

电量变送器及其 检定装置

雷惠博 编著

第

电量变送器及其 检定装置

雷惠博 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书以新设备、新技术为基点,根据新颁布的国家标准和电力部规程,讲述电量变送器及其检定装置,包括:基础知识,基本工作原理和电路结构,检定方法,检定结果的处理。

本书可供电力系统从事自动化工作和计量工作的技术人员阅读,也可供制造、设计部门相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电量变送器及其检定装置/雷惠博编著.北京:中国电力出版社,1999

ISBN 7-5083-0051-3

I. 电… II. 雷… III. ①电量测量-变送器-基本知识
②电量测量-变送器-检定-装置 IV. TM933

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第17680号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路8号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京市地矿印刷厂印刷

各地新华书店经售

1999年7月第 1 版 1999年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.25印张 298千字

印数0001—5000册 定价21.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

电工测量变送器又称电测量变送器,简称电量变送器,是将交流电流、电压、有功(无功)功率、有功(无功)电能、频率、相位、功率因数和直流电流、电压等电量转换为直流电压、电流或数字信号的设备,广泛应用于现代工业的自动化系统中。

我国制造电量变送器的历史已有近40年,早在50年代末,上海电表厂就已生产JD2型2.5级感应式有功、无功功率变送器和JL2型2.5级整流式电流、电压变送器;60年代初,上海浦江电表厂生产了FS2~FS4型1.0级霍尔元件变送器和FS5~FS12型0.5级半导体元件变送器;60年代末至70年代,以晶体管为主的分立元件变送器日趋成熟,上海浦江电表厂生产了FS13~FS28型0.5级变送器,北京低压电器厂生产了YBG系列0.5级变送器,天津电表厂生产了FZ系列0.5级变送器;随着半导体集成技术的迅猛发展,从80年代开始,集成电路电量变送器迅速取代了分立元件变送器,上海浦江电表厂生产的FS29~FS33、FS40~FS49、FS50~FS55型0.5级变送器,哈尔滨电表仪器厂生产的FS37系列0.5级变送器,哈尔滨电工仪表研究所生产的FS100系列0.5级变送器,天津电表厂生产的FZM系列0.5级变送器等,直到现在还在生产。

80年代中期,北京低压电器厂引进了瑞典CEWE公司的CT系列0.5级变送器,上海浦江电表厂和贵阳永胜电表厂同时引进了美国罗切斯特公司的TD-1000系列0.25级和0.5级变送器,永胜电表厂还引进了德国哈特曼、布朗公司的ET30系列0.5级变送器。这些引进产品质量优良,性能稳定,受到用户欢迎,对国产变送器质量的提高也起到了推动作用。

特制集成电路(ASIC)技术是80年代迅速发展起来的高新技术,它是将超大规模集成电路(VLSI)的工艺技术、计算机辅助设计(CAD)技术、自动测试技术(ATE)三者结合的丰硕成果,实现了“用户—厂家—用户”的新设计思想。80年代末,浙江海盐普博电机有限公司引进台湾的FP、GP系列0.2、0.5级变送器采用了以ASIC技术制成的变送器专用芯片,即所谓厚膜电路,从而使变送器的集成度更高,工作更加可靠,温度特性和长期稳定性更加优良。

电力系统是电量变送器的最大用户。进入90年代后,电力自动化技术迅速进入实用化阶段,电量变送器作为自动测试和遥测系统原始数据采集装置,具有举足轻重的地位。随着电量变送器国家标准和电力部电量变送器检定规程的制定,我国变送器产业如虎添翼,正处于蓬勃发展时期。国外先进技术和产品的引进促进了国产产品质量的提高和性能的完善,国产产品以它的价格优势与引进产品平分秋色,继续在竞争中发展。

随着电量变送器在自动化系统中重要性的提高和使用量的增加,变送器的检定工作显得越来越重要。近年来,电子式电量变送器校验装置发展迅速,技术越来越先进,性能越来越完善,普遍采用数字波形合成技术及单片机控制,实现了全自动检定,现已达到0.05级的准确度,基本上能满足变送器检定工作的需要。

电量变送器行业日新月异,新产品、新技术层出不穷。但是长期以来,国内缺乏变送器方面的专著,给有关人员了解该专业造成一定困难。一些同行期望作者为此尽力,以解当务

之急。作者自知才疏学浅，难以胜任，但盛情难却，只好尽力而为。现在总算交出一份答卷，请各位同行评判。

本书分为三篇，第一篇介绍与电量变送器及其检定装置有关的一些基础知识；第二篇介绍各种电量变送器、功率总加器、变送器检定装置的基本工作原理和电路结构；第三篇介绍上述设备的检定方法。

本书力求理论联系实际，以期对从事电量遥测和自动测试的专业人员及从事变送器设计、制造、测试、检定的技术人员有所帮助。

尤德裴教授对本书进行了审阅，提出不少宝贵意见，作者受益匪浅，谨致诚挚的谢意。

囿于作者的理论水平和实践经验，书中难免存在疏漏、谬误之处，恳切希望读者批评指正。

雷惠博

1999年3月

目 录

前 言

第一篇 基础知识

第一章 计量基础知识	1
第一节 误差理论基本知识	1
第二节 测量不确定度	4
第二章 电子基础知识	7
第一节 集成运算放大器	7
第二节 变送器的输出电路	14
第三节 数-模转换	19
第四节 直流稳压电源	24
第三章 三相电路功率的测量	27
第一节 用对称分量法计算不平衡三相电路	27
第二节 三相电路有功功率和无功功率的测量	31
第四章 电量变送器国家标准技术要求	38
第一节 基本误差和参比条件	38
第二节 改变量和标称使用范围	41
第三节 其他技术要求	43

第二篇 电量变送器及其检定装置的原理

第五章 交流电流和交流电压变送器	49
第一节 电流、电压平均值变送器	49
第二节 电流、电压真有效值变送器	55
第六章 直流电流、直流电压变送器	57
第七章 三相功率变送器	61
第一节 分立元件三相功率变送器	61
第二节 集成电路三相功率变送器	68
第三节 三相功率变送器的误差与调试	75
第四节 三相无功功率变送器	81
第八章 三相电能变送器	89
第九章 频率变送器	96
第一节 利用集成 f - U 转换器构成的频率变送器	96
第二节 利用晶振作时间基准的频率变送器	98
第十章 相位和功率因数变送器	100

第一节	相位变送器.....	100
第二节	功率因数变送器.....	103
第十一章	微机变送器	109
第十二章	功率总加器	113
第十三章	电量变送器检定装置	116
第一节	三相稳定电源.....	117
第二节	数字式标准表.....	132
第三节	校验切换装置.....	136

第三篇 电量变送器及其检定装置的检定

第十四章	电量变送器的检定	139
第一节	一般要求.....	139
第二节	通用检定方法.....	143
第三节	有功功率变送器的检定.....	149
第四节	无功功率变送器的检定.....	152
第五节	电流、电压、频率、相位角、功率因数变送器的检定.....	158
第六节	检定结果的处理.....	160
第七节	改变量测定方法.....	162
第十五章	电能变送器的检定	167
第十六章	功率总加器的检定	172
第十七章	电量变送器检定装置的检定	175
第一节	一般要求.....	175
第二节	检定方法.....	181
参考文献	参考文献.....	189

第一章 计量基础知识

电量变送器属于计量器具，但是变送器的使用人员大部分是自动化工作人员。为了帮助他们熟悉计量工作，本章简要介绍有关计量的基础知识。

第一节 误差理论基本知识

一、测量误差的来源

测量的目的在于求出被测量的真值，但是一切测量都含有误差，即使采用最先进的测量手段仍然不可能测出真值，只是更接近于真值而已。

产生测量误差的原因通常有：

(1) 测量装置（包括计量器具）的基本误差，即其在参比条件下的误差。它通常是误差的主要来源。这种误差是不可避免的。

(2) 在非标准条件下，各种影响量引起的改变量。例如，当温度、湿度、外磁场、外电场、辅助电源电压、频率、波形等与环境有关的影响量，以及被测量的电压、电流分量及其频率、波形、功率因数及三相电量对称性等与被测量有关的影响量超出参比条件时引起的改变量，或称附加误差。

(3) 方法误差。即由于所依据的测量原理不严密或所用的测量方法不完善引起的测量误差。例如，根据欧姆定律用电压电流法测量电阻值时，由于电压表或电流表内阻引起的误差；用电动系功率表测量功率时，不可避免地将功率表的部分损耗计入测量结果引起的误差；用两功率表跨相 90° 接线测量三相电路无功功率时，由于三相电量不对称引起的附加误差等。方法误差是原理性误差，与测量仪器的准确度无关。

(4) 在参比条件下，被测量随时间的变化。任何模拟式仪表，由于机械惯性等原因，其指示器的示值总是滞后于被测量的变化，即存在一定的响应时间；任何数字式仪表的示值都是时间的不连续函数，具有固定的采样时间，在一个采样周期之内，示值保持不变。因此，被测量随时间的变化都会引起测量误差。

(5) 人员误差。这是由工作人员的技术水平和主观因数引起的误差。例如，读取指针式仪表的示值时，由于读数习惯的不同，有人读的偏高，有人读的偏低；不同的人员读取仪表读数的快慢也有所不同；有人由于责任心不强，甚至发生错误的读数和记录等。

二、测量误差的种类

测量误差的定义是，测量结果与被测量真值之差。根据测量误差的特点，可分为系统误

差、随机误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差。在同一被测量的多次测量过程中, 保持恒定或以可预知方式变化的测量误差称为系统误差。按其变化规律可分为固定值的系统误差和随条件变化的系统误差两类。固定值的系统误差值(包括正负号)恒定。如采用天平称重时标准法码误差引起的误差分量、指示仪表定度失准引起的误差分量等就属于这一类误差。其值以确定的(并时常是已知的)规律随某些测量条件变化的系统误差称为随条件变化的系统误差, 如随温度周期变化引起的温度附加误差等。固定值的系统误差可以修正。

(2) 随机误差。在同一量的多次测量过程中, 以不可预知方式变化的测量误差分量称为随机误差。它引起对同一量的测量列中各次测量结果之间的差异, 常用极限误差或标准差表征。

随机误差是多项随机影响量同时作用的结果, 它服从概率统计规律。对同一被测量进行多次测量, 其读数的平均值趋向稳定值, 即多次测量平均值的随机误差趋向零值, 这是随机误差的重要特性。

(3) 粗大误差。它又称为疏忽误差或过失误差, 是指明显超出规定条件下预期的误差, 它是统计的异常值。若测量结果中带有粗大误差, 应按一定规律将它剔除, 但绝不可将认为不理想的数据盲目舍弃。

三、测量误差的表示方法

表示测量误差的基本形式是绝对误差和相对误差, 但也常用引用误差表示计量器具的误差。

1. 绝对误差

绝对误差简称误差, 它等于测量结果减去被测量的真值。设被测量的真值为 x_0 , 测量结果为 X , 则绝对误差 ΔX 可表示为

$$\Delta X = X - x_0 \quad (1-1)$$

式中的测量结果可以是一次测得值, 也可以是算术平均值。在一般情况下, 我们并不知道真值。所以, 在实际工作中, 应根据需要选择约定真值来代替真值。所谓约定真值是指“为了给定目的可代替真值的量值”, 一般称其为实际值。例如, 在检定工作中, 可以把标准器的示值作为约定真值。

2. 相对误差

相对误差等于绝对误差除以真值。设被测量 X 的相对误差为 γ_1 , 则

$$\gamma_1 = \frac{\Delta X}{x_0} \quad (1-2)$$

为计算方便, 常用测得值 X 代替真值(实际值)计算相对误差, 即令

$$\gamma_1 = \frac{\Delta X}{X} \quad (1-3)$$

式(1-2)与式(1-3)的计算结果差值很小, 可以忽略。

3. 引用误差

引用误差的表示式为

$$\gamma_2 = \frac{\Delta X}{X_F} \quad (1-4)$$

式中: X_F 为基准值或基值, 也称为引用值。

基准值可以是仪表的量程，也可以是测量范围上限或其他值，这个值在产品标准或检定规程中给出。

电测量指示仪表的误差和电测量变送器的误差都是用引用误差表示的，变送器的基准值等于其输出量程或输出量程的一半。

4. 数字仪表误差表达式举例

数字仪表的误差通常以相对误差、绝对误差或引用误差的组合形式来表达，一般有以下三种表达形式。

$$(1) \Delta = \pm (aA_x + bA_m)\%$$

式中： a 、 b 为常数； A_x 为被测量的实际值； A_m 为数字表的测量范围上限。该式是数字仪表误差表达的标准形式。

$$(2) \Delta = \pm (aA_x\% + n)$$

如果变换成标准形式，则应使 $b = 100 * n / N$ 。其中 N 是数字仪表的满码值（不含小数点）。

$$(3) \Delta = \pm (aA_x\% + \Delta)$$

上二式中： Δ 是绝对误差分量； n 为字数。如果变换成标准形式，则应使 $b = 100 * \Delta / A_m$ 。

四、正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度的含义不同，在研究和处理测量误差时要特别注意它们之间的区别和相互关系。

(1) 正确度。表示测量结果中系统误差大小的程度，它反映了在测量过程中所有系统误差的综合。对已定系统误差可用修正值来更正，对未定系统误差常用极限误差或其方和根来表示。

(2) 精密度。表示测量过程中随机误差大小的程度，它反映了在一定条件下进行多次测量时所得结果之间的符合程度。精密度通常用标准差来表示。

(3) 准确度。又称精确度，它反映测量结果中系统误差和随机误差的综合，表示测量结果与真值之间的一致程度。

此外，在许多文献和资料中，还经常提到“精度”一词。精度是正确度、精密度和准确度的泛称，它是一个概括性的词。精度高，则误差小；精度低，则误差大。至于是系统误差，还是随机误差，或者二者的综合，是不明确的。因此，应慎用这一名称。

五、随机误差和标准差

1. 随机误差

任何测量结果都会伴随有测量误差，一般认为测量误差服从正态分布。图 1-1 是服从正态分布的随机误差的概率密度曲线。

设被测量的真值为 x_0 ，期望（总体均值）为 m ，任一次的测得值为 X_i 。则该次测量的误差为

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= X_i - x_0 = (X_i - m) + (m - x_0) \\ &= \delta_i + \epsilon \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中： δ_i 是单次测得值 X_i 与期望 m 之差，一般称为随机真误差，实际上它是单次测量中随机误差的一个表现值； ϵ 是期望 m 与真值 x_0 之差，它实际上是系统误差中保持恒定的部分。

随机误差一般是由多种变化的偶发性因素造成的。例如，检

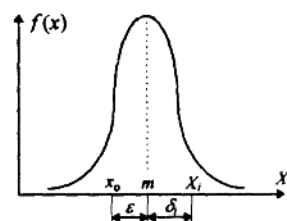


图 1-1 随机误差示意图

定装置电源（幅值、频率和相位）的突然变化带来的误差；接触电阻阻值变化带来的误差；数字仪表的量化误差；环境条件（温度、湿度、外磁场、外电场等）的突然变化带来的误差；试验人员因视觉、听觉差异带来的误差等都是随机误差。

服从正态分布的随机误差具有以下四个特性：

（1）单峰性：即绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

（2）对称性：绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。

（3）有界性：在一定测量条件下，误差的绝对值一般不会超过某一界限，通常把这个界限定为 3 倍标准差。

（4）抵偿性：在同一条件下，对同一量进行重复测量时，随着测量次数的增多，随机误差的代数和趋向零，或者说随机误差的期望为零。

2. 总体标准差

总体标准差又称母体标准差或理论标准差，经常简称为标准偏差或标准差，通常用符号 σ 表示，其定义如下

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - m)^2}{N}} \quad (1-6)$$

式中： δ_i 是随机真误差； N 是测量次数， $N \rightarrow \infty$ 。

总体标准差 σ 是表征测量分散性的重要参数，从理论上说，它是一个常数。在同一条件下，对同一个量进行多次重复测量时，每次测得值的随机误差有大小和正负之分，但随机误差的分布规律可以用 σ 来估价。如果 σ 小，说明分散性小，绝对值小的误差出现的概率大，精密度高；如果 σ 大，说明分散性大，绝对值大的误差出现的概率大，精密度低。

总体标准差的统计学意义是，随机误差不超过 $\pm\sigma$ 的概率是 68.27%，不超过 $\pm 2\sigma$ 的概率是 95.45%，不超过 $\pm 3\sigma$ 的概率是 99.73%。

3. 实验标准差

总体标准差 σ 是随机误差的表征值，但它是在测量次数无穷多的条件下定义的，实际上是不可能得到的。实用中可以对有限次随机误差通过数学处理，取得 σ 的估计值，这个估计值就叫作实验标准差，也经常叫作标准偏差估计值或标准差估计值，国际上规定用 s 表示。 s 也是个随机变量。当测量次数无穷多时， s 就等于 σ 。对于正态分布， s 通常用如下所示的贝塞尔公式计算

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1-7)$$

式中： $\bar{X}$ 为各次测量结果的平均值； n 为测量次数。

第二节 测量不确定度

一、测量不确定度的概念

我们通常用误差来评价测量结果的质量。如前所述，误差的定义是：测量结果与被测量真值之差，而被测量的真值是不可知的，所以误差本身是不确定的。再者，当有多个误差源

时,因为没有统一的误差综合方法,常常出现对于同一测量结果或同一计量器具,不同的人会有不同的评价。鉴于这种情况,国际计量局(BIPM)于1980年提出了用不确定度评定测量结果的建议,该建议的名称是《实验不确定度建议书(INC-1)》。该建议得到了国际法制计量组织(OIML)、国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)的积极响应。经过多次协商,这四个国际组织又对测量不确定度规定了统一的定义。我国接受了该国际建议,并于1991年颁发了国家计量技术规范JJG1027-91《测量误差及数据处理(试行)》(以下简称《规范》)。在该《规范》中,具体规定了测量不确定度的评定方法。

国际四组织和《规范》对测量不确定度的定义是:表征被测量的真值所处量值范围的评定。

不确定度与测量误差是两个完全不同的概念,误差以真值为中心,它说明测量结果与真值的差异;而不确定度则以测量结果为中心,用它估价测量结果与真值相符合的程度。我们已经知道,真值通常是未知的,因而误差本身就是不确定的,所以,用不确定度来评价测量的质量是比较科学和切合实际的。

二、测量不确定度的计算

根据国际标准化组织的建议和JJG1027-91的规定,按照评定方法的不同,将测量不确定度分为两类,其中按统计方法评定的不确定度称为统计不确定度,又称为A类不确定度;按非统计方法评定的不确定度称为非统计不确定度,又称为B类不确定度。

对于不确定度的分类,A类和B类与以前的“随机”和“系统”不一定存在简单的对应关系。

1. A类不确定度

A类不确定度用统计方法计算,随机误差是它的主要来源。A类不确定度用标准差来表征,标准差可用实验标准差来估计。实验标准差按贝塞尔公式计算。

如果含有多个A类不确定度分量,当各分量相互独立时

$$s = \sqrt{\sum (C_i s_i)^2} \quad (1-8)$$

式中: s_i 为A类不确定度分量的实验标准差; C_i 为A类不确定度分量的传播系数。

2. B类不确定度

B类不确定度是用非统计方法评定的不确定度,虽然不能称为系统不确定度,但仍然可以认为,系统误差中的不可掌握部分是它的主要来源。

B类不确定度各分量也须用类似实验标准差 s_i 的标准差 u_j 来表征, u_j 可用下式计算

$$u_j = b_j / k_j \quad (1-9)$$

式中: b_j 为误差源的误差限,是以一定概率对误差源不确定度的估计值; k_j 是与误差源的误差分布和估计 b_j 值时的概率有关的置信因数。

对于正态分布律的误差源,如果误差限 b_j 用极限误差来表示,则认为其置信概率为99.73%,应取置信因数 $k_j=3$;对于均匀分布律的误差源,如果误差限 b_j 用极限误差表示,则应取置信因数 $k_j=\sqrt{3}$ 。当误差源的分布密度函数不可知时,可按均匀分布律对待,但偏于保守,而按正态分布律计算则比较冒险。

如果B类不确定度各分量相互独立,可按下式合成

$$u = \sqrt{\sum (C_j u_j)^2} \quad (1-10)$$

式中: C_j 为 B 类不确定度各分量的传播系数。

3. 合成不确定度

当各不确定度分量相互独立时, A 类不确定度和 B 类不确定度按下式合成

$$u_c = \sqrt{\sum (C_i s_i)^2 + \sum (C_j u_j)^2} \quad (1-11)$$

根据误差理论, 用实验标准差 s 估计标准差 σ 时带有负偏差, 所以, 当测量次数较少时, 应将 A 类不确定度各分量的实验标准差进行修正, 即乘以系数 $t_p(\nu)$ (t 分布临界值), 然后代入式 (1-11) 计算, 系数 $t_p(\nu)$ 的取值见《规范》附录 1 或有关误差理论书。例如, 当测量次数是 5, 计算得到的实验标准差为 0.5 时, 查表得置信概率为 0.6827 时的 t 分布临界值 $t_{0.68}(5) = 1.14$, 则应将实验标准差修正为 $t_{0.68}(5) \times 0.5 = 1.14 \times 0.5 = 0.57$ 后, 代入式 (1-11) 计算合成不确定度。

4. 总不确定度

合成不确定度及其分量都是用一倍标准差表示的, 其置信概率为 68.27%。但是人们经常需要把置信概率提高一些, 置信概率提高, 必然导致置信区间的扩大。国际标准化组织和我国《规范》规定, 将置信区间扩大后的不确定度用总不确定度 U 表示, 其定义如下

$$U = Ku_c \quad (1-12)$$

式中: u_c 为合成不确定度; K 为置信因数。

置信因数 K 的大小与所选概率有关, 其值一般选 2~3, 在《规范》中实际上规定了三个置信概率: 0.68, 0.95, 0.99, 也就是规定了三个 K 值: 1, 2, 2.6, 其中置信概率 0.95 和 K 值 2 是优选值。

5. 测量结果的表达形式

设被测量为 Y , 定值系统误差经修正后的测量结果为 y 。

(1) 总不确定度用绝对值给出时, 设绝对总不确定度为 U , 则测量结果用下列三种形式之一表达

$$Y = y \pm U \quad (p = 0.68) \quad (1-13)$$

$$Y = y \pm U \quad (1-14)$$

$$Y = y \pm U \quad (p = 0.99) \quad (1-15)$$

式中当置信概率为 0.95 时, 不在括弧内标出。

式 (1-13) ~ (1-15) 表明, 被测量 (真值) 处于以测量结果 y 为中心, 绝对偏差为 $\pm U$ 的区间内的概率是 p 。

(2) 总不确定度用相对值给出时, 设相对总不确定度为 U_r , 则测量结果用下列三种形式之一表达

$$Y = y(1 \pm U_r) \quad (p = 0.68) \quad (1-16)$$

$$Y = y(1 \pm U_r) \quad (1-17)$$

$$Y = y(1 \pm U_r) \quad (p = 0.99) \quad (1-18)$$

其中当置信概率为 0.95 时, 不在括弧内标出。

式 (1-16) ~ (1-18) 表明, 被测量 (真值) 处于以测量结果 y 为中心, 相对偏差为 $\pm U_r$ 的区间内的概率是 p 。

第二章 电子基础知识

本章主要介绍在电量变送器及其检定装置中普遍使用的电子电路的工作原理及部分元器件的技术要求。

第一节 集成运算放大器

集成运算放大器是一个高增益的多级放大电路，它把晶体管、二极管、电阻（有时还有小电容）和相互之间的连线等集成在一块硅片上，只要外接电源和少量元件，便可构成各种不同功能的运算器，如比例器、积分器、微分器、加法器、减法器、乘法器等。随着运算放大器性能的不断完善，它的应用范围已扩展到其他领域，如脉冲电压发生器、波形发生器、有源滤波器、采样保持器、比较器、检波器、各种转换器、电流源等。

本章的主要内容引自《数字化测量技术》（尤德斐，机械工业出版社，1980）。

一、集成运算放大器的基本概念

1. 集成运算放大器的特点

由于半导体制造工艺的特别要求，集成运算放大器具有以下特点：

（1）多用晶体管，少用电阻，避免使用高值电阻，因为在硅片上制造电阻所需面积比制造晶体管所需面积大得多。

（2）只用很小容量的电容，不用电感，所以级与级之间不采用阻容耦合，而采用直接耦合。为了解决直接耦合带来的严重的零点漂移和温度漂移问题，采用了差动放大器，因此电路具有双端输入单端输出的特点，而且具有很强的共模抑制能力。

（3）制造集成元件的精度虽然较差，但电阻的对称性好，电阻比稳定，晶体管特性的一致性易于保证，这正是制造差动放大器的必要条件。

2. 集成电路的引出端子

现代集成运算放大器通常有如图 2-1 所示的引出端子。实际产品中由于内部实际电路的差异，所给出的调零端和相位补偿端的数目可能不同，但供这些用途的引出端子是必备的。

3. 集成运算放大器的主要技术指标

（1）开环电压增益 G_{ol} 。运算放大器在没有任何外部反馈情况下的差动电压放大倍数记作 A_d ，如用对数表示时称为开环电压增益，记作 G_{ol} ，且 $G_{ol} = 20\lg A_d$ 。

（2）输入失调电压 U_{os} 。运算放大器两输入端都接地并把调零端子短路时由于制造上的不对称总有一定的电压输出，称为失调输出电压 U_{off} ，把它向放大器的输入端折算，即除以差动放大倍数 A_d ，称为输入失调电压，记作 U_{os} ，则 $U_{os} = U_{off}/A_d$ 。实际的 U_{os} 可正可负，但我们只对绝对值

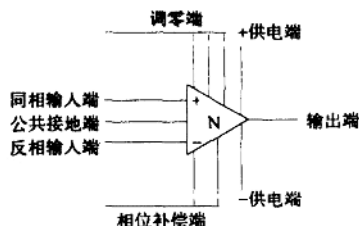


图 2-1 集成运算放大器的引出端子

感兴趣,希望它越小越好,一般为毫伏级,优良的可为微伏级。

(3) 输入失调电流 I_{os} 。运算放大器两输入端都接地时,总有一些电流流入或流出,实质上它们是差分输入级的偏置电流 I_{b1} 和 I_{b2} 。 I_{b1} 和 I_{b2} 之差称为输入失调电流,记作 I_{os} ,则 $I_{os} = I_{b1} - I_{b2}$ 。 I_{os} 越大说明输入级两晶体管的特性越不对称,当然希望它越小越好,一般为微安级,优良的可为纳安级。

(4) 输入偏置电流 I_b 。输入偏置电流是指输入信号为零时两个输入端静态基极电流的平均值,记作 I_b ,则 $I_b = (I_{b1} + I_{b2}) / 2$ 。因此可以说 I_b 是两基极电流的共模分量,输入失调电流 I_{os} 则是它们的差模分量。

输入偏置电流的大小主要决定于第一级晶体管的质量,若 β 小,则 I_b 大。若 I_b 大,一般 I_{os} 也大,所以希望它小好。实际应用中必须充分注意 I_b 的影响,因为不管信号源如何, I_b 总要流过去,在信号源内阻较大时会形成相当大的附加电压输入。

(5) 输入失调电压温度系数 $\Delta U_{os} / \Delta T$ 。单位温度变化引起的输入失调电压的变化量称为输入失调电压温度系数。

(6) 输入失调电流温度系数 $\Delta I_{os} / \Delta T$ 。单位温度变化引起的输入失调电流的变化量称为输入失调电流温度系数。

$\Delta U_{os} / \Delta T$ 和 $\Delta I_{os} / \Delta T$ 是衡量运算放大器温度稳定性的主要参数。

(7) 电源电压灵敏系数 $PSRR$ 。电源电压灵敏系数是指电源电压变化引起输入失调电压变化的系数,也称为电源电压抑制比。 $\Delta U_{os} / \Delta U_{cc}$ 称为正电源电压抑制比 $PSRR^+$, $\Delta U_{os} / \Delta U_{ee}$ 称为负电源电压抑制比 $PSRR^-$ 。

(8) 共模电压增益 G_{cm} 。共模电压放大倍数 A_{cm} 是指放大器的两输入端加入极性相同大小相等的信号时,输出端(对地)输出电压与输入电压之比,用对数表示时称为共模电压增益,即 $G_{cm} = 20 \lg A_{cm}$ 。

(9) 共模抑制比 $CMRR$ 。共模抑制比反映了放大器对共模输入电压的抑制能力,其定义为放大器差动放大倍数 A_d 与共模放大倍数 A_{cm} 之比,用对数表示为: $CMRR = 20 \lg (A_d / A_{cm})$ 。

(10) 输出电阻 R_o 。输出电阻 R_o 是指运算放大器不接负载时输出端对地的电阻。

(11) 输入电阻 R_i 。输入电阻一般是指差动输入电阻。由于在直流情况下难于把零电流的影响分开,所以 R_i 通常是在交流(1kHz)小信号下测得的。

(12) 共模电压范围。共模电压范围是指不影响放大器正常工作的输入端允许施加的同相电压范围,当运算放大器工作在同相放大状态,特别是作跟随器应用时要特别注意这个问题。

(13) 最大输出电压 U_{opp} 。最大输出电压是指运算放大器尚未失真的最大输出幅度,一般用峰-峰值来表示,有时也称为动态输出范围。

(14) 电压摆率。电压摆率是指输出电压随时间变化快慢的一种尺度,单位为 $V/\mu s$ 。在运算放大器中小信号响应和大信号响应是不同的,电压摆率用来衡量大信号作用下放大器的瞬态响应。

(15) 单位带宽。单位带宽是指运算放大器的增益随工作频率升高而降低直到增益为 0dB 时的频率。有时也称为特征频率。

(16) -3dB 带宽。指工作频率升高放大倍数下降,直到增益由低频时的数值下降 3dB 那一点的频率。

(17) 放大器功耗 P_{ro} 。放大器的功耗是指在静态时所消耗的电源功率。

二、反相输入比例放大器

1. 闭环电压放大倍数 A_f

图 2-2 是反相输入比例放大器, 采用电压并联负反馈结构。 u_i 是输入信号电压, u_o 是输出电压, R_i 是运算放大器的输入电阻, R_o 是运算放大器的输出电阻, b1、b2 分别是运算放大器的反相输入端和同相输入端。

由图 2-2 可以得到

$$A_d = \frac{u_o}{u_{b1} - u_{b2}} = \frac{u_o}{u'_i}$$

式中 A_d ——开环放大倍数;

u_{b1} 、 u_{b2} ——反相端对地电压和同相端对地电压;

u'_i ——输入端 b1、b2 之间的电压。

由于开环放大倍数 A_d 相当大, 一般都在 10^5 以上, 所以 $u'_i \rightarrow 0$, 即反相输入端与同相输入端几乎处于相同电位。这是因为输出电压 u_o 总是一个有限值, 而 $u'_i = u_o/A_d \rightarrow 0$ 的缘故。

又因为输入电阻 R_i 相当大, 一般不小于 $10^{10}\Omega$, 所以流入反相输入端的电流 i_i 近似等于零, 因此在电阻 R_2 上的压降也极小, 故可认为同相输入端 b2 处于地电位, 即 $u_{b2} = 0$ 。

由于 $u'_i \rightarrow 0$, 因此反相输入端 b1 的电位 u_{b1} 接近于地电位, 但不等于地电位, 故称为虚地。需要特别注意的是, 反相输入端 b1 并不是在任何电路中都是虚地, 只有在同相输入端 b2 处于地电位时, b1 点才是虚地。

在图 2-2 中, $i_1 = i_i + i_i \approx i_i$, 故

$$\frac{u_i - u_{b1}}{R_1} = \frac{u_{b1} - u_o}{R_f}$$

因为 b1 为虚地, $u_{b1} \rightarrow 0$, 所以

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

于是闭环电压放大倍数为

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (2-1)$$

式中: 负号表示输出电压与输入电压反向。

2. 输入电阻

图 2-3 的闭环输入电阻 R_{if} 在数值上等于输入电压与输入电流之比, 即 $R_{if} = u_i/i_1$, 由图可知

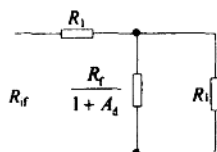


图 2-3 反相输入比例放大器等效输入回路

所以

$$\begin{aligned} i_1 &= i_i + i_i = \frac{u'_i - u_o}{R_f} + \frac{u'_i}{R_i} \\ &= u'_i \frac{R_i + A_d R_i + R_f}{R_f R_i} \\ u'_i &= i_1 \frac{R_f R_i}{R_i + A_d R_i + R_f} \end{aligned}$$

$$u_i = i_1 R_1 + u'_i = i_1 R_1 + i_1 \frac{R_f R_i}{R_i + A_d R_i + R_f}$$

$$R_{if} = \frac{u_i}{i_1} = R_1 + \frac{R_f R_i}{R_i + A_d R_i + R_f} \quad (2-2)$$

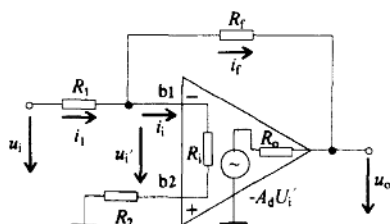


图 2-2 反相输入比例放大器

改写式 (2-2) 可发现更清晰的物理意义

$$R_{if} = \frac{u_i}{i_i} = R_i + \frac{R_i R_f}{R_i + A_d R_i + R_f} = R_i + \frac{\frac{R_f}{1+A_d} R_i}{\frac{R_f}{1+A_d} + R_i} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 表示一个电阻串、并联网路, 如图 2-3 所示, 这就是反相输入比例放大器的等效输入电路。其中 R_i 和 R_i 显然是存在的, 第三只电阻反映了反馈电阻 R_f 对输入回路的影响。这种把反馈电阻 R_f 除以 $(1+A_d)$ 后向放大器输入端的等效折算, 称为密勒效应。运用密勒效应可使负反馈放大器的许多计算得以简化。

由于开环放大倍数 A_d 很大, 根据式 (2-3) 可以认为 $R_{if} \approx R_i$ 。

3. 输出电阻

闭环输出电阻的定义为, 输入信号短路时, 在输出端上作用以电压 Δu_o , 该电压与由其所引起的输出端电流的变化 Δi_o 之比, 即

$$R_{of} = \Delta u_o / \Delta i_o$$

图 2-4 中, R_o 为放大器本身的开环输出电阻, 等效电压源 $-A_d u'_i$ 反映了放大器的放大作用, 可以列出以下关系式

$$u'_i = \Delta u_o \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$\Delta i_o = \Delta i_{o1} + \Delta i_{of}$$

图 2-4 计算输出电阻的电路

其中
$$\Delta i_{o1} = \frac{\Delta u_o - (-A_d u'_i)}{R_o} = \frac{\Delta u_o + A_d \frac{R_i}{R_i + R_f} \Delta u_o}{R_o} = \Delta u_o \frac{1 + A_d F_b}{R_o}$$

这里 $F_b = \frac{R_i}{R_i + R_f}$, 为反馈系数。

$$\Delta i_{of} = \frac{\Delta u_o - u'_i}{R_f} = \Delta u_o \frac{F_b}{R_f}$$

则
$$R_{of} = \frac{\Delta u_o}{\Delta i_{o1} + \Delta i_{of}} = \frac{R_o}{1 + A_d F_b + \frac{R_o}{R_f} F_b} \quad (2-4)$$

若 $R_o \ll R_i$, 则
$$R_{of} \approx \frac{R_o}{1 + A_d F_b} \quad (2-5)$$

深度负反馈时, 由于 $(1 + A_d F_b) \gg 1$, 则 R_{of} 降至很小值, 表现出很强的负载能力。

三、同相输入比例放大器

1. 闭环电压放大倍数 A_f

图 2-5 是同相输入比例放大器, 采用电压串联负反馈结构。由图可知, $i_f + i_i = i_1$, 当 $R_i \rightarrow \infty$ 时, $i_i \rightarrow 0$, 故 $i_f = i_1$, 即

$$\frac{u_o - u_{b1}}{R_f} = \frac{u_{b1}}{R_i} \quad (2-6)$$

当 $A_d \rightarrow \infty$ 时, $u_{b1} = u_{b2} = u_i$, 代入式 (2-6) 得

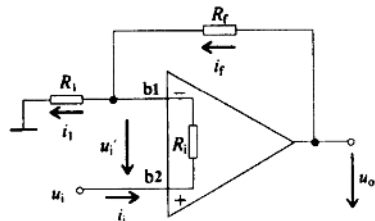


图 2-5 同相输入比例放大器