

放大电路原理

苏联 A. A. 李兹金 著

顾世华 李洛童 王先华 译

人民邮电出版社

放 大 电 路 原 理

苏联 A. A. 李 兹 金 著

顧世華 李洛童 王先華譯

人 民 郵 電 出 版 社

А. А. РИЗКИН

ОСНОВЫ ТЕОРИИ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

ИЗДАТ. "Советское радио" 1954

內 容 提 要

本书介绍了放大电路的一般分析方法，并对各种放大器的原理加以研究。其中有：选择性放大器，音频电压放大器，功率放大器，宽频带放大器，脉冲放大器，晶体管放大器，磁放大器等。书中专有两章对放大器中的反馈作了较详细的研究。

放 大 电 路 原 理

著者：苏联 А. А. 李兹金

译者：顧世華 李洛童 王先華

出版者：人民邮电出版社

北京东四區 6 條胡同 13 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號)

印刷者：人民邮电出版社南京印刷厂

南京太平路戶部街 15 號

發行者：新 華 書 店

開本 850×1168 1/32

印張 15 $\frac{24}{32}$ 頁數 252

印刷字數 395,000 字

印數 1→2,072 冊

1958年3月南京第一版

1958年3月南京第一次印刷

統一書號：15045·總694-无166

定價：(11)3.70 元(精裝)

前 言

本书是1951年在同一出版社以同一书名出版的那本书的第二版。它基本上保留了第一版的结构，和第一版的差别主要在于：对某些个别问题作了更详细的研究，加入了一些新节，同时加入了叙述无电子管电路的第十一章。

在本版中得到更详细的叙述以及第一次讨论的问题中，有物理上可实现性的问题（第一章，第4节），有绝对稳定和绝对稳定放大器的计算问题（第四章，第6节），有在放大脉冲时，频带和非线性相位特性的影响问题（第七章，第2节和第3节），以及与功率放大器B类状态工作有关的某些能量问题（第十章，第6节）。叙述放大电路特性曲线近似绘制法的附录，也大大地扩充了。

第十一章中简短地叙述了晶体管放大器和磁放大器的理论基础。

作者谨借此机会向技术科学博士 A. A. 柯洛索夫致以谢意，感谢他在这个第二版准备出版时所作的十分宝贵的指示。

作者

緒 言

放大器在目前已經是一个独立的而且內容丰富的技术部門，不論在理論或实用方面，都获得了高度的发展。

这个技术部門和一般无綫电技术一样，它的发展特点是速度快和成就多。在这个发展中，苏联科学家的工作起着决定性的作用，他們不仅創立了制造現代放大設備的基本理論，而且創立了所有最重要的設計和校正放大器的方法。

不管我們去研究那一个理論性質或实用性質的問題，我們首先就会看到苏联科学家的工作和苏联科学家的名字；虽然外国技术书籍在广泛采用由苏联作家的著作中抄来的想法时，力图对材料的来源避而不談，或者是粗暴地捏造事实，上面这一点也是不能抹杀的。

为了使讀者对苏联科学家在放大理論和技术的发展方面所起的巨大作用有一个总的概念，我們在这里只提出下面一些事实。

B. H. 柯瓦連科夫証明，在电信技术上放大极弱交流电流的問題是偉大的俄国科学家 *A. C.* 波波夫首先提出的。波波夫早在1903年就已經向柯瓦連科夫提出了設計这种放大設備的任务。柯瓦連科夫在1903到1909这个时期中所进行的許多工作都具有巨大的原則性的意义，但是这个时期的工作还没有得出在技术上解决問題的办法。

1909年，*B. H.* 柯瓦連科夫利用彼得堡电工学院物理實驗室制造的二极管，发现在一定的加热状态下，当灯絲电流发生不大的变化时，板极电流会发生剧烈的变化，这种情况就成为放大作用的基础。

根据这个原理，*B. H.* 柯瓦連科夫在1909年制造了一个放大器，

在当时說来，这个放大器可以算是技术完善的。

发明利用电子器件以进行放大的現代原理的日期要算是1910年，那时B. H. 柯瓦連科夫利用了电工学院物理實驗室制成的第一个俄国的三极电子管进行放大，稍后甚至又利用了四极管，这不論在电子管技术方面，或者是在放大技术方面，都要比外国先进許多年。B. H. 柯瓦連科夫在1910年所发明的电子法放大原理，即使在今日也仍然是放大的基本原理，是广泛应用的技术。放大技术近40年来的进步和今日的急剧发展，都正是应当归功于这一原理。

1915年，B. H. 柯瓦連科夫在电气工程师代表大会上展出了两个电话放大器的模型，这些放大器在当时光輝地解决了远距离电话通信的任务。

沙皇政府曾經对这些工作发生过兴趣，但是，当它了解到外国并没有类似的东西时，却拒絕給柯瓦連科夫以帮助，甚至不許他在邮电部門的綫路上进行必要的实验。

苏維埃政府对待B. H. 柯瓦連科夫的工作是与此不同的。早在1918年，就建立了电报电话科学研究所，柯瓦連科夫在这里得到了一切必要的东西以开展自己的工作。

1921年，以列宁为主席的劳动国防委员会通过了專門的決議，保証B. H. 柯瓦連科夫得到一切必要的东西以繼續他的工作，并将其付諸实现。

大家知道，列宁对苏联无线电技术著名奠基者之一，M. A. 蓬奇—布魯耶維奇也給予了同样的重視；根据列宁的倡議，1918年建立了以蓬奇—布魯耶維奇为领导的尼热哥罗得无线电實驗室，这个實驗室曾起了特別重要的作用。虽然是在封鎖的条件下，这个實驗室在成立后不久所得到的成就也大大超过了外国无线电技术在当时所获得的成就。

正是在这些年代中，苏联科学家作出了許多发现，这些发现成

为以后建制无线电机器的新原理的基础。例如，在二十年代初期，以列宁命名的尼热哥罗得无线电实验室的工作人员 O. B. 洛谢夫发现，晶体在一定的条件下能够产生和放大振荡，和电子管能够产生和放大振荡的情况相似。这个发现成为建立现代晶体管电路的基础，这种电路在无线电技术中获得了日益宽广的和各式各样的应用。

现代磁放大器所根据的一些原理，俄国科学家 B. П. 沃洛格金和 H. A. 巴巴列克西早在第一次世界大战以前即已广泛加以利用，此后 M. A. 蓬奇—布鲁耶维奇在建设第一批苏联无线电台时也曾加以利用。

某些电介质，例如酒石酸盐中的电介质滞后现象，是 B. П. 沃洛格金在约30年以前发现的。

苏联科学家们不仅找出了许多制作无线电路的新原理，而且将它们付诸实现，并根据这些新原理建立了设计无线电机器的新方法。

我们就仅仅来回忆一下现代电子管电路设计方法的发展历史吧，

当出现和实际采用电子管时，电工学电路理论和设计方法已经十分完整，但是就普通电工学电路的观点看来，电子管是一个新元件，因此普通的电工学方法不能直接用来研究电子管电路。

在二十年代初期，苏联无线电技术奠基者之一 M. A. 蓬奇—布鲁耶维奇证明，电子管在直线状态中，相当于一个简单的交流电压发生器（或电流发生器），并且得出了十分简单的电子管等效电路，这个等效电路成为全部现代无线电技术的基础。

这件事情现在已经成为非常普通的了，因此我们常不能对它的意义给以足够的估价，但是，它曾经在一般无线电技术的发展上，特别是在放大设备的发展上，起过巨大的作用。M. A. 蓬奇—布鲁耶维奇所得出的电子管等效电路，使得前一世纪期间研究出来的分析电工学电路的所有方法，都能够用来分析无线电路。现在有时

会碰到的另一些形式的电子管等效电路，在原則上說沒有任何新的东西，而且都是直接出自 *M. A. 蓬奇—布魯耶維奇* 所得出的等效电路。

A. H. 別尔格 院士在二十年代后半期研究出来的电子管特性曲线綫直綫化的方法，对分析一般无綫电电路，特别是放大电路，也具有同样重要的意义。他利用这一方法建立了十分严整的放大器和振盪器电路理論及其工程計算方法。*A. H. 別尔格* 当时发表了两篇专論，敘述了放大器的理論和計算（1928年）以及振盪器的理論和計算（1932年），这些专論中所說的方法直到現在仍然是設計各种各样不同功用的放大和振盪設備的主要理論基础。

B. H. 西福罗夫 建立了多級諧振放大器的稳定性理論和設計这种放大器的方法，他的工作对選擇性放大理論和技术的发展起着特別重大的作用。

A. A. 柯洛索夫 的工作对一般諧振放大器的理論和技术的发展，特别是超高频放大器的理論和技术的发展，具有十分重要的意义。

A. B. 米哈依洛夫 得出了放大电路稳定性的极为一般的准則。

以苏联科学院通訊院士 *A. Л. 明茨* 为首的一批苏联专家，对音频放大的理論和技术的发展作出了很巨大的貢獻。在这些专家中，应当特別指出斯大林奖金获得者 *С. H. 莫傑尔*、*С. B. 別尔松* 和 *A. M. 皮薩列夫斯基*，他們創立了現代功率放大器和調制器的設計方法。

Г. С. 崔金、*H. Л. 別茲拉德諾夫*、*С. H. 克里捷* 以及許多其他苏联专家的工作，对只有在我国才得到如此巨大发展的有綫广播中所应用的現代高質量放大設備的制造，具有重大的意义。同时也不能不指出苏联作者所写的有关放大設備的書籍所起的十分重要的作用。

除了上述 *A. H. 別尔格* 的巨著以外，*Г. B. 沃依什維洛*、*С. H. 克*

里捷和H. A. 热列茲諾夫所写的教科书，以及Г. C. 崔金的有关放大器用变压器的理論和計算、在放大器中应用反饋等两篇专論，对发展放大设备技术和建立苏联专家学派也具有巨大的意义。

在寬頻带放大器和脈冲放大器理論和技术的发展上，苏联电视方面的专家們有非常卓越的功績。在这方面的的工作中，斯大林奖金获得者Г. B. 布拉烏傑的工作占有特殊的地位。采用反饋（广义的反饋）以校正电路的基本想法应归功于Г. B. 布拉烏傑。除此以外，他創造了寬頻带放大器校正电路的一般設計方法，創制了有十分重要的实用意义的特种防噪声校正电路。

О. B. 魯利叶的工作对脈冲放大器理論的发展具有首要的意义，这些工作第一次給出了根据脈冲放大器瞬变特性以分析放大器的方法。Г. B. 布拉烏傑和О. B. 魯利叶的工作成为現代脈冲放大器和寬頻带放大器理論和設計的基础，本书中广泛地采用了这些原理。

十分卓越的分析 and 設計电视放大器的方法是斯大林奖金获得者B. Л. 克列采尔最近創建的。

在慢变化电流和电压的放大技术的发展方面，С. E. 格利克曼作出了巨大的貢獻。

不能不指出現代放大技术发展中的另一个方向，这里苏联科学家的工作也具有首要的意义。这就是選擇性放大器中的瞬变过程的研究。早在脈冲技术出現以前，当这些問題还未具有很大迫切性的时候，H. H. 克雷洛夫、Л. B. 阿謝也夫和Ю. B. 柯布扎列夫即已对这些問題进行过理論研究，研究結果現在已成为經典性的了。近年来，苏联科学院通訊院士A. H. 舒金的工作和С. И. 叶夫恰諾夫的专論已經将这些結果加以大大的补充和扩展。在本书中，作者采用了一些С. И. 叶夫恰諾夫所創制的方法和他得到的一些結果。

和放大理論紧密相連的，有A. B. 米哈依洛夫、B. B. 索洛多夫尼柯夫、Я. З. 崔普金、A. A. 沃罗宁、A. A. 費里德包穆所进行的許

多十分珍貴和卓越的自动控制方面的工作，有Л. А. 梅耶罗維奇、B. H. 西福罗夫、H. A. 热列茲諾夫、A. П. 西維尔斯以及其他苏联科学家所进行的脈冲技术方面的工作。

显然，上述事实远远不能将苏联专家們在創建和发展現代放大設備的理論和技术上所起的如此巨大的作用完全包括进去。但是，仅就这些很不完全的事实，也足以有充分权利說：苏联在这一方面也占据了应有的地位，不愧为世界上第一个发明无綫电和第一个获得社会主义胜利的国家。

目 錄

前言

緒言

第一章 放大电路的一般分析方法..... (1)

1. 放大器的分类, 基本定义和特性 (1)
2. 放大級的等效电路及其分析 (8)
3. 綫性系統中的瞬变过程的分析方法 (22)
4. 某些一般关系 (51)

第二章 选择性放大器 (71)

1. 諧振放大器 (72)
2. 頻带放大器 (78)
3. 具有失諧回路的諧振放大器 (88)
4. 选择性放大器中的瞬变过程 (94)

第三章 音頻电压放大器 (101)

1. 电阻耦合放大器 (101)
2. 变压器耦合放大器 (108)
3. 电阻变压器耦合和扼流圈耦合放大器 (115)

第四章 反饋放大器 (120)

1. 等效参数 (121)
2. 杂音和失真的补偿 (129)
3. 等效电路 (133)
4. 反饋放大器的图解 (137)
5. 反饋放大器的稳定性 (144)
6. 絕對稳定的反饋放大器的設計 (149)
7. 多級放大器中的寄生反饋 (170)

第五章 几种反馈放大器电路	(174)
1. 阴极输出放大器	(174)
2. 倒相电路	(177)
3. 反馈选择性放大器	(183)
第六章 宽频带放大器	(205)
1. 宽频带放大器的校正	(206)
2. 复杂的校正电路	(213)
3. 行波放大器	(216)
4. 放大器的固有噪声	(224)
第七章 脉冲放大器	(245)
1. 引言	(245)
2. 频带和建起时间的关系	(247)
3. 相位的影响	(257)
4. 低频校正 (脉冲平坦部分的校正)	(262)
5. 高频校正 (脉冲上升边的校正)	(272)
6. 反馈脉冲放大器	(277)
7. 脉冲放大器设计要点	(295)
第八章 几种脉冲放大器电路	(299)
1. 具有阴极输出器的脉冲放大器	(299)
2. 阴极耦合倒相脉冲放大器	(309)
3. 变压器耦合脉冲放大器	(313)
4. 多级脉冲放大器电路	(326)
第九章 直流放大器	(331)
1. 引言	(331)
2. 直流电压放大器	(334)
3. 直流电流放大器	(341)
第十章 音频功率放大器	(349)
1. 引言	(349)

√2. A类状态	(357)
√3. B类状态	(359)
√4. 非线性失真	(375)
5. 功率放大器中的瞬变过程	(381)
6. 考慮到傳輸动态的B类状态的平均功率	(403)
第十一章 无电子管放大器	(409)
1. 引言	(409)
2. 晶体管放大器	(413)
3. 磁放大器	(439)
附錄一 繪制特性曲綫的近似方法	(461)
1. 按照И.К.阿庫里申的方法計算瞬变特性曲綫	(461)
2. 直綫綫段近似法	(464)
3. 按所給頻率特性曲綫繪制相位特性曲綫	(468)
附錄二 对偶电路中的反饋对偶性定理	(474)
附錄三 用反饋校正頻率特性曲綫的圖解計算	(477)
附錄四 运算关系式表	(480)

第一章

放大电路的一般分析方法

1. 放大器的分类, 基本定义和特性

放大设备广泛应用在国民經济和科学技术的各个部門。我們可以列举出几个这样的部門, 例如无綫电技术、專門的物理研究、自动調整、医学、电影等等。

放大设备要完成极其广泛的、多种多样的任务, 这就使得放大电路具有极其不同的型式。因此我們的任务就是首先介紹放大器的分类和它的基本特性, 以及这一部門所采用的相应的專門名詞和定义。

电子管是现代放大器結構的基础^①, 因此具有电子管的放大器通常称为电子管放大器。

我們能够控制电子管中的过程, 而在栅极电路中不消耗功率。这就使得放大器分为两类——电压放大器和功率放大器。在前一种情况下, 我們只研究电压放大問題, 而不管放大器輸出端可得到的功率; 而在第二种情况下, 我們研究放大器所能保証的輸出功率問題, 而不管电压放大問題, 但是与效率問題紧密联系起来。

这样分法常使我們产生这样的想法: 当所放大的电压为交流电压时, 在电压放大器中沒有必要采用电子管, 因为当只需放大交流电压的振幅而不管功率时, 应用升压变压器就可以得到任意的电压比数。因此, 必須馬上說明, 实际并不是这样。在大多数实际情况下, 我們都要碰到这种电压放大問題, 这种电压可以认为是頻带极

註①: 磁放大器和晶体管放大器除外, 在第十一章專門討論这两种放大器

寬的穩定的周期性电压，或者認為是時間極短、上升和下降極陡的电压脈冲。在这两种情況下，应用變压器的可能性都受到極大的限制；这是因为變压器具有漏電感和寄生電容，因此不可能从它得到寬頻帶的均匀放大或对复杂形状的、時間極短的电压脈冲进行无失真的放大。此外，不言而喻的，采用變压器总是要有一些功率損失。因而，我們首先可以把放大器分为电压放大器和功率放大器①。

电压放大器按照它們的用途或电路特性（当然也是按照它們的用途选择的），又可分成許多型式；例如，按照用途可分为音频放大器、視頻放大器等等，按照电路特性可分为电阻耦合放大器、扼流圈耦合放大器、變压器耦合放大器等等。

音频放大器应当均匀地放大音频波段的所有頻率（从20赫到20,000赫），因此，其負荷不应当具有显明的諧振特性，因而負荷应当是非周期性的。这种型式的放大器称为非周期性放大器。

利用專門的校正方法，非周期性放大器的頻帶可以大大扩展（由几赫到几百兆赫）。这类放大器我們今后将称为寬頻帶放大器。

尽管有这样寬的頻帶并能放大極高的頻率，但是按照無線电放大器的本意來說，非周期性的寬頻帶放大器不能算作是無線电放大器，因為它們对于放大一个頻率來說，并不比放大这个頻率附近的其他一些頻率优越些，而这一点正是作为無線电工学基础的頻率选择性的基本原理。

要得到选择性的放大器（它对某一选定頻率的放大極大，而对离开这个頻率的其它諸頻率的放大，則随着离开的程度而急剧下降），就必须采用諧振系統，即采用单个的或耦合的振盪回路来作

註①：功率放大器常常叫做“强力放大器”，这样可以強調在柵極电路中不一定要消耗功率。

为电子管的負荷。这样我們就得出選擇性放大器（諧振放大器和頻帶放大器）。寬帶諧振放大器也有应用，这种放大器在某一載頻附近有比較寬的通頻帶。

如果現在再加上脈冲放大器（它也可以分为兩类——負荷具有諧振特性的无綫电脈冲放大器和具有非周期性負荷的脈冲放大器），以及直流电流和电压放大器，則得到一个相当完整的全貌。

在本书的結構中，《反饋放大器》一章与这个分类法有某些出入，在这一章里，反饋电路是分类的标志。这样的分法是为了能够用最一般的型式来研究应用反饋的原理問題，因而是合理的。

严格地說，放大設備就如同任何其它装有电子管的設備（或是包括变压器的設備）一样，都是非綫性的系統。但是今后我們將把放大器作为綫性系統来研究，这是因为在放大时，非直綫性不起原則上的作用（例如不象調制或檢波时那样），特別是当正确地選擇工作状态并有效地应用反饋方法时，实际上其重要性就极小。当然，在系統的非綫性很重要的情况下（例如研究与功率放大器有关的某些問題时），非綫性的影响将要考虑。

放大器的基本特性是它的頻率特性、相位特性和瞬变特性^①。当放大正弦振盪时，頻率特性和相位特性决定着稳定状态时的复放大系数的模数和相位。瞬变特性决定着放大器在脈冲状态下的工作。

如果我們把放大器看作一个四端網絡，当在它的輸入端加上一复振幅为 $U_1(\omega)$ 的正弦电压时，在輸出端产生出复振幅为 $U_2(\omega)$ 的正弦电压，那末，其放大系数即由下列复数决定

$$K(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}。$$

註①：現在我們通常称頻率特性和相位特性为“振幅頻率特性”和“相位頻率特性”，按实質來說是正确的；因为这兩种特性都是頻率的函数。但是“振幅特性”一詞將另有不同的意义。因此，也是为了把名称縮短些，我們保留了前面的名詞。当給出的特性是复数形式或是用圖解表示在复数平面上的一条曲綫时，我們將称它为“頻率相位特性”。

此时，用曲线表示的放大系数的模数 $K(\omega)$ 与频率 ω 的关系就是放大器的频率特性，而函数 $\varphi(\omega)$ 对 ω 的关系曲线就是它的相位特性。

从频带的无失真放大的观点来看，水平直线 $K(\omega) = K_0 = \text{常数}$ 是理想的频率特性。

理想的相位特性也是一条直线，但是它有按下式表示的某一倾角

$$\varphi = -\omega\tau,$$

式中 τ 为与频率无关的某一常数。

这种判断的正确性可用以下的方法来证明。

在理想的系统的频率和相位特性时，将输入端的周期信号分解为级数而得到的任一频率分量具有频率 ω_k 和振幅 A_k

$$a_k = A_k \sin(\omega_k t + \psi_k),$$

它在输出端提供出的式为

$$b_k = K_0 A_k \sin(\omega_k t + \psi_k - \omega_k \tau) = K_0 A_k \sin[\omega_k(t - \tau) + \psi_k],$$

也就是放大到 K_0 倍，并在时间轴上向滞后的方向移动了时间 τ 。

由这样的一些谐波总和所组成的输出电压的总曲线，对输入电压的曲线来说，经受的变化和每一个谐波所经受到的变化相同；因此输出电压的曲线仍旧和输入电压的曲线相似，也就是曲线的形状将不发生失真。

上面已经指出，放大器在放大脉冲方面的特性是决定于它的瞬变特性。瞬变特性是当在输入端作用一个单位函数^①形状的电压时，以图形表示的输出端的电压 $h(t)$ 对时间 t 的变化关系。只有当电路的瞬变函数的形状和单位函数相同时，才能得到脉冲的无失真的放大。

由于在放大器的频率相位特性和它的瞬变特性之间有着最紧密的联系，因此我们可以根据放大器的瞬变特性来判断它的频率特性，

註①：单位函数的定义以后再說。