

熵不“伤”：用“能量贬值”重塑热力学

田云龙

西华大学 能源与动力工程学院

摘要：对工程热力学课程中“熵”这一概念本身具有一定的抽象性、难以理解，并且较易被学生片面地解读成“混乱度”而忽略了“能量品质”的物理本质问题，在此背景下提出了概念“逆向”这一教学模式，即“舍弃从‘混乱度’出发的逆序思路，采用从‘能量贬值’开始的新视角，通过制造认知冲突——构建新框架——回归工程本质来真正让学生领会熵就是能量做功能力贬值程度的度量”。通过课堂上的实践操作得出结论：将熵真正作为能量做功能力贬值程度的度量来教授有助于有效地破解学生学习存在的问题，以及有助于增强学生对于热力学第二定律的理解和运用程度。

关键词：工程热力学；教学改革；熵；能量贬值；痛点教学；概念反转

引言

《工程热力学》是一门作为能源、动力类专业基础核心课，在实际的学习过程中，往往因该课程属于一门注重理论性的课程，概念比较抽象难懂而导致学生在学习的过程中常常感到枯燥乏味，以往的教学过程中存在着不少的问题^[1-2]。一般来说，有史以来一直沿用经典讲授法，在讲授的过程中大多是顺着传统思路展开：先讲热力学第二定律的各类表达式，再推出克劳修斯熵，最后借用“混乱度”解释微观层面的问题。这种讲解模式虽然教材很常见，但弊端却是明显的。如黄晓明等人曾指出：“混乱度”是最需要纠正的一个错觉，克劳修斯熵也只是对混乱度的一个宏观化概括，有失偏颇。学生会困惑于，为何温度高的热源具有高“品质”的能量，温度低的环境就没有呢？这样一来，我们的知识与工程实际的联系太远，根本就是完全违背了我们设置课堂教学的目的。仅为了应付考试而背公式的做法不能让学生真正了解熵的本质，不得不“谈熵色变”。结合“以学生为中心”的教学理念^[3]，借鉴翻转课堂的教育模式，在课堂教学时，改变教学逻辑的方向，从一开始就不直接给出“熵是什么”，而是指出我们需要什么，并辅之以“能量贬值”的强大比喻。

一、核心痛点分析与“概念反转”教学设计

(一)核心痛点深度剖析：从“混乱度”迷思到“工程应用”脱节

“熵”的概念之所以成为历届学生难以逾越的认知障碍，其根源在于传统教学模式在概念引入、物理图像构建和工程应用衔接上存在三重断裂。

1. 概念引入的断裂：“混乱度”比喻的局限性及其误导性

当前主流的工程热力学教材，大多沿袭历史发展路径，通过克劳修斯不等式严谨地推导出熵的定义式 $dS \geq \delta Q/T$ 。为了赋予这个数学定义以物理意义，教学中普遍引入玻尔兹曼熵 $S = k \ln \Omega$ 作为补充，并将熵通俗地解释为系统微观粒子运动的“混乱度”或“无序度”。然而，这一看似直观的比喻，对于工程学科的学生而言，却埋下了深刻的误解种子。但当学生将这一图像机械地套用到所有场景时，便会产生无法调和的矛盾。一个最典型的认知冲突是：一套整齐排列但处于高温高压状态的水蒸气（宏观有序），其做功能力远高于一堆杂乱无章但处于环境温度的空气分子（微观无序）。学生因此陷入困惑：为何“有序”的蒸汽能量品质高，而“无序”的空气却不能驱动发动机？这表明，“混乱度”无法作为“能量品质”或“做功能力”的可靠代理，它未能触及工程热力学最关心的核心——能量的可用性。

与宏观工程的隔阂：工程热力学重点研究宏观上的连续介质，要让学生掌握解决实际工程问题所用到的各种宏观参数；微观粒子的“混乱”只能是用来举例，而不是去引导学生陷入具体颗粒度的“混乱”思考，会让学生产生只看到微观世界的局部因素却看不到全局问题的本质的“见木不见林”的思维误区。

2. 物理图像构建的失败：熵作为“态函数”的抽象性与孤立性

在传统的教学过程中，熵往往是作为一个从数学公式中定义出来的“态函数”展现在学生面前的。即

作者简介：田云龙（1995—）男，工学博士，西华大学能动学院讲师，硕士生导师，研究方向为能源高效清洁利用领域的研究。

使教师再三强调熵在物理学中的地位，但是在学生的头脑里往往很难建立起像温度或者压力，这样一种比较形象、生动的物理图像来。它成为单纯的数学符号，而熵的物理含义是十分空泛的。当学生碰到“熵到底是什么”这一问题的时候，他们的回答大多是“熵是一个表征混乱程度的物理量”，这样的一种定义显然无法解释“为什么可逆绝热过程是等熵过程？”，也无法解释“工质通过不可逆设备后熵为什么会增大？”这个概念是非常抽象的，并且没有办法让学生联系到以往的经验或者对于周围世界的一些认知来感受到它的存在。

3. 工程应用衔接的缺失：从理论公式到工程判据的鸿沟

教学的最终目的是让学生能够应用知识解决实际问题。然而，在传统模式下，熵与核心工程应用之间存在着一条巨大的鸿沟。学生能够熟练背诵“孤立系统熵增原理”，却无法回答以下关键的工程问题：

① 效率极限问题：为什么卡诺热机的效率是理论上限？其本质限制究竟是什么？

② 过程方向性问题：为什么我们不能造一台“海洋热能”发动机，将海水的内能完全转化为功，让全球海水降温一度？

因为教学当中没有把“熵增”“能量品质贬值”这两个过程联系在一起，学生建立不了这样的认识：看不到熵变就是对应地失去了做功的能力。“熵增”原理是抽象而难于理解的数学关系，学生会把它当教条记忆下来，而不去自觉地将其当作是一个判断一个能源系统是否经济的有用的工程判据。

（二）“概念反转”教学模式的整体架构与设计理念

针对以上问题，本文提出了“概念反转”的教学模式。“概念反转”是摒弃传统教学习惯的教学逻辑顺序，并不是“由什么”引出“熵”，而是从“为了解决什么”出发；教学起始点不是寻求确定的工程目标来描述“熵是什么”，而是在意识到能量在转换过程中“做功能力”的变化问题后直接“抛出”熵的概念，不用“熵的概念事先被摆在那里像一块必须赶紧吞下的石头”^[4]。

本模式的设计遵循以下理念：①以终为始；②形象化先行；③贯穿始终

（三）“概念反转”三步教学法的详细实施路径

第一步：制造认知冲突——瓦解旧范式，激发新需求

1. 课堂实践活动设计：

① 情境设问：在讲解完热力学第一定律（能量守

恒）后，向学生展示两个系统：A. 一杯 90 °C 的热水；B. 一池 25 °C 的池水。提问：“从第一定律看，两者都拥有内能。但如果我告诉你，这杯热水可以用来驱动一台微型发动机发电，而这池水几乎不能，你如何从物理上解释这种差异？”

② 引导讨论与暴露矛盾：学生可能会提出“温度高”等原因。教师肯定温度是关键，进而追问：“如果我们用‘混乱度’来解释呢？这杯热水分子运动剧烈，很‘混乱’；池水分子运动平缓，相对‘有序’。难道不是越混乱，能量品质越高吗？”此时，学生的直觉（温度高则品质高）与“混乱度”比喻的推论（池水更有序故品质应更高）产生直接冲突。

③ 提炼核心问题：教师总结：“由此可见，‘混乱度’无法准确描述能量的‘品质’或‘做功能力’。在能量守恒的背后，隐藏着一个关于能量‘品质’蜕变的秘密。今天，我们就来揭开这个秘密，并找到一个能够精准度量能量品质变化的物理量。”

2. 设计意图：通过精心设计的认知冲突，主动揭示“混乱度”比喻的致命缺陷，从而在学生心中制造强烈的“认知失衡”和求知渴望，为接纳一个新概念做好充分的心理准备。

第二步：引入核心比喻——建构“能量贬值”新范式

1. 核心讲述与比喻展开：

① 提出核心比喻：“让我们把能量想象成货币。高温热源的能量，好比是百元大钞，购买力强劲，可以驱动大型机器（做大量的功）。环境温度的能量，则像是一元硬币，虽然也是钱，但难以直接购买大件商品（做功能力微弱）。”

② 阐述过程本质：“任何实际的热力过程，都像是在进行一场不可避免的货币兑换。例如，一台热机从高温热源取热（收入百元大钞），其中一部分用于对外做功（购买商品），另一部分则排向低温冷源（被迫换成一堆硬币零钱）。整个过程，总金额（总能量）守恒，但总的购买力（总的做功能力）却下降了。”

③ 定义新概念：“为了量化这种‘购买力’的下降程度，我们引入一个物理量——熵（S）。熵就是衡量我们能量‘钞票’面值变小程度的尺子。一个系统的熵越大，代表其能量的‘零钱化’程度越高，品质越低。”

④ 陈述基本定律：“热力学第二定律因此可以表述为：在一个孤立系统中，你无法阻止你的‘百元大钞’自发地变成‘一元硬币’。总的‘零钱’数量（总熵）只会增加，不会减少。”

2. 可视化辅助与案例深化:

①采用动画演示,生动展现能量流在流经热机时,从代表高品质的大面额钞票图标,逐步转变为代表低品质的小面额硬币图标的过程。

②即时在黑板上画出 T-S 图,并解释说:“这个图就像是能量的‘账本’,曲线下的面积代表的是因‘兑换’而损失掉的那部分购买力(即不可用能)。熵增越大,这笔‘损失’就越大。”

第三步:回归工程本质——应用新范式解决经典问题

1. 卡诺循环与热机效率极限的再阐释:

①传统讲法:直接给出卡诺效率公式 $\eta=1-T_l/T_h$,然后进行数学推导。

②新范式讲法:“卡诺循环之所以是最高效的,是因为它设计了一套‘最精明的货币兑换方案’。它通过可逆的等温吸热和放热过程,最大限度地减少了在‘兑换’过程中的不必要的损耗(即熵产)。公式中的 T_l/T_h 项,本质上刻画了冷源‘硬币’与热源‘钞票’之间的‘汇率’。无论技术多先进,我们都无法避免要将一部分热量按这个糟糕的‘汇率’兑换成‘硬币’排掉,这就决定了效率的上限。”

2. 制冷/热泵循环的再阐释:

①传统讲法:从逆卡诺循环开始,分析其工作原理。

②新范式讲法:“制冷的目的,是从更‘零钱化’的环境(室内)中提取热量,并将其‘升级’成‘钞票’排到更热的环境(室外)。这相当于要把‘一堆硬币’重新摞起来换回‘百元大钞’,这显然是违背自发趋势的。因此,我们必须消耗外功(投入新的‘钞票’)作为‘手续费’,才能驱动这个‘逆向兑换’过程。所耗的功,正是为了克服系统总熵的必然增长。”

3. 工程损失分析的定位:

引导学生分析一个不可逆的换热过程。指出由于存在传热温差,这个过程的熵产大于零。教师强调:“看,这里产生了额外的熵产,意味着在这个环节,我们有一笔额外的‘能量钞票’被毫无意义地兑换成了‘零钱’,这就是做功能力的净损失!熵产,就是我们定位和量化工程中能量损耗‘黑洞’的探测器。”

通过以上详尽的三步教学法,学生得以在一个统一、自洽且直观的“能量贬值”范式下,重新理解和应用熵的概念,从而真正实现从“知其然”到“知其所以然”的跨越。

二、教学实施与效果分析

在本校 2024–2025 学年《工程热力学》课程中,我们对两个平行班($n=60/班$)进行了对比教学实践。A 班采用传统教学法,B 班实施上述“概念反转”教学法。为评估效果,我们采用了以下方法:

1. 概念辨析题测试:期末一道题目为“‘一个系统越混乱,其能量品质越低’这一说法是否严谨?请阐述。”结果显示,B 班学生能准确指出其不严谨性(混淆了表象与本质),并能从能量品质和熵的角度进行正确分析的比例高达 85%,显著高于 A 班的 45%。

2. 学习动机观察:在后面熵的工程应用讨论中,B 班学生的课堂参与度和提问质量明显高于 A 班,表明其学习动机和应用信心得到增强。这与刘浪等关于教学互动与学习动机正相关的研究结论相一致^[5]。

三、结论与展望

本文针对“熵”的教学痛点,成功设计并实践了一套以“能量贬值”为核心比喻的概念反转教学模式。该模式通过三步教学法,实现了学生对熵的概念从模糊的“混乱度”到清晰的“能量贬值度”的根本性转变,有效破解了认知障碍,显著提升了教学成效。

本策略以工程应用终局为目的,运用具有冲击力的比喻拆解理论的枯燥晦涩,具有实效性,以后能将“痛点导向—概念反转”的方法运用到“㶲”“火用”等其他类似的抽象概念的课堂教学上,并结合虚拟仿真的教学方法加以应用,使其成为具有普适性的工程热力学教学法。

参考文献:

- [1] 张芳芳,金听祥,陈俊杰,等.《高等工程热力学》课程教学体系优化与多学科融合路径研究[J].科技视界,2025,15(23):83–85.
- [2] 黄晓明,许国良,方海生,等.关于工程热力学教学难点“熵”的教学设计思考[J].高等工程教育研究,2023(S1):206–208.
- [3] 焦运景,白亚双,许文娟,等.以学生为中心的《工程热力学》课程教学方法改革探索[J].北华航天工业学院学报,2025,35(4):38–40+53.
- [4] 仇伟,刘莹,方宏萍.工程热力学课程教育模式改革实践[J].化工管理,2025(15):15–18.
- [5] 刘浪,王勤,宋家胜.高等工程热力学课程中教学互动模式对学生学习效果的影响——基于路径分析的实证研究[J].黑龙江科学,2025,16(13):84–86.