

線性與非線性電路

曉園出版社
世界圖書出版公司

北京·廣州·上海·西安

1992

内 容 简 介

本书作者是美国加州大学伯克利分校电气工程与计算机领域的知名教授。本书内容丰富充实，是一本很有权威性的大学教材，也可供有关专业的科技人员参考。

线 性 与 非 线 性 电 路

(美) 蔡少棠 葛守仁 著

李清吟 李俊良 译

*

晓园出版社出版

世界图书出版公司北京分公司重印

北京朝阳门内大街 137 号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1993 年 1 月第 一 版 开本 711×1245 1/24

1993 年 1 月第一次印刷 印张 36

印数 0001-900 字数 64.8 万字

ISBN 7-5062-1467-9/TN·16

定价. 32.70 元 (W_{9206/10})

世界图书出版公司通过中华版权代理公司向晓园出版社购得重印权

限国内发行

目 錄

第一章 克希荷夫定律 1

1. 電路理論的學科	1
2. 集總電路的近似化	2
3. 電氣電路、模型與電路元件	4
4. 克希荷夫定律	6
5. 從電路到圖脈	12
6. 克希荷夫定律的矩陣型式	23
7. 特立勤定理	28
摘 要	35
習 題	36

第二章 雙端電阻器 47

1. 雙端電阻器的特性	47
2. 串聯和並聯連接	62
3. 片斷式線性化的技巧	79
4. 直流操作點	84
5. 小信號分析	93
6. 轉移特性曲線	97
摘 要	100
習 題	101

第三章 多端電阻器 115

1. 電阻性雙埠	115
2. 有用的電阻性雙埠	124
3. 非線性電阻性雙埠	132
4. <i>n</i> pn 雙極性電晶體	135
5. 金氧半電晶體與基本反相器	148

6. 多埠與多端電阻器	152
摘 要	157
習 題	158

第四章 運算放大器電路 169

1. 元件描述、特性與模型	169
2. 線性區操作下之運算放大器電路	175
3. 運算放大器的非線性區操作	184
4. 與有限增益模型比較	197
摘 要	200
習 題	201

第五章 一般電阻電路 211

1. 電阻電路的節點分析	212
2. 電阻電路的表格分析法	223
3. 非線性代數方程式的電腦解法	230
4. 線性電阻電路的一般性質	241
5. 非線性電阻的一般特性	263
摘 要	275
習 題	278

第六章 一階電路 291

1. 雙端電容器與電感器	291
2. 非時變電容器與電感器的基本性質	301
3. 一階線性電路	315
4. 一階線性開關電路	334
5. 一階片斷線性電路	335
摘 要	344
習 題	348

第七章 二階電路 359

1. 建立方程式：線性非時變電路	360
2. 零輸入響應	370

3. $x = Ax$ 的定性行為	39
4. 非線性狀態方程式的建立	39
5. $x = f(x)$ 的定性行為	40
6. 非線性振盪	40
摘 要	40
習 題	40

第八章 一般動態電路 449

1. 耦合電感器	4
2. 表格分析	4
3. 修正節點分析	4
4. 小信號分析	4
5. 動態電路的一般特性	4
6. 電路方程式的數值解	4
摘 要	4
習 題	4

第九章 弦波穩態分析 503

0. 複數復習	5
1. 相量和弦波解	5
2. 電路方程式的相量形式化	5
3. 處於弦波穩態之網路函數	5
4. 共振電路	5
5. 處於弦波穩態的功率和能量	5
6. 三相電路	5
摘 要	5
習 題	5

第十章 線性非時變電路 577

1. 拉普拉斯轉換的定義	
2. 拉普拉斯轉換的四個基本性質	
3. 部分分式展開	
4. 線性非時變電路的性質	

4 目 錄

5. 弦波穩態的基本定理	620
6. 迴 旋	623
摘 要	634
習 題	638

第十一章 網路函數和穩定度 651

1. 大小相位和極點零點	651
2. 網路函數的零點	665
3. 奈奎斯特準則	668
4. 單埠的開路穩定度和短路穩定度	686
5. 以電阻器端接單埠的穩定度	691
摘 要	694
習 題	695

第十二章 電路拓樸和一般電路分析 705

1. 電源轉換	706
2. 克希荷夫定律的再探討	709
3. 以一樹作出切集和迴路	715
4. 表格分析	725
5. 線性非時變電路分析	729
6. 狀態方程式	738
摘 要	741
習 題	743

第十三章 雙埠、多埠和互易性 751

1. 埠特性描述的複習	753
2. 線性非時變雙埠	756
3. 端接和互聯雙埠	765
4. 多埠和多端電路	773
5. 輝鐵入口和鉗子入口	781
6. 互易定理	782
摘 要	790
習 題	791

1. 簡單低通濾波器設計.....	801
2. 靈敏度分析.....	814
摘要.....	831
習題.....	833
附錄 A 符號	839
附錄 B 記號	841
索引	843

克希荷夫定律

身為一位電機工程師，必須能夠分析與設計電路。我們到處都可見到電氣電路，如家用電腦、電視機、高傳真音響設備、電力網路及越洋通訊系統，無一不是由電路所組成。但要讓各式各樣的電路充分發揮其功能，就必須仰賴電機工程師巧妙地設計與分析了。現在坊間有關電路的書籍，討論範圍都局限在傳統的 $R.L.C$ 元件線性電路。本書不同，我們不但對電路基本理論有更精闢的剖析，而且它將涵蓋主要的線性與非線性 $R.L.C$ 元件電路的應用。

在第一章，首先介紹集總電路 (lumped-circuit) 理論的基本假說一稱之為“克希荷夫定律”，當然，我們會先說明什麼是“集總”，同時讓讀者了解“模型化”觀念的重要性，因為在電路理論中，我們是先將電氣 (electric) 裝置的實體電路模型化，變成一個由電路元件連接組合而成的電路，因為克希荷夫定律 (Kirchhoff's laws) 適用於任何集總電路，所以它和電路元件的電氣特性無關。這些特性將在下章討論到。

本章將介紹一重要的觀念，即用一個圖脈 (graph) 表示電路。這樣一來，對於多端裝置 (multiterminal devices) 的分析方法就可和普通雙端裝置 (two-terminal device) 的分析方法相同。同時，可以使克希荷夫定律與其它相關的基本定理，如特立勤定理 (Tellegen's theorem) 一併正式介紹。

1. 電路理論的學科

電路理論是一門基礎工程學科，它涵蓋了所有的電機工程。在這裏，我們所謂的“實際電路” (physical circuit) 是指由一些實際的電氣裝置 (electric devices) 所互相連接 (interconnection) 而成的電路。常

見的電氣裝置是電阻器、線圈、電容器、二極體、電晶體、運算放大器 (op amps)、電池組、變壓器、電動機、發電機等等。

電路理論的目標是預測 (predict) 實際電路之行為 (behavior)，然後根據這些行為去改善電路設計。特別是減少電路成本及在各種工作條件下 (如溫度效應、老化效應，可能故障情況等等) 去改善電路性能。

電路理論是一門應用領域非常廣泛的一種工程學科 (engineering discipline)。電路的體積大小 (size) 變化差距非常大，例如：從外表看起來像指甲般大小，卻含有十萬個以上元件的大型積體電路到收音機、電視機、電子儀表、小型與大型計算機的電路，一直到佈滿全美大陸的通信電路與電力網路。在研究的電路中，電壓 (voltages) 範圍從數微伏特 (μV) [例如：精密儀器的雜訊研究——到電力網路的百萬伏特 (MV)]。電流變化範圍從 10^{-18} 安培 ($1 \text{ fA} = 10^{-18} \text{ A}$) [例如在靜電表中——到電力網路的故障電流百萬安培 (MA)]。頻率 (frequencies) 的範圍從零赫芝 [直流 (dc)] 到微波電路的 10^{10} 赫芝 ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$)。功率的範圍 (power levels) 很大，從 10^{-14} 瓦特 (W)，即靈敏的接收器之輸入信號 (例如從遙遠銀河的微弱無線電信號) 到發電機的輸出功率 10^9 瓦特 = 1000 百萬瓦 (MW)。

電路理論的焦點放在電路上的電氣作用。亦即理論上不考慮電路產生的熱、機械效應及化學效應。其目的在如何預測或說明電氣裝置端點所量測的 (端) 電壓與 (端) 電流。而往往不予考慮在實際裝置內部 (如電晶體或電動機內部) 的物理現象，這些討論在裝置的物理課程與電機機械課程有專門介紹。

電路理論的目標是在電路電氣特性上作定性與定量的預測；因此電路理論的工具將是數學和屬於電路的觀念 (concepts) 與結果 (results)，並以電路變數 (circuit variables) 及電路方程式來表示，從這些方程式與變數中可明顯的看到種種的動作說明。

2. 集總電路的近似化

本書所討論電路範圍僅限於集總電路 (lumped circuits)。一個實際電路稱為集總 (lumped) 必須是它的電路元件之實際尺寸，足夠小而使得電磁波能以極短的時間通過電路，考慮下列兩個例子：

例題 1 考慮在一晶片上的小型計算機電路，它的大小是一毫米 (mm)，假設所需的最短信號時間是 0.1 奈秒 (nanosecond) [一奈秒的 $\frac{1}{10} = 10^{-10}$ 秒 (s)]，電磁波以光速前進，光速為 $3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ ，通過 1 毫米的時間為

$10^{-8} \text{ m} / (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 3.3 \times 10^{-16} \text{ s} = 0.0033 \text{ ns}$ ，因為傳播 (propagation) 時間遠小於所需的最短信號時間，故可以忽略。大體上而言，假設 d 是電路的最大尺寸， Δt 是所需的最短時間，且 c 是光速。如果 $d \ll c \cdot \Delta t$ ，則稱這個電路為集總電路。

考慮一音頻電路。所需的最高頻率為 $f = 25 \text{ kHz}$ ，對電磁波而言，它的對應波長為 $\lambda = c/f = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) / (2.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}) = 1.2 \times 10^4 \text{ m} = 12 \text{ km} \cong 7.5 \text{ miles}$ 。所以，即使一個電路的尺寸有整個足球場那麼大，比起所需最短波長來，還是太渺小了。因此，大體上而言，如果 $d \ll \lambda$ ，則這個電路可稱之為集總電路。

當滿足這些條件時，電磁理論的驗證¹與實驗都能證明集總電路的近似化是可成立的。講明白一點，在整個實際電路中，在任何時間 t ，流經任何電氣裝置端點之電流 $i(t)$ ，與跨於任何端點對 (any pair of terminals) 的電位差 $v(t)$ ，都必定是定義良好的 (well-defined)。能滿足這些條件的電路稱之為集總電路 (lumped circuit)。

從電磁理論的觀點來看，電磁波是瞬間傳播通過電路，基於這個理由，我們可以把一個集總電路簡化成一個點。因此，在集總電路的理論中，電路元件的個別位置並不影響整個電路的行為，將一個實際 (physical) 電路近似成一個集總 (lumped) 電路，就好像把一剛體看成一個質點一樣，如此一來，有關剛體的相關資料 (如形狀、大小、方向等) 都可以被忽略。

由此可知，集總電路理論是電磁理論的一種近似，(忽略傳播效應) 就好像古典力學和精確的相對力學之關係一樣：古典力學在速度遠小於光速下，能對物體的運動情形提供一個極佳的預測值。同理，當上述條件皆成立時，集總電路理論能對一實際電路的行為提供一極佳的預測值。

如果集總近似不能成立，則實際電路的尺寸就必須被考慮，這種電路我們稱之為分佈電路 (distributed circuits)。典型的分佈電路有導波管 (waveguides) 與傳輸線 (transmission lines)，在分佈電路中，電流與電壓不僅與時間變數有關，且與空間變數 (如距離、寬度) 有關。這時就必須利用電磁理論來對分佈電路作預測、分析與設計了。在這本書，我們只限於討論集總電路。

¹ R. M. Fano, L. J. Chu, and R. M. Adler. *Electromagnetic Fields, Energy and Forces*. John Wiley and Sons, New York, 1960.

3. 電氣電路、模型與電路元件

在實驗室或工廠裏，我們所謂電氣裝置 (electric device) 是指實物，如線圈、電容、電池、二極體、電晶體、電動機等等。實際的電路 (physical circuits) 是由這些裝置用導線加以連接而成。在平時，這些導線都假設為理想導體。我們把電氣裝置用理想化模型 (idealized models) 來替代，例如電阻 ($v = Ri$)、電感 ($v = L di/dt$)、電容 ($i = C dv/dt$) 等等，這些在物理學上皆可學到。

這些“理想化模型”必須都能被精確的定義，以便把電氣裝置與電路元件 (circuit element) 嚴格區分開來。例如繞於磁蕊上的線圈——我們稱為電氣裝置 (electric device)，它的模型可能是一個電感，或是一個電阻串聯一個電感——我們稱為電路元件或電路元件的組合。

每一個模型都是一種近似，什麼時候用什麼近似模型，完全視應用或考慮條件而有所不同。因此，同樣一個裝置可能有好幾種不同的近似模型。每個模型都是由 (理想的) 電路元件所組成。例如，我們會遇到好幾種不同模型的運算放大器 (op amp)²。

任何電路元件的互相連接 (interconnection of circuit elements)，皆稱為電路，所以一個電路是由相對應於實際裝置之理想化模型所互相連接而成。圖 3.1 說明了實際裝置與相對應電路的關係。如果從理論分析 (analysis) 得到預測值與實際量測值不一樣，則錯誤原因可能是進行量測的過程有錯誤，或者是使用不正確的分析方法。一個經常出錯的原因是選用不正確的模型，例如在高頻範圍使用低頻模型，或使用線性模型去分析遠超過其有效幅度範圍的情況。

我們的重點是電路理論，所以我們必須將電氣裝置組成的實際電路化成分析用的電路，我們的目標是去發展預測電路行為的方法。必須強調的是，分析用的“電路”並不是“實際電路”，根據以往經驗，只要給我們任何實際電路，我們都可將它模型化成為分析用的電路，而且能夠充分地預測它的行為。

在圖 3.2 (a) 中，我們指出由電氣裝置 (electric devices) 所組成的實際電路 (physical circuit)，這些裝置有發電機、電阻器、電池組、變壓器與負載。要分析這個實際電路。首先模型化成如圖 3.2 (b) 所示的電路，它是由電路元件 (circuit elements) 所互相連接而成，這些元件有電壓源、電阻器、電容器、耦合電感器及電晶體。它們以慣用符號來表示

² 同樣地，在傳統機械學上，一個環繞地球運行的通訊衛星可視為一個點或一個剛體，或一個彈性體端視所考慮的問題而定。

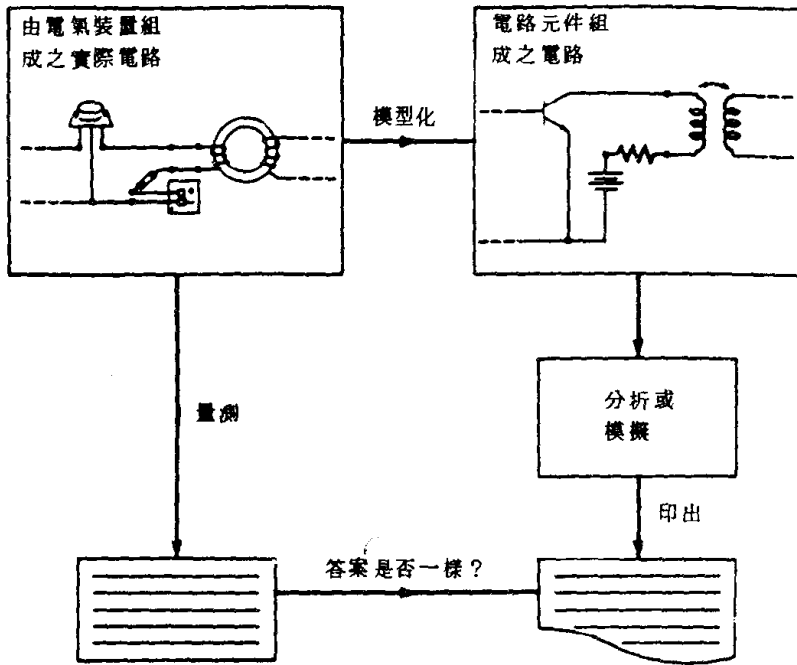
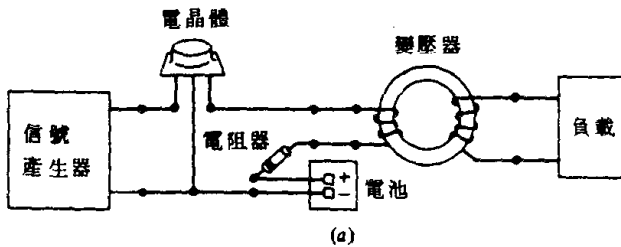


圖 3.1 說明實際電路與電路，實際裝置與電路元件和實驗室量測與電路分析等兩者之間的關係

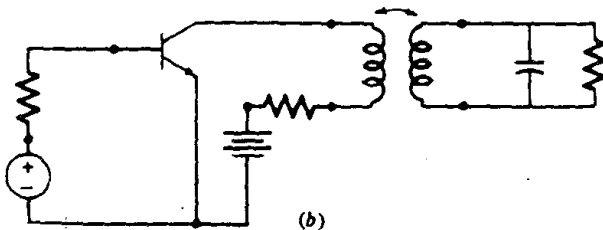
。在第二章，我們將討論雙端元件（如電壓源、電阻器……等等）的一些電氣特性，第三章我們將討論多端元件（如電晶體、理想變壓器……等）的電氣特性。

我們利用導線連接各個電氣裝置的端點，如圖 3.2 (a)所示。當連接電路元件時，我們去掉連接的導線並將端點合併，以得到如圖 3.2 (b)所示的電路。所謂“節點”（node）是指電路中端點結合在一起的點或電路元件任何獨立的端點。如圖 3.2 (b)之電路就有 8 個節點（以黑點為符號）。有



(a)

圖 3.2 (a)由電氣裝置組成之實際電路；(b)由電路元件組成之電路模型



(b)

了節點的觀念以後，我們就可正式討論電路的連接及陳述電路理論的兩個基本假說，就是克希荷夫電壓定律 (Kirchhoff's voltage law) 與克希荷夫電流定律 (Kirchhoff's current law)。

4. 克希荷夫定律

在集總電路中，兩節點間之電壓及電流流經節點進入任一元件都有良好的定義³。因為電流之真正 (actual) 流向與電壓之真正 (actual) 極性在從一瞬間到另一瞬間隨時都會改變。因此實在很難事先指定電流真正的 (actual) 方向與電壓極性。因此必須像古典力學一樣，設定“參考體制” (frame of reference)，使得系統之質點在每一時刻都能正確指出其位置。同理，在電路中亦必須設定“電氣參考體制” (electric frame of reference)，使電流與電壓都能被明確地 (unambiguously) 量測。

4.1 參考方向

制定電氣參考體制，我們可以對每一個電流變數任意地設定一個參考方向 (assign arbitrarily a reference direction)，其方向以箭頭表示；並對每一個電壓變數設定一個參考極性 (reference polarity)，以正 (+) 負 (-) 符號來表示。圖 4.1 所示為雙端，三端及 n 端元件之參考方向⁴。

在每一端點，我們加一箭頭符號表示電流參考方向，它在電路上扮演一重要角色，考慮圖 4.1 (a)，如果在時間 t_0 時， $i_1(t_0) = 2 \text{ A}$ ，意即在時間 t_0 時，有一電流 2 A 流出圖 4.1 (a) 所示雙端元件之節點②，如果經過一段時間 t_1 ，得 $i_2(t_1) = -25 \text{ mA}$ 。意即，在時間 t_1 ，有一電流 25

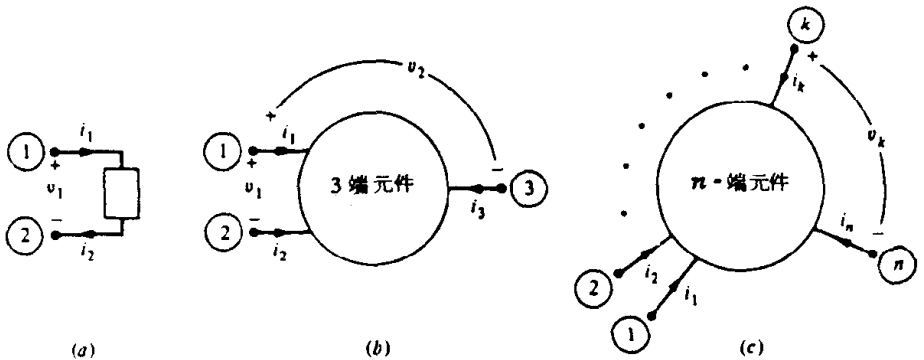


圖 4.1 使用雙端、三端和 n 端元件來說明參考方向

³ 我們假設此電路為連接的，而“連接” (connectedness) 的定義將在後面介紹。

⁴ 例如，音頻放大器的輸出為一個濾波器，其為六端元件，它將高頻送到高音揚聲器，低頻送到低音揚聲器 (在後面，我們將明瞭此濾波器也可視為三埠)。

mA，從節點②流入 (flow into) 雙端元件。

必須指出的是電流的參考方向和 $i(t)$ 的正負號決定電荷流動的真正方向。

在圖 4.1，我們在端點附加上“+”，“-”之符號，如圖 4.1(b)之①②端點對與③④端點對。這些符號表示了電壓之參考方向 (voltage reference direction)。考慮圖 4.1(a)，如果在時間 t_0 ， $v(t_0) = 3 \text{ mV}$ ，表示在時間 t_0 ，端點①之電位比端點②高 (larger) 3 mV ，同理考慮圖 4.1(c)，如果在時間 t_1 ， $v_k(t_1) = -320 \text{ V}$ ，表示在時間 t_1 ，端點④之電位比端點③之電位低 (smaller) 320 V 。

練習題 針對圖 4.1(c)，寫出下列敘述之物理意義：

圖 4.1c: $i_k(t_1) = -2 \text{ mA}$, $i_2(t_1) = 4 \text{ A}$, $-v_k(t_1) = 5 \text{ V}$ 。

4.2 克希荷夫電壓定律 (Kirchhoff's Voltage Law (KVL))

任一 n 個節點之連接 (connected) 集總電路，我們可任選其中之一節點為根據節點 (datum node)，即量測電位的參考。所謂連接 (connected)，即電路中任一節點至另一節點之間至少有一通過電路元件的路徑相通。圖 3.2(b) 所示電路即為不連接電路。在圖 4.2 中，我們對應於選定之參考節點，可定義 $n - 1$ 個節點對據點 (node-to-datum) 之電壓。因為這個電路是連接集總電路，所以 $n - 1$ 個節點對據點之電壓都有明確的定義且都可量測到實際值，我們用 e_1, e_2, \dots, e_{n-1} 符號表示，並加上 +、- 符號表示參考方向，我們選④為根據節點，故 $e_n = 0$ 。

在圖 4.2 中，我們用 v_{k-j} 表示節點④到節點①之電位差。克希荷夫電壓定律 (Kirchhoff's Voltage law) 為：

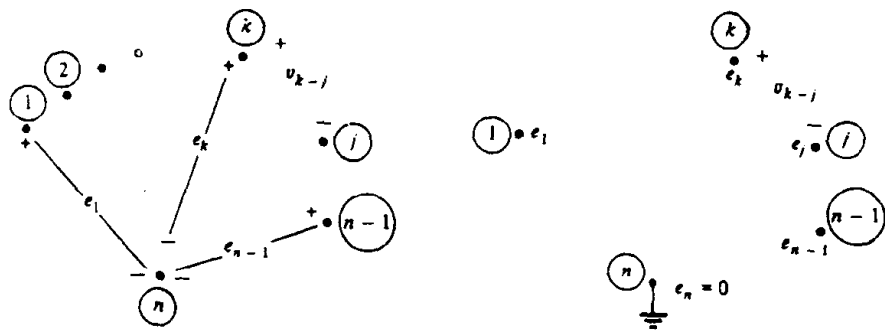


圖 4.2 n 個節點、電路的節點對據點的標示

KVL 對所有集總連接電路而言，對所有選擇根據節點，在所有時間 t ，對所有之節點對 k 與 j ，

$$v_{k-j}(t) = e_k(t) - e_j(t)$$

說得更清楚一點，

$$v_{j-k}(t) = e_j(t) - e_k(t) = -v_{k-j}(t) \quad (4.1)$$

例題 圖 4.3 所示為一連接電路，由 5 個雙端元件與 1 個標示為 T 的三端元件所組成。共有 5 個節點，標示為 ①到⑤，（任意）選擇節點⑤為根據節點，我們令四個節點對根據節點之電壓分別為 e_1, e_2, e_3 及 e_4 。根據 KVL，我們可寫成下列七個方程式⁵（為方便起見，我們不寫 t ）：

$$\begin{aligned} v_{1-5} &= e_1 - e_5 = e_1 \\ v_{1-2} &= e_1 - e_2 \\ v_{2-3} &= e_2 - e_3 \\ v_{3-4} &= e_3 - e_4 \\ v_{4-5} &= e_4 - e_5 = e_4 \\ v_{2-4} &= e_2 - e_4 \\ v_{5-2} &= e_5 - e_2 = -e_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

其中， v_{1-5} 與 v_{1-2} 分別表示跨在雙端元件（two-terminal elements）

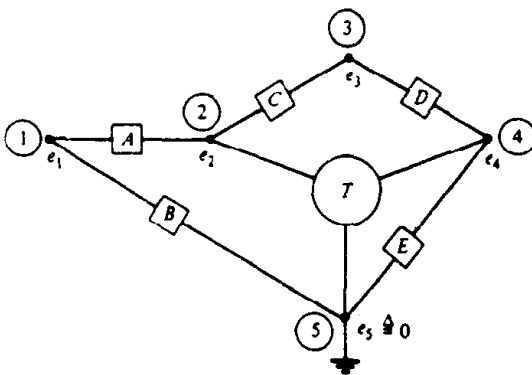


圖 4.3 一具有 5 個節點之連接電路

⁵ 由方程式 (4.1) 可知道共有五中選二，即可寫成組合 $C_2^5 = 10$ 個非微 (nontrivial) 方程式。

B 與 A 之電壓。同理， v_{2-4} ， v_{4-5} 與 v_{5-2} 分別表示跨於三端元件 (three-terminal element) T 之端點對②與④，④與⑤，以及⑤與②之電壓。

如果我們將 (4.2) 式之後三個式子加起來，我們發現

$$v_{4-5} + v_{2-4} + v_{5-2} = 0$$

讓我們考慮封閉節點順序 (closed node sequence) ②—④—⑤—②，所謂封閉 (closed)，即起點與終止都在節點②，因此對此一特別的封閉節點順序，其電壓和為零。

考慮另一封閉節點順序 ①—②—③—④—⑤—①，從 (4.2) 式之前五個式子，且利用 (4.1) 式，我們發現

$$v_{1-2} + v_{2-3} + v_{3-4} + v_{4-5} + v_{5-1} = 0$$

這個封閉節點順序 ①—②—③—④—⑤—① 在電路中構成一個迴路 (loop)，亦即一條封閉路徑，不管起始節點是那個，經過一些雙端元件 (two terminal elements) 後，最後一定回到原來的起始節點上。封閉節點順序 ②—④—⑤—②，不是一個迴路，封閉節點順序 ②—③—⑤—② 亦不是一個迴路。

練習題 證明封閉節點順序 ②—③—⑤—②， v_{3-5} ， v_{5-2} 與 v_{2-3} 之電壓和為零。

我們用封閉節點順序的形式敘述 KVL：

KVL [封閉節點順序 (closed node sequence)]，對所有集總連接電路 (lumped connected circuits)，對所有封閉節點順序，則在所有時間 t ，沿封閉節點順序上節點到節點的電壓代數和為零。

定理 用節點電壓型式描述 KVL 與用封閉節點電壓型式描述 KVL 是完全一樣的。

證明

1. 我們假設用節點電壓型式描述的 KVL 成立。考慮任意封閉節點順序，如 $a-b-c-d-a$ ，沿著此順序的所有電壓代數和為

$$v_{a-b} + v_{b-c} + v_{c-d} + v_{d-a}$$

利用節點電壓型式描述的 KVL，可表示

$$(e_a - e_b) + (e_b - e_c) + (e_c - e_d) + (e_d - e_a) = 0$$

因此第一個敘述已經隱含第二個敘述了。

2. 現在假設用封閉節點順序描述的 KVL 成立，考慮任意封閉節點順序，為 ①—②—③—④，則

$$v_{p-q} + v_{q-r} + v_{r-p} = 0 \quad (4.3)$$

選擇 (任意) ① 為根據節點 (datum node)，我們得到節點對據點電壓 $v_{q-1} = e_q$ 及 $v_{r-p} = -e_p$ ，從 (4.3) 式，我們得到

$$v_{p-q} = e_p - e_q$$

因此，利用封閉節點順序型式描述之 KVL 隱含了利用節點電壓型式描述之 KVL。 ■

【註】 對任一含 n 個節點之連接電路，我們 (任意) 選擇 (任意) 節點 ① 為參考節點，則 $n-1$ 個節點對參考點電壓為 e_1, e_2, \dots, e_{n-1} ，它們唯一地且清楚地表示出電壓 v_{j-1} 為電路上由任意節點 ① 到其他任意節點 ②。這事實在電路理論中是非常重要的，且是第五章中節點分析之重要觀念。

4.3 克希荷夫電流定律 (KCL)

物理有一基本定律為電荷不滅：沒有一項實驗能使淨電荷產生或消滅。克希荷夫電流定律就是將此基本定律表示在集總電路上。

欲表示 KCL，我們必須用高斯面 (gaussian surfaces) 來說明。所謂高斯面即為一雙面 (two-sided)，似球體 (balloon-like) 的封閉曲面。因為它是雙面的，故有內部 (inside) 與外部 (outside)。為了說明此事實——在高斯面 \mathcal{S} 內部之電荷總和是為常數，我們要求在任何時間，離開曲面 \mathcal{S} 之所有電流的代數和等於 0。如圖 4.4 所示，我們選擇了 \mathcal{S} ，它僅切過連接線路元件的連接線，在電路中，我們看到一個四端元件 (four-terminal element)：一個運算放大器，它連接電路 ②、③、④ 和 ⑤ 的節點。運算放大器的特性將在第四章介紹。在圖中我們畫了六個高斯面： $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2, \dots, \mathcal{S}_6$ 。我們將使用這些曲面來說明克希荷夫電流定律：