

高等学校教学用书



无綫电物理学导論

WUXIANDIAN WULIXUE DAOLUN

上 册

B. H. 卡利宁 著
Г. М. 格尔什欽

李 洛 童 譯

人民教育出版社

73.45
170
:2

高等学校教学用书



无线电物理学导论

WUXIANDIAN WULIXUE DAOLUN

下 册

B. H. 卡利宁 著
I. M. 格尔什欽
高 煜 译

JS65/24

人民教育出版社

此书系根据苏联技术理论书籍出版社(Гостехиздат)出版的卡利宁(В. И. Калинин)、格尔什钦(Г. М. Герштейн)合编的“无线电物理学导论”(Введение в Радиофизику)一书1957年版译出的,原书曾经苏联高等教育部审定为国立大学的教学参考书。

中译本暂分上、下两册出版。上册内容包括:绪论及闭合振荡回路、具有分布常数的电路、波导管和空腔谐振器等三编。可供高等学校物理系、无线电系参考。

无线电物理学导论

上册

В. И. 卡利宁 Г. М. 格尔什钦 著

李 洛 童 译

北京市书刊出版业营业许可出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K13010·873 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $10 \frac{12}{32}$

字数 249,000 印数 10001—38,000 定价(6) ¥1.00

1961年12月第1版 1982年2月北京第2次印刷

序 言

我們偉大的前輩、無線電技術和無線電物理學的創始人和奠基者，A. C. 波波夫(1859—1906)，按理應當稱為第一個無線電物理學家(照這個名稱的最新涵義來理解)。他的研究工作為一系列最重要的現代問題(包括雷達的物理原理)奠定了基礎。但是，很久以後，才詳細探討了那一整套複雜的問題，這些問題使得無線電物理學能夠分出成為獨立的科學，並使它在物理科學這一廣闊系統中具有深刻的、有原則意義的重要性。

作為一門獨立學科，無線電物理學是在最近二三十年內建立起來的。這門年青科學的內容主要決定於電磁振蕩技術的物理基礎；由於無線電物理學和物理學以及力學-數學的其它科學部門之間存在着強烈的“相互作用”，這個內容在戰後年代里曾大大擴展，並在繼續擴展着。這裡只需指出無線電頻譜學和無線電天文學等新部門的建立和發展就夠了。特殊的無線電物理器件和研究方法，使實驗技術得以革新，並使現代物理學的各個部門(特別是原子物理學)能夠獲得巨大的成就。利用超高頻振蕩的方法解決了基本粒子加速問題，就是一個明顯的例子。另一方面，一系列最重要的無線電物理學問題提出來了，並且要解決這些問題，這就使得人們必須在改進數學儀器方面，在解決許多重要的機械性質的問題方面，特別是在振蕩理論方面，進行認真的研究。這裡只需指出下列事實：由於蘇聯無線電物理學家 Л. И. 曼杰里什坦院士和 Н. А. 巴巴列克西院士這一著名學派的工作，現在不僅發展了許多研究各種各樣的無線電物理學問題的集體，而且這些集體已經形成為許多研究自動調整、遠動學、自動學等理論問題的獨立學派(例如在高爾基大學和科學院的 А. А. 安德羅諾夫院士學派)。

苏联无线电物理学家在这門科学的各个发展阶段中所进行的工作,其特点都是理論和实际有机地联系。现在,无线电物理学在深入到物理科学的各个部門时,除了引入实验方法以外,还要引入无线电物理学的概念。无线电物理学的語言和术语越来越深入到普通物理学的术语之中,創造出了十分方便的,在許多問題上都极为明确的“振荡理論的国际語言”(已故院士 J. И. 曼杰里什坦的說法),也就是对所有振荡現象(机械振荡,声振荡,电磁振荡,包括古典光学)的統一解釋。从这种“普通物理学”观点来研究无线电物理学,是培养“从物理方面思考”的习惯的最正确的道路;而这种习惯对每一个物理学家,不論他是实验家还是理論家,都是必要的。

无线电物理学对发展苏联文化、国民經济和国防的作用和意义,可以从苏联共产党二十次代表大会的一些指令中明显地看出。在这些指令中,十分重视发展无线电通信、无线电广播和电视中的新技术,在苏联国民經济中采用先进无线电方法,以及培养相应专业的专家等問題。因此,对无线电物理学教学书籍的需要,也就必定增长。在苏联的书籍中,有許多很好的无线电技术教学参考书和有关无线电技术中某些专业的教学参考书,但是实质上却没有一本无线电物理学教学参考书(如果不算 1932 年出版的 K. A. 列昂齐耶夫著“无线电技术的物理基础”那本早已陈旧的書的話)。

本书是編写这种教学参考书的一个尝试。它自然不能包括現代无线电物理学的所有方面,而且也沒有抱定这样的目的。这本书是根据作者近十一十五年来在薩拉托夫大学讲授“无线电物理学講座”中一系列課程的材料編写而成,它的目的在于叙述无线电物理学中某些主要的一般性問題,闡明它們之間的关系,并需要用研討各种不同設備中所发生的过程的方法來說明这些問題。因此,这本书取名为“无线电物理学导論”。借此以強調指出,本书所談許多問題的进一步發揮和具体化,讀者可以在专业課程

的手冊中以及專門論文中找到。

必須指出，本書不論在材料的選擇上或是在敘述這些材料的順序上，都有某些特點。在敘述電磁振蕩理論、綫性系統和信號變換、振蕩和非綫性變換一般理論等“古典”材料的同時，對超高頻問題也給予很大的注意。無疑地，這不但符合於無線電物理學的現代情況，而且符合於它今后的發展趨勢。超高頻物理學和原子物理學、天文學、頻譜學等密切相關。因此，除了研究超高頻傳輸系統和振蕩系統、由於場和電子的慣性所引起的特殊問題以及產生超高頻振蕩的新原理之外，還注意到超高頻在研究物質電氣特性方面的應用，注意到帶電粒子加速器中的主要過程以及無線電天文學中的某些問題。

為了能廣泛利用對無線電信號的頻譜觀念，和在研究最簡單系統時廣泛利用頻譜概念，在緒論中簡短地敘述了調制問題（即獲得無線電信號的過程）以及反向過程（檢波）的原理。這樣，作者多少打破了過去的傳統，即“在離開頭很遠的地方”，和其他非綫性變換一起來敘述調制問題。這些非綫性變換是已有的“現成”無線電信號通過非綫性系統時所發生的過程，我們把它分出寫成獨立的一編（第六編）。振蕩和放大問題，由於它們的物理實質相同，因而綜合成為兩編：第四編敘述“古典的”振蕩和放大設備，第五編敘述超高頻振蕩和放大的問題。第七編簡短地敘述噪聲和超高頻接收的問題，這些問題在現代無線電物理學的各個部門中，特別是在無線電天文學中，具有很大的意義。

考慮到必須使讀者，特別是大學學生讀者養成獨立工作的習慣，作者盡量避免過分詳細地敘述某些個別問題；在某些情況下，建議讀者自己去分析某些問題，並在每編之末列出主要教學參考書和專門文獻。進行敘述時，假定讀者除學過普通物理學的課程之外，還學過無線電工學的課程，並具有關於電子器件的基本概念。

本书第1—22章由B. И. 卡利宁编写, 第24—38章由Г. М. 格尔什钦编写, 第23章由二人合写。由B. И. 卡利宁对材料作总的加工整理。书中有若干章曾在我們无綫电物理学科学討論会上討論过。作者謹向所有参加討論的人表示深摯的謝意, 感謝他們的热烈討論和珍貴的意見; 并深深感謝参加編写本书手稿的同人和同学(A. И. 施迪罗夫, Г. Л. 維捷里斯, И. Д. 赫麦里科夫, A. B. 卡利宁娜, B. И. 塔塔布林)。此外, 作者还要向莫斯科大学的M. Д. 卡拉謝夫表示衷心的謝意, 感謝他仔細审閱本书初稿, 并提出許多宝貴的意見。

作者将本书看作为編写无綫电物理学教学参考书的一个嘗試, 因而一切批評意見和評論均將竭誠接受, 并在以后的著作中对这些意見和評論加以考慮。

B. И. 卡利宁 Г. М. 格尔什钦

目 录

序言	vii
緒論	1
第一章 无綫电电路中的振蕩过程	1
§ 1.1 引言·諧振蕩过程	1
§ 1.2 瞬变过程	7
§ 1.3 能量关系	17
§ 1.4 振蕩过程在相位平面中的表示法	19
第二章 振蕩过程的頻譜	26
§ 2.1 福里哀級数和福里哀积分	26
§ 2.2 脉冲过程及其分析	30
§ 2.3 电路的主要特性	35
§ 2.4 线性电路对复杂信号的反应(信号的线性变换)	40
第三章 調制原理	45
§ 3.1 概述	45
§ 3.2 調幅	48
§ 3.3 調相	50
§ 3.4 調頻	53
§ 3.5 檢波原理	55

第一編 閉合振蕩迴路

第四章 单閉合迴路中的强迫振蕩	58
§ 4.1 自由振蕩和强迫振蕩·諧振現象	58
§ 4.2 串联振蕩迴路中的諧振現象	64
§ 4.3 并联迴路的諧振頻率和等效阻抗	72
§ 4.4 并联迴路在諧振附近的情况	76
§ 4.5 諧振迴路的頻譜特性	82
第五章 耦合迴路中的振蕩过程	88
§ 5.1 关于振蕩迴路耦合的一般概念	88
§ 5.2 两耦合迴路中的自由振蕩的分析	92
§ 5.3 耦合迴路中的强迫振蕩	101
§ 5.4 耦合迴路中的諧振現象	104
§ 5.5 次級迴路中的电流情况的分析	109

§ 5.6 耦合迴路的諧振曲線和頻譜的特性	116
§ 5.7 耦合迴路系統中的能量关系	125
緒言和第一編的补充資料	128
第二編 具有分布常数的电路	
第六章 长綫理論基础	128
§ 6.1 引言	128
§ 6.2 电报方程	135
§ 6.3 长綫中波的反射現象	139
§ 6.4 綫路的輸入阻抗和波阻抗	143
§ 6.5 电磁波在长綫中傳播的特点	148
第七章 超高频下的长綫	156
§ 7.1 基本关系	156
§ 7.2 几个特殊情况	161
§ 7.3 利用綫路来变換和匹配阻抗	169
第八章 傳輸系統圓图基本原理	175
§ 8.1 基本关系式	175
§ 8.2 直角坐标圓图	176
§ 8.3 极坐标圓图	180
§ 8.4 应用圓图的几个例子	183
第九章 作为振蕩系統的长綫	189
§ 9.1 长綫的固有波长	189
§ 9.2 諧振綫的等效阻抗和品质因数	194
§ 9.3 具有分布常数的耦合系統	204
第十章 滤波电路原理	212
§ 10.1 滤波电路的一般等效电路	212
§ 10.2 滤波器的通頻条件	218
§ 10.3 多节滤波电路的一些特性	224
第二編的补充資料	229
第三編 波导管和空腔諧振器	
第十一章 用波导管傳輸电磁能的物理基础	230
§ 11.1 波导管的一般概念	230
§ 11.2 波在波导管中傳播的物理状况	233
第十二章 矩形截面的波导管	239
§ 12.1 一般关系式	239

§ 12.2 矩形波导管中的电波	241
§ 12.3 矩形波导管中的磁波	245
§ 12.4 矩形波导管中的纵向波	251
第十三章 圆形截面波导管	253
§ 13.1 一般关系式	253
§ 13.2 圆形波导管中的电波	254
§ 13.3 圆形波导管中的磁波	260
第十四章 波导管中的损耗和衰减	264
§ 14.1 波导管中损耗的来源	264
§ 14.2 波导管壁有限电导(σ)的影响	264
§ 14.3 矩形波导管中的损耗	266
§ 14.4 圆形波导管中的损耗	270
§ 14.5 波导管中的介质的影响	273
第十五章 作为传输系统的波导管	277
§ 15.1 波导管的激励	277
§ 15.2 波导管和传输线相比较的条件	279
§ 15.3 “带状波导管”	287
第十六章 空腔谐振器	290
§ 16.1 超高频振荡系统的特点	290
§ 16.2 空腔谐振器的基本特性	294
§ 16.3 矩形空腔谐振器	298
§ 16.4 圆柱形谐振器	305
§ 16.5 球形空腔谐振器	311
第十七章 复杂形状的空腔谐振器和它们的应用	314
§ 17.1 实际应用的谐振器的主要型式	314
§ 17.2 复杂形状的谐振器的计算方法	316
§ 17.3 用“等效代换法”对环形和同轴空腔谐振器的近似计算	318
§ 17.4 空腔谐振器的激励方法	322
§ 17.5 空腔谐振器的“等效参数”	326
§ 17.6 应用空腔系统来研究物质的电特性	329
第三编的补充资料	333

下册目录

第四編 电磁振荡的发生和放大

第十八章 自振和自振系統.....	335
§ 18.1 自振系統的一般性質.....	335
§ 18.2 負电阻.....	338
§ 18.3 負电阻的靜态和动态伏安特性曲綫.....	341
第十九章 电子管振蕩器的理論基础.....	353
§ 19.1 最簡單的自振系統和它的綫性闡釋.....	353
§ 19.2 电子管振蕩器的綫性微分方程.....	355
§ 19.3 “未截流的振蕩”.....	360
§ 19.4 用折綫表示电子管的特性曲綫.....	365
§ 19.5 电子管振蕩器在阳极电流为余弦脉冲时的工作.....	369
第二十章 电子管振蕩器理論的非綫性方法.....	374
§ 20.1 利用“振蕩特性曲綫”研究电子管振蕩器.....	374
§ 20.2 把平均互导表示为激励电压振幅的函数的計算.....	381
§ 20.3 利用平均互导曲綫研究电子管振蕩器.....	384
§ 20.4 具有下降特性曲綫的自激振蕩器的准綫性闡釋.....	390
§ 20.5 电子管振蕩器的非綫性方程.....	393
§ 20.6 求解电子管振蕩器非綫性微分方程的近似法.....	396
§ 20.7 自激振蕩器中的过程的稳定条件.....	402
第二十一章 張弛自振.....	407
§ 21.1 自振的波形.....	407
§ 21.2 張弛系統的最簡單例子.....	410
§ 21.3 具有气体放电管的自激張弛振蕩器.....	415
§ 21.4 多諧振蕩器.....	419
§ 21.5 間歇振蕩器.....	426
§ 21.6 斷續振蕩的同步.....	428
第二十二章 电磁振蕩的参数激励.....	434
§ 22.1 参数振蕩的一般知識.....	434
§ 22.2 参数調制系数的初步計算.....	439
§ 22.3 参数諧振.....	441

07052

§ 22.4 参数发电机	443
第二十三章 自激振荡器的普用线路和稳定频率的问题	448
§ 23.1 维持等幅振荡的普用条件	448
§ 23.2 自激振荡器的普用线路	449
§ 23.3 双迴路振荡器	451
§ 23.4 正弦振荡的阻-容振荡器	455
§ 23.5 回授式振荡器稳定频率的理论基础	460
§ 23.6 增大频率稳定性的方法	465
第二十四章 放大器线路的分析	469
§ 24.1 概述	469
§ 24.2 放大器的等效线路	472
§ 24.3 共阴极线路	476
§ 24.4 共栅极线路	480
§ 24.5 共阳极线路(“阴极输出器”)	484
§ 24.6 晶体管放大器线路	487
§ 24.7 分析某些具体放大器线路的例子	489
第二十五章 放大器的回授和稳定性	495
§ 25.1 一般关系	495
§ 25.2 回授的个别情况的分析	498
§ 25.3 回授对谐振式放大器的选择性的影响	500
§ 25.4 回授放大系统的稳定性	506
第四編的参考文献	512
第五編 超高頻的产生和放大的問題	
概述	514
第二十六章 电子流与电場相互作用的一般問題	517
§ 26.1 电子与电場相互作用的能量效应	517
§ 26.2 感应电流	521
§ 26.3 感应电流定理	523
§ 26.4 总电流的确定	523
第二十七章 电子間隙在超高頻上的响应	532
§ 27.1 概述	532
§ 27.2 二极管总电流的确定	533
§ 27.3 二极管阻抗的确定	534
第二十八章 电子流静态控制的振荡器	541
§ 28.1 回授振荡器	541

§ 28.2 分瓣阳极磁控管	547
§ 28.3 超高频二极管振荡器	552
第二十九章 电子流动态控制的原理	554
§ 29.1 引論	554
§ 29.2 在断續相互作用设备中电子流的动态控制	555
§ 29.3 在連續相互作用设备中电子流的动态控制	557
§ 29.4 在超高频器件中确定对流电流的方法	558
§ 29.5 分析质点与高频电场相互作用过程的方法	561
第三十章 断續相互作用的超高频器件	563
§ 30.1 速調管	563
§ 30.2 磁控管	577
§ 30.3 基本质点加速器	584
第三十一章 連續相互作用设备中的慢波系統	589
§ 31.1 概述	589
§ 31.2 充填介质的波导管	590
§ 31.3 由选定边界条件所造成的慢波系統	591
§ 31.4 計算不均匀慢波綫的方法	601
第三十二章 連續相互作用的超高频设备	604
§ 32.1 概述	604
§ 32.2 作为电场函数的对流电流的确定	606
§ 32.3 取决于对流电流交变分量 $i_{\sim}$ 的波的电场的确定	608
§ 32.4 电子运动方程和场的方程的联立求解	610
§ 32.5 利用增长波的放大。正向波和反向波放大器	613
§ 32.6 利用增长波产生振荡。正向波和反向波振荡器	618
§ 32.7 行波磁控管	625
第五編的参考文献	630
第六編 无线电信号的主要非线性变换	
第三十三章 檢波	632
§ 33.1 小振幅的檢波(平方律檢波)	632
§ 33.2 大振幅的檢波(直綫性檢波)	637
§ 33.3 檢波綫路	640
§ 33.4 利用具有可变参数的綫性系統的檢波。同步檢波	644
第三十四章 再生	650
§ 34.1 再生理論	650
§ 34.2 再生对增益和选择性的影响	654

第三十五章 超再生	661
§ 35.1 正弦形輔助电压的一般关系	661
§ 35.2 超再生时的增益和选择性	666
§ 35.3 矩形輔助电压的一般关系	668
第三十六章 变频	673
§ 36.1 一般关系	673
§ 36.2 多栅管变频	676
§ 36.3 变频的某些实际应用	679
第六編的参考文献	682
第七編 无綫电接收的一些問題	
概述	683
第三十七章 噪声	685
§ 37.1 电路的起伏噪声	685
§ 37.2 电子管的噪声	693
§ 37.3 大气来源和宇宙来源的外部噪声。无綫电天文学	696
第三十八章 超高频上的接收問題	699
§ 38.1 接收放大管中电子慣性的出現	699
§ 38.2 在超高频上放大和变频的問題	701
§ 38.3 超外差和超再生接收法在超高频上的应用	704
第七編的参考文献	705

第四編 电磁振蕩的发生和放大

第十八章 自振和自振系統

§ 18.1. 自振系統的一般性質 現在，我們來研究“自振”和“自振系統”。前面已經指出，“自振”這一術語是指在沒有周期性的外力作用時產生並進行着的振蕩過程。穩定的自振的頻率、振幅和形狀只決定於自振系統本身的性質，而與起始條件無關。

時鐘就可以作為自振系統的例子，它是一個能將絞緊了的彈簧或舉高了的重錘中的固定能量轉變為鐘擺的振蕩能量的機構。在時鐘里，由於任何足以使時鐘啟動的衝擊的結果，都會或快或慢地使鐘擺振動起來，而鐘擺振動的頻率和振幅只決定於機構的內在性質。

再看一下电磁自振系統，可以發現也有這樣的特点，各種电磁振蕩發生器就是电磁自振系統的代表，它們所產生的振蕩的頻率決定於構成系統的振蕩迴路。顯然，為了維持一個具有與起始條件無關的某一“穩定”振幅的等幅振蕩，就要求完全補償系統的全部電路里的損耗。在自振系統中，起補償損耗的作用的那一部分，有一慣用術語，叫做“負電阻”。在描述和研究自振過程時，廣泛採用着負電阻的概念，這概念可以初步解釋如下。具有歐姆電阻的任何導體均要吸收能量，我們把這種導體的電阻看作是正電阻。如果某一導體或導體系統，它本身能夠輸出能量的話，那末我們就稱這個系統為負電阻。當然，類似的極其簡化了的定義是需要詳細規定的，這在以後的敘述中再來說明。而這裡最重要的是強調指出決定自振的穩定狀態的一個基本情況：在系統中應當達到能量平衡，就是說，振蕩系統中因損耗而消費掉的能量 $\mathcal{Q}_+$ 應當等於由

負电阻所供給的能量 $\mathcal{G}_-$, 即

$$\mathcal{G}_+ = \mathcal{G}_- \quad (18.1)$$

假若負电阻所供給的能量小于完全补偿損耗所需的能量, 也就是

$$\mathcal{G}_+ > \mathcal{G}_- \quad (18.1')$$

时, 那末系統中的振蕩就成为减幅振蕩。如果能量的关系与此相反, 也就是說, 如果

$$\mathcal{G}_+ < \mathcal{G}_-, \quad (18.1'')$$

那末从負电阻中得到的多余能量便可用来增大振蕩的振幅。

由此可見, 任何自振系統都应当包含有正电阻和負电阻的元件。根据这个概念和上面举出的关于能量平衡的理由, 立刻可以得出很重要的結論, 就是任何自振系統都是非綫性系統。实际上, 設自振系統由某一 LCR 振蕩迴路和加入到这个迴路中的具有負电阻 $\bar{R}$ 的元件所組成(图 18.1)。因为 LCR 迴路是一个綫性系統, 所以迴路中消耗的能量与迴路中的电流振幅的平方成比例地增加(如图 18.2 所示, 直綫)。假若負电阻 $\bar{R}$ 也具有綫性特性, 就是說

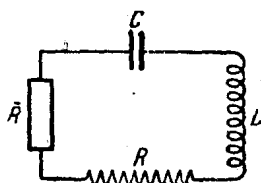


图 18.1.

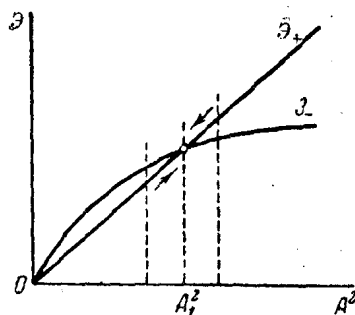


图 18.2.

負电阻供給迴路的能量 $\mathcal{G}_-$ 也与振幅的平方成比例地变化时, 那末就可能发生下列三种情况中的一种:

- a) 当 $\frac{d\mathcal{G}_-}{d(A^2)} = \frac{d\mathcal{G}_+}{d(A^2)}$ 时, 任何的振蕩振幅都得到能量平衡的保

証,也就是說,振幅应当決定于起始条件;

6) 当 $\frac{d\vartheta_-}{d(A^2)} > \frac{d\vartheta_+}{d(A^2)}$ 时, 振蕩的振幅应当无限止地增大, 因为在所有時間內傳輸給迴路的能量始終是大于損耗的能量;

Б) 当 $\frac{d\vartheta_-}{d(A^2)} < \frac{d\vartheta_+}{d(A^2)}$ 时, 一般說来, 不可能产生振蕩, 因为不管振幅有何值时, 由負电阻供給的能量都不足以补偿損耗。

可見, 所有这些情况均不能滿足自振系統的特性。因此, 唯一正确的結論是: 只有在非綫性系統中才可能产生具有穩定的有限振幅的振蕩。事实上, 如果負电阻所供給的能量与振幅的平方的关系 $\vartheta_- = f(A^2)$ 由图 18.2 中的一条曲綫 ϑ_- 来描述, 而这条曲綫在坐标原点上的斜率 $\frac{d\vartheta_-}{d(A^2)}$, 又比表征迴路損耗能量的直綫 ϑ_+ 的斜率大时, 那末系統就应当“自激”, 就是說, 这系統应当发生振蕩, 其振幅是从起伏作用的振幅开始, 实际上是从沒有任何外力作用时的零振幅开始。可以說, 在这样的系統中, 对应于零振幅的状态在振蕩的意义上是不穩定的。振蕩的穩定振幅 A_1 決定于曲綫 ϑ_+ 与 ϑ_- 的交点。不难看出, 这个振幅是穩定的, 因为当振幅偶然减小时, 就出現不等式 $\vartheta_- > \vartheta_+$, 就是說, 从負电阻中得到的能量超过了損耗; 当振幅增大时, 便有 $\vartheta_- < \vartheta_+$, 也就是損耗超过了負电阻所供給的能量。因此, 在这两种情况下, 都能使系統自动恢复到振幅为 A_1 的振蕩。这就意味着, 当系統有了图 18.2 中的曲綫所描述的关系时, 振幅为零的状态是系統唯一的不穩定状态。这里, 被定性描述的自振的自激过程, 是系統在沒有任何外力作用的情况下开始的, 这种过程称为軟自激。

由于系統的某些物理性質, 曲綫 ϑ_- 的变化形式可能具有另一种特性, 例如, 类似于图 18.3 中所示曲綫的特性。由負电阻供給的能量的曲綫 ϑ_- 在坐标原点附近的斜率, 小于損耗能量曲綫(或