

漫谈理论热学*

黄吉平[†]

(复旦大学物理学系 应用表面物理国家重点实验室 上海 200438)

2020-03-06收到

[†] email: jphuag@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200801

On theoretical thermotics

HUANG Ji-Ping[†]

(State Key Laboratory of Surface Physics, Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China)

摘要 文章简要介绍了理论热学, 一个理论物理(统计物理)中的新兴研究方向, 其以变换热学及其扩展理论为理论架构, 用于设计热超构材料, 实现任意操控热流的目的, 为工程技术应用服务。不同于传统热力学侧重于自然系统中热现象的被动描述, 理论热学侧重于人工系统中热现象的主动控制。

关键词 理论热学, 变换热学, 热传导, 热对流, 热辐射, 热超构材料, 特征长度

Abstract Theoretical thermotics is presented as a new direction of theoretical physics (statistical physics). It takes transformation thermotics and extended theories as the theoretical framework, and helps design thermal metamaterials to arbitrarily control heat flow for applications in industry and technology. Traditional thermodynamics focuses on a passive description of heat phenomena in natural systems. By contrast, theoretical thermotics emphasizes active control of heat phenomena in artificial systems.

Keywords theoretical thermotics, transformation thermotics, thermal conduction, thermal convection, thermal radiation, thermal metamaterials, characteristic length

1 有用的“理论物理”

“理论物理”是物理学一级学科下辖的一个二级学科。我一直认为“理论物理”是自由而无用的, 即相关研究过程有天马行空式的自由, 但无特定应用目标。可是, 也正因为无用, 所以有大用, 大用在于其作为基础理论可以用途很广, 这正如农民手中的钉耙, 可以用于收土豆, 也可以用于收红薯, 还可以用于松松土, 种种花生。隶属于“理论物理”的“理论热学(theoretical thermotics)”^[1], 自然也不例外。

然而, 何为“理论热学”^[1]?

2 有用的“理论热学”

首先, 请见表1。可以这么说, 经典“热力学(thermodynamics)”的主要内容是人类对自然系统宏观热现象的被动描述, 其以热力学四大定律为理论框架, 而“理论热学”的主要内容却是人类对人工系统宏观热现象的主动控制, 其以变换热学(transformation thermotics)及其扩展理论为理论框架。此处, 变换热学是指通过两种不同空间之间的坐标变换, 从而实现的一种把空间几何结构参数精确耦合进热导率等热学物理量的理论方法。该方法使得通过人工设计几何结构对热输运进行精确的新奇调控成为可能, 它是变换光学理论在热学领域的延伸。

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 11725521)资助项目

表1 “热力学”与“理论热学”之比较¹⁾

	主要用途	主要研究系统	理论框架
热力学	侧重被动描述 宏观热现象	自然系统	热力学四大定律
理论热学	侧重主动控制 宏观热现象	人工系统	变换热学及其 扩展理论

1) 被动描述: 人类只能认识它(即描述自然规律的热力学四大定律), 但不能改变它, 故名之“被动描述”; 主动控制: 其是指根据人类想要的任意目标结果, 建立或发展合适的理论, 以设计特定的人工系统, 从而获得想要的任意目标结果

可见, 变换热学及其扩展理论可以用于设计具有特定几何结构的热超构材料(thermal metamaterial), 从而用于主动操控宏观或微观热流, 实现各种工程技术应用所需的新奇性质或功能。

至此, 可能有读者会问: 这里提及的热超构材料又是什么呢?

答案很简单: 它们是一类人工结构材料, 其特定的几何结构(而非组成材料的物理性质), 能够使其具有自然材料或化合物所不具有的新奇热学性质或功能。

3 理论热学研究对象: 热超构材料

说到这里, 可能有读者会有新的疑问: 众所周知, 超构材料(metamaterial)起源于电磁波或光波领域, 其是有明确定义的, 就是指那些人工设计出来的结构材料, 它们的结构基元比入射波长小(亚波长), 或者小得多(深亚波长)。这里的入射波长对应于超构材料的特征长度, 你提到的“热超构材料”有特征长度吗? 如果没有, 似乎不能把它归入“超构材料”这个大家庭中来。

对, 很多电磁或光学领域的同行都关心过这个问题。其实, 热超构材料也有类似的特征长度。对此, 下面谈谈我的个人看法, 并不成熟, 权作抛砖引玉, 与同行探讨。

我们知道, 热传递有三种基本的传热方式, 即热辐射、热传导和热对流。迄今, 热超构材料已经可以用于操控这三种传热方式, 可单独操控, 也可复合操控。对于热辐射而言, 热超构材料的特征长度就是辐射电磁波的波长, 这很好理解。对于热传导来说, 热超构材料的特征长度就

是热扩散长度 $L^{[2]}$, 其是热导率 κ 、定压比热容 c 、质量密度 ρ 和时间 t 的函数, 即 $L=[\kappa t/(\rho c)]^{1/2}$ 。至于热对流, 无论是自然对流, 还是受迫对流, 热超构材料也是有特征长度的, 它就是流体介质流动所对应的几何长度, 显然, 这也是一个与时间呈正相关关系的物理量。可见, 无论是热传导, 还是热对流, 热超构材料的特征长度都与时间正相关。即当热超构材料开始传热时, 系统处于非稳态(即温度分布随时间变化而变化), 其对应的特征长度也是随时间的流逝而增大的。但当体系一定时, 随着时间的延伸, 系统终将达到稳态(即温度分布不随时间变化), 此时系统的特征长度可以视为系统本身的几何尺寸(注: 这里的“系统本身”, 特指系统的功能区域, 而不包含背景, 例如, 双层热隐身斗篷的核壳结构就是这里所说的功能区域之一种), 这时其中的任何人工结构都是小于系统本身大小的, 自然满足超构材料对特征长度的要求。这也是为什么热超构材料同行常常把(稳态)热超构器件(thermal metadvice)也纳入热超构材料之中的一个可能原因。同时, 这也解释了为什么很多能够工作在稳态的热超构材料(含器件)在非稳态时失效的原因——因为非稳态热超构材料对应的特征长度, 很可能会小于材料内部的人工结构基元的尺寸, 即不满足超构材料特征长度必须大于或远大于结构基元尺寸的要求。

需要一并说明的是, 已有的光子晶体, 其原胞尺寸与入射波长(特征长度)相当, 但是因其不满足超构材料对特征长度的要求(即人工结构基元需要小于或远小于入射波长), 故而自20世纪90年代超构材料兴起, 以及随后的相当长时间内, 光子晶体并没有被纳入超构材料之中。不过, 近几年, 也有少数学者在介绍超构材料时开始把光子晶体也纳入其中, 个中原因, 此处不去赘述。事实上, 可用于操控热声子或声波的声子晶体, 也有完全类似的经历。

此外, 值得一提的是, “thermal metamaterial (热超构材料)”这个词组最早在公开的学术期刊中出现, 是美国麻省理工学院学者在*Nature*发表的一篇综述论文^[3]。此文首次用该词组, 命名2008年起发表的5篇论文^[4-8]中基于变换热学(热传

导)理论提出的热隐身斗篷(热屏蔽)及相关器件。

因为这5篇论文^[4-8]研究的都是热传导,所以热超构材料这个名字在其诞生之初可以视为只适用于热传导(扩散系统)。鉴于基本的热传递方式不仅有热传导,还有热对流和热辐射,当前“热超构材料”的内涵确实已经从热传导扩展到热对流^[9, 10]和

热辐射^[11, 12]。至于热超构材料对热对流的控制,实际研究时,热传导也是伴随其中的,并且与热对流协同工作,能够产生新奇的热性质或热现象,例如等效无限大热导率^[9]、反宇称时间对称^[10]等等。至于热超构材料对热辐射的控制,当前的一个研究热点是日间辐射制冷^[11, 12],其已经取得很好的商业应用,实际应用时,它也必需与热传导和热对流协同工作,以获得期望的制冷效果。

关于热超构材料的更多发展历史和研究进展,建议阅读2018年第11期《物理》发表的文章“热超构材料十年简史”^[13]。

4 理论热学之名

至此,善意的读者可能会提醒我:“你命名的‘理论热学’,为什么不用其他更具有吸引力的名字呢?”事实上,我这样命名的一个很重要的原因是,作为复旦大学“理论物理”国家重点学科的一名教师,我希望套用“理论力学”的格式命名的“理论热学”,能够尽可能消除我与国内外同行交流时的隔阂,其可从字面上肤浅地视为是“使用解析理论的方法研究热的学问”的浓缩版。此处暂不去追求更深刻的内涵。换言之,现在的“理论热学”这个名字并不具有排他性,仅仅是为

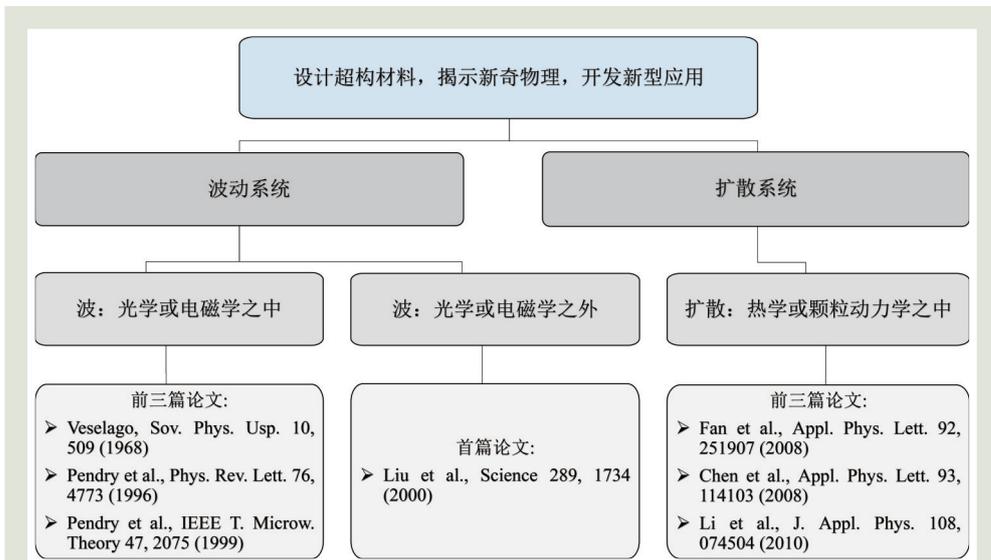


图1 超构材料,因其具有新颖的人工结构,而拥有大量新奇物理现象,并且已经获得很多新型应用^[1]。建议一并参阅2018年第11期《物理》文章“热超构材料十年简史”^[13]

了交流的便利而已,倘若有读者喜欢用其他名字,我看也完全可以——只要便于交流、便于发展。但是,无论如何,一个正式的名字还是需要有的,因为《论语·子路》中有教诲:“名不正,则言不顺;言不顺,则事不成”。

“理论热学”的英文翻译是“theoretical thermotics”,这里不用“theoretical thermodynamics”的主要原因是,它的理论基础是变换热学,其对应的英文翻译是“transformation thermotics”。可是,使用“transformation thermotics”这个英文翻译,又是为什么呢?因为变换热学起源于对热传导方程的变换^[4, 5],该变换并不涉及对热力学四大定律的变换,可是“thermodynamics(热力学)”的主体是热力学四大定律,所以,为了区分起见,早期我们给变换热学的英文翻译是“transformation thermotics”^[4],而非S. Guenneau等人已经使用的“transformation thermodynamics”^[6]。幸运的是,近几年来,使用前者的同行人数越来越多,而使用后者的同行人数则越来越少——时至今日,应该只剩下极少数了。再且值得一提的是,“transformation thermotics(变换热学)”起源于变换光学,后者的英文翻译是“transformation optics”,我们选用的“thermotics”与“optics”的构词结构,从字面上看,严格对应,这也是当初我

们^[4]不把变换热学英文翻译为“transformation thermology”或“transformation heat transfer”或“transformation thermophysics”的另一个不可忽视的原因。当然，英文翻译是什么并不重要，关键是内容。

5 总结与展望

本文介绍了“理论热学”，我个人认为，这可能是一个值得大家都知道的新的研究方向^[1]。

说一个领域重要与否，国人喜欢拿诺贝尔奖说事，在此，我也不能免俗。我一直认为超构材料物理领域(metamaterial physics)，很有实力在不久的将来诞生诺贝尔物理学奖获得者。如图1所示，该领域自1968年 Veselago (1929年6月—2018年9月)开始，得益于20世纪90年代 Pendry 教授的开创工作，其后兴盛至今。2008年之前，该领域的研究限于波动系统，自2008年起，在波动系统研究^[15]的启发之下，以热传导为代表的扩散系

统方面的相关研究也开始登上历史舞台^[4, 5]。迄今，在超构材料的帮助下，人们揭示了许多新奇的物理现象，其涉及物理学诸多分支，例如光学、电磁学、弹性学、声学、力学等，这些分支主要关注的是波动系统。针对扩散系统，超构材料也不甘落后，当前已经在热学、颗粒动力学等物理学分支取得不少新进展。针对热学分支，需要特别提及的是，把热扩散(热传导)系统与热对流和/或热辐射耦合起来，也已经取得令人瞩目的成绩^[9-12, 16, 17]，未来应该还会有更多。可见，作为超构材料物理的开创者，Pendry 教授完全有问鼎诺贝尔奖的实力。这也说明，这个领域还有很大的发展空间。

无疑，我十分看好理论热学与热超构材料这个领域的长期发展。希望能够得到更多同行——特别是年轻同行——的关注、加盟。

致谢 感谢博士生金鹏、须留钧、杨帅和博士后王斌对文章提出的修改建议。

参考文献

- [1] Huang J P. Theoretical Thermotics: Transformation Thermotics and Extended Theories for Thermal Metamaterials. Springer, 2020
- [2] Wegener M. Science, 2013, 342: 939
- [3] Maldovan M. Nature, 2013, 503: 209
- [4] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 251907
- [5] Chen T Y, Weng C N, Chen J S. Appl. Phys. Lett., 2008, 93: 114103
- [6] Guenneau S, Amra C, Veynante D. Optics Express, 2012, 20: 8207
- [7] Narayana S, Sato Y. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 214303
- [8] Schittny R, Kadic M, Guenneau S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 195901

- [9] Li Y, Zhu K J, Peng Y G *et al.* Nat. Mater., 2019, 18: 48
- [10] Li Y, Peng Y G, Han L *et al.* Science, 2019, 364: 170
- [11] Raman A P, Anoma M A, Zhu L X *et al.* Nature, 2014, 515: 540
- [12] Zhai Y, Ma Y G, David S N *et al.* Science, 2017, 355: 1062
- [13] 黄吉平. 物理, 2018, 47: 685
- [14] Li Y, Shen X Y, Wu Z H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 195503
- [15] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Science, 2006, 312: 1780
- [16] Li Y, Bai X, Yang T *et al.* Nature Commun., 2018, 9: 273
- [17] Xu L J, Dai G L, Huang J P. Phys. Rev. Appl., 2020, 13: 024063

读者和编者

《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649029。

《物理》编辑部