

[日]木村建一 著

单 寄 平 译

空气调节的 科学基础

—中国建筑工程工业出版社—

空气调节的科学基础

[日] 木村建一著

单 寄 平 译

中国建筑工业出版社

本书是一本基础理论教科书, 前六章的内容主要论述建筑热工和空调冷热负荷计算方法, 包括太阳辐射、通过墙壁和楼板的定常导热、建筑物中的辐射和对流换热、窗进入的日射得热、照明发热及风和烟囱效应引起的渗入和渗出。第七章是前六章的总结和概括。第八章和第九章分别阐述空调的系统模拟和空调的计算机控制。这是70年代迅速发展起来的新技术, 它使空调技术问题的处理从原先的静态方法转入动态考虑。

本书内容较新, 取材丰富, 理论性强。可供高等院校研究生、科研工作者和有关工程技术人员阅读参考。

Ken-ichi Kimura
SCIENTIFIC BASIS OF AIR CONDITIONING
Applied Science Publishers Ltd
London, 1977

* * *

空气调节的科学基础

单寄平 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 97/8 字数: 220 千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

印数: 1—10,310册 定价: 1.50元

统一书号: 15040·3911

译者序

这是一本为研究生和空调工程师写的空调基础理论教科书, 1977年由英国应用科学出版公司发行, 列入由 H. J. 考文教授主编的一套建筑科学丛书中。本书作者木村建一先生是日本早稻田大学教授、工学博士, 对建筑热工、空调冷热负荷及太阳能利用的基本理论研究方面建树颇多, 富有创见, 1975年曾来我国进行过学术访问。

近年来由于译者从事空调基础理论研究工作的需要, 曾阅读了本书, 颇有兴味, 因此利用工余之暇, 把它译了出来, 希望能为从事空调理论研究的同行们提供一本值得阅读的参考书。

近十余年来世界空调技术发展飞速, 随着电子计算机的广泛应用, 围绕着节能和提高空调系统效率的基础理论有了新的开拓, 使计算日趋精确化, 更注重经济效益。本书前六章的内容主要围绕空调冷热负荷计算方法进行了探讨, 而在第七章中作了综合, 这项研究工作在我国亦已开展。第八章和第九章分别阐述空调的系统模拟和空调的计算机控制, 这是六十年代出现, 七十年代迅速发展起来的新技术, 它使空调技术问题的处理从惯用的静态方法转入动态考虑。而且由于最优化方法被引入空调技术领域, 从而可对设计方案实现优选。这方面的工作在我国今后必将获得广泛的发展。

此外, 增译了木村先生和小宫英孝合写的《相对于室温变位的除热量权系数的简化算法》一文(原文见日本《空

气调和·卫生工学会论文集》第6号, 1978年2月), 作为增补的章节, 放在本书正文之后。可以把它看作是本书第七章7-4节所述内容的一个延伸和发展, 作为本书作者的一个新的研究成果收录进来, 以供有兴趣钻研这方面问题的读者参考。

为了使读者易于理解书中的许多新概念和新内容, 特在适当的地方加上了一些注释。原书印错之处, 也一一作了订正, 并在附注中加以说明。

译者自知理论水平低, 译文和注释中错误的地方, 热诚欢迎读者们指正!

序

本书是为建筑科学、建筑工程及机械工程等专业的研究生而写的一本高等教科书，也是供从事空调实践的工程师使用的一本参考书。它论述了空调的科学性质，从基础理论到目前通用的应用技术。空气调节的目的是为建筑环境创造舒适的条件。但是，空气调节在消耗过量的初级能量方面也是有所失的。因此，为了获得最有效的空调设计，学习空调科学基础和能量守恒原理便成为很重要的事情。

空调的性能取决于各种不同的参数，而且也与许多不同方面的科学有关。例如，照射到建筑物表面上和通过窗透射进入的太阳辐射，对居住房间内的热环境就有着重要的影响，而太阳辐射的基础理论却属于物理学和环境科学。传热学是在机械工程和化学工程系讲授的，可是，在建筑物中到处存在的不定常工况和非线性传热以及一些建筑物中的传热，毕竟与力学体系中的那些基本传热有某些不同的特点。在建筑物结构内部的导热、沿着建筑物构件内、外表面上的对流换热以及封闭空间中表面之间的辐射换热有时也会产生相当复杂的问题。

过去，空调的教师们只好从不同学科领域来搜集适用于空调技术的资料，而在空调领域中，似乎未曾建立过系统的理论。另一方面，建筑师们又经常声称他们不懂得象空调之类的环境问题，这正说明在建筑院校中对空调的科学基础讲授得很不够。

如对空调的科学基础作一全面考察，便可发现确难将其系统地编入常规教程中。本书的内容主要集中于环境空间的热特性方面。前六章讲述估算空调热负荷的基础，而由第七章加以总结。第八章和第九章则论述工程特点和复习用于工程实际的基础理论。

本书的部分内容取材于作者用日文写的《建筑设备基础理论》一书，对该书出版者惠予准许转载这些内容，作者不胜感激。本书的原稿并不是直接由那些日文内容译成的，当然也把近来获得的各种新的研究成果包括了进去。

是 H. J. 考文教授1972年来日本访问后建议作者应该写这本书的。承蒙考文教授和他的同事 P. 史密斯教授和魏内尼·哈维阿特博士费心地审阅了手稿的初稿，并帮助修改了相当大部分的英语，我谨对他们表示衷心的感谢。在本书写作过程中，早稻田大学建筑系的井上宇市教授所给予的指导和鼓励是使我非常感激的。我也很感激加拿大国家研究院建筑研究所的 D. G. 斯蒂芬松博士和 G. P. 米塔拉斯先生对我在渥太华期间进行这一研究时所作的悉心指导，若没有他们珍贵的帮助，这本书是不可能出版的。最后也应向早稻田大学我的研究室中的十位研究生致谢，他们为本书绘制了供说明用的曲线图。

木村建一
于日本所澤市

目 录

绪论	1
第一章 太阳辐射	4
1-1 太阳常数和太阳光谱	4
1-2 太阳位置	8
1-3 直接日射	14
1-4 漫射日射	17
1-5 将总辐射分解为直接辐射成分和漫射辐射成分	21
1-6 曇天的日射	23
第二章 通过墙壁和楼板的不定常导热	32
2-1 不定常导热的基础方程	33
2-2 有限差分法	35
2-3 周期性定常导热	38
2-4 单位阶跃响应	45
2-5 脉冲响应和卷积	47
2-6 拉普拉斯变换解法	52
2-7 表面温度和表面热流的矩阵表达式	56
2-8 响应系数——定义和用途	60
2-9 响应系数的导出	62
2-10 响应系数的实际应用	70
2-11 Z变换	72
第三章 建筑物中的辐射和对流换热	76
3-1 表面放热系数	76
3-2 辐射放热系数	79
3-3 对流放热系数	82

3-4	大气辐射	84
3-5	建筑物外表面上的热平衡	87
3-6	用现场试验方法确定某个建筑物外表面的对流放 热系数	93
3-7	室内的辐射和对流换热	102
第四章	窗进入的日射得热	106
4-1	平板玻璃对日射的吸收、反射和透射	106
4-2	不同朝向玻璃窗的日射得热	112
4-3	日射得热引起的冷负荷的试验确定法	116
4-4	日射得热的冷负荷权系数	124
4-5	内侧具有活动百叶帘的窗的日射得热	128
4-6	活动百叶帘热特性的试验确定法	134
4-7	外遮阳再辐射效应的试验确定法	139
4-8	用权系数法对具有外遮阳玻璃窗日射得热的简化 计算法	146
第五章	照明发热对空调的影响	150
5-1	照度和照明产生的热量	151
5-2	照明与空调组合系统	156
5-3	具有回风装置的灯具排热效率的试验确定法	161
5-4	照明引起的冷负荷的理论	167
5-5	照明输入功率的冷负荷权系数	177
第六章	风和烟囱效应引起的渗入和渗出	185
6-1	孔口和缝隙的空气渗漏特性	185
6-2	风引起的渗入	187
6-3	烟囱效应原理	188
6-4	烟囱效应引起的渗入	190
6-5	风和烟囱效应的联合作用	194
第七章	空气调节的热负荷	196
7-1	得热和冷负荷	197

7-2	室内冷负荷的各个组成部分	199
7-3	室内冷负荷的算法	202
7-4	除热和室温变化	208
7-5	预调节负荷和预调节期	212
第八章	空气调节的系统模拟	221
8-1	空调的系统模型	222
8-2	双风道系统的模拟	226
8-3	空调部件模拟的例子	231
8-4	部分负荷下空调部件的性能	233
8-5	蓄热系统的模拟	237
8-6	热回收系统的模拟	243
8-7	太阳能集热器的模拟	245
8-8	太阳能采暖系统的模拟	249
第九章	空气调节的计算机控制	253
9-1	空调计算机控制用的系统模型	253
9-2	控制中的寻优方法	255
9-3	空调部件的开停控制	257
9-4	室外新风量的控制	259
9-5	预测控制	261
	相对于室温变位的除热量权系数的简化算法	268
	参考文献	301

绪 论

近百年来，人类在地球表面上的居住区域已变得相当广阔，致使自然环境产生了很大的变化。看来大自然正在不断地被人类用其所掌握的科学技术征服着。当人们学会用自己的设备和能量将环境改善到适合居住时，人们的活动范围自然就深入到居住条件较差的那些区域里去了。显然这是人类的进步，但是为了追求舒适而过度地使用矿物燃料，终将使市区环境产生热污染^①，并使来源有限的矿物燃料发生短缺。

现代社会中的市区环境是自然和人类之间相互作用的产物。从热性状 (thermal behaviour) 的观点来看，居住区的温度、湿度、空气流速和辐射已与出现人类活动以前的原始状态完全不同。图 0-1 通过东京八月份的日平均最高温度及一月份的日平均最低温度数据，对此提供了明显的证据。

如果要想使未来的建筑物不产生有害的影响，建筑师和空调工程师就必须了解市区环境的质量和性状。图 0-2 表明空调和其他建筑设备系统在各种环境的相互联系中所起的作用，这些外部环境供给那些建筑设备系统以能量，并接受这些建筑设备系统排出的废料。所供应的全部能量，如电力、油、燃气、煤及有压城市给水主要是取自周围环境，同时又排

① 原文为 thermal pollution，系指当炼钢厂、火电厂和原子能发电厂的冷却水等高温废水排放入江河湖海之后，对鱼虾蟹等水生动物造成恶劣影响的现象。一般来说，若水温上升 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，则鱼虾蟹之类由于体温失调便无法生存。所引起的这种现象，在国外统称之为热污染。——译者注

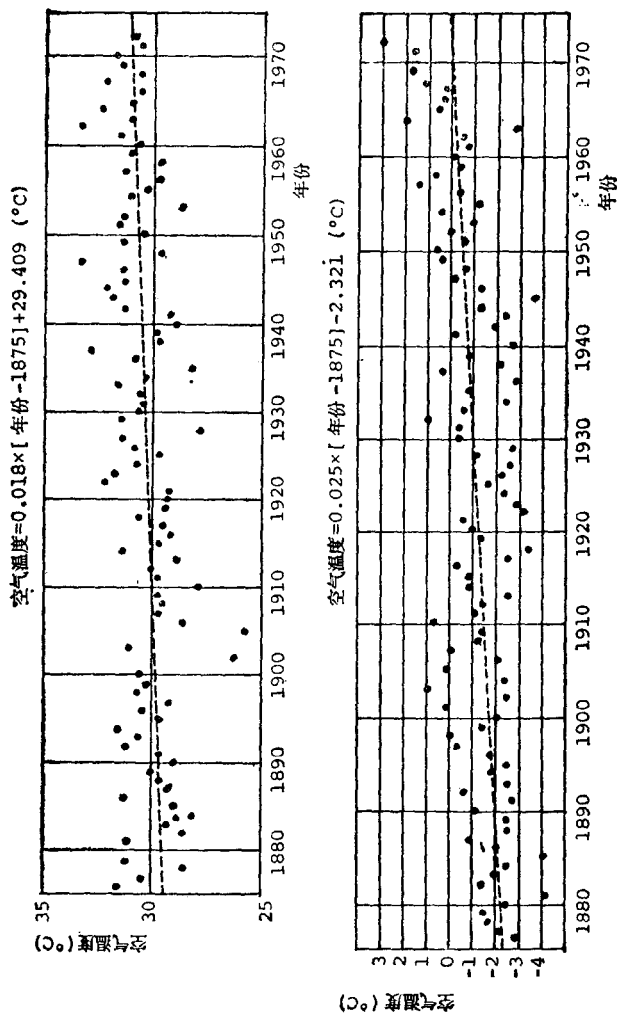


图 0-1 东京八月份的日平均最高温度值（上图）和一月份的日平均最低温度值的发展趋势

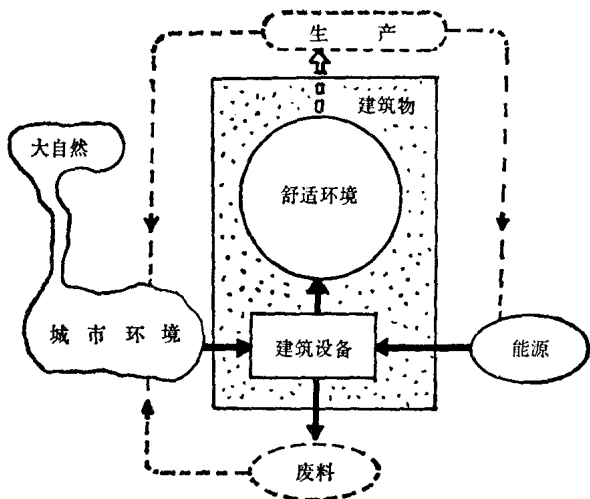


图 0-2 建筑设备和环境之间相互作用的关系

回周围环境，其中也有一部分未经有效利用就被浪费掉了。因此，自然环境便不能保持其天然状态，而如图中所示发生了变形，结果是，我们只有在远方才能看到作为尚未开发的“真正的自然”。从另一方面来说，在人为的舒适环境中的人类活动成了对新的能量需求的原因，并且由于工业生产过程中排出的固体、液体和气体废料而对环境造成了破坏作用。

空调的目的主要在于创造一个为人们所需要的舒适环境，不仅能给人们提供便于工作或休息的适宜条件，而且又能保护人们免受不卫生或有害环境的影响。从另一方面来说，空调系统又不得不在大自然的平衡遭到破坏的情况下运行。在学习空调的科学基础时，我们必须时常记着这些相互作用的关系，并且可以认为空调的作用乃是在于创造一个与原始自然环境不同的都市环境。

第一章 太 阳 辐 射

日射^①可以被认为是地球上生物的唯一天然能源，而世界上每天出现的所有天气型谱都可被认为是由太阳能所造成的。从空调的观点来看，日射大大有利于冬天的室内供暖；然而在夏季，它却产生了大量的冷负荷。因此，必须把日射作为空调的热能来看待。其次，为了估算被各种建筑材料吸收或透过的日射量，必须考虑日射的光谱特性。

本章将通过研究，以了解日射到达某一方位和斜度的建筑物表面的数量、时间和种类。

1-1 太阳常数和太阳光谱

为了空调热负荷计算，总得估算出地球上任何时间和地点的建筑物表面所接受的日射强度。为了估算给定条件下的日射强度，其关键值便是太阳常数。太阳常数可以定义为，当太阳与地球的距离采用年平均值时^②，在对着太阳光线的法线方向上大气外层的日射强度。

① 太阳辐射 (solar radiation) 为由太阳放射的一种辐射。但据《气象学词典》(世界气象学组织编，中央气象科技情报所译)的汉语译名规定，也可简称“日射”，故在本书中除个别情况外，一般均译日射。——译者注

② 即气象学上所指的太阳与地球的平均距离或称谓平均太阳距离。因地球轨道为椭圆形，故日射强度在近日点约大于远日点7%。日射强度既然因太阳与地球间的距离而不同，故太阳常数必须换算成太阳与地球的平均距离。所谓太阳常数是指不受大气影响的常数而言，实际上并不是一绝对不变的数。这种变化主要是由于太阳活动的变化；其次，测定计算时，并不能将大气影响完全去除也有关系。——译者注

世界上许多气象学家根据高空大气中观测到的数据，提出了一些太阳常数的推荐值。其中最可靠的莫过于由西卡耶卡拉 (Thekaekara) ^[1.1] 所提出的 1353 Wm^{-2} 这一数值，它是在几乎没有大气影响的条件下，主要以飞机、火箭和卫星所获得的数据作为依据的。

西卡耶卡拉还推荐了一个标准的太阳光谱，如图1-1所示。与波长相对应的一些辐照度 (irradiance) 值列于表1-1中，表中所有波长的辐照度的积分和等于 1353 Wm^{-2} 。由表中可知，大气外层全部日射量的99%集中在 $0.28 \mu\text{m}$ 至 $5 \mu\text{m}$ 的波长范围内。

太阳常数与光谱辐照度之间的关系可由下式给出：

$$I_0 = \int_0^{\infty} J(\lambda) d\lambda \quad (1-1)$$

式中， I_0 ——太阳常数 (Wm^{-2})； λ ——波长 (μm)； $J(\lambda)$ ——以 λ 为中心的狭小频带宽上的平均光谱辐照度 ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)。

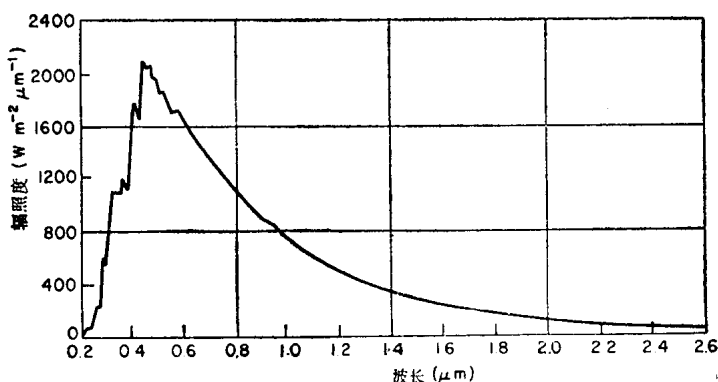


图 1-1 标准太阳光谱的辐照度曲线 (美国国家航空与宇航局) ^[1.1], 0.2 至 $2.6 \mu\text{m}$

太阳光谱辐照度——标准值^[1.1]

表 1-1

λ	E_{λ}	$E_{0-\lambda}$	$D_{0-\lambda}$
0.12	0.900	0.0048	0.0003
0.14	0.030	0.0073	0.0005
0.16	0.230	0.0093	0.0006
0.18	1.250	0.0230	0.0016
0.20	10.7	0.1098	0.0081
0.22	57.5	0.6798	0.0502
0.24	63.0	1.9356	0.1430
0.26	130	3.6516	0.269
0.28	222	7.6366	0.564
0.30	514	16.3816	1.210
0.32	830	30.0216	2.218
0.34	1074	50.3566	3.721
0.36	1068	71.9366	5.316
0.38	1120	94.7566	7.003
0.40	1429	110.0541	8.725
0.42	1747	151.839	11.222
0.44	1810	185.706	13.725
0.46	2066	225.321	16.653
0.48	2074	266.296	19.681
0.50	1942	305.766	22.599
0.52	1833	343.379	25.379
0.54	1783	379.979	28.084
0.56	1695	414.669	30.648
0.58	1715	448.874	33.176
0.60	1666	482.796	35.683
0.62	1602	515.469	38.098
0.64	1544	546.899	40.421
0.66	1486	577.159	42.657
0.68	1427	606.284	44.810
0.70	1369	634.284	46.879
0.72	1314	661.139	48.864
0.74	1260	686.909	50.769
0.76	1211	711.614	52.595
0.78	1159	735.314	54.346
0.80	1109	757.984	56.023

续表

λ	E_{λ}	$E_{0-\lambda}$	$D_{0-\lambda}$
0.85	990	810.434	59.899
0.90	891	857.329	63.365
0.95	837	900.509	66.556
1.00	748	940.184	69.488
1.10	593	1007.109	74.435
1.20	485	1060.809	78.404
1.30	397	1104.759	81.652
1.40	337	1141.009	84.331
1.50	288	1172.234	86.639
1.60	245	1198.909	88.611
1.70	202	1221.234	90.261
1.80	159	1239.259	91.593
1.90	126	1253.484	92.644
2.00	103	1264.909	93.489
2.5	55	1302.809	96.2903
3.0	31	1323.609	97.8277
3.5	14.6	1334.329	98.6200
4.0	9.5	1340.254	99.0579
4.5	5.92	1344.0351	99.33740
5.0	3.79	1346.3999	99.51219
10	0.2410	1352.1774	99.93920
15	0.0481	1352.7524	99.98170
20	0.015200	1352.8920	99.99202
30	0.002970	1352.9683	99.99765
40	0.000942	1352.9860	99.99887
50	0.000391	1352.9927	99.99946
100	0.00002576	1352.9990	99.99992
200	0.00000169	1352.9998	99.99999
400	0.00000011	1352.9999	99.99999
1000	0.00000000	1353.0000	100.00000

 λ —— 波长(μm); E_{λ} —— 以 λ 为中心的狭小频带宽上的平均太阳光谱辐照度(Wm^{-2}
 μm^{-1}); $E_{0-\lambda}$ —— 0 至 λ 波长范围内的太阳辐照度的积分和(Wm^{-2}); $D_{0-\lambda}$ —— 波长小于 λ 共同所占的太阳常数百分比;太阳常数 —— 1353Wm^{-2} 。