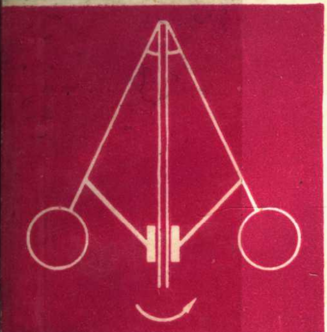
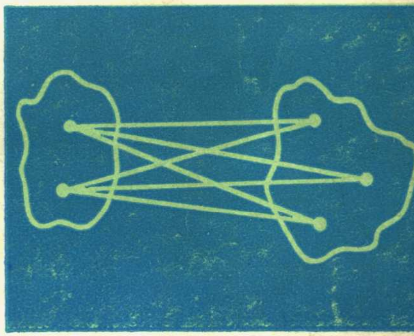
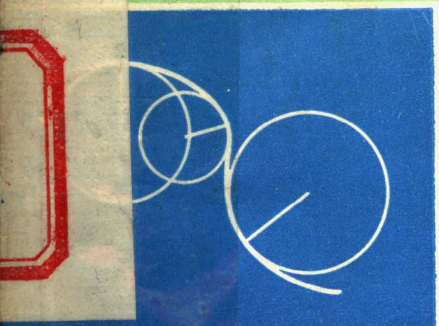
高中物理教学参考读物



曲线运动 万有引力

上海教育出版社





上海市物理学会中学物理教学研究委员会编

高中物理教学参考读物

曲线运动　万有引力

上 海 市 物 理 学 会
中学物理教学研究委员会编

上 海 教 育 出 版 社

高中物理教学参考读物

曲线运动　万有引力

上　海　市　物　理　学　会

中学物理教学研究委员会编

上海教育出版社出版

（上 海 永 福 路 123号）

新华书店上海发行所发行　上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092　1/32　印张 4　字数 83,000

1957 年 5 月新知识第 1 版

1959 年 4 月新 1 版　1962 年 12 月新 2 版

1981 年 10 月新 3 版　1981 年 10 月第 13 次印刷

印数 359,531—409,530 本

统一书号：7150·490　　定价：0.35 元

修订版前言

上海市物理学会中学物理教学研究委员会从1956年开始所主编的一套《高中物理教学参考读物》共14册，先后经过四年的时间，到1959年陆续出齐。编写目的是以当时的《中学物理教学大纲》为依据、结合中学物理教学的需要，帮助教师更好地掌握教材，以提高教学质量。问世以来，颇得读者的支持和关怀。在文化大革命前曾多次重印，其中有几本印数多达数十万册。其间也曾根据读者所提意见作过修订和适当补充，重新排版出了几次修订本。粉碎“四人帮”后，为了满足广大师生对物理参考书的需求，又重印了一次。但物理科学近年来发展较快，它在社会主义建设和实现“四化”的过程中起着重要的作用，为了适应这些要求，原书不足之处很多，须作进一步的修订。为此，我们在维持原书面目不过多改变和原篇幅不过多扩大的前提下，根据教育部最近颁布的《全日制十年制学校中学物理教学大纲》(试行草案）和当前中学物理的教学情况，在内容上适当加深加广；处理教材的方法上力求新颖，以供教师备课时参考，并对学有余力的同学提供课外补充读物，加深理论和扩大知识面。单位制以SI制为主，如有必要亦适当介绍其他单位制。适当更新插图内容，增补一些有参考价值的例、习题。删去比较陈旧烦琐的内容，努力做到取材精练新颖，争取能够反映我们国家的新成就。

本书原由束世杰、江浩、杨逢挺等同志编写，并吸取了朱章、朱鸿鹗、孙钟道等同志的意见。现参加修改的同志为束世杰、杨超。由于我们对中学物理的教学经验不足，又是在匆忙中完稿，疏忽和错误不妥之处在所难免，请读者随时予以指正。

目　录

第 1 章

曲线运动

在《运动学》分册中我们讨论过匀速直线运动和匀加速直线运动。前者是加速度为零的运动，后者是加速度不变的运动。如果加速度的方向和物体运动的方向相同，即加速度方向和速度方向夹角为零，则加速度的量值取正；反之，如果加速度方向和速度方向相反，即它们之间的夹角为 π 弧度，则加速度的量值取负，这实际上是一种减速运动。现在我们要进一步讨论加速度的方向与速度的方向成一般角度的运动，这时，运动的轨迹不再是一条直线，而是一条曲线，这类运动就叫做曲线运动。如圆周运动就是一种曲线运动。我们也可以把直线运动看作是曲线运动的一种特殊情况，因为直线可以看作是曲率半径为无穷大的曲线，所以曲线运动包括了一般运动。我们在本册中所要讨论的是限于在同一平面上的曲线运动。

在讨论曲线运动的各种现象中，我们要应用牛顿运动定律、力的平衡和功能原理等基础知识。通过曲线运动的学习，我们希望对于力学的一些理论知识能获得进一步的理解。

直线运动与圆周运动是曲线运动中的两种特殊情况，又是曲线运动中两种最简单和最基本的形式。关于直线运动，我们在以前已经讨论过，这里不再重复。本册我们要着重介绍有关圆周运动的一些基本规律和它的应用。圆周运动之所以是基本的，一方面是因为了解圆周运动以后，就可以懂得对一般的曲线运动应该怎样进行分析；另一方面，转动体上的各质点都在绕轴作圆周运动，因此研究圆周运动也是研究物体转动的基础。对于圆周运动，我们分运动学与动力学两方面加以讨论，希望读者对这种运动能了解得透彻一些。

抛体运动是日常接触到的一种曲线运动，所以我们也要作比较深入的讨论。

在圆周运动中关于向心力和离心力的问题，一般初学者是感到难于理解和掌握的。常有这样的错误看法，认为向心力与离心力大小相等，方向相反而互相抵消，因此作圆周运动的物体处于平衡状态；也有这样的误解，认为汽车的车轮所以向外飞溅泥水，是由于离心力作用的缘故。有的人问：作匀速圆周运动的物体快慢不改变，那末为什么有加速度存在？为了要明确这些现象的根本原因，我们在这本小册子里，要用较多的篇幅来讨论这些问题。在本书中也提到了惯性离心力的概念，目的是为了把惯性离心力和离心力作一对比，希望对离心力能理解得深刻一些。但对惯性离心力只作简单的介绍，而不作深入的研讨。

下面我们从运动学和动力学两个方面来讨论圆周运动。

一、圆周运动速度的方向

如果质点运动的轨迹是圆周，那末这种运动叫做圆周运

动。如果质点沿圆周运动时速度的大小不改变，即在任何相等时间内运动质点所通过的圆弧长度都相等，那末这种运动叫做**匀速圆周运动**。作匀速圆周运动的质点，虽然它的速度的大小不变，但是方向是不是在改变呢？要回答这一问题，我们先要了解，质点经过圆周上任何一点时它的速度方向到底是怎样的。

在一光滑水平桌面的中央，钉一只钉子，钉子上接一条线，线的另一端拴一小球。先把线拉直，然后在直线的垂直方向对球施一冲量，使球得到一个水平速度。那末小球就以线长为半径而绕钉子作圆周运动。当小球经过 A 点时(图 1-1)，如果线忽然中断，由实验的结果知道，小球是沿该点的切线方向飞出而作直线运动。这条直线的方向表示小球在 A 点时运动速度的方向。我们知道，如果物体不受外力作用，则根据牛顿第一运动定律，物体必定作匀速直线运动。小球所以被迫作圆周运动，是因为有线的拉力的作用；在线断后，拉力就不存在，小球便沿切线方向飞去。由此可以说明，小球过 A 点时，速度的方向是沿该点的切线方向。圆周上各点的切线方向是不同的，所以匀速圆周运动的速度方向是不断改变的。

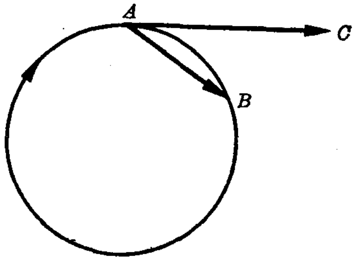


图 1-1

以上是根据实验确定质点沿圆周运动各点速度的方向，现在根据理论再作进一步的说明。

当小球由 A 点沿圆周运动到 B 点的时候，经过的路程是

$\widehat{AB}$，而经过的位移是 $\overrightarrow{AB}$。设经过的时间间隔 Δt 很短，则 AB 弧长就非常接近 AB 弦长，根据速度的定义，小球从 A 到 B 的平均速度为

$$\vec{v} \approx \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t} \tag{1}$$

位移 $\overrightarrow{AB}$ 是矢量，所以平均速度 $\vec{v}$ 也是矢量，平均速度的方向就是位移的方向。如果我们所考虑的一点 B 沿圆弧逐渐向 A 点移近，那末位移和平均速度的方向都在那里不断改变，当 B 无限接近 A 而以 A 为极限时，则 AB 弦便与 AB 弧重合，这时的平均速度就是 A 点的即时速度。而无限短的圆弧的方向就是该点的圆的切线方向，所以 A 点的即时速度的方向就是过 A 点的圆的切线方向。

二、匀速圆周运动的向心加速度

常有人这样误解，认为当质点作匀速圆周运动时，它的快慢既然不改变，那就不应该有加速度存在。我们认为，这种错误的根源主要是对速度是矢量、它有方向性还不够了解的缘故。在决定匀速圆周运动加速度的大小和方向以前，先要使读者理解这种运动确实有加速度存在，为此可先提出如下几个问题：

(1) 矢量的意义是什么？矢量怎样合成？

应该回答：有些物理量不仅有大小，并且有方向，这类物理量叫做矢量①。矢量的合成必须用平行四边形法则。

---

① 严格地讲，有大小和方向的量不一定是矢量。一个量是不是矢量，还要看它是不是遵守平行四边形的合成法则。如电流不仅有大小，而且有方向，但是它不遵守平行四边形的合成法则，所以电流不是矢量。

(2) 速度是不是矢量?

应该回答:速度既有大小,又有方向,而且速度合成时符合平行四边形法则,所以它是矢量。

(3) 当质点作匀速圆周运动时,它的速度是不是在改变?

应该回答:速度的大小虽不改变,但是它的方向在不断地改变,所以速度也在不断地改变。

(4) 加速度的意义是什么?既然质点的速度不断改变,那末是否有加速度存在?

应该回答:速度的变化跟发生这变化所用时间的比就是加速度,既然质点的速度在不断变化,所以一定有加速度存在。

通过以上的问答,对作匀速圆周运动的质点存在加速度这一点,至少有了一个定性的了解。所以就可以进一步来决定加速度的大小和方向。

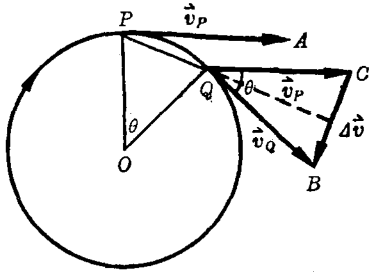


图 1-2

设一质点绕 O 作匀速圆周运动(图 1-2)。当它经过 P 点时速度为 $\vec{v}_P$,以线段 PA 表示。过 Q 点作 QC 平行而且等于 PA,则 $\overrightarrow{QC}$ 也代表 $\vec{v}_P$,表示自 P 点到 Q 点时如果速度不变所应有的大小和方向。但经过 Q 点时的速度实际上已不是 $\vec{v}_P$ 而是 $\vec{v}_Q$,以 QB 表示。质点由 P 到 Q,速度的大小虽然不变,但方向却变了。现在我们要问,速度到底怎样变化?关于这一问题,我们必须复习以前所讨论过的矢量合成法。

设有一只船在流动的水中,水流向东,速度为 $\vec{v}_1$(图1-3),

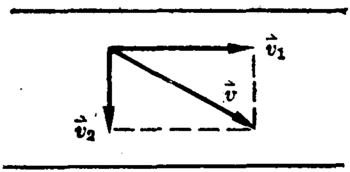


图 1-3

如果船随波逐流，则船速也为$\vec{v}_1$。如果船自北向南划去的速度为$\vec{v}_2$，根据矢量的合成法，此时船的合速度是$\vec{v}$。船的速度所以能从$\vec{v}_1$变为$\vec{v}$，是由于在$\vec{v}_1$上另加一速度$\vec{v}_2$的缘故。

同理，如图 1-2 所示，$\vec{v}_P$所以能变成$\vec{v}_Q$，是由于在$\vec{v}_P$上另加一速度$\Delta\vec{v}$的缘故。$\Delta\vec{v}$是代表由P到Q经Δt时间所增加的速度。但必须注意，$\Delta\vec{v}$ **并不是加速度，因为加速度是指单位时间内速度的变化**。同时还得注意，速度变化$\Delta\vec{v}$不是速度大小的改变，而是速度方向的改变。

质点由P运动到Q的平均加速度设为$\vec{a}$，则

$$\vec{a}=\frac{\overrightarrow{\Delta v}}{\Delta t} \tag{2}$$

因QC垂直于OP，QB垂直于OQ，故$\angle BQC=\angle POQ=\theta$。

又因速度大小不变，一直是v，故$QB=QC=v$，$OP=OQ=r$（圆半径），故三角形BQC与三角形QOP相似。

$$\frac{\Delta v}{v}=\frac{PQ}{r}, \qquad \Delta v=\frac{v}{r}\cdot PQ,$$

$$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v}{r}\cdot\frac{PQ}{\Delta t} \tag{3}$$

如果Q点趋近于P点而以P为极限，Δt也趋近于零而以零为极限，则

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v}{\Delta t}=a_P \tag{4}$$

当Δt趋近于零的时候，Δv也趋近于零，因此分子分母都

是无限小。但是无限小与无限小仍可比较，它的商可以从零一直到无限大，在上述圆周运动的实例中，则为一确定的常数，这常数依速度的大小和半径的长度而定。

a_P 即质点经过 P 点时的即时加速度。将(3)式代入(4)式，因 $\frac{v}{r}$ 为常值，可以移到极限之前，得

$$a_P=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{v}{r}\cdot\frac{PQ}{\Delta t}=\frac{v}{r}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{PQ}{\Delta t} \tag{4'}$$

由图 1-2可知，PQ 弦 $<$ PQ 弧，但当 Q 与 P 无限接近时，则两者可以认为相等，又因 PQ 弧 $=v\cdot\Delta t$，故

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{PQ}{\Delta t}=v \tag{5}$$

由式(5)与式(4′)，得

$$a_P=\frac{v^2}{r} \tag{6}$$

在三角形 QCB 中，$\angle\theta+2\angle QCB=180°$，当 Q 点趋近于 P 点并以 P 为极限时，θ 以零值为极限，$\angle QCB$ 以 $90°$ 为极限，即 $\overrightarrow{\Delta v}$ 的方向在极限时是沿 PO 指向圆心，这方向也是 P 点的即时加速度的方向，因此称这加速度为**向心加速度**。我们知道，与轨道垂直的方向叫做法向，所以在轨道为圆周的特殊情况下向心加速度也叫做**法向加速度**。向心加速度的大小与速度的大小的平方成正比，而与圆半径的大小成反比。

质点过 P 点的即时加速度 $\overrightarrow{a_P}$ 与由 P 到 Q 的平均加速度 $\overrightarrow{a}$ 是有区别的。$\overrightarrow{a}$ 的方向垂直于 PQ①，所以它的方向随 Q 的位置而变。$\overrightarrow{a}$ 的数值，小于 a_P(因 PQ 弦小于 PQ 弧)，且没有确定的值，要看所取的那一段位移 PQ 或那一段时间 Δt 而决

① 因两三角形 OPQ 与 QCB 相似，且已有两边互相垂直，则第三边也必互相垂直。

定，所以我们必须指出某一段位移或某一段时间的平均加速度。但某一点(例如P点)的即时加速度则既有确定的方向又有确定的量值，所以我们必须指出某一时刻或某一点的即时加速度。这与平均速度和即时速度的区别类似。

在变速直线运动中，加速度能改变速度的大小。但在圆周运动中，向心加速度的方向与速度的方向垂直，故它只能改变速度的方向，而不能改变速度的大小。

$$a\text{ 的单位}=\frac{(v\text{ 的单位})^2}{r\text{ 的单位}}=\frac{1(\text{米/秒})^2}{1\text{ 米}}=1\text{米/秒}^2,$$

如用厘米·克·秒制，则a的单位为1厘米/秒^2。

质点作匀速圆周运动时，速度的大小虽然不变，但方向是随时变化的。所以匀速圆周运动不是等速度运动，所谓匀速只是指它的速度的大小不变而已。

我们一般还能注意到速度的矢量性，但容易忽略加速度的矢量性。在运动学中已讲过，矢量乘以标量或除以标量所得的积或商仍是矢量。$\Delta\vec{v}$是矢量，而Δt是标量，故$\Delta\vec{v}$除以Δt所得的商的极限值仍是矢量，也就是说，即时加速度(或简称加速度）也是矢量。在匀速圆周运动中，虽然加速度大小始终等于$\frac{v^2}{r}$，但不论质点在圆周上运动到什么位置，加速度的方向总是指向圆心，也即加速度的方向是随时改变的，**所以匀速圆周运动既不是等速度运动也不是等加速度运动。**

三、向心力和离心力

在上一节中，我们已经从运动学方面研究了匀速圆周运动的向心加速度，现在要从动力学方面来研究力的问题。作

匀速圆周运动的质点(或物体)既然存在加速度，根据牛顿第二运动定律，力是产生加速度的原因，所以一定有力作用在这质点上。因为加速度总和力的方向一致，现在加速度既然指向圆心，力也一定指向圆心，所以这个力叫做**向心力**。向心力只改变速度的方向而不改变速度的大小。根据公式 $F=ma$，向心力

$$F=ma=m\cdot\frac{v^2}{r} \tag{7}$$

向心力的大小与速度大小的平方成正比，还与作圆周运动质点的质量的大小成正比，而与圆半径的大小成反比。

在国际单位制中，向心力的单位是牛顿；在厘米·克·秒制中，向心力的单位是达因。

我们再应用小球在光滑水平面上的转动（具体装置详见第一节）来说明向心力的概念。现在提出这样几个问题：小球受到几个力的作用？它为什么能作圆周运动？

有人说，小球这时受到四个力：即重力，桌面对小球向上的弹力，绳对小球的拉力(也是弹力)以及向心力(其余如球与水平面的摩擦力，空气的阻力和浮力等可以忽略不计)。这样回答，读者可以考虑是否正确。

球在竖直方向上没有加速度，所以重力和桌面的弹力是互相抵消的，对于小球的圆周运动不起作用。小球被迫不断改变运动的方向而作圆周运动，是由于向心力作用的结果，这时线的拉力作为向心力。也可以这样说：这时线的拉力就是向心力。所以我们不应该说：小球除受到线的拉力之外还受到一个向心力。在《动力学》分册中我们已讲过万有引力、弹力和摩擦力。我们不应误解向心力是上述三种力以外的一种力，而构成所谓另一类力。实际上，在力学范围内，万有引力、

弹力和摩擦力在某种情况下，都可以作为向心力。"向心"两字不过表示这三种类型的力所发生的效果（改变运动的方向），并非表示向心力有什么不同的本性。

向心力是作用在作圆周运动的那个物体(或质点)上，根据牛顿第三运动定律，一定有一反作用力存在，这力叫做离心力。离心力是作用于迫使运动的物体改变方向的另一个关联物体上，而不是作用在运动物体本身上①。向心力与离心力大小相等，方向相反，且同时存在，同时消失。但必须注意它们不是作用于同一个物体上。当小球作圆周运动时，线的拉力迫使小球改变运动方向，所以线拉球的力是向心力，球拉线的力就是离心力，方向是沿半径而背离圆心。向心力是线作用于球，而离心力则是球作用于线。如果把它们画成力图，则如图 1-4(乙) 所示。球和线画得不相连接是为了作图的方便起见，实际上是相连的。向心力和离心力分别用 F 和 F' 表示，则 $F=-F'$，

$$F=m\frac{v^2}{r},\qquad F'=-m\frac{v^2}{r}。$$

离心力和向心力的单位是完全相同的。

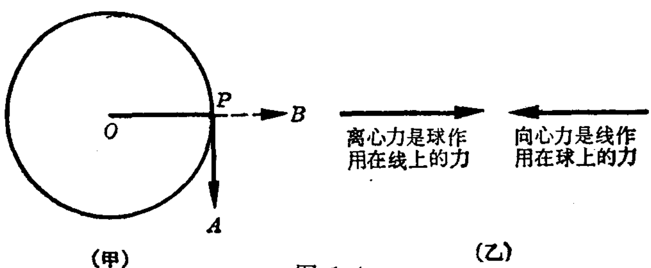


图 1-4

① 这是我们在惯性系统中所见到的现象，在加速度系统中所见到的则不是这样。但加速度系统不属本书范围，故不再讨论。