

注：由于“焯”为自造字，Word 文档会有错码，PDF 版本可正确显示文档！

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

教案主题：概和概耗散

比赛类别：理工类

比赛组别：A

选手姓名：曹炳阳

2013 年 5 月 22-24 日

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

概和概耗散

(Entransy and Entransy Dissipation)

课程名称：新概念热学

课程类型：专业基础课

授课对象：三年级本科生

2013年5月22-24日

一. 课程介绍与教学目标

【课程名称】

中文：新概念热学

英文：New Concept Thermophysics

【课程类型】

专业基础课

【教学对象】

工程热物理（热能动力工程）专业三年级本科生

院系：航天航空学院、热能工程系、汽车工程系、建筑学院

【课程内容简介】

《新概念热学》是我校过增元院士在传统的《传热学》课程基础上创立的一门全新的课程，旨在弥补传统传热学在解决超高速和高热流密度等极端条件下传热和热量传递过程节能优化问题中存在的不足。课程在引入热的能质二象性学说基础上介绍热量传递过程的新概念（热质和概等）、分析方法、数学模型、基本原理和应用技术，阐明热量传递的普适定律和优化热量传递过程的普遍原理。学生通过该课程的学习可以对解决高新技术和节能领域中的热物理问题奠定良好的理论基础，掌握工程热物理学的一些最新进展和研究前沿并学习研究创新的思维方法。《新概念热学》是工程热物理、热能动力工程等专业本科生的专业基础课，面向航天航空学院、热能工程、汽车、建筑等关于动力工程和能源环境专业的学生开设。

【课程内容】

1. 热质和热的能质二象说：热学发展简史、现有传热学面临的挑战、热的本质探索——热质说和热动说、热质及其基本属性、热的能质二象说；
2. 热质的状态方程和热质的运动：热子和热子气、热子气的状态方程、声子和

声子气、声子气的状态方程、热质的运动及动力学物理量；

3. 热质的守恒方程和傅里叶导热定律的物理本质：热质运动的动力学、热质运动的守恒方程（连续性方程、动量和能量守恒方程）、傅里叶导热定律的物理本质；

4. 稳态导热定律及其应用：稳态非傅里叶导热定律、碳纳米管中的稳态导热、金属纳米薄膜的非傅里叶稳态导热、热整流和热驱动现象；

5. 热波现象：傅里叶导热定律的局限性、经典热波模型及其局限性、普适导热定律及热波传递现象分析、非傅里叶导热的物理本质；

6. 传热过程的热力学优化：强化传热技术进展、场协同理论、非平衡热力学与最小熵产原理、传热过程的热力学优化；

7. 概理论：概和概耗散的概念、概和热势能、概效率及其应用、概平衡方程、概和熵、概理论的发展现状；

8. 概耗散极值原理：物理学中的最小作用量原理、最小熵产原理优化传热过程的局限性、概耗散极值原理（最大概耗散极值原理和最小概耗散极值原理）；

9. 最小热阻原理：传统热阻概念的局限性、基于概耗散定义热阻、最小热阻原理及其和概耗散极值原理的等价性；

10. 基于概耗散的优化理论与节能技术：概耗散概念的拓展（导热、对流、辐射、传质）、应用：换热器优化、航天器轻量化、能源系统和网络的优化等。

【课程教学目标】

使学生深入理解并熟练掌握传热传质的基础理论、数学模型、分析方法和优化设计技术，特别是最近十几年来的研究进展。具备对先进技术领域中高热流密度散热进行热分析热设计和对工业能量传递过程进行节能优化设计的能力，了解专业知识的国际学术动态，掌握学习和研究创新的思维方法。

【教材与参考书】

教 材：[1] 过增元, 曹炳阳. 新概念热学. 待出版

[2] 李志信, 过增元. 对流传热优化的场协同理论. 北京:科学出版社. 2010

参考书：[1] J.P. Holman. Heat Transfer. Mc Graw Hill. 2008

[2] A. Bejan. Advanced Engineering Thermodynamics. Wiley & Sons. 1997

【前导课与后续课】

本课程的主要前导课为《传热学》和《工程热力学》，后续课程为工程热物理和热能动力工程专业学生的专业课，包括《分析传热学》、《换热设备》、《辐射换热》、《航天器热控制与热管理》和《热物理测试技术》等。

二. 单元教学任务与目标

【单元教学任务】

在 50 分钟内讲授“第七章 概理论”中的第 7.1 节：概和概耗散（其中前 20 分钟为参赛教学演示内容）

【单元教学目标】

1. 知识层面

- 理解新物理量概和概耗散的概念、表达式及其物理内涵；
- 掌握概平衡方程及其物理意义；
- 掌握基于概耗散定义的概效率及进行传热优化的思路。

2. 能力层面

- 理解概和熵概念的物理内涵和应用领域的不同；
- 运用导热与导电的类比理解概平衡方程各项的物理意义；
- 能够基于概耗散的定义计算实际传热过程中的概耗散和概效率。

3. 思维层面

- 类比法：从基于热电类比提出概概念掌握类比法并进行应用；

- 类比和演绎：从概定义的提出和推导掌握类比法和演绎方法的辩证关系；
- 科学与人文：从“概”和“熵”的文字文化认识科学和人文的交融。

三. 单元教学重点

在前一章“传热过程的热力学优化”中，参赛教师已经为学生简述了强化换热技术的发展概况和传热过程的热力学优化理论。本章的教学重点则是：概理论及其应用。具体到本教案的 50 分钟教学，其教学重点集中在：概和概耗散概念的提出及其物理内涵、基于概耗散定义效率并进行传热优化、概和熵在物理内涵和应用上的区别。单元教学重点可作如下分解：

1. 概和概耗散的概念

概和概耗散是全新的概念。概表征热势能，即物体传递热量的能力，概耗散表征传热过程中传热能力的损失。在该知识点的教学中，不仅需要讲解概和概耗散概念的表达式，更需要说明为何需要概和概耗散的概念，概和概耗散的概念是如何提出的，概和概耗散是何物理意义并且有何应用价值。在阐释概和概耗散的概念和物理意义上，从热电类比和演绎两种方法出发进行介绍，以加深学生的理解。

2. 基于概耗散定义传热效率及其在传热优化中的应用

有了概和概耗散的概念，传热效率则可定义为： $\text{输出概}(\text{输入概}-\text{概耗散})/\text{输入概}$ 。教学重点为概效率的意义、如何应用于传热过程优化和基于概耗散和熵产概念两种优化方法的区别。在教学中除理论讲解外，还需设计具体的应用实例（如热管能源管理系统、CPU 内热源散热优化等）分析说明基于概耗散和熵产概念两种优化方法的区别，为后面几节课发展传热优化理论、方法和技术打下基础。

3. 概和熵在物理内涵和应用上的区别

概为《新概念热学》新引入的概念，它表征物体热量传递的能力，主要用于定义传热效率并应用于传热过程的优化；而熵是经典《工程热力学》中的核心概念，它表征系统的无序度和热功转换能力，主要用于衡量过程的不可逆性和热功转换过程的优化。在教学中需重点对比概和熵概念的不同，阐明它们在微观物理意义、宏观物理意义、热力学内涵和在传热和热功转换过程优化中的不同。

四. 学生特点与教学难点分析

参赛教师所教的学生在大学一年级学习了《大学物理——热学》，在大学二年级中系统学习了《传热学》、《工程热力学》和《流体力学》，有些学生自修或自学过《统计物理》、《分子运动论》或《不可逆过程热力学》，基本上奠定了良好的前期热学知识基础。现就学生的典型特点分析如下：

1. 在原有的知识体系中，熵的概念占统治地位

在原有热学、传热学和工程热力学的知识体系中，已经树立了熵概念的统治地位，即熵可以表征热量的品位，而且可以表征热转换为功的效率，熵概念可以拓展延伸至其它描述效率的领域。这导致学生往往存在两点主要认识：一是作为描述热效率的概念，“熵”之地位不可动摇；二是现有的热学知识体系已经非常成熟了。因此，《新概念热学》本节教学中成功引入概概念的难点在于：为什么引入概概念？（原有的知识体系有何不足）、概概念是如何提出的？（创新的过程和方法）、引入概概念有何作用？（定义传热效率，进行传热过程优化）、概和熵有何区别？（与原有概念的联系和区别）。

因此，参赛教师在教学内容的设计上作了以下处理：

一是讲概和概耗散的概念，须讲概和概耗散的概念提出的历史过程。在学生认

知规律上，他们不满足于学习现有的知识，而是关心知识发展的过程，若仅讲现成的概念和理论，学生容易陷入迷惑和疑虑之中。因此，在本节课的导引中需要强调如下几个要点：节能优化设计对传热效率概念的需求；原有传热学中没有效率的概念及其原因；引入热力学熵产概念进行传热过程优化的不足；学术界对该问题的思考；过增元院士如何通过热电类比的方法提出了概的概念。

二是讲概和概耗散的概念，须讲与熵和熵产概念的对比。在热力学中，熵本身是一个难懂的概念，学生在接触概和概耗散的概念后，会自然思考概和概耗散与熵和熵产概念上的联系和区别。针对这一难点，参赛教师做以下设计：首先在提到传热过程的热力学优化时回顾熵和熵产的定义和物理意义；然后在概概念的定义时讲解熵概念引入的历史；最后，在引入概耗散定义的概效率后，设计一个传热优化的实例分别用概耗散和熵产的概念进行对比分析。

这样，将学术体系的发展脉络以及新概念和传统概念的对比贯穿于参赛教师的整个教学实践，既符合学生的认知规律，满足了学生的求知欲，也增强了课程的趣味性。在讲授基本知识的基础上，参赛教师还结合自身的科研经历，介绍一些工程实践中的问题，满足了学生对于本专业学科前沿的好奇心，激发学生学习后续课程的兴趣。

2. 在原有的思维方法上，逻辑性演绎方法占统治地位

参赛教师的授课对象为理工科学生，在前期课程中，主要训练逻辑性的演绎方法，即根据一般规律引出对特殊事例结论的逻辑推理与认识方法，而“创新始于形象思维、终于逻辑思维，创新思维是这两种思维的有机结合”（钱学森语）。实际上，概概念的提出亦是源于须引入“热势能”概念的直觉，然后根据导热和导电相似现象之间的类比定义“概”，最后采用演绎的方法进行实证，这是创新的真实思维过程。

学生往往不满足于对课程知识的学习，更重要的还是学习科学创新的方法，培养良好的思维方法。

因此，参赛教师在教学内容的设计上作了以下处理：

一是强调熵和熵耗散概念形成的方法论（直觉、类比和演绎）。“授之以鱼，不如授之以渔”，在讲解熵和熵耗散的知识的定义及物理意义的同时，深入讲解概念提出的方法。通过导热和导电类比推理提出热学中还缺乏一个物理量，即“热势能”，通过类比获得其定义式，同时还可以通过类比定义熵耗散，然后再采用推导演绎的方法获得熵和熵耗散的表达式，将知识和方法论紧密结合到一起。同学可以体会到知识和方法本身是紧密结合在一起的，体会类比方法在创新中的作用，理解科学创新“大胆假设，小心求证”（胡适）的过程。

二是融合熵和熵耗散知识中蕴含的人文文化和国际发展现状。在大部分的课程学习中，科学和文化看起来似乎是相互独立的部分，在本课程教学中，“熵”中文字的创立有一段趣事，就是物理学家胡刚复如何创造了“熵”字，现在，受到启发，过增元院士又创造了相似的文字“概”。另外，学生一般体会到所学的知识或理论已经相当成熟了，就不再想研究和创新的事情。在讲授熵和熵耗散知识的基础上，参赛者还根据目前从事的研究简略介绍目前国际上的研究现状，学生体会到所学习的知识正处于发展过程中，学习的课程内容不是封闭的而是开放的，而且也是目前国际上的研究前沿，这会激发同学们学习和创新的兴趣。

五. 教学创新点与教学理念

1. 讲授过增元院士创立的热学新概念——概，在教学中还原过院士的心路和足迹

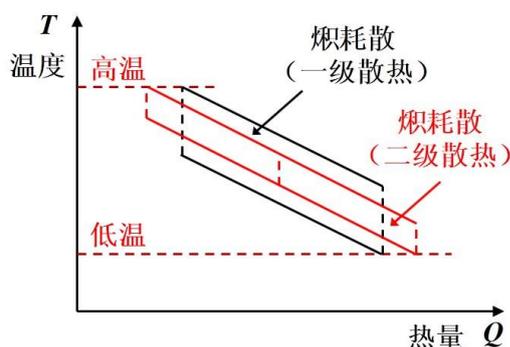
参赛教师将过增元院士取得科学突破的过程在讲课中概括为五个步骤：

第一步，概概念提出的国际学术背景。传统《传热学》的问题是传热过程没有效率的概念，即热量输运过程中能量是守恒的，而又不去定义传热过程的损失。这样的后果是无法对传热过程进行节能优化设计。这一缺憾已为国际传热学界广泛认识，并在纷纷寻求解决办法。上世纪八十年代，美国 Duke 大学 Bejan 教授提出了基于熵概念的热力学优化理论，但同时又出现了“熵产悖论”，即换热器的传热效能极值和熵产的极值并不对应。因而，传热过程的效率问题成为笼罩在传热学上空的一片乌云，一些科学家已开始意识到传热学中需要建立新的物理量。

第二步，概概念提出的思维过程。过增元院士从事传热过程优化研究已有三十多年时间。早期，也曾采用 Bejan 教授提出的热力学优化理论，但他发现借用热力学概念进行传热过程优化的道路走不通。最近几年，过院士直觉感到，既然历史上欧姆通过热电类比由热学的傅里叶定律提出了电学的欧姆定律，那反过来热学和电学再类比是否能走出一条新路来呢？于是，他根据热电再类比定义了“热势能”。这样的研究工作继续了约三年，未能有更本质的进展。后来无意中想到，热力学中定义了“熵”概念，那么，传热学中也可以将“热势能”命名为一个字——“概”，这样才使科学研究上升到了建立热学基本概念的高度。而后，又采用演绎的方法建立了概及相关概念并形成了严密的理论体系，实现了科学的突破。

第三步，概概念在工程中的应用价值。热学基本概念的提出不能仅仅停留在理论范围内，只有找到其工程应用价值，才能使新概念得到实践的检验。尽管传热过程中能量总是守恒的，但是概不守恒，而由于概在传热过程中总是减少（耗散）的，因此就可以定义传热过程的概效率，即收益（输入概-概耗散）/代价（输入概）。根据概的数学微分表达式 $dG=T\cdot\delta Q$ （其中 G 为概， T 为温度， Q 为热量），便在描述传

热过程的 $T-Q$ (温度-热量) 图上通过曲线包围的面积反映概耗散，即用以判断传热过程的优劣。以我校工程热物理研究所开展的分离式热管散热系统开发为例，2010 年应用 $T-Q$ 图的分析发现分级散热可以减少概耗散，这样做使传热效率提高了 20-30%。分级分离式热管技术应用于数据中心机房的冷却后，每年的经济产值达数亿元。



传热过程的 $T-Q$ 图

第四步，概概念的国际学术界反映。从 2003 年提出概定义以来，以概为主题在国际上 (至 2012 年) 已发表 SCI 论文 120 多篇，其中我校作为概念提出单位发表论文 60 多篇，处于该领域的引领地位。最近二三年，国际上发表的论文增长很快，概理论的国际影响逐渐增大。在 2011 年举办的“热科学前沿理论国际论坛(International Forum of Frontier Theories of Thermal Science)”上日本东北大学 Maruyama 教授评价说：“概理论对能源工业非常有用。日本正计划出版一部面向热能工程的《传热学》教材，我们会将概理论作为其中一部分内容。这样，年轻一代，还有工程师，能够学习概理论及其应用。如果工程师能全面理解如何利用能源的概念，会对工业和我们的国家非常有益。”

第五步，总结概概念提出的科学突破核心点：一项重要的科学发现开始时总有一些学者在攻关。可以这样说，那时他们都处在一个“分数”的“分母”上，只有能将初步科学认识理论化，特别是提出基本概念的人，才能飞跃到“分数”的“分

子”上。过增元院士创建热学新概念“概”及其理论，说到底就是“概”一个字。

教学理念 著名数学家丘成桐说：“当今的大学，尤其是研究型大学，课堂上要讲解‘知识的过程’，不能过分突出知识的结果”（“我们该建怎样的大学”，北京晚报，44版，2009.3.26）。所谓知识的过程，应该包含知识的思维过程和生成过程两个方面，即发现者是怎样想的，又是怎样做的。这对参赛讲师讲授自己团队所发现的新知识的研究式讲课尤为重要。这样鲜活地揭示新知识的动态发展历程，是对学生未来创新的示范、熏陶和引导。

2. 总结概概念提出所蕴含的科学方法论：直觉—类比—演绎

“直觉”是提出概概念的第一阶段。物理学家福克说：“伟大的发现都不是按逻辑的法则进行的，而都是由猜测得来，换句话说，大都是凭创造性的直觉得来的”。爱因斯坦认为，“直觉是科学研究和创造的最可贵的因素”。过增元院士在思考传热过程的效率问题上有三十多年的历程。早期也曾采用基于熵概念的热力学优化理论，但后来发现在传热学中借用热力学概念的路走不通，曾经历了“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴”的苦恼和困惑，最终有“暮然回首，那人却在灯火阑珊处”的顿悟，这才萌发了在传热学中引入“热势能”概念的想法。

“类比”是建立概概念的核心阶段。类比法是指由一类事物所具有的某种属性可以推测与其类似的事物也应具有这种属性的推理方法。在教学中，首先，先用欧姆通过类比法根据热学的傅里叶定律提出电学的欧姆定律的例子生动引入类比的思想；然后，采用类比方法依据电学中的“电势能”提出“热势能”的概念，并进而给出概的定义式和物理内涵；最后，在课堂上开展应用类比方法是否百分之百会得到正确结论的讨论，这使学生体会到类比方法既不是完全的逻辑方法，但也不是完全的非

逻辑方法。

“演绎”是完善概理论的最终阶段。类比并不是完全的逻辑方法。胡适于 1921 年提出“大胆假设，小心求证”的治学思想。这提供了一种研究问题、解决问题的治学思路。在本课程的教学过程中，通过类比法提出概的概念，从方法论的角度，实际上正是提供了一种大胆的假设和猜想，再通过演绎推导的方式从导热微分方程得到概的表达式，这是一种小心的求证。通过这一过程的讲解，使学生体会到“大胆假设”的价值和“小心求证”的意义。

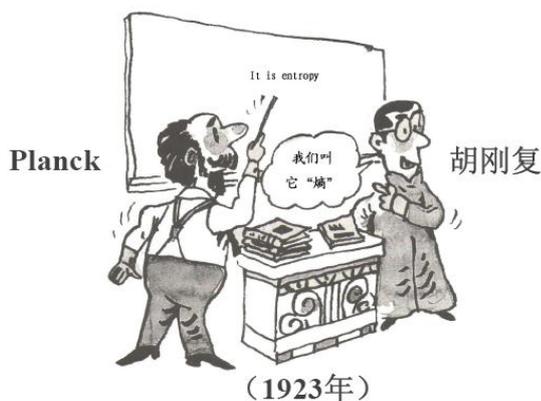
在课程小结中，对方法论中的类比法进行科学哲学的定义和提升。列举科学历史上采用类比法进行科学创新的具体例子，指出科学中的类比法是通向创新的捷径，它使推理和想象插上了翅膀。

教学理念 方法论并不是具体的解题方法，“它是从哲学认识论的高度概括出方法的规律性知识”(孙小礼著《自然辩证法通论(第二卷)》，北京：高等教育出版社，1993)。科学方法论是科学与哲学的结合点。当前教学中存在“重知识，轻方法，更轻方法论”的现象。因此，教师必须结合知识的形成过程突出讲授科学方法论。这方面的讲授可以使学生更加深刻地认识知识，激发学生的学习兴趣 and 热情，启发学生的智慧，培养学生创造性地学习和研究，引导学生树立科学世界观。

3. 对比“熵”与“概”的文字文化，从科学中发掘出人文精神

一是“熵”的文字文化。“entropy (熵)”的概念是著名德国物理学家 Clausius 于 1854 年提出的，其中“en”表示“energy (能量)”，“tropy”在希腊文中表示“transformability (转换能力)”。德国物理学家 Planck 于 1923 年来中国南京作学术报告，中国物理学家胡刚复为其作翻译，由于英文“entropy”本身比较难懂，很难找到对应的

中文词语，胡刚复就创造性地提出了“熵”的新汉字，其中“火”字偏旁代表它是一个热学量，因为熵的微分定义式为“ $dS=\delta Q/T$ ”（其中 S 为熵， Q 为热量， T 为温度），右侧的“商”则代表热量和温度相除。



“熵”命名的历史

二是“概”的文字文化。中国过增元院士于 2003 年提出“热势能”的定义式“ $dG=\delta Q T$ ”（其中 G 为概， Q 为热量， T 为温度），受到“熵”命名的启发，于 2006 年提出“概”的概念并同时创造了汉字“概”，其中“火”字偏旁代表它是一个热学量，右侧的“积”代表热量和温度相乘。由于英文中没有单词和“概”相对应，于是过院士又创造了英文字“entransy”，其中“en”表示“energy（能量）”，“transy”表示“transfer ability（传递能力）”。

参赛教师通过对比“熵”和“概”的文字文化，发掘出科学知识中包含的人文精神：

“entropy（熵）”：外国人提出概念，造外国字，中国人进行翻译和造中国字；

“entransy（概）”：中国人提出概念，造中国字，中国人又替外国人造外国字。

这不但听起来是一个美妙的科学故事，还启发了学生发现科学中的人文及其美，体会到文字中蕴含着丰富的科学内涵，而科学的发展也进一步丰富了文字文化，这是鼓舞中国学生创新突破的人文精神。

教学理念 我国科学家和教育家杨叔子说：“没有人文的科学，是残缺的科学，科学中有人文的精神和内涵”。尽管如此，长期以来我们大学教学理念中存在着科学和人文教育的对立和冲突，理工科课程的教学往往过分地强调科学知识的地位而轻视人文。理工科授课教师有责任深入发掘科学知识中蕴含的人文文化，使学生体验到科学知识中的人文文化、美感和人文精神。

总结起来，参赛教师授课的教学创新点与教学理念可以概括为：第一，讲过程；第二，讲方法；第三，讲人文。

六. 教学内容、教具与教学设计

(20 分钟教学演示部分开始)

1、问题的提出 引出本讲教学内容 2 分钟

- 简单回顾：《新概念热学》课程是过增元院士在传统的《传热学》课程基础上创立的一门全新课程，两门课程的任务都是研究存在温度差时的热能传递规律，而《新概念热学》的特点是可以弥补传统传热学的“不足”。
 - 对“不足”做具体阐述。当前，我们面临世界性的能源危机，急需提高能源利用效率，而实际上做任何工作都应讲究效率。传热过程的效率是什么呢？
- 明确不足：传统传热学中没有传热效率的概念。
 - 给出效率的定义，即收益/代价。
 - 联系实例，与学生互动
 - 【提问】举例：一维稳态导热。其中什么是收益？什么是代价？
 - 引出：原来传统传热学中没有效率的概念，因为不能定义传热过程的损失。
- 【国际学术动态】热力学优化与“熵产悖论”
 - 介绍：上世纪八十年代，美国 Duke 大学 Bejan 教授提出基于熵产概念的热力学优化理论，认为熵产的大小能够表征传热过程的优劣。

- 回顾：熵——是系统无序度的量度，代表热功转换的能力；熵产——表征过程的不可逆性，代表热功转换能力的损失。可见，熵和熵产都是描述热功转换过程的物理量。

■ 教具一：使用自制展板，展示并保留主要物理量符号及其意义。

- “熵产悖论”：换热器传热效能的极值和熵产的极值不对应。
- 举例：以换热器为例，换热器的换热效能最高，既不对应其熵产最大，也不对应其熵产最小，具体说明熵产悖论。
- 落脚点：传统传热学中沒有传热效率的概念，这个问题成为笼罩在传热学上空的一片乌云，一些学者开始意识到，是否传热学中还需要引入描述传热效率的新的物理量？

关键点：1. 传统传热学中沒有效率的概念；2. 以熵产为基础的热力学优化不能应用于传热过程的优化。

2、概的概念 核心内容 5 分钟

- 开门见山点题：我校过增元院士提出“概”的概念 0.5 分钟
- 重点一：通过热电类比提出概的概念 2 分钟

【提问】什么物理现象的规律和导热规律特别相似？

- 历史：欧姆通过热电类比根据热学的傅里叶定律提出了电学的欧姆定律。
- 现在：过增元院士受启发想到，进行导热和导电的再类比能否有新的发现呢？通过列表对比电学和热学中对应的物理量，发现热学中缺少与“电势能”相对应的“热势能”概念。
- 热势能：根据热电类比给出热势能的表达式，解释其物理内涵：热量的传递能力。
- 举例：以学生餐厅的铁板饭为例，形象地解释“传热能力”的内涵。

■ 教具二：使用实物教具——铁板，形象阐释传热能力的内涵。

● 重点二：“熵”的命名

2.5 分钟

- 给出“热势能”的数学微分定义式： $dG=\delta Q/T$ （其中 G 为热势能， Q 为热量， T 为温度）。

■ 使用板书：演示从热势能的微分定义式推导出宏观定义式。

- 对比“熵”的微分定义式： $dS=\delta Q/T$ （其中 S 为熵， Q 为热量， T 为温度）
- 生动讲述“熵”命名的文字文化：1923 年，德国物理学家 Planck 来中国南京作学术报告，中国物理学家胡刚复为其作翻译，由于英文“Entropy（熵）”本身比较难懂，很难找到与其对应的中文词语，胡刚复创造性地提出新汉字“熵”。左边的“火”偏旁代表它是热学物理量，右边“商”代表热量与温度相除。（同时，运用漫画反映鲜活的历史）
- 熵的命名：过增元院士受到热力学中“熵”命名的启发，将传热学中的“热势能”命名为一个字——“概”，它左边的“火”偏旁代表热学物理量，右边“积”代表热量与温度相乘。

关键点：1. 概概念的物理内涵是热势能；2. 概概念的提出是基于类比的方法；3. 通过“熵”和“概”的命名使同学感受到科学知识和文字文化的交融。

3、概耗散的概念

重点内容

2 分钟

● 通过热电类比引入概耗散的概念

2 分钟

- 分析（类比）：导电过程中电量是守恒的，而电势能有损失（耗散）；导热过程中热量是守恒的，而概会有损失（耗散）。
- 举例：两个不同温度的物体接触传热并最后达到热平衡，给出导热前两物体

的总概和达到热平衡后两物体的总概，通过比较得出结论：导热过程中概总是减少的，会产生耗散。

【提问】 如何写出导热过程中概耗散的表达式？

- 启发学生得到答案：还可以通过和导电的电势能耗散进行类比得到导热的概耗散表达式。（引导学生运用类比方法）
- 列出导电过程电势能耗散的表达式，类比得出导热过程概耗散的表达式。

关键点：1. 概耗散及其表达式；2. 类比方法的实际运用！

4、概和概耗散定义的推导 重点内容 4 分钟

【提问】 通过类比方法得到的结论一定正确吗？

- 类比和演绎方法的结合 1 分钟
 - 讨论：类比方法不一定得到正确的结论。类比方法不是完全的逻辑方法，也不是完全的非逻辑方法；
 - 引申：引入胡适“大胆假设，小心求证”的治学思想。类比方法正是提供了一种大胆假设，只有再结合演绎方法的小心求证才能获得正确的结论。
- 从导热微分方程的推导出概和概耗散 3 分钟

■ **使用板书：**演示从导热微分方程推导出概和概耗散的定义式。

- 从导热微分方程出发推导出概平衡方程：

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \left(\frac{1}{2} \rho c_v T^2 \right) dV = \iint_S -qT \cdot nds - \iiint_V -q \cdot \nabla T dV + \iiint_V T \dot{Q} dV$$

【提问】 概平衡方程中各项是什么物理意义？

- 讨论：引导同学讨论，通过同导电类比的方法得到答案。
- 各项意义：概变化率、概流（输入/输出概）、概耗散、内热源输入的概。

关键点：1. 类比法和演绎法的结合“大胆假设，小心求证”；2. 概平衡方程的物理意义。

5、应用：概效率 **重点内容** **3 分钟**

● **概效率的定义式** **0.5 分钟**

➤ 分析：效率的定义：收益/代价。

【提问】 有了概和概耗散的概念，什么是导热过程的收益和代价？

➤ 阐释：输入概为代价，概耗散为损失，收益为：输入概 - 概耗散。

➤ **强调**：有了传热效率的概念，它能应用于传热过程的优化设计。

● **一维稳态导热的概效率** **0.5 分钟**

➤ 分析：一维稳态导热的概效率：输出概/输入概。

● **概效率在优化传热过程中的应用** **2 分钟**

➤ **T-Q 图**：根据概的数学微分表达式 $dG=T\cdot\delta Q$ (其中 G 为概， T 为温度， Q 为热量)，便在描述传热过程的 $T-Q$ (温度-热量) 图上通过曲线包围的面积反映概耗散，即用以判断传热过程的优劣。。

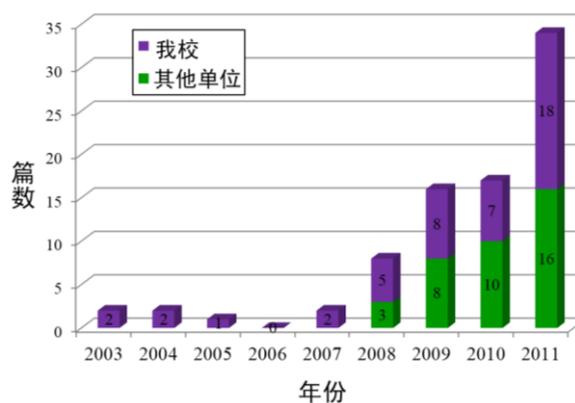
➤ **实例**：以我校工程热物理研究所开展的分离式热管散热系统开发为例，2010 年应用 $T-Q$ 图的分析发现分级散热可以减少概耗散，这样做使传热效率提高了 20-30%。分级分离式热管技术应用于数据中心机房的冷却后，每年的经济产值达数亿元。

关键点：1. 有了概效率的概念，可以发展传热过程优化的理论、方法和技术 (后面几节课的重点内容)；2. $T-Q$ 图的物理内涵及应用价值；3. 概理论应用于分级分离式热管技术。

● 发表 SCI 论文情况

1 分钟

- 从 2003 年最初提出热势能的表达式有近十年的时间（十年磨一剑）。
- 最近几年概理论在国际传热学界的影响正在快速增大。
- 我校作为概理论的提出单位处于引领地位。



国际上发表关于概理论的 SCI 论文情况

● 日本 Maruyama 教授在“热科学前沿理论国际论坛”上的评价

1 分钟

- 原话：“The entransy is very useful for the energy industry. And we'll publish a textbook on heat transfer for the thermal engineering school (in Japan). We will contain a part of entransy. So, young generation, also the engineers, can study the concept of entransy and its application. If the engineers know this kind of global understanding of the concept of using energy, it could be a great benefit for the company and country.”
- 翻译：“概理论对能源工业非常有用。日本正计划出版一部面向热能工程学院的《传热学》教材，我们会将概理论作为其中一部分内容。这样，年轻一代，还有工程师，能够学习概理论及其应用。如果工程师能全面理解如何利用能源的概念，会对工业和我们的国家非常有益。”

【升华】 同学们，翻开我们的教材，科学的殿堂里已经书写了大量外国人提出的概

念和理论，写满了外国人的名字，我真希望将来有一天，中国人提出的概念和理论也会在热学史上占有一席之地！

7、前 20 分钟知识点小结

2 分钟

- 1) 知识：引入了概和概耗散的新概念。概表示热势能，及传递热量的能力；概耗散表示传热能力的损失。有了概和概耗散的概念，就可以定义传热过程的效率，进行传热过程优化。
- 2) 方法：类比法。类比法是指由一类事物所具有的某种属性可以推测与其类似的事物也应具有这种属性的推理方法。它既不是完全的逻辑方法，也不是完全的非逻辑方法，而是二者的中间方法；
- 3) 文化：“概”和“熵”的文字文化。对于“熵”：外国人提出概念，造外国字，中国人进行翻译和造中国字；对于“概”：中国人提出概念，造中国字，中国人又替外国人造外国字。我们体会到：文字文化中包含丰富的科学内涵，科学发展又进一步丰富了文字文化；
- 4) 启发：学习和研究的创新思维。引用钱学森的话：“创新始于形象思维，终于逻辑思维，创新思维是这两种思维的有机结合。”一项重要的科学发现开始时总有一些学者在攻关。可以这样说，那时他们都处在一个“分数”的“分母”上，只有能将初步科学认识理论化，特别是提出基本概念的人，才能飞跃到“分数”的“分子”上。过增元院士创建热学新概念“概”及其理论，说到底就是“概”一个字。

【前 20 分钟课程的作业】 厚度为 10 cm 的铁板和塑料板（假定另外两个方向无限大），两侧面的温度分别为 400 K 和 300 K，计算它们的概耗散率。分析在其它条件不变但只有厚度发生变化时，概耗散率会如何变化。

(20 分钟教学演示部分结束)

8、概与热势能

重点内容

5 分钟

【提问】 类比得到的“热势能”不具有能量的量纲，为什么？

● 回顾：电容器的电势能

1 分钟

- 思路：电容器的电势能等于移动等量电荷所付出的功（能量）。
- 简单展示推导电容器电势能的过程。

● 热容器的热势能

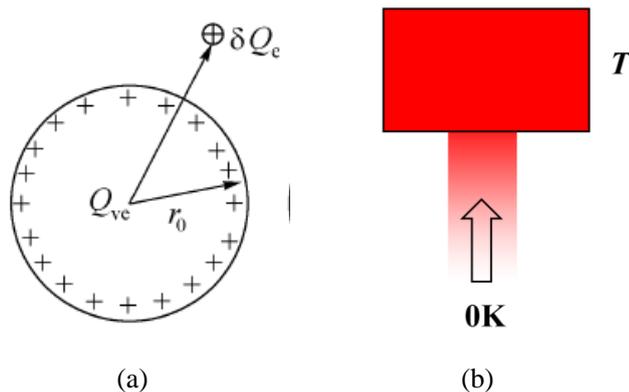
2 分钟

- 能量量纲：热势能等于移动等量的热能所做得功。

【提问】 如何确定热量传递过程的驱动力和阻力？

- 启发讨论：采用前几堂课讲授过的热质及其动力学概念，驱动力和阻力相等时，移动热量的做功即为热势能。

■ 使用板书：演示热容器热势能的推导过程。



电容器的电势能(a)和热容器的热势能(b)

● 概和热势能的关系

2 分钟

- 相同：物理内涵，都表征系统热量的传递能力；
- 不同：量纲，概的量纲为[JK]，热势能的量纲为[J]。

- 结论：概是热势能的简化表达式。

关键点：1. 概的物理实质是热势能；2. 概是热势能的简化表达式。

9、概与熵

10 分钟

● 概和熵的物理意义

5 分钟

【共同讨论 3 个问题】

1. 概和熵的宏观和微观物理意义？
2. 概耗散和熵产的区别和联系？
3. 为何熵产不能应用于传热过程的优化？

【重点】引导同学的讨论，逐渐得到清晰的答案。

- 物理意义核心点：熵是热力学物理量，表征系统的无序度，衡量热量的作功能力（热力学势能）；概是传热学物理量，表征能量的有序度，衡量热量的传热能力（传热学热势能）。
- 概耗散和熵产：都表征过程的不可逆性，或能力的损失；概耗散表征热量传递能力的损失，而熵产表征热功转换能力的损失。
- 重要推论：传热过程按目的可分为两类：加热冷却和作功，它们的优化原则应分别使用概耗散和熵产的概念。

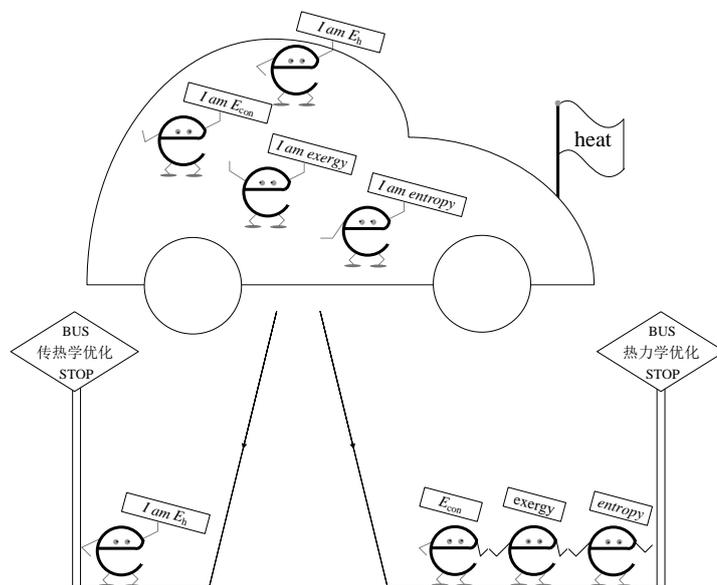
● 概耗散和熵产的热力学内涵

5 分钟

- 耗散函数：流和力的定义不同。对于熵产，流为热流密度，力为温度倒数的梯度，而对于概耗散，流为热流密度，但力为温度梯度。所以，熵产描述了热力学框架下的损失；而概耗散描述了传热学框架下的损失。
- 线性唯象定律：概耗散对应的线性唯象定律为傅里叶导热定律，而熵产对应

的线性唯象定律不是傅里叶导热定律(明确:熵产对应的线性唯象系数和热导率的关系)。

- 利用动漫形象化解释熵和熵的不同。



熵与熵的关系

关键点: 1. 传热优化需区分传热过程的目的:加热冷却和做功; 2. 熵耗散适用于加热冷却过程优化, 熵产适用于做功过程的优化。

10、熵耗散与最小作用量

10 分钟

● 最小作用量原理概述

4 分钟

- 自然界的极值现象:树的根系和枝干形状、肺部血管、河系分布、蜜蜂蜂巢等,说明自然现象总体现为最优状态,体现为某个物理量的极值性。[形象生动的说明可以使同学对探索自然规律充满兴趣]



自然界的极值现象

- 引用物理学家瓦特逊的名言：“大自然基本上是懒惰的——它总是采取最小的路线。把这个重要概念提升为原理并赋予它以精确的数学意义之后，物理学家们发现，它能以一种统一的形式描述从板球到基本粒子的一切事物的运动。”
- **最小作用量原理**：物理系统从初态到终态，其间的某个特定的量（其选择依赖于系统的本性）将具有极值性。

● 从变分原理导出概平衡方程

6 分钟

- 变分原理的概念和方法补充（一部分同学未学变分学）。
 - 1) 变分学：要点——以函数为变量的函数求极值。
 - 2) 变分求极值的基本思路：若变量偏离极小值为一级小量，则函数与极小值的偏差仅为二级小量。
 - 3) 举例：几何实体（圆）的变分描述，光学中的费曼原理，力学中的哈密顿原理。
- 采用变分的方法证明概耗散极值和傅里叶导热定律的等价性。

■ 使用板书：演示变分法证明概耗散极值和傅里叶定律等价的过程。

【提问】 概耗散极值和傅里叶导热定律的等价性说明了什么内涵？

- 引导同学思考最小作用量和过程经济性的问题：概耗散是传热过程的最小作用量，它描述了传热过程的经济性（优劣）。（此处是为下节课介绍概耗散极值原理埋下的伏笔）

关键点：1. 最小作用量原理的表述和内涵；2. 概耗散是传热过程的最小作用量，它描述了传热过程的经济性。

11、本节知识点小结

5 分钟

- 1) 知识点 1：概和概耗散的概念。概表征热势能，是代表热量传递能力的物理量，其定义式为热能与温度乘积的一半。概耗散表征传热过程中热势能的损失。同时，概概念提出的主要背景是因为传统的传热学不能定义传热效率，不能进行传热过程的优化。
- 2) 知识点 2：概平衡方程。可以采用概的概念描述传热过程，即概平衡方程，通过导热微分方程和变分原理的方法推导得到导热过程的概平衡方程，明确概平衡方程中各项的物理意义，包括概变化率、输入/输出概、概耗散、概流。根据概平衡方程可以定义传热过程的概效率。
- 3) 知识点 3：概效率及传热优化。基于概耗散的概念可以定义传热过程的概效率，即收益（输入概 - 概耗散）/输入概。概效率总是小于 1，并且可以用来优化传热过程。传热优化需区分传热过程的目的：加热冷却和作功。概耗散适用于加热冷却过程优化，熵产适用于作功过程的优化。
- 4) 方法：类比法（同前 20 分钟小结）。类比法是指由一类事物所具有的某种属性可以推测与其类似的事物也应具有这种属性的推理方法。它既不是完全的逻辑方法，也不是完全的非逻辑方法，而是二者的中间方法；
- 5) 文化：“概”和“熵”的文字文化（同前 20 分钟小结）。对于“熵”：外国人提出概

念，造外国字，中国人进行翻译和造中国字；对于“概”：中国人提出概念，造中国字，中国人又替外国人造外国字。我们体会到：文字文化中包含丰富的科学内涵，科学发展又进一步丰富了文字文化；

- 6) 启发：学习和研究的创新思维（同前 20 分钟小结）。引用钱学森的话：“创新始于形象思维，终于逻辑思维，创新思维是这两种思维的有机结合。”一项重要的科学发现开始时总有一些学者在攻关。可以这样说，那时他们都处在一个“分数”的“分母”上，只有能将初步科学认识理论化，特别是提出基本概念的人，才能飞跃到“分数”的“分子”上。过增元院士创建热学新概念“概”及其理论，说到底就是“概”一个字。

【布置课后作业】

- 基于热质流动阻力做功的概念推导得到概耗散的表达式。

【布置课后思考】

- 传质、流动、动量扩散和导热、导电也具有相似性，这些现象中是否也会有类似“概”的概念？
- 基于熵产概念进行热力学优化的最小熵产原理在物理本质上为何不适用于传热过程的优化？