



高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

暖通空调设计基础分析 (第二版)

Basic Analysis of HVAC Design (Second Edition)

葛凤华 王春青 编著
马最良 主审



中国建筑工业出版社

高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

暖通空调设计基础分析 (第二版)

Basic Analysis of HVAC Design (Second Edition)

葛风华 王春青 编著
马最良 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

暖通空调设计基础分析/葛风华,王春青编著. —2
版. —北京:中国建筑工业出版社,2017.7
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-20627-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 071041 号

责任编辑:张文胜 姚荣华
责任校对:焦 乐 张 颖

高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

暖通空调设计基础分析

(第二版)

葛风华 王春青 编著

马最良 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:14 字数:335 千字

2017年8月第二版 2017年8月第三次印刷

定价:35.00 元

ISBN 978-7-112-20627-8

(30297)

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)

第二版前言

建筑环境与能源应用工程专业的课程体系中有一些重要的实践教学环节,如供暖、通风、空调、冷热源等课程设计及毕业设计,还有专业课程“暖通空调典型工程设计与分析”,2009年出版的《暖通空调设计基础分析》可作为这些课程的主要参考教材,利用本专业基础理论,结合实际工程应用进行分析,提高学生实际应用能力。本次修订在原有教材的基础上进行了调整与增删,并改正了已发现的讹误。

《暖通空调设计基础分析》(第二版)的主要特点:(1)保留并完善了第一版教材的课程体系。(2)2009年后出版了一些新的设计规范与技术措施,如《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012、《公共建筑节能设计标准》GB 50189—2015、《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26—2010、《建筑设计防火规范》GB 50016—2014、《全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调·动力-2009》等,根据规范的变化对相关内容进行了修改。(3)第1章增加了“通风余热回收”、第2章增加了“消除再热的方法实例”、“蒸发冷却的应用实例”、“三种除湿方法分析”;第3章增加了“混水连接的水力工况分析”、“冷热源位置与重力循环压力分析”;第4章增加了“管网形式与变流量工况分析”、“循环水泵管网压差控制”;第5章增加了“年负荷与复合冷热源”,删去了第6章,并把原第6章部分内容并入第5章;在第6章中,除根据新防火规范进行修改外,另结合了尚未正式实施的《建筑防排烟系统技术规范》,对相关内容进行了分析;第7章增加了部分设备的设计选择方法。

本书由马最良教授主审,对本书的完善提出了许多宝贵意见,谨致谢意。

由于作者的水平所限,对于书中的错误和不妥之处,恳请读者给予批评指正。

第一版前言

暖通空调系统设计是实现所需的室内环境的重要过程,这一过程需要设计人员熟练掌握专业理论知识并具备一定的实践经验,需要将基本理论与实际应用相结合。设计过程不仅要考虑技术的合理性,还要考虑经济性与节能性。本书编写的主要目的是使建筑环境与设备工程专业学生在完成专业课程学习后,进一步理解和巩固专业知识,并能灵活应用于工程设计及工程实践活动中,从而进一步提高专业水平和应用能力。

本书针对建筑环境与设备工程专业的部分重要知识点进行了系统的理论归纳,以工程设计为主线,突出专业重点、难点,结合工程应用中的典型实例进行分析,具有很强的实用性。本书共分8章,第1章介绍了影响人体热舒适与室内空气品质的因素及室内设计参数的取值;第2章针对空气的热湿处理过程进行分析,并对机器露点送风的空气处理过程进行了能耗分析;第3章通过工程实例分析了水压图的应用,解决水力工况分析在实际工程中出现的疑难问题;第4章介绍了泵与风机的调节及其与管路系统匹配,结合能耗分析了暖通空调动力设备的典型应用;第5章介绍了暖通空调的冷热源,从技术、经济、节能和环保方面对冷热源特性进行了分析;第6章从经济与节能角度分析了冷、热媒温度对采暖、空调系统的影响;第7章分析了建筑防排烟理论,并通过实例重点分析了相关规范的具体应用问题;第8章介绍了暖通空调设计过程、分析方法和关键问题。

本书第1、2、3、6、7、8章由葛凤华编写,第4、5章由王春青编写,全书由葛凤华统稿。哈尔滨工业大学马最良教授担任本书主审,并为本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。本书的出版得到了中国建筑工业出版社张文胜编辑的大力帮助和热情支持,在此表示衷心的感谢。硕士研究生刘春菊、于秋生为本书作了部分文字、图片的录入工作,在此表示感谢。本书各章后列出了相关参考文献,对这些文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中肯定还存在许多偏颇和不足之处,望读者能不吝赐教,以便在以后的教学和实践不断改进。

目 录

第 1 章 室内环境品质与室内设计参数	1
1.1 热舒适指标与室内设计参数	1
1.1.1 人体热平衡方程	1
1.1.2 热舒适方程与 $PMV-PPD$ 指标	3
1.1.3 根据 $PMV-PPD$ 指标确定室内设计参数	4
1.1.4 有效温度 ET^* (Effective Temperature) 与 ASHRAE 舒适区	6
1.1.5 湿度的作用	7
1.1.6 平均辐射温度与辐射供暖、辐射供冷	8
1.2 室内空气品质与控制	10
1.2.1 空气污染物的种类与来源	10
1.2.2 室内空气品质标准	12
1.2.3 通风量的确定	14
1.2.4 通风余热回收	18
本章参考文献	19
第 2 章 空气的热湿处理	21
2.1 湿空气的性质与焓湿图	21
2.1.1 湿空气的组成及基本状态参数	21
2.1.2 湿空气的焓湿图	25
2.1.3 露点温度	26
2.2 湿球温度	26
2.3 空调室内外空气状态点	29
2.3.1 室内空气状态点	29
2.3.2 空调室外空气状态点	29
2.4 空气的热湿处理过程	29
2.4.1 喷水室处理空气	29
2.4.2 水喷雾与喷蒸汽加湿过程	31
2.4.3 表面式换热器处理空气	31
2.4.4 表面式换热器处理空气的送风状态点与室内状态点	34
2.4.5 表冷器选择计算举例	36
2.4.6 露点送风的空气处理能耗计算	38
2.4.7 消除再热的几种方法	40
2.4.8 利用溶液处理空气	41

2.4.9 固体吸附处理空气	42
2.4.10 蒸发冷却系统	43
本章参考文献	45
第3章 水压图的应用	46
3.1 水压图原理	46
3.1.1 能量方程	46
3.1.2 水压图画法	47
3.2 水压图的技术要求与系统定压	47
3.2.1 热水网路压力状况的基本技术要求	47
3.2.2 管网系统的定压	48
3.3 水系统的压力工况与水压图	48
3.3.1 定压点位置与水压图	48
3.3.2 水系统分区与水压图	50
3.4 外网与用户的连接	50
3.4.1 常规直接连接方式分析	50
3.4.2 高层建筑暖通空调水系统与外网连接方式	51
3.4.3 混水连接的水力工况分析	54
3.5 定压点不恒压的几个问题	55
3.5.1 膨胀水箱定压的定压点变化	55
3.5.2 补给水泵定压的定压点变化	56
3.5.3 多个定压点情况	58
3.6 外网水压图应用举例	58
3.6.1 双定压值定压系统	59
3.6.2 旁通管定压	60
3.7 系统变动水力工况分析	60
3.7.1 水力失调的概念	60
3.7.2 变动水力工况分析方法	61
3.7.3 典型变动水力工况分析举例	62
3.7.4 冷热源位置与重力循环压力分析	65
3.7.5 水平失调与垂直失调	66
本章参考文献	66
第4章 泵与风机的选择应用	67
4.1 泵与风机的基本性能参数	67
4.2 泵与风机调节原理	70
4.2.1 泵与风机的性能曲线	70
4.2.2 管路性能曲线与运行工况	70
4.2.3 泵与风机的相似律	71
4.3 泵与风机工况调节	72
4.3.1 非变速调节	72

4.3.2	变速调节	74
4.3.3	管网形式与变流量运行工况	74
4.4	泵与风机的联合运行工况	75
4.4.1	泵或风机的并联运行	75
4.4.2	泵或风机的串联运行	79
4.5	离心泵的吸水能力	81
4.5.1	离心泵的气蚀现象	81
4.5.2	泵的安装高度	82
4.6	泵与风机的选用	84
4.7	泵与风机典型应用分析	87
4.7.1	水泵的应用	87
4.7.2	风机的应用	92
	本章参考文献	94
第5章	暖通空调冷热源	95
5.1	空调系统冷源	95
5.1.1	蒸汽压缩式冷水机	95
5.1.2	溴化锂吸收式制冷	97
5.1.3	蓄冷(蓄冷系统冷源)	99
5.1.4	冷源设备的优缺点比较	102
5.2	暖通空调系统热源	104
5.2.1	暖通空调热源设备的分类	104
5.2.2	暖通空调热源设备原理及性能	104
5.2.3	热泵	105
5.2.4	热源主要特点	108
5.3	冷热源性能	111
5.3.1	锅炉的额定热效率	111
5.3.2	蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组制冷性能系数	111
5.3.3	蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组综合部分负荷性能系数	111
5.3.4	单元式机组能效比(EER)	113
5.4	冷热源能源效率分析	113
5.4.1	能源利用比较基准的确定	113
5.4.2	制冷机与热泵的一次能源利用率	114
5.4.3	冷热源系统一次能源利用率的影响因素	115
5.5	暖通空调冷热源能耗分析	116
5.5.1	空调冷源能耗分析	116
5.5.2	空调热源能耗分析	118
5.6	焓(Exergy)分析	119
5.6.1	焓与焓的概念	119
5.6.2	焓方程	121

5.6.3 锅炉烟损	122
5.6.4 制冷系统的烟分析	123
5.7 冷热源技术经济分析	125
5.7.1 技术经济分析方法	125
5.7.2 初投资、年折旧费和年运行费用计算	126
5.7.3 年运行费用的计算	127
5.7.4 年经营费用计算	128
5.7.5 年负荷与复合冷热源	128
5.7.6 冷热源技术经济分析算例	130
5.8 制冷剂性能及环保	133
5.8.1 制冷剂评价	133
5.8.2 常用制冷剂及替代	134
5.9 热媒与冷媒温度	137
5.9.1 热媒温度	138
5.9.2 冷媒温度与空调系统	140
5.9.3 独立新风系统与低温送风系统	141
本章参考文献	145
第6章 建筑防烟、排烟设计	146
6.1 建筑火灾烟气的特征及其危害	146
6.1.1 火灾烟气的组成	146
6.1.2 烟气的危害	146
6.2 烟气的流动特性	147
6.2.1 热压作用与烟气的扩散	147
6.2.2 烟气在房间的扩散	148
6.2.3 烟囱效应引起的烟气垂直流动	149
6.3 烟气的控制要求	150
6.3.1 防火分区与防烟分区	150
6.3.2 需要防烟、排烟的场合	151
6.4 自然防烟排烟	152
6.5 机械防排烟	152
6.5.1 机械加压送风	153
6.5.2 机械排烟	153
6.6 排烟系统的风量计算	153
6.6.1 一般规定	153
6.6.2 机械排烟系统应用举例	154
6.6.3 《建烟规》的新要求	160
6.7 机械加压送风量计算	160
6.7.1 机械加压送风系统的设计要求	160
6.7.2 机械加压送风量	161

6.8 防排烟系统设计的几个问题分析	169
6.8.1 地上、地下共用楼梯间的防烟设计	169
6.8.2 关于防火阀的设置	169
6.8.3 地下建筑排烟系统设置原则	170
6.8.4 排烟量计算问题	170
本章参考文献	170
第7章 暖通空调系统设计	171
7.1 暖通空调系统设计方法与步骤	171
7.2 室内外设计参数	171
7.2.1 室内设计参数	171
7.2.2 室外空气计算参数	173
7.2.3 负荷计算	174
7.3 暖通空调方案与设备	176
7.3.1 冷热源方案	176
7.3.2 管网形式及分区	180
7.3.3 供暖水系统的末端装置	184
7.3.4 空调水系统的末端装置	187
7.4 其他设备的选择应用	195
7.4.1 软化水设备	195
7.4.2 电子水处理仪	195
7.4.3 除氧设备	196
7.4.4 冷却塔	196
7.4.5 水箱	196
7.4.6 过滤器	197
7.4.7 分集水器	197
7.5 气流组织设计	197
7.5.1 气流组织评价与要求	197
7.5.2 气流组织形式	200
7.5.3 气流组织计算	200
7.6 空调、通风系统的消声	206
7.6.1 噪声的计量	206
7.6.2 空调、通风系统的噪声源	207
7.6.3 噪声的叠加、衰减特性	208
7.6.4 消声设备	209
7.6.5 通风、空调系统消声设计	210
本章参考文献	210

第1章 室内环境品质与室内设计参数

室内环境品质 (Indoor Environment Quality, IEQ) 是指声环境、光环境、热湿环境及室内空气品质等因素, 它对人的身心健康、舒适感、工作效率及生产工艺过程都会产生直接的影响。在上述诸多影响因素中, 热湿环境及室内空气品质 (Indoor Air Quality, IAQ) 对人与工艺过程的影响尤为明显。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人体的热湿环境, 室内空气污染物浓度指标及对空气质量的主观感受构成了空气品质的定义, 比较有代表性的参数是新风量的指标。这些参数构成了室内设计参数。

室内设计参数取值在影响室内环境品质的同时, 对建筑能耗影响巨大。供热、供燃气、通风及空调工程学科的主要任务就是以最低的能耗, 创造一个健康、舒适的热湿环境及良好的室内空气品质, 满足人们生产、生活的需求。

1.1 热舒适指标与室内设计参数

1.1.1 人体热平衡方程

人体靠摄取食物获得能量, 食物通过人体新陈代谢被分解氧化, 同时释放出能量以维持生命, 最终都转化成热能散发到体外, 并与周围环境发生热量交换, 在热量交换过程中维持体温基本不变。从热力学的角度, 人体与周围环境的热交换应服从能量转换与守恒的热力学第一定律, 由此可以列出人体热平衡方程式为:

$$S=M-W-R-C-E \quad (1-1)$$

式中 S ——人体蓄热率, W/m^2 ;

M ——人体新陈代谢率, W/m^2 ;

W ——人体所做的机械功, W/m^2 ;

R ——着装人体与环境的辐射热交换, W/m^2 ;

C ——着装人体与环境的对流热交换, W/m^2 ;

E ——人体与环境之间由水分蒸发而产生的热交换, W/m^2 。

在稳定的环境条件下, 式 (1-1) 中的人体蓄热率 $S=0$ 时, 人体能够保持能量平衡, 人的热感觉为不冷、不热。对于式 (1-1) 中的各项都有详细的研究成果, 现分别叙述如下:

(1) 人体新陈代谢率

人体的新陈代谢率 (Metabolic Rate) 是指人体在新陈代谢活动中将化学能转变成热能和机械能的速率。人体新陈代谢率受多种因素影响, 如肌肉活动强度、环境温度、性别、年龄、神经紧张程度、进食后时间的长短等。肌肉活动对新陈代谢率影响最为显著, 所以根据人体活动强度来确定人体代谢率, 成年男子在静坐时的代谢率为 1met , $1\text{met}=58.2W/m^2$ 。

(2) 人体的机械功

人体对外所做的功也取决于活动强度，是代谢率的函数。人体对外做功的机械效率定义为：

$$\eta=W/M \tag{1-2}$$

人体在不同活动强度下机械效率值比较低，一般为 5%~10%，很少能超过 20%。对于大多数的活动来说，人体的机械效率几乎为 0。在计算空调负荷时，忽略人体对外所做的功，人体新陈代谢率全部形成室内得热量，这对空调系统设计来说是安全的。

(3) 人体与环境的辐射换热量

穿衣人体的外表面与周围环境的壁面会发生辐射热交换，这部分辐射热交换遵循斯蒂芬-波尔茨曼定律，经推导后可由下式计算：

$$R=3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273.15)^4-(\bar{t}_r+273.15)^4] \tag{1-3}$$

式中 t_{cl} ——服装外表面的平均温度，℃；
 f_{cl} ——服装面积系数，即穿着服装的外表面面积与人体裸表面积之比，%；
 $\bar{t}_r$ ——环境平均辐射温度，℃。

环境的平均辐射温度的意义是一个假想的等围合面的表面温度，如果有一个封闭空间，其内表面为温度一致的黑体表面，由此所造成的与人体之间的辐射换热量和所研究的人体所处真实环境中的辐射换热量相等，那么，黑体表面的温度就是真实环境的平均辐射温度。在实际应用中可以近似用室内各表面温度的面积加权平均值来表示，即：

$$\bar{t}_r=\frac{\sum t_iA_i}{\sum A_i} \tag{1-4}$$

式中 t_i ——室内第 i 表面的温度，℃；
 A_i ——室内第 i 表面的面积，m²。

(4) 人体与环境的对流热交换

穿衣人体的表面与周围空气存在温差就有对流换热，可以用牛顿对流换热公式计算。对于对流换热系数，一般认为它是掠过人体的风速 v 的函数，对流换热量可以表示为：

$$C=f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a) \tag{1-5}$$

$$h_c=1.16(M-50)^{0.39} \tag{1-6}^{[1]}$$

$$t_{cl}=t_{sk}-I_{cl}(R+C) \tag{1-7}$$

$$t_{sk}=35.7-0.0275(M-W) \tag{1-8}^{[2]}$$

式中 h_c ——对流换热系数，W/(m²·K)；
 t_{sk} ——人体在接近舒适条件下的平均皮肤温度，℃；
 t_a ——人体周围的空气温度，℃；
 I_{cl} ——服装热阻，m²·K/W。

这里服装热阻 I_{cl} 指的是显热热阻，常用单位为 m²·K/W 和 clo，两者的关系是：1clo=0.155m²·K/W。表 1-1 为部分服装的热阻与面积系数。

部分服装的热阻 I_{cl} 与面积系数 f_{cl} 表 1-1

服装种类及组合形式	I_{cl} (clo)	f_{cl}
裸体	0	1.0
短裤	0.1	1.0

续表

服装种类及组合形式	$I_{cl}(\text{clo})$	f_{cl}
一般热带服装: 短裤,短袖衬衫,薄短袜及凉鞋	0.3~0.4	1.05
轻型夏装: 开领短袖衬衫,薄长西裤	0.5	1.1
轻型工作服: 短裤,袜,工作衣裤(上衣下摆不束入裤内)	0.6	1.1
普通职员套装	1.0	1.15
普通职员套装再加外套大衣	1.5	1.23
轻型户外活动服: T恤,短裤,衬衫,长裤,单夹克,袜,鞋	0.9	1.14
厚型传统西服套装: 长内衣裤,衬衫,毛袜,皮鞋,带马夹的西装	1.5	1.2~1.3
极地羽绒服	3~4	1.4~1.45

(5) 人体的蒸发散热量

人体的蒸发散热量包括皮肤蒸发散热量和人体呼吸散热量。皮肤蒸发散热包括汗液蒸发散热与皮肤湿扩散散热,呼吸散热又分为蒸发潜热与蒸发显热两部分。根据 Rohlesh Nevins 等人的实验^[2],它们可表示如下:

$$E = E_{sw} + E_{dif} + E_{res} + C_{res} \quad (1-9)$$

$$E_{sw} = 0.42(M - W - 58.2) \quad (1-10)$$

$$E_{dif} = 3.05(0.254t_{sk} - 3.335 - P_a) \quad (1-11)$$

$$E_{res} = 0.0173M(5.867 - P_a) \quad (1-12)$$

$$C_{res} = 0.0014M(34 - t_a) \quad (1-13)$$

式中 E_{sw} ——汗液蒸发散热量, W/m^2 ;
 E_{dif} ——皮肤湿扩散散热量, W/m^2 ;
 E_{res} ——呼吸潜热蒸发散热量, W/m^2 ;
 C_{res} ——呼吸显热蒸发散热量, W/m^2 ;
 P_a ——人体周围水蒸气分压力, kPa 。

1.1.2 热舒适方程与 PMV-PPD 指标^[3,4]

P. O. Fanger 于 1982 年提出了描述人体在稳态条件下能量平衡的热舒适方程,在人体热平衡方程式 (1-1) 中,当人体蓄热率 $S=0$ 时,处于不冷、不热状态,将上述人体代谢率与散热量值代入式 (1-1),就可得人体热舒适方程式:

$$\begin{aligned} (M - W) = & f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) + 3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ & + 0.42(M - W - 58.2) + 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - P_a] \\ & + 0.0173M(5.867 - P_a) + 0.0014M(34 - t_a) \end{aligned} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 中有 8 个变量: M 、 W 、 t_a 、 P_a 、 $\bar{t}_r$ 、 f_{cl} 、 t_{cl} 、 h_c 。实际上, f_{cl} 与 t_{cl} 可由 I_{cl} 决定, h_c 是风速 v 的函数, W 按 0 考虑,空气水蒸气分压力 P_a 又是空气温度 t_a 与相对湿度 φ 的函数。因此,影响人体热舒适的有 6 个变量: M 、 I_{cl} 、 t_a 、 $\bar{t}_r$ 、 φ 、 v , 其中有两个主

观变量： M 、 I_{cl} ；有 4 个环境变量： t_a 、 $\bar{t}_r$ 、 φ 、 v_o 。

P. O. Fanger 收集了 1396 名美国和丹麦受试者的冷热感觉资料，得出人的热感觉与人体热负荷之间的回归公式^[3]：

$$PMV=[0.303\exp(-0.036M)+0.0275]TL \tag{1-15}$$

式中 PMV ——预测平均评价 (Predicted Mean Vote)，稳态热环境下的热感觉评价指标；
 TL ——人体热负荷，为人体产热量与人体向外界散出的热量差值。

上式中有一个假定条件，即人体的平均皮肤温度 t_{sk} 和出汗造成的潜热散热 E_{sw} 是人体保持舒适条件下的数值。在此，人体热负荷为式 (1-1) 中的人体蓄热率 S ，即把蓄热率看作是造成人体不舒适的热负荷， S 值相当于式 (1-14) 中两端的差值，将其代入式 (1-15)，可得：

$$\begin{aligned} PMV=&[0.303\exp(-0.036M)+0.0275]\times\{M-W-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)-0.0014M(34-t_a) \\ &-3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4]-0.42(M-W-58.2) \\ &-3.05[5.733-0.007(M-\bar{W})-P_a]-0.0173M(5.867-P_a)\} \end{aligned} \tag{1-16}$$

PMV 指标采用了 7 级分度，见表 1-2。

PMV 热感觉标尺							表 1-2
热感觉	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
PMV 值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

PMV 指标代表了同一环境下绝大多数人的感觉，但是人与人之间存在生理差别，因此 PMV 指标并不一定能够代表所有人的感觉。为此，Fanger 又提出了预测不满意百分比 PPD (Predicted Percent Dissatisfied)^[4] 指标来表示人群对热环境不满意的百分数，并利用概率分析方法，给出了 PMV 与 PPD 之间的定量关系：

$$PPD=100-95\exp[-(0.03353PMV^4+0.2179PMV^2)] \tag{1-17}$$

1984 年，国际标准化组织提出了室内热环境评价与测量的新标准化方法 ISO 7730。在 ISO 7730 标准中就采用 $PMV-PPD$ 指标来描述和评价热环境。当 $PMV=0$ 时， PPD 为 5%，即意味着在室内热环境处于最佳的热舒适状态时，仍然有 5% 的人感到不满意。因此，ISO 7730 对 $PMV-PPD$ 指标的推荐值在 $-0.5\sim+0.5$ 之间，相当于人群中允许有 10% 的人感觉不满意。

在我国《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012 以下简称《民规》^[5]中，规定了热舒适等级，其中Ⅰ级舒适性较高，Ⅱ级舒适性一般，见表 1-3。

不同热舒适等级 PMV-PPD 值			表 1-3
热舒适度等级	PMV	PPD	
Ⅰ 级	$-0.5\leq PMV\leq 0.5$	$\leq 10\%$	
Ⅱ 级	$-1\leq PMV<-0.5, 0.5< PMV\leq 1$	$\leq 27\%$	

1.1.3 根据 $PMV-PPD$ 指标确定室内设计参数

如果针对普通的办公建筑，人员工作状态为打字，人体代谢率 M 取值为 $65W/m^2$ ；机械效率取值为 0；室内平均辐射温度 $\bar{t}_r$ 可以近似取空气温度 t_a ；夏季服装热阻 $I_{cl}=$

0.5clo=0.08m²·K/W；冬季服装热阻 I_{cl}=1.3clo =0.2015m²·K/W。分别取不同的室内空气温度 t_a、相对湿度 φ 值及上述参数代入式 (1-5)~式 (1-8) 及式 (1-16)，计算 PMV 数值。

式 (1-16) 中的水蒸气分压力 P_a可由下式计算^[6]：

$$\ln(P_a/\varphi)=\frac{k_1}{t+273.15}+k_2+k_3(t+273.15)+k_4(t+273.15)^2+k_5(t+273.15)^3+k_6\ln(t+273.15) \tag{1-18}$$

式中 k₁=-5800.2206；k₂=1.3914993；k₃=-0.04860239；k₄=0.41764768×10⁻⁴；k₅=-0.14452093×10⁻⁷，k₆=6.5459673。

表 1-4 和表 1-5 为给定参数的室内冬、夏季 PMV 计算结果。从表中可以看出，夏季空调条件下，当室内温度大于 27℃时，PMV>+0.5，超出《民规》中Ⅰ类舒适标准规定值；当室内温度为 26℃时，相对湿度若小于 55%，则满足Ⅰ类舒适标准。若按Ⅱ类舒适标准值-1≤PMV≤+1，当空气温度取 27℃时，相对湿度在 30%~70%范围内均满足要求。在冬季供暖条件下，室内设计温度 18℃能满足 PMV>-0.5 的标准规定值，而 15℃仍可满足《民规》中Ⅱ类舒适标准规定的-1≤PMV≤+1。

夏季不同温度、相对湿度情况下的 PMV 值 表 1-4

相对湿度(%) 温度(℃)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
22	-0.7772	-0.7456	-0.7139	-0.6823	-0.6506	-0.619	-0.5874	-0.5557	-0.5241
23	-0.4962	-0.4626	-0.4289	-0.3953	-0.3617	-0.328	-0.2944	-0.2608	-0.2272
24	-0.2245	-0.1888	-0.153	-0.1173	-0.0816	-0.0459	-0.0102	0.0255	0.0613
25	0.0533	0.0912	0.1292	0.1671	0.205	0.2429	0.2908	0.3188	0.3567
26	0.333	0.3732	0.4134	0.4537	0.4939	0.5342	0.5744	0.6147	0.6549
27	0.6145	0.6572	0.6999	0.7426	0.7853	0.828	0.8706	0.9133	0.956
28	0.8977	0.943	0.9882	1.0335	1.0788	1.124	1.1693	1.2146	1.2598

冬季不同温度、相对湿度情况下的 PMV 值 表 1-5

相对湿度(%) 温度(℃)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
15	-0.9755	-0.953	-0.9305	-0.908	-0.8855	-0.863	-0.8405	-0.8180	-0.7955
16	-0.8005	-0.778	-0.7554	-0.7329	-0.7103	-0.6878	-0.6652	-0.6427	-0.6201
17	-0.6195	-0.5963	-0.5731	-0.5499	-0.5267	-0.5036	-0.4804	-0.4572	-0.434
18	-0.438	-0.4133	-0.3886	-0.3639	-0.3392	-0.3146	-0.2899	-0.2652	-0.2405
19	-0.2555	-0.2292	-0.2029	-0.1766	-0.1503	-0.124	-0.0977	-0.0714	-0.0451
20	-0.0719	-0.0439	-0.0159	0.0121	0.0401	0.0681	0.096	0.124	0.152
21	0.113	0.1428	0.1726	0.2023	0.2321	0.2619	0.2916	0.3214	0.3512
22	0.299	0.3306	0.3622	0.3939	0.4255	0.4572	0.4888	0.5204	0.5521
23	0.4862	0.5198	0.5534	0.5871	0.6207	0.6543	0.6879	0.7216	0.7552

人体舒适性除 4 个环境参数外，还受人体代谢率与服装热阻影响，因此新《民规》还有如下规定：对于供暖系统，供暖室内设计温度应符合下列要求：严寒和寒冷地区的主要房间应采用 18~24℃；夏热冬冷区的主要房间宜采用 16~22℃。对于舒适性空调系统，

空调室内设计参数应符合下列规定：

(1) 人员长期逗留区域的空调室内设计参数符合表 1-6 的规定。

人员长期逗留区域空调室内设计参数 表 1-6

类别	热舒适度等级	温度(℃)	相对湿度(%)	风速(m/s)
供热工况	I 级	22~24	≥30	≤0.2
	II 级	18~22	—	≤0.2
供冷工况	I 级	24~26	40~60	≤0.25
	II 级	26~28	≤70	≤0.3

注：I 级热舒适度较高，II 级热舒适度一般。

(2) 人员短期逗留区域空调供冷工况室内设计参数宜比长期逗留区域提高 1~2℃；供热工况宜降低 1~2℃；短期逗留区域供冷工况风速不宜大于 0.5m/s；供热工况风速不宜大于 0.3m/s。

上述计算与新《民规》的内容有一定的出入，其主要影响因素是服装热阻的选取不同，表 1-6 的数据计算所选择的冬季服装热阻偏低。

从表 1-4、表 1-5 中还可看出，室内温度、湿度对热感觉影响的程度不同，室内温度对热感觉的影响要比湿度影响程度大。因此在一定的温度范围内，相对湿度可以在较大的范围内变化。

1.1.4 有效温度 ET^* (Effective Temperature) 与 ASHRAE 舒适区

有效温度 ET 的定义是：“干球温度、湿度、空气流速对人体温暖感或冷感影响的综合数值，该数值等效于产生相同感觉的静止饱和空气的温度”，有效温度过高地估计了湿度在低温下对凉爽和舒适状态的影响。

新有效温度 ET^* 出现在 ASHRAE 舒适标准 54-74 和 ASHRAE 的 1977 年版手册基础篇中，其数值是通过对着身 0.6clo 服装、静坐在流速为 0.15m/s 的空气中的人进行热舒适实验，并采用相对湿度为 50% 的空气温度作为与其冷热感相同环境的等效温度而得出的，即同样着装和活动的人，在某环境中的冷热感与在相对湿度为 50% 空气环境中的冷热感相同，则后者所处环境的空气干球温度就是前者的 ET^* 。该指标只适用于着装轻薄、活动量小、风速低的环境。

在图 1-1 中，虚线部分为有效温度线，在该线上，虽然温湿度值不同，但热感觉相同，相对湿度 50% 对应的空气温度为该线不同位置的有效温度。图中阴影部分为 ASHRAE 舒适标准 54-74 的舒适区，适用于服装热阻为 0.8~1.0clo、坐着但活动量稍大的人。图中另一块菱形面积是美国堪萨斯州立大学通过实验得到的舒适区，其适用条件是服装热阻为 0.6~0.8clo 坐着的人。两块舒适区的重叠范围是推荐的室内设计条件。

从图 1-1 可以得出以下分析结果：

- (1) 在其他条件相同时，适当增大温度、降低相对湿度可获得相同的热感觉。
- (2) 在焓湿图中，虽然有效温度线上的热感觉相同，但在该线上的焓值不同，为了实现室内状态点所需消耗的能量就会不同。
- (3) 在每个舒适区内，温、湿度变化范围较大，尤其是湿度的变化较为显著。在阴影区内，温度约为 22.5~26.5℃，湿度约为 20%~70%；在菱形区内，温度约为 24~

27℃，湿度约为 20%~80%。

1.1.5 湿度的作用

湿度影响皮肤和黏膜的水分蒸发，反过来，水分蒸发又影响人体热平衡、人体温度和热感觉。当皮肤的水分蒸发受到影响时，皮肤温度会改变，人体能直接感受到这种热感觉的变化。人体水分蒸发由人体和空气中水蒸气的压力差决定。一个标准成年人穿着长裤、长衫在 24℃，50% 相对湿度的环境中休息时会向环境中失去 32g/h 的水分。在这些水分中，其中 12g/h 是从呼吸系统失去的，而其余 20g/h 是经干燥皮肤扩散出去的。

如果从能量的角度来看，这些蒸发散热 (21W) 占到静止状态人体散热 (105W) 的 20%^[7,8]。由于人体此时不做有用功，所有新陈代谢产生的热都需要排放到环境中去，所以其余 84W/h 的热量要通过热传导、对流与辐射的方式传递到环境中去。如果环境在 24℃ 下将湿度由 50% 降到 20%，人体水分蒸发速率将增加到 38g/h，通过蒸发散热的热量增加到 26W，相当于总散热量 (105W) 的 25%。由于通过蒸发散热的热量增加，以干传热的方式散发的热量减少到 79W，此时皮肤温度降低了 0.3℃。结果人体在相对湿度为 20% 的环境中比在相对湿度为 50% 的环境中要感觉到稍微凉快点。相应地，如果要体会到从相对湿度为 50% 的环境变到相对湿度为 20% 的环境时的舒适感，环境温度需减小 1℃。

在干燥环境下，尤其是露点温度低于 0℃ 时，人们常常会抱怨鼻子、喉咙、眼睛和皮肤干燥。低湿会导致皮肤和黏膜表面干燥，而呼吸系统表面干燥后，导致鼻孔出血，纤毛自洁和噬菌活动减少，使人们更易患呼吸系统疾病。

在高湿环境中，在偏热的环境中人体需要出汗来维持热平衡，由于人体单位表面积的蒸发换热量下降会导致蒸发换热的表面积增大，从而增加人体的湿表面积，使皮肤“黏着性”增加从而增加不舒适感。

湿度对人体热舒适有一定的影响，但从 1.1.3 节的内容可以看出，在一定范围内湿度对热舒适的影响有限。所以在一些规范中对相对湿度规定的范围较大，在图 1-1 中舒适区内相对湿度的变化范围也很大。

室内相对湿度受室外气候影响很大，而我国幅员辽阔，气候差异悬殊。在夏季，国内一些地区的空调计算参数差别就很大。例如哈尔滨地区室外空调干、湿球计算温度为 30.3℃、23.4℃，相对湿度约为 55%；广州地区室外空调干、湿球计算温度为

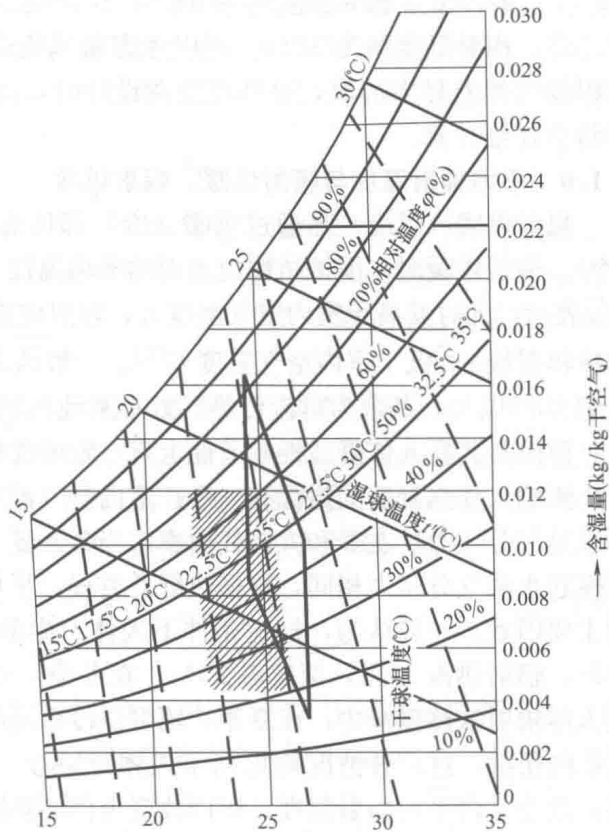


图 1-1 新有效温度和 ASHRAE 舒适区