

低頻电压放大器

C. H. 克里捷著
徐秉鐸 車見道 黃嵩如譯
馮秉銓 林为干校

高等教育出版社

本書系根据苏联國立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的克里捷 (С. Н. Кризе) 著“低頻电压放大器” (Усилители напряжения низкой частоты) 1953 年版譯出。

本書闡述低頻电压放大級的設計,並介紹脈冲放大器(包括有反饋时的情形)理論和設計的知識。本書可供高等工業学校中接触到放大器計算的各專業的學生参考,同时也可供在工作中接触到放大器計算的工程师参考。

本書由徐秉鐸、車見道、黃嵩如三同志合譯,由馮秉銓、林为干兩同志校訂。

低 頻 电 压 放 大 器

С. Н. 克里捷著

徐秉鐸 車見道 黃嵩如譯

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證出字第〇五四號)

上海市印刷四廠印刷 新华書店總經理

書號 15010·223 開本 850×1168 1/32 印張 117/16 字數 297,000

一九五六年十二月上海第一版

一九五六年十二月上海第一次印刷

印數 1—6,000

定價(9) 1.40

序

在一切無線电技術以及与其有关的設備中，放大器起着重要的作用。这就說明了为什么在我們的文献中，对于放大器的理論和設計給以很大的注意。

苏联專家們在制訂各种不同类型放大器設備的最重要的理論問題以及設計方法上起着主導作用，这是大家所公認的。在这个領域中从 A. И. 貝尔格院士約在二十五年前發表的第一批論文起一直到現在許多苏联学者的工作都是最先進的。Г. Б. 布拉烏杰、Г. Б. 沃依什維洛，С. И. 耶夫將諾夫、А. А. 里茲金、Г. С. 茨金以及許多其他的苏联專家在放大器技術領域中的工作，决定了放大器技術在近年來的發展。

我國工業在放大器設備制造方面所獲得的成就，如果沒有苏联学者在这方面所建立的理論的和計算的基礎是不可能得到的。

苏联共產党具有歷史意义的第十九次代表大会在其旨在使今后國民經濟各部門再度提高的決議中，对于電訊、無線电廣播、电视的發展以及对于工業生產过程中自动控制方法的运用問題都特別給予了重大的注意。由于这个緣故，在工業以及在所有國民經濟部門中电子学和無線电工程方法(其中包括放大器技術)的利用具有巨大的意义。

本書致力于放大器設備的計算。書中僅研究电压放大器的計算。一切关于功率放大器計算的問題不在本書討論之列，而应当是單獨研究的題目。

書中主要闡明具体的放大器綫路的計算。关于放大器設備一般理論問題的系統研究未引为著者的任务。只有脉冲放大器中瞬变过程的

分析才作为例外，这是因为这个问题比較新穎，其需要的迫切性較大，以及这个領域中缺乏系統的文献的緣故。

著者力圖把所有的数学結論導向具体的計算公式而且尽可能以計算实例來說明材料內容。

放大器計算的許多重要部分以及放大器許多特殊应用的領域，在本書中均不加以研究，因此本書并不以詳盡無遺的完備性自居。書中只闡述工作于穩定狀態的声頻放大器計算的基本知識，以及脉冲放大器計算(計及其中所發生的瞬变过程)的基本知識。

本書供廣大工程界，以及在學習活动中接触到放大器設備計算的各种專業的学生之用。

本書于1951年完稿，因此，在最近期間獲得進一步發展的某些問題，在本書內容中自然沒有反映出來。

C. H. 克里捷

目 錄

序.....	5
第一章 放大器概論.....	7
1-1. 放大器的分类.....	7
1-2. 表征放大器工作特性的指标.....	11
1-3. 放大器的固有噪声.....	19
1-4. 放大器的穩定性及输出电压振幅的穩定性.....	25
1-5. 放大器畸变的种类.....	26
1-6. 非直綫性畸变.....	28
1-7. 非直綫性畸变的图解計算法.....	35
1-8. 頻率畸变.....	44
1-9. 相位畸变.....	51
1-10. 电子管工作情况的分类.....	54
1-11. 放大級在限制情况下的工作.....	58
第二章 电阻級.....	63
2-1. 电阻級电路及其性質.....	63
2-2. 电路元件的作用及对元件的要求.....	64
2-3. 电阻級的頻率及相位特性方程式.....	67
2-4. 电阻級的优良度.....	75
2-5. 电阻級的計算.....	78
2-6. 放大器的电阻輸入电路.....	87
2-7. 电阻輸入电路的固有噪声.....	90
2-8. 多級电阻放大器.....	94
2-9. 电阻放大器的計算举例.....	100
2-10. 电阻放大器指标的穩定性.....	105
第三章 变压器級.....	117
3-1. 变压器級的性質.....	117
3-2. 諧振变压器参数的計算.....	119
3-3. 頻率特性曲綫的形狀对于放大系数的影响.....	127
3-4. 电压放大器变压器級計算举例.....	131
3-5. 非周期性变压器参数的計算.....	134
3-6. 五極管在变压器耦合电压放大器中的应用.....	140

✓ 3-7. 窄頻帶的變壓器放大級.....	144
第四章 小功率低頻變壓器的構造計算基礎.....	149
4-1. 低頻變壓器的結構.....	149
4-2. 無直流磁化的變壓器的計算.....	154
4-3. 無直流磁化的變壓器計算舉例.....	159
4-4. 有直流磁化的變壓器的計算.....	162
第五章 放大器的反饋.....	170
5-1. 反饋放大器的性質.....	170
5-2. 反饋電路的分類.....	171
5-3. 反饋對放大器輸入阻抗的影響.....	173
5-4. 反饋對放大器輸出阻抗及輸出電壓恆定性的影響.....	176
5-5. 反饋對放大系數的影響.....	180
5-6. 反饋對放大器內部產生的畸變及干擾的影響.....	184
5-7. 反饋對放大器頻率及相位特性曲線的影響.....	186
5-8. 反饋放大器的自激.....	191
第六章 電壓放大器中負反饋的應用.....	199
6-1. 反饋放大器頻率相位特性曲線的方程式.....	199
6-2. 電阻性反饋兩級放大器.....	202
6-3. 負反饋兩級電壓放大器的計算舉例.....	211
6-4. 單級非周期性复合反饋放大器.....	213
6-5. 選擇性的反饋放大器.....	219
第七章 脈沖放大器.....	223
7-1. 脈沖訊号的特性.....	223
7-2. 脈沖放大器的工作特点及脈沖級中電子管的工作情况.....	226
7-3. 分析脈沖放大器中瞬變過程的方法.....	231
7-4. 應用運算法計算瞬變過程.....	237
7-5. 電阻級的脈沖放大器.....	261
7-6. 變壓器耦合脈沖放大器.....	26
7-7. 抗流圈耦合脈沖放大器.....	31
7-8. 板極電路中具有改正電感的寬頻帶級.....	32
第八章 反饋脈沖放大器的瞬變過程.....	331
8-1. 純阻反饋單級放大器的瞬變過程.....	332
8-2. 純阻反饋兩級放大器的瞬變過程.....	341
8-3. 復反饋放大器中的瞬變過程.....	350
8-4. 多級脈沖放大器的計算基礎.....	361
參考書刊.....	366
俄文下角符号說明表.....	364

低頻电压放大器

C. H. 克里捷著
徐秉鐸 車見道 黃嵩如譯
馮秉銓 林为干校

高等教育出版社

本書系根据苏联國立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的克里捷 (С. Н. Кризе) 著“低頻电压放大器” (Усилители напряжения низкой частоты) 1953 年版譯出。

本書闡述低頻电压放大級的設計,並介紹脈冲放大器(包括有反饋时的情形)理論和設計的知識。本書可供高等工業学校中接触到放大器計算的各專業的學生参考,同时也可供在工作中接触到放大器計算的工程师参考。

本書由徐秉鐸、車見道、黃嵩如三同志合譯,由馮秉銓、林为干兩同志校訂。

低 頻 电 压 放 大 器

С. Н. 克里捷著

徐秉鐸 車見道 黃嵩如譯

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證出字第〇五四號)

上海市印刷四廠印刷 新华書店總經售

書號 15010·223 開本 850×1168 1/32 印張 117/16 字數 297,000

一九五六年十二月上海第一版

一九五六年十二月上海第一次印刷

印數 1—6,000

定價(9) 1.40

目 錄

序.....	5
第一章 放大器概論.....	7
1-1. 放大器的分类.....	7
1-2. 表征放大器工作特性的指标.....	11
1-3. 放大器的固有噪声.....	19
1-4. 放大器的穩定性及输出电压振幅的穩定性.....	25
1-5. 放大器畸变的种类.....	26
1-6. 非直綫性畸变.....	28
1-7. 非直綫性畸变的图解計算法.....	35
1-8. 頻率畸变.....	44
1-9. 相位畸变.....	51
1-10. 电子管工作情况分类.....	54
1-11. 放大級在限制情况下的工作.....	58
第二章 电阻級.....	63
2-1. 电阻級电路及其性質.....	63
2-2. 电路元件的作用及对元件的要求.....	64
2-3. 电阻級的頻率及相位特性方程式.....	67
2-4. 电阻級的优良度.....	75
2-5. 电阻級的計算.....	78
2-6. 放大器的电阻輸入电路.....	87
2-7. 电阻輸入电路的固有噪声.....	90
2-8. 多級电阻放大器.....	94
2-9. 电阻放大器的計算举例.....	100
2-10. 电阻放大器指标的穩定性.....	105
第三章 变压器級.....	117
3-1. 变压器級的性質.....	117
3-2. 諧振变压器参数的計算.....	119
3-3. 頻率特性曲綫的形狀对于放大系数的影响.....	127
3-4. 电压放大器变压器級計算举例.....	131
3-5. 非周期性变压器参数的計算.....	134
3-6. 五極管在变压器耦合电压放大器中的应用.....	140

✓ 3-7. 窄頻帶的變壓器放大級.....	144
第四章 小功率低頻變壓器的構造計算基礎.....	149
4-1. 低頻變壓器的結構.....	149
4-2. 無直流磁化的變壓器的計算.....	154
4-3. 無直流磁化的變壓器計算舉例.....	159
4-4. 有直流磁化的變壓器的計算.....	162
第五章 放大器的反饋.....	170
5-1. 反饋放大器的性質.....	170
5-2. 反饋電路的分類.....	171
5-3. 反饋對放大器輸入阻抗的影響.....	173
5-4. 反饋對放大器輸出阻抗及輸出電壓恆定性的影響.....	176
5-5. 反饋對放大系數的影響.....	180
5-6. 反饋對放大器內部產生的畸變及干擾的影響.....	184
5-7. 反饋對放大器頻率及相位特性曲線的影響.....	186
5-8. 反饋放大器的自激.....	191
第六章 電壓放大器中負反饋的應用.....	199
6-1. 反饋放大器頻率相位特性曲線的方程式.....	199
6-2. 電阻性反饋兩級放大器.....	202
6-3. 負反饋兩級電壓放大器的計算舉例.....	211
6-4. 單級非周期性复合反饋放大器.....	213
6-5. 選擇性的反饋放大器.....	219
第七章 脈沖放大器.....	223
7-1. 脈沖訊号的特性.....	223
7-2. 脈沖放大器的工作特点及脈沖級中電子管的工作情况.....	226
7-3. 分析脈沖放大器中瞬變過程的方法.....	231
7-4. 應用運算法計算瞬變過程.....	237
7-5. 電阻級的脈沖放大器.....	261
7-6. 變壓器耦合脈沖放大器.....	26
7-7. 抗流圈耦合脈沖放大器.....	31
7-8. 板極電路中具有改正電感的寬頻帶級.....	32
第八章 反饋脈沖放大器的瞬變過程.....	331
8-1. 純阻反饋單級放大器的瞬變過程.....	332
8-2. 純阻反饋兩級放大器的瞬變過程.....	341
8-3. 復反饋放大器中的瞬變過程.....	350
8-4. 多級脈沖放大器的計算基礎.....	361
參考書刊.....	366
俄文下角符号說明表.....	364

序

在一切無線电技術以及与其有关的設備中，放大器起着重要的作用。这就說明了为什么在我們的文献中，对于放大器的理論和設計給以很大的注意。

苏联專家們在制訂各种不同类型放大器設備的最重要的理論問題以及設計方法上起着主導作用，这是大家所公認的。在这个領域中从 A. И. 貝尔格院士約在二十五年前發表的第一批論文起一直到現在許多苏联学者的工作都是最先進的。Г. Б. 布拉烏杰、Г. Б. 沃依什維洛，С. И. 耶夫將諾夫、А. А. 里茲金、Г. С. 茨金以及許多其他的苏联專家在放大器技術領域中的工作，决定了放大器技術在近年來的發展。

我國工業在放大器設備制造方面所獲得的成就，如果沒有苏联学者在这方面所建立的理論的和計算的基礎是不可能得到的。

苏联共產党具有歷史意义的第十九次代表大会在其旨在使今后國民經濟各部門再度提高的決議中，对于電訊、無線电廣播、电视的發展以及对于工業生產过程中自动控制方法的运用問題都特別給予了重大的注意。由于这个緣故，在工業以及在所有國民經濟部門中电子学和無線电工程方法(其中包括放大器技術)的利用具有巨大的意义。

本書致力于放大器設備的計算。書中僅研究电压放大器的計算。一切关于功率放大器計算的問題不在本書討論之列，而应当是單獨研究的題目。

書中主要闡明具体的放大器綫路的計算。关于放大器設備一般理論問題的系統研究未引为著者的任务。只有脉冲放大器中瞬变过程的

分析才作为例外，这是因为这个问题比較新穎，其需要的迫切性較大，以及这个領域中缺乏系統的文献的緣故。

著者力圖把所有的数学結論導向具体的計算公式而且尽可能以計算实例來說明材料內容。

放大器計算的許多重要部分以及放大器許多特殊应用的領域，在本書中均不加以研究，因此本書并不以詳盡無遺的完備性自居。書中只闡述工作于穩定狀態的声頻放大器計算的基本知識，以及脉冲放大器計算(計及其中所發生的瞬变过程)的基本知識。

本書供廣大工程界，以及在學習活动中接触到放大器設備計算的各种專業的学生之用。

本書于1951年完稿，因此，在最近期間獲得進一步發展的某些問題，在本書內容中自然沒有反映出來。

C. H. 克里捷

第一章 放大器概論

1-1. 放大器的分类

在需要放大电振盪功率的各种各样場合下，放大器是最常用的無線电技術設備。按照运用原理、用途、工作頻帶以及电路的不同，可以有多种类型的放大器。最通行的放大器是利用电子管放大性能的一——电子管放大器，这种放大器用途最廣。此外，还有用途沒有那么廣的無管放大器。利用饱和磁心的特性的磁性放大器是無管放大器的一例，这类放大器用途較狹，本書中不加以研究。

每一个放大器主要是用某一个頻段(頻帶)來表明它的特証，在这一个頻段範圍內它能勝任地加强电的振盪。这——个工作頻帶以下限(最小)頻率 f_n 与上限(最大)頻率 f_o 为界。根据工作頻帶的不同，放大器可以分为兩種类型：即低頻放大器与高頻放大器。這兩种型式的放大器無論在电路上和特性上都大不相同。

高頻放大器，顧名思义是用以放大高頻振盪的。这类放大器的工作頻帶的相对寬度是不大的：即最大工作頻率 f_o 与最小頻率 f_n 之比接近于一。通常在高頻放大器中：

$$\frac{f_o}{f_n} \leq 1.01 \sim 1.1.$$

狭窄的工作頻帶使高頻放大器可以采用由一个或几个諧振迴路構成的系統作为电子管的負載。所以这类放大器常称为諧振放大器。例如，高頻放大器在無線电接收設備中用以放大檢波器以前的訊号。

本書討論低頻放大器的計算問題，为簡略起見，以后將簡称为放大

器。这种放大器的特点是：

1. 工作頻帶很寬，高工作頻率 f_0 对低工作頻率 f_n 之比一般不小于几十，在个别情形可达到几十万。

2. 工作頻率的下限数值很小(一般在几十赫茲)。

寬的頻帶使我們不能采用有尖銳諧振曲線的振盪迴路作为电子管的負載。在这种情形下，电子管負載照例是帶有非周期的性質，因此这类放大器有时称为非周期性的放大器。

用以放大声頻电振盪的设备是在实用中常常遇到的低頻放大器中最通行的一种类型。这种类型的放大器的工作頻帶一般在 $f_n = 50$ 至 100 赫茲到 $f_0 = 5$ 至 12 千赫茲範圍之內。这样的頻帶对要求畸变小的語言和音乐的傳送，照例是完全足够的。这种类型的放大器用在無線电廣播、無線电通訊、有綫电通訊、錄音、以及在其他需要放大声頻电振盪的类似情形中。

在本書中最大的注意力是放在声頻放大器上。

在本書中也討論到一些在脉冲通訊、無線电定位、及电视設備中用以放大訊号的放大器，这些放大器具有一定的特殊性。由于其本身工作条件的特殊，这些放大器不同于声頻放大器而具有非常寬的工作頻帶，往往包括从几十赫茲到几百万赫茲的範圍。由于这原因，它們僅是在習慣上被列入低頻放大器的範疇，因為它們是同时供放大低頻和極高頻率訊号之用的。这种放大器称为寬帶或脉冲放大器。按照其本身的工作条件來說，它們本質上和声頻放大器不同，但根据以上的分类法，則應該依慣例列入低頻放大器一类。

各种不同类型的放大器在工程与科学的很多部門中有很廣泛的应用，如声頻放大器是有綫廣播設備、錄音与擴音設備的基本機構，也是無線电接收机和發送机的必要部分。寬帶放大器用以放大电视及無線电定位系統中的訊号。最后，也有很多种特殊型式的放大器，用于遙控机械、軍事技術、地質学、医学、以及工程与科学的其他很多部門中。

任何一种放大器均可视为四端网络的一种特殊情况，需要放大的电压信号引入于这个四端网络的输入端，而其输出端则接到有用的负载（图 1-1）。

放大器是有源的四端网络，因为在输出端（在负载上）的振荡功率总是大于放大器由输入信号电源所消耗的功率：

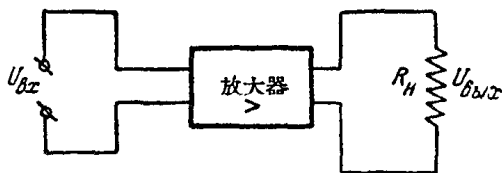


图 1-1. 放大器的扼要线路图。

$$P_{\text{BX}} > P_{\text{BX}}。 \quad (1-1)$$

应该指出，为了满足这个条件，完全不需要使放大器输出端电压（ U_{BX} ）大于输入端电压（ U_{BX} ）。如所周知，功率不仅由电压决定，而且也由该电压所作用的阻抗值决定：即

$$P_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{BX}}^2}{2R_H}; \quad (1-2)$$

$$P_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{BX}}^2}{2R_{\text{BX}}}, \quad (1-3)$$

式中 U_{BX} 及 U_{BX} 分别为四端网络输入及输出端信号电压的振幅；

R_H 是负载阻抗；

R_{BX} 是放大器的输入阻抗。

为了简单起见，我们把阻抗 R_H 与 R_{BX} 看作是纯电阻。从关系式 (1-2) 与 (1-3) 可见，即使是 $U_{\text{BX}} < U_{\text{BX}}$ ， $P_{\text{BX}} > P_{\text{BX}}$ 的情形也是可能的，不过此时必须保持 $R_{\text{BX}} > R_H$ 的条件，这个条件在放大器中总是可以成立的。

在大多数情形中，我们必须处理在输入端上的如此微弱的振荡，以致由一个电子管来放大是不够的。这时候，可将经第一管放大的振荡加到第二管的栅极，再将第二管放大的振荡加到第三管的栅极，如此类推，直至振荡的强度达到所需之值为止。在这种情形中，放大器由

若干放大級所組成。

电子管、負載、以及用作耦合本級电子管与次級电子管或外部負載的各个电路元件的組合，总称为放大級。

为了使末級电子管能够在負載上給出指定数量的有效功率，該管柵極应供以一定数值的交流电压 U_c 。輸入电压來源（例如傳声器）所能供給的电压 U_{cx} 总是比末級輸入端所需的电压小得多。为了將电压放大到所需的数值 U_c ，每采用由一級或常常由若干級組成的前置放大器或电压放大器。

僅在少有的情形中，輸入电压來源能供給功率放大器正常工作所需的电压：即 $U_{cx} \geq U_c$ ，这时前置放大器就不需要了。

前置放大器各級在放大电压的同时，当然也放大了被引入的振盪的功率。但对这些級來說，所產生的功率并不是帶有指标性的量，因为在次一級电子管柵極的电路中所消耗的功率通常是很小的。

这样，我們把放大器分为电压放大器和功率放大器。对这两种放大器中的每一种來說， $P_{out} > P_{cx}$ ，但在第一种情形必須有 $U_{out} > U_{cx}$ ，而在第二种情形并不一定要滿足这个要求。

低頻放大器也可以按照級間耦合的型式而分类。在声頻放大器中主要是采用下列几个級間耦合电路：

1. 电阻放大級(电阻級)；
2. 变压器級；
3. 抗流圈級；
4. 电阻变压器級(或称并饋的变压器級)。

在有特殊用途的各种放大器中，也可采用其他式样的級間耦合电路，但上述的放大級电路(尤其是第一和第二种)是基本的，也是实际上最通用的。

在寬帶放大器中往往采用級間电阻耦合电路或其变形，后者不同于簡單电阻綫路之处是在于附加有用以擴大放大器通頻帶(頻率範圍)

的一些改正元件。

1-2. 表征放大器工作特性的指标

低頻放大器用一系列的运用指标及品質指标來表示它的特性。

屬於放大器运用指标的有：

- 1) 放大系数；
- 2) 輸出端功率及电压；
- 3) 效率 (η , Π , Π);
- 4) 輸入电压。

屬於放大器品質指标的有：

- 1) 頻帶；
- 2) 动态振幅範圍及固有噪声水平；
- 3) 放大系数的穩定度；
- 4) 負載变动时輸出电压振幅的恒定性；
- 5) 放大器所引入的畸变。

以下討論上列放大器的各种工作指标。

a) 放大系数是表示放大器輸出电压較輸入电压大若干倍的数字。

其值等于这两电压之比：

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad (1-4)$$

視用途的不同，各种放大器放大系数的数值在極大的範圍內变化：从几个單位到几十万，有时还更大。

在实用上最常遇到的放大設備，其放大系数約在几百或几千之譜。当放大器的通頻帶擴寬时，要得到大的放大系数的困难会大大地增加。

放大系数是代表电压放大器工作特性的基本指标之一。但对于功率放大器，电压放大系数 $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ 并不是有代表性意义的量。正如前已指出，在功率放大器中輸出电压可以小于輸入电压，亦即电压放大系