

周期性热作用下的傳热

(增訂二版)

〔苏联〕A·M·什克洛維尔 著

陈在康 蔡祖康 譯



中国工业出版社

51.11.8
152



周期性热作用下的传热

(增订二版)

〔苏联〕A·M·什克洛维尔 著

陈在康 蔡祖康 译

中国工业出版社



本书阐述了作者所創有关多层墙壁內平面热波的計算方法。利用此方法能以解决各种墙壁周期性传热問題，以及房間內溫度和热流的波动問題。为建筑热工計算提供了重要的理論依据和具体的計算方法，內容比較全面、系統。

本书系供大专学校“供热、供煤气及通风”专业师生的参考用书。也可供建筑热工方面以及其他有关方面的工程技术人员和科学研究人員参考。

本书譯稿承胡璘同志审校，并經高等工业学校供热供煤气及通风教材編审委员会审核。

A. M. Шкловер

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА-1961-ЛЕНИНГРАД

* * *

周期性热作用下的傳热

(增訂二版)

陈在康 蔡祖康 譯

*

建筑工程部教材編輯室編輯(北京西郊百万庄)

中国工业出版社出版(北京修羅閣路丙10号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $5 \frac{1}{16}$ ·插頁1·字数102,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—1,560·定价(科五)0.60元

*

統一书号: K15165·3259(建工-395)

第一版序言（1952年）

众所周知，平壁，特别是多层壁的不稳定传热计算，会遇到怎样的困难。很多问题仍未获得解决，而已经解决的也都牵涉到复杂的数学计算，妨碍其在工程实际中的应用。

在本书中传热理论部分之一（即平面波理论部分），基本上能解决有关多层平面壁或整个密闭房间在周期性热作用下的各种问题，而且用的是能用于工程实际中的比较简单的方法。

我国最早研究平面波传热问题的是O.E.符拉索夫教授。他在1927年所研究出的原理，在实际建筑计算中得到了广泛的应用[Л.1]^①。

此后Г.А.歇里维尔斯托夫[Л.2]，Е.Г.什维柯夫斯基[Л.3]，С.И.模罗莫夫[Л.4]以及本书作者[Л.5和6]继续进行理论上的探讨。

作者第一本著作阐述了房屋热稳定性的计算。

本书是作者在对上述问题进一步研究的基础上编写的。作者扩大了用新理论来解决问题的范围，使其论证更完善和更易于理解。编制了大大简化实际计算的简单图表，并提出了在不要求十分精确时的近似计算方法。

作者在苏联建筑科学院建筑技术研究所制订出的这些理论是为了用以解决建筑热工问题。室外温度和太阳辐射热

① Л.1表示参考文献序号，见书末，下同。——译注

(特别是在夏天)昼夜間的变化, 以及室内供热昼夜間的波动等等, 决定了对房屋热作用的周期性性质。

这里所提出的計算, 其应用范围已远远地超出了建筑的領域。

在工业企业中, 热力过程的周期性常常和企业每昼夜間歇工作或生产本身的特点有关。

在鍋炉的炉衬內, 工业炉的炉墙內以及化学、食品和其他工业(如酿造、蒸发、干燥等)部門的各种仪器的側壁內, 在管道的隔热层內以及其他地方, 均可能有周期性的热力过程。

热力过程的周期性也是再生炉、蓄汽器、蒸汽机、內燃机、蓄电炉(为了利用夜間較廉价的电流)等工作的主要特点。

室外溫度和太阳輻射的周期性变化, 在地质学和植物学中均起很大作用; 它們在水工建筑物和煤气蓄气罐中能引起溫度应力等等。

本书供广大讀者和工程技术人員閱讀。

本书所包括的計算例題, 将有助于实际的应用和更好地理解本书的內容。

讀者不一定需要具有高等数学的知識, 因为只在本书中的几頁里应用到它, 并且对了解整个內容及其实际应用沒有重要的意义。但要求讀者必須熟悉复数以及双曲函数和三角函数。

作 者

第二版序言

本书第二版中增添了两章：在間歇供热情况下房間的热状况（第四章）；房間稳定热状况的原理（第五章）；并大大地充实了近似計算这一章（第六章）。

第三章关于諧性热作用情况下房間的溫度状况重新改写，由于将对流和輻射供热分別考虑，使計算大大地接近于实际情况。

头两章关于沿单层或多层墙壁厚度热波的传递，主要作了下列修改：在計算公式中主要是利用蓄热系数 Y 来代替参数 M ，这样能簡化論証、研究許多新的問題、統一各种情况下的計算、当波通过时用图表来分析沿层厚度的特殊热現象等等。

另一方面，我們尽量縮減計算图表的数量，及用來說明計算方法的例題，順便修正了某些不确切的地方和錯誤。

在同时利用本书初版本和再版本的时候，应当注意我們对符号做了某些改变：

1. 由于在精确計算时复数的表达式中，以及在近似計算时实数的表达式中，要利用同样的一些量，如 W 、 Θ 、 Q 、 Y 和 B ，就在第一种情况时在字母上記上一个点，如 $\dot{W}$ 、 $\dot{\Theta}$ 、 $\dot{Q}$ 、 $\dot{Y}$ 和 $\dot{B}$ ；

2. 复数 $\dot{Y}$ ， $M_{es.np}$ 和 M_c 相当于初版中的符号 $Y\sqrt{i}$ ， $M_{es.np}\sqrt{i}$ 和 $M_c\sqrt{i}$ 。

本书写出“热稳定性”一般理論的和实际的計算原理，在实际运用这些原理去解决具体問題的时候，必須考虑到每种情况的特点。

作者

主 要 符 号

- t —— 温度, $^{\circ}\text{C}$;
- Θ —— 谐性温度波动的振幅, $^{\circ}\text{C}$;
- $\dot{\Theta}$ —— 以复数表示的谐性温度波动;
- q —— 热流量, 大卡/米²·小时;
- Q —— 谐性热流的振幅, 大卡/米²·小时; 在第五章中表示为稳定的供热量, 大卡/小时;
- $\dot{Q}$ —— 以复数表示的谐性热流波动;
- w —— 供热量, 大卡/小时;
- W —— 谐性供热的振幅, 大卡/小时;
- $\dot{W}$ —— 以复数表示的供热的谐性波动;
- W_m —— 当间歇供热时, 在周期的部分时间内, 保持不变的供热量, 大卡/小时;
- s —— 材料的蓄热系数, 大卡/米²·小时· $^{\circ}\text{C}$;
- $\dot{Y}$ —— 以复数表示的墙内任意平面的蓄热系数;
- Y —— 以实数表示的墙内任意平面的蓄热系数 (近似值);
- $\dot{B}$ —— 以复数表示的墙表面的吸收能力, 大卡/米²·小时· $^{\circ}\text{C}$;
- B —— 以实数表示的墙表面的吸收能力 (近似值);
- β_{Θ} —— 以复数表示的墙内谐性温度波动的衰减, 其模 r_{Θ} 给出振幅的衰减 (而且 $r_{\Theta} > 1.0$), 而幅角 ε_{Θ} 给出相位的延迟 (度) (而且 $\varepsilon_{\Theta} > 0$);
- β_Q —— 以复数表示的墙内谐性热流波动的衰减, 其模以 r_Q 表示, 而幅角以 ε_Q 表示;
- α_{κ} —— 墙表面的对流放热系数, 大卡/米²·小时· $^{\circ}\text{C}$;
- α_A —— 墙表面的辐射放热系数, 大卡/米²·小时· $^{\circ}\text{C}$;

- α —— 放热系数, 等于 $\alpha_k + \alpha_A$, 大卡/米²·小时·°C;
 δ —— 墙内层的厚度, 米;
 R —— 层的热阻, 米²·小时·°C/大卡;
 R_0 —— 墙的热阻, 米²·小时·°C/大卡;
 $\Delta_{\text{вз.нр}}$ —— 空气层的透热系数, 大卡/小时·米²·°C;
 F —— 墙的面积, 米²;
 η_k —— 房間全部热量中对流散热的部分 ($\eta_k \leq 1.0$);
 τ —— 时间, 小时; 在第五章中表示为墙表面上恒定的温度, °C;
 x —— 周期性波动的周期, 小时。

脚 注 符 号

- m —— 在多层墙内层的顺序号码;
 n —— 墙最后一层的顺序号码;
 вз. —— 室内空气;
 вз.нр —— 墙内的空气层;
 o —— 对于所有围护结构的平均值;
 cp —— 在波动周期内的平均值。

当分别研究对流和辐射放热的时候, 对于量 α_A 、 α_s 、 $\dot{B}$ 和 B 的上角标有 “ $\cdot$ ” 者, 表示为精确的量。

目 录

第一版序言 (1952年)

第二版序言

主要符号

緒論 1

第一章 諧性热波通过有限厚的

单一材料层的傳播 3

1. 关于諧波动的主要依据 3

2. 諧波动的矢量表示 4

3. 諧性热波动导热微分方程的解 6

4. 解的分析 7

5. 溫度和热流波动的衰减 10

6. 蓄热系数 $\dot{Y}$ 12

7. $\text{th}Rs\sqrt{i}$ 值 14

8. 变换过的衰减方程式 16

9. 复数加法用的計算图表 18

第二章 多层墙內平面热波的計算 21

10. 边界条件 21

11. 空气层 23

12. 热波从邻近介质至墙表面的传递 24

13. 对墙表面的輻射传热 25

14. 热波通过多层墙时的衰减 26

15. 各层之間的相互影响 28

16. 空气层对墙內衰减的影响 28

17. 在双层墙中材料层的位置对衰减的影响 30

18. 波的方向对墙內衰减的影响 31

19. 已知热阻值为 R_0 的墙内之最小衰减	32
20. 当通过热波时, 墙内的平均温度和平均热流	33
21. 热波波长	34
22. 諧波的迭加	34
23. 对称墙	35
24. 相对蓄热系数	37
25. 确定相对蓄热系数的图表	40
26. 材料层内相对蓄热系数变化的图解分析	42
27. 层内温度波动衰减的图解分析	47
28. 利用图表的计算	48
29. 非諧性波	54
第三章 室内在諧性散热时的热状况	57
30. 概述	57
31. 采用系数 α_0 导出的方程式	57
32. 精确的一般公式的推导	59
33. 几种个别情况	64
34. 墙内表面上的温度波动	67
35. 墙内表面的蓄热系数	69
36. 系数 $\dot{Y}_r$ 和 $\dot{B}'$ 的极限值	70
37. 求 $\dot{B}'$ 用的图表	72
38. 热波由室外介质向室内传递	74
39. 热源散热与室内温度的关系	76
40. 室内空气的吸热	76
41. 室内设备的吸热	78
42. 室内空气和设备吸热的计算	81
43. 对于特殊情况的精确计算	83
44. 关于空气调节系统的负荷	84
第四章 間歇性供热情况下的房間热状况	88
45. 用傅利叶級数表示間歇性供热	88

46. 个别情况下对墙壁表面温度的解	89
47. 计算用表的编制	96
48. 室内空气温度	100
49. 公式推广应用到任何房间	104
50. 间歇作用集中采暖的计算	105
51. 任意周期性散热	108
52. 太阳辐射对房间的加热 (计算例子)	110
53. 蓄热散热器的散热计算	113
54. 室内间歇性换气	116
第五章 房间稳定热状况的原理	118
55. 一般说明	118
56. 室内空气和围护结构表面的温度	118
57. 通过围护结构的热损失	121
58. 自然换气的计算	127
59. 关于辐射采暖的计算	130
60. 精确计算	132
第六章 近似解	134
61. 概述	134
62. 近似蓄热系数	135
63. 谐性温度波动在墙内衰减之近似计算	136
64. 图表的用法	137
65. 确定墙内衰减的各种方法	141
66. 近似确定当波通过墙时的相位延迟	143
67. 对墙壁非谐性热作用的应用	144
68. 在室内有非恒定产热时房间温度状况的近似计算	146
69. 关于“剧烈波动层”	149
附录 双曲函数和复数的变换	151
参考文献	153

緒 論

本书研究对墙或对封閉房間周期性的、多次重复的热作用，这时发生的热現象往往以同样周期重复，所以它們和稳定的热現象相仿，并可称之为“准稳定的热現象”。

本书研究具有无限长和寬的单层墙和由平行平面分层的多层墙。在这样的墙中，热作用是从墙表面往内部沿一个方向也就是沿垂直于表面的方向传播（一度的問題）。

平面热波在这些条件下通过墙壁，它随着在墙內深入的程度，溫度和热流的周期性波动逐漸地衰减。提出的計算方法可以确定，在各种情况下沿墙厚度的这些波动将是怎样的。

本书取放热系数和材料的热物理参数为与溫度变化无关的常数，因为我們所研究的都是綫性关系，这样就可以利用迭加的原則。

在导热的理論中，研究三类对墙的热作用問題。

a) 最常見的是第三类热作用，即給出与墙接触的介质溫度系時間的函数，且介质和表面間的放热規律为热流和溫压成正比。

b) 給出墙表面的溫度为時間的函数（第一类热作用）。

б) 給出进入表面的热流系時間的函数，例如受阳光照射的表面（第二类热作用）。

諧性作用是周期性作用最簡單的情况，即随時間按正弦

或余弦的规律变化。任何其他周期的作用均可化为许多谐性作用之和，这将在后面说明。因此，主要将是研究谐性的作用。

首先，我们研究谐性热波通过有限厚的单一材料层，而波通过多层的墙壁，是依次地通过其每一个别层的结果。

第一章 諧性热波通过有限厚的 单一材料层的傳播

1. 关于諧波动的主要依据

如果溫度的諧波动用余弦来表示，則得方程式①：

$$t = A \cos\left(\frac{360\tau}{z} + \varphi\right), \quad (1)$$

式中 A ——溫度波动的振幅， $^{\circ}\text{C}$ ；

φ ——这些波动的初相角，度；

z ——波动的周期，小时；

τ ——从某一已知的起始时刻开始計算的时间，小时。

对于已知的曲綫初相角 φ 取决于計算时间的起始时刻。

当 $\tau = 0$ 时，由式 (1) 可得：

$$t = A \cos \varphi. \quad (2)$$

溫度达最大值时的 τ ，等于：

$$\tau = \frac{(360 - \varphi)z}{360}. \quad (3)$$

● 在这个方程式中角度是以度为单位；如果以弧度表示，則得：

$$t = A \cos\left(\frac{2\pi\tau}{z} + \varphi'\right),$$

式中 $\varphi' = \frac{\varphi}{57.3^{\circ}}$

同一諧波動的曲綫也可以用正弦來表示，因為：

$$\cos x = \sin(90 - x)。$$

因而，代入（1）式可得：

$$t = A \sin\left(\frac{360x}{z} + \varphi''\right), \quad (4)$$

其中，在計算時間的起始時刻相同時，有：

$$\varphi'' = 90 - \varphi。 \quad (5)$$

以後，我們將利用余弦關係對於計算比較便利。

式（1）給出溫度圍繞一恒定溫度隨時間的波動，而在波動計算時，這個溫度被取作零點。

熱流的諧波動（大卡/小時·米²）也可以用類似的方程式表示，熱流在波動的時候，其方向可以和波運動的方向相同或者相反。我們把第一種方向作為正向；第二種方向為負向。

熱流的波動同樣可從某一恒定熱流開始向兩個方向計算，在個別情況下，這一熱流可以是零。

在諧波動的情況下，在半個周期內正向熱流將熱量朝波運動的方向轉移，而在後半個周期內，又將同樣多的熱量向相反方向轉移。

2. 諧波動的矢量表示

我們把諧波動表示成矢量的形式。

為此我們來研究某一矢量（圖1）。它的模 A 按某一比例尺等於溫度諧波動的振幅，而和 X 軸的夾角 φ 等於此波動的初相角。從 $x = 0$ 開始，把這個矢量以在 z 小時內轉一圈的速度，圍繞座標原點反時針均勻地旋轉。這個旋轉矢量在 X 軸上的投影等於：

$$t = A \cos\left(\frac{360\tau}{z} + \varphi\right),$$

也就是溫度作諧性的变化^①。上述矢量称为諧量的矢径。

其次，从复数的理論得知：在平面上的矢量可以用复数来表示，其模等于矢量的絕對值，而幅角等于矢量的角度。把这复数写成下列形式（适用于图 1 中的矢径）^②：

$$\dot{\Theta} = A \angle \varphi. \quad (6)$$

复数也可以用实数和虚数之和来表示：

$$\dot{\Theta} = a + bi, \quad (7)$$

式中（见图 1）：

$$a = A \cos \varphi; \quad (8)$$

$$b = A \sin \varphi, \quad (9)$$

即 a 和 b 为矢径在 X 軸和 Y 軸上的投影。

如果已知 a 和 b ，那么 A 和 φ 便可由下式决定：

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}. \quad (11)$$

用矢径或复数代替諧性曲綫將簡化对諧性函数的数学运算（加法、减法、和无名数相乘、除法、微分或积分），而这些运算可以就其矢径或代替它的复数来进行。从計算的观

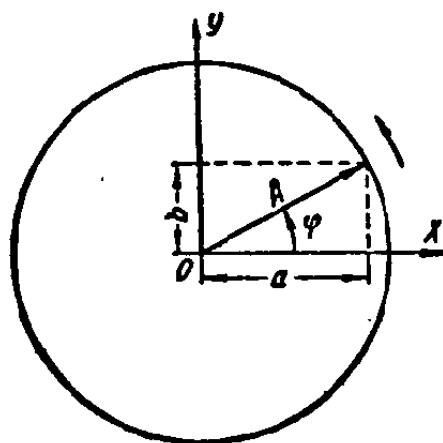


图 1 諧波动矢径

① 矢量在 Y 軸上的投影給出相应的正弦变化。

② 在数学书籍中，用指数函数的形式 $\dot{\Theta} = Ae^{j\varphi}$ 来表示。

点看来，用比較简单的复数运算代替对諧性函数的繁瑣的运算有着很大的优点。今后我們用复数 $\dot{\theta}$ 来表示溫度的諧波动，而用复数 $\dot{Q}$ 来表示热流波动。这些复数的模为波动的振幅；幅角为初相角，而周期 z 是已知量。对于进行上述运算的所有諧量必須具有同样的周期。

3. 諧性热波动导热微分方程的解

众所周知，热在固体中传播的物理現象，服从于傅利叶导热基本微分方程式。对于热在平壁中的传播，这个方程式具有下列形式：

$$\frac{\partial \dot{t}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \dot{t}}{\partial x^2}, \quad (12)$$

式中 a ——材料的导溫系数（米²/小时），等于 $\frac{\lambda}{c\gamma}$ 。

方程式的解在于寻找 $\dot{t}$ 同变数 x 和 τ 之間的关系，这个关系应同时滿足微分方程式和問題的边界条件。

下列个别解能滿足微分方程式（12）：

$$\dot{t} = e^{\frac{2\pi\tau i}{z}} \left(A \operatorname{ch} x \sqrt{\frac{2\pi i}{za}} + B \operatorname{sh} x \sqrt{\frac{2\pi i}{za}} \right). \quad (13)$$

式中 A 和 B ——任意常数。

溫度 $\dot{t}$ 是复数，它的意义从下面可看得很清楚。

分析方程式的右边，我們得知括弧中的式子为 $\tau = 0$ 时表示 $\dot{t}$ 值的一个复数（矢量），其值决定于所在平面的座标 x 。

在方程式（13）的右边，当 τ 增加时只是第一个乘数发