

高等学校教学用书

振动理论引论

上册

C. И. 斯特列可夫著

高等教育出版社



高等学校教学用书



振 动 理 论 引 论

上 册

C. II. 斯特列可夫著

何 文 蛟 译

高等  社

高等学校教学用书



振 动 理 论 引 论

下 册

С. П. 斯特列可夫著
何文蛟 王君健译

高等教育出版社

本書系根据苏联技术理論書籍出版社 (Государственное издательство технико-теоретической литературы) 出版的斯特列可夫 (С. П. Стрелков) 著 “振動理論引論” (Введение В Теорию Колебаний) 1951 年版譯出，原書經苏联高等教育部审定作为高等学校的教科書。

中譯本分二册出版，本書為上册，內容講解具有一个自由度的系統的振動以及其应用。

本書由何文蛟同志譯出，林金銘同志校訂。

2P52/08

振 動 理 論 引 論

上 册

С. П. 斯特列可夫著

何文蛟譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇五四號)

京華印書局印刷

新華書店總經售

統一書號 15010·207 開本 850×1168 1/32 印張 7 2/16 字數 166,000

一九五六年十二月北京第一版

一九五六年十二月北京第一次印刷

印數 00001—10,000 定價 (5) 羊 0.86

本書系根据苏联技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的斯特列可夫 (С. П. Стрелков) 著“振動理論引論” (Введение в теорию колебаний) 1951 年版譯出, 原書經苏联高等教育部审定作为高等学校的教科書。

中譯本暫分为二册出版, 本册为下册, 內容講解具有多个自由度的綫性系統中的振動, 以及其在科学技术上的应用。

本書由何文蛟、王君健兩同志合譯, 由何文蛟同志校訂。

245/08

振 動 理 論 引 論

下 册

С. П. 斯特列可夫 著

何文蛟 王君健 譯

高等教育出版社出版 北京琉璃廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京華印書局印刷 新華書店總經售

統一書號 13010·416 開本 850×1168¹/₃₂ 印張 4²/₁₆ 字數 111,000 印數 0001—3,500

1958 年 3 月第 1 版 1958 年 3 月北京第 1 次印刷 定價 (8) ¥0.55

序

決定本書內容的主要材料，是作者于 1944—1949 年間在榮膺列寧勳章、以 M. B. 羅蒙諾索夫命名的國立莫斯科大学物理系任教時，講授振動理論一般課程的講義。

這課程是研究振動理論專門部分的一個引論，它的目的，不僅要使學生從技術與物理中的最常見實例來認識振動過程的基本規律，並且要使學生學會最簡單的振動系統的理論研究和計算的初步方法。

物理系振動教研室二十年來教授振動理論課程所積累的科学傳統，在一定程度上，決定了本書的材料取舍和基本原理問題的敘述方式。

第一次關於振動理論的課程，是 Л. И. 曼傑爾席塔姆院士在莫斯科大学講授的。

在修改本課程時，我採納了我們教研室的同志們的，特別是 К. Ф. 杰阿多爾奇克教授的一些建議，並接受了 B. B. 米古林教授在讀完本書原稿後，所提出的一些批評。在準備原稿時，承 Г. А. 本德里可夫和 И. Е. 米赫也夫給我很多的幫助。

謹趁此機會，對他們表示我深切的謝意。

——作者——

目 录

序

緒論	1
----------	---

第一編 具一个自由度的系統中的振动

第一章 具一个自由度的綫性系統中的固有振动	9
-----------------------------	---

§ 1. 系統的自由度数的定义	9
§ 2. 具一个自由度的守恒系統中的固有振动	11
§ 3. 諧振动与能量振动的基本要点	17
§ 4. 具一个自由度的非守恒系統中的固有振动	20
§ 5. 用“相平面”研究具一个自由度的系統中的振动过程	26
§ 6. 具“負”阻尼的系統的固有振动	35

第二章 非綫性守恒系統中的固有振动	43
-------------------------	----

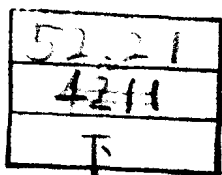
§ 7. 非綫性守恒系統的振动	43
§ 8. 物理摆的振动	47
§ 9. 振动周期的确定	48

第三章 在綫性系統中的受迫振动(在外力作用下的振动)	52
----------------------------------	----

§ 10. 前言	52
§ 11. 諧(正弦)力对沒有摩擦的綫性系統的作用	54
§ 12. 共振現象	57
§ 13. 共振时的振动形式	60
§ 14. 在正弦力作用下具有阻尼的系統中的受迫振动(复数振幅以及复数参数方法)	61
§ 15. 共振規律的分析	70
1. 电流(或速度)的振幅	71
2. 位移的振幅(或在电容器上电荷的振幅)	75
3. 加速度的振幅(或在电感量上的电压的振幅)	78
4. 受迫振动的相位	80
§ 16. 在系統参数变动的情况下共振曲綫的特性	81
§ 17. 某些特殊的共振情形(“电流”共振与“电压”共振)	86
§ 18. 任何形式的外力对綫性振动系統的作用	92

§ 19. 隔振設備的理論基礎(抑振).....	96
第四章 記錄儀器的理論綱要	100
§ 20. 關於記錄儀器的基本知識	100
§ 21. 准靜態儀器	101
§ 22. 共振儀器	111
§ 23. 按照地震儀原理工作的儀器	111
§ 24. 沖擊儀器	114
第五章 共振理論在無線電技術中的一些應用	118
§ 25. 選擇性	118
§ 26. 無畸變性	121
§ 27. 正弦脈沖的接收	125
§ 28. 調頻	130
§ 29. 關於“頻譜分解”的評論	133
第六章 具非線性元件的最簡單系統中的受迫振動	134
§ 30. “非線性”彈簧的振動	134
§ 31. “非線性導體”和交流電的整流	135
§ 32. 具有 RC-濾波器的二極管整流器的計算	139
§ 33. 陰極伏特表	141
§ 34. 檢波	142
§ 35. 實際的檢波電路	146
§ 36. 外差法	150
§ 37. 超外差	152
第七章 參數振動	154
§ 38. 秋千的擺動	154
§ 39. 參數振動的簡要計算	156
§ 40. 參數共振的區域	159
§ 41. 對簡要計算的評論	160
§ 42. 參數振動數學理論中的一些知識	161
§ 43. 參數共振區域的確定	163
§ 44. 參數振動的例子	168
第八章 自動振動	170
§ 45. 關於自動振動的一般知識	170
§ 46. 電磁振蕩器	171
§ 47. 振蕩器非線性方程式的解和分析	176
1. 交變振幅方法	176
2. 曼杰爾席塔姆-巴巴列克斯方法	180

3. 安德罗諾夫方法(小参数方法)	184
4. 周期性解的稳定性	189
5. 杰阿多尔奇克的能量方法	193
§ 48. 特性曲线的工作点的选择对振荡器中自动振动的影响	194
§ 49. 无线电技术中的振荡器状态的分析(“准线性方法”)	202
§ 50. 振荡器的功率	208
§ 51. 振荡器的线路	211
§ 52. 间隙自动振动	212



下 册 目 录

第二編 具多个自由度的綫性系統中的振动

第一章 具两个自由度的系統中的振动	223
§ 53. 关于确定自由度数的概述	223
§ 54. 具两个自由度的系統的例子	225
§ 55. 部分系統与全系統	226
§ 56. 在無阻尼的两个电感耦合迴路的系統中的固有振动	229
§ 57. 系統的固有頻率与迴路間失諧 (比值 $\frac{n_2}{n_1}$) 的依存关系	234
§ 58. 在具两个自由度的無摩擦系統中(一般情形)的固有振动的理論	236
§ 59. 彈性耦合摆的固有振动	241
§ 60. 正則坐标	243
§ 61. 固有頻率是最小值	247
§ 62. 两个系統的耦合与耦合度(两个系統的相互作用)	249
§ 63. 在大耦合度情况下的振动	251
§ 64. 具两个自由度的系統在有摩擦时的固有振动	255
§ 65. 具小阻尼的电感耦合迴路中的固有振动	259
§ 66. 諧外力对具两个自由度的無阻尼的系統的作用	261
§ 67. 具两个自由度的系統当有阻尼时的受迫振动	267
§ 68. 系統的复数参数	273
§ 69. 关于系統的共振頻率的概述	275
§ 70. 超外差中的中頻滤波器的計算	278
第二章 具多个自由度的綫性系統中的振动	281
§ 71. 具多个自由度的綫性振动系統的一般性質	281
§ 72. 無摩擦力的系統中的固有振动	284
§ 73. 附有三个小珠的弦的固有振动	289
§ 74. 正則坐标	293
§ 75. 正則坐标的正交性	294
§ 76. 固有振动的能量和正則振动的能量	297
§ 77. 正則坐标标尺的变化	299
§ 78. 附有小珠的弦的正則坐标	301
§ 79. 系統的固有頻率相等的情形	303

§ 80. 一个或是几个固有频率等于零	304
§ 81. 具多个自由度的系统在有阻尼的情况下的振动	306
§ 82. 在无阻尼系统中的受迫振动	308
§ 83. 具多个自由度的系统在有摩擦情况下的受迫振动	313
§ 84. 同样环节(元件)的“鏈”	316
§ 85. 均匀元件的鏈中的固有振动	318
§ 86. 均匀元件的鏈(濾波器)中的受迫振动	325
第三章 具分布参数的振动系统	335
§ 87. 具分布参数的均匀系统	335
§ 88. 无阻尼的均匀分布系统的固有振动	341
§ 89. 在非齐次边界条件下的固有振动的例子	350
§ 90. 固有振动波形的正交性	351
§ 91. 具阻尼系统的固有振动	353
§ 92. 具分布常数的均匀系统中的受迫振动	355
参考文献	362

緒 論

不論哪一種技術領域里，不論哪一個物理部門里，都會碰到某種程度的振動過程。無線電技術、交流電工學以及某些其他的技術部門，全部都是建築在利用振動過程的基礎上的。在物理學的光學、聲學、力學、電學以及原子理論中，我們更處處碰到振動過程。

發生振動的各种過程的物理本質是不相同的；譬如：鐵路橋梁的振動與電迴路中電流的振動^①，就是完全不同的兩種現象。然而，即令是對某些種情形中的振動規律有一點粗淺認識，也會看出：在這些所謂振動過程中，有很多共同之處。對物理與技術中所碰到的振動過程的詳細分析指出：在所有的情形下，振動的基本規律是一樣的。振動規律的這一普遍性，就某種意義來說，促使我們把它划分出來作為一個獨立的科學部門來研究，並得到了振動理論的名稱，因此振動理論這一課程的任務，乃是用統一的觀點，來研究在各式各樣的物理現象中以及技術設備中所遇到的振動過程。

我們可能碰到的一切振動過程，可按照其外在特征（按照過程中某一量隨時間變化的規律特性和形式來分類，這種分類可稱為動的分類（按“動”字的廣義來說）。

首先可將所有在物理及技術中實際上遇到的振動過程，分為兩類：週期的和非週期的。在理論上具有重大意義的還有中間的一類——近似週期運動。

所謂週期過程，是這樣的一種過程，在這種過程中，任一瞬間

① 譯者注：在電學中一般稱為振蕩，本書為一致起見仍稱振動。

的振动量，經過一定的一段时间 T 后又具有同样的值。周期函数的数学定义是：当变数 t 为任何值时，如果有这样一个常数 T ，能使

$$f(t+T)=f(t).$$

那末函数 $f(t)$ 称为具有周期 T 的周期函数。所有不满足上式所表示的周期条件的其他函数，可称为非周期函数。

近似周期函数具有下列性質：即在任一瞬間 t 时，

$$|f_1(t+\tau)-f_1(t)|\leq\varepsilon.$$

其中 τ 及 ε 为常数。 τ 值一般是 ε 的函数，并称之为近似周期。如果量 ε 和函数 $f_1(t)$ 的模量在時間 τ 內的平均值比起来，显得很小，那末，就可以認為近似周期函数在某一段时间实际上接近于周期函数。例如：函数

$$f_2(t)=\cos t+\cos\sqrt{2}t$$

是一个近似周期函数。但是如果近似地令 $\sqrt{2}=1.4$ ，那末，在時間 t 的有限的一段上，函数 $f_2(t)$ 可以看作是周期等于 10π 的周期函数。

在周期运动的类型中，諧振动或者正弦振动占着重要的地位，在这种振动中物理量随時間所进行的变化，类似于两个簡單三角函数中的任一个——正弦函数或余弦函数。

非周期振动比周期振动的式样要多得多，現在我們仅仅指出那些在振动理論中最常遇到的。

“阻尼”的(或者“增長”的)“正弦”和有限运动 按照“阻尼的正弦”規律的振动，有时称为“阻尼諧”振动，如圖 1, a 所示，其数学的表达式如下：

$$Ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

其中 A, φ, δ 以及 ω 为常数， t 为時間。“增長諧”振动則如圖 1, b 所示。在数学上，它們之間的区别只在 δ 的符号。严格的講，关于

这样的振动应该这样叙述：阻尼（或者增长）振动，在 δ 的值足够小时，接近于谐振动，因此“阻尼的正弦”或者“阻尼谐振动”的说法不十分合逻辑，谐振动不可能是阻尼的。然而由于通用，我们仍沿用这种称呼。

有限运动的一些典型例子，如图 2 所示。它们表示量的这样一种变化：变量逐渐地趋于某个极限的恒定值；在数学上，有限运动可能具有这种形式，例如：

$$(Ae^{-\alpha t} + Be^{\alpha t})e^{-\lambda t},$$

其中 A, B, α 及 λ 是实数，并且 $\lambda > \alpha$ 。

单列举振动过程的外在的特征，对于它的分析与系统化，还十分不够。因此，我们将按照那些正在进行振动的系统的基本物理特征，来对振动进行分类。正在进行振动的系统称为振动系统。

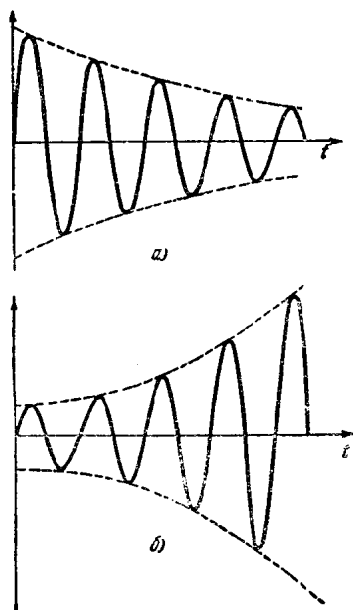


圖 1.

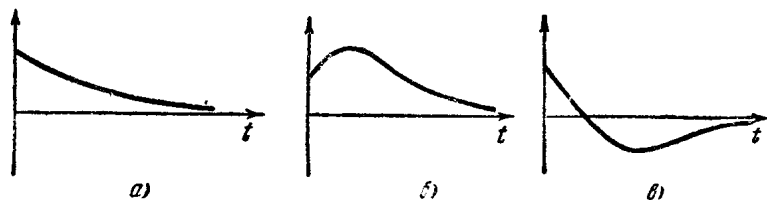


圖 2.

首先指出，本书的全部材料系按照发生振动的系统的复杂程度分为三部分：

1. 在具一个自由度的系统中的振动。

2. 在具多个自由度的系統中的振动。
3. 在具無穷个自由度的系統中的振动。

第一部分中所指出的,是关于所有振动理論中最簡單的、初步的、同时也是基本的、重要的过程,因此它占了本書的很多篇幅。在第二及第三部分中討論比較复杂的过程,然而这些过程彼此在實質上差別很小。

在每一部分,應該討論振动現象的四种可能的类型。

1. 固有振动;
2. 受迫振动;
3. 参数振动;
4. 自动振动。

固有振动發生于經過了外来扰动(“冲击”)后的隔离系統中。振动过程的特性,基本上仅仅由系統的内力来决定,这种内力依存于系統的物理構造。在激励振动的起始瞬間,由外界供給其所必需的能量。

受迫振动發生于一定周期性外力的作用下。这力的作用不依存于系統中的振动。过程的特性不仅由系統的特性决定,并在很大程度上依存于外力。振动能量由給出外力的能源供給。

参数振动与受迫振动的区别在于外来作用的方式。受迫振动时,由外面供給力或者某种别的量来产生振动,此时,系統本身的参数則保持恒定。参数振动是由外面使系統的某个物理参数(例如質量)产生周期变化所引起的。

自动振动發生于沒有外来周期作用的系統中。振动特性唯一地决定于系統的设备。用来抵偿振动时变成热的能量損失的能量来源,通常是系統的不可分割的一部分。

另一方面,所有的振动过程还可以这样地分为兩类:在綫性系統中的振动和在非綫性系統中的振动。凡振动的基本規律用綫性

微分方程式表示的系統，称为綫性系統。显然，非綫性系統是那些基本規律由非綫性微分方程式表示的系統。由于沒有解非綫性微分方程式的正規方法，使得非綫性振動系統的分析非常复杂。綫性及非綫性振動系統中的过程之間的区别歸結到：按照特殊的步驟来分析綫性系統中的振動時，可對該系統中所有可能的过程，作出完全確定的結論，而這對於在非綫性系統中的过程，一般則不可能作出。因此，非綫性系統的振動理論是相當复杂的，普通能解決的只是屬於非綫性系統的一定形式的問題。然而非綫性振動的理論，對於我們却是重要的，因為所有的自動振動系統，根本都是非綫性系統。

有時把振動理論的科目，列入數學的課程內。然而這是不十分正確的；振動理論是一個獨立的科學部門，因為它的各種應用彼此間是這樣緊密的聯繫着，以致不僅在數學上，而主要的是物理上必須用統一的觀點來研究它。用統一的物理觀點來研究在不同系統中的振動，大大地方便了分析研究某些振動过程，在這些振動过程中，一些不同的物理量的振動，例如電學量和力學量的振動，都存在着規律的關係。在技術與物理中這樣的設備是越來越常見了。此外，用統一的觀點來研究振動过程，可以培養學生用類比的方法來分析現象的能力，而這對於研究在技術上常會碰到的未曾研究過的新过程時，是極其有用的。

振動理論，作為一個物理科學部門，是最近才成立起來的，它研究有關在物理與技術中所碰到的各種振動过程。它是在各種科學與技術領域內許多振動研究的基礎上產生并發展起來的。

由於偉大的學者 A. C. 波波夫發明了無線電——它是技術上最大規模利用振動过程之一——科學家們面臨了一系列的嶄新的任務，這些任務也使得我們有必要將振動理論發展為一個物理科學部門。

在振动理論中,決定它發展的基本研究工作,是由俄国学者所完成的。特別應該指出的是 B. B. 戈李茲院士同 A. H. 克雷洛夫院士在研究受迫振动及固有振动方面的工作。在 B. B. 戈李茲的工作中,只要看看出版于 1912 年的,他的名著“測地震术講义”,就可以看到这位学者所完成的工作範圍。这講义直到現在还没有失掉它的意义,并代表着应用受迫振动理論来解决复杂的測地震术問題的典范。

A. H. 克雷洛夫院士于 1898 年所發表的著作,关于船的顛簸以及由机器运行所引起的船的振动,是广泛研究受迫振动及固有振动的輒始,已故的 A. H. 克雷洛夫畢生从事这种研究,后来由他的学生繼續作下去。1913 年出版的 A. H. 克雷洛夫所著的教本“論应用于技术問題中的某些数学物理的微分方程式”特別清楚的指出:当研究振动过程时,数学同技术問題彼此間是多么緊密的交融着,因此这本书是每一个認真研究振动的人所必讀的书。

無綫电技术的發展,在振动理論面前提出了一些新的任务:研究無阻尼振蕩器的工作;建立調制、檢波理論以及無綫电振动理論等等。这些任务是由于發展祖国無綫电技术、無綫电通信、無綫电广播的迫切需要所提出的,这些需要在十月革命后不久,曾陈述于 B. H. 列宁致 M. A. 波奇-伏隆叶維奇的那封有名的信中。

苏联的科学家和工程师: A. H. 伯尔格及 M. B. 蕭列依金院士, M. A. 波奇-伏隆叶維奇教授等,完成了無阻尼振蕩器的理論計算方法;而調制設備的計算方法,曾由 H. Г. 克雅齐金、A. A. 敏茨等作出。至于在無綫电振动电路中現象的詳細分析,則由 B. H. 阿謝也夫教授等所作出。

約在二十年前,莫斯科大学教授 J. H. 曼杰尔席塔姆开始在物理数学系講授振动理論这一課程,并成立了研究振动的專業和實驗室。