

电声学基础

冯秉铨 编著

高等教育出版社

本書系根据作者历年來在華南工学院講授“电声学”一課時所用的講稿略加扩充編写而成。对象是“無線电广播和通信”專業三年級的学生。但对于其他有关專業的高等学校学生和工程技術人員也可作为参考之用。

本書前二章討論机械振动系統和声学振动系統。第三章討論在理想媒質中声的傳播規律以及在实在媒質中發生的各种現象。第四章簡單地敘述了关于生理声学的一些基本知識。第五、六兩章繼一二章之后进一步討論輻射器和接收器的一般理論問題。第七、八、九各章依次敘述了各种常用的电声設備——揚声器、傳声器和录音設備。最后兩章簡略地介紹了关于建筑声学和揚声方法的一些主要問題。

本書內容的講授約需 84—88 小时。

电 声 学 基 础

高秉鈺編著

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号
(北京市書刊出版業營業許可證出字第051号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店发行

統一書号 15010·529 开本 850×1168 1/32 印張 9 5/16
字數 236,000 印數 4,201—5,400 定价(4) 洋 1.80
1957年10月第1版 1959年6月重印第4次印刷

序 言

本書是根据作者历年来在华南工学院对“無線电广播和通信”專業的学生講授“电声学”一科时所用的講稿略加扩充編写而成的。“电声学”这門課程列入“無線电广播和通信”專業的教学計劃之内，所占用的時間是比較少的。因此，如何在極度压縮的方式下把本課程主要应包括的內容列入教学大綱之内就成为一個重要的問題。

作者認為，在高等工業学校中的講課，主要是把課程的基本理論和不可缺少的基本知識傳授給学生，更重要的是通过这样的傳授，使学生学会了正确的思考方法和分析問題的能力。因此，与其說通过講課來傳授大量的知識，不如說通过講課來培养学生的独立思考 and 独立工作能力。知識是無窮無尽的。随着科学和技术的发展，今天使用某一类型的仪器，明天就可能換用另一种类型。因此，企圖把目前常用的各种电声設備一一介紹出来是不可能的，也是不必要的。相反，假如学生掌握了基本理論和必要的工具，有了能够分析問題的能力，他不但可以举一反三，甚而可能推陈出新。在編写本書时，作者尽力采用了这样一个观点。

本書的对象是四年制無線电專業三年級的学生。在學習这門課程时已讀过了电工原理、無線电基础、电子管、放大器等課程；同时也正在學習天綫、电波傳播等課程。本書中尽量指出了“电声学”和这些課程之間的联系性。教学实践証明，这样作法对于了解本課程的內容以及巩固在其他課程中所學到的东西都是有好处的。

当然,对于非無線电專業的学生以及業務与电声学有关的工程技術人員,这本书也可作为参考之用。

本書从机械振动系統一章开始,因为声音的本質不外就是机械振动的过程。过去的教学經驗也証明了,一开始就提出机电类比的問題,很容易引起学生对这門課程發生濃厚的兴趣,这一章讀得好就为以后几章打下比較穩固的基础。本章以比較長的篇幅討論机电类比和等效电路的作法,教学实践証明这样作是恰当的。随着机械振动系統之后,第二章把机电类比推广到电声类比。

第三章講授声場的基本定律和声傳播的問題。这虽然不屬于电声学的范畴,但是作者認為,为了能够深入了解电声设备的原理和仪器的構造,这些基本定律的知識是不可缺少的。作者認為,与其多費十几小时来講授基本原理相同而只是类型不同的电声仪器设备,罗列出很多的“实用数据”,就远不如把这一部分時間放在基本理論上。当然,理論部分也只是为了以后的需要才引入的。例如,关于波动方程式的推証,仅限于小訊号的假定。同时,在分析有关問題时,也仅以穩态过程为討論的对象,而很少涉及瞬变过程。

第四章簡略地介紹了一些关于生理声学的知識。从發射声音的声源到声的傳播,然后到声音的接收器——人耳,第一至四章的次序就是这样安排的。

第五、六兩章是承第一、二兩章之后进一步討論輻射器和接收器的一般理論問題,为以下几章作进一步的准备。

第七、八、九各章分別敘述了各种常用的电声設備。每一种基本类型只举一兩個具有代表性的例子。第十、十一兩章簡略地介紹了关于建筑声学和揚声方法的一些主要問題。

每章之后附有一些習題,其中一大部分曾在华南工学院电訊系授課的过程中用过几次。本書內容的講授約需 34 至 38 小时。

作者对于电声学这一門科学所知甚少。本書中的內容都是前

輩科學家們多年勞動的成果，作者個人在這方面過去沒有什麼貢獻，在書中個人的創見也不多。書中材料主要取自書末所列各書，有些圖表是直接從這些書中抄下來的，這些地方在書中均已注明來源。至于內容的敘述，特別是有关基本理論方面，各个作者的說法都大同小異，在本書中就不注明出處了。

在本書的編寫過程中，曾得到許多同志的鼓勵和幫助。例如，馬大猷教授曾把他發表的論文和研究成果寄給作者并給与作者自由摘錄的方便；林于干教授供給作者关于电声学方面的圖表和資料；高兆蘭教授校閱了本書內容的一部分并經常給与鼓勵和協助；華南工學院历届畢業班學生在學習這門課程時所提出的問題也對本書的編寫有很大的幫助；華南工學院黨和行政領導对于這一工作的支持和鼓勵，对于作者工作時間上的安排和照顧；這些都是這本書之所以能在短期內寫成的原因。对于以上提到的各位，作者謹致以衷心的謝意。

馬大猷教授在百忙之中仔細地校閱了本書的原稿并改正了原稿中某些錯誤和不够嚴謹的地方，在这里作者謹表示最大的謝意。

由于作者對這門科學造詣很淺，尽管經過了几次校訂，恐仍难免有錯誤或不尽正確之處，尚望國內專家和讀者們予以批評和指正。对于本書的意見請直寄作者或高等教育出版社轉交。

馮秉鈞 華南工學院

1956年12月。

目 录

序言

緒論	1
----	---

第一章 机械振动系統	9
------------	---

- § 1. 声源(9) § 2. 声波(11) § 3. 簡單的机械振动系統(13)
- § 4. 机电类比(16) § 5. 力共振和速度共振(23) § 6. 等效电路的作法(27) § 7. 共振現象的防止(23)

第二章 声学元件	39
----------	----

- § 1. 声学元件的性質(39) § 2. 声阻、声扭和声容(40) § 3. 細管和狭縫的声阻抗和声阻抗率(44) § 4. 电声类比(46) § 5. 具有均匀分布常数的系統(48)

第三章 声的傳播	54
----------	----

- § 1. 基本概念(54) § 2. 声波傳播的方程式(波动方程式)(56)
- § 3. 声波傳播方程式的特殊形式(61) § 4. 平面声波(63) § 5. 球面声波(67) § 6. 無限長喇叭中声波的傳播(70) § 7. 声音在实在媒質中的傳播(73) § 8. 声速(79) § 9. 声的反射和折射(82) § 10. 声的曲射和繞射(84) § 11. 声的吸收(87)

第四章 人的听觉	92
----------	----

- § 1. 声的基本特征(92) § 2. 人耳的灵敏度曲綫——听觉圖(95)
- § 3. 等响曲綫(97) § 4. 音調(99) § 5. 听觉特性(101) § 6. 口声及語音(102) § 7. 对电声傳播的要求(104)

第五章 輻射器的基本原理	107
--------------	-----

- § 1. 在無限障板中的点式輻射器(107) § 2. 其他簡單的輻射器(114)
- § 3. 無限障板中平面輻射器的指向特性(118) § 4. 有限尺寸喇叭的輻射阻抗(121) § 5. 有限尺寸喇叭的指向特性(125) § 6. 具有前室的喇叭(127)

第六章 机电換能器的基本原理	130
----------------	-----

- § 1. 机电耦合(132) § 2. 电动式換能器(134) § 3. 电容式換能器(135) § 4. 电磁式換能器(136) § 5. 压电式換能器(139)

第七章 揚声器	144
---------	-----

§ 1. 扬声器的类别及其基本性质(144)	§ 2. 电动式纸盆扬声器(146)
§ 3. 多个扬声器的系统(155)	§ 4. 宽带纸盆扬声器(156)
§ 5. 扬声器中高频的抑制(160)	§ 6. 障板对扬声器的作用(162)
§ 7. 扬声器箱(163)	§ 8. 喇叭式电动扬声器(169)
§ 9. 电磁式扬声器(177)	§ 10. 晶体式扬声器(180)
§ 11. 耳机(181)	

第八章 傳声器.....187

§ 1. 傳声器的类别及其品质指标(187)	§ 2. 声振膜接收器的指向特性(189)
§ 3. 电动式傳声器(194)	§ 4. 带振式傳声器(198)
§ 5. 单向式傳声器(204)	§ 6. 电容式傳声器(207)
§ 7. 压电式傳声器(210)	§ 8. 炭粒式傳声器(213)

第九章 录音和放音.....219

§ 1. 机械录音(219)	§ 2. 机械放音(223)	§ 3. 机械录音和放音的畸变(228)
§ 4. 磁性录音和放音的基本原理(230)	§ 5. 磁性录音中的偏压(232)	§ 6. 磁性录音的设备(235)
§ 7. 磁性录音中的畸变(240)		

第十章 建筑声学概論——播音室設計.....244

§ 1. 緒言(244)	§ 2. 房間內的交混回响(245)	§ 3. 房間的声学处理(251)
§ 4. 房間的隔声(255)	§ 5. 播音室的構造(260)	§ 6. 播音室內傳声器的布置(263)
§ 7. 播音室的設計举例(264)	§ 8. 簡正振动方式(267)	§ 9. 从物理声学的观点看交混回响的問題(272)

第十一章 揚声.....279

§ 1. 揚声方法和对揚声系統的要求(279)	§ 2. 露天广播的揚声(282)
§ 3. 室內揚声(286)	

参考書目.....290

符号一覽表.....291

緒 論

(I) 声学發展史紀要

声学——关于声音的研究——是物理学中最早發展的一个部門，它和物理学中其他部門也有着極其密切的联系。

彈性媒質(例如空气、水等等)質点的振动，以波的形式向周圍傳播，这种質点的运动就称为“声”。由于声波作用于听觉器官所引起的某种感觉，也可以用“声”这一詞来表示。

显而易见，声学和振动与波的学說是分不开的。事实上，声学的發展史与振动理論和波动理論的發展也是分不开的。早在公元前五世紀，皮札果拉斯(Pythagoras)已經研究过弦振动的規律^①。阿里士多德(Aristotle, 公元前 384—322)曾指出声音的特性应以其高度、强度和品質三者来表征，并且注意到这些特性与空气运动的速度、被激动的空气量以及發声器官的構造有着密切的关系。阿里士多德也曾認為，發声的物体会使空气产生压縮和稀疏，并曾利用反射的道理来解释回声現象。

在中世紀的一段期間，科学的發展普遍地中落，声学也未能例外。这种停止不前的情况一直到十六世紀才有所改变。在 16 至 17 世紀之間，伽利略(Galileo)和梅尔新(Marin Mersenne)先后詳細地研究过弦振动的定律。梅尔新和加桑地(Pierre Gassendi)曾先后測定过空气中的声速，后者并証明了声的速度与其音調之高

^① 本节所引用的資料取自苏联百科全书第二卷及 F. Cajori “A History of Physics” 一書。

低無關。牛頓(Newton)早在 1687 年已經從理論上導出了計算聲速的公式，但是他所得到的結果與實驗結果不甚相符。這一誤差的來源是由于在計算當中，他沒有考慮到當媒質壓縮時溫度會增加，膨脹時溫度會減低，因而媒質的彈性會有所變化。這一誤差的來源一直到一百多年之後(1816 年)才由拉普拉斯(P. S. Laplace)指出並對牛頓公式進行了校正。科喇頓(J. D. Colladon)和斯吐爾本(J. C. F. Sturm)于 1827 年測定了水中的聲速，也証實了拉普拉斯公式的正確性。

在十八世紀，理論聲學得到了大大的發展。俄國彼得堡科學院院士歐勒(Л. Эйлер)和伯努利(А. Бернулли)以及法國數學家達朗伯(J. D'Alembert)發展了弦振動的理論。這些工作不但解決了有關樂器發聲的問題，而且對以後研究聲波傳播的問題也有很大的幫助。在 1739 年，歐勒擬訂了音程制，為樂聲理論奠定了基礎。

十九世紀初葉标志着實驗聲學的初期發展。克拉德尼(E. F. Chladni)在一系列的工作中詳細地研究了各種彈性物體(弦、棒、板等)的振動，從而為實驗聲學開辟了一條道路(1802)。韋伯兄弟(W. Weber 和 E. H. Weber, 1825)和薩瓦(F. Savart, 1820—37)研究了聲音在液體和固體中的傳播並証明了這種傳播和在空氣中的傳播是服從着同樣的規律的。亥姆霍茲(Helmholtz)發展了所謂“聲音分析法”，利用實驗方法(所謂亥姆霍茲共鳴器)闡明了樂音和語音的物理本質，為現代的音樂聲學奠定了基礎。在十九世紀出現了兩部聲學的經典名著。一本是亥姆霍茲的“關於聲音感受的研究”(1863)，另一本是瑞利(Rayleigh)的“聲的理論”(1877—78)。“聲的理論”一書從統一理論的觀點系統地陳述了到當時為止聲學的全部知識，總結了前人的工作，也介紹了作者本人所得到的豐富的實驗資料。直到今天，這本書仍然是研究

声学必讀的經典著作之一。

从十九世紀的末叶到本世紀的二十年代，声学沒有得到很大的發展。当时在一般的物理学界，存在着有这样一种錯誤的見解，以为声学的理論已經研究得相当透澈，在声学的領域中再沒有什麼更重要的問題需要解决，因而物理学家們对这方面的兴趣逐漸降低，而声学的發展遂有停頓不前的趋势。

應該指出，俄国杰出的物理学家列別捷夫 (И. Н. Лебедев) 是上述物理学家中的一个例外。在十九世紀的八十年代，列別捷夫曾进行了許多重要的声学研究，奠定了声压理論的基础，获得了那个时候最短的声波并成功地創制了許多种声学測量仪器。这些研究工作是和他的举世知名的关于光压的研究可以媲美的。

(II) 电声学的出现

無綫电的發明給声学的發展帶來了轉机。从本世紀的廿年代开始，随着电子管的出現，声学的發展开始轉入了一个新的阶段。在电子管發明之后不多的几年当中，所有声学的实验方法都完全改观了。無綫电工学的發展和声学的發展是彼此互为因果的。無綫电，特別是無綫电广播，对声学提出了愈来愈高的要求：要求有更好的傳声器、揚声器以及其他声学設備，要求有更大更强的声源，要求尽量不失真地重發各种乐声和語声……。反过来，声学也对無綫电工学提出了許多要求；事实上，正是由于無綫电技术的發展才使我們有可能測量通常往往是非常微小的声学量，也正是由于無綫电技术的發展，才使我們有可能得到新的方法来产生高达超高频的声普和数以千瓦計的声功率。

这样，声学的發展滿足了广播技术的要求，而無綫电技术的發展又滿足了声学的要求。無綫电学与声学的不可分割的联系，不可避免的相互刺激和相互要求就很自然地要求建立一个新的技术

部門——电声学。

顧名思義，电声学這門科學主要是研究電能和聲能彼此轉變的問題。各種換能器的構造和理論，錄音和放音的各種方法，都是屬於“电声学”的範疇。無線電所用的接收和發送設備，其中一部分也是屬於电声儀器的類型。應該指出，有些电声儀器可用以解決非聲學的問題。回聲儀就是一個例子。回聲儀這種儀器可以使我們很快而且很準確地測出海的深度和石油層的深度等等。這種例子是很多的。

(III) 用統一的觀點來處理聲學的問題

电声学這門科學是把電學和聲學交織在一起的，它的一個特點就是要用“統一的語言”來處理電學的問題和聲學的問題。應該認識到，把物理學分為力學、光學、聲學、熱學、電磁學等等，這種分類的方法是由於歷史的演進所形成的。這種分類法之所以合理，是因為它以一定的程度反映了客觀世界中各種運動形式在本質上的區別。但是，從另一方面來看，在研究表面上似乎毫不相關的各種物理現象時（例如擺的振動和電迴路的振蕩，無線電波的調幅過程和光的聯合散射過程），我們會發現這些現象的內在規律性往往具有一定的相似性。隨着科學的發展，這種共同的規律性使我們對客觀世界認識得更為清楚，更為深刻。因此，從一般的共同規律性出發來研究這些表面看來似乎毫不相關的現象，往往是更為合理，更有好處。

這種用“統一語言”來處理不同現象的方法，在科學和技術上起着很大的作用。在處理聲學的問題時，我們往往“借用”電學中的分析方法，把聲學中提出的問題“翻譯”成電學的語言，用電學中熟知的方法分析之後，再把所得到的結果“翻譯”回去，成為聲學的語言。這種方法稱為“机电類比”或“声电類比”法。

“机电类比”法的根据是由于机械振动系統(包括質点的振动)和电振荡系統有很多相似之处。描述机械振动的微分方程式和描述电振荡的微分方程式是完全相似的。这并不是一个單純在数学形式上相似的問題,而是說明着在物理意义上相似的問題。列宁在“唯物論与經驗批判論”一書中說过:“自然界的統一性表現在有关于不同現象領域的微分方程式的惊人的相似性”。机电类比的根据正在于此。

当然,除了共同規律性之外,各种不同的現象还有它自己的特殊規律性。如果不注意到这一点,只是盲目地运用“机电类比法”,把它簡單地了解为“直譯”工作,而不顧及其特殊的运用条件和具体要求,那就很可能造成严重的錯誤。

(IV) 电声学与其他声学部門的关系

电声学和建筑声学、生理声学、超声学、水声学都有很密切的关系。

建筑声学的基本任务在于保証建筑物內任何有听众的地方都能听得很清楚。为此,必須保証在建筑物內每一处都能有足够的响度,必須减低过份的隆隆声,也必須消除来自外界的噪声和干扰声。这些要求对于播音室的設計尤为严格。

在露天广场或室內裝置揚声設備时,必須保証在听众所在之处有良好的可聞度而沒有回声或嘯声。

生理声学的任务在于研究發声器官和听觉器官的声学特性。知道了这些特性才能正确地提出对电声学的要求。例如,知道了語言的声譜,才能正确地設計适当的声学設備和傳播电路来重發这些語言。例如普通話的“知、吃、詩、茲、此、斯”各音,比起广州話来,声譜要寬得多,因此对电声設備在重發高频这一方面的要求就要高一些。

水声学的任务之一是研究声波在水中的傳播。海水是一种非常不均匀的媒質，声綫在其中会遭遇到显著的弯曲、吸收和散射。因此利用測探声音的方法来測定远处船只的位置是非常困难的。但是，由于水的“声阻”比空气的声阻几乎大 3500 倍之多，因此在水中工作的声輻射器所發出的声功率比在空气中的要大 3500 倍。同时，利用超声頻率，可以得到指向性很尖銳的輻射器。这样就可以使水底通訊达到很远的距离。水底測听的技术，在第二次大战期間得到了很大的發展。

苏联学者布列霍夫斯基赫 (Л. М. Бреховский) 和罗森别尔格 (Л. Д. Розенберг) 曾發現并研究过在海水中声的超距傳播現象 (1946)。在一定的条件下，可察觉到 5000 千米以外的爆炸声波，通过这一距离要經過几小时之久。

超声学的应用并不限于水声学的領域。超声之所以得到广泛的应用，一則是因为很强的超声波比較容易得到，二則是因为超声的波長很短，很容易作成細束的形狀，必要时还可以像光綫一样地聚焦。超声具有显著的灭菌特性，它可以使化学反应加速，也可以使植物的成長加速。在医学上，超声用以治疗神經炎和各种神經痛均証明有效。超声从金屬内部看不到的缺陷处發生反射，从这些反射就可以發現金屬的内伤。根据这一現象，索科洛夫 (С. Я. Соколов) 制造了超声金屬探伤仪。

所有以上所述，都是和电声設備有密切关系的。

(V) 电声学發展的方向

声学虽然是一門古老的科学，但自从它和無線电学發生了关系之后，在技术方面已經完全改观。近代声学所用的方法和旧的声学已很少有共同之处。正如任何科学部門一样，技术的發展和理論的發展是分不开的。为了保証技术的繼續發展，就必須进行

基本的理論研究工作。技術的發展要求理論的提高，理論的發展又轉而指導技術的進步。

改善現有的並創制新型的傳聲器、揚聲器、錄音機以及各種聲頻放大設備是物理學家和電聲工程師的奮鬥目標。創制各種供研究語言和樂音用的儀器以及各種聲學測量儀器，也會愈來愈顯着需要。研究如何改善有聲電影的設備，特別是研究電影的立體聲設備也是很重要的工作。

由於電聲學不單是為聲學服務，這就使得電聲學的發展有無限廣闊的前途。例如，超聲波在各方面的應用（工業、農業、醫學、國防），海底通訊和測位（航海學），中國語音的分析（語言學），這些都離不開電聲學。

（VI）我國聲學發展的前途

從聲學的發展史來看，在任何國家，聲學的研究一般都是起源於樂音的研究。對於樂器的發明和聲律的研究，在我國有着很早的歷史。傳說^①黃帝命人斬竹作管，定出五聲十二律。伏羲氏作五弦琴，舜時已作出一首大合奏曲“韶樂”。這些傳說的可靠性雖然值得懷疑，但管弦樂器的出現是在周初或是在周代（公元前一千年左右）以前，則是可以肯定的。這比起希臘的皮扎果拉斯時代至少要早五百年。據史書的記載，周代的樂器常用者計有四十多種，分為金、石、絲、竹、匏、土、革、木八類。陳澧聲律通考一書中說：“五聲以數相求之法見于管子者為最古。管子以宮數三分益一為徵，商數三分益一為羽……”。這就是所謂“三分損益法”。這樣算出的音程，和希臘皮扎果拉斯所得出的是一致的。所不同的地方是，皮扎果拉斯用的是弦長，而當時的中國科學家們則用的是管長。在周代的著作中，稱最低的标准基音為“黃鐘”。

① 見杜氏通典，呂氏春秋仲夏紀古樂篇等書。

汉京房曾研究过弦振动的规律。刘歆甚至曾建議以律(頻率)作为度量衡的标准(見前汉書律历志)。

在封建时代和半封建半殖民地的时代,任何科学部門是得不到發展的,声学当然也不是例外。

我国發展国民經济的第一个五年計劃,規定了人民的物質生活和文化生活要不断地逐步提高。仅就無綫电广播事業的發展来看,1957年全国的总發射电功率將比1952年增展4.6倍。到1957年,全国城市乡村的广播站和收音站將达到三万个左右。

前面已經說过,無綫电事業的發展对于声学的發展起着决定性的作用。無疑地,我国声学事業的發展也必然随着無綫电事業的發展而飞躍迈进。我国的十二年科学規劃也規定了声学这門科学要大大地發展。中国科学院已設立声学研究室,高等学校也已設置了声学專業或声学專門化。在目前我国的無綫电器材制造厂已出产有各种各式的揚声器和傳声器。相信在不久的将来,声学这一科学部門將在我国开花結果,飞躍前进。

第一章 机械振动系統

§ 1. 声源

当彈性媒質的質点由于某种緣故發生振动时,这种振动以波的形式向周圍傳播,这种質点的振动就称为“声”。

彈性媒質質点之所以發生振动,往往是由于某一物体(或某一組物体)被迫作某种形式的运动,因而使其周圍媒質的平衡状态遭受破坏。这种运动着的物体就称为声源。声源大致可以分为下列几种类型:

(1) **自由振动系統** 在这种系統中,所激發的振动是屬於阻尼振动(衰减振动)的性質。振动的初幅决定于系統中所蓄积能量之多少,振动的頻率基本上决定于系統的質量和彈性,而振幅衰减的快慢則决定于系統中的阻尼(衰减量)。一般的敲击乐器都屬於这一类。比方說,彈琴时鋼琴的小錘敲打琴弦,琴弦就發生自由振动。每一条弦有它的固有頻率,与敲打的輕重無關,但振动的幅度則决定于敲打之輕重。弦的振动通过琴板而傳至周圍的空气。由敲击所得到的能量逐漸損耗,而振动的幅度遂逐漸衰减。音叉、鑼、鼓、鐘、鈴等等也是如此。这一种情况和一个已經充电的电容器通过电感电阻串联电路放电时的情况極為相似。用类比的語言,可写出一个对照表如下頁所示。

(2) **受迫振动系統** 假如物体的振动是由周期性的外力来維持,則振动称为受迫振动。電話机的膜片在磁力作用之下發生振动,就是这样一个例子。受迫振动的振幅决定于外力振幅的大小,

由于敲打琴弦而产生的 自由振动	由于电容器放电而产生的 自由振荡
振动初幅决定于敲打之轻重。	振荡初幅决定于电容器事前充电的多少。
振动频率决定于弦的质量和弹性。	振荡频率决定于电路中的电感和电容。
敲打不同的琴弦,就可以发出不同音调的声波。	激發不同的迴路,就可以發出不同频率的电磁波。
振动能量通过琴板而傳至周圍的空气。	振荡能量通过天綫而傳至周圍的“以太”。
由于辐射声能以及其他不可避免的損耗,振幅漸漸衰減。	由于辐射电能以及其他不可避免的損耗,幅值漸漸衰減。

也决定于外力频率与系统本身的固有频率(自由振动频率)之间的关系。当外力的频率等于系统本身的固有频率时,振动的幅度最大。这时,我們說,振动系统与外力發生共振(声学上称为共鳴)。这一情况和电阻、电感、电容串联接至一个交变电源时的情况完全相似。

(3) **自持振动系统** 在适当的条件下,質点的振动可以由一个本地的能源来維持,而这个能源所产生的力并不是“交变”的而是“直流”的或“單向”的。这一种系统称为自持振动系统。在这一种系统中所产生的振动是無衰减的(或等幅的),振动的频率接近系统的固有频率。

自持振动系统的特征是,在这些系统中不引入交变的外力,只要有一个單向的能源,系统本身就能产生無衰减的振动。一切的管弦乐器和人的喉嚨都是声学上的自持振动系统。鐘表是机械的自持振动系统。在电学上,电子管振荡器也是一种自持振荡系统。吹笛子或拉六弦琴时,我們是在“單向地”吹气或拉弓,只要向一个方向一直吹下去或拉下去,笛子和六弦琴就会不断地發声。同理,鐘表中摆輪的摆动也不是因为我們用手整天把它推来推去,而是因为我們把彈簧向一个方向扭紧(上鍊)时蓄积了能量。同理,电