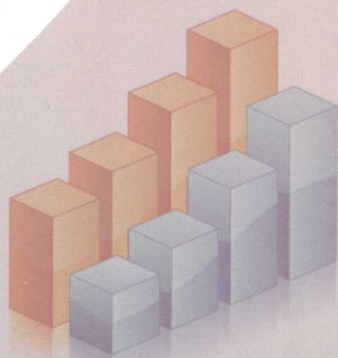


JIANZHU CHUANGZUOZHONG
DE JIENENG SHEJI

建筑创作中的节能设计

刘加平 谭良斌 何泉 著

中国建筑工业出版社



建筑创作中的节能设计

刘加平 谭良斌 何泉 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑创作中的节能设计/刘加平等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-10771-1

I. 建… II. 刘… III. 建筑-节能-建筑设计 IV. TU111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 024198 号

本书以建筑设计的过程为主线, 系统介绍了建筑设计过程中的节能设计理论与方法。全书分为绪论和正文两大部分。正文有四章, 前三章分别对场地设计、体形与空间设计、围护结构设计过程中的节能设计方法进行了介绍, 第四章着重介绍了节能的构造设计。书中突出系统的概念, 强调将节能设计贯穿到建筑设计的整个过程中去, 通过对相关实例的介绍, 使读者更容易理解。

本书主要是针对建筑师的, 为建筑师的节能建筑设计提供参考, 也适用于建筑学本科或研究生学习使用。

* * *

责任编辑: 王玉容

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 王金珠 王雪竹

建筑创作中的节能设计

刘加平 谭良斌 何泉 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 330 千字

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-10771-1

(18016)

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)

前 言

这是一本写给建筑师的书。

本书想回答的是建筑师与建筑节能到底有哪些关系？建筑师怎样才能轻而易举地设计出节能建筑？

进入 21 世纪，节能建筑已经引起了广泛的关注，而且在不久的将来可持续发展和能源保护必然将深入到建筑设计的核心。如果哪位建筑师在方案设计说明中没有绿色、生态和可持续发展等词句，那他就很不时尚了！生态建筑、绿色建筑、人居环境的可持续发展是前卫建筑师们最时髦的话题。建筑与环境保护、可持续发展的关系已变得和传统的要素，如功能、空间、形式等同等重要，而且将会影响到建筑最后的形象。我国建筑业目前正处于鼎盛时期，每年建成的房屋面积高达 16~20 亿 m^2 ，超过所有发达国家年建成建筑面积的总和，预计到 2020 年，全国房屋建筑面积将接近 2000 年数量的 2 倍。然而遗憾的是，不仅既有的近 400 亿 m^2 建筑中 99% 为高耗能建筑，新建建筑中 95% 以上仍属于高耗能建筑，单位建筑面积采暖能耗为发达国家新建建筑的 3 倍以上。我国建筑节能水平和国际先进水平相比，差距越拉越大。那么到底谁才能担当起实现节能建筑的主要责任呢？不是别人，正是广大的建筑师们。

所谓的“节能设计”是内在的、本质的考虑，而且这种考虑应该贯穿到整个建设过程，从最初的项目可行性论证、环境影响评估及环境策略的制定，到建筑设计、施工，直到建成后的运营管理，甚至还需要考虑到建筑拆除时的材料可回收使用性、垃圾管理等问题。

建筑节能设计对建筑师而言，具体的专业知识，如关于能耗的计算、通风与光照效果的设计等并不需要也很难有非常精深的掌握，但了解一些基本的技巧和要点对促进我们将生态意识转化为建筑的实体是非常必要的。建筑师绝不应该以建筑设计活动的复杂性为借口来逃避自己在生态保护方面所应负起的主导性责任。由于科技应用水平的提高以及改造生态环境的迫切，生态节能建筑将成为我国新一轮城市和建筑设计的主题。建筑师或其他建筑相关工作者有责任首先在自己的思想意识中树立起节能的概念，并积极地了解和学习，将生态的概念转化为建筑设计的方法，锻炼自己着眼于建筑的综合环境和气候因素，并将其转化为高品质的空间、高舒适度的环境和完美形式的力量。

目前“绿色建筑”在某些著名建筑院校里甚至仍然只被看作和当年的“解构主义”等类同的“一种时尚”。具体到中国，在建筑设计过程中真正进行了节能考虑的建筑仍然很少，很多建筑师还在为建筑形式的追求和探索精疲力竭，其中的原因是多方面的。柯布西耶在晚年讲过一句不太被重视的话：自然是对的，而建筑师错了（The nature is right, the architect is wrong）。

本书尝试从建筑设计的最初将节能设计的理论和手法贯穿其中，希望对建筑师的节能创作设计有所帮助，当然，要达到同样设计目的的手法还有很多，不限于书中所讲，建筑师们在掌握了基本的理论之后可以触类旁通，灵活运用，创作出既满足节能要求又具有时代风格的建筑形式。

本书由西安建筑科技大学刘加平、何泉和昆明理工大学谭良斌共同完成，全书由刘加平统稿，各章的著者分别为：

绪论：刘加平

第一、二章 谭良斌

第三章 谭良斌 何泉

第四章 何泉

此外西安建筑科技大学建筑技术科学研究所的诸位研究生参与了本书图表的绘制工作，在此表示衷心的感谢。

由于著者水平有限，书中难免还存在一些问题和不足之处，恳切希望使用本书的读者提出宝贵意见和建议，以利于今后的充实和提高。

目 录

绪 论	1
0.1 建筑热环境	3
0.1.1 室内热环境的构成要素及影响	3
0.1.2 室内热环境的需求	5
0.1.3 室内热环境综合评价	7
0.2 建筑能耗	10
0.2.1 建筑能耗的形成机理	10
0.2.2 建筑能耗的构成	14
0.3 建筑热环境的室外影响因素	16
0.3.1 太阳辐射	16
0.3.2 长波辐射散热	17
0.3.3 空气温度	17
0.3.4 风	17
0.3.5 空气湿度	18
0.3.6 降水	19
0.4 建筑设计对室内热环境的影响	19
0.4.1 整体及外部环境设计	20
0.4.2 合理的建筑单体设计	20
第一章 场地设计	25
1.1 选址	25
1.1.1 基地的选择和控制措施	25
1.1.2 坡地的选址	27
1.2 建筑总平面布局	30
1.2.1 总平面布局的影响因素	30
1.2.2 建筑群体布局模式	35
1.3 建筑朝向	36
1.3.1 日照和采光的影响	36
1.3.2 通风的影响	37
1.3.3 综合考虑	38
1.4 景观设计	42

1.4.1	一般原则	42
1.4.2	绿化	42
1.4.3	铺地	46
1.4.4	水体	47
1.5	室外活动场所的布置	48
1.5.1	室外空间设计的作用	49
1.5.2	室外空间设计的建议措施	51
第二章	体形与空间设计	53
2.1	建筑单体设计的原则	53
2.2	建筑体形	56
2.2.1	建筑体形的选择	57
2.2.2	体形的控制	62
2.2.3	关于体形选择应注意的问题	69
2.3	空间分区	70
2.3.1	从热利用角度考虑	70
2.3.2	从采光角度考虑	80
2.3.3	从通风角度考虑	88
2.4	蓄热体的布置	104
2.4.1	结构蓄热	106
2.4.2	掩土	106
2.4.3	卵石床	108
2.4.4	估算蓄热体的大小	111
第三章	围护结构设计	113
3.1	墙	113
3.1.1	一般做法	113
3.1.2	集热蓄热墙的立面处理	114
3.1.3	常见节能墙体做法	117
3.2	窗户(门)	119
3.2.1	侧窗	119
3.2.2	天窗	125
3.2.3	估算窗户的大小	133
3.2.4	改善窗的保温及密闭性	136
3.3	遮阳	137
3.3.1	可选择的遮阳方式	138
3.3.2	遮阳系数	145
3.3.3	遮阳设计中应综合考虑的因素	147
3.4	阳光间(阳台)	148

3.5	屋顶	151
3.5.1	保温隔热屋顶	152
3.5.2	种植屋面	152
3.5.3	蓄水屋面	153
3.5.4	双重屋面	153
3.6	地面	155
3.6.1	面层材料的选择	156
3.6.2	地面保温	156
第四章	节能构造设计	157
4.1	外墙	157
4.1.1	保温外墙	157
4.1.2	集热蓄热墙	166
4.1.3	隔热外墙	168
4.2	屋面	169
4.2.1	保温屋面	169
4.2.2	通风隔热屋面	171
4.2.3	种植屋面	173
4.2.4	反射屋面	174
4.2.5	蓄水屋面	174
4.2.6	蒸发降温屋面	175
4.3	门窗	175
4.3.1	节能门窗	175
4.3.2	活动保温装置	180
4.4	楼地面	181
4.4.1	低温辐射地板采暖	181
4.4.2	通风蓄热楼板	183
4.4.3	楼地面保温	183
附录 A	我国部分城市最佳、适宜和不佳的建筑朝向	186
附录 B	不同材料的太阳辐射吸收系数及反射系数	188
附录 C	各类建筑的采光系数	189
附录 D	遮阳板的 P 值	192
附录 E	估算公共建筑及集合住宅的通风得热/失热	197
附录 F	公共建筑主要空间的设计新风量	198
附录 G	几种遮阳设施的遮阳系数	199
	参考文献	201

绪 论

建筑的产生，原本就是人类为了抵御自然气候的严酷而改善生存条件的“遮蔽所(shelter)”，使其间的微气候适合人的生存。随着技术与文明的进步，在生存问题解决以后，今天人们追求的是舒适、健康的室内环境。不论在严寒的冬季，还是在酷热的夏季，具备舒适、健康的室内环境，是人类对生活及工作环境的基本需求。从古到今，大到封建帝王的宫殿，小到乡野庶民的居所，无不如此。良好的室内环境不仅有益于身体健康，最重要的是可以提高工作效率。因此，创造舒适、健康的工作和居住环境是建筑物的基本功能之一，是建筑师在设计时必须考虑的问题。

良好室内环境的获得可以通过两个方面来完成，如图 0-1 所示。第一个方面是建筑物自身的建筑学设计。如合理的朝向选择有利于充分利用太阳能，良好的平面和剖面设计有助于自然通风的形成等，也就是我们通常所说的被动式设计。从城市规划到建筑群体布局，从建筑平面、剖面设计到建筑构件的细部设计，尽量来减少冬季热量损失和夏季热量获取，并尽可能利用天然采光。当第一方面的工作完成后，室内环境达不到舒适要求或者在极端气候的情况下，我们可以通过第二个方面，也就是机械设备的辅助来完成。但是靠第二个方面来实现室内的热舒适是需要付出代价的，也就是能耗量的增加。第一个方面完成得越少，第二个方面耗费的能就越多。因此第一个方面决策的好坏将直接影响到建筑耗能的多少。好的建筑设计决策不需耗能或耗费少量的能源就能获得理想的室内环境，不佳的决策最终会使建筑耗能成双倍甚至是 3 倍的增加。可见，对节能的建筑设计来说，建筑方案设计的好坏将会直接影响建筑运行能耗的多少。也就是说，在整个节能建筑的设计中担负着主要责任的不是别人，正是建筑师。

但现在的很多设计往往是建筑师对改进建筑物自身以改善室内环境做得很少，有些甚

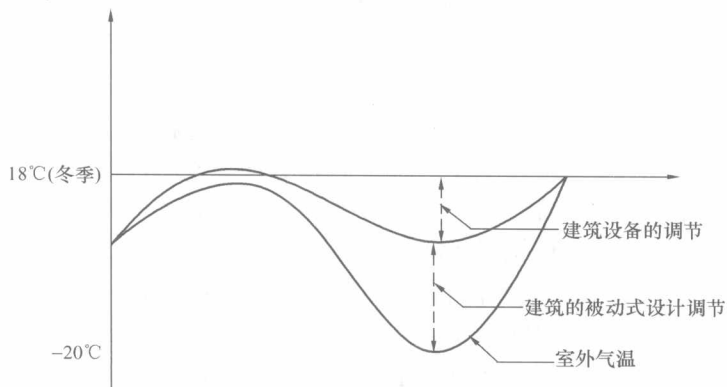


图 0-1

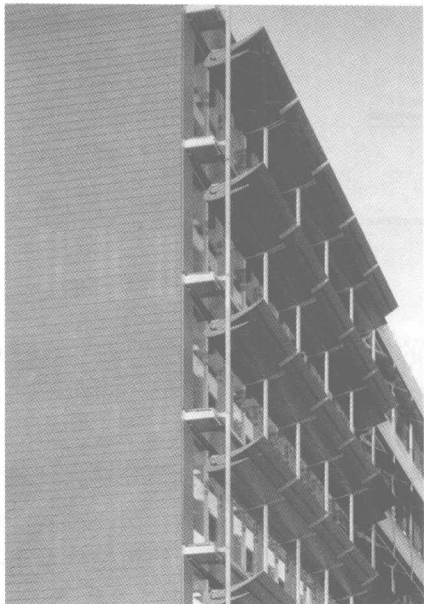


图 0-2 赫尔佐格设计的建筑工业养老基金会，遮阳构件是其外立面的主要特征

至漠不关心或者设计出完全与气候要求相违背的建筑，节能设计完全依赖由设备工程师在第二个层面上来解决建筑的室内环境问题。例如在酷热或严寒地区设计带有大片玻璃的建筑，迫使设备工程师们不得不采用那些吞噬能源的巨大采暖或降温设备来达到舒适的室内环境。但是，如果建筑师可以对第一个层面的设计加以重视，那么就可轻而易举地使机械设备投资降低 50%。如果再多花些心思的话，这种节省甚至有可能达到 90%。在某些气候条件下，建筑甚至可以完全设计成不使用机械设备的。而当建筑师真正可以把室内环境的好坏和建筑本身的设计结合起来考虑的话，形式往往也会变得更有意思。因为，不同于被隐藏起来的设备系统，像遮阳板这样的建筑构件对室外效果而言是有相当大的审美价值的，有些甚至可以成为该建筑的标志性设计，正如托马斯·赫尔佐格在建筑工业养老基金会扩建项目中（图 0-2）所做的那样。

建筑节能是一个系统工程。作为建筑师，应在方案前期就树立环保节能的观念，融合进一些绿色建筑的理念和技术，主动吸收采暖、通风、采光、照明、材料、声学等多个技术工种的专业意见，建筑的节能设计单靠后期的调整是很难完善的。在设计中，建筑师除了应该利用先进适用的节能方法和材料满足节能设计标准外，还必须从本专业出发，在总体规划上，应更多地关注地域和气候特点的研究。通过建筑物的朝向布局、日照分析、通风研究、绿化布置、透水地面等方式，在总体布局上、在生物气候设计上，控制和改善一些气候与环境要素对建筑的不利影响。在建筑设计中，应细致规划各种交通流线和交通设施，使流线方便快捷，减少人力物力的浪费，交通设施数量和位置适宜，提高其效率；应认真推敲室内空间的大小比例和各空间的位置关系，推敲其空气流动关系，避免能源的浪费；应关注使用一些替代的适宜技术与方法，如屋顶花园代替屋面隔热，立面造型结合遮阳等。因为建筑在构筑室内外空间的同时，也在创造一个供人居住、生活的环境，无论哪一种生活形态，都必须以舒适、有效、安全为前提。人居环境的形成和维持也必须以可持续的技术方向来完成，建筑节能则是可持续建筑永恒的主题。

相对于现代建筑来说，传统民居建筑在第一个层面上就解决得非常巧妙。它们在选址、朝向、平面布局、空间组合、建筑用材、构造处理等方面，积淀了千百年来人们适应与利用自然、保护自然，以最简洁灵巧且经济的方式创造居住环境的思想和经验。例如，我国北方地区的合院式民居的平面布局与空间组织利于冬季收集太阳能和防止冷风渗透，南方地区的庭院式民居则利于夏季的自然通风和蒸发吸热降温，而过渡地区的合院式民居，或同时具备自然采暖与降温特性，或有所偏重。以现代建筑技术科学的观点来审视民居建筑所呈现的这些效应发现，这是人们自发且巧妙地在民居建筑中考虑了自然条件和气候特征，运用了“烟囱效应”原理、相变蒸发（冷凝）吸（放）热原理、土壤蓄热（冷）

原理、太阳能热利用原理以及地表风场的分布规律等，创造出通过建筑空间与平面、院落与建筑体形的合理布局，院落与室内空气流场的合理组织的方法。通过这些“被动式”环境控制措施的运用，在国家自然科学基金资助下，从1996年开始，西安建筑科技大学绿色建筑研究中心在大量实地考察和测试研究的基础上，将这些“被动式”环境控制的科学原理和技术运用于建筑平面和空间的设计当中，在没有现代采暖空调技术、不需要运行能耗的条件下，创造出适宜的室内外物理环境。这个研究是开创性的，它有利于将我国优秀的传统建筑经验得以继承下去。

现代建筑为了满足社会发展的要求，需要在空间中筑起一个人工环境，并努力做到室内环境的舒适和稳定，因此需要花费昂贵的代价。建筑环境设计应该正视室外环境对室内环境的影响，通过相应的技术手段和控制方法达到对气候的尊重。利用气候条件的有利因素，调整环境对建筑的影响程度，以营造符合现代社会要求的更舒适、更有效的空间环境，从而成为真正人性化的好建筑。

0.1 建筑热环境

建筑物外围护结构将人们的生活与工作空间分为室内和室外两部分，因而，建筑热环境也就分为室内热环境和室外热环境。建筑物常年经受室内外各种热环境因子的作用，属于室外的因子如太阳辐射、空气的温湿度、风、雨雪等，统称为室外热环境；属于室内的因子如空气温湿度、生产和生活散发的热量与水分等，则称为室内热环境。

0.1.1 室内热环境的构成要素及影响

室内热环境的舒适要求是人对建筑环境最基本的要求之一。而热环境对人体热舒适的影响主要表现在冷热感。它取决于人体新陈代谢产生的热量和人体向周围环境散热量之间的关系。在人体与其周围环境之间保持热平衡，对人体的健康和舒适来说是首要的要求之一。这种热平衡即使在外界环境有较大变化的情况下，也能使体内核心组织的温度波动很小。这种热平衡的条件以及人体对环境的冷热感取决于多种因素的综合作用。影响室内热环境的物理环境因素主要包括空气温度、平均辐射温度、空气流速和空气湿度四个方面。

一、空气温度

在人的热舒适感觉指标中空气温度给人冷热的感觉，对人体的舒适感最为重要，室内最适宜的温度是20~24℃。在人工空调环境下，冬季温度控制在16~22℃，夏季控制在24~28℃时，能耗比较经济，同时又较为舒适。如果室内温度低于16℃，则人的手指温度将低于25℃，无法正常工作和写字；同时对人体的肌肉和骨关节有害。如果温度高于30℃，人体的活动也将受到不良影响。在讨论热环境时，如果只用到空气温度，一般认为其他三要素（湿度、风速和平均辐射温度）大致都是恒定的，此外，温度场的水平和垂直分布对人体的舒适性也会产生影响。

空气温度对人体的热调节起着主要的作用。房间内空气温度是由房间内的得热和失热、围护结构内表面的温度及通风等因素构成的热平衡所决定的，它也直接决定人体与周围环境的热平衡。周围温度的变化改变着主观的温热感（热感觉）。在水蒸气压力及气流

速度为恒定不变的条件下，人体对环境温度升高的反应主要表现为皮肤温度的升高与排汗率的增加，从而增加辐射、对流和蒸发散热。在室内一般情况下，气流不大，如果湿度很低，气温与周围壁面温度相差又不多，则身体热感觉可完全由气温决定。对于工程设计者来说，主要任务在于使实际温度达到室内计算温度。因此，室内空气温度是关系舒适与节能的重要指标。根据我国国情，在实践中推荐室内空气温度为：夏季，26~28℃，高级建筑及人员停留时间较长的建筑可取低值，一般建筑及人员停留时间短的可取高值；冬季，18~22℃，高级建筑及人员停留时间较长的建筑可取高值，一般建筑及人员停留时间短的可取低值。

二、空气湿度

空气湿度是指空气中含有的水蒸气的量。在舒适性方面，湿度直接影响人的呼吸器官和皮肤出汗，影响人体的蒸发散热。在舒适区内（即干球温度在16~25℃时），相对湿度在30%~70%范围内变化对人体的热感觉影响不大；但是，当人体温度升高到人体需要通过出汗来散热降温时，空气湿度将对热舒适造成较大的影响。一般认为最适宜的相对湿度应为50%~60%。相对湿度低于20%，人会感到喉咙疼痛，皮肤干燥发痒，呼吸系统的正常工作受到影响。在夏季高温时，如果湿度过高则汗液不易蒸发，形成闷热感，令人不舒适；在冬季湿度过大则产生湿冷感，同样令人不舒适。此外湿度过高且通风不好时，微生物很容易滋生。

空气的湿度对施加于人体的热负荷并无直接影响，但它决定着空气的蒸发力，因而也决定着排汗的散热效率，从而直接或间接地影响人体舒适度。相对湿度过高或过低都会引起人体的不良反应。对于人体冷热感来说，相对湿度的升高就意味着增加了人体的热感觉。高温、高湿对机体的热平衡有不利的影响。因为，在高温时机体主要依靠蒸发散热来维持热平衡，此时相对湿度的增高，将会妨碍人体汗液的蒸发。就人的感觉而言，当温度高、湿度大，尤其风小时人会感到“闷热”；而当温度高，湿度小时，人将会感到“干热”。一般情况下，室内相对湿度在60%~70%左右是人体感觉舒适的相对湿度。我国民用及公共建筑室内相对湿度的推荐值为：夏季40%~60%，一般的或人员短时间停留的建筑可取偏高值；冬季对一般建筑相对湿度不作规定。

三、风速

空气流动形成风，改变风速是改善热舒适的有效方法。舒适的风速随温度变化而变化，在一般情况下，令人体舒适的气流速度应小于0.3m/s；在夏季利用自然通风的房间，由于室温较高，舒适的气流速度也应较大。如广州、上海等地对一般居室在夏季使用情况的调查测试结果为：室内风速在0.3~1m/s之内多数人感到愉快；只有当室内风速大于1.5m/s时，多数人才认为风速太大不舒适。

室内的空气流速对改善人们的热环境亦有重要的作用，气流速度从两个不同的方面对人体产生影响。首先，它决定着人体的对流换热。气流可以促进人体散热，增进人体的舒适感；其次，它影响着空气的蒸发力，从而影响着排汗的散热效率。当空气温度高于皮肤温度时，增加气流速度会由于对流传热系数的增大而增加人从环境的得热量，从而可能对人体产生不利影响。因此，在高气温时，气流速度有一个最佳流速值，低于此值，由于排

汗率的降低而产生不舒适及造成增热；高于此值，对流得热量又会抵消蒸发散热量并有余，从而增热。在寒冷环境中，增加气流速度会增加人体向环境的散热量。我国对室内空气平均流速的计算值为：夏季 0.2~0.5m/s，对于自然通风房间可以允许高一些，但不可高于 2m/s；冬季 0.15~0.3m/s。

四、平均辐射温度

周围环境中的各种物体与人体之间都存在辐射热交换，可以用平均辐射温度来评价。人通过辐射从周围环境得热或失热。当人体皮肤温度低时，人就可以从高温物体（炉火或散热器）辐射得热，而低温物体将对人产生“冷辐射”。热辐射具有方向性，因此在单向辐射下，只有朝向辐射的一侧才能感到热。

室内平均辐射温度近似等于室内各表面温度的平均值。热辐射不受空气温度的影响，且与风无关。它决定了人体辐射散热的强度，进而影响人体的冷热感。在同样的室内空气热湿条件下，如果室内表面温度高，人体会增加热感；如果室内表面温度低，则会增加冷感。根据实验，当气温 10℃，四周壁面表面温度 50℃时，人体在其中会感到过热；当室内温度 10℃，而壁面表面温度为 0℃时，却会使人在室内感到过冷。我国《民用建筑热工设计规范》GB 50176—1993 对房间围护结构内表面温度的要求是：冬季，保证内表面最低温度不低于室内空气的露点温度，即保证内表面不结露；夏季，保证内表面最高温度不高于室外空气计算温度的最高值。

0.1.2 室内热环境的需求

人体通过新陈代谢从摄取的食物中制造能量，而新陈代谢率的大小则取决于身体的活动量。人工作时，只有一部分能量用来做机械功，其余的均转换为热能。如果要保持稳定的体温，体内的产热量应与对环境的失热量和得热量相平衡。在室内的人感到冷或热，都是由人体与周围环境之间的热平衡决定的。人体向周围环境散热的方式主要是通过辐射换热、对流换热和蒸发散热。如果人体放出的热量大于其新陈代谢的产热量时，人体就会感觉到冷；相反的，如果人体向环境释放出的热量大于新陈代谢产热时，热量聚积在体内就会感觉到热；当人体产热与放热相等时，体温则保持恒定。这种人体与周围环境之间的热平衡关系可用式 0-1 表示：

$$\Delta q = q_m \pm q_c \pm q_r - q_e - q_w \quad (0-1)$$

式中 Δq ——人体感热量，即人体得失净热量 (J)；

q_m ——人体新陈代谢过程的产热量 (J)；

q_c ——人体与周围空气的对流换热量 (J)；

q_r ——人体与周围表面的辐射换热量 (J)；

q_e ——人体蒸发散热量 (J)；

q_w ——人体做功消耗的热量 (J)。

人体的新陈代谢产热量 q_m 由人体活动量决定，如人在静坐时的新陈代谢率为 60W/m²（人体表面积约为 1.6m²），在中速行走时为 200W/m²。新陈代谢释放的能量除用于对外做机械功外，大部分都转化为人体内部热量，最后又以对流、辐射和蒸发的方式将热量

散发出去。

当人体与周围空气间存在温度差时，对流换热就会发生，热量由温度高的一方传向温度较低的一方。对流换热量 q_c 取决于体表温度、空气温度以及气流速度等因素。当体表温度高于空气温度时，人体向外散热，从而产生冷感， q_c 为负值。反之，则人体得热， q_c 为正值。

辐射换热量 q_r 主要是在人体表面与周围墙壁、顶棚、地面以及窗玻璃之间进行的，如果室内有火墙、壁炉、辐射采暖板之类的采暖装置， q_r 还应包括这些装置的辐射换热在内。当人体表面温度高于周围表面温度时，人体失热， q_r 为负值；反之，则人体得热， q_r 为正值。

人体的蒸发散热 q_e 是由有感的汗液蒸发、无感的呼吸和皮肤隐汗汗液蒸发散热量组成。由呼吸引起的散热量与新陈代谢率成正比。通过皮肤的隐汗散热量取决于皮肤表面和周围空气中的水蒸气压力差。有感的汗液蒸发是靠皮下汗腺分泌汗液来散热，它与空气的流速、从皮肤经衣服到周围空气的水蒸气压力分布、衣服对水蒸气的渗透阻力等因素有关。

人体得失热量取决于上述各项热量得失的综合结果。式 (0-1) 中，当 $\Delta q > 0$ 时，体温上升，人体产生热感；当 $\Delta q = 0$ 时，体温保持不变；当 $\Delta q < 0$ 时，体温下降，人体产生冷感。显然，当满足 $\Delta q = 0$ 时，人体处于热平衡状态，体温恒定 (36.5°C)。在这种情况下，人体健康不会受到影响，也是人体感觉热舒适的必要条件。但必须指出， $\Delta q = 0$ 并不代表人体就一定处于舒适状态。因为各种换热间的多种不同组合都可使 $\Delta q = 0$ 。也就是说，人们会遇到各种不同的热平衡，然而只有那些能按正常比例散热的热平衡才是舒适的。所谓正常比例是指散热量中辐射换热占 $45\% \sim 50\%$ ，对流换热占 $25\% \sim 50\%$ ，呼吸和无感觉蒸发散热占 $25\% \sim 50\%$ 。处于热舒适状态的热平衡，称之为“正常热平衡”。

当劳动强度和室内气候发生变化时，本来是正常的热平衡就有可能遭到破坏，但并不至于立即使体温发生变化，因为人体有一定的新陈代谢调节机能。在外部热环境变化时，人体首先能调整散热率的第一个生理机能是皮肤表层（即皮下层）内血流的调节，即血管的舒张与收缩的调节控制。其次，通过排汗达到蒸发散热的调节，乃是不论在炎热条件下，或在舒适环境中工作时主要的热调节机能。当环境温度过冷时，皮肤的毛细血管收缩，血流减少，皮肤温度下降，以减少散热量；当环境温度过热时，皮肤的毛细血管扩张，血流增多，皮肤温度升高，以增加散热量，甚至大量出汗增加蒸发散热量，以争取新的热平衡。此时的热平衡称为“负荷热平衡”。

在负荷热平衡下，虽然 $\Delta q = 0$ ，但人体却已经不处于舒适状态了。不过只要分泌的汗液量仍在生理允许的范围，虽不舒适，但仍是可忍受的。

人体新陈代谢的调节能力是有限的，不可能无限制地通过减少输往体表血量的方式抵抗过冷环境，也不可能无限制地借蒸发汗液来适应过热的环境。当室内热环境恶化到一定程度之后，终将超出人体调节机能范围，使得 $\Delta q \neq 0$ ，于是体温开始出现上升或下降的现象。虽然当体温变化不大、持续时间不长时，改变环境后仍然可以恢复到正常体温，但从生理卫生角度来说已经不允许了。因此，在人体机能调节过程中，其皮肤温度和汗液蒸发率超过了生理所允许的范围时，就会使人感到难以忍受。所以，人体在环境中感到舒适的条件是必须使其皮肤温度和汗液蒸发处于舒适的范围。

综合上述分析，人体的蒸发散热量随不同的空气温度、湿度以及气流速度而变化，对流换热热量与气温、气流有关，而辐射换热热量则随不同的周围壁面温度而变化。因此，室内人体的冷热感觉决定于空气温度、相对湿度、气流速度及室内平均辐射温度四个物理环境要素。该四项物理环境要素与人的活动量、衣着情况等个人因素的不同组合，决定了室内热环境的舒适程度，且热环境的四要素在对人体的热舒适影响方面，各要素间很大程度上是可以互换的。某一要素的变化所造成的影响常可为另一要素相应的变化所补偿。例如，机体由辐射所获得的热量可以和因气温升高所获得的热量相当；在热环境中湿度增高所造成的影响可为风速增高所抵消。

0.1.3 室内热环境综合评价

室内热环境及人体的热舒适性受各种因素的综合影响，对室内热环境的评价必须以人体热反应的规律为基础，根据环境物理因素，结合主观感觉与生理反应来考虑制定室内热环境的综合评价标准。

室内气候要素对人体热调节的作用是综合的。热环境的四要素对人体的热平衡均有影响，且在各要素间很大程度上是可以互换的，某一要素的变化可为另一要素相应的变化所补偿。各要素的不同组合，可以使人体的散热方式发生改变，影响人体的热调节。因此，不能单独根据气温或其他任何单一的某一要素来评价室内热环境，而必须用某种能够包括各种要素共同作用的综合指标进行评价。实际上，除上述四种室内热物理环境要素外，影响室内热环境评价的因素还有很多，例如劳动强度、衣着条件、人们的年龄、性别、体质、适应能力以及社会、经济等因素。室内气候与人的主观感觉和生理反应之间的关系是十分复杂的。近些年来，不少学者提出了各种不同的热环境评价指标，由于每个研究者都只能在有限条件下对少数受试者进行实验研究，因而各指标都难免有其局限性，下面简单介绍几种评价指标以作参考。

一、有效温度 (Effective Temperature, 简称为 ET)

有效温度指标是 1923~1925 年由霍顿、亚格罗及米勒等人在美国采暖与通风工程师学会 (ASHRAE) 的科学研究实验室中所提出的。该指标包含的因素有：气温、湿度与气流速度。

有效温度是人在不同温度、湿度和风速的综合作用下所产生的热感觉指标。它是以气流不动，即风速为 0，而相对湿度为 100% 的条件下使人产生某种热感觉的空气温度，来代表在不同风速，不同相对湿度，不同空气温度条件下使人产生同样的热感觉。研究者认为空气温度、湿度及气流速度诸因素的任何组合，如果得出同一个有效温度，则均能产生同样的热感觉，且与处在温度和该热指标值相同的饱和静止空气中所感受的热感觉是等同的。

二、新有效温度 (New Effective Temperature, 简称为 ET*)

有效温度 ET 指标没有考虑热辐射作用，这一点在大多数室内条件下无关紧要，可是在亚热带气候区内有热顶棚、热墙面和热楼面的房间里，以及当房间有直射阳光、大吸热表面的窗户时，则热辐射的作用就不可忽视了。

对于辐射温度及辐射效应自 1926 年以来巴克、达夫顿以及随后的盖奇等人先后都做了很多研究，并获得大量的试验数据和成果。1971 年由盖奇等人提出了所谓的新有效温度 ET^* ，自 1972 年以来被美国供暖、制冷与空调工程师协会（ASHRAE）正式采用至今。

新有效温度（ ET^* ）定义为在相对湿度为 50% 的假想封闭环境中起相同作用的温度。在此环境中，人与在实际环境中一样，在相同的皮肤温度和湿度的条件下，通过辐射、对流和蒸发进行同等数量的热交换，产生同样热感觉。此指标把室内气温、空气湿度和平均辐射温度三个参数的作用效果综合成了一个综合指标。在某一温度和湿度下的 ET^* 依赖于人们所穿的服装以及他们的活动量。在人体湿润度较低的情况下，空气湿度的影响很小， ET^* 线接近于垂直。当皮肤的湿润度随着人们活动量的增大时， ET^* 线就会变得越来越水平，湿度的影响也就越来越大。

三、标准有效温度（SET）

标准有效温度是盖奇等人结合了人体平均皮肤温度和皮肤湿润度来表示人体热平衡状态，根据生理条件制定的一项合理的热舒适指标。它是对新有效温度的进一步发展。这种指标对于任何环境条件、衣着及活动量均按均匀的环境条件（ $t_a = t_{mrt}$ ）来表示，并统一规定相对湿度为 50%，气流速度为 0.125m/s（即室内“静风”状态），活动量为 1met（58W/m²），内衣热阻为 0.6clo（相当于在室内穿一般薄衣衫）。在实际条件下，如果人们的感受与在这种标准条件下的相同，那么这个标准条件下的空气温度就是实际条件下的标准有效温度。因此，设在温度、湿度、风速、辐射等四个环境变量与衣着及活动量的任意组合条件下，标准有效温度（SET）为 5℃。这就意味着人在这种环境中的热感觉和在均匀环境温度为 5℃，相对湿度为 50%，在室内静风状态下，穿便衣人坐着休息的热环境一样。

四、预测平均热感觉 PMV-PPD 指标

为了在室内已知的气候条件下确定人体的热感觉及该环境的不舒适程度，房格尔又以人体热平衡的基本方程式以及心理生理学主观感觉的等级为出发点，提出了 PMV-PPD 评价方法和指标。PMV（Predicted Mean Vote）意为平均预测投票值。它是运用实验及统计的方法，得出人体热感觉与六个物理量之间的定量函数关系，然后把 PMV 值按人体的热感觉分为七个等级，定义为人体热舒适的七点标度。房格尔经过大量实验得出的各 PMV 值所对应的热感觉如表 0-1 所示。

PMV 值与人体热感觉

表 0-1

PMV 值	-3	-2	-1	0	1	2	3
人体热感觉	很冷	冷	稍冷	舒适	稍热	热	很热

房格尔提出的 PMV 指标综合反映了人的活动、衣着、环境的空气温度、相对湿度、风速与辐射温度等因素的关系及其综合影响，因此较为实用，已被国际标准化组织（ISO）编入国际标准（ISO-DIS7730）中。

房格提出 PMV 指标的同时,还提出了与之相关的另一个指标 PPD(Predicted percentage Dissatisfied),意为一大群人对给定的环境的热感觉表示不满意的百分率的预计值。

PMV-PPD 的变化曲线如图 0-3 所示。

在 $PMV=0$ 处, PPD 为 5%, 即最小的不满意率。这说明即使室内热环境为最佳热舒适状态, 仍还有 5% 的人感到不满意。国际标准化组织 (ISO) 对 PMV-PPD 指标的推荐值为: $PPD < 10\%$, 即 PMV 值在 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, 相当于在一群人中有 10% 的人感到不满意。这一指标, 只有舒适性空调建筑才可能达到, 而对于我国来说, 近期内还是难以达到的。适合于我国国情的热舒适指标还有待进一步研究和探索。

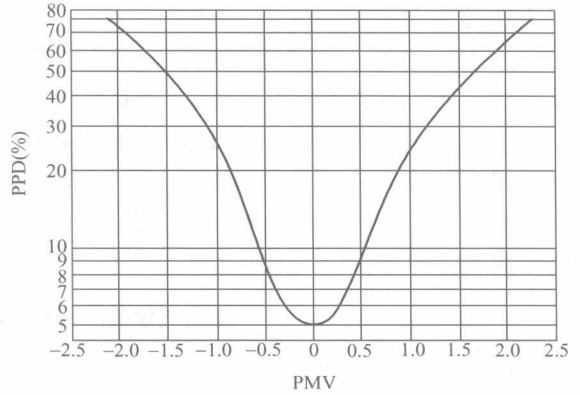


图 0-3 PMV-PPD 关系曲线图

五、自然通风条件下室内热环境的综合评价

当前我国城乡大量的公共建筑(如学校、医院、幼儿园)与住宅夏季仍广泛采用自然通风, 仅在房间防止过热的情况下才采用空气调节。因此, 建筑设计仍然要求防止太阳辐射、争取自然通风, 要求采取综合的防热措施。

自然通风房间与空调房间的室内热环境的变化是有差异的, 空调房间室内气候各因素的变化较为稳定, 而自然通风房间室内气候各要素受室外气候各因素变化的影响和制约较大。自然通风房间热环境评价的基本准则:

(1) 夏季室内气候应保证人体处于正常的热平衡和温热感。评价指标乃是改善当地住宅夏季室内气候的重要依据。

(2) 夏季通风条件下室内气候是气温、湿度、气流和辐射等因素的综合影响。根据调查资料分析, 夏季室内气候要素是按一定规律相互结合的。某种气温与一定范围的气流、湿度和辐射相结合后, 仍有可能以气温为代表来表示按一定规律组合的种种气象因素, 而气温仍是一项重要的评价指标。

(3) 各地室内气候评价标准的确定, 应充分考虑当地气候的特征及不同地区居民对气候的适应性问题。

从建筑发展的趋势来看, 创造舒适的热环境无疑是建筑师与工程师的一项重要任务。舒适是实现无负荷的热平衡, 且这种热平衡是在正常散热条件下实现的, 也就是休息中的典型人体的热反应处于热中性区。但是, 一方面由于经济原因, 在一定时期内大量的建筑标准还不能太高; 另一方面, 在实践中自然通风房间很难保持室内气候稳定, 保证长时间处于舒适的热环境中。同时, 从生理上说, 长期处于某种恒定的舒适环境中, 将使人体降低对气候变化的适应能力, 反而不利于健康。

为此, 在考虑室内气候的评价指标时以争取“舒适”的热环境, 允许“可忍受”的热环境作为确定的意向。因此, 一方面应当找出最适宜的气温指标(下限), 另一方面也应