

文章编号:1672-058X(2012)02-0073-06

关于反馈电路的几个概念问题

陶希平

(厦门理工学院 电子与电气工程系,福建 厦门 361024)

摘要:针对目前大多数教材中对反馈问题的论述,结合多年的教学体会,就反馈的一般表达式、反馈极性的定义及自激振荡问题等重要的概念,从教材体系安排、前后内容衔接等方面提出了调整的思路,并对这些重要的概念给出了更有利于学生理解的说明,以达到化解难点、利于教学的目的。

关键词:负反馈放大器;一般表达式;极性定义;自激振荡

中图分类号:O371

文献标志码:A

反馈在电子技术中得到了广泛的应用,在各种电子设备中,人们经常采用反馈的方法来改善电路的性能,以达到预定的指标。但是对反馈的一些基本概念、反馈的规律和分析方法,往往又是学生们比较难以理解的。因此,在电子技术基础课程的教学,反馈既是重点又是难点,把这一部分内容处理好,对于整个课程教学质量的提高是很有意义的。

1 关于反馈的一般表达式

目前的大多数教材,在分析负反馈放大器时,大都以图 1 所示的带有相减环节的基本放大器和反馈网络组成的闭合环路为基础,由输入回路方程 $\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f$ 推导出它的闭环增益表达式:

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (1)$$

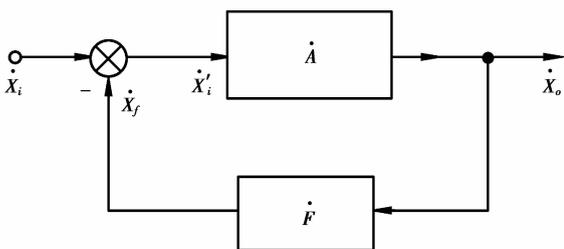


图 1 采用相减比较环节的反馈电路方框图

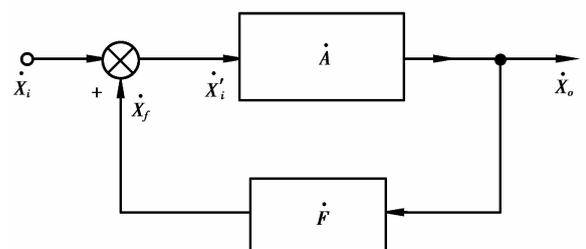


图 2 采用相加比较环节的反馈电路方框图

而在分析振荡器时,又以图 2 所示带有相加环节的由 \dot{A} 网络和 \dot{F} 网络组成的闭合环路为基础,由输入回路方程: $\dot{X}'_i = \dot{X}_i + \dot{X}_f$, 导出 \dot{A}_f 的一般表达式为:

收稿日期:2011-05-12;修回日期:2011-06-10.

作者简介:陶希平(1956-),男,副教授,甘肃平凉市人,从事电路与系统研究.

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 - \dot{A}\dot{F}} \quad (2)$$

比较式(1)与式(2)可以看出,分母中第二项相差一个符号,这样,在区分反馈的极性、判断自激振荡的条件时都将差一个符号,或相位相差 180° 。由于在目前的教材体系中,均是先讲反馈后讲振荡,在讲完负反馈后,在引出正反馈或振荡的概念时,往往要指出振荡的实质就是反馈信号 \dot{X}_f 的幅度、相位均与净输入信号 \dot{X}'_i 相同,因此可以取代输入信号 \dot{X}_i ,而维持输出信号 \dot{X}_o ,放大器转化为振荡器^[1,2]。对此,学生一般难以理解,往往会有这样的提问:由 $\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f$ 看出,正反馈时 \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 相位应该是相反的,为什么现在又说它们的相位相同,而且 \dot{X}_f 可以取代 \dot{X}_i 呢?问题就出在两种比较环节及其引用,在学生学学习相加环节的概念以前,这个问题难以讲清,学生也难以理解。

在教学过程中,如何科学的处理教材、安排内容,尽可能减少学生理解上的困难呢?考察两种比较环节可知,它们的区别仅是所设定的 \dot{X}_f 正方向不同,若所设的 \dot{X}_f 的正方向使: $\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f$,就是所谓的相减环节;若所设的 \dot{X}_f 的正方向使: $\dot{X}'_i = \dot{X}_i + \dot{X}_f$,就是所谓的相加环节,两者并无实质上的区别。而正方向的假设是任意的,仅以方便为原则。^[3]因此,在同一本教材及同一门课程的教学过程中,可以避免两种比较环节的概念,而这个概念并不是必须的。也就是说,自始至终采用同一种比较环节,即所假设的 \dot{X}_f 的正方向始终不变,这样有利于减少初学时容易产生的概念上的混乱。当学生真正理解了一种比较环节后,再在其他课程中接触到另一种比较环节时,也就比较容易接受了。

在电子技术基础课程的教学过程中,针对学生初次接触反馈概念这一情况,究竟采用哪一种比较环节好呢?认为以采用相加环节为宜。原因在于:

其一,在讲授反馈概念时,以下的提法比较容易接受,若反馈信号 \dot{X}_f 与输入信号 \dot{X}_i 相位相同,就能使净输入信号 \dot{X}'_i 加强,这样的反馈为正反馈;若 \dot{X}_f 与 \dot{X}_i 相位相反,就能使 \dot{X}'_i 减弱,这样的反馈为负反馈。而在相加环节的输入回路方程 $\dot{X}'_i = \dot{X}_i + \dot{X}_f$ 中,刚好满足这样的关系。

其二,在讲授振荡概念时,这样的提法比较容易理解,若 \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 幅度相等,相位相同,则当无输入信号即 $\dot{X}_i = 0$ 时, \dot{X}_f 可以代替 \dot{X}_i 维持 \dot{X}'_i ,从而维持 \dot{X}_o ,反馈放大器变为振荡器,而相加环节的输入回路方程 $\dot{X}'_i = \dot{X}_i + \dot{X}_f$,正好说明了这个问题。

反观相减比较环节,由于其相位关系与相加比较环节相反,因此学生较难理解。所以,采用相加环节,可使学生更容易接受,更有利于理解反馈及振荡的概念及其物理实质。然而,目前的多数教材,在反馈及振荡内容中分别采用了两种不同的比较环节,这样的安排并不利于教和学。

2 关于反馈极性的定义

目前的大多数教材对于反馈极性的定义,在一开始介绍反馈的基本概念和分类时,采用的提法是:若引入反馈后,能使 \dot{X}'_i 加强,从而使放大倍数提高,则为正反馈;若引入反馈后,能使 \dot{X}'_i 减弱,从而使放大倍数降低,则为负反馈。这种提法,在概念上完全正确,学生也容易理解。可是,在引出反馈的方框图及一般表达式后,教材往往又根据式(1)进一步对反馈的极性下定义,而有的定义中的某些内容在概念上似有欠妥

之处。

比如,有的教材根据式(1)所作的定义是,若反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$, $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$, 为负反馈;若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$, $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$, 则为正反馈;若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 1$, $|\dot{A}_f| = |\dot{A}|$, 则反馈效果为零;若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$, $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$, 此时无输入也有输出,产生自激振荡。不难看出,在这里是以反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 作为区分反馈极性的依据的。

认为这种定义和解释是不甚妥当的,因为在某些情况下将造成概念上的错误。实际上,反馈信号 \dot{X}_f 对净输入信号 \dot{X}'_i 究竟是起增强还是减弱作用,完全取决于两者之间的相位关系,在相减环节中,若 \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 反相,则起增强作用,为正反馈;若 \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 同相,则起减弱作用,为负反馈。由于:

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}},$$

$$\dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}'_i, \quad \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}'_i} = \dot{A}\dot{F},$$

$$\angle \dot{X}_f - \angle \dot{X}'_i = \angle \dot{A}\dot{F}.$$

故由以上表达式可以看出, \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 的相位关系是由环路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 决定,而不是由反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 决定的,因此,定义反馈极性的依据应当是 $\dot{A}\dot{F}$, 而不应当是 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 。^[4] 据此,由以上各式可知:

(1) 当环路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 为正实数即 $\dot{A}\dot{F} > 0$ 时, \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 同相位,为负反馈,此时 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$, 且 \dot{A}_f 与 \dot{A} 同相位。

(2) 当 $\dot{A}\dot{F}$ 为绝对值小于1的负实数,即 $-1 < \dot{A}\dot{F} < 0$ 时, \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 相位相反,为正反馈,此时 $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$, 且 \dot{A}_f 与 \dot{A} 同相位。

(3) 当 $\dot{A}\dot{F} = -1$ 时, $\dot{X}_f = -\dot{X}'_i$, 即 \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 幅度相等,相位相反,此时若 $\dot{X}_i = 0$, \dot{X}_f 经相减比较后,与 \dot{X}'_i 幅度相等且相位相同。可以取代 \dot{X}_i 维持 \dot{X}_o , 即无输入有输出,为自激振荡,因此, $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$ 。

(4) 当 $\dot{A}\dot{F}$ 为绝对值大于1的负实数,即 $\dot{A}\dot{F} < -1$ 时, \dot{X}_f 经相减比较后,不仅与 \dot{X}'_i 相位相同,且它的幅度也比 \dot{X}'_i 的幅度大,即 $|\dot{X}_f| > |\dot{X}'_i|$, 使 $|\dot{X}_o|$ 不断增大,产生增幅自激振荡。可见, $\dot{A}\dot{F} < -1$ 实际上就是自激振荡稳定前的过渡过程。由式(1)可以看出,此时 \dot{A}_f 与 \dot{A} 相位相反。也就是说, \dot{A}_f 与 \dot{A} 相位相反,表明电路中有自激振荡,而自激振荡是由正反馈引起的,因此 \dot{A}_f 与 \dot{A} 相位相反表明电路中有正反馈。

(5) 当 $\dot{A}\dot{F} = 0$ 时, $\dot{X}_f = 0$, 无反馈, $\dot{A}_f = \dot{A}$ 。

在上面所讨论的第4种情况中,若 $\dot{A}\dot{F} < -2$, 则有 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$, 如果依据 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 对反馈极性进行定义,应为负反馈,而实际上,由上面的讨论可知,此时虽 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$, 但 \dot{A}_f 与 \dot{A} 的相位相反,电路产生增幅自激振荡,反馈的极性应为正反馈,把它定义为负反馈,显然是错误的。产生这个错误的原因就在于把 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$

作为区分反馈极性的依据,结果只注意到了 \dot{A}_f 与 \dot{A} 的幅度之间的关系,而忽略了它们之间的相位关系。^[5]

类似的,对于相加比较环节,可以得到如下分析结论:

当 $\dot{A}\dot{F} < 0$ 时, \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 相位相反,为负反馈,此时 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$,且 \dot{A}_f 与 \dot{A} 同相位。

当 $\dot{A}\dot{F}$ 为小于1的正实数,即 $0 < \dot{A}\dot{F} < 1$ 时, \dot{X}_f 与 \dot{X}'_i 同相位,为正反馈,此时 $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$,且 \dot{A}_f 与 \dot{A} 同相位。

当 $\dot{A}\dot{F} = 1$ 时, $\dot{X}_f = \dot{X}'_i$,此时若 $\dot{X}_i = 0$, \dot{X}_f 可以取代 \dot{X}_i 维持 \dot{X}_o ,即无输入有输出,为自激振荡。

当 $\dot{A}\dot{F} > 1$ 时, \dot{X}_f 不仅与 \dot{X}'_i 相位相同,且它的幅度也比 \dot{X}'_i 的幅度大,使 $|\dot{X}_o|$ 不断增大,产生增幅自激振荡。此时 \dot{A}_f 与 \dot{A} 相位相反。

当 $\dot{A}\dot{F} = 0$ 时, $\dot{X}_f = 0$,无反馈, $\dot{A}_f = \dot{A}$ 。^[6]

对于以上分析的情况,若以开环增益 $|\dot{A}|$ 为基准(即 $|\dot{A}| > 0$),可分别绘出相减和相加比较环节情况下, $|\dot{A}_f|$ 随 $|\dot{A}\dot{F}|$ 变化的情况如图3、图4所示。从图3、图4中可以看出,反馈由负变为无,再变为正,其分界点在 $|\dot{A}\dot{F}| = 0$ 处。在正反馈中, $|\dot{A}\dot{F}| = -1$ (图3相减比较环节)及 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ (图4相加比较环节)是自激与否的分界点。可见, $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$,未必是负反馈,因为增幅自激振荡也属于这种情况,而究竟是负反馈还是自激振荡,则还要看 $|\dot{A}_f|$ 与 $|\dot{A}|$ 的相位是否相同才能确定。

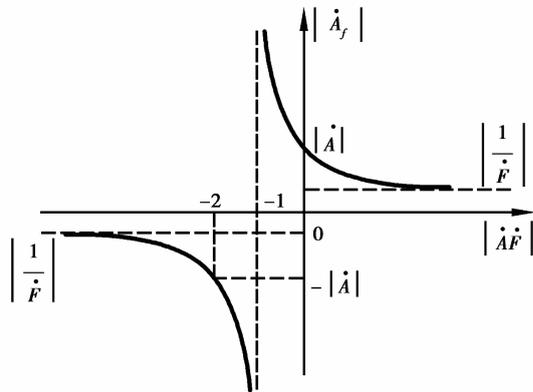


图3 相减比较环节 $|\dot{A}_f|$ 随 $|\dot{A}\dot{F}|$ 的变化情况

由以上分析可以看出,用反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 作为定义反馈极性的依据,有可能出现概念上的混乱和错误,而改用环路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 作依据,则可以避免这些混乱和错误^[7,8]。

3 关于自激振荡问题

在电子技术课程的教学内容中,分别在负反馈放大电路和正弦波振荡电路中涉及到自激振荡问题,而目前的大多数教材对这一内容的处理,有进一步探讨的必要。认为在教学过程中,以下两点需要给以足够的重视,以减少学生理解上的困难。

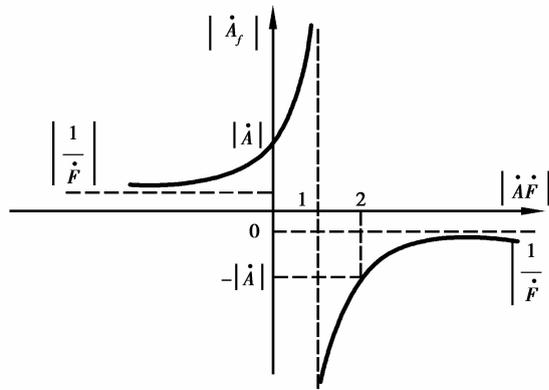


图4 相加比较环节 $|\dot{A}_f|$ 随 $|\dot{A}_F|$ 的变化情况

3.1 自激振荡的相位问题

在放大电路的级间加负反馈,信号的相移可能使负反馈放大电路工作不稳定,产生自激振荡。在分析负反馈放大器时,若采用相减环节,则可得负反馈放大器中产生自激振荡的条件为: $\dot{A}\dot{F} = -1$ 。

其中振幅平衡条件为: $|\dot{A}\dot{F}| = 1$,相位平衡条件为: $\varphi_a + \varphi_f = (2n+1)\pi (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。

在分析正弦波振荡器时,多数教材采用相加环节,从而得到它的自激振荡条件为: $\dot{A}\dot{F} = 1$ 。

其中振幅平衡条件亦为 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$,相位平衡条件为: $\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。

这里,自激振荡相位条件差一个负号,或者说相位平衡条件差 180° 。产生这个差别的原因仅是所采用的比较环节不同。因此,这个差别恰恰说明,不管是在负反馈放大器中由于附加相移而造成的自激振荡,还是正弦波振荡器中人为地引入正反馈所产主的自激振荡,其物理本质是相同的。 \dot{X}_f 经比较后与原来的 \dot{X}'_i 幅度相等、相位相同,因此可以取代 \dot{X}'_i 而维持 \dot{X}_o 。因为本质相同,所以自激振荡的条件在实质上也是相同的。而前面所看到的差别,仅是形式上的差别。如果采用相同的比较环节,那么这个形式上的差别也就没有了。

既然负反馈电路中的自激振荡和正弦波振荡本质是相同的,那么,现行大多数教材中,对其振荡条件的推导,无论是从负反馈的角度出发(采用相减环节),还是从正反馈的角度出发(采用相加环节),进而得出不同的相位条件这样的体系安排,就显得不太恰当,人为地造成了学生学习上的困难。此点也说明了在同一教材中,前后采用同一比较环节的必要性。

3.2 自激振荡的振幅问题

现行的大多数教材中,在讨论反馈的极性时,大都给出以下说法:

若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$, 则 $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$, 即在没有输入信号时,也会有输出信号,这种现象称为自激振荡, $\dot{A}\dot{F} = -1$ 为自激振荡条件。而在后面介绍正弦波振荡电路时又给出了自激振荡起振的振幅条件为 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$, $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 只是维持振荡的条件。如果 $|\dot{A}\dot{F}|$ 一直保持为 1, 那么信号不能放大, 电路是不可能起振的。只有 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 时, 才能够把信号不断地进行放大, 振荡才能够建立。这样前后似乎不尽一致的论述, 容易造成学生理解上的困难。

实际上,结合前面的分析可知,对于相减比较环节,当 $\dot{A}\dot{F} > 1$ 时,为负反馈,当 $\dot{A}\dot{F} < -1$ 时,电路产生增幅自激振荡;对于相加比较环节,当 $\dot{A}\dot{F} > 1$ 时,产生增幅自激振荡,当 $\dot{A}\dot{F} < -1$ 时,为负反馈。因此,在满足

相位条件时,振幅起振条件 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 是学生容易理解的。

但是,对于相减比较环节 $\dot{A}\dot{F} = -1$ 及相加比较环节 $\dot{A}\dot{F} = 1$ 时的情况,必须强调此时 $|\dot{X}_f| = |\dot{X}'_i|$ 电路处于增幅自激振荡后的稳幅振荡状态。目前的大多数教材,对此点说明较少,故教学中应辅以充分的解释。

参考文献:

- [1] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001
- [2] 康华光. 电子技术基础模拟部分[M]. 北京:高等教育出版社,1999
- [3] 文国富. 反馈放大电路再讨论[J]. 广西民族学院学报:自然科学版,2003,9(1):19
- [4] 李永安. 负反馈放大器闭环特性的再研究[J]. 电气电子教学学报,2004,26(3):31
- [5] 陈光红.《模拟电子技术》课程中“反馈”的教学设计[J]. 苏州市职业大学学报,2009,20(2):87
- [6] 魏金成. 反馈放大电路教学方法的探讨[J]. 高等教育研究,2008,25(1):30
- [7] 罗毅. 电子电路中反馈放大器类型的快速判断方法[J]. 湖北第二师范学院学报,2009,26(2):45
- [8] 杨一军. 负反馈放大电路的理论计算与仿真[J]. 淮北煤炭师范学院学报:自然科学版,2009,30(1):38

On Several Concepts of Feedback Circuit

TAO Xi-ping

(Department of Electronics and Electrical Engineering, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: According to the elaboration on feedback question in majority of textbooks, based on many years teaching experience, the author proposes teaching ideas on the important concepts such as general expression of feedback, the definition of feedback polarity, self-excited oscillation and so on from their textbook arrangement and contents combination, and gives explanations to these important concepts more beneficial to be understood by students so as to attain the goal of solving problems and benefiting teaching.

Key words: negative feedback amplifier; general expression; polarity definition; self-excited oscillation

责任编辑:代小红

校对:田静