副本现存美国商业部国家技术情报局(NTIS)，Springfield, Va. 22161。

求作出一些脚注，以便使读者容易确定文献目录在书中的位置。但是每一章里的所有方程式、表格和插图都用统一的方式按顺序编号。

本书共分10章。有的专章的作者不止一个。章节的划分是编者根据作者提交的专节编成的。节和段用小数点的方式编号。目录表则列出一直到三位数字的小标题，相应的作者亦予以注明。作者的名字列在他所负责撰写的章、节或段的最上方。

读者现在看到的《汇编》全书的题目的选择，既有原来计划内的，也有后来扩大的。在选题、取消和修订的整个过程中，McFarland先生都起着非常积极的作用。他起草了原始计划，发生变动时又同他进行了磋商，更为重要的是，他识别了一些专家，劝说他们参加撰写工作，并在财政上给他们以资助。

除了《原始资料汇编》以外，布朗大学的专家组又着手写作本书的姐妹篇，题目是《作为电能资源的地热能——地热电站设计和运行的世界范围的调查》。该书是由一位作者，即Ronald DiPippo教授写的。据信，这本姐妹篇尽可能准确地提供了全世界地热发电一直到1979年7月的发展状况。

地热电站利用的是一种天然资源，即在较高温度和压力下多多少少含有一些杂质的地下水，它或者闪蒸扩容成蒸汽进入汽轮机，或者使有机工作流体气化再驱动涡轮机。这个系统能够以电能输出（或者叫轴端功）的方式生产有用功，因为用于发电的“原材料”，即热卤水，是以一种和环境处于非平衡态而天然存在的。让这种原材料趋于和大气达到平衡的过程就会产生有用功（就热力学和社会意义而言）。因此首要条件就是要发现一个蕴藏着这种工作流体并且可以进行开发的热储，并对其各种特性进行评价。这是一个很长的勘探和开发过程，而且必须在电站进行初步设计之前进行。某一特定地热田即使恰当地圈定了它的范围和了解了它的特性，用目前所有的技术也不可能确定出它究竟是一个可再生的地热田，抑或只是一个寿命有限的地热田。但是实践经验表明：只要开发适度，就可以预期热田有30~50年的寿命。

记住上述特点以后，我们就可以翻开本书，它以很大的一章，即第2章开头，题目是“资源特性：勘探，评价和开发”。第2章的各节由五位作者写成*。

列入第2章的主要题目有：地热区的地质学和地球物理学导论，地热勘探要点的描述。然后继之以热储力学研究和热储模拟原理。本章对钻井和测井以及热储和井孔中流体流动的简化分析等都给予了较大的注意。第2章是综合性的，但有些读者会考虑到它的篇幅分配不够均匀；如同我们在前面已经强调过的那样，这种现象是不可避免的，另外我们也考虑这种安排是可以被接受的。

第3章是“地热能的可用功”。它在热力学研究，特别是适用于地热装置的热力学研究的基础上，对能量转换原理进行综合评述。作者认为把评述的重点放在可用功的概念上，然后才是有关不存在的理想循环（双工质装置中仅部分存在理想循环）方面的分析，是合理的。

本章的热力学分析清楚地表明地热装置中排热系统的重要性。比可用功对排放温度非常敏感。必须尽一切实际可能使排放温度接近环境温度。环境温度的昼夜和季节波动都会反映在排热温度上，并会影响到凝汽器和冷却塔的设计。它对双工质系统的影响特别大，因为与

* 按字母顺序排列的全部作者名录，包括他们的资格和隶属单位等均列在前言之前。

常规电站相比，双工质系统的流体性质使设计有更大的选择范围。同理，排放热量与有用功的比值很大，这对设计有很大的影响。可以说，这是由运行的“等效朗肯效率”本来就很低造成的，但是这个问题的本身无足轻重。设计人员必须力求得到一个高的利用因数，并且在经济条件允许的限度内，力争提取最大的比可用功。但是他必须认识到，地热电站的凝汽器及其附属设备要比他所熟悉的大，从而使汽轮机和排热设备的相对投资额与常规火电厂和核电站的有所不同。

第4章的题目是“发电系统”。它由一组比较多的，参与过实际设计和运行管理的作者写成。某些读者会想到，这是《原始资料汇编》里的关键性一章。本章可以设想为由两个互相补充的部分组成。第一部分介绍工艺技术业已确定的发电系统，它包括由井孔直接给汽的装置，或者由经过一级或多级扩容后排出的蒸汽供给的动力装置。这种工艺可以说已经得到了验证，因为这种动力装置已经有了（参看第10章）。本章还包括实用性尚待进行商业性验证的双流体动力装置。这一部分的结尾是有关材料选择和热力学数据来源的清新论述。

第4章第2部分介绍了尚属罕见的两种能量转换系统。一种即所谓化石燃料-地热混合系统，它在一个单一的电站里把常见于单独化石燃料转换装置和地热转换装置的特点结合起来了。主张这种系统的人认为它的好处在于两种能量资源的利用都能实现重大的节约，从而导致电能成本的下降。虽然今天还不存在这种电站，但厂址选在化石燃料和地热能量资源相互离得很近的美国西部某地的一个电站，正在进行这样的设计。

另一种先进系统是所谓全流能量转换系统的一种冲动式涡轮机。这种系统可能具有利用因数非常高的优点，但是它存在一系列目前工程技术水平尚无法克服的缺点。

第5章是“废热排放”。文章的表述既透彻又条理分明。侧重点则放在系统的设计上，以满足地热发电的要求。文章还以Imperial Valley电站为例进行了典型事例分析。本章最后谈到环境温度的变化对地热电站废热排放和电能出力的影响。

第6章是“地热动力系统的材料选择准则”。读者将会学到因地热电站所遇到的流体具有腐蚀性而对材料所提出的一些特殊要求。我们可以看到问题的严重程度将取决于处于应力下的材料究竟是暴露在地热蒸汽中、扩容前的地热液体水中，还是暴露在凝结水里。腐蚀测量既针对金属材料，也针对非金属材料。本章最突出的教训是：电站设计人员在他确定用于分离器、扩容器、管线和汽轮机等的材料之前，必须掌握有关地热流体各个相的特性的可靠资料。

有关地热能利用的重大问题之一是它所生产的电能成本，以及与可替代的或者可竞争的能量转换系统的计算成本或设计成本的比较。例如尚在争论中的问题是，在资源条件给定的情况下，究竟是扩容蒸汽电站，还是双工质流体电站能够更经济地生产电力？这种比较往往很难做出，因为不同作者所喜好的方法和经济模型有很大的差别。第7章“经济分析”试图为系统方法学奠定一个基础，以便读者能够在各种可供选择的动力系统之间作出比较。本章还讨论了各种技术因素和经济因素对成本的影响，包括通货膨胀的影响等。

第8章“方案选择和初步设计最优化的准则”分为三部分。第一部分提出了影响是否要建电站的决策过程的因素，如果决策的结果是建，则何种类型电站与既定的一组经济和市场条件最相宜？第二部分介绍一些多参量最优化规范，这些规范是为了帮助设计人员了解电站工况和转换系统的成本对所涉及的众多变量中每一变量的敏感程度。本章作为一例引用了Lawrence Berkeley Laboratory编制的GEOTHM规范。本章最后一部分为有可能成为设计人

员的人提供有价值的帮助。它介绍了一些能够帮助他找到标准部件供应单位的服务性机构，以及能够承担设计和制造某些特殊设备项目的公司。

影响地热发电扩大容量的重大因素之一是对地热开发（特别是在美国，但不限于美国）中环境冲突的忧虑。第9章“环境分析”是由美国环境保护局的一位官员写的。就是这位作者颁布的环保局文件，即1978年6月颁布的《地热能开发的污染控制指南》。第9章实际上就是这份环保局文件的剪辑版本。它本身构成环境问题的一个专章，也是一份有关地热能开发的现行管理法规以及地热动力开发各个阶段可能产生的有害于环境的影响的综合报告。文章还详细介绍了现有的或者正在研究的克服污染问题的工艺技术。

《原始资料汇编》最后一章，即第10章的题目是“世界各地的地热电站”。这是一份现有的、曾经有过的以及在可以预见到的未来计划发展的地热电站的资料简编。本章是上面提到过的DiPippo教授专著的缩编，它对世界上每个国家的每一个地热机组都作了介绍。读者将会得到有关热储、井孔和集汽系统、包括废热排放系统的能量转换装置、效率和可靠程度，以及电站和它所生产的电力的成本等方面的材料。这一调查材料得出的一个结论是：很难从中做出一般化结论，每一特定地热田都是独特的。设计人员在编制能量转换设备清单之前，必须对热储有完整的了解。不能期待所有的地热发电工程都会取得全面的成功。重要之点在于，我们应当尽可能多地从这些情况介绍里学到东西。但是总的说来，地热电站非常可靠，非常安全，比较地不那么费钱，环境冲突轻微而且仅存在局部性影响。

但是重要的问题是要懂得：地热能利用伴随有一个风险的因素，即新发现的地热田的生产寿命存在不确定性。目前进行的研究和开发工作的目的就是为了减少这些风险，同时也是为了降低地热电力的成本和改善整个系统的性能。我们期望地热能将象萨尔瓦多已经做到的那样，在满足许多发展中国家的能量需求方面起到极其重要的作用。本章的末尾介绍了正在美国进行的几项工程以及用于发电的地热能接近于实质性开发的许多其他国家的一些工程项目。

编者和作者都希望本书将为全世界的地热能开发计划提供一份成功的工具。最后我们强调，我们之中没有任何人相信地热能本身能够把我们我们的能源困境里挽救出来；但是我们也确信，如果我们现在不着手明智地利用现有的能量资源，并准备去开发新能源，问题将只会变得更糟糕。

第2章 资源特性、勘探、评价和开发

2.1 地热区的地质学和地球物理学 (William H. Diment*)

2.1.1 引言

虽然地壳里的温度随着深度的延深而增加,但是只有在很少的几个地方在可以经济地钻及的深度上,存在着具有足够温度和足够渗透率的热储。这些特性的组合范围极宽,它可以提供现在就能够开发的资源,或者提供用将来发展的适宜工艺开发的资源。一个极端组合情况是位于浅部岩浆囊里的热熔岩(岩浆),或者是埋深只有几千米的异常热的干岩体。这两种地质体的渗透率都极低,或者没有渗透率,但是提取其中热能量的一些方案可能行得通。另一种极端的组合情况是在中等深度上存在具有高渗透率的厚含水层,这种含水层即使赋存于热流量正常或近乎正常的区域内,也有可能产出足以用于房屋供暖的大量温水。

2.1.1.1 地热系统分类

目前尚不存在被普遍接受的地热系统分类,但是Muffler [1976, 页499]的分类包含了有可能遇到的绝大多数类型,并为问题的讨论提供了一个有用的框架。本章引用了他的分类系统,但作了某些修改,修改的原因是考虑到资源(Resource)与储量(Reserve)两个词具有与地热经济评价相关的相当确定的含义 [White and Williams, 1975; Muffler and Christiansen, 1978; Muffler and Cataldi, 1979; Muffler and Guffanti, 1979]。

1. 与上地壳内年青火成侵入体相关的地热系统

- a. 岩浆;
- b. 干热岩体;
- c. 对流型水热系统。

2. 与上地壳内年青火成侵入体无关的地热系统

- a. 低孔隙率传导环境中的系统;
- b. 受大气水环流改造过的低孔隙率传导环境中的系统;
- c. 承受静水压力的低孔隙率地质环境中的系统;
- d. 实际压力大大超过静水压力的低孔隙率地质环境中的系统(即“地压系统”)。

这一分类的某些方面将在以后的各节里详细讨论,但是为了给讨论提供一部分框架,需要详细介绍“传导环境”和“上地壳内年青火成侵入体”这两个术语。

2.1.1.2 传导环境

在绝大多数地区,地球内热的大部分都是通过传导过程逸出地壳的。在另外一些区域内,热量主要是通过侵入到地壳里的熔融岩石(岩浆),或者通过地壳透水岩体里地下水环流的传质传递到地表的。尽管常常极不可能把热量传递的传导分量和对流分量区别开来,但

* United States Geological Survey, Reston, Va.