热量的力学

过增元
清华大学工程力学系热物理研究所

2014/12/19(高温气动力学实验室)

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

1. 有没有热量的力学?

2. 为什么要热量的力学?

3. 什么是热量的力学?

4. 热量的力学有什么用?

1. 有没有热量的力学?

“热力学”

不就是

热(量)的力学吗！？

(1) “热力学” (thermodynamics)

名词的由来

来自于希腊文"θερμοδυναμική"

Θερμο -- “therme” — heat (热)

δυναμική- “dynamis”— power (力/动力)

-- 不是动力学!

(2) “热力学” (thermodynamics) 的内容

- 热能利用——热机
  (热能与机械功转换)
  thermo-dynamic engine (热力机)

“热力学”是热/力(功)转换学,

而不是热量的力学！

(3) 热学的特殊性

- “非平衡热力学/传热学”中没有热驱动力、热的质量、热运动速度、热(运动)阻力的物理量
- 热学中独有的概念：熵、可用能 、品位、状态量/过程量…

表明“热力学” 不是热(量)的力学

(静力学、运动学、动力学)

热学不同于力学

法国数学和物理学家
传热学的奠基人

- 傅里叶“热的解析理论”(1822年):
  “……热现象构成了物理现象中一个特别的类，它不能用运动与平衡的准则来解释……不能与动力学相联系，它具有专有的准则……”

2. 为什么要热量的力学?

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

现有热学面临两方面的挑战

（1） 前沿技术 (激光、CNT) 中

傅里叶导热定律不成立!

现有应对方法

- C-V 模型(修正, 负温度)

$$q+\tau\frac{\partial q}{\partial t}=-\kappa\nabla^2 T$$

- 非局域模型(修正)

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\tau_q}{\alpha}\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\tau_T\frac{\partial^3 T}{\partial x^2\partial t}$$

- 声子动力学(微观)

$$\frac{\partial \boldsymbol{q}}{\partial t}+\frac{1}{3}\left(v^s\right)^2\nabla E=-\frac{\boldsymbol{q}}{\tau_R}+\frac{\tau_N\left(v^s\right)^2}{5}\left(\nabla^2+\zeta\nabla\nabla\cdot\right)\boldsymbol{q}$$

缺乏从**宏观基本原理**研究热量传递规律

(2) 世界性的能源短缺要求提高能效

- 最小熵产原理与传热性能最优（能效最高）不对应

- 其它优化理论(窄点法、遗传算法、线性规划等)都需某种程度的试湊

缺乏基于基本原理的

能效新理论

3. 什么是热量的力学?

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

建立热量力学的思路

(1) 从新审视热量本质，引入新物理量

- **热质**(不同于Caloric)

Einstein 质能量关系式 $E = mc^2$

热质 $m_h = \dfrac{U(\text{热能})}{c^2}$ [kg]

热能的等效质量，热运动引起的质量增量

热能具有等效质量的概念在物理学界已有认识
(加热物体会使其重量增加)

• 热质速度

在现有传热学文献中，只有热流密度，而没有传热速度的物理量

然而，我们可以从热流密度，导出传热速度这个物理量

$$q = \rho C T u$$

$$u = \frac{q}{\rho C T}\left[\frac{m}{s}\right]$$

u — 热量（声子气）的宏观运动速度

其它力学量

- 热质密度 $$\rho_{\mathrm{h}} = \frac{\rho C T}{c^2}$$
- 热质压力 $$p_{\mathrm{h}} = \gamma \rho_{\mathrm{h}} C T = \frac{\gamma \rho (C T)^2}{c^2}$$
- 热质动能 $$E_{\mathrm{Kh}} = \frac{1}{2} \rho_{\mathrm{h}} u_{\mathrm{h}}^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\rho C T c^2}$$
- 热质势能 $$E_{\mathrm{Ph}} = \frac{\gamma \rho (C T)^2}{c^2}$$

流体力学中的基本量

(2) 建立守恒方程

- 热质守恒

$$\frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_h \boldsymbol{u}_h \right) = 0$$

- 热质动量守恒

时间惯性力　　空间惯性力　　驱动力　　阻力

$$\frac{\partial \left(\rho_h \boldsymbol{u}_h \right)}{\partial t} + \rho_h \left(\boldsymbol{u}_h \nabla \right) \cdot \boldsymbol{u}_h + \nabla p_{\mathrm{h}} + \boldsymbol{f}_{\mathrm{h}} = 0$$

(流体力学中的基本方程)

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

- 热量是具有重量的流体，介质中的热量传递实际上就是热质流体在多孔介质中的运动。

- 由于其速度远小于光速，因此可用属于牛顿力学框架的流体力学方法描述导热的规律。

(3) 热质势能和熵（类比法）

导电过程	电量	电势	电势能	欧姆定律
	Q_{ve}	U_e	$\frac{1}{2}Q_{ve}U_e$	$\dot{q}_e = \sigma \frac{dU_e}{dn}$
多孔介质流动	质量	重力势	重力势能	达西定律
	M	Hg	$\frac{1}{2}MHg$	$\dot{m} = -K \frac{dP}{dn}$
传热过程	热质	热势	热势能	傅立叶定律
	$U/c^2\,[kg]$	$CT\,[J/kg]$	?	$\dot{q}_e = -k \frac{dT}{dn}$

缺少热质势能 $E_h = \frac{1}{2}UTC/c^2$ [J]

热质势能的简化表达式: $G = \frac{1}{2}UT$ **称其为熵**

焓 名称的由来

◎ 熵 的由来

1923年普朗克到南京讲 *entropy*, 物理学家胡刚复教授任翻泽，由于它的概念太复杂，就想了个简单的办法, 根据 $dS=dQ/T$，认为 S 是热量与温度之商，而且与火有关，从而构成新字 ‘熵’

◎ 焓 的由来:

$G=\frac{1}{2}UT$ ，G 是热能与温度之积，而且与火有关，从而构成新字 焓

◎ 克劳修斯(1865)创造 *entropy* 的由来

因为它具有能量的含义，所以用字头 *en*, 又因它代表热功转换能力，则用希腊字转变的 *tropy* 作字段，所以构成新字 ***en-tropy***

◎ *entransy* 的由来

因为它具有能量的含义，所以用字头 *en*, 又因它代表热量传递能力，则用具有传递含义的字段 *transy*, 所以构成新字

en-transy

熵 耗散

热量守恒： $\rho c_v \dfrac{dT}{dt} = -\nabla \cdot q$

方程两边乘以 T 后得到 熵 平衡方程

熵变化　　熵传递　　熵耗散

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}uT\right) = -\nabla \cdot (qT) + q \cdot \nabla T$$

- 在无体积变化时的传递过程中，

  热量守恒，而 熵则要耗散.

- 因此，与熵产一样，熵 耗散同样可以度量

  传热过程的不可逆性.

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

- 熵是热质势能的简化表达式
- 熵 耗散是传热学中的最小作用量
- 最小熵 耗散热阻原理是哈密尔顿原理在传热学中的应用

因此，可用类似于分析力学的方法研究介质中的传热问题

4. 热量的力学有什么用？

（1） 揭示各导热定律/模型的物理本质

热质动量守恒方程

时间惯性力　　空间惯性力　　驱动力　　阻力

$$\frac{\partial(\rho_h \boldsymbol{u}_h)}{\partial t} + \rho_h(\boldsymbol{u}_h \nabla)\cdot \boldsymbol{u}_h + \nabla p_{\mathrm{h}} + \boldsymbol{f}_{\mathrm{h}} = 0$$

它就是普适导热定律

$$\frac{\tau_{\mathrm{TM}}}{\kappa}\frac{\partial q}{\partial t} + 2\frac{l}{\kappa}\frac{\partial q}{\partial x} - b\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q}{\kappa} = 0$$

- 忽略全部惯性力时退化为傅里叶导热定律

$$\kappa\frac{\partial T}{\partial x}+q=0$$

- 忽略空间/部分空间惯性力时退化为 C-V模型

$$\tau\frac{\partial q}{\partial t}+\kappa\frac{\partial T}{\partial x}+q=0$$

- 忽略时间惯性力退化为稳态非傅利叶导热

$$\kappa(1-b)\frac{\partial T}{\partial x}+q=0$$

热现象能用运动与平衡的准则来解释！

(2) 极端条件下的热分析和热设计

适用于**超快速**（激光、高频芯片）；

超高热流密度（激光）；

微纳尺度（碳纳米管，纳米线）；

条件下的器件热分析和热设计

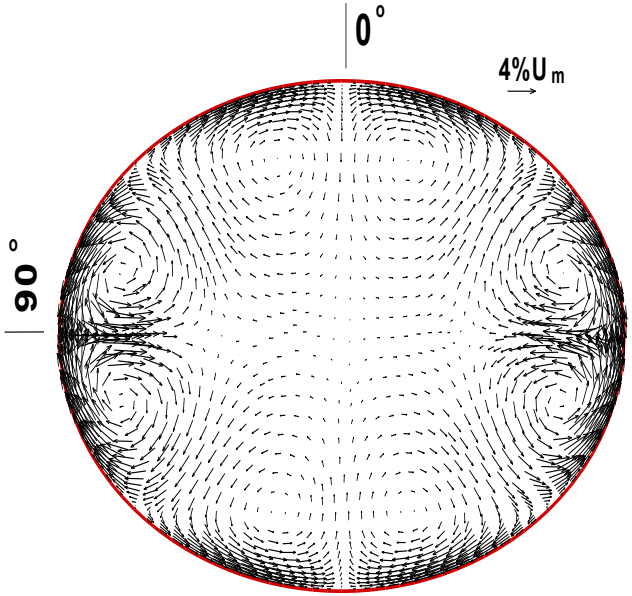
(3) 传热过程的节能(材)优化

- 层流换热优化

导出了能效最高时的流体运动的动量方程

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla P + \mu \nabla^2 U + \left(C_\phi A \nabla T + \rho U \cdot \nabla U \right)$$

方程的解：管内层流对流换热的最佳速度场为多纵向涡速度场



http://ncheat.tsinghua.edu.cn

（4） 换热器网络的优化

- 网络系统优化问题转化为变分或多元函数的条件极值问题：

优化目标： $\min \sum_i (kA)_{i,fc} + (kA)_e$

约束条件： $\sum_i \Phi_{hi,am} + \sum_i \Phi_{hi,fc} + \Phi_{h,m} + \Phi_{h,e} = \sum_i T_i Q_i - T_e \sum_i Q_i = \Phi_t$

Entransy balance equation

- 优化方程组：

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (kA)_{i,fc}} = 0 \quad \frac{\partial \Pi}{\partial (kA)_e} = 0 \quad \frac{\partial \Pi}{\partial (m_{i,ca} c_{p,ca})} = 0 \quad \frac{\partial \Pi}{\partial (m_{i,w} c_{p,w})} = 0$$

Π -- Lagrange function

Chen, et.al., Energy, 2012

结束语

(1) 現有经典热力学，是描述热与机械功相互转换的学科，不是热量的静力学；非平衡热力学/传热学，是描述热量传递的唯象/实验学科，不是热量的动力学.

(2) 热量是具有（当量）质量的可压缩流体，可用平衡和流体动力学方法描述热量传递过程，所得的普适导热定律适用于极端条件下器件的热分析和热设计

(3) 基于 熵 、热质势能等物理和变分方法，建立了最小 熵 耗散热阻原理，它已用于传热(导热、对流、辐射、换热器和网络等)的优化和开发了相应的系列节能技术。

(4) 在现有传学中引入热量的能、质二象性、热量动力学、最小作用量和哈密尔顿原理等后，可望逐步形成一个具有第一性原理的“分析传热学”的新学科 。

物理学家 马克斯 普朗克：

”科学是内在的整体，它被分割为单独的部门，不是取决于事物的本质，而是取决于人类认识能力的局限性”

http://ncheat.tsinghua.edu.cn

欢迎质疑