

“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

# 蒸发冷却空调 原理与设备

黄翔 主编  
赵旭东 主审

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

 双色印刷

 免费教学资源

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

# 蒸发冷却空调 原理与设备

黄翔 主编

黄翔 强天伟 屈元 梁才航 王玉刚 汪超  
孙铁柱 白延斌 孙哲 宋祥龙 吕伟华 薛运  
折建利 褚俊杰 耿志超 杜冬阳 严锦程 贾曼  
安苗苗 刘振宇 屈悦滢

编著

赵旭东 主审



机械工业出版社

本书以“基础→设备→系统”为主线，全面、系统地介绍了蒸发冷却空调原理与设备的基础知识，重点加强“三结合”，即将蒸发冷却空调理论基础知识与空气调节中空气的热力学和空气与水的湿交换理论相结合，将蒸发冷却理论知识与设备原理相结合，将蒸发冷却空调系统与蒸发冷却工程应用相结合。

本书共13章，分别是绪论、蒸发冷却理论基础、直接蒸发冷却设备、间接蒸发冷却设备、蒸发冷却空调机组、蒸发冷却冷水机组、蒸发冷凝原理与设备、单元式蒸发冷却通风空调系统、全空气蒸发冷却空调系统、空气-水蒸发冷却空调系统、蒸发冷却空调系统自动控制、蒸发冷却空调水质处理、被动蒸发冷却技术。

本书可作为高等院校建筑环境与能源应用工程及相近专业的本科生和研究生教材，也可供暖通风空调行业相关工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

蒸发冷却空调原理与设备/黄翔主编. —北京: 机械工业出版社, 2019. 5

“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

ISBN 978-7-111-62330-4

I. ①蒸… II. ①黄… III. ①空气调节设备-高等学校-教材  
IV. ①TU831.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 054473 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 张丹丹

责任校对: 杜雨霏 封面设计: 陈沛

责任印制: 张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·432千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62330-4

定价: 58.00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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 序

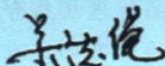
先贤梁启超先生说“少年强则国强”，我因此深刻体会到“学生强则行业强”。高等学校专业学科的教师团队优秀，他们编写的教材优秀，是使学生强的最接地气、最有实效的必要条件。高等学校的中心任务就是教书育人，这本由西安工程大学黄翔教授率领的蒸发冷却团队编写的教材，不仅是教书的教材，更是育人的教材。“学生强”的判定标准中，育人日显重要。这本教材客观、认真地阐述了国内外在蒸发冷却方面的发展历史，实事求是。作者不忘专业领路人的功绩，并对他们充满了感激之情，不忘各方面同仁对技术发展的贡献。我确信，在今天将这些理念植入教书育人中，将对我们的学生产生深刻和长远的重要影响。

蒸发冷却是自然现象，工程技术发展的本质就是创造性地利用自然现象和客观规律，巧妙地造出设备、建立起系统，恰当地应用于实践中，并经不断优化、改进，深化对规律的认识，提升理论水平，用工匠精神精益求精进行完善。这本教材可为学生潜移默化地增加科学技术、设备制造、工程应用、运行管理、数据积累、性能总结、继续追求等多方位的底蕴。

无数事实证明，中国要想成为技术强国，只能依靠自身实力的逐渐强大。中国是文化悠久的文明古国，发展的特质是文化加工匠实践。近代世界科技在数学、物理学、化学、统计学、逻辑学、工程学等方面有了长足的进步和发展，一些国家得以在高起点上切入起步，并获得了后发优势。我们应当实事求是地向他们的优势学习，但我们擅长的工匠优势也必须与时俱进地努力挖掘、总结和发扬。我们的文化起源于科技水平较低的时代，会有一些先验论的成分，应利用现代的科学知识去辨清、判断并发扬和纠偏，相信我们的学生会不辱使命，对复兴中华民族之梦做出贡献。

感谢黄翔老师蒸发冷却团队编写的教材让我建立了“学生强”的信心，也让我有机会将自己的一些学习心得与同仁们分享。

北京市建筑设计研究院有限公司

顾问总工程师  (吴德绳)

2018年10月

# 前言

公元前 2500 年，古埃及人利用蒸发冷却原理为皇室降温。100 多年前美国 Willis H. Carrier (Willis H. Carrier) 博士受大自然的蒸发冷却现象启发，发明了世界上第一台空调。30 多年前，我国暖通界著名专家学者同济大学陈沛霖教授在美国加州劳伦斯-伯克利实验室做访问学者，从事蒸发冷却空调技术的研究，回国后将蒸发冷却空调技术引入国内，倡导要加强间接蒸发冷却技术的研究，大力推广蒸发冷却空调技术在我国的应用。今天，陈老师播下的蒸发冷却空调的火种已燃遍祖国大地，蒸发冷却空调这一绿色仿生空调技术已在我国工业、农业、民用建筑等领域得到广泛应用。

蒸发冷却空调技术的发展与空气调节技术的发展息息相关。从世界上第一台空调的诞生到当今数据中心的自然冷却，再到身边随处可见的蒸发式冷气机（冷风扇），蒸发冷却空调已成为与我们生产和生活密不可分的通风降温装置。它以其节能、环保、经济、健康等优势，在工业与民用建筑通风空调中发挥着越来越重要的作用。

万丈高楼平地起，基础不牢，地动山摇。空气调节的主要理论基础是空气的热力学和空气与水的湿交换机理。蒸发冷却空调技术的基础理论同样是干空气能的热力学原理及空气与水的直接和间接接触的传热传质机理，两者一脉相承。因此，学好蒸发冷却空调技术的基础知识可为“空调工程”课程的学习奠定坚实的热力学与传热传质学基础。

目前，有关蒸发冷却空调技术方面的译著《蒸发冷却空调技术手册》（简称《译著》）、专著《蒸发冷却空调理论与应用》（简称《专著》）、图集《蒸发冷却通风空调系统设计与安装》（简称《图集》）及《蒸发冷却通风空调系统设计指南》（简称《指南》）等已相继问世，但始终缺少一本专门为大学本科生和研究生系统和全面地讲述蒸发冷却空调原理与设备方面基础知识的教材。为此，西安工程大学黄翔教授率领的蒸发冷却空调技术研究团队（以下简称蒸发冷却团队）编著了《蒸发冷却空调原理与设备》一书。

本书的编写思路是围绕“基础→设备→系统”这条主线，重点加强“三结合”，即将蒸发冷却空调理论知识与空气调节中空气的热力学和空气与水的湿交换理论相结合，将蒸发冷却理论知识与设备原理相结合，将蒸发冷却空调系统与蒸发冷却工程应用相结合。

在我国蒸发冷却空调技术的开创者与领路人同济大学陈沛霖教授的指引下，蒸发冷却团队从 1998 年开始，结合我国西北地区气候条件的特征和纺织空调的特色，聚焦蒸发冷却空调技术的研究，坚持不懈地开展了长达 20 年的蒸发冷却空调技术的教学与科研工作。《蒸发冷却空调原理与设备》一书是继《蒸发冷却空调技术手册》《蒸发冷却空调理论与应用》《蒸发冷却通风空调系统设计与安装》及《蒸发冷却通风空调系统设计指南》之后，再次为制冷空调行业呈献的蒸发冷却空调技术方面的研究成果。

本书共 13 章：第 1 章绪论、第 2 章蒸发冷却理论基础、第 3 章直接蒸发冷却设备、第 4 章间接蒸发冷却设备、第 5 章蒸发冷却空调机组、第 6 章蒸发冷却冷水机组、第 7 章蒸发冷凝原理与设备、第 8 章单元式蒸发冷却通风空调系统、第 9 章全空气蒸发冷却空调系统、第 10 章空气-

水蒸发冷却空调系统、第 11 章蒸发冷却空调系统自动控制、第 12 章蒸发冷却空调水质处理、第 13 章被动蒸发冷却技术。

本书由蒸发冷却团队 21 位成员编著，黄翔教授统稿。本书是蒸发冷却团队集体智慧的结晶。在编写过程中全体成员充分发扬蒸发冷却团队“不放弃、不畏惧、不懊悔”的团队精神，克服各种困难，密切合作，保质保量按时完成各自分配章节内容的编写。编写分工如下：

#### 第 1 章 绪论

西安工程大学城市规划与市政工程学院 黄翔

中国建筑科学研究院在读博士生 褚俊杰

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 严锦程

#### 第 2 章 蒸发冷却理论基础

西安工程大学城市规划与市政工程学院 屈元、孙铁柱

清华大学在读博士生 吕伟华

维谛技术（西安）有限公司 薛运

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 严锦程

#### 第 3 章 直接蒸发冷却设备

西安国际陆港产业发展有限公司 孙哲

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 严锦程

#### 第 4 章 间接蒸发冷却设备

西安航空学院能源与建筑学院 宋祥龙

集美大学机械与能源工程学院 王玉刚

维谛技术（西安）有限公司 耿志超

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 严锦程

#### 第 5 章 蒸发冷却空调机组

维谛技术（西安）有限公司 薛运

桂林电子科技大学机电工程学院 梁才航

深圳市英维克科技股份有限公司 折建利

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 刘振宇

#### 第 6 章 蒸发冷却冷水机组

维谛技术（西安）有限公司 耿志超

珠海格力电器股份有限公司 杜冬阳

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 刘振宇

#### 第 7 章 蒸发冷凝原理与设备

清华大学在读博士生 吕伟华

维谛技术（西安）有限公司 薛运

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 刘振宇

#### 第 8 章 单元式蒸发冷却通风空调系统

西安工程大学 汪超

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 屈悦滢

#### 第 9 章 全空气蒸发冷却空调系统

西安工程大学城市规划与市政工程学院 孙铁柱

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 屈悦滢

#### 第 10 章 空气-水蒸发冷却空调系统

中煤能源研究院有限责任公司(中国科学技术大学在读博士生) 白延斌

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 屈悦滢

#### 第 11 章 蒸发冷却空调系统自动控制

西安工程大学城市规划与市政工程学院 强天伟

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 屈悦滢

#### 第 12 章 蒸发冷却空调水质处理

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 安苗苗、刘振宇

#### 第 13 章 被动蒸发冷却技术

西安工程大学城市规划与市政工程学院在读硕士生 贾曼、严锦程

#### 附录

中国建筑科学研究院在读博士生 褚俊杰

在编著本书的过程中得到了许多前辈和同仁的关怀与帮助。年近 80 高龄的暖通空调界德高望重的老前辈、北京市建筑设计研究院有限公司顾问总工程师吴德绳教授级高工为本书亲自作序,给予蒸发冷却团队编写组全体成员极大鼓励与鞭策。国际著名蒸发冷却空调技术研究学者,英国赫尔大学机械工程学院首席教授赵旭东老师在百忙之中担任本书的主审,为蒸发冷却团队编写组全体成员提供了很多指导和帮助。机械工业出版社刘涛作为本书的策划编辑和责任编辑,对本书的编写给予了鼎力支持。本书还得到了“十三五”国家重点研发计划项目“藏区、西北及高原地区利用可再生能源采暖空调新技术”(2016YFC0700400)中课题 4“蒸发冷却空调关键技术与设备研究”(2016YFC0700404)和课题 7“西部炎热干燥地区蒸发冷却与其他空调技术结合研究”(2016YFC0700407)的资助,借此机会一并表示感谢!

由于编著者的学识和经验有限,本书中难免存在一些疏漏和不妥之处,恳请读者在使用过程中,将发现的问题和建议及时反馈给编者,以便使本书不断地得到改进和完善,编著者将不胜感激!

主编联系方式:

地址:陕西省西安市金花南路 19 号,西安工程大学

邮编:710048

邮箱:huangx@xpu.edu.cn

编著者

# 目 录

## 前 言

### 第 1 章 绪论 ..... 1

#### 1.1 蒸发冷却技术发展简史 ..... 1

##### 1.1.1 概述 ..... 1

##### 1.1.2 直接蒸发冷却技术 ..... 7

##### 1.1.3 间接蒸发冷却技术 ..... 8

##### 1.1.4 蒸发冷却技术专著 ..... 14

##### 1.1.5 蒸发冷凝技术 ..... 16

#### 1.2 蒸发冷却技术标准与术语 ..... 17

##### 1.2.1 蒸发冷却技术的标准 ..... 17

##### 1.2.2 蒸发冷却技术的术语 ..... 19

#### 1.3 蒸发冷却技术分类 ..... 21

##### 1.3.1 按技术形式分类 ..... 21

##### 1.3.2 按产出介质(获得冷量)形式 分类 ..... 23

##### 1.3.3 按空气处理设备的集中程度 分类 ..... 23

##### 1.3.4 按冷凝器结构形式分类 ..... 23

#### 1.4 蒸发冷却技术发展趋势 ..... 23

#### 1.5 本书和本课程的特点及学习方法 ..... 24

##### 1.5.1 本课程与专业基础课和专业课 的关系 ..... 24

##### 1.5.2 本书与《译著》《专著》《图集》 和《指南》的关系 ..... 25

##### 思考题与习题 ..... 25

##### 参考文献 ..... 26

##### 暖通专家陈沛霖简介 ..... 27

### 第 2 章 蒸发冷却理论基础 ..... 28

#### 2.1 蒸发冷却制取冷风 ..... 28

##### 2.1.1 干球温度、湿球温度和露点 温度 ..... 28

##### 2.1.2 直接蒸发冷却制取冷风的原理 ..... 29

##### 2.1.3 间接蒸发冷却制取冷风的原理 ..... 33

#### 2.2 蒸发冷却制取冷水 ..... 35

##### 2.2.1 直接蒸发冷却制取冷水的原理 ..... 35

##### 2.2.2 间接蒸发冷却制取冷水的原理 ..... 35

#### 2.3 蒸发冷却散热 ..... 36

##### 2.3.1 管外侧换热原理 ..... 37

##### 2.3.2 管内侧换热原理 ..... 37

##### 思考题与习题 ..... 38

##### 参考文献 ..... 38

##### 暖通专家吴德绳简介 ..... 39

### 第 3 章 直接蒸发冷却设备 ..... 40

#### 3.1 冷雾式直接蒸发冷却设备 ..... 40

##### 3.1.1 主动冷雾式直接蒸发冷却设备 ..... 40

##### 3.1.2 被动冷雾式直接蒸发冷却设备 ..... 42

##### 3.1.3 冷雾式直接蒸发冷却设备性能 评价 ..... 43

#### 3.2 冷风式直接蒸发冷却设备 ..... 45

##### 3.2.1 蒸发式冷气机 ..... 45

##### 3.2.2 蒸发式冷风扇 ..... 46

##### 3.2.3 窗式蒸发空调器 ..... 50

##### 3.2.4 岗亭用蒸发冷却空调 ..... 51

##### 3.2.5 广告牌式蒸发冷却空调 ..... 52

##### 3.2.6 冷风式直接蒸发冷却设备性能 评价 ..... 53

##### 思考题与习题 ..... 56

##### 参考文献 ..... 57

##### 暖通专家陆亚俊简介 ..... 57

### 第 4 章 间接蒸发冷却设备 ..... 58

#### 4.1 间壁式蒸发冷却换热设备 ..... 58

##### 4.1.1 板翅式间接蒸发冷却器 ..... 58

##### 4.1.2 卧管式间接蒸发冷却器 ..... 59

##### 4.1.3 立管式间接蒸发冷却器 ..... 60

##### 4.1.4 板管式间接蒸发冷却器 ..... 61

##### 4.1.5 热管式间接蒸发冷却器 ..... 61

#### 4.2 间壁式间接蒸发冷却器性能参数与 评价 ..... 63

##### 4.2.1 蒸发效率 ..... 63

##### 4.2.2 淋水密度 ..... 63

4.2.3 二次/一次风量比 .....	64	参考文献 .....	109
4.2.4 耗水量 .....	64	暖通专家王天富简介 .....	111
4.2.5 阻力 .....	65	<b>第6章 蒸发冷却冷水机组</b> .....	112
4.3 间壁式蒸发冷却器相关计算 .....	65	6.1 蒸发冷却冷水机组的结构形式与工作 过程 .....	112
4.3.1 间壁式间接蒸发冷却器出风温度 计算 .....	65	6.1.1 表冷器预冷式蒸发冷却冷水 机组 .....	112
4.3.2 间壁式间接蒸发冷却器模块化 计算 .....	66	6.1.2 卧管间接预冷式蒸发冷却冷水 机组 .....	113
4.3.3 间壁式间接蒸发冷却器设计 计算 .....	67	6.1.3 立管间接预冷式蒸发冷却冷水 机组 .....	114
4.4 露点式蒸发冷却换热设备 .....	67	6.1.4 露点间接预冷式蒸发冷却冷水 机组 .....	115
4.4.1 叉流式露点间接蒸发冷却器 .....	68	6.1.5 表冷器-卧(立)管间接预冷式 蒸发冷却冷水机组 .....	115
4.4.2 逆流式露点间接蒸发冷却器 .....	70	6.1.6 表冷器-立管间接-填料直接蒸发 预冷式蒸发冷却冷水机组 .....	116
4.4.3 复合式露点间接蒸发冷却器 .....	72	6.1.7 表冷器-露点间接预冷式蒸发冷却 冷水机组 .....	117
4.4.4 多级间接蒸发冷却式露点换 热器 .....	73	6.2 蒸发冷却冷水机组的性能评价 .....	118
4.4.5 露点式蒸发冷却冷水机组 .....	75	6.2.1 蒸发冷却冷水机组的冷却效率 .....	118
4.5 露点式间接蒸发冷却器性能评价 .....	76	6.2.2 蒸发冷却冷水机组的能源效率 .....	120
4.5.1 露点效率 .....	76	6.3 蒸发冷却冷水机组的性能测试 .....	121
4.5.2 空气流量比 .....	76	6.4 蒸发冷却冷水机组的设计计算 .....	124
4.5.3 制冷量 .....	76	6.5 蒸发冷却与机械制冷联合制取冷水的 形式 .....	126
4.5.4 性能系数 .....	77	思考题与习题 .....	127
4.5.5 耗水率 .....	77	参考文献 .....	127
思考题与习题 .....	77	暖通专家丁良士简介 .....	128
参考文献 .....	77	<b>第7章 蒸发冷凝原理与设备</b> .....	129
暖通专家马最良简介 .....	79	7.1 蒸发式冷凝器 .....	129
<b>第5章 蒸发冷却空调机组</b> .....	80	7.1.1 蒸发式冷凝器的工作原理与 构造 .....	129
5.1 单级和多级蒸发冷却空调机组 .....	80	7.1.2 蒸发式冷凝器的分类 .....	129
5.1.1 单级蒸发冷却空调机组 .....	80	7.2 蒸发冷凝式空调机组 .....	134
5.1.2 多级蒸发冷却空调机组 .....	84	7.2.1 蒸发冷凝式空调机组的工作 原理 .....	134
5.1.3 蒸发冷却设备性能评价 .....	88	7.2.2 蒸发冷凝式空调机组的应用 .....	134
5.2 蒸发冷却与机械制冷相结合的空调 机组 .....	90	7.2.3 蒸发冷凝式空调机组制冷系统的 设计思考 .....	138
5.2.1 外接机械制冷式 .....	90	7.2.4 辅助机械制冷降温 .....	138
5.2.2 间接-直接蒸发冷却-机械制冷 空调设备 .....	91	7.3 蒸发冷凝式冷水机组 .....	139
5.2.3 内置机械制冷式 .....	93	7.3.1 蒸发冷凝式冷水机组的工作	
5.2.4 内置机械制冷式相关设备 .....	94		
5.3 蒸发冷却与除湿联合空调机组 .....	99		
5.3.1 除湿方法类型 .....	99		
5.3.2 除湿与蒸发冷却联合的空调 系统 .....	105		
思考题与习题 .....	109		

原理 .....	139	10.1.2 蒸发冷却冷水机组分区及选用判定 .....	170
7.3.2 蒸发冷凝式冷水机组的性能评价 .....	139	10.1.3 显热末端——干式风机盘管 .....	171
7.3.3 蒸发冷凝式冷水机组的工程应用 .....	141	10.1.4 显热末端——辐射板 .....	173
7.4 蒸发冷却设备的比较分析 .....	142	10.1.5 显热末端——其他形式 .....	174
思考题与习题 .....	142	10.2 空气-水蒸发冷却空调系统流程 .....	176
参考文献 .....	143	10.2.1 水系统流程 .....	176
暖通专家江亿简介 .....	144	10.2.2 空气系统流程 .....	178
<b>第8章 单元式蒸发冷却通风空调系统</b> .....	145	10.3 空气-水蒸发冷却空调系统运行模式 .....	183
8.1 单元式蒸发冷却通风空调系统概述 .....	145	10.3.1 全负荷季节运行模式 .....	183
8.2 单元式蒸发冷却通风空调系统流程 .....	145	10.3.2 过渡季节运行模式 .....	183
8.3 单元式蒸发冷却通风空调系统气流组织 .....	147	10.3.3 部分负荷季运行模式 .....	184
8.3.1 置换通风送排风形式 .....	147	10.4 工程应用实例 .....	186
8.3.2 工位送风送排风形式 .....	150	10.4.1 实例1——新疆某大厦 .....	186
8.4 单元式蒸发冷却通风空调系统运行模式 .....	151	10.4.2 实例2——新疆某数据中心 .....	188
8.5 工程应用实例 .....	152	思考题与习题 .....	192
8.5.1 福州某通信机房应用实例 .....	152	参考文献 .....	193
8.5.2 汽车生产车间应用实例 .....	153	暖通专家张小松简介 .....	193
思考题与习题 .....	154	<b>第11章 蒸发冷却空调系统自动控制</b> .....	194
参考文献 .....	154	11.1 蒸发冷却空调自动控制的必要性和功能 .....	194
暖通专家赵旭东简介 .....	155	11.1.1 必要性 .....	194
<b>第9章 全空气蒸发冷却空调系统</b> .....	156	11.1.2 功能 .....	194
9.1 全空气蒸发冷却空调系统概述 .....	156	11.2 蒸发冷却控制系统的总体设计方案 .....	195
9.2 全空气蒸发冷却空调系统流程 .....	157	11.3 蒸发式冷气机自动控制设计 .....	196
9.3 全空气蒸发冷却空调系统运行模式 .....	158	11.3.1 蒸发式冷气机模拟仪表控制 .....	196
9.3.1 运行模式分区气象参数选取 .....	158	11.3.2 蒸发式冷气机 DDC 控制 .....	196
9.3.2 运行模式参数分区及空气处理过程 .....	159	11.4 全空气蒸发冷却通风空调机组自动控制设计 .....	198
9.4 工程应用实例 .....	163	11.4.1 三级蒸发冷却空调机组模拟仪表控制 .....	198
9.4.1 新疆某热电厂变频器室应用实例 .....	163	11.4.2 三级蒸发冷却空调机组 DDC 控制 .....	199
9.4.2 兰州某地铁站应用实例 .....	165	11.5 蒸发冷却与机械制冷联合空调机组自动控制设计 .....	202
思考题与习题 .....	167	11.5.1 间接-表冷-直接三级蒸发冷却空调机组模拟仪表控制 .....	202
参考文献 .....	167	11.5.2 间接-表冷-直接三级蒸发冷却空调机组 DDC 控制 .....	203
暖通专家由世俊简介 .....	168	11.6 空气-水蒸发冷却通风空调系统自动	
<b>第10章 空气-水蒸发冷却空调系统</b> .....	169		
10.1 空气-水蒸发冷却空调系统原理 .....	169		
10.1.1 系统概述 .....	169		

控制设计 .....	205	12.4.3 钙硬度的测定 .....	242
11.6.1 空气-水蒸发冷却通风空调系统 模拟仪表控制 .....	205	12.4.4 水总碱度的测定 .....	242
11.6.2 空气-水蒸发冷却通风空调 系统 DDC 控制 .....	206	12.4.5 pH 值的测定 .....	242
11.7 实际应用 .....	207	12.4.6 电导率的测定 .....	243
11.7.1 模拟仪表控制实例 .....	207	12.5 蒸发冷却空调系统水质处理方案设计 分析 .....	243
11.7.2 PLC 控制实例 .....	209	12.5.1 处理方案设计概要 .....	243
11.7.3 DDC 实例 .....	217	12.5.2 处理方法选择及建议 .....	243
11.7.4 集散控制系统和楼宇自动控制 系统 .....	222	12.6 蒸发冷却空调系统是否会引起 军团病 .....	245
11.7.5 设备安装 .....	224	思考题与习题 .....	246
思考题与习题 .....	225	参考文献 .....	246
参考文献 .....	225	暖通专家麦索特森科 (Maisotsenko) 简介 .....	247
暖通专家约翰·瓦特 (John Reid Watt, P. E.) 简介 .....	226	<b>第 13 章 被动蒸发冷却技术</b> .....	248
<b>第 12 章 蒸发冷却空调水质处理</b> .....	227	13.1 被动冷却技术 .....	248
12.1 蒸发冷却空调水系统存在的问题及 水质处理的必要性 .....	227	13.2 被动蒸发冷却技术概述及其分类 .....	252
12.1.1 水垢的产生 .....	227	13.2.1 被动蒸发冷却技术概述 .....	252
12.1.2 腐蚀现象 .....	228	13.2.2 被动蒸发冷却技术分类 .....	254
12.1.3 细菌、藻类生长 .....	229	思考题与习题 .....	261
12.1.4 结垢顺序和趋势判定 .....	229	参考文献 .....	261
12.2 蒸发冷却空调循环水处理的常用方法 与设备 .....	230	蒸发冷却团队简介 .....	262
12.2.1 物理水处理方法 .....	231	<b>附录</b> .....	263
12.2.2 化学水处理方法 .....	233	附录 A 全国主要城市蒸发冷却空调系统 和通风系统室外空气计算参数 (修正后) .....	263
12.3 蒸发冷却空调系统的清洗与维护 .....	238	附录 B 人体舒适区最佳取值范围 .....	264
12.3.1 物理清洗 .....	239	附录 C 蒸发冷却空调机组(冷却器) EER 对比 .....	265
12.3.2 化学清洗 .....	239	附录 D 不同蒸发冷却设备耗水量 指标值 .....	265
12.3.3 系统的维护 .....	241	附录 E 蒸发冷却空调机组耗水量 实测值 .....	265
12.4 循环水水质测试方法 .....	241	附录 F 常用基本符号 .....	267
12.4.1 水硬度的测定 .....	241		
12.4.2 总硬度的测定 .....	241		

## 第 1 章

# 绪 论

### 1.1 蒸发冷却技术发展简史

#### 1.1.1 概述

在自然界的瀑布和河流附近、湖面和海洋上方、茂密的叶子下面等湿表面，包括人的皮肤，都会发生蒸发冷却。在炎热的夏天，我们离开游泳池或冲凉后都体验过蒸发冷却的效果。

或许原始时期很多人观察到了这个现象，因此蒸发冷却的有效开发和利用曾出现在很多地区和时期。早期的发展出现在地中海东部沿岸地区，包括非洲东北部和亚洲西南部，该地区炎热、干旱的气候为蒸发冷却技术的应用提供了有利条件。

蒸发冷却技术是利用水蒸发吸热的效应来冷却空气。它在空气调节中应用的历史悠久。人们早就知道用水洒在地上可以冷却室内空气，工业通风中采用喷雾风扇，空调中采用喷水室（喷循环水），这些都应用的是蒸发冷却技术。

##### 1. 原始的蒸发冷却

古埃及人早就熟知蒸发冷却。大约公元前 2500 年的壁画显示奴隶们给广口瓶里的水扇风来为皇室冷却房间（见图 1-1）。这些容器是可渗水的，可以保持表面潮湿，促进蒸发过程。

在伊朗，古老的住宅和建筑中经常用蒸发冷却。房间部分位于地下，以避免太阳热，并有流动着水的水池，水池上设有敞口的通风塔以吸风，并变换风的方向掠过下方的水表面。饮用水的贮水池也用同样的方法冷却。古波斯人和一些美国印第安人都在帐篷上放有始终潮湿的毛毡，以达到冷却的目的。

在印度，蒸发甚至被用来制冰。人们将大自然中浅的河床用 30cm 厚的稻草与外界隔热，上面盖有陶土制的薄盖。在寒冷的夜晚，甚至在空气温度不低于 6℃ 时，也能形成冰，夜空中的蒸发加上辐射产生了制冷。去波斯的旅行者曾报道在高高的石墙上有冰产生，东西向的“冰墙”在白天避开阳光对浅水池的照射，促使其在夜晚结冰。

印度人在夏天仍然用湿香帘（Tatty）取代迎风面的门，湿香帘是用干燥的香根草（Khus-Khus）覆盖着类似纱门的一种东西。最初采用手工保湿，现在有的采用循环水泵和集水池保湿。许多湿香帘用上面的平衡槽周期性地浸透，水从供水管徐徐流入水槽中，直到



图 1-1 公元前 2500 年的壁画记载

水槽翻转过来，将填料浸透，然后利用重力将水槽扶正，重新注水。

印度另一个蒸发冷却器是冷风扇。它采用一个轮状的旋转结构，覆盖着香根草，用类似湿香帘的方法保湿，并在门口旋转。

在古代中国，战国时期就有把冰块置于鼎内供人们防暑降温的记录。唐朝时期，出现了一种供人们消暑的“凉屋”。“凉屋”一般傍水而建，采用水循环的方式推动扇轮摇动，将水中凉气缓缓送进屋中，或利用机械将水送至屋顶，然后沿屋顶而下，制成“人工水帘”，使凉气进入屋中。唐代诗人张仲素《杂曲歌辞·宫中乐》中说道：“江果瑶池实，金盘露井冰。甘泉将避暑，台殿晓光凝。”说的就是这种利用“水循环”建成的“凉屋”（见图 1-2）。由此可见这种降温方式应用的也是蒸发冷却的原理。



图 1-2 古代中国的“凉屋”

我们的先辈们经常用盖着布的箱子或食品冷却器来保存食物，上面的水盘或下面的水槽利用毛细作用将织物弄湿。许多这样的箱子被放在厨房的窗户外，这样风可以增强蒸发。后来就有了简单舒适的冷却：用潮湿的粗麻布覆盖迎风面的窗户，或者将门口的帘子弄湿，或者给床单喷洒水使睡觉更凉快。

列奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci）可能是第一台机械式空气冷却器的制作者，冷却器被用来给房间降温。该冷却器是一个中空的水轮，当水轮在水流中连续旋转时，空气被水轮内腔中上升或下落的水流吸入。水进入轮子，飞溅到空气中，将空气冷却并净化，并迫使空气从中空轮轴的木制阀门中穿过，进入房间内。

## 2. 现代的蒸发冷却

现代蒸发冷却有两个起源，分别在美国的东部和西部。在 1900—1930 年期间，喷水室（空气洗涤器）和纺织厂蒸发冷却开始在美国的东部出现，多用于新英格兰和南部沿海地区的工厂。这些发明在古代似乎是没有先例的。

在 1930 年以前，紧随滴水式和抛洒式直接蒸发冷却器之后，在美国西部的亚利桑那州和加利福尼亚州出现两种类型的间接蒸发冷却器。间接蒸发冷却器无疑是从冷却塔的地区性成功中获得灵感的。而直接蒸发冷却器的灵感则来自于印第安人和墨西哥人的实践。

各地区的系统起源不同，并分别发展。东部开发了较好的纺织厂冷却器以及单元式空气洗涤器，西部则发明了抛洒式和旋转填料式冷却器以及大规模生产的滴水式冷却器。东部类型发展的结果是成为工业上普遍应用的空气处理和净化设备，但很少用于冷却；西部类型仍保持为纯粹的家庭及建筑用冷却装置。

1906 年，威利斯·H. 开利（Willis H. Carrier）博士（见图 1-3）获得了“空气处理装置”的专利权。这是世界上第一台喷水室，它具有多个压力型喷嘴和挡水板，可以加湿或干燥空气。虽然设计的喷水室是用于净化空气，但它们同样对空气进行了冷却和加湿。由于

纺织加工需要高湿度，所以从1904年开始，美国东部北卡罗来纳州的“多面手”工程师斯图亚特·W. 克勒谋（Stuart W. Cramer）负责设计和安装了美国南部约1/3纺织厂的空调系统，系统中开始采用了集中处理空气的喷水室。

在20世纪20年代后期，人们发现室内风机循环使加湿器的水雾可以到达厂房的所有角落，因此，在任何可以敞开心窗以使室外空气蒸发水雾的地方，蒸发冷却都能发生。纺织工业在为员工提供舒适性降温方面走在了前列，并且长期主导了大部分的空调制造设备工业。

最后，供有不同水温的空气洗涤器成为加湿、除湿、加热、冷却以及净化空气的通用设备，并且成为大多数大型加热和空气调节系统的标准设备。如今，只有极少数的空气洗涤器被纯粹用于蒸发冷却。

1935年，由于传统空气洗涤器的价格高、体积大，促使约翰·瓦特发明了简单、紧凑的空气洗涤器。在这种洗涤器中，空气通过厚而松散的填充玻璃纤维，并通过低压喷淋予以保湿。由于该设备极大地减小了占用空间和质量，因此这些蜂窝状机组取代了诸如化工、冶炼、精炼、橡胶、纺织以及其他工厂中许多标准的空气洗涤器，当然，也有部分被用于舒适性降温。由于喷水室改善了温湿度控制的效果，从而使全年性空调系统除纺织厂外还能够满意地应用于200种以上不同类型的工厂。

美国另外两类蒸发冷却，主要是由亚利桑那州和加利福尼亚州气候相对干旱的地区开发的，这些地区冷却塔很常见，住户们经常在敞开着迎风窗上悬挂垂下的布条，而这些布条又通过吸收窗台水槽中的水来保持湿润，借助水的蒸发来冷却空气。

冷却塔是利用一部分水的蒸发来冷却再循环水的工业设备，当喷出的再循环水与大量运动着的室外空气接触时，部分再循环水蒸发，室外空气立即被排出。然后被冷却的水用来冷却那些热加工过程、电力生产，或者用于大型机械制冷空调中的冷凝器。

据报道，在1930年以前，亚利桑那州的实验人员曾用泵将冷却塔的水送到汽车的散热器中以冷却室内空气，立即获得了成功。于是菲尼克斯（Phoenix）汽车散热器经销商奥斯卡·帕默（Oscar Palmer）开始制造此类冷却器。数以千计的间接蒸发冷却器被安装在亚利桑那州的家庭、商店、咖啡馆、办公室、旅馆、政府机构、仓库以及学校中（见图1-4）。

两种不同类型的间接蒸发冷却器在洛杉矶得到应用和发展。它们用板式换热器替代了盘管和散热器。另一种更有效的方式是，水直接喷射或空气直接冲击中空的金属板外部，而将流过金属板内部的干空气冷却。这些冷却系统被安装在从加利福尼亚州到亚利桑那州的许多联营商店和百货公司的屋顶上。早期的相关设备描述和图表曾发表在1935年加利福尼亚大学（University of California）的期刊上（见图1-5）。

第一台机械式直接蒸发冷却器大约出现在1932年，当时住户们开始给他们窗外悬挂着的湿布条装上电动风机。到1933年，在亚利桑那州出现了数以千计这样的自制冷却器。最早的是用粗麻布覆盖着的木质结构，通过滴水打湿，安装在窗外，而通常装有汽车风机叶片的电动机则立在窗台上，将冷却后的空气吹入室内。咖啡馆和理发店是这种冷却器的早期用户。



图1-3 威利斯·H. 开利博士

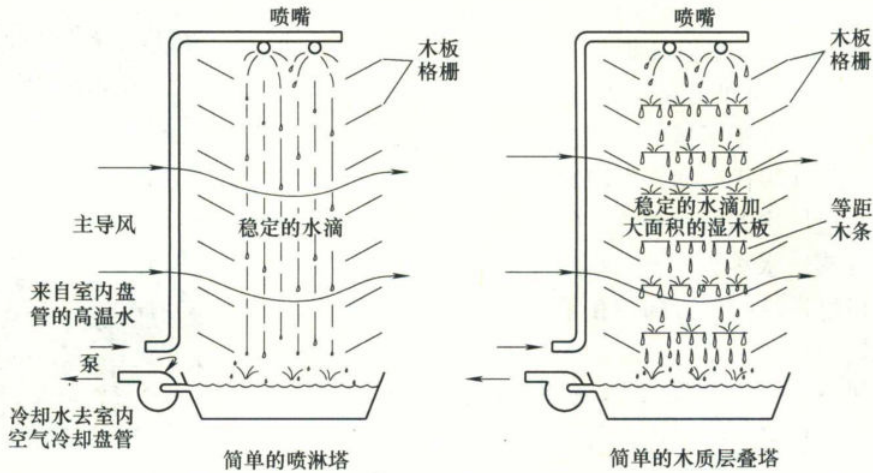


图 1-4 早期间接蒸发冷却器所使用的冷却塔简图

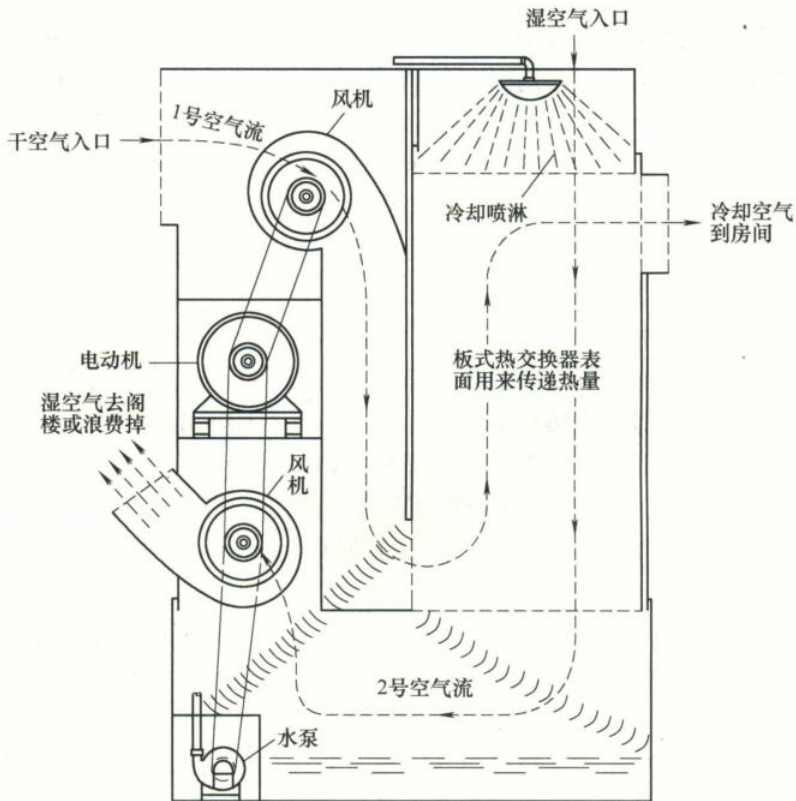


图 1-5 20 世纪 30 年代的板式间接蒸发冷却器

不久，细木丝填料取代了粗麻布。实验人员将风机放在前面开口的箱子中，后部用厚 5cm 的细木丝填料钉入六角形轻质钢丝网中间，用打过孔的铜管润湿填料，并将机组安装在窗户上。这种机组最初称为“湿箱”，就是有名的“沙漠冷却器”，后来被称为“滴水式冷却器”。

到1935年,自制的滴水式冷却器已非常普遍,1937年整个亚利桑那州,几乎所有的住宅和商店都在使用滴水式冷却器。

“Sno-Breeze”冷却塔-盘管系统价格昂贵,因此它的销路被滴水式冷却器削弱了。安装这种间接蒸发冷却器大约比安装滴水式冷却器贵10倍,而且其能耗更是后者的许多倍。这种冷却器大多数都需要使用特别高大的自然通风冷却塔,它们噪声大、不美观,并且容易出故障。只有在最干旱的气候中,它们才能提供与最好的滴水式冷却器相同的舒适性。另外,散热器或盘管很容易受到硬水和冷却塔喷水时捕集到的灰尘的侵害,管子内表面会附着上一层硬的隔热水垢,这会慢慢降低其传热性能,只有通过每年的酸洗才能除去水垢,而这会导致管子过早泄漏或需要更换盘管。因此,当滴水式冷却器推广以后,间接冷却器开始慢慢消失。在第二次世界大战期间,由于铜的短缺造成盘管难以更换,致使间接冷却器完全消失。

### 3. 当代的蒸发冷却

第二次世界大战以后,工业的快速发展,促使结构简单、成本低廉、冷却效果好的直接蒸发冷却器在工业领域得到了迅猛的发展。新型直接蒸发冷却器的使用,已从西南部扩展到气候干燥地区,远至北部的加拿大以及遥远的澳大利亚。这种新型冷却器为西部许多地区财富和人口的快速增长做出了巨大的贡献。它们不仅在许多城市中提供了就业机会,而且,作为世界上最早的廉价空气调节方式,它们第一次使得一些最热的城镇和农场变得舒适、适宜居住。这就提高了当地居民的生产率和收入,并使许多地区为北部旅游者所接受,后来许多人还在那里定居、投资甚至工作至退休。

因此,从历史的观点说,廉价的蒸发冷却器对美国西部的贡献比早期的有大篷货车、反复使用的步枪、风车、西部马鞍、带刺钢丝网和科尔曼灯都大得多。

后来新型“刚性介质”(Rigid—Media)冷却器开发出来,它们是30.5m长、3.7m高、不足0.91m厚的无风机冷却器。它们像滴水式冷却器那样从上面淋湿,在空气调节中冷却能力较强,空气流动阻力较低,填料寿命更长,并且冷却费用最低。设置于各种建筑物墙壁的排风风机,可将室外空气吸入室内,以冷却大空间空气。

间接蒸发冷却器也有新的进展,老式的冷却塔-盘管系统已得到改进,有些采用小型多级组合式。在澳大利亚、新泽西州、亚利桑那州、科罗拉多州以及其他一些地方还制造了板式系统。三种多管型冷却器采用类似火管锅炉设计的换热器,其中两种采用风机吹过每根管上的湿纤维套管。它们对管内流动的空气进行干式冷却,而且可以通过制冷或直接蒸发冷却,或两者同时使用来进一步冷却空气。在从前认为不适宜使用任何蒸发冷却设备的地区,分级系统允许用间接蒸发冷却器替代部分机械制冷冷却器,并且有较大的节约投资能力。

有些间接系统,在夜间使用直接蒸发冷却器将冷风吹入地下储槽内,对槽内大量经过仔细分级的石块进行冷却,以利用非高峰期较便宜的电能。到早晨,这些石块已经被充分冷却,因而可以轻松地冷却白天建筑物所需的送风。有些系统在夜间使用冷却塔来冷却大水池中的水,为第二天提供与上面类似用途的冷源。另一种非能动间接冷却系统不采用任何运动部件,而依靠辐射和对流冷却作用来提供冷源。尚有其他冷却系统采用储热转轮在润湿填料冷却空气前对空气进行干燥。

卡尔·格奥尔格·蒙特(Carl Georg Munters)先生(见图1-6)于1955年在美国佛罗里达州的迈尔斯堡(Fort Myers)创建了蒙特公司(Munters)。卡尔·格奥尔格·蒙特先生一生中获获得1000多项专利,结合其在空气热力学、空调制冷等领域的独到见地,蒙特公司

在技术革新上取得了突破性进展。最初，蒙特先生想开发蒸发冷却除湿空调系统，该系统的关键组件是除湿转轮和蒸发冷却填料。这两项技术也是蒙特公司的核心技术，并一直秉承创新和工程技术两大传统优势发展至今。转轮除湿系统和直接蒸发冷却刚性填料是蒙特公司对于空气调节领域的卓越贡献。

将蒸发冷却技术作为自然冷源，替代人工冷源的研究早在 20 世纪 60 年代已引起我国学者的关注。1963 年哈尔滨建筑工程学院（现为哈尔滨工业大学）徐邦裕教授在《国外空调制冷发展动态》论文中介绍了填料层蒸发冷却技术。

蒸发冷却技术在 20 世纪 60 年代已在我国开始应用，劳研型喷雾风扇（I、II、III 型）用于高温车间降温。

同济大学在 20 世纪 80 年代中期就与美国加州劳伦斯伯克利实验室从事蒸发冷却空调技术的国际合作研究（见图 1-7）。1985 年同济大学陈沛霖教授被国家公派到美国劳伦斯伯克利实验室做访问学者，主要研究方向为蒸发冷却空调技术。回国以后，陈沛霖教授大力倡导在我国推广与应用这种绿色节能的空调技术。他在 20 世纪 80 年代末期和 90 年代初先后连续在《暖通空调》等刊物上发表了多篇高水平蒸发冷却技术研究论文，并以蒸发冷却技术为研究方向，培养了多名博士研究生和硕士研究生（图 1-8 为他指导的第一位博士研究生周孝清的博士学位论文）。陈沛霖教授可谓我国蒸发冷却空调技术领域的开创者与领路人。

20 世纪 80—90 年代，国内开展蒸发冷却技术的研究主要集中在同济大学、哈尔滨建筑工程学院、天津大学等高校。

同济大学开展了蒸发冷却传递过程的理论分析及实验研究；淋水填料层中热湿交换计算理论及实验研究；蒸发冷却技术与晚间通风的联用研究；蒸发冷却技术与机械制冷联用技术的研究等。

哈尔滨建筑工程学院开展了我国某几个城市利用蒸发冷却空调的适用性研究；波纹规则纸填料及一些非规则填料直接蒸发冷却过程的试验研究；蒸发冷却技术在空调机组中的应用研究；开发了直接蒸发冷却局部空调器和卧式空调机组直接蒸发冷却段。

天津大学开展了空调用金属填料（不锈钢或铝箔）传热传质性能的试验研究与理论研究；金属填料在组合式空调机组中的应用研究；金属填料型直接蒸发式空气冷却器的开发及



图 1-6 卡尔·格奥尔格·蒙特先生



图 1-7 陈沛霖教授在美国菲尼克斯考察某火车站应用的被动式蒸发冷却冷却塔