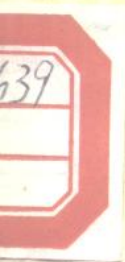


对数放大器

南京邮电学院 孔俊宝 著



国防工业出版社

对数放大器

南京邮电学院

孔俊宝 著

国防工业出版社

Dt16/22

内 容 简 介

本书是讨论利用电容充放电及脉宽调制的方法实现高准确度对数放大器的专著。

全书共有四章。第一章介绍二极管、三极管及放大器逐级串联实现对数函数的原理和方法。第二章介绍实现高准确度对数放大器的思路、设想和实际电路。第三章介绍实现高准确度对数宽带放大器的思路、设想和实际电路。第四章介绍二极管、三极管、稳压二极管对数运算电路的结构及其特点。为方便读者，还补充了一些必要的基础知识。

本书可供通信、仪器仪表、测量等工程技术人员、科研工作者及有关院校师生参考。

对 数 放 大 器

南京邮电学院

孔俊宝 著

责任编辑：王细李

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 3 73千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷 印数：0,001—2,700册

统一书号：15034·3202 定价：0.73元

序

“对数放大器”产生“对数函数”的传统方法,是利用晶体管近似于对数关系的伏安特性,但其对数函数的准确度是依靠补偿方法来解决的,因而始终是提不高的。作者提出了一个利用电容充放电的指数关系,通过脉宽调制,得到对数函数的方案。经过数年来研究的结果表明,其准确度得到了大幅度的提高。这种方案是前所未见的。

在电信号检测技术中,很需要这种高准确度对数函数放大器。以往,由于其准确度不高而影响检测的质量。作者的这一研究成果对提高某些电信号检测质量,提供了有效的解决办法。

作者将其数年来研究所得的具体电路、实验数据和结果以及电路分析,都无私的贡献出来,给从事此项目的研究人员提供了从理论到实践的具体资料,以及进一步提高的思路。因此,我欣然推荐这本书,作为有关的科研工作者和大专院校教师、研究生的参考。

上海交通大学教授 张钟俊

1985年于上海

前 言

作者自 1978 年以来,进行了有关“对数放大器”的研究,并陆续发表了几篇有关“对数放大器”的论文,本书就是在此基础上编写而成的。

本书的中心是第二章和第三章。作者在 1978 年曾提出了一个设想,并写成为第一篇论文发表,该设想就是利用电容充放电的指数关系,通过脉宽调制,以图得到高准确度的对数函数。到 1979 年、1980 年,进一步将这个设想加以实现,就写出了第二篇论文,题目是《高准确度对数放大器的研讨与实现》。这篇论文在江苏省电子学会 1980 年年会上宣读过,而后在《电信科技情报》上全文发表了。因当时在国内、国际上都未见到过如此高的准确度,此种方案也从未见过。1981 年、1982 年又继续展宽频带,并尽量集成化,于是又有第三篇论文问世,题目是《高准确度对数函数宽带放大器的研讨》。这篇论文在中国电子学会电子线路及系统学会 1982 年年会上进行了宣读,会后在上海《电子技术》上全文发表。1984 年又经过再实践、再修改,即在本书的第三章中比较全面地阐述了其基本内容及其实验的结果。具体电路和实验数据也都全部写入了书中。

为了读者阅读方便,将一些有关的基础理论知识,如有关某些运算放大器的原理与应用,也作了应有的叙述。在附录中还介绍了有源滤波器的设计和斩波器的原理。

另外,在叙述基础理论知识的同时,还提出一些新的知识和新的计算方法。如反馈放大器输入阻抗的计算方法,其简单、准确,是一般书上少见的内容。还有关于稳定判据中的“劳斯阵列判据”的内容,虽然有些书中也提到,但很少有如此详细的介绍和分析。

本书写成之后,得到北方交通大学副校长杜锡钰教授的青睐

和推荐，南京邮电学院孙仁琦教授给予了支持，谭小为同志为本书进行了校对并复核了计算公式及例题。在此特向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，恳切地希望广大读者提出批评和指正。

孔俊宝 谨识

一九八五年三月

目 录

引言	1
第一章 实现对数函数的理论依据	3
§ 1-1 二极管或三极管实现对数函数的原理	3
§ 1-2 放大器逐级串联实现对数函数的原理	6
§ 1-3 顺序电流相加法及其所实现的电路	8
§ 1-4 两个具体电路的简要分析	9
一、三级单极性并联加法对数放大器	9
二、多级单极性并联加法对数放大器	10
第二章 高准确度对数放大器的设想与实现	12
§ 2-1 设想与理论依据	12
一、新的思路与设想	13
二、实现的理论依据	13
三、实现上述设想的初步方案	14
§ 2-2 电路的设计与分析	20
一、对该系统总的要求及指标	20
二、对该电路系统的具体分析	20
§ 2-3 电路实验的结果	24
第三章 高准确度对数函数宽带放大器的实现	27
§ 3-1 设想与理论依据	27
§ 3-2 电路的设计与分析	28
一、对该系统总的要求及指标	28
二、对该电路系统的具体分析	28
§ 3-3 电路实验的结果	35
一、单级线性放大器幅频响应的测试	35
二、有源低通滤波器幅频响应的测试	36
三、三级系统对数放大器幅频响应的测试	37
四、三级系统对数放大器时延的测试	39
五、三级系统对数放大器对数函数特性的测试	39
第四章 对数运算电路	42

§ 4-1 运算放大器	42
一、理想运算放大器	43
二、理想运算方程	44
三、传递函数及其基本性质	50
四、运算放大器的应用实质——反馈放大器	52
五、运算放大器的频率稳定性	55
六、高速集成运算放大器	69
§ 4-2 对数运算电路的结构设想	73
一、二极管对数运算电路的结构	72
二、三极管对数运算电路的结构	73
三、稳压二极管对数运算电路的结构	74
§ 4-3 对数运算电路的分析	74
一、二极管对数运算典型电路的分析	75
二、三极管对数运算典型电路的分析	77
三、差动输入式对数运算典型电路的分析	78
附录 I 有源低通滤波器	80
附录 II 场效应晶体管及其分流斩波器	84
参考文献	87

引 言

在电信号检测（如雷达显示、电平扫描）或测量（如电子伏特计）技术中，往往送来的输入信号动态范围较大，以致一般放大器就会使输出达到饱和。而对数放大器就可以把动态范围大的电压（或电流）转换成动态范围压缩了的电压，也可以说它能处理从正常工作中获得的大动态范围的信号。

在测量中，还可将指示部分中以电压的伏（V）为单位的刻度，换成以分贝（dB）为单位的刻度，当然其量程覆盖系数也自然加宽了。

因此，对数放大器就是其输入与输出之间为对数关系的放大器，这是与一般线性放大器基本不同之点（线性放大器输入与输出之间保持正比关系，也就是直线关系，如图 0-1 所示）。或者说，对数放大器是输入为等比级数而输出则为等差级数的放大器，如图 0-2 所示。

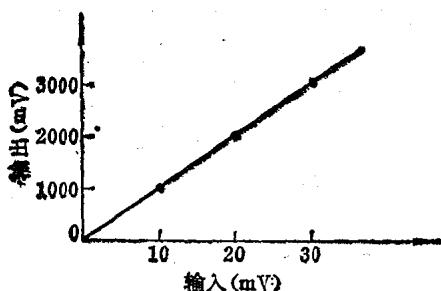


图0-1 线性放大器特性

用数学表达式来说明，则有

$$U_{\text{出}} = U_{\text{入}} K^n$$

$$U_{\text{出}} = U_{\text{出0}}$$

8710684

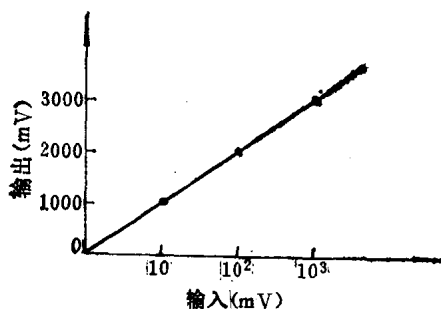


图0-2 对数放大器特性

上两式中:

U_{λ} ——输入电压;

$U_{\text{出}}$ ——输出电压;

$U_{\lambda 0}$ ——起始输入电压值;

$U_{\text{出}0}$ ——起始输出电压值;

n 、 K 、 C ——常数。

当

$$U_{\text{出}} = C \ln U_{\lambda}$$

成立, 则有

$$\begin{aligned} U_{\text{出}} &= C \ln(U_{\lambda 0} K^n) \\ &= C (\ln U_{\lambda 0} + \ln K^n) \\ &= C \ln U_{\lambda 0} + nC \ln K \end{aligned}$$

令

$$C \ln U_{\lambda 0} = U_{\text{出}0}$$

$$nC \ln K = \text{常数}$$

则有

$$U_{\text{出}} = U_{\text{出}0} + \text{常数}$$

因此可看出, 只要输出与输入能维持

$$U_{\text{出}} = C \ln U_{\lambda}$$

的关系 (当 U_{λ} 为一等比级数的变化量时), $U_{\text{出}}$ 必为一等差级数的变化量。也就是说符合图 0-2 所画曲线的表示关系。如果制造一个电路能符合上述关系, 那么, 这个电路即为对数放大器。

第一章 实现对数函数的理论依据^{〔1〕〔2〕}

所谓实现对数函数，也就是实现

$$U_{\text{出}} = C \ln U_{\text{入}}$$

或

$$e_{\text{出}} = K_1 \ln K_2 e_{\text{入}}$$

实现的方法有多种，这里介绍两种最基本的方法。

§ 1-1 二极管或三极管实现对数函数的原理

利用二极管（或三极管）的伏安特性实现对数函数的基本原理，也就是基本的单极性对数级，如图 1-1 所示。

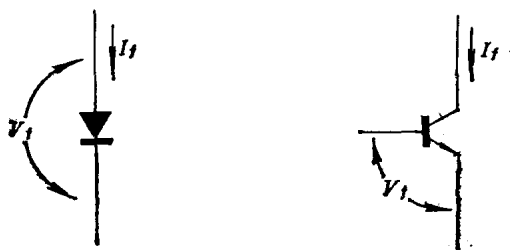


图1-1 二极管和三极管的电流电压示意

I_f —二极管（或三极管）的正向电流；

V_f —二极管（或三极管）的正向电压。

根据晶体二极管的伏安特性可画出如图 1-2 所示曲线，即对数曲线，或称指数曲线。经过实验知道，在 20dB 动态范围内，可以得到 $\pm 0.75\text{dB}$ 的对数放大，其数学表达式为

$$I_f = I_s [\exp(mV_f) - 1] = I_s (e^{mV_f} - 1)$$

同样，三极管的特性曲线也可以表示成对数函数，如图 1-3 所示。

U_b 与 I_b 成指数关系，而 I_c 与 I_b 成正比关系，即 $I_c = \beta I_b$ ，所以， U_b 与 I_c 即成指数关系，即对数关系。与二极管相同，同样有

$$I_f = I_s (e^{mV_f} - 1)$$

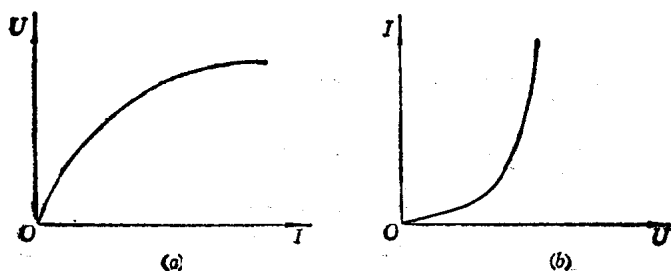


图1-2 二极管电流电压的关系曲线

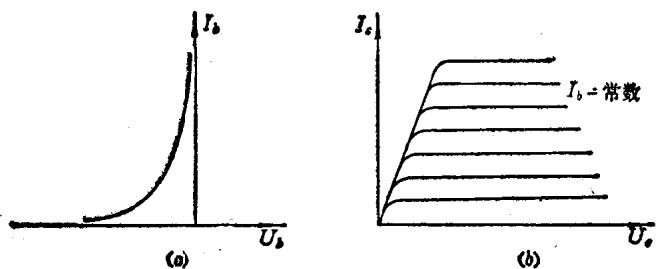
(a) 二极管 $U-I$ 特性曲线; (b) 二极管 $I-U$ 特性曲线。

图1-3 三极管电流电压的关系曲线

(a) 三极管 I_b-U_b 特性曲线; (b) 三极管 I_c-U_e 特性曲线。

$$I_t/I_s = e^{mV_f} - 1$$

$$(I_t/I_s) + 1 = e^{mV_f}$$

所以

$$mV_f = \ln[(I_t/I_s) + 1]$$

$$V_f = (1/m) \ln[(I_t/I_s) + 1]$$

式中 I_s ——二极管(或三极管)的反向饱和电流; m ——常数, 等于 $q/\eta kT$;其中 q ——电子电荷量; k ——波尔兹曼 (Boltzmann) 常数; T ——绝对温度;

η ——晶体管常数（二极管为 1 与 2 之间，三极管为 1）。

所以

$$V_f = (1/m) \ln[I_f/I_s + 1]$$

从上式可看出, V_f 与 I_f 为对数关系。

图 1-4 所示电路系由单级电路设计而成。

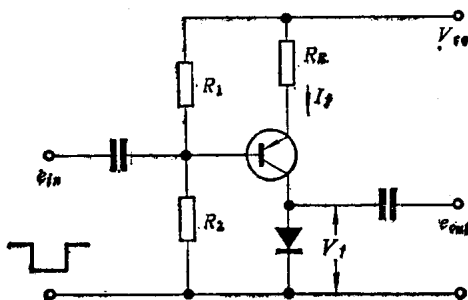


图1-4 单级的二极管对数电路

根据图 1-4 可知:

$$I_f = i_p + I_{f\beta}$$

式中 $I_{f\beta}$ ——二极管（或三极管集电极）静态正向电流分量；

i_p ——二极管（或三极管集电极）由于输入电流引起的电流分量。

所以

$$V_f = (1/m) \ln[(i_p + I_{f\beta})/I_s + 1]$$

又因

$$e_{out} = V_f - V_{f\beta}$$

$$V_{f\beta} = (1/m) \ln[(I_{f\beta}/I_s) + 1]$$

所以

$$\begin{aligned} e_{out} &= (1/m) \ln[(i_p + I_{f\beta})/I_s + 1] - (1/m) \ln[(I_{f\beta}/I_s) + 1] \\ &= (1/m) \{ \ln[(i_p + I_{f\beta})/I_s + 1] - \ln[(I_{f\beta}/I_s) + 1] \} \\ &= (1/m) \{ \ln[(i_p + I_{f\beta} + I_s)/I_s] - \ln[(I_{f\beta} + I_s)/I_s] \} \\ &= (1/m) [\ln(i_p + I_{f\beta} + I_s) / I_s \cdot (I_s) / (I_{f\beta} + I_s)] \\ &= (1/m) [\ln(i_p + I_{f\beta} + I_s) / (I_{f\beta} + I_s)] \\ &= (1/m) \{ \ln[i_p / (I_{f\beta} + I_s) + 1] \} \end{aligned}$$

即

$$e_{out} = (1/m) \ln(i_p / (I_{f\beta} + I_r) + 1)$$

当 $I_r \ll I_{f\beta}$ 时, I_r 为反向饱和电流, $I_{f\beta}$ 为静态正向电流。则有

$$e_{out} \approx (1/m) \ln((i_p / I_{f\beta}) + 1)$$

由于

$$i_p \propto e_{in}$$

令

$$K_1 = 1/m$$

$$K_2 e_{in} = (i_p / I_{f\beta}) + 1$$

则有

$$e_{out} = K_1 \ln K_2 e_{in}$$

上式正好说明二极管 (或三极管) 可以完成对数放大的任务。

§ 1-2 放大器逐级串联实现对数函数的原理

假定放大器共有 m 级, 每一级都是相同的, 其放大倍数都等于 K 。对某一级放大器来说, 如果是理想的, 即当输入信号电压不大时 (在饱和点以下), 其特性是直线性的; 当输入信号电压大于一定值时 (即超过饱和点), 使放大器过载, 即输出电压保持不变, 并等于 K 倍的本级输入电压, 即 KU_{go} 。对于多级放大器来说, 如果输入信号电压足够小, 则任何一级都不过载, 整个放大器的放大倍数即为 K^m , 若输入信号电压稍有增大, 使最后一级放大器过载, 则这最后一级即失去了放大作用, 这时总的放大倍数即为 K^{m-1} , 如末前级也过载, 则放大倍数即为 K^{m-2} , 如果使放大器第 $[m - (n - 1)]$ 级过载, 而第 $(m - n)$ 级以前都没有过载, 则在 $(m - n)$ 级以前的逐级电压叠加为

$$KU + K^2U + K^3U + \cdots + K^{m-n}U$$

在 $[m - (n - 1)]$ 级以后, 由于已进入饱和状态, 因此, 每级均为 KU , n 级叠加则为 nKU , 所以总的输出电压为

$$U_{出} = KU_{\lambda} + K^2U_{\lambda} + K^3U_{\lambda} + \cdots + K^{m-n}U_{\lambda} + nKU$$

但假定条件为 K 具有足够大, 以致于

$$K \ll K^2 \ll K^3 \ll \cdots \ll K^{m-(n-1)} \ll K^{m-n}$$

则有

$$U_{出} \approx K^{m-n}U_{\lambda} + nKU \approx K^{m-n}U_{\lambda} + n(K-1)U$$

整理后可得

$$\dot{U}_{\text{出}}/U = (K^m \dot{U}_{\lambda}/K^n U) + n(K-1)$$

令

$$1/U = (a-1)/K_1$$

$$Km/U = K_2$$

$$K = a$$

则有

$$U_{\text{出}}(a-1)/K_1 = (K_2 U_{\lambda}/a^n) + n(a-1)$$

但若以 $U_{\text{出}} = K_1 \log_a K_2 U_{\lambda}$ 画出曲线, 则如图 1-5 所示。

用折线来替代图 1-5 中

的曲线时, 以第 $(n+1)$

段折线来说, 其斜率为

$$\frac{[(n+1) - n]}{[a^{(n+1)} - a^n]}$$

第 $(n+1)$ 段折线的方程

即为

$$(U_{\text{出}}/K_1) - n$$

$$= [(n+1) - n] [K_2 U_{\lambda} - a^n] / [a^{(n+1)} - a^n]$$

整理后可得

$$(U_{\text{出}}/K_1) = [(K_2 U_{\lambda} - a^n) / (a^{(n+1)} - a^n)] + n$$

$$= [(K_2 U_{\lambda} - a^n) / a^n (a - 1)] + n$$

再整理可得

$$U_{\text{出}}(a-1)/K_1 = [(K_2 U_{\lambda} - a^n) / a^n] + n(a-1)$$

$$= (K_2 U_{\lambda} / a^n) - 1 + n(a-1)$$

$$\approx (K_2 U_{\lambda} / a^n) + n(a-1)$$

(因 a 很大, 则 $n(a-1)$ 比 1 大得多, 故可将 1 忽略不计)。

与前面推导的表达式相比, 完全相同。可见将放大器串联后完全可以得到如下的对数函数关系:

$$U_{\text{出}} = K_1 \ln K_2 U_{\lambda}$$

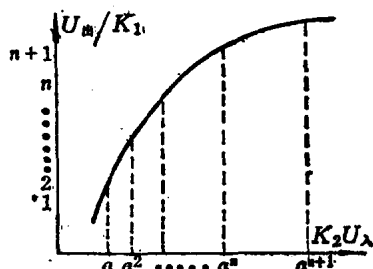


图1-5 逐级饱和放大器的 $U_{\text{出}}-U_{\lambda}$ 特性

§ 1-3 顺序电流相加法及其所实现的电路

实现对数放大器的电路型式有多种，仅以顺序电流相加法来说，也有逐级检波相加、折线相加法、三极管顺序电流相加法等；尚有隧道二极管对数放大器、齐纳二极管对数放大器和电子管的可变跨导对数放大器等等，不一而足。总之，能实现对数函数的放大器电路型式不少。

无论是哪一种顺序电流相加法，都是逐级放大后，逐级转换对数关系，然后叠加，当然可以是电压叠加，也可以是电流叠加。

逐级检波相加法，其方框图如图 1-6 所示。

在图 1-6 中所示即为二极管逐级检波后，按顺序将电流相加

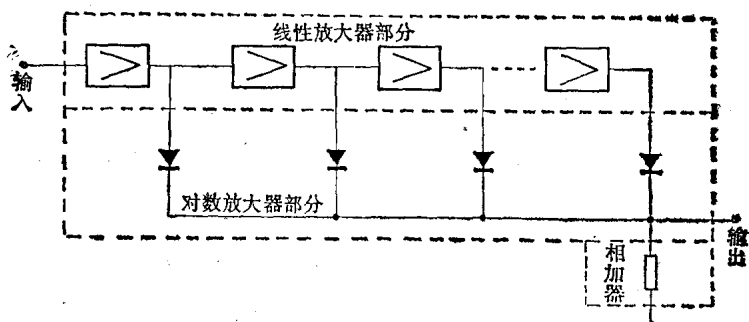


图1-6 逐级检波顺序相加对数放大器方框图
的对数放大器电路的方框图。

关于二极管（或三极管）实现对数函数的顺序电流相加法，也可以如图 1-7 或图 1-8 所示的方框图。

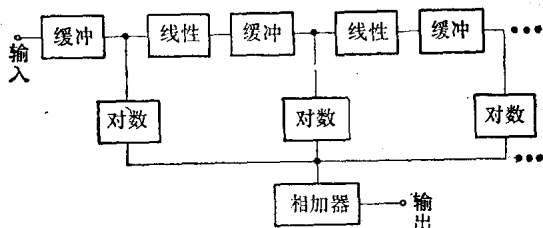


图1-7 顺序电流相加的对数放大器方框图

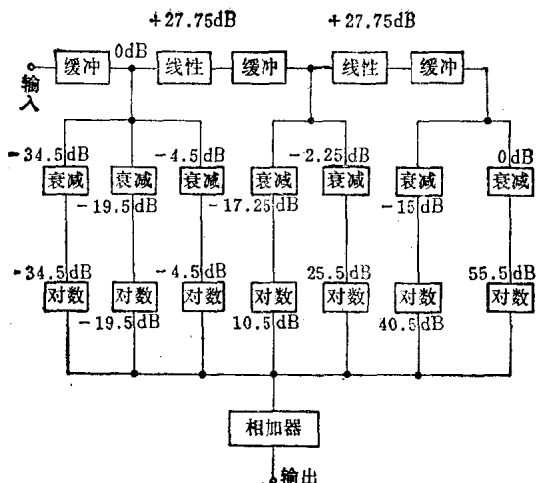


图1-8 带有衰减器的顺序电流相加对数放大器方框图

由于在图 1-8 中，加入了衰减器，比图 1-7 节省了四只线性放大器，仍然是每级间隔 15dB。节省了造价，便于制造，而且增益完全相同。

§ 1-4 两个具体电路的简要分析

一、三级单极性并联加法对数放大器

三级加法对数放大器的电原理图如图 1-9 所示。

图 1-9 中的电路简要分析如下：晶体管 BG_2 及 BG_3 组成互补放大电路，而 BG_4 是一级射极输出器，以便接入对数放大级的 BG_6 的基极。

同样，晶体管 BG_5 及 BG_6 组成互补放大电路，而 BG_7 是一级射极输出器，以便接入对数放大级的 BG_{10} 的基极。而 BG_5 的基极是从前级的放大输出进行电容耦合直接接入。并未经过射极输出器，这是为了提高电平和匹配阻抗而设计的。

BG_1 是直接从输入引进的第一级对数放大级。

BG_8 则是加法器。