

热力学经典教科书中一个现象级的错误

原创 刘全慧 物理与工程 2023-10-12 09:01 发表于北京

热力学经典教科书中一个现象级的错误

刘全慧

湖南大学物理与微电子科学学院

磁介质的热力学部分有一个非常精彩的结果，简单而深刻。三小步就可以推出这个结果。

第一步，从热力学基本方程出发，

$$dU = TdS - pdV + \mu_0 H dm \quad (1)$$

其中 T, S, p, V 分别为温度，熵，压强和体积， $m = VM$ 为总磁矩， H 为磁场强度， μ_0 为真空磁导率。

第二步，施行勒让德变换把内能 U 换成吉布斯函数 $G = U - TS + pV - \mu_0 Hm$ ，取吉布斯函数的微分，得

$$dG = -SdT + Vdp - \mu_0 m dH \quad (2)$$

第三步，由于 G 对 p 和 H 的二阶导数具有次序无关性，有如下(麦克斯韦)关系

$$\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)_p = -\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)_H \quad (3)$$

等式的左边是磁致伸缩，右边是压磁效应。热力学把这两个不同的效应联系起来。这是何等神奇！每次讲到这个地方，我都几乎要赋诗一首，参见图1。

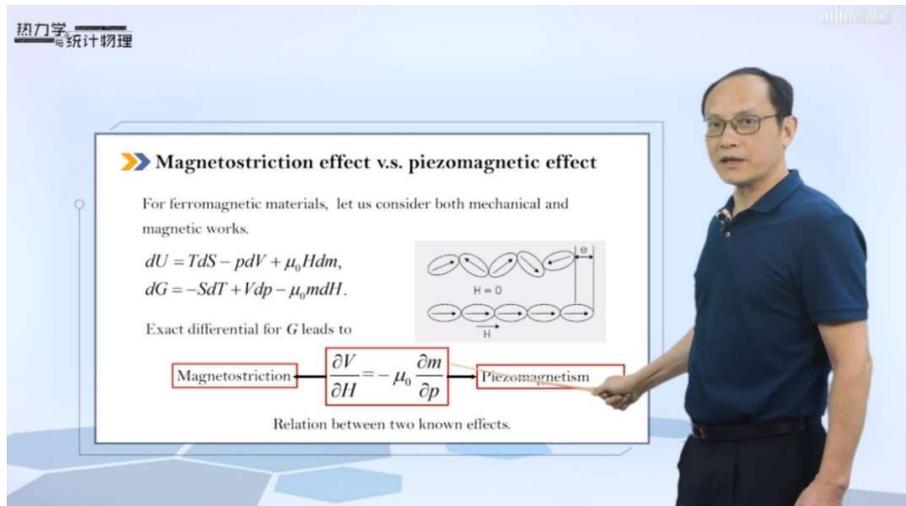


图1 我在智慧树平台上在讲解这个结果时的截屏。请跳过这一页。

和学生一起，我还专门写过一篇文章，赞美了这一个结果，参见图2。

再由于 Gibbs 函数的对两个不同变量 (p, H) 的二阶导数和求导次序无关，有如下麦氏关系：

$$\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)_p = -\mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_H \quad (10)$$

此式的左边表磁致伸缩，右边表压磁效应，它建立了两个实验效应间的关系。这个关系可以由实验直接验证。这是一个很重要的关系。

图2 我们的文章中认为关系式是一个热力学中的一个华彩结果

一本经典教科书“认证”了这个结果，而且持续使用了超过了四十年的时间，参阅图3，可能有数以十万的学生和老师熟悉它。

由完整微分条件可得

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \mathcal{H}}\right)_{T,p} = -\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)_{T,\mathcal{H}} \quad (2.7.16)$$

这也是磁介质的一个麦氏关系. 式(2.7.16)左方的偏导数给出在温度和压强保持不变时体积随磁场的变化率, 它描述磁致伸缩效应, 右方给出在温度和磁场保持不变时介质磁矩随压强的变化率, 它描述压磁效应. 式(2.7.16)给出磁致伸缩效应与压磁效应的关系.

图3 汪志诚《热力学·统计物理》第三版第94页, 第六版内容相同

直到昨天(2023年10月9日)晚上, 我才惊觉这个结果可能有问题, 不过问题有些隐蔽.

从电动力学可知道, 对静磁场中的线性介质, 磁相互作用能量密度元 dw 是

$$dw = \mu_0 H dM \quad (4)$$

热力学关心的是对整个磁介质的磁场功, 功元 dW_B 是,

$$dW_B = \int \mu_0 H dM dV \quad (5)$$

如果在磁化每个时刻, 磁化强度 M 都不依赖于空间点, 有

$$dW_B = V \mu_0 H dM \quad (6)$$

一般来说, 体积 V 是磁化强度 M 、温度 T 和压强 p 的函数. 只有体积是一个常数的时候, 才有如下形式的磁功元

$$dW_B = \mu_0 H d(VM) = \mu_0 H dm \quad (7)$$

这就是热力学基本方程(1)中的最后一项的来源. 但是, 磁致伸缩的时候, 体积和磁化强度同时改变, 也就是总磁矩 m 的微小改变分为两部分

$$dm = d(VM) = M dV + V dM \quad (8)$$

这也是(1)式中引入体积变化功的原因. 但是, (1)式把 $M dV$ 这一项直接忽略了, 就不再是严格的热力学基本方程. 出发点出了问题, 结果(3)就是可疑的.

细致而深入地研究这个问题不过不是本文的目的. 但是, 不妨简单地探讨结果(3)近似成立的条件. 正确的热力学基本方程是,

$$\begin{aligned} dU &= T dS - p dV + V \mu_0 H dM \\ &= T dS - p dV + \mu_0 H dm - \mu_0 H M dV \end{aligned} \quad (9)$$

如果如下条件成立

$$|p| \gg |\mu_0 H M| \quad (10)$$

则(9)中的最后一项可以忽略, (1)式近似成立, 即

$$dU \approx T dS - p dV + \mu_0 H dm \quad (11)$$

(3)式也就是在这个条件下成立的一个近似关系

$$\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)_p \approx -\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)_H$$

(12)

近似条件 (10) 没有任何一般性, 导致了式 (12) 的应用范围很狭窄。作为一个近似关系, 结果 (3) 显然就失去了光彩。我的线上课程中, 对这一部分的讲解, 要做相应的订正, 建议初学者直接跳过。

当然, 在热力学中, 磁功的表达式不是一个容易处理的问题。全国热力学与统计物理课程教学研究会副理事长、南京大学邢定钰院士说过, 他在《大学物理》上发表的唯一——篇论文, 也许是邢先生唯一一篇教学研究论文, 就是讨论磁功的表达式问题。因此, 当遇到磁功的时候, 从第一性原理出发, 结果具体的物理实际, 小心翼翼地处理。

为什么说是一个现象级的错误? 1, 问题能长期存在, 人人难辞其咎。指出这个错误, 也不能使得数以十万计的学生和老师立即认识到这一点。在一段时间内, 热力学的考试甚至考研的时候, 可能还会碰到这个题目。2, 物理学家大多是“美颜控”。不仅结果 (3) 形式实在优美, 而且出发点的功元满足功元的普适形式 $dW=ydX$, 其中 y 为强度量, X 为广延量。人人都喜欢漂亮, 而对于漂亮结果不容易回过头去细究这个结果成立的条件。3, 现在已经知道这个错误, 回过头去想, 可以从多种角度发现这个错误! 例如, 欧美教材没有这个结果。5, 如何对待教科书的内容选择和编排? 如何对待教科书中的问题? 如何衔接不同教科书中内容? 等问题值得我们深思。

作者简介: 湖南大学教授、岳麓学者, 全国热力学与统计物理课程教学研究会副理事长, 国家级一流课程热力学与统计物理主讲教师。

END



更多精彩文章请点击下面“蓝字”标题查看:

- 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会 会议纪要
- 2023 年全国高等学校物理基础课程青年教师讲课比赛在喀什大学举办
- 全国大学物理实验教学对口支援(智力援疆)研讨会在新疆师范大学举办
- 王青教授: 理解王中林院士“拓展的麦克斯韦方程组”
- “碰瓷”麦克斯韦: 伽利略协变和洛伦兹协变电磁场论趣谈
- 热点: 运动介质洛伦兹协变电磁理论
- 2021年《物理与工程》优秀论文、优秀审稿专家、优秀青年学者名单
- 王青教授: 源自苏格拉底的问题驱动式教育——在互动中共同学习和成长
- 读后感: 教育中的现实和远方
- 王青教授: 昨晚(6月9日), 清华电动力学期末考试
- 朱邦芬院士: “减负”误区及我国科学教育面临的挑战
- 《物理与工程》2022年第6期目录
- 乐永康: 新冠肺炎疫情防控下美国物理实验教学及中美情况对比
- 顾牡: 对于重新制定的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》的认识和体会
- 朱邦芬院士: 从基础科学班到清华学堂物理班
- 朱邦芬院士: 对培养一流拔尖创新人才的思考
- 李学潜教授: 物理是一种文化
- 李学潜教授: 如何帮助物理系学生迈过从高三到大一这个坎
- 穆良柱: 物理课程思政教育的核心是科学认知能力培养
- 穆良柱: 什么是物理及物理文化?

- 穆良柱：什么是ETA物理认知模型
- 穆良柱：什么是ETA物理教学法
- 吴国祯教授：我的国外研究生经历印象——应清华大学物理系“基科班20年·学堂班10周年纪念活动”而写
- 陈佳洱，赵凯华，王殖东：面向21世纪，急待重建我国的工科物理教育
- 王亚愚教授：清华物理系本科人才培养理念与实践
- 葛惟昆教授：关于中外人才培养的几点思考
- 安宇教授：为什么传统的课堂讲授模式需要改变
- 安宇教授：其实教学就是积累的过程
- 刘玉鑫教授：关于本科生物理基础课程教学和教材编著的一些思考
- 沈乾若：重创理科教育的美加课程改革
- Henderson C：美国研究基金支持下的物理教育研究及其对高等物理教育的影响

《物理与工程》期刊是专注于物理教育教学研究的学术期刊，是中国科技核心期刊，1981年创刊，欢迎踊跃投稿，**期刊投审稿采编平台**：
<http://gkwl.cbpt.cnki.net>



欢迎关注
 《物理与工程》微信公众号



喜欢此内容的人还喜欢

用脉冲星捕获背景引力波
 物理与工程



重新认识物理教学——“人文的物理学”的启示
 物理与工程



保罗·狄拉克：永不独行
 物理与工程

