

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书
21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

第3版

热泵技术与应用

张昌 主编
史琳 主审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

双色印刷



免费教学资源

“三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书
21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

热泵技术与应用

第3版

主 编 张 昌
主 审 史 琳



机械工业出版社

本书阐述了热泵的基本原理和主要设备,以及热泵空调系统的设计方法和技术措施。其内容包括热泵机组的工作原理、空气源热泵系统设计、水源热泵系统设计、土壤源热泵系统设计、大型公共建筑热泵空调工程的应用实例等。本书注重知识的系统性,内容全面翔实,反映了热泵领域最新的科学研究成果和工程应用进展。

本书可作为高等学校建筑环境与能源应用工程专业本科生及研究生的教学用书,也可作为能源与动力工程、新能源科学与工程等专业教材,同时可供工程技术人员在设计、安装、使用热泵空调系统时参考。

本书配有电子课件,免费提供给选用本书作为教材的授课教师。需要者请登录机械工业出版社教育服务网(www.cmpedu.com)注册后免费下载,或发邮件至 1847737699@qq.com 索取(请提供您的姓名、电话、所属院校、授课专业等基本信息)。

图书在版编目(CIP)数据

热泵技术与应用/张昌主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2019.2
21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材“十三五”国家重点出版物出版规划项目 面向可持续发展的土建类工程教育丛书
ISBN 978-7-111-61639-9

I. ①热… II. ①张… III. ①热泵-高等学校-教材 IV. ①TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第299705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:刘涛 责任编辑:刘涛 章承林 刘丽敏

责任校对:肖琳 封面设计:陈沛

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2019年2月第3版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·1插页·464千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61639-9

定价:48.00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:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第3版前言

2018年1月30日，教育部发布了《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》，这是我国发布的第一个高等教育教学质量国家标准。其中，对建筑环境与能源应用工程专业的知识体系和核心课程体系都做了明确规定。各高校根据该标准修订教学计划，培养体现各自办学特色的专业人才。这无疑对专业课程教材提出了更广的选用范围和更高的质量要求。另外，建筑环境与能源应用工程系列规划教材入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目，为各高校构建各具特色的专业课程体系提供了足够丰富的教材选配空间。因此，有必要再次修订《热泵技术与应用》，以提高本书的整体质量，进一步促进教材向精品迈进，推动课程教学从“教得好”向“学得好”转变。

在第2版的基础上，本次修订工作主要集中体现在以下五个方面：

- 1) 补充了与热泵技术有关的国家或行业政策，更新了相关数据和技术信息。
- 2) 以已经商业化的新工质 R1234yf 为例，阐述了工质的热力性质计算原理。
- 3) 检查了全部插图并且修改了部分细节，便于教师在课堂上正确解说相关内容。
- 4) 推敲了各章节的文字和标点符号，力求书面语言表达精准、语法正确、逻辑合理，使得读者能在阅读过程中准确无误地理解教材内容。
- 5) 陈焰华和於仲义更新了部分热泵技术的工程案例。

本次电子课件的修订由邱庆龄完成。

《热泵技术与应用》从开始编写至第3版修订完毕历经十年，在全体编写教师的共同努力下，顺应了时代的发展且满足了专业教学的需求。高校广大师生以及暖通空调工程技术人员也期待本教材不断提高成为精品出版物。但是，由于编者的水平有限，书中缺点和不妥之处在所难免，敬请广大师生和专家学者批评指正。

武汉纺织大学

张 昌

2018年5月于武昌南湖

第2版前言

本书第1版自2008年出版以来,受到高校广大师生以及暖通空调工程技术人员的普遍欢迎,在社会上产生了一定的影响。由于教材密切结合工程实际,内容深入浅出,文字流畅,图表清晰,不仅较好地满足了建筑环境与设备工程专业(原供热、供燃气、通风与空调专业)教学需要,还被国内相关专业广泛采用,同时也为工程技术人员在设计、施工、制造、运行热泵系统过程中提供参考。

2012年9月,教育部公布了新的高等学校本科专业目录,建筑环境与设备工程专业名称调整为建筑环境与能源应用工程。为了适应专业调整的要求,紧跟热泵技术工程应用的进展,提高教材质量,我们对《热泵技术与应用》第1版进行了修订。第2版增加了思考题,更新了涉及相关新规范的内容,更新了部分工程实例,纠正了发现的讹误。

以紧密配合应用型创新人才培养的需要为原则,第2版保持原有特色和框架结构,取材和深度适当有所扩充。本次修订主要做了以下变动:在第1章中介绍了与热泵技术有关的国家或行业政策,让学生了解热泵技术在我国的发展前景;在第2章中增补了热泵工质的热力性质计算原理的内容,以适应热泵制造和工程模拟的需要;在第5章中增补了海水源热泵系统设计、污水源热泵系统设计、水环热泵系统设计的内容,以开拓学生对热泵技术的应用视野;在第6章中增添了土壤热物性测试、复合式土壤源热泵系统设计和土壤源热泵运行管理与能效评价的内容,以加强对工程研究和施工管理的重视;在第7章中更新了部分热泵技术的工程案例,以体现本书与时俱进的编写意图。

本次修订工作由武汉纺织大学张昌教授、华中科技大学胡平放教授、华中科技大学苏顺玉副教授、中信建筑设计研究总院有限公司陈焰华教授级高级工程师和於仲义高级工程师完成,全书由张昌统稿。本书由清华大学史琳教授担任主审。本书电子课件由武汉商学院邱庆龄高级工程师完成。

本书力图使所阐述的内容深刻而讲解通俗易懂,及时反映热泵技术的最新工程进展和成果,更好地适应新的拓宽专业的教学。但是,限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见,以使本书不断得到完善。

武汉纺织大学

张昌

2014年5月于武汉

第1版前言

在人居环境中，许多场合需要温度不是很高的热源。为此，人们非常重视利用低位能量的热泵技术。热泵技术是从热力学第二定律出发，利用一部分高位能源（煤、石油、电能等）来提升另一部分低位能源（空气、水、土壤、太阳能、工业废热等），以达到节约高位能源的目的。这是一种既可节约一次能源，又可减少环境污染的有效节能技术，深受建筑环境与设备工程师的青睐。热泵空调系统的应用研究正在逐步向大、中型和多样化方向发展，热泵装置已进入了家庭、公共建筑物、厂房，以提供空调采暖、热水供应所需的热量，并且还在一些工业生产的工艺过程中得到应用。

本书主要阐述了热泵的基本原理和主要设备，以及热泵空调系统的设计方法和技术措施，并介绍了大型公共建筑热泵空调工程的成功应用实例。因此，本书不仅可作为高等学校建筑环境与设备工程专业本科生及研究生的教学用书，还可供工程技术人员在设计、安装、使用热泵空调系统时参考。

本书共分8章，由武汉纺织大学张昌教授拟定提纲并编写第1章、第2章、第4章，武汉市建筑设计院陈焰华教授级高级工程师编写第7章，华中科技大学胡平放副教授和於仲义博士编写第6章、第8章，武汉科技大学刘秋新教授编写第5章，武汉纺织大学魏文平副教授编写第3章。本书由张昌统稿。

本书由张昌任主编，胡平放任副主编，清华大学博士生导师史琳教授任主审。

本书引用了许多参考文献和工程案例，谨向有关文献的作者和工程案例的设计者表示衷心感谢。由于编者的水平有限，书中缺点和不妥之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编者

2007年12月于武昌南湖

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 概论	1
1.1 热泵的节能与环境效益	1
1.1.1 热泵的定义	1
1.1.2 热泵的节能效益	1
1.1.3 热泵的环境效益	2
1.2 热泵循环的热力学原理	2
1.2.1 逆卡诺循环	2
1.2.2 洛伦兹循环	3
1.2.3 热泵的热力经济性指标	3
1.3 热泵的低位热源	4
1.3.1 空气	4
1.3.2 水	5
1.3.3 土壤	8
1.3.4 太阳能	8
1.4 热泵的驱动能源和驱动装置	9
1.4.1 热泵的驱动能源和能源利用系数	9
1.4.2 热泵的驱动装置	10
1.5 热泵的分类	11
1.5.1 热泵的分类方法	11
1.5.2 按热泵机组换热器所接触的 载热介质分类	11
1.5.3 按低位热源分类	13
1.6 热泵发展的历史与现状	15
思考题	19
第2章 蒸汽压缩式热泵的工作原理	20
2.1 蒸汽压缩式热泵循环	20
2.1.1 单级蒸汽压缩式热泵的工作过程	20
2.1.2 单级蒸汽压缩式热泵循环在 压焓图上的表示	20
2.1.3 单级蒸汽压缩式热泵的实际循环	22
2.2 蒸汽压缩式热泵的工质	26
2.2.1 热泵工质的发展历程	26
2.2.2 热泵工质与环境保护	27
2.2.3 对热泵工质的要求	29
2.2.4 常用的热泵工质	31
2.2.5 热泵工质的热力性质计算原理	33
2.3 蒸汽压缩式热泵的压缩机	35
2.3.1 热泵用压缩机的特点和要求	35
2.3.2 活塞式压缩机	36
2.3.3 涡旋式压缩机	39
2.3.4 螺杆式压缩机	40
2.3.5 离心式压缩机	44
2.4 蒸汽压缩式热泵机组	47
2.4.1 空气-空气热泵机组	47
2.4.2 空气-水热泵机组	48
2.4.3 水-水热泵机组	51
2.4.4 水-空气热泵机组	51
2.5 蒸汽压缩式热泵的故障分析与处理	52
2.5.1 无制热或制冷效果	52
2.5.2 热量或冷量不足	53
2.5.3 压缩机的吸气温度不正常	55
2.5.4 压缩机的排气压力和温度不正常	55
思考题	56
第3章 吸收式热泵的工作原理	57
3.1 吸收式热泵概述	57
3.1.1 吸收式热泵的工作过程	57
3.1.2 吸收式热泵的分类	57
3.1.3 吸收式热泵的热力系数	59
3.2 吸收式热泵的工质对	60
3.2.1 工质对的选择	60
3.2.2 溴化锂水溶液的性质	61
3.3 吸收式热泵的循环及其计算	67

3.3.1 吸收式热泵的循环	67	5.1 水源热泵空调系统的特点和分类	106
3.3.2 单效溴化锂吸收式热泵的 循环及其计算	68	5.1.1 水源热泵系统的特点	106
3.3.3 双效溴化锂吸收式热泵的 循环及其计算	71	5.1.2 水源热泵机组的种类	106
3.4 溴化锂吸收式热泵机组	74	5.1.3 水源热泵系统的分类	107
3.4.1 单效溴化锂吸收式热泵机组的结构 ..	74	5.2 水源热泵空调系统的运行性能	112
3.4.2 双效溴化锂吸收式热泵 机组的结构	76	5.2.1 水源热泵机组的变工况性能	112
3.5 溴化锂吸收式热泵的安装调试与维护 ..	78	5.2.2 影响水源热泵系统运行 性能的因素	115
3.5.1 溴化锂吸收式热泵的安装	78	5.3 热源(热汇)水的处理方法与措施 ..	117
3.5.2 溴化锂吸收式热泵的调试	79	5.3.1 热源(热汇)循环水系统的 水处理方法	117
3.5.3 溴化锂吸收式热泵的维护	81	5.3.2 热源(热汇)循环水系统的 水处理措施	118
思考题	83	5.4 水源热泵空调系统设计要点	119
第4章 空气源热泵系统设计	84	5.4.1 水文地质工程勘查	119
4.1 空气源热泵机组的技术参数	84	5.4.2 地下水回灌设计	120
4.1.1 空气源热泵机组的特点	84	5.4.3 地表水取水设计	121
4.1.2 空气源热泵机组的参数及 相关标准	84	5.4.4 与热源(热汇)交换的热量计算 ..	121
4.2 空气源热泵机组的变工况特性	87	5.4.5 水源热泵机组的选择	122
4.2.1 热源温度变化对机组供热 能力的影响	87	5.4.6 海水源热泵系统的特殊问题	122
4.2.2 热源温度变化对机组制冷 能力的影响	88	5.4.7 污水源热泵系统的特殊问题	123
4.3 空气源热泵空调机组冬季除霜控制	89	5.5 地下水源热泵系统设计	124
4.3.1 结霜过程及其影响因素	89	5.5.1 开式环路地下水系统设计	124
4.3.2 除霜过程及其控制方法	91	5.5.2 闭式环路地下水系统设计	127
4.3.3 空气源热泵除霜的研究方向	93	5.5.3 热源井的结构与设计要点	134
4.4 空气源热泵系统的平衡点	94	5.6 地表水源热泵系统设计	138
4.4.1 热泵供热量与建筑物耗热量的 供需矛盾	94	5.6.1 闭式环路地表水热泵 系统的设计	138
4.4.2 最佳平衡点温度	95	5.6.2 塑料盘管换热器设计	140
4.4.3 辅助加热	96	5.6.3 地表水取水口设计	146
4.4.4 空气源热泵机组的能量调节	97	5.7 海水源热泵系统设计	148
4.5 空气源热泵系统设计要点	98	5.7.1 海水源热泵系统的工作原理	148
4.5.1 空调负荷的计算	98	5.7.2 海水源热泵系统设计的基本原则 ..	149
4.5.2 空气源热泵系统方案选择	99	5.7.3 海水源热泵系统设计方案	149
4.5.3 设备容量确定	102	5.7.4 海水取水构筑物	149
4.5.4 水系统设计	102	5.8 污水源热泵系统设计	152
4.5.5 新风处理	103	5.8.1 污水源热泵系统设计方案	152
4.5.6 设备的布置设计	104	5.8.2 污水源热泵系统防堵、防腐、 防垢措施	152
思考题	105	5.8.3 城市原生污水源取水设计	153
第5章 水源热泵系统设计	106	5.8.4 污水源热泵中心能源站设计的 几个问题	154
		5.9 水环热泵系统设计	155
		5.9.1 水环热泵系统的分区设计	155

5.9.2 水环热泵系统的水系统设计	156	7.1.3 武汉楚源大厦空气源热泵空调 系统设计	196
思考题	156	7.1.4 武汉××花园空气源热泵空调 系统设计	200
第6章 土壤源热泵系统设计	157	7.2 水源热泵系统的工程实例	205
6.1 土壤源热泵系统的特点、形式和结构	157	7.2.1 武汉×××花园水源热泵空调 系统设计	205
6.1.1 土壤源热泵系统的特点	157	7.2.2 武汉塔子湖全民健身大楼水源热泵 空调系统设计	210
6.1.2 土壤源热泵系统的形式与结构	158	7.2.3 湖北大学图书馆水源热泵 空调系统设计	214
6.2 土壤换热器的传热分析	160	7.2.4 连云港职业技术学院水源热泵 空调系统设计	217
6.2.1 土壤换热器传热分析模型	160	7.3 土壤源热泵系统的工程实例	220
6.2.2 土壤换热器传热过程分析	161	7.3.1 湖北省图书馆新馆土壤源热泵 系统设计	220
6.2.3 土壤换热器传热计算方法	161	7.3.2 武汉华中智谷园区土壤源热泵 空调系统设计	225
6.2.4 土壤换热器传热的主要影响因素	164	7.3.3 神农架某接待中心土壤源热泵 空调系统设计	229
6.3 土壤换热器设计计算	168	7.3.4 武汉鑫龙湾小区土壤源热泵 空调系统设计	233
6.3.1 土壤换热器的计算特点	168	7.3.5 中铁大桥局总部大楼土壤源热泵 空调系统设计	238
6.3.2 土壤换热器的设计步骤	168	第8章 热泵在其他领域的应用	243
6.3.3 土壤换热器的换热负荷计算	169	8.1 热泵在物料干燥中的应用	243
6.3.4 土壤热物性测试	170	8.1.1 热泵干燥的原理	243
6.3.5 土壤换热器容量计算	173	8.1.2 热泵干燥的应用	244
6.3.6 土壤换热器系统水力计算	174	8.2 热泵在工业和民用项目中的应用	248
6.4 复合式土壤源热泵系统设计	177	8.2.1 热泵在工业余热回收中的 应用意义	248
6.4.1 复合式土壤源热泵系统	177	8.2.2 热泵在冶金企业中的应用实例	248
6.4.2 辅助冷热源设计	178	8.2.3 热泵在民用项目中的应用实例	249
6.4.3 复合式土壤源热泵 系统运行控制	178	8.3 热泵在制药及化工中的应用	250
6.5 土壤换热器管材与循环介质	179	8.3.1 热泵在蒸发浓缩和蒸馏中的应用	250
6.5.1 土壤换热器管材	179	8.3.2 热泵蒸发浓缩和蒸馏的工程实例	251
6.5.2 管材规格和压力级别	179	思考题	252
6.5.3 土壤换热器循环介质	180	附录	253
6.6 土壤换热器的施工	182	附录A 制冷空调工程常用单位换算	253
6.6.1 施工前的准备工作	182	附录B 湿空气主要热物理参数	254
6.6.2 土壤换热器管道连接	183	附录C 工质的热力学性质和压焓图	256
6.6.3 水平埋管土壤换热器埋管安装	184	参考文献	270
6.6.4 垂直式U形管土壤换热器施工	185		
6.6.5 土壤换热器的检验与水压试验	186		
6.7 土壤源热泵运行管理与能效评价	186		
6.7.1 运行管理	186		
6.7.2 能效评价	187		
思考题	188		
第7章 热泵空调系统工程实例	189		
7.1 空气源热泵系统的工程实例	189		
7.1.1 武汉图书馆空气源热泵空调 系统设计	189		
7.1.2 武汉正信大厦空气源热泵 空调系统设计	192		

第 1 章

概 论

1.1 热泵的节能与环境效益

1.1.1 热泵的定义

热泵是一种以消耗部分能量作为补偿条件使热量从低温物体转移到高温物体的能量利用装置。热泵能够把空气、土壤、水中所含的不能直接利用的热能、太阳能、工业废热等转换为可以利用的热能。在暖通空调工程中可以用热泵作为空调系统的热源来提供 100°C 以下的低温用能。

根据热力学第二定律，热量是不会自动从低温区向高温区传递的，必须向热泵输入一部分驱动能量才能实现这种热量的传递。热泵虽然需要消耗一定量的驱动能，但根据热力学第一定律，所供给用户的热量却是消耗的驱动能与吸取的低位热能的总和。因为用户通过热泵获得的热量永远大于所消耗的驱动能，所以说热泵是一种节能装置。热泵的制热量与热泵的驱动能量之比称为热泵的制热系数，常用来分析热泵的经济性。

热泵与制冷机从热力学原理上说是相同的，都是按热机的逆循环工作的。两者所不同的是使用的目的不同。制冷机利用吸取热量而使对象变冷，达到制冷的目的；而热泵则是利用排放热量向对象供热，达到供热的目的。另外，两者的工作温度范围也不同，如图 1-1 所示。制冷机在环境温度 T_a 和被冷却物体温度 T_c 之间工作，从作为低温热源的被冷却物体中吸热，向作为高温热源的环境介质排热，以维持被冷却物体温度低于环境温度。热泵在被加热物体温度 T_h 和环境温度 T_a 之间工作，从作为低温热源的环境介质中吸热，向作为高温热源的被加热物体供热，以维持被加热物体温度高于环境温度。

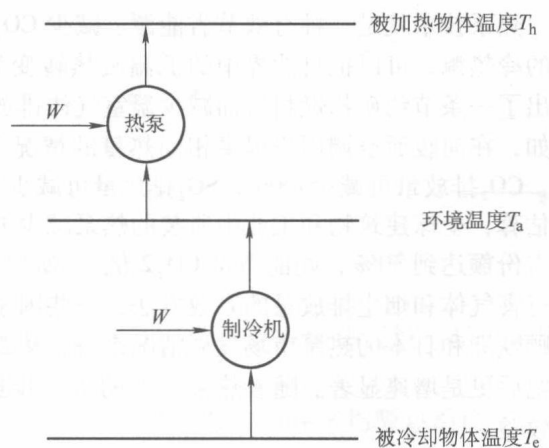


图 1-1 制冷机和热泵的工作温度范围

1.1.2 热泵的节能效益

随着我国人居环境的改善和人民生活质量的提高，公共建筑和住宅的供热和空调已成为普遍的需求，造成建筑能耗占全社会总能耗的比例很大且持续增长。据统计，2015 年我国建筑能耗已达到 8.57 亿 t 标准煤，占全国能源消费总量的 20%。在发达国家中，供热和空调的能耗可占到社会总能耗的 30%。有国外资料统计，办公楼中仅空调系统耗能量就占总耗能量的 35% 左

右,商住楼中仅空调系统耗能量就占总耗电量的25%左右。所以空调系统节能始终是建筑环境与设备领域中的重要研究课题之一。

根据热泵定义的阐述,热泵空调技术是一种有效的节能手段,可以大大降低一次能源的消耗。有研究表明,电动热泵的制热系数只要大于3,则从能源利用观点看热泵就会比热效率为80%的区域锅炉房用能节省。目前,家用热泵空调器随着热泵技术的进步,制热性能系数已经达到或超过3。各种大型热泵机组的制热能效比(EER)绝大部分大于3。VRV热泵机组的制热性能系数在4.2左右。由此可见,热泵作为空调系统的热源要优于目前传统的供热方式,是一种有效的节能手段。

评价热泵的节能作用时,不仅要看其数量上的收益,还要看其质量上的效果。因为任何实际的能量利用过程都存在量的守恒性和质的贬值性,必须合理做到按质用能才是热力学原理上的节能。热泵从低温热源吸取的低位热能不仅从数量上减少了高品位能量的消耗,而且避免了这些在数量上相等的高品位能因温度的降低所造成的做功本领的损失。也就是说热泵在质的方面减缓了能量的降级或贬值,这就是为什么目前在大城市的重要建筑物中广泛采用热泵技术的重要原因。从综合的经济效益与社会效益看,热泵在我国的发展具有广阔的空间。

1.1.3 热泵的环境效益

当今全球面临环境恶化问题主要有:CO₂、甲烷等产生的温室效应,SO₂、氮氧化物等酸性物质引起的酸雨,氯氟烃类化合物引起的臭氧层破坏等。而目前空调冷热源中采用的能源基本属于矿物能源。矿物燃料燃烧过程会产生大量CO₂、NO_x、SO_x等有害气体和烟尘,造成环境污染和地球温度上升。2007年我国的温室气体排放量达82.87亿t CO₂当量,2010年我国的温室气体排放量居世界第一位。2016年世界卫生组织发布的空气污染最严重的30个城市中,我国占了6个。我国环境保护问题伴随着工业化、城市化、现代化过程的推进将变得十分突出。

热泵技术就是一种有效节省能源、减少CO₂排放和大气污染的环保技术。把热泵作为空调系统的冷热源,可以把自然界中的低温废热转变为暖通空调系统可利用的再生热能,这就为人们提出了一条节约矿物燃料进而减少温室气体排放、提高能源利用率进而减轻环境污染的新途径。例如,在向暖通空调用户提供相同热量的情况下,电动热泵比燃油锅炉节约40%左右的一次能源,CO₂排放量可减少68%,SO₂排放量可减少93%,NO_x排放量可减少约73%。1997年就有学者估算,全球建筑物和工业中所装的热泵减少1.14亿t CO₂排放量,如果热泵在建筑物供热方面所占份额达到30%,则能减排CO₂2亿t。所以,许多国家把热泵技术作为减少CO₂、NO_x、SO_x等有害气体和烟尘排放量的有效方法,一些国家的热泵供热量占总供热量的份额已经大幅增加。回顾欧洲和日本的热泵市场发展情况来看,从20世纪90年代开始总体上处于上升状态,进入21世纪后更是增速显著。随着热泵技术的进一步提高和推广,热泵的广泛应用将会带来良好的环境效益。

综上所述,热泵的发展不仅与国民经济总体发展及热泵本身技术进展有关,还与能源的结构与供应、环境保护与可持续发展密切相关。为此暖通空调工作者应加强有关热泵空调方面的研究工作,积极推广和使用热泵空调技术。

1.2 热泵循环的热力学原理

1.2.1 逆卡诺循环

理想的热泵循环是在两个恒温热源间工作的逆卡诺(Carnot)循环。图1-2所示是逆卡诺循

环的温熵图。首先,工质在理想热泵中做等温膨胀自状态4变化到状态1,同时在温度 T_L 下从低温热源中吸取热量;接着,工质被等熵压缩至状态2,其温度由 T_L 升高至 T_H ;随后,工质被等温压缩至状态3,同时在温度 T_H 下向高温热源放出热量;最后,工质再经等熵膨胀回复到状态4,其温度也由 T_H 降至 T_L ,从而完成整个循环。

由热力学理论可以证明,按逆卡诺循环工作的热泵的制热系数为

$$\text{COP}_h = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (1-1)$$

而且,在同样热源条件下理想的热泵循环具有最大的制热系数,因此它是同样热源条件下的实际循环的比较标准。

1.2.2 洛伦兹循环

在实际情况中,随着热源与工质之间热交换过程的进行,热源的温度将会发生变化。对于工作在两个变温热源之间的理想热泵循环,可以用洛伦兹(Lorenz)循环来描述。如图1-3所示,洛伦兹循环是由两个等熵过程和两个工质与热源之间无温差的传热过程所组成的。1-2表示等熵压缩过程;2-3表示工质的可逆放热过程,其温度由 T_2 降低到了 T_3 ,而高温热源的温度则由 T_3 升高至 T_2 ;3-4表示等熵膨胀过程;4-1表示工质的可逆吸热过程,其温度由 T_4 升高至 T_1 ,而低温热源的温度则由 T_1 降至 T_4 。在洛伦兹循环中为了使工质与热源之间实现无温差的热交换,必须采用理想的逆流式换热器。

由热力学理论可以证明,按洛伦兹循环工作的热泵的制热系数,与在平均吸热温度 T_{Lm} 和平均放热温度 T_{Hm} 间工作的逆卡诺循环制热系数相等,即

$$\text{COP}_h = \frac{T_{Hm}}{T_{Hm} - T_{Lm}} \quad (1-2)$$

1.2.3 热泵的热力经济性指标

常用的热泵系统热力经济性指标有性能系数(Coefficient of Performance, COP)、制热季节性性能系数(Heating Seasonal Performance Factor, HSPF)和热泵的焓效率。

1. 热泵的性能系数

热泵制热时的性能系数称为制热系数 COP_h ,热泵制冷时的性能系数称为制冷系数 COP_c 。

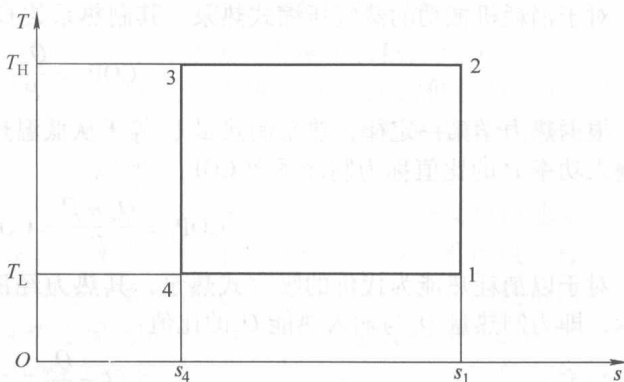


图 1-2 逆卡诺循环温熵图

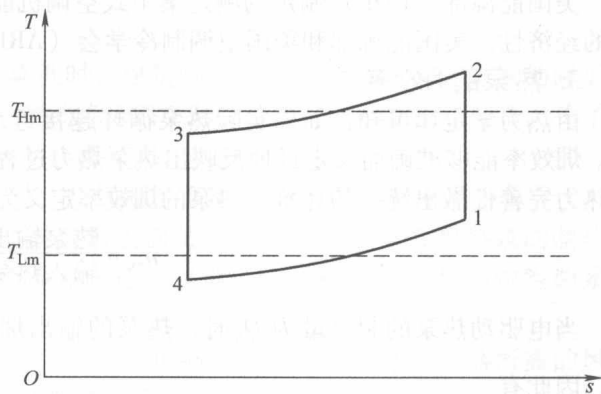


图 1-3 洛伦兹循环温熵图

对于消耗机械功的蒸气压缩式热泵,其制热系数 COP_h 为制热量 Q_h 与输入功率 P 的比值。即

$$COP_h = \frac{Q_h}{P} \quad (1-3)$$

根据热力学第一定律,热泵制热量 Q_h 等于从低温热源吸热量 Q_c 与输入功率 P 之和。由于 Q_c 与输入功率 P 的比值称为制冷系数 COP_c , 所以

$$COP_h = \frac{Q_c + P}{P} = COP_c + 1 \quad (1-4)$$

对于以消耗热能为代价的吸收式热泵,其热力经济性指标可用热力系数 (Heat Ratio) ξ 来表示,即为制热量 Q_h 与输入热能 Q_g 的比值:

$$\xi = \frac{Q_h}{Q_g} \quad (1-5)$$

2. 制热季节性能系数

由于热泵的经济性不仅与热泵本身的设计和制造情况有关,还与热泵运行时的环境温度有关,而环境温度又是随地区及季节的不同而变化的。为了进一步评价热泵系统在整个采暖季运行时的热力经济性,就要用到热泵的制热季节性能系数 (Heating Seasonal Performance Factor, HSPF)。HSPF 可表示为

$$HSPF = \frac{\text{供热季节总的供热量}}{\text{供热季节热泵消耗的总能量} + \text{供热季节辅助加热的耗能量}} \quad (1-6)$$

美国能源部 (DOE) 制定的测定集中式空调机能耗的统一试验方法中规定,用 HSPF 表示热泵的经济性。美国能源部和美国空调制冷学会 (ARI) 还提出了估算 HSPF 值的温度频段方法。

3. 热泵的焓效率

由热力学定律可知,如果实际热泵循环越接近理想热泵循环,则实际热泵的不可逆损失越小。焓效率能够准确而又定量地反映出热泵热力过程的不可逆性,可以对各种工况下的热泵循环的热力完善性做出统一的评价。热泵的焓效率定义为

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\text{热泵输出的焓}}{\text{输入热泵的焓}} \quad (1-7)$$

当电驱动热泵的制热量为 Q_h 时,热泵的输出焓为 $\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)Q_h$, 输入功率 P 的焓还是等于 P 值。因此有

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)Q_h}{P} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)\frac{Q_h}{P} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)COP_h \quad (1-8)$$

热泵的焓效率越高说明热泵循环过程中的焓损失越小,热力完善程度越好。用式 (1-8) 就可以说明电阻加热设备比热泵性能差的理由。电阻加热设备得到的热量就是输入的电能, $Q_h = P$, $\eta_{\text{ex}} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$; 热泵工作时, $Q_h > P$, $COP_h > 1$, $\eta_{\text{ex}} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)COP_h$ 。结论是电阻加热设备的焓效率比热泵的焓效率低。也就是说电阻加热设备焓损失大,电能转变为热能的过程中有一部分转变成了焓,损失了做功的能力。

1.3 热泵的低位热源

1.3.1 空气

空气是热泵空调的主要低位热源之一。空气源热泵装置的安装和使用也比较方便,目前的

产品主要是家用热泵空调器、商用单元式热泵空调机组和风冷热泵冷热水机组。用空气作为热泵装置的低位热源时也可利用来自建筑物内部排出的热空气。当建筑物内某些生产、照明设备的散热量较多,具有足够的发热量需排除时,此时可将这些热量作为热泵的低位热源加以利用。这样不仅可以减少加热新风的热负荷,同时与采用室外空气作为低位热源相比还能提高制热系数。

在暖通空调工程中,常用“采暖度日”(Heating Degree Day, HDD)数来反映该地区冬季供暖的需求。采暖度日(HDD)是采暖期间室温与室外空气日平均温度之差的累计值。日本学者曾提出,当采暖度日数 <3000 时在工程中采用空气源热泵是可行的。我国除寒冷地带以外,很大一部分地区的大气温度是可以满足热泵制热工况的要求的。根据《建筑气候区划标准》(GB 50178—1993),全国分为7个一级区,我国的建筑气候区划图如图1-4所示。Ⅱ区的气候特点是冬季气温较低但是空气干燥,1月平均气温为 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$,年平均气温低于 5°C 的日数为 $90\sim 145\text{d}$;在采暖期里白天气温高于 -3°C 的时数占很大的比例,最冷月室外相对湿度范围为 $45\%\sim 65\%$,空气源热泵的结霜现象又不太严重,有利于空气源热泵机组安全可靠地运行。Ⅲ区是我国夏热冬冷地区,夏季闷热,7月平均气温为 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$,年日平均气温大于 25°C 的日数为 $40\sim 110\text{d}$;冬季湿冷,1月平均气温为 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$,年平均气温低于 5°C 的日数为 $0\sim 90\text{d}$ 。Ⅴ区1月平均气温为 $0\sim 13^{\circ}\text{C}$,年平均气温低于 5°C 的日数为 $0\sim 90\text{d}$ 。在Ⅲ区和Ⅴ区以室外空气作为热泵的低位热源是合理且可行的。近年来的热泵应用情况证明,在这些地区选用空气源热泵供冷、供暖是较为合适的选择。

空气源热泵也有其局限性。

1) 要考虑补充热源的问题。当室外温度降低时,建筑物空调热负荷会随大气温度的降低而增加,但热泵的制热系数却相反地随着大气温度的降低而下降,热泵的供热能力就降低。为了弥补热泵的这种供需不平衡现象,需要用其他辅助热源补充加热量。

2) 要解决除霜问题。冬季空气温度很低时,空气源热泵的室外换热器表面温度低于 0°C 且低于空气的露点温度时,空气中的水分就会在换热器表面凝结成霜,致使空气源热泵的制热系数和运行的可靠性降低。空气源热泵需要定期除霜,这不仅消耗大量的能量而且影响空调系统正常运行。

3) 要注意噪声问题。由于空气的比热容小,为获得足够的热量,其室外蒸发器所需的风量较大,因而风机的容量增大,致使空气源热泵装置的噪声较大。

4) 要防止材料被腐蚀问题。在沿海地区使用的热泵,其室外换热器的肋片选材以铜片为好,并应做专门的耐蚀镀层,以减少含有腐蚀性成分的空气造成的损害。

1.3.2 水

地表水(江河水、湖水、海水等)、地下水(深井水、泉水、地热水等)、工业和生活废水都可用作热泵的低位热源。水作为热源的优点有两个:一是水的比热容大、传热性能好,所以换热设备体积紧凑;二是水温一般比较稳定,因而热泵的运行工况稳定。利用水作为热泵的低位热源时,要附设取水装置和水处理设施,而且应考虑换热设备和管路系统的腐蚀问题。

1. 地表水

用地表水作为热泵的热源有两种方式:一种方式是用泵将水抽送至热泵机组的蒸发器换热之后返回水源;另一种方式是在地表水水体中设置换热盘管,用管道与热泵机组的蒸发器连接成回路,换热盘管中的媒介水在水泵的驱动下循环经过蒸发器。在采用地表水时,应尽可能减少对河流或湖泊造成的生态影响。

我国的地表水资源丰富,如果能用江、河、湖、海的水作为热泵的低位热源,则经济效益是

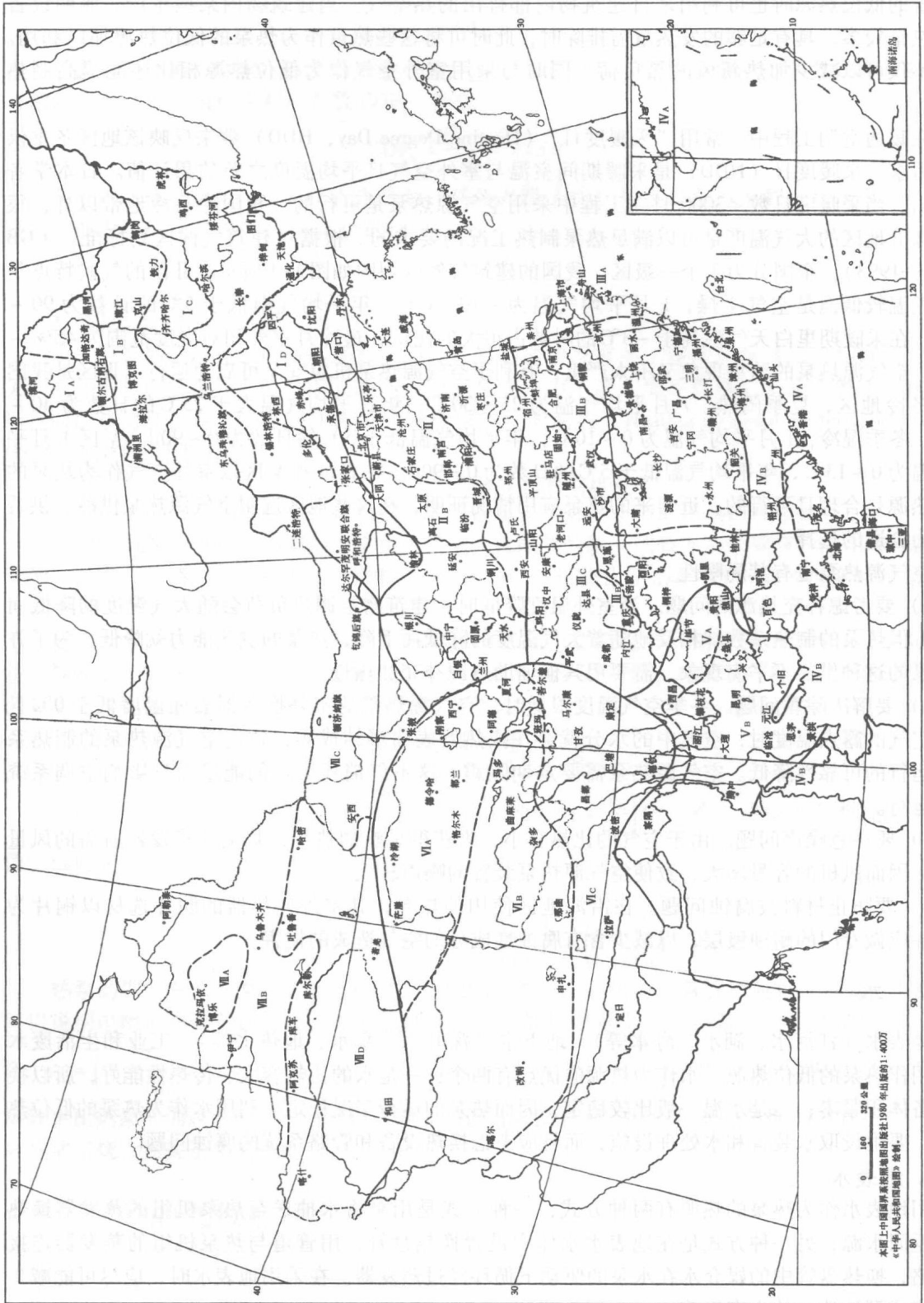


图 1-4 我国的建筑气候区划图
摘自《建筑气候区划标准》(GB 50178—1993)

很可观的。地表水相对于室外空气可算是高质量的低位热源，只要地表水冬季不结冰，均可作为低位热源使用。例如，武汉长江1月的平均水温为 6.7°C ，武汉东湖1月的平均水温为 3.1°C ，不存在结冰问题。而且冬季水温比空气温度明显地稳定，有利于热泵稳定运行。

海洋是一个巨大的能量储存库，占整个气候系统总热量的95.6%。据估算，到达地表的太阳辐射能约有80%为海洋表面所吸收。海洋水温随深度增加昼夜变化幅度减小，15m以下无昼夜变化，140m以下无季节性变化。赤道及两极地带海洋的温度年温差不超过 5°C ，而温带海洋水温年温差为 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。海洋水温在垂直方向上，水温波动幅度从表层向下层衰减很快，在2000m以下水温几乎没有变化。海洋表层水温的分布主要取决于太阳辐射和洋流性质。等温线大体与纬线平行，低纬水温高，高纬水温低，纬度平均每增高 1° 水温下降 0.3°C 。

我国海域冬季表层水温自北向南逐渐升高，表层之下水温均匀且高于海面空气温度。冬季水温的分布规律是：沿岸低，外海高，径向梯度较大。由于海水的比热容比空气的比热容大，因此冬季海水降温比空气滞后。渤海表层冬季水温为 $-1\sim 1^{\circ}\text{C}$ ，渤海中央温度高，温度自中央向四周递减，东部高西部低。黄海表层冬季水温为 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，黄海中央为一高温水舌由南向北伸展。东海表层冬季水温为 $8\sim 21^{\circ}\text{C}$ ，呈现西北低东南高的形态，致使等温线基本上都呈西南—东北走向。南海表层冬季水温为 $16\sim 26^{\circ}\text{C}$ ，等温线分布大致与海岸平行，温度由岸向外海递增。由此可见，我国沿海的海水都是很好的低位热源。

选用地表水作为热泵低位热源时，应注意地表水的特性对热泵机组运行的影响。

1) 江河水流量变化大会引起水位变化幅度大，取水构筑物在枯水期内也要能保证热泵机组的需水量。

2) 江河水温的变化将会影响热泵机组的运行工况，水温变化范围应能够在热泵机组正常运行的工况范围内。

3) 江河水含沙量大的情况下，要采取防沙处理措施。

4) 海水含盐量高且海洋生物丰富，热泵系统要有防腐和清除的手段。

5) 在湖水中采热时，要防止热污染和破坏湖泊的生态平衡。

2. 地下水

地下水温度变化主要受气候和地温的影响，尤其是地温。因土壤的隔热和蓄热作用，地表20m以下深井水温随季节气温的变化较小，对热泵运行十分有利。深井水的水温一般比当地年平均气温高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。我国东北地区深井水温为 $10\sim 14^{\circ}\text{C}$ ，华北地区为 $14\sim 18^{\circ}\text{C}$ ，华东地区为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，西北地区为 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，中南地区为 $19\sim 21^{\circ}\text{C}$ 。作为热泵的低位热源，地下水无论其水质、水温都是适宜的。对于地下热水，还可先作为供热的热媒再作为热泵的低位热源，实现地下热水的梯级利用，提高能量利用率。

地下砂岩和砾岩因为孔隙率较大、渗透性好而容易形成含水层。因为含水层的砂层粒度越大，含水层的渗透系数越大，出水量就大，所以应选择地下含水层为砾石和中粗砂区域作为地下水源。地下水的补给一般有两个来源，一是雨水渗入地下，二是外区地下水由地下透水层渗流到本区。用井水作为热泵空调的低位热源时，必须采用“井水回灌”的方法，用过的井水应回灌到原含水层中以防止地面的沉降。

3. 生活废水

我国城市生活废水的排放量巨大。2015年全国废污水排放总量735.3亿t中，城镇生活污水排放量535.2亿t。根据全国城镇污水处理及再生利用的要求，城市污水集中处理率将会年年增高，为城市生活废水用作热泵站的热源创造了基本条件。洗衣房、浴池、旅馆等排出废水的温度一般都在 30°C 以上，用这些废水作为热泵的低位热源，可以使热泵具有较高的制热系数。城市生活废水作为热泵低位热源时，必须贮存热泵用水量 $2\sim 3$ 倍的生活废水，使热泵能连续运行以

免供热量波动。此外,如何保持换热设备表面的清洁也是值得注意的问题。由于热泵热源使用生活废水只吸纳和释放热量,水温改变但水质不改变,因为必须按照《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的规定,经处理并达到一、二级排放标准后方可排至相应标准的水域或海域。

4. 工业废水

工业废水的数量可观,大有利用的前途。2015年全国的工业废水排放量为199.5亿t。各种设备用过的冷却水温升一般为 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 且热量巨大,有的设备冷却水的温度甚至达到 80°C 。可以利用热泵回收这些废水的热量用于供热。对于温度较高的冶金钢铁工业废水,可直接作为供热的热媒或作为吸收式热泵的驱动能源。

1.3.3 土壤

地表浅层土壤相当于一个巨大的集热器,土壤热源是人类可利用的可再生能源,是热泵的一种良好的低位热源。土壤的持续吸热率一般为 $20\sim 40\text{W}/\text{m}^2$ 。土壤的蓄热性能好,温度波动小。土壤温度的年变化是指一年中每个月平均温度变化,如图1-5所示。一般来说,从地表到地下15m的表层,土壤全年平均温度略高于气温。土壤越深则其温度年变化也越小,在我国大部分地区15m以下土壤就进入常温层,约等于当地年平均气温。从图1-5上可看到,土壤温度的变化较空气温度(深度0m)的变化有滞后和衰减的特点。由于土壤温度有延迟性,当室外空气的温度最低时,室内需要的热量也最多,而此时土壤层内却具有较高的温度,并且土壤层内温度能保持较稳定。所以把土壤作为热泵的低位热源,与空气源相比更能与建筑物热负荷较好地匹配。这对于空气调节是非常有利的。

土壤热源的主要缺点:①土壤的热导率小,地下盘管换热器的传热系数小,需要较大的传热面积,因此地下盘管换热器比较大导致占地面积大;②地下盘管换热器在土壤中埋得较深,所以土壤中埋设管道成本较高,运行中发生故障不易检修;③用盐水或乙二醇水溶液作中间载热介质时,增大了热泵工质与土壤之间的传热温差和管内介质的流动阻力,影响热泵循环的经济性。

1.3.4 太阳能

太阳以电磁波的形式向外辐射能量,它的辐射波长范围从 0.1nm 以下的宇宙射线直至无线电波的绝大部分,可见光(波长为 $400\sim 780\mu\text{m}$)只占整个电磁辐射波的很小部分。在应用太阳能系统时,通常把它看成是温度为 6000K 的黑色辐射体。地球只接收到太阳总辐射量的22亿分之一,即有 $1.73\times 10^{17}\text{W}$ 到达地球大气层上缘。由于穿越大气层时的衰减,最后约有 $8.5\times 10^{16}\text{W}$ 的能量到达地球表面。这个数量相当于目前全世界总发电量的几十万倍。但其辐射强度最多不超过 $1000\text{W}/\text{m}^2$,属低密度能源,且受天气阴晴影响。因此,利用太阳能需要较大的设备投资。

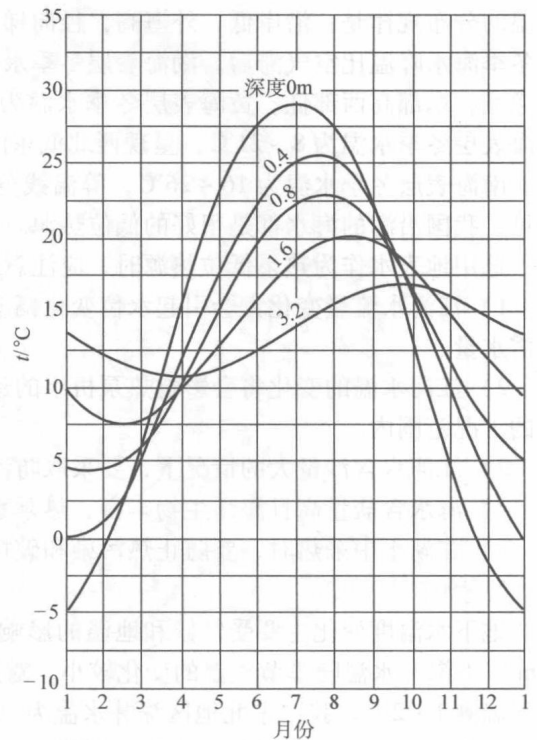


图1-5 不同深度土壤的温度曲线