

# 特色工科院校《热力学与统计物理》教学改革

李文博\* 徐世峰 马佳 王珩 杨迪 高峰 杨旭

沈阳航空航天大学理学院

DOI:10.12238/er.v7i9.5414

**摘要：**本文介绍近年来沈阳航空航天大学应用物理专业开设2.5学分《热力学与统计物理》课程的教学方案设计及教学实践。该课程在40学时的授课中，做到基本理论、方法及应用几个方面的统筹兼顾，为省工科院校培养具有扎实理论基础和超强应用能力的复合型人才奠定基础。

**关键词：**特色工科院校；应用物理；热力学与统计物理；教学改革

**中图分类号：**G420 **文献标识码：**A

## Teaching Reform of *Thermodynamics and Statistical Physics* in Featured Engineering Colleges

Wenbo Li\*, Shifeng Xu, Jia Ma, Heng Wang, Di Yang, Feng Gao, Xu Yang

School of Science, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics

**Abstract:** This article introduces the teaching plan design and teaching practice of the 2.5-credit course *Thermodynamics and Statistical Physics* offered by the Applied Physics major of Shenyang University of Aeronautics and Astronautics in recent years. In the 40 hour teaching, this course achieves a comprehensive consideration of basic theories, methods, and applications, laying the foundation for provincial engineering colleges to cultivate compound talents with solid theoretical foundations and super strong application abilities.

**Keywords:** Featured engineering colleges; *Applied Physics*; *Thermodynamics and Statistical Physics*; Reform in education

### 引言

热力学与统计物理，作为我国高等教育中物理专业本科生的核心必修课程，与量子力学、理论力学、电动力学齐名，共同构成物理学教育的四大支柱<sup>[1-2]</sup>。对于培养具有深厚理论基础和创新能力的物理人才至关重要。沈阳航空航天大学，是一所特色鲜明的工科院校，专注于理学与工学的融合，致力于培育具备扎实理论基础和卓越应用技能的复合型人才。在国家发展和民族振兴的大背景下，地区高等教育机构因此面临新使命，需调整课程，与地方振兴战略紧密结合。

《热力学与统计物理》（简称“热统”）作为沈航应用物理专业的核心课程，旨在让学生在有限的学时内深入理解并应用知识，是专业教师一直在探索和实践的课题。经慎重考虑，选择梁希侠、班士良编著的《统计热力学》作为专业教材<sup>[3-6]</sup>。这本教材直接从统计物理系综理论入手，避免与《热学》课程内容的大量重复，为后续专业课《量子力学》和《计算物理》前期铺垫。下面就40学时2.5学分“热统”，每章学时安排、知识框架依照教材安排如下：

#### 一、第一章及第八章：预备知识及涨落理论

作为开篇内容，教学中把微观粒子状态及涨落理论捏在一起讲解，共规划8学时，讲授1.2节单粒子的微观状态，

1.3节多粒子系统的微观状态，8.4节布朗运动。对于单粒子微观状态的探讨，这一节是理解整个课程的基石，它将引领学生进入微观物理的神秘世界。这一部分，我们将详尽地阐述粒子的波粒二象性，这是一个至关重要的基础概念，波粒二象性揭示了一个引人入胜的物理现象：微观粒子如电子、光子等，既表现出波动性，又表现出粒子性。这种看似矛盾的双重性质，实际上是量子力学描述微观世界的基本特征。通过对这一概念的深入讲解，学生将开始认识到微观世界与我们日常经验中的宏观世界之间的根本区别。为了更直观地展示这一点，我们将通过分析单个自由粒子在一维容器中的运动来向学生展示如何使用量子数来描述微观粒子状态，这与宏观物理中使用的连续变量描述有着本质的不同。第八章涨落理论则是统计物理学中描述宏观系统中微观粒子行为波动的理论。在宏观系统中，由于粒子数量巨大，系统的某些宏观物理量（如温度、压力、浓度等）通常会显示出一定的波动，这些波动被称为涨落。涨落理论的一个重要应用是在布朗运动的研究，这也是我们8.4节重点介绍的内容，当然中间包含了爱因斯坦非常重要的扩散理论，其在研究核污水排放海洋扩散模型中有着重要的作用<sup>[7]</sup>。在教学中，单粒子微观状态和涨落理论我们将其结合在一起讲解，以便学生能

够更好地理解微观粒子的行为以及它们如何影响宏观系统的稳定性和性质。此外，我们将线性谐振子、电子自旋模型以及概率、统计平均、涨落、排列组合、偏导数和完整微分等数学知识，这些内容将通过线上学习的方式留给学生自学。

## 二、第二章：孤立系将安排4个学时教学

我们将从2.1节开始介绍统计物理的基本原理，包括系统、微观状态、宏观状态以及状态的划分。这些概念是理解整个统计物理体系的基石，为后续的学习打下坚实基础。接着，2.2节中，我们讲授等概率原理，这是统计物理中一个重要的假设，它假设系统处于各种可能微观状态的概率是相等的。这一原理是推导热力学定律的关键。2.3节中，主讲热平衡定律，这是热力学中描述系统达到平衡状态的基本规律。通过这一节的学习，学生将理解系统如何通过热交换达到热平衡，以及这一过程中宏观物理量的变化规律。在2.4节和2.5节中，我们将分别深入讲解热力学第一定律和第二定律。这两大定律是热力学的支柱，分别描述了能量守恒和熵增原理。我们将通过统计物理的方法，从微观粒子的行为出发，推导出这两个定律，使学生能够从本质上理解它们。最后，在本章的结尾部分，我们将应用统计思想来处理单原子分子理想气体的问题。

## 三、第三章封闭系

这是整个课程中的核心章节，因此我们将花费5学时来确保学生能够全面理解并掌握相关内容。通过3.1节，学生将了解如何利用正则分布来描述封闭系统在热平衡状态下的微观状态。3.2节将讲授正则分布如何导出热力学公式，这些公式是理解和计算宏观热力学量的关键。在3.3节将介绍近独立粒子的麦克斯韦-玻尔兹曼分布，这是一种用于描述粒子能量分布的统计方法。3.4节将进一步讲授麦克斯韦-玻尔兹曼分布的热力学公式，这些公式对于理解系统的热力学性质至关重要。3.5节的能均分定理是统计物理中的一个基本定理，它说明了能量在系统中的分布方式。这一定理不仅有助于学生理解能量的微观分布，还能够应用于解决实际问题，如计算分子振动和转动的能量。3.6节和3.7节将分别讨论肖特基缺陷和二能态与负温度的概念。肖特基缺陷是固体物理学中的一个重要概念，而二能态与负温度则涉及到量子系统的统计行为。这两个概念虽然在实际应用中较为特殊，但它们对于理解统计物理的深层次原理具有重要意义。我们将这两节作为线上自学的作业，让学生能够在自己的节奏下深入研究。

## 四、第四章均匀物质的热力学性质

这是理解物质在不同条件下行为的关键，安排4个学时。通过4.1节的学习，学生将掌握如何利用这些关系来解决实际问题，例如，计算物质在不同温度和压力下的性质变化。

4.2节讲授基本热力学函数，如内能、焓、自由能和熵。这些函数是描述系统热力学状态的基础，对于理解系统如何进行能量转换和物质循环至关重要。4.3节特性函数将进一步加深学生对热力学性质的理解。特性函数如比热容、膨胀系数等，它们描述了物质在热力学过程中的特定行为。4.4节将探讨磁介质的热力学性质，这是一个相对较新的研究领域，对于理解磁性材料的行为和开发新型磁性设备具有重要意义。最后，4.5节焦耳效应和焦耳-汤姆孙效应在制冷技术、热电材料和低温物理等领域有着广泛的应用。我们将采用线上自学和翻转课堂的形式，让学生在课前自主学习，并在课堂上进行讨论和讲解。

## 五、第五章气体的热力学性质

这是理解物质状态变化和热力学行为的重要内容，将在3个学时内完成。5.1节中将详细介绍理想气体的热力学函数，这些函数是理解和计算气体性质的基础。通过学习理想气体的热力学函数，学生将能够掌握气体状态方程、内能、焓、熵等重要概念，并学会如何应用这些概念进行热力学计算。5.2节将专注于单原子分子理想气体的讲解。在这一部分中，我们将探讨单原子气体如氦、氖等的特性，并分析它们的热力学行为。通过对单原子分子理想气体的研究，学生将能够理解这些气体的热容量、等温过程和绝热过程等热力学特性，以及它们如何影响气体的宏观表现。5.3节中，我们将转向双原子分子理想气体，如氢气和氮气等。双原子分子气体相比于单原子气体，具有更为复杂的分子结构和热力学行为。在这一部分，我们将讨论双原子分子的振动和转动模式，以及这些模式如何影响气体的热力学性质，如热容量和热导率。本章的一个关键讲解参数是热容量，它是衡量气体吸收或释放热量时温度变化的物理量。

## 六、第六章和第九章的内容共同探讨了开放系统和非平衡态统计物理的深奥理论

这两章内容将在6个学时内完成。这两章的结合讲解将为我们提供一个全面的视角以便学生能够全面地理解开放系统和非平衡态统计物理的复杂概念。从6.1节的巨正则分布开始，这是描述开放系统热力学性质的一个关键工具。巨正则分布允许我们计算系统中粒子的分布情况，以及系统在不同宏观状态下的概率。6.2节将介绍开放系的热力学公式，这些公式为我们提供了一套强大的工具，用以分析和计算开放系统的热力学性质。我们将讨论如何从微观粒子的行为出发，推导出宏观热力学量，如能量、熵和吉布斯自由能等。6.3节的热动平衡条件是理解开放系统如何达到平衡状态的关键。在这一部分，我们将探讨系统与外界交换能量和粒子时的动态过程，以及如何通过调整系统参数来实现热动平衡。6.5节至6.7节将深入讨论化学平衡、混合气体的平衡性质以及化学反应的性质。6.8节将简要介绍热力学第三定律，

它提供了熵在绝对零度时的参考点,并允许我们计算系统在任何温度下的熵变。对于这四节内容,我们将主要关注结论的介绍,而不必使学生深入到复杂的推导过程中。对于第九章仅讲授9.6节的局域熵产生率。这一概念是非平衡态统计物理的核心,它描述了在非平衡条件下系统中熵的产生和流动。我们将通过热传导和物质运输的例子来简单介绍局域熵产生率,使学生能够理解非平衡过程的微观机制,以及如何从统计物理的角度分析和预测这些过程。

**七、第七章的课程内容将带领学生进入量子统计法的精彩世界,共6个学时。**

7.1节中,讲授量子统计分布的基本概念,这是理解量子系统中粒子分布的基础。通过这一节的学习,学生将了解费米-狄拉克和玻色-爱因斯坦两种统计分布的特点,以及它们如何适用于不同类型的粒子系统。7.2节将专注于固体的热容量,这是一个展示量子效应对宏观物理性质影响的经典例子。学生将学习到德拜模型,以及如何利用量子统计法来解释固体在不同温度下的热容量行为。7.3节光子气体将带领学生探索光子作为量子粒子的特性,以及它们在黑体辐射和光电效应中的作用。7.4节金属自由电子气将介绍电子在金属中的量子行为,以及这些行为如何影响金属的电导率和热导率。7.5节半导体载流子统计将深入讨论电子和空穴在半导体中的分布规律,这对于理解半导体器件的工作原理至关重要。学生将学习到量子统计法如何帮助我们预测和控制半导体中的电荷载流子行为。最后,在7.6节中,我们将探索玻色-爱因斯坦凝聚这一神奇的量子现象,这是一种在极低温度下出现的粒子聚集状态。通过对玻色-爱因斯坦凝聚的研究,学生将了解到量子统计法在解释和预测量子相变中的重要性。

**八、第十章的课程内容将深入探讨相变和临界现象**

这是热力学和统计物理学中极具魅力的领域,涉及到物质在不同相态之间转换的复杂过程。共4个学时。在10.1节中,将讲授固溶体相图的基本概念和应用。通过对固溶体相图的学习,学生将能够理解如何预测合金的相变行为,以及如何设计和优化材料的性能。10.2节气液相变将引导学生探索物质从气态转变为液态的过程,在这一部分,我们将讲授

相变过程中的热力学原理和动力学机制,以及如何控制和利用相变过程。10.4节将通过伊辛模型来探讨有序无序相变的理论基础。伊辛模型是一个经典的统计物理模型,它通过简化的格点系统来模拟粒子的相互作用和相变行为。通过对伊辛模型的学习,学生将能够理解相变的微观机制,以及如何使用模型来预测和解释相变现象。最后,在10.5节中,我们将介绍朗道平均场理论,这是一个强大的理论工具,用于描述和分析相互作用粒子系统的宏观行为。

## 九、结语

总之,沈阳航空航天大学在热力学与统计物理课程的教学改革中,始终坚持以学生为中心,不断探索和实践,力求在有限的学时内,让应用物理专业的学生系统掌握热力学与统计物理的理论知识,并能够有效地将所学知识应用于实际问题的解决中,为培养新时代的航空航天人才做出积极的贡献。

## 【参考文献】

[1]苏汝铿.统计物理学[M].2版.北京:高等教育出版社,2004.

[2]林宗涵.热力学与统计物理学[M].北京:北京大学出版社,2007.

[3]梁希侠,班士良.统计热力学(第二版)[M].2版.北京:科学出版社,2008.

[4]梁希侠,班士良.“热统”课程的“统计热力学”体系——国家精品课程“统计热力学”的知识体系[J].中国大学教学,2012,(04):43-46.

[5]梁希侠.融中华传统文化元素于物理课堂——视频公开课“热含妙理”拾贝[J].中国大学教学,2013,(10):7-9.

[6]汪志诚.热力学·统计物理[M].5版.北京:高等教育出版社,2013.

[7]Yi Liu etc. Discharge of treated Fukushima nuclear accident contaminated water: macroscopic and microscopic simulations [ J ] National Science Review, Volume 9, Issue 1, January 2022.

## 基金项目:

辽宁省教育厅基金(LIKMZ20220522);2022年辽宁省教学改革优质资源建设与共享项目