

IDC
机房设计
和运行管理

数据中心 机房空气调节系统的 设计与运行维护

钟志鲲 丁涛 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

IDC
机房设计
和运行管理

数据中心 机房空气调节系统的 设计与运行维护

钟志鯤 丁涛 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

数据中心机房空气调节系统的设计与运行维护 / 钟志
鲲, 丁涛编著. —北京: 人民邮电出版社, 2009.8
(IDC机房设计和运行管理)
ISBN 978-7-115-19965-2

I. 数… II. ①钟…②丁… III. ①电子计算机—机房—
空气调节设备—设计②电子计算机—机房—空气调节设
备—运行③电子计算机—机房—空气调节设备—维护
IV. TP308 TU831.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第090281号

内 容 提 要

本书在介绍 IDC 机房专用空调实用技术知识的基础上, 介绍了工程设计及施工实施方案。首先从空气焓湿图入手, 依次阐述了机房空调系统、机房气流组织、机房空调设计与施工中常见问题的解决方法、机房空调运行管理等, 特别结合了国家节能减排工作, 重点介绍了机房专用空调节能方面的知识、经验以及具体的节能措施。在写作思路, 本书把理论与实践进行了紧密的结合, 为从业人员提供系统理论知识的同时, 提供了实用技术和经验。

本书既考虑到 IDC 的广泛性, 又兼顾通信行业的独特性。读者对象为 IDC 领域有关的工程技术人员、运行维护管理人员、系统集成商、产品提供商等, 也可供其他相关人员作为参考资料。

IDC 机房设计和运行管理

数据中心机房空气调节系统的设计与运行维护

◆ 编 著 钟志鲲 丁 涛

责任编辑 王建军

执行编辑 青晓琴

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 13.25

2009 年 8 月第 1 版

字数: 317 千字

2009 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-19965-2/TN

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前言

随着互联网向纵深发展,互联网数据中心(Internet Data Center, IDC)应运而生。IDC 通过与某一骨干网高速连接,借助丰富的网络资源,向网站企业出租带宽和空间,并为客户提供有电信级品质保证的服务(包括整机租用、服务器托管、机柜租用、机房租用、专线接入、网络管理服务)。可以说,IDC 的出现,是数据服务在市场驱动下向集中化管理的具体体现,这种需求会随着社会经济的发展而越来越大。我国的 IDC 起步于 1996 年前后,在历经 10 多年的发展后,出现了欣欣向荣的局面。

IDC 对机房基础设施的要求非常高,供电和环境保障是目前 IDC 的突出难点问题。虽然从业的管理人员、工程技术人员、运行维护人员、系统集成商、产品提供商等耗费心力,不断探索,但一直苦于没有详实的相关资料。此次,《IDC 机房设计和运行管理》丛书策划编委会,组织了多位中国通信电源界的资深专家和中国计算机用户协会机房设备应用分会的专家,编写了本系列丛书,期望采取优势互补、集思广益的方式,为读者提供一份既全面又实用的资料,以利于今后 IDC 机房的建设和发展。

本书作为丛书之一,主要介绍了机房空调的专业知识、实用技术和经验,既考虑到 IDC 的广泛性,又兼顾通信行业的独特性。本书共分 8 章,从空调的基础理论、系统设计、节能措施、维护管理、发展方向等进行了系统的介绍。第 1 章介绍了空气的 h-d 图(焓湿图),帮助读者了解空气调节的基础知识;第 2 章介绍 IDC 机房专用空调的特点、机房负荷计算等;第 3 章介绍世界知名品牌的专用空调;第 4 章从机柜功率密度、单机柜气流组织、机房建筑结构和机架布局等方面探讨 IDC 机房的气流组织问题;第 5 章介绍了机房维护结构严密性、洁净度、温度不均、噪声、节能等重要问题并提出空调系统设计与施工中的解决办法;第 6 章介绍了空调节能方面的相关知识和措施;第 7 章涉及空调系统维护和管理,为维护人员提供参考资料;第 8 章展望了 IDC 机房空调系统的发展趋势,为将来空调系统的发展提供参考方向。书后的附录提供了大量常用的技术参数,同时也收集了一些网址,以期为进一步

学习提供方便。

本书由中国电信上海公司的电源资深专家丁涛担任主编，中国电信上海公司电源空调中心钟志鲲主笔，中国电信上海公司信息产业（集团）有限公司杜秋等提供了大量的宝贵意见和原始资料，还邀请了中国科学院计算技术研究所的唐玛丽和汤钟才两位专家对全书进行了审阅。同时，感谢爱默生网络能源有限公司、中达电通股份公司、上海东智屏有限公司、优力（珠海）电器制造有限公司、上海景龙机房设备有限公司、上海捷联实业发展有限公司等提供的大力支持和帮助。

我们希望本书既能让刚入门的读者看懂学会，也能为经验丰富的专业人士提供可参考的资料。当然，限于篇幅，内容不可能面面俱到，且由于时间仓促，编者水平有限，书中难免有缺点和错误之处，恳请读者批评指正，以利于我们今后修正。如果读者有任何意见或建议，请反馈至编辑邮箱 qingxiaoqin@ptpress.com.cn，以帮助我们不断改进和提高。

作者

2009 年 4 月

目 录

第 1 章 空气的 h-d 图 (焓湿图)	1
1.1 空气的主要物理性质	1
1.1.1 干空气和湿空气的物理性质	1
1.1.2 湿空气的状态参数	2
1.2 湿空气的 h-d 图	10
1.3 h-d 图的应用	12
1.3.1 查找状态点	12
1.3.2 在已知状态点的基础上查找其他参数	13
1.3.3 湿空气的处理过程分析	14
1.3.4 在空调机房中用 h-d 图计算	15
第 2 章 IDC 机房空调系统	17
2.1 空调系统分类与区别	17
2.1.1 空调系统的分类	17
2.1.2 机房专用空调系统和舒适性空调的区别	17
2.2 IDC 机房空调系统的特点	20
2.3 IDC 机房对空调系统的要求	21
2.4 机房负荷计算	24
2.4.1 热量单位的基本换算	24
2.4.2 IDC 机房热负荷的组成	25
2.4.3 IDC 机房建筑结构的热量	25
2.4.4 人体散热、散湿	29
2.4.5 照明和辅助设备散热	29
2.4.6 室外空气进入机房带来的热负荷	30
2.4.7 服务器热负荷	31
2.4.8 国外一些国家计算机房负荷情况	35
2.5 机房精密空调系统冷源的分类	36
2.5.1 风冷型直接膨胀制冷	36
2.5.2 水冷型直接膨胀制冷	37
2.5.3 冷冻水制冷	37
2.5.4 双冷源系统	38

2.5.5	自由制冷(乙二醇冷却制冷)	39
2.6	机房专用精密空调简介	39
2.6.1	风道系统	40
2.6.2	加湿装置	40
2.6.3	制冷系统	41
第3章	常用专用空调品牌简介	46
3.1	力博特(Liebert)专用空调	46
3.1.1	Deluxe System 豪华系列	47
3.1.2	Challenger M+ (挑战者 M+) 系列	48
3.1.3	DataMate3000 系列	48
3.1.4	PEX 系列	50
3.2	阿特拉斯(Atlas)专用空调	52
3.2.1	PEC 系列	52
3.2.2	PeX 系列	54
3.2.3	系统控制参数	57
3.2.4	空调安装方法	58
3.3	海洛斯(HIROSS)专用空调	59
3.4	佳力图(CANATAL)专用空调	62
3.5	斯图斯(Stulz)模块化专用空调	63
3.6	海瑞弗(HiRef)精密空调机组	65
3.7	依米康(EMICON)专用空调	66
3.8	约顿(JOTON)恒温恒湿专用空调	67
3.9	优力(UNIFLAIR)恒温恒湿精密空调	69
3.10	艾苏威尔(Isover)精密空调	71
第4章	IDC 机房的气流组织	73
4.1	机柜功率密度的发展趋势	73
4.1.1	功率密度的概念与定义	73
4.1.2	功率密度的发展趋势	75
4.1.3	空调和电力系统的参数配比	76
4.1.4	合理的参数配比是提高机房经济效益的有效途径之一	76
4.1.5	结合实例分析功率密度的参数特性	77
4.1.6	结论	77
4.2	单个机柜的气流组织	78
4.2.1	空调系统送风方式的分类	78
4.2.2	不同送风方式的差异	78
4.2.3	两种送回风方式差异的理论分析	80
4.2.4	下送风上回风方式下单机柜的不同气流组织形式	83
4.2.5	单机柜气流组织的优化	84
4.2.6	改善机架微环境在应用中的实例解析	86

4.3 机房建筑结构和机架布局对气流组织的影响	89
4.3.1 机房的建筑结构	89
4.3.2 机架布局方式	89
4.3.3 机架的气流组织	90
4.3.4 气流速度	94
4.3.5 静压箱计算	95
4.4 通风风压	95
4.4.1 空气压力单位	95
4.4.2 静压	96
4.4.3 动压	97
4.4.4 全压	97
4.4.5 研究气流特性的新方法——CFD	97
第5章 IDC 机房空调系统设计与施工中的常见问题及解决办法	99
5.1 机房的围护结构	99
5.1.1 建筑围护结构的组成	99
5.1.2 围护结构的热工性能	100
5.2 机房围护结构的严密性问题	102
5.2.1 围护结构热湿传递	102
5.2.2 围护结构对温度精度的影响	103
5.2.3 窗户辐射热问题	104
5.2.4 冷桥问题	105
5.2.5 缝隙漏风问题	106
5.2.6 建筑朝向问题	106
5.3 提高机房的装机容量	106
5.3.1 机房最佳布局的推算	106
5.3.2 排机架数 (A) 与排数 (B) 的最佳比例 (q)	108
5.3.3 最大填充系数 K	109
5.3.4 结论	110
5.4 洁净度问题	110
5.4.1 有害气体问题	110
5.4.2 微生物问题	111
5.4.3 尘埃问题	111
5.4.4 空气过滤器的几个主要指标	112
5.4.5 机房洁净度要求以及过滤器配置	114
5.4.6 过滤器的工作机理	115
5.4.7 IDC 机房中洁净度问题的解决	116
5.5 温度问题	117
5.5.1 冷量与发热量匹配问题	117
5.5.2 风循环问题	118

5.5.3	送风温度	118
5.5.4	风短路问题	119
5.5.5	温度分布不均问题	119
5.6	空调系统的噪声问题	120
5.6.1	声音的基本知识	120
5.6.2	噪声的测量和评价	122
5.6.3	噪声的危害	122
5.6.4	国家对噪声控制的标准	122
5.6.5	空调噪声问题	123
5.7	空调系统的阻力问题	130
5.7.1	风循环系统的组成	130
5.7.2	风循环阻力的关键点和解决方法	131
第 6 章	空调系统的节能	133
6.1	空调系统节能的基本方法	133
6.1.1	减少设备发热量	133
6.1.2	合理控制室内温度参数	134
6.1.3	提高建筑物围护结构热工性能	135
6.1.4	利用自然冷源	136
6.1.5	从排风中回收热量	137
6.1.6	通过技术改造提高空调性能	137
6.1.7	加强日常管理	137
6.2	空调系统节能技术及应用	138
6.2.1	机房空调温度自动变设定节能技术及应用	138
6.2.2	专用空调节能新技术——极化冷冻油添加剂	143
6.2.3	超级计算中心空调综合节能效果	145
6.2.4	某 IDC 机房新风节能方案	146
6.2.5	机房专用空调室外机雾化喷淋节能系统	151
第 7 章	空调系统的维护管理	155
7.1	机房空调的日常维护	155
7.1.1	月度维护项目	155
7.1.2	半年度维护项目	159
7.1.3	常见告警处理	161
7.1.4	空调性能测试	163
7.2	空调机的备份和机群工作规律	167
7.2.1	空调备机问题	167
7.2.2	空调机群工作规律	167
7.3	空调机维修问题	169
7.3.1	风道系统故障	170
7.3.2	高压故障	171

7.3.3 低压故障	172
7.3.4 压缩机超载	173
7.3.5 加湿系统故障	173
7.3.6 氟里昂循环管路故障	174
7.3.7 主电路及控制电路故障	175
7.3.8 氟里昂替代问题	175
第 8 章 IDC 机房空调系统有待解决的问题	180
8.1 机房发热量的极限问题	180
8.2 机房环境的标准和可靠性问题	181
8.3 冷却方式问题	181
8.4 气流组织问题的突破	182
8.4.1 机房气流的组织	182
8.4.2 机架气流的组织	182
8.4.3 设备内的气流组织	183
8.5 集中还是分散(水冷还是风冷)	183
8.6 机架标准化问题	184
8.7 节能措施的利用	184
附录 A 常用制冷剂特性	186
附录 B 常用制冷剂特性	187
附录 C R22 工质饱和状态热力特性	189
附录 D R407C 工质饱和状态热力特性	192
附录 E 压缩机的工作特性	194
附录 F 相关技术标准	196
附录 G 部分相关网站	198
参考文献	201

第 1 章

空气的 h-d 图（焓湿图）

机房环境，除建筑结构、机房布局等固定的物理因素外，最主要的就是空气环境。由于空气的物理性质比较复杂，因此将空气的温度、湿度、洁净度、气流速度控制在合理的范围内，满足机房设备对环境的要求，是空调的主要任务。

要很好地解决机房空调环境问题，就必须对空气的物理特性有所了解。本章就空气的物理性质，特别是湿空气的物理性质、湿空气的 h-d 图、湿空气的处理过程进行介绍，为读者深入学习 IDC 机房空调打下理论基础。

1.1 空气的主要物理性质

1.1.1 干空气和湿空气的物理性质

自然状态下的空气是一种无色无臭无味的混合气体，组成部分相对稳定。干空气是不含水分的空气，由多种气体混合而成，且各组成部分之间的比例在地球的任何地区几乎是恒定不变的。表 1-1 给出了干空气的正常组成。

表 1-1 干空气的组成

成 分	氮气 (N ₂)	氧气 (O ₂)	氩气 (Ar)	二氧化碳 (CO ₂)	其 他 气 体
体 积 (%)	78.09	20.95	0.93	0.03	0.078
重 量 (%)	75.53	23.14	1.28	0.05	0.075

由于自然界广泛存在水，水蒸发后变为蒸气，混合在空气中即形成湿空气。除非经特殊处理，一般情况下我们周围的空气均为湿空气。湿空气的物理性质相对稳定，遵循理想气体的变化规律。表 1-2 给出了标准大气压下干空气的物理性质。

表 1-2 干空气的物理性质（标准大气压下）

温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	比热 c [kJ/(kg·°C)]	导热系数 $\lambda \times 10^2$ [W/(m·°C)]	粘度 $\mu \times 10^5$ (Pa·s)	普兰德数 Pr
-50	1.584	1.013	2.035	1.46	0.728
-40	1.515	1.013	2.117	1.52	0.728
-30	1.453	1.013	2.198	1.57	0.723
-20	1.395	1.009	2.279	1.62	0.716
-10	1.342	1.009	2.36	1.67	0.712

续表

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	比热 c [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$]	导热系数 $\lambda \times 10^2$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$]	粘度 $\mu \times 10^5$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	普兰德数 Pr
0	1.293	1.009	2.442	1.72	0.707
10	1.247	1.009	2.512	1.77	0.705
20	1.205	1.013	2.593	1.81	0.703
30	1.165	1.013	2.675	1.86	0.701
40	1.128	1.013	2.756	1.91	0.699
50	1.093	1.017	2.826	1.96	0.698
60	1.06	1.017	2.896	2.01	0.696
70	1.029	1.017	2.966	2.06	0.694
80	1.000	1.022	3.047	2.11	0.692
90	0.972	1.022	3.128	2.15	0.69
100	0.946	1.022	3.21	2.19	0.688
120	0.898	1.026	3.338	2.29	0.686
140	0.854	1.026	3.489	2.37	0.684
160	0.815	1.026	3.64	2.45	0.682
180	0.779	1.034	3.78	2.53	0.681
200	0.746	1.034	3.931	2.6	0.68
250	0.674	1.043	4.268	2.74	0.677
300	0.615	1.047	4.605	2.97	0.674
350	0.566	1.055	4.908	3.14	0.676
400	0.524	1.068	5.21	3.31	0.678
500	0.456	1.072	5.745	3.62	0.687
600	0.404	1.089	6.222	3.91	0.699
700	0.362	1.102	6.711	4.18	0.706
800	0.329	1.114	7.176	4.43	0.713
900	0.301	1.127	7.63	4.67	0.717
1 000	0.277	1.139	8.071	4.9	0.719
1 100	0.257	1.152	8.502	5.12	0.722
1 200	0.239	1.164	9.153	5.35	0.724

注：空调一般使用 $-30^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 范围内的空气，机房内环境温度一般为 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.2 湿空气的状态参数

湿空气有很多物理状态，要描述这些不同的状态就需要了解它的参数。主要的状态参数有大气压力 B 、温度 t 、相对湿度 φ 、含湿量 d 、焓 h 等。

1. 压力

气体的压力是由于气体分子的热运动产生的。分子数量多，热运动剧烈，对于外部的累积冲撞力就强，压力就大；反之就小。在这里我们用 B 来表示湿空气的压力，单位为帕斯卡，

记作 Pa。由于帕斯卡 (Pa) 是很小的单位, 所以我们也常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 作为压力单位。

$$1\text{Mpa} = 1\,000\text{kPa} = 1\,000\,000\text{Pa}$$

大气层会对地面产生一定的压力, 物理学中规定以北纬 45° 海平面的平均气压 (101 325Pa) 作为 1 个标准大气压。由于纬度的不同、地势的高低等因素影响, 我国各地的大气压都不相同, 西藏的高海拔地区气压最低, 拉萨的年平均大气压为 489.1mmHg (毫米汞柱) 即 65kPa。

气压是可测量的, 用压力表可以得到数值。但由于测量压力的仪表本身也处于大气压力之下, 所以其指示的压力并非真实压力, 而是与周围大气压力的差, 称为“表压力”。压力大于周围大气压力的称为“正压”, 压力小于周围大气压力的称为“负压”或“真空度”。

根据道尔顿分压定律, 混合气体的总气压等于各种成分的分气压之和。因此湿空气的气压就分解成为干空气的压力和水蒸气的压力, 表示如下:

$$B = P_g + P_q \quad (\text{Pa}) \quad (1-1)$$

式中 B ——湿空气的压力;

P_g ——干空气的分压力;

P_q ——水蒸气分压力。

一定状态下的干空气, 其容纳水蒸气的能力是有限的, 空气中容纳水蒸气达到极限时, 即达到饱和, 此时的湿空气就是饱和湿空气。

$$B_b = P_g + P_{q,b} \quad (\text{Pa}) \quad (1-2)$$

式中 P_g ——干空气的分压力;

B_b ——饱和湿空气的压力;

$P_{q,b}$ ——饱和水蒸气分压力。

【要点】

- 水蒸气分压力的大小直接反映了水蒸气含量的多少。
- 在一定温度下, 空气中的水蒸气含量越多, 空气就越潮湿, 水蒸气分压力也越大。
- 湿空气中的水蒸气含量达到最大限度时, 多余的水蒸气就会凝结成水从空气中析出。
- 饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 是温度的单值函数, 也即 $P_{q,b}$ 值仅取决于温度, 温度越高, $P_{q,b}$ 值越大。

2. 温度

温度表示物体的冷热程度。根据分子运动学说, 温度是物质分子平均动能的量度。温度高, 分子运动快; 温度低, 分子运动减慢。如果分子运动完全停止, 这时的温度就是“绝对零度”, 目前人类还无法达到这个目标。

温度的高低是相对的, 要准确地测量温度, 就需要使用温标。目前国际上常用的温标有 3 种, 即热力学温标、摄氏温标和华氏温标。由于它们所取的基准点和分度线大小不同, 所以对同一温度, 表示的数值是不同的。在使用中我们可以根据需要进行转换。

(1) 热力学温标

热力学温标也称绝对温标, 用 T 表示。国际计量大会规定, 以标准大气压下, 水的三相点 (固、液、汽共存平衡点) 作为基准点, 是热力学温度 273.15, 单位符号为 K, 读作开尔

文。分度线为水的三相点的 $1/273.15$ ，记为 1K 。热力学温标没有负值，其最小值为 0K ，即“绝对零度”。

(2) 摄氏温标

摄氏温标是我们最常用的温标，用 t 表示。标准大气压下，纯水的冰点为 0 ，纯水的沸点为 100 ，两个基准点间分 100 格，每 1 格记 1°C ，读作摄氏度。摄氏温标的 1°C 与热力学温标的 1K 相等。因此有下面的换算公式：

$$T = t + 273.15 \quad (\text{K}) \quad (1-3)$$

(3) 华氏温标

华氏温标一般在英美等国家常用，用 F 表示。标准大气压下，纯水的冰点为 32 ，纯水的沸点为 212 ，两个基准点间分 180 格，每 1 格记 1°F ，读作华氏度。由于冰点和沸点间分度线间距不同，摄氏温标为 100 格，华氏温标为 180 格，很显然 1°C 对应 1.8°F 。换算公式如下：

$$t = \frac{5}{9} \times (F - 32) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1-4)$$

$$\text{或 } F = \frac{9}{5} \times t + 32 \quad (^\circ\text{F}) \quad (1-5)$$

(4) 空气的干球温度和湿球温度

干球温度：在空气流中放置一支普通温度计，所测得空气的温度为 t ，此温度称为空气的干球温度，是空气的实际温度。

湿球温度：用水润湿纱布包裹温度计的感湿球，即成为湿球温度计。将它置于一定温度和湿度的流动的空气中，达到稳态时所测得的温度称为空气的湿球温度，以 t_s 表示。

如图 1-1 所示为干湿球温度计的测量原理，如图 1-2 所示为干湿球温度计的外观。

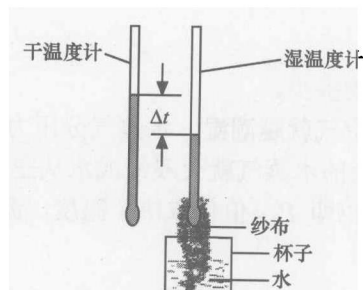


图 1-1 干湿球温度计的测量原理

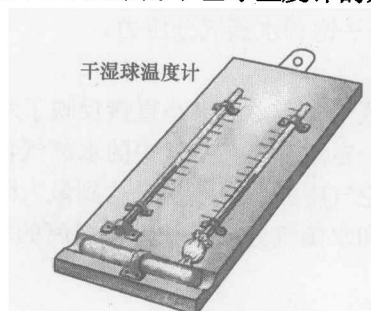


图 1-2 干湿球温度计的外观

当不饱和（可以继续容纳水蒸气）空气流过湿球表面时，由于湿纱布表面的水蒸气压力大于空气中的水蒸气分压，因此在湿纱布表面和气体之间存在着湿度差。这一湿度差使湿纱布表面的水分汽化被气流带走，水分汽化使其降温，于是在湿纱布表面与气流之间又形成了温度差，这一温度差将引起空气向湿纱布传递热量。当单位时间由空气向湿纱布传递的热量恰好等于单位时间自湿纱布表面汽化水分所需的热量时，湿纱布表面就达到一稳态温度，即湿球温度。

根据干球温度和湿球温度，再通过查表或计算可得到空气的相对湿度。

【要点】

- 热力学温标对于我们并不常用。目前空调设备一般使用摄氏温标，部分进口设备仍

使用华氏温标。因此我们掌握摄氏温标与华氏温标的换算比较重要。

- 在测量湿球温度时, 空气速度一般需大于 3m/s, 使对流传热起主要作用, 尽量减少热辐射和传导的影响, 使测量较为精确。

- 湿球温度 t_s 为湿空气温度 t 和含湿量的函数, t_s 与 t 的差越大, 该湿空气的湿度越小, 可加湿的量越大; 湿球温度 t_s 越接近湿空气温度 t , 湿度越大, 可加湿的量越小; 当空气达到饱和湿度时, $t_s = t$, 此时无法加湿。

3. 湿空气的密度 ρ 和比体积 ν

空气具有一定的质量, 常用密度来表示这一特性。湿空气的密度是单位体积的湿空气的质量, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。由于湿空气是干空气和水蒸气的混合气体, 所以等于干空气的密度与水蒸气的密度之和, 即:

$$\rho = \rho_g + \rho_q = \frac{P_g}{R_g T} + \frac{P_q}{R_q T} = 0.003484 \times \frac{B}{T} - 0.00134 \times \frac{P_q}{T} \quad (1-6)$$

式中 ρ_g ——干空气的密度;

ρ_q ——所含水蒸气的密度;

P_g ——干空气分压力;

P_q ——水蒸气分压力;

R_q ——水蒸气的气体常数;

T ——该湿空气热力学温度;

R_g ——干空气的气体常数;

B ——该湿空气的压力;

ρ ——湿空气的密度。

比体积是单位质量的气体所占有的体积, 密度的倒数就是比体积, 用 ν 表示, 单位为 m^3/kg 。

【要点】

- 湿空气的密度取决于 P_q 值的大小, 它随水蒸气分压力 P_q 的升高而降低。在湿空气总压力 B 恒定、温度 T 恒定时, 水蒸气分压力 P_q 越大, 水蒸气所占的比例就越大, 由于水蒸气的密度小于干空气, 所以湿空气比干空气轻。

- 空气越潮湿, 水蒸气含量越大, 则空气密度越小, 大气压力 B 也越低。阴雨天气大气压力 B 比晴天低。

- 温度 t 越高, 则空气密度越小, 大气压力 B 也越低, 因此同一地区夏天比冬天的大气压力 B 低。

4. 湿度

空气的湿度问题很复杂, 一般有两种表达方法: 含湿量 d 和相对湿度 φ 。

(1) 含湿量 d

空气的含湿量 d 是指, 在湿空气中, 与 1kg 干空气同时并存的水蒸气量。即:

$$d = \frac{G_q}{G_g} \quad (1-7)$$

式中 G_q ——湿空气中水蒸气的质量 (g);
 G_g ——湿空气中干空气的质量 (kg)。

空气的含湿量又与湿空气的总气压和水蒸气的分压力有关, 其公式为:

$$d = 0.622 \times \frac{P_q}{B - P_q} \quad (1-8)$$

式中 P_q ——水蒸气分压 (Pa);
 B ——湿空气总压 (Pa)。

在温度恒定的情况下, 空气容纳水蒸气的能力是有限的, 单位质量湿空气中水蒸气量已达到最大限度, 不再有吸湿能力, 即不能再接纳水汽, 这时的湿空气达到饱和, 称为饱和湿空气。达到饱和状态时的含湿量称为饱和含湿量 d_b 。饱和空气的含湿量 d_b 与 B 和 t 有关。

(2) 相对湿度 φ

湿空气中水蒸气分压力 P_q 和同温度下饱和水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 之比即为相对湿度。为方便计算, 有时可以用近似值, 取容积含湿量和饱和容积含湿量的比值, 近似计算的误差只有 1%~3%。

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}} \times 100\% \approx \frac{d'}{d_b'} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 P_q ——水蒸气分压 (Pa);
 $P_{q,b}$ ——饱和水蒸气分压力 (Pa);
 d' ——湿空气的容积含湿量 (g/m^3);
 d_b' ——湿空气的饱和容积含湿量 (g/m^3)。

根据对 IDC 机房的有关规定, A 类和 B 类机房的相对湿度都为 45%~55%。过于干燥容易产生静电, 危及精密电子设备的正常使用; 过于湿润则容易结露而凝结成水滴, 水滴不仅会腐蚀元件而且对系统稳定性带来不良影响, 还会在带电体之间与灰尘结合, 形成导电的电桥, 使绝缘程度下降。

【要点】

- 当大气压力 B 一定时, 水蒸气分压力 P_q 只取决于含湿量 d 。含湿量 d 随水蒸气分压力 P_q 的升高增大, 反之亦然。
- 含湿量 d 能确切反映空气中含的水蒸气量的多少, 但不能反映空气的吸湿能力, 不能表示湿空气接近饱和的程度。
- 相对湿度 φ 能反映湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度, 但不能表示水蒸气的含量。
- φ 值小, 表示空气离饱和程度远, 空气较为干燥, 吸收水蒸气能力强; φ 值大, 表示空气更接近饱和程度, 空气较为潮湿, 吸收水蒸气能力弱。

5. 湿空气的露点 t_l

在含湿量 d 不变的条件下, 湿空气达到饱和时的温度称为露点温度 t_l 。 t_l 与湿空气的总压力 B 相关, 也取决于空气的含湿量 d 。当总压力 B 不变含湿量 d 也不变时, t_l 为定值。对于露点温度, 我们可以通过计算得到, 也可以通过查图表得到, 表 1-3 和表 1-4 分别为机房常

用的几个空气状态的露点数据。

表 1-3 机房中常见的空气状态参数 (1 个标准大气压下)

干球温度 ($^{\circ}\text{C}$)	相对湿度 (%)	绝对湿度 (g/m^3)	露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)
22	50	9.83	11.25
24	35	7.76	7.81
24	45	10.01	11.64
24	50	11.11	13.20
25	50	11.73	14.06
26	50	12.39	15.00
27	50	13.07	15.94

表 1-4 标准大气压力下露点—水分含量关系速查表

露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
水分含量	83.06	65.50	51.19	39.63	30.38	23.05	17.30	12.83	9.319	6.797
露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	49	44	39	34	29	24	19	14	9	4
水分含量	79.26	62.39	48.67	37.61	28.78	21.78	16.31	12.07	8.819	6.360
露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3
水分含量	75.61	59.41	46.26	35.68	27.24	20.58	15.37	11.35	8.270	5.947
露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	47	42	37	32	27	22	17	12	7	2
水分含量	72.10	56.56	43.96	33.83	25.78	19.43	14.48	10.66	7.750	5.559
露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	46	41	36	31	26	21	16	11	6	1
水分含量	68.73	53.82	41.75	32.07	24.38	18.34	13.63	10.01	7.260	5.192

注：水分含量是指在一定的露点温度下，水蒸气（单位为 g ）与干空气（单位为 kg ）的比值。

在通信机房中，由于专用空调的风量大，而且结构设计上蒸发盘管面积大，因而能实现高显热比。机房专用空调的送风温度一般为 $13^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。在温度为 $22^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 45% 的环境下，如果此时也没有外部湿量入侵，则机房专用空调基本很少开启除湿功能，因此除湿量很小，显热比很高，在 95% 以上。

【要点】

- 湿空气的露点温度 t_l 是判断空气是否会结露的依据。
- 湿空气在接触低于露点温度的物体表面时，接触表面上的空气层被冷却到露点温度，湿空气的相对湿度达到 100%，如温度继续下降，将有凝结水析出。

6. 比热容 c

单位质量的物体，温度升高或降低 1K 所吸收或放出的热量，称为物质的质量比热容，其单位是 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。在标准大气压下，水的比热容为 $4.1868\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，空气的比热容为 $1.005\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。严格意义上讲，任何物质的比热容都不是恒定的，在温度变化时它也会有变化，但变化不大，因此可以将物质的比热容认为是定值。

7. 湿空气的焓 h

焓在热力工程中是一个重要而且常用的状态参数，用于热力过程计算非常方便。焓是一个复合状态参数，对于湿空气，它指每 1kg 干空气中的焓 (h_g) 和 $d\text{kg}$ 水蒸气中的焓 (h_q)