

国际奥赛金牌教练 +
国家奥赛命题研究专家
联袂编写

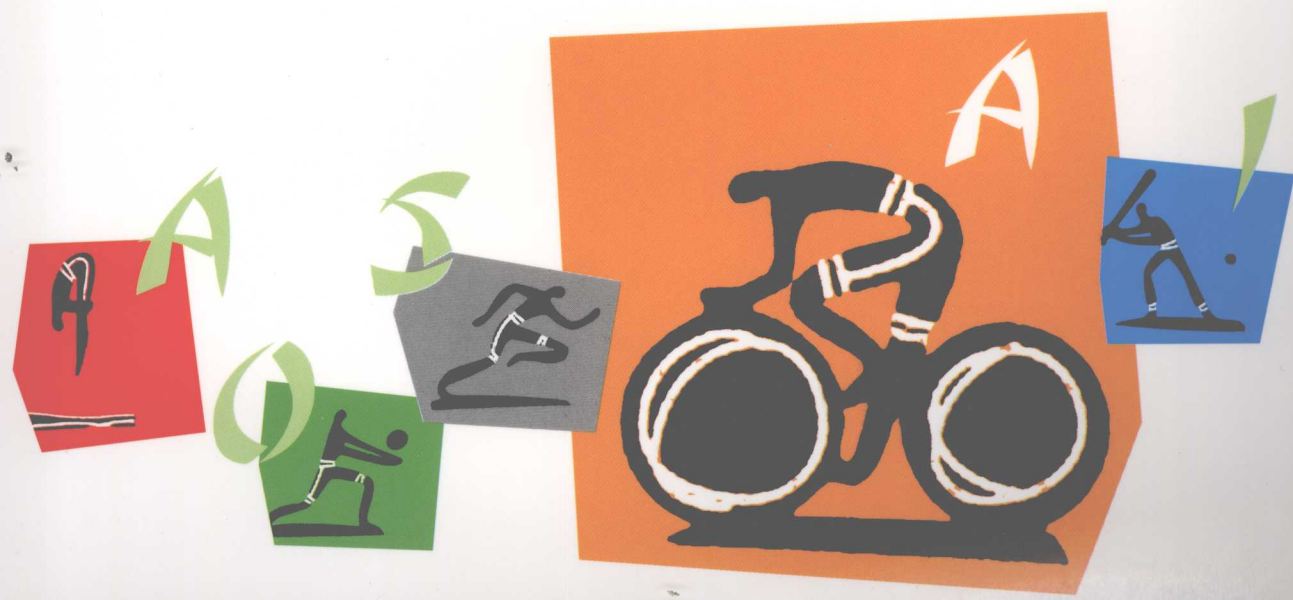
科学技术文献出版社



金牌奥赛高级教程

高二物理

· 修订版 ·



◎ 金牌奥赛

金牌奥赛高级教程

高二物理

(修订版)

总主编:耿立志 全国中学奥林匹克竞赛金牌教练
中科国际奥赛研究中心执行主任
国家首批骨干教师、全国特级教师

总审定:王永胜 中学奥林匹克竞赛研究专家
教育部新课程标准研制专家
重点大学教授、博士生导师

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北 京

图书在版编目(CIP)数据

金牌奥赛高级教程. 高二物理(修订版)/刘占明等主编. -北京:科学技术文献出版社, 2008. 2

(金牌奥赛)

ISBN 978-7-5023-4783-3

I. 金… II. 刘… III. 物理课-高中-教学参考资料 IV. G634

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 093912 号

出 版 者 科学技术文献出版社

地 址 北京市复兴路 15 号(中央电视台西侧)/100038

图书编务部电话 (010)51501739

图书发行部电话 (010)51501720, (010)51501722(传真)

邮 购 部 电 话 (010)51501729

网 址 <http://www.stdph.com>

E-mail: stdph@istic.ac.cn

策 划 编 辑 科 文

责 任 编 辑 袁其兴

责 任 校 对 唐 炜

责 任 出 版 王杰馨

发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销

印 刷 者 北京正豪彩色印刷有限责任公司

版 (印) 次 2008 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

开 本 787×1092 16 开

字 数 303 千

印 张 13.25

印 数 1~8000 册

定 价 17.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

(京)新登字 130 号

《金牌奥赛——高级教程》编委会

主 任	石丽杰	耿立志	
副 主 任	刘翠霞	何秀勤	陈正宜
委 员	纪立伏	张 菁	冯彦国
	王爱军	李宇峰	陈世泽
	刘晓静	张沈坤	

总 主 编 耿立志

本册主编	刘占明	赵丽萍	
编 委	韩尽全	李宇峰	陈世泽
	王建平		

《金牌奥赛——高级教程》

前 言

为了满足广大师生对中学奥林匹克竞赛培训教材的迫切需求,充分体现国家新课程改革的精神,由著名奥赛研究专家耿立志老师精心策划、组织编著了《金牌奥赛——高级教程》丛书。高中部分包括数学、物理、化学、生物4个学科,共7个分册,涵盖高考和奥赛的全部重点内容。

本丛书特点是

权威性

丛书作者由来自全国奥赛名校的国际奥赛金牌教练;参加奥赛命题研究的全国重点大学知名教授、博士生导师;从事奥赛一线辅导的国家高级教练及主持高考命题研究的特级教师组成。

科学性

根据国家“十五规划”教育科研课题《研究性学习与奥林匹克竞赛的有效整合》的研究成果,参考全国奥林匹克竞赛规程,对最新考试内容进行标准解读与科学诠释,是全国第一部将奥赛与高考有效整合,并经实践证明既适合奥赛又适合高考的培优宝典。



高效性

丛书注重实战,特聘请来自教学一线的骨干教练执笔各分册的编写工作。关注全国奥赛动向,力求所选试题具有代表性、时代性和实用性。鼎力打造完全实战性丛书,迅速提升学生的竞赛成绩。

谨以此书,献给在求学路上奋力拼搏的莘莘学子们!

②

《金牌奥赛——高级教程》丛书编委会

2007年12月于清华园

目 录

第八章 电场	(1)
第九章 电路	(39)
第十章 磁场	(68)
第十一章 电磁感应	(99)
第十二章 几何光学	(133)
第十三章 光的本性 原子物理	(171)

第八章 电 场



目标菜单

【基础目标】

1. 能应用库仑定律解决一些实际问题
2. 加深理解电场强度、电势、电势差、电势能、电容等重点概念,在熟练掌握上述概念的基础上,能够分析和解决一些物理问题
3. 应用电场的力和能的性质解决综合问题

【拓展目标】

1. 非匀强电场中电势的计算,会用电势法计算电量
2. 电容器的连接和静电能计算、电介质的极化



备考链接

【高考点击】

一、电场力的性质

1. 库仑定律:在真空中两个点电荷间的作用力跟它们的电量的乘积成正比,跟它们间的距离的平方成反比,作用力的方向在它们的连线上.

(1) 表达式: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, 静电恒量 k 是个重要的物理常数, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$.

(2) 适用条件:真空中点电荷. 点电荷是相对而言的理想化的物理模型,只要带电体本身的大小跟它们之间的距离相比可以忽略,带电体就可以看作是点电荷.

2. 电场强度:放入电场中某一点的电荷受到的电场力跟它的电量的比值,叫做这一点的电场强度,简称场强,单位牛每库,符号 N/C .

电荷周围存在着电场. 电场对放入其中的电荷有力的作用,这种力叫电场力.



- (1) 场强是电场的一种特性,与检验电荷存在与否无关.
- (2) E 是矢量,它的方向即电场的方向,规定场强的方向是正电荷在该点受力的方向.
- (3) 几个电场叠加计算合场强时,要按平行四边形法则求其矢量和.

(4) 场强的计算

① 定义式为 $E = F/q$,适用于任何电场.

② 真空中的点电荷的场强为 $E = kq/r^2$.

③ 匀强电场的场强为 $E = U/d$.

3. 电场线:电场线是为了形象地描述电场而假想的线.

(1) 电场线的特点

- ① 电场线起始于正电荷,终止于负电荷,是非闭合曲线.
- ② 电场线上每一点的切线方向跟这一点的场强方向一致.
- ③ 电场线越密的地方,场强越大,电场线越稀的地方,场强越小.
- ④ 电场线在空间不能相交.

(2) 电场线不是带电粒子运动的轨迹,在特殊情况下,带电粒子的运动轨迹可以与电场线重合.这些特殊情况是:电场线是直线,电荷的初速为 0 或初速方向与电场线方向在同一直线上,带电粒子只受电场力作用.

(3) 匀强电场:电场强度处处相同的电场.

① 匀强电场的电场线是一簇等间距平行直线.

② 两带等量异种电荷的平行金属板间中间部分的电场为匀强电场(边缘部分由于有边缘效应为非匀强电场).

二、电场能的性质

1. 电势差:在移动电荷的过程中,电场力对电荷所做的功与电荷电量的比值,叫这两点间的电势差.

(1) 定义式: $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$.

(2) A 、 B 两点间的电势差可以是正值或负值,大小等于单位正电荷从 A 移到 B 时电场力所做的功.

(3) 电势差的单位:伏(V).

(4) 不论是匀强电场还是非匀强电场,都可用 $W = qU$ 来计算电功.

(5) 电势差与零电势点的选取无关.

(6) 电势差和电场强度的关系: $E = U/d$ (此式只适用于匀强电场, d 为两点间沿场向上的距离).

2. 电势能:电荷在电场中具有的电势能.

(1) 电荷在电场中某点的电势能在数值上等于把电荷从这点移到电势能为零处电场力所做的功.



(2) 电势能是相对的,通常取电荷在无限远处的电势能为零,这样,电势能就有正负.

(3) 电场力对电荷所做的正(负)功总等于电荷电势能的减少(增加).

(4) 电场力移动电荷做功,只跟电荷的始、末位置有关,跟具体路径无关.

3. 等势面:电场中电势相等的点构成的曲面.

等势面的特点:① 在同一等势面上任何两点间移动电荷电场力不做功;② 等势面和电场线垂直;③ 电场线总是由电势高的等势面指向电势低的等势面;④ 等差等势面越密的地方电场强度越大.

三、电容

定义式: $C = Q/U$

(1) 电容是表征电容器特性的物理量,对于给定的电容器, C 一定,而与它所带的电量 q 和电势差 U 无关.

(2) 电容器所带电量指每个导体(或极板)所带电量的绝对值.

(3) 平行板电容器的电容 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d}$, 表示 C 与介电常数 ϵ 成正比,跟正对面积 S 成正比,跟极板间的距离 d 成反比.

四、带电粒子在电场中的运动

1. 带电粒子沿与电场线平行的方向进入匀强电场时,受到的电场力的方向与运动方向在同一直线上,此时带电粒子做加(或减)速运动,带电粒子动能的变化量等于电场力做的功,也等于电势能的变化量, $qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$.

2. 偏转问题:带电粒子进入电场时速度方向与电场线不平行时,带电粒子在电场中要发生偏转.当带电粒子进入匀强电场时的速度方向与电场线垂直时,带电粒子在电场中作匀变速运动,即类似平抛的运动,我们完全可以类比于解决平抛问题的方法去解决问题.带电粒子在其初速度方向上以初速 v_0 作匀速直线运动,在电场强度的方向上作初速为零的匀加速直线运动, $a = \frac{qE}{m}$, 由此应用相应的力学知识可以解出带电粒子在电场中的偏转距离 y 和偏转角度 θ .

【奥赛拓展】

一、典型带电体的场强

决定电场强弱的因素有两个:场源(带电量和带电体的形状)和空间位置.

1. 点电荷: $E = K \frac{Q}{r^2}$, 结合点电荷的场强和叠加原理,我们可以求出任何电场的场强.

2. 均匀带电环:垂直环面轴线上距离环心为 r 的某点 P



$E = \frac{kQr}{(r^2 + R^2)^{3/2}}$, 其中 R 为环的半径.

3. 均匀带电球壳

内部: $E_{\text{内}} = 0$

外部: $E_{\text{外}} = k \frac{Q}{r^2}$, 其中 r 指考察点到球心的距离.

4. 均匀带电球体内外的电场(球体半径为 R , 电荷的体密度为 ρ , 距球心为 r 处)

$$E = \frac{kQ}{r^2} = k \frac{4\pi R^3 \rho}{3r^2} \quad (r \geq R)$$

$$E = \frac{4}{3} \pi k \rho r \quad (r \leq R)$$

5. 无限长均匀带电直线(电荷线密度为 λ)

$$E = \frac{2k\lambda}{r}$$

6. 无限大均匀带电平面(电荷面密度为 σ)

$$E = 2\pi k \sigma$$

二、高斯定理

1. 电通量: 穿过某一截面的电场线的条数.

2. 高斯定理: 在任意场源所激发的电场中, 对任意一闭合曲面的总电通量可以表示为

$$\Phi = 4\pi k \sum q_i$$

式中 k 是静电常量, $\sum q_i$ 为该闭合曲面所围的所有电荷电量的代数和. 利用高斯定理推导上面几种特殊电场, 特别方便.

三、电势

1. 电势: 把一电荷从 P 点移到参考点 P_0 时电场力所做的功 W 与该电荷电量 q 的比值, 即

$$U = \frac{W}{q}$$

参考点即电势为零的点, 通常取无穷远或大地为参考点.

2. 典型电场的电势

(1) 点电荷: 以无穷远为参考点,

$$U = k \frac{Q}{r}$$

(2) 均匀带电球壳: 以无穷远为参考点,

$$U_{\text{外}} = k \frac{Q}{r}, U_{\text{内}} = k \frac{Q}{R} \quad (R \text{ 为球半径})$$

3. 电势的叠加: 由于电势是标量, 所以电势的叠加服从代数加法. 很显然, 有了点电荷



电势的表达式和叠加原理,我们可以求出任何电场的电势分布.

四、电场中的导体

1. 静电感应:把导体放在外电场中,由于导体内部自由电荷受电场力作用而定向运动,使导体的两端出现等量异种电荷的现象.

2. 静电平衡:发生静电感应的导体中的自由电荷停止定向运动时,导体处于静电平衡状态.

3. 处于静电平衡状态的导体具有以下特点

(1) 导体内部场强处处为零.此时感应电荷形成的附加场与外电场的场强大反向,故合场强为零,这是求解感应电荷形成的电场的场强的方法.

(2) 整个导体是等势体,导体表面是等势面.

(3) 导体外部电场线与导体表面垂直.

(4) 电荷分布于导体的外表面.

4. 使物体带电的三种方法

(1) 摩擦起电:通过两个物体摩擦,使一个物体失电子,另一个物体得电子,从而带上等量异种电荷.

(2) 接触带电:带电导体相互接触,电荷重新分布,分开后可使两导体带电,此过程遵从电荷守恒定律.

(3) 感应带电:导体在电场中发生静电感应,使导体两端出现等量异种电荷,通过分离、接地后断开等操作使导体带电.

5. 静电屏蔽:金属网罩能把外电场遮住,使其内部不受外电场的影响.

五、电场中的电介质

1. 电介质的极化

(1) 电介质分为两类:无极分子和有极分子,前者是指在没有外电场时每个分子的正、负电荷“重心”彼此重合(如气态的 H_2 、 O_2 、 N_2 和 CO_2),后者则反之(如气态的 H_2O 、 SO_2 和液态的水).

(2) 电介质的极化:当介质中存在外电场时,无极分子会变为有极分子,有极分子会由原来的杂乱排列变成规则排列,如图 8-1 所示.

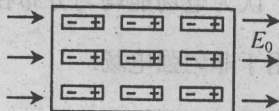


图 8-1

2. 介电常数 ϵ :在真空中场强为 E_0 的区域内充满电介质后,场强会减小到 E ,那么比值 E_0/E 就叫做这种电介质的介电常数 $\epsilon = E_0/E$.

$$\text{电介质中点电荷场强和场力: } F = k \frac{Qq}{\epsilon r^2} \cdot E = k \frac{Q}{\epsilon r^2}$$



电介质中点电荷电势: $U = \frac{kQ}{\epsilon r}$

六、电容

1. 电容

(1) 定义式: $C = \frac{Q}{U}$

(2) 决定式: 决定电容器电容的因素是导体的形状和位置关系、绝缘介质的种类, 所以不同电容器有不同的电容.

① 平行板电容器: $C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d}$, 其中 ϵ 为介电常数

② 孤立球形导体: $C = \frac{\epsilon R}{k}$

③ 球形电容器: $C = \frac{\epsilon R_1 R_2}{k(R_2 - R_1)}$

2. 电容器的连接

(1) 串联: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

(2) 并联: $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

3. 电容器的能量

用图 8-2 表征电容器的充电过程, “搬运”电荷做功 W 就是图中阴影的面积, 这也就是电容器的储能 E , 所以

$$E = \frac{1}{2} q U = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{q^2}{2C}$$

4. 电场的能量: 电容器储存的能量究竟是属于电荷还是属于电场? 正确答案是后者, 因此, 我们可以将电容器的能量用场强 E 表示.

对平行板电容器: $E_{\text{总}} = \frac{S d}{8\pi k} \epsilon E^2$

认为电场能均匀分布在电场中, 则单位体积的电场储能 $\omega = \frac{\epsilon}{8\pi k} E^2$, 而且, 这个结论适用于非匀强电场.

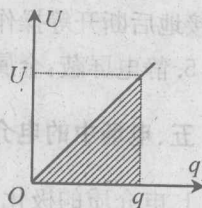


图 8-2



题型扫描

【基础示例】

例 1 如图 8-3 所示是一条电场线, 电子在 A 点的电势能大于

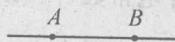


图 8-3



它在 B 点的电势能,则下列叙述肯定正确的是()

- A. A 点电势高于 B 点电势
- B. A 点场强大于 B 点场强
- C. 从 A 到 B 的过程中电场力对电子做正功
- D. 把质子从 A 移到 B , 它的电势能增加

参考答案: C、D

据电势能与电场力的功的关系,因为电子在 A 点的电势能大于它在 B 点的电势能,所以设想从 A 到 B 移动电子,电场力一定对电子做正功. 即电子受电场力向右,可知场强方向向左. 故质子向右移动,电场力对它做负功,电势能增加,所以 C、D 正确, A 项错误. 虽然电场线指向可以判断,但疏密程度不清,故 B 项错.

思路启迪: 仔细体会电场强度、电场线、电势能及电场力功的区别与联系.

例 2 如图 8-4 所示,两个固定的正电荷 Q_1 和 Q_2 , 电量之比为 $Q_1:Q_2=1:4$, 相距为 d , 现引入第三个电荷 Q_3 , 要使 Q_3 处于平衡状态, 对 Q_3 的位置、正负和电量的多少有何要求?

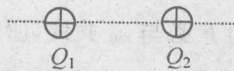


图 8-4

参考答案:

要使 Q_3 平衡, 需要 Q_1 和 Q_2 各自对 Q_3 的库仑力等大反向.

要反向必在 Q_1 与 Q_2 连线上, 且在 Q_1 与 Q_2 之间, 对 Q_3 的电量及正、负均无要求.

要使 Q_3 受到两个库仑力等大, 设距 Q_1 为 x , 由库仑定律可得:

$$k \frac{Q_1 Q_3}{x^2} = k \frac{Q_2 Q_3}{(d-x)^2}$$

将 $Q_2 = 4Q_1$ 代入, 解得 $x = \frac{d}{3}$.

思路启迪: 若 Q_1 和 Q_2 都不固定, 引入 Q_3 后要求三个电荷都平衡, 则对 Q_3 的位置、所带电量、电荷正负有何要求? 首先 Q_3 的位置同上面距 Q_1 为 $x = d/3$. 若 Q_3 带正电荷, Q_1 与 Q_2 两个电荷都不平衡, 所以 Q_3 必须带负电荷, 则由 Q_1 平衡得:

$$k \frac{Q_1 Q_3}{x^2} = k \frac{Q_1 Q_2}{d^2},$$

得 $Q_3 = \frac{Q_2}{9}$

例 3 如图 8-5 所示, 实线为匀强电场中的电场线, 虚线为等势面, 且相邻等势面间的电势差相等, 一正点电荷在等势面 U_3 上时的动能为 20 J, 它运动到等势面 U_1 上时动能恰好为零, 今设 U_2 为零, 那么电荷在电势能为 4 J 处, 其动能是多少?

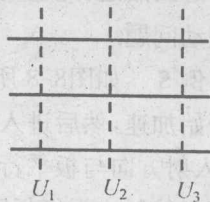


图 8-5

参考答案:

由题意 $U_1 = -U_3$, 电荷由 U_3 到 U_1 , 根据动能定理可得

$q(U_3 - U_1) = -E_{k3} = -20 \text{ J}$, 所以 $q(U_3 - U_2) = qU_3 = -10 \text{ J}$, 即该电荷在 U_3 上时, 具有的电势能为 $E_p = -10 \text{ J}$, 该电



荷的总能量为 $E = E_p + E_{k3} = -10 + 20 = 10 \text{ J}$, 依能量守恒定律, 当它的电势能为 4 J 时, 其动能是 6 J .

思路启迪: 本题是从能量转化的角度来看动能和电势能的转化, 来处理带电粒子在电场中的运动问题.

例 4 一电场的等势面是一组相互平行的平面, 相邻两等势面之间的距离为 d , 各等势面的电势如图 8-6 所示. 现有一个质量为 m 的带电小球, 初速度 v_0 的方向与水平方向成 45° 角. 要使小球做直线运动, 求:

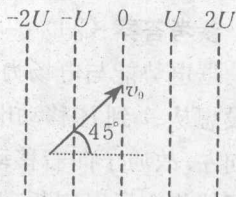


图 8-6

(1) 小球带何种电荷? 电量多少?

(2) 小球在入射方向的最大位移?

参考答案:

(1) 如图 8-7 所示, 小球受重力、电场力, 要做直线运动其合力 F 必与 v_0 共线, 所以小球必带正电荷. 由平行四边形定则知:

$$qE = mg \quad F = \sqrt{2}mg$$

$$\text{所以 } mg = qE = qU/d$$

$$q = \frac{mgd}{U}$$

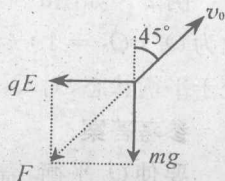


图 8-7

(2) 小球到达最大位移处时速度为 0, 据动能定理:

$$-F \cdot s_m = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$\text{即 } -\sqrt{2}mgs_m = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$\text{所以 } s_m = \frac{v_0^2}{2\sqrt{2}g}$$

$$\text{或: } a = \frac{F'}{m} = \frac{\sqrt{2}mg}{m} = \sqrt{2}g,$$

$$\text{据 } v^2 - v_0^2 = -2as$$

$$\text{得 } s_m = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2}{2\sqrt{2}g}$$

思路启迪: 此题重点考查运用牛顿运动定律或动能定理解决电场中带电粒子的匀变速运动问题.

例 5 如图 8-8 所示, 电子在电势差为 U_1 的电场中由静止开始加速, 然后进入电势差为 U_2 的两平行金属板间的电场中, 入射方向与板平行, 整个装置处在真空中, 重力忽略, 在满足电子能射出平行板区的条件下, 下述四种情况中, 一定能使电子偏角 θ 变大的是 ()

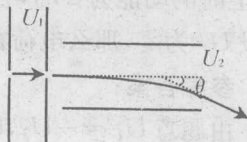


图 8-8

A. U_1 变大, U_2 变大

B. U_1 变小, U_2 变大

C. U_1 变大, U_2 变小D. U_1 变小, U_2 变小

参考答案: B

在电场中加速:

$$qU_1 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad ①$$

在电场中偏转:

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{at}{v_0} = \frac{qU_2t}{mdv_0} \quad ②$$

$$L = v_0t \quad ③$$

由 ①②③ 式得 $\tan\theta = \frac{U_2L}{2dU_1}$

显然 B 项对, 其他项错.

引申: 在上例中若使电子在电场中的侧移量变为原来的 2 倍, 可选用的方法是 ()

A. 只使 U_1 变为原来的一半B. 只使 U_2 变为原来的一半

C. 只使偏转电极长度变为原来的一半

D. 只使偏转电极间距离变为原来的一半

参考答案: A、D

$$\text{由 } y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qU_2l^2}{2mdv_0^2}, \text{ 且 } qU_1 = \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$\text{联立得: } y = \frac{U_2l^2}{4dU_1}$$

显然只有 A、D 项对

思路启迪: 由例题的结论可以看出, 用相同电场使带电粒子由静止先加速后偏转, 最后的侧移距离和偏转角与带电粒子荷质比无关, 解题时注意从基本点出发, 得出最终表达式再讨论结果.

例 6 如图 8-9 所示, 把一个带电量为 $+q$, 质量为 m 的小球, 用长为 L 的丝线悬挂在两块面积很大的平行金属板之间, 两板相距为 d , 所加电压为 mgd/q . 现将小球拉到 B 点处 (悬线竖直), 然后释放, 则下列说法中正确的是 ()

A. 小球摆动的最高点是 A 点

B. 小球在 C 点速度最大

C. 小球在 A 点机械能最大

D. 小球在 B 点电势能最大

参考答案: ABCD

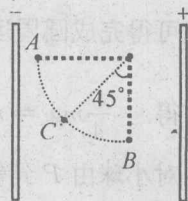
因为 $U = mgd/q$, 所以 $F_{\text{电}} = qU/d = mg$ 即 $mg = qE$ 

图 8-9



设当绳转过 θ 角时物体的动能最大,则

$$E_k = qEL \sin\theta - mgL(1 - \cos\theta) = mgL(\sin\theta + \cos\theta - 1)$$

所以当 $\sin\theta + \cos\theta$ 最大时,即 $\theta = 45^\circ$ 时, E_k 最大, B 项正确。

小球由 B 向 A 运动过程中,根据动能定理: $\frac{1}{2}mV_A^2 = qEL - mgL = 0$,

所以小球恰能摆到 A 点, A 项正确。小球摆到 A 点时电场力做功最多,所以小球在 A 点时机械能最大,小球在 B 点时电势能最大, C、D 项均正确。

思路启迪: 本题 A、C、D 项比较好判定,在判断 B 项时要用到数学中的三角函数知识求极值,对运用数学知识综合解决物理问题的能力是很好的锻炼。

例 7 如图 8-10 所示,长 L 的绝缘细绳一端固定于 O 点,另一端拴一质量为 m 的带电小球,处于水平方向的匀强电场中,静止时绳与竖直方向的夹角 $\theta = 37^\circ$,现对小球施以极短时间的冲量,使小球在竖直面内完成圆周运动,这个冲量至少应为多大?

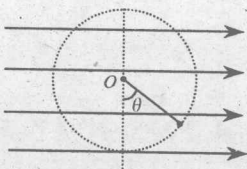


图 8-10

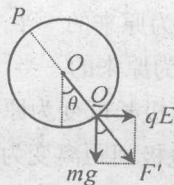


图 8-11

参考答案:

做出小球静止时的受力图如图 8-11,可知电场力:

$$qE = mg \tan 37^\circ = \frac{3}{4}mg$$

重力和电场力的合力为:

$$F' = mg / \cos 37^\circ = \frac{5}{4}mg$$

因为重力和电场力都是恒力,故 F' 也为恒力,用 F' 代替重力和电场力,根据等效场原理可得完成圆周运动的等效最高点为 P 点,由: $F' = m \frac{v_P^2}{l}$

$$\text{得 } \frac{5}{4}mg = m \frac{v_P^2}{l} \Rightarrow v_P = \sqrt{\frac{5gl}{4}}$$

对小球由 P 到等效最低点 Q 的过程,据 $W = \Delta E_k$

$$2mgl \cos 37^\circ + qE 2l \sin 37^\circ = \frac{1}{2}mv_Q^2 - \frac{1}{2}mv_P^2$$

$$\text{代入可得: } v_Q = \frac{5}{2} \sqrt{gL}$$

$$\text{所以最小冲量 } I_{\min} = mv_Q = \frac{5m}{2} \sqrt{gL}.$$

思路启迪: 此题解题的关键是用合场来代替重力场和电场,从而较容易找到临界点 P