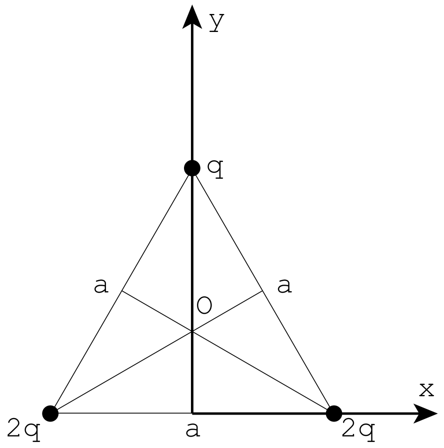
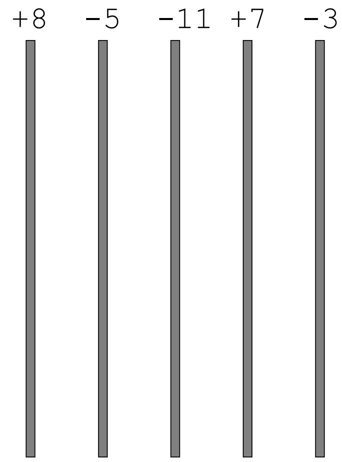
期中考试试卷

一、填空【11 分】

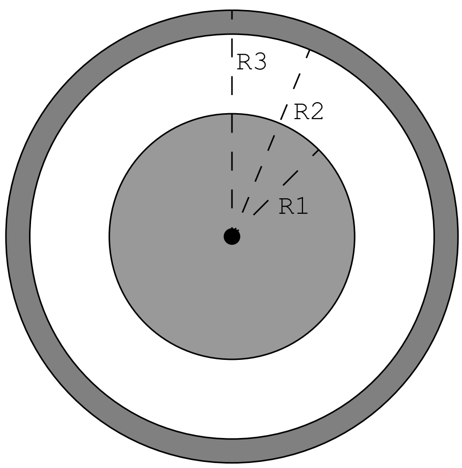
1. 一边长为 a 的正三角形顶点上分别放置了电量为 $q, 2q, 2q$ 的三个点电荷，则三角形重心 O 处的电场强度为 ______ ，方向为 ______ 。将一个电量为 q 的电荷从无穷远处移动到 O 点，外力需做功 ______ 。
2. 已知 5 个薄导体板相互靠得很近，带电量如右图，单位为库伦，若导体板达到静电平衡，则各板 10 个表面从左至右的电荷量分别为 ____________________ 库伦。



一 (1) 题图



一 (2) 题图



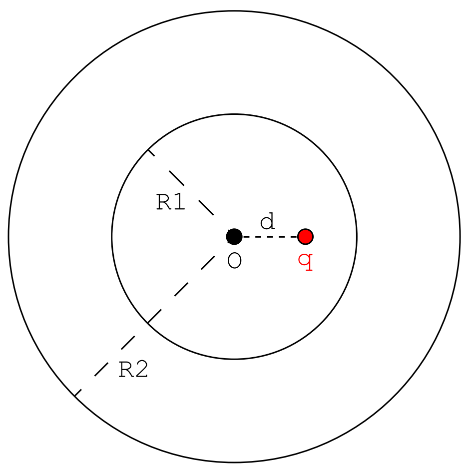
二、【12 分】半径为 R_1 的导体球外套一个与它同心的导体球壳，壳的内外半径分别为 R_2, R_3 ，球与壳之间充满空气，壳外也是空气。使球带电 Q 。

1.求这个系统储存的静电能。

2.如果用导线把球与球壳连接，系统的静电能又如何?

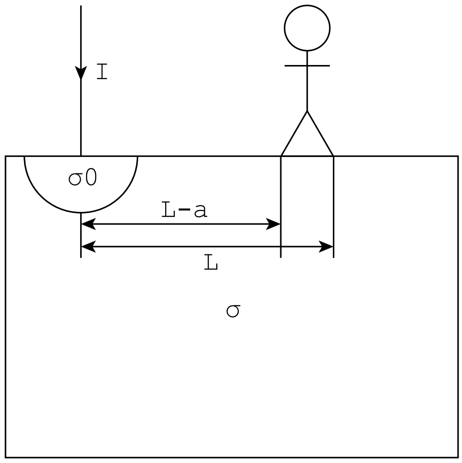
三、【11 分】内外两层导体球壳半径分别为 R_1, R_2 ，厚度忽略不计。在腔内离球心的距离为 d 处 $(d < R_1)$ 固定一点电荷 q ，选无穷远为电势零点。

1. 求球心 O 处的电势。
2. 若内外两层导体球壳内 $(R_1 < r < R_2)$ 充满绝对介电常数为 ϵ 的电介质，求球心 O 处的电势。



四、【12 分】一人在雷雨天站在大地表面。设大地的电导率为 σ 。雷电通过离人水平距离为 L ，半径为 R ，上表面与地面齐平，电导率为 σ_0 的导体半球向大地流入强度为 I 的电流。求

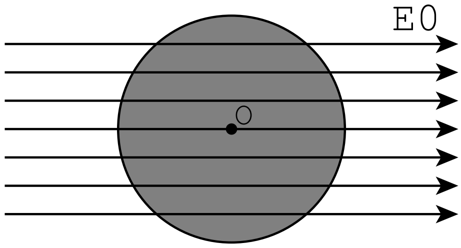
1. 当人向雷电击中方向迈出距离为 a 的一步时两脚之间的电势差。
2. 半球面上和大地中的电荷分布。
3. 大地所发的焦耳热功率密度分布。



五、【15 分】一半径为 R 的导体球的球心位于 x 轴上的 O 点处，置于平行于 x 轴的均匀外场 E_0 中，并达到静电平衡，求

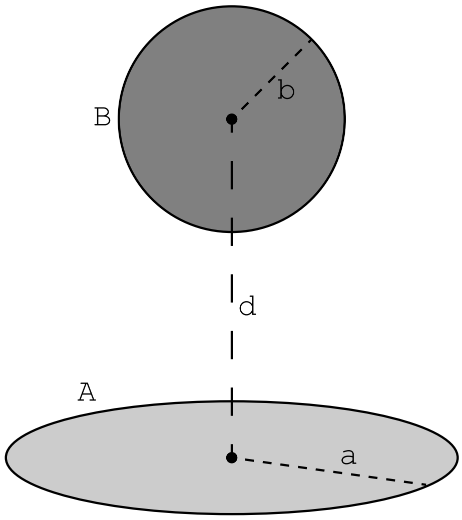
1. 导体球表面的电荷面密度。
2. 导体球在外场 E_0 中的电势能。
3. x 轴上距离球心为 $r(r \gg R)$ 处的电场强度。

「提示：静电平衡下的导体球可等效为位于球心处的电偶极子」



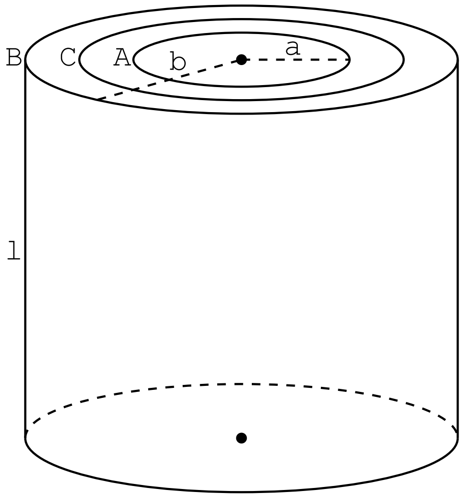
六、【14 分】如图，一带电圆盘 A 的半径为 a ，一带电球 B 的半径为 b ，二者的中心距离为 d ，中心连线和圆盘面垂直，圆盘 A 电荷均匀分布，面电荷密度为 σ_a ，球 B 的电量为 Q_B ，其体电荷密度按照 $\rho_B = Ce^{r/b}$ 的形式随半径变化， C 是待定常数。忽略静电感应，求

1. 球 B 电荷分布形式中的常数 C 。
2. 圆盘 A 对球 B 的库伦力作用。



七、【25 分】圆柱体导体半径为 a ，长度为 l ，外面套一个与它共轴且等长的导体圆筒，筒的外半径为 b ，两筒之间充满两层厚度相同的均匀导电介质，从内层到外层电导率分别为 σ_1, σ_2 ，介电常数分别为 ϵ_1, ϵ_2 ，如图所示，忽略边缘效应。假设从圆柱通向圆筒的恒定电流为 I ，求

1. 导体圆柱与圆筒之间的电阻。
2. 导体圆柱与圆筒之间的电容。
3. 导电介质内电流密度分布，电场强度分布和电势差 V_{AC}, V_{CB}。
4. 各交界面上的自由，极化以及总电荷面密度。
5. 外筒表面受到的静电压强。



期中考试评分细则

答案正确 但是过程较少	答案错误 但是思路正确	答案正确 但是思路错误 或者没有过程	答案错误 过程错误较多 但与正确答案 有一定联系	答案错误 并与正确答案 相去甚远 或仅作答 很小的一部分

对于不能得满分的情况，分为以上五种，分别记为情况 I, II, III, IV, V。
比情况 I 更好的情况，得满分；比情况 V 更差的情况，得 0 分。

一、【共 11 分】

(1) 第一空答案：$\dfrac{3q}{4\pi\epsilon_0 a^2}$

「2 分。等价表达式都得满分，但是回答 $\dfrac{3q}{4\pi\epsilon_0 a^2}, \dfrac{3q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}, \dfrac{3q^2}{4\pi\epsilon_0 a}$ 不得分」；

第二空答案：e_x

「2 分。回答“竖直向上”“X 轴正方向”“$\mathbf{i}$ 方向”都得满分，但是回答 $-e_x$ 不得分」；

第三空答案：$\dfrac{5\sqrt{3}q^2}{4\pi\epsilon_0 a}$

「2 分。等价表达式都得满分，但是回答 $\dfrac{5\sqrt{3}q}{4\pi\epsilon_0 a}, \dfrac{5\sqrt{3}q}{4\pi\epsilon_0 a^2}, \dfrac{5\sqrt{3}q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$ 不得分」。

(2) 答案：$-2, 10, -10, 5, -5, -6, 6, 1, -1, -2$

「5 分。每个正确得 0.5 分，并将最后得分四舍五入」。

二、【共 12 分】

(1)
根据高斯定理，电场强度为

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \mathbf{0}, & r < R_1, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}}, & R_1 < r < R_2, \\ \mathbf{0}, & R_2 < r < R_3, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}}, & r > R_3, \end{cases}$$

电能为

$$W = \int_{\mathbb{R}^3} \frac{1}{2}\epsilon_0 \mathbf{E}^2 dV = \left(\int_{R_1}^{R_2} + \int_{R_3}^{\infty}\right) \frac{1}{2}\epsilon_0 \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\right)^2 4\pi r^2 dr = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right).$$

「8 分。情况 I – V 分别得 7, 5, 3, 2, 1 分」。

(2)
接上导线后，导体球与导体球壳电势相等。令此时导体球带电量为 q，根据高斯定理，电场强度为

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \mathbf{0}, & r < R_1, \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}}, & R_1 < r < R_2, \\ \mathbf{0}, & R_2 < r < R_3, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}}, & r > R_3, \end{cases}$$

电势为

$$V(r) = \int_r^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{R} = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_3} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right), & r < R_1, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_3} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_2}\right), & R_1 < r < R_2, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_3}, & R_2 < r < R_3, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}, & R > R_3, \end{cases}$$

因为导体球与导体球壳电势相等，所以

$$\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_3} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_3},$$

$$q = 0,$$

所以电场强度为

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \mathbf{0}, & r < R_3, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}}, & r > R_3, \end{cases}$$

电能为

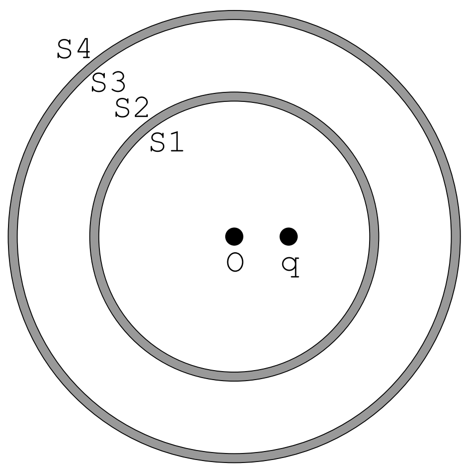
$$W = \int_{\mathbb{R}^3} \frac{1}{2}\epsilon_0 \mathbf{E}^2 dV = \int_{R_3}^{\infty} \frac{1}{2}\epsilon_0 \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\right)^2 4\pi r^2 dr = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R_3}.$$

「4 分。情况 I – V 分别得 3, 3, 1, 1, 0 分」

三、【共 11 分】

(1)

如图所示，令内部的导体球壳内半径与外半径分别为 $R_1 - \delta_1, R_1$，内表面与外表面分别记为 S_1, S_2；外部的导体球壳内半径与外半径分别为 $R_2 - \delta_2, R_2$，内表面与外表面分别记为 S_3, S_4。

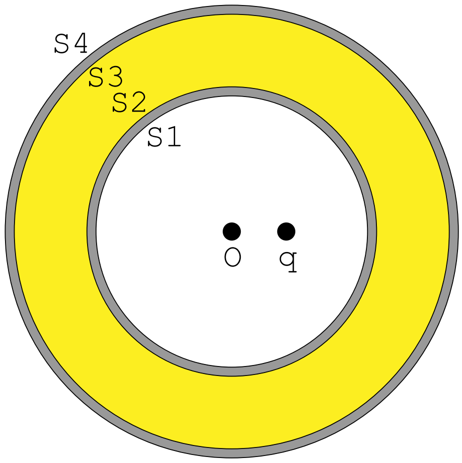


I. 选取半径为 $r_1(R_1 - \delta_1 < r_1 < R_1)$ 的球面「高斯面」，根据高斯定理，可得表面 S_1 带电量为 $-q$；
II. 根据内球壳总体不带电的性质，可得表面 S_2 带电量为 q；
III. 选取半径为 $r_2(R_2 - \delta_2 < r_2 < R_2)$ 的球面「高斯面」，根据高斯定理，可得表面 S_3 带电量为 $-q$；
IV. 根据外球壳总体不带电的性质，可得表面 S_4 带电量为 q。

而表面 S_1, S_2, S_3, S_4 均为球面，球面与球心 O 处的距离处处相等。因此，球心 O 处的电势为

$$V = \lim_{\delta_1 \to 0, \delta_2 \to 0} \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{q}{d} - \frac{q}{R_1 - \delta_1} + \frac{q}{R_1} - \frac{q}{R_2 - \delta_2} + \frac{q}{R_2}\right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d}.$$

「5 分。情况 I – V 分别得 4, 4, 4, 2, 1 分」



(2)

由 (1) 可得，表面 S_1 带电量为 $-q$，表面 S_2 自由电荷的电量为 q，表面 S_3 自由电荷的电量为 $-q$，表面 S_4 带电量为 q。令表面 S_2, S_3 极化电荷的电量分别为 q_2', q_3'，电介质内部极化电荷的密度为 ρ'。

选取半径为 $r_3(R_1 < r_3 < R_2 - \delta_2)$ 的球面「高斯面」，根据高斯定理，电位移矢量为

$$D = \frac{q}{4\pi r_3^2},$$

因此，极化矢量为

$$P = D - \epsilon_0 E = \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) D = \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) \frac{q}{4\pi r_3^2},$$

$$\rho' = -\operatorname{div} \mathbf{P} \equiv 0,$$

因此，极化电荷只分布在表面 S_2, S_3 上。

$$q_2' = -\int_{\partial B(0,r_3)} \mathbf{P} \cdot d\mathbf{A} = -P(r_3) 4\pi r_3^2 = -\left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) q,$$

$$q_3' = -q_2' = \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) q,$$

因此，球心 O 处的电势为

$$\begin{aligned} V &= \lim_{\delta_1 \to 0, \delta_2 \to 0} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{d} - \frac{q}{R_1 - \delta_1} + \frac{q}{R_1} - \frac{q}{R_2 - \delta_2} + \frac{q}{R_2} + \frac{q_2'}{R_1} + \frac{q_3'}{R_2 - \delta_2} \right) \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{d} - \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right). \end{aligned}$$

「6 分。情况 I – V 分别得 5, 5, 4, 3, 1 分」

四、【共 12 分】

(1)
电流密度分布为

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}, r > 0,$$

电场强度分布为

$$E = \begin{cases} \frac{I}{2\pi\sigma_0 r^2}, & 0 < r < R, \\ \frac{I}{2\pi\sigma r^2}, & r > R, \end{cases}$$

因此两脚之间的电势差为

$$V = \int_{L-a/2}^{L+a/2} E dr = \frac{I}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{L-a/2} - \frac{1}{L+a/2}\right) = \frac{I}{2\pi\sigma}\frac{a}{L^2 - a^2/4} \approx \frac{I}{2\pi\sigma}\frac{a}{L^2}.$$

「5 分。表达式可能不尽相同，但是只要在 $a \ll L$ 的情况下，近似结果与答案相同则得满分；计算结果为负值，但是绝对值近似结果与答案相同也得满分。情况 I – V 分别得 4, 4, 3, 2, 1 分」

(2)
半球面上的电荷面密度为

$$\rho_S = \epsilon_0\left(\lim_{r\searrow R} E - \lim_{r\nearrow R} E\right) \equiv \frac{\epsilon_0 I}{2\pi R^2}\left(\frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma_0}\right),$$

大地中的电荷密度为

$$\rho = \epsilon_0(\mathrm{div}\ \mathbf{E}) \equiv 0.$$

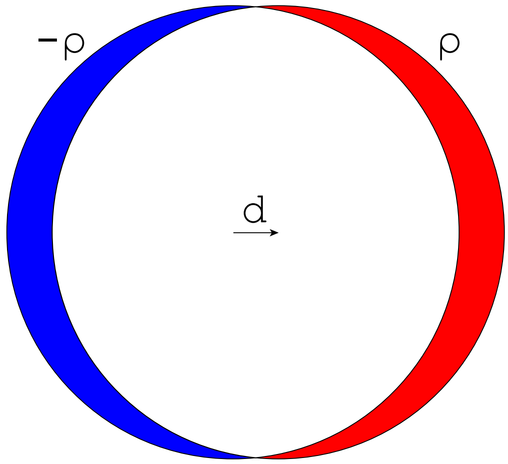
「5 分。情况 I – V 分别得 4, 4, 3, 2, 1 分」

(3)
焦耳热功率密度为

$$p = \frac{J^2}{\sigma} = \frac{I^2}{4\pi^2 r^4 \sigma}.$$

「2 分。情况 I – V 分别得 1, 1, 1, 1, 1 分」

五、【共 15 分】



(1)
导体球在外场中极化，产生的感应电荷相当于右图所示的情况，根据习题 1.12 的结论，可以得出，在右图所示的情况中，空白区域内部电场是匀强电场，电场强度为

$$\mathbf{E} = -\frac{\rho}{3\epsilon_0}\mathbf{d},$$

这个电场强度与外电场抵消了，因为导体球内部电场强度为 $\mathbf{0}$，所以

$$\mathbf{E} + \mathbf{E}_0 = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{d} = \frac{3\epsilon_0}{\rho}\mathbf{E}_0,$$

等效的电偶极矩为

$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} = \rho\frac{4}{3}\pi R^3\mathbf{d} = 4\pi\epsilon_0 R^3\mathbf{E}_0,$$

因此导体球表面的电荷面密度为

$$\rho_S = \epsilon_0 \lim_{r\searrow R}\mathbf{E}\cdot\mathbf{n} = \epsilon_0\left(E_0\cos\theta + \frac{2p\cos\theta}{4\pi\epsilon_0 R^3}\right) = 3\epsilon_0 E_0\cos\theta\,.$$

「9 分。表达式与高斯定理、电荷面密度计算相关至少能得 5 分，如果过程与题目相关性较大至少能得 6 分」

(2)
电势能为

$$W = -pE_0 = qd = -4\pi\epsilon_0 R^3 E_0^2\,.$$

「3 分。情况 I – V 分别得 2, 2, 2, 1, 1 分」

(3)
电场强度为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_p = \mathbf{E}_0 + \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \left(1 + \frac{2R^3}{r^3}\right)\mathbf{E}_0\,.$$

「3 分。情况 I – V 分别得 2, 2, 2, 1, 1 分」

六、【共 14 分】

(1)
对于B球，在距离球心为 $r-r+dr$ 的区域 $B(0,r+dr)\backslash B^0(0,r)$ 内，电荷量为

$$dQ_B=\rho_B 4\pi r^2 dr=Ce^{r/b}4\pi r^2 dr,$$

因此，

$$Q_B=\int_0^b Ce^{r/b}4\pi r^2 dr=4\pi Cb^3\int_0^1 x^2e^x dx=4\pi(e-2)Cb^3,$$

其中 $x=r/b$，因此，

$$C=\frac{Q_B}{4\pi(e-2)b^3}.$$

「8 分。表达式包含 $\int \rho_B dV, \int \rho_B 4\pi r^2 dr$ 至少能得 7 分，如果不是等价表达式则得 0 分」

(2)
根据高斯定理，B球在球外产生的电场强度为

$$\mathbf{E}=\frac{Q_B}{4\pi\epsilon_0 R^2}\hat{\mathbf{R}},$$

投影到 Z 轴的分量为

$$E_z=-\frac{Q_B}{4\pi\epsilon_0(r^2+d^2)}\frac{d}{(r^2+d^2)^{1/2}}=-\frac{Q_B}{4\pi\epsilon_0}\frac{d}{(r^2+d^2)^{3/2}},$$

对于盘A，在距离圆心为 $r-r+dr$ 的区域 $B(0,r+dr)\backslash B^0(0,r)$ 内，电荷量为

$$dQ_A=\sigma_A 2\pi r dr,$$

这个区域受到的电场力为

$$dF_{BA}=E_z dQ_A=-\frac{\sigma_A Q_B}{2\epsilon_0}\frac{rd}{(r^2+d^2)^{3/2}}dr,$$

因此盘A受到的总电场力为

$$F_{BA}=-\frac{\sigma_A Q_B}{2\epsilon_0}\int_0^a\frac{rd}{(r^2+d^2)^{3/2}}dr=-\frac{\sigma_A Q_B}{2\epsilon_0}\int_0^{a/d}\frac{x}{(1+x^2)^{3/2}}dx=-\frac{\sigma_A Q_B}{2\epsilon_0}\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+(a/d)^2}}\right),$$

盘A对球B的库仑力作用为

$$F_{AB} = -F_{BA} = \frac{\sigma_A Q_B}{2\epsilon_0}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+(a/d)^2}}\right),$$

方向为 Z 轴正方向。

「6 分。表达式与受力计算或电场强度相关至少能得 5 分，如果只有文字说明，没有表达式则得 0 分」

七、【共 25 分】

(1)
电阻为

$$R = \frac{1}{\sigma_1}\int_a^{(a+b)/2}\frac{dr}{2\pi rl} + \frac{1}{\sigma_2}\int_{(a+b)/2}^{b}\frac{dr}{2\pi rl} = \frac{1}{2\pi l}\left(\frac{1}{\sigma_1}\log\frac{a+b}{2a} + \frac{1}{\sigma_2}\log\frac{2b}{a+b}\right).$$

「3 分。情况 I – V 分别得 2, 2, 2, 1, 1 分」

(2)
令内筒与外筒带电量分别为 $Q, -Q$，根据高斯定理，电场强度为

$$E = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi\epsilon_1 rl}, & a < r < \frac{a+b}{2}, \\ \frac{Q}{2\pi\epsilon_2 rl}, & \frac{a+b}{2} < r < b, \end{cases}$$

内筒与外筒的电势差为

$$V = \int_a^b E dr = \frac{Q}{2\pi l}\left(\frac{1}{\epsilon_1}\log\frac{a+b}{2a} + \frac{1}{\epsilon_2}\log\frac{2b}{a+b}\right),$$

电容为

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi l}{\frac{1}{\epsilon_1}\log\frac{a+b}{2a} + \frac{1}{\epsilon_2}\log\frac{2b}{a+b}}.$$

「3 分。情况 I – V 分别得 2, 2, 2, 1, 1 分」

(3)
电流密度为

$$J = \frac{I}{2\pi rl}, a < r < b,$$

电场强度为

$$E = \frac{J}{\sigma} = \begin{cases} \frac{I}{2\pi\sigma_1 rl}, & a < r < \frac{a+b}{2}, \\ \frac{I}{2\pi\sigma_2 rl}, & \frac{a+b}{2} < r < b, \end{cases}$$

电势差为

$$V_{AC} = \int_a^{(a+b)/2} E dr = \frac{I}{2\pi\sigma_1 l} \log\frac{a+b}{2a},$$

$$V_{CB} = \int_{(a+b)/2}^{b} E dr = \frac{I}{2\pi\sigma_2 l} \log\frac{2b}{a+b}.$$

「10 分。得分分为两部分：a) 电流密度计算正确得 2 分，电场强度每个区域计算正确得 2 分，电势差每个计算正确得 2 分，这一部分得分记为 $A(A \leq 10)$；b) 表达式与题目相关得 2 分。最后得分为 $\max(A,2)$」

(4)
电位移矢量为

$$D = \epsilon E = \begin{cases} \frac{I}{2\pi rl}\frac{\epsilon_1}{\sigma_1}, & a < r < \frac{a+b}{2}, \\ \frac{I}{2\pi rl}\frac{\epsilon_2}{\sigma_2}, & \frac{a+b}{2} < r < b, \end{cases}$$

极化矢量为

$$P = D - \epsilon_0 E = \begin{cases} \frac{I}{2\pi rl}\frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\sigma_1}, & a < r < \frac{a+b}{2}, \\ \frac{I}{2\pi rl}\frac{\epsilon_2 - \epsilon_0}{\sigma_2}, & \frac{a+b}{2} < r < b, \end{cases}$$

关于界面A：

$$\rho_{S,\mathrm{free}} = \lim_{r \searrow a} D = \frac{I}{2\pi al}\frac{\epsilon_1}{\sigma_1},$$

$$\rho_{S,\mathrm{ind}} = -\lim_{r \searrow a} P = -\frac{I}{2\pi al}\frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\sigma_1},$$

$$\rho_{S,\mathrm{total}} = \epsilon_0 \lim_{r \searrow a} E = \frac{I}{2\pi al}\frac{\epsilon_0}{\sigma_1},$$

关于界面B：

$$\rho_{S,\text{free}} = -\lim_{r\nearrow b} D = -\frac{I}{2\pi bl}\frac{\epsilon_2}{\sigma_2},$$

$$\rho_{S,\text{ind}} = \lim_{r\nearrow b} P = \frac{I}{2\pi bl}\frac{\epsilon_2-\epsilon_0}{\sigma_2},$$

$$\rho_{S,\text{total}} = -\epsilon_0\lim_{r\nearrow b} E = -\frac{I}{2\pi bl}\frac{\epsilon_0}{\sigma_2},$$

关于界面C：

$$\rho_{S,\text{free}} = \lim_{r\searrow(a+b)/2} D - \lim_{r\nearrow(a+b)/2} D = \frac{I}{\pi(a+b)l}\left(\frac{\epsilon_2}{\sigma_2}-\frac{\epsilon_1}{\sigma_1}\right),$$

$$\rho_{S,\text{ind}} = -\left(\lim_{r\searrow(a+b)/2} P - \lim_{r\nearrow(a+b)/2} P\right) = -\frac{I}{\pi(a+b)l}\left(\frac{\epsilon_2-\epsilon_0}{\sigma_2}-\frac{\epsilon_1-\epsilon_0}{\sigma_1}\right),$$

$$\rho_{S,\text{total}} = \epsilon_0\left(\lim_{r\searrow(a+b)/2} E - \lim_{r\nearrow(a+b)/2} E\right) = \frac{I}{\pi(a+b)l}\left(\frac{\epsilon_0}{\sigma_2}-\frac{\epsilon_0}{\sigma_1}\right),$$

「6 分。得分分为三部分：a) $r=a,b$ 处每个计算正确得 0.5 分，$r=(a+b)/2$ 处每个计算正确得 1 分，这一部分得分记为 $A(A\leq 6)$；b) D,P 每个区域计算正确得 0.5 分，这一部分得分记为 $B(B\leq 2)$；c) 回答 $P=D-\epsilon_0 E$ 或等价表达式得 1 分。最后得分为 $\max(A,B,1)$，并四舍五入」

(5)
假设静电压强是 Pressure，静电力将外筒内表面向外推出体积 ΔVol「非常小」，此时静电力做功为

$$\text{Work} = \text{Pressure}\cdot\Delta\text{Vol},$$

做功转化为电场能量的变化，这个变化为

$$\Delta\text{Energy} \approx \left(\frac{1}{2}\lim_{r\nearrow b} D\lim_{r\nearrow b} E\right)\Delta\text{Vol} = \left(\frac{1}{2}\frac{I}{2\pi bl}\frac{\epsilon_2}{\sigma_2}\frac{I}{2\pi\sigma_2 bl}\right)\Delta\text{Vol} = \left(\frac{I^2\epsilon_2}{8\pi^2 b^2 l^2\sigma_2^2}\right)\Delta\text{Vol},$$

$$\text{Work} = \Delta\text{Energy},$$

因此，

$$\text{Pressure} = \frac{I^2\epsilon_2}{8\pi^2 b^2 l^2\sigma_2^2}.$$

「3 分。情况 I – V 分别得 2, 2, 2, 1, 1 分」