物理竞赛丛书

物理竞赛丛书

物理竞赛专题讲座

物理竞赛专题讲座

游佩林主编

西南交通大学出版社

版社

物理竞赛丛书

物理竞赛专题讲座

游佩林　　龙　达
唐士军　　苏成悦　编

西南交通大学出版社

内 容 简 介

本书是系统讲述物理竞赛知识和方法的指导书。内容分力学、热学、电学、磁学、光学中典型问题与处理方法，竞赛题中的数学方法，竞赛口试题分析等专题。它基本上包括了历届全国中学物理竞赛中所用到的基本知识和技巧。

本书针对物理竞赛的特点，对基本概念与基本规律作了较深入的论述，突出灵活运用与典型方法的归纳，对于如何引导和培养学生运用数学方法解决物理问题也给予了较多的介绍。全书各专题均采用典型示范，逐步深化的方法，取材面向中学，兼顾大学，有助于读者思维能力的提高。

本书是高中学生和中学教师很实用的参考书，也可供大学生和从事大学物理教育的同志选用。

物理竞赛专题讲座

主　编　游德林

责任编辑　周一凡

西南交通大学出版社出版

四川省新华书店发行

长沙铁道学院印刷厂印刷

开本：787×1092　1/32　印张：7　字数：163,000

1988年8月第1版　1988年8月第1次印刷

书号：ISBN　7—81022—064—0/0012

印数：1—10,000　定价：1.85元

前　言

从1984年开始，我国每年举办一届全国中学生物理竞赛。从已经举办的几届来看，这一活动受到各界普遍好评并特别为高等学校所关注，几乎所有在竞赛中取得优秀成绩的学生都被重点院校破格录取。特别是从1986年起，我国由竞赛后选拔出优秀学生组成代表队，参加国际物理奥林匹克竞赛取得了较好的成绩，更给广大中学师生极大的鼓舞。

竞赛题着重考查灵活运用和独立思考的能力，题目具有一定的难度，内容无论从深度和广度都比中学大纲的要求高。因此，为了有助于学生能力的培养，开拓眼界，以适应物理竞赛的需要，开设适当的讲座是有必要的，这就是编写本书的目的。由于除了数学方法外，中学物理与大学物理内容有许多相同之处，因此，本书取材范围比较广泛，很多题取自大学物理竞赛题和研究生入学试题，所以，本书也可供大学生及从事大学物理教育的同志参考。

本书是物理竞赛丛书之一，由游佩林副教授主编。参加编写的有龙达(热学)、唐士军（静力学）、苏成悦（光学）等同志。游佩林同志编写了七讲并对其余三讲作了修改和补充。由于目前国内尚未有专门探讨物理竞赛辅导与训练的专著，因此，本书的出版尚属一种尝试，目的是抛砖引玉。我们希望它不但能有助于同学们课外学习，而且能促进国内物理教育界的交流。由于时间仓促，编者水平有限，书中错误与不当之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

1988年6月于长沙铁道学院

目　录

一　认识牛顿定律　提高解题能力

一、例题分析

先分析一道全国物理竞赛决赛试题。

如图1—1所示，一质量均匀分布的细圆环，其半径为 R，质量为m。令此环均匀带正电，总电量为Q。现将此环平放在绝缘的光滑水平桌面上，并处于磁感应强度为B的均匀磁场中，磁场方向竖直向下。当此环绕通过其中心的竖直轴以匀角速度ω沿图示方向旋转时，若不计电荷之间相互作用，问环中的张力等于多少？（第一届物理竞赛决赛试题）

分析

此题难度中等，满分为20分。但是得分低于 7 分的占73%，高于15分的占17%，基本做对的仅占20%。这道题涉及到牛顿定律，圆周运动，安培力，力的合成等内容。这些内容在学校里大都反复训练过。解答本题的关键是要会从圆环上隔离出一小段圆弧来分析受力情况，列出运动方程。但是不少同学把整个圆环当作一个质点处理并套用质点圆周运动公式。其次，不少同学没有考虑圆环转动时，由于圆环有质量，因而作圆周运动需要有向心力，错误的套载流直导线受到的安培力公式，认为安培力与环中的张力平衡。这样做错上加错，但占的比例很大（约有43%）。这说明有相当一部分同学对牛顿定律并没有

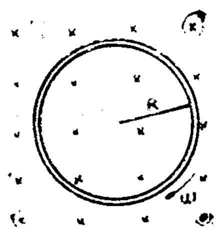

图1-1

真正认识，应用牛顿定律解题的方法也没有真正掌握。

正确解法

设环中的张力为T，因为张力是内力，必须从圆环上隔离一段来作为研究对象，从而把内力转化为外力，才能代入牛顿定律中求解。又由于圆环作圆周运动，圆周上各点的加速度不一样(即方向不同)，因而所隔离的一段只能是很小的一个元段。这小段圆弧所受张力的合力为T'，磁场对它的作用力f向外。若用Δm表示这个小段的质量，则由牛顿第二定律

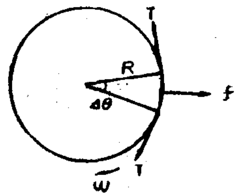

图1-2

$$T' - f = \Delta m \cdot R\omega^2$$

因为$\Delta\theta$很小

$$T' = 2T\sin\frac{\Delta\theta}{2} \approx 2T\cdot\frac{\Delta\theta}{2} = T\Delta\theta$$

$$f = \frac{\theta}{2\pi R}\cdot R\Delta\theta\cdot R\omega\cdot B = \frac{1}{2\pi}QR\omega B\Delta\theta$$

$$\Delta m = \frac{m}{2\pi R}\cdot R\Delta\theta = \frac{\Delta\theta}{2\pi}m$$

代入前式

$$T\Delta\theta - \frac{1}{2\pi}QR\omega B\Delta\theta = \frac{1}{2\pi}mR\omega^2\Delta\theta$$

$$\therefore T = \frac{R\omega}{2\pi}[QB + m\omega]$$

二、认识牛顿定律

牛顿（1642—1727）在分析总结了伽利略、开普勒等前人

已经做过的理论和实验工作的基础上，发展了一种严谨而普遍的理论，这一理论的核心是，**任何物体的运动状态变化都归结为它受周围环境力的作用的结果**。由此他创立了经典力学，这是科学史上的一个里程碑。在牛顿时代以前，行星之类物体的运动始终是一个谜，但在牛顿以后，一切都迎刃而解。单摆的运动，与弹簧相连的物体的运动，不论是天上的行星还是地球上的宏观物体，在低速的条件下（比如小于光速的十分之一）都可以用经典力学定律圆满地加以解决。

牛顿的三条运动定律可陈述如下

牛顿第一定律："每一物体都保持它的静止状态或沿一直线的匀速运动状态，除非它受到作用力而被迫改变这种状态"。

牛顿第二定律："物体加速度的大小与物体所受合外力的大小成正比，与物体质量成反比，加速度的方向与合外力的方向相同"。

牛顿第三定律："只要有两个物体A和B相互作用，则物体B作用在A上的力与A作用在B上的力总是大小相等而方向相反，并且作用在同一条直线上"。这样一对力常常称为作用力与反作用力。

牛顿定律只适用于惯性系，这是我们必须注意的。伽利略是根据不受任何力作用的物体具有恒定的速度来定义惯性系的。但是判断物体有没有加速度（即是否具有恒定的速度）又必须先要有一个惯性系，这样就陷入逻辑循环。通常作这样的处理：远离其他一切物体的物体可以认为不受任何外力作用而看作是惯性系。因此第一定律的近代陈述是："远离一切物体的孤立物体必以恒定速度运动"。

牛顿定律的核心可以用公式表为

$$\sum\vec{F}=m\vec{a}$$

这是反映质点的瞬时作用规律的矢量方程。这句话有三个要点，下面解题方法中的“分单元”，“取状态”，“定坐标”就是与它紧密相连的。深刻理解这三个要点是非常重要的。

加速度是联系运动学与动力学的桥梁，这个矢量特别重要。我们除了将它按直角坐标分解外，在曲线运动中常常将它沿轨道的切线方向和法线方向分解(见图1-3)，分别称切向加速度a_t和法向加速度a_n（即向心加速度）。因为在轨道的不同地方，切向单位矢量与法向单位矢量的方向都是变化的，好象随轨道形状自然形成，通常称之为**自然坐标**。a_t反映质点速度数值的变化，而a_n反映速度方向的变化，在匀速圆周运动中，$a_n=\frac{v^2}{R}$而$a_t=0$。

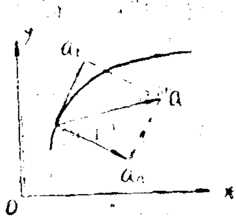

图1-3

应用牛顿定律求解力学问题，已经形成比较系统而完整的方法。为了尽快地熟悉这种方法，养成严谨而有条理的思维习惯，现将求解力学问题一般方法的要点归纳如下：

1.选取研究对象，将其隔离

这一步简称**分单元**。因为牛顿第二定律中的$\sum\vec{F}$是指物体所受的合外力，而外力和内力的划分是相对的，是根据研究对象而定的。例如，在图1-4中的阿特武德机，如果要求出T_1，则因为$T_1=2T$，必须求绳子张力T。若将物体A和B一起作为研究对象，则张力是内力，牛顿定律是无能为力的。所以要求出张力T必须将物体A和B分别隔离。这时，对每个研究对象，T都是外力，因此可以求解。这正是牛顿定律能用于分析质点组力学问题的关键，它具有普遍意

义。通常称之为隔离法。

2.取状态，分析受力

分析物体受力的原则是不漏不添。注意掌握除引力之类场力外，只有在相互接触处才存在作用力。把握住这一条往往会提供极大的方便。初学者在分析时，可按先重力、后弹力、最后分析摩擦力的顺序，做到有条不紊，避免遗漏。

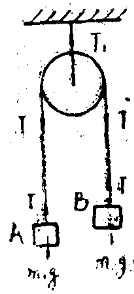

图1-4

因为牛顿定律是力的瞬时作用规律，在通常情况下，不同的运动状态作用力不同，加速度也不同。所以，进行力的分析时，绝对不能只取某个特定的位置去分析，而应该取任一状态。这实际上相当于引入一个参量（见例2），这就是取状态的含义。

3.定坐标，建立方程

牛顿第二定律是矢量方程，为了便于求解，必须先化成分量方程，因此，要选定坐标系，并将所有的力沿坐标轴分解。坐标系选择的原则是使坐标轴与加速度方向平行或垂直，因而，从运动状态分析中首先找出加速度方向是很重要的。若已知质点作圆周运动，往往就选用自然坐标。如果方程数目不够，则通常从运动学和几何关系列出补充方程

4.解方程，再对结果作讨论

解方程，一般先进行文字运算，然后再以具体数值代入。运算中应注意统一单位。在方程解出结果后，通常还要进行讨论，特别是在有摩擦存在而摩擦力的方向事先并不十分确定时更有必要。

以上步骤归纳口诀如下：

分单元　取状态　定坐标　列方程　作讨论

例题分析

动力学的典型问题可以归纳为以下两类

第一类问题，已知作用在物体上的力，求物体的加速度并进而确定该物体的运动情况。

第二类问题，已知物体的运动情况，求作用在物体上的作用力。

例1 尖劈A的质量为m_1，倾角为θ，此尖劈的一面靠在光滑的墙上，另一面与质量为m_2的光滑棱柱B接触，B可沿光滑水平面滑动，求尖劈A和棱柱B的加速度。

解 分别取A、B为研究对象，并看作质点，作受力分析，取坐标轴如图1-5所示。

由牛顿第二定律

对A：$m_1 g - N\sin\theta = m_1 a_1$　　（1）

对B：$N\cos\theta = m_2 a_2$　　（2）

两个方程，但有三个未知量，由两者几何关系找补充方程。因A和B在加速运动中不脱离接触，由图可知，A沿y轴位移Δy与B沿x轴位移Δx满足

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \mathrm{tg}\theta$$

同理，两者加速度也应满足这个几何关系

$$\frac{a_2}{a_1} = \mathrm{tg}\theta \qquad (3)$$

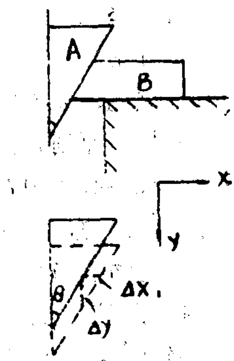

图1-5

联立求解

$$a_1 = \frac{m_1 g}{m_1 + m_2 \mathrm{tg}^2\theta} \qquad a_2 = \frac{m_1 g \mathrm{tg}\theta}{m_1 + m_2 \mathrm{tg}^2\theta}$$

例2 飞机在竖直平面内以速率v作匀速圆周运动，圆的半径为R，飞行员的质量为m，求飞行过程中飞行员给座椅的作用力。

解 这属于第二类问题。要求座椅所受的力，如以座椅为研究对象，则因它的质量未知，比较困难。我们可以求其反作用力，即座椅给飞行员的力。因此，以飞行员为研究对象。

要分析受力，必须先取定位置。因整个飞行过程中各处受力不同，所以我们不能只取某些特定位置（比如最高点或最低点），而应该取任一状态。因此，引入参量θ（这也相当于一种坐标），表示飞行员p的位置。如图1-6所示。

飞行员受重力mg和座椅作用力N。重力向下，N的方向如何呢？是不是指向圆心？因为飞行员作匀速圆运动，加速度是指向圆心的，所以合力也向心，故N的指向不能指向圆心，应与mg分居法线两侧，用φ表示。

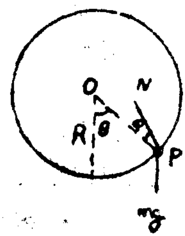

图1-6

采用自然坐标，取法向和切向分量方程

$$N\cos\varphi - mg\cos\theta = m\frac{v^2}{R} \qquad (1)$$

$$N\sin\varphi - mg\sin\theta = 0 \qquad (2)$$

消φ

$$N = \sqrt{m^2g^2 + 2m^2\frac{v^2}{R}g\cos\theta + m^2\frac{v^4}{R^2}}$$

消N

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}\frac{g\sin\theta}{g\cos\theta + v^2/R}$$

讨论 作用力N的大小和方向均随质点位置θ而变，飞行员给座椅的作用力N'与N大小相等，方向相反。

三、约束问题

为了使应用牛顿定律解题能力有一个大幅度的提高，在力学教学中，有两点是必须着重讨论的，这就是约束与坐标。

1.约束与约束反力

取一根伸长可忽略不计的细绳，悬一质点于下端，就成为单摆。单摆的质点运动被限制在以悬点为中心，绳长为半径的圆弧上。（图1-7）

将一质点放在一楔形木块的斜面上，则质点的运动就被斜面所限制。

一般地讲，如果一个质点被限制在某曲面或曲线上运动，就称质点受到运动学的约束，该曲面或曲线就称为约束。约束如不随时间改变，则称为稳定约束。否则，就称为不稳定约束。

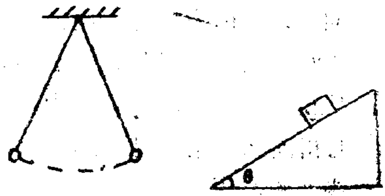

图1-7

约束一定来源于某个物体。为了考察约束对质点的作用，可以先假设约束不存在，于是质点的运动就没有限制。这说明，在存在约束时质点本来就有脱离约束的趋势，但是质点试图脱离约束时，就会迫使构成约束的物体发生形变，这就引起一种弹性力，正是这种弹性力阻止质点脱离它。因为这个力来

源于质点对约束的作用并使约束变形才产生的，所以，力学书上将它称为约束对质点的反作用力，或简称约束反力。比如单摆情况，由于质点m受重力作用本来会自由下落，但由于受细绳的约束不能下落，质点对绳的作用为使绳发生形变而伸长，绳子由于伸长产生弹性力作用在质点上，这个弹性力（这时称为张力）就是约束反力。在大多数情况下（除弹簧外），由于体现约束的物体比较坚硬，变形极小。因此，为简单起见，一方面将约束看作是不变的刚性物体，同时又用约束反力这种弹性力来说明质点被限制在约束上。比如，在单摆例子中，认为绳子不可伸长但产生张力；在斜面例子中，认为斜面没有变形但产生支承力，这种约束反力作用在位于斜面上的物体上。

2.约束反力的求解

因为约束反力是阻止质点脱离约束的，因此，它应该沿着约束的法线方向。如果约束与质点之间是光滑的，则约束仅仅给予质点法向的约束反力。如果约束与质点之间是粗糙的，则约束除了给予法向的约束反力外，还给予质点以摩擦力。摩擦力指向与质点相对约束的运动方向相反，因而在切线方向上。

在对研究对象作受力分析中，可以将力分为两类：一类是重力和库仑力等，它们的大小和方向不受其他力和物体运动状态的影响，通常称为主动力。但是约束反力不同，它的大小和方向要由主动力（这常常是重力）和物体运动状态决定，因此又称为被动力。比如，绳子下面悬挂一重物，当重物处于静止、加速上升、加速下降或作圆运动等几种不同的运动状态时，绳子对重物的约束反力（即张力）是不同的。不能认为绳子的张力一定等于mg。同样，斜面的支承力也不一定等于$mg\cos\theta$，摩擦力也不一定等于μmg等。

在具体问题中，约束反力的大小及其变动情况往往不能预

先知道。需要根据“质点的运动限制在约束上”这一条件从运动方程式中求解。这个基本方法下面通过例题来说明。

例3 如图1-8所示，质量为M的斜面，倾角为θ，放在光滑水平面上。斜面上放有质量为m的物体，斜面是光滑的，当物体m下滑时，求M对m的正压力？

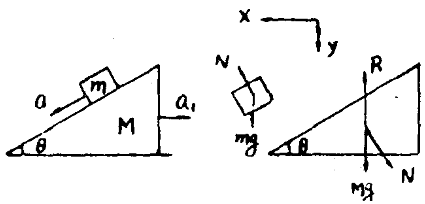

图1-8

解 以地面为参照系，取坐标如图（本题有多种解法，下面采用惯性系求解）。设M的加速度为a_1，m相对于M的加速度的两个分量分别为a_x和a_y。

$$mg - N\cos\theta = ma_y \tag{1}$$

$$N\sin\theta = m(a_x - a_1) \tag{2}$$

$$-N\sin\theta = -Ma_1 \tag{3}$$

因m相对于M的加速度始终沿斜面方向，可得补充方程：

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{a_y}{a_x}$$

联立求解

$$N = \frac{Mmg\cos\theta}{M + m\sin^2\theta}$$

讨论 注意：$N \neq mg\cos\theta$，因为相对于地面参照系，在垂直斜面方向，物体加速度不为0。本题还可求出M对地的加

速度a_1与m对地加速度a_{2x}与a_{2y}

$$a_1=\frac{mg\cos\theta\sin\theta}{M+m\sin^2\theta}$$

$$a_{2x}=a_x-a_1=\frac{Mg\sin\theta\cos\theta}{M+m\sin^2\theta}\qquad a_{2y}=a_y=\frac{(M+m)g\sin^2\theta}{M+m\sin^2\theta}$$

m相对于M的加速度$a=\dfrac{(M+m)\sin\theta}{M+m\sin^2\theta}g$

3.采用自然坐标的求解方法

因为约束反力在约束（曲面或曲线）的法向，而摩擦力如果存在，它在切线方向。因此，在研究质点有约束运动时（特别是知道质点作圆周运动时），通常采用自然坐标系，分别列出切向与法向运动方程。因为求解的问题绝大部分是平面曲线运动，切向和法向方程分别为

$$F_t=ma_t\qquad F_n=m\frac{v^2}{R}$$

其中$a_t=\dfrac{dv}{dt}$是质点速率对时间的变化率。在无摩擦力的情况（即光滑约束），切向方程对坐标积分就得到机械能守恒方程。所以，对于无摩擦的约束情况，求解约束反力的一般方法是：

“由机械能守恒方程求出v等有关量，代入到法向方程$F_n=ma_n$中，即可解出约束反力。”

例4 一质量为m的小球与一长为L的细绳组成一单摆，现将此单摆从与竖直线成α角的位置静止释放，在摆动的途中，摆绳为一小木桩所阻，木桩与摆的悬挂点相距r，两者连线与竖直线成β角，如图1-9所示。

（1）求摆绳为小木桩所阻后，绳子张力表达式。

（2）小球在继续上升过程中，若摆绳发生弯曲，求此情况

下，r、L、β、α之间的关系式。

解 这也是一道全国物理竞赛试题，解题方法分析如下：

以悬挂点为重力势能零点，机械能守恒方程为

$$-mgL\cos\alpha = -mg[r\cos\beta + (L-r)\cos\theta] + \frac{1}{2}mv^2$$

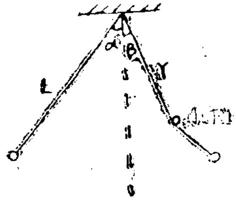

图1-9

为求约束反力T，法向方程为

$$T - mg\cos\theta = m\frac{v^2}{L-r}$$

式中θ为摆绳与竖直向下方向的夹角，联立求解消去v，得

$$T = 3mg\cos\theta + \frac{2mg}{L-r}(r\cos\beta - L\cos\alpha)$$

若摆绳发生弯曲，则约束解除$T=0$，由此条件

$$\cos\theta = -\frac{2(r\cos\beta - L\cos\alpha)}{3(L-r)}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left[\frac{-2(r\cos\beta - L\cos\alpha)}{3(L-r)}\right]$$

由于只当$\frac{\pi}{2}<\theta<\pi$时绳才会弯曲，故有$-1<\cos\theta<0$

$$-1<-\frac{2(r\cos\beta - L\cos\alpha)}{3(L-r)}<0$$

由此得r、L、β、α间应满足的条件为

$$0<(r\cos\beta - L\cos\alpha)<\frac{3}{2}(L-r)$$

4. 约束解除的可能性