大学物理教学研究

籍延坤 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

大学物理教学研究

籍延坤　著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本著作由大连交通大学籍延坤教授根据几十年从事基础物理教学的体会和进行基础物理教学研究所积累的资料撰写而成。

本著作主要撰写了大学物理中一些专题独到的和更严格的处理方法，其内容包括力学、电磁学、热学、光学、近代物理和物理实验。其特点是概念准确、创意新颖和叙述严谨。

本著作适合作为高等院校大学物理课程和大学物理实验课程的教学参考书，也可供有关教师和学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教学研究 /籍延坤著. —北京：中国铁道出版社，2013.5

ISBN 978-7-113-16540-6

Ⅰ.①大… Ⅱ.①籍… Ⅲ.①物理学—教学研究—高等学校 Ⅳ.①O4-42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096174 号

书　　名：大学物理教学研究
作　　者：籍延坤　著

策　　划：李小军　　**读者热线：**400-668-0820
责任编辑：马洪霞　徐盼欣
封面设计：付　魏
封面制作：刘　颖
责任印制：李　佳

出版发行：中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号
网　　址：http://www.51eds.com
印　　刷：北京市燕鑫印刷有限公司
版　　次：2013 年 5 月第 1 版　　2013 年 5 月第 1 次印刷
开　　本：720mm×960mm　1/16　**印张：**18.5　**字数：**363 千
书　　号：ISBN 978-7-113-16540-6
定　　价：45.00 元

前　　言

严格地讲，大学物理包含大学物理理论和大学物理实验，而大学物理理论习惯上又简称为大学物理学。大学物理学和大学物理实验是理工科大学生的两门重要的基础课，对学生专业基础的培养，科研素质的训练，以及辩证唯物主义世界观的形成等，都有重要意义。然而，我们在教学实践中发现，目前的大学物理和大学物理实验教材，包括一些经典教材，在有些问题的处理上仍有不尽完善和不准确之处，或者由于教材篇幅有限，某些问题不可能阐述得非常清楚。为了弥补这些不足之处，让学生能更好地理解大学物理中的基础知识、基本思想、基本规律和基本方法，以及教师能更好地讲透大学物理，作者在多年教学和教学研究的基础上，撰写了这本《大学物理教学研究》著作。

本著作共分成八篇。第 1 篇是力学，其中包括运动学基础、动力学基础、振动和波；第 2 篇是静电学；第 3 篇是静磁学；第 4 篇是电磁感应；第 5 篇是热学，其中包含气体分子动理论和热力学基础；第 6 篇是光学；第 7 篇是近代物理，这部分包括相对论力学基础和量子物理基础；第 8 篇是物理实验。

通过对一些具体物理问题的研究，力图强调物理概念的准确性和物理理论的严密性，书中较多地运用了数学理论，对这些专题给出更合理、更严格的处理方法，某些专题以论文形式已经在一些期刊上发表。对于多数读者来说，一定会受益匪浅。

由于作者水平有限，书中的某些论述，往往强调了问题的一个侧面，个别论点也难免片面或错误，作者诚恳地希望得到读者的批评和指正。

编　者

2013 年 3 月

目　录

第1篇 力　学

1　切向加速度和法向加速度的几种推导方法

1.1　方法1

如图1-1所示，设位移 $\Delta\vec{r}=\vec{r}(t+\Delta t)-\vec{r}(t)$ 方向的单位矢量为 $\Delta\vec{r}_0$，则根据速度的定义有

$$\vec{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta s}\ \frac{\Delta s}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\left|\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta s}\right|\Delta\vec{r}_0\ \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\lim_{\Delta t\to 0}\Delta\vec{r}_0=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}=v_\tau\vec{\tau}$$

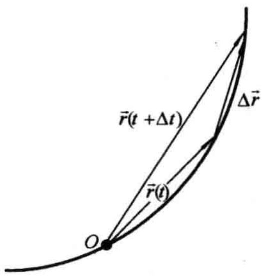

图1-1

即
$$\vec{v}=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}$$

式中，$\mathrm{d}\vec{r}=\mathrm{d}s\vec{\tau}$，当 $\mathrm{d}s>0$，表示 $\mathrm{d}\vec{r}\uparrow\uparrow\vec{\tau}$；当 $\mathrm{d}s<0$，表示 $\mathrm{d}\vec{r}\uparrow\downarrow\vec{\tau}$；

加速度为

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_\tau}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}+v_\tau\frac{\mathrm{d}\vec{\tau}}{\mathrm{d}t}$$

根据矢量的正交分解可得

$$\vec{\tau}=\tau\cos\theta\vec{i}+\tau\sin\theta\vec{j}=\cos\theta\vec{i}+\sin\theta\,\vec{j}$$

$$\frac{\mathrm{d}\vec{\tau}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}(-\sin\theta\vec{i}+\cos\theta\vec{j})$$

式中，$\theta=(\widehat{\vec{\tau},\vec{i}})$.

又

$$\vec{n}=\cos\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)\vec{i}+\sin\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)=-\sin\theta\vec{i}+\cos\theta\vec{j}$$

所以有

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}v_\tau}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}+v_\tau\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\vec{n}$$

注意：$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$不是质点对极坐标系极点 O 的角速度，因为质点不是绕 O 点在转动，只

能说是轨道上质点不同位置的切向方位角的变化率，或可以视为质点对曲率中心的角速度，因为只有对曲率中心质点才可以视为转动.

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=v_\tau\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}s}=v_\tau\Big/\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\theta}$$

由线量与角量的关系可得

$$\mathrm{d}s=\rho\mathrm{d}\theta$$

式中，ρ 为曲率半径，即

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{v_\tau}{\rho}$$

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}v_\tau}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}+\frac{v^2}{\rho}\vec{n}=\vec{a}_\tau+\vec{a}_n=a_\tau\vec{\tau}+a_n\vec{n}$$

类比于直线运动，因为加速度为 $\vec{a}=a_x\vec{i}$，代数量 a_x 可以唯一地确定加速度矢量 $\vec{a}$，所以习惯上称 a_x 为质点作直线运动的加速度，同理，质点作曲线运动时，$\vec{a}_\tau$ 称为切向加速度，因为 $\vec{a}_\tau=a_\tau\vec{\tau}$，对于自然坐标系而言，轨道是已知的，即任意时刻，轨道上的任意一点切向 $\vec{\tau}$ 也是已知的，代数量 a_τ 也可以唯一确定切向加速度矢量 $\vec{a}_\tau$，所以习惯上称 a_τ 为切向加速度；依此类推，因为 $\vec{a}_n=a_n\vec{n}$，所以称 $\vec{a}_n$ 为法向加速度，习惯上称 a_n 为法向加速度.

1.2 方法 2

设轨道上任意一点的曲率半径为 ρ，相对于曲率中心，质点可以视为转动，其角速度为 $\vec{\omega}$，速度为 $\vec{v}$，则有

$$\vec{v}=\vec{\omega}\times\vec{\rho}$$

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\vec{\omega}}{\mathrm{d}t}\times\vec{\rho}+\vec{\omega}\times\frac{\mathrm{d}\vec{\rho}}{\mathrm{d}t}$$

考虑到加速度具有瞬时性，所以考虑某一时刻加速度时，选择该时刻质点运动轨迹曲率中心为坐标原点，则

$$\vec{\rho}=\vec{r}$$

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\vec{\omega}}{\mathrm{d}t}\times\vec{r}+\vec{\omega}\times\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=\vec{\beta}\times\vec{r}+\vec{\omega}\times\vec{v}=\beta_z r\,\vec{\tau}+\omega^2 r\vec{n}$$

$$=a_\tau\vec{\tau}+\frac{v^2}{r}\vec{n}=a_\tau\vec{\tau}+\frac{v^2}{\rho}\vec{n}$$

1.3 方法 3

如图 1-2 所示，因为质点的速度为

$$\vec{v}=v_\tau\vec{\tau}=r\omega_z(\vec{k}\times\vec{r}_0)=(\omega_z\vec{k})\times(r\vec{r}_0)=\vec{\omega}\times\vec{r}$$

加速度为

$$\vec{a}=\omega_z\vec{k}\times\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}+\beta_z\vec{k}\times\vec{r}=\omega_z\vec{k}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})+\beta_z\vec{k}\times\vec{r}$$

$$=\omega_z\vec{k}\times(\omega_z\vec{k}\times r\vec{r}_0)+\beta_z\vec{k}\times r\vec{r}_0=\beta_z r\vec{\tau}+r\omega^2\vec{n}$$

所以切向加速度和法向加速度分别为

$$a_\tau=r\beta_z=r\frac{\mathrm{d}\omega_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_\tau}{\mathrm{d}t}$$

$$a_n=r\omega^2=\frac{v^2}{r}$$

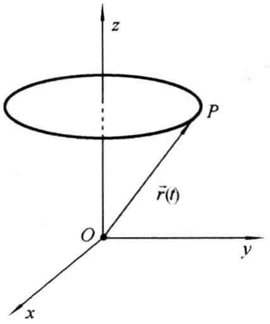

图 1-2

推广：一般曲线运动可以视为若干个曲线元组成，每一曲线元在不同曲率半径 ρ 的圆周上，即质点作曲率半径可变的圆周运动，故

$$a_\tau=\rho\beta_z=\rho\frac{\mathrm{d}\omega_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_\tau}{\mathrm{d}t}$$

$$a_n=\rho\omega^2=\frac{v^2}{\rho}$$

1.4　方法 4

如图 1-3 所示，作圆周运动的质点的位矢为

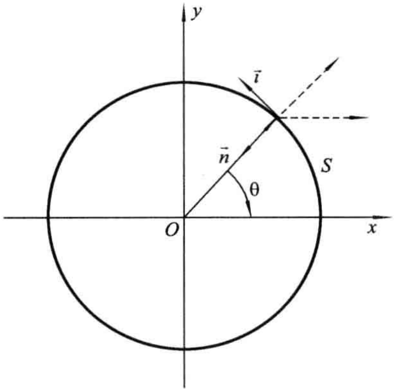

图 1-3

$$\vec{r}=R\cos\theta\vec{i}+R\sin\theta\vec{j}$$

速度为

$$\vec{v}=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}R\sin\theta\,\vec{i}+\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}R\cos\theta\vec{j}$$

$$=-\omega_z R\sin\theta\vec{i}+\omega_z R\sin\theta\vec{j}=R\omega_z(-\sin\theta\vec{i}+\cos\theta\vec{j})$$

$$\vec{\tau}=\tau_x\vec{i}+\tau_y\vec{j}=\cos\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)\vec{i}+\cos\theta\,\vec{j}=-\sin\theta\,\vec{i}+\cos\theta\,\vec{j}$$

$$\vec{v}=R\omega_z\vec{\tau}$$

线速度为

$$v_\tau = R\omega_z = R\frac{d\theta}{dt} = \frac{d(R\theta)}{dt} = \frac{ds}{dt}$$

加速度为

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv_\tau}{dt}\vec{\tau} + v_\tau\frac{d\vec{\tau}}{dt} = a_\tau\vec{\tau} + v_\tau(-\omega_z\cos\theta\vec{i} - \omega_z\sin\theta\vec{j})$$

$$\vec{n} = n_x\vec{i} + n_y\vec{j} = -\cos\theta\vec{i} - \sin\theta\vec{j}$$

切向加速度和法向加速度分别为

$$a_\tau = \frac{dv_\tau}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} = R\frac{d\omega_z}{dt} = R\beta_z$$

$$a_n = v_\tau\omega_z = R\omega^2 = \frac{v^2}{R}$$

同方法 3,推广到一般曲线运动有

$$a_\tau = \rho\beta_z,\quad a_n = \rho\omega^2 = \frac{v^2}{\rho}$$

1.5 方法 5

如图 1-4 所示,$\Delta v_n > 0, \Delta v_\tau > 0, v_\tau > 0, v'_\tau > 0$

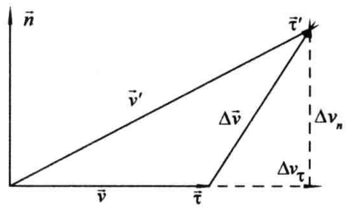

图 1-4

$$\begin{aligned}\vec{a} &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_n}{\Delta t}\vec{n} + \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_\tau}{\Delta t}\vec{\tau} \\ &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v'\cos\Delta\theta - v}{\Delta t}\vec{\tau} + \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v'\sin\Delta\theta}{\Delta t}\vec{n} \\ &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v' - v}{\Delta t}\vec{\tau} + \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v'\Delta\theta}{\Delta t}\vec{n} \\ &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_\tau}{\Delta t}\vec{\tau} + \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v'\Delta\theta}{\Delta t}\vec{n} \\ &= \frac{dv_\tau}{dt}\vec{\tau} + v\frac{d\theta}{dt}\vec{n} = \frac{dv_\tau}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho}\vec{n}\end{aligned}$$

或如图 1-5 所示,$\Delta v_n > 0, \Delta v_\tau < 0, v_\tau > 0, v'_\tau > 0$

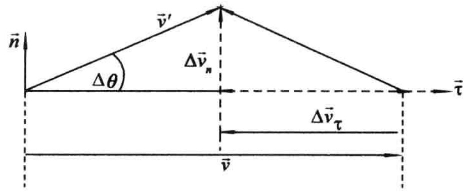

图 1-5

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_n}{\Delta t}\vec{n} + \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_\tau}{\Delta t}(-\vec{\tau})$$