

高等學校教學用書

電磁場實驗導則

Л. Р. НЕЙМАН 著
黃 席 椿 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



卡蘭達羅夫 聶孟合編“理論電工實驗導則”之第二部

電 磁 場 實 驗 導 則

J. P. 聶孟著 黃席椿譯
清華大學基本電工教研組校

高 等 教 育 出 版 社

本書係根據蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的卡蘭達羅夫 (П. Л. Калантаров) 和森孟 (Л. Р. Нейман) 合編“理論電工實驗導則”之第二部森孟著“電磁場實驗導則” (Руководство к лаборатории электромагнитного поля) 1950年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等學校教學參考書。

本書內容包括電磁場實驗室的基本量測方法的敘述及實驗內容的敘述兩部分。

本書由交通大學黃席椿同志擔承翻譯，並經清華大學基本電工教研組王先冲、唐統一、蕭達川、陳嘉瑞、陸培海、夏紹璋、俞天音、董新保、江耕光等同志校訂。

電 磁 場 實 驗 導 則

J. P. 森 孟 著

黃 席 椿 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010-212 開本 850×11681/32 印張 5 14/16 字數 143,000

一九五四年十月上海第一版

一九五六年七月上海第二次印刷

印數 3,001—4,000

定價 (10) 洋 0.90

原 序

列寧格勒的加里寧 (М. И. Калинин) 工學院中的電磁場實驗是“電工學的理論基礎”課程實驗的第二部分。第一部分是交流電實驗。第一部分實驗課程的導則是由卡蘭達羅夫教授 (проф. П. Л. Калантаров) 編寫的 (卡蘭達羅夫著: “交流電實驗導則”, 國家動力出版社, 1949)。由本人編寫的本導則包括了第二部分實驗內容的敘述。

電磁場實驗屬於課程的最後部分, 這就使我們在組織這一部分的實驗時考慮到這時同學學習水平較高, 可以使這些實驗的目的不僅是加深在理論課程中所獲得的知識, 並且還要在最大可能限度內培養學生在科學研究方面獨立工作的技能。這個極重要的根據也反映在實驗導則的製定中。本導則並不包括記錄形式, 示範曲線及完成實驗的詳細步驟的現成方案。建議學生獨立地擬定完成實驗的程序, 記錄形式及與研究的問題有關的曲線的特性。爲了這個目的, 在實驗的敘述中也注意到不良影響的避免方法, 這些影響是足可歪曲實驗結果的。差不多在所有的實驗內容中, 除了實驗工作之外, 還需要進行理論上的計算以及計算結果與實驗結果的比較。對於實驗和計算結果之間可能存在的分歧, 必須詳細地以批判的方式來分析其原因。

本導則中可列入的實驗個數遠超過教學計劃所分配的實驗時間內所能完成的實驗數目。某些實驗在獨立工作能力較強的同學, 也只有在到實驗室來好幾次後, 才能更好的完成這些實驗。然而完全不是要求每個學生把所有在本導則中所敘述的實驗全部做完。有些實驗在性質上是很相近的。例如, 第一至第五實驗, 或第十和第十一實驗等等。因此可指定不同的學生去完成不同的實驗。

作為能促進發展獨立進行科學研究技能的方法之一，可以提出下列安排實驗工作的程序：在該程序中每個學生小組僅須完成次數不多的實驗，但須要求他們應以最大可能的深度和精密性來進行研討。在實驗結束時，要留出一些時間來舉行全班的討論會，在會上每小組向全班學生彙報他們可完成的實驗的結果，並在全班學生的參與之下，對這些結果進行討論。討論會前，全班學生應根據實驗導則來研究別的小組所完成的實驗。

自然，本導則中的實驗目錄並未強求其完備。然而在目錄的編排上，却力圖把“電工學的理論基礎”課程有關部分的教學大綱內所包括的全部最重要的問題，儘可能地收集在內。一部分的實驗是屬於電介體和導電媒質內的穩定電場的，一部分是屬於非鐵磁媒質和鐵磁媒質中的穩定磁場的而另一部分是屬於電介體和非鐵磁及鐵磁傳導媒質中的交變電磁場的。對於電路的重要參數（電容和電感）亦予以注意，這些參數的計算是和電場及磁場的計算相關連的，同樣對帶電體及電流迴路系統中的機械力也應予以注意，這些機械力由這些參數對幾何坐標的微商來決定。

在建立實驗時，處處着重地指出了各種場間的類似性，只要這些類似性是可能的話。在很多的情況中利用了科學研究上有着重大意義的場圖仿製概念。

無論何處，只要可能的話，實驗室中表示某些電磁現象的一般規律的研究，要用電工裝置的具體實例來進行。這樣做法是為了使得一般規律的研究與使用這些規律來解決的實際問題連繫起來。當然，這些具體電工裝置的更詳盡的研究是必須在以後的專業實驗中完成的——在電工測量儀器實驗中，在電機實驗中，在高頻工程實驗等等中。

在列寧格勒的加里寧工程學院的電磁場實驗室中組織實驗工作時，別列得尼科娃（В. Ф. Бередникова），博哥斯羅夫斯基（А. С. Богословский），查伊則夫（И. А. Зайцев），魯里葉（А. Г. Лурье）

和米開維奇(А. В. Миткевич)曾給予本人很大的幫助,他們參與了特殊設備的設計和調整的工作,這些設備對於實驗室中某些實驗的建立都是不可缺少的。

電磁場實驗室是由本人在1945至1946年間在列寧格勒的列寧工程學院開始籌備的,在那裏本人曾和教研室同人們擬定和磋商了本實驗室中的一套基本實驗,在本人的領導之下,教研室同人們開出了某些實驗。

電磁場實驗導則的初稿曾由卡波梁斯基教授(проф. А. Е. Каплянский)及拉夫羅夫副教授(доц. В. М. Лавров)詳閱。他們所提出的寶貴意見在最後校訂草稿方面給了我不少的指示並且無疑地促成了本導則的改善。我認爲,向他們表達我的深厚謝意是我的愉快責任。

本導則的初稿的大部分曾由卡蘭達羅夫教授(проф. П. Л. Калантаров)和魯里葉副教授(доц. А. Г. Лурье)審閱,全部曾由查伊則夫副教授(доц. И. А. Зайцев)審閱,他們都曾提出過一系列的寶貴意見。在準備原稿出版方面別列得尼科娃(В. Ф. Бередникова)和博哥斯羅夫斯基(А. С. Богословский)曾給了我重大的幫助。我謹向他們全體表達我誠懇的謝意。

聶孟(Л. Нейман)

目 錄

原 序	1
I. 電磁場實驗室內基本量測方法的敘述	1
1. 用衝擊法量測電量	1
2. 用衝擊法量測磁通	4
3. 在大交變電流時藉不易受強磁場影響的補償器來量測小交變電動勢及 小阻抗	7
4. 磁通勢的測量	17
II. 實驗內容的敘述	21
1. 平導體板中直流的分佈的研究	21
2. 在兩種具有不同電導率的媒質交接面上電流線屈折的研究	24
3. 以導體板內的電流場來完成雙線傳輸線電場的造型	35
4. 以導體板內的電流場來完成電機磁場的造型	39
5. 以導體板內的電流場來完成電磁鐵磁場的造型及根據場圖來進行電感計算	46
6. 電流在導電媒質中的空間散播及接地電阻的研究	51
7. 分岔飽和磁路的研究	63
8. 圓形和矩形線圈的互感的研究	73
9. 靜電感應係數,部分電容及電位係數的測定	82
10. 載電流迴路間的相互機械作用的研究	88
11. 用量測儀器的模型進行電磁力的研究	92
12. 用靜電伏特計模型進行帶電體間的相互機械作用的研究	97
13. 柱形線圈的磁場的研究	105
14. 旋轉槽球在均勻磁場內磁化的研究	113
15. 在恆定及交變磁場中電磁屏蔽的研究	120
16. 導線和母線表面效應現象的研究	137
17. 置於電機槽內導體中電流分佈的研究	146

18. 具有分佈參數的傳輸線的研究	156
19. 波導中的電磁場的研究	166
20. 交變電偶極子的電磁場的研究	171
附 錄	175
1. 零階及一階貝塞爾函數的模和幅角	176
2. 第一類及第二類全橢圓積分	178

I. 電磁場實驗室內基本量測方法的敘述

在本篇中只敘述那些用於很多實驗裏的一般的基本量測方法。爲完成某些實驗所必需而不必詳加敘述的一些各別的电磁量測方法，將在敘述有關的實驗時再加以說明。同樣地，在理論電工實驗導則的第一部*中已經說明過的一般量測方法，在本篇內也不再敘述。

1. 用衝擊法量測電量

欲測定在短時間內沿電路通過的電量，應利用衝擊電流計。衝擊電流計與用來測定小電流附有可動框架的普通磁電式電流計的區別，在於其可動部分具有很大的轉動慣量。我們由電工量計課程中知道，爲了維持電流計的可動部分的偏轉角與通過其框架的電量間的正比關係，電流脈衝必須在框架開始運動之前實際上已停止。電流脈衝愈短及電流計的可動部分的轉動慣量愈大，則這個條件愈能準確地滿足，而量測誤差也愈小。通過的電量可由在電流計的標尺上讀出的衝擲度 α 加以確定。在等式

$$q = C_q \alpha$$

中，通過框架的電量 q 與電流計標尺上的衝擲度 α 的比例係數稱爲電流計的衝擊常數，而其倒數

*卡蘭達羅夫，交流電實驗導則(П. Л. Калантаров, Руководство к лабораториям переменных токов)1949年出版。

$$S_q = \frac{1}{C_q}$$

稱爲衝擊靈敏度。在鏡式電流計中，在電流計的可動部分的相同偏轉下，標尺上的衝擲度視電流計的小鏡與標尺間的距離而定。在電流計的規格中通常指出相當於小鏡與標尺間的距離爲一米時的 C_q 數值，而且偏轉通常以毫米來計算。如果在實驗室中這個距離不是一米，那麼 C_q 也應是相當於實際距離的另一數值。 C_q 的值可以由根據下述方法所完成的分度中求得。

衝擊靈敏度視電流計可動部分的阻尼程度而定，我們由電流計的理論裏知道，阻尼程度是由電流計所在的迴路內的電阻所決定的。衝擊靈敏度隨着阻尼程度的增加而降低，將上述電阻減小時即可發生這種情形。由測定電量時能得到最大靈敏度的觀點看來，在最大可能的電路電阻下電流計的工作條件應是最好的。這時阻尼極低而電流計將處在振盪的狀態。爲使其停止，在讀出了第一個衝擲度之後，當可動部分經過零位置時，用一個特殊的扣鍵將電流計的兩端短路。如果阻尼程度以及和它相應的電阻等於確定週期性振盪與非週期性偏轉的界限的所謂臨界值時，則衝擊靈敏度將降低至阻尼爲零時的最大靈敏度的 $1/\varepsilon$ ， ε 是自然對數的底數。通常應在電流計電路內的電阻稍大於臨界值的情況下進行工作，因爲這時可動系統很快地就可平定下來而不須應用上述的短路扣鍵。電流計電路的外部臨界電阻通常是在電流計的說明書上繪出的。

爲了確定電流計的衝擊常數，可利用一個已知容量爲 C 的標準容電器。使容電器充電至電壓 U ，然後再使其經由電流計電路放電，觀察在電流計標尺上的衝擲度 α 。由以上所述可知，在測定衝擊常數時，電流計所跨接的電路的電阻值必須與以後進行量測時所用的電阻值相同。爲了這個目的，可聯接如圖 1 所示的電路。具有電阻 r_c 的電流計聯至電阻 $(r_1 + r_2)$ ，這個電阻必須選得等於在以後量測時電流計所閉合

的外部電路的電阻。

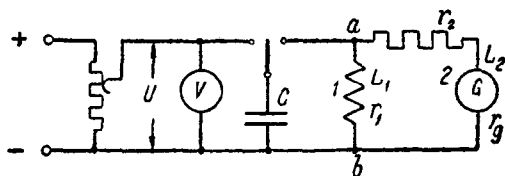


圖 1

現求取容電器放電時通過電流計線圈的電量 q_2 的算式。

對於兩並聯支路 1 及 2, 我們有下一等式:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 = L_2 \frac{di_2}{dt} + (r_2 + r_g) i_2,$$

其中 L_1 及 L_2 為兩支路的電感, r_1 及 $(r_2 + r_g)$ 為它們的電阻, i_1 及 i_2 為兩支路內電流的瞬時值。在全部放電時間內(由 $t=0$ 至 $t=\infty$)將上式積分,得:

$$L_1(i_{1\infty} - i_{10}) + r_1 q_1 = L_2(i_{2\infty} - i_{20}) + (r_2 + r_g) q_2.$$

此處: i_{10} 及 i_{20} 為放電開始($t=0$)時支路內的電流值; $i_{1\infty}$ 及 $i_{2\infty}$ 為放電終止($t=\infty$)時這些電流的值; $q_1 = \int_0^{\infty} i_1 dt$ 及 $q_2 = \int_0^{\infty} i_2 dt$ 為在全部放電時間內通過支路的電量。實際上放電並不在 $t=\infty$ 時終止,而在放電開始後一個極短時間內便告結束。

因為

$$i_{10} = i_{1\infty} = i_{20} = i_{2\infty} = 0,$$

故有

$$r_1 q_1 = (r_2 + r_g) q_2.$$

因此, 比值 q_2/q_1 與兩支路的電感 L_1 及 L_2 無關, 而是由支路電阻的比值倒數決定的。

容電器上的總電量 q 等於:

$$q = UC = q_1 + q_2,$$

由這些等式得

$$q_2 = UC \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_g}.$$

上式指出，當電流計所跨接的電路的電阻為無限大 ($r_1 = \infty$) 時，電流計具有最大的靈敏度而在分度時 $q_2 = UC$ 。

知道 q_2 以及與其相應的電流計標尺上的衝擲度 α ，即可由下列關係將衝擊常數算出：

$$q_2 = C_q \cdot \alpha.$$

在進行分度時最好在不同的電壓值 U 下，取一些讀數 α ，然後根據每一讀數所算出的 C_q 值取其平均值。

在運用電流計時必須採取各種的防護措施，因為它們對於機械震動和搖動是很靈敏的。這點對於鏡式電流計尤其重要，爲了這個原因它們必須安裝在堅固的基座上，這些基座對外界的機械震動而言必須足夠的平穩。帶有懸絲的電流計應當安裝得使它們的可動部分處在絕對鉛直的位置。爲了這個目的，電流計應該裝有調節螺旋和水泡水平儀。在搬運電流計時，爲避免懸絲折斷起見，必須使懸絲釋去負荷，方法是：利用一種特殊設備——定止器——把框架固定在一個稍稍提起的位置，定止器是用一個裝在外殼上的轉鈕來控制的。只有將電流計安裝在水平位置之後，方可將它的可動機構釋放。

2. 用衝擊法量測磁通

用以測定與任意電路相鏈合的全磁通 Ψ 的衝擊法是：將磁通由零變至最後值或由最後值變至零而用一衝擊電流計量出通過電路的電量值 Δq 。磁通的增量 $\Delta \Psi$ 與 Δq 的值有關，它們之間的關係即代表電磁感應定律：

$$\Delta \Psi = -\Delta q \cdot r,$$

其中 r 爲電路的電阻。如將磁通由零增至最後值 Ψ ，則 $\Psi = \Delta \Psi$ ；如將磁

通由數值 Ψ 減至零，則 $\Psi = -\Delta\Psi$ 。

欲根據上式計算 $\Delta\Psi$ 的值，必須知道電路電阻 r ，並須根據電流計的衝擲度 α 及其衝擊常數 C_q 確定出 Δq 來。如將電流計直接地按磁通刻度，則在實用上更為便利。事實上，全磁通的增量的絕對值是

$$|\Delta\Psi| = \Delta q \cdot r = C_q r \alpha = C_\Psi \alpha,$$

其中， $C_\Psi = C_q \cdot r$ 是一個新的衝擊常數，它直接以電流計標尺每度的單位磁通數來表示。和 C_q 一樣，常數 C_Ψ 也與電流計電路的電阻有關，這使得我們在實用時不得不特別地在每一個單獨情況下將電流計分度。

為加快量測過程起見，應將電流計電路的電阻選配得與臨界電阻大致相等或較臨界電阻稍大。在電流計的名牌和說明書中繪出適用於電流計工作在臨界電阻情況下的常數 C_Ψ 的值。在常數 C_Ψ 為未知的情況下，測定磁通時也可根據衝擊常數 C_q 及臨界電阻值來選擇電流計。同時須注意到，具有最小的衝擊常數 C_q ，也就是在量測電量方面最為靈敏的電流計在測定磁通時可能表現得較不靈敏，如果它的臨界電阻是很大的話。

為了確定常數 C_Ψ ，可按照圖 2 所示的電路藉一標準螺線管 M 將衝擊電流計分度。這個標準螺線管各別地另在圖 3 中表示。它是一個長的柱形單層線圈，它的線匝沿長度均勻分佈。線圈的繞組捲在一個以絕緣材料製成的柱形芯子上。在螺線管的中部，它被一個短的副繞組所包圍，這個副繞組被安置在與螺線管的主繞組同軸的位置。螺線管

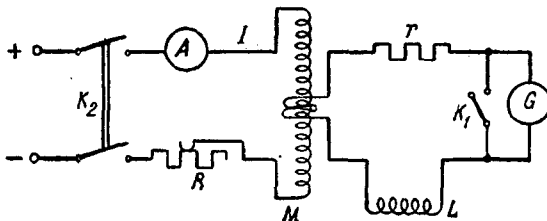


圖 2

繞組的錄匝的直徑遠較螺線管的長度為小，因此可以以相當大的準確性把螺線管內部的中央部分的磁場當作均勻的，而在這中央部分的磁場強度 H 可依以下公式計算：

$$H = \frac{w_1 I}{l},$$

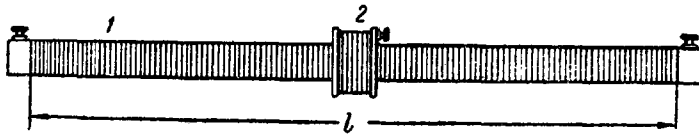


圖 3

其中 w_1 為螺線管的主繞組的匝數， l 為繞組的長度而 I 為沿繞組通過的電流。

與副錄圈的全部匝數 w_2 相鏈合的磁通等於：

$$\Psi = w_2 \Phi = w_2 \mu_0 H S = \frac{\mu_0 w_1 w_2}{l} \cdot s \cdot I,$$

其中 Φ 為穿過主繞組的橫截面的磁通而 s 為這個繞組的橫截面的面積。 s 的值應規定是一個與繞組的錄匝導線的軸線相重合的輪廓所包圍的面積。

電路(圖 2)的其他元件如下述： G 為須加分度的衝擊電流計， K_1 為一扣鍵，藉此可在調節螺線管的主繞組內的電流時將電計短路，從而避免偶然的電流脈衝通過電流計， r 為一電阻箱，用以選擇電流計電路的電阻，使它等於或接近於電流計的臨界電阻， A 及 R 各為電流計及變阻器，分別用來量測及調節標準螺線管 M 的主繞組電路中的電流，而 K_2 為使此電流接通或截斷的開關。 L 代表量測錄圈，與它的錄匝相鏈合的磁通就是今後我們所要量測的。這個錄圈應當在電流計分度時接入電路，這樣可以使得在分度時電流計電路的電阻與在正式量測時的一樣。顯然，為同一目的在進行正式量測時，仍應使標準螺線管的副錄

圈留在電流計的電路內。特別重要的是：留心安排標準螺線管和量測錄圈的相對位置，在這位置時可使標準螺線管的副錄圈與量測錄圈之間的互感係數為零。如這點不能辦到，那麼在分度電流計時須將量測錄圈由電路中拆除而代以和它相應的電阻，而在進行正式量測時須將標準螺線管的副錄圈由電路中拆除而代以和它相應的電阻。

電流計的分度依下述步驟進行。合上扣鍵 K_1 ，並在將開關 K_2 閉合後，將一個任何數值的電流 I 建立在螺線管的主繞組中。然後打開扣鍵 K_1 ，用開關 K_2 將電流截斷並在電流計的標尺上讀出衝擲度 α 。電流計常數可依下式算出：

$$C_{\Psi} = \frac{|\Delta\Psi|}{\alpha} = \mu_0 w_1 w_2 \frac{s}{l} \cdot \frac{I}{\alpha}.$$

依此在不同的電流值 I 下進行一系列的觀察並取常數 C_{Ψ} 的平均值。

3. 在大交變電流時藉不易受強磁場影響的補償器來量測小交變電動勢及小阻抗

量測小交變電動勢，可利用任何類型的補償器，特別是在導則的第一部中所敘述的補償器。需要以高度準確性來知道的大多並不是電動勢本身，而是它與引起它的電流之比。例如，在測定阻抗時必須準確地知道電壓降與電流之比；在測定一種物質的磁特性時必須準確地知道在一個繞在待測樣品上的特殊繞組內的感應電動勢與磁化電流值之比，等等。當然，在所有這些情況中饋送至補償器的電流應與在待測樣品中產生電壓降或感應電動勢的電流相同。這時須根據補償電路的參數來計算被測量的值，這些參數是可以以極高的準確性來知道的。

爲了能够改變補償電壓的相位，在任何交流補償器中應包含電容或電感元件或利用互感的效應。在所有必須避免強力交變磁場對電路的影響的情況下（在大的交變電流時這點尤其重要），最好採用可變容

電器，而避免使用一切的電感元件。在適當的容電器構造下，電場對容電器容量的影響是微不足道的而採用了適當的屏蔽之後可以很容易地使它實際上減小至零。補償器還具有一個優點，就是它的電容可以以極高的準確度來測定。

在根據補償電路的參數來計算被測量時，所用的公式總含有饋電電流的頻率在內。為便於量測起見，必須作到：可以使我們在量測之後進行計算時才去考慮頻率並且在每次量測之前不必使補償器的任何元件去適應當時的頻率，就如在某些補償器中所需要的。最後，我們希望，頻率在公式中所處的地位可以使得在各種重要的通常情況下它的測定準確度對於欲求量的計算準確度的影響較小。

滿足上述條件的補償器已由著者創造出來。這種補償器的電路如圖 4 所示。

補償器的主要元件如下：一個精密的雲母十進容電器，電容 $C = 0.999$ 微法；一個十進電阻箱，含有一個可變電阻部分 r ，全部電阻 $r_2 = 10000$ 歐 = 常數；電阻線圈 $r_3 = 10000$ 歐；電阻線圈 $2r_0 = 2 \times 0.1$ 歐，具有兩個用來引導電流的端鈕和三個用來引出電壓的端鈕，後者中之一係由中點引出。作為一個例子，在圖 5 中表示測定阻抗 Z 時補償器

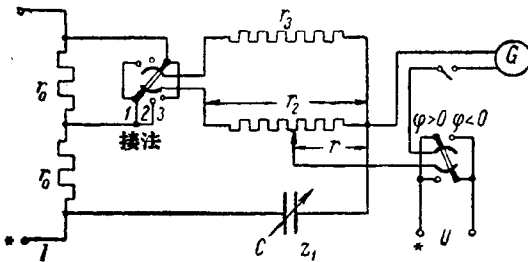


圖 4

的聯法。這時補償器由一精確電流互感器的次級端饋電，電流互感器的初級繞組則與待測物串聯。

分支在支路 r_2, r_3 及 Z_1 內的電流和電阻 r_0 內的電流比較起來是可以略而不計的。這時誤差將小於 0.01%，因為阻抗 r_2, r_3 及 z_1 與電阻 r_0 的比值具有數量級 10^5 。在這情況下電阻為 r_0 的每一部分上的電壓降將為：

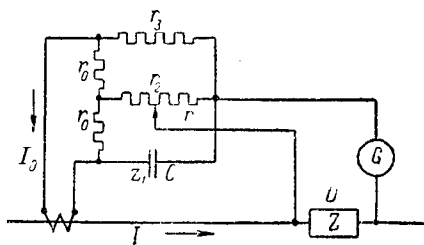


圖 5

$$U_0 = \dot{I}_0 r_0,$$

其中 \dot{I}_0 為饋送至補償器的電流在(圖5的)電路中，這是電流互感器的次級電流。

假設圖 4 中以“接法”兩字表示的換接開關在第一位置上。如選取阻抗為 Z_1, r_2 及 r_3 的各支路內的電流 I_1, I_2, I_3 的正方向如圖 6 所示的方向(因此這些也是該支路內的電壓降 U_1, U_2, U_3 的正方向)，則有以下的方程式：

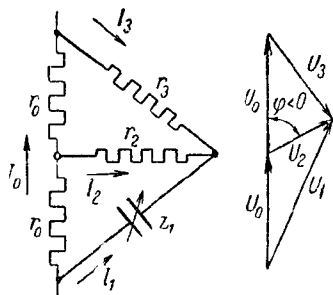


圖 6

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{U}_0,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + \dot{I}_3 r_3,$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \text{ 及 } \dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_2}{r_2}.$$

由這些方程式解 \dot{U}_2 ，得

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 \frac{r_2(Z_1 - r_3)}{r_2 r_3 + Z_1 r_3 + Z_1 r_2}.$$

由於 $r_2 = r_3$ 及 $Z_1 = \frac{1}{j\omega C}$ ，故