

問題 1

求解電偶極子軸線和中垂面上的電場強度

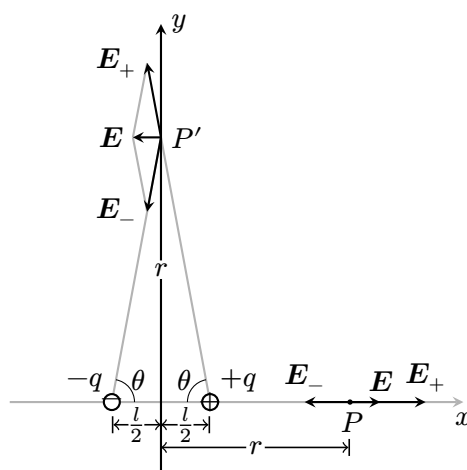


图 1 電偶極子

解. 設 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 是 \mathbb{R}^3 的標準正交基.

1) 對於延長線上的 P 點

$$\mathbf{E}_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{+q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} \hat{i}$$

$$\mathbf{E}_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \hat{i}$$

因此

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] \hat{\mathbf{i}} \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{l}{2r}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{l}{2r}\right)^2} \right] \hat{\mathbf{i}} \\
 &\approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(1 + \frac{l}{r} - 1 + \frac{l}{r} \right) \hat{\mathbf{i}} \\
 &= \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} \hat{\mathbf{i}}
 \end{aligned}$$

定義 $\mathbf{l} = -l\hat{\mathbf{i}}$ 及電偶極距矢量 $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$

$$\mathbf{E} \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\mathbf{p}}{r^3}$$

2) 對於中軸線上的 P' 點

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_+ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} (-\cos\theta\hat{\mathbf{i}} + \sin\theta\hat{\mathbf{j}}) \\
 \mathbf{E}_- &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} (\cos\theta\hat{\mathbf{i}} + \sin\theta\hat{\mathbf{j}})
 \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} &= \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- \\
 &= -2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} \cos\theta\hat{\mathbf{i}} \\
 &= -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \frac{l^2}{4}} \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} \hat{\mathbf{i}} \\
 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/2}} \hat{\mathbf{i}} \\
 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3 \left(1 + \frac{l^2}{4r^2}\right)^{3/2}} \hat{\mathbf{i}}
 \end{aligned}$$

因爲 $r \gg \frac{l}{2}$, $\left(1 + \frac{l^2}{4r^2}\right)^{3/2} \approx 1$, 又可以定義 $\mathbf{l} = -l\hat{\mathbf{i}}$ 及電偶極距矢量 $\mathbf{p} = ql$,

$$\mathbf{E} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{r^3}$$

□

問題 2

使用馬克士威方程組 (Maxwell's equations) 求解光速 c .

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

Hint: $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$

解.

□

問題 3

使用庫倫定律和高斯定理相互證明

$$(\text{庫倫定律}) \quad \mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

$$(\text{高斯定理}) \quad \oint_{\mathbb{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i(\mathbb{S} \text{ 內})} q_i$$

解. 極座標下, 對於半徑爲 r 的一球面面元 dA ,

$$dA = (r \sin \theta d\varphi)(r d\theta)$$

可定義極小立體角爲

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi$$

對於更加普遍的有向面元 $d\mathbf{S} = dS \hat{\mathbf{n}}$ 而言, 可推廣立體角定義爲

$$d\Omega = \frac{(\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS}{r^2} = \frac{\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}|} \sin \theta d\theta d\varphi$$

由立體角的推廣定義, 對於任一封閉曲面 \mathbb{S} 所張之立體角也就有所定義了, 當頂點在曲面內時, 對於曲面上的任一立體角元 $d\Omega$, 總有 $\langle \hat{\mathbf{r}}, \hat{\mathbf{n}} \rangle < \pi/2$, 即 $\frac{\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{n}}|} \equiv 1$, 於是

$$\oint_{\mathbb{S}} d\Omega = \oint_{\mathbb{S}} \sin \theta d\theta d\varphi = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = [-\cos \theta]_0^\pi (2\pi) = 4\pi$$

當頂點在曲面外時，對於曲面上的任一立體角元 $d\Omega$ 皆存在一個互為相反數立體角元 $d\Omega$ ，使得積分結果為 0

$$\oint_{\mathbb{S}} d\Omega = 0$$

1) 庫倫定律 → 高斯定理

數學中定義積分式：

$$\iint_{\Sigma} \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = \iint_{\Sigma} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}$$

為向量場 \mathbf{A} 通過曲面 Σ 向着指定側的通量，其中 $\hat{\mathbf{n}}$ 是面元的單位法向量。對於電場 \mathbf{E} ，自然可定義電通量

$$\Phi_E = \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

今假設空間中存在一封閉曲面 \mathbb{S} 名曰高斯面。則可依單個點電荷 q 與 \mathbb{S} 的位置關係而對 \mathbb{S} 向外側的電通量進行分類討論：

a) q 在 \mathbb{S} 內的情況

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \oint_{\mathbb{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \oint_{\mathbb{S}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \oint_{\mathbb{S}} \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega \\ &= \frac{q}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

b) q 在 \mathbb{S} 外的情況

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \oint_{\mathbb{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \oint_{\mathbb{S}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \oint_{\mathbb{S}} \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega \\ &= 0 \end{aligned}$$

因為任何電荷系的點電荷皆可分為 \mathbb{S} 內和 \mathbb{S} 外兩個部分，由 a)、b) 的結論和場強疊加原理得

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \oint_{\mathbb{S}} \left(\sum_{i(\mathbb{S}^{\text{內}})} \mathbf{E}_i + \sum_{j(\mathbb{S}^{\text{外}})} \mathbf{E}_j \right) \cdot d\mathbf{S} \\ &= \sum_{i(\mathbb{S}^{\text{內}})} \oint_{\mathbb{S}} \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{S} + \sum_{j(\mathbb{S}^{\text{外}})} \oint_{\mathbb{S}} \mathbf{E}_j \cdot d\mathbf{S} \\ &= \sum_{i(\mathbb{S}^{\text{內}})} \frac{q_i}{\epsilon_0} + \sum_{j(\mathbb{S}^{\text{外}})} 0 \\ &= \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i(\mathbb{S}^{\text{內}})} q_i \end{aligned}$$

2) 高斯定理 → 庫倫定律

設一點電荷 q , 以其爲球心, r 爲半徑假設球形高斯面 \mathbb{S} , 則有

$$\oiint_{\mathbb{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \oiint_{\mathbb{S}} \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

因爲在 \mathbb{S} 上 $\hat{\mathbf{n}} \equiv \hat{\mathbf{r}}$ 且 $\mathbf{E} \parallel \hat{\mathbf{r}}$, 場強大小在 \mathbb{S} 上處處相等, 故

$$\mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \oiint_{\mathbb{S}} dS = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{r}} \oiint_{\mathbb{S}} dS = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

$\hat{\mathbf{r}}^2 = 1$, 故 $\hat{\mathbf{r}}$ 自反, 於是

$$\mathbf{E} = \frac{\hat{\mathbf{r}}}{4\pi r^2} \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

□