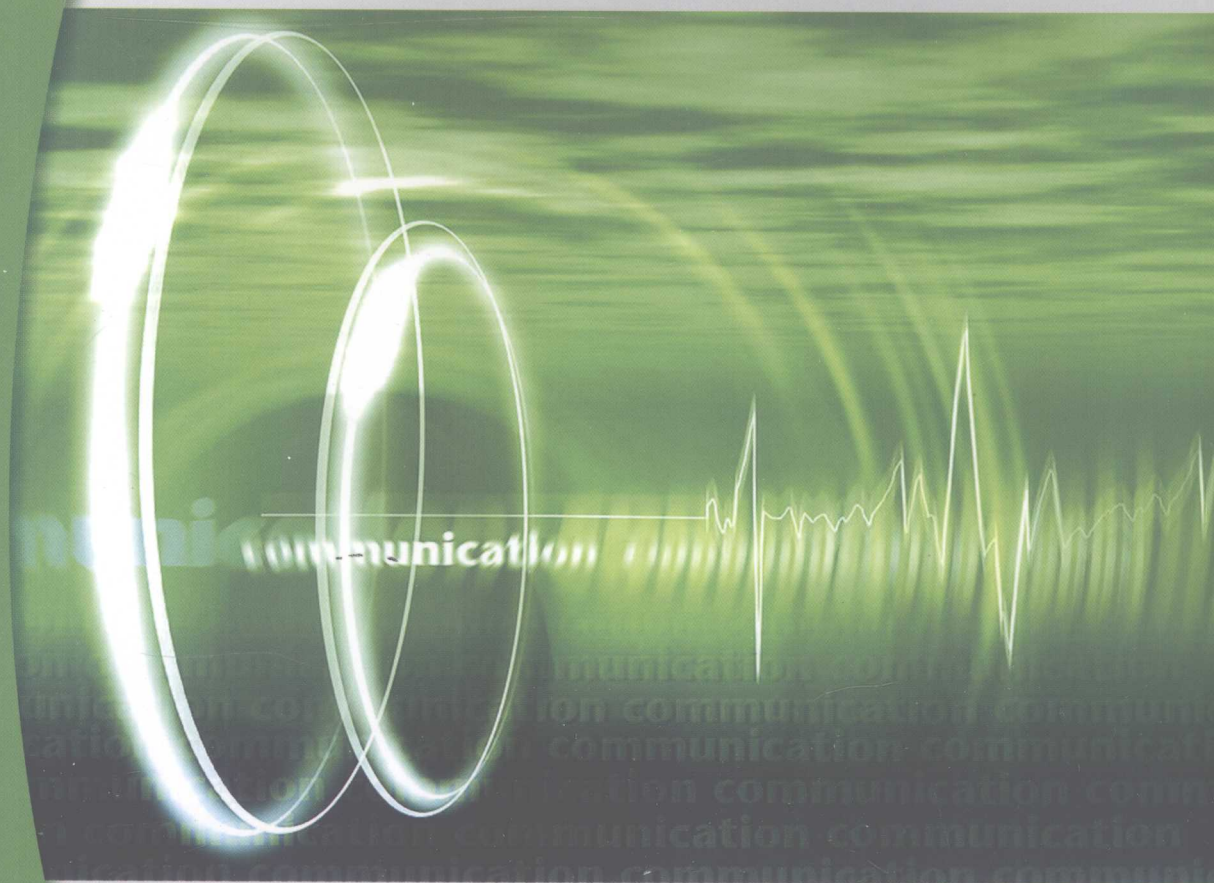




传感器接口 与检测仪器电路

吕俊芳 钱政 袁梅 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

传感器接口与检测仪器电路

吕俊芳 钱政 袁梅 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

传感器接口与检测仪器电路设计及信号调理是现代测控系统中不可缺少的重要环节。本书全面阐述了各种类型的传感器输出信号的放大、处理、变换、传输及抗干扰技术,在阐述中突出了基本概念、基本方法、还特别突出了工程实际应用。本书还介绍了传感器接口与检测仪器电路可靠性设计与仿真,突出了国防工业产品的高可靠性设计特色。同时还介绍了航空航天用传感器接口与检测仪器电路多个实例,均是作者多年科研工作中与航空航天有关的成功的应用研究。

本书内容具有先进性、实用性、完整性、易读性。

本书是检测技术与仪器、仪器科学与技术大学本科专业的教材,也可作为电气工程与自动化、信息工程、检测技术与自动化装置、机械电子工程等本科专业用教材,同时本书也是相关行业尤其是航空航天及国防领域的科研人员、工程技术人员的一本极有价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器接口与检测仪器电路 / 吕俊芳, 钱政, 袁梅编
著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 2
ISBN 978 - 7 - 118 - 05984 - 7

I. 传… II. ①吕…②钱…③袁… III. ①传感器 - 接口
设备 - 电子电路②传感器 - 检测仪表 - 电子电路 IV.
TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 166071 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20 1/2 字数 460 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 33.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

在当今工业化社会向信息化社会转变的过程中,传感器与测量系统提供信息的作用日趋明显。在不确定条件下,把各类传感器的原始信息转换为测量系统及后续控制系统、分析系统、监视系统的可用信息是传感器接口与检测仪器电路的主要功能,传感器接口与检测仪器电路的精度及稳定性决定了使用该信息的各类系统的精度及稳定性,它在工业、农业、国防、经济、社会服务和娱乐等众多领域中发挥着不可替代的作用。

本书主要介绍在不确定条件下,具有高精度、高稳定性的传感器接口与检测仪器的常用基本电路的原理、特性及用途等。是笔者 20 多年来从事检测技术与仪器专业教学及科研工作的基础上撰写而成的。将电路设计理论基础与电路实测分析相结合,着重突出国防产品的设计特色,内容丰富,系统性强,表述深入浅出,理论联系实际,对检测仪器电路的设计有一定的指导和参考作用。

全书共分三部分。第一部分包括第 1 章至第 5 章,主要介绍传感器接口与检测仪器电路设计的理论基础;各种不同特性的传感器及其相匹配的放大电路;无失真地接收弱电信号加以放大,然后将信号进行不同需求处理;同时也介绍了具有检测仪器电路特色的仪表非线性特性的线性化、仪表电路的抗干扰技术。第二部分为第 6 章和第 7 章,主要介绍传感器接口与检测仪器电路的可靠性设计与仿真,突出国防尤其是航空航天产品的高可靠性设计特色。在电路进行原理设计的同时,必须进行可靠性设计及可靠性预计工作。第 6 章中详细介绍了电路可靠性设计及预计的概念与实施方法。第 7 章详细介绍了电路仿真的概念与实施方法。对所设计的电路必须进行计算机仿真,它包括电路特性分析;环境温度与噪声对电路特性的影响;电路印制板的热分析等,使电路研制的成功率大大提高,缩短了研制时间。第三部分为航空航天用传感器接口与检测仪器电路实例分析,突出了航空航天产品设计的特殊需求。实例均是作者多年科研工作中与航空航天有关的应用研究,并在第一部分理论上设计与研制成功,且已在工程中应用。本书将理论基础与实际应用相结合,使读者较容易消化接受该学科的知识。

本书第 1 章、第 5 章、第 6 章及 8.1 节~8.4 节、8.6 节和 8.7 节、8.9 节和 8.10 节、8.12 节~8.15 节,由北京航空航天大学吕俊芳教授编写,第 2 章和第 3 章及 8.16 节~8.18 节由钱政副教授编写,第 4 章、第 7 章及 8.5 节、8.8 节、8.11 节由袁梅副教授编写,8.19 节由杜冲编写,全书由吕俊芳教授主编并统稿。杜冲在文稿录入中做了大量细致的具体工作。

在本教材编写过程中,参考、引用了许多专家、学者的论著和教材。黄俊钦、袁海文教授给予很大的帮助,提出了许多宝贵意见,在这里一并表示诚挚的感谢。

传感器接口与检测仪器电路内容广泛且发展迅速,由于编者水平有限,错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2008年8月

目 录

第 1 章 信号放大电路	1
1.1 小信号放大器设计	1
1.1.1 小信号交流放大器的设计	1
1.1.2 线性集成运算放大器的设计	4
1.2 数据放大器设计	9
1.2.1 数据放大器静态特性指标	10
1.2.2 数据放大器的动态特性指标	11
1.2.3 集成运放对称组成数据放大器	12
1.2.4 动态校零数据放大器	15
1.3 低漂移直流放大器设计	17
1.3.1 单管直流放大器温度漂移的计算	17
1.3.2 差动放大器温度漂移的计算	19
1.3.3 双通道放大器电路	22
1.3.4 低漂移直流放大器制作工艺	23
1.4 高输入阻抗放大器设计	24
1.4.1 自举反馈型高输入阻抗放大器	24
1.4.2 高输入阻抗放大器的计算	27
1.4.3 高输入阻抗放大器信号保护	29
1.4.4 高输入阻抗放大器制作装配工艺	29
1.5 电荷放大器设计	30
1.5.1 电荷放大器原理	30
1.5.2 电荷放大器特性	31
1.6 低噪声放大器设计	35
1.6.1 噪声的基本知识	35
1.6.2 噪声电路的计算	37
1.6.3 信噪比与噪声系数	38
1.6.4 前置放大器的噪声模型	40
1.6.5 低噪声电路设计原则	41
第 2 章 信号处理电路	43
2.1 有源滤波器设计	43

2.1.1	有源滤波器的分类和基本参数	43
2.1.2	组成二阶有源滤波器的基本方法	45
2.1.3	二阶有源滤波器的设计	47
2.1.4	集成有源滤波器	54
2.2	常用特征值检测电路	56
2.2.1	绝对值检测电路	56
2.2.2	峰值检测电路	60
2.2.3	真有效值检测电路	62
2.3	采样保持电路	66
2.3.1	电路原理	66
2.3.2	模拟开关	68
2.3.3	采样保持实用电路	70
第3章	调制与解调电路	72
3.1	振幅调制与解调	72
3.1.1	调幅原理与方法	72
3.1.2	包络检波电路	73
3.1.3	相敏检波电路	75
3.2	频率调制与解调	76
3.2.1	调频原理与方法	76
3.2.2	鉴频电路	78
3.3	相位调制与解调	79
3.3.1	调相原理与方法	79
3.3.2	鉴相电路	80
3.4	脉冲调制与解调	81
3.4.1	脉冲调制原理与方法	81
3.4.2	脉冲调制信号的解调	82
第4章	仪表非线性特性的线性化	83
4.1	仪表组成环节的非线性	83
4.1.1	指数曲线型非线性特性	83
4.1.2	有理代数函数型非线性特性	84
4.2	经典非线性特性的补偿方法	85
4.2.1	开环式非线性补偿法	85
4.2.2	闭环式非线性补偿法	87
4.2.3	差动补偿法	89
4.2.4	数字控制分段校正法	90

4.3	线性化电路设计	93
4.4	智能传感器中非线性特性的补偿方法	96
4.4.1	查表法	97
4.4.2	最小二乘曲线拟合法	98
4.4.3	函数链神经网络法	98
第5章	抗干扰技术	100
5.1	干扰的来源	100
5.1.1	外部干扰	100
5.1.2	内部干扰	100
5.2	干扰的传输途径	101
5.2.1	电场耦合	101
5.2.2	磁场耦合(互感性耦合)	102
5.2.3	漏电流效应	102
5.2.4	共阻抗干扰	103
5.3	差模干扰与共模干扰	104
5.4	抗干扰技术	106
5.4.1	滤波技术	106
5.4.2	屏蔽技术	108
5.4.3	隔离技术	110
5.4.4	接地技术	113
5.4.5	浮空(浮置、浮接)技术	116
第6章	传感器接口与检测仪器电路的可靠性设计与预计	118
6.1	概述	118
6.1.1	调理电路的可靠性设计及预计	118
6.1.2	研究的意义	118
6.2	举例电路简介	118
6.2.1	调理电路的功能	118
6.2.2	电路介绍	118
6.2.3	电路中的元器件	122
6.3	调理电路的可靠性设计	123
6.3.1	原理设计的可靠性措施	123
6.3.2	元器件的选型及应用的可靠性措施	126
6.3.3	印制电路板设计的可靠性措施	127
6.4	调理电路的可靠性预计	128
6.4.1	有关的基本概念	128

6.4.2	可靠性预计方法	129
6.4.3	可靠性的预计	130
6.4.4	可靠性预计的结果	135
6.4.5	可靠性预计的结论	136
第7章	传感器接口与检测仪器电路的仿真	137
7.1	电路的计算机仿真	137
7.1.1	电路仿真的基本概念	137
7.1.2	电路仿真软件 OrCAD 介绍	137
7.1.3	电路仿真软件 OrCAD/PSpice 的仿真功能	138
7.1.4	使用 OrCAD/PSpice 进行电路仿真的步骤	139
7.1.5	电路的仿真实例	142
7.1.6	电路仿真过程	143
7.1.7	仿真结果分析	157
7.2	电路印制板的热分析	157
7.2.1	热分析的目的与方法	158
7.2.2	BETAsoft - Board 软件的特点	158
7.2.3	印制板的热分析	159
7.3	电路印制板的热测试	163
7.3.1	热测试的目的与方法	163
7.3.2	印制板的热测试	164
7.3.3	热测试的结果与改进措施	164
第8章	航空航天用传感器接口与检测仪器电路实例分析	167
8.1	二氧化碳分压传感器调理电路	167
8.1.1	测量机理	167
8.1.2	传感器的组成	168
8.1.3	关键技术	169
8.1.4	传感器性能	173
8.1.5	结束语	174
8.2	卫星推进系统通道流量测试仪电路	174
8.2.1	测试仪的组成	174
8.2.2	气体流量探头的组成及原理	175
8.2.3	气体流量探头数学模型的建立	177
8.2.4	气体流量探头的试验数据处理	178
8.2.5	数据采集与处理系统	178
8.3	航空发动机磨损在线监测仪电路	179

8.3.1	监测的理论基础	180
8.3.2	监测系统的组成	180
8.3.3	能谱的数据处理	182
8.3.4	实验结果	185
8.3.5	结论	187
8.4	高精度航空燃油密度实时测量仪电路	187
8.4.1	测量的机理	188
8.4.2	测量系统的构成	188
8.4.3	测量系统对飞机燃油密度的测量	191
8.4.4	提高航空燃油密度测量精度的方法	193
8.4.5	结论	196
8.5	基于磁致伸缩机理的液位测量仪电路	197
8.5.1	磁致伸缩效应	197
8.5.2	磁致伸缩液位传感器测量机理	198
8.5.3	磁致伸缩液位测量系统	199
8.5.4	液位测量系统实验	205
8.5.5	结论	207
8.6	航空数字人感系统电路	207
8.6.1	人感系统的组成	208
8.6.2	人感系统的工作原理	208
8.6.3	人感系统的仿真	209
8.6.4	传感器调理电路	210
8.6.5	直流电机驱动电路	212
8.6.6	保护电路	214
8.6.7	人感系统软件	215
8.6.8	结论	215
8.7	航空标定转台的角速度波动检测仪电路	215
8.7.1	角速度波动技术研究的内容	215
8.7.2	检测仪的组成	216
8.7.3	系统的软件组成	221
8.7.4	系统联调	221
8.8	转速标准装置电路	224
8.8.1	直流无刷电机转速控制原理	224
8.8.2	电机锁相控制	225
8.8.3	转速标准装置组成及工作原理	226
8.8.4	频率量测量方法	229
8.8.5	标定实验及分析	230

8.8.6	结论	233
8.9	光纤 pH 值实时监测仪电路	233
8.9.1	单光路的光电转换与放大电路	233
8.9.2	双光路的光电转换与放大电路	235
8.9.3	结论	237
8.10	高精度光纤静位移传感器调理电路	238
8.10.1	高精度光纤位移传感器	238
8.10.2	前置放大器的设计与调试	238
8.10.3	有源滤波器	241
8.10.4	A/D 转换器	242
8.10.5	结论	242
8.11	基于压电传感器阵列的结构健康监测仪电路	243
8.11.1	压电传感器进行结构损伤检测的机理	244
8.11.2	基于压电传感器阵列的健康监测仪总体方案	244
8.11.3	压电传感器的布局	245
8.11.4	监测仪调理电路	246
8.11.5	实验及结果	248
8.11.6	结论	251
8.12	安全火花型集成电路温度变送器电路	251
8.12.1	主要技术指标	252
8.12.2	工作原理	252
8.12.3	系统试验	255
8.12.4	结论	256
8.13	光电感烟火探测器调理电路及信号的远距离传输	256
8.13.1	光电感烟火探测器的工作原理	256
8.13.2	光电感烟火探测器的调理电路设计	257
8.13.3	火灾自动报警系统中信号的远距离传输	261
8.14	电子式差定温探测器电路	265
8.14.1	探测器的工作原理	265
8.14.2	电桥参数选定	267
8.14.3	具体算例	270
8.15	航空 VXI 总线仪器自动计量校准方法	273
8.15.1	VXI 仪器校准的方法	274
8.15.2	VXI 仪器的校准	275
8.15.3	E1418A 模块校准举例	277
8.15.4	VXI 仪器校准的发展趋势	282
8.16	制造火箭推进剂的混合机桨叶安全状况实时测试仪电路	283

8.16.1	测试仪的组成	283
8.16.2	测试系统关键环节的设计与调试	284
8.16.3	测试仪的标定	287
8.16.4	测试仪现场实测结果分析	288
8.17	航空电力设备中高精度直流大电流测试仪电路	289
8.17.1	测试仪的组成	290
8.17.2	巨磁电阻传感器环节的设计与调试	290
8.17.3	数据采集和数据处理模块的设计和调试	293
8.17.4	测试仪的误差分析与补偿	294
8.18	利用磁阻传感器进行飞机姿态测量的测试仪电路	296
8.18.1	测试仪电路	297
8.18.2	磁阻传感器调理电路的设计	297
8.18.3	测试仪的误差分析和补偿	299
8.18.4	测试结果分析	300
8.19	光纤布拉格光栅用于太阳能帆板模型的振动监测	302
8.19.1	光纤布拉格光栅的传感原理	302
8.19.2	光纤布拉格光栅传感模型分析	303
8.19.3	太阳能帆板模型振动监测系统的组成	305
8.19.4	光纤光栅解调系统	305
8.19.5	光纤布拉格光栅的标定及温度补偿	307
8.19.6	太阳能帆板振动监测系统实验及结果分析	309
参考文献		312

第1章 信号放大电路

在检测仪器的测量电路中通常都有信号放大级,它把传感器输出的微弱信号进行放大,以便进行控制与显示。信号放大电路的结构形式视传感器类型而定。本章论述了常用的小信号交流放大器及数据放大器的设计,并介绍了特殊的信号放大级(如低漂移、高阻抗、电荷放大、低噪声)的设计。

信号放大电路的设计方法是:首先根据传感器的类型来确定相应的放大级电路方案,并根据对放大级提出的技术要求,大致确定放大电路的级数、各单元电路的形式、耦合方式、反馈电路的形式等,绘出初步原理电路图,这是设计第一步——定性分析;其次作初步计算,以确定电路工作状态,元器件参数等问题,这是设计第二步——定量计算;最后进行实验调试的过程,这是设计第三步——实验调试。实践证明,一个符合实际要求的设计,往往都要经过实践、认识、再实践多次反复才能完成。

定性分析、定量计算、实验调试这种三结合的设计方法,不仅是放大电路常用的设计方法,也是解决电子电路设计的一般方法。实践证明,这是一种行之有效的方法。

1.1 小信号放大器设计

1.1.1 小信号交流放大器的设计

放大器的设计是一个综合性问题。设计一个达到给定指标的放大器,实现方案可以多种多样,具体步骤也可以各不相同。但是设计的指导思想应该是一致的,就是在保证技术指标的条件下,力求降低成本,从实际出发,既要使设计符合要求,也要力求体积小、重量轻、稳定可靠、维修方便,而且设计中必须始终贯彻理论联系实际,把定性分析、定量计算和实验调试三者有机结合起来。

设计一个放大器通常要给定以下条件:① 输入信号 U_i (有时还给定信号源内阻 R_i); ② 输出信号幅值 U_o ; ③ 总的增益; ④ 工作频带(下限 f_l 、上限 f_h); ⑤ 非线性失真; ⑥ 环境温度; ⑦ 输入阻抗; ⑧ 输入噪声; ⑨ 电源电压等。在某一具体环节设计中,可能只给定其中的几个条件。

设计的主要任务是:① 确定采用电路的形式; ② 确定放大器的级数; ③ 选择管子型号; ④ 确定直流静态工作点; ⑤ 耦合方式; ⑥ 采用什么类型的反馈; ⑦ 计算电路元件的所有参数值。

1. 输入级的选择

输入级采用什么电路,主要取决于信号源的特点,如果信号不允许取较大的电流,那么就要求输入级有较高的输入阻抗,这时采用射极输出器较为理想;如果要求更高的输入

阻抗,那么可采用复合管组成的射极输出器,或采用自举电路,必要时可用场效应管作输入级;如果信号源要求放大器具有低输入阻抗,而且要求匹配,那么必须使输入阻抗在工作频率范围内保持规定数值(如 $R_i = 75\Omega$ 等),这时采用电压并联负反馈作低输入阻抗级较为方便;如果信号源的输出信号很微弱,那么要求输入级的输入阻抗与信号源内阻相匹配,以获得最佳信噪比。

2. 中间级的选择

中间级主要取决于放大器的总增益。因此,中间级必须能获得尽可能高的电压增益,所以采用共射极电路最为合适。

3. 输出级的选择

输出级电路的确定主要取决于负载的要求。如果负载电阻较大(几千欧以上),而且主要是输出电压,则可用共射极作输出级;反之,如果负载阻抗很低,则可用射极输出器作输出级;如果负载要求匹配,而且对地要平衡,则可用变压器输出;如果负载要求没有直流电流通过,而且是对地输出,则可用单端推挽互补输出级。

4. 耦合方式的选择

放大器各级之间的耦合方式有三种,即阻容耦合、变压器耦合和直接耦合。

变压器耦合的主要优点是:可以实现级间匹配,从而获得最大功率增益。其缺点是频带窄、非线性失真大、体积大、笨重。在小信号放大器中一般不采用,只是在低频功放级中才采用。阻容耦合的优点是:体积小、频带较宽、各级之间直流工作状态互不影响。直接耦合的优点是:可以省去偏置电阻 R_1 、 R_2 ,可以提高电流增益和功率增益,频带可以从直流开始等。

5. 晶体管的选择

晶体管是放大器的核心元件,它的选择原则是:① 要满足频率上限 f_h 的要求,应选 f_β 比 f_h 大的管子;② 要满足增益的要求,应选较高 β 的管子,通常 $\beta = 60 \sim 100$ 最为合适, β 太高会使温度稳定性变差;③ 如果是放大微弱信号,则必须选择噪声系数 N_F 低的管子;④ 根据电路的 E_c 、 I_{OM} 及功耗 P_{CQ} 选择 $BU_{CER} > E$,集电极 $I_{CM} > I_{OM}$,集电极 $P_{CM} > P_{CQ}$ 的管子。

6. 静态工作点的选择

由于静态工作点与放大器的性能关系密切,静态工作点 (I_{CQ} 、 U_{CEQ}) 的变动将会引起放大器的性能指标(如①管子的参数 β 、 h_i 、 N_F 、 f_β ,② 增益 A_v ,③ 偏置电路的稳定性,④ 放大器输出的动态范围及非线性失真等)的变化。

在选择工作点时,要根据放大器的主要性能指标来考虑,不可能全部兼顾到。

(1) 输入级工作点的选择

通常输入级工作点的选择主要是考虑低噪声系数 N_F 。因为 N_F 与静态工作点的集电极电流 I_{CQ} 有关,对锗管, I_{CQ} 选 $0.5\text{mA} \sim 1\text{mA}$ 为宜;对硅管, I_{CQ} 选 $1\text{mA} \sim 3\text{mA}$ 为宜。 U_{CEQ} 的大小对 N_F 影响不大,通常 U_{CEQ} 小, N_F 也稍微减小,故取 $U_{CEQ} = 1\text{V} \sim 3\text{V}$ 。

(2) 中间级工作点的选择

中间级工作点的选择原则是保证每级均能获得较高的增益,同时要保证有良好的温度稳定性。通常取中间各级的 $I_{CQ} = 1\text{mA} \sim 3\text{mA}$,而中间级的最后一级 I_{CQ} 应适当比前级大些。

由于中间级的电压动态范围不大,一般均不超过 1V,如考虑到晶体管的饱和压降 $U_{CES} = 0.3V \sim 1V$,为避免温度变化时工作点变动会产生失真,通常取 $U_{CEQ} = 2V \sim 3V$ 。

(3) 输出级工作点的选择

一个多级放大器除了要求有必要的电压增益之外,还要求输出级能输出足够的不失真电压幅度。所谓不失真就是输出信号在其正、负半周内不会进入输出特性的饱和区或截止区。输出电压不失真的最大振幅范围称为输出电压的动态范围,通常简称为动态范围。输出级静态工作点设计的原则就是保证输出级具有必需的动态范围。

7. 反馈电路的选择

由反馈放大器的特性可知,负反馈能改善放大器的性能,如减小失真、增宽频带、减小噪声、提高输入阻抗、降低输出阻抗等。如果要求减小非线性失真及得到一定的电压增益,则主要是设计恰当的反馈深度。(在非线失真要求较高或电压增益非常稳定的情况下,必须采用深度负反馈,通常是采用多级负反馈);如果要求输出电压稳定,则必须采用电压负反馈;如果要求提高输入阻抗,则可以采用输入串联负反馈。

8. 元件的选择

通常的 RC 耦合放大器都是由有源元件晶体管及无源元件电阻、电容组成的。这里主要是讨论集电极电阻、耦合电容与射极旁路电容的选择问题。

(1) 集电极电阻 R_c 的选择

选择 R_c 的依据主要是保证获得足够的电压增益。

电压增益为 $A = \beta \frac{R'_L}{h_{ie}}$, 可得

$$R'_L = \frac{Ah_{ie}}{\beta}$$

式中: $R'_L = R_L // R_c$; R_L 为输出负载电阻; $R_c = \frac{h_{ie} R'_L}{h_{ie} - R'_L}$ 。

通常加大 R_c 可以提高电压增益,但当 R_c 已远大于下一级 h_{ie} 的情况下,再继续加大 R_c ,不但不能提高电压增益,反而会因 I_{CQ} 减小,使 β 也减小,致使电压增益不能提高,这是因为工作点偏低,反而使放大器的输出电压动态范围减小。

(2) 耦合电容 C_b 及发射极旁路电容 C_e 的选择

放大器级间耦合电容 C_{b1} 、 C_{b2} 及发射极旁路电容 C_e , 主要根据低频特性来选择。

下面以图 1.1.1 中的 C_{b2} 为例来说明如何根据低频特性来选择耦合电容。为了分析方便,先忽略 C_{b1} 及 C_e , 这是由于 C_{b1} 及 C_e 足够大时,在低频区,相当于短路,就可画出图 1.1.1 的等效电路图,如图 1.1.2 所示。

由图 1.1.2 可得

$$U_o = -\beta I_b R'_L \frac{1}{1 + 1/j\omega C_{b2} (R_c + R_L)}$$

电压增益为

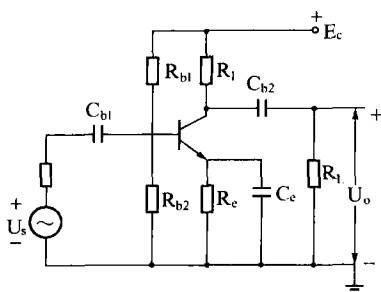


图 1.1.1 单级放大器

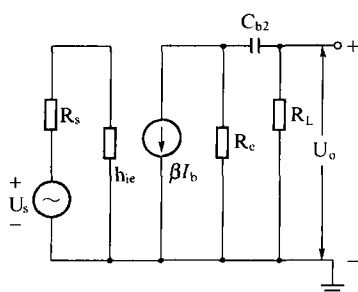


图 1.1.2 低频等效电路

$$A = \frac{U_o}{U_s} = - \frac{\beta R'_L}{R_s + h_{ie}} \cdot \frac{1}{1 + 1/j\omega C_{b2}(R_c + R_L)} = \frac{A_o}{1 - j \frac{f_L}{f}} \quad (1.1.1)$$

式中: $A_o = \frac{\beta R'_L}{R_s + h_{ie}}$ 为中频区电压增益; $f_l = \frac{1}{2\pi C_{b2}(R_c + R_L)}$ 为下限频率, 则

$$C_{b2} \geq \frac{1}{2\pi f_l (R_c + R_L)} \quad (1.1.2)$$

同样考虑输入回路可得

$$C_{b1} \geq \frac{1}{2\pi f_l (R_s + h_{ie})} \quad (1.1.3)$$

根据计算的结果,再考虑 3 倍~10 倍的裕量,即可选 C_{b1} 、 C_{b2} 的值。

由图 1.1.3 所示发射极等效电路,可求得发射极旁路电容 C_e 与低频特性下限频率 f_l 的关系。

$$f_l \approx \frac{R_s + h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e}{2\pi(R_s + h_{ie})R_e C_e}$$

可得

$$C_e \geq \frac{R_s + h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e}{2\pi f_l (R_s + h_{ie})R_e} \quad (1.1.4)$$

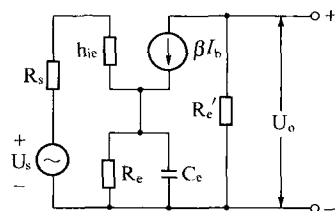


图 1.1.3 发射极等效电路

再取 1 倍~3 倍的裕量,即可选 C_e 值。

以上讨论的放大器电路及元件的选择原则仅考虑在低频段,关于工作频率在高频段时放大器电路及元件的选择,可参阅相关著作。

1.1.2 线性集成运算放大器的设计

1. 反相放大器电路设计

为了设计方便,反相放大器主要关系式见表 1.1.1。

表 1.1.1 反相放大器主要关系式

序号	说 明	公 式
①	理想运放时的闭环电压增益	$A_f = -\frac{R_f}{R_1}$
②	$A_d \neq \infty$ 时闭环电压增益	$A_f = -\frac{A_d}{1 + (1 + A_d)R_1/R_f}$
③	$A_d \neq \infty, R_i \neq \infty$ 时闭环电压增益	$A_f = -\frac{R_f/R_1}{1 + 1/FA_d + 2R_f/A_d R_i}$
④	$A_d \neq \infty, R_o \neq 0$ 时闭环电压增益	$A_f = -\frac{R_f/R_1}{1 + (R_f + R_o)/FA_d R_f}$
⑤	$A_d = \infty$ 时闭环输入电阻	$R_{in} \approx R_1 \left(1 + \frac{R_f}{A_d R_1} \right)$
⑥	由 A_d, R_i, R_o 引起闭环电压增益误差最小时的反馈电阻	$R_{f(opt)} = \sqrt{\frac{R_i R_o}{2F}}$
⑦	具有单极点 f_{pl} 时闭环带宽	$f_{cp} = \frac{f_{pl} A_d R_1}{R_f}$
⑧	小信号输入时输出电压上升时间	$t_r = \frac{0.35 R_f}{f_{pl} A_d R_1}$
注: 表中 $F = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$ 为电压反馈系数		

设计反相放大器的电路参数取决于电路的技术指标。如果仅提出闭环放大倍数 A_f 的指标,且对 A_f 精度要求不高,则只要考虑表 1.1.1 中①即可;若考虑到 A_f 的精度,则要考虑表 1.1.1 中①、③、④、⑥;若对 R_{in} 提出要求,还要考虑表 1.1.1 中⑤。如果对反相放大器提出频率响应及瞬间响应的指标,还需要考虑表 1.1.1 中⑦、⑧。下面就反相放大器的参数设计原则,进行综合分析。

(1) 减小直流漂移

如果输入信号是直流信号,或是缓慢的交流信号,则运算放大器的漂移是闭环增益误差的主要来源,这是因为 I_{os} 、 U_{os} 、 I_b 均是环境温度的函数。

在图 1.1.4 中: I_{b1} 、 I_{b2} 是偏置电流; ΔU_{iT} 是由于失调电压 U_{os} 及偏置电流 I_{b1} 、 I_{b2} 分别在 R_1 、 R 上电压降折算到输入端的等效电压; R_o 是开环输出电阻。

由图 1.1.4 可知

$$\Delta U_{iT} = U_{os} \pm I_{b1} \times R_1 // (R_f + R_o) - I_{b2} R \quad (1.1.5)$$

由于 $I_{b1} = I_b - \frac{I_{os}}{2}$, $I_{b2} = I_b + \frac{I_{os}}{2}$ 代入式(1.1.5),可得

$$\Delta U_{iT} = U_{os} \pm I_b [R_1 // (R_f + R_o) - R] - \frac{I_{os}}{2} [R_1 // (R_f + R_o) + R] \quad (1.1.6)$$