University Physics Teaching and Studying

# 大学物理·教与学

周一平　罗益民　主编
杨兵初　主审

中南大學出版社
www.csupress.com.cn

University Physics Teaching and Studying

# 大学物理·教与学

◉ 周一平　罗益民　主编
杨兵初　主审

中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

大学物理·教与学/周一平,罗益民编.—长沙:中南大学出版社,2013.2

ISBN 978-7-5487-0748-6

Ⅰ.大... Ⅱ.①周...②罗... Ⅲ.物理学-高等数学-教学参考资料 Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 000845 号

大学物理·教与学

周一平 罗益民 编

□责任编辑 胡小锋
□责任印制 周 颖
□出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88.10482
□印 装 长沙市华中印刷厂

□开 本 787×1092 1/16 □印张 17.5 □字数 331 千字
□版 次 2013 年 2 月第 1 版 □2013 年 2 月第 1 次印刷
□书 号 ISBN 978-7-5487-0748-6
□定 价 35.00 元

## 内容简介

本书是为工科大学物理教学编写的教学参考书，全书分为教学研究篇和学习指导篇。在教学研究篇中，我们在认真参考有关教材、专著或杂志的基础上，选编了很多个专题，这些专题大部分源自大学物理教学内容，但编者对其进行了适当的扩充和深化，非常适合于教师在教学过程中作为参考。在学习指导篇中，我们采取与教材配套的方法，将全篇分为10章，每章包含内容概要、学习指导和典型例题3部分。内容概要以框图的形式，将每章的重点内容、公式定律等加以总结；学习指导针对各章重点、难点问题进行具体阐述和指导；典型例题选题典型、覆盖面广。

本书可作为理工科院校非物理类专业大学物理教学的辅助教材或学习参考书，对大、中学校的物理教师及广大物理爱好者也有一定的参考价值。

# 前　言

大学物理课程不仅是一门重要的基础理论课，而且在科学素质教育中发挥着重要作用。物理学的研究方法对其他自然科学和技术也具有指导意义。近年来按照教育部《理工科类大学物理课程教学基本要求》，我们在大学物理课程教学中实施“知识教育、能力培养、素质提升三者并重”的教学改革，进行研究性教学的探索。在传授知识的过程中，注重培养学生发现、提出、分析和解决问题的能力。为了与全国从事工科大学物理课程教学的同行们更好地交流，也为了指导和帮助学习工科大学物理课程的学生们，我们编写了本书。

本书分为两大部分，第一部分为教学研究篇，第二部分为学习指导篇。在教学研究篇中，我们结合大学物理课程教学的体会编写了一些专题，对大学物理教学中的某些问题进行了深入地研究和探讨。此外，我们还从有关杂志中选用了若干篇紧密结合大学物理教学实际的研究论文。这一部分集知识性、趣味性于一体，对从事大学物理教学的教师应该会有所帮助，对于引导和激发学生的创新思维，帮助学生深刻领会物理学中的科学精髓也很有益处；学习指导篇根据大学物理课程的基本章节，每章分为内容概要、学习指导、典型例题三部分。内容概要将每一章的主要内容，公式定律提炼成知识结构网络图，有助于学生系统地理解教学内容和掌握重点。学习指导对各章学习方法、重点难点作出讨论与辅导。典型例题部分的题目是编者多年教学实践中积累并经过精心筛选的，有利于学生理解和巩固每一章的概念和知识点。

本书由李志军(新疆大学)编写力学部分，聂耀庄编写相对论部分，罗益民编写统计物理与热力学部分，周一平编写振动与波部分，李旭光编写光学部分，谭小红编写静电场部分，蔡建国编写稳恒磁场和变化的电磁场部分，朱星炬编写量子物理基础部分，全书由周一平、罗益民统稿，杨兵初主审。

由于编者水平有限，加之这一方面的参考书不是很多，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评。

编　者

2013 年 1 月于中南大学

# 目　录

## 教学研究篇

# 学习指导篇

# 教学研究篇

# 第1部分　力　学

## 1.1　椭球体转动惯量的计算①

现行大学物理教材对圆柱体、球体等绕各种对称轴旋转的刚体的转动惯量大小都已列出，此处对曲面方程为$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}=1$的椭球体绕对称轴旋转的转动惯量的大小用分步计算和广义球面坐标变换两种方法进行了计算，计算表明，后一种方法更简单、实用，在工程实际中有应用价值.

### 1.1.1　椭球体转动惯量的计算方法

**方法一　分步计算法**

（1）先计算椭圆形薄板绕通过中心且垂直板面的轴的转动惯量. 如图1－1－1所示，设椭圆形薄板质量为$m$，质量均匀分布；质量面密度为$\sigma$；长、短轴半径分别为$A$、$B$，椭圆方程为

$$\frac{x^2}{A^2}+\frac{y^2}{B^2}=1 \qquad (1-1-1)$$

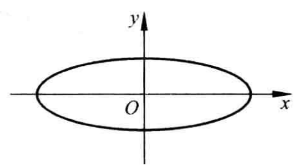

图1－1－1　椭圆形薄板转动惯量

则该薄板绕过$O$且垂直板面的轴的转动惯量为

$$I_{z1}=\iint_S(x^2+y^2)\mathrm{d}m=\sigma\iint_S(x^2+y^2)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \qquad (1-1-2)$$

由式(1－1－1)得

$$x=\pm A\sqrt{1-\frac{y^2}{B^2}}$$

所以　$$I_{z1}=\sigma\int_{-B}^{B}\mathrm{d}y\int_{-A\sqrt{1-\frac{y^2}{B^2}}}^{A\sqrt{1-\frac{y^2}{B^2}}}(x^2+y^2)\mathrm{d}x$$

① 选自：赵新闻. 椭球体转动惯量的计算. 物理与工程，2007(2)

$$= \frac{2}{3}\sigma A^3 \int_{-B}^{B} \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{B^2}\right)^3}\, dy + 2\sigma A \int_{-B}^{B} y^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{B^2}}\, dy$$

令 $\frac{y}{B} = u$① 有

$$\int_{-B}^{B} \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{B^2}\right)^3} dy = B\left\{\frac{y}{8B}\left[5 - 2\left(\frac{y}{B}\right)^2\right]\sqrt{1 - \left(\frac{y}{B}\right)^2} + \frac{3}{8}\arcsin\frac{y}{B}\right\}\Bigg|_{-B}^{B}$$

$$= \frac{3}{8}\pi B$$

$$\int_{-B}^{B} y^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{B^2}}\, dy = B^3\left\{\frac{y}{8B}\left[2\left(\frac{y}{B}\right)^2 - 1\right]\sqrt{1 - \left(\frac{y}{B}\right)^2} + \frac{1}{8}\arcsin\frac{y}{B}\right\}\Bigg|_{-B}^{B}$$

$$= \frac{1}{8}\pi B^3$$

所以 $$I_{z1} = \frac{2}{3}\sigma A^3 \frac{3}{8}\pi B + 2\sigma A \frac{1}{8}\pi B^3 = \frac{1}{4}\sigma\pi AB(A^2 + B^2)$$

由椭圆的面积 $S = \pi AB$ 得

$$I_{z1} = \frac{1}{4}m(A^2 + B^2) \qquad (1-1-3)$$

(2)再计算椭球体绕对称轴(如 $z$ 轴)的转动惯量. 如图 1-1-2 所示, 设椭球体的三个轴的半径分别为 $a$、$b$、$c$, 则其曲面方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \qquad (1-1-4)$$

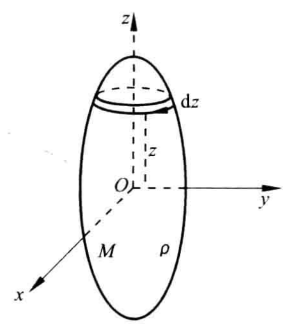

**图 1-1-2 椭球体转动惯量**

椭球体质量为 $M$, 质量均匀分布; 质量体密度为 $\rho$; 将椭球体用垂直于 $z$ 轴的平面分成许多厚度为 d$z$ 的椭圆形薄板, 对离中心 $O$ 距离为 $z$ 的薄板, 其对应椭圆方程为

$$\frac{x^2}{a^2\left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right)} + \frac{y^2}{b^2\left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right)} = 1$$

由式(1-1-3)可得该薄板对 $z$ 轴转动惯量

$$dI_z = \frac{1}{4}dM\left[\left(a\sqrt{1 - \frac{z^2}{c^2}}\right)^2 + \left(b\sqrt{1 - \frac{z^2}{c^2}}\right)^2\right]$$

① 中国矿业学院数学教研室编. 数学手册. 式(84)和式(85). 科学出版社, 1980

而 $\mathrm{d}M=\rho S\mathrm{d}z=\rho\pi a\sqrt{1-\frac{z^2}{c^2}}\cdot b\sqrt{1-\frac{z^2}{c^2}}\mathrm{d}z$,

所以
$$\mathrm{d}I_z=\frac{1}{4}\rho\pi ab(a^2+b^2)\left(1-\frac{z^2}{c^2}\right)^2\mathrm{d}z$$

可得椭球体绕 $z$ 轴转动惯量

$$I_z=\int_{-c}^{c}\mathrm{d}I_z=\frac{1}{4}\rho\pi ab(a^2+b^2)\int_{-c}^{c}\left(1-\frac{z^2}{c^2}\right)^2\mathrm{d}z$$
$$=\frac{4}{15}\rho\pi abc(a^2+b^2)$$

由椭球体体积 $V=\frac{4}{3}\pi abc$ 得

$$M=\rho V=\rho\frac{4}{3}\pi abc$$

所以
$$I_z=\frac{1}{5}M(a^2+b^2) \tag{1-1-5}$$

**方法二　用广义球面坐标变换直接积分求解**

已知条件如图1－1－2所示，由转动惯量定义，可得椭球体绕 $z$ 轴转动惯量

$$I_z=\iiint_V(x^2+y^2)\rho\mathrm{d}V \tag{1-1-6}$$

作广义球面坐标变换

$$\begin{cases}x=ar\sin\theta\cos\varphi\\ y=br\sin\theta\sin\varphi\\ z=cr\cos\theta\end{cases} \tag{1-1-7}$$

其中 $r\geqslant 0$，$0\leqslant\varphi\leqslant 2\pi$，$0\leqslant\theta\leqslant\pi$.

变量替换后的体积元变为

$$\mathrm{d}V=abcr^2\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}r\mathrm{d}\varphi \tag{1-1-8}$$

椭球面方程变为

$$r^2=1 \tag{1-1-9}$$

将式(1－1－7)、(1－1－8)、(1－1－9)代入式(1－1－6)得

$$I_z=\rho\iiint_V(a^2\cos^2\varphi+b^2\sin^2\varphi)\cdot r^2\sin^2\theta abcr^2\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}r\mathrm{d}\varphi$$
$$=\rho abc\int_0^1 r^4\mathrm{d}r\int_0^{\pi}\sin^3\theta\mathrm{d}\theta\int_0^{2\pi}(a^2\cos^2\varphi+b^2\sin^2\varphi)\mathrm{d}\varphi$$

容易求得

$$\int_0^{\pi}\sin^3\theta\mathrm{d}\theta=\frac{4}{3}$$

$$\int_0^{2\pi}(a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi)\mathrm{d}\varphi = \pi(a^2 + b^2)$$

所以
$$I_z = \rho abc\frac{1}{5}\cdot\frac{4}{3}\pi(a^2 + b^2) = \frac{4}{15}\rho\pi(a^2 + b^2)abc$$

$$= \frac{1}{5}M(a^2 + b^2) \qquad (1-1-10)$$

同理，可求得椭球体绕 $x$ 轴和 $y$ 轴转动惯量分别为

$$I_x = \iiint_V (y^2 + z^2)\rho\mathrm{d}V = \frac{1}{5}M(b^2 + c^2) \qquad (1-1-11)$$

$$I_y = \iiint_V (x^2 + z^2)\rho\mathrm{d}V = \frac{1}{5}M(a^2 + c^2) \qquad (1-1-12)$$

### 1.1.2 讨论

(1)当椭球体满足 $a=b=c=R$ 时，椭球体即变为球体，由式(1-1-10)、(1-1-11)、(1-1-12)得

$$I_z = I_x = I_y = \frac{2}{5}MR^2 \qquad (1-1-13)$$

式(1-1-13)即为半径为 $R$ 质量为 $M$ 的球体对通过球心的轴的转动惯量.

(2)对质量非均匀分布的椭球体，只要已知质量体密度函数 $\rho(\theta,\varphi,r)$，则由方法二亦可求出其绕对称轴的转动惯量. 可见，方法二既简单，又具有普遍性，在工程实际计算中有实用价值.

## 1.2 均质半圆盘质心计算的微元选取及讨论①

微元分析法是体现大学物理思想的重要研究方法. 我们通过均质半圆盘质心计算中质量元的多种选取方案，阐述微元法的重要和精妙，给学生以引导和启迪.

在讨论质点系的运动时，常常引入一个非常重要的概念——质心. 顾名思义，质心就是质量中心，是相对于质点系本身的一个特殊位置. 由于内力和外力的作用，质点系内各个质点的运动情况可能很复杂，但相对于质心，其运动规律可能比较简单，仅由质点系所受的合外力决定. 基于此，质心位置的确定及其测量在工程技术如发动机、车辆、船舶、武器装备、火箭、航天器等设计制造上显得尤为重要.

① 选自：赵素贵等. 均质半圆盘质心计算的微元选取及讨论. 物理与工程，2010(1)

对于质量连续分布的物体，任取一质元 d$m$，则物体的质心位置可以表示成

$$\boldsymbol{r}_c = \frac{\int \boldsymbol{r}\mathrm{d}m}{m} \tag{1-1-14}$$

式中，$\boldsymbol{r}$ 表示质元的位矢. 计算中常采用直角坐标系中的分量式

$$x_c = \frac{\int x\mathrm{d}m}{m},\ y_c = \frac{\int y\mathrm{d}m}{m},\ z_c = \frac{\int z\mathrm{d}m}{m} \tag{1-1-15}$$

在求解过程中，质元 d$m$ 可有多种取法. 本书以均质半圆盘（质量为 $m$，半径为 $R$）的质心计算为例，对于如何选取微元，进行一些有益的探讨.

## 1.2.1 质元的 5 种取法

**1. 矩形质元**

建立如图 1-1-3 所示的直角坐标系. 在半圆盘上任取一长为 d$x$、宽为 d$y$ 的矩形质元

$$\mathrm{d}m = \sigma \mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

式中，$\sigma = \frac{2m}{\pi R^2}$为半圆盘质量面密度，$R$ 为半圆盘半径. 根据对称性分析，半圆盘质心在 $y$ 轴上（以下分析同）.

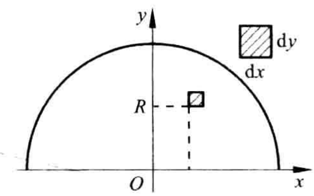


**图 1-1-3 矩形质元**

由式（1-1-15），质心坐标为

$$\begin{aligned} y_c &= \frac{\int y\mathrm{d}m}{m} = \frac{2}{\pi R^2}\int_{-R}^{R}\mathrm{d}x\int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} y\mathrm{d}y \\ &= \frac{1}{\pi R^2}\int_{-R}^{R}(R^2 - x^2)\mathrm{d}x \\ &= \frac{4R}{3\pi} \end{aligned}$$

**2. 梯形质元**

在与 $x$ 轴夹角为 $\theta$，对心角为 d$\theta$ 的小扇形上取一梯形质元，如图1-1-4所示，质元下底到原点的距离为 $r$，则

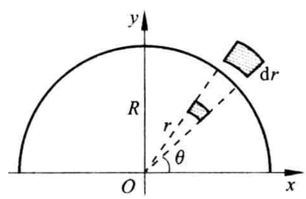


**图 1-1-4 梯形质元**

$$\mathrm{d}m = \sigma\frac{1}{2}[r\mathrm{d}\theta + (r + \mathrm{d}r)\mathrm{d}\theta]\mathrm{d}r$$

略去二阶无穷小量，可得

$$\mathrm{d}m = \sigma r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta$$

则质心位置

$$y_c = \frac{\int y\mathrm{d}m}{m} = \frac{\int y\,\frac{2m}{\pi R^2}r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta}{m} = \frac{2}{\pi R^2}\int yr\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta$$

因 $y = r\sin\theta$，所以

$$y_c = \frac{2}{\pi R^2}\int_0^R r^2\mathrm{d}r\int_0^\pi \sin\theta\mathrm{d}\theta = \frac{4R}{3\pi}$$

**3. 长条形质元(平行于 $x$ 轴)**

在圆盘上取一距 $x$ 轴为 $y$，宽为 $\mathrm{d}y$ 的长条形质元，如图 1－1－5 所示.

$$\mathrm{d}m = \sigma\cdot 2\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = \frac{4m}{\pi R^2}\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y$$

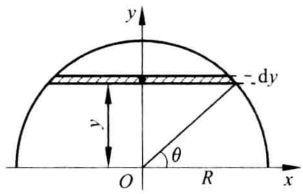


**图 1－1－5　长条形质元(平行于 $x$ 轴)**

该质元的质心为$(0, y)$，所以半圆盘的质心位置

$$y_c = \frac{\int y\mathrm{d}m}{m} = \frac{4}{\pi R^2}\int_0^R y\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = \frac{4R}{3\pi}$$

**4. 长条形质元(垂直于 $x$ 轴)**

在圆盘上 $x$ 处取一平行于 $y$ 轴的长条形质元，如图 1－1－6 所示.

$$\mathrm{d}m = \sigma y\mathrm{d}x$$

质元的质心为$(x, \frac{1}{2}y)$，所以，半圆盘的质心位置

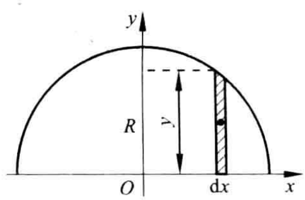


**图 1－1－6　长条形质元(垂直于 $x$ 轴)**

$$y_c = \frac{\int \frac{1}{2}y\mathrm{d}m}{m} = \frac{1}{\pi R^2}\int y^2\mathrm{d}x = \frac{1}{\pi R^2}\int_{-R}^{R}(R^2 - x^2)\mathrm{d}x = \frac{4R}{3\pi}$$

**5. 半圆环质元**

半圆盘可看成由无穷多个半径不同的微小半圆环组成，如图 1－1－7 所示. 在半圆盘上任取一半径为 $x$，宽为 $\mathrm{d}x$ 的半圆环作为质元，则

$$\mathrm{d}m = \sigma\pi x\mathrm{d}x = \frac{2m}{R^2}x\mathrm{d}x$$