

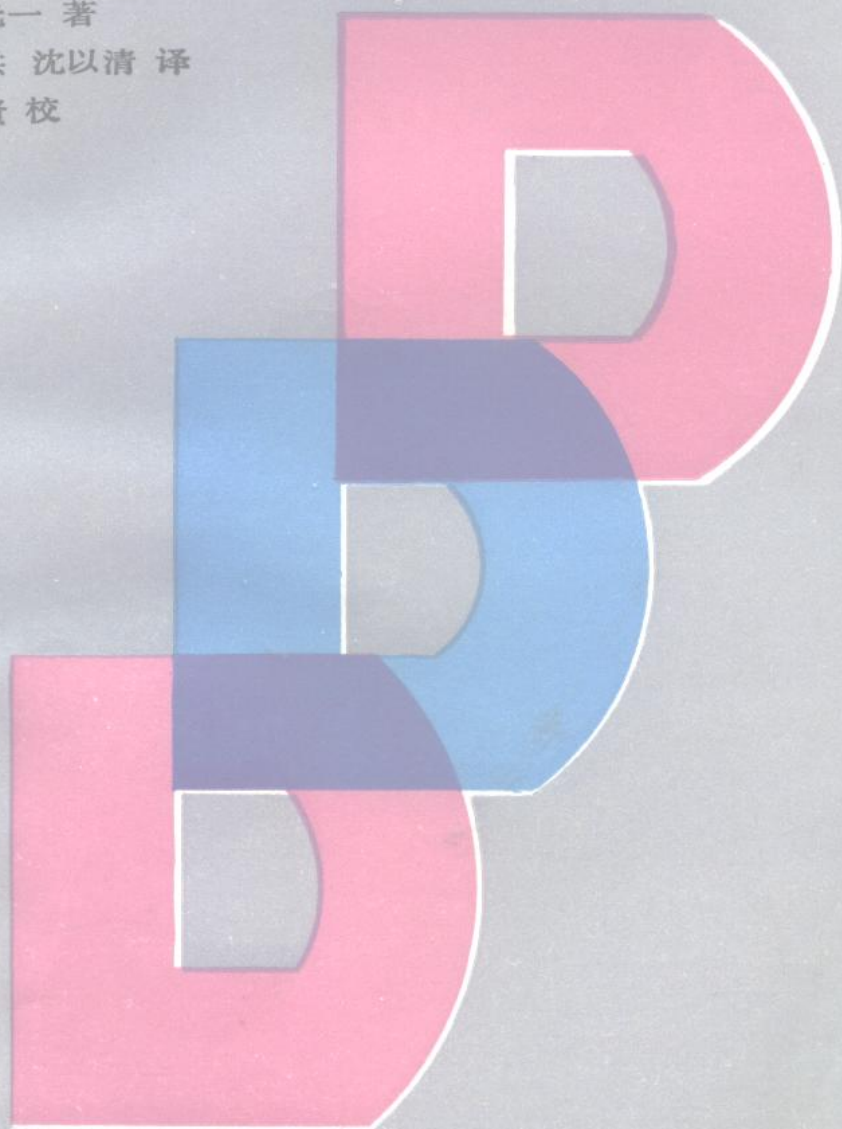
电子电路的反馈理论

〔日〕 筱崎寿夫 小岛纪男

本间光一 著

刘长洪 沈以清 译

张质贤 校



电子电路的 反馈理论

[日] 筱崎寿夫 小島纪男 本间光一 著
刘长洪 沈以清 译 张质贤 校

高等教育出版社

简 介

线性反馈放大电路的伯德(Bode)理论,对电子电路技术的发展起着重要作用。但它难度较高,不易理解和运用。本书用比较浅显的语言来阐述伯德理论,并着重论述线性反馈放大器的稳定性。为了帮助基础较差的读者,本书还特别加入了“线性系统初步”这一章作为入门知识,并在附录中编列重要公式的推导。

本书适合具有大学无线电系、电机系、自动控制系等各专业三年级以上基础知识的读者学习使用。也可供教师和研究人員作参考。

责任编辑 张志军

筱崎寿夫·小島紀男·本間光一·著

電子回路のフィードバック理論

现代工学社 1981

电子电路的反馈理论

刘长洪 沈以清 译

张质贤 校

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海群众印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 4.875 字数 116,000

1987年10月第1版 1987年12月第1次印刷

印数 00,001—3,640

书号 15010·0743 定价 1.25 元

前 言

本书的主旨是阐述线性反馈放大电路的伯德(Bode)理论。说起来,日本东海大学现任校长松前重义博士在四十年前发明的“非加感电缆远距离多路通信方法”,开辟了电信技术的新领域。之后,远距离通信技术在四十多年内有了高速度发展,目前已达到60兆赫10800路的超多路通信的高水平。宽频带反馈放大器是促成该技术成就的核心问题之一。可以毫不夸张地说,如果没有宽频带反馈放大器的发展,通信技术就不可能达到今天这样高的水平。

美国贝尔电话研究所的研究人员伯德(H. W. Bode)于1938年前后开展宽频带反馈放大器设计原理方面的研究,后经整理归纳,于1945年出版了著名的“网络分析和反馈放大器设计”^[3]一书。在伯德建立反馈放大器设计理论之前,人们把宽频带放大器的增益和相位当作两个互不相关的参数来处理,因而宽频带放大器的设计极其困难。而伯德则认为增益和相位密切相关,在一定条件下(最小相移电路),可以由一个参数确定地求得另一个参数,并导出了其基本关系式,进而建立了反馈放大器的理论。这个关系式就是希尔伯特(Hilbert)变换式的变形,是这一领域科技工作者所熟知的伯德关系式。值得一提的是,实际上该关系式在物性论中也推导出来了,称为克瑞麦斯-克龙尼希*(Kramers-Kronig)关系式,是一个很有用的公式。

上面叙述了利用反馈来解决电子电路实际问题的一个例子。如所周知,反馈的概念不仅用来解决宽频带反馈放大器的问题,而且推而广之,应用于首先是把人本身作为系统以及社会机构等系统中。为了使系统能很好地运行,不言而喻,一般都必须施行适当

* 原文误为クテマー・クロニッヒ。——译者注

的信息反馈。

反馈是非常重要的概念,但反馈的一般理论还没有建立起来。目前只在电子电路方面确立了伯德理论,虽然反馈放大器的理论在电子学中很重要,但因内容难懂,有关著作甚少,虽有伯德的著作,但要充分理解它并应用于实际工作,需要有深厚的基础知识和进行大量的数学运算,因此不适于初学者学习使用。而有关反馈放大器理论的其它书籍虽然还有一些,但由于同样的原因,也不适用于初学者。

本书对反馈放大器的伯德理论,阐述得简洁明了,通俗易懂,适合具有大学电信、电子工程系三年级以上基础知识的读者学习使用。因篇幅所限,本书省略了过于冗长的细节部分的叙述,而作者认为重要的公式的推导则列于附录中。

笔者才疏学浅,难免有错误和不妥之处,敬请读者指正,写本书时参考了很多文献(特别是文献中的[1],[2],[3]),对上述著作的作者深致谢意。

最后,感谢现代工学社社长林胜平先生给予笔者写作此书的机会和对我的鼓励,还有东京大学的斋藤正男教授审阅了本书书稿,并提出了许多宝贵意见,在此深表谢意。

作 者

1980年夏

目 录

第 1 章 反馈放大器基础	1
1.1 反馈概念	1
1.2 理想单环反馈放大器的基本公式	4
1.2.1 基本公式	4
1.2.2 负反馈与正反馈	6
1.2.3 返送比和返送差	7
1.3 负反馈的优点	9
1.3.1 降低灵敏度	9
1.3.2 减小非线性失真	11
1.3.3 削弱噪声	13
1.3.4 控制阻抗	18
1.3.5 改善幅频特性	23
1.4 负反馈的缺点	25
第 2 章 伯德反馈理论 (1)	26
2.1 元件 ξ 的返送差、返送比和传递函数	26
2.1.1 基本方程式	26
2.1.2 传递函数	28
2.1.3 返送差与返送比	28
2.1.4 一端口元件 ξ 的返送差和返送比	30
2.1.5 零返送比和零返送差	31
2.1.6 传递函数与返送差的关系	33
2.2 灵敏度函数	34
2.2.1 传递函数的灵敏度	34
2.2.2 根(传递函数零点)灵敏度	35
2.2.3 根灵敏度与灵敏度函数的关系	35
2.3 元件 ξ 对一般参考值的返送差、返送比及相对灵敏度函数	38
2.3.1 广义返送差和广义返送比	38
2.3.2 广义零返送差和广义零返送比	40
2.3.3 传递函数和广义返送差的关系	41

2.3.4 一端口元件的广义返送差和广义返送比	42
2.3.5 相对灵敏度	43
2.4 有源电路的阻抗	44
2.4.1 有源电路策动点函数表达式	45
2.4.2 举例说明(1)	45
2.4.3 举例说明(2)	46
2.5 返送比的测定	48
2.5.1 测定方法	48
2.5.2 复杂的等效电路	49
2.5.3 讨论	50
2.6 单环反馈放大器的稳定性	51
2.6.1 劳斯-霍尔维茨(Routh-Hurwitz)判别法	51
2.6.2 奈奎斯特(Nyquist)判别法	52
第3章 伯德反馈理论(2)	58
3.1 对网络函数规定的各种积分形约束条件	58
3.1.1 寄生电容	58
3.1.2 对策动点函数规定的约束条件	58
3.1.3 对传递函数规定的约束条件	62
3.2 伯德关系式、最佳级间网络及伯德理想截止特性	67
3.2.1 伯德关系式	67
3.2.2 最佳一端口网络和理想截止特性	77
3.3 最佳反馈放大器	85
3.3.1 设计举例	85
3.3.2 设计步骤	90
第4章 补充(线性系统初步)	91
4.1 线性系统及其性质	91
4.2 线性系统响应分析	113
4.3 线性网络稳定性和霍尔维茨(Hurwitz)多项式	123
附录	139
参考文献	145
索引	146

第1章 反馈放大器基础

1.1 反馈概念

反馈的概念不仅对电路工程学重要，在一切系统中都是很重要的。因此，首先举出各个领域的反馈概念作为例子来说明，然后再论述电路工程学中的反馈。

(1) 人的动作：不只是人类，动物的动作以及生理机能等都是如此，单就人的动作来说，可以注意到，动作的每一个环节都是按反馈原理进行的。例如，想要拿桌子上的一本书，首先由大脑发出把手伸向书的指令，手就向书伸去。眼睛看着这样的动作，就对大脑送回一个信息，告诉大脑手还没有伸到目的地，还差几厘米。这样，大脑又发出把手继续向书伸去的指令，最后手就摸到了书本。于是由视觉和手的感觉把手摸到书本的信息反馈于大脑。…就这样进行拿书的动作。其它动作也完全一样*。这时，如果由于某种原因把反馈施加得过多，那就要过分了，想要返回而又返回得过多，这样就要发生颤动，好像得了中风病似的。也可说是过犹不及。众所周知，依靠所谓体内动态平衡调节机构，使体温大体保持恒定，也是一种巧妙的反馈过程。

(2) 恋爱：在这里出现这样的词汇，也许会使人感到奇怪。但仔细想想就可知道，如果没有恋爱这样的情感，种族就要灭绝了。可以认为，恋爱这种感情是把动物传宗接代的反馈升华于人类的一种形态，传宗接代的各种反馈，作为动物的本能，施加于所有的动物。

(3) 禁止原子弹氢弹运动：和上面所说的意思一样，这是人类

* 也有不全反馈于大脑的动作。

谋求生存的反馈。这种运动的开展，可以解释为是要保护人类生存的反馈的表现。

(4) 公司的经营活动：公司生产某种产品时，必须先了解市场情况，把所得信息反馈于公司，然后才能确定他们认为最适宜的方针。

(5) 经济活动：国家的经济活动，如果没有适当的反馈，也是搞不好的。在自由经济中，由于自由竞争而产生的亚当·史密斯的“看不见的手”就是起到了反馈的作用。但是在现在这种人口激增，高度复杂化了的社会经济中，这样的反馈也逐渐失去了作用。于是希望找到更强有力的更适宜的反馈。对于公害问题，大概也是如此。

(6) 教育系统：教师教学生时，总要以某种形式得到学生理解程度的信息。就是说，在教育系统中，如果不施加反馈，显然是搞不好的。

上面通过各种例证考察了反馈的形态，而且知道，为了很好地经营各种系统，必须施加适当的反馈。而为了施加适当的反馈，还必须知道返送什么，返送到什么程度和返送到什么地方。例如，人类社会用本能这样的反馈，不论怎样说，已经很好地经营到现在，但是今后只有这样的反馈就不能很好地经营下去了，也没有理由很好地经营下去。社会上出现的各种失调现象就是证据。人口密度过高，各种公害，资源不足，遗传因子的破坏，能源危机等等，从其中任何一项都可知道，在不久的将来，这些都要成为威胁人类生存的重要因素。人类怎样施加反馈才能很好地经营呢？怎样解决这些问题呢？可以说，“人类社会正处于转机”。不管怎样，也必须具体解决下述两个问题：

(1) 应当检测什么样的情报？怎样检测？

(2) 应当施加什么样的反馈(当然需要多路反馈)？

对于第(1)问，首要的问题是预测。只搜集一些无关紧要的情

报是不够的，必须预测出什么是必要的情报。对于第(2)问，需要适宜的政治体制，这个问题太重大了，这里不宜讨论，所以省略。总之，目前人类必须采取某些措施，而且已经晚了。但是有谁采取了措施？采取了什么措施？想到这里使人不寒而栗。

把上述反馈控制系统用单环路简单地模拟，如图 1.1 所示。著名科学家维纳 (N. Wiener) 最先指出，动物的动作和具有反馈的机械的动作存在前面讲过的相似性。研究这种内容的学问称为“控制论”。这里不想论述控制论，如前所述，想要就电路工程中的反馈理论，特别是伯德理论的内容，展开讨论。目前，反馈这样的概念已不再局限于电路领域，而对人类社会也已发生密切关系。这是何等重要的问题，有必要重新认识。由于想到了这一点，所以再补充这一句。

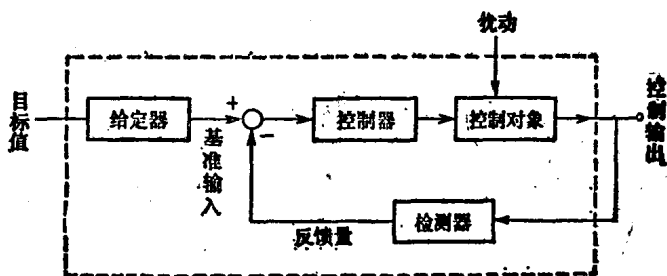


图 1.1 反馈系统的单环路模型

电路工程中的反馈技术，在有源电路设计方面是不可缺少的，在许多电子电路中都引进了反馈的概念。尤其是负反馈，不仅在信号的放大和伺服控制系统中，而且在电子工程的各个部门都获得了广泛的应用。例如：

- (1) 减轻无线电接收机的衰减用的 AVC(自动音量控制)。
- (2) 远距离电缆传输方式的 AGC(自动增益控制)和 APC(自动相位控制)。
- (3) PLLC(锁相环路)
- (4) 各种自动控制装置

(5) 负反馈放大器

(6) 系统控制的反馈

这一类例子很多,不胜枚举。

松前博士的伟大业绩:

第(5)类负反馈放大器是特别重要的,在各种测量装置中已广泛地使用。可以称之为社会神经的电信网络,在采用同轴电缆远距离电话传输方式构成干线的地方,负反馈放大器是不可缺少的,而且使用的也更多。现代传输工程的创始人松前重义博士在世界上首先发明了用6路非加感电缆的远距离传输方式,翻开了世界电信技术的新的一页。从那以后又不断发展,目前同轴电缆方式已经达到1万路的程度(现在准备向光导纤维传输方式发展)。由于有了这种技术,今天利用拨号盘可以从任何地点向任何地点随时通话。在这样的远距离多路通信方式中,需要串联非常多的中继放大器。由于信号必须在宽频带范围内放大传输,所以每个放大器即使只发生微小的变动,总的影响就很大。因此,用普通放大器时,这个通信系统将是无济于事的。但是具有负反馈效应的反馈放大器可以减少这些影响,再配合使用 AGC,效果就更好了。如所周知,目前数千公里长的 60 MHz 的宽频带通信方式正在稳定地工作,在世界各国起着情报网的干线的作用。在本章中,为了理解上面所讲的在各个工程部门起重要作用的反馈放大器的分析和设计,首先考察理想的单环反馈放大器的基本性质,这是必要的而且是基本的。

1.2 理想单环反馈放大器的基本公式

1.2.1 基本公式

如果把理想单环反馈放大器(ideal single loop feedback amplifier)的电路结构表示为信号流程图的形式,一般如图 1.2 所示。

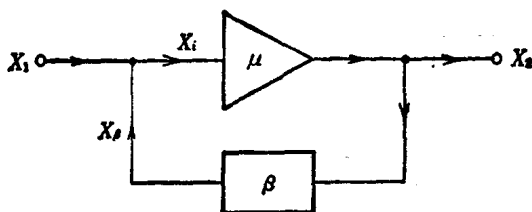


图 1.2 理想单环反馈放大器的结构模型

图 1.2 中的 μ 是放大器加反馈前(称为 μ 电路)的放大倍数(无反馈放大倍数)。 μ 电路是由电子管和晶体管等有源元件和无源元件(电阻、电感、电容等)组成的有源网络构成的。而 β 表示反馈电路(称为 β 电路)的反馈系数,它的定义以后讲述。反馈电路一般是由无源网络组成的。反馈电路的作用是将输出量的 β 倍反馈到输入侧。需要注意的是, μ 和 β 都是复频率 s 的函数。如果断开反馈环路,则加于输入端的这部分信号当然就不能返回。也就是此时图 1.2 中的 $X_f=0$, 反馈放大器的这种状态称为开环(无反馈)状态。

下面仅就电路的稳定状态(即频率特性)进行讨论。这时,开环传递函数(the open-loop transfer function)或正向放大(增益)函数(the forward amplifier gain function),即无反馈放大倍数 μ 定义如下:

$$\mu = \left. \frac{X_2}{X_1} \right|_{X_f=0} = \frac{X_2}{X_1} \quad (1.1)$$

而将反馈函数即反馈系数 β 定义为

$$\beta = \frac{X_f}{X_2} \quad (1.2)$$

上面的 X 可以是电压量,也可以是电流量,但反馈放大器假定为理想的而且是单向性的。因此,在这种理想的模型中,输入信号 X_1 不能通过 β 网络传输到输出端,而输出信号 X_2 也不能通过 μ 网络反方向传输。如图 1.2 所示,信号只能按箭头方向传输。

在图 1.2 中, 输入信号 X_1 为

$$X_1 = X_i - X_o \quad (1.3)$$

把式(1.1)及式(1.2)代入式(1.3)并加以整理, 则单环反馈放大器总的放大倍数 W 可用下面的基本关系式(反馈方程式)表示, 即

$$W = \frac{X_o}{X_1} = \frac{\mu}{1 - \mu \cdot \beta} \quad (1.4)$$

上式是该理想单环反馈放大器的增益函数。

1.2.2 负反馈与正反馈

在图 1.2 中, 我们把 X_o 和 X_1 反相位的反馈称为负反馈 (negative feedback), X_o 和 X_1 同相位的反馈称为正反馈 (positive feedback) 或再生反馈 (regenerative feedback)。因为 X_1 和 X_o 都具有频率特性, 所以, 虽然想在低频段加负反馈, 但一般只在某一频段内是负反馈, 而在超过某频率的高频段内往往变成正反馈。一般工作在工作频带为负反馈且式(1.4)中的 $|1 - \mu \cdot \beta| \gg 1$ 的情况下。

由以上可知, 单反馈环反馈放大器的性质是由 $1 - \mu \cdot \beta$ 决定的。

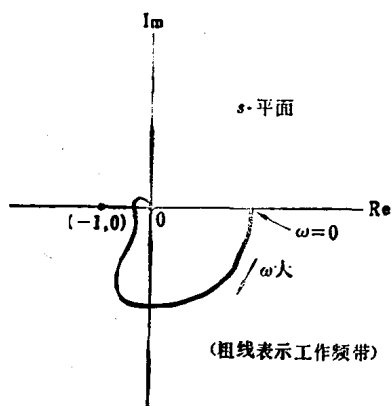


图 1.3 奈奎斯特线图

即使想制作的是负反馈放大器, 但若反馈施加过深, 则在某工作频带之外将成为正反馈, 电路变得不稳定并产生振荡。所以, 在设计宽频带放大器电路时, 对工作频带以外的频域也必须极为慎重地考虑。实际上, $\mu \cdot \beta$ 是复数, 必须在复平面上研究 $\mu \cdot \beta$ 。 $\mu \cdot \beta$ 称为环路增益。当 $s = j\omega$ 时, 用极坐标表示

的 $\mu(j\omega) \cdot \beta(j\omega)$ 曲线称为奈奎斯特线图 (Nyquist diagram),

如图 1.3 所示, 它使单环反馈放大器的特性的大致情况一目了然, 非常方便。这将在后面详加说明。

1.2.3 返送比和返送差

为了理解反馈放大器电路的设计, 对于在反馈理论中常用的两个基本物理量, 即返送比 (return ratio) 和返送差 (return difference), 让我们参照图 1.4 的电路, 说明如下。

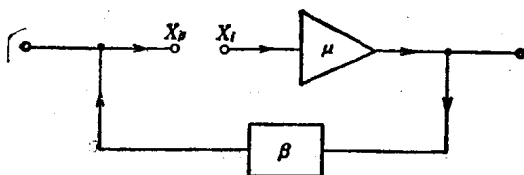


图 1.4 说明返送比和返送差的电路结构

首先, 如图 1.4 所示, 切断 μ 的输入侧 (假设切断后断点前后的输入输出阻抗不变)。现在, 假设 μ 电路的输入电压为 X_i , 这时通过 μ 电路和 β 电路再返送到输入侧的电压 X_β 称为反馈电压 (返送电压)。如前所述, X_i 和 X_β 反相的电路为负反馈电路, 同相时为正反馈电路。 X_β 是 X_i 绕行一周后返送的电压的大小

$$X_\beta = -\mu \cdot \beta \cdot X_i$$

因此

$$T = \frac{X_\beta}{X_i} = -\mu \cdot \beta \quad (1.5)$$

T 称为返送比。前已述及, $\mu \cdot \beta$ 称为环路增益。再定义 F 为

$$F = 1 + T = 1 - \mu \cdot \beta \quad (1.6)$$

* 原书误为 $T = -\frac{X_\beta}{X_i}$ 。——译者注

F 称为返送差(T 、 F 都是 s 的函数)。它可看作 μ 电路的输入 $X_i = 1[V]$ 并绕行一周后返送的电压 $\mu \cdot \beta$ 和输入电压 X_i 的差值。

反馈量: $20 \log |F(s)|_{s=j\omega} [dB]$ 称为**反馈量**, 其值为放大器无反馈时的增益和加反馈后的增益之差。因为集中参数电路系统的稳定性一般是由其系统函数的分母多项式的性质决定的, 所以在讨论放大器的稳定性时, 应该用式(1.4)的分母, 即式(1.6)的返送差。将 $F=1+T=0$ 称为这个反馈放大器的特征方程式。也就是说, 如果特征方程式的根全部都在 s 平面的左半部, 则电路稳定; 而即使只有一个根在右半面, 则电路变为不稳定(参阅 2.6 节)。

返送差的定量表示: 考察 μ 电路内某元件(设为 ξ)从基准值开始变化时, 上述返送差 F 如何变化, 是非常重要的问题。为此, 用行列式的形式来表示元件 ξ 的返送差 F 。

设电路在基准稳定状态时, 反馈放大器的网孔解析式或节点解析式的总的电路行列式为 Δ , 并设去掉所讨论的元件 ξ 时的相同形式的行列式为 $\Delta^0 (\Delta^0 = \Delta|_{\xi=0})$, 则元件 ξ 的返送差 F 可表示为

$$F = \frac{\Delta}{\Delta^0} \quad (1.7)$$

不论 ξ 是双向性元件还是单向性元件, 上式都成立。此式的推导见 2.1 节。

式(1.7)是返送差的一般表达式, 自然, 无论是单环反馈放大器还是多路反馈放大器, 都是适用的。用这样的表达式分析反馈电路是非常方便的。为什么呢? 因为电路行列式 Δ 包含了该电路的全部信息。如果作为问题的电路的行列式一旦建立起来, 则各个有源元件的返送差在多数情况下都能容易地计算出来。再者, 由于行列式 Δ 的零点左右着电路的稳定性, 以后将知道, 能用式(1.7)说明反馈和稳定性之间的关系。

1.3 负反馈的优点

负反馈放大器的优点主要有下列五点:

- (1) 降低灵敏度
- (2) 减小非线性失真
- (3) 削弱噪声
- (4) 控制输入阻抗、输出阻抗及内部阻抗
- (5) 改善频率特性

下面按以上顺序加以说明。

1.3.1 降低灵敏度

如果电子管或晶体管的增益由于电源电压的波动、温度的变化、晶体管和电路元件的更换以及长年老化等各种原因而发生变化,则无反馈放大器的增益 μ 将受其影响而产生显著改变。在用数十个乃至数百个中继放大器串联连接传输信息的远距离电缆传输方式中,这个问题特别重要。而放大器加负反馈后,能减小下述各参数的变化,即大大降低放大器的灵敏度。因此,远距离电缆通信方式必须要用负反馈放大器。在其它精密测量仪器中,负反馈放大器也是必不可少的。

灵敏度: 在说明负反馈对灵敏度的影响之前,首先定义电路的灵敏度。其严格的定义将在 2.2 节中给出。可以说,灵敏度是衡量所讨论的某个量对其它量影响程度的尺度。定量的定义如下。放大器的总增益 W 对所讨论参数 ξ 的灵敏度 S_{ξ}^W 定义为

$$S_{\xi}^W = \frac{\frac{\partial W}{W}}{\frac{\partial \xi}{\xi}} = \frac{\partial \ln W}{\partial \ln \xi} \quad (1.8)$$

S_{ξ}^W 称为 W 对 ξ 的灵敏度 (Sensitivity)。这是伯德作的定义。式 (1.8) 是表述 ξ 微变量的情况,而当 ξ 的变化不是太小时,用下式

定义比用式(1.8)的偏微分形式定义要好(δ 表示微小量)。

$$S_{\xi}^W \approx \frac{\frac{\partial W}{W}}{\frac{\delta \xi}{\xi}} = \frac{\delta \ln W}{\delta \ln \xi} \quad (1.9)$$

上述灵敏度定义的两种表达式是 W 的变化率和 ξ 的变化率之比, 即变化的百分比。

对 μ 的灵敏度: 由式(1.8)和(1.4)知道, W 对 μ 的灵敏度可表示为 S_{μ}^W [参见式(1.6)]

$$S_{\mu}^W = \frac{\frac{\partial W}{W}}{\frac{\partial \mu}{\mu}} = \frac{1}{1 - \mu\beta} = \frac{1}{F} \quad (1.10)$$

由此可知, 加负反馈后, $|S_{\mu}^W|$ 越小的电路越稳定。因上式可写成

$$\frac{\partial W}{W} = \frac{1}{1 - \mu\beta} \frac{\partial \mu}{\mu} = \frac{1}{F} \frac{\partial \mu}{\mu} = S_{\mu}^W \frac{\partial \mu}{\mu} \quad (1.11)$$

所以反馈放大器的总增益 W 的变化率 $\partial W/W$ 为 μ 的变化率 $\partial \mu/\mu$ 的 $1/(1 - \mu\beta)$ 。

如果 $|F| = 20$, 即使晶体管或电子管的增益变化了 10% (相当于 μ 的变化), 它对电路总增益 W 的影响为 $1/200^*$, 即减少到 0.5%。

对 β 的灵敏度: 我们来讨论 β 电路变化时, W 对 β 的灵敏度。由式(1.4)和式(1.8)可得

$$S_{\beta}^W = \frac{\frac{\partial W}{W}}{\frac{\partial \beta}{\beta}} = \frac{\partial W}{\partial \beta} \cdot \frac{\beta}{W} = \frac{\mu\beta}{1 - \mu\beta}$$

$$\left(\because \frac{\partial W}{\partial \beta} = \frac{\mu^2}{(1 - \mu\beta)^2} \right) \quad (1.12)$$

当 $|\mu\beta| \gg 1$ 时, $S_{\beta}^W \approx -1$, β 电路的变化直接影响到整个电路的增益 W 。在 $|\mu\beta| \gg 1$ 时, 式(1.4)可作如下近似

* 原书误为 $1/20$ 。——译者注