

高等學校教學用書

振動與波

第一冊

Г. С. ГОРЕЛИК 著
馮秉銓 馮志超 張世箕譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



振 動 與 波

第 一 冊

Г. С. 高列力克著

馮秉銓 馮志超 張世箕譯

21/5-7/14



高等教育出版社

52.2

高等学校教学用书



振 动 与 波

第二册

Г. С. 高列力克著

馮秉銓 顧德仁 張世箕等譯

3157/14

高等 版社



本書係根據蘇聯國立技術理論書籍出版社(Государственное издательство технико-теоретической литературы)出版的高列力克(Г. С. Горелик)著“振動與波”(Колебания и волны)1950年版譯出。原書係根據著者在蘇聯國立高爾基大學對物理系學生的講稿編寫而成，適合於物理、應用物理、無線電工學各專業的教學參考書之用。

本書中文譯本分兩冊出版：第一冊內容包括振動的一般概念，線性及非線性振動系統，波的一般理論和概念，彈性波；第二冊內容包括電磁波、輻射器、波的繞射，統計現象及波譜分解。

本書第一冊由華南工學院馮秉鈺、馮志超、張世箕合譯，中山大學物理系高兆蘭作了前四章的校訂工作。

振 動 與 波

第 一 冊

書號365(譯339)

高 列 力 克 著

馮秉鈺 馮志超 張世箕譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 城 隍 廟 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

商務印書館印刷廠印刷

上 海 天 通 電 路 一 九 〇 號

開本787×1092 1/16 印張13 字數 251,000

一九五五年八月上海第一版 印數 1—2,000

一九五五年八月上海第一次印刷 定價(8) 1.63

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的高列力克 (Г. С. Горелик) 著“振动与波”(Колебания и волны) 1950 年版譯出。原書系根据著者在苏联国立高尔基大学对物理系学生的講稿編写而成, 可用作物理、应用物理、無綫电工学各專業的教学参考書。

本書中文譯本分兩册出版: 第一册包括振动的一般概念, 綫性及非綫性振动系統, 波的一般理論和概念, 彈性波; 第二册包括电磁波, 輻射器, 波的繞射, 統計現象及波譜分解。

参与本書翻譯及校閱工作者为馮秉鈞、顧德仁、張世箕、李华鍾及苏銳聖、梁恒心、馮志超、李文江、李榮鈞、黃卓璇、周振星、李如祥、林文忠、叶凌云、区淑霞、趙世等。馮秉鈞教授作了全書的校訂工作, 高兆蘭教授参与了第七、九兩章的校訂工作。

振 动 与 波 第 二 册

P. C. 高列力克著

馮秉鈞 顧德仁 張世箕等譯

高等教育出版社出版 北京東黃城根 170 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 054 号)

上海市印刷四廠印刷 新华書店总經售

統一書号 13010-337 开本 787×1092 1/16 印張 17 6/8 字數 386,000 印數 1—2,300
1957 年 10 月第 1 版 1957 年 10 月上海第 1 次印刷 定價: 10 角 2.20

序

本書企圖根據大學普通物理的水平，用統一的觀點來研究在力學、聲學、光學和關於電磁現象的研究中所遇到的振動和波動現象。用統一的方法來處理各式各樣的振動和波動現象的好處，對物理學家和工程師們來說，早已很清楚了。

本書是根據多年來在國立高爾基大學對二年級物理系學生的講稿編寫而成的。主要的對象是我們大學中物理、工程物理和無線電工學各系的學生和工科高等學校的學生。我相信，這本書對於處理振動與波動現象的工程師們也會有益處。

要閱讀這本書，需要具備普通物理中的“力學”和“電學”各章的知識。在數學基礎方面，假定讀者通曉向量代數和解析幾何，並會計算導數和簡單的積分。每當必須應用更複雜的數學工具（例如：微分方程）時，則給予必要的解釋，但不苛求其完備和嚴謹。

為使篇幅不致龐大起見，必須限制一些個別問題的說明，使僅足以應一般整體的了解之需為度。因此，必須事先說明：這一本書不能代替普通的光學、聲學或無線電工學的教本。

在本書中，無線電物理的材料佔了比較重要的位置，這不但是由於無線電物理對工程的重要性，而且是由於無線電物理方法在現代科學研究的極廣泛領域（從原子核物理學到天文學，從生物學到地球物理學）中所起的作用。對自然科學家來說，最主要類型無線電儀器的作用所根據的原理的知識，是和顯微鏡或電流計的構造的認識具有同樣重要的意義。

著者曾極力指出：在振動與波的研究中 A. C. 波波夫、И. И. 列別捷夫、H. A. 烏莫夫、И. A. 維斯尼格拉斯基、H. E. 茹可夫斯基、A. H. 克里洛夫、Л. И. 曼介里氏坦以及其他傑出的俄國研究者所給予的貢獻是多麼的珍貴。在本書中，對蘇聯在振動與波動的範疇內所完成的廣泛而多式多樣的研究工作，力求給予足夠清楚（雖然不容易完整）的介紹。

說幾句關於本書中所引證的參考文獻的性質。本書提出參考文獻的目的，跟程度較高的讀者所需要的教科書不同，並不是作為讀者閱覽原著的指南，而是僅僅提出一系列的書籍和論文，這些書刊能幫助讀者在一些個別問題上作更完整而深入的研究。

國立高爾基大學普通物理學教研組同仁和國立高爾基大學應用物理研究所的無線電物理科同仁在編寫本書中給予作者很多幫助。助教 A. И. 杜門涅克提供了本書中描寫的一系列例證表演；B. C. 特羅依茨基製造了為表演無線電微波和無線電物理中的起伏現象所用的儀器；H. M. 查巴維納和 C. И. 波羅維茨基完成了製圖工作的基本部份；他們在編寫這本書時都參與了很多工作。

書裏一些插圖給出關於一些課堂實驗的不太過於圖案化的說明，這些插圖是十分適當的。這樣的插圖是 C. И. 魯賓以寫真的形式製出的。

C. M. 雷托夫在校閱時提出了很多寶貴的意見。

H. K. 柯仁那為準備手稿的出版做了很多工作。

我對所有幫助我編寫這本書的諸位表示誠懇的感謝。

不管著者和出版者怎樣努力，書中可能發現（主要是由於材料的多樣性）某些錯誤和遺漏。對於必需的或恰當的指正，我將表示十分的感謝。

Г. 高列力克

關於本書的譯名的商榷

Колебание 一字可譯為振動亦可譯為振盪。一般習慣，在力學中稱為振動，在電學中稱為振盪。本書書名暫譯為振動，但在各章節中將視其具體內容而分別地譯為振動或振盪。

譯者

目 錄

序

第一章 振動	1
§ 1. 諧和振動的例子	1
§ 2. 對各種不同物理性質的振動現象的統一的處理	9
§ 3. 振動的各種類型	13
§ 4. 諧和振動之間的相位關係	14
第二章 振動的疊合	18
§ 1. 問題的提出	18
§ 2. 同頻標量諧和振動的疊合	18
§ 3. 兩個互相垂直而以同一頻率作正弦變化的向量的疊合	27
§ 4. 電子示波器	30
§ 5. 頻率相近的諧和振動的疊合	35
§ 6. 具有倍頻的諧和振動的疊合	38
第三章 線性振動系統	41
§ 1. 擺的振動, 相位平面圖	41
§ 2. 無阻尼的諧和振動器	45
§ 3. 有阻尼的諧和振動器	49
§ 4. 週期性的撞擊對於無阻尼諧和振動器的作用	55
§ 5. 週期性撞擊對於阻尼振動器的作用	64
§ 6. 正弦力對於無阻尼的諧和振動器的作用	69
§ 7. 正弦力對於有阻尼的振動器的作用	75
§ 8. 共振曲線	79
§ 9. 參量共振	83
第四章 非線性振動系統	87
§ 1. 自持振動, 自持振動系統	87
§ 2. 時鐘	89
§ 3. 電子管	91
§ 4. 電子管振盪器	94
§ 5. 自激條件, 再生作用	99
§ 6. 未含有諧和振動器的自持振動系統	102
§ 7. 振盪的整流	105
§ 8. 調制	109
§ 9. 解調(檢波)	111
§ 10. 并合振動	116
第五章 波	119
§ 1. 緒言, 水面上的波	119
§ 2. 標量波	123

§ 3. 聲波(初步知識)	128
§ 4. 向量波, 偏振	129
§ 5. 駐波	131
§ 6. 兩個球面或圓形正弦波的疊合	133
§ 7. 光波(初步知識)	136
§ 8. 波動方程式	141
§ 9. 色散, 羣速度	142
§ 10. 多普勒現象	150
第六章 彈性波	153
§ 1. 固體內的縱波	153
§ 2. 能量關係, 伍莫夫(ВМОБ)矢量	159
§ 3. 棒和板的縱向固有振動	163
§ 4. 氣體和液體內的彈性波	169
§ 5. 輻射	173
§ 6. 縱波在兩種媒質的界面上的作用	176
§ 7. 氣體柱的振動	180
§ 8. 弦上的橫波	183
§ 9. 簡正振動的疊加	185
§ 10. 吸收和色散	189
§ 11. 非線性現象	195
§ 12. 補充說明	196

第二册 目录

第七章 电磁波	199
§ 1. 历史紀要	199
§ 2. 麦克斯韦方程式及其物理意义	202
§ 3. 电磁波(理論)	205
§ 4. 电磁波(理論,續), 能量关系	213
§ 5. 电磁波(課堂表演的实验)	215
§ 6. 無綫电定位和無綫电干涉量度学	221
§ 7. 元振子的輻射	226
§ 8. 反射和折射	230
§ 9. 各向异性媒質中的电磁波	244
第八章 复杂的輻射器	251
§ 1. 前言	251
§ 2. 半波振子的輻射	251
§ 3. 由兩根平行半波振子所組成的天綫的輻射	253
§ 4. 由半波振子所組成的一維柵形式的天綫	255
§ 5. 兩維柵形式的天綫	262
§ 6. 指向性的声輻射	267
§ 7. 振动薄片所輻射的声波的一般研究	270
§ 8. 在电振子所組成的二維柵附近的場	280
§ 9. 电磁波反射, 折射, 及色散的机构	283
§ 10. 双折射及極化面旋轉的机构	290
§ 11. 倫琴輻射的散射	297
第九章 繞射	300
§ 1. “繞射”一詞的“广义”和“狭义”	300
§ 2. 惠更斯-菲涅耳原理: 基本概念	302
§ 3. 在周期性結構 繞射光柵 中的夫琅和費繞射	303
§ 4. 惠更斯-菲涅耳原理(續): 定量的陈述	307
§ 5. 具有軸对称的最簡單的繞射問題	310
§ 6. 聚焦	314
§ 7. 由長直狹縫的繞射	320
§ 8. 屏邊緣的不整齐性	328
§ 9. 夫琅和費繞射的几种重要的情形	332
§ 10. 光学、声学 and 無綫电学的探射器	336
§ 11. 在焦点附近的繞射圖案	339
第十章 統計的現象	344
§ 1. 緒論	344
§ 2. 具有無規相位的振动的疊加	346
§ 3. 無規的冲击对諧振器的作用	355
§ 4. 在無綫电仪器中的統計現象	363
§ 5. 光源中的統計現象	370
§ 6. 混沌調制振动的疊加的一般研究	378

§ 7. 线偏振波的叠加.....	284
§ 8. 自然光和偏振光.....	286
§ 9. 电磁波叠加的一般研究.....	289
§ 10. 在扩展光源的情形中干涉和绕射现象.....	295
§ 11. 在扩展光源的情形中相干性的问题.....	401
§ 12. 用扩展光源的干涉和绕射实验.....	408
§ 13. 光的分子散射.....	412
第十一章 波谱分解.....	416
§ 1. 波谱(实际存在的图形和波谱)数学的概念.....	416
§ 2. 波谱分解作为一种数学运算方法.....	417
§ 3. 波谱分解作为一种物理现象. 用透镜系统实现波谱分解.....	425
§ 4. 波谱分解作为一种物理现象. 续. 用光栅和透镜来实现波谱分解.....	430
§ 5. 选择性及光谱分辨率.....	437
§ 6. 连续波谱.....	441
§ 7. 波谱分解物理意义的讨论.....	452
§ 8. 波谱分解的“机构”. 最简单的情况.....	458
§ 9. 片段正弦波被波谱仪器改造的时间过程.....	462
§ 10. 已调振荡被波谱仪器改造的时间过程.....	468
§ 11. 波谱线的宽度.....	473
§ 12. 波谱分解作为研究工作的方法. 波谱与微观世界.....	475

第一章 振動

§ 1. 諧和振動的例子

1. 擺的振動 用手使擺偏轉，然後放開，擺的裝置能夠自己畫出它本身的偏轉對於時間的依賴關係曲線圖（圖 1）。這個擺本身是一個錐形器皿，懸掛在三根線上，其中盛滿細砂，底部有一小孔，砂從小孔中成細流逸出。桌上放着塗黑的長條紙板。把紙條沿着桌面向垂直於擺的運動平面的方向均勻地滑動。砂散落在紙板上，並粘在上面（紙板事先稍加潤

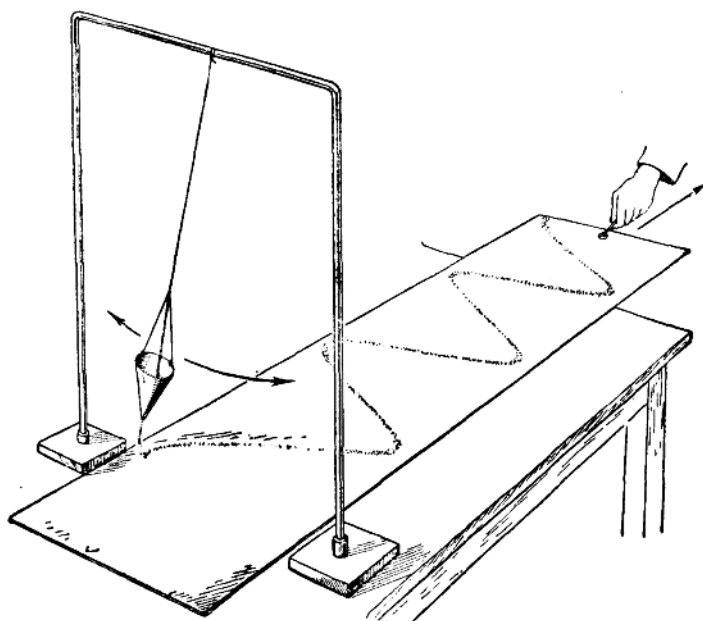


圖 1. 自錄擺。

濕)。然後把紙板豎起，即可見圖 2 所示的樣子。砂在紙板上描下來的擺的“筆跡”是正弦狀的，或者，準確地說，以一定的近似可以認為是正弦狀的。適當地選擇座標的原點，這曲線就可以用下列方程式來描述：

$$y = A \cos kx,$$

這裏 A 和 k 是常數。每一縱座標 y 顯然是等於擺在一定時間 t 內的位移，而每一橫座標 x 則等於在同一時間 t 內紙板的位移。既然紙板以某一恆定速度 v 均勻移動，因此

$$x = vt,$$

於是，擺的位移依賴於時間的關係可以用方程式

$$y = A \cos \omega t \quad (1.1)$$

來表示，式中

$$\omega = kv.$$

用 (1.1) 形式的公式 (其中 A 和 ω 都是常數) 所描述的現象稱為諧和振動。

函數 $\cos \omega t$ 具有這樣的特性，即當

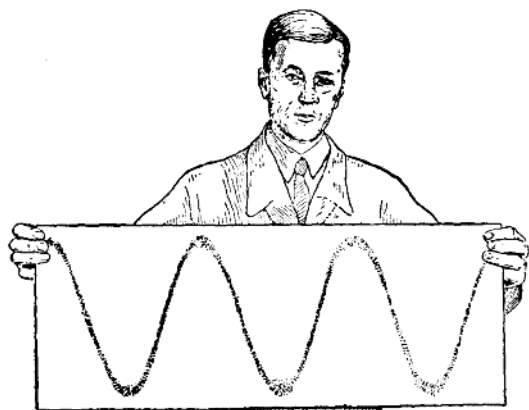


圖 2. 擺的“筆跡”。

任意 t 時

$$\cos \omega(t+T) = \cos(\omega t + \omega T) = \cos \omega t,$$

假如

$$\omega T = 2\pi,$$

即

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{或} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

時間間隔 T 稱為諧和振動的週期；這就是一個完整振動的延續時間，過了這期間以後，一切運動絲毫不差地重複演出。 $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ 這一個量稱為諧和振動的頻率；這就是在單位時間內完整振動的數目。 ω 量稱為角頻率；這是在 2π 單位時間內所產生的完整振動的數目。若時間以秒計算，則頻率就是一秒鐘內完整振動的數目。當週期等於 1 秒時，這樣的振動頻率就是頻率的單位。這個頻率單位取名為赫芝或週^①。圖 1 所示的擺，當線長為 1 米時，其週期約等於 2 秒，即頻率約為 0.5 赫芝。 10^{-3} 秒的週期相當於 1 千赫芝 (或 1 千週) 的頻率， 10^{-6} 秒的週期則相當於 1 兆赫芝 (或 1 兆週) 的頻率。我們在今後經常會遇到這樣高 (甚至比這高得多) 的頻率。

A 稱為諧和振動的振幅。振幅等於根據式 (1.1) 所代表的規律依時間而變的量所取的最大值。

2. 音叉的振動 使音叉發聲，音叉的一臂上裝上一面輕的小鏡 (圖 3)。把室內遮暗，並將從電弧取得的一細束白光投射到小鏡上。光從小鏡反射到另一固定的鏡上，再投射到幕上。在幕上形成了一個“光映”，形狀為一條窄狹的垂直線，兩端較中間更亮。若抑制音叉的臂使音叉停止發聲，則線變為一小圓點。垂直的線形顯然是由於音叉的臂 (連同小鏡子) 高速振動而得到的。這時光的入射角和反射角不斷地變化，於是從鏡上反射出來的光線就在一垂直面上振動。假如觀察者將視線固定在垂直的亮線條上，並迅速地把頭轉動一下，他

① 更正確地說應該是“週每秒”。

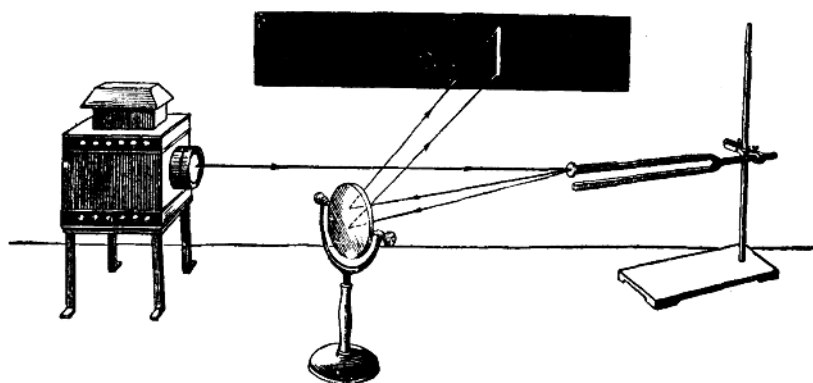


圖 3. 音叉發聲時光映的垂直掃射。

就會看到在黑暗的背景上一條光亮的白色正弦曲線。頭轉得愈快，則看到的各個最高點和最低點離開得愈遠。顯然在這一情形中，眼球的網膜感受了幕上光映的形像，它的作用正如擺的實驗裏的紙板一樣；光映的位置，和擺一樣，隨正弦律而變化。由此容易得出結論：音叉的臂的位移也遵循着同樣的定律，隨時間而變。

若用一沿垂直軸旋轉的多面鏡來代替固定的鏡子，那麼這一點就能更容易看出。當音

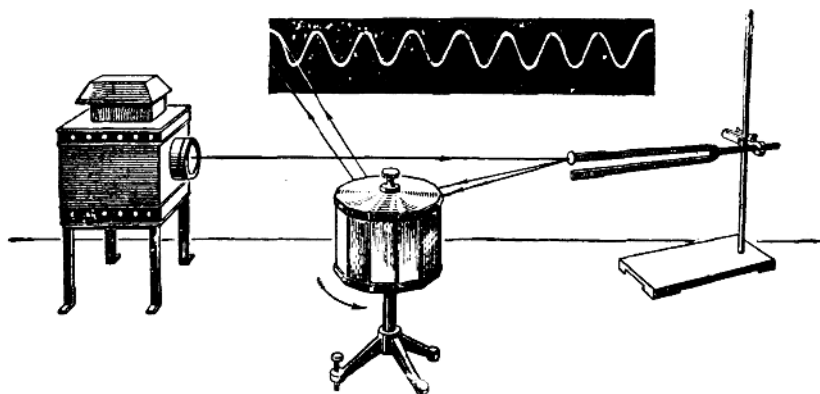


圖 4. 與圖 3 同，但加上水平掃射。

叉靜止時，光映自左至右沿一水平線多次地跑過；假如多面鏡轉得夠快，就可以看到一條連續的水平線而不復為斷續的光映的位置。若此時撥動音叉使它再發聲，那麼水平線就變為一條正弦曲線（圖 4）。

這樣，音叉也隨規律(1.1)而振動，但這裏它的角頻率 ω 和頻率 $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ 比擺的要高得多。發出第一個八度的 A 音的音叉以 440 赫芝的

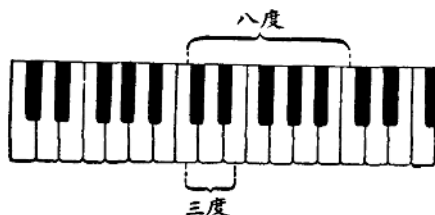


圖 5. 鋼琴的鍵盤。

頻率振動。八度音(圖5)相當於2:1的頻率比值,三度音相當於5:4的頻率比值。

3. 電學量的振盪^①讓我們做一個實驗,這實驗明顯地指出市電的電壓隨時間而變化是遵循着怎樣的一個規律。

為此,我們應用電子示波器^②,它的外表如圖6所示。這美妙的儀器的裝置,以後(第二章)將會更詳盡地加以描述。目前知道下面的一些就夠了。它的基本部份是一個電子射線真空管——一個平底玻璃瓶,裏面飛着高速的電子,形成一個電子射線,即電子的細束。管底的內部蓋上一層薄薄的物質,這物質具有一種特性:當電子落在上

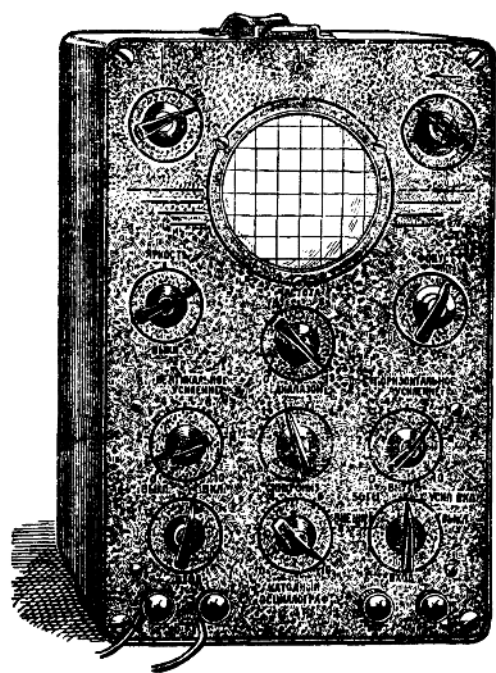


圖 6. 電子示波器。

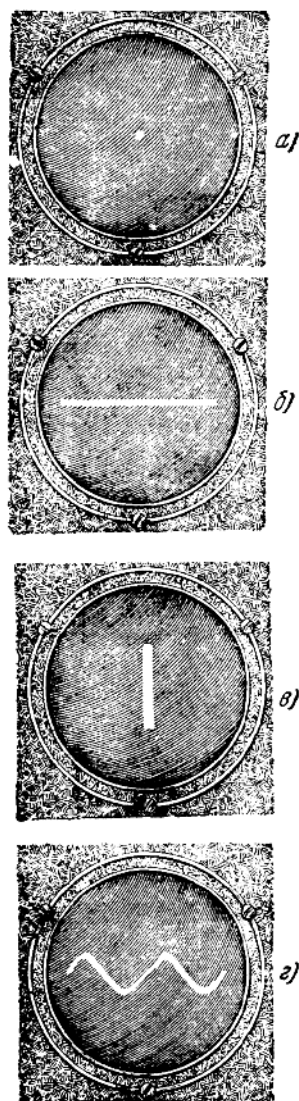


圖 7. 示波器螢光幕上的圖形:a—接上電子管, b—接上掃退電路, c—接上市電電源, d—接上掃退電路和市電電源。

① 可以說物理系統的振動(例如:擺的振動),也可以說物理量的振動或振盪(例如:位移的振動,速度的振動,電流強度的振盪)。(電學量用“振盪”,其他用“振動”——譯者註)。

② 對我們來說,電子示波器這一名詞比常用的“陰極記振器”更為恰當。記振器意味着“描畫振盪的儀器”。示波器則意味着“能使人看到振盪的儀器”。電子射線是儀器的基礎;而陰極(與陽極等在一起)則僅是產生電子束所需要的許多元件之一而已。

面時,在那個地方就會發出光來。這形成了一個屏。接通真空管電路後,我們起初看見在螢光屏中心有一個靜止的光點——電子射線打在屏上一定的地方(圖 7, *a*)。現在轉動示波器面板上的一個按鈕,使“掃迴電路”發生作用。掃迴電路是一個電的裝置,迫使電子束以等速沿螢光屏的水平直徑向左向右多次地跑過。這運動進行得這樣快,以致肉眼看到一條連續的水平線(圖 7, *b*),這是和高速轉動的多面鏡的情形相類似的(正常音叉不作聲時)。向反方向轉動按鈕,停止這運動,在螢光屏上重新看到一個光點。現在把市電接頭接到示波器的接線柱上(圖 8),光點就變成一條垂直直線(圖 7, *c*)。示波器的裝置是這樣的:光點的垂直位移正比於接到它的接線柱上的電壓。光線條的出現意味着電子射線開始一上一下地作迅速的振動。重新轉動剛才所說的按鈕,我們在螢光屏上看到了一段正弦曲線(圖 7, *d*)。這表示市電的電壓 u 隨

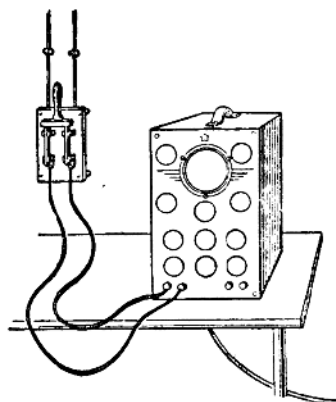


圖 8. 示波器接在市電源接頭上。

$$u = A \cos \omega t$$

的規律而變化,即遵循着擺或音叉臂的偏轉所遵循的同樣的規律。這裏,頻率等於 50 赫芝。

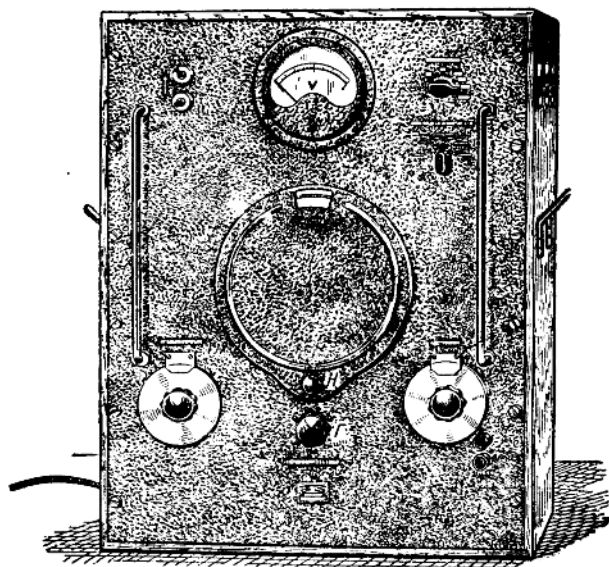


圖 9. 聲頻振盪器。

其次再用電子示波器來研究聲頻振盪器兩端所產生的電壓。聲頻振盪器是一個相當複雜的儀器,外形如圖 9 所示(其裝置將在第四章中提到)。用導線將聲頻振盪器的輸出端接到示波器。我們在這裏也看到一條正弦曲線——聲頻振盪器所產生的電壓也是諧和振盪。

沿順時針方向轉動聲頻振盪器的“調諧按鈕”*H*(圖 9)。此時螢光屏上的正弦曲線在水平方向上被壓縮,曲線上的峯和谷彼此靠攏,並且屏上峯和谷的數目逐漸增

加(圖 10, *a*, *b*)——所要研究的電壓的頻率^①逐漸增高。圖 9 所示的聲頻振盪器,其頻率變化由幾個赫芝到 20000 赫芝。再沿順時針方向轉動按鈕 *F* (“輸出調節”),我們看到正弦曲

① 所謂“電壓的頻率”、“電流的振幅”等等,意即:電壓、電流等等的諧和振盪的頻率或振幅。

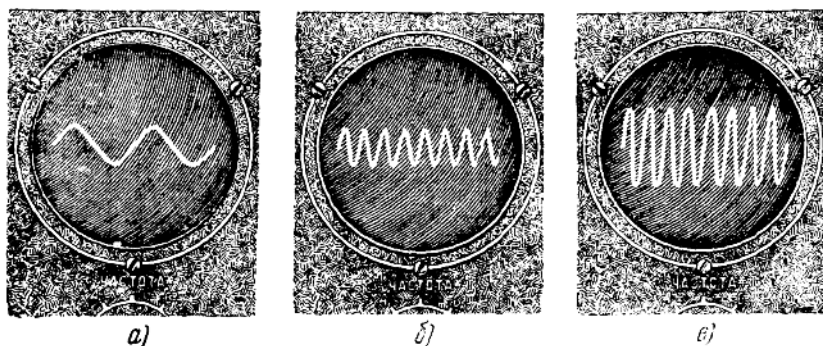


圖 10. 示波器螢光屏上的圖形: *a*—原來的圖形, *б*—轉動控制鈕 *H* 以後的圖形, *в*—轉動控制鈕 *Г* 以後的圖形(參看圖 9)。

線沿垂直方向逐漸伸長(圖 10, *в*), 電壓的振幅逐漸增加。

圖 11 示更高頻率(約 50 兆赫芝)的電磁振盪發生器。它的基本元件是: 由粗銅線繞成的一些線圈和可變電容器組成的振盪迴路, 和三極電子管(至於這樣的發生器如何工作, 將

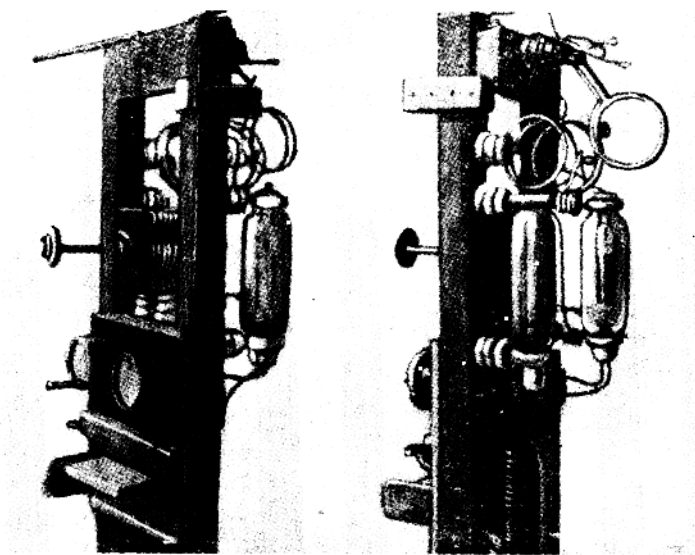


圖 11. 示範用高頻振盪器: *a*—控制板一邊的外貌, *б*—振盪迴路一邊的外貌。

在第四章中詳細說明)。當把電子管工作所需的直流電壓加到管上時, 在振盪迴路中即產生一電流, 依

$$i = A \cos \omega t$$

的規律而變。發生器周圍空間中的電場和磁場強度 E 和 H 也依同一規律而變:

$$E = A_1 \cos \omega t, \quad H = A_2 \cos \omega t,$$