

低頻放大器

苏联 C. H. 克里捷 著

程 广 建 等 译

人民邮电出版社

低 頻 放 大 器

蘇聯 C. H. 克里捷著

程 廣 建 等 譯

鄭 法 成 校

人 民 郵 電 出 版 社

С. Н. КРИЗЕ
УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ
СВЯЗЫЗДАТ 1948

內 容 提 要

本書系統地講述了各種低頻放大器的原理和實際計算方法，可以用作中等電信學校及大學電信、無線電系學生的課外參考讀物，也可以作為電信工程技術人員在進行系統學習或實際工作中的參考書。

參加本書翻譯和校訂工作的有程廣建、施良駿、梁守義、孫寶庫、吳寶初、毛耀光和鄭法成等同志。

低 頻 放 大 器

著 者:	蘇聯 С. Н. 克 里 捷
譯 者:	程 廣 建 等
校 者:	鄭 法 成
出版者:	人 民 郵 電 出 版 社 北京東四區 6 條胡同 13 號
印刷者:	人 民 郵 電 出 版 社 南 京 印 刷 廠 南京太平路戶部街 15 號
發行者:	新 華 書 店

書號：無112 1956年9月南京第一版第一次印刷 1—5,800 冊
787×1092 1/27 189頁 印張14 字數 269,000 字 定價 1.50 元

★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

統一書號：15045

序 言

在無線電發射機、無線電接收機、無線電轉播站裏，在有綫通信以及在相接近的技術部門間的無數設備裏，應用最廣的無線電工程設備之一就是低頻放大器。

近來，低頻放大器的技術獲得了很大的發展。強功率放大設備在有綫廣播中的廣泛應用，在這一方面起了很大作用。蘇聯的有綫廣播在世界上是佔第一位的。就是由於這個原因，蘇聯無線電專家們在放大器理論問題及其實際應用方面一直是非常注意的。

在蘇聯，放大器理論已經有了非常全面的發展，同時特別深入地研究了學校裏「低頻放大器」課程的教學問題，並為此寫了許多專門論文。

從A. H. 別爾格院士在本世紀20年代初期的著作開始（別爾格是最早研究放大器基本電路一批人中的一個），到近幾年來我們許多專家所發表的著作為止（其中包括H. J. 別茲蘭得諾夫、I. B. 沃什維洛、A. A. 李茲金、I. C. 崔金等的著作），——這就是蘇聯科學家們在放大設備理論發展方面所作的貢獻。

二十年前，蘇聯無線電工廠就組織了第一次強功率低頻放大器的生產。現在，我們的無線電工業正為無線電化事業生產着非常完美的放大設備，其功率在幾千瓦左右，能供幾萬個收聽點的需要。這種放大設備都具有現代的技術水平，從功率上來說，國外生產的這類放大設備是比不上它的。

維護複雜的放大設備需要熟練的人員，這門課程的任務就是要

培養這樣的人員。

在通信專科學校裏，低頻放大器課程是學完電工原理、電子管及其他一些無線電技術問題以後的第一門專門技術課程，這門課程又是以後學習無線電接收設備、無線電發射設備、無線電廣播以及其他專門課程的基礎。在放大器課程中，第一次研究了電子管在具體電路裏的工作情況。

這種情形說明學習放大器課程在培養技術員及其他通信專業人員方面所起的巨大作用。

作者對技術科學博士H. H. 齊斯恰柯夫、M. H. 波諾馬列夫副教授和B. H. 列別傑夫工程師在這本書準備出版過程中所提出的許多建議表示感謝。

作者希望大家把所有對本書的意見都寄到蘇聯郵電出版社（莫斯科市中心區基洛夫街40號）*。

C. 克里捷

* 對本書中文版內容或譯文有意見時請寄北京人民郵電出版社。

目 錄

序 言

第 一 編 放 大 器 概 論

緒 論

- § 1. 放大器的用途、分類和運用..... (1)
- § 2. 表示放大器工作特性的指標..... (5)
- § 3. 放大器的失真..... (15)
- § 4. 放大器電路的元件..... (30)
- § 5. 放大級之間的耦合電路..... (38)

第 一 章 電子管的特性曲綫及工作狀態

- § 1. 電子管的靜態特性曲綫..... (41)
- § 2. 在各種負載下的動態特性曲綫..... (46)
- § 3. 複數陽極負載下的動態特性曲綫..... (49)
- § 4. 電子管的工作狀態..... (53)

第 二 章 放大器電路的研究方法

- § 1. 具有負載的電子管的等效電路..... (58)
- § 2. 等效發生器定理..... (62)

第 三 章 電子管的輸入阻抗

- § 1. 輸入導納的一般表示式..... (64)
- § 2. 電子管的輸入電容..... (67)

第 二 編

功 率 放 大 器

第 一 章 功率放大器的質量指標

- § 1. 功率放大器的工作情況..... (69)
- § 2. 末級放大器中的頻率失真..... (71)
- § 3. 輸出變壓器參數之計算..... (76)
- § 4. 空載時輸出電壓的增大..... (87)
- § 5. 根據電子管動態特性曲綫確定非直綫性失真..... (89)

第 二 章 A類狀態左三極管功率放大器

- § 1. A類狀態的一般研究..... (97)
- § 2. A類狀態左三極管功率放大級的計算..... (107)

第 三 章 A類狀態五極管功率放大器

- § 1. 五極管的構造及其工作情況..... (117)
- § 2. 五極管功率放大級的特性..... (120)
- § 3. A類狀態五極管功率放大級的計算..... (121)
- § 4. 用以穩定五極管負載阻抗的回路..... (128)
- § 5. A類狀態五極管功率放大級的計算程序..... (131)

第 四 章 推挽電路

- § 1. 推挽電路的工作原理及特性..... (138)
- § 2. A類狀態推挽功率放大器計算的特點..... (146)
- § 3. 倒相電路..... (151)

第 五 章 B類狀態及AB類狀態

- § 1. B類狀態及AB類狀態電子管的工作原理..... (157)
- § 2. B₂類狀態功率放大級的計算..... (178)
- § 3. AB類狀態功率放大級的計算..... (193)
- § 4. 功率放大器在複數負載時的工作特點..... (204)

第六章 功率放大器在有柵流的情況下工作時的柵極電路

- § 1. 柵極電流對非直綫性失真的影響…………… (209)
- § 2. 放大器末級前置級的計算…………… (215)
- § 3. 放大器末級前置級與末級間的無變壓器耦合電路…………… (221)

第七章 回授在放大器中的應用

- § 1. 回授放大器的特性…………… (223)
- § 2. 回授對放大器頻率特性和相位特性的影響…………… (232)
- § 3. 回授放大器的自激…………… (238)
- § 4. 放大器中的回授電路…………… (242)

第三編

電壓放大器

第一章 電阻耦合放大器

- § 1. 電阻耦合放大級的等效電路的分析…………… (252)
- § 2. 相位特性曲綫及準諧振頻率…………… (263)
- § 3. 三極管電阻耦合放大級的計算…………… (265)
- § 4. 五極管電阻耦合放大級的計算特點…………… (268)
- § 5. 脈衝放大器…………… (272)

第二章 變壓器耦合放大器

- § 1. 變壓器耦合放大級的特性…………… (280)
- § 2. 變壓器耦合放大級的等效電路之分析…………… (283)
- § 3. 變壓器耦合放大級的計算…………… (287)

第三章 電阻—變壓器耦合放大器

- § 1. 等效電路的分析…………… (300)
- § 2. 電阻—變壓器耦合放大器的計算…………… (305)

第四章 扼流圈耦合放大器

- § 1. 等效電路的分析…………… (308)

§ 2. 扼流圈耦合放大器的計算.....	(314)
-----------------------	---------

第 五 章 放大器中的失真補償

§ 1. 頻率失真補償的原理.....	(316)
§ 2. 在陽極電路中用電感的補償放大級.....	(323)
§ 3. 用 RC 濾波器在高頻率區域進行補償.....	(324)
§ 4. 諧振補償.....	(326)
§ 5. 用陽極濾波器在低頻率區域進行補償.....	(328)
§ 6. 補償在電視放大器中的應用及其計算特點.....	(331)
§ 7. 利用回授補償頻率失真.....	(337)

第 六 章 放大器中的寄生回授

§ 1. 概論.....	(341)
§ 2. 陽極電源的內阻抗.....	(343)
§ 3. 由公共陽極整流器供電的兩級放大器的工作.....	(344)
§ 4. 在三級放大器中經過陽極電源的寄生耦合.....	(345)
§ 5. 通過自偏壓電路的耦合及柵極濾波器的計算.....	(350)

第 七 章 增益調整

§ 1. 增益調整器的作用.....	(353)
§ 2. 增益調整電路.....	(354)

附 錄 低頻變壓器的結構計算

§ 1. 概論.....	(359)
§ 2. 無磁化的變壓器的計算.....	(364)
§ 3. 有磁化的變壓器的計算.....	(367)

第一編

放大器概論

緒論

§ 1. 放大器的用途、分類和運用

在現代工程中，經常需要放大某些電振盪或信號的功率。用來完成這項任務的設備稱為放大設備或放大器。

根據用途和工作情況的不同，放大器可以劃分為好幾種。

放大器的特性首先是由它能滿意地放大電振盪的頻率範圍（波段）來表示，這工作波段是由最低頻率 f_n 到最高頻率 f_v 。

根據工作波段的不同，放大器可以分成兩類，即低頻放大器和高頻放大器。這兩類放大器不論在電路或特性方面都有很大區別。

高頻放大器，顧名思義是用來放大高頻電振盪的。這種放大器工作波段的相對寬度並不大，最高工作頻率對最低工作頻率的比近於1，通常為

$$\frac{f_v}{f_n} \geq 1.01 - 1.1。$$

高頻放大器在無線電接收機裏用來放大檢波器以前的信號；它也用在無線電發射設備裏。

在這門課程裏只研究低頻放大器，以後為了簡便起見，簡稱它為放大器。這種放大器的特點是：

(1) 最低工作頻率 f_n 很低（通常在幾十赫）；

(2) 最高工作頻率對最低工作頻率的比很大 ($\frac{f_H}{f_L} = 50-100$ 或更大)。

在這門課程裏，對電視、雷達以及其他某些方面所應用的放大器也作了一些研究，這類放大器有一些獨特地方。由於工作條件特殊，它與聲頻放大器不同的地方是波段非常寬——從幾十赫到幾百萬赫。因此，就低頻放大器的普通意義來說，它們不能算是低頻放大器。電視放大器通常叫作寬頻帶放大器，因為它是用來同時放大聲頻、高頻（超聲頻）和射頻的。

低頻放大器在各種科學技術部門中都獲得了非常廣泛的應用。在很多情況下，當需要放大某一電振盪的振幅時，都要用到放大器。

如果不是電子管以及電子管放大器得到了這樣廣闊的發展，現代形式的遠距離電氣通信工程是根本不能想像的。

沒有放大低頻電振盪的設備，就幾乎不可能有一架無線電發射機。從送話器上得到的聲頻電壓，在送到發射機的調制器以前，必須經過很多倍的放大。

絕大多數無線電接收機也都裝有低頻放大器。這是必需的，因為接收機的檢波器通常不可能在有效負載上建立足夠大的交流電壓。

放大設備在有線廣播（無線電化）系統中得到了極廣泛的應用，它是無線電轉播站設備的主要部分。利用大功率放大器可以將無線電廣播節目用導線轉送給幾萬個用戶。

沒有放大器，電視和傳真也是不可能的事，並且正像上面所講的，在電視和傳真中對放大器有着特殊的要求。

除無線電通信和無線電廣播外，低頻放大器在有線通信中也獲

得了廣泛的應用。當沿導綫傳送電信號時，信號的振幅由發送點起沿着綫的長度逐漸減弱，因此在長距離的電話幹綫上每隔一定距離必需裝上一個放大器。

除以上所舉的例子外，低頻放大器還廣泛應用在錄音、有聲電影、雷達、遙控機械和航海中，應用在地質學、醫學、軍事技術、以及其他許多科學部門和工程部門中。

在上面所列舉的每一個應用放大器的場合裏，由於各種特殊的工作條件，就必須對放大器提出各種不同的要求。首先，放大器的用途規定了它的工作波段。放大器的其他指標也隨着它的用途而改變，這些指標的概念以後將會講到。

在實際業務中，特別是在電信工程中最常遇到的一種最普遍的低頻放大器是用來傳送聲頻波段的放大器。這種放大器的工作波段通常是從 $f_n = 50—100$ 赫到 $f_s = 5—10$ 千赫。在無線電廣播機、無線電通信機中，在傳送語言或音樂時需要放大聲頻電振盪的所有其他情況下，都使用這種聲頻放大器。由於這種放大器用得非常普遍，所以在這門課程裏給予最大的注意。

放大器是一個具有兩根輸入接綫和兩根輸出接綫的裝置，從輸入接綫引入應該放大的電振盪，而由輸出接綫取出已放大的電振盪（圖 I—1）。因此，放大器可看成是一個四端網路，在此網路的輸入接綫上接着電振盪的電源，在輸出接綫上接着有效負載。

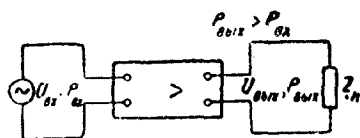


圖 I—1 放大器相當於一個有源四端網路

放大器屬於有源四端網路一類，因為在上述情況下，在輸出端上得到的振盪功率 (P_{BY}) 比加到輸入端上的振盪功率 (P_{BX}) 大。

與有源四端網路相對應，還有一種用得更廣的無源四端網路，對於這一種網路來說永遠是 $P_{out} < P_{in}$ 。變壓器、濾波器、傳輸綫等都是無源四端網路的例子。

放大電振盪時所利用的是電子管的放大特性。

放大器輸入端的電振盪通常都很弱，因之有時用一個電子管得到的放大是不夠的。這時就需要將第一個電子管放大的電振盪加在第二個電子管的柵極上，依此類推，一直到電振盪的振幅達到所需要的大小為止。在這種情形下，放大器是由若干個放大級組成的。

放大級是由電子管、電子管陽極電路裏的負載阻抗以及該電子管與下級電子管或外加負載之間的耦合電路元件組合而成的。

爲了使末級電子管能給出所需的有效電功率，在它的柵極上就必須引入一個一定值的交流電壓 U_g 。輸入電壓的電源（例如送話器）所能給出的電壓 U_{in} ，通常比末級電子管柵極所需要引入的電壓要小得多。爲了把電壓 U_{in} 放大到所需要的 U_g 值，就要利用前置放大器或電壓放大器。這種放大器可由一個或幾個放大級組成。

只有在很少的情況下，放大器輸入電壓的電源能給出足以使功率放大器正常工作的電壓（ $U_{in} \geq U_g$ ），這時前置放大器當然就不需要了。

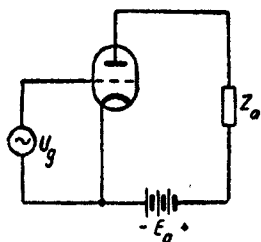


圖 I-2 最简单的放大器電路圖

前置放大器除了放大電壓以外，當然也會提高引入電振盪的功率。但對這種放大器來說，它所增大的功率不能列爲指標數值，因爲下級電子管柵極電路所需要的功率通常是微不足道的。

這樣，放大器就分爲電壓放大器和功率放大器。

圖 I—2 所示為最簡單的放大器綫路圖。此一電路能把加於柵極的電振盪加以放大的原理，大家在研究電子管理論時就已經知道了。這一原理的根據是：爲了使陽極電流發生同樣大小的變化，所需柵壓的變化，只是所需陽極電壓變化的 $\frac{1}{\mu}$ 。換句話說，柵極電壓對陽極電流的影響，比陽極電壓的影響要大，而爲其 μ 倍。 μ 稱爲電子管的放大係數。

陽極電流的變化在負載阻抗 Z_a 上造成交流電壓降。當 Z_a 足夠大的時候，這個電壓就會比加在柵極上的電壓大。在必要的時候，這個電壓可以加到下一級電子管的柵極上繼續放大。因此，放大器中所有電子管的陽極電路裏都要有一個負載阻抗，以便在其上形成有效交流電壓。電壓放大器的電子管可以用電阻或電感來作陽極負載。

按照與下一級耦合形式的不同，可以分成下列四種主要放大器電路：

1. 電阻耦合放大器（用電阻耦合）；
2. 變壓器耦合放大器；
3. 扼流圈耦合放大器；
4. 電阻—變壓器耦合放大器（或並饋式變壓器耦合放大器）。

功率放大器的外加負載大都是經過變壓器接到輸出級。因此功率放大器通常都是變壓器耦合放大器。

§ 2. 表示放大器工作特性的指標

低頻放大器的特性是用一系列的使用指標和質量指標來表示的。

放大器的使用指標有：

1. 放大係數；
2. 負載阻抗上的電壓和功率；
3. 效率；
4. 輸入端的電壓。

放大器的質量指標有：

1. 頻帶；
2. 振幅動態範圍；
3. 負載變動時輸出電壓振幅的恆定性；
4. 放大器所引起的失真。

下面來分別研究上述各種放大器工作指標，其中關於放大器所引起的失真問題，由於它在放大器理論中特別重要，所以單獨分成一節來討論。

放大係數 表示放大器輸出端電壓是輸入端電壓若干倍的數值稱為放大係數。放大係數等於該兩電壓的比。

$$K = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \quad (\text{I-1})$$

隨着用途的不同，各種放大器的放大係數的變化範圍很大，可從幾到幾十萬或幾十萬以上。

在實際應用中最常見的放大器，其放大係數大約是幾百或幾千。

放大係數是表示電壓放大器特性的主要數值。但對功率放大器來說，放大係數不是具有代表性的數值，因為在這種情況下，在放大器輸出端需要的不是電壓而是有效功率，有效功率不只是決定於輸出端的電壓，而且還決定於外加負載阻抗。

多級放大器的總放大係數等於所有各級放大係數的乘積

$$K_{od} = K_1 K_2 \cdots K_n \quad (I-2)$$

我們來證明這個情況。用 U_1 表示第一放大級輸入端的電壓，用

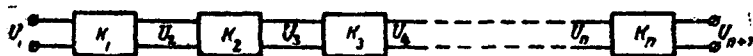


圖 I-3 多級放大器方框圖

U_2 表示第二放大級輸入端的電壓，它也是第一放大級輸出端上的電壓（圖 I-3），餘此類推。於是

$$K_{od} = \frac{U_{n+1}}{U_1}; \quad K_1 = \frac{U_2}{U_1}; \quad K_2 = \frac{U_3}{U_2}; \quad \cdots \cdots K_n = \frac{U_{n+1}}{U_n}。$$

將 $K_1, K_2, \cdots, K_n$ 值連乘

$$K_1 K_2 \cdots K_n = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_3}{U_2} \cdots \frac{U_{n+1}}{U_n} = \frac{U_{n+1}}{U_1}。$$

但 $\frac{U_{n+1}}{U_1} = K_{od}$ 。因此式 (I-2) 得到了證明

$$K_{od} = K_1 K_2 \cdots K_n。$$

每級的放大係數都不是固定不變的，它總是或多或少地隨着頻率和其他一些因素而變動。

維別爾和拉扎列夫的研究指出：人耳對音量變化的感覺是和聲能變化的對數成正比。

因而通常是用對數單位（分貝或奈培）來測量放大量。

如放大量用分貝 (S) 來表示，則它等於輸出電壓對輸入電壓比值的常用對數與 20 之乘積

$$S = 20 \lg \frac{U_{nblx}}{U_{nx}} = 20 \lg K \quad (I-3)$$

假如 $S = 100$ ，則

$$\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = K = 10^{\frac{S}{20}} = 10^{0.05} = 1.12。$$

根據這點可給分貝下這樣一個定義：假如放大器輸出端電壓是輸入端電壓的1.12倍（增加12%），則放大量等於1分貝。

圖 I-4 繪出了放大係數 K 和分貝互相換算的曲綫圖。

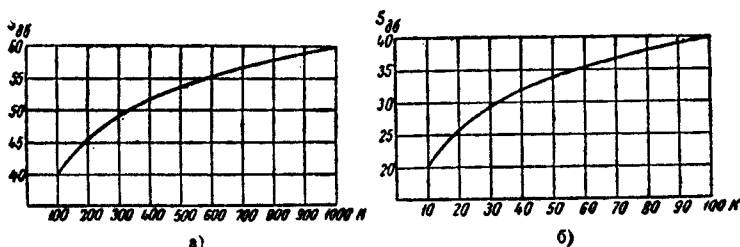


圖 I-4 放大係數變換成分貝的曲綫圖

在有綫通信技術上，普遍使用着另外一種對數單位——奈培。放大量用奈培(N)來表示時是等於輸出端電壓對輸入端電壓比值的自然對數

$$N = \ln \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \ln K。 \quad (\text{I-4})$$

假如將自然對數變換成常用對數，則 N 可用下式表示：

$$N = 2.3 \lg K。 \quad (\text{I-5})$$

比較 (I-3) 和 (I-5) 兩式，可以看出奈培這個單位要比分貝的單位大——1奈培等於8.7分貝

假如各放大級的放大量用對數單位來表示，則放大器的總放大量等於各級放大量的總和