徐恩生 主编

吴颖 罗宏超 孙丽媛 副主编

大学物理学习指导书

清华大学出版社

大学物理学习指导书

徐恩生

—主编—

吴颖 罗宏超 孙丽媛

—副主编—

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》的主要内容，结合许多本课程专任教师的长期教学经验以及近年来大学生的特点编写而成。全书按章节编排，每章包含“基本要求”、“内容提要”、“解题指导”、“自测题”等内容。

本书由浅入深、难度适宜，突出了大学物理学的基本思想，注重分析问题和解决问题基本方法的训练。本书可作为高等学校非物理专业学生的辅导书和自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学习指导书/徐恩生主编. --北京：清华大学出版社，2011.3
ISBN 978-7-302-24770-8

Ⅰ. ①大…　Ⅱ. ①徐…　Ⅲ. ①物理学－高等学校－教学参考资料　Ⅳ. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013602 号

责任编辑：邹开颜
责任校对：赵丽敏
责任印制：李红英
出版发行：清华大学出版社　地　址：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　邮　编：100084
社 总 机：010-62770175　邮　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：北京市清华园胶印厂
经　销：全国新华书店
开　本：140×203　印　张：7.375　字　数：195 千字
版　次：2011 年 3 月第 1 版　印　次：2011 年 8 月第 2 次印刷
印　数：4001～7500
定　价：14.00 元

产品编号：041109-01

编　委　会

主　　编：徐恩生

副主编：吴　颖　罗宏超　孙丽媛

编　　者：王　微　陈识璞　杨俊梅

聂　琴　于文革　谢远亮

曹泽新　徐　丹　王兆阳

鞠丽平　梅　迪　徐世峰

于　飞

前言

FOREWORD

根据国家教育部颁布的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》，参考近年来大学物理教材改革成果结合编者多年教学经验，考虑到近年来大学生的实际水平及我院的特点，我们编写了这本《大学物理学习指导书》供学生学习参考，也会对复习考试有所裨益。

物理学是一门严谨的科学。本书突出了基本概念、基本原理、基本思想和分析问题、解决问题方法的训练。以物理课程为中心，在掌握系统知识的基础上加强对学生能力的培养和科学素质的教育。

学过物理的人都知道，要想真正理解和掌握物理学的知识，不亲自去解答一定数量的习题是不可能的。因此，这样一本结合学习与考试实际的教学参考书就是必不可少的。

这本《大学物理学习指导书》是我们物理教师多年从事大学物理教学的集体智慧的结晶。其主要特点如下：

(1) 每章都简要介绍了该章教学的基本要求、基本内容（包括基本概念、基本定理和定律）。

(2) 每章都选取了一些典型例题给出解题指南，指出解题的基本思路和方法。

(3) 参考了目前很多高校采用的清华等高校制作的“大学物理学试题库”，并根据试题库试题而编写了一定数量类型相似的习题，选题时着重对物理概念的理解，避免过于冷僻的数学方法及繁琐的

数字演算，供学生练习。

（4）内容简洁，习题数量适当，有利于学生学习时抓住重点，便于学生学习。

由于编写的时间紧迫、水平有限，难免有错误和不足之处，欢迎广大师生提出宝贵意见。

编　者

2010.11

目录

CONTENTS

第1章

质点运动学

一、基本要求

1. 掌握位矢、位移、速度、加速度、角速度和角加速度等物理量。

2. 借助直角坐标系计算质点在平面内运动时的速度及加速度。

3. 计算质点作圆周运动时的角速度、角加速度、切向加速度和法向加速度。

二、内容提要

1. 位置矢量：简称位矢，是描述质点位置的物理量。如图 1-1 所示，从坐标原点 O 到质点所在位置 A 的有向线段 $\boldsymbol{r}(\overrightarrow{OA})$ 可表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$$

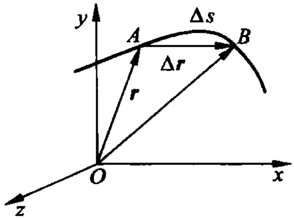

图 1-1

2. 运动方程：质点的位矢 $\boldsymbol{r}$ 或坐标 x、y、z 都是时间 t 的函数，表示为

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \tag{1-1a}$$

或

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \tag{1-1b}$$

3. 位移：描述质点位置变化的物理量，为矢量，表示为

$$\overrightarrow{AB} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A = \Delta\boldsymbol{r}$$

4. 速度：描述质点位移变化快慢的物理量，为矢量。

质点在 t 到 $t+\Delta t$ 时间内，位移为 $\Delta\boldsymbol{r}$，则质点在 t 时刻的速度为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v} &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \\ &= v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-2}$$

其大小

$$|\boldsymbol{v}| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

方向：沿着质点轨道切线，指向质点前进的方向。

5. 加速度：描写质点速度变化快慢的物理量，为矢量。

在直角坐标系中可表示为，

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a} &= \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \\ &= \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k} \\ &= a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-3}$$

其大小

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

在自然坐标系中，加速度可分为切向加速度 $\boldsymbol{a}_t$ 和法向加速度 $\boldsymbol{a}_n$。如图 1-2 所示。

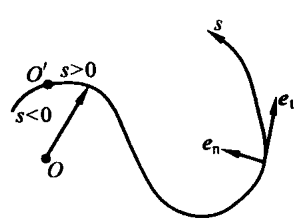

图 1-2

一般曲线运动可采用自然坐标系描述，图 1-2 中，$\boldsymbol{e}_t$ 表示切向单位矢量，$\boldsymbol{e}_n$ 表示法向单位矢量，则有

$$\boldsymbol{a} = a_t\boldsymbol{e}_t + a_n\boldsymbol{e}_n = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_t + \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n$$

其中，$a_t = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$，$a_n = \dfrac{v^2}{\rho}$，$\rho$ 为曲率半径。

6. 圆周运动的描述

角位置 θ：θ 随时间变化的方程

$$\theta = \theta(t)$$

称圆周运动的运动学方程。

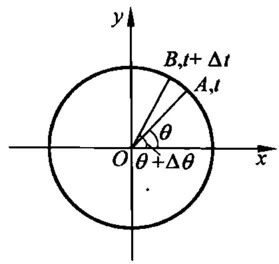

图　1-3

角位移 $\Delta\theta$：质点在 Δt 时间内走过的圆弧 Δs 所对的圆心角。

角速度：$\omega=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\theta}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\dfrac{v}{R}$

角加速度：$\beta=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$

角量与线量：

$$\Delta s = \Delta\theta R$$

$$v = \omega R$$

$$a_t = \beta R = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t},\quad \text{沿切线方向}$$

$$a_n = \omega^2 R = \frac{v^2}{R},\quad \text{指向圆心}$$

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_t + \boldsymbol{a}_n$$

7. 运动叠加原理：任何一个运动都可以看成是几个各自独立运动的叠加。直线运动是最基本的运动。通常把其他曲线运动看成是沿直角坐标系三个轴向相互垂直的直线运动的叠加。

直线运动(一维运动)：

$$x = x(t),\quad v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\quad a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

圆周运动：按运动叠加原理，在自然坐标系中，常常把它分解为切向运动和法向运动。

$$\boldsymbol{r} = -R\boldsymbol{e}_n,\quad \boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = -R\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}_n}{\mathrm{d}t} = R\omega\boldsymbol{e}_t = v\boldsymbol{e}_t$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = a_t\boldsymbol{e}_t + a_n\boldsymbol{e}_n,\quad \text{其中 } a_t = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t},\quad a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$$

三、解题指导

运动学问题基本上可以分为两大类：一是运动方程已知，求质点的速度和加速度等，这类问题可用微分法由前面所述的速度、加速度的定义式求出。二是已知质点的速度或加速度和初始条件（即 $t=0$ 时的位置和速度），求运动方程，这用积分法求解。下面给出求解这类问题的一般公式。

$$\boldsymbol{v}(t) = \boldsymbol{v}_0 + \int_0^t \boldsymbol{a}\mathrm{d}t \begin{cases} v_x(t) = v_{0x} + \int_0^t a_x(t)\mathrm{d}t \\ v_y(t) = v_{0y} + \int_0^t a_y(t)\mathrm{d}t \\ v_z(t) = v_{0z} + \int_0^t a_x(t)\mathrm{d}t \end{cases}$$

$$\boldsymbol{r}(t) = \boldsymbol{r}_0 + \int_0^t \boldsymbol{v}\mathrm{d}t \begin{cases} x(t) = x_0 + \int_0^t v_x(t)\mathrm{d}t \\ y(t) = y_0 + \int_0^t v_y(t)\mathrm{d}t \\ z(t) = z_0 + \int_0^t v_z(t)\mathrm{d}t \end{cases}$$

［**例 1-1**］ 已知 $\boldsymbol{r}(t)=3t\boldsymbol{i}+(5-t^2)\boldsymbol{j}-t^3\boldsymbol{k}$(m)，求(1) $t=3$s 时的速度；(2)1～4s 内的平均速度。

解 (1) $\boldsymbol{v}(t)=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=3\boldsymbol{i}-2t\boldsymbol{j}-3t^2\boldsymbol{k}$

$$\boldsymbol{v}(3)=3\boldsymbol{i}-6\boldsymbol{j}-27\boldsymbol{k}(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$$

(2) $\boldsymbol{r}(4)=12\boldsymbol{i}-11\boldsymbol{j}-64\boldsymbol{k}$

$\boldsymbol{r}(1)=3\boldsymbol{i}+4\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k}$

$$\bar{\boldsymbol{v}}_{1-4}=\frac{\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1}{\Delta t}=\frac{\boldsymbol{r}(4)-\boldsymbol{r}(1)}{4-1}=\frac{9\boldsymbol{i}-15\boldsymbol{j}-63\boldsymbol{k}}{3}$$

$$=3\boldsymbol{i}-5\boldsymbol{j}-21\boldsymbol{k}(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$$

［**例 1-2**］　一质点运动轨迹为抛物线$\begin{cases} x=-t^2 \\ y=-t^4+2t^2 \\ z=0 \end{cases}$，求 $x=-4\text{m}$ 时($t>0$)粒子的速度、速率、加速度。

解　由已知得 $\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}=-t^2\boldsymbol{i}-(t^4-2t^2)\boldsymbol{j}$

把 $x=-4$ 代入得

$$t=2,\quad \boldsymbol{r}=-4\boldsymbol{i}-8\boldsymbol{j}(\text{m})$$

则

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=-2t\boldsymbol{i}-(4t^3-4t)\boldsymbol{j}=-4\boldsymbol{i}-24\boldsymbol{j}(\text{m/s})$$

$$v=\sqrt{4^2+24^2}=4\sqrt{37}(\text{m/s})$$

$$\boldsymbol{a}=-2\boldsymbol{i}-(12t^2-4)\boldsymbol{j}=-2\boldsymbol{i}-44\boldsymbol{j}(\text{m/s})$$

［**例 1-3**］　已知质点运动的加速度为 $\boldsymbol{a}=6\boldsymbol{i}+4\boldsymbol{j}$，$t=0$ 时 $v_0=0$，$\boldsymbol{r}_0=10\boldsymbol{i}$，求任一时刻质点的位置(运动方程)。

解　因为 $\boldsymbol{a}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$，得 $\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{a}\mathrm{d}t$，所以代入已知，$\int_{v_0}^{v}\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\int_0^t\boldsymbol{a}\mathrm{d}t$。

$$\int_0^v\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\int_0^t(6\boldsymbol{i}+4\boldsymbol{j})\mathrm{d}t,\quad 得\ \boldsymbol{v}=6t\boldsymbol{i}+4t\boldsymbol{j}$$

又因为 $\boldsymbol{v}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$，则 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}\mathrm{d}t$，得

$$\int_{r_0}^{r}\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_0^t\boldsymbol{v}\mathrm{d}t，即\ \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\int_0^t(6t\boldsymbol{i}+4t\boldsymbol{j})\mathrm{d}t=(10+3t^2)\boldsymbol{i}+2t^2\boldsymbol{j}$$

四、自测题

1-1　如图 1-4 所示，湖中有一小船，有人在湖边一定高度的岸上以匀速率 v_0 收绳子，小船即向岸边靠拢，小船的运动是［　　］。

(A) 匀加速运动

(B) 匀减速运动

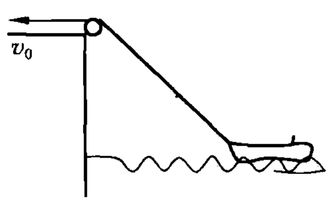

图　1-4

(C) 变加速运动

(D) 变减速运动

(E) 匀速直线运动

1-2 一运动质点在某瞬间位于矢径 $\boldsymbol{r}(x,y)$ 的端点处，其速度大小为[　　]。

(A) $\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$　　(B) $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$

(C) $\frac{\mathrm{d}|\boldsymbol{r}|}{\mathrm{d}t}$　　(D) $\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2}$

1-3 一质点在平面内运动，已知质点位置矢量 $\boldsymbol{r}=at^2\boldsymbol{i}+bt^2\boldsymbol{j}$，其中 a、b 为常量，则质点作________运动。

1-4 质点沿半径 $R=0.4\mathrm{m}$ 作圆周运动，其角位置 $\theta=2+3t^2$(SI)，在 $t=2\mathrm{s}$ 时，它的法向加速度 $a_n=$________，切向加速度$a_t=$________

1-5 一质点在 XOY 平面内运动，其运动方程为 $x=4t$，$y=10-2t^2$，求质点开始运动后，位置矢量与速度矢量恰好垂直的时刻。

1-6 一艘行驶的快艇，速度为 v_0，在发动机关闭后，有一个与它的速度方向相反的加速度，其大小与它的速度平方成正比，$a=-kv^2$，式中 k 为常数。求快艇在关闭发动机后，行驶速度与行驶距离的关系。

1-7 一质点沿 X 轴运动，其加速度 a 与位置坐标 x 的关系为 $a=2x+6x^2$。如果质点在原点处的速度为零，求该质点在任意位置时的速度。

1-8 质点沿半径为 R 的圆周作匀速率运动，每 R 秒转一周，求在 $3R$ 秒的时间间隔内，质点的平均速度和平均速率。

1-9 一质点沿一半径为 2.5m 的圆周运动，其角位置由 $\theta=1.5t^2$(SI)给出，试求：当 $t=0.5\mathrm{s}$ 时，这质点的切向、法向和总加速度。

1-10 一质点在水平面沿半径 $R=2\mathrm{m}$ 的圆轨道转动，转动角速

度 ω 与时间 t 的关系为 $\omega=At^2$（A 为常数）。已知 $t=1\mathrm{s}$ 时，质点的速度大小为 $4\mathrm{m/s}$，求 $t=2\mathrm{s}$ 时质点的速率和加速度的大小。

1-11　一质点从静止出发，沿半径 $R=9\mathrm{m}$ 作圆周运动，切向加速度 $a_t=3\mathrm{m/s^2}$ 保持不变，求其总加速度方向恰与半径成 $45°$ 时所经历的时间。

第2章

质点动力学

一、基本要求

1. 掌握牛顿运动定律及其适用范围，用微积分方法求解一维变力作用下质点动力学的简单问题。

2. 掌握动量定理和动量守恒定律，用其分析、解决质点在平面内运动的有关动量、冲量的简单力学问题。

3. 掌握功的概念，计算直线运动情况下变力的功，理解保守力做功的特点及势能的概念，会计算重力、弹性力和万有引力势能。

4. 掌握动能定理、功能原理和机械能守恒定律，并用它们分析、解决质点在平面内运动的有关功、机械能的简单力学问题。

5. 用质点力学的基本概念、基本规律解决简单系统在平面内运动的综合力学问题。

二、内容提要

1. 基本概念

(1) 质量：物体惯性大小的量度。

(2) 力：物体间的相互作用。

按力的性质不同分为弹性力、摩擦力、万有引力、静电力等；按研究问题的范围不同可分为内力和外力。

内力：系统内各物体间的相互作用力。

外力：系统外物体对系统内物体的作用力。

内力又分保守力和非保守力。

保守力：做功与路径无关，只与始末位置有关。即

$$\oint_L \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = 0$$

如万有引力（包括重力）、弹性力、静电力等。

非保守力：如摩擦力、爆炸力等。

（3）动量：描述物体运动状态的物理量，为矢量，表示为

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$$

（4）冲量：力在时间上的积累，为矢量，表示为

$$\boldsymbol{I} = \int_0^t \boldsymbol{F}\mathrm{d}t$$

（5）功：力在空间距离上的积累，为标量，表示为

$$W = \int_a^b \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \int_a^b F\cos\alpha\mathrm{d}s$$

（6）能量：物体具有做功的本领称为具有能量，简称能，能量是标量。

动能：物体由于运动所具有的能量，$E_k = \frac{1}{2}mv^2$。

势能：物体由于处在某一位置或某种状态所具有的能量，属于系统。势能具有相对性，即选定势能零点后，才有确定量值：

$$E_p = W = \int_a^{\text{势能零点}} \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r}$$

其中重力势能：mgh，h 是物体相对于重力势能零点的高度；弹性势能：$\frac{1}{2}kx^2$，x 是弹簧的伸缩量；万有引力势能：$-\frac{GMm}{r}$，取 M 与 m 相距无穷远时为势能零点。

动能和势能统称为机械能。

2. 基本规律

（1）牛顿运动定律：它是动力学的基本规律。

第一定律：任何一个物体都将保持其静止或匀速直线运动状

态，直到外力迫使它改变这种状态。

第一定律给出了一个没有加速度的参照系——惯性参照系。

第二定律：
$$\boldsymbol{F}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}$$

若质量一定，则
$$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$$

第三定律：物体 A 若以外力 $\boldsymbol{F}_1$ 作用于物体 B，则物体 B 必同时以力 $\boldsymbol{F}_2$ 作用于物体 A，$\boldsymbol{F}_1$ 与 $\boldsymbol{F}_2$ 的大小相等，方向相反，沿着同一直线，即 $\boldsymbol{F}_1=-\boldsymbol{F}_2$。

第二定律、第三定律只对惯性系成立。

(2) 动量定理：物体所受合力的冲量等于物体动量的增量，即

$$\boldsymbol{I}=\int_{t_1}^{t_2}\boldsymbol{F}\mathrm{d}t=m\boldsymbol{v}_2-m\boldsymbol{v}_1$$

其中 $\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$ 分别为物体在 t_1 时刻和 t_2 时刻的速度。

(3) 动量守恒定律：当系统不受外力或所受合外力为零时，该系统的总动量保持不变。

注意：当合外力在某一方向上的分量为零时，系统的总动量在此方向上的分量保持不变。

(4) 动能定理：物体所受合力的功，等于物体动能的增加量，即

$$W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

(5) 功能原理：一切外力与非保守内力对物体系统所做的功，等于该物体系统机械能的增量，即

$$W_{外力}+W_{非保守力}=(E_\mathrm{k}+E_\mathrm{p})-(E_{\mathrm{k}0}+E_{\mathrm{p}0})$$

(6) 机械能守恒：一切外力与非保守内力对物体系统不做功时，该物体系统的机械能保持不变。

三、解题指导

动力学问题大体可分为三类，相应地有三种解题方法。

第一类是只与作用力、加速度、质量有关的问题，通常给的条件