



知识概要

例题解析

高考水平

自主招生



竞赛提高

自主招生 奥赛教程

ZIZHU

ZHAOSHENG

AOSAI JIAOCHENG



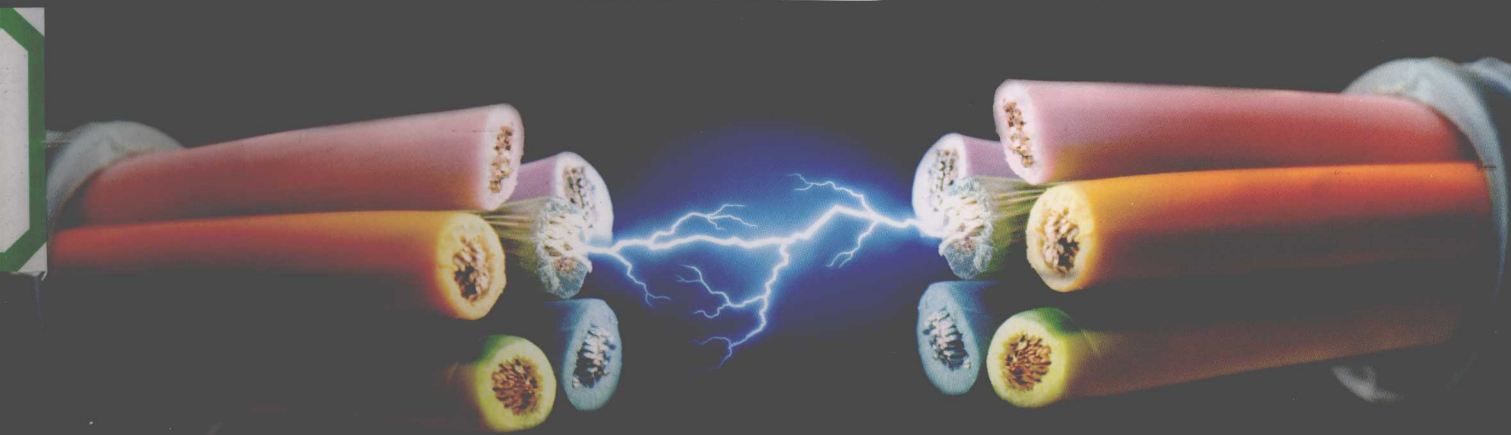
浙江教育出版社

WULI DIANCIXUE

物理
电磁学



YZLI0890144881



ZIZHU
ZHAOSHENG
AOSAI JIAOCHENG

自主招生 奥赛教程

主 编 金 鹏
编 者 解学仁 张传兵
李 鸣 方润根
齐国元 毛朝亮

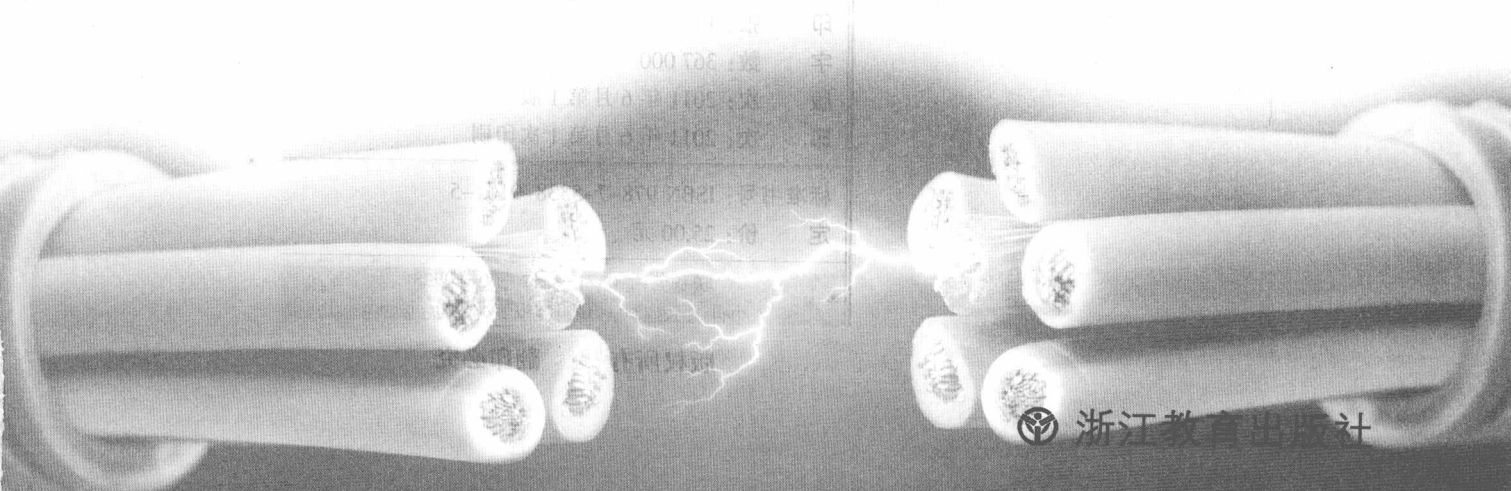


物 理

电磁学



YZLI0890144881



浙江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

自主招生+奥赛教程.物理.电磁学/金鹏主编. —杭州:浙江教育出版社,2011.6

ISBN 978-7-5338-9101-5

I. ①自... II. ①金... III. ①中学物理课—高中—教学参考资料 IV. ①G634

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 114230 号

责任编辑:周延春

责任校对:郑德文

封面设计:韩波

责任印务:陈沁

自主招生 奥赛教程 物理 电磁学

出版发行:浙江教育出版社

(杭州市天目山路 40 号 邮编 310013)

制 作:杭州富春电子印务有限公司

印 刷:富阳市育才印刷有限公司

开 本:850×1168 1/16

印 张:14

字 数:367 000

版 次:2011 年 6 月第 1 版

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

标准书号:ISBN 978-7-5338-9101-5

定 价:25.00 元

联系电话:0571-85170300-80928

e-mail: zjy@zjcb.com 网址: www.zjeph.com

版权所有 · 翻印必究

前 言

中学物理教学是基础教育的重要组成部分。每年一度的全国中学生物理竞赛在激发中学生对物理学科的热爱和学习兴趣,培养创新精神和实践能力、科学思维能力及综合分析能力等方面起到了重要的作用,并产生了积极的影响,因此越来越受到中学师生的重视。

另一方面,高校招生考试已从单维的全国统考逐渐演变为各省高校的多元考试,其中自主招生是高校选拔人才的新举措,各所高校可以根据自身的培养目标和办学特色设定入学标准,自己组织测试来选拔适合在自己学校学习的学生。一般说来,自主招生更加注重学生的综合素养、创新精神和发展潜能,更加注重高校特色与学生特长的匹配。因此,自主招生的考试越来越引起广大师生与家长的关注。

为了给立志于在全国中学生物理竞赛及自主招生中取得优异成绩的中学生提供可读性强、有实用参考价值的学习材料,我们按照《全国中学生物理竞赛大纲》、《普通高中物理课程标准》及《普通高中课程标准实验教科书 物理》的要求,编写了《自主招生十奥赛教程 电磁学》一书。根据物理的学科特点,本书详细地阐述了静电场、恒定电流、磁场、电磁感应、交变电流和电磁波等高中电磁学范围内的高考重、难点及竞赛的特点与趋势,并附有四份高中电磁学竞赛模拟题及参考答案。

本书的特点是立足高考,面向竞赛。在编写时,本书充分遵循了学生的认知规律,设置了“知识概要”、“例题解析”、“高考水平”、“自主招生”、“竞赛提高”等栏目。“知识概要”主要是对每节的重、难点知识进行归纳和整理,同时对一些重要的解题方法进行提炼;“例题解析”中,选取了极具代表性的历年高考压轴题及全国中学生物理竞赛典型题作为例题,进行了详细的剖析,重在启发学生的解题思路;习题按“高考水平”、“自主招生”和“竞赛提高”编排,由浅入深,供不同程度的学生选择或分段使用。同时,本书在每一章后还配有适量的综合训练,供学生对自己的学习情况进行测评,查漏补缺。本书以学生为本,所有的配套练习都附有答案,对难度较小的习题进行了提示,对难度稍大一点的习题提供了详细的解题过程。因此,本书既是中学生自学的理想读物,也是学校老师竞赛辅导的理想教材。相信通过本书的学习,一定能扩大学生的知识面,提高学生分析问题、解决问题以及灵活运用物理知识的能力,并最终达到提高高考及竞赛成绩的效果。

参加本书编写的有(按章节编写次序):杭州外国语学校解学仁、杭州第十四中学张传兵、浙江大学附属中学李鸣、杭州学军中学方润根、杭州第四中学齐国元、杭州学军中学毛朝亮,全书由金鹏统稿。

在本书的编写过程中,参阅了许多文献,在此,对原作者表示感谢!由于编者水平有限,错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

2011年6月

目 录

第一章 静电场	1
§ 1.1 库仑定律与电场强度	1
§ 1.2 电势能与电势	8
§ 1.3 导体的静电平衡与电容器	15
§ 1.4 综合训练	24
第二章 恒定电流	31
§ 2.1 部分电路	31
§ 2.2 闭合电路	36
§ 2.3 复杂电路	41
§ 2.4 电流、电压和电阻的测量	47
§ 2.5 物质的导电性	56
§ 2.6 综合训练	62
第三章 磁 场	68
§ 3.1 通电导线在磁场中的运动	68
§ 3.2 电荷在磁场中的运动	74
§ 3.3 带电粒子在复合场中的运动	82
§ 3.4 综合训练	91
第四章 电磁感应	97
§ 4.1 电磁感应现象 楞次定律	97
§ 4.2 法拉第电磁感应定律 自感现象	102
§ 4.3 电磁感应定律的综合应用	113
§ 4.4 综合练习	122
第五章 交变电流和电磁波	129
§ 5.1 交变电流的产生	129
§ 5.2 变压器的原理与远距离输电	137
§ 5.3 电磁波 振荡回路	144
§ 5.4 综合训练	150
第六章 模拟试卷	155
模拟试卷一	155
模拟试卷二	158
模拟试卷三	161
模拟试卷四	163
参考答案	167

第一章

静电场

静电场所研究的问题可分为两类,一类是对静止带电体所产生电场电势的研究,另一类是对静电场中带电体的研究。高考考题关注电场中带电质点所受电场力的大小与方向,以及恒定电场力做功问题;而物理竞赛涉及的情景更多,如根据带电体的电荷分布定量分析静电场的场强与电势,或根据场强或电势明确电荷的分布,甚至研究电场中形状不能忽略的金属导体等。

在分析有关静电场的问题时,牛顿经典力学在重力场环境中采用的方法与适用的规律依然成立,只不过用点电荷模型替代了质点模型,且在处理方法上,常用到无限分割思想和叠加原理。

§ 1.1 库仑定律与电场强度

知识概要

1. 静电场的基本规律

(1) 电荷守恒:大量实验证明,电荷既不能被创造,也不能被消灭,正负电荷的代数和在任何物理过程中始终保持不变。

我们所熟知的摩擦起电其实就是电子在不同物体间的转移,而静电感应现象则是电子在同一物体不同部位间的转移。液体和气体的电离以及电中和等实验现象都遵循电荷守恒定律。

(2) 库仑定律:真空中两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力 $F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$ (其中 $k=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 是真空介电常数),方向沿两点电荷的连线。

(3) 电场叠加:若干场源激发的电场中任一点的总电场,等于每个场源电荷单独存在时在该点激发的场强的矢量和。

从原则上讲,库仑定律与电场叠加原理可解决静电场中的全部问题。

2. 电场的描述之一——电场强度

(1) 定义法理解电场强度:引入试探电荷 q ,空间各处电场强度 $E=\frac{F}{q}$,方向与正试探电荷的受力方向一致。

(2) 不同电场中场强的计算。

①与点电荷相距 r 处的场强大小: $E=k\frac{Q}{r^2}$ 。

②与无限长均匀带电直线(电荷线密度为 λ)相距 r 处的场强大小。

如图 1.1-1 所示,取微元 $\Delta l'=\frac{\Delta l}{\cos\theta}$,而 $\Delta l'=\frac{r}{\cos\theta}\cdot d\theta$,

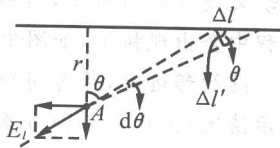


图 1.1-1



学习札记

$$\text{点电荷模型 } E_l = k \frac{\lambda \Delta l}{\left(\frac{r}{\cos \theta}\right)^2} = k \frac{\lambda \cdot \frac{rd\theta}{\cos^2 \theta}}{\frac{r^2}{\cos^2 \theta}} = k \frac{\lambda d\theta}{r},$$

$$\text{根据对称性以及叠加原理, } E_A = \sum_{\theta} 2E_l \sin \theta = \sum_{\theta} \frac{2k\lambda \sin \theta d\theta}{r} = \frac{2k\lambda}{r}.$$

③无限大均匀带电平面(电荷面密度为 σ): $E=2\pi k\sigma$ 。

④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 是考察点到球心的距离。

⑤均匀带电球体:内部 $E=\frac{kQr}{R^3}$,其中 r 是考察点到球心的距离, R 是球体半径;外部 $E=\frac{kQ}{r^2}$ 。

3. 电场的描述之二——电场线与电通量

(1) 对某一匀强电场,电通量的大小 $\Phi=ES\sin\theta$ (θ 为截面与电场线的夹角),可用穿过某一截面的电场线的条数多少定性表示。

(2) 高斯定理:对均匀介质空间,任意场源所激发的电场对任一闭合曲面的电通量可以表示为 $\Phi=4\pi k \sum q_i$,或者 $\oint E dS = 4\pi k \sum q_i$ 。

例如,如图 1.1-2 所示,在无限大均匀带电平面形成的电场空间中,取一圆柱体,这一闭合曲面的电通量 $\Phi=2E \cdot \Delta S$ (侧面无电场线穿过)。

$$2E\Delta S = 4\pi k \cdot \sigma \cdot \Delta S, E = 2\pi k\sigma, \text{得证。}$$

4. 带电粒子在电场中的运动形式

带电粒子在电场中可以保持平衡状态,也可以做匀变速直线运动、类平抛运动、圆周运动、简谐运动等。

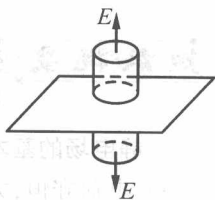


图 1.1-2

例题解析

【例 1】 所带电荷量为 $+Q$ 的点电荷从无穷远处移近一所带电荷量为 $+Q$ 的金属球,试分析它们之间的作用力将随着距离的移近发生怎样的变化。粗略地勾画出 $F-s$ 图象,并说出理由(F 为作用力, s 为点电荷与金属球之间的距离)。

解析 在点电荷移近带电金属球的过程中,当它们相距无穷远时,带电金属球也可看做点电荷,由库仑定律可知,两者之间的作用力如图 1.1-3 中的①的部分所示。

当它们慢慢移近时,金属球会发生静电感应现象,球上的电荷不再均匀分布,较多正电荷将分布在球的相对远侧。此时,两者间距变近导致库仑力增大,而球上正电荷向远侧移动又使库仑力减小,这两种相反的因素,使作用力在变化过程中会出现极值,如图中的②部分所示。

继续移近时,两者间的作用力开始减小,并且在近侧开始出现负电荷,呈现如图中③部分所示情况;当斥力与引力抵消时,呈现如图中④部分所示情况;当斥力小于引力时,呈现如图⑤部分所示情况。

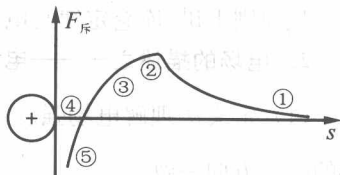


图 1.1-3

【例2】 如图 1.1-4 所示,半径为 R 的光滑绝缘环形轨道竖直放置,在圆轨道的最低点 B 处固定一带电小球,另一质量为 m 的带电小环球穿在圆环上,从 A 点(水平最右端)处无初速释放。若小球运动到 C 点时获得最大速度,大小为 v_m ,且 $\angle AOC = \theta = 30^\circ$ 。求小环球在 A 点刚释放时对轨道的压力大小以及小环球在 C 点时对轨道的压力大小。

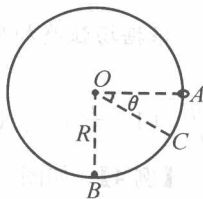


图 1.1-4

解析 在 A 点刚释放时对小环球进行受力分析,小环球受到重力 mg 、库仑力 F_A 、轨道支持力 F_N 的作用。

小环球在水平方向受力平衡,因此

$$F_N = F_A \cos 45^\circ = k \frac{Q_B q}{(\sqrt{2}R)^2} \cos 45^\circ. \quad (1)$$

当小环球运动到 C 点时,再对它进行受力分析,可知小环球受重力 mg 、库仑力 F_C 、轨道支持力 F'_N 的作用。因此时小环球的速度最大,故它在轨道切线方向受力平衡,如图 1.1-5 所示。

由于小环球在 x 方向受力平衡,因此有

$$mg \cos 30^\circ = F_C \cos 30^\circ = k \frac{Q_B q}{R^2} \cos 30^\circ. \quad (2)$$

由①、②两式可得, $F_N = \frac{\sqrt{2}}{4} mg$ 。

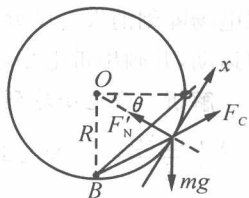


图 1.1-5

在与 x 垂直的方向,合力提供向心力,因此有 $F'_N - F_C \sin 30^\circ - mg \sin 30^\circ = m \frac{v_m^2}{R}$,解得 $F'_N = mg + m \frac{v_m^2}{R}$ 。

说明:若已知电势 $\varphi = k \frac{Q}{r}$,则最大速度 v_m 的条件可不要,直接计算出 $N = (4 - \sqrt{2})mg$ 。

【例3】 真空中有一对相距为 l 的带等量异号电荷的点电荷系统 $(+q, -q)$,且 l 远小于讨论中所涉及的距离,这样的电荷体系称为电偶极子。求:

(1) 两电荷连线中垂面上某点 P 的电场强度,该点到两电荷连线的距离为 r 。

(2) 若 P' 为两电荷延长线上的一点, P' 到两电荷连线中点的距离为 r ,求该点的电场强度。

解析 (1) 根据场强叠加原理, P 点的场强情况如图 1.1-6 所示,

其中 $E_+ = E_- = k \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}}$ 。

$$\text{则 } E = 2E_+ \cos \theta = 2k \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} \cdot \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} = k \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \approx$$

$$k \frac{ql}{r^3} \left(1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{l^2}{4r^2}\right) \approx k \frac{ql}{r^3}。$$

(2) 如图 1.1-7 所示, $E_+ = k \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2},$

$$E_- = k \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2}。$$

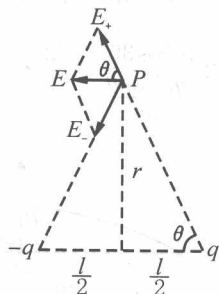


图 1.1-6

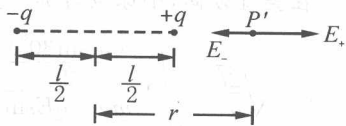


图 1.1-7

学习札记

根据场强叠加原理,可得 $E=E_+-E_-=kq\left[\frac{1}{\left(r-\frac{l}{2}\right)^2}-\frac{1}{\left(r+\frac{l}{2}\right)^2}\right]=$
 $k\frac{q}{r^2}\left[\left(1-\frac{l}{2r}\right)^{-2}-\left(1+\frac{l}{2r}\right)^{-2}\right]\approx k\frac{q}{r^2}\left(1+\frac{l}{r}-1+\frac{l}{r}\right)=k\frac{2ql}{r^3}.$

【例4】如图1.1-8所示,一质量为0.10 kg、所带电荷量为 8×10^{-4} C的带正电小球,从水平地面上A点以与x轴正方向成 30° 夹角的初速度 v_0 被抛出(v_0 在xOy竖直平面内)。当到达最高点B时(B点恰好处在y轴上),在全空间立刻产生一个匀强电场E,场强大小为 2.5×10^3 N/C,方向平行于xOy平面,并与x轴负方向成 θ 夹角。当带电小球再次通过y轴时,匀强电场即刻消失。试分析讨论当 θ 角变化时($0\leq\theta\leq 180^\circ$),带电小球自B点以后到落地前做什么运动,并画出带电小球在各种情况下的运动轨迹简图($g=10$ m/s²)。

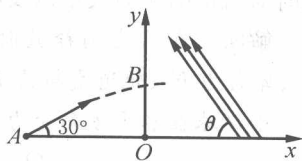


图 1.1-8

解析 带电小球到最高点B时,速度平行水平地面,大小为 $v_0\cos 30^\circ$,离水平地面的高度 $h=\frac{(v_0\sin 30^\circ)^2}{2g}$ 。加入匀强电场后,小球受到两个力的作用,一个是重力 mg ,另一个是电场力 qE ,且 $qE=2.0$ N= $2mg$ 。由于电场力在x轴方向和y轴方向的分量的大小与 θ 角有关,因此,带电小球自B点以后的运动可分为以下6种情况:

①当 $qE\sin\theta=mg$,即 $\theta=30^\circ$ 时,带电小球只受到电场力在x轴负方向的分量 $qE\cos\theta$ 的作用,以初速度 $v_0\cos\alpha$ 做匀减速运动,之后沿原路返回,电场消失后做平抛运动,落回原处。带电小球的运动轨迹如图1.1-9所示。

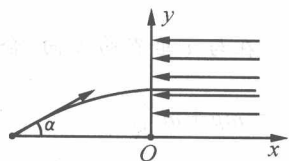
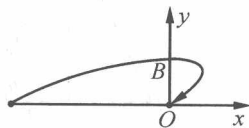


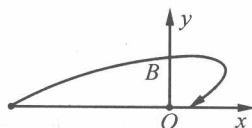
图 1.1-9

②当 $qE\sin\theta<mg$,即 $0\leq\theta<30^\circ$ 时,带电小球受到沿y轴负方向的力 $mg-qE\sin\theta$ 和沿x轴负方向的力 $qE\cos\theta$ 的作用,做斜下抛运动。随着 θ 角的变化($0\leq\theta<30^\circ$),可能出现如图1.1-10甲、乙、丙所示的三种情况。其中,在 $0\leq\theta<30^\circ$ 的范围内存在一个角 θ_0 ,使得小球运动情况满足图甲的情况。根据合运动与分运动具有同时性的特点,可计算出小球在x轴方向往返一次回到坐标原点的时间 $t_x=2\frac{v_{0x}}{a_x}$

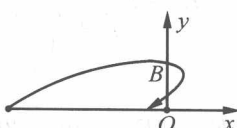
$$=2\frac{v_0\cos 30^\circ}{\frac{qE\cos\theta}{m}}=\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{v_0}{g\cos\theta^\circ}$$



甲
到达坐标原点



乙
落在x轴正半轴



丙
过y轴后斜抛落在x轴负半轴

图 1.1-10

在竖直方向,小球做匀加速直线运动,到达 $y=0$ 所需要的时间

$$t_y=\sqrt{\frac{2h}{a_y}}=\sqrt{2\frac{\frac{(v_0\sin 30^\circ)^2}{2g}}{\frac{mg-qE\sin\theta}{m}}}=\frac{v_0}{2g}\sqrt{\frac{1}{1-2\sin\theta^\circ}}$$

当 $t_x=t_y$ 时,产生如图1.1-10甲所示的轨迹。此时 $\sin^2\theta_0-6\sin\theta_0+2=0$,
 可得 $\theta_0=\arcsin(3-\sqrt{7})=20^\circ 45'$ 。

③当 $qE\sin\theta > mg$, 即 $30^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, 带电小球受到沿 y 轴正方向的力 $Eq\sin\theta - mg$ 和沿 x 轴负方向的力 $qE\cos\theta$ 的作用, 因此带电小球自 B 点以后做斜上抛运动, 在 B 点上方飞出电场后做斜抛运动落到地面, 轨迹如图 1.1-11 所示。

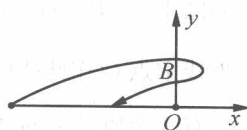


图 1.1-11

④当 $90^\circ \leq \theta < 150^\circ$, 即 $qE\sin\theta > mg$ 时, 带电小球受到沿 y 轴正方向的力 $qE\sin\theta - mg$ 和沿 x 轴正方向的力 $qE\cos\theta$ 的作用, 因此小球到达最高点 B 以后, 在水平方向做加速运动, 在 y 轴正向做加速运动, 运动轨迹如图 1.1-12 所示。

⑤当 $\theta = 150^\circ$, 即 $qE\sin\theta = mg$ 时, 带电小球只受到沿 x 轴正方向的力 $qE\cos\theta$ 的作用, 因此小球到达最高点 B 以后, 在水平方向做匀加速直线运动, 在 y 轴方向不运动, 运动轨迹如图 1.1-13 所示。

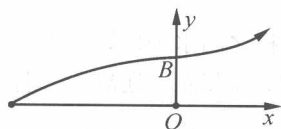


图 1.1-12

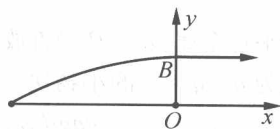


图 1.1-13

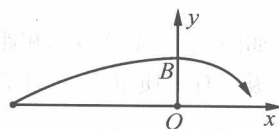


图 1.1-14

⑥当 $150^\circ < \theta \leq 180^\circ$, 即 $qE\sin\theta < mg$ 时, 带电小球受到沿 y 轴负方向的力 $mg - qE\sin\theta$ 和沿 x 轴正方向的力 $qE\cos\theta$ 的作用, 因此带电小球自 B 点以后在水平方向做匀加速运动, 在竖直方向上向下做匀加速运动, 运动轨迹如图 1.1-14 所示。

高考水平

1. 如图 1.1-15 所示, a 、 b 为两个带等量正电荷的固定小球, O 为 ab 连线的中点, c 、 d 为中垂线上的两个对称点, 且离 O 点很近。在 c 点由静止释放一个电子。

关于电子的运动, 下列叙述正确的是()

- A. 在 $c \rightarrow O$ 的过程中, 做匀加速运动
- B. 在 $c \rightarrow O$ 的过程中, 做加速度减小的变加速运动
- C. 在 O 点速度最大, 加速度为零
- D. 在 cd 间沿中垂线做振动

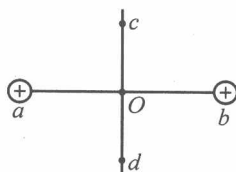


图 1.1-15

2. 如图 1.1-16 所示, 在光滑的水平绝缘平面上固定着三个等质量的可视为质点的带电小球 A 、 B 、 C , 三球排成一条直线。若释放 A 球(另外两球仍固定, 下同), 则释放瞬间 A 球的加速度为 1 m/s^2 , 方向向左; 若释放 C 球, 则 C 球的瞬时加速度为 2 m/s^2 , 方向向右。现同时释放三个球, 则释放瞬间 B 球的加速度大小为 _____ m/s^2 , 方向为 _____。



图 1.1-16

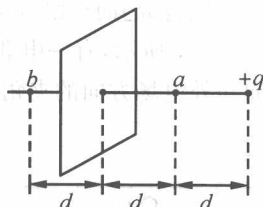


图 1.1-17

3. 如图 1.1-17 所示, 所带电荷量为 $+q$ 的点电荷与均匀带电薄板相距 $2d$, 点电荷到带电薄板的垂线通过板的几何中心。若图中 a 点处的电场强度为零, 根据对称性, 带电薄板在图中 b 点处产生的电场强度大小为 _____, 方向 _____。(静电力常量为 k)

纠错笔记

4. 如图 1.1-18 所示, a, b 为两个固定的、所带电荷量均为 $+q$ 的点电荷, 相距为 L 。通过其连线中点 O 作此线段的垂直平分面, 在此平面上有一个以 O 为圆心、半径为 $\frac{\sqrt{3}}{2}L$ 的圆, 其上有一个质量为 m 、所带电荷量为 $-q$ 的点电荷 c 做匀速圆周运动。求 c 的速率。

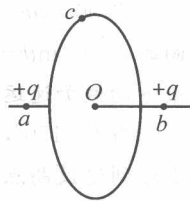


图 1.1-18

5. 如图 1.1-19 所示, 相距为 d 的平行金属板 A, B 竖直放置, 在两板之间水平放置一绝缘平板。有一质量为 m 、所带电荷量为 q ($q > 0$) 的小物块在与金属板 A 相距 l 处静止。若某一时刻在金属板 A, B 间加一大小为 $U_{AB} = -\frac{3\mu mgd}{2q}$ 的电压, 小物块与金属板只发生了一次碰撞, 碰撞后电荷量变为 $-\frac{1}{2}q$, 并以与碰前大小相等的速度反方向弹回。已知小物块与绝缘平板间的动摩擦因数为 μ , 不计小物块电荷量对电场的影响和碰撞时间。

- (1) 小物块与金属板 A 碰撞前瞬间的速度大小是多少?
- (2) 小物块碰撞后经过多长时间停止运动? 停在何处?

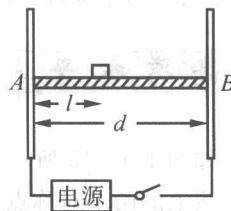


图 1.1-19

自主招生

6. 科学家在描述某类物质的带电性质时, 认为物质是由大量的电偶极子组成的, 平时由于电偶极子的排列方向杂乱无章, 因而该物质不显示带电的特性。当加上外电场后, 电偶极子绕其中心转动, 最后都趋向于沿外电场方向排列, 从而使物质中的合电场发生变化。
- (1) 如图 1.1-20 甲所示, 有一电偶极子放置在电场强度为 E 的匀强外电场中。若电偶极子的方向与外电场方向的夹角为 θ , 求作用在电偶极子上的电场力绕 O 点的力矩。

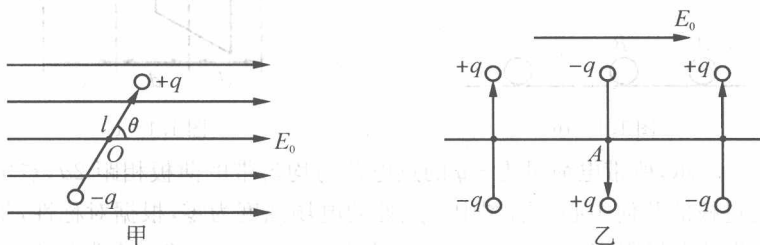


图 1.1-20

- (2) 求电偶极子在外电场中处于力矩平衡时,其方向与外电场方向夹角的可能值。
- (3) 现考察物质中的三个电偶极子,其中心在一条直线上,初始时刻如图乙排列,它们相互间隔距离恰等于 l 。加上外电场 E_0 后,三个电偶极子转到外电场方向。若在图中 A 点处引入一电荷量为 $+q_0$ 的点电荷(q_0 很小,不影响周围电场的分布),求该点电荷所受电场力的大小。

7. 灰尘是带电的。为净化空气中的灰尘,可利用以下两种装置:

装置一,将含有灰尘空气的玻璃圆桶(高 $H=1\text{ m}$ 、半径 $R=0.1\text{ m}$,如图 1.1-21 所示)放在电场强度 $E_1=1\times 10^4\text{ V/m}$ 的电场中,其场强方向沿着圆柱桶的轴线方向。经时间 $t_1=120\text{ s}$ 后,可以观察到容器中所有的灰尘均已沉积在底部。

装置二,沿圆柱筒的轴线紧拉着一根细导线,且将此导线跟高压电源连接。电源电压是这样选取的,使在容器壁上场强值恰好等于第 1 个实验的场强值 $1\times 10^4\text{ V/m}$ 。已知在这种情况下,场强 $E\propto \frac{1}{r}$, r 为离轴线的距离。

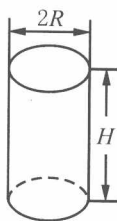


图 1.1-21

假设尘粒是同种的,其所带电荷量也相等。试确定第二个实验中尘粒沉积到容器壁所需的时间。由于空气中的尘粒不多,电荷体积可以忽略,所受阻力与速度成正比。

竞赛提高

8. 如图 1.1-22 所示, AA' 和 BB' 为两根无限长的绝缘线,它们都均匀带电,且电荷线密度都为 η 。将它们的端点平齐地平行放置,端点 A、B 相距为 a ,试求 A、B 连线中点 C 的电场强度。

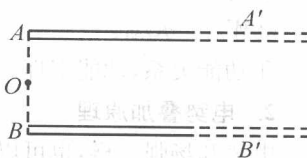


图 1.1-22

纠错笔记

9. 如图 1.1-23 所示, 电场线从正电荷 $+q_1$ 出发, 与正点电荷及负点电荷的连线成 α 角, 则该电场线进入负点电荷 $-q_2$ 的角度 β 为多大?

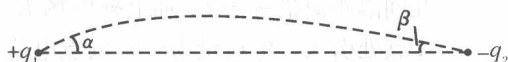


图 1.1-23

10. 定向电子束以速度 $v=10^5$ m/s 从细长缝中飞出(如图 1.1-24 所示), 束中电子密度 $n=10^{10}$ 粒/ m^3 。求离缝多远处电子束的厚度增加 1 倍。已知电子质量 $m=9\times 10^{-31}$ kg, 电子电荷量 $e=-1.6\times 10^{-19}$ C, 静电力恒量 $k=9\times 10^9$ N·m²/C²。

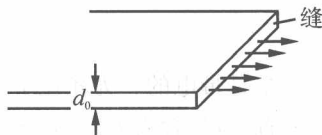


图 1.1-24

§ 1.2 电势能与电势

知识概要

学习札记

1. 电场力对电荷做功

(1) 电场力是保守力, 因此电场力对电荷做功只与该电荷的始末位置有关, 与其具体路径无关。

类比万有引力势能, 可以引入电势能 ϵ , 电场中某点 A 的电势能等于放在该点的电荷的电荷量与该点电势的乘积, 即 $\epsilon_A = q\varphi_A$ 。在电场中两点间移动电荷, 电场力所做的功与被移动的电荷的电荷量比值, 称为两点间的电势差, 即 $\frac{W_{AB}}{q} = U_{AB}$ 。电势差反映了电场力做功的能力, 同时也反映了场源电荷形成的电场的性质, 与参照点的选择无关。

(2) 电场力做功的计算方法:

① $W = F_{\text{电}} q$, 适用于电场力是恒力的情况。

② $W_{AB} = \epsilon_A - \epsilon_B$, 电场力做功等于电势能的改变。

③ $W_{AB} = qU_{AB}$ 。

④ 功能关系, 动能定理。

2. 电势叠加原理

电势和场强一样, 也可以叠加。因为电势是标量, 因此在多个点电荷所形成的电场中, 任一点的电势等于每个电荷单独存在时在该点产生的电势的代数和, 这就是电势叠加原理。由于电势是标量, 所以电势的叠加服从代数加法。根据点电荷电势的表达式和叠加原理, 可以求出任何电场的电势分布情况。

3. 电势

(1) 常见带电体的电势。

①点电荷电势:规定无穷远处为电势零点。若点电荷的电荷量为 Q , 则距场源为 r 处的电势 $\varphi = k \frac{Q}{r}$ 。

②均匀带电球壳、实心导体球周围及内部的电势: Q 为均匀带电球壳、实心导体球的电荷量, R 为球壳的半径, r 为该点到球壳球心的距离, 规定无穷远处为电势零点, 则在 $r \geq R$ 的情况下, $\varphi = k \frac{Q}{r}$; 在 $r \leq R$ 的情况下, $\varphi = k \frac{Q}{R}$ 。

(2) 电势计算的方法。

①定义法: $\varphi = \frac{W}{q}$ 。

例如, 场源电荷电荷量为 Q , 在离 Q 为 r 的 P 点处有一电荷量为 q 的检验电荷。如图 1.2-1 所示, 将该检验电荷由 P 点移至无穷远处(取无穷远处为零电势), 由于此过程中, 所受电场力为变力, 故将 q 移动的整个过程理解为由 P 移至很近的 P_1 (离 Q 距离为 r_1) 点, 再由 P_1 移至很近的 P_2 (离 Q 距离为 r_2) 点……直至无穷远处。在每一段很小的过程中, 电场力可视为恒力, 因此这一过程中, 电场力做功可表示为:

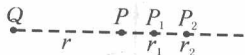


图 1.2-1

$$\begin{aligned} W &= k \frac{Qq}{r^2}(r_1 - r) + k \frac{Qq}{r_1^2}(r_2 - r_1) + k \frac{Qq}{r_2^2}(r_3 - r_2) + \dots \\ &\approx \frac{kQq}{rr_1}(r_1 - r) + \frac{kQq}{r_1r_2}(r_2 - r_1) + \frac{kQq}{r_2r_3}(r_3 - r_2) + \dots \\ &= \frac{kQq}{r} - \frac{kQq}{r_1} + \frac{kQq}{r_1} - \frac{kQq}{r_2} + \frac{kQq}{r_2} - \frac{kQq}{r_3} + \dots = k \frac{Qq}{r}, \end{aligned}$$

所以距场源电荷 Q 距离为 r 处的电势可表示为 $\varphi = k \frac{Q}{r}$ 。

②电势叠加原理。

电势是标量, 任一点的电势等于每个点电荷单独存在时在该点产生电势的代数和。

例如, 在球壳上任取一个微元, 设其电荷量为 Δq , 该微元在球心 O 处产生的电势 $U_i = \frac{k\Delta q}{R}$ 。由电势叠加原理, 可知 O 点处电势等于球壳表面各微元产生电势的代数和, 即 $\varphi =$

$$\sum U_i = \sum \frac{k\Delta q}{R} = \frac{k}{R} \sum \Delta q, \text{ 故带电球壳、实心导体球球心电势 } \varphi = k \frac{Q}{R}。$$

4. 等势面

(1) 电势相等的点组成的曲面叫做等势面。

(2) 等势面具有以下性质:

①在等势面上移动电荷, 电场力不做功。

②等势面与电场线处处正交。

③电势不同的等势面不能相交。

5. 匀强电场中电势差与场强的关系

匀强电场中任意两点间的电势差等于场强大小和这两点在沿场强方向的位移的乘积, 满足 $U = Ed$ 。

· 例题解析 ·

【例1】 静电透镜是利用静电场使电子束会聚或发散的一种装置,其中某部分静电场的分布情况如图 1.2-2 所示。虚线表示这个静电场在 xOy 平面内的一簇等势线,等势线形状相对于 x 轴、 y 轴对称。等势线的电势沿 x 轴正向增加,且相邻两条等势线的电势差相等。一个电子经过 P 点(其横坐标为 $-x_0$)时,速度与 Ox 轴平行。适当控制实验条件,使该电子通过电场区域时仅在 Ox 轴上方运动。在通过电场区域的过程中,该电子沿 y 轴方向的分速度 v_y 随位置坐标 x 变化的示意图是图 1.2-3 中的()

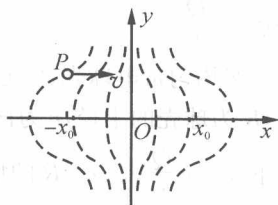


图 1.2-2

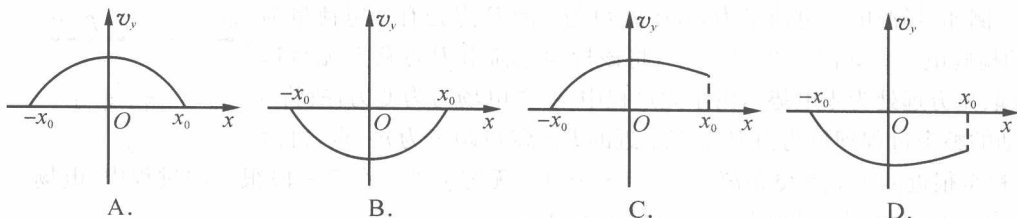


图 1.2-3

解析 根据等势面的情况,我们可以大致画一条电场线如图 1.2-4 所示。电子在 y 轴左侧受到的电场力指向右下方,可以分解为水平向右的分量和竖直向下的分量。同理,电子在 y 轴右侧受到的电场力指向右上方,可以分解为水平向右的分量和竖直向上的分量。所以,电子在整个运动过程中,水平方向一直在加速,当在 y 轴右侧运动的水平位移也为 x_0 时,其平均速度 v_x 比在 y 轴左侧运动的平均速度大,运动时间比在 y 轴左侧运动时间短。

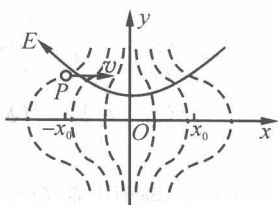


图 1.2-4

竖直方向,电子在 y 轴左侧运动时向下加速,在 y 轴右侧运动时向下减速,其加速度 a_y 是逐点变化的。由于越接近 x 轴,等势线越稀疏,电场线形状也越“平坦”,场强就越弱,因此电子在竖直方向的加速度 a_y 就越小。同时,因为电子在 y 轴右侧运动的时间短,所以它在竖直方向的速度不可能减为零。综上所述,正确的选项应为 D。

【例2】 如图 1.2-5 所示,BCD 是以 O 点为圆心、以 R 为半径的半圆弧。在 A 点有一电荷量为 $+q$ 的点电荷, O 点有一电荷量为 $-q$ 的点电荷,线段 $\overline{BA}=R$ 。现将一单位正电荷从 B 点沿半圆弧轨道 BCD 移到 D 点,在这一过程中电场力所做的功为 _____。

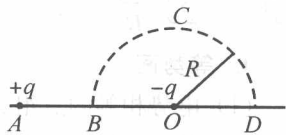


图 1.2-5

解析 单位正电荷从 B 点沿半圆弧轨道 BCD 移到 D 点的过程中,受到两个电场力的作用。这两个电场力都是变力,因此可采用电场力所做的功等于电势能的改变这一原理求解。因为做功与路径无关,所以 A 点的点电荷对单位正电荷所做的功等于单位正电荷在初、末两点的电势能的变化: $W_1 = k \frac{q}{R} - k \frac{q}{3R} = k \frac{2q}{3R}$; 位于 O 点的点电荷对单位正电荷所做的功等于单位正电荷在初、末两点的电势能变化,也就是 0 (因为电势没变)。故单位正电荷从 B 点沿半圆弧轨道 BCD 移到 D 点的过程中,电场力做正功,大小为 $k \frac{2q}{3R}$ 。

【例 3】 将两个电荷量均为 $q=3.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的小球, 分别固定在两根绝缘杆的一端, 并用绝缘的线系住这两端, 如图 1.2-6 所示。将两杆的另一端固定在公共轴 O 上, 使两杆可以绕 O 轴在水平面上做无摩擦的转动, 线和两杆长度均为 $l=5.0 \text{ cm}$ 。给这一系统加上匀强电场, 场强 $E=100 \text{ kV/m}$, 场强方向平行水平面且垂直于线。某一时刻将线烧断, 求当两个小球和转轴 O 在同一条直线上时, 杆受到的力(杆的重力不计)。

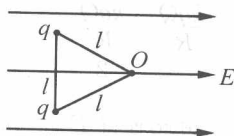


图 1.2-6

解析 线烧断以后, 两个球在电场力等外力的作用下绕 O 轴转动。当两个球和转轴 O 位于同一条直线上时, 两球仅具有沿场强方向的速度 v 。

$$\text{任意取一个球, 利用动能定理得: } Eq l \cos 30^\circ = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k \left(\frac{q^2}{2l} - \frac{q^2}{l} \right).$$

$$\text{由于向心力为拉力与两球间库仑力的合力, 因此 } F_T - k \frac{q^2}{4l^2} = m \frac{v^2}{l},$$

代入数据解得杆受到的拉力 $F_T = 7.6 \times 10^{-3} \text{ N}$ 。

【例 4】 如图 1.2-7 所示, 两个固定的均匀带电球面, 所带电荷量分别为 $+Q$ 和 $-Q$ ($Q > 0$), 半径分别为 R 和 $\frac{R}{2}$, 小球面与大球面内切于 C 点, 两球面球心 O 和 O' 的连线 MN 沿竖直方向。在 MN 与两球面的交点 B 、 O 和 C 处各开有足够小的孔, 因小孔损失的电荷量忽略不计。有一质量为 m , 电荷量为 q ($q > 0$) 的质点自 MN 线上离 B 点距离为 R 的 A 点竖直上抛。设静电力常量为 k , 重力加速度为 g 。

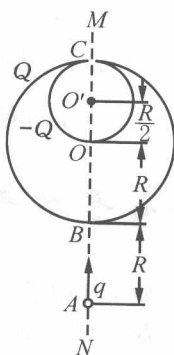


图 1.2-7

(1) 要使质点从 A 点上抛后能够到达 B 点, 所需的最小初动能是多少?

(2) 要使质点从 A 点上抛后能够到达 O 点, 在不同条件下所需的最小初动能各为多少?

解析 (1) 质点在 $A \rightarrow B$ 应做减速运动。如图 1.2-8 所示, 设质点在 A 点的最小初动能为 E_{k0} , 则根据能量守恒, 可得质点刚好能到达 B 点的条件为

$$\frac{kqQ}{R} - \frac{kqQ}{3R} + mgR = E_{k0} + \frac{kqQ}{2R} - \frac{kqQ}{5R},$$

$$\text{由此可得 } E_{k0} = mgR + \frac{7kqQ}{30R}.$$

(2) 质点在 $B \rightarrow O$ 的运动有三种可能情况:

$$\text{① 质点在 } B \rightarrow O \text{ 做加速运动, 对应条件为 } mg \leq \frac{4kqQ}{9R^2}.$$

此时只要质点能过 B 点, 也必然能到达 O 点, 因此质点能到达 O 点所需的最小初动能与第(1)问相同, $E_{k0} = mgR + \frac{7kqQ}{30R}$ 。

若 $mg = \frac{4kqQ}{9R^2}$, 则最小初动能应比 E_{k0} 略大一些。

$$\text{② 质点在 } B \rightarrow O \text{ 做减速运动, 对应条件为 } mg \geq \frac{4kqQ}{9R^2},$$

此时质点刚好能到达 O 点的条件为

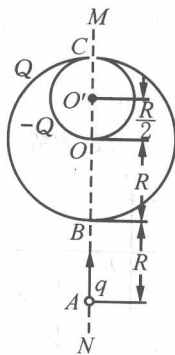


图 1.2-8

学习札记

$$\frac{kqQ}{R} - \frac{kqQ}{\frac{R}{2}} + mg(2R) = E_{k0} + \frac{kqQ}{2R} - \frac{kqQ}{\frac{5R}{2}},$$

$$\text{由此可得 } E_{k0} = 2mgR - \frac{11kqQ}{10R}.$$

③质点在 $B \rightarrow O$ 之间存在一平衡点 D (如图 1.2-9 所示), 在 $B \rightarrow D$ 质点做减速运动, 在 $D \rightarrow O$ 质点做加速运动, 对应条件为 $\frac{4kqQ}{9R^2} < mg < \frac{4kqQ}{R^2}$,

$$\text{设 } D \text{ 到 } O \text{ 点的距离为 } x, \text{ 则 } mg = \frac{kqQ}{\left(\frac{R}{2} + x\right)^2},$$

$$\text{即 } x = \sqrt{\frac{kqQ}{mg}} - \frac{R}{2}.$$

根据能量守恒, 质点刚好能到达 D 点的条件为

$$\frac{kqQ}{R} - \frac{kqQ}{\frac{R}{2} + x} + mg(2R - x) = E_{k0} + \frac{kqQ}{2R} - \frac{kqQ}{\frac{5R}{2}},$$

可得质点能到达 D 点的最小初动能

$$E_{k0} = \frac{5}{2}mgR + \frac{9kqQ}{10R} - 2\sqrt{kgmqQ}.$$

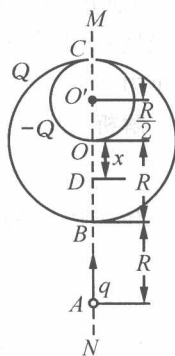


图 1.2-9

高考水平

纠错笔记

1. 质子和中子是由更基本的粒子, 即“夸克”组成的。两个强作用电荷相反(类似于正、负电荷)的夸克在距离很近时几乎没有相互作用(称为“渐近自由”); 在距离较远时, 它们之间就会出现很强的引力(导致所谓“夸克禁闭”)。作为一个简单的模型, 设这样的两夸克之

$$\text{间的相互作用力 } F \text{ 与它们之间的距离 } r \text{ 的关系为: } F = \begin{cases} 0, & 0 < r < r_1 \\ -F_0, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0, & r > r_2 \end{cases}$$

式中 F_0 为大于零的常量, 负号表示引力。用 U 表示夸克间的势能, 令 $U_0 = F_0(r_2 - r_1)$, 取无穷远为势能零点。图 1.2-10 所示的 $U-r$ 图象中正确的是()

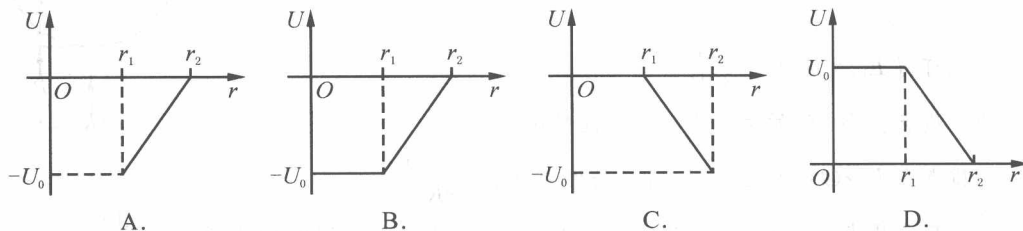


图 1.2-10

2. 如图 1.2-11 所示, 在一个粗糙的水平面上, 彼此靠近放置两个带同种电荷的小物块。由静止释放后, 两个物块向相反方向运动, 并最终停下。在物块的运动过程中, 下列说法正确的是()

- A. 两个物块的电势能逐渐减少
- B. 物块受到的库仑力不做功
- C. 两个物块的机械能守恒



图 1.2-11