

高等学校教材

传热学

第三版

俞佐平 陆 煜 编

高等教育出版社



高等学校教材

HK40/19

传 热 学

第 三 版

俞佐平 陆 煜 编

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 简 介

本书是在第二版的基础上,按照1993年修订的《传热学课程教学基本要求》,广泛征求各校意见,总结第二版的教学经验修订而成的。本次修订主要表现在:在导热部分加强了热阻概念、导热微分方程及边界条件等的叙述;在对流换热部分,把第二版的第四、五章合并为一章,内容作了相应调整,并引入了一些新的实验关系式;在辐射换热部分突出了黑体的概念,并对兰贝特定律作了进一步说明,等等。习题有较大变化,不但增加了习题的难度,而且增加了习题数量。每章末增加了思考题,以供学生复习时参考。参考文献丰富。

本书经国家教委热工课程教学指导委员会传热学课程教学指导小组组织的审稿会审订,可作为热能核能类热能工程专业、机械类热力发动机专业等专业的教材,亦可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学/俞佐平,陆煜编,一3版.一北京:高等教育出版社,1995

ISBN 7-04-005214-8

I. 传… II. ①俞…②陆… III. 传热学 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 00754 号

*

高等教育出版社出版
新华书店总店北京发行所发行
国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.25 字数 260 000

1995 年 5 月第 3 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数 0001 9 064

定价 6.55 元

第三版前言

本书第二版自 1985 年出版至今已经多年,为适应形势需要决定再次修订。由于原编者山东工业大学俞佐平教授业已退休,受其委托,并征得有关方面同意,此次修订工作由本校热工教研室陆煜负责。

在本书使用过程中曾陆续收到不少宝贵意见。修订前,也曾发函征求一些使用本书院校的意见,并在一定范围内召开座谈会,征求各方面的意见和建议。正由于这些同志对教学负责和对教材的关心,才使本次修订工作得以顺利进行。

本次修订主要在以下一些方面。在绪论中辟专节讨论热阻的概念,但辐射热阻移到辐射一章讨论。稳态导热部分加强了导热微分方程式及边界条件的叙述,并由此导出大平壁及长圆管导热量的计算公式;对稳态导热的差分解法的叙述作了若干修改。在非稳态导热中,为了与对流换热中的讲法相呼应,采用微分相似法导出相应的函数关系,这可使学生对诺模图有进一步了解;在非稳态导热的叙述次序上也作了较大调整,把集总参数分析法的叙述放在诺模图之后。对流换热部分的最大变动是把原来的两章合并为一章,作为一种尝试,删去了前期课程中已讲授过的内容,同时将原来列为专节的影响因素分到各相应章节中叙述。对于有相变时的对流换热,则对努谢尔特理论的导出作了一些改动,同时更换了几个公式。辐射换热部分突出了黑体辐射,并对兰贝特定律作了进一步说明,同时强调了辐射包壳和重辐射面的概念。传热和换热器部分调换了传热过程的叙述次序,并对 ϵ -NTU 法的叙述作了一些更动,相信这会有利于对内容的理解。习题不仅增加了数量,而且相应地增加了难度,并删去了一半以上简单代公式即可求得解答的习题。此外,在每章后均附有思考题,供进一

步思考之用。

初稿写出后，承蒙西安交通大学陶文铨教授主审，天津大学章熙民教授复审，并由热工课程教学指导委员会于1992年9月召开审稿会审订。审稿者对初稿提出了不少宝贵的意见和建议。热工课程教学指导委员会主任委员王补宣教授及副主任委员杨世铭教授始终关心本书的修订工作，曾给以不少鼓励和帮助。我校裘烈钧教授审阅过部分初稿。这一任务的顺利完成是与上述各位的帮助密切相关的，在此谨致以深切的谢意。

由于水平所限，书中不当或错误之处在所难免，欢迎各兄弟院校的同行人和本书使用者批评指正。

编者

1993. 9

主要符号表

A 面积、截面积, m^2	T 热力学温度, K
a 热扩散率(导温系数), m^2/s	t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
b 宽度, m	U 周长, m
C 热容比	V 体积, m^3
c 比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$	v 速度, m/s
D 直径, m	W 宽度, m
E 辐射力, W/m^2	α 换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; 吸收率
F 力, N ; 角系数; 换热器的校正系数	β 体胀系数, K^{-1} ; 肋化系数
G 投射辐射, W/m^2	δ 厚度, m
g 重力加速度, m/s^2	ϵ 黑度; 换热器有效度
I 定向辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; 反射辐射, W/m^2	η_i 肋片效率
k 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	η_l 肋壁效率
L 长度、高度, m	θ 过剩温度, $^{\circ}\text{C}$
m 质量, kg	λ 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; 波长, μm
$\dot{m}$ 质量流量, kg/s	μ 动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
p 压力, Pa	ν 运动粘度, m^2/s
Q 热流量, W	ρ 密度, kg/m^3 ; 反射率
q_v 内热源强度, W/m^3	σ 表面张力, N/m
q 热流密度, W/m^2	σ_b 斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
R 半径, m ; 总面积的热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$	τ 时间, s ; 透射率
r 半径, m ; 单位面积的热阻, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$; 汽化潜热, J/kg	ω 立体角, sr
S 导热形状因子, m	

相似准则

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{——毕渥(Biot)准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{L^2} \text{——傅里叶(Fourier)准则}$$

$$Gr = \frac{\beta g L^3 \Delta t}{\nu^2} \text{——格拉晓夫(Grashof)准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{——努谢尔特(Nusselt)准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特(Prandtl)准则}$$

$$Re = \frac{vL}{\nu} \text{——雷诺(Reynolds)准则}$$

$$St = \frac{Nu}{RePr} \text{——斯坦顿(Stanton)准则}$$

$$Ra = GrPr = \frac{\rho^2 \beta g L^3 c_p \Delta t}{\mu \lambda} \text{——瑞利(Rayleigh)准则}$$

$$Gz = RePr \frac{D}{L} \text{——格雷兹(Graetz)准则}$$

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 热传递的基本方式	2
§ 1-3 热阻的概念	7
思考题	7
习题	8
第二章 导热基本定律及稳态导热	10
§ 2-1 导热的基本概念和定律	10
§ 2-2 导热微分方程	14
§ 2-3 一维稳态导热	18
§ 2-4 肋的稳态导热	31
§ 2-5 二维、三维稳态导热	42
思考题	51
习题	53
第三章 非稳态导热的分析计算	60
§ 3-1 概述	60
§ 3-2 一维非稳态导热的图解法	61
§ 3-3 特殊多维导热体非稳态导热的求解	70
§ 3-4 集总参数分析法	74
§ 3-5 数值解法	78
思考题	85
习题	86
第四章 流体无相变时的对流换热	92
§ 4-1 概述	92
§ 4-2 对流换热过程的数学描述	97
§ 4-3 对流换热准则方程式的建立	103

§ 4-4	流体在管槽内强迫流动时的换热	113
§ 4-5	外绕壁面强迫对流换热	122
§ 4-6	流体自然对流时的换热	134
思考题	.....	142
习题	.....	144
第五章	流体有相变时对流换热的分析计算	150
§ 5-1	概述	150
§ 5-2	蒸气凝结时的换热	151
§ 5-3	液体沸腾时的换热	160
思考题	.....	169
习题	.....	170
第六章	热辐射及辐射换热	173
§ 6-1	概述	173
§ 6-2	黑体的辐射特性	177
§ 6-3	黑体表面间的辐射换热	187
§ 6-4	实际物体的辐射 灰体	198
§ 6-5	灰体间的辐射换热	204
§ 6-6	气体辐射	218
§ 6-7	辐射表面的总换热系数	229
思考题	.....	230
习题	.....	232
第七章	传热过程与换热器	240
§ 7-1	概述	240
§ 7-2	传热过程的分析与计算	241
§ 7-3	换热器的用途和分类	250
§ 7-4	间壁式换热器的热计算	253
§ 7-5	换热器的局部热阻和污垢热阻	273
思考题	.....	276
习题	.....	278
附录	.....	284
附录 I	单位换算表	284

附录Ⅱ	几种材料的物性参数	287
附录Ⅲ	气体的物性参数	289
附录Ⅳ	油类的物性参数	294
附录Ⅴ	饱和水的物性参数	295
附录Ⅵ	水蒸气在饱和线上的物性参数	298
附录Ⅶ	大气压力 ($p=1.01325\text{Pa}$) 下过热水蒸气的物性参数	301
附录Ⅷ	几种材料的法向黑度	302
附录Ⅸ	双曲线函数	303
参考文献	.....	307
习题答案	.....	309

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

传热学是研究热量传递规律的学科。热力学第二定律指出：热量总是自发地、不可逆地从高温处传向低温处，即：有温差存在就有热量的传递。由于温差广泛存在于自然界和日常生活中，因此热量传递是一种普遍的自然现象。

传热学和工程热力学都以热力学第一定律和第二定律为基础，但两者的研究有所不同。工程热力学着重研究平衡状态下机械能和热能之间相互转换的规律，而传热学则研究由于存在温差而引起的不可逆的热量传递的规律。例如铁棒烧热后放在空气中的冷却，工程热力学能计算出铁棒温度降到室温放出的热量，但无法计算这一放热过程进行的快慢，而传热学却能予以解决。这说明，在传热学中仅应用热力学第一定律和第二定律还不够，还需引入能确定热量传递速率的有关定律。对这些定律的研究和应用，构成了传热学研究的基础。

和其他学科一样，在传热学的研究中，也需引入一些对现象进行科学简化的假设。这些假设一般分为两类。一类属于普遍性的假设，例如在本书所讨论的范围内均假设所研究的物体为连续体，即物体各点的温度等参数为时间和空间坐标的连续函数。若不考虑物质的微观结构，只要所研究的物体的尺寸，与分子间相互作用的有效距离相比足够大，这一假设总是成立的。又如，假定所研究的物体是各向同性的，也即在同样的温度、压力下，物体各点的物性与方向无关。另一类假设是针对某一类特定问题引入的，例如反映物体导热能力的导热系数总是随温度而变的，但为了简化计算而又不致出现明显的误差，而取为定值或适当的平

均值。为了能在实际计算中作出恰当的简化和假设，必须对各种物理现象作详细的观察和分析，这就要求我们具有丰富的理论知识和实践经验。在处理工程传热问题时，还必须熟悉和掌握传热机理、有关定律、测试技能和分析计算方法。

工程传热问题大体上可分为两种类型。一类是更有效地增强或减弱传热，例如为使内燃机中高温的活塞顶或汽缸壁冷却，要增强传热，而在室外的蒸汽管道上敷设隔热材料是利用热绝缘以减弱传热。另一类着重于确定温度分布。例如，在知道了物体内的温度分布后，可设法采取措施，使温度分布趋于均匀，以减少热应力，或找出温度最高点，以确定是否已超过材料的温度极限。

热传递的研究方法既可用理论分析，也可用实验研究，两者是相辅相成的。理论的基础是实践，并在不断实践中发展。所以，科学技术的进步和生产实践经验对于加强理论分析，进而更好地解决生产中有关热传递的问题，具有十分重要的意义。

通过本课程的学习，应使学生获得比较宽广和巩固的热量传递规律的基础知识，具备分析工程传热问题的基本能力，掌握计算工程传热问题的基本方法，并具有相应的计算能力及一定的实验技能，这就是学习本课程的目的和要求。

§ 1-2 热传递的基本方式

热传递是一种复杂的现象，在不同的条件下具有不同的机理。为了便于分析，常把它区分为几种基本传热方式。工程中所遇到的热传递现象常常是几种基本方式的不同主次的组合。一般认为这些基本方式有三种，即热传导、热对流及热辐射。以下对这三种基本方式作一简单介绍，其详细研究将在以后各章中逐次展开。

一、热传导

热传导简称导热。两个相互接触的物体或同一物体的各部分之间，由于温度不同而引起的热传递现象，称为导热。物体内部温度不同的各部分不发生相对位移是纯导热的主要特点。此时物体

内没有明显的物质转移，而仅依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行热量传递。从热力学观点来看，温度是微观粒子平均动能大小的标志，其平均动能越大，温度越高。据此，可认为热传导是处于不同温度下的介质微观粒子彼此之间相互作用而造成的能量传递，其总的结果是使热量从高温部分传向低温部分。

导热现象不仅在固体和静止的流体中存在，在流动的流体中也同样存在。

1822年，傅里叶在其著作中引出了热传导计算的基本公式。对于如图1-1所示的大平壁，若其两侧壁面各点的温度分别保持为 t_{w1} 及 t_{w2} ，且 $t_{w1} > t_{w2}$ ，则热量将从 t_{w1} 一侧传向 t_{w2} 一侧。此时通过大平壁的热流量 Q 可表示为

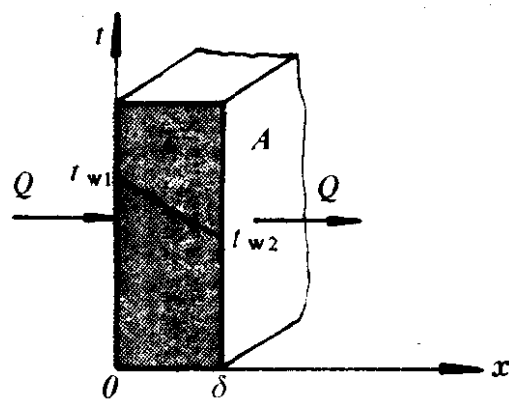


图 1-1 大平壁一维导热

$$Q = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中： A ——垂直于导热方向的截面积， m^2 ；

δ ——平壁厚度， m ；

$\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ——平壁两侧壁温之差， $^{\circ}\text{C}$ ；

λ ——导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。导热系数反映物质的导热能力，通常由实验求出。

单位面积所传递的热量 q ，称为热流密度。由上式可见

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

注意，传热学与工程热力学不同，交换的热量均指单位时间交换的热量，故其单位用“W”表示。

二、热对流

热对流是液体或气体由于宏观相对运动，从某一区域迁移到温度不同的另一区域时的热传递过程。显然，在热对流时表现为微观粒子间能量传递的导热依然存在。

工程上常遇到流动流体与温度不相同的壁面之间的换热，此时发生的热传递过程称为对流换热。根据流体是否存在相变，常把对流换热区分为有相变和无相变两类。而它们又可细分为若干类，例如根据流动的成因，无相变的对流换热又可分为强迫对流换热和自然对流换热。强迫对流换热流体的流动系由外力引起，如用水泵泵水使之流动。自然对流换热则是由于温差造成密度差，产生浮升力而使流体流动。例如用水壶煮水，在未达到沸点之前壶内的水已开始上下流动，此时的热传递过程即属于自然对流换热。

对流换热过程中，热流量的计算采用牛顿冷却公式：

$$Q = \alpha A \Delta t \quad \text{W} \quad (1-3)$$

或用热流密度表示为

$$q = \alpha \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-4)$$

式中： A ——与流体接触的壁面面积， m^2 。

α ——对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

Δt ——壁面温度 t_w 与流体温度 t_f 之差， C 。若 $t_w > t_f$ ， $\Delta t = t_w - t_f$ ，反之 $\Delta t = t_f - t_w$ ，即 Q 或 q 恒取正值。

由式 (1-3) 或 (1-4) 可见，计算的关键在于确定对流换热系数 α 之值。由于影响因素较多，因此 α 值的确定比较困难。关于这一点将在第四章中详加论述。在此仅指出，对流换热系数不是一个物性参数。

三、热辐射

凡温度高于 0K 的物体都会向外界以电磁波的方式发射具有一定能量的粒子（光子），这个过程称为辐射。光子所携带的能量称为辐射能。物体会因不同的原因发出辐射能。本书仅讨论热辐射，此时辐射能系由物体的内能转化而来。物体的温度越高，辐射能力越强。温度相同的物体，其种类和表面状况不同时辐射能

力也不同。

辐射能力最强的理想辐射体，称为黑体。以后将证明，黑体也是能将外来辐射能全部吸收的物体。它向周围空间发射的辐射能为

$$Q = \sigma_b A T^4 \quad \text{W} \quad (1-5)$$

式中： A ——物体参与辐射的表面积， m^2 。

T ——表面温度， K

σ_b ——黑体辐射常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

式(1-5)称为斯蒂芬-玻尔兹曼定律。该定律由斯蒂芬、玻尔兹曼分别从实验及理论导出，仅适用于黑体的热辐射。

自然界中各物体的温度都高于 0K ，所以均会向外界发射辐射能。物体发射出去的辐射能，当投射到其它物体上时可以被吸收，从而又转化为内能。这种物体间相互辐射和相互吸收的能量传递过程，称为辐射换热。辐射换热时，物体并不需要直接接触，也可以没有中间媒质，太阳向地球的辐射就是一例。必须指出，只有彼此看得见的物体之间才能直接进行辐射换热。

图 1-2 示出面积相同、平行放置的两黑体平表面，其间有温度等于 T_f 的完全透射的介质(如没有辐射和吸收能力的纯净空气)。当两表面间距离很小时，任一表面辐射的能量可认为全部落在另一表面上，并被全部吸收，此时利用式(1-5)可计算它们之间的辐射换热量。若表面 1 的温度 T_{w1} 大于表面 2 的温度 T_{w2} ，则

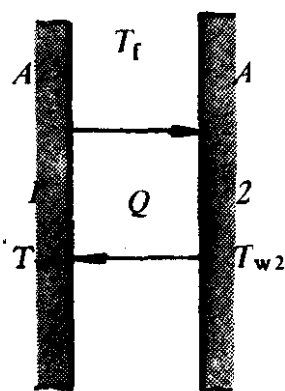


图 1-2 黑体平表面间的辐射换热

$$Q = \sigma_b A (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-6)$$

对于上述两平行平板间的辐射换热，在过程进行一段时间后，由于热量不断地从表面 1 传向表面 2，如果没有别的手段保持两板的表面温度恒定，两板的温度将趋于一致。此时辐射换热量为

零,但辐射及吸收过程仍在进行,此种状态称为热动平衡。反之,若要维持两表面的初始温度,则对表面 1 必须不断加入热量,而表面 2 必须不断有热量散出,以维持其温度不变。此类物体温度不随时间而变的过程称为稳态过程,否则称为非稳态过程。本书除导热外,均仅讨论稳态过程。

如前所述,工程热传递过程常是几种基本传热方式同时作用的结果。例如,水冷式内燃机燃烧室内的高温燃气以对流和辐射的方式将热量传给燃烧室内壁,再以导热方式传至外壁,然后以对流方式由冷却水把热量从外壁带走。这种高温流体通过固体壁面把热量传给低温流体的过程,称为传热过程。它的分析计算将在第七章中介绍。

例题 1-1 一厚 0.1m 的大平板,两侧温差保持 40℃ 不变。平板材料为:(a)导热系数 $\lambda=50\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 的铸铁;(b) $\lambda=0.13\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 的石棉。试计算其热流密度。

解 利用式(1-2),热流密度为

$$(a) q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 50 \times \frac{40}{0.1} = 2 \times 10^4 \text{W/m}^2$$

$$(b) q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 0.13 \times \frac{40}{0.1} = 52 \text{W/m}^2$$

可见,在相同的温差和板厚下,由于导热系数不同,通过两种材料的热流密度可相差 384 倍之多。

例题 1-2 长 $L=10\text{m}$ 、外直径 $D=150\text{mm}$ 的蒸汽管道,外壁温度为 55℃,水平地通过室温为 18℃ 的车间。设管壁与空气间的对流换热系数 $\alpha=9\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,如不考虑辐射的影响,试计算管道外壁对空气的对流换热量。

解 管道与流体的接触面积 $A=\pi DL$,由牛顿冷却公式(1-3):

$$Q = \alpha \pi DL (t_w - t_f) = 9\pi \times 0.15 \times 10 \times (55 - 18) = 1.57 \times 10^3 \text{W}$$

例题 1-3 面积相同的两平行黑体表面,其间距离与表面的宽和高相比甚小,以致通过两表面边缘向外辐射的能量可以忽略。表面温度分别为 527℃ 和 27℃。试求两表面间单位面积的辐射换热量。

解 利用式(1-6)可得

$$\begin{aligned} q &= \sigma_b (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \\ &= 5.67 \times 10^{-8} \times [(527 + 273)^4 - (27 + 273)^4] \end{aligned}$$

$$= 228 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

§ 1-3 热阻的概念

式(1-1)、(1-3)可分别改写为

$$Q = \frac{\Delta t}{\delta/(\lambda A)} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad \text{W} \quad (1-7)$$

$$Q = \frac{\Delta t}{1/(\alpha A)} = \frac{\Delta t}{R_\alpha} \quad \text{W} \quad (1-8)$$

可以看出,其形式与直流电路中的欧姆定律 $I=U/R$ 相类似: Δt 与电压 U 相对应,称为温压; $\delta/(\lambda A)$ 、 $1/(\alpha A)$ 与电阻 R 相对应,分别称为导热热阻及对流热阻。热阻的常用单位为 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。仿此,可定义单位面积的热阻。例如,对于大平壁

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{r_\lambda} \quad (1-9)$$

式中, r_λ 称为单位面积的导热热阻。将式(1-7)与式(1-9)比较,有

$$r = RA \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (1-10)$$

单位面积的对流热阻可同样定义,读者可自行推导。对于辐射换热,以后将会看到,也可定义相应的热阻。

在热传递过程中,引入热阻概念将对问题的研究带来很大的方便。例如前述内燃机气缸壁的传热过程,可模拟为:一个对流热阻和一个辐射热阻的组合,再串联上一个导热热阻及一个对流热阻。当求出其总热阻后,在已知温压的条件下即可方便地求出其总传热量。

思 考 题

1-1 试对导热、对流换热及辐射换热各举一工程及生活中的实例。

1-2 导热系数和对流换热系数的常用单位分别为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 及 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 试问将它们分别改为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 及 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 是否可以?

1-3 牛顿冷却公式中的 Δt 改用热力学温度之差 ΔT 是否可以?