

传热学与电学问题的迁移类比研究:(1)理论基础

李元^{1,2}, 王晨^{1,2}, 张冠军^{1,2}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 迁移类比是交叉学科研究的一种重要的创造性方法,恰当的迁移类比有利于认知并解决学科间相似问题,驱动交叉学科发展。从传热学与电学的发展渊源着手,论证了热电类比研究的可行性。基于传热学与电学的基础理论,详细分析了传热学与电学的相似性与差异性。对比研究发现,传热学与电学在中心物理量、中心物理量衍生量与场函数及其边界条件等方面具有相似性,在热荷与电荷等部分物理量、传热与导电机理上存在差异。依据电路与热路中物理参量的显著对偶关系,从电路角度迁移类比得到热路分析模型。热电类比理论的基础研究有望为电学领域一些传热学问题提供解决思路。

关键词: 传热学;电学;迁移类比;热电类比模型

中图分类号: TM12 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202108010 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0078-07



Analogical Transfer Between Heat Transfer and Electrology: (1) Theoretical Fundamentals

LI Yuan^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, ZHANG Guanjun^{1,2}

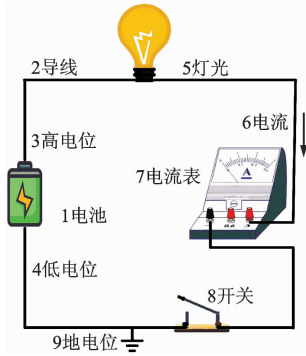
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Analogy of transfer processes is an important and creative method in many interdisciplinary studies. Appropriate analogy of transfer processes facilitates the recognition and even the similar problem-solving between disciplines and further drives the development of interdisciplines. In this paper, we compare the development and connection of heat transfer and electrology. It is acknowledged that the mutual reference and learning of theories among disciplines can promote the development of heat transfer and electrology and verify the feasibility of thermal-electric analogy study. According to the fundamental theories of heat transfer and electrology, similarities and differences between heat transfer and electrology are analyzed in detail. It is found that there are similarities of the heat transfer and electrology in-between central physical quantities, derived quantities of central physical quantities, field functions and boundary conditions, and differences exist in some physical quantities, such as heat charge and charge, as well as the mechanism of heat transfer and conduction. Based on the antithetical relations of physical parameters between heat transfer and electrology, we obtain thermal circuit analysis model by the analogy investigation of electric circuit. This approach to the theoretical fundamentals on thermal-electrical analogy is expected to provide enlightenments for solving heat

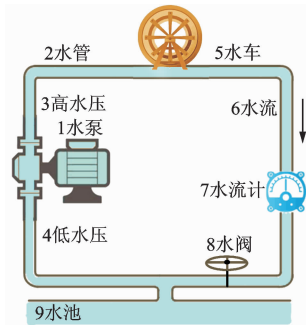
transfer problems in electrical engineering.

Keywords: heat transfer; electrology; analogical transfer; thermal-electrical analog mode

根据人类和生物界的学习心理,在认知新的概念时,常常会通过既有知识,借助熟悉的、与之相似的经验来理解新知识。例如,在理解电路的过程中,可以将电路与水管通路进行类比学习,二者的结构与功能存在许多相似之处,如图 1 所示。电池的作用类似于水泵提供动力源,灯泡发光类似于水车转动消耗回路能量,开关类似水阀,电流表类似水流计等。将熟知的水压形成水流的原理迁移到电路,有助于理解电流的产生与流动过程。



(a) 直流电路



(b) 水管通路

图 1 电路与水管通路的类比思想

Fig. 1 Analogy between a circuit and a water pipe route

上述应用到迁移类比的逻辑认知方法,即根据两个对象在某些方面的相同或相似性,推导、探索二者在其他方面的相同与相似性^[1]。迁移类比法在认知与解决学科间相似问题上有很多成功应用,例如,牛顿将天体运动与自由落体运动进行类比发现了万有引力定律;卢瑟福将原子结构与太阳系类比论证了电子绕原子核旋转运动;麦克斯韦将电学中的势与流体的压力类比推导出电场强度的计算公式;欧姆将电的流动与热的流动类比,在傅里叶定律的基础上提出了欧姆定律^[2]。从科学发展史可以看出,

不断探索不同学科间的共性规律推动了许多学科的交叉发展。

自然界和生产技术中普遍存在热量传递现象,传热学是研究热量传递规律的学科^[3],传热理论在冶金、建筑、航天和电气等领域广泛应用。传热学与力学、电磁学、光学等物理分支学科相比,缺乏与其他学科间的某些共性规律,基础理论还不完善^[4-6],且实际应用中设备的结构往往较为复杂,直接分析内部传热过程较为困难,因此传热学理论在工程实践中存在部分瓶颈。

合理地开展分支学科间的迁移类比可以驱动新兴交叉领域的发展,有效解决实际问题。学科间的相似属性越多、相似程度越高,迁移类比结果就越准确。本文从传热学与电学的发展渊源着手,基于传热学与电学的基础理论,深入分析传热学与电学的共性与差异,依据热-电类比思想,论证二者迁移类比研究的可行性,以期为电学领域中传热学问题的解决提供思路。

1 传热学与电学的发展渊源

在漫长的物理学史中,热与电首次“相遇”于雷电现象。人们发现雷击有时会引发山火,合理地运用火种可以驱寒饱腹^[7]。基于观察获取的经验和生存的需要,人类逐渐掌握了取火的技能,对热现象的探索由此开启。后来,对雷电现象的好奇驱使着人类探索更多的电过程,人们对电现象的研究也逐渐起步。

18 世纪初,在工业革命驱动生产力大发展的背景下,传热学迅速成长发展。20 世纪初,传热学从热学独立出来成为一门学科。传热的基本方式有导热、对流和热辐射 3 种,其中导热和对流的研究起步较早,热辐射的研究起步较晚^[8]。导热理论的奠基人傅里叶在实验研究的基础上,运用数学原理总结出导热的经验公式,即傅里叶导热定理;对流换热的基础是流体流动理论,由于流体流动的机理复杂,对流学发展较为缓慢^[9]。普朗特提出边界层理论,解决了流体力学的基本问题,加速了对流换热理论的发展;热辐射研究领域的 4 大定律奠定了热辐射理论的基础,分别是基尔霍夫热辐射定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律、维恩位移定律与黑体辐射定律,使得热辐射理论在 19 世纪末获得蓬勃发展。

人类早期对电的认识比较零散,系统的科学研究也是始于18世纪^[10]。不少学者在实验基础上进行观察与归纳,认识到大量重要规律,为电学的发展奠定基础。如迪费提出同种电荷相互排斥、异种电荷相互吸引,富兰克林总结出电荷守恒定律。18世纪后期,库伦通过扭秤实验,开展了电荷相互作用的定量研究。人们类比发现,静电力与万有引力定律在理论和实验上都有许多相似之处。1811年,泊松将从万有引力基础上发展起来的势论应用于静电力,提出了泊松方程。

随着对电学研究的不断深入,人们从传热学理论中得到启迪,欧姆定律便是热与电第二次“相遇”的成果。1826年,欧姆受傅里叶导热定理的启发,大胆猜想电传导与热传导具有相似性,认为电源与热传导中的温差有类似作用。后来通过实验明确了电路中电压、电流和电阻的关系,总结得到了现在的欧姆定律。此外,奥斯特、法拉第、麦克斯韦等人均为电学理论的发展完善做出了重大贡献。

纵观传热学与电学的发展历史,流体力学理论的完善加速了对流传热的发展,万有引力定律为静电力研究提供了理论支撑,傅里叶导热定理指导了欧姆定律的形成,理论间的相互借鉴与渗透推动了学科发展。随着社会进步的迫切需要,学科相互交叉与开拓已成为现代科学研究的重要发展方向^[11]。

传热是普遍存在的自然现象,包括电学在内的很多科学技术领域中必须予以考虑的主要因素或耦合因素^[12],而热量运输机理繁复且易受环境因素影响,直接运用传热学理论分析较为复杂。本文借鉴迁移类比思想,对传热学与电学深入开展相似性与差异分析,为认识交叉学科问题提供新视角。

2 传热学与电学的相似性

有效开展学科间类比的前提是选择合适的核心物理量,使得它们展示学科间相似性的同时也能最大限度地反映学科自身特点^[13]。本文分别选择广延量热容量 Q_{vh} 、电荷量 Q_{ve} 和强度量温度 T 、电势 U 。作为中心物理量,以中心物理量为基础展开相似性分析。

2.1 中心物理量的相似性

热荷是与物质的热相关的属性,没有质量并且依附于物质而存在。热荷的数量称为热容量,也称为熵^[14],单位为焦耳(J)。传热的基本方式分为3种:导热、对流与热辐射。严格意义上,固体间的传热现象为热传导,流体间传热过程会同时发生热传

导和热对流,而热辐射较为特殊,是电磁辐射的一种,温度高于热力学零度的物体便可产生热辐射。

温度 T 用来衡量物体的冷热特性,相当于传递热量的势^[15]。当两个温度不同的物体相互接触时,在温差驱动下,热荷由高温物体流向低温物体,直至二者温度相等,传热过程达到平衡,若想实现逆温度梯度传递需要附加热源。

电荷也是物质的一种物理性质,同样没有质量且依附于物质而存在,电荷的数量称为电荷量。根据形成方式的不同,电流分为传导电流、位移电流等。我们常讨论的电流多为传导电流,由自由电荷在导体中定向移动而形成;位移电流是电位移通量对于时间的偏导数,不存在热效应等。

电势 U 用来衡量电场中各点的能量大小,当两个带电体用导线连接时,在电势差的驱动下电荷由高电势处流向低电势处,直至二者电势相等。若想实现电荷逆电势传递需要附加电源。

2.2 中心物理量衍生量的相似性

在传热学中,热荷在传热导体内流动会形成热流,单位时间内流过任一截面的热容量称为熵流 I_s ,表示为^[16]

$$I_s = dQ_{\text{vh}}/dt \quad (1)$$

热容量是一种能量载体,因此热荷的流动过程中存在能量传输,能量的大小被称为能流强度 P ,可以表示为

$$P = TI_s \quad (2)$$

可以看出,熵流运载能量的能力与其温度相关,温度越高,运载能力越强。

过增元团队较早地对热学与电学量开展了对比分析研究,比拟导热与导电过程,提出了具有势能意义的物理量焓 E_{vh} ,表征物体传递热量的能力,为定义传热效率和优化传热过程做出了重要贡献^[17-20]。当外界对热容量为 Q_{vh} 的物体加热,使其温度由0 K变为 T 时,物体具有的热势能即焓,表达式为^[21]

$$E_{\text{vh}} = Q_{\text{vh}}T/2 \quad (3)$$

在传热过程中由于热阻 R_T 的存在,焓存在耗散不守恒^[22]。

若在传热导体区域内选取一个闭合的曲面 A ,假定不存在熵增过程,曲面区域内减少的热容量 dS 等于从该曲面流出的热容量之和,则熵流的连续性方程可以表示为^[16]

$$\sum I_s = \oint_A j_s dA = - \frac{dQ_{\text{vh}}}{dt} \quad (4)$$

式中: j_s 为熵流密度,即单位面积流过的熵流。

对应地,依据电磁学知识,电荷在导体内流动形成电流,单位时间内流过任一截面的电荷量 Q_{ve} 称为电流强度 I ,表示为

$$I = dQ_{ve}/dt \quad (5)$$

电荷流动同样在输送能量,能量的强度也就是我们熟知的功率,即

$$P = U_e I \quad (6)$$

电学中最常见的势能是静电势能,表征传递电量的能力,若平行板电容器的带电量为 Q_{ve} ,两板的电势差为 U_e ,则电容器的电势能可以表示为

$$E_{ve} = Q_{ve} U_e / 2 \quad (7)$$

同样,在导电过程中由于电阻 R 的存在,电势能也不守恒^[23]。

类似地,在导体内任取一个闭合曲面 A ,由电荷守恒可知,从该曲面流出的电荷量与曲面区域内减少的电荷量相等,即

$$\sum I = \oint_A j dA = - \frac{dQ_{ve}}{dt} \quad (8)$$

式中: j 为电流密度,即单位面积流过的电流。

通过梳理发现,传热学与电学的部分物理量存在对偶关系,这些物理量的概念相似且表达式结构对称。基于物理学的统一性,对比上述中心物理量衍生量,可归纳发现传热学与电学在能流、能流强度、势能,以及能流的连续性方程上具有对称性,从能量角度体现了两个学科的相似性。

2.3 热场与电场的相似性

2.3.1 场函数 温度场是指某一时刻空间内各点温度的总称,是时间和空间的函数,用直角坐标系表示为

$$T = f(x, y, z, t) \quad (9)$$

式中:表示物体的温度在 x, y, z 3 个坐标方向和时间上都发生变化的三维非稳态温度场。

电场是电荷及变化磁场周围空间里存在的一种特殊物质。与温度场类似,它也可以用时间和空间的函数关系表示,用直角坐标系表示为

$$U_e = f(x, y, z, t) \quad (10)$$

式中:表示电势在 x, y, z 3 个方向和在时间上都发生变化的三维非稳态电场。

2.3.2 传导方程 根据能量守恒定律,温度场中任何一个微元体的热流量守恒。对于常物性且有内热源的稳态温度场传导方程的一般形式为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{\lambda} = 0 \quad (11)$$

式中: Φ 为热源, $J \cdot m^{-3}$; λ 为导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot$

$^{\circ}C^{-1}$ 。

对应地,电场的内部电荷进出平衡。在各向同性与线性的均匀媒质中,有源稳态电场的电传导方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 U_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_e}{\partial z^2} + \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (12)$$

式中: ρ 为电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; ϵ 为介电常数, $F \cdot m^{-3}$ 。

2.3.3 传导方程边界条件 为了确定传导方程的解,需要给定边界条件,不同的边界条件显著影响计算结果的精度。导热微分方程常用边界条件有 3 类:一是温度边界条件,规定边界上的温度值;二是热流边界条件,规定边界上的热流密度值;三是热交换边界条件,规定边界上物体与周围流体间的表面传热系数 α 及周围流体的温度。

导电微分方程的边界条件也有 3 种:一是电势边界条件,规定边界上的电势大小;二是电势法向导数边界条件,即规定边界上的电流密度;三是场域边界面上各点电势和电势法向导数的线性组合的值。

3 传热学与电学的差异性

通过对所类比的两个模型差异性进行分析,可以显现研究对象的个性与特殊性。它们的差异性会影响因为相似性类比得到的类推结果,如果这些差别与我们所研究的问题关系很小,则相似性类比得到结论相对可靠;反之,则往往会得到错误的结论。因此,在传热学和电学的类比中,既应该关注它们的相似性,也要考虑它们的差异性。

3.1 物理量的差异性

为了方便问题的研究,传热学中存在许多假想的概念,例如热荷是为了研究问题方便而提出的,热流中并不存在热荷,而是存在由于分子的热运动传递着的内能;静电场是以场的形式客观存在的物质,而温度场不是一种物质,是为研究问题方便而给出的物理图像。

具体而言,首先电荷有正负之分,并且遵循异种电荷相互吸引,同种电荷相互排斥的规律,而热荷不区分正负。电荷量是一个守恒量,而热荷量并不守恒^[13]。例如在摩擦发热过程中,产生的热荷是系统的净增量,区别于摩擦起电过程中,电荷从一个物体转移到另一个物体,系统电荷量守恒。

其次,电学中有电感的概念,它是闭合回路的一种属性,当电流通过闭合线圈时,会在线圈中感应出磁场,磁场又会感应电流来抵制通过线圈中的电流。

这种电流与线圈的相互作用关系称为电感。电感是在电能量和磁能量的交互感应下,抵制电流变化的现象。目前,在传热学中没有热感的概念,对于热场中是否存在某种作用能量或作用力可以与热量交互变化,进而抵制热量的变化仍是未知。

3.2 传热与导电机理的差异性

在非闭合的导电回路中,由于没有放电通道,电压存在稳定的阶跃差。在闭合回路中,金属导线上的各个位置均存在自由电荷,在没有电场时电荷做无规则的热运动,导线内建立电场后,自由电荷在电场作用下定向移动形成电流。电能的传播速度实际上是电场的传播速度,理论值等于光速 3×10^8 m/s。对于热量的传递,存在热绝缘层时,层内外温度同样存在阶跃差。而从热绝缘变为热导通状态后,传热在空间上不再受回路的限制,在温度达到平衡前,热交换过程可以持续,因而在无外界能量作用的情况下,相邻物体的温差是一个渐变过程。所以,即使远距离的物体间能够快速建立温度差,也无法引起热量的快速转移,因此导电与传热过程在时间尺度上存在显著差异。但需指出,热辐射的传播速度与电磁波相同,接近于光速。

4 热-电迁移类比研究

不同现象的相似性可分为表面相似性与结构相似性^[24-25]。由上述异同比较可知,传热学与电学属于结构相似性,二者可通过类比法分析。类比法依据两个现象的某种相似关系,可将一种现象的理论应用于另一种现象^[26]。由于电路理论的建立简化了电学中许多的复杂问题,为了简化传热过程,可将电路迁移类比得到热路。虽然电路和热路的参量存在差异,但是多个参量存在对偶性,在一些短距离的热量传递过程中,借鉴电路分析思想能够快速建立对象的温度计算分析方程,实现热学工程问题的快速求解。

4.1 对偶参量

4.1.1 电压与温差 在稳态电场中,任意两点间的电势差称作电压,用来表示单位电荷位于电场不同电势下所产生的能量差,通常用 U 表示,单位是伏特(V)。温差为不含内热源的恒定热场中任意两点间的温度差,用 ΔT 表示,单位是开尔文(K)。

4.1.2 电流与熵流 电流通常用字母 I 表示,单位是安培(A);熵流通常用 I_s 表示,单位是 W/K。2.1 节对此已详细说明,不再赘述。

4.1.3 电阻与热阻 电流在导体中流动会遇到阻

碍,这种阻碍称为电阻,电阻是描述导体导电性能的物理量,常用 R 表示,单位是欧姆(Ω)。热量在导热媒质中传递时受到的阻碍称为热阻,用 R_T 表示^[22],单位是 K/W。导体的电阻一般与材料电导率、长度、横截面积以及温度有关,其中电导率 σ 是描述物质中电荷流动难易程度的参数,易受温度影响,单位是 S/m。导热体的热阻值与物质热导率、厚度和面积等因素有关。热导率是物质导热能力的量度,又称导热系数,同样与温度具有强相关性,用符号 λ 表示,单位为 W/(m·K)。

4.1.4 电容与热容 电容是反映电容器容纳电荷能力的物理量。一般来说,当导体之间存在介质,阻碍电荷在电场中的受力运动,使电荷在介质表面累积储存,电介质在电场中储存静电能的相对能力通常用介电常数衡量,储存的电荷量称为电容,常用 C 表示,单位是法拉第(F)。相应地,材料存储热量的本领称作热容,通常表现为物质温度的升高,用 C_T 表示,单位是 J/K。热容的大小与材料本身的密度、体积及比热容有关,其中比热容用来表示物体的吸热或散热能力。电容和热容在微观上分别用电容率(介电常数) ϵ 和比热容 c 来表示。

将以上对偶参量汇总列于表 1。如前文所述,电学中有电感的概念,而目前在传热学中无热感的概念,在此没有列出。

表 1 电路与热路的对偶参量

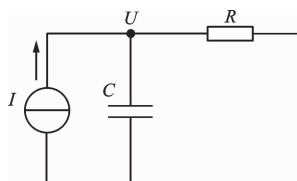
Table 1 Pairing parameters of electric and thermal circuits

电路	热路
电压 U (V)	温差 ΔT (K)
电流 I (A)	熵流 I_s (W/K)
电阻 R (Ω)	热阻 R_T (K ² /W)
电导率 σ (S/m)	热导率 λ (W/(m·K))
电容 C (F)	热容 C_T (J/K)
电容率 ϵ (F/m)	比热容 c (J/(kg·K))

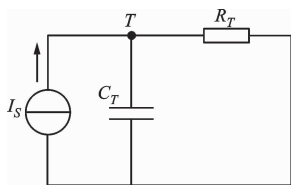
4.2 热路模型

参照电学的 RC 电路模型,可以根据对偶参量构造传热学的 R_TC_T 热路模型,如图 2 所示。热路模型可以合理地简化并解释复杂传热过程。热源发热引起回路温度上升,在温度差的驱动下发生热量传递。热量传递过程中部分材料温度升高,可以用热容表示材料的储热能力,部分材料由于阻碍作用耗散热量,这部分阻力可视为热阻,动态的产热与散热过程形成了稳定的热流回路。需要指出,本文所述的热路模型是通过类比直流电路得到的,交流(甚

至高频)电路如何类比得到对应的热路模型、是否可以应用于传热领域以及适用于哪类应用场景等问题仍待探究。



(a) RC 直流电路



(b) $R_T C_T$ 热路

图2 电路与热路的类比模型

Fig. 2 Analogical models of electric and thermal circuits

实际工程应用中,由于设备的结构和应用场景较为复杂,直接计算内部热场分布运算量大、耗时长,现场实施较为困难,可依据上述分析与电路分析理论构建设备的简化热路模型进行快速计算。运用基于稳态电路欧姆定律与基尔霍夫电流定律对偶,得到适用于稳态热路的公式^[22]

$$R_T = \Delta T / I_s \quad (13)$$

$$I_s = C_T \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_T} \quad (14)$$

即可求解设备温度分布,具体的工程实践应用案例将在下文中给出。

5 结 论

本文在介绍迁移类比理论、传热学与电学发展渊源的基础上,详细分析了传热学与电学的相似性与差异性,通过迁移类比为传热学中部分问题的解决提供新思路,将传热问题利用电路分析思路迁移类比得到热路模型,主要结论如下。

(1)在传热学与电学发展史中,迁移类比思想起到了重要的推动作用。以传热学与电学的中心物理量为基础展开的对比分析发现,二者在基本物理量、物理量间的关系式、场概念、场方程及其边界条件都具有相似性。

(2)传热学与电学的部分物理量(热荷与电荷等)以及传热与导电机理上虽然存在差异,但是电路和热路基本参量更体现出显著的对偶性,使得热学与电学类比的研究具有一定的理论基础。

(3)基于传热学与电学中物理参量的对偶关系,依据热-电类比理论建立的热路模型,使复杂的传热过程得以简化,可实现热学工程问题的快速求解。

致谢:针对热学和电学的关联性,作者与西安交通大学能源与动力工程学院、热流科学与工程教育部重点实验室陶文铨院士和王秋旺教授进行了交流讨论,促使了本文思路的形成和论文完成,在此向两位老师表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 袁希娟, 龚耘. 浅谈类比法 [J]. 河北理工学院学报 (社会科学版), 2003, 3(1): 84-88.
YUAN Xijuan, GONG Yun. A brief study on the method of analogy [J]. Journal of Hebei Institute of Technology (Social Science Edition), 2003, 3(1): 84-88.
- [2] 郭奕玲, 沈慧君. 物理学史 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 124-128.
- [3] 陶文铨. 传热学 [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 15-20.
- [4] 冯端, 冯少彤. 熵的世界 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 78-82.
- [5] 过增元. 热学中的新物理量 [J]. 工程热物理论, 2008, 29(1): 112-114.
GUO Zengyuan. New physical quantities in heat [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 112-114.
- [6] 纪军, 刘涛, 张兴, 等. 热质理论及其应用研究进展 [J]. 中国科学基金, 2014, 28(6): 446-454.
JI Jun, LIU Tao, ZHANG Xing, et al. Advancements of thermomass theory and its applications [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2014, 28(6): 446-454.
- [7] 阎康年. 热力学史 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989: 50-52.
- [8] 吴晶. 热学中的势能焓及其应用 [D]. 北京: 清华大学, 2009: 1-2.
- [9] 王秋旺. 螺旋折流板管壳式换热器壳程传热强化研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 881-886.
WANG Qiawang. Current status and development of shell-side heat transfer enhancement of shell-and-tube heat exchangers with helical baffles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 881-886.
- [10] GOLDSTEIN M. The experience of science: an interdisciplinary approach [M]. Berlin: Springer, 1984: 124-128.
- [11] 王补宣. 面临新世纪机遇的工程热物理 [J]. 世界科

- 技研究与发展, 1998(5): 68-70.
- WANG Buxuan. Opportunities for advancing engineering thermophysics in the new century [J]. World Sci-Tech R&D, 1998(5): 68-70.
- [12] 齐永强, 何雅玲, 张伟, 等. 电子设备热设计的初步研究 [J]. 现代电子技术, 2003, 26(1): 73-76, 79.
- QI Yongqiang, HE Yaling, ZHANG Wei, et al. Thermal analysis and design of electronic equipments [J]. Modern Electronic Technique, 2003, 26(1): 73-76, 79.
- [13] 吴国玠, 皇甫泉生, 顾铮先. 通过热力学与电学的类比加深对于熵的理解 [J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(4): 307-312.
- WU Guobin, HUANGFU Quansheng, GU Zhengtian. A more in-depth understanding of entropy by drawing analogy between thermodynamics and electricity [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2019, 41(4): 307-312.
- [14] 吴国玠, 皇甫泉生. 关于如何理解物理量熵的若干思考 [J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(2): 103-109, 149.
- WU Guobin, HUANGFU Quansheng. Considerations on how to understand the physical quantity entropy [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2018, 40(2): 103-109, 149.
- [15] 赵甜, 薛提微, 过增元. 可逆热力学中的对称性 [J]. 科学通报, 2019, 64(S2): 3030-3040.
- ZHAO Tian, XUE Tiwei, GUO Zengyuan. Symmetry of reversible thermodynamics [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(S2): 3030-3040.
- [16] 吴晶, 过增元. 熵的宏观物理意义的探索 [J]. 中国科学: E辑, 2010, 40(9): 1037-1043.
- WU Jing, GUO Zengyuan. Exploration of macro-physical meaning of entropy [J]. Science in China: Series E, 2010, 40(9): 1037-1043.
- [17] GUO Zengyuan, ZHU Hongye, LIANG Xingang. Entropy: a physical quantity describing heat transfer ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007(50): 2545-2556.
- [18] 过增元, 梁新刚, 朱宏晔. 熵: 描述物体传递热量能力的物理量 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1288-1296.
- GUO Zengyuan, LIANG Xingang, ZHU Hongye. Entropy: a physical quantity describing heat transfer ability [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(10): 1288-1296.
- [19] 程新广. 熵及其在传热优化中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2004: 51-73.
- [20] 胡幅杰, 曹炳阳, 过增元. 系统的熵与可用熵 [J]. 科学通报, 2011, 56(19): 1575-1577.
- HU Guojie, CAO Bingyang, GUO Zengyuan. Entropy and entropy revisited [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(19): 1575-1577.
- [21] 王松平, 陈清林, 张冰剑. 熵传递方程及其应用 [J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2247-2251.
- WANG Songping, CHEN Qinglin, ZHANG Bingjian. An equation of entropy transfer and its application [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2247-2251.
- [22] 陈群, 任建勋. 对流换热过程的广义热阻及其与熵耗散的关系 [J]. 科学通报, 2008, 53(14): 1730-1736.
- CHEN Qun, REN Jianxun. The generalized thermal resistance of convective heat transfer and its relation to dissipation [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(14): 1730-1736.
- [23] 韩光泽, 朱宏晔, 程新广, 等. 导热与弹性系统及导电的相似性 [J]. 工程热物理学报, 2005(6): 124-126.
- HAN Guangze, ZHU Hongye, CHENG Xinguang, et al. Transfer similarity among heat conduction, elastic motion and electric conduction [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005(6): 124-126.
- [24] 汤广福, 贺之渊. 相似理论在大功率电力电子装置试验中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 74-79.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan. Application of similarity theory in high power electronics equipment test [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 74-79.
- [25] 郝方舟, 赵慧, 赵洪山, 等. 基于灰箱理论的配电房温度变化预测模型研究 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 187-192.
- HAO Fangzhou, ZHAO Hui, ZHAO Hongshan, et al. Temperature change prediction model of power distribution room based on grey box theory [J]. Jiangsu Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 187-192.
- [26] BARBOT N, MICLET L, PRADE H. Analogy between concepts [J]. Artificial Intelligence, 2019, 275: 487-539.

(编辑 杜秀杰 陶晴)