

吕俊芳 编著

传感器接口与检测仪器电路

北京航空航天大学出版社

73-42
286

传感器接口与检测仪器电路

吕俊芳 编著

北京航空航天大学出版社

(京)新登字 166 号

内 容 简 介

传感器接口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、转换与传输,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。本书还介绍了典型的检测仪器的整机电路,在工艺性很强的电路中的重要技术措施,以及作者在多年的科研中的成功应用实例。

本书内容具有先进性、实用性、完整性、易读性。

本书是大学本科检测技术与自动化仪表专业的专业教材,同时本书也是从事测量仪器和测试技术、自动化仪表、自动控制、微机应用等工作的科研人员、工程技术人员的一本极有价值的参考书。

2025/5

传感器接口与检测仪器电路

CHUANGANQI JIEKOU YU JIANCEYIQI DIANLU

吕俊芳 编著

责任编辑 曾昭奇

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

通县兔子店印刷厂印装

787×1092 1/16 印张:12.75 字数:320千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷 印数:4500册

ISBN 7-81012-471-4/TN·024 定价:9.00元

前 言

本教材是根据 1990 年航空航天部教材编审室所确定的教学基本要求编写的。

随着科学技术的发展,自动化技术已在工业生产及国防建设中得到广泛的应用。检测仪器是自动化系统的“感官”,它的稳定性及精度决定了自动化过程的稳定性及控制精度。由于有些检测现场的环境非常恶劣,各种传感器的特性又可能各不相同。因此,与其相匹配的电路必须满足相应传感器特性要求,并能在实际环境下进行高精度的实时测量。本书的主要内容就是介绍满足这些要求的传感器接口与检测仪器中常用基本电路的原理、特性、用途等,对检测仪器的设计有一定的指导和参考作用。

本书是笔者在 10 年传感器接口与检测仪器电路的教学经验和自编讲义的基础上撰写而成的。内容丰富,概念清楚,系统性强,实际应用突出,表述深入浅出,理论联系实际。

全书共九章。第一章概论,主要介绍传感器接口与检测仪器电路的组成、功用及发展趋势。第二章至第四章系统地介绍了传感器输出的各种类型信号的放大,然后根据不同要求进行必要的处理,直至进行转换,或送至计算机;或直接为仪表显示。第五章介绍信号的调制与解调,是信号处理的一种常用的有效手段。第六章介绍仪表非线性特性线性化的几种方法,是构成检测仪器不可缺少的一个重要环节。第七章介绍六种检测微弱信号的一般方法,从理论上概括了由噪声淹没中提取信号的思路与方法。第八章介绍传感器接口与检测仪器电路中如何设计地线系统,以达到抗干扰的目的。第九章为实例分析,加深读者对正文内容的理解。

本书在内容取材上立足于工程应用。各章均附有一定量的硬件电路实例,尤其是第九章列举的实例全为笔者多年的实践工作总结,均已用于科研与生产实践中,可供读者在解决类似工程问题时的参考。其中大量工作是与同事、学生共同完成的,如周秀银、陈博、钱建良、周浩敏、袁梅、刘莹、陈巍、顾征宇、姚雅红、李绍猛与潘军等同志。

北京航空航天大学黄俊钦、刘惠彬、朱定国教授,魏鸿然、陈行禄副教授对本书在编写过程中给予巨大帮助,清华大学王家桢、顾利忠与北京理工大学罗伟雄、李世智老师审阅了全书,并提出了许多宝贵的意见,在这里一并表示诚挚的感谢。

由于本人水平有限,错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1993 年 9 月

目 录

第一章 概 论

§ 1.1 检测仪器电路的内容与功用	(1)
§ 1.2 对检测仪器电路的主要要求	(2)
§ 1.3 检测仪器电路的发展趋势	(4)

第二章 信号放大电路

§ 2.1 电荷放大器	(6)
2.1.1 电荷放大器原理	(6)
2.1.2 电荷放大器特性	(7)
§ 2.2 低漂移直流放大器	(10)
2.2.1 单管直流放大器温度漂移的计算	(10)
2.2.2 差动放大器温度漂移的计算	(13)
2.2.3 低漂移直流放大器制作工艺	(16)
2.2.4 低漂移放大器电路	(17)
§ 2.3 高输入阻抗放大器	(24)
2.3.1 自举反馈型高输入阻抗放大器	(25)
2.3.2 场效应管高输入阻抗差动放大器	(28)
2.3.3 高输入阻抗放大器的计算	(29)
2.3.4 高输入阻抗放大器信号保护	(30)
2.3.5 高输入阻抗放大器制作装配工艺	(31)
§ 2.4 低噪声放大电路	(32)
2.4.1 噪声的基本知识	(32)
2.4.2 噪声电路计算	(34)
2.4.3 信噪比与噪声系数	(35)
2.4.4 晶体三极管的噪声	(36)
2.4.5 低噪声电路设计原则	(39)
§ 2.5 光电转换电路	(41)
2.5.1 真空光电管测量电路	(41)
2.5.2 光电倍增管测量电路	(41)
2.5.3 半导体光电器件测量电路	(42)

第三章 信号处理电路

§ 3.1 有源滤波器电路	(44)
3.1.1 有源滤波器分类和基本参数	(45)

3.1.2	组成二阶有源滤波器的基本方法	(46)
3.1.3	二阶有源滤波器传递函数的分析与设计	(48)
3.1.4	有源滤波器设计	(50)
§ 3.2	绝对值检测电路	(57)
3.2.1	绝对值电路原理	(57)
3.2.2	绝对值电路性能的改善	(58)
§ 3.3	峰值保持电路	(61)
3.3.1	峰值保持电路原理	(61)
3.3.2	误差分析	(61)
3.3.3	峰值保持电路性能的改善	(64)
3.3.4	峰-峰值检测电路	(67)
§ 3.4	采样-保持电路	(68)
3.4.1	工作原理	(68)
3.4.2	采样电路的特性及参数	(68)
3.4.3	采样-保持电路	(71)
§ 3.5	真有效值检测电路	(75)
3.5.1	平均值响应、峰值响应、有效值响应电压表概述	(75)
3.5.2	真有效值响应交流电压表原理	(76)
3.5.3	真有效值测量精度与波形关系	(80)
§ 3.6	模拟电压比较器	(81)
3.6.1	概述	(81)
3.6.2	模拟电压比较器特性参数	(82)
3.6.3	过零比较器	(83)
3.6.4	电平检测器	(84)
3.6.5	回差电压比较器	(86)
3.6.6	窗口比较器	(87)

第四章 信号转换电路

§ 4.1	数/模转换(DAC)	(92)
4.1.1	D/A 转换原理	(92)
4.1.2	T 型解码网络	(92)
4.1.3	D/A 变换器的构成	(95)
4.1.4	D/A 变换器的主要技术指标	(95)
§ 4.2	模/数转换(ADC)	(96)
4.2.1	A/D 转换原理	(96)
4.2.2	时间间隔-数字转换	(96)
4.2.3	频率-数字转换	(97)
4.2.4	位移(或转角)-数字转换	(97)
4.2.5	电压-数字转换	(98)
4.2.6	A/D 变换器的主要技术指标	(101)

§ 4.3 频率-电压转换	(101)
4.3.1 频率-电压转换工作原理	(101)
4.3.2 频率-电压转换基本电路	(102)
第五章 调制与解调	
§ 5.1 振幅调制与解调	(105)
5.1.1 振幅调制和调制特性	(106)
5.1.2 调幅波的解调	(109)
5.1.3 解调器电路	(112)
§ 5.2 频率调制与解调	(114)
5.2.1 测量系统中的调频波	(114)
5.2.2 调频波的解调	(114)
第六章 仪表非线性特性的线性化	
§ 6.1 仪表组成环节的非线性	(117)
6.1.1 指数曲线型非线性特性	(117)
6.1.2 有理代数函数型非线性特性	(118)
§ 6.2 非线性特性的补偿方法	(120)
6.2.1 开环式非线性补偿法	(120)
6.2.2 闭环式非线性补偿法	(122)
6.2.3 最佳参数选择法	(124)
6.2.4 差动补偿法	(125)
6.2.5 数字控制分段校正法	(126)
§ 6.3 线性化电路设计	(128)
第七章 检测微弱信号的一般方法	
§ 7.1 窄带滤波法	(132)
§ 7.2 双路消噪法	(133)
§ 7.3 同步累积法	(134)
§ 7.4 锁定接收法	(136)
§ 7.5 取样积分法	(138)
§ 7.6 相关分析法	(140)
第八章 地线系统和抗干扰技术	
§ 8.1 地线系统	(142)
8.1.1 各种不同接地处理	(142)
8.1.2 接地装置的施工方法	(147)
8.1.3 地线系统设计	(150)
§ 8.2 抗干扰技术	(150)
8.2.1 长线传输阻抗匹配	(150)

8.2.2 长线传输过程中的窜扰	(153)
8.2.3 数字电路引起的干扰	(154)

第九章 传感器接口与检测仪器测量电路实例分析

§ 9.1 新型安全火花型的集成电路温度变送器	(157)
§ 9.2 数字式多路温度测量仪	(161)
§ 9.3 微机快速钢水测温仪	(166)
§ 9.4 高精度光纤静位移传感器调理电路	(169)
§ 9.5 光纤 pH 值测试系统研究	(174)
§ 9.6 光电感烟火灾探测器电路设计	(178)
§ 9.7 电子式差定温探测器研究	(183)
§ 9.8 火灾自动报警系统中信号远距离传输的几种方案	(189)

主要参考文献	(194)
--------------	-------

第一章 概 论

§ 1.1 检测仪器电路的内容与功用

1.1.1 检测仪器电路的主要内容

随着科学技术的发展,生产自动化已在工业生产及国防建设中得到广泛的应用。检测仪器是生产过程自动化的“眼睛”,它的稳定性及精度决定了生产自动化过程的稳定性及控制精度。由于有些工业生产现场的环境非常恶劣,各种传感器的特性又可能各不相同。因此,要求与其匹配的电路必须满足相应传感器的特性要求,并能在恶劣的环境下进行高精度的测量。本书讲授的检测仪器电路主要是介绍如何将传感器输出的测量信号进行放大、处理、转换和线性化处理后,驱动、显示或控制执行机构动作。因此电路在仪器中担负着:选择、放大、运算、信号变换、逻辑处理等任务,是检测仪器不可少的组成部分。本书主要分析这些功能电路和设计计算方法及其在仪器中的相互联系、作用。

1.1.2 检测仪器电路的主要功用

检测仪器的主要优点可归结为:(1)精度高;(2)使用方便;(3)易于自动化。这在很大程度上都是通过仪器电路实现的。

检测仪器精度高的主要原由是:(1)易于实现高倍率的放大。电路的放大倍数可以做到几万倍、几十万倍(而一般光学和机械的放大倍数不易做得很大),从而提高了检测仪器的分辨率,减少了读数误差;(2)通过电路,易于实现量程切换,特别在数字式仪器中有效数字的位数可以很多,解决了量程与分辨率的矛盾,即在大量程下仍有较高的分辨率;(3)通过信号的调制与解调电路、选频与滤波电路、共模抑制电路等等,可以比较方便地选取有用信号,抑制无用信号,从而减小噪声、干扰与非被测参数的影响;(4)利用电路可以对仪器误差进行自动修正,包括零点的自动校正、放大倍数的自动校正和非线性误差的修正等等(负反馈电路在很多情况下也起到这类作用;近年来,还广泛应用计算机软件修正);(5)利用差动电路、补偿电路、平衡电路使很多干扰因素的影响互相抵消和显著减小。

仪器电路的上述功用使它不仅广泛地用于各种纯电测量仪,也广泛应用于其他类型,例如光学仪器中。为此,先将光学信号,例如干涉条纹或莫尔条纹信号,经光电转换变为电信号,然后通过仪器电路,使很多误差因素得以减小。

检测仪器使用方便表现在许多方面,它们也是与电路的功能分不开的。例如:(1)通过电路可以方便地将信号传输到所需地点,使它便于读出,或实现控制、执行;(2)电路放大倍数可以很高,可以不需要仔细瞄准、精心估读,数字式电路读数更为方便;(3)电路的反应速度高,信息传输快,利用信号锁存,便于实现动态采样;(4)通过电路可进行巡回采样,或同时读出多路信号;(5)通过信号分离电路,可以读出各种成分参数,例如读出各次谐波分量;(6)通过计算电路与逻辑处理电路便于实现信号的运算处理,直接读出所需的复杂参数值;(7)便于利用电路储

存测量的结果。

自动化功能也是与电路分不开的。通过电路实现逻辑判断、处理,功率放大、反馈控制等等。

电子计算机的广泛应用是仪器电路功能的延伸与新发展。其主要功用为:(1)大量数据的动态和自动采样;(2)大量数据的储存;(3)完成较为复杂多样的运算;(4)较为复杂的误差自动修正;(5)较高水平智能化。计算机完成这些任务都需要仪器电路对信号进行预处理,并通过接口将计算机与仪器沟通。

§ 1.2 对检测仪器电路的主要要求

对检测仪器电路的要求,首先是围绕“检测”提出来的,当然也还有其他一些要求。

1.2.1 信号选取与抗干扰能力

仪器电路接受传感器送来的信号不仅有反映被测参数情况的测量信号,而且含有器件内部产生的噪声和外界干扰引起的噪声。

在精密测量中,由传感器送来的信号往往是很微弱的,有时达微伏级。为了保证高的测量精度,首先要求电路本身是低噪声的,这里包括选择低噪音的器件,合理选择参数等。其次是采取恰当的屏蔽、隔离,合理的布线与接地,电路本身的合理设计等。这些问题对电路的前级尤为重要,因为它们带来的影响最大。被测信号的调制和解调是增强仪器电路选取信号、排除干扰的常用重要措施之一。

1.2.2 稳定性

稳定性是对仪器电路乃至整个测量仪器最基本的要求。稳定性不好就很难提出对其他指标,如线性度、频率特性的高要求。这就决定了要把仪器或电路的稳定性作为首要指标。

稳定性可以分为温漂、长期稳定性与短期稳定性。温漂导致仪器的示值在一次运行中发生渐变。长期稳定性是由于元器件老化、接插件弹性疲劳、氧化等原因,使仪器性能在长期运行中发生变化。短期稳定性表现为示值重复性。它主要由输入信号的信噪比、电路本身的噪声和抗干扰性能决定;器件本身的性能、寄生参数的稳定性、焊接的质量、接插件和开关的过渡电阻的稳定性和接触可靠性、电源电压的波动、外界电磁场的干扰、环境条件的快速变化等也都是决定其好坏的重要原因。

电路的稳定性不仅包括零点和放大倍数(灵敏度)稳定性,还应包括线性度、频率特性、输入输出阻抗的稳定性等等。

为了提高仪器电路的短期稳定性,除了选用低噪声、工作性能稳定可靠的元器件、适当布线接地及采取适宜的抗干扰措施外,还常采用深度的负反馈、差动或平衡电路等等。在静态测量条件下,采用多次采样取平均值、加大滤波器时间常数等也能减小示值分散性。但它不适用于动态和快速测量。

为了减小电路温漂带来的误差,除采用漂移小、经过老化处理的元器件外,还要合理安排热源,采取深度负反馈和补偿措施。不少仪器中还设有自动稳零、自动定标或放大比较校正电路。有的仪器在使用中规定了对环境和预热的要求。这些措施对提高长期稳定性也有用。

1.2.3 频率特性与响应速度

由于被测对象不同以及仪器的工作原理不同,对仪器电路的频率特性要求各不相同。从被测参数的频率范围看,低端从直流开始,高端可至 10^{11}Hz ,以致更高。在机械量测试中,例如为了测定一些高频振动和高速回转轴系的高次谐波(例如1500次谐波),被测信号的频率可达 10^7Hz 以上。在采用信号调制的情况下,载波频率比待测信号的频率至少还要高一个数量级。

随着科技的发展,对于快速度变化的过程进行动态测量的要求越来越多,越来越高。在对若干参数进行巡回采样的情况下,巡回点数越多,越发要求提高采样速度。一些本来可以采用静态测量的参数,为提高效率,也常采用动态测量。这就要求仪器电路的各个元器件(如光电元件、放大器件)、各个功能块(如细分电路、计数器、逻辑电路)和各个闭环跟踪系统,有较高的响应速度。特别是闭环跟踪系统,往往是影响仪器动态特性的关键部件。

1.2.4 线性度

线性度是仪器精度的又一重要指标。从原理上讲,仪器的输入(被测量)与输出(示值)可以按非线性函数关系定标。这时传递函数的非线性并不影响仪器的精度。但是,通常仍然要求仪器的输入与输出之间具有线性关系,这是因为:(1)线性标尺便于读出;(2)在换档时只是改变分度值,不必另行定标;(3)记录曲线波形不失真;(4)进行模/数转换、细分、伺服系统控制跟踪时均不必考虑非线性因素,比较方便。

电测量仪的非线性度由传感器、电路、显示执行机构这三个部分的非线性度产生。在这三部分中间,电路是最灵活的,它有时还要担负补偿其他二部分非线性失真的任务。利用计算机软件进行非线性校正,近年来在一些精密测量仪器中正获得越来越广泛的应用。

1.2.5 分辨率

适当提高仪器的分辨率有利于减小读数误差、方便读数。在模拟式仪器中为了提高仪器的分辨率应适当提高放大器放大倍数。在数字式仪器中,当被测量的变化不到数字显示最低位一个字时,示值不会改变,这一误差称为量化误差。为了减小量化误差必须减小每一个字所对应的被测量。为此常常采用细分电路,在传感器输出信号的一个周期内进行内插,以减小每一个计数脉冲所对应的当量。

1.2.6 输入与输出阻抗

对仪器电路输入阻抗的要求随所选用传感器而异。有的传感器(例如压电传感器)输出阻抗很大,可达 $10^8\Omega$ 以上,这就要求仪器电路有很高的输入阻抗。为此放大器的输入级常常采用有高输入阻抗的场效应管,采用自举电路,有些情况下还需采用电荷放大器。但是并不是在所有情况下都要求输入端有高输入阻抗。输入阻抗越高,输入端的噪声也越大。合理的要求是输入级的输入阻抗应与传感器输出阻抗匹配,使放大器的输出信噪比达到最大值。

同样要求电路的输出阻抗应以它所驱动的显示执行机构阻抗匹配。

1.2.7 计算与逻辑控制功能

通常检测仪器需要完成一定的计算,以获得所需的被测参数值。此外,仪器电路还要完成一系列的逻辑判断处理,以保证仪器正常运转工作。近年来,这些任务已越来越多地由电子计

算机完成。

§ 1.3 检测仪器电路的发展趋势

当今,检测仪器电路发展日新月异,其主要发展趋势可概括为以下几个方面:

1.3.1 优质化

为满足科技发展的需要,依靠半导体工业提供的可能性,电子器件的性能不断得到完善。一些低噪音、高稳定度、高输入阻抗、高频响、宽频带、高保真度的电子器件不断出现、指标不断刷新、价格不断下降。诚然,不是一个器件同时满足上述要求,因为并不是在所有情况下对各种性能都有高要求,何况上述指标中有的还是互相矛盾的。一方面要看到新电子器材给我们提供的完善电路性能的可能性,另一方面又要按实际需要合理选择器件。

优质化的一个重要方面是提高电路的工作可靠性。随着电路,特别是大规模集成电路的迅速发展,一个电路中包含的晶体管等元器件数目越来越多。一个含有 10^4 个晶体管的电路,如若单个器件的可靠性为 0.9999,那么这个电路的总体可靠性仅为 $0.9999^{10000} \approx 0.37$ 。当单个器件的工作可靠性为 0.99999 时,整个电路的工作可靠性约为 0.905。这就是说,为使整个电路的工作可靠性达到 0.99,则单个器件的可靠性必须达到 0.999999。从这一数字可以看出,现代仪器对元器件的质量,特别是工作可靠性提出了极严的要求。

1.3.2 集成化

仪器电路向集成化发展趋势包括:(1)集成块的密集度越来越高,一个晶体管的尺寸已小到 $1\mu\text{m}$,在一块芯片上制作几十万只、上百万只晶体管已成为现实,实际限制因素往往是一块芯片上输入和输出引脚数不能太多;(2)采用集成块的范围越来越宽广,不仅放大器、逻辑数字电路采用集成块,而且如锁相环、脉宽调制电路等都已集成块。

集成电路不仅体积小、功耗小,而且引线短、寄生因素小,整个组件处于同样工作环境下,抗干扰性能好,易于达到较高精度、较高频响。

集成电路的一个特点是有源元件容易制作,无源元件制作比较困难,这使得在电路构成上采用晶体管越来越多,而阻容等元件减少,采用电感、变压器更少。另一个特点是集成电路参数不易精确,但一块片上参数一致性较好,这导致采用差分、平衡电路越来越多。

1.3.3 数字化

数字式电路不仅读数方便、客观、量程大,能较好地解决量程与分辨率的矛盾,而且(1)易于集成化,因为在数字电路中重复应用同类组件较多;(2)抗干扰能力强,因为数字电路只需判别有、无或 1、0 两个状态;(3)便于动态采样,便于记忆保存;(4)便于与计算机联用。所以数字电路在检测仪器中应用越来越广。

但是,数字电路不可能完全代替模拟电路,因为客观存在的被测量多数是模拟的。而且仪器的精度还主要取决于前级模拟接收与转换、模拟放大、模/数转换上。一些小量程的模拟式测微仪器分辨率和精度都不低于纯数字式仪器。而且比较简单、成本较低。然而确实存在越来越多地用数字式电路,模/数转换尽可能安排在测量系统前级的趋势。

1.3.4 通用化

通用化有三方面含义:(1)在一个电路中尽量采用相同的单元电路,这给元器件的订购、电路调试、电路集成化都带来方便;(2)整个仪器的构成采用电路模块化、积木化。例如相应的电感传感器加上锁相放大器(含振荡器)与电子计算机(含模/数转换电路)就可构成各种物理量的电感式测量仪。采用这种模块组合方式的好处是:各种基本功能仪器由专业厂生产,有利于提高质量、降低成本。对使用单位来说,这些基本功能仪器可视需要组合、互相借用,提高效率;(3)推广通用仪器。当然专用仪器比较简单便宜,对一些常规的、重复的、大量的测试任务,专用仪器还很有必要。仪器的通用化并不是要求仪器的功能十分齐全,而是基本仪器比较简单,可以通过增加附件,联接扩展器等等,来满足各种测试任务的需要。

1.3.5 自动化与智能化

随着计算机的迅速发展,其性能日益完善、价格不断下降,微处理机与微计算机在仪器中的应用日益广泛。它使仪器具有两个显著的特点:柔性自动化与智能化。仪器可以灵活地按照人们编定的程序要求自动地完成测量操作,采集测量数据,自动进行调节和校正。它有记忆功能,进行测量信息的存储和学习,即按人们第一遍的操作,自动进行以后的操作。它有逻辑判断和运算功能,自动选择量程、进行数据处理、自动诊断故障甚至自动修复的功能。它能根据以前的测量过程,总结经验教训,在以后的测量中自动地选用更合理的测量方案。检测仪器的智能化正处在开发研制阶段,因此现在还很难对智能化的全部含义作一个确切地概括。

仪器电路中硬件常常为软件所代替,硬件软件化具有灵活、经济的特点,但有时使速度受到限制。

第二章 信号放大电路

测量电路是检测仪器的重要组成部分,它的作用是把传感器输出的电信号显示出来。在自动控制系统中,测量电路输出的信号还要送到调节器与控制器,并通过执行器对被测量(控制的对象)进行调节与控制。

在检测仪器的测量电路中通常都有信号放大级(即前置级),其功能是把传感器输出的微弱信号放大到足以推动指示器、记录仪或各种控制机构。信号放大电路的结构形式,视传感器的类型而定。本章论述了常用的线性集成运算放大电路的设计,并介绍了特殊的信号放大级(如低漂移、高阻抗、低噪声等)的设计。

§ 2.1 电荷放大器

随着工农业、科学研究和国防事业的日益发展,力、加速度、振动、冲击等的测量日益显得重要。目前,在这些测量中广泛地应用压电传感器,它将被测量转换成电荷输出,并把电荷送入电荷放大器,使电荷放大器的输出电压正比于被测量。电荷放大器的主要特点是测量灵敏度与电缆长度无关,这对远距离测量提供了方便。

2.1.1 电荷放大器原理

所谓电荷放大器,就是输出电压正比于输入电荷的一种放大器。它是利用电容反馈,并具有高增益的一种运算放大器,其原理电路如图 2-1 所示。放大器的反相输入端与传感器相连,其输出经电容 C_f 反馈至输入端。若 A_d (开环放大倍数)很大,则反相输入端虚地点对地电位趋近于零。由于放大器的直流输入电阻很高,则传感器的输出电荷 Q 只对电容 C_f 充电, C_f 上的充电电压为 $U_c = Q/C_f$ 。此电压即为电荷放大器的输出电压。即

$$U_o = -Q/C_f \quad (2-1)$$

显然可见,电荷放大器的输出电压,仅和输入电荷成正比,和反馈电容 C_f 成反比,与其它电路参数、输入信号频率均无关。实际上并非如此,式(2-1)只有在理想情况下才成立。电荷放大器的实际等效电路如图 2-2(a)所示。其中:

C_s ——压电传感器固有电容;

C_c ——输入电缆等效电容;

C_i ——放大器输入电容;

C_f ——反馈电容;

G_c ——输入电缆的漏电导;

G_i ——放大器的输入电导;

G_f ——反馈电导。

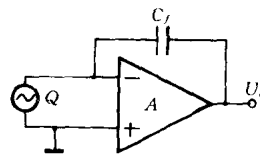
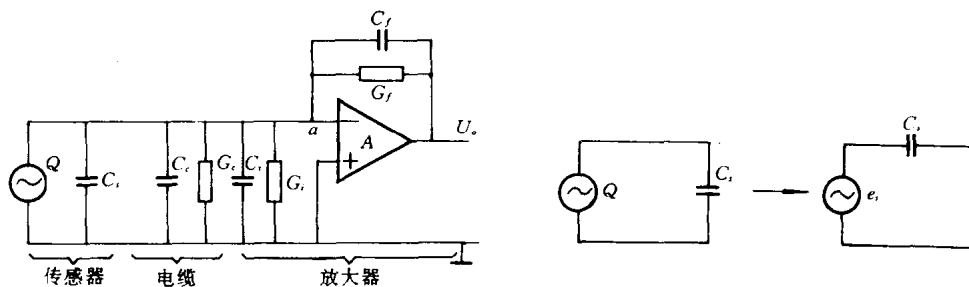


图 2-1 电荷放大器



(a) 电荷放大器的实际等效电路

(b) 电荷源用电压源代替

图 2-2

若将图 2-2(a)中传感器电荷源用电压源代替,如图 2-2(b)所示。则根据等效电路可得

$$(e_s - U_a)j\omega C_i = U_a[(G_c + G_i) + j\omega(C_c + C_i)] + (U_a - U_o)(G_f + j\omega C_f) \quad (2-2)$$

式中 U_a 为 a 点电压。因 a 点为虚地点,即 $U_a = -\frac{U_o}{A_d}$,代入(2-2)可得

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{-j\omega C_i A_d e_s}{(G_f + j\omega C_f)(1 + A_d) + G_i + G_c + j\omega(C_c + C_i + C_s)} \\ &= \frac{-j\omega Q A_d}{(G_f + j\omega C_f)(1 + A_d) + G_i + G_c + j\omega(C_c + C_i + C_s)} \end{aligned} \quad (2-3)$$

显然可见,实际电荷放大器的输出电压,不仅和输入电荷 Q 有关,而且和电路参数 G_i 、 G_c 、 G_f 、 C_i 、 C_c 、 C_s 及信号频率 f 、开环增益 A_d 有关。

下面具体分析以上各参数对电荷放大器输出电压 U_o 的影响。

2.1.2 电荷放大器特性

2.1.2.1 电荷放大器的理想特性

由于在通常情况下 G_c 、 G_i 和 G_f 均很小,则式(2-3)可简化为

$$U_o = \frac{-A_d Q}{C_c + C_i + C_s + (1 + A_d)C_f} \quad (2-4)$$

一般情况下, C_i 为几十 pF, C_f 为 $(10^2 \sim 10^5)$ pF, C_c 约为 100 pF/m。所以式(2-4)中 $(1 + A_d)C_f \gg (C_c + C_i + C_s)$

因此,式(2-4)可简化为

$$U_o = \frac{-A_d Q}{(1 + A_d)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (2-5)$$

显然,这和定性分析所得理想电荷放大器的特性是一致的,即电荷放大器的输出电压 U_o 正比于输入电荷 Q ,反比于反馈电容 C_f 。

由此可见,只有满足 G_i 、 G_c 和 G_f 很小和 $(1 + A_d)C_f \gg (C_c + C_i + C_s)$ 条件下,电荷放大器才能获得近似的理想特性。

2.1.2.2 开环电压增益的影响

电荷放大器是一种具有电容反馈的运算放大器。运算放大器的运算误差与其开环电压增益成反比。当 C_i 很小时,实际电荷放大器的测量误差与开环电压增益的关系,可以由下式求得:

$$\delta = \frac{\text{理想电荷放大器输出} - \text{实际电荷放大器输出}}{\text{理想电荷放大器输出}}$$

$$\delta = \frac{-\frac{Q}{C_f} - \left[-\frac{A_d Q}{C_s + C_c + (1 + A_d)C_f} \right]}{-Q/C_f} \times 100\%$$

$$= \frac{C_c + C_s + C_f}{C_s + C_c + (1 + A_d)C_f} \times 100\% \quad (2-6)$$

由式(2-6)可见,当 $(1+A_d)C_f \gg (C_s+C_c)$ 时,误差 δ 与开环电压增益 A_d 成反比。

2.1.2.3 电荷放大器的频率特性

式(2-3)是电荷放大器的频率特性表达式。为了更清楚的表示 U_o 与 f 之间的关系,可将式(2-3)进一步简化。由于开环电压增益 A_d 很大,通常满足

$$G_f(1 + A_d) \gg (G_i + G_c), \quad C_f(1 + A_d) \gg (C_s + C_c + C_i)$$

则式(2-3)可表示为

$$U_o = \frac{-j\omega Q A_d}{(G_f + j\omega C_f)(1 + A_d)} = \frac{-Q}{C_f + G_f/j\omega} \quad (2-7)$$

式(2-7)说明,电荷放大器的输出电压 U_o 不仅与输入电荷 Q 有关,而且和反馈网络参数 C_f, G_f 有关。当信号频率 f 较低时, $|G_f/\omega|$ 就不能忽略,因此式(2-7)是表示电荷放大器的低频响应。 f 愈低, $|G_f/\omega|$ 影响愈大,当 $|G_f/\omega| = |C_f|$ 时,其输出电压幅值为

$$U_o = \frac{Q}{\sqrt{2} C_f}$$

可以看出,这是截止频率点电压输出值。即是相应的下限截止频率(增益下降3dB时的对应频率)为

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_f / G_f} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (2-8)$$

式(2-8)是在 $G_i/A_d \ll G_f$ 的条件下得出的,如果 $\frac{G_i}{A_d}$ 与 G_f 可以相比拟,则 f_L 应由下式决定:

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_f / (G_f + G_i/A_d)} \quad (2-9)$$

由式(2-8)和(2-9)可见,若要设计下限截止频率 f_L 很低的电荷放大器,则需要选择足够大的反馈电容 C_f 及反馈电阻 $R_f = \frac{1}{G_f}$,也即是增大反馈回路时间常数 $R_f \cdot C_f = T_f$ 。由于反馈电阻 R_f 很大,则必须用高输入阻抗场效应管作输入级,才能保证有强的直流负反馈以减小输入级零点漂移。例如: $R_f = 10^{10} \Omega, G_f = 10^{-10} / \Omega, A_d = 10^4, C_f = 100 \text{pF}$,则下限截止频率为

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi R_f C_f} = \frac{1}{2\pi \times 10^{10} \times 100 \times 10^{-12}} 0.16 \text{Hz}$$

若 C_f 选用 $10000 \text{pF}, R_f = 10^{12} \Omega$,则 $f_L = 0.16 \times 10^{-4} \text{Hz}$ 。

电荷放大器的高频响应主要是受输入电缆的分布电容、杂碎电容的限制,特别是当远距离测量时,输入电缆可达数百米,甚至数千米。若电缆分布电容以 100pF/m 计,则 100m 电缆的等效分布电容为 10^4pF 、 1000m 电缆的等效分布电容为 10^5pF 。当输入电缆很长时,电缆本身的直流电阻 R_c 亦随增大。通常 100m 输入电缆,其直流电阻 R_c 约为几十欧姆。若将长电缆分布电容及直流电阻用一等效电容 C_c 及等效电阻 R_c 代替,如图2-3所示。则可以求得电荷放大器上限截止频率为

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_c (C_s + C_c)} \quad (2-10)$$

当然,放大器的开环频率响应高低,对电荷放大器的上限截止频率(闭环工作)也有影响,由反馈理论可知:

$$f_H = f_{H0}(1 + A_d F) \quad (2-11)$$

式中 f_H 是闭环情况下的上限截止频率, f_{H0} 是开环情况下的上限截止频率。若 $f_{H0} = 1\text{kHz}$, $A_d =$

$$10^4, F = \frac{1}{100}, \text{则 } f_H \approx 100\text{kHz}$$

由此可见,若要求电荷放大器的上限截止频率大于 100kHz ,则输入电缆的长度就受到限制。为了提高 f_H ,可以设计 f_{H0} 高的放大器,若选用线性集成电路作放大器,则必须选 $f_{H0} > 1\text{kHz}$ 的运放。

2.1.2.4 电荷放大器的噪声及漂移特性

电荷放大器的噪声主要来自输入级元器件和输入电缆,由于电荷放大器可以带数百米、甚至更长的输入电缆工作,因此长电缆带来的噪声是电荷放大器噪声一个重要来源。

电荷放大器零点漂移和其他放大器一样,主要是由于输入级的差动晶体管的失调电压及失调电流产生的。如果输入级用场效应管,则输入偏置电流很小,因此失调电压是引起零点漂移的主要原因。

图 2-4 是将噪声和零点漂移等效到输入端的等效输入电路。 U_n 是等效输入噪声电压, U_{off} 是等效输入失调电压。

由图 2-4 等效电路可以分析等效输入噪声和在输出端产生的噪声输出电压 U_m 之间的关系,只要将输入电荷 Q 及等效零点漂移电压 U_{off} 均等于零即可。由图 2-4 可列出方程

$$U_n[j\omega(C_c + C_s) + G_i + G_c] = (U_m - U_n)(j\omega C_f + G_f)$$

解得

$$\begin{aligned} U_m &= \frac{(j\omega C_f + G_f) + [j\omega(C_c + C_s) + G_i + G_c]U_n}{j\omega(C_c + C_s)} U_n \\ &= [1 + \frac{j\omega(C_c + C_s) + G_i + G_c}{j\omega C_f + G_f}] U_n \end{aligned} \quad (2-12)$$

当 $\omega(C_c + C_s) \gg G_i + G_c$, $\omega C_f \gg G_f$, 则式(2-12)可简化为

$$U_m = [1 + \frac{C_s + C_c}{C_f}] U_n \quad (2-13)$$

由式(2-13)显然可见,当等效输入噪声电压 U_n 一定时, C_s 和 C_c 愈小, C_f 愈大,输出噪声电压 U_m 愈小。当输入电缆越长,反馈电容越小,则相应噪声电压 U_n 的增益愈大,在输出端引起的噪声电压 U_m 也就愈大。

必须指出,除了输入器件及电缆引起噪声之外,由于电荷放大器是电容反馈,交流电源的 50Hz 交流电压很容易通过杂散电容耦合到输入端,特别是在最灵敏档,此时 C_f 最小,杂散电容对电荷放大器的影响也最灵敏。很小的 50Hz 交流电压通过杂散电容,耦合到输入端,也可以在输出端产生很大的 50Hz 干扰电压。为了减小 50Hz 交流干扰电压,必须在电荷放大器的输入端进行严密的静电屏蔽。

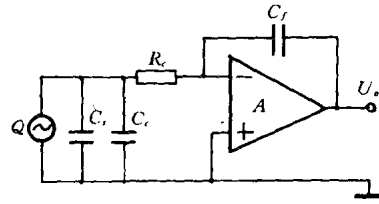


图 2-3 带长电缆电荷放大器等效电路

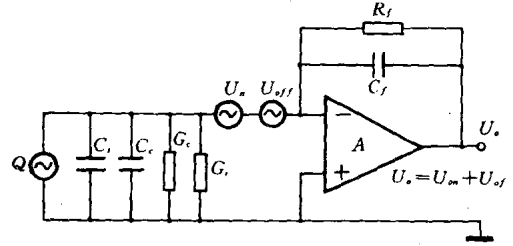


图 2-4 电荷放大器噪声及漂移等效电路