

倪寿春 编译

反馈电路和 运算放大器

安徽科学技术出版社



722.5

责任编辑：杨家骥

封面设计：张远林

反馈电路和运算放大器

倪寿春 编译

安徽科学技术出版社出版

(合肥市九州大厦八楼)

安徽省新华书店经销 安徽新华印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：6 字数：122,000

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数：0,001—1,550

ISBN7-5337-10450-2/TN·4

定价：2.95元

目 录

第一章	导言	1
第二章	反馈放大器的一般性质	5
§2.1	基本定义和方程	5
§2.2	负反馈和正反馈	8
§2.3	增益稳定性的提高	13
§2.4	噪声和失真的减小	16
§2.5	多路反馈	19
第三章	无反馈放大器	25
§3.1	放大器的类型	25
§3.2	信号源、放大器和负载之间的连接	32
§3.3	频率响应	36
§3.4	差分放大器	49
第四章	反馈放大器电路	57
§4.1	四种反馈电路形式	57
§4.2	反馈对输入和输出阻抗的影响	62
§4.3	电压并联反馈电路举例	70
§4.4	电压串联反馈电路举例	74
§4.5	电流串联反馈电路举例	78
§4.6	电流并联反馈电路举例	81

第五章	对反馈放大器的进一步讨论	86
§5.1	正向放大器和反馈网络之间的负载效应.....	86
§5.2	信号源和负载阻抗对反馈放大器的影响	103
§5.3	反馈放大器的频率响应	109
§5.4	不稳定性	114
第六章	运算放大器的基本概念和电路	123
§6.1	什么是运算放大器	123
§6.2	倒相电压放大器	126
§6.3	以倒相电压放大器为基础的其他运放电路	133
§6.4	同相电压放大器	137
§6.5	运放的电源连接	140
第七章	运放的非理想性	144
§7.1	运放非理想性的重要性	144
§7.2	失调电压	144
§7.3	偏置电流和失调电流	150
§7.4	运放的频率响应.....	156
§7.5	转换速率和全功率带宽	159
第八章	其他运放电路	164
§8.1	精密差分 and 测试放大器	164
§8.2	模拟计算	169
§8.3	文氏桥振荡器.....	175
§8.4	反函数原理	180
§8.5	三角波、方波发生器	182

第一章 导 言

日常生活中有许多关于反馈的例子。房间温度的调节便是其中之一(图1.1)。热源向房间提供热量,使房间温度升为 T_M (图中 M 为温度测量器)。 T_M 被反馈后与需要的温度 T_D 进行比较,其差值 $T_E = T_D - T_M$ (称作差值信号)被送往调节器。调节器利用差值信号来控制热源,使房间温度接近需要值。这种自动控制技术便是负反馈。称作负反馈是因为在产生差值信号的过程中,比较器的作用是从需要的温度中减去测量温度。

本书的主要内容是介绍负反馈原理在包含有源器件(晶体管等)的电子放大电路中的运用。由于集成电路晶体管放大器,即运放(运算放大器的缩写)的应用特别重要,我们也作了一定程度的讨论。

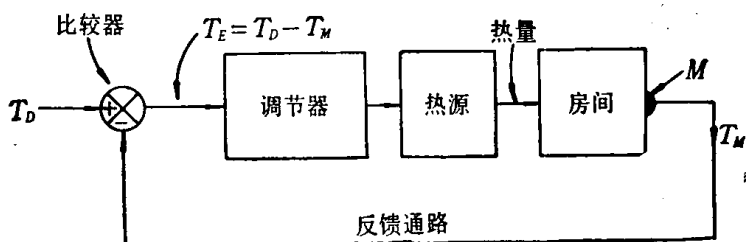


图1.1 房间温度调节系统示意图

负反馈放大器的组成如图1.2所示。放大电路利用有源器件(通常是晶体管),以放大加在输入端的电信号。放大器的输入信号来自于比较器。比较器从外加输入信号中减去 β 倍输出信号。如果放大器增益很大,则其输入端所需信号很小,所以外

加输入信号近似等于输出信号的 β 倍。就是说输出信号近似等于输入信号除以 β ($\beta \leq 1$)。如果反馈网络中器件性能稳定，则这种技术可使得系统总增益恒定。利用无源元件，如电阻，这个条件是比较容易得到的。放大网络本身不必增益恒定，但其增益必须很高。这一点意义重大。因为对大部分电子系统来说，首先要求的是增益稳定而且可以预测。但是现有的各种有源器件却不具备稳定性。幸运的是，对反馈系统其增益应该很高的要求，今天可以很方便、很廉价地得到，特别是在集成电路中。

应该指出，负反馈所提供的增益稳定性不仅仅是对时间的稳定性。负反馈同时还减小了增益随环境条件(如温度)、随器件生产的离散性、随频率、随信号大小等的变化。

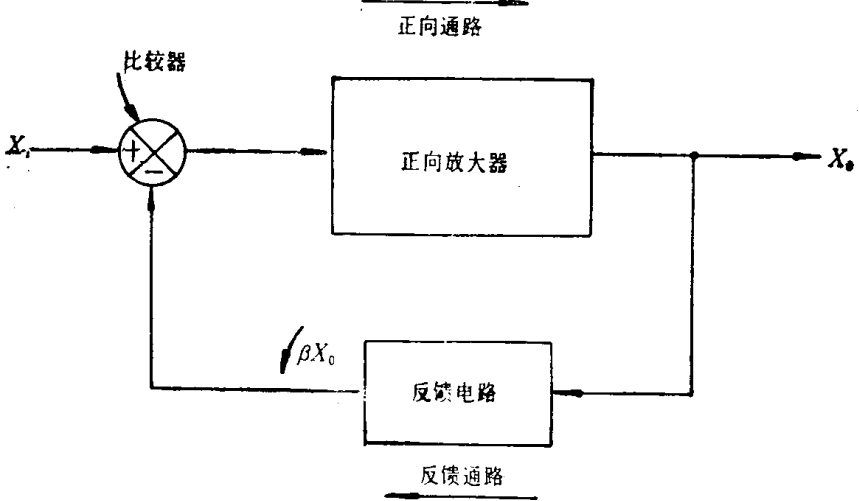


图1.2 反馈放大器系统工作原理图

显然，由图1.2可以看出如果输出信号的 β 倍与输入信号相加，则总增益提高。这种反馈叫正反馈。

在电子管放大器的早期发展过程中，正反馈被用于提高增益。可是电子管不但价格昂贵而且性能较差。

电子管放大器的一个严重问题在于由非线性引起的信号失真(晶体管也存在同样问题),即增益随电子管信号大小的变化而变化。1927年,H·S·布莱克首次建议采用负反馈以减小电子管放大器的信号失真。这项发现今天看来意义深远,它导致了工程上的巨大进步,并被生物学家、经济学家等广泛运用于各自的研究领域。然而,由于晶体管可以廉价地提供高增益而不能提供高稳定性,所以负反馈思想在电子工程中运用十分普遍。通过本书我们可以看到,负反馈不仅稳定了增益,而且还有另外一些优点。比如能控制输入电阻和输出电阻,扩展频带宽度等等。

第二章我们分析了反馈放大器的一般性质及负反馈的一些主要优点。对多路反馈系统的分析也作了介绍。

在将这些思想运用于放大电路的第四章、第五章之前,第三章对无反馈放大电路的有关性质也作了一定描述,包括电压及电流增益的计算、多级放大、输入和输出阻抗及频率响应等。

第四章解释了负反馈用于放大器的四种基本方法,并分析了一些例子;给出的简单处理方法是对负载效应可以忽略的情形而言的。

第五章阐述了计入负载效应以后反馈电路的处理方法,同时还讨论了反馈放大器的频率响应。这节内容较深,初学时可以省略。

本书其余部分讨论的是运算放大器电路。在早期的模拟计算机中,这种放大器被用于根据模拟电压进行不同的数学运算(参阅第八章)。运算放大器即由此而得名。早期的运算放大器由电子管构成,但由于价格昂贵,应用受到了限制。20世纪60年代硅材料集成电路的发展使价格便宜、增益很高的运算放大

器得以大量生产。今天,带有负反馈的运算放大器被广泛运用,在模拟测试、通信中起着不少作用。

第六章解释了运算放大器的性质及其运用,利用了理想运放的概念。

虽然运放的特点十分接近于理想运放,但它的一些缺陷仍不可忽视。第七章描述了运放的非理想性质,解释了与之相应的解决方法。

第八章给出了一些较为复杂而有一系列应用的运放电路,并进一步阐述了运放的原理。

各章的顺序采用了循序渐进、由浅入深较适合于初学者的逻辑顺序。读者也可先学习运放电路,而后学习分立元件晶体管电路。采用这种顺序时应在学完其它章节后再学习第二、第四和第五章。

第二章 反馈放大器的一般性质

§2.1 基本定义和方程

图2.1所示为一个反馈系统。图中标出了各种电信号。本书中所有系统均为电系统，信号为电流和电压。但是需要记住的是反馈也可运用于其它系统之中，信号可以是速度、资金流动、产值等等。在正向通路中，方块A代表放大器，其输出 x_o 等于放大器输入信号 x_{ia} 乘以正向增益常数A。增益常数通常很大，它既可以为正也可以为负(后者使正弦信号反相)。一般说来，它是信号频率的复函数。放大器的输出 x_o 同时也是反馈系统的输入，加于反馈网络 β 。反馈网络输出反馈信号 x_f ，它等于系统的

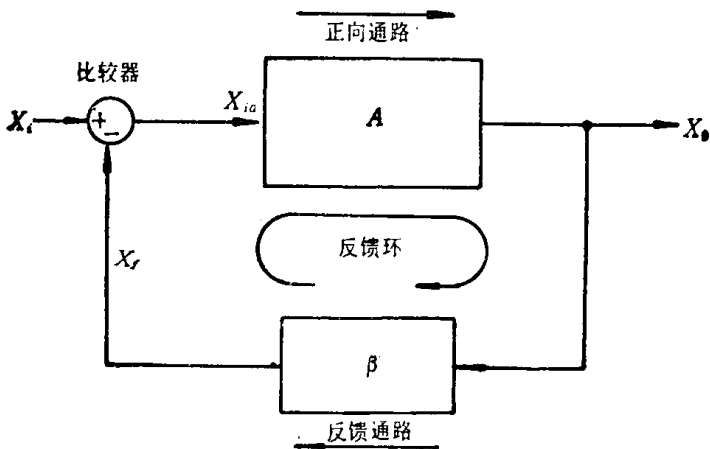


图2.1 反馈系统中的信号流通图

输出乘以反馈系数 β (不要和晶体管的电流放大倍数 β 混淆)。反馈系数通常很小,和常数 A 一样,它可以为正、为负或者是信号频率的复函数。比较器从系统输入信号 x_i 中减去反馈信号 x_f ,而后作为放大器输入 x_{ia} 。

实际应用中,电子放大器可以利用一个包含放大元件,例如用双极型晶体管或场效应管的简单放大电路来构成,或者可以通过这种简单电路的组合而得到,也可以采用集成电路。放大电路的类型很多,反馈网络也可以通过许多渠道得到。此外,将反馈信号与系统输入信号进行比较的方法也不止一种。其种种可能的方式将在第四章中予以说明。本章考虑的只是负反馈系统的一般性质。

在分析反馈系统时,必须首先得出引入反馈后输入信号 x_i 和输出信号 x_o 之间的关系。由此可以得出反馈系统的另外一些性质。

由图2.1可以看出下面的三个方程给出了各信号之间的相互联系:

$$\text{对反馈网络而言} \quad x_f = \beta x_o \quad (2.1)$$

$$\text{对比较器而言} \quad x_{ia} = x_i - x_f \quad (2.2)$$

$$\text{对放大器而言} \quad x_o = A x_{ia} \quad (2.3)$$

为了得到总的输入 x_i 和输出 x_o 之间的关系,必须从这组公式中消去中间信号 x_f 和 x_{ia} 。将式(2.1)代入式(2.2),对比较器而言得到

$$x_{ia} = x_i - \beta x_o \quad (2.4)$$

然后,将式(2.4)代入式(2.3),得到

$$x_o = A(x_i - \beta x_o)$$

所以

$$x_o(1 + A\beta) = Ax_i$$

由此

$$x_0 = \frac{A}{1 + A\beta x_i}$$

比值 x_0/x_i 称作反馈增益 A_f ，也称闭环增益。由上式可得

$$A_f = \frac{x_0}{x_i} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (2.5)$$

这是基本的反馈关系式。无反馈增益 A 称作开环增益。

可见，反馈的结果是正向增益除以 $(1 + A\beta)$ 。

读者利用上述结果，还可以推导出：

$$x_f = \frac{A\beta}{1 + A\beta} x \quad \text{和} \quad x_{ia} = \frac{1}{1 + A\beta} x_i \quad (2.6)$$

下面再考虑图2.1中包含正向放大器、反馈环节及比较器的反馈网络。假设系统输入不存在， $x_i=0$ ，同时反馈环在任一点被临时断开，比如说在反馈网络的输出端，如图2.2所示。如果一假想信号被加于 x_f 点，则比较器的输出为 $-x_f$ （见图2.1，令 $x_i=0$ ）。这个信号通过增益为 A 的正向放大器，在输出端出现的数值为 $-Ax_f$ ，然后流入反馈网络。反馈网络将该信号乘以 β 得

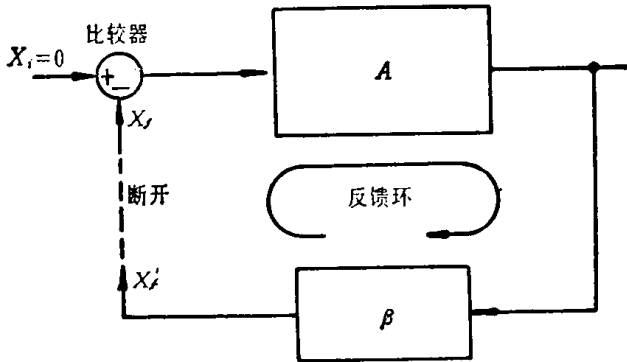


图2.2 断开反馈环以得到环路增益的示意图

到开环反馈信号 $x'_f = -A\beta x_f$ 。在环绕反馈环的过程中，假想的输入信号 x_f 乘以 $-A\beta$ ，这个因子称作环路增益。所以

$$\text{环路增益} = -A\beta \quad (2.7)$$

这里要指出的是，如果 $A\beta$ 的数值远大于1，则闭环增益近似等于 $1/\beta$ 。所以闭环增益与正向放大器的性质无关。事实上，我们可以证明不论从哪一点断开，所得到的环路增益有同样形式的表达式。

为总结这段内容，我们再次给出重要结论

$$\text{闭环增益} = \frac{\text{正向增益}}{1 - \text{环路增益}}$$

即
$$A_f = A/(1 + A\beta) \quad (2.8)$$

§2.2 负反馈和正反馈

现在我们可以很容易地给出负反馈和正反馈的定义了。如导言所述，如果系统的输入信号被减去反馈信号而数值下降时，则这种反馈称为负反馈。式(2.6)是用输入信号 x_i 表示的比较器输出信号 x_{ia} 的表达式。可见当 $|1 + A\beta|$ 大于1时，便是负反馈。将此式运用于基本反馈关系式(2.8)，就可看出对负反馈而言，反馈增益小于正向增益。正反馈则与此相反。所以负反馈和正反馈的定义同样可以由不同量的数值大小给出，如表2.1所示。

表2.1 负反馈和正反馈的等效定义

负反馈	正反馈
$ x_{ia} < x_i $	$ x_{ia} > x_i $
$ 1 + A\beta > 1$	$ 1 + A\beta < 1$
$ A_f < A $	$ A_f > A $

由式 $(1 + A\beta)$ 可以看出负反馈或正反馈的存在取决于正向增益 A 和反馈系数 β 的特定值。这里有几种可能性。对正向增益 A 的某一特定值，我们考虑当反馈系数作正负变化时闭环增益 A_f 的情况。图2.3绘出了基本反馈关系式的图象。虽然曲线是对 A 取正值而言的，但我们还是考虑 A 取正负值两种情况下曲线的五个区域。

区域(i)： $A\beta > 0$ (负反馈)。

在这个区域内 $(A\beta)$ 为正，所以 $|1 + A\beta| > 1$ ，说明反馈为负。随着 β 的增大，因子 $(1 + A\beta)$ 增大，负反馈增强，所以闭环增益下降。随着 β 的下降，闭环增益数值增大。当 $\beta = 0$ 时，因子 $|1 + A\beta|$ 等于1。基本反馈关系式指出此时闭环增益等于开环增益，即 $A_f = A$ 。这是可以预料的，因为如果 $\beta = 0$ 也就是说反馈根本不存在。

区域(ii)： $-1 < A\beta < 0$ (正反馈)。

在这个区域内，环路增益 $(-A\beta)$ 为正， $|1 + A\beta| < 1$ ，因而说明反馈为正。从反馈基本关系式可以看出闭环增益的数值大于开环增益。如果 β 变化使 $A\beta$ 趋于 -1 ，则 $|1 + A\beta|$ 变得极小，而闭环增益无限增大。

区域(iii)： $A\beta = -1$ (增益无穷大，正反馈)。

这一点上环路增益等于 $+1$ ， $|1 + A\beta| = 0$ 。基本反馈关系式指出，此时 A_f 数值趋于无穷大 $(A_f \rightarrow \infty)$ 。将增益关系式 $x_0 = A_f x_i$ ，反过来，则得 $x_i = (A_f)^{-1} x_0$ 。所以 $A_f \rightarrow \infty$ 说明由零输入信号可以得到一定的输出 x_0 。重新考虑图2.2，环路增益准确为1，说明 $x_f' = x_f$ 。所以一旦回路被接通，则系统中的任一信号均能永远环流下去，且幅度保持恒定。结果反馈系统不是一个信号放大器，而是信号发生器。这是反馈放大器的一个特例。它可以在正弦波振荡器中得到应用。

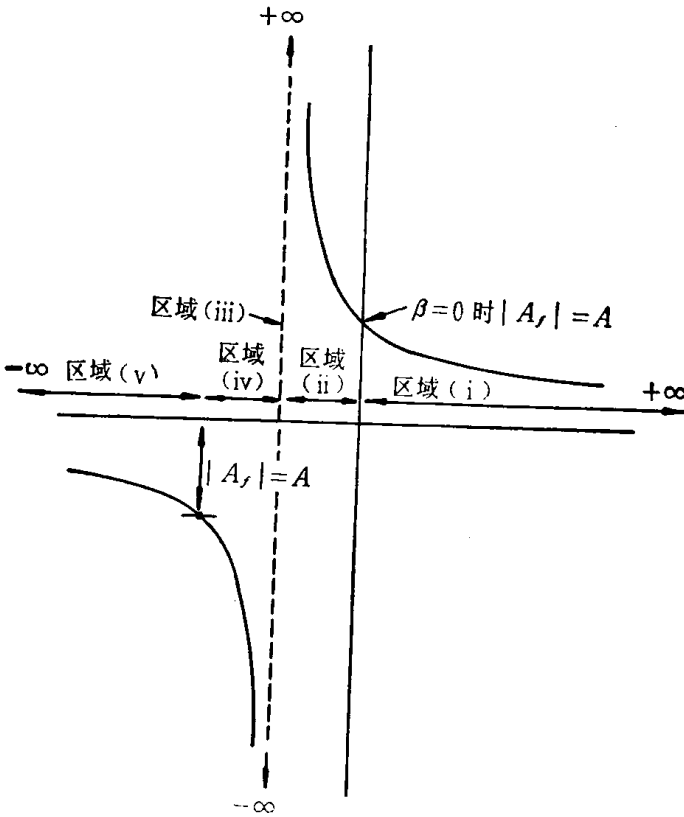


图2.3 表示不同区域的基本反馈方程的图形

区域(iv): $-2 < AB < -1$ (正反馈, 通常不够稳定)。

AB 值在 -1 以下, 并继续向负方向增大, 则环路增益上升且大于 1 。于是信号沿反馈环环流, 且通常幅度无限制地不稳定增大, 直到放大器不能承受这样大的信号为止。这种性质称为放大器的不稳定性, 是我们所不期望的。

区域(v): $AB < -2$ (负反馈, 通常不稳定)。

在此区域内, $(1 + AB) < -1$, 故 $|1 + AB| > 1$ 。可见反馈为负(见表2.1)。但是, 如前面讨论的区域(iv), 由于该区域内环路增益大于 1 , 可以估计该系统是不够稳定的。

从最后两个区域可以得出结论:如果环路增益为大于1的正值,则由于信号环流于反馈环且不断增大,它必然导致反馈系统不稳定。不过,在某些特殊情形下,系统稳定也是有可能的(但实际应用极少)。这一问题留在第五章再讨论。

讨论至此,我们均假设反馈系统的参数 A 和 β 为正或负实数。信号 x_i 、 x_o 和 x_f 若为正弦信号则要么同相,要么反相。实际上,与输入信号相比,放大器和线性网络的输出信号不仅在数值上,而且在相位上也不相同。它们可以表示为频率的函数(原因下章讨论,这里不必考虑)。所以放大倍数 A_f 现在可以写成复变量 \dot{A}_f 。它既可以表示成模和相角两部分,也可以表示成实数部分和虚数部分。

到目前为止,我们对反馈系统的实数分析几乎完全可以用于复数分析。只要把各个变量分别用复变量替换,再运用复数运算法则即可。例如,基本反馈式(2.8)可以写为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\beta} \quad (2.9)$$

负反馈和正反馈的定义相应地写为

$$\begin{aligned} |1 + \dot{A}\beta| > 1 & \quad \text{负反馈} \\ |1 + \dot{A}\beta| < 1 & \quad \text{正反馈} \end{aligned} \quad (2.10)$$

这里绝对值符号被用来表示其内部复数的模。

前面所讨论的内容中,复数形式下唯一不完全适用的地方是图2.3中讨论的几个稳定区域。该图中 A 和 β 均假定为正或负实数,相移为 0° 或 180° 。对于复数 A 和 β 该图不存在。这时关于放大器稳定性和不稳定性的讨论,需要用另一种方法来讨论(详见第五章)。

例2.1 一个标称增益为1000的放大器被用于某反馈电路

中，以获得数值等于10的闭环增益。计算反馈系数 β 的值。如果在使用中，该放大器的增益变为 $A=900\angle-30^\circ$ ，试计算实际得到的闭环增益。

解 对前一部分来说，闭环增益不论为+10或-10均能满足闭环增益等于10的要求。将数值代入基本反馈关系式(2.8)，得到

$$\pm 10 = \frac{1000}{1 + 1000\beta}$$

解之得 $\beta = +0.099$ 或 -0.101 。后者使 $-A\beta = +101$ 。这与图2.3的区域(V)相对应。通常它会导致放大器的不稳定，所以 β 的这种取值应予以舍弃。于是选 $\beta = +0.099$ ，闭环增益为+10。

实际应用下 $A=900\angle-30^\circ$ ，将 A 代入式(2.8)，得到

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{900\angle-30^\circ}{1 + (900\angle-30^\circ)(0.099)} = \frac{900\angle-30^\circ}{1 + 89.1\angle-30^\circ} \\ &= \frac{900\angle-30^\circ}{1 + (77.16 - j44.55)} = \frac{900\angle-30^\circ}{78.16 - j44.55} \\ &= \frac{900\angle-30^\circ}{89.96\angle-29.68^\circ} \end{aligned}$$

所以 $A_f = 10.004\angle-0.32^\circ$

可见尽管 A 的数值和相位都有了变化，但是其结果仍然接近于+10值。这是可以预料的。因为 $A\beta \gg 1$ ，闭环增益几乎于 A 无关。需要特别指出的是，由于反馈系数 β 的相角为零，尽管 A 的相角很大，但 A_f 的相角仍然很小。

在结束本节之前应该指出，图2.1所示的比较器的输出为外加信号与反馈信号之差。有的书本介绍比较器将这两个信号相加，如图2.4所示。从图2.4可以看出，比较器的负号可以改变

成正号，而对整个系统不产生影响，只要相应地将 x_f 和 β 变为 $-x_f$ 和 $-\beta$ 就可以了。就是说只要将各方程中出现的 β 和 x_f 改变符号，则图 2.1 的分析可同样运用于图 2.4。于是， $1 - A\beta$ 代替了基本关系式中的 $1 + A\beta$ 。为一致性起见，本书中讨论的反馈全部按照图 2.1 的形式。

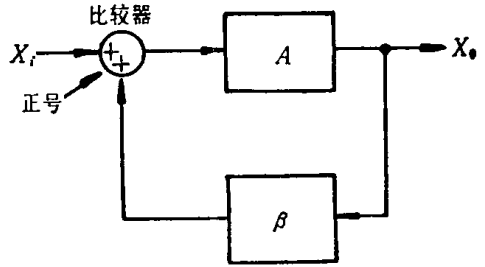


图2.4 比较器的另一种表示法

§2.3 增益稳定性的提高

在实际运用中，正向放大网络的增益 A 可能会偏离标称值。导致这种情况的原因可能有多种。例如构成放大器的有源元件和无源元件会随着温度和时间的变化而变化，或者由于受到放大器的电源电压变化的影响。通常，增益总是要或多或少地偏离其标称值。因为生产出来的有源元件如双极性晶体管，不可能特性完全一致。

由前面的例题我们可以看出，即使正向放大器的增益为 $900 \angle -30^\circ$ 而不是 $1000 \angle 0^\circ$ ，闭环增益的结果 $10.004 \angle -0.32^\circ$ 仍然非常接近于需要值 $10 \angle 0^\circ$ 。很显然，这是我们所期望的。但它是否为负反馈的一般性质呢？为了回答这个问题，首先要给出下面几个定义：

设正向增益有一个很小的变化 dA ，则 A 的相对变化为 dA/A ；设变化量 dA 引起闭环增益一个很小的变化 dA_f ，则 A_f 的相对变化量为 dA_f/A_f 。为了说明反馈的效果，我们考虑 A 的相对变化所引起的 A_f 的相对变化量。联系此二者的参量称作灵敏度参数