

曹叔维 编著

房间热过程 和空调负荷

上海科学技术文献出版社

房间热过程和空调负荷

曹叔维 编著

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

房间热过程和空调负荷

曹叔维 编著

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路 2 号)

全国新华书店经销

上海科技文献出版社昆山联营厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 13.75 插页 1 字数 332,000

1991 年 10 月第 1 版 1991 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—2,000

ISBN 7-80513-837-0/T·203

定 价: 9.80 元

<科技新书目> 249-295

序

进行空调房间的全年负荷模拟和建筑物的能耗分析，必须了解房间内的热量变化和转换过程以及现代负荷计算方法。现代的负荷计算方法建立在线性系统基础上。本书在简要介绍了线性系统概念之后，试图较为系统地叙述墙体热力系统和房间热力系统，尤其想把重点放在房间热力系统上，同时对房间的各种得热作了整理，补充讨论了一些在房间系统研究中所需要的参数。为了让读者能使用书中介绍的设计负荷计算方法，在附录中引入了完整的数据表。限于作者的水平，谬误之处难免，敬请读者批评指正。

本书原为近年来的上课讲稿，这次在亲友和同事们的鼓励支持下才得以整理成书。其间，贵州省建筑设计院孙延勋高级工程师曾给予许多鼓励和指教，并提供了谐波反应法的全部资料和数据；同济大学暖通教研室陈沛霖教授一直支持作者在这方面进行研究工作，给了许多帮助和指教，并推荐和提供了不少有关资料；茅清希副教授在百忙之中审阅了本书的全稿，提了许多宝贵意见，茅清希、张良珏副教授以及陈爱珍同志还帮助整理、抄写了部分书稿和绘制了全部插图。在此向他们表示衷心的感谢。

编 著 者

1990年9月

44V95/07

绪 言

人们为创造舒适的室内环境进行了长时期的努力,但是对房间围护结构和室内热量变化规律的了解是随着近代空调技术的发展而逐步深入的。关于房间热量变化过程的研究最终反映在墙体传热、房间冷热负荷和室内空气温度等的计算之中,其中尤其以夏季房间冷负荷的计算最具代表性。这方面的发展大致分为三个阶段。最先为现代空调理论打下基础的是被称为“空调之父”的美国人 Willis H. Carrier (1876—1950)。1911年 Carrier 发表了合理的温湿度公式和绝热饱和理论,这些公式和温湿度表成为现代空调理论的基础,但是直到二次大战前后,在研究室内热过程和保持室内热舒适环境的空调计算中并没有区分房间的得热量和房间冷负荷两个不同概念,把稳定传热计算作为房间负荷计算的主要方法,这一阶段可称为稳定传热计算时期。以 1946 年美国的 O.O. Mackey 和 L.T. Wight 发表当量温差法为标志开始了第二阶段:准稳态传热计算时期,他们用室外气温和太阳辐射的 Forier 级数展开式作为墙体导热方程的边界条件求解传热量,再用稳定传热计算形式来简化,得出当量温差的概念,并以此计算负荷。这个方法被 ASHRAE(美国采暖、制冷和空气调节工程师学会)采纳,成了此后 20 年内美国和西方国家的主要计算方法。50 年代初,苏联的 A.T. Школовер 等人提出了谐波分解的类似方程,并用衰减度和延迟时间来表示。我国是在解放后才开始有自己的空调事业的,因此这个方法在国内影响很大,以 Школовер 方法或谐波法为暖通界

所熟悉,一直被使用到70年代甚至更迟。这一时期可以划到1967年加拿大的 D.G. Stephenson 和 G.P. Mitalas 发表反应系数法为止。第三阶段,从那时起直到现在,为动态负荷计算时期。1967年反应系数法发表,立即被 ASHRAE 接受,1971年 Stephenson 和 Mitalas 又用 Z 传递函数改进了反应系数法,并产生了适合手算的冷负荷系数法。我国在 1972 年已有人注意并引用了部分数据,1974 年暖通规范组编译了《空气调节房间热负荷计算》的资料,介绍了日、美等国的计算方法,1978 年成立了全国性的“建筑物冷热负荷计算方法研究”课题组,到 1982 年 6 月评议通过了课题组的推荐方法。尽管早在 1959 年 O.O. Mackey 和 N.R. Gay 已提出了得热量并不是冷负荷的观点,但直到 1967 年提出反应系数法时才使得得热和负荷的区别在计算方法中体现出来,由于近代计算机技术的发展才使计算方法得以实现,房间热过程的研究才进入到现代阶段。

60 到 70 年代,由于计算机的普及和计算技术的发展,并且在当时能源危机的刺激下,空调负荷理论得到了飞快的发展,产生了反应系数法等几种新的负荷计算方法。负荷理论的发展,使得:

1. 空调设计负荷计算更精确,因而能够降低能耗和节省投资;

2. 为空调房间的全年逐时负荷模拟、建筑物的年能耗分析和空调系统的自动控制奠定了基础;

3. 为了适合新方法的要求,对各种热源和建筑热工性能进行深入研究;而把空气调节学科的理论 and 实践推进到了一个新的阶段。

由内外围护结构隔离出来的一个个空间——房间构成了建筑物的基本单元。根据控制论中线性系统理论来研究房间热过程时,把房间的围护结构;内、外墙,窗、门,楼板、屋顶或地板等

以外墙为代表构成一个墙体热力系统，墙的外侧空气温度和太阳辐射是该系统的扰量，墙的传热量是该系统的反应；再把房间的各个内表面和室内空气看作一个热力系统，它可以近似当作一个线性系统，称为房间热力系统，研究它在房间各种得热量作用下的热量变化过程，这是书中研究房间热过程的方法。由于夏季的房间冷负荷具有典型的代表性，冬季热负荷可以作为负的冷负荷看待，所以我们以夏季工况为主进行讨论。

本书基本上按线性系统的扰量、系统和系统的反应来安排内容。第1章介绍线性系统的基本概念，是基础部分；第2章讲述房间的各种内外扰量，大致根据太阳光线射到地面的行进过程来叙述；第3、4章研究墙体和房间系统的数学模型和系统的传递函数；第5、6、7章是关于系统的反应，讲述不同类型的扰量函数作用下墙体系统的传热量和房间系统的负荷变化过程；第8章介绍建立在第6、7章所述传递函数法基础上的冷负荷系数法；第9章研究室温变化和房间的蓄热过程。谐波法的墙体传热量计算早已解决，但是书中从线性系统的角度作了介绍，这可以看作新老方法之间的一个衔接。为了提供一种完整的设计负荷计算方法，在第5章中讲述了谐波法的实用计算方法，并在附录中引入了这个方法完整的手算计算数据表，它们适用于国内绝大部分地区的空调房间的设计负荷计算。

目 录

绪 言	(1)
1 线性系统分析的基本概念	(1)
1.1 系统和线性系统的传递函数	(1)
1.1.1 系统与数学模型	(1)
1.1.2 传递函数	(2)
1.1.3 耦合系统及其传递函数	(3)
1.2 线性系统的响应	(4)
1.2.1 系统的加权函数和脉冲响应	(4)
1.2.2 系统的频率响应	(6)
1.3 传递函数的推广	(6)
1.3.1 多变量系统的传递函数	(6)
1.3.2 多元系统的传递函数	(7)
1.4 采样数据系统	(9)
1.4.1 采样器和保持器	(9)
1.4.2 Z 传递函数	(10)
习 题	(11)
2 房间的扰量	(13)
2.1 室外扰量	(13)
2.1.1 太阳及其视运动	(13)
2.1.2 太阳辐射强度	(23)
2.1.3 太阳辐射的反射、吸收和透过率	(30)
2.1.4 太阳-空气综合温度	(42)

2.1.5	室外空气温度和标准气象数据·····	(44)
2.1.6	标准年气象数据·····	(47)
2.2	房间的扰量和几个热量概念·····	(50)
2.2.1	室内环境和室内参数·····	(50)
2.2.2	房间的得热量、冷负荷和除热量·····	(53)
2.2.3	日射得热·····	(56)
2.2.4	人员得热·····	(80)
2.2.5	灯光得热·····	(92)
2.2.6	设备得热·····	(101)
2.3	连续扰量的分解·····	(102)
2.3.1	单位阶跃函数和斜坡函数·····	(102)
2.3.2	单位脉冲函数·····	(104)
2.3.3	单位矩形波函数和单位三角波函数·····	(104)
2.3.4	扰量函数的分解·····	(106)
习 题	·····	(111)
8	墙体热力系统·····	(112)
8.1	导热方程·····	(112)
3.1.1	方程及定解条件·····	(112)
3.1.2	定解问题的特点和齐次化·····	(113)
3.1.3	方程的求解·····	(115)
8.2	单层和多层均质墙体热力系统·····	(116)
3.2.1	单层均质墙体热力系统·····	(116)
3.2.2	对多层均质墙体的推广·····	(118)
3.2.3	空气边界层的传递矩阵·····	(119)
3.2.4	传递矩阵的基本性质·····	(121)
3.2.5	墙体系统的吸热和传热传递函数·····	(126)
3.3	稳定传热和表面放热系数·····	(128)

3.3.1	稳定传热计算	(128)
3.3.2	墙体的表面放热系数	(129)
习 题		(137)
4	房间热力系统	(138)
4.1	房间热平衡方程	(138)
4.1.1	第 i 个内表面的热平衡方程	(138)
4.1.2	室内的特殊表面	(140)
4.1.3	室内空气热平衡方程	(145)
4.1.4	房间热平衡方程组	(147)
4.1.5	典型房间和房间热平衡方程适用范围	(149)
4.2	房间热力系统的传递函数	(151)
4.2.1	房间热平衡方程的分解	(151)
4.2.2	房间的负荷传递函数	(154)
4.2.3	房间的室温传递函数	(158)
习 题		(159)
5	空调设计负荷计算的谐波法	(161)
5.1	周期扰量下的墙体传热	(161)
5.1.1	墙体热力系统的频率响应	(161)
5.1.2	墙体传热量	(162)
5.1.3	半无限厚墙体	(164)
5.1.4	衰减度和延迟时间	(168)
5.2	冷负荷的频率响应——谐波反应法	(176)
5.2.1	周期条件下内表面的吸热和放热	(177)
5.2.2	房间的放热衰减和放热延迟	(180)
5.2.3	房间的冷负荷计算	(183)
5.3	谐波法的简化	(187)
5.3.1	墙体传热的当量温差	(187)

5.3.2	传导得热的负荷温差·····	(189)
5.3.3	负荷强度系数·····	(194)
5.3.4	例 题·····	(195)
习 题	·····	(198)
6	空调负荷计算的反应系数法·····	(201)
6.1	任意扰量下的墙体传热·····	(201)
6.1.1	墙体热力系统的单位阶跃反应·····	(202)
6.1.2	墙体的单位三角波反应·····	(207)
6.1.3	墙体反应系数·····	(208)
6.1.4	周期性反应函数和反应系数·····	(208)
6.1.5	反应函数和反应系数的性质·····	(211)
6.1.6	墙体传热量计算·····	(212)
6.1.7	例 题·····	(214)
6.2	房间反应系数和冷负荷·····	(217)
6.2.1	房间热平衡方程的时域表示·····	(217)
6.2.2	房间反应系数及其求解·····	(220)
6.2.3	房间的冷负荷计算·····	(224)
6.2.4	房间负荷反应系数的补充讨论·····	(232)
6.3	方法的简化和反应系数的改进·····	(237)
6.3.1	墙体反应系数的当量温差·····	(237)
6.3.2	改进型墙体反应系数·····	(238)
6.3.3	房间负荷反应系数的公比·····	(238)
习 题	·····	(242)
7	空调负荷计算的 Z 传递系数法·····	(243)
7.1	用 Z 传递系数计算墙体传热·····	(243)
7.1.1	三角脉冲保持器和墙体系统 Z 传递函数·····	(243)
7.1.2	墙体 Z 传递系统的求解·····	(244)

• • •

7.1.3	Z 传递系数和反应系数的关系	(246)
7.1.4	传热量计算	(247)
7.1.5	Z 传递系数的性质及计算例题	(247)
7.2	负荷传递系数和房间冷负荷	(251)
7.2.1	房间的负荷 Z 传递系数	(251)
7.2.2	负荷传递系数的求法	(252)
7.2.3	房间负荷传递系数的性质和意义	(254)
7.2.4	房间的冷负荷计算	(256)
7.2.5	例 题	(257)
7.3	方法的简化和负荷传递系数的测定	(263)
7.3.1	方法的简化	(263)
7.3.2	负荷传递系数的归类和测定	(265)
	习 题	(268)
8	冷负荷系数法	(269)
8.1	冷负荷温差和冷负荷系数	(269)
8.1.1	冷负荷温差 CLTD	(269)
8.1.2	冷负荷系数 OLF	(272)
8.1.3	关于 CLTD 和 OLF 数值表的编制	(275)
8.2	我国的冷负荷系数法	(276)
8.2.1	房间类型和负荷传递系数	(277)
8.2.2	日射负荷计算	(278)
8.2.3	外围护结构传导负荷计算	(280)
8.2.4	室内热源得热形成的负荷	(282)
8.2.5	例 题	(282)
	习 题	(286)
9	室温变动和房间除热量	(288)
9.1	室温反应系数和室温传递系数	(288)

9.1.1	室温反应系数的求解	(288)
9.1.2	房间蓄热量与室温传递系数	(291)
9.1.3	室温变动与房间除热量	(292)
9.2	间歇空调的预冷量和预冷时间	(293)
9.2.1	非空调期的室温变动	(293)
9.2.2	房间降温反应系数	(297)
9.2.3	预冷时间和预冷量	(299)
主要参考文献		(301)
附录 1	时差表	(303)
附录 2	太阳倾角表	(305)
附录 3	我国主要城市的经纬度	(307)
附录 4	计算太阳直、散射辐射强度的系数 (ASHRAE)	(308)
附录 5	地面反射率	(309)
附录 6	表面吸收率	(309)
表 6-1	各种材料的发射率	(309)
表 6-2	围护结构外表面的太阳辐射热吸收率	(310)
附录 7	窗户的传热系数和有效面积系数	(310)
表 7-1	单层窗玻璃的 K 值	(310)
表 7-2	双层窗玻璃的 K 值	(311)
表 7-3	窗户传热系数的修正值	(311)
表 7-4	窗户有效面积系数	(311)
附录 8	外遮阳系数计算用的常数值	(312)
附录 9	窗玻璃和标准玻璃的太阳光学性能	(314)
表 9-1	窗玻璃太阳光学性能测定数据汇总	(314)
表 9-2	窗玻璃和标准玻璃的太阳光学性能 (直射三率)	(315)

表 9-3	窗玻璃遮阳系数 SC 的计算公式	(315)
附录 10	内遮阳太阳光学性能及其组合体的遮阳系数和辐射比例	(316)
附录 11	夏季(7 月)中国各城市最大日射得热因素	(317)
附录 12	室外空气温度计算用表	(318)
表 12-1	模比系数	(318)
表 12-2	空调冷负荷计算室外设计温度表	(318)
附录 13	人员得热计算用表	(319)
表 13-1	我国成年男子的散热、散湿量	(319)
表 13-2	群集系数	(320)
附录 14	家具墙类型数据	(320)
附录 15	谐波法的计算用表	(321)
表 15-1	围护结构的夏季热工指标	(322)
表 15-1-1	外墙的夏季热工指标	(322)
表 15-1-2	屋面的夏季热工指标	(330)
表 15-1-3	内墙的夏季热工指标	(337)
表 15-1-4	楼板的夏季热工指标	(339)
表 15-2	墙体的负荷温差	(344)
表 15-2-1	北京市墙体的负荷温差	(344)
表 15-2-2	西安市墙体的负荷温差	(352)
表 15-2-3	上海市墙体的负荷温差	(360)
表 15-2-4	广州市墙体的负荷温差	(368)
表 15-3	屋面的负荷温差	(376)
表 15-3-1	北京市屋面的负荷温差	(376)
表 15-3-2	西安市屋面的负荷温差	(378)
表 15-3-3	上海市屋面的负荷温差	(380)
表 15-3-4	广州市屋面的负荷温差	(382)

表 15-4	窗户传热的负荷温差	(插页)
表 15-5	透过窗玻璃的太阳总辐射负荷强度系数	(384)
表 15-5-1	北京市钢框单层玻璃窗的日射负荷强度 系数	(384)
表 15-5-2	西安市钢框单层玻璃窗的日射负荷强度 系数	(390)
表 15-5-3	上海市钢框单层玻璃窗的日射负荷强度 系数	(396)
表 15-5-4	广州市钢框单层玻璃窗的日射负荷强度 系数	(402)
表 15-6	人体显热散热的负荷强度系数	(408)
表 15-7	照明散热的负荷强度系数	(410)
表 15-8	设备、器具散热的负荷强度系数	(412)
附录 16	房间的负荷反应系数及其公比	(414)
附录 17	几种墙体构造的 Z 传递系数	(415)
附录 18	房间的负荷传递系数	(417)
附录 19	冷负荷系数法用室内热源得热的冷负荷系数 CLF	(418)

1 线性系统分析的基本概念

用热力系统来研究墙体和房间的热量变化过程时,系统的传递函数是解决问题的关键,因此本章先简要介绍线性系统的一些基本概念,特别是传递函数,这是研究墙体传热、房间负荷和室温变动的主要工具。详细的情况,可以参阅书末有关文献^{[2]~[5]}。

1.1 系统和线性系统的传递函数

1.1.1 系统与数学模型

系统是指一组事物,它具有以下两个重要性质:其一,它受其它事物的影响,而这种影响只能通过特定的途径,称之为输入,发生作用;其二,它对其它事物施加影响,但这种影响也只能通过特定的途径,称之为输出,发生作用。

描述系统运动或变化规律的数学表达式,通常是一些微分方程,称其为系统的数学模型。如果系统的数学模型是线性方程,那么该系统称为线性系统,否则为非线性系统。如果系统的数学模型为线性常系数方程,则特别称这类系统为线性定常系统。线性系统的一大优点是适用叠加原理。

当所考察的系统只有一个自变量时,例如时间变量 t ,则称这种系统为一元系统,描述一元系统的数学模型是常微分方程。具有多个自变量的系统称为多元系统,相应的数学模型是偏微分方程。当系统只有一对输出时称为单变量系统,有多对输

出入时称为多变量系统，或多输入多输出系统。多变量系统的数学模型是微分方程组。

1.1.2 传递函数

假定线性定常系统的数学模型为

$$A_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + A_1 \frac{dx(t)}{dt} + A_0 x(t) = f(t) \quad (1.1)$$

式中未知函数 $x(t)$ 是系统的输出，亦称响应或反应；自由项 $f(t)$ 是系统的输入，亦称扰量或驱动函数。函数 $f(t)$ 也可以是另一已知函数 $I(t)$ (此时 $I(t)$ 为系统扰量) 的微分表达式：

$$f(t) = B_m \frac{d^m I(t)}{dt^m} + B_{m-1} \frac{d^{m-1} I(t)}{dt^{m-1}} + \dots + B_0 I(t) \quad (1.2)$$

为求解方程(1.1)尚需一组初始条件，为方便我们始终假设方程带有零初始条件：

$$x(0) = x'(0) = \dots = x^{(n-1)}(0) = 0 \quad (1.3)$$

现用 L 变换求解方程(1.1)，为一般起见， $f(t)$ 取用式(1.2)，则可把解写为

$$\bar{x}(s) = G(s) \bar{I}(s) \quad (1.4)$$

式中

$$\bar{x}(s) = L[x(t)]$$

$$\bar{I}(s) = L[I(t)]$$

$$G(s) = \frac{B_m s^m + B_{m-1} s^{m-1} + \dots + B_0}{A_n s^n + A_{n-1} s^{n-1} + \dots + A_0} \quad (1.5)$$

这样方程的解或说系统的反应可通过函数 $G(s)$ 及扰量 $I(t)$ 的 L 变换来表示，函数 $G(s)$ 便称为系统的传递函数。据式(1.4)，传递函数 $G(s)$ 又可以表示为：

$$G(s) = \frac{\bar{x}(s)}{\bar{I}(s)} \quad (1.6)$$

由此定义线性系统的传递函数是系统输出、入函数的 Laplace 变