

专业指导委员会推荐教材  
高校建筑环境与设备工程



普通高等教育土建学科专业  
“十五”规划教材

PUTONG  
GAODENG  
JIAOYU  
TU JIAN XUEKE  
ZHUANYE  
SHIWU  
GUIHUA  
JIAOCAI

# 暖通空调工程 设计方法与 系统分析

杨昌智 刘光大 李念平 编  
朱颖心 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会推荐教材

# 暖通空调工程设计方法 与系统分析

杨昌智 刘光大 李念平 编  
朱颖心 主审

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

暖通空调工程设计方法与系统分析/杨昌智等编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

高校建筑环境与设备工程专业指导委员会推荐教材

ISBN 7-112-06160-1

I. 暖… II. 杨… III. ①采暖设备—建筑设计—分析—高等学校—教材②通风设备—建筑设计—分析—高等学校—教材③空气调节设备—建筑设计—分析—高等学校—教材 IV. TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 004204 号

本书主要内容包括: 热湿环境, 暖通空调工程设计程序及内容, 室内外计算气象参数, 空调系统设计方法, 供热与通风除尘系统设计方法, 暖通空调系统冷、热源, 工业厂房空调系统设计概要, 主要公共建筑空调系统设计要点, 高层民用建筑防排烟设计, 暖通空调系统的节能设计与测控设计, 工程问题反馈信息分析, 设计实例等。

本书是高校建筑环境与设备工程专业指导委员会推荐的教材, 也可供相关专业设计人员参考。

\* \* \*  
责任编辑: 齐庆梅 姚荣华

责任设计: 孙 梅

责任校对: 王雪竹 张 虹

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会推荐教材

### 暖通空调工程设计方法与系统分析

杨昌智 刘光大 李念平 编

朱颖心 主审

\*  
中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市安泰印刷厂印刷

\*  
开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{1}{4}$  字数: 300 千字

2005 年 2 月第一版 2005 年 2 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-112-06160-1

TU·5427 (12173)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## 前 言

随着社会的进步、科技的发展,暖通空调的应用越来越广泛,暖通空调系统的构造日趋复杂,人们对暖通空调系统及工程设计的要求也越来越高。暖通空调工程设计是一项复杂的工作,它不仅要求设计人员掌握本专业的理论知识和具备一定的实践经验,同时还要求设计人员掌握本专业工程设计的方法、程序和相关的法规、标准。为了使广大设计人员搞好本专业的工程设计,许多优秀的暖通专家、工程技术人员作出了不懈的努力,编写出版了大量相关的设计手册、指南、措施等,有力地推动了整体设计水平的提高。对于普通高校本专业的学生以及从事暖通空调工程设计的新手,一方面从这些书籍中学到了丰富的实际设计经验,获得了大量理论教学中无法学到的知识,但另一方面也感到这些设计手册、设计指南、设计措施等都非常具体,很难在短时间内从整体上把握本专业工程设计的共性,如暖通空调工程设计一般的程序、方法、内容和深度等。为了使本专业的学生及从事本专业设计的新手在短时间内掌握本专业工程设计的程序、方法,了解设计中需要遵守的相关法规,把握设计所需资料的查取途径、方法等,为了配合普通高校本专业的教学需要,我们编写了这本书,以期使她成为理论教学 and 实际工程设计之间的桥梁。同时,为了使广大学生和新手不仅能从中学到具体的设计方法、设计步骤,而且能够以系统的观点实现真正的过程设计和节能舒适设计,并使设计的系统能实现节能运行,在这本书中我们还编入了室内热湿环境、暖通空调系统的节能设计与节能运行、工程问题反馈信息分析等方面的内容。

本书的编写得到了全国第三届建筑环境与设备专业教学指导委员会全体委员的支持,许多委员还提出了宝贵的意见,其中清华大学的彦启森教授对本书的编写给予了很大的支持和关心。朱颖心教授提出了许多非常具体中肯的修改意见和建议,并担任本教材的主审。机械工业第六设计研究院张家平教授等委员提出了许多难得的建议,在此,向他们表示感谢。特别是中国建筑工业出版社姚荣华副编审,本书从出版计划的提出、出版到重新修订、充实都得到了她的大力支持和热忱帮助,在这里向她致以诚挚的谢意;中国建筑工业出版社的齐庆梅编辑对本书的编辑出版付出了大量的劳动,向她表示感谢。本书在编写过程中听取了許多同行及兄弟院校专业任课教师的意见,使本书几经修改,日趋成熟,向他们表示感谢;此外,长沙有色冶金规划设计院的欧阳炎高级工程师在本书的编写过程中提供了许多设计素材,并作了部分文字、图片的录入工作,湖南大学硕士研究生叶国栋、文伟、刘成林、朱赤辉、马卫武、吴晓燕、李文菁、戴晓丽等为本书的部分文字录入、插图绘制及校对作了许多工作,在此一并向他们致谢。

由于时间仓促,编者的水平也有限,书中还存在许多不尽人意之处,欢迎广大专家、任课老师、同行不吝赐教,批评指正,以便不断改进。

# 目 录

<b>第一章 热、湿环境</b> .....	1
第一节 热、湿环境的构成及对人体的作用 .....	1
第二节 热、湿环境的评价方法与评价指标 .....	2
第三节 热、湿环境基本参数的测量 .....	4
第四节 暖通空调系统与热湿环境 .....	9
<b>第二章 暖通空调工程设计程序及内容</b> .....	11
第一节 暖通空调工程设计程序 .....	11
第二节 设计规范和设计依据 .....	11
第三节 设计文件编制深度 .....	12
<b>第三章 室内外设计计算参数</b> .....	17
第一节 暖通空调工程室内外设计计算参数简介 .....	17
第二节 室内外设计计算参数的获取 .....	17
第三节 设计计算参数对暖通空调系统的影响 .....	18
<b>第四章 空调系统设计方法</b> .....	20
第一节 工况设计与过程设计 .....	20
第二节 空调冷、热负荷计算 .....	22
第三节 空调系统设计方法步骤 .....	29
第四节 空调系统方案选择与设计 .....	29
<b>第五章 采暖与通风除尘系统设计方法</b> .....	64
第一节 采暖系统设计方法 .....	64
第二节 通风除尘系统设计方法 .....	76
<b>第六章 暖通空调系统冷、热源</b> .....	80
第一节 空调冷源设备 .....	80
第二节 暖通空调热源设备 .....	97
第三节 热交换设备 .....	103
第四节 蓄热(冷)空调系统 .....	104
<b>第七章 工业厂房空调系统设计概要</b> .....	123
第一节 工业厂房空调过程分析.....	123
第二节 空气洁净厂房空调系统设计 .....	126
<b>第八章 主要公共建筑的空调设计要点</b> .....	134
第一节 旅馆建筑空调系统设计要点 .....	134
第二节 百货商场空调系统设计要点 .....	138
第三节 影剧院建筑空调系统设计要点 .....	140

第四节	体育建筑空调系统设计要点	141
<b>第九章</b>	<b>高层民用建筑防、排烟设计</b>	<b>145</b>
第一节	防、排烟设计任务与特点	145
第二节	防、排烟设计的有关建筑基本知识	145
第三节	自然排烟	147
第四节	机械防烟	149
第五节	机械排烟	152
第六节	地下汽车库的排烟设计	158
第七节	防、排烟设备及部件	158
<b>第十章</b>	<b>暖通空调系统的节能设计与测控设计</b>	<b>162</b>
第一节	影响暖通空调系统能耗的因素	162
第二节	暖通空调系统的节能设计	163
第三节	暖通空调系统的测控设计	166
<b>第十一章</b>	<b>工程问题反馈信息分析</b>	<b>173</b>
<b>第十二章</b>	<b>工程设计实例</b>	<b>180</b>

# 第一章 热、湿环境

我们人体处于热、湿环境中，热、湿环境直接影响人的生理、心理过程，不同的热湿环境对人体的作用是不同的。显然，要想创造一个适合于人体生理需要的热湿环境，首先必须了解热湿环境与人体的相互作用规律、评价方法以及热湿环境与暖通空调系统的关系。

## 第一节 热、湿环境的构成及对人体的作用

在我们所处的标准大气压下的空气环境中，可以说空气的温度、相对湿度、流速以及环境的平均辐射温度构成了影响我们人体所处的热、湿环境。人体与环境之间的相互作用过程实际上就是人体与环境之间的热湿交换过程，影响这一过程的因素除上述环境参数外，还取决于人体的新陈代谢率和着衣热阻。这六大因素共同影响着人体与环境之间的热湿交换。

人体与环境之间的热湿交换是通过对流热交换 ( $C$ )、辐射热交换 ( $R$ )、皮肤表面蒸发放热 ( $E_{sk}$ )、呼吸对流热交换 ( $C_{res}$ ) 和呼吸蒸发放热 ( $E_{res}$ ) 等进行的 (图 1-1)。如果用  $M$  表示人体的代谢产热量， $W$  表示人体对外所作的功， $S$  表示人体储热量，则有如下关系式：

$$M = C + R + E_{sk} + C_{res} + E_{res} + W + S \quad (1-1)$$

式中， $S$  是人体体温上升或下降所引起的储热或失热。我们知道，人体的正常体温是  $36.5 \sim 37^\circ\text{C}$ 。当人体得到的热比通过各种途径散发的热要大时，体温将升高，人体感觉热。人体为了维持正常体温将自动对体温进行调节，如出汗，依靠汗的蒸发带走多余的热量，如果大量出汗还平衡不了，体温将继续升高，此时  $S$  为正。反之，当人体总的失热大于代谢热时，人体感觉冷，人体将减少流向皮肤层的血液量使表皮温度降低，以减少散热量保持热平衡，若还平衡不了，身体肌肉就会紧张甚至寒颤发热，以抵消多的散热维持体温平衡，当还平衡不了，体温会开始下降， $S$  就会为负值。在一定范围内，人体的体温调节机构有一定的自我调节能力。人体维持正常体温时， $S = 0$ ，消耗在体温调节上的能量最小时，此时人体对热湿环境的感受处于中立状态 (不冷不热)，当人体用于调节体温的能量越大，即热湿环境偏离中立状态越远，人体感觉会越不舒适。

但在另一方面，中立状态的热湿环境不一定就满足人们的需要。例如，当人们从事难度较大的工作时，中立状态的热湿环境对提高工作效率是有利的，而当从事简单的、非常容易的工作时，中立状态的热湿环境反而会降低工作效率，反而需要热湿环境在一定范围内有一点波动。



图 1-1 人体与环境的热交换

上述各影响因素对人体的作用是紧密相关的。如在一定的气温下，相对湿度越大，人体通过蒸发的散热量就越少，越容易感到闷热，反之通过蒸发的散热量越大，人体就会感到凉爽；而在一定的相对湿度下，气温越高通过对流的散热量越少，人体感觉热，反之人体感觉冷。而当气温高一点湿度低一点的热环境和气温低一点湿度高一点热环境可以对人体有相同的热作用效果，这一点在现实中我们都不乏体会。显然，组成热环境的各影响因素的不同组合，热环境对人体可以有不同的作用效果，但也可以有相同的作用效果。从暖通空调的角度来看，不同的组合暖通空调系统的能耗一般是不同的。因此，采用什么样的暖通空调方式、参数组合才能使人体更舒适、暖通空调系统更易于实现、更节能是热湿环境在暖通空调领域的应用研究主要的课题之一。

## 第二节 热、湿环境的评价方法与评价指标

要创造和保持一个舒适的热湿环境，首先就要掌握热湿环境的评价方法。如前所述，影响热湿环境的各因素的不同组合可以得到相同效应的热湿环境。那么如何衡量这些因素对人体的共同作用效果，人体在这个环境中的冷热感觉如何，如何定量地表示，这就是热湿环境评价所要解决的问题。

评价热湿环境就是将影响热湿环境的各要素和人体生理学结合人的主观感觉构造一个评价指标，这个指标反映人体对热湿环境的真实感受。如图 1-2 所示：

热舒适环境的评价指标有多个，常用的有作用温度  $OT$ ，预测平均冷热感  $PMV$ ，新标准有效温度  $SET^*$  等，这里我们简单介绍  $PMV$  和  $SET^*$ 。

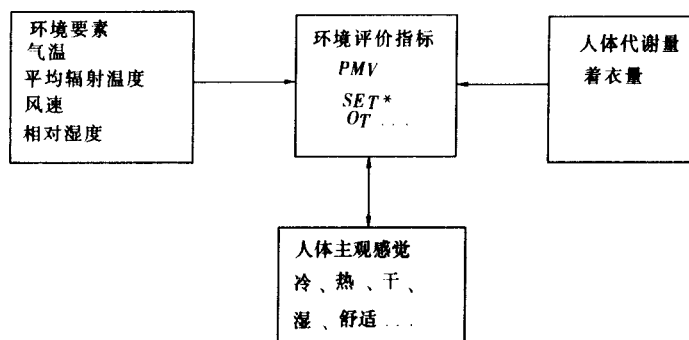


图 1-2 评价指标与环境及人体的关系

### 一、预测平均冷热感 $PMV$ (Predicted Mean Vote)

$PMV$  指标是丹麦的 Fanger 教授提出的。它将人体对冷热的感觉分成七段，如表 1-1 所示。

$PMV$  和冷热感的程度对应

表 1-1

$PMV$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
冷热感	非常冷	冷	有点冷	不冷不热	有点热	热	非常热
不满足率	99%	75%	25%	5%	25%	75%	99%



PMV 与人体的代谢量  $M$  和人体的蓄热量  $S$  的关系是:

$$PMV = f(M) \cdot S \quad (1-2)$$

式中,

$$S = M - (C + R + E) - (C_{res} + E_{res}) \quad (1-3)$$

在出汗和蓄热不明显的场合, 上式中的各换热量可以按下列各式。

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1-4)$$

$$R = 3.96 \times 10^{(-8)} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273.15)^4 - (t_r + 273.15)^4] \quad (1-5)$$

$$E = 3.05 \times (5.73 - 0.007M - p_a) + 0.42(M - 58.15) \quad (1-6)$$

$$C_{res} = 0.0014M(34 - t_a) \quad (1-7)$$

$$E_{res} = 0.0173M(5.87 - p_a \cdot M) \quad (1-8)$$

$$t_{cl} = t_{sk} - 0.155I(C + R) \quad (1-9)$$

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275M \quad (1-10)$$

式中  $S, M, C, R, E$  ——分别为单位人体表面积蓄热、新陈代谢热、与环境的对流、辐射换热及通过皮肤的蒸发散热量,  $W/m^2$ ;

$C_{res}, E_{res}$  ——分别为单位人体表面积的通过呼吸的对流散热和蒸发散热量,  $W/m^2$ ;

$t_{cl}, t_{sk}$  ——分别为衣服外表面温度和皮肤温度,  $^{\circ}C$ ;

$t_r, t_a$  ——分别为平均辐射温度和空气温度,  $^{\circ}C$ ;

$p_a$  ——水蒸气的压力, Pa。

平均辐射温度  $t_r$  可以根据定义计算得到, 但在实际应用中通常采用实测得到的空气温度  $t_a$  ( $^{\circ}C$ ), 风速  $v$  (m/s), 黑球温度  $t_g$  ( $^{\circ}C$ ) 用下式计算得到:

$$(t_r + 273.15)^4 = (t_g + 273.15)^4 + 2.47 \times 10^3 \sqrt{v} \cdot (t_g - t_a) \quad (1-11)$$

当气温  $t_a$  和黑球温度  $t_g$  之差小于  $2 \sim 3^{\circ}C$ , 风速为  $v$  时, 平均辐射温度  $t_r$  的计算可以简化如下:

$$t_r = t_g + 2.37 \sqrt{v} \cdot (t_g - t_a) \quad (1-11')$$

在(1-2)式中的  $f(M)$  与代谢量的关系如下:

$$f(M) = 0.303 \exp(-0.036M) + 0.028 \quad (1-12)$$

Fanger 教授通过实验得到了被实验者对温冷感的不满足率  $PPD$  与  $PMV$  的关系式如下:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.003353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (1-13)$$

从上式可以看出, 即使  $PMV$  为 0, 平均也会有 5% 的人不满足, 这说明了人体对冷热感觉存在个体差异。

在 ISO 7730 中,  $PMV$  作为标准的热环境指标被采用, 并将  $PMV = \pm 0.5$  ( $PPD = 10\%$ ) 作为舒适域。值得注意的是, 在上述表示各热量的计算式中, 基本上是在人体舒适或接近舒适的情况下导出的。特别是, 皮肤平均温度  $t_{sk}$  只考虑了人体的代谢热  $M$ , 而没有考虑其他环境条件和着衣的影响; 蒸发热  $E$  没有考虑气温、辐射、风速和着衣的影响。显然, 当偏离舒适状态,  $PMV$  值较大时, 将与实际偏差较大。所以, 运用  $PMV$  进行评价应控制在  $PMV$  不超出  $\pm 2$  ( $PPD = 75\%$ ), 最好是在  $PMV = \pm 0.5$  ( $PPD = 10\%$ ) 范围内使用。

## 二、新标准有效温度 $SET^*$ (Standard Effective Temperature)

新标准有效温度就是冷热感觉及人体与环境的热交换量与实际环境等同的相对湿度为 50% 的标准环境的气温。它是由 Gagge 提出的, 并作为标准的体感温度被 ASHRAE 采用。这里的标准环境是指相对湿度为  $r_{hs} = 50\%$ 、风速为  $v_s = 0.1\text{m/s}$ 、人体代谢量  $M_s = 1.0\text{met}$ 、衣着热阻,  $I_{cl,s} = 0.6\text{clo}$  的环境。 $SET^*$  以实际气温  $t_a$ 、平均辐射温度  $t_r$ 、风速  $v$ 、相对湿度  $r_h$ 、代谢量  $M$ 、实际衣着热阻  $I_{cl}$  为输入值, 用 Gagge 提出的人体二节点生理模型算出人体的平均皮肤温度  $t_{sk}$  和汗湿面积率  $\omega$ 、结合热工学计算出通过皮肤面的换热量  $M_{sk}$ , 在实际环境和标准环境等冷热感觉的条件下, 即:

$$\begin{cases} t_{sk,s} = t_{sk} \\ \omega_s = \omega \end{cases} \quad (1-14)$$

以及实际环境和标准环境人体换热量相等的条件下, 即:

$$M_{sk,s} = M_{sk} \quad (1-15)$$

算出  $SET^*$ 。

由于在计算  $SET^*$  的过程中, 全部考虑了热环境的六大要素, 因而可以说  $SET^*$  比  $PMV$  具有更加广泛的适用性。通过试验, 在舒适的条件下,  $SET^*$  的大致范围, 美国人为  $SET^* = 22.2 \sim 25.6^\circ\text{C}$ , 日本人为  $SET^* \approx 22 \sim 26^\circ\text{C}$ 。

此外, 还有一些其他的评价指标, 如有效温度  $ET^*$ 、作用温度  $OT$  等。但比较全面、被广泛采用的是上述两个指标。

## 第三节 热、湿环境基本参数的测量

### 一、热湿环境的基本参数

身体感觉冷热的环境基本要素如上所述有: (1) 空气温度; (2) 空气湿度; (3) 风速; (4) 辐射温度以及在人体侧的着衣的热特性; (5) 衣着热阻和表示人体在体内产生的热量; (6) 代谢量六大要素。

这些要素在不同的场合、不同的时间, 对环境和人体作用大小是不同的, 有的因素在某种场合是主要因素而在另外的场合就成了次要因素。如在全空气系统中, 空气的温度、速度和湿度是主要因素, 通常以这些因素作为检测项目和控制参数; 而在辐射采暖系统中主要的因素就成了气温、湿度和辐射温度了, 此时气温、湿度和辐射温度就变成了重要的测定评价项目。在实际中要根据实际情况选择测定项目和相应的检测方法。本节介绍作为评价的基本要素的气温、湿度、风速、辐射温度、着衣量、代谢量的检测方法。

### 二、温度及其测量方法

#### 1. 温度的表示方法

作为表示温度的单位通常有摄氏温度 ( $^\circ\text{C}$ ) 和华氏温度 ( $^\circ\text{F}$ ), 二者的换算如下式所示:

$$t(^{\circ}\text{F}) = (9/5)t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-16)$$

此外, 还有以绝对零度 ( $-273.15^\circ\text{C}$ ) 为基准的绝对温度 ( $\text{K}$ ), 绝对温度与摄氏温度换算关系为:

$$T = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-17)$$

## 2. 温度计的种类

### (1) 热膨胀直读式温度计

常用的有将酒精或水银封入玻璃中制成的棒状温度计，以及利用热膨胀系数不同的两种金属薄板随温度不同而变化这种特性的自动记录式温度计。

### (2) 热电偶温度计

### (3) 电阻温度计

## 3. 温度计的校正

为确保温度测量的精度，需要对测量用的温度计进行校正（标定），用作校正的温度计通常采用水银温度计或者是已经用标准温度计校正过的温度计。对于采用了二次仪表的测试系统，由于使用了连接测头和仪表较长的接线，则需要对包括二次仪表在内的温度测试系统整体进行校正。

## 4. 室温的测定

对于室温的测量首先要选择确定测点的位置。通常是在离地面 1~1.5m 的高度测量，这是因为人在居室内活动的范围都在离地面 2m 的范围，而上述高度可以说代表了这一范围的平均高度。在 ISO 7726 中推荐室温的测定高度为离地面 0.1m、0.6m、1.1m、1.7m。对于不同的建筑、不同的空调系统、在不同的时间其室温的分布一般是不同的，因此，在进行室温测量时应根据具体需要在有代表性的平面位置和高度位置上布置测点。

对于非稳态的室温测定，应选择热惰性较小的温度计，如热电偶温度计。对于辐射影响较明显的场合，在测量室温时要注意防止辐射的影响，可以在测头罩上一个用黑度较小的铝箔制成的筒状物，但当测头直径小于  $\phi 0.1 \sim 0.2\text{mm}$  时不用辐射罩。

## 5. 辐射的测定

热辐射的测定就是测定与人体进行辐射热交换的墙壁、家具等表面的温度，通过计算出辐射热交换量和平均辐射温度，或者测定空间某点的辐射温度或辐射热量。以下介绍主要的测定方法。

### (1) 接触法测定周围表面的温度

这是一种使热电偶或半导体温度计直接接触周围表面进行测定的方法。采用这种方法应注意：1) 使测头尽量细小；2) 测点应尽量选择能代表表面温度的点；3) 测头要与表面充分接触；4) 测量信号引出线从测点沿着表面要达 20cm 左右；5) 尽可能消除干扰表面温度的影响。

### (2) 非接触法测定周围表面温度

这是采用红外线辐射温度计测量周围表面温度的一种方法。由于它不接触周围表面，因而不影响表面温度，并且与接触法相比能够更加简便地测定。热辐射温度计有测量表面中一些点的温度的点测型和测量表面温度分布的热画像型。对于利用红外线进行测量的表面温度测量装置必须预先输入被测表面的黑度  $\epsilon$ ，因此在需要准确测量表面温度的场合，被测表面的黑度是必须的。在以要计算平均辐射温度为目的的场合，黑度以 1 进行测定，对于黑度未知及黑度不同的物体组合的场合，需要与接触法并用。

### (3) 黑球温度计

黑球温度计是通过测量无发热球的辐射与对流达到热平衡时的温度，从而求出平均辐

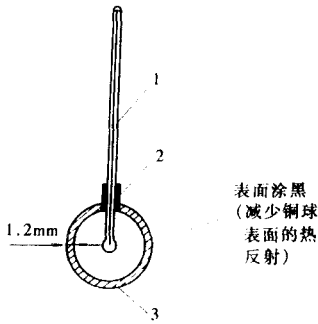


图 1-3 黑球温度计

1—温度计；2—橡皮塞；  
3—外径为 150mm 的铜板  
中空球（板厚 1.2mm）

射温度的一种平均辐射温度测定装置。其结构如图 1-3 所示。由黑球温度计所显示的温度，即黑球温度  $t_g$ 、气温  $t_a$ 、和风速  $v$  的测定值可以计算出平均辐射温度  $t_r$ 。这个平均辐射温度  $t_r$ ，由于球和人体的大小、形状都有明显的不同，因此严格地讲它与环境对人体的平均辐射温度是不同的。但是对于一般的室内环境它和人体的感觉比较接近，因而可以近似使用。特别是，当气流速度很小时，其表示的温度与环境对人体的作用温度基本一致。平均辐射温度由下式求得：

$$(t_r + 273.15)^4 = (t_g + 273.15)^4 + 2.47 \times 10^8 \sqrt{v} \cdot (t_g - t_a) \quad (1-18)$$

当气温  $t_a$  和黑球温度  $t_g$  之差小于 2~3℃ 时，可用下式简化计算：

$$t_r = t_g + 2.37 \sqrt{v} (t_g - t_a) \quad (1-18')$$

式中  $t_r$ ——平均辐射温度，℃；

$t_g$ ——黑球温度，℃；

$t_a$ ——气温，℃；

$v$ ——风速，m/s。

黑球温度计由于球内的空气有一定的热容量，因而测量具有一定的延迟性，使用时要考虑测定时间。同时，读取数据时人体不要长时间地靠近温度计，还要避免靠近其他发热体。

### 三、湿度的测量

#### 1. 湿度的表示

绝对湿度：单位质量的干空气中含水蒸气的量 (kg/kg)。

相对湿度：一定的温度下空气中的水蒸气分压力  $P_a$  和同温度下空气中水蒸气的饱和分压力  $P_a^*$  之比的百分数。

露点温度：当水蒸气分压力与某一温度下所对应的水蒸气饱和分压力相等时，所对应的这个温度就是这个水蒸气分压力下的露点温度。

#### 2. 湿度计的种类

##### (1) 阿斯曼通风干湿球温度计

测量空气的干湿球温度，据此计算或从  $h-d$  图上查得空气的湿度。

##### (2) 电阻式湿度计

利用陶瓷等对水蒸气有很好的附着性，附着水蒸气量的改变引起电阻变化的特性来测量湿度的湿度计。

##### (3) 电容式湿度计

利用电容随湿度的变化而改变的特性进行湿度测量。

##### (4) 毛发式湿度计

毛发和植物纤维等会随周围湿度的变化而其长度会伸缩，利用这一性质制作的湿度计

就是毛发湿度计。

### 3. 湿度的测量

在室内对湿度进行简易测定的场合，通常采用数字式湿度计。采用阿斯曼通风干湿球温度计测量湿度时，为了使其达到平衡，每点测量需要 3~5min 以上。即使是采用电阻和电容式湿度计，也要考虑时间延滞性问题。毛发式自动记录湿度计，主要用于以湿度管理为目的的场合，如美术馆、博物馆等的湿度测控常常采用。

## 四、空气流速及其测量

空气的流速是形成热环境的四个基本要素之一，同时还直接关系到室内热量及粉尘、有害气体等污染物的扩散。空气的流速主要以平均风速进行评价。但是，最近的研究发现，风速的不稳定度对人体的气流感也有较大的影响。

### 1. 风速仪的种类

在室内热环境的测量中经常使用的风速仪有热线风速仪、热敏电阻风速仪、晶体管式风速仪等。它们的构造、原理及使用办法在有关课程中已作过详细介绍。

### 2. 室内空气流速的测定

气流速度的测量高度，以离地面 10cm 和 100~120cm 的高度为好。在这两个高度位置正好是坐着的人着衣量少的脚踝关节部和裸露的脖子、头的部位，这些部位对气流十分敏感。在计测平面分布的场合，除了人员的工作位置等具有代表性的位置外，在近壁面和空调系统吹出口下方及近旁处也需设立测定点。

测量时，对于平均流速的测定要考虑到风速仪的时间延迟性；对于测量风速变动的场合要使用反应时间短的风速仪。

## 五、着衣量

### 1. 着衣量及热阻

冬天我们穿着毛衣等就是为了防止热的散发，此时毛衣等起着热阻的作用，表示着衣热阻的单位是 clo 值，1clo 相当于男性穿着西装时的热阻。

$$1\text{clo} = 0.155(\text{m}^2 \cdot \text{C} / \text{W}) \quad (1-19)$$

clo 值越大衣服的热阻越大，反之越小。一般的，厚衣服的 clo 值大，薄衣服的 clo 值小，长衣服的 clo 值大，短衣服的 clo 值小。显然，裸体时的 clo 值为 0。

### 2. 着衣热阻 (clo 值) 的测定

要精确测量着衣热阻值是困难的，不同面料的衣服、人体的不同姿势、衣服的大小不同，确切地说衣服的热阻是不同的。在此介绍着衣热阻的一般测量方法。

#### (1) 温度测定法

在十分平静的环境中测量被试验者着衣的表面温度  $t_{cl}$ 、衣服内的皮肤温度  $t_{sk}$  及作用温度  $t_0$  (当气温和作用于人体的平均辐射温度相等时可以用空气温度代替)，根据热平衡从下式求出着衣整体的热阻 clo 值：

$$I = (1/0.155h) (t_{sk} - t_{cl}) / (t_{cl} - t_0) \quad (1-20)$$

式中  $h$ ——人体的综合换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ；

$t_{sk}$ ——人体的平均皮肤温度， $\text{C}$ ；

$t_{cl}$ ——着衣表面温度， $\text{C}$ ；

$t_0$ ——作用温度， $\text{C}$ 。

在气温为 20~25℃时, 着衣内皮肤温度的经验值如下:

$$\text{男性} \quad t_{sk} = 0.42t_a + 23.60 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1-21)$$

$$\text{女性} \quad t_{sk} = 0.52t_a + 21.10 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1-22)$$

## (2) 衣服重量测定法

在气温 20℃, 相对湿度 60%~65% 的恒温、恒湿环境中称取其重量  $W$  (g), 然后按下面的计算式求得其 clo 值:

男性衣服, 且  $W \leq 3000\text{g}$ ,

$$I_{clo} = 0.00058W + 0.068(\text{clo}) \quad (1-23)$$

女性衣服, 且  $W \leq 2000\text{g}$ ,

$$I_{clo} = 0.00103W - 0.025(\text{clo}) \quad (1-24)$$

式中  $W$ ——衣服总重量, g。

## (3) 多件衣服的 clo 值

已知单件衣服的 clo 值  $I_{clo,i}$ , 则多件衣服的热阻值可按下列式计算:

男性衣服, 总热阻不超过 1clo 时

$$I_{clo} = 0.708\sum I_{clo,i} + 0.052 \text{ (clo)} \quad (1-24')$$

女性衣服, 总热阻值不超过 1clo 时

$$I_{clo} = 0.802\sum I_{clo,i} + 0.013 \text{ (clo)}$$

## 六、代谢量及其测量方法

如前所述, 人在体内的产热量与向体外的散热量相等时, 体温保持一定。人体的产热来源于人体对所摄入的食物的消化分解。成人每天的代谢热大约为 10500kJ, 安静的时候约为 6300kJ。

人的活动量或者作业强度可以用此时的代谢量表示。通常用单位体表面积、单位时间的代谢量表示。如安静地坐在椅子上时为  $58.2\text{W}/\text{m}^2$ 。这个代谢量如果对标准体格的成人而言, 每人相当于 100W 的电灯 1 个。作为代谢量的基准单位, 通常用 met 表示, 1met 就是安静时的代谢量 58.2W。

### 代谢量的测定

测定各种场合代谢量的方法有直接法和间接法。

#### (1) 直接法

直接法就是直接测量人体各部分向外界散发的能量, 包括辐射、对流、蒸发、做功等。当人体的体温恒定时, 代谢量和散发量相等。

#### (2) 间接法

是一种通过测定人体氧气摄入量来测定人体代谢量的方法。通过测量呼吸量和呼气中氧气和二氧化碳的浓度, 算出氧气的摄入量, 从而计算出代谢量。

$$M = (0.23R + 0.77) \times 0.10 \times (60 \times V_{O_2}) / A_d(\text{met}) \quad (1-25)$$

式中  $M$ ——人体的代谢量, met;

$R$ ——呼吸商, 被摄取的  $O_2$  量和排出的  $CO_2$  量的比, 一般在 0.7~1.0 之间, 安静时为 0.83, 重作业时接近 1.0;

$V_{O_2}$ —— $O_2$  的消耗量, L/min;

$A_d$ ——是人体的体表面积,  $A_d = 0.202(W_1)^{0.425} \cdot (H_1)^{0.725}$ ,  $m^2$ ;

$W_1$ ——体重, kg;

$H_1$ ——身高, m。

## 第四节 暖通空调系统与热湿环境

人类为了抵御严寒和酷暑,很早以前就采取了各种各样的办法,如生火取暖、凿窖储冰。随着工业的发达和科技的进步,出现了空调系统,人类真正能够随心所欲地控制自己居住的热湿环境了。然而,室外的寒暑如何影响室内,空调系统怎样保持室内的热湿环境,空调系统与热湿环境具有怎样的辩证关系,是我们设计和控制空调系统时需要掌握的。

### 一、室内热湿环境的内扰与外扰

这里指的内扰和外扰就是指影响室内热湿环境的室内和室外作用因素。如室内的照明装置、办公设备和人员向室内散热散湿,这些就是内扰;室内以外的作用因素如室外气温、湿度、太阳辐射、室外风速等就是外扰。

内扰主要是通过对流、辐射和蒸发(或吸湿)与室内进行热湿交换,最后使室内的空气温度和湿度发生变化。

外扰则主要通过玻璃门窗辐射、通过围护结构热湿传导以及通过室内外的空气交换进行热湿传递的。其中,辐射热是经透明或半透明玻璃门窗或玻璃幕墙进入房间后加热室内墙体及其他物体的表面,使这些表面的温度上升,然后这些表面与室内的空气进行对流换热;通过围护结构的热传导是热量从外墙经围护结构传入到内表面,再以对流和辐射的方式作用于室内。

不管内扰还是外扰,最后它们都使室内空气的温、湿度改变。

### 二、暖通空调系统与热湿环境

暖通空调系统的作用就是抵御室内热湿环境的内扰和外扰,维持人们所需的热湿环境。

以往的空调系统主要是以空气环境为控制主体,即室内空气的温度、湿度和速度。室内空气环境的内、外扰最终是作用到室内空气上,使室内空气的参数改变。为了抵抗这个干扰、保持室内空气的参数达到所需要的值,人们通过暖通空调系统向室内空气供冷(或供热),加湿(或去湿)。这样,毫无疑问能够保持我们所需的室内空气环境,然而也带来了一些问题。

首先,如前所述,影响人体冷热感、舒适感的环境因素不仅仅是空气的温度、湿度或者速度,还有环境的平均辐射温度。同时,对于舒适性空调而言还有人体侧的人体的着衣量和作业量(代谢水平)。例如,在寒冷的冬天,空气的温度很低,但我们晒太阳和不晒太阳是大不一样的。显然,只考虑空气的状态参数是不全面的,它不能够全面地代表人体对环境的冷热感觉。其次,虽然不管是室内环境的内扰、外扰还是暖通空调系统,对室内环境的作用结果最终都体现到室内空气的状态参数上,但是这个过程是缓慢的,其时间的延迟性很大。如辐射,它先作用于室内各个表面,使其温度上升,再由温度升高了的表面通过对流使空气升温。对于辐射干扰变化频繁时,势必会造成室内空气参数的频繁变动,

使空调系统启停频繁，也影响着人体的舒适感觉。第三，对于这种以控制空气参数为目的的空调系统，其节能性较差。一方面，如上所述，由于干扰对室内空气影响的滞后性会使室内空气参数波动，为了抵消这种波动有时可能产生冷热抵消损失，空调系统的频繁启动也不可避免地降低空调系统的能效比，另一方面，由于空调系统通过空气作用于人体，因而必须要保证空气的温湿度，在夏季就需要较低的室内温度，在冬季就需要较高的室内空气温度，相反，如果采用辐射空调，由于增加了人体与环境的辐射换热，所需要的空气温度在夏季相对来说可以高一些，冬季就可以低一些，显然，通过围护结构的传热量和冷却或加热新风的能量都会比辐射空调方式大，在实际中为降低新风负荷，往往对新风量限制严格，从而也大大降低了室内的空气品质。

随着热湿环境研究工作的不断深入，发现传统的单一以空气参数为控制目标的空调方式已经越来越不能适应发展的需要了。实际上，对于舒适性空调系统，其服务的对象是人，而不是空气，因而应该以人为作用主体，而不是空气。事实上，如前所述，影响人体冷热感、舒适感的六大因素共同作用于人体，它们对人体的作用程度可以用热环境评价指标如  $SET^*$ 、 $PMV$  等来衡量，例如在通常的范围内当  $SET^*$  值一定时人体的冷热感觉是相同的。而  $SET^*$  值是由前述六大要素构成的，因此我们有理由相信：对于空调系统，只要综合考虑这六大因素，使得所构成的  $SET^*$  值达到人体舒适的感觉即可。毫无疑问，要达到相同的  $SET^*$  值可以有許多不同环境参数的组合，研究这些参数的最佳组合对于降低空调系统能耗、开发新的空调方式下的空调设备及其控制方法、对于解决以往空调系统存在的不足、对于创造一个使人体更舒适健康的热湿环境有着重要的意义。



## 第二章 暖通空调工程设计程序及内容

### 第一节 暖通空调工程设计程序

民用建筑工程一般应分为方案设计、初步设计和施工图设计三个阶段，对于技术要求简单的民用建筑工程，经有关主管部门同意，并且在合同中有不做初步设计的约定，可在方案设计审批后直接进入施工图设计。

方案设计文件，应满足编制初步设计文件的需要；初步设计文件，应满足编制施工图设计文件的需要；施工图设计文件，应满足设备材料订货，非标准设备制造和施工要求。

### 第二节 设计规范和设计依据

#### 一、设计规范

##### 1. 暖通空调的一般规范

- (1) 采暖通风与空气调节设计规范 (GB 50019—2003)
- (2) 民用建筑热工设计规范 (GB 50176—93)
- (3) 冷库设计规范 (GB 50072—2001)
- (4) 洁净厂房设计规范 (GB 50073—2001)
- (5) 锅炉房设计规范 (GB 50041—92)
- (6) 设备及管道绝热工程设计规范 (GB 50246—97)
- (7) 城镇燃气设计规范 (2002年版) (GB 50028—93)
- (8) 城市热力网设计规范 (CJJ 34—2002)

##### 2. 防火类

- (1) 建筑设计防火规范 (2001年修订版) (GB 50016—2001)
- (2) 高层民用建筑设计防火规范 (2001年修订版) (GB 50045—95)
- (3) 人民防空工程设计防火规范 (2001年修订版) (GB 50098—98)

##### 3. 环境保护、劳动卫生与安全类

- (1) 工业“三废”排放试行标准 (GBJ 4—73)
- (2) 工业企业设计卫生标准 (TJ 36—79)
- (3) 工业企业噪声控制设计规范 (GBJ 87—85)
- (4) 城市区域环境噪声标准 (GB 3096—93)
- (5) 大气环境质量标准 (GB 3095—82)
- (6) 商场(店)、书店卫生标准 (GB 9670—88)
- (7) 锅炉大气污染物排放标准 (GB 13271—91)
- (8) 低压锅炉水质标准 (GB 1576—85)