

原书第2版

建筑通风

VENTILATION OF BUILDINGS SECOND EDITION

[英] Hazim B. Awbi 著

李先庭 赵彬 邵晓亮 蔡浩 译

VENTILATION OF BUILDINGS SECOND EDITION



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

Ventilation of Buildings

Second Edition

建筑通风

(原书第2版)

(英) Hazim B. Awbi 著

李先庭 赵彬 邵晓亮 蔡浩 译



机械工业出版社

本书共9章,涵盖了建筑通风的各个方面。其中包括人体舒适性
与通风、通风需求、空气渗透量计算和测量、空气射流和羽流原理、
空气末端设备、房间气流组织设计、自然通风、多元通风和低能耗通
风、计算流体力学在房间气流分析中的应用、室内气候测量等。本书
内容既包括了经典的理论,又包括了国际上该方向的最新研究进展;
既是一部适用于暖通空调专业本科、研究生教学的教材,又是从事该
方向研究的科研工作者很好的参考书籍。

Ventilation of Buildings (Second edition)/ by Hazim B Awbi / ISBN:
0-415-27056-1

Copyright © 2003 by Hazim B Awbi.

Authorized translation from English language edition published by Spon
Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体字版授权由机械工业出版社独家翻译出版并限在中
国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行
本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售
北京市版权局著作权合同登记号:图字 01-2007-6058

图书在版编目(CIP)数据

建筑通风/(英)奥比(Hazim B. Awbi)著;李先庭等译. —北京:
机械工业出版社,2011.3

书名原文: Ventilation of Buildings

ISBN 978-7-111-33236-7

I. ①建… II ①奥…②李… III ①房屋建筑设备:通风设备-
高等学校-教材 IV. ①TU83

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第015745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 版式设计:张世琴

责任校对:陈延翔 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年6月第1版第1次印刷

169mm×239mm·30 25印张·586千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33236-7

定价:59.00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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译者的话

Hazim B. Awbi 是英国雷丁大学的教授，是欧洲建筑通风领域最知名的专家之一。Awbi 教授是清华大学暖通空调专业赵荣义教授的老朋友，他向赵荣义教授提出了在中国出版其著作《建筑通风》一书的可能性。通过译者与机械工业出版社的联络，促成了这本书在中国的出版。

《建筑通风》一书涵盖了建筑通风的各个方面，既包括了经典的理论，又包括了国际上该方向的最新研究进展；既是一部适用于暖通空调专业本科、研究生教学的教材，又是从事该方向研究的科研工作者很好的参考书籍。

本书由清华大学建筑技术科学系的李先庭、赵彬、邵晓亮、蔡浩翻译，清华大学建筑技术科学系的张晓灵、朱奋飞、王嘉、赵阳、彭军、马晓钧、颜承初、韩林俊、郜义军、熊双、梁苡瑞、王彧、马勇、江岸、徐明、董俐言、张小芬、周德海、吴伟、李筱、蒋选、王利峰、代允闯、吴成斌、王超、张明磊、施珊珊、李沁笛等同学帮助整理了大量资料，在此一并表示感谢！

由于本书涉及非常多的内容，除专业通风知识外，还包括了热工测量、数值模拟、热舒适等诸多基础知识和专业基础知识，尽管译者已尽可能减少理解上的偏差，但许多内容的翻译肯定会存在不严谨乃至错误，恳请读者批评指正。

译 者

第2版前言

在过去的30年中，通风理念已经历了很大的变化。在该阶段的第一个10年间，人们把大量精力用于掌握建筑中空气渗透的机理，从而控制和减少无组织通风并且节约能源。在某些情况下，渗透空气的减少产生了与室内空气品质相关的问题，专业术语“病态建筑综合症”就出现了。在第二个10年间，人们致力于掌握病态建筑的成因，从而引进了新的通风概念，比如空气龄、新空气质量单位，并达成了增加室外新风量的共识。在第三个10年间，研究者和设计者考虑的重点放在了节能和保护环境意识上，比如自然通风的节能潜力以及局部环境的个性化控制。由于这些变化，已制订出的新的通风标准和导则来反映通风对保障室内环境质量的重要性。

自《建筑通风》第1版发行已经过去了近12年。在这期间，通风已经发展成为一门集科学研究和工程应用的综合学科。此前，通风被视为科学研究的边缘问题，而现在情况已经改变。如今该课题正吸引着全世界不同背景的知名学者，并不断开展通风新理论和高效、可持续发展的通风系统的研究。这种研究重点的转移并非偶然，而是由于人们对更高质量的室内空气环境的需求。

在第2版中，全面更新了第1版中的各章内容，同时还增加了一章关于自然通风的内容。在更新后的章节中包含了通风概念和气流分布的最新成果，一方面是想向读者展示该领域的最新进展，另一方面是突出现代通风系统设计的实际内容。

伴随着人们逐渐意识到通风是一门科学，一批高质量的研究工作已经相继完成。本版试图将一些高水平的研究纳入其中，但要把所有已完成的研究工作都包含在内显然是不现实的，希望不会因此忽略其

中最关键和重要的内容!

最后,感谢所有在本版写作中提供研究数据和图表的同仁,感谢 Michela Marchetti 帮忙绘制一些 CAD 图作为新的插图。

Hazim B. Awbi

2002 年于英国雷丁市

第 1 版前言

空调通常是指建筑中的采暖、制冷和湿度控制，它不仅包括热负荷和冷负荷的计算，还包括冷热站部件、风道和控制系统的设计。另一方面，通风则是指向建筑物中供应充足的室外新风，用于人员呼吸以及稀释建筑中人员、设备和材料产生的污染物浓度。不仅空调建筑中需要通风，非空调建筑也同样需要。室内污染物的稀释效果不仅受送入建筑中的室外空气数量和质量影响，还受室内空间中气流分布形式的影响。气流分布的方式也是任何一个空调系统的重要内容。在本书中，重点将放在后两个主题上面，即建筑中室外新风量的量化和通风气流分布。

在过去的 15 年中通风理念经历了很大的变化。在这个时期的第一阶段，为了控制（通常是减少）无组织通风和节约能源，人们主要把精力用于掌握建筑中空气渗透的机理。在某些情况下，渗透空气的减少产生了一些与室内空气品质相关的问题，专业术语“病态建筑综合症”就出现了。在这个时期的第二阶段，人们共同致力于掌握病态建筑的成因，从而引入了 P. O. Fanger 教授提出的两个空气品质新单位，即 olf 和 decipol，并达成了增加室外新风的共识。由于这些变化，一些通风标准，原来建议减少人员新风要求，现在不得不在原标准推荐值基础上增加新风量。为了满足目前的需求，新 ASHRAE 标准 62—1989 将原来每人最少 2.5L/s 新风量增加到 7.5L/s ，即增加了 3 倍。

构思本书的目的是完善而不是重复暖通空调（HVAC）手册的内容，诸如 ASHRAE 和 CIBSE 发布的手册。在合适的地方给出设计问题旨在扩展读者在本课题下的视野。本书还包括了在通风需求、热舒适、室内空气品质和室内气流分布方面的最新进展。它主要是为建筑环境与设备领域的从业者、建筑师、学习或从事暖通空调或建筑设备研究的研究生以及建筑设备专业本科生而服务的。本书假定读者已经熟悉流体流动和传热的基本知识以及建筑围护结构热特性相关的知

识。但是,第7章还要求一些用于描述流体湍流流动和传热过程的关于偏微分方程的高等知识。

第1章较详细地介绍了热舒适和室内空气品质 (IAQ) 的理论和实践知识,包括这些领域的最新进展,这些进展大部分是基于 Fanger 和他助手的相关工作。第2章和第3章描述了不同人员情况下确定通风量需求的步骤、确定空气渗透率的方法以及被动技术和防排烟的设计。第4章和第5章略述了不同类型的空气射流理论,包括浮升力、Coanda 力和障碍物的影响,以及实际中应用的各种末端的空气动力学特性。第6章较详细地给出了用于空气流动的物理模型,探讨了各种流体和传热参数对建模过程的影响;这一章还包括了小尺度和原型模型测量的案例,以及不同室内气流分布方法的设计步骤。第7章介绍了用于通风和房间空气流动的计算流体力学 (CFD) 方法,给出了最新发表的一些研究成果,展示了该领域通风研究的快速发展。第8章介绍了温度、辐射温度、湿度、压力、风速、风量、热舒适、室内污染物浓度和空气流动可视化的测量方法。

本书向读者提供了其他出版物经常忽视的领域的一些最新进展。当然本书的最终目的是为了设计出更好的通风系统,从而减少近年来大众对暖通空调系统日益增加的抱怨。最后,鉴于智能建筑在未来会频繁地提及,希望本书能够为这些建筑的通风系统设计者提供必要的知识。

Hazim B. Awbi

于1991年

目 录

译者的话

第2版前言

第1版前言

第1章 人体舒适性与通风 1

1.1 引言 1

1.2 热平衡方程 1

1.3 环境指标 8

1.4 热舒适模型 11

1.5 热不舒适 19

1.6 室内空气品质 31

参考文献 38

第2章 通风需求 42

2.1 引言 42

2.2 室内污染物 43

2.3 新风量 58

2.4 换气效率和空气龄 70

2.5 通风系统的分类 74

2.6 通风系统的能耗 80

参考文献 84

第3章 空气渗透量计算和

测量 88

3.1 引言 88

3.2 建筑空气渗透特征 88

3.3 空气渗透量计算与模型 97

3.4 空气渗透的测试 110

参考文献 121

第4章 空气射流和羽流原理 ... 123

4.1 简介 123

4.2 自由空气射流 123

4.3 贴壁射流 134

4.4 浮力的作用 140

4.5 射流干涉(Jet interference) ... 147

4.6 羽流 155

参考文献 164

第5章 空气末端设备 167

5.1 简介 167

5.2 空气扩散术语 167

5.3 空气末端设备的性能 169

5.4 空气末端设备的类型 178

5.5 空气末端设备的选择 193

参考文献 199

第6章 房间气流组织设计 200

6.1 引言 200

6.2 模型研究 200

6.3 案例研究 236

6.4 设计步骤 246

参考文献 267

第7章 自然通风、多元通风和

低能耗通风 271

7.1 引言 271

7.2 风特性 271

7.3 风压通风 275

7.4 热压通风 281

7.5 风压和热压联合通风 285

7.6 自然通风开口的特征 285

7.7 自然通风策略 290

7.8 自然通风与机械通风结合的

多元通风 302

7.9 消防通风 305

参考文献 310

第 8 章 计算流体力学在房间气流 分析中的应用 313

- 8.1 引言 313
- 8.2 输运方程 313
- 8.3 湍流模型 317
- 8.4 输运方程的求解 328
- 8.5 房间空气运动的 CFD 应用 ... 348
- 参考文献 399

第 9 章 室内气候测量 407

- 9.1 引言 407
- 9.2 空气温度测量 407
- 9.3 辐射温度测量 413
- 9.4 湿度测量 419
- 9.5 压力测量 421
- 9.6 气流速度测量 424
- 9.7 体积流量测量 435
- 9.8 热舒适测量 444
- 9.9 空气污染物的测量 446

- 9.10 示踪气体测量 450
- 9.11 气流可视化 452
- 参考文献 457

附录 A 空气渗透量计算

软件 460

- A.1 空气渗透发展算法(AIDA, Air
Infiltration Development Algor-
ithm) 460
- A.2 劳伦斯伯克利实验室模型
(LBL, Lawrence Berkeley
Laboratory) 463
- A.3 AIOLOS 模型 463
- A.4 COMIS 模型 464
- A.5 CONTAMW 模型 464
- 参考文献 465

附录 B “CFD 软件 466

缩略语 468

第1章 人体舒适性与通风

1.1 引言

通风系统的作用是为通风区域提供一个可接受的微气候。在本书中，微气候涉及热环境和空气品质。在设计一个房间或建筑的通风系统时必须考虑这两个因素，因为它们是保障室内人员舒适和安全以及工业过程性能的最重要的内容。在现代技术型社会中，人们有90%以上的时间是在人工环境（如住房、车间或交通工具）中度过的。自20世纪70年代初以来人们采取了一系列的节能措施，这些措施使得人工创造的“内部”或“室内”环境发生了根本性的变化，这些变化中有些是积极的，有些则是消极的。在积极的方面，通过提高围护结构绝热性和采用更先进的空调或供热系统的设计，使得热舒适水平的提高成为现实；而在消极的方面，室内空气品质恶化得日益严重，尤其是在空调建筑中^[1]“病态建筑综合症”一词已成为节能时代的代名词。这些室内空气品质问题与设备的维护差、室内产生的污染物含量高、室外新风量少等因素有关。

通风系统的设计者和运行者应当熟悉室内环境所需要的舒适性要求和空气品质，这就要求他们具备人体与室内环境热平衡，影响热舒适和不舒适的因素，以及人们能够忍受的室内污染物含量等方面的知识。近年来，在建筑环境的这些重要方向，已发表了一大批文章，特别是斯堪的纳维亚（丹麦、挪威、瑞典、冰岛）和美国的文章。本章第一部分将介绍在热舒适和空气品质方面所做的一些基础工作，第二部分将介绍一些最新的进展。本章是本书其他章节的支撑。

1.2 热平衡方程

1.2.1 人体热调节

热调节的主要作用就是维持人体中具有大量重要器官的核心区在一个比较窄的温度范围中，该温度范围对于核心区的正常运作至关重要。人体温度控制中心是下丘脑，它与大脑中的热感受器、皮肤以及人体的其他部分（如肌肉）等相连接。下丘脑接收来自温度传感器的神经脉冲，并将此信息协调至不同的人体器官，以维持恒定的人体核心区温度。人体热感受器对于温度变化非常敏感，可探

2 建筑通风

测出小至 $-0.004 \sim +0.001\text{K/s}$ 的温度变化率。温度调节是通过控制新陈代谢产热速率、控制血液流速、出汗、肌肉收缩而完成的，在特别冷的情况下还可以通过颤抖完成温度调节。正常情况下，人体核心区温度 t_c 约为 37°C ，这个温度一般保持不变，除非是外界环境温度发生了变化，如图 1.1 所示^[2]。图中展示了在某一环境温度以下时维持恒定的核心区温度的温度调节机制的功能，但超过此环境温度后核心区温度便不能再维持恒定，因为此时出汗的蒸发冷却效果不明显了。从图 1.1 还可以看出，核心区的温度并不总是常数，它取决于人体的活动量，即随着新陈代谢的增加而上升，在特别大的活动量时核心区温度可高达 39.5°C 。

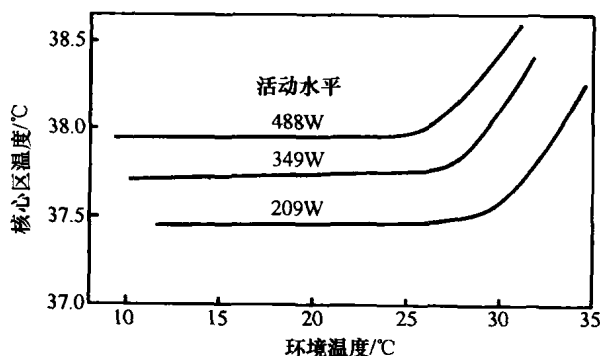


图 1.1 三种活动水平下核心区温度与环境温度间的关系

虽然人体核心区温度在很大的外界温度范围内几乎保持恒定，但皮肤温度却随着环境温度的变化而变化，而且人体不同部位的皮肤温度通常也是不同的。然而，当人体处于热平衡和舒适状态时，整个身体皮肤温度的变化会减小。图 1.2 给出了裸体时人体平均皮肤温度 t_{sk} 随环境温度的变化关系，图中也给出了核心区温度以便进行比较^[3]。

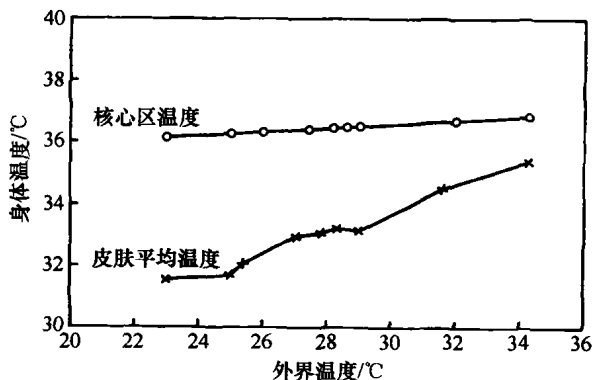


图 1.2 裸体时皮肤平均温度和核心区温度随外界温度的变化关系

1.2.2 人体与环境间的传热

人体的热平衡方程通过人体新陈代谢的产热、对外做功和人体向外界环境的散热三者之间的平衡而得到，人体向外界环境的散热包括蒸发、呼吸以及服装表面的热传导、辐射、对流。即：

$$S = M + W + R + C + K - E - RES \quad (1.1)$$

式中 S ——人体蓄热率 ($\propto \Delta t_b / \theta$, θ 是时间), W ;

M ——新陈代谢率, W;

W ——机械功, W;

R ——辐射换热量, W;

C ——对流换热量, W;

K ——导热换热量, W;

E ——蒸发热损失, W;

RES ——呼吸热损失, W。

S 为正值表明人体温度 t_b 将会上升, S 为负值表明 t_b 将会下降, 而当 $S=0$ 时则表明人体处于热平衡状态。公式右侧各项的计算表达式将在下面介绍, 但对于每一项的详细估值读者可参阅 Fanger^[4] 和 McIntyre^[5] 的相关著作。

(1) 新陈代谢量 (M) 它是人体氧化食物时产生的热量, 其值取决于每个人的食物和活动量, 可以用下式估算:

$$M = 2.06 \times 10^4 \dot{V} (F_{oi} - F_{oe}) W \quad (1.2)$$

式中 $\dot{V}$ ——空气吸入量, L/s;

F_{oi} 和 F_{oe} ——吸入和呼出空气中的氧气含量。 F_{oi} 的值通常是 0.209, 而 F_{oe} 则随食物中用于代谢的食物组分而变化; 对脂肪食物来说, $F_{oe} \approx 0.159$; 对碳水化合物来说, $F_{oe} \approx 0.163$ 。每平方米人体表面积的新陈代谢率可以用式 (1.2) 计算得到。下面是 Du Bois 的人体面积公式:

$$A_D = 0.202 m^{0.425} H^{0.725} m^2 \quad (1.3)$$

式中 m ——人体质量, kg;

H ——人体身高, m。

对于一位体重 70kg、身高 1.73m 的一般人来说, $A_D = 1.83 m^2$ 。新陈代谢率通常采用“met”为单位, 即一个放松、静坐人的新陈代谢量为 $1 \text{ met} = 58.15 \text{ W/m}^2$ 。表 1.1 中给出了典型活动量下的新陈代谢率。

表 1.1 不同活动量下的新陈代谢率^[6]

活动	新陈代谢率	
	W/m ²	met
斜躺	46	0.8
静坐	58	1.0
放松站立	70	1.2
坐着的活动 (办公、住宅、学校、实验室)	70	1.2
站立的活动 (购物、实验室、轻工业)	93	1.6
站立的活动 (商店导购、家庭劳动、机械加工)	116	2.0
中等强度的活动 (重机械加工、修车厂工作)	165	2.8

4 建筑通风

(2) 对外做功 (W) 如果人体对外做功, 新陈代谢就会增加以提供额外的能量来完成此项工作。由于人体的热效率 (W/M) 比较低, 即小于 20%, 每产生 1W 的功新陈代谢就需要增加 5W。人体产生的绝大多数的功都是正的; 然而在有些情况下也会产生负功, 比如人体沿一陡坡向下行走, 此时一部分势能会在肌肉中转化为热能以维持人体匀速行进。

(3) 辐射 (R) 辐射热交换发生在人体表面 (服装和皮肤) 与周围环境表面, 比如房间内表面、热源或热汇。辐射换热可以用斯忒藩-玻耳兹曼方程计算:

$$R = f_{\text{eff}} f_{\text{cl}} \varepsilon \sigma (t_{\text{cl}}^4 - \bar{t}_r^4) \text{ W/m}^2 \quad (1.4)$$

式中 f_{eff} ——有效辐射面积系数, 即有效辐射面积与总着衣面积的比值;

f_{cl} ——着装面积系数, 即人体着衣面积与人体裸体表面积之比;

ε ——着衣人体的发射系数;

σ ——斯忒藩-玻耳兹曼常量, 即 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

t_{cl} ——服装表面温度, K;

$\bar{t}_r$ ——平均辐射温度, 即房间表面的有效温度, K。

式 (1.4) 中之所以用系数 f_{cl} , 是因为热传递是基于裸体人体的表面积, 即 Du Bois 面积 A_D 。由于人体的某些部分会遮挡其他部分, 系数 f_{eff} 的值对坐着的人为 0.696, 对站着的人为 0.725; 通常可用平均值 0.71。皮肤和服装的组合发射率 ε 大约为 0.97, 对长波辐射来说, 这一值与皮肤或衣服颜色无关。将 f_{eff} 、 f_{cl} 、 ε 和 σ 的值代入, 式 (1.4) 可简化为

$$R = 3.9 \times 10^{-8} f_{\text{cl}} (t_{\text{cl}}^4 - \bar{t}_r^4) \text{ W/m}^2 \quad (1.5)$$

平均辐射温度 $\bar{t}_r$, 可以通过面积、角系数和各房间表面的温度计算得到 (例如, 参见 Fanger^[4]), 也可以直接测量得到 (见第 9 章)。服装温度 t_{cl} , 取决于新陈代谢率、服装热阻和空气温度 (见后文)。

室内环境的温度范围通常很小 (一般为 $10 \sim 30^\circ\text{C}$), 这种情况下式 (1.5) 中的四次方可以用下面的线性公式代替:

$$R = f_{\text{cl}} h_r (t_{\text{cl}} - \bar{t}_r) \quad (1.6)$$

$$h_r = 4.6 (1 + 0.01 \bar{t}_r) \quad (1.7)$$

对于一般的室内状况, $h_r \approx 5.7 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

(4) 对流 (C) 人体与周围空气间的传热主要是对流, 对流可以是浮升力引起的自然对流, 也可以是人体与空气间的相对运动引起的强制对流。通用的对流传热方程为

$$C = f_{\text{cl}} h_c (t_{\text{cl}} - t_a) \text{ W/m}^2 \quad (1.8)$$

式中 h_c ——对流传热系数[⊖], $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

⊖ “对流传热系数”在现行的国家标准中已经改为“表面传热系数”, 本书暂不做修改。参见 GB 3100 ~ 3102—93 《量和单位》——编辑注。

t_a ——空气温度,℃。

对流传热系数 h_c , 取决于传热的方式。对于自然对流, 它可用下式计算:

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad (1.9)$$

对于强制对流, 它可用下式计算:

$$h_c = 12.1\sqrt{v} \quad (1.10)$$

式中 v ——人体与空气间的相对速度, m/s。

(5) 辐射和对流的组合 ($R + C$) 辐射和对流传热可以用式 (1.6) 和式 (1.8) 组合成一个简单公式来计算人体与周围环境间的显热传热量:

$$R + C = f_{cl} [h_r(t_{cl} - \bar{t}_r) + h_c(t_{cl} - t_a)]$$

该式可以简化为

$$R + C = f_{cl} h(t_{cl} - t_o) \quad (1.11)$$

式中 h ——辐射和对流组合传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

t_o ——操作温度,℃。

它们可由下式计算:

$$h = h_r + h_c \quad (1.12)$$

$$t_o = (h_r \bar{t}_r + h_c t_a) / (h_r + h_c) \quad (1.13)$$

操作温度可定义为平均辐射温度和空气温度以各自的传热系数为权的加权平均值。当空气速度 $v \leq 0.4 \text{ m/s}$ 且 $\bar{t}_r < 50^\circ\text{C}$ 时, t_o 近似等于空气温度和平均辐射温度的简单平均。操作温度是一个环境指标, 将在后面介绍。

(6) 着装导热 (K) 着装导热可用常规的导热公式计算:

$$K = h_{cl}(t_s - t_{cl}) \quad W/m^2 \quad (1.14)$$

式中 h_{cl} ——服装的热传导系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

t_s ——皮肤平均温度,℃。

服装的热传导系数用服装热阻 I_{cl} 的倒数代替。服装热阻的单位通常用 “clo” 表示:

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot K/W$$

因此

$$h_{cl} = 1/(0.155 I_{cl}) = 6.45/I_{cl} \quad (1.15)$$

式中, I_{cl} 的单位为 clo。

不同服装的 I_{cl} 值通常可按表 1.2 取用。服装面积系数 f_{cl} 与服装热阻直接相关, 可以用下式计算:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2 I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \geq 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (1.16)$$

平均皮肤温度 t_s , 可以用 Fanger^[4] 导出的关联了活动量的经验式估算, 表达式如下:

6 建筑通风

$$t_s = 35.7 - 0.0275(M - W)^\circ\text{C} \quad (1.17)$$

这个公式适用于 $1 < M < 4$ 。

表 1.2 总着装热阻^[6]

服 装	I_{cl}	
	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	clo
裸体	0	0
短裤	0.015	0.1
典型热带服装: 内裤, 短裤, 短袖开领衫, 轻质短袜和凉鞋	0.045	0.3
轻质夏装: 内裤, 轻质长裤, 短袖开领衫, 轻质短袜和鞋子	0.08	0.5
轻质工作服: 轻质内衣裤, 棉质长袖工作衬衫, 工作长裤, 毛袜和鞋子	0.11	0.7
典型的冬季室内服装: 内衣裤, 长袖衬衫, 裤子, 夹克或长袖毛衣, 厚袜和鞋子	0.16	1.0
厚实的传统欧式商业服装: 带长腿和长袖的棉质内衣裤, 衬衫, 包括裤子、夹克和半身大衣的套装, 毛袜和厚鞋	0.23	1.5

(7) 蒸发热损失 (E) 蒸发热损失一部分是由于水蒸气通过皮肤组织扩散 E_d , 一部分是由于皮肤表面的汗液蒸发 E_{sw} 。两种情况下均从皮肤处吸热, 而这过程控制了体温上升。水蒸气的扩散是一个持续不断的过程, 甚至在凉爽环境中也会发生, 但汗液蒸发仅发生在热环境中且人体活动量大于通常水平时。

扩散热损失取决于皮肤温度对应的饱和水蒸气压力 p_{ss} , 与周围空气水蒸气分压力 p_a 的差。Olesen^[3] 给出下列公式用于计算 E_d :

$$E_d = 3.05 \times 10^{-3} (p_{ss} - p_a) W / \text{m}^2 \quad (1.18)$$

式中, p_{ss} 和 p_a 的单位为 Pa。

饱和水蒸气压力可采用诸如 CIBSE 指南^[7] 中给出的公式来计算:

$$\log_{10} p_{ss} = 30.59051 - 8.2 \log_{10} t_s + 2.4804 \times 10^{-3} t_s - 3.14231 \times 10^3 / t_s \quad (1.19)$$

式中 t_s ——皮肤的热力学温度, K;

p_{ss} 的单位是 kPa。

在皮肤温度范围内 $27^\circ\text{C} < t_s < 37^\circ\text{C}$, 一个线性公式估算得到的 p_{ss} , 与蒸汽表中数据的误差在 3% 以内:

$$p_{ss} = 256t_s - 3373 \text{ Pa} \quad (1.20)$$

式中, t_s 的单位为 $^\circ\text{C}$ 。

式 (1.18) 和式 (1.20) 可以组合为:

$$E_d = 3.05 \times 10^{-3} (256t_s - 3373 - p_a) W / \text{m}^2 \quad (1.21)$$

p_a 可以应用空气温度和相对湿度的知识计算得到, 详见 2.2.9 节。 E_d 的值代表了最小的蒸发热损失。

McIntyre^[5]给出了 E_d 的另外一个表达式:

$$E_d = 4.0 + 1.2 \times 10^{-3} (p_{ss} - p_a) \text{ W/m}^2 \quad (1.22)$$

式中, p_{ss} 和 p_a 的单位均为 Pa。

皮肤的汗液蒸发是在热环境和高新陈代谢率下维持人体体温恒定的最有效手段。相应地, 汗液蒸发热损失就受到环境温度和新陈代谢的影响。当皮肤完全润湿时, 汗液蒸发的热损失最大, 可由下式计算:

$$(E_{sw})_{\max} = f_{pcl} h_e (p_{ss} - p_a) \text{ W/m}^2 \quad (1.23)$$

式中 h_e ——蒸发传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa})$;

f_{pcl} ——服装透水系数, 对于多孔的服装, 其值可用下式计算^[8]:

$$f_{pcl} = 1/(1 + 0.143h_e/h_{cl}) \quad (1.24)$$

式中 h_e ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

h_{cl} ——服装热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

式 (1.23) 中的系数 h_e 可以通过刘易斯关系式表达为对流传热系数 h_e 的函数:

$$h_e = 1.67h_c$$

因此

$$(E_{sw})_{\max} = 16.7f_{pcl} h_c (p_{ss} - p_a) \text{ W/m}^2 \quad (1.25)$$

上述公式中没有考虑服装的吸汗效果, 即通过服装纤维的毛细作用将汗液转移到衣服表面的过程。当存在服装的吸汗作用时, 汗液的蒸发发生在服装内部而不是皮肤表面。这就降低了汗液带走人体多余热量的效率, 从而就需要更多的汗液从皮肤表面带走相同的热量。出汗效率因而可以定义为:

$$\eta_{sw} = 1/(1 + h/h_{cl}) \quad (1.26)$$

式中 h ——辐射和对流组合换热系数。

于是出汗带走的实际热量变为:

$$E_{sw} = \eta_{sw} (E_{sw})_{\max} \quad (1.27)$$

Fanger^[4]根据实验测量结果得到了一个 E_{sw} 与新陈代谢率之间的关系式:

$$E_{sw} = 0.42(M - W - 58.15) \text{ W/m}^2 \quad (1.28)$$

这个关系式适用于 $1 < M < 4$ 。扩散热损失 E_d , 用于计算皮肤无汗时的蒸发热损失。然而, 当皮肤完全润湿时, E_d 完全可以忽略, 此时式 (1.25) 或式 (1.28) 直接用于计算 E_{sw} 。

(8) 呼吸热损失 (RES) 吸入的空气在通过呼吸系统时会被加热和加湿。显热和潜热的热损失与进入肺部的空气量成正比, 而进入肺部的空气量又与新陈代谢率成正比。显热损失可用下式计算:

$$S_{res} = 0.0014M(34 - t_a) \text{ W/m}^2 \quad (1.29)$$

式中 t_a ——环境空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。