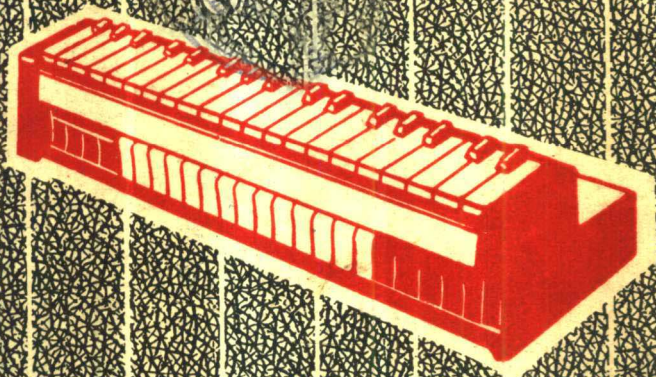


电子乐器

本书由作者精心编写，可作为电子乐器爱好者的参考书。



人民邮电出版社

內 容 提 要

本書敘述声学 and 乐声学的一些基本知識，怎样由振盪器产生相应于各种乐器的乐音频率的电振盪，怎样产生顫音效果。最后介紹了电子乐器的構造、綫路圖和有关实际裝置的問題。

本書可供乐器制造者、無綫电爱好者閱讀。

电 子 乐 器

編著者：北京邮电学院無綫电系401班

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

(北京市書刊出版登記證出字第0484号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

發行者：新 华 書 店

开本787×1092 1/32 1958年12月北京第一版

印张128/32 頁数30 插頁1 1958年12月北京第一次印刷

印刷字數48,000字 統一書号：15045·5929—無246

印數1—3,700册 定价：(10)0.26元

前

电子乐器是一种能模仿小提琴、大提琴、长笛、双簧管、单簧管、大管、萨克管、管风琴、小号、法国号、六弦琴、曼陀林等二十多种乐器的发音的一种多音色键盘乐器。几乎管弦乐队中的一切乐器都可用它来代替。可以设想将来有那么一天，您去音乐厅里听交响曲或管弦乐，幕拉开了，展现在您面前的，也许是一架架同样的形似轻便钢琴式的乐器，~~没有人拿小提琴、大提琴、也没有人吹长笛或者萨克管。~~您或~~正纳闷着~~，怎么，这难道是“钢琴大合奏”么？不过，~~没有关系您立刻就会明白。~~指挥棍的挥动，使您听到的仍然是悲壮的“英雄交响曲”，或是轻松愉快的“天鹅湖舞曲”，而并非什么“钢琴大合奏”。~~这样的乐队该叫什么呢？姑且就叫它“电子交响乐队”或“电子管弦乐队”吧！~~

电子乐器是利用音频多谐振荡器来发声的。每种乐器的特有音色是由滤波电路滤出音频多谐振荡中的谐波成份来获得的。由电键控制的滤波电路形式的变更，就相当于乐器的改换。要想将电子乐器当作某一种乐器使用，只需合上对应于这种乐器的音色控制电键就行了。至于这种乐器的演奏方法，则和演奏别的键盘乐器是相类似的。

在这本小册里，叙述了声学 and 乐声学的一些基本知识。关于电振荡器、电振荡的产生与混合以及音色控制的基本理论在书中都作了介绍。最后，还介绍了电子乐器的构造、线路图和有关实际装置的一些问题。

目 录

前言

第一章	声的基本知識.....	1
第二章	乐音和噪音.....	4
第三章	电振盪的产生.....	9
第四章	音色控制.....	18
第五章	放大器和揚声設備.....	28
第六章	电子乐器.....	31
第七章	电子乐器的制作.....	37
結束語.....		57
附录.....		58

第一章 声的基本知識

声是我們日常生活中所遇到的最普通的物理現象之一，但究竟什么是声，它有什么特性呢？

1-1 声的产生

物体的受迫振动是一切声音的源泉，振动的物体將自身的这一运动(振动)傳遞給周圍的彈性媒質(如空气、水等)，这些媒質的質点也随之振动，并以“波”的形式向周圍的空間傳播開去，質点的这种运动称为声振动，这种声振动——声波作用于我們的听觉器官，我們便听到了声音。

1-2 声的物理性質

声音有高低不同的音調是因为声振盪的頻率有高低不同，頻率的單位是“赫”(週/秒)，它表示每單位時間(如一秒)內的振动次数，頻率的倒数称为週期 T ，它表示完成一次振动所需要的时间。

人耳所能听到的声音的頻率范围，因各人的不同和年齡的大小而有所差別，但一般的可以指出，人耳所能听到的声音的頻率范围大約在 20 赫到 20000 赫以內，頻率高于 20000 赫的“不可聞的声音”(振动)，叫做超声(波)；頻率低于 20 赫的“不可聞的声音”則叫做次声(波)。

声音由發声物体向四週輻射叫做声的傳播，声音的傳播速度”因媒質的不同而異，声音在固体媒質中傳播最快，液体中次之，气体中最慢，在溫度为攝氏 15° 的空气中，声音的傳播速度大約为 340 米/秒。

根据声音的頻率、週期和傳播速度的定义，我們不難得出这三

者之間存在的關係，即

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = Tv = \frac{v}{f}. \quad (1.1)$$

式中的 λ 叫做波長，它相當於兩個相鄰同相振動點間的距離（圖 1.1）。

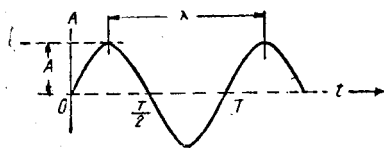


圖 1.1. 簡諧振動波形圖

振動物體波動幅度的峯值叫作振幅 A ，振動物體波動幅度是隨時間變化的。最簡單的振動波是簡諧波（圖 1.1）。它的波動幅度是時間的正弦函數，即波幅隨時間作正弦曲線變化。

聲音的強弱或响度，決定於發聲物體振幅的大小，在物理學中，聲音的強弱是以單位時間內穿過與聲波傳播方向相垂直的單位面積上的能量（即能流密度）來度量的。聲強 I 可寫作：

$$I = 2\pi^2 \rho v A^2 f^2. \quad (1.2)$$

式中的 ρ 是空氣的密度， v 是波速， A 是振幅， f 是聲音的頻率，聲強 I 的單位是爾格/厘米²秒。

在實際上都用所謂聲強級來作為度量聲強的標準，因為人耳感覺的聲音的強弱，即聲音的响度，差不多是與聲強級成正比例的。通常規定強度 $I_0 = 10^{-9}$ 聲強單位（約相當於頻率為 1000 赫時所能听到的最弱聲音）作為測量聲強的標準。聲強級 L 。定義為某一聲強 I 與 I_0 比值的常用對數值，即

$$L = \log \frac{I}{I_0}. \quad (1.3)$$

聲強級的單位是貝爾，按此規定 I_0 的聲強級是零。人耳所能忍受的最大聲強約為 10^4 聲強單位，其聲強級是：

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.4)$$

前面已經說過,引起听覺的聲振動的頻率約在 20 赫到 20000 赫之間,但這種提法是不全面的,因為它忽略了在上述頻率範圍內某一聲振動的聲強。實驗指出:可聞聲音的聲強不能小於某一數值也不能大於某一數值。這就是說,一定頻率的可聞聲音的聲強有上下兩個限度。當聲強小於這個限度時,就听不到聲音;而當聲強大於另一個限度時,人耳就會有疼痛的感覺。實驗同時還指出,聲強的上下限是隨頻率而改變的。根據正常的听覺的實驗結果表明,如果以頻率(或波長)為橫座標,以聲強級(或有效壓強振幅 P_0) 為縱座標,在 20 赫到 20000 赫的頻率範圍內連續地標出每一個頻率下聲強的上下限,于是就得到了兩條如圖 1.2 所示的曲線。

圖中的上限曲線稱為痛覺限度(痛覺閾),下限曲線稱為最低可听限度(听覺閾)。兩條曲線間即為听覺區域。

從圖 1.2 中可以看出,聲音的頻率不同時,可聞閾也不相同,人耳對 1000—4000 赫的聲音最為敏感,頻率再大或再小,人耳對其敏感程度就逐漸降低。當頻率小於 20 赫或大於 20000 赫時,無論聲強如何,人耳就再也不能感覺出有任何聲音了。

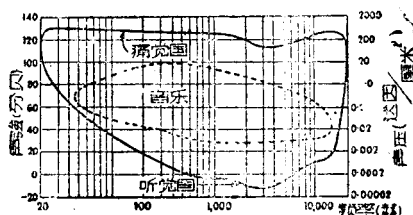


圖 1.2 聲音的可聞閾

聲音第三個重要的特性是音色或稱為音品。發同一頻率基音的各種樂器或是人的嗓子對听覺所產生的感受是各不相同的。譬如,提琴,鋼琴,風琴和人的嗓子發出的任一唱名(如中央 $C261.625$

赫)的声音,听起来就觉得截然不同。这种现象表示出,音调高低相同的声音有着不同的音色。关于声的这一特性——音色在下一章乐音和噪音中还要详细的叙述。

当两个不同的声源发出的声音同时到达空间的某一点时,在该点可以觉察出两个声音的合声,这就是说声音可以叠加的。三个,四个,无限多个声源的发声同样地可以叠加成一个复杂的合成声音。

如所遇知的回声是声的反射的最好的例子。人耳所能分辨的最短时间约为0.1秒,若在 15°C 时音在空气中的传播为340米/秒,那末可以听到回声的反射面的最短距离应在17米以上。

关于声的其他特性,如折射、干涉、吸收和交混回响等,因限于篇幅,在这里就不赘述。

第二章 乐音和噪音

在我们日常所听到的声音中,大致可分为乐音、语音和噪音三种。这三种不同的声音给予我们听觉感受的差异是非常明显的。噪音听起来单调、刺耳、使人感到不舒服。而乐音听起来则与噪音截然相反,它浑厚、圆滑、谐和而富于变化;乐音给人以美感,它沁人肺腑,使人心情舒畅。但是,乐音与噪音在本质上到底有什么区别呢?

2-1 声的基音、泛音和声谱

在前一章里已经提到,每个声振动都有一定的频率。由这一频率便决定了声音音调的高低。只含有一个频率的声振动所发出的声音叫作纯音,但实际上,纯音几乎是不存在的。这就是说一般的声音都是由多种频率的简谐振动混合而成的。这些振动频率中最低的

頻率叫作基本振動頻率 f_0 。(簡稱基頻)。基頻所發出的聲音叫作基音。除基音以外的其他振動頻率都叫泛音，泛音中那些頻率為基頻 f_0 的整數倍 $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4f_0$ ……等等的聲音則特別叫作基音的諧音，以區別於其他的泛音。諧音頻率則叫作諧頻。

任何一個複雜的聲振動都可以認為是多個簡諧振動的疊成，即任一個複雜的聲振動都相應於一定的聲譜。按照聲譜的特性之不同，聲可分為兩種基本類型。一種是具有連續譜的聲，這相當於一個非週期的振動；振動的能量連續地分佈在一個相當寬的頻帶範圍內(圖2.1, a)。具有連續譜的可聞聲就是噪聲，如槍砲聲、雷鳴和風吹樹動的沙沙聲等。

聲的另一種基本類型是具有綫狀譜的聲，這相當於一些各自具有其獨特頻率的週期性振動的綜合(圖2.1, b)。

具有綫狀譜的聲振動就是樂音。因此，樂音與噪聲在聲的本質上的區別就在於：一個是具有綫狀譜的聲，而另一個則是具有連續譜的聲。

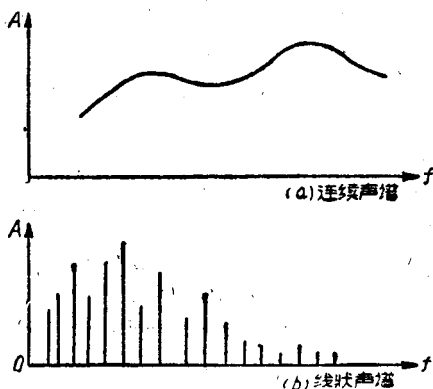


圖 2.1 a) 連續聲譜圖, b) 綫狀聲譜圖

2-2 樂 音

樂音與噪音的差異是很明顯的，但樂音和語音有何不同呢？語音學的知識告訴我們，語音是由樂音與噪音組成的。語音中母音都是樂音，而子音的發聲大多是由噪音組成的。樂音和語音的區別還不僅在於此，樂音不像語音那樣短暫，音樂中聲音常持續到半秒或

更長的時間。再有，樂音頻率的變換是按照音階的關係來進行的，而不像語音中變換頻率那樣雜亂無章。樂音不是單一的基音，而是由基音和多個複雜的諧音組合成的。在樂音中，有時諧音甚至比基音更強。諧音的數目與強度，以及它們成長和衰滅的速率，是各種樂器發聲各有一定的特有音色的主要原因。譬如，管樂和弦樂的音色不同，主要是因為它們發出的聲音中諧波成分不同的緣故，前者含有更多奇次諧波，而後者則含有較豐富的偶次諧波。

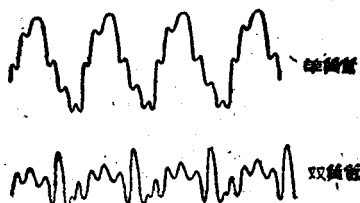


圖 2.2 幾種樂器發聲的波形

聲音的建立與衰滅的速率也是決定音色的重要的因素之一。

圖 2.3 示出了鋼琴和風琴發音的建立與衰滅的平均速率。

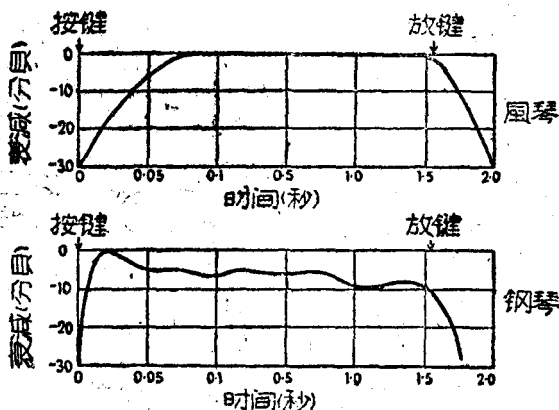


圖 2.3 鋼琴和風琴發音的建立與衰滅的平均速率

2-3 弦、膜片和空气柱的发声

数以千万计的各种不同的机械乐器^①，它们总不外是依靠弦线、膜片(包括簧片)和空气柱的单独的振动或是复合的振动来发声的。乐器的发声机构和它的共鸣机构一样，是每一件乐器最重要的部分，所以研究乐器的发声对于了解乐音是很有帮助的。

当我们拨动或用琴弓推拉两端固定的琴弦时，将激起琴弦在它的平衡位置附近作很快的来回摆动(简谐振动)，这种简谐振动就是发出基音的基频振动(图2.4a)。由于振动在两端固定端反射，而形成驻波^②结果弦线振动时同时还发出基音的各次谐波(图2.4,b,c,d)。

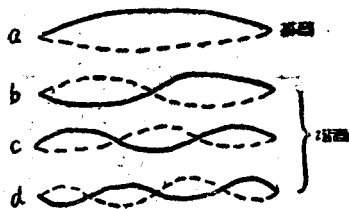


图 2.4 弦的振动

弦的基本振动频率 f_0 与弦线两端固定端的距离 L 成反比：

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}},$$

式中 T 是弦线的张力，单位为力的绝对单位达因； m 是弦的线密度，即单位长度的弦的质量，单位为克/厘米。

这一等式的含义可以用弦乐器来说明。例如所有的弦乐器都是用改变琴弦的张力来定音的。增加张力 T 可以使琴弦的振动频率或音调增高；反之，减低张力则可使琴弦的振动频率或音调降低。频率 f_0 与弦长 L 的反比关系，可用钢琴低音部分的弦长和钢琴高音部分的弦短来说明。在钢琴低音弦上绕有金属线的主要原因，就是用来增加弦线单位长度上的质量 m ，以便获得所需的极低的频

① 机械乐器：于电子乐器而言，其他一切乐器都可以称为机械乐器。

② 关于驻波的概念可参阅一般物理学中的有关章节。

率，而無需加長琴弦。

所有的帶簧乐器，如簧風琴、口琴等都是利用簧舌膜片的受迫振動來發音的。每一個簧舌膜片都有一個固有振動頻率，當以外力作用於它時，如風吹時，簧舌便發出其固有音。

管乐器是以受外加振動的激發並與之共振的空氣柱來發聲的。這種空氣柱的振動，可能是由吹奏者的上下唇（如吹奏各種喇叭）或膜片（如各種含吹乐器）的振動的激發而引起的。在這種複雜的聲振動的激發下，空氣柱只選擇聲譜中與自己的固有振動頻率和諧聲頻率相等的頻率發生共振。

一般管乐器的管徑與它的固有音的波長比較是很小的，這實際上相當於一個閉管的空氣柱，所以管乐的發音振動中含有大量的奇次諧波而缺少偶次諧波。這就是管乐器的音色不同於弦乐器的根本原因。

2-4 乐声学的基本知識

我們通常所指的乐音，大致是在 16.353 赫（大字二組的最低音 C_2 ）到 15804.256 赫（小字四組的最高音 b_4 ）的不連續譜內。前面已經提到過，乐音頻率的變換是按照音階的關係進行的。所以，整個乐音聲譜是不連續的。

在每一組不同的 12 個音中只有 7 個音（與鋼琴白鍵相符的音）有它自己獨立的音名。對應於另外 5 個黑鍵的音則是這 7 個具有獨立音名的音的兩個音程相鄰的音的升半音或降半音。這在乐声学上叫作變音。

音樂中的聲音（乐音）不同於別的聲音的其中一個主要原因是它的頻率的變換是按照一定的規律來進行的。這就是說，乐音是服從於確定的協調法則的，音與音之間互有一定的連帶關係。

乐音所服從的這種協調原則和音與音之間相互的連帶關係就是

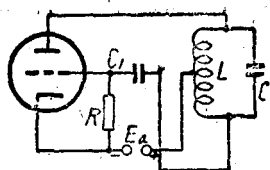
为 50 赫的正弦波电振荡。闪电、电焊的火花会产生频率很高的电振荡；迫使扬声器或耳机发声的是音频电振荡……，诸如此类，是举不胜举的。

在电振荡中，最重要的是利用各种电气器件或电磁器件所产生的频率可以随需要而变更的电振荡。这种专门用来产生电振荡的器件叫做电振荡发生器或振荡器。其中，最常用，最重要的一种是电子管振荡器。

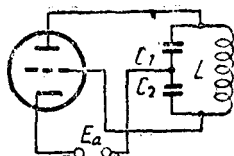
3-1. 电子管振荡器

在无线电及其它领域中，应用最广的是各种类型的电子管振荡器：哈脱莱振荡器、柯尔皮兹振荡器、电阻稳定振荡器、电子耦合振荡器、打拿负阻振荡器及阻容振荡器（图 3.1）。阻容振荡器，顾名思义，是由电阻、电容作为电路的元件。它比起上述其他类型的振荡器来有许多显著的优点。因为它没有电感和大的电容，这就使振荡器的结构变得极其简单，从而减小了体积，降低了造价。不用分频器而直接由这种振荡器得到频率低于 16 赫（通常认为音乐的最低音频率为 16.353 赫）的电振荡是很容易的。但是，如果要用 LC 振荡（例如哈脱莱振荡器）来取得这样低的频率的振荡就不是一件容易的事。因为，这时就需要很大的线圈和电容器。这不仅加大了振荡器的体积，而且也给制造上带来了很大的困难。此外，阻容振荡器的振荡频率稳定性很高，因为频率只决定于电阻、电容的数值，而它们的稳定性是高的。因此，在电子乐器中，无论是颤音振动，还是音调振动都是由阻容振荡器产生的。阻容振荡器既然在电子乐器中占有如此重要的位置，下面我们就来介绍一下它的电路和工作原理。

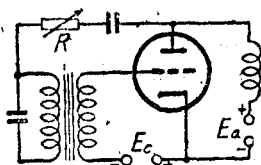
一种典型的阻容正弦波振荡器的电路如图 3.2 所示。其中 V_1 是振荡管， V_2 是放大管，它起着放大和反相的双重作用。当任何信号



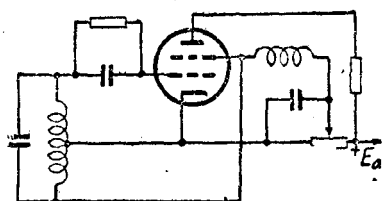
(a) 哈脱莱振荡器



(b) 柯耳皮兹振荡器



(c) 电阻稳定振荡器



(d) 电子耦合振荡器

圖 3.1 各种电子管振荡器

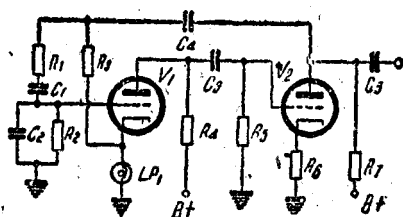


圖 3.2 阻容正弦波振荡器

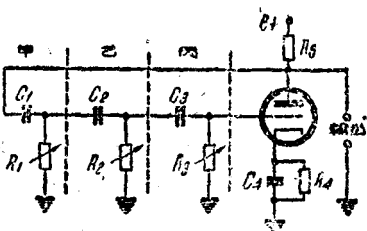


圖 3.3 阻容相移振荡器

出现在电子管 V_1 的栅极上时，经 V_1 放大，相位转过 180° ，送至 V_2 的栅极，经 V_2 放大，相位再转过 180° ，并通过回授电路 R_1C_1 将已由 V_1, V_2 放大，相位转过 360° 的信号部份地加至 V_1 的栅极。由于回授的信号电压与原来的信号同相，对 V_1 起激励加强的作用，引起振荡。图中 $C_1R_1C_2R_2$ 起滤波作用，使只有某一频率能通过它分压而回授至 V_1 栅极的信号电压为最大。如果频率高于这个一定的频

率，电容 C_2 的容抗 x_{c2} 很小， R_2 被 x_{c2} 分路，使 V_1 栅極至地电压降低，即分压回授作用减弱。如果频率过低，則串联支路电容 C_1 的容抗 x_{c1} 很高，这使得流过 C_2 或 R_2 的电流極小，因此，电流在 $C_1 R_1$ 并联支路上所产生电压降亦很小，使 V_1 栅極至地电压極小，而只有当某一中間频率 f_0 滿足：

$$\frac{1}{2\pi f_0 R_2 C_1} - 2\pi f_0 R_1 C_2 = 0 \quad (3.1)$$

时， $C_1 R_1 C_2 R_2$ 的分压回授作用最大，亦即 V_1 栅極至地的信号电压最高。因而，振盪器便以这个频率 f_0 产生稳定的振盪。根据(3.1)式，这个频率 f_0 可由下式求出：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.2)$$

另一种重要的阻容振盪器，称为相移振盪器，它的电路如图 3.3 所示，其中只有一个电子管和一个相移回授电路。我們知道，振盪器产生振盪的必要条件是回授到电子管栅極的电压必需与原来的信号电压同相。由于信号经过电子管放大后产生了 180° 的相移，所以为了使取自輸出端的回授信号电压与原信号同相，那就还必需設法再轉过 180° 的相移。这里是用三节 RC 相移电路来完成的。当信号电压 U_a 加在 RC 电路上时，流过甲节 RC 迴路的电流 I_1 將超前 U_a 一个小于 90° 的相角，于是与 I_1 同相的 R_1 上的电压降 U_R 也超前 U_a 一个同样的相角。适当地选择 R 和 C 数值可以使 U_R 超前 $U_a 60^\circ$ 的相角，那么，经过三节这样的相移电路，便能使回授电压超前于輸出信号电压一个 180° 的相角而与原来輸入信号同相，从而引起振盪。这种振盪器所产生的振盪频率 f_0 反比于电阻 R 和电容 C 的乘积，它可以表示为下式：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{8RC}} \quad (3.3)$$

3-2. 电振盪的合成与分解

正弦波形的电振盪是一种最简单最基本的电振盪。我們实际上碰到的电振盪的波形往往是奇形怪状的，形式非常复杂。我們知道，任何一个复杂的振动都是多个简諧（正弦波形）振动的合成。这就是說，任一个形式复杂的振动都可以分解为一个个独立的简諧振动。振动能够合成与分解的这一特性也同样适用于电振盪。

任意波形的週期性电振盪都可以認為是一个基頻正弦振盪以及它的有限次諧頻正弦波振盪的合成。基頻正弦振盪的週期就等于合成振盪的週期。

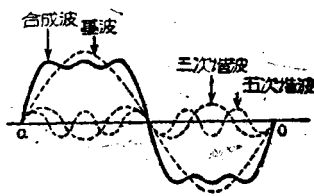


圖 3.4 振盪的合成与分解

圖 3.4 示出了几种基頻振盪和它的諧頻振盪所組合成的合成振盪波形。由圖中可以看出，任一个复杂的电振盪的波形决定于它所包含的基波及其諧波的成分和大小。

3-3. 多諧振盪器

前面我們講述了阻容正弦波振盪的基本原理，应用这种电路，我們可以获得正弦振盪。但是，这种振盪还不能用作乐音振动的源泉。我們知道，乐音的頻譜中，除了基頻外，还含有丰富的諧頻。有时，甚至諧頻振动的强度（振幅）还远大于基頻振动。因此，作为一种乐器發音機構的振动或迫使其作机械振动的电振盪也必需是多諧（頻）的。否則，这种乐器的發音，听起来不是覺得單調枯燥，就是失去了乐音的美感。

对称的矩形波和鋸齒波，可以分解为一个週期与它相同的正弦基波和它的許多諧波，如圖 3.5 所示。从圖中可以看出，矩形波可以分解为一个基頻正弦振盪和許多諧頻振盪。这就是說，矩形波和