

反馈放大器的 稳定性理论及应用

杨孟琢

高等教育出版社

内 容 提 要

本书论述各种类型的多级反馈放大器和集成电路组成的运算放大器的稳定性理论。在反映该领域最新进展的同时,重点介绍作者建立的数值判据法,并以集成电路组成的运算放大器为主要对象进行讨论。

全书除绪论外共有七章。分别是:放大电路的模型,开环与闭环频率响应,闭环系统的稳定性,数值判据法高频稳定性理论,数值判据法低频稳定性理论,闭环系统的品质及校正,应用举例。各章附有小结,书末还有主要参考文献目录和常用名词术语汉英对照索引。

本书蒙顾了与教科书有关内容的配合,因此也可作为教学参考书。

本书可供电工学与电子学教师、电子技术专业的教师、研究生与高年级学生以及从事电子技术工作的工程技术人员参考。

〔京〕 112 号

反馈放大器的 稳定性理论及应用

杨孟琢

*

高等教育出版社出版
新华书店总店北京科技发行所发行
高等教育出版社激光照排技术部照排
高等教育出版社印刷厂印装

*

开本 787 × 1092 1/32 印张 11.125 字数 240 000

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数 0 001 — 2 415

ISBN 7 - 04 - 003351 - 8 / TM · 172

定价 5.70 元

前 言

在实用电子线路中,各种类型的多级反馈放大器,特别是集成电路组成的运算放大器得到了广泛的应用。如果把几年前的教科书与目前出版的教科书加以对照,就可以发现反馈放大器的稳定性理论是发展较快的部分之一。这无疑是一个可喜的进步。但是,有两点还令人感到不足。其一是仍跟不上当前科技发展的形势;其二是至今都在采用自动控制理论中的传统方法来解决反馈放大器的动态分析与设计问题。由于传统方法的局限性,应用起来会感到不便。

作者在密切注意该领域最新动态的同时,以该类反馈放大器为对象,基于自动控制理论,对其稳定性与相对稳定性理论进行了研究,建立了一种新的理论和方法——数值判据法。部分成果已公开发表。后来又在全国和北京的学术会议上报告了这些成果,广泛征求了一些专家和同行的意见,特别是清华大学童诗白教授给予了许多指正。同时,作者把这一成果用于解决常规心电图仪的设计问题,取得了满意的结果。最后,童诗白教授等五位专家对该成果进行了鉴定,肯定了其开创性和实用性。以上内容曾编写了讲义,对清华大学有关专业的研究生讲授。

汇集了该领域的最新研究成果,重点对数值判据法进行了总结和提高,并引入作者据此解决常规心电图仪设计问题的实例,遂成此书。本书对下述三个方面着重加以考虑。第一,着重讨论该类反馈放大器的动态理论问题,特别是从时域与频域理论的结合上来论述这些问题。第二,着重讨论数值判据法,介绍作者的研究成果。第三,着重以集成电路组

成的运算放大器为对象来进行讨论。这样安排的目的是力求在一定程度上弥补现有教科书之不足，以便能更好地适应当前科技工作实践的需要。

清华大学杨福生教授审阅了本书初稿，提出了宝贵的修改意见。

在此，谨向童诗白教授、杨福生教授以及在建立数值判据法与本书出版过程中给予支持和帮助的各位同志致以衷心的感谢。

限于作者水平与所论及问题的难度，书中缺点和错误在所难免，敬请读者提出指正。

作者

1988年12月

目 录

绪论	1
第一章 放大电路的模型	4
§1.1 电子线路模型概述	4
1.1-1 电路模型	4
1.1-2 数学模型	6
§1.2 晶体管的电路模型	7
1.2-1 混合 π 型等效电路	7
1.2-2 参数计算	9
§1.3 混合 π 型等效电路的简化及应用	13
1.3-1 简化的混合 π 型等效电路	13
1.3-2 单级放大电路的数学模型	14
1.3-3 多级放大电路的数学模型	20
§1.4 场效应管的电路模型	25
§1.5 集成运放的宏模型	27
1.5-1 集成运放的电路模型	27
1.5-2 集成运放的数学模型	31
本章小结	33
第二章 开环与闭环的频率响应	34
§2.1 闭环系统概述	34
2.1-1 频率响应	35
2.1-2 正反馈与负反馈	37
2.1-3 负反馈对性能的影响	40
2.1-4 反馈的四种组态	42
§2.2 电压并联反馈	43
2.2-1 典型电路	43

2.2-2 电路变换	44
2.2-3 频率响应	46
2.2-4 稳定的闭环系统的分析	47
§2.3 电压串联反馈	50
2.3-1 典型电路	50
2.3-2 电路变换	51
2.3-3 频率响应	52
2.3-4 稳定的闭环系统的分析	54
§2.4 电流串联反馈	56
2.4-1 典型电路	56
2.4-2 电路变换	57
2.4-3 频率响应	59
2.4-4 稳定的闭环系统的分析	60
§2.5 电流并联反馈	62
2.5-1 典型电路	62
2.5-2 电路变换	63
2.5-3 频率响应	65
2.5-4 稳定的闭环系统的分析	66
§2.6 闭环系统的统一形式	68
§2.7 运算放大器的频率响应	69
2.7-1 同相比例运算放大器	70
2.7-2 反相比例运算放大器	76
本章小结	84
第三章 闭环系统的稳定性	86
§3.1 传递函数	86
3.1-1 时域研究方法	86
3.1-2 拉氏变换	89
3.1-3 传递函数	92
§3.2 闭环系统的瞬态响应	95

3.2-1 闭环系统的传递函数	96
3.2-2 一个闭环极点的阶跃响应	99
3.2-3 两个闭环极点的阶跃响应	101
3.2-4 一般闭环系统的阶跃响应	108
§3.3 闭环系统的稳定性	110
3.3-1 稳定性的概念	110
3.3-2 稳态误差	114
§3.4 稳定性的判断	115
3.4-1 稳定的必要条件	116
3.4-2 稳定判据	117
§3.5 频率响应法	121
3.5-1 稳定判据	121
3.5-2 奈魁斯特图法	124
3.5-3 波特图法	128
§3.6 根轨迹法	138
3.6-1 根轨迹绘制规则	138
3.6-2 一个开环极点	142
3.6-3 两个开环极点	144
3.6-4 三个开环极点	146
本章小结	151
第四章 数值判据法(一)	153
§4.1 概述	153
§4.2 高频稳定性理论基础	155
4.2-1 高频段频率响应	155
4.2-2 高频频率响应的特点分析	160
§4.3 稳定判据	165
4.3-1 相同开环极点的情况	165
4.3-2 相同开环极点情况的改善	173
4.3-3 三个开环极点的情况	180

4.3-4 四个开环极点的情况	187
4.3-5 稳定判据小结	198
§4.4 稳定裕量	201
4.4-1 开环极点分散的情况	202
4.4-2 开环极点重合的情况	210
§4.5 动态分析与设计	216
4.5-1 动态分析	216
4.5-2 动态设计	218
§4.6 数值判据法(一)的特点和应用范围	224
本章小结	226
第五章 数值判据法(二)	228
§5.1 低频稳定性	228
§5.2 对偶定理	232
§5.3 稳定判据与稳定裕量计算	238
5.3-1 稳定判据	239
5.3-2 稳定裕量	247
§5.4 数值判据法(二)的特点和应用范围	250
本章小结	251
第六章 闭环系统的品质与校正	253
§6.1 性能指标	253
6.1-1 性能指标的三种形式	254
6.1-2 开环与闭环频率响应的关系	256
6.1-3 闭环频率响应与闭环阶跃响应的关系	262
6.1-4 开环频率响应与闭环阶跃响应的关系	267
§6.2 反馈系数 F_R 对闭环阶跃响应的影响	271
6.2-1 一阶闭环系统	271
6.2-2 二阶闭环系统	273
§6.3 主极点校正	279
6.3-1 一般主极点校正方法	280

6.3-2 密勒电容校正方法	285
§6.4 极—零点校正	290
§6.5 零—极点校正	297
§6.6 反馈网络的校正	303
本章小结	307
第七章 应用举例	309
§7.1 常规心电图仪简介	309
§7.2 仪器的数学模型	310
§7.3 动态设计	314
7.3-1 指导思想	314
7.3-2 设计方法	317
§7.4 性能指标校核	320
§7.5 主放大器设计	323
§7.6 仪器制作及实验结果	328
本章小结	332
主要参考文献	334
常用名词术语汉英对照索引	337

绪 论

本书的宗旨是讨论多级反馈放大器与运算放大器的稳定性和相对稳定性的理论,以及如何应用这些理论来进行动态分析与设计。

反馈已是现代电子技术中的关键概念,在实用的电子线路中,几乎找不到不存在反馈的例子。因此,多级反馈放大器与运算放大器得到了广泛的应用。

一般放大器如图 0-1 所示,其电压增益为 A_1 。虽然能产生放大效果,但也伴随着信号失真等一系列令人棘手的问题。

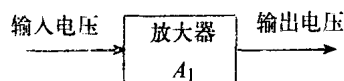


图 0-1 开环放大器系统

如果在一般放大器的基础上,再加上一个反馈网络,把输出电压衰减后反馈到输入端,与输入电压相减再经放大器放大,如图 0-2 所示,则放大器的性能将大为提高。

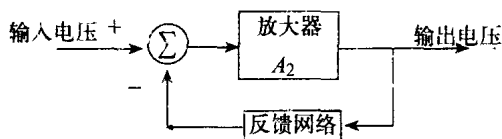


图 0-2 闭环放大器系统

图 0-2 所示的电子线路即是负反馈放大器。只要放大器的电压增益 A_2 足够大,即 $A_2 \gg A_1$,尽管有反馈存在,放大效果也可和一般放大器相同,而诸如信号失真等一系列

问题都可以得到显著的改善。

为了使负反馈放大器的 A_v 充分大, 要采用多级放大器来实现, 于是就形成了多级反馈放大器。

集成运放配以各种反馈网络, 可以形成各种不同功能的电路, 本书按照习惯统称这些电路为运算放大器。运算放大器是性能优良的多级反馈放大器, 在各个领域中, 得到了广泛的应用。

对于多级反馈放大器与运算放大器而言, 会在某些条件下不稳定, 变成了振荡器, 这样就完全失去了放大功能。这是稳定性的问题。同时, 在稳定的前提下, 由一种稳态向另一种稳态过渡, 还有平滑性与快速性的要求。这是相对稳定性的问题。关于这两方面问题的研究, 统称为稳定性理论。

长期以来, 都是把多级反馈放大器与运算放大器看成为反馈控制系统, 采用自动控制理论中的传统方法来研究其稳定性与相对稳定性, 一直延续到今天。由于这些传统方法的局限性, 应用起来会感到繁杂和不便。

能否以多级反馈放大器与运算放大器这类特殊的闭环系统为对象, 针对其特点建立专门研究其稳定性与相对稳定性的理论和方法, 是一个新的课题。作者提出的数值判据法解决了这一问题。该方法是多级反馈放大器与运算放大器稳定性理论的新发展, 具有计算简单、精确度高、适用于计算机辅助分析与设计等特点。

为了研究多级反馈放大器与运算放大器的稳定性与相对稳定性, 首先要建立其数学模型。包括放大电路的模型化, 以及在此基础上实现闭环系统的模型化。这是本书第一章与第二章讨论的内容。

建立了闭环系统的数学模型, 就可以从数学解答上讨论

其稳定性与相对稳定性的概念。自动控制理论中的传统方法，为研究其稳定性与相对稳定性问题提供了手段。这涉及到传统的判据法，以及以频率响应法和根轨迹法为核心的传统的作图法。这是本书第三章讨论的内容。

本书的重点是介绍数值判据法。它包括多级反馈放大器与运算放大器的高频稳定性理论和低频稳定性理论两个部分，分别在第四章和第五章里加以讨论。高频稳定性理论部分包括六条定理，前四条定理是稳定判据，后两条定理用来计算稳定裕量。通过对偶的概念和对偶定理，把闭环系统低频稳定性的研究转换为高频稳定性的研究，从而把数值判据法高频与低频稳定性理论两个部分统一了起来。

为了进行设计和校核闭环系统的品质，需要提出性能指标。如果闭环系统不满足稳定性与相对稳定性的要求，要采取校正措施。这是本书第六章讨论的内容。

最后，在第七章里介绍了多级反馈放大器与运算放大器稳定性理论以及数值判据法的应用实例。结合生物医学领域中的常规心电图仪的设计过程，说明了这些理论及数值判据法用来指导设计的步骤、特点与注意事项。

现在，国内外都在注意深入研究多级反馈放大器与运算放大器的动态品质与稳定性等问题，并取得了喜人的成果。从数学模型的建立，到系统理论的研究，都得到了进展。对进一步提高电子技术的水平，起到了积极的推动作用。作为对这具有重要理论与实践意义的新潮流的一种呼应，即是本书的目标。本书一方面力求更加系统和全面地反映国内外在该领域的最新成就，另一方面将着重介绍数值判据法及其应用。

第一章 放大电路的模型

多级反馈放大器与运算放大器的核心部分是放大电路。为了研究多级反馈放大器或运算放大器的稳定性问题，需要建立相应的模型，首当其冲的即是放大电路的模型。

本章介绍有关电子线路模型的一般知识，晶体管的电路模型、场效应管的电路模型，建立放大电路模型的方法以及集成运放的模型等。

§ 1.1 电子线路模型概述

电子线路的模型是为了研究电子线路而建立的等价物。电子线路是由电子元件和电子器件所组成的。如果全部的元件和器件都是线性的，称为线性电子线路。如果包含非线性的元件和器件，称为非线性电子线路。对电子线路进行的研究，可以包括诸多方面。例如静态的分析，动态的分析等等。因此在建立电子线路的模型时，通常是根据所要进行研究的问题的特点和需要，确保电子线路的某些必要特征，从而达到与原电子线路等价的目的。只要建立的模型是合理的，对于所要进行研究的问题而言，模型与原电子线路是相似的，可以互相替代。这样，就可以借助对模型所进行的研究，来获得在原电子线路上无法或难以实现的各种信息。

电子线路的模型有电路模型和数学模型两种，下面分别加以讨论。

1.1-1 电路模型

电路模型是电子线路的近似等效电路。人们预先规定几

种理想的基本元件，实际的电子元件或电子器件，以及电子线路，都用上述几种基本元件中的一种或几种的组合来进行近似的描述，它们是原线路的电路模型，习惯上称为原线路的等效电路。例如，对具有集总的和时不变的参数的电子元件和电子器件而言，至少要规定五种基本元件，即电阻、电容、电感、独立电源和线性可控电源。称这五种基本元件为“最小限度的基本元件”。由它们中的一种或几种的组合来构成电子元件、电子器件或电子线路的电路模型。

电子线路的电路模型可以有多种不同的形式。究竟建立何种形式的电路模型，视原电子线路本身的特点和所要研究的问题的性质而定。就是在上述前提下，电路模型也不是唯一的，还可以根据进行研究的条件和研究者的习惯而有所变化。

电路模型的分类，主要取决于所讨论的问题中工作信号的性质。工作信号的幅度和频带是两个最重要的特征，通常就依据这两个特征来对电路模型加以分类。

根据工作信号幅度，可以分为整体电路模型、局部电路模型和线性增量电路模型。对应工作信号最大可能的幅度范围而建立的电路模型，称为整体电路模型。它一般是非线性的。对应工作信号幅度某一局部范围而建立的电路模型，称为局部电路模型。它可以是非线性的，也可以是线性的，取决于所要研究的区域的大小。如果工作信号幅度很小，只在静态工作点附近很小的范围内变化，所建立的电路模型称为线性增量电路模型，或小信号电路模型。显然它是局部电路模型中的一种，但它又区别于局部电路模型的一般概念。它是由最小限度基本元件中的各种线性元件所组成，且不包含独立电源，即不包含非线性元件和独立电源。根据工作信号频

带，可分为直流电路模型和交流电路模型。直流电路模型，不同于交流电路模型之处在于它完全是电阻性的，不包含电容或电感。

1.1-2 数学模型

用数学关系式构成的电子线路模型称为数学模型。它是电子线路的数学抽象，由一组数学关系式来表示。在构成数学模型时，不受电子线路结构的限制，只用来描述电子线路的内在属性和工作状态。

如果电子线路的工作状态可以按某种条件预先加以确定，它的输出信号完全决定于输入信号，所建立的数学模型称为确定性的。如果电子线路的工作状态受到随机因素的作用，不可预测，只服从一定的概率规律，它的输出信号具有随机性质，所建立的模型中含有随机变量，则称所建立的数学模型是随机性的。

如果电子线路的状态只在有限个时刻，或至多在可列个时刻才发生变化，则称之为离散电子线路。反之，如果电子线路的状态随时间连续变化，则称之为连续电子线路。当然，也有离散数学模型和连续数学模型之分。但是，离散的或连续的数学模型不一定必须对应于离散的或连续的电子线路，所属的关系也可以是交叉的。

如果数学模型中不包含时间因素，它只是电子线路静止状态或某个特定时刻状态的描述，称之为静态数学模型。反之，如果数学模型中包含时间因素，那么它就是电子线路在整个时间过程中运动状态的描述，则称之为动态数学模型。

前面已经指出，在构成数学模型时，不受电子线路结构的限制。但在一些特殊需要的场合，数学模型则要考虑到电

子线路的结构，对于电子线路中的一些元件和器件，在数学模型中有与之相对应的部分，以便于获得中间变量的有关信息。

究竟建立何种数学模型，既决定于电子线路的本身特征，又在很大程度上决定于所研究的问题性质。建立数学模型是一门科学，也包含着技巧的因素，是一件困难的工作。建立数学模型不但包括构成数学关系式的过程，而且还包括对数学模型确认的过程，往往不是一次所能奏效的。经过确认后的数学模型，对于所要研究的问题而言，与原电子线路是相似的，可以互相替代，这样获得的研究信息才具有实际意义。

对于大多数情况而言，数学模型是在电路模型的基础上建立起来的。明确了研究目标之后，就可以确定电路模型。具体说来，从研究目标和电子线路特征出发，舍去非主要元件和器件，保留影响大的元件和器件，就可得到电路模型。在此基础上，决定与这些元件和器件有关的变量和参数，并建立这些变量和参数间的数学关系式，再经过一定手段的确认，就可得到数学模型。

本书的内容是研究多级反馈放大器与运算放大器的稳定性问题，并对不稳定时出现的振荡形式作出估计。因此，采用静态工作点附近的线性增量电路模型就够了。在此基础上建立起来的数学模型是确定性的和连续的动态模型。

§ 1.2 晶体管的电路模型

1.2-1 混合 π 型等效电路

混合参数 π 型等效电路是晶体管的线性增量电路模型。模型中的每个参数都可以和晶体管的实际物理结构联系起来。

它的特点是模型参数容易确定, 在宽频带范围内适用, 同时由于元件数目少, 结构简单, 该模型得到了广泛的应用。模型中共包括七个参数, 对应七个元件, 如图 1-1 所示。

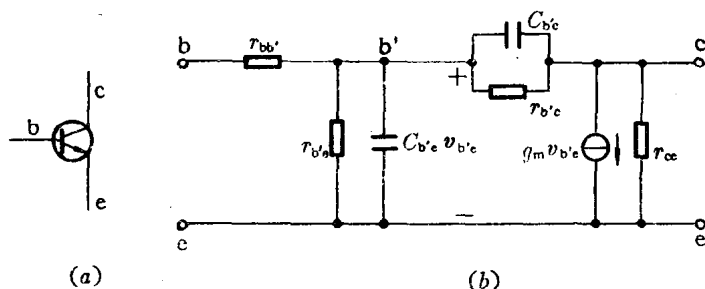


图 1-1 晶体管混合 π 型等效电路

对于图 1-1 中各参数说明如下:

1) $r_{bb'}$: 基极扩散电阻。对一个给定的晶体管而言, 该电阻是一个常数。一般小功率晶体管的 $r_{bb'}$ 在几欧至几百欧之间。

2) $r_{b'e}$: 基极与发射极间的电阻。一般小功率晶体管的 $r_{b'e}$ 为 1 千欧左右。

3) $r_{b'c}$: 输出电压对输入回路引入反馈的电阻。一般小功率晶体管的 $r_{b'c}$ 为几兆欧。

4) r_{ce} : 共射接法下的输出电阻。一般小功率晶体管的 r_{ce} 在几十千欧至几百千欧之间。

5) $C_{b'e}$: 发射极对基极的电容。

6) $C_{b'c}$: 集电极对基极的电容。

7) g_m : 跨导。表示由发射结电压 $v_{b'e}$ 到集电极回路电流的增益, 单位为 mS, 相当于导纳。一般小功率晶体管的 g_m 为几十 mS。

图 1-1 所示的晶体管线性增量电路模型在很宽的频带