2 静电场与恒定电场

2.1 静电场的基础知识

- 2.1.1 场强的计算与例子
- 2.1.2 场强的通量与散度
- 2.1.3 场强的环量与旋度
- 2.1.4 静电场的电位函数
- 2.1.5 电偶极子和电场线

2.2 介质中的静电场

- 2.2.1 极化强度与极化电荷密度
- 2.2.2 电位移矢量的通量与散度
- 2.2.3 极化强度与相对介电常数
- 2.2.4 极化强度与极化电荷计算
- 2.2.5 泊松方程与拉普拉斯方程

2.3 静电场的边界条件

- 2.3.1 电位移法向边界条件
- 2.3.2 场强的切向边界条件
- 2.3.3 电位函数的边界条件
- 2.3.4 分界面上的电场方向
- 2.3.5 电荷密度的计算方法

2.5 静电场的其它问题

- 2.5.1 双导体与孤立导体电容
- 2.5.2 常见导体系统电容公式
- 2.5.3 多导体系统的部分电容
- 2.5.4 静电场的能量及其密度
- 2.5.5 计算静电力的虚位移法

2.6 恒定电场

- 2.6.1 电流与电流密度矢量
- 2.6.2 恒定电场的基本性质
- 2.6.3 恒定电场的边界条件
- 2.6.4 静电场比拟法与电导
- 2.6.5 损耗功率与焦耳定律

2.1 静电场的基础知识

大物笔记, 文件夹.

2.1.1 场强的计算与例子

• 物理概念

- \circ 电场力: $m{F}_{21}=rac{q_1q_2}{4\piarepsilon_0}rac{m{e}_R}{R^2}=rac{q_1q_2}{4\piarepsilon_0}rac{m{R}}{R^3}=rac{q_1q_2}{4\piarepsilon_0}m{
 abla}rac{-1}{R}.$
- \circ 电场强度: $m{E} = rac{q}{4\piarepsilon_0}rac{m{e}_R}{R^2} = rac{q}{4\piarepsilon_0}rac{m{R}}{R^3} = rac{q}{4\piarepsilon_0}m{
 abla}rac{-1}{R}$

约定

- 观测点 (场点) r = (x, y, z).
- 电荷处 (源点) r' = (x', y', z').

• 例子

。 无限失事电量透射电场: $E=\frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0 r}$.

。 带电圆环轴线上的电场: $E=rac{qz}{4\piarepsilon_0(z^2+r^2)^{rac{3}{2}}}.$

2.1.2 场强的通量与散度

真空中静电场的高斯定理:

- 场强 E
 - 。 积分形式: $\oint_S m{E} \cdot \mathrm{d} m{S} = rac{Q}{arepsilon_0}.$
 - 。 微分形式: $oldsymbol{
 abla} \cdot oldsymbol{E} = rac{
 ho}{arepsilon_0}.$
- 电位移矢量 $oldsymbol{D}=arepsilon_0oldsymbol{E}$
 - 。 积分形式: $\oint_S m{D} \cdot \mathrm{d} m{S} = Q.$
 - 微分形式: $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho$.

2.1.3 场强的环量与旋度

真空中静电场的斯托克斯定理:

- $\oint_{l} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0.$
- $\nabla \times \boldsymbol{E} = \boldsymbol{0}$.

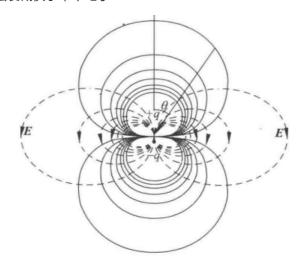
2.1.4 静电场的电位函数

- 一般的: $\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla}\varphi$.
- 点电荷: $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R}$.

2.1.5 电偶极子和电场线

- 电偶极距 $m{P}_{
 m e}=qm{l}$.
 - 。 要求点电荷等值异号、相距很近.
 - 。 方向由负电荷指向正电荷.
- 电位函数 $arphi=rac{ql\cos heta}{4\piarepsilon_0r^2}=rac{m{P}_{
 m e}\cdotm{e}_r}{4\piarepsilon_0r^2}.$
 - 。 要求观察点远离电偶极子.
 - 。 等位面 $arphi=arphi_0\Rightarrow r^2=rac{ql\cos heta}{4\piarepsilon_0arphi_0}.$
 - 。 电偶极子的电位衰减快于单个电子.
- 电场强度 $m{E} = rac{P_{
 m e}\cos heta}{2\piarepsilon_0 r^3}m{e}_r + rac{P_{
 m e}\sin heta}{4\piarepsilon_0 r^3}m{e}_ heta.$

- 。 要求观察点远离电偶极子.
- \circ 电场线 $\mathbf{E} \times d\mathbf{l} = 0 \Rightarrow r = C \sin^2 \theta$.
- 。 电偶极子的场强衰减快于单个电子.



2.2 介质中的静电场

2.2.1 极化强度与极化电荷密度

- 极化强度
 - 。 极化强度定义: $oldsymbol{P} := \lim_{\Delta V o 0} \sum_{i=1}^n rac{oldsymbol{P}_i}{\Delta V}.$
 - \circ 一般通过另一种定义计算: $m{P}\equiv arepsilon_0\chi_{
 m e}m{E}$.
- 电介质中的电位

$$\circ \ \varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \oint_{S'} \frac{\boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{e}_{\mathrm{n}} \, \mathrm{d}S'}{R} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{V'} \frac{\boldsymbol{\nabla}' \cdot \boldsymbol{P}}{R} \, \mathrm{d}V'.$$

$$\circ \ \varphi = \oint_{S'} \frac{\rho_{\mathrm{p}} \, \mathrm{d}S'}{4\pi\varepsilon_0 R} + \int_{V'} \frac{\rho_{\mathrm{ps}} \, \mathrm{d}V'}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

- 极化电荷密度
 - 。 极化电荷体密度 $ho_{
 m p} = -oldsymbol{
 abla} oldsymbol{\cdot} oldsymbol{P}_{
 m .}$
 - 。 极化电荷面密度 $ho_{
 m ps} = m{P} \cdot m{e}_{
 m n}$.
- 总束缚电荷 $Q=Q_{\mathrm{p}}+Q_{\mathrm{ps}}.$

2.2.2 电位移矢量的通量与散度

- 电位移矢量
 - 。 考虑 $oldsymbol{
 abla} \cdot oldsymbol{E} = rac{
 ho +
 ho_{
 m p}}{arepsilon_{
 m 0}} = rac{
 ho oldsymbol{
 abla} \cdot oldsymbol{P}}{arepsilon_{
 m 0}}.$

3

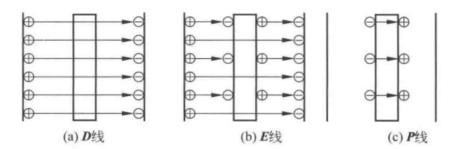
- \circ 于是定义电位移矢量 $oldsymbol{D}:=arepsilon_0oldsymbol{E}+oldsymbol{P}.$
- 介质中的高斯定理
 - 。 微分形式: $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho$.
 - 。 积分形式: $\oint_S m{D} \cdot \mathrm{d} m{S} = Q.$

2.2.3 极化强度与相对介电常数

- 极化强度: $\mathbf{P} \equiv \varepsilon_0 \chi_{\rm e} \mathbf{E}$.
 - \circ 由此定义的介质的极化率 χ_e 无量纲.
 - 。 对于线性介质, χ_e 与 E 无关.
 - \circ 对于非线性介质, χ_e 是 E 的函数.
 - \circ 对于各向同性的介质, χ_e 是一个系数.
 - \circ 对于各向异性的截止, χ_e 是一个张量.
- 电位移矢量: $\mathbf{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} \equiv \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \equiv \varepsilon \mathbf{E}$.
 - \circ 相对介电常数 ε_r 无量纲.
 - 介电常数 $\varepsilon := \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 单位为 F/m.
 - · 三个基本电磁参数:介电常数、磁导率、电导率.
 - 。 上式也称为介质中的电场物质 (本构) 方程.
 - 在真空中 $\varepsilon_0 = 1$, 在介质中 $\varepsilon_0 > 1$.

2.2.4 极化强度与极化电荷计算

- 相互关系与矢量方向
 - \circ 电场强度 E、极化强度 P 和电位移 D 之间是线性关系.
 - **D**线由正的自由电荷发出,终止于负的自由电荷.
 - 。 E 线的起止点可以在自由电荷上, 也可以在极化电荷上.
 - 。 P 线由负的极化电荷发出, 终止于正的极化电荷.



• 极化强度和极化电荷的计算

$$egin{aligned} oldsymbol{P} &= arepsilon_0 \chi_e oldsymbol{E} = arepsilon_0 (arepsilon_{
m r} - 1) oldsymbol{E} = rac{arepsilon_{
m r} - 1}{arepsilon_{
m r}} oldsymbol{D}, \
ho_{
m p} &= - oldsymbol{
abla} \cdot oldsymbol{P} = - rac{arepsilon_{
m r} - 1}{arepsilon_{
m r}} oldsymbol{
abla} \cdot oldsymbol{D} - oldsymbol{D} \cdot oldsymbol{
abla} rac{arepsilon_{
m r} - 1}{arepsilon_{
m r}}, \
ho_{
m ps} &= oldsymbol{P} \cdot oldsymbol{e}_{
m n} = rac{arepsilon_{
m r} - 1}{arepsilon_{
m r}} oldsymbol{D} \cdot oldsymbol{e}_{
m n}. \end{aligned}$$

对于线性各向同性介质, $ho_{
m p}=rac{1-arepsilon_{
m r}}{arepsilon_{
m r}}
ho.$

• 例子: 真空中半径为 a、介电常数为 ε 的介质球内体电荷均匀分布,密度为 ρ ,则球内

。 极化强度的计算: $m{P} = rac{arepsilon_{
m r}-1}{arepsilon_{
m r}} m{D} = rac{arepsilon_{
m r}-1}{3arepsilon_{
m r}} r
ho m{e}_r.$

。 极化电荷体密度: $ho_{
m p} = -oldsymbol{
abla} \cdot oldsymbol{P} = rac{1-arepsilon_{
m r}}{arepsilon_{
m r}}
ho.$

。 极化电荷面密度: $ho_{
m ps} = m{P} \cdot m{e}_{
m n} = rac{arepsilon_{
m r}-1}{3arepsilon_{
m r}} a
ho.$

。 总束缚电荷为零: $Q = \frac{4\pi a^3}{3}
ho_{
m p} + 4\pi a^2
ho_{
m ps} = 0.$

2.2.5 泊松方程与拉普拉斯方程

对于线性、均匀、各向同行的介质材料, ε 为常数,因此有:

• 泊松方程
$$\Delta \varphi = \nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\nabla \varphi) = \nabla \cdot (-E) = \nabla \cdot \left(-\frac{D}{\varepsilon} \right) = -\frac{\rho}{\varepsilon}.$$

• 当空间中没有电荷时, 泊松方程变为拉普拉斯方程 $\Delta \varphi = 0$.

2.3 静电场的边界条件

2.3.1 电位移法向边界条件

• 法向边界条件

$$oldsymbol{\circ}
ho_{ ext{s}} = oldsymbol{e}_{ ext{n}} \cdot (oldsymbol{D}_1 - oldsymbol{D}_2).$$

$$\circ \ \rho_{\rm s} = D_{\rm 1n} - D_{\rm 2n} = \varepsilon_1 E_{\rm 1n} - \varepsilon_2 E_{\rm 2n}.$$

- 。 其中 ho_{s} 是自由面电荷密度,而非极化面电荷密度.
- 特例与说明
 - 。 可由此计算极化电荷面密度.
 - 。 若有一个媒质是导体,则 $D_{\rm n}=\rho_{\rm s}$.
 - 。 如果导体表面有自由面电荷,则电场与表面垂直.

2.3.2 场强的切向边界条件

• 切向边界条件

$$\circ \ (\boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2) \cdot \boldsymbol{e}_{\mathrm{t}} = 0.$$

$$ullet \ (oldsymbol{E}_1 - oldsymbol{E}_2) imes oldsymbol{e}_{
m n} = oldsymbol{0}.$$

$$\circ E_{1\mathrm{t}} = E_{2\mathrm{t}} = rac{D_{1\mathrm{t}}}{arepsilon_1} = rac{D_{2\mathrm{t}}}{arepsilon_2}.$$

- 特例与说明
 - 若有一个媒质是导体,则 $E_t=0$.
 - 。 电场在导体表面没有切向分量.

2.3.3 电位函数的边界条件

- 电位函数连续, 即 $\varphi_1 = \varphi_2$.
- $\bullet \ \ \rho_{\rm s} = \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n}.$
- 上式中注意方向.

2.3.4 分界面上的电场方向

- 若分界面上没有自由电荷,即 $ho_{
 m s}=0$,则
 - $\circ \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$
 - $\circ \ \frac{E_1}{E_2} = \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1}$
- 其中角度为场强与法线的夹角.

2.3.5 电荷密度的计算方法

- 自由电荷
 - o 自由体电荷密度: $\rho = \nabla \cdot \boldsymbol{D}$.
 - 。 自由面电荷密度: $\rho_{\mathrm{s}} = (\boldsymbol{D}_1 \boldsymbol{D}_2) \cdot \boldsymbol{n}$.
- 束缚电荷
 - 。 极化体电荷密度: $\rho_{\mathrm{p}} = oldsymbol{
 abla} \cdot oldsymbol{P}.$
 - 。 极化面电荷密度: $ho_{
 m ps} = m{P} \cdot m{n}$.

2.5 静电场的其它问题

2.5.1 双导体与孤立导体电容

- 电容定义
 - \circ 双导体 $C = \frac{q}{U}$.
 - \circ 孤立导体 $C=rac{q}{arphi}.$
- 电容求解
 - 。 法一:假设 q,求出 ${m E}$ 从而积分得到 U.
 - 。 法二:假设 φ ,求出 ${m E}$ 从而得到 q (考虑体电荷、面电荷)

2.5.2 常见导体系统电容公式

- 双导体
 - \circ 平板电容器: $C = \frac{\varepsilon S}{d}$.
 - 。 同轴圆柱: $C=2\piarepsilon l / \lnrac{b}{a}$.

• 同心球壳: $C = \frac{4\pi\varepsilon ab}{b-a}$.

 \circ 远距两球: $C=rac{4\piarepsilon_0}{rac{1}{a}+rac{1}{b}-rac{2}{d}}.$

• 孤立电容

o 球体 / 薄球壳: $C = 4\pi \varepsilon R$.

2.5.3 多导体系统的部分电容

• 假设各导体的电量为 q_0, \dots, q_n , 电位为 $\varphi_0, \dots, \varphi_n$, 且 $\varphi_0 = 0$.

$$ullet \ q_k = \sum_{s=1}^n eta_{sk} arphi_s.$$

• β_{sk} 称为电容系数,

 \circ 当 s=k 时称为自电容系数,

 \circ 当 $s \neq k$ 时称为互电容系数.

$$ullet \quad q_k = \sum_{s=1}^{k-1} C_{ks} (arphi_k - arphi_s) + C_{kk} arphi_k + \sum_{s=k+1}^n C_{ks} (arphi_k - arphi_s).$$

 \circ C_{ks} 称为部分电容.

。 当 s=k 时称为自部分电容, 即全部导体的电位都是一个单位时, 第 k 个导体上的总电荷量.

。 当 $s \neq k$ 时称为互部分电容, 即第 s 个导体上的电位为一个单位, 其它导体接地时, 第 k 个导体上的总电荷量.

7

 $\circ \ C_{ks} = C_{sk} > 0.$

。 两导体间的等效电容不一定等于部分电容.

2.5.4 静电场的能量及其密度

• 静电场的能量

。 离散形式:
$$W_{
m e}=rac{1}{2}\sum_i arphi_i q_i.$$

。 体积积分:
$$W_{
m e}=rac{1}{2}\int_V
ho arphi\, {
m d}V$$

。 面积积分:
$$W_{
m e} = rac{1}{2} \int_S
ho_{
m s} arphi \, {
m d} S.$$

• 静电场的能量密度

$$ullet W_{
m e} = rac{1}{2} \int_V oldsymbol{D} oldsymbol{\cdot} oldsymbol{E} \, \mathrm{d}V = rac{1}{2} \int_V \omega_{
m e} \, \mathrm{d}V.$$

$$ullet \ \omega_{
m e} = rac{oldsymbol{D} \cdot oldsymbol{E}}{2} = rac{arepsilon E^2}{2} = rac{D^2}{2arepsilon}.$$

• 电容系统的能量: $W_{\mathrm{e}}=\frac{CU^2}{2}=\frac{q^2}{2C}.$

2.5.5 计算静电力的虚位移法

对于复杂系统,利用 $dW = F dx + dW_e$.

• 若各带电导体的电位不变

$$\circ \;\; \mathrm{d}W = \sum_i arphi_i \, \mathrm{d}q_i.$$

$$\circ \ \mathrm{d}W_\mathrm{e} = rac{1}{2} \sum_i arphi_i \, \mathrm{d}q_i.$$

$$ullet F = rac{\partial W_{
m e}}{\partial x}igg|_{arphi = {
m ray}}.$$

• 若各带电导体的电荷不变

$$\circ dW = 0.$$

$$\circ F = -rac{\partial W_{
m e}}{\partial x}igg|_{q= ext{ iny m}}.$$

2.6 恒定电场

2.6.1 电流与电流密度矢量

• 自由电流

· 传导电流:导体、导电溶液、半导体中.

。 运流电流: 真空、气体中.

• 电流密度

。 体电流
$$|oldsymbol{J}|=rac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S}.$$

。 面电流
$$|\boldsymbol{J}_s| = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}I}$$
.

$$\circ$$
 $oldsymbol{J} = |oldsymbol{J}|oldsymbol{e}_{\scriptscriptstyle J} =
hooldsymbol{v}.$

• 电流强度 (电流密度通量)

。 定义式:
$$I = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$$
.

。 体电流:
$$I = \int_{\mathcal{S}} m{J} \cdot \mathrm{d} m{S}$$

。 面电流:
$$I = \int_I \boldsymbol{J}_s \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$
.

2.6.2 恒定电场的基本性质

• 电流连续性方程

○ 一般形式 (电荷守恒定律)

■ 积分形式:
$$\oint_S m{J} \cdot \mathrm{d} m{S} = -rac{\partial q}{\partial t}.$$

8

• 微分形式:
$$oldsymbol{
abla} \cdot oldsymbol{J} = -rac{\partial
ho}{\partial t}.$$

○ 恒定电场(基尔霍夫电流定律)

- 积分形式: $\oint_S \boldsymbol{J} \cdot \mathrm{d} \boldsymbol{S} = 0.$
- 微分形式: $\nabla \cdot \boldsymbol{J} = 0$.
- 恒定电场的无旋性(基尔霍夫电压定律)
 - 。 积分形式: $\oint_{I} \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = 0$.
 - 微分形式: $\nabla \times \boldsymbol{E} = \boldsymbol{0}$.
 - \circ 电位函数: $m{E} = -m{\nabla}\phi$.
- 欧姆定律
 - 。 公式
 - 微分形式: $J \equiv \sigma E$.
 - 积分形式: $U = \frac{Il}{\sigma S} \equiv IR$.
 - 。 说明
 - 电导率 σ 单位为 S/m.
 - 电源内部: $\boldsymbol{J} = \sigma(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{E}')$.
 - 长直导线电阻: $R = \frac{l}{\sigma S}$.
- 恒定电场的无散性

$$\circ \ \
ho = oldsymbol{
abla} oldsymbol{\cdot} (arepsilon oldsymbol{E}) = oldsymbol{E} oldsymbol{\cdot} \left(oldsymbol{
abla} arepsilon - rac{arepsilon}{\sigma} oldsymbol{
abla} \sigma
ight).$$

- 线性均匀媒质
 - $\bullet \ \nabla \cdot \boldsymbol{E} = 0, \ \rho = 0.$
 - $\Delta \varphi = \nabla \cdot \boldsymbol{E} = 0.$

2.6.3 恒定电场的边界条件

- 积分:场强与电流密度
 - 。 法向边界条件
 - $\bullet (\boldsymbol{J}_1 \boldsymbol{J}_2) \cdot \boldsymbol{e}_n = 0.$
 - $J_{1n} = J_{2n}$
 - 。 切向边界条件
 - $e_n \times (E_1 E_2) = 0.$
 - $E_{1t} = E_{2t}$.
- 推论: 电位与折线夹角
 - 。 电位函数连续
 - $\phi_1 = \phi_2$.
 - $\bullet \ \sigma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}.$
 - 。 电流矢量折线

- $\blacksquare \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$,其中角度为电流矢量与法线的夹角.
- 良导体 (σ大) 的电流流入不良导体,则流出电流近似垂直于分界面,于是良导体表面可以近似地看作等位面.

• 自由电荷分布

- 。 不均匀的导电媒质在恒定电场中: $ho = oldsymbol{
 abla} \cdot oldsymbol{D} = oldsymbol{J} \cdot oldsymbol{
 abla} rac{arepsilon}{\sigma}.$
- 。 线性均匀导电媒质的内部, 在达到稳恒状态之前有

。 分界面的自由面电荷

■ 非理想介质分界面的自由面电荷一般非零.

2.6.4 静电场比拟法与电导

	电源以外导体区域中的恒定电场	无源均匀介质的区域中的静电场
微分形式	$oldsymbol{ abla} imes oldsymbol{E} imes oldsymbol{E} = oldsymbol{0}$	$oldsymbol{ abla} imes oldsymbol{E} imes oldsymbol{E} = oldsymbol{0}$
	$oldsymbol{ abla} oldsymbol{\cdot} oldsymbol{J} = oldsymbol{0}$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$
积分形式	$\oint_{l} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d} \boldsymbol{l} = 0$	$\oint_{l} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = 0$
	$\oint_S oldsymbol{J} \cdot \mathrm{d}oldsymbol{S} = 0$	$\oint_S oldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}oldsymbol{S} = 0$
场量关系	$oldsymbol{J} = \sigma oldsymbol{E}$	$oldsymbol{D} = arepsilon oldsymbol{E}$
	$\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla}\varphi$	$oldsymbol{E} = -oldsymbol{ abla}arphi$
满足方程	$oldsymbol{ abla}^2arphi=0$	$oldsymbol{ abla}^2arphi=0$
	$I = \int_S oldsymbol{J} \cdot \mathrm{d}oldsymbol{S}$	$q = \int_S oldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}oldsymbol{S}$
	$E_{1\mathrm{t}}=E_{2\mathrm{t}}$	$E_{ m 1t}=E_{ m 2t}$
边界条件	$J_{ m 1n}=J_{ m 2n}$	$D_{ m 1n}=D_{ m 2n}$
	$\varphi_1=\varphi_2$	$arphi_1=arphi_2$
对应关系	$oldsymbol{E}, arphi$	$oldsymbol{E}, arphi$
	\boldsymbol{J},σ	$oldsymbol{D}, arepsilon$
	I	q

10

• 双导体的电容与电导

$$\circ \ C = \frac{q}{U} = \frac{\int_{S} \mathbf{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}}{U} = \frac{\varepsilon \int_{S} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}}{U} .$$

$$\circ \ G = \frac{I}{U} = \frac{\int_{S} \mathbf{J} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}}{U} = \frac{\sigma \int_{S} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}}{U} .$$

$$\circ \ CR = \frac{C}{G} = \frac{q}{I} \left(= \frac{\mathrm{d} \ln I}{\mathrm{d}t} \right) = \frac{\varepsilon}{\sigma} .$$

• 接地电阻的国标为 $< 4\Omega$.

2.6.5 损耗功率与焦耳定律

损耗功率密度为 $p=rac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}$,焦耳定律为:

- 微分形式: $p = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2 = \frac{J^2}{\sigma}$.
- 积分形式: $P = \int_V p \, \mathrm{d}V = UI$.