

# 准静态过程及相关物理概念教学探析\*

栗生长 张 杨

(西安交通大学 理学院 陕西 西安 710049)

(收稿日期:2015-11-23)

**摘要:**本文运用类比方法,引入爬台阶这一常见生活实例,通过对其作细致的定性和定量分析,直观形象地类比了热力学中的准静态过程及相关物理概念,揭示了平衡态、非平衡态、弛豫时间等概念之间以及他们跟准静态过程的内在联系和本质区别,进一步明确了将实际过程近似为准静态过程的定量条件.

**关键词:**平衡态 弛豫时间 准静态过程

准静态过程及相关内容在整个大学物理课程的热力学教学中占有举足轻重的地位,可以说,热力学的绝大多数教学内容都是围绕这一过程展开的.准静态过程概念本身与力学概念相比,更加抽象,既采用了极限定义思想,又用到了理想模型描述.在具体课堂教学时,基本都以气体系统作为实例对这一概念进行讲解.然而,要对涉及气体系统的具体热力学过程和状态变化进行直观想象和深入理解往往比较困难.

鉴于此,本文引入一个常见的生活实例,通过对其进行详细分析,运用类比方法引导学生直观形象地理解准静态过程及相关物理概念,通过揭示相关物理概念间的内在联系和本质区别,以帮助学生更好地掌握将实际过程近似为准静态过程的定量条件.

## 1 平衡态的类比分析

本文引入的常见生活实例为“爬台阶”,如图1(a)所示.在此例中,将热力学基本物理概念类比如下:爬台阶者即人可类比一个热力学系统,台阶可类比环境或外界,人的3项身体指标血压、呼吸频率和心率可分别类比压强、体积和温度3个气体状态参量,记为 $x, y$ 和 $z$ .在这个实例中,系统的平衡态则对应着人在某一高度为 $h_i$ 的台阶处,心率、呼吸

频率和血压(分别记为 $x_i, y_i$ 和 $z_i$ )均不随时间变化的状态,通俗的讲,就是人处于“心不跳、气不喘、头不晕”的平静状态.

由于一个系统的热学性质往往跟它的其他性质有关,因此,对热力学系统状态的描述一般应包括对系统所有性质(如几何性质、力学性质、热学性质、电磁性质和化学性质等)的概括<sup>[1]</sup>.平衡态指系统不受外界影响或外界条件不变时,系统宏观性质(如压强、体积和温度)不随时间变化的状态<sup>[2]</sup>.这包含两个基本条件:一是系统本身处于不随时间变化的状态;二是系统不与外界发生相互作用或相互作用恒定,即不以任何方式发生能量交换.显然,在上面的实例类比中,第一个条件自然满足,第二个条件,只要人所处的台阶高度不变,他与台阶的相互作用就保持恒定,或可认为人不受台阶的影响,因此也满足.

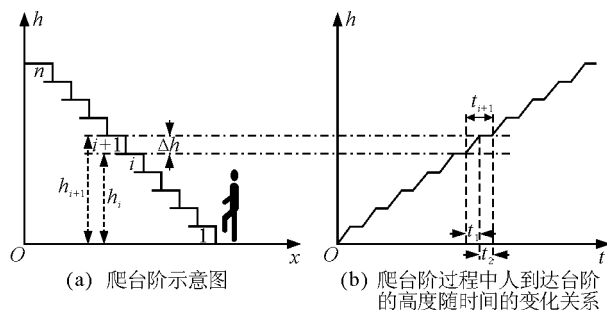


图 1

\* 西安交通大学本科教学改革研究青年项目(20140206)

作者简介:栗生长(1982-),男,博士,副教授,主要从事冷原子和玻色-爱因斯坦凝聚动力学和几何特性的研究.

需要指出,在理解平衡态这一概念时,必须注意几点:

(1) 不受外界影响或外界条件不变是指系统与外界没有能量交换,既不作功也不传热,不作功可实现系统的力学平衡,不传热可实现系统的热学平衡和化学平衡;

(2) 平衡态是系统宏观静止(指系统的宏观性质不随时间改变)和微观运动(指组成系统的大量分子不停地作无规则热运动)的统一,即“热动平衡”;

(3) 跟力学中质点和刚体等模型类似,平衡态也是一个理想模型,是在一定条件下对实际状态的概括和抽象;

(4) 不能把平衡态简单理解为系统宏观性质不随时间变化的状态,在系统与外界存在能量交换时,其宏观性质不随时间变化的状态其实是非平衡态<sup>[1]</sup>.

## 2 热力学过程和弛豫时间的类比分析

在爬台阶的实例中,把人平静地(指3项身体指标都稳定)站在第*i*个台阶上看成一个平衡态,平静地站在第*i*+1个台阶上看成另一个平衡态,则人从第*i*个台阶爬上第*i*+1个台阶的过程就可类比一个热力学过程.该过程的实现需要人克服自身的重力势能作功,这可看作人和台阶间的能量交换,也可以认为台阶这个外界条件发生了变化,即台阶位置高度增加了 $\Delta h = h_{i+1} - h_i$ .其实,在发生能量交换或台阶位置高度变化这段时间里,人是处于非平衡态的,因为人的各项身体指标都是随时间变化的,也就是人还没有平静下来.当能量交换结束后,人可以在第*i*+1个台阶上休息一段时间使自己逐渐恢复平静,从而达到新的平衡态.

把这种外界影响消失或者外界条件恒定(指台阶位置高度 $h_{i+1}$ 保持不变)后,系统逐渐到达新平衡态的过程叫做弛豫过程,把完成这个过程需要的最短时间称为弛豫时间,记为 $\tau_{i+1}$ .

需要说明,热力学过程是指热力学系统的状态

随时间发生改变的情况.这种系统从一个状态到另一个状态的变化,可以从平衡态到平衡态,也可以从平衡态到非平衡态,更可以从非平衡态到非平衡态.需要指出,一个热力学过程的实现必须满足一个条件:即系统和外界之间存在能量交换或外界对系统的影响发生了变化.从这个意义上讲,非平衡态的出现和宏观运动(指系统的宏观性质随时间变化)是热力学过程的基本特征.

这里强调,弛豫时间的长短既跟外界条件的改变程度和何种性质的外界条件改变(即引起不平衡的原因及偏离平衡的程度)有关,又跟系统本身的性质和尺度有关.对同一系统,如气体,压强达到平衡(即力学平衡)要比温度达到平衡(即热学平衡)快得多,即压强恢复平衡的弛豫时间比温度恢复平衡的弛豫时间要短得多<sup>[3]</sup>.这是因为引起压强不恒定的原因在于一些未抵消力的存在,这些力将导致系统宏观运动的出现,而温度趋于平衡则与系统的宏观运动无关<sup>[4]</sup>.对不同系统,如固体和气体,弛豫时间一般不同.如在扩散现象中,要达到密度均匀,在气体中可能只需几分钟,而在固体中则可能要长达几年.对本文的实例,不同身体指标在不同台阶高度处恢复平衡的弛豫时间一般不同,为方便,将台阶高度为 $h_i$ 时的心率、呼吸频率和血压所对应的弛豫时间分别记为 $\tau_{ix}$ , $\tau_{iy}$ 和 $\tau_{iz}$ .一般情况下,呼吸频率对应的弛豫时间较短,心率和血压的次之.

## 3 准静态过程的类比分析

为方便描述,假设本文实例中每层台阶厚度相同,即均为 $\Delta h = h_{i+1} - h_i$ .爬台阶过程中人所到达台阶处高度随时间的变化关系假定满足图1(b)所示情形.从第*i*个台阶爬到第*i*+1个台阶的微小过程其实是整个爬台阶过程的一个中间过程,这一微小过程假定分两步完成,第一步人克服自身重力势能上升一层,即从一个平衡态到非平衡态,用时记为 $t_1$ ,第二步人到达较高台阶后休息片刻以恢复平静,即从非平衡态到另一新平衡态,用时记为 $t_2$ ,这样爬一层台阶总共用时为 $t_i = t_{i+1} = t_1 + t_2$ .假设每层台

阶高度远小于台阶的总高度  $H$ , 即  $\Delta h \ll H = n\Delta h$ . 对人爬总高度一定的台阶这个过程而言, 若总台阶数目  $n$  足够大, 则每层台阶的厚度  $\Delta h$  就足够小, 每爬一层台阶人和台阶之间的能量交换就很小, 从而使人的各项身体指标偏离原有平衡值的幅度(记为  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  和  $\Delta z_i$ ) 均很小. 假设整个过程中人的各项身体指标分别改变一微小量  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  和  $\Delta z_i$  所用时间均为  $t_1$ [如图 1(b) 所示], 若  $t_1 \gg \max[\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}]$ , 则认为爬得非常缓慢, 每爬一层人都来得及恢复到新的平衡态, 这样整个过程就可以看成一个准静态过程. 反之, 若  $t_1 < \min[\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}]$ , 则认为爬得很快, 每一步都来不及恢复到新的平衡态, 因而只能看成非静态过程.

准静态过程是描述热力学系统状态变化的一种理想化方法, 它是指系统所经历的初态、末态以及所有中间状态都无限接近平衡态的过程<sup>[5]</sup>. 然而, 作为一种热力学过程, 系统的状态参量必然要随时间发生变化, 这意味着必须打破系统原有状态的平衡性. 因此, 平衡态和热力学过程这两个看似相互对立的概念在准静态过程的定义中实现了统一. 要深入理解并彻底掌握准静态过程这个物理概念, 既不能将平衡态的概念绝对化, 否定它组成过程的可能性, 也不能将过程的概念绝对化, 否定过程中状态存在平衡性的可能<sup>[3]</sup>. 所以, 要用辩证的观点来看, 作为矛盾的对立统一体, 准静态过程是一种理想过程, 它虽不可能完全实现, 但可以无限地趋近.

对准静态过程这一理想模型的适用性问题, 大学物理教学中通常强调过程进行得无限缓慢的特点. 如果只强调无限缓慢, 而不对“缓慢”作具体深入的说明, 很可能导致学生把这个理想模型当成是与实际过程毫不相干的纯粹抽象. 其实, 一个实际过程能否被看成准静态过程, 必须借助弛豫时间的概念对整个具体过程进行定量分析, 一般可用两种定量方法作出判断<sup>[6]</sup>:

(1) 利用弛豫时间  $\tau$  与系统状态变化一可被观测的宏观量所需时间  $\Delta t_1$  进行比较来判定, 若满足  $\Delta t_1 \gg \tau$ , 则可认为系统经历了一个准静态过程, 在

本文的实例中则对应条件  $t_1 \gg \max[\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}]$ ;

(2) 利用弛豫时间  $\tau$  与热力学过程经历的总时间  $\Delta t$  的比较来判断, 若满足  $\Delta t \gg \tau$ , 则可判定为准静态过程, 在本文的实例中对应条件  $t_i = t_1 + t_2 \gg \max[\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}]$ . 需要说明, 一般情况下, 一热力学过程所经历的总时间是指由旧平衡态过渡到新平衡态所需的整个时间, 文献[7]在讨论弛豫时间与准静态过程的关系时, 给出热机过程经历的时间和弛豫时间之比约为  $10^2$ .

#### 4 总结

本文通过对一个生活实例进行定性和定量分析, 直观形象地类比了热力学中与准静态过程密切相关的几个重要物理概念. 概括地讲, 准静态过程作为一种典型的热力学过程, 它将描述系统宏观静止的概念“平衡态”和描述系统宏观运动的概念“热力学过程”统一了起来. 这个无限缓慢变化的热力学过程, 静中有动, 动中有静, 概念本身既采用了极限定义思想, 又运用了理想模型描述, 理论上堪称完美. 同时, “弛豫时间”的概念作为联系实际过程和理想过程的桥梁和纽带, 赋予了准静态过程真正的灵魂, 使其不但没有变成脱离实际的纯粹抽象, 反而凸显出其非凡的科学价值和重要的现实意义.

#### 参考文献

- 1 阿力甫·沙吾提. 热力学准静态过程的教学研究. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2006, 25(4): 103 ~ 105
- 2 吴百诗. 大学物理学(下册). 北京: 高等教育出版社, 2012. 4 ~ 15
- 3 游佩林. 准静态过程的教学探讨. 大学物理, 1984(9): 22 ~ 23
- 4 朗道, 栗弗席兹. 统计物理学. 北京: 高等教育出版社, 1964. 49 ~ 54
- 5 陆瑞正. 用“弛豫时间”讲解“准静态过程”. 大学物理, 1986(10): 26 ~ 27
- 6 薛红, 李望. 准静态过程的两种定量判断方法. 渭南师范学院学报, 2002, 17(2): 18 ~ 19
- 7 黄淑清, 聂宜如, 申先甲. 热学教程(第二版). 北京: 高等教育出版社, 1994. 49 ~ 89

(下转第 28 页)

(5)  $D$  为  $m$  量级,  $d$  为  $0.1\text{ mm}$  量级, 实验室可观察到清晰干涉条纹.

### 3 结论

本文在未经任何理论近似的情况下, 通过改变不同参数, 模拟了观察屏上干涉明纹的分布, 该模拟结果不但直观地展示了干涉条纹分布特点, 有助于学生对干涉条纹分布规律的理解和掌握, 而且可在一定程度上指导杨氏双缝干涉实验. 另外, 通过对比不同参数下的模拟结果, 可引发学生对实验条件的关注, 认识到实验条件的重要性.

### 参考文献

- 1 程守洙, 江之永. 普通物理学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 175 ~ 176
- 2 张三慧. 大学基础物理学. 北京: 清华大学出版社, 2003. 592 ~ 593
- 3 马文蔚, 周雨青, 解希顺. 物理学教程. 北京: 高等教育出版社, 2006. 185
- 4 吴百诗. 大学物理. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. 118 ~ 119
- 5 金仲辉, 柴丽娜. 大学基础物理学. 北京: 科学出版社, 2010. 260

## Theoretical Simulation on Young's Double-slit Interference Pattern

He Kunna Han Ping Zhu Shiqiu Jin Zhonghui  
(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract:** The paper theoretically simulated the fringe pattern on the screen in Young's double-slit interference experiment in case that the theoretical analysis is not approximated. The simulation result is not only helpful for students to master the interference fringes in an all-round way, but also helpful for students to understand the importance of the experimental conditions.

**Key words:** double-slit interference; optical path difference; simulation

(上接第 24 页)

## Analysis on Teaching of Quasi-static Process and Related Physics Concepts

Li Shengchang Zhang Yang  
(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049)

**Abstract:** In this paper we adopt the analogy method and introduce the process of climbing steps as an example. We give an intuitive analogy of the quasi-static process and related physical concepts in thermodynamics through a detailed qualitative and quantitative analysis on the process of climbing steps. We reveal the difference between the conceptions of equilibrium state, non-equilibrium state, and relaxation time, and show the connection of them to the concept of quasi-static process. We give the quantitative condition for practical process approximating to quasi-static process as well.

**Key words:** equilibrium state; relaxation time; quasi-static process