

電信網絡

錢鳳章編著

中國科學圖書儀器公司

出版

內容介紹

本書係由著者根據多年在大學電信工程系講授電信網絡的經驗編寫而成。注重基本理論，培養分析能力，從簡單現象引伸到繁複理論，所用數學方法並不十分高深，凡能瞭解交流電路計算的讀者，不致感覺困難。

全書凡分十章，前六章對於無線電方面比較有用，後四章則在長途電話方面更為重要，可配合教學需要酌分輕重。濾波器一章中，將斜格式濾波器的設計方法亦扼要介紹，故比較深入。本書可供大專學校電信工程系作為教本，亦可備實際工作人員作參考之用。

電 信 網 絡

編著者 錢 鳳 章

出版者 中國科學儀器公司
上海延安中路 537 號 電話 64545

總經售 中國圖書發行公司

版權所有 ★ 不可翻印

EE. 18—0.15 25 開 546 面 365 千字 每千冊用紙 22.49 令
新定價 ¥ 47,500 1953 年 8 月初版 0001—2000

上海市書刊出版業營業許可證出 027 號

序

電信網絡與交流電路的區別在於後者主要討論單頻的交流現象，而前者則研究多頻而多變的信號傳輸。電力輸送着重於功率效率的提高，而電信傳輸的目的在於不失真地傳遞這多頻而多變的信號電流。因此電信網絡的理論應更廣泛地討論各種網絡對全部有關頻率的傳輸效應。電信工程的頻率範圍日趨高超，但因微波傳輸需用不同的數學來討論，本書範圍以聲頻到普通無線電頻率為限。

本書就編者三年來講授電信網絡的講稿編寫而成，可作有關學系或專業中電信傳輸或網絡理論等課程的教本，或可供實際工作人員的參考。編寫方法注重基本理論，培養分析能力，講解力求明顯，一般地，由簡單現象說起，引展到概括性的定理，必要時附以實例，更闡明理論中的意義。傳輸線路一章置重點於物理觀念，以引入以後各章。濾波器一章應實際需要，比較深入，並將晚近發展的斜格式濾波器的設計方法亦簡要地加以介紹。書中前六章對無線電工程更為有用，而後四章對長途電話比較重要，可視教學目的，分別置以重點，或予精簡。全書所用數學方法，均較簡易，凡已習交流電路(或電工學和電工基礎中的交流電路部份)熟諳複數演算者，閱讀此書必無困難。

本書編寫承陳章系主任吳大榕教授多予鼓勵，並承交通大學張

煦教授提示意見，暨中國科學圖書儀器公司顧世楫先生協助付梓，均表感謝。書中插圖及謄寫工作承何振亞助教王子儀同學幫助一併誌謝。編者學識淺陋，錯誤難免，敬希讀者發現，隨時指正是幸。

錢鳳章

一九五三年二月南京工學院

目 錄

序

第一章 電信傳輸概論 1-21

- 1-1 電信網絡的意義 1
- 1-2 網絡元件 2
- 1-3 信號電壓的性質 3
- 1-4 正弦波形的意義 6
- 1-5 繁複波形的分析 7
- 1-6 耳的特性 11
- 1-7 傳輸網絡的任務 12
- 1-8 傳輸的失真 14
- 1-9 傳輸損失的單位 15
- 1-10 介入損失的定義 18

第二章 電網絡的基礎理論 22-65

- 2-1 阻抗和導納 22
- 2-2 串聯或並聯的阻抗和導納 23
- 2-3 表示發電機的兩個形式 24
- 2-4 耦合電路 26
- 2-5 克希荷夫定律和馬克斯威爾
環繞電流 30
- 2-6 繁複耦合電路 32
- 2-7 重疊定理 39
- 2-8 互易定理 41
- 2-9 戴凡甯定理 42
- 2-10 補償定理 45
- 2-11 最大功率轉移定理 47
- 2-12 等效網絡定義 51
- 2-13 T和 π 式網絡的轉變 52
- 2-14 繁複網絡可簡化為等效T式
 π 網絡 57
- 2-15 由阻抗測量而決定T或 π 等
效網絡 58
- 2-16 平衡與不平衡網絡 62

第三章 二端阻抗 66-114

- 3-1 阻抗的頻率特性 66
- 3-2 串聯諧振電路 67
- 3-3 諧振銳度 69
- 3-4 串聯電路中阻抗和導納的軌
跡 70
- 3-5 串聯諧振電路中的電壓問題 . 72
- 3-6 並聯諧振 74
- 3-7 並聯諧振的向量圖 83
- 3-8 並聯諧振電路用作阻抗配合
網絡 87
- 3-9 複諧振網絡 89
- 3-10 倒量網絡 93
- 3-11 等效網絡 98
- 3-12 普通電抗定理 104

第四章 耦合電路 115-168

- | | | | |
|---------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 4-1 磁感耦合電路 | 115 | 4-8 變壓器的等效網絡 | 133 |
| 4-2 耦合電路的T式等效網絡 | 117 | 4-9 變壓器的頻率響應 | 137 |
| 4-3 理想變壓器 | 120 | 4-10 射頻變壓器(耦合諧振電路) | 143 |
| 4-4 自耦變壓器 | 122 | 4-11 耦合諧振電路的等效T式網絡 | 154 |
| 4-5 多繞圈變壓器 | 124 | 4-12 耦合諧振電路的頻率響應 | 162 |
| 4-6 阻抗轉度 | 127 | | |
| 4-7 實際變壓器 | 131 | | |

第五章 傳輸線路的參數 169-200

- | | | | |
|----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 5-1 分佈參數與集總參數的辨別 | 169 | 5-8 電阻 | 188 |
| 5-2 圓柱導體的自感 | 171 | 5-9 集膚效應 | 190 |
| 5-3 平行二導線的自感 | 174 | 5-10 圓柱導體在高頻時的電阻近似值 | 195 |
| 5-4 同軸電纜的自感 | 177 | 5-11 漏導 | 198 |
| 5-5 平行二導線的電容 | 181 | 5-12 結論 | 198 |
| 5-6 同軸電纜的電容 | 183 | | |
| 5-7 平行線間的鄰近效應 | 184 | | |

第六章 傳輸線路 201-283

- | | | | |
|--------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 6-1 導波的觀念 | 201 | 6-14 反射係數 | 235 |
| 6-2 微分等式 | 203 | 6-15 遠端短路的無耗損線路 | 238 |
| 6-3 綫路任意點上電壓和電流的普通公式 | 207 | 6-16 遠端斷路的無耗損線路 | 243 |
| 6-4 無限長綫路 | 210 | 6-17 終接在任何電阻的無耗損線路 | 246 |
| 6-5 無限長綫路中電波的波動狀態 | 211 | 6-18 駐波比值 | 248 |
| 6-6 衰減常數和週相常數 | 217 | 6-19 斷路式短路的有耗損線路 | 250 |
| 6-7 電纜 | 218 | 6-20 終接在任何負載的有耗損線路 | 259 |
| 6-8 最小衰減條件 | 219 | 6-21 反射產生失真 | 261 |
| 6-9 不失真綫路 | 220 | 6-22 測定綫路中一個反射點的位置 | 262 |
| 6-10 加感 | 222 | 6-23 用阻抗測量來決定綫路的參數 | 264 |
| 6-11 同軸電纜 | 226 | 6-24 重複網絡綫路 | 268 |
| 6-12 傳播速度,相速度與羣速度的區別 | 229 | 6-25 梯式網絡的傳播常數 | 273 |
| 6-13 電波的反射 | 233 | | |

第七章 四端網絡 284-325

- | | | | |
|--|-----|--------------------------|-----|
| 7-1 線性參數 | 285 | 7-7 加感線路的做真網絡 | 307 |
| 7-2 對像參數 | 287 | 7-8 π 式網絡 | 310 |
| 7-3 重複參數 | 293 | 7-9 π 式衰減器 | 312 |
| 7-4 由已知對像參數或重複參數
求一等效 T 式網絡 | 298 | 7-10 斜格式網絡 | 315 |
| 7-5 T 式衰減器 | 302 | 7-11 橋 T 式網絡 | 317 |
| 7-6 均勻線路的做真網絡 | 305 | 7-12 終端反射因子 | 318 |
| | | 7-13 介入損失和介入相移 | 322 |

第八章 濾波器 326-429

- | | | | |
|------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 8-1 純電抗網絡的對像阻抗特性 | 327 | 8-13 濾波器中功耗的影響 | 374 |
| 8-2 純電抗網絡的對像轉移常數
特性 | 329 | 8-14 導型濾波器對像阻抗的頻率
特性 | 382 |
| 8-3 濾波器的可通與不通頻帶的
決定方法 | 330 | 8-15 導型通帶濾波器 | 388 |
| 8-4 梯式濾波器 | 331 | 8-16 MM' 導型濾波器 | 392 |
| 8-5 截止頻率 | 338 | 8-17 組合濾波器 | 395 |
| 8-6 對像阻抗的頻率特性 | 340 | 8-18 斜格式濾波器的設計 | 401 |
| 8-7 衰減和相移的頻率特性 | 343 | 8-19 互補濾波器 | 410 |
| 8-8 常 K 式通帶濾波器 | 346 | 8-20 並聯和串聯的互補濾波器 | 411 |
| 8-9 常 K 式除帶濾波器 | 353 | 8-21 終端不配合的弊病 | 416 |
| 8-10 常 K 式濾波器的設計公式 | 357 | 8-22 M 導型中剖終端的反射損失 | 418 |
| 8-11 導型濾波器 | 360 | 8-23 常 K 式 ∞ 終端的反射損失 | 423 |
| 8-12 導型低通和高通濾波器 | 366 | 8-24 濾波器的介入損失 | 426 |

第九章 摹擬與修正網絡 430-480

- | | | | |
|----------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 9-1 一般討論 | 430 | 9-6 由傳播常數的頻率函數求網
絡解答 | 452 |
| 9-2 均衡器的基本理論 | 431 | 9-7 均衡器的設計實例 | 453 |
| 9-3 恆電阻網絡 | 433 | 9-8 二端均衡器 | 466 |
| 9-4 傳播常數相等的關係 | 446 | 9-9 阻抗修正網絡 | 472 |
| 9-5 傳播常數用頻率函數來表示 | 450 | 9-10 摹擬網絡 | 477 |

第十章 信號電波的分析	481-521
10-1 用富氏級數分析周期性繁複 波形	482
10-2 富氏級數的形式	482
10-3 富氏級數各係數的求法	484
10-4 分析繁複波形舉例——鋸齒波 形	488
10-5 一連串電報點波形的分析	491
10-6 用富氏積分分析非周期性繁 複波形	492
10-7 突然加上直流電壓波的分析	493
10-8 一直流電壓波突然衰退	500
10-9 用電路穩態阻抗來計算暫時 電流的舉例	501
10-10 單個直流脈衝電波的分析	504
10-11 突然加上單頻交流電波的分 析	511
10-12 突然加上單頻交流脈衝電波 的分析	516
15-13 不失真的傳輸	519
10-14 結論	520
附錄	522
參考資料	529
中英文譯名對照表	531

第一章

電信傳輸概論

1-1 電信網絡的意義 人的意識利用電能傳遞遠方而被瞭解即是電信工程。電信傳輸系統包括很廣，首先由傳話器將語言聲能變為電能，或藉手指按動電鍵發出報碼電流，或藉光能控制感光電管發出電視或傳真電流，中間經過多種傳輸器材，如長途線路，海底電纜，或地球外表的空間，而後達到受信器，恢復原來語聲，報碼，或影像。這樣的傳輸比電力輸送更為繁複。首先電源電壓性質不同，電力電壓為穩定而單頻的波形，而電信電壓為瞬變而多頻的繁複波形。其次，傳輸目的亦復異趣，電力輸送在於損失少，效率高；而電信傳輸必需保持品質不變，即保持其原有的繁複波形，不使其變質，而功率效率反為次要。第三，電信傳輸系統更較電力為繁複，尤以載波電報電話的傳輸為更甚。傳輸系統包括自發送器，中經一鏈串的傳輸器材，而達到收受器。每一器材可能吸取一部份功率，而減低傳輸的效率，或因器材的特性，遏止一部份頻率，或延遲其傳輸過程，因此改變信號電壓的波形。所以研究電信傳輸即是研究一鏈串的傳輸器材，它們前後啣接，互起作用，任一環節能接受前一器材的輸出功率，而轉遞到後一器材。這種互為啣接的傳輸器材，可能全是電器的，或一部份是機械的，或聲響的器材。電信工程即是研究全部器材的總和效果，以達到傳遞語言或信號的目的。本書定名電信網絡，專就傳輸系統中佔重要地位的無源器

材，詳細討論其傳輸特性，以便讀者進一步研究有線電或無線電工程之用。因普通電信傳輸器材，多由電阻電感和電容等組合而成星網形式，所以電信傳輸器材通常叫做電信傳輸網絡，或簡稱網絡。

1-2 網絡元件 電網絡的基本元件是電源（電勢或電流），電阻，電感，和電容如圖 1-1 所示。電源是電路中產生電壓和電流

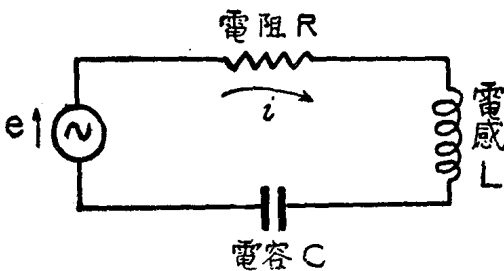


圖 1-1

的原動力，所以叫做電源元件，而電阻電感和電容則稱謂無源元件。一電網絡倘全由無源元件組成，則稱無源網絡。在研究電網絡（包括電信網絡）的理論

時，電源元件被認為供給電勢或電流的源泉，至於這電勢或電流的如何產生，則不在探討範圍之內。所以電信網絡理論中主要討論者都是無源網絡，討論它們的組成形式，和它們對電勢，電流，電場，磁場，和功率等的關係，以及它們在高低不同頻率下的響應。

圖 1-1 中電阻器的電阻 R ，電感圈的電感 L ，和電容器的電容 C ，都是這電路中的集總參數，即電路中所有的電阻電感和電容，分別集中在 R, L, C 上，而中間的連接線都無絲毫電阻電感或電容。這當然是理想的情況，但在低頻運用下，分佈參數的影響極微，而這些元件可認為純元件（倘適當構造在任何一段頻率範圍內亦可認為純元件）。在較高頻率下，分佈參數的效應顯著，而這些元件都

呈顯為具有電阻電感和電容的混合組織，而其阻抗特性完全與純元件所有者不同。在極高頻率時甚至短段連接線的電阻，電感和電容都不可忽視，而必需妥為處理。所以我們在以後討論中所述的純元件都是理想的純元件，或是適當構造而在規定頻率範圍內使用的元件的意義。

圖 1-1 中的各元件，在任何頻率下運用，都不隨電流的大小而變動他們的數值，即他們都是電路中的常數，表示電壓和電流的直線性關係，所以他們被叫做直線性參數。具有直線性元件的電路叫做直線性電路。

電路元件可能隨電流的強弱而變動，如氧化銅變阻器或鐵心電感圈等。前者的電阻隨電壓的大小和方向而變動，後者的電感也隨電流的強弱而異值。其他如電子管或電話傳話器的電阻也隨電流的大小而變化。這些元件都是非直線性元件。電路中有非直線性元件者被稱為非直線性電路。這種非直線性電路較難計算，有時用圖解方法可得近似結果。一般電信網絡的運用都限制在各元件的直線性範圍之內（如鐵心電感圈或變壓器等所用的電流不得超過某種限度），所以都屬於直線性網絡。

因電子管和氧化銅變阻器等具有非直線性特性，它們常被用作調幅器，檢波器或整流器等用途。

這些元件對於一方向的傳輸很佳，而反方向則很壞，所以這些元件是單向性的。直線性元件都是雙向性的。

1-3 信號電壓的性質 任何通信方式必採用某種變動。例如兩人對話，發話者，變動空氣的壓力，發出聲波作為傳遞的媒介。又

如軍艦間通信，白日用旗語，晚間用燈光，都是利用光波作為媒介。在電信工程中，首先將人的意識轉變為電的變動。最簡單者如電報通信，將語言或文字譯成點和畫的電碼，然後將直流電源用電鍵斷續地發出矩形脈衝電流如圖 1-2 所示。在電話對話中，發言者隨語言的聲調而變動空氣的壓力。各人所發的聲調不同，而各個

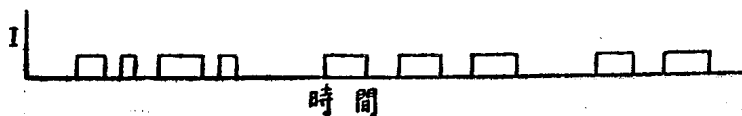


圖 1-2

字音的波形亦各異。圖 1-3(a)和圖 1-3(c)表示兩種風琴發出 C 音的波形，由這兩曲線可以看出波形是週期性的，但每週波形中又各有多次起伏，表明有高频諧波的存在。圖 1-3(b)和圖 1-3(d)分別說明圖 1-3(a)和圖 1-3(c)兩波形中的多種頻率成份以及每一成份頻率波幅的大小。可知風琴種類不同，雖按同調音鍵，基本頻率相同，但其成份頻率的多少及其波幅的大小，各不相同，所以聆聽者能分辨明白。普通語言的頻率範圍約自 100~10,000 週/秒，其中低頻部份為聲能集中的所在，高频部份為字音辨別的基礎。人們研究，已經知道一電信傳輸系統倘能傳遞頻率範圍自 250~3000 週/秒，雙方對話的瞭解程度可達百分之九十五左右。所以現在電話傳輸的頻率範圍即以此為普通標準。

音樂器材的頻率範圍更為寬廣，約自 40~15,000 週/秒，聲波強度的範圍亦更廣大，最強與最弱的比值約為 10^7 倍，遠非電信傳輸器材所能承受。欲藉長途電話傳輸設備而播送音樂節目者，必須將聲音的強度範圍適當地縮減，而後可以傳送。除強度方面外，頻率範圍亦須加以限制。普通分為兩個標準，第一種的傳輸頻率範

圍約自 100~5000 週/秒,第二種約自 50~8000 週/秒。當然後者傳輸的音質較佳,但整個傳輸系統的設計和維護更為繁複而價貴。

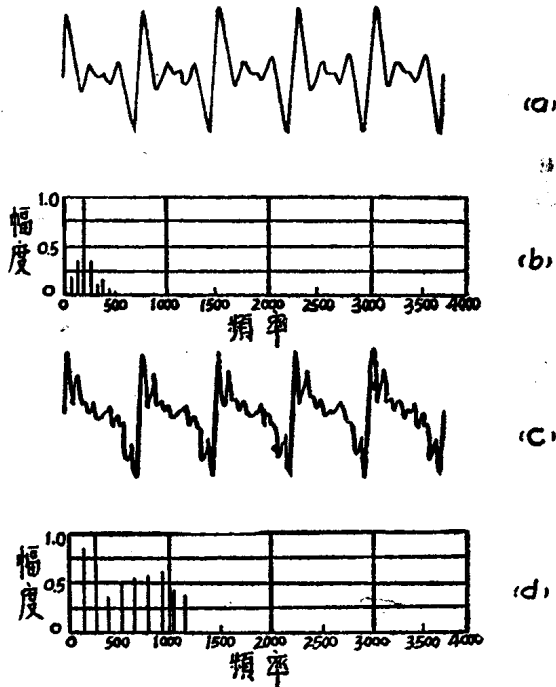


圖 1-3

至於傳真或電視工程,則由光源的強弱產生電流的同樣變化,傳達對方再轉變為光的強弱而恢復原來的影像。但頻率範圍遠更廣闊,所以需用同軸電纜作為電視節目傳輸的導線。

以上僅就信號電壓本身的頻率而言,倘藉載波而傳送,則載波的頻率較聲頻為高。尋常在長途電話架空明線中傳送的載波頻率,一般由聲頻起至約 150×10^3 週/秒止。藉無線電載波而傳送者,頻率已高至約 3×10^{10} 週/秒。這種電波叫做微波,正被科學工作

者繼續研究中。

1-4 正弦波形的意義 現在電機工程(包括電信)中採用的標準波形是正弦波形。因正弦函數的微分和積分都仍是正弦函數(餘弦函數等於原角加 90° 的正弦函數),所以正弦波形的電勢輸入任何含有電阻,電感或電容的電路,它所產生的電流仍是正弦波形。這可由下式說明。

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{\int i dt}{C}$$

倘用 $E_m \sin \omega t$ 代替 e , 而用 $I_m \sin(\omega t - \theta)$ 代替 i , 則上式可寫成,

$$E_m \sin \omega t = \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] I_m \sin(\omega t - \theta)$$

這裏 $\theta = \tan^{-1} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) / R$ 。倘用向矢 E, I 分別代表電壓, 電流的有效值, 又用 Z 代表阻抗, 則上式可簡化為

$$E = ZI \quad (1-1)$$

這樣簡單的關係祇有在電勢是正弦波形時可能, 倘電勢是其他波形, 則惟有在純電阻的電路內可以產生同樣波形的電流; 倘加在含有電感或電容的電路內必產生極不相同波形的電波, 而(1-1)式的簡單關係不能存在。

本書所講一切網絡理論, 完全根據(1-1)式的簡單關係。所以當我們說到某一頻率 f 的電波時, 即是說明一正弦波形的電波, 每秒鐘交替 f 週, 而其波幅是恆定不變。換言之, 即是穩定狀態的正弦

電波。倘一正弦電波的波幅隨時間而變動，那它的頻率不再是單一，而必定是多個頻率合成的。所以嚴格說來，單一頻率的電流無法產生，因電流的成長必需時間，而其波幅必是隨時間而增長的緣故。但我們通常所說單一頻率的電流是說這電流在很久以前已成長完全，它的暫變狀態已完全過去而已達到穩定狀態，必再繼續維持穩定狀態到很久時間以後，而目前尚無衰退的跡象可尋。這樣的電流我們稱他做穩定的單頻電流。

1-5 繁複波形的分析 我們的標準波形是幅度不變的正弦波形。凡非正弦波形，或隨時間而瞬變的波形都是繁複波形。繁複波形通常可分析為多個簡單波形。這個方法叫做分析。反過來，繁複波形也可由簡單波形合併而成叫做綜合方法。這二種方法，在電信工程中極為有用。

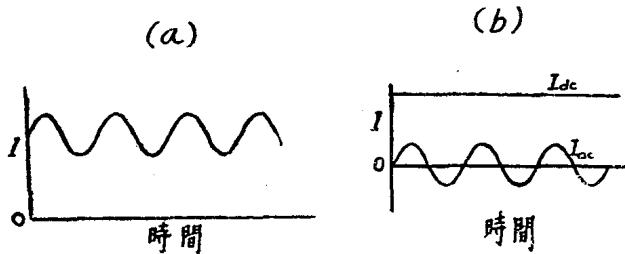


圖 1-4

當一個電話傳話器的膜片受到一個單純音調（即正弦波形的聲波）的影響而振動時，通過這傳話器的電流的波形如圖 1-4(a) 所示。這波形可用圖 1-4(b) 中二個部份電波綜合而成，圖中 I_{dc} 表示直流部份而 I_{ac} 表示交流部份。久磁式用戶電話機中的感應線圈將交流部份轉送傳輸線路而達到對方的受話器，其直流部份則

被限制在發話器的局部電路之內。

繁複波形倘是周期性的⁽¹⁾，我們可認它由周期基本頻率和他的 1, 2, 3, 4, 5, …等倍的不同頻率，不同波幅的正弦電波重疊而成。這樣將一周期性的非正弦函數分析為一連串的多頻的正弦函數就叫做富利靄級數如下：

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (1-2)$$

這裏 $f(t)$ 代表任何依時間而變化的周期性的繁複函數，如我們正在考慮的繁複的信號電壓或電流的波形等。右邊第一項是分析出來的一個常數項，可以代表如圖 1-4(b) 中的直流部份 I_{dc} 。第二項是基本頻率的基波。第三項及以後各項是倍頻的諧波。理論上，一繁複波形應由無限項的富氏級數來代表。但實際上，僅有最初數項已是足夠準確。

我們先用圖解方法考慮一二例題。圖 1-5(a) 的平頂波形和圖

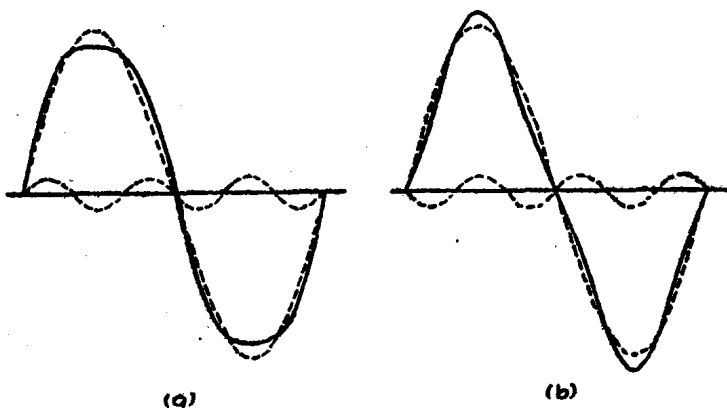


圖 1-5 基波和三次諧波的合成波

(1) 實際信號電壓（不論電報或電話）的波形不是準確的周期性的而多少帶有暫時性的。

1-5(b) 的尖頂波形都可分解為基頻和三次諧頻的兩個部份波形，各個部份波形的波幅和相位的關係，如圖所示。倘繁複波形對時間軸對稱，即正和負兩半波形完全相似，它不包含雙數諧波。雙數諧波使波形失去對稱如圖 1-6 所示。這種波形常由電子管振盪器或放大器產生。

圖 1-2 中的矩形電波代表電報通信時發送的電碼電流。這種矩形電波的富氏級數是：

$$e = E \sin \omega t + \frac{1}{3}E \sin 3 \omega t + \frac{1}{5}E \sin 5 \omega t + \frac{1}{7}E \sin 7 \omega t + \dots \quad (1-3)$$

圖 1-7 中四個圖形說明當富氏級數的更多諧波項被採用後，則綜合波形更近似這矩形電波。由圖中可看出倘一電信傳輸系統能傳遞這矩形電報波形的基波及三次和五次諧波者，則到達的電波已

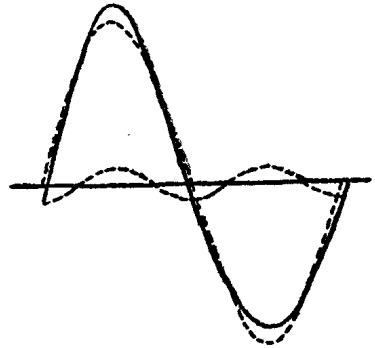


圖 1-6 基波及二次諧波的合成波

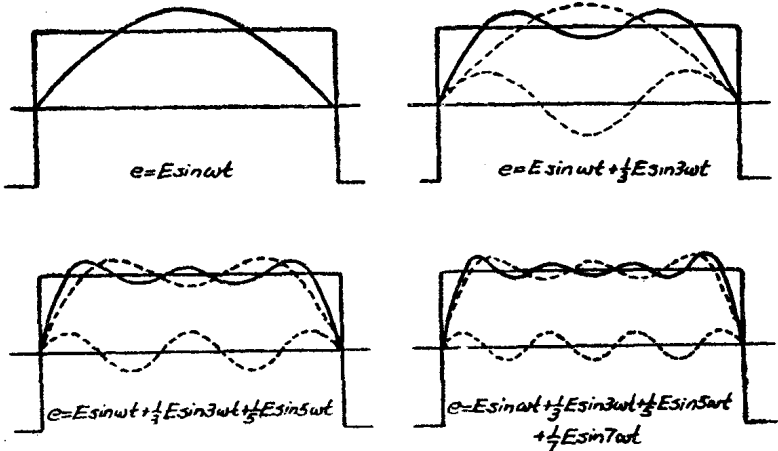


圖 1-7