

## 类比理解物体的力学、电学、热学惯性

谭志光 郭有能 刘 亮 王胜杰

(长沙学院电子信息与电气工程学院, 湖南 长沙 410022)

**摘 要** 物体任何保持原有状态不变的性质, 都可以叫做惯性。本文用类比的方法从力学、电学和热学各方面阐述了物体多种惯性的存在, 并重点讨论了物体热惯性的表示以及与之哪些因素有关。此外, 本文还从守恒的角度探讨了惯性所蕴含的对称性。

**关键词** 惯性; 热惯性; 导热系数; 导温系数

## UNDERSTANDING THE INERTIA OF OBJECTS IN MECHANICS, ELECTRICITY, AND THERMODYNAMICS THROUGH ANALOGIES

TAN Zhiguang GUO Youneng LIU Liang WANG Shengjie

(College of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410022)

**Abstract** Any property of an object that remains unchanged in its original state can be called inertia. This paper uses analogical methods to elucidate the existence of various types of inertia in objects from various aspects such as mechanics, electricity, and thermodynamics. It focuses on the representation of an object's thermal inertia and discusses the factors related to it. And from the perspective of conservation, the symmetry inherent in inertia was explored.

**Key words** Inertial heat; inertial thermal conductivity; thermal conductivity

“惯性”一词最先出自伽利略 1632 年出版的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》<sup>[1]</sup>, 指的是物体保持静止或匀速直线运动的性质。而现代我们所认识的惯性则来自牛顿第一定律: 物体总保持原有状态不变, 直到有外力迫使它改变这种状态为止。物体这种保持原有状态不变的性质叫做惯性。所以牛顿第一定律也称为惯性定律。质量越大的物体, 惯性越大。后来, 牛顿用实验得出了力与物体运动状态改变之间的定量关系——牛顿第二定律, 并正式定义了物体的质量——物体惯性大小的量度。质量越大的物体, 相同大小的力改变它的运动状态就越难, 因此我们才说牛顿第二定律中的质量是物体的惯性质量<sup>[2]</sup>。物体的宏观运动状态由速度来描述。对于

实际的其它热学或电磁学系统, 它们的宏观状态由什么来描述? 改变这些状态需要给系统施加什么样的作用? 这些问题之间似乎存在一些联系或者说类比性, 那么热学系统和电磁学系统内是不是也存在某种惯性呢? 本文通过类比的方法, 揭示物体状态参量所对应的惯性及其在状态变化之间的具体阻碍作用。从而更深层地讨论惯性所对应的对称性本质或守恒问题, 可引导学生加强对所学知识的综合理解。

### 1 力学系统的惯性

物体因为有质量, 因而具有保持原有平动状态不变的性质, 称为物体的平动惯性。物体的平

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 湖南省教学改革重点项目, 立项编号: HNJC-2021-0211。

通信作者: 谭志光, 长沙学院电子信息与电气工程学院副教授, tanzg@ccsu.edu.cn。

引文格式: 谭志光, 郭有能, 刘亮, 等. 类比理解物体的力学、电学、热学惯性[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 74-77.

Cite this article: TAN Z G, GUO Y N, LIU L, et al. Understanding the inertia of objects in mechanics, electricity, and thermodynamics through analogies[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 74-77. (in Chinese)

动状态可由其质心速度(或质心动量)来描述,要改变物体的平动状态需要外力的作用。或者说外力是改变物体平动状态的原因。这一性质由牛顿第二定律来定量表示

$$F = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

力的时空积累所产生的效果是使物体的动量或动能发生改变

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1 = p_2 - p_1$$

$$\int_{r_1}^{r_2} F dr = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

同理,转动惯性由转动定理给出

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{dL}{dt}$$

物体的转动状态不需要力矩来维持,转动状态发生改变才需要力矩的作用。转动惯量  $J$  描述了转动状态发生改变的难易程度,也是衡量物体转动惯性大小的量度。力矩的时空积累导致的效应是使物体的角动量和转动动能发生改变。

$$\int_{t_1}^{t_2} M dt = J\omega_2 - J\omega_1 = L_2 - L_1$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} M d\theta = \frac{1}{2}J\omega_2^2 - \frac{1}{2}J\omega_1^2$$

从守恒的角度看,一个系统如果不受任何外力的作用,那么它的动量是守恒的。这个守恒不因观察者所处的参考系而变化。其实质是相对空间具有平移不变性。同样如果不受外力矩作用,那么它的角动量守恒,系统具有旋转不变性<sup>[3]</sup>。

## 2 电磁惯性

### 2.1 电惯性

用来贮存电荷的装置,可统称为电容器。电容器所处的状态由其两极电势差确定。给电容器充放电的过程,实际上是改变电容器状态的过程。所以电容器具有保持其两端电势差不变的性质,即电惯性。

如图 1 所示,在给电容器充电的过程中,设  $dt$  时间内,有  $dq$  的电量被电源推送到电容器上,电容器的电势随之升高,电路中的瞬时电流

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

显然,在相同的电流作用下,电容越大,其两

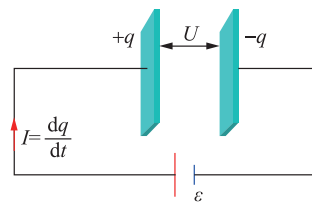


图 1 电容器的充电过程

端电压的改变速度就越慢,因此电容是电容器电惯性大小的量度。如果电流为零,电容器两极板上的电势差就不会发生改变。它不依赖于零电势的选取,也是一种平移不变。

从能量的角度来说,给电容器充电,电源的非静电力要克服电场力做功,把电荷从一个极板移动另一个极板。非静电力的功就变成了静电能储存在电容器之中

$$W = \int_0^Q U dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2$$

### 2.2 磁惯性

同样,我们可以用电感线圈来储存磁能。其储能状态由线圈中的电流来描述。

如图 2 所示,以自感线圈的供、放电过程为例,当  $K$  接在①瞬时,电路接通,由于自感的存在,它将通过在线圈中产生与电流方向相反的自感电动势来阻碍电流的增加

$$\epsilon_L = -L \frac{di}{dt}$$

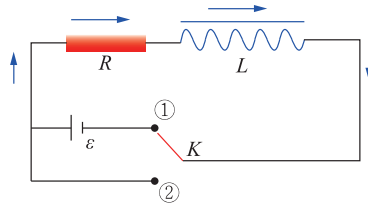


图 2 电感线圈的供放电过程

自感系数  $L$  越大,电流的改变就越难。 $L$  反映了线圈保持电流不变的性质,称为磁惯性。在超导线圈内,电流会一直保持不变地存在。只有在给线圈充电的过程中,如在  $0 \rightarrow T$  的时间内,电流从  $0 \rightarrow \epsilon/R$ ,电源电动势做功为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^T \epsilon i dt = \int_0^I Li dt + \int_0^T i^2 R dt \\ &= \frac{1}{2} LI^2 + \int_0^T i^2 R dt \end{aligned}$$

电源反抗自感电动势做功

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

可见,电源反抗自感电动势所做的功,转换成磁场能储存在自感线圈之中<sup>[4]</sup>。在 LC 振荡电路中,电场能与磁场能相互转换,反映了磁现象的电本质。

### 3 热学惯性

对于一个孤立的热力学系统,温度是描述其冷热程度的一个状态参量。当与外界没有热量交换时,其温度  $T$  将保持不变。物体这种保持温度不变的性质叫做热惯性。系统在当前温度下所包含的热量

$$Q = CT$$

系统温度的改变,或所含热量的改变需要什么样的“外力”呢?以加热过程为例,设  $dt$  时间内,有  $dQ$  的热量被外部热源传送到热容器上,热容器在阻止传热过程中温度逐渐升高。然而不同于电磁能量的传送,传入到物体的热量,引起物体温度的变化在物体内部存在一个与传热方向相同的梯度。达到温度一致还需额外的时间。

以一维热传导瞬态过程为例,设有一根横截面积为  $A$ ,长为  $L$  的圆柱形金属材料棒,其侧面与右侧端面均绝热。初始平衡温度为  $T_0$ ,现将棒左端与一个温度为  $T$  的恒温热源接触,于是热量将从左端流入,直到整个材料达到均匀温度  $T$  后停止。设该金属材料的密度、导热系数与比热容分别为  $\rho$ 、 $k$  和  $c$ 。根据热传递的傅立叶定律<sup>[5]</sup>

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{dT}{dx}$$

即单位时间垂直通过单位面积的热流量(称为热流密度)正比于该方向的温度梯度,比例系数  $k$  称为材料的热导率(或导热系数)。为了探讨热传导的瞬态过程,我们将此圆柱棒划分成  $N$  个相同的小段。以左侧高温面中心为原点,向右沿轴向建立坐标如图 3 所示。

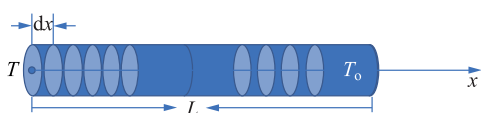


图3 一维热传导模型

假设  $N$  足够大,可以认为任意小段在从左侧输入的热量  $Q_1$  并向右侧输出热量  $Q_2$  的时间内能

迅速达到热平衡从而得到新的温度。于是对于第  $i$  小段,以下递推规律得以实现

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_2 &= kA \frac{T_{i+1} - T_i}{dx} dt - kA \frac{T_i - T_{i-1}}{dx} dt \\ &= kA dt \frac{T_{i+1} - T_i - T_i + T_{i-1}}{dx} \\ &= c \Delta m \Delta T = c \rho A dx (T'_i - T_i) \\ \Rightarrow T'_i &= T_i + \frac{k}{\rho c} \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{dx} \frac{dt}{dx} \end{aligned} \quad (2)$$

以铁为例,它的导热系数  $k = 40 \times 1.163 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,密度  $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ,比热容  $c = 460 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$ ,取  $L = 0.1 \text{ m}$ ,  $A = 0.1 \text{ m}^2$ 。铁柱开始时处于  $300 \text{ K}$  的平衡温度,当用  $600 \text{ K}$  的恒温热源从左侧接触铁柱后,热量开始从铁柱左侧缓慢流入。图 4 显示了计算机模拟的铁柱上不同位置的温度变化情况。

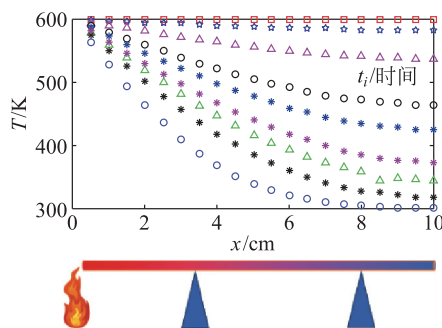


图4 多个时刻铁柱上不同位置处的温度

我们把公式(2)变形为

$$\frac{T'_i - T_i}{dt} = \frac{k}{\rho c} \frac{(T_{i+1} - T_i) - (T_i - T_{i-1}))}{dx^2} \quad (3)$$

即

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (4)$$

其中,  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  反映了物体的增温快慢,称为热扩散系数,也称为导温系数<sup>[6]</sup>。它表示物体在加热或冷却中,温度趋于均匀一致的能力;导热系数与导温系数之比反映了物质抵抗热量扩散和阻止温度变化的综合能力,称为热惯量密度。即

$$\frac{k}{\alpha} = \rho c$$

物体的热惯量,它本质上就是物体的热容,可表示为

$$C = \int \rho c dV$$

但扩展到了质量、材料分布不均匀的普遍情况。即使导热系数较大的物体,由于导温系数小,也会具有很大的热惯量。即改变物体的温度仍然较难。

图5显示了,铁在与不同的热源温度接触并达到热平衡时所需的热量、所需的时间与温度变化之间的关系,为了突出其变化情况,图中实线是按式(5)、(6)多项式拟合的结果。

$$Q = 10^4 \times (3.62\Delta T - 3.56) \quad (5)$$

$$t = 10^{-4} \times (8.11\Delta^3 T - 1706\Delta^2 T + 1.8 \times 10^5 \Delta T + 6.32 \times 10^6) \quad (6)$$

很明显,热量与温度改变量呈简单线性关系。而达到平衡所需时间与温度差的关系却较为复杂。

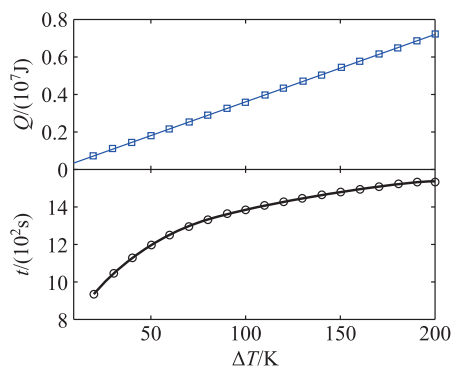


图5 对应不同的温度变化,铁柱吸收的热量(上面板)和达到平衡所需的时间(下面板)

当一个孤立的热学系统(电容为常数),温度不变时,即没有与外界发生热量交换,系统的热能将保持不变,时间对称反映了系统的能量守恒。

#### 4 结语

本文从力学惯性概念出发,类比提出了电惯

性、磁惯性以及热惯性等概念,并定义了描述和衡量各种惯性的物理量,分别叫平动惯量、转动惯量、电惯量、磁惯量、热惯量等。它们的共性是保持原有状态不变。其深层次的原因是某种守恒量和相应的对称性。

#### 参 考 文 献

- [1] 伽利略. 关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话[M]. 周熙良,等,译. 北京:北京大学出版社,2006.  
Galileo. Dialogue on the two world systems of Ptolemy and Copernicus[M]. translated by ZHOU X L, et al. Beijing: Peking University Press, 2006. (translated into Chinese)
- [2] 何欣灿. 从质量的起源探讨惯性质量与引力质量[J]. 中学物理教学参考, 2015, 44(17): 46-48.  
HE X C. Exploring inertial mass and gravitational mass from the origin of mass[J]. Teaching Reference of Middle School Physics, 2015, 44(17): 46-48. (in Chinese)
- [3] 赵凯华. 时空对称性与守恒律(下篇)——经典电动力学[J]. 大学物理, 2016, 35(8): 14.  
ZHAO K H. Spacetime symmetries and conservation laws (II) Classical Electrodynamics[J]. College Physics, 2016, 35(8): 14. (in Chinese)
- [4] 谭志光, 孙利平. 大学物理学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022: 199.  
TAN Z G, SUN L P. College Physics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2022: 199. (in Chinese)
- [5] 朱彤, 安青松, 刘晓华, 等. 传热学[M]. 7版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 10-12.  
ZHU T, AN Q S, LIU X H, et al. Heat Transfer[M]. 7th edition, Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 10-12. (in Chinese)
- [6] 张天孙, 卢改林. 传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 21-24.  
ZHANG T S, LU G L. Heat transfer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 21-24. (in Chinese)