

传热学教学中的热路分析法

李友荣, 吴双应

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘要:文章阐述了传热过程热路分析方法的基本思想与原理,揭示了热路分析方法在加深学生对传热过程理解、激发学生学习兴趣时的作用。结果表明:热路分析方法物理意义明确、浅显易懂,它不仅可以用于导热、对流和辐射传热过程的分析,而且可以用于导热、对流和辐射三种传热方式相互耦合的复杂传热问题,因此,应该在传热学教学中得到加强。

关键词:传热学;热路分析法;耦合传热;热阻;课程教学

中图分类号:TP-4;G642.0

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2012)01-0051-03

传热学是一门研究热量传递规律的科学,它是热能与动力工程专业的三大技术基础课之一,是连接基础课和专业课学习不可缺少的重要桥梁,也是培养学生分析和解决实际工程问题的关键环节,在课程教学体系中起着承上启下的重要作用^[1-4]。然而,由于三种传热过程传输机理不同、控制方程不同,特别是辐射传热、导热与对流传热有着本质的区别,从而使理论学习中知识点多、概念多,教学难度大,学生学习理解困难^[5-8]。

热量的传递是一种典型的传输现象,它与电量的传输、动量的传输和质量的传输之间具有很多共同的特性。以电学的基本知识为基础发展起来的热路分析方法,不仅物理意义明确、浅显易懂,而且可以为传热过程的分析与计算提供一种便捷的方法,易于被学生接受。文章以导热、对流和辐射传热及其耦合过程为例,阐述了热路分析方法在传热学教学中的地位与作用。

一、导热与对流传热过程的热路分析

在常规条件下,任何传输过程都存在阻力。例如,电量的传递存在电阻,动量的传递存在流阻,同样,热量的传递也存在热阻,它们都满足关系式

$$\text{传输通量} = \frac{\text{传递推动力}}{\text{阻力}} \quad (1)$$

导热与对流传热有一个共同的特点,即传递推动力都为温差,传热量都与温差成正比,这种比例关系分别由傅里叶定律和牛顿冷却定律给出。

假定有一块厚度为 δ 、面积为 A 的大平板,其导热系数为 λ ,平板两侧的温差为 Δt ,则通过平板的导热量

$$\Phi_d = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda A} = \frac{\Delta t}{R_d} \quad (2)$$

收稿日期:2011-09-15

基金项目:重庆大学大类系列课程建设改革资助项目(2009035A)

作者简介:李友荣(1963-),男,重庆大学动力工程学院教授,博士,重庆市工程热物理学学术带头人,主要从事传热传质学、非平衡热力学研究,(E-mail)liyurong@cqu.edu.cn。

式中: Δt 为导热过程推动力, $R_d = \delta/\lambda A$ 称为导热过程热阻。

同样,假定有一块面积为 A 的大平板,表面与某种流体发生对流传热,如果表面传热系数为 h ,流体与表面间传热温差为 Δt ,则对流传热量

$$\Phi_c = \frac{\Delta t}{1/hA} = \frac{\Delta t}{R_c} \quad (3)$$

式中: Δt 为对流传热过程推动力, $R_c = 1/hA$ 称为对流传热过程热阻。

在教学过程中应该特别强调,由于导热和对流过程中传热量与温差呈线性关系,因此,电路分析中的总电阻计算方法、电流与电阻的关系等同样适用于传热过程的热路分析。为了加深学生对热路分析法的印象,可以举以下例子。

假定有一块大平板由两种材料构成,其厚度相同,都为 δ ,导热系数分别为 λ_1 和 λ_2 ,面积分别为 A_1 和 A_2 ,总面积为 $A = A_1 + A_2$;平板两侧有温度不同的两种流体流过,温差为 Δt ,流体与表面间的平均表面传热系数分别为 h_{n1} 和 h_{n2} ,如果平板内的导热为一维稳态导热,试计算两流体间的传热量。对于这类问题,如果用导热微分方程求解,学生往往感到无从下手,而且求解过程繁琐,会降低学生的学习兴趣。此时,应该有意识地引导学生采用热路分析法求解。

如图 1、2 所示,首先画出传热过程的热路图,然后计算出每个环节的分热阻和总热阻,这样,就可以根据式(1)直接写出两流体间的传热量

$$\Phi = \frac{t_{n1} - t_{n2}}{\frac{1}{h_{n1}A} + \frac{\delta}{\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2} + \frac{1}{h_{n2}A}} \quad (4)$$

由此可知,热路分析法求解这类传热问题非常简洁,这样就可提高学生的学习兴趣。

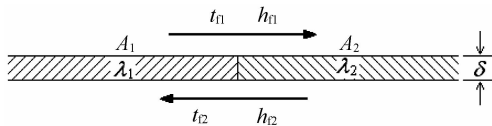


图 1 传热过程

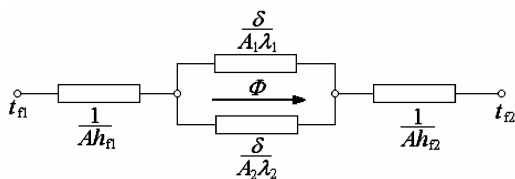


图 2 热路图

二、辐射传热过程的热路分析

与导热和对流传热过程相比,辐射传热的最大不同之处在于辐射换热量不再是温差的线性函数,而是与温度的四次方成正比,因此,辐射传热过程的计算更加复杂。

多表面间辐射传热过程的计算也常采用热路分析法,习惯上称为辐射传热的网络法。由于黑体的

辐射能力最大,因此,对于实际物体而言,通过引入有效辐射的概念,将辐射热阻分成两类:一类是反映物体表面特性对辐射传热影响的表面热阻;另一类是反映两物体相对位置对辐射传热影响的空间热阻。

假定有两表面组成的封闭腔,表面温度分别为 T_1 和 T_2 ,且 $T_1 > T_2$,表面黑度分别为 ε_1 和 ε_2 ,面积分别为 A_1 和 A_2 ,有效辐射分别为 J_1 和 J_2 ,相同温度下黑体辐射力分别为 E_{b1} 和 E_{b2} 。如果表面 1 对表面 2 的角系数为 $X_{1,2}$,则两表面间辐射传热热路图如图 3 所示。由于空间热阻和两表面热阻串联在一起,因此,总辐射传热热阻即为三热阻之和,故两表面间的辐射传热量

$$\Phi = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (5)$$

当用热路分析法求解辐射传热问题时,学生经常会问:电量传递的推动力是电势差(电压),导热和对流传热的推动力是温差(温压),为什么辐射传热的推动力不是温差,而是相同温度下的黑体辐射力之差呢?为了回答这个问题,必须要介绍三种热量传递的不同物理机制。辐射传热是依靠电磁波传输能量,由于热辐射发射的电磁波强度与温度的四次方成正比,两物体间的辐射传热量的大小与两物体温度的四次方之差成正比,习惯上用辐射力表示;因此,推动力即为相同温度下黑体辐射力之差。从本质上讲,两者相同,不管是温差,还是辐射力之差,都与温度的高低有关。

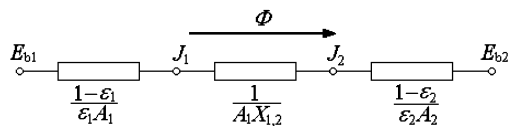


图 3 两表面封闭腔辐射传热热路图

三、耦合的导热、对流和辐射传热热路分析

在用热路法分析传热问题时,导热和对流传热推动力与辐射传热推动力形式不同,那么,对于导热与辐射耦合的传热问题以及导热、对流和辐射三种方式耦合的传热问题,热路分析法还能用吗?为了回答学生的这个问题,可举以下两例说明。

假定有两块水平放置的材质相同、厚度都为 λ 的大平板,其导热系数为 ε ,表面黑度为 ε ,面积为 A ,上平板上表面和下平板下表面温度分别为 T_{w1} 、 T_{w2} ,且 $T_{w1} > T_{w2}$,计算两块平板之间的传热量。显然,这是通过两平板导热与平板间辐射传热相互耦合的传热问题,也可采用热路分析法求解。首先,画出耦合传热过程热路图,此时的热阻包括通过平板的导热热阻、平板的表面热阻及两平板间的空间辐射热阻,如图 4 所示。采用热路法求解时,由于辐射传热与对流传热的推动力不同,不能将所有热阻直接相加,必须按式(1)对导热和辐射传热分别计算,然后在耦

合结点上利用 Stefan - Boltzmann 定律将两者关联起来;因此,有下述关联式

$$\Phi = \frac{T_{w1} - T_1}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A} + \frac{1}{AX_{1,2}} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}} = \frac{T_2 - T_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda A}} \quad (6)$$

在耦合结点上,有 $E_{b1} = \sigma T_1^4, E_{b2} = \sigma T_2^4$ 。联立各式即可确定两块平板之间的传热量 Φ 。

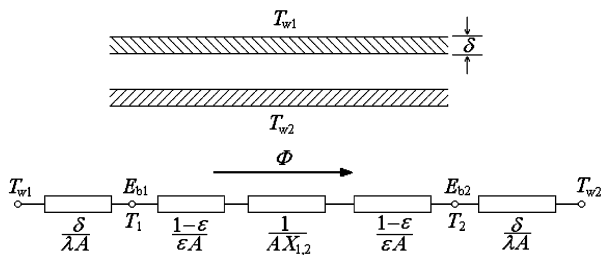


图4 导热与辐射的耦合传热(上)及其热路图(下)

在上述问题中,如果在两平板间有某透明的气体介质流过,其与上、下表面之间的表面传热系数分别为 h_1 和 h_2 ,这样一来,两平板间不仅有辐射传热,还有对流传热,从而构成了一个导热、对流和辐射三种方式相互耦合的传热问题。其热路图如图5所示,此时,也应该按式(1)对导热、对流和辐射传热分别计算。根据能量守恒原理得

$$\Phi = \frac{T_{w1} - T_1}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A} + \frac{1}{AX_{1,2}} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}} + \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{T_2 - T_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda A}} \quad (7)$$

同样,在耦合结点上 $E_{b1} = \sigma T_1^4, E_{b2} = \sigma T_2^4$ 。

从上述例子可以看出,对于导热与辐射耦合的传热问题,以及导热、对流和辐射三种方式耦合的传

热问题,热路分析法也是一种非常有效的求解方法。

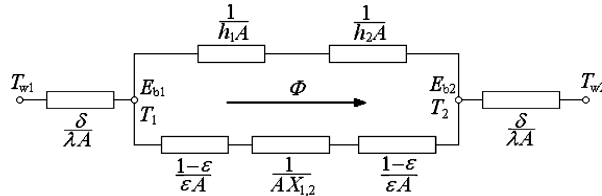


图5 导热、对流和辐射耦合传热热路图

四、结语

传热过程的热路分析方法物理意义明确、浅显易懂,它在加深学生对传热过程的理解、激发学生的学习兴趣过程中具有重要作用。热路分析方法不仅可以用于导热、对流和辐射传热过程的分析,而且可以用于导热、对流和辐射三种传热方式相互耦合的复杂传热问题。因此,应该在传热学教学中得到加强。需要特别指出的是,用热路分析法求解,只有当传热推动力相同时,总热阻的计算才能套用总电阻的计算方法,否则,必须对不同推动力下的热阻分别计算,然后耦合求解。

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 戴锅生. 传热学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,1999.
- [3] 赵忠超,周根明,陈育平.“传热学”教学方法的探索与实践[J]. 中国电力教育,2009(2):38-39.
- [4] 黄金.“传热学”教学改革探讨[J], 广东工业大学学报(社会科学版),2007(S1):72-73.
- [5] 严嘉琳. PBL 教学模式在“传热学”教学中的应用[J]. 中国电力教育,2010(4):67-68.
- [6] 赵斌,梁精龙.“传热学”研究性实践教学体系的构建[J]. 中国电力教育,2009(13):123-125.
- [7] 刘彦丰. 传热学课程课堂教学方法研究与探索[J]. 中国电力教育,2008(15):90-91.
- [8] 刘爱萍,浅谈传热学课程的教学改革[J]. 中国电力教育,2002(4):73-75.

Thermal circuit analysis method for heat transfer teaching

LI You-rong, WU Shuang-ying

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The basic idea and principle of thermal circuit analysis method for heat transfer process were illustrated and the importance of this method in promoting students to understand heat transfer process and motivating students' interest in learning was revealed. The results show that the thermal circuit analysis has clear physical meaning and is easy to understand. It not only can be used for heat conduction, convection, and radiation heat transfer analysis, but also can be applied in complex heat transfer process that coupled with heat conduction, convection and radiation heat transfer. It can be concluded that the thermal circuit analysis method should be emphasized in heat transfer teaching.

Keywords: heat transfer; thermal circuit analysis method; coupled heat transfer; thermal resistance; course teaching

(编辑 梁远华)