

72
高等學校教學用書

地中電流

Н. Ф. МАРГОЛИН 著

賀家李譯

龍門聯合書局

天津大學推薦高等教育部介紹
高等學校教學用書



地 中 電 流

技術科學博士 Н. Ф. 馬爾高林 著
天津大學電力系賀家李 譯
天津大學發電廠電力網教研室校

龍 門 聯 合 書 局

本書係根據蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的馬爾高林 (Н. Ф. Марголин) 著“地中電流” (Токи в земле) 1947 年版譯出。

本書可作為高等工程學校學生學習有關專門課程中地中電流部分的參考書。

地 中 電 流

ТОКИ В ЗЕМЛЕ

Н. Ф. МАРГОЛИН 著

天津大學電力系賀家李 譯

★版權所有★

龍 門 聯 合 書 局 出 版

上海南京東路61號101室

新華書店華東總分店總經售

上海南京西路1號

啓 智 印 刷 廠 印 刷

上海白忠路259弄28號

1954年5月初版 印數0001—4000冊

定價 ¥ 11,000

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

序

本書是 Н. Ф. 馬爾高林 教授在 1940—1941 年間所著的“**短路電流和地中電流**”的第二部分（第三冊）。原書是用來作為這門專門課程的教學參考書的。此書第一冊的內容為在一點發生三相短路時對過渡狀態深入的（和短路電流普通課程的內容比較）分析，已於 1941 年中在榮膺列寧勳章的莫斯科莫洛托夫動力學院出版。手稿中所留下的最後一冊（第三冊）只討論有關電流在大地中流通的問題，與前面部分的關係不大，因而可以單獨出版。

在過去的一段時期內，“**短路電流**”普通課程的教學大綱曾經重加修訂，現在的大綱中也包括了“**地中電流**”部分。因此這種教學參考書的印行就有了必要。本書的出版可以大大地滿足這種需要。

本書是按照著者準備好付印的手稿而出版的。除了在進行手稿的修正時即已取得著者同意改動者外，別無多大的改動。最重大修改的地方，在文中都特別地附加說明。

本書內容包括純粹理論的材料：如計算各種接地體的**對電流流散的阻力和輸電線零序阻抗**所需公式的推演，以及當大地作為“**回線**”時**地中交流電流分佈**的研究。

文中遇到引證參考文獻的地方 [Л...], 已按照所示號碼在每章之末列出。

公式號碼是按章編排的；而插圖號碼的編排則不分章次。

在書末列出了重要的下標符號和符號的說明。

與國家標準 5580 號的指示不同，以複數決定的各量在代表它們的字母上標記着點。字母下面的星號指出這些量是用標么值表明的。

缺乏涉及接地裝置的構造和設計的實用部分可以認為是本書作為一本教學參考書的缺點。

編 者

目 錄

序.....	1
--------	---

第一編 接 地 體

第一章 地中直流電流的基本理論.....	1
1. 導言.....	1
2. 基本假定。直線正交坐標制和曲線正交坐標制中的電位 方程式.....	2
3. 兩種介質邊界面上的電場.....	9
4. 平行平面場.....	10
5. 從各方面被大地無限包圍的任意形狀之接地體.....	14
6. 地球表面的影響。鏡像法.....	18
第一章參考文獻.....	21
第二章 位於地表面處的單一接地體.....	22
7. 半球形接地體.....	22
例 1.	26
8. 圓柱形鉛直(管狀)接地體.....	26
例 2.	38
9. 水平位於地面處的半圓柱形接地體.....	39
例 3.	45
10. 帶狀接地體.....	46
例 4 和 5.	56, 57
第二章參考文獻.....	57
第三章 多重接地體。環狀接地體.....	58
11. 導言.....	58

12. 由放置於地面處的、相互間距離很遠的單一接地體所構成的多重接地體·····	63
13. 由位於地面處、沿一正多角形頂點或成一系列放置的相同的單一接地體所組成的多重接地體·····	64
例 6 和 7.·····	68
例 8 和 9.·····	72
14. 環狀水平接地體·····	73
例 10.·····	81
第三章參考文獻·····	82
第四章 深埋的接地體 ·····	83
15. 導言·····	83
16. 深埋的球狀接地體·····	84
例 11.·····	87
17. 深埋的圓柱形鉛直(管狀)接地體·····	87
例 12.·····	90
18. 深埋的圓柱形具有直線軸線的水平接地體及直線形和環形的帶狀接地體·····	92
例 13 和 14.·····	97, 99
第四章參考文獻·····	100
第五章 “支柱-地線” 接地系統 ·····	101
19. 導言·····	101
20. 入地短路電流在支柱和架空地線段間分佈的一般規律·····	102
21. 入地短路電流在支柱和架空地線段間的分佈及在各種特殊情況下支柱-地線接地系統的電阻·····	106
例 15 至 17.·····	111, 120
22. 零序電流在支柱和架空地線段間分佈的一般規律·····	120
23. 零序電流在支柱和架空地線段之間的分佈和在各特例情況下支柱-地線接地系統對於交流的阻抗·····	125
例 18.·····	131

第五章參考文獻·····	134
--------------	-----

第二編 線路的阻抗

第六章 “導線-大地” 架空線路對交流電流的阻抗·····	135
24. 導言。單相二線架空輸電線路的阻抗·····	135
例 19. ·····	139
25. 導線-大地架空線路的阻抗·····	140
26. 二導線-大地線路之間的互感阻抗·····	158
第六章參考文獻·····	161
第七章 平行導線系統對交流電流的阻抗·····	162
27. 導線系統中任意兩導線間的平均互感阻抗·····	162
28. 三相單回輸電線的正序和負序阻抗·····	163
29. 無架空地線的三相單回和雙回輸電線的零序阻抗·····	165
30. 互相感應及並行架設之導線系統的零序等效線路圖。具有 架空地線的三相線路之零序阻抗。雙回線路當一回短 路接地時的等效線路圖·····	174
例 20. ·····	180
31. 地下電纜的零序阻抗·····	191
例 21 和 22. ·····	194, 196
第七章參考文獻·····	199
主要的下標符號及符號·····	200

第一編 接 地 體

第一章 地中直流電流的基本理論

1. 導 言

當入地短路電流 I_3 通過接地裝置流入地中時，爲了預防人們可能遭受到危險電壓起見，“接觸電壓” U_n 和最大“跨步電壓” U_w (圖 1) 必

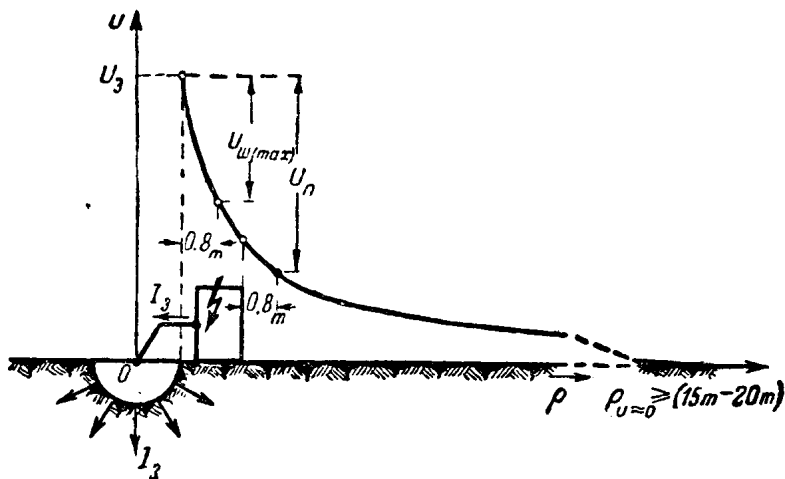


圖 1.

須不超過某一定的數值。對於已知的條件，這些電壓對接地體電壓 U_3 之比值以相應的“接觸電壓係數”

$$\alpha_n = \frac{U_n}{U_3} \quad (I, 1)$$

和“跨步電壓係數”

$$\alpha_{ui} = \frac{U_{ui(\max)}}{U_s} \quad (I, 2)$$

決定之。

這些係數數值上決定於接地裝置的類型。

因此，為了保證容許的接觸電壓和跨步電壓，必須將每個接地裝置裝設恰當，以使接地體的電壓不會超過由公式 (I, 1) 和 (I, 2) 所確定的數值中的小者。

接地體的電壓是和通過它的入地電流 I_s 和所謂接地體對電流流散的電阻 R_s 成正比的，即

$$U_s = I_s R_s, \quad (I, 3a)$$

或

$$R_s = \frac{U_s}{I_s}. \quad (I, 3b)$$

此後為了簡便起見，就稱 R_s 為接地體的電阻。在已知條件下（接地裝置的構造，它和被接地物件的相對位置等），以及在已知的係數 α_n 和 α_{ui} 及計算用入地電流 I_s 等條件下，接地裝置的計算可以歸結為在達到公式 (I, 3b) 所確定的電阻時這些裝置尺寸的決定 [Л.1*, § 1 和 6; Л.2, 3—5 頁, 167—168 頁和 § 42 及 § 48; Л.3, XXI, 1—XXI, 5]。

全部第一編主要的是敘述幾種接地體電阻的決定。

所有電的和磁的各量以後都用實用單位制^①表明 [見 Л.4, 附錄和 § 46; Л.6 等]。

2. 基本假定。直線正交坐標制和曲線正交坐標制 中的電位方程式

基本假定 本編中所有的推論都是以下列兩個假設為基礎的：

1. 假設大地在任何深度處都是均勻的，即都具有同一的電導係數。

實際上，大地的電導係數和土壤的成分，特別是含有水分的程度及

^① 此處省去了作者較詳盡的敘述。

溫度有關 [Л.1, § 1; Л.2 第三章; Л.3, 表 XXI, 4]。

作為一個平均值，大地的電導係數可以採取為

$$\gamma_{g(cp)} = 10^{-4} \frac{1}{\Omega \text{ cm}}; \quad (\text{I, 4 a})$$

因而地的平均電阻係數為

$$\rho_{g(cp)} = 10^4 \Omega \text{ cm}. \quad (\text{I, 4 b})$$

下面舉出銅和鐵（在 0°C 時）的電導係數和電阻係數值以資比較：

$$\gamma_{\text{Cu}} \approx 6.5 \cdot 10^5 \frac{1}{\Omega \text{ cm}}; \quad \rho_{\text{Cu}} \approx 1.54 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm},$$

$$\gamma_{\text{Fe}} \approx 1.1 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \text{ cm}}; \quad \rho_{\text{Fe}} \approx 9.1 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm},$$

因而

$$\frac{\gamma_{\text{Cu}}}{\gamma_{g(cp)}} = 6.5 \cdot 10^9, \quad \frac{\gamma_{\text{Fe}}}{\gamma_{g(cp)}} = 1.1 \cdot 10^9,$$

即銅的電導係數平均為地的 6 500 兆倍，而鐵的電導係數平均為地的 1 100 兆倍。

由上面的比較可見，祇有當對電流所提供的截面很大，因而所得的電流密度小到這種程度以致即使在相當大的大地電阻係數下，地中的電壓降落還是很小的情形下，大地的電阻或該電流所產生的電壓降落才可以略去不計。所以，在距接地體不遠的地方，對從接地體流下的入地電流的截面較小，因而當電流密度很大時，在地中就有顯著的電壓降落。這種地中的電壓降落在距接地體 15—20 公尺處（圖 1）實際上即已消失，因為在這樣的距離處電流密度已經大大的降低了。

2. 假設在地中任一點的電流密度 $\vec{j}$ 的大小和方向都對時間恆定不變 [Л.1, § 2]，即

$$\vec{j} = \text{常數}. \quad (\text{I, 5})$$

電流密度是和電場強度成正比的：

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}. \quad (\text{I, 6})$$

電流密度線 $\vec{j}$ 和電場強度線 $\vec{E}$ 重合, 因之在地中任一點, 電場強度的大小和方向也是對時間恆定不變的, 即

$$\vec{E} = \text{常數}. \quad (\text{I}, 7)$$

由於電流密度不隨時間而改變, 所以穿鏈地中任意迴路磁通的大小也不隨時間而改變, 即

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0. \quad (\text{I}, 8)$$

由於對任意迴路磁通是不變的, 於是可得點 A 和點 B 間電場強度的線積分 (圖 2) 與積分的途徑無關:

$$\int_A^B E_{s_1} \cdot ds - \int_A^B E_{s_2} \cdot ds = 0,$$

由此得

$$\int_A^B E_{s_1} \cdot ds = \int_A^B E_{s_2} \cdot ds = \int_A^B E_s \cdot ds = U_{AB}. \quad (\text{I}, 9)$$

上面逐一求得的條件 (I, 5), (I, 7) 和 (I, 9) 只能發生於直流電路



圖 2.

中, 對頻率不高——工業頻率 (50 Hz) 附近的交流網絡, 本編中所得到的結論, 除了“支柱-地線”接地系統外, 可近似的應用, 在後者的情形下, 當架空地線的電阻相對的很小時, 在入地電流為直流的假

定下而得的結論, 即使在工業頻率下, 可能要導致顯著的誤差。

直線正交坐標制中的電位方程式 [Л.1, § 2; Л.4, § 25 和 27; Л.5, § 12, 14, 15 和 18]。

由 (I, 9) 可知, 當直流電流在地中通過時, 電場強度即等於電位梯度的負數:

$$E_s = -\frac{\partial U}{\partial s} \quad (\text{I}, 10)$$

和

$$\vec{E} = -\text{grad } U. \quad (\text{I}, 10 a)$$

在特殊情形下，當電場強度沿直線正交坐標系統各軸分解為三個分量時

$$\left. \begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial U}{\partial x}, \\ E_y &= -\frac{\partial U}{\partial y}, \\ E_z &= -\frac{\partial U}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{I, 10 } \delta)$$

在具有無限大電導係數、半徑是無限大的球面上的電位假定等於零。因之，任意一點的電壓就可以了解為這點的電位。

由於導體中電流的連續性，電流密度的散度必須等於零（克希荷夫第一定律的微分式）：

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{dN_j}{dV} = 0, \quad (\text{I, 11 } a)$$

式中 N_j 是電流密度向量的通量。

由 (I, 11 a) 和 (I, 6) 可得電場強度向量的散度也等於零：

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{dN_E}{dV} = 0, \quad (\text{I, 11 } \delta)$$

但由 (I, 11 \delta) 和 (I, 10 a) 可得電位梯度的散度也等於零：

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U = 0. \quad (\text{I, 11 } \text{в})$$

電場強度向量的元通量為（圖 3）：

$$\begin{aligned} dN_E &= (E_{x+dx} - E_x) \cdot dy \cdot dz + (E_{y+dy} - E_y) \cdot dz \cdot dx \\ &\quad + (E_{z+dz} - E_z) \cdot dx \cdot dy \\ &= \frac{\partial E_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial E_y}{\partial y} dy \cdot dz \cdot dx + \frac{\partial E_z}{\partial z} dz \cdot dx \cdot dy \\ &= \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz. \end{aligned} \quad (\text{I, 12})$$

元體積是

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz. \quad (\text{I, 13})$$

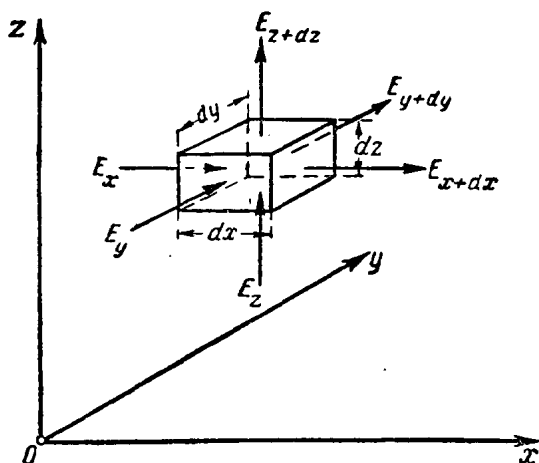


圖 3.

從 (I, 11 6), (I, 12) 和 (I, 13) 得

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0. \quad (\text{I, 14})$$

把 (I, 10 a) 中的電場強度以及 (I, 10 6) 中它的分量值代入 (I, 14) 可得直線正交坐標制中的電位方程式如下：

$$-\operatorname{div} \bar{E} = \operatorname{div} \operatorname{grad} U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \Delta U = 0, \quad (\text{I, 15})$$

式中 (拉氏運算符號)

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (\text{I, 16})$$

曲線正交坐標制中的電位方程式 應用曲線正交坐標制，對接地體四週電場的確定比較方便。

在圖 4 a 中，在具有原點 O 的 x, y, z 軸的直線正交坐標制中任意點 P 是由三個坐標 x, y 和 z 所確定的。令點 P 的曲線正交坐標為 g, h 和 k 。

經過點 P 作三個曲線坐標面，在每一個面上，有一個曲線坐標的值

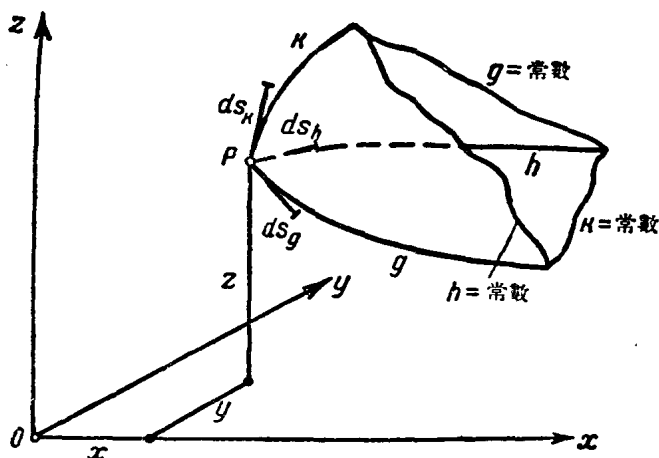


圖 4a.

是恆定不變的，即這三個面的方程式為：

$$g = \text{常數},$$

$$h = \text{常數},$$

和

$$k = \text{常數}.$$

這些面的交線就是坐標線，在每一條上只有一個坐標是變化的。由於這種坐標制的正交性，在每一點處的三個坐標線是互相垂直的。和直線坐標制相似，在這個曲線坐標制中的坐標線我們相應地稱之為 g , h 和 k 線。

點的曲線坐標和直線坐標間是有關係存在的，此可由下列方程式決定：

$$\left. \begin{aligned} x &= f_x(g, h, k), \\ y &= f_y(g, h, k), \\ z &= f_z(g, h, k). \end{aligned} \right\} \quad (\text{I}, 17)$$

沿曲線坐標軸的微增量 ds_g , ds_h 和 ds_k 是沿直線坐標線的 dx , dy 和 dz 相對應的 (圖 4b)：

$$\left. \begin{aligned} ds_g &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial g} dg\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial g} dg\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial g} dg\right)^2} = G \cdot dg, \\ ds_h &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial h} dh\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial h} dh\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial h} dh\right)^2} = H \cdot dh, \\ ds_k &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial k} dk\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial k} dk\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial k} dk\right)^2} = K \cdot dk, \end{aligned} \right\} \quad (\text{I, 18})$$

式中

$$\left. \begin{aligned} G &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial g}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial g}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial g}\right)^2}, \\ H &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial h}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial h}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial h}\right)^2}, \\ K &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial k}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial k}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial k}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{I, 19})$$

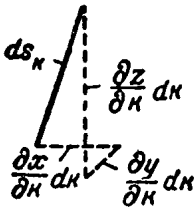


圖 46.

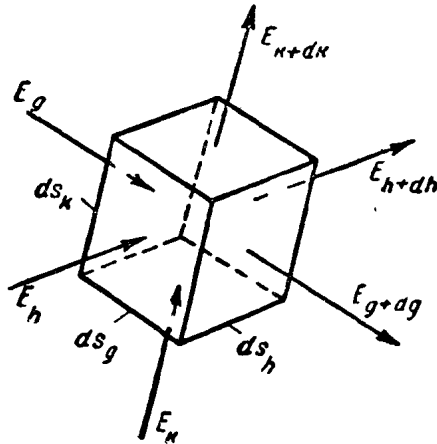


圖 4B.

在這裏可以完全像在直線正交坐標制中一樣來決定散度(圖4B)。考慮到(I, 18), 電場強度向量的元通量是

$$\begin{aligned}
dN_E &= E_{g+dg} \cdot (ds_h \cdot ds_k)_{g+dg} - E_g (ds_h \cdot ds_k)_g \\
&\quad + E_{h+dh} \cdot (ds_k \cdot ds_g)_{h+dh} - E_h (ds_k \cdot ds_g)_h \\
&\quad + E_{k+dk} \cdot (ds_g \cdot ds_h)_{k+dk} - E_k (ds_g \cdot ds_h)_k \\
&= \frac{\partial(E_g \cdot H \cdot K)}{\partial g} \cdot dg \cdot dh \cdot dk + \frac{\partial(E_h \cdot K \cdot G)}{\partial h} \cdot dh \cdot dk \cdot dg \\
&\quad + \frac{\partial(E_k \cdot G \cdot H)}{\partial k} \cdot dk \cdot dg \cdot dh \\
&= \left[\frac{\partial(E_g \cdot H \cdot K)}{\partial g} + \frac{\partial(E_h \cdot K \cdot G)}{\partial h} + \frac{\partial(E_k \cdot G \cdot H)}{\partial k} \right] dg \cdot dh \cdot dk. \quad (I, 20)
\end{aligned}$$

考慮到 (I, 18), 這元體積是:

$$dV = ds_g \cdot ds_h \cdot ds_k = G \cdot H \cdot K \cdot dg \cdot dh \cdot dk. \quad (I, 21)$$

將 (I, 20) 和 (I, 21) 代入 (I, 116) 中得:

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{1}{GHK} \left[\frac{\partial(E_g \cdot H \cdot K)}{\partial g} + \frac{\partial(E_h \cdot K \cdot G)}{\partial h} + \frac{\partial(E_k \cdot G \cdot H)}{\partial k} \right] = 0. \quad (I, 22)$$

依據 (I, 10) 和 (I, 18), 電場強度沿坐標線的各分量爲:

$$\left. \begin{aligned} E_g &= -\frac{\partial U}{\partial s_g} = -\frac{1}{G} \cdot \frac{\partial U}{\partial g}, \\ E_h &= -\frac{\partial U}{\partial s_h} = -\frac{1}{H} \cdot \frac{\partial U}{\partial h}, \\ E_k &= -\frac{\partial U}{\partial s_k} = -\frac{1}{K} \cdot \frac{\partial U}{\partial k}. \end{aligned} \right\} \quad (I, 23)$$

由 (I, 10 a), (I, 22) 和 (I, 23), 求得曲線正交坐標制中的電位方程式爲:

$$\begin{aligned}
\operatorname{div} \operatorname{grad} U &= -\operatorname{div} \bar{E} = \Delta U = \frac{1}{G \cdot H \cdot K} \left[\frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{H \cdot K}{G} \cdot \frac{\partial U}{\partial g} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{K \cdot G}{H} \cdot \frac{\partial U}{\partial h} \right) + \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{G \cdot H}{K} \cdot \frac{\partial U}{\partial k} \right) \right] = 0. \quad (I, 24)
\end{aligned}$$

3. 兩種介質邊界面上的電場 ① [Л.1, § 3]

將介質 1 和 2 中靠得非常近的兩點處的電場強度向量 ($\bar{E}_1$ 和 $\bar{E}_2$)

① 本節以較為簡略的形式刊出。

在這兩個介質的邊界面上分解為切線分量 (E_{t_1} 和 E_{t_2}) 和法線分量 (E_{n_1} 和 E_{n_2})。

由於磁場是不變的 [從 (I, 8)] 故

$$E_{t_1} = E_{t_2} \quad (\text{I, 25 a})$$

把 (I, 10) 代入 (I, 25 a) 可得:

$$\frac{dU_1}{ds_1} = \frac{dU_2}{ds_2} \quad (\text{I, 25 b})$$

如果在靠近邊界面處, 對於兩個介質任意點的電位相同, 則 (I, 25 b) 式成立。

由於電流的連續性

$$j_{n_1} = j_{n_2} \quad (\text{I, 26 a})$$

如果把 (I, 6) 中的 j 值代入 (I, 26 a), 即得:

$$\gamma_1 E_{n_1} = \gamma_2 E_{n_2} \quad (\text{I, 26 b})$$

由圖 5 以及式 (I, 25 a) 和 (I, 26 b), 我們即可求得兩個電場強度向量和介質邊界面法線間夾角正切之比:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{E_{t_1}}{E_{n_1}}}{\frac{E_{t_2}}{E_{n_2}}} = \frac{E_{n_2}}{E_{n_1}} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad (\text{I, 27})$$

4. 平行平面場 [Л.1, § 15]

如所周知, 所謂平行平面場, 是這樣一種力場, 在這種場中, 沿某一方向例如 z 軸, 所討論的向量沒有分量。在所有垂直於這方向的平面中 (在上面所示的情形中, 是在和 xoy 平面平行的所有平面中), 場的力線的圖形都是一樣的。

在這種場中, 各個等位面是許多柱面, 它們的母線和 z 軸平行。