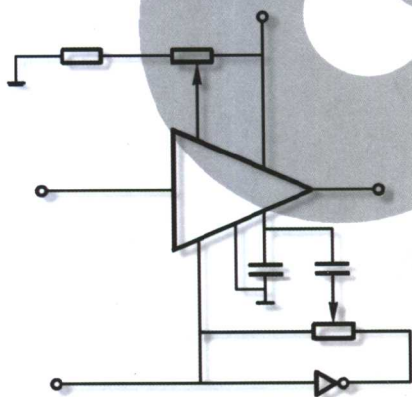


高等学校适用教材

SHUZI XIANSHI
CELIANG YIBIAO

数字显示 测量仪表

张建志 主编



中国计量出版社



物理实验

物理实验

数字显示 测量仪表

王 强 主编

王 强 主编



高等学校适用教材

数字显示测量仪表

张建志 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

数字显示测量仪表/张建志主编. —北京: 中国计量出版社, 2003. 11
高等学校适用教材

ISBN 7-5026-1777-9

I. 数… II. 张… III. 数字显示—测量仪表—高等学校—教材
IV. TH761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 094107 号

内 容 提 要

本书系统介绍了数字显示测量仪表的测试原理和方法、仪表的误差来源及处理方法。全书共分九章, 可分为两大部分: 第一部分 (第一、二、三、四章) 系统地介绍了数字测量仪表所应用的电路基础知识, 第二部分 (第五、六、七、八、九章) 系统地介绍了数字仪表的使用、检定、测试的理论和具体的检定、测试方法。此外还详细介绍了数字测量仪表产生误差的因素及影响, 并分析了数字测量仪表产生干扰的因素、防护措施以及对干扰的实际测量方法。为帮助读者学习和阅读, 每章后面配有习题。

本书可作为高等院校仪表、仪器、测控技术专业教材和教学参考书, 可供计量、生产、检测和调试人员使用, 也可作为工程技术人员的培训教材。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jilxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×960 mm 16 开本 印张 17.5 字数 297 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 27.00 元

(如有印装质量问题, 请与本社联系调换)

质量技术监督高校教材

编审委员会

主 任 张玉宽

副主任 马纯良 孙秀媛

委 员 瞿兆宁 裴晓颖 黄 夏 何伟仁

李小亭 张 艺 宋明顺 杨建华

吴宁光 史菊英 赵玉禄 孙克强

周志明 张莉莉 王庆仁 许吉彬

刘宝荣 韦录强 张万岭 孙振江

陈小林 朱和平 李素琴 刘宝兰

刘文继 张桂琴

出版前言

随着我国加入世界贸易组织，社会主义市场经济和质量技术监督事业的迅速发展，迫切需要大量的质量技术监督专业人才。质量技术监督高等教育在质量技术监督教育事业中占有重要地位，对提高在职人员的素质、改善队伍结构、培养新生力量具有重要意义。大力发展质量技术监督高等教育，将对质量技术监督事业产生深远的影响。

近年来，全国各地质量技术监督院校办学条件不断改善，招生规模不断扩大，教学质量和水平不断提高。与此同时，在质量技术监督教育中，高等教育所占比重不断增大。为了适应这种形势，加快质量技术监督院校教材建设的步伐，根据质量技术监督院校对专业教材的实际需求，我们组织全国质量技术监督及相关院校和单位编写了有关标准化、计量、质量等方面的系列专业基础课和专业课教材。

这套教材主要是根据质量技术监督高等教育发展的需要编写的。在目前情况下，存在多种形式的质量技术监督高等和中等专业教育，因此，在编写过程中从内容选取、结构设计、深浅程度等方面考虑了适用的多样性。质量技术监督普通中等专业教育、职业教育和人员技术培训等，可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

原国家质量技术监督局政策法规宣传教育司进行了本套教材的前期组编工作。参加教材审定工作的院校和单位有：中国计量学院、河北大学质量技术监督学院、四川省技术监督学校、山东省质量工程学校、广西计量学校、河南省质量工程学校、天津市渤海职业中等专业学校、吉林省技术监督职工中专学校、

北京市质量技术监督培训中心等。在教材的编写、审定等工作中，中国计量出版社、河北大学质量技术监督学院等单位做了很多具体、细致的工作。

这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面的努力，但仍可能存在很多不足之处，甚至于错误，我们拟在使用过程中听取各方面意见，于适当时机组织修订。

国家质量监督检验检疫总局人事司

2003 年 4 月

编者的话

本书是在电子技术, 数字电路等基础课程上开设的专业课程。随着电测技术、通信技术, 计算机技术的飞速发展, 数字显示测量仪表也已发展成为高精度仪表。数字化测量是近 20 年来发展起来的新技术, 而且应用越来越广泛。因为本书旨在阐明数字测量技术的基本原理和方法, 以及测量基本误差理论和数据处理知识, 并适当渗透了一些测量技巧, 这对培养学生的实践能力能起到较好的作用。对从事数字化测量工作的工程技术人员也有参考价值。利用本教材时可适当删选内容。

全书的教学时数为 75~90 学时, 建议实践课时不少于 20 学时。讲授内容可根据情况进行取舍。本书可分为两大部分, 第一部分(第一、二、三、四章)系统地介绍了数字测量仪表所应用的电路基础知识, 第二部分(第五、六、七、八、九章)系统地介绍了数字仪表的使用、检定、测试的理论和具体的检定、测试方法。此外还详细地介绍了数字测量仪表产生误差的因素及影响, 并分析了数字测量仪表产生干扰的因素、防护措施以及对干扰的实际测量方法。该部分实践性很强, 实用性较高。所以建议重点放在对测试方法、形成误差的各种因素、对误差影响采取的措施进行分析。

本书是根据编者多年来从事电磁测量的实践和教学的体会, 并参考有关资料而写成。通过对本书的编写, 以及现代电子测量技术的发展, 越来越感到数字化测量是基础理论较深, 应用越来越广泛, 发展越来越迅速的一门学科。在编写过程中得到了河北省计量测试研究院张秀敏、王会肖两位高级工程师的大力支持和帮助。谨向她们表示衷心的感谢。

本书第一、二章由河北大学质量技术监督学院宋占表高级讲师编写, 第三、四章由该院刘锦江高级讲师编写, 第六、七、八、九章由该院张建志副教授编写, 第五章由四川省技术监督学校邓鹏飏高级讲师编写。

由于作者水平有限, 书中一定有许多错误或不足之处, 欢迎读者批评指教。

编 者

2003 年 3 月

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 数字仪表的发展过程及用途	(1)
第二节 数字仪表的分类、结构及特点	(2)
第三节 数字仪表的主要技术术语及表示方法	(8)
第四节 数字仪表的主要模拟部件	(9)
习题	(31)
第二章 电子计数器	(32)
第一节 电子计数器的基本工作原理	(32)
第二节 电子计数器的测量误差	(43)
第三节 微计算机在电子计数器中的应用	(46)
第四节 电子计数器的测试与检定	(50)
习题	(53)
第三章 数字-模拟(D/A)转换技术	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 权电阻网络 D/A 转换器	(59)
第三节 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	(66)
第四节 权电流型 D/A 转换器	(69)
第五节 D/A 转换器的主要技术指标	(72)
第六节 D/A 转换器的应用	(77)
习题	(79)
第四章 模拟-数字(A/D)转换技术	(82)
第一节 A/D 转换器的基本原理	(82)
第二节 直接 A/D 转换器	(88)
第三节 积分式 A/D 转换器	(94)
第四节 脉冲调宽式 A/D 转换器	(108)
第五节 微机化数字测量仪表	(112)
习题	(118)
第五章 数字仪表中的交流-直流转换器	(120)
第一节 交流-直流转换器概述	(120)
第二节 平均值交流-直流转换器	(121)

第三节	有效值交流-直流转换器	(125)
第四节	峰值交流-直流电压转换器	(131)
第五节	其它量的数字化测量	(134)
第六章	数字电压表的检定与测试	(148)
第一节	检定概论	(148)
第二节	直流数字电压表的一般检查与检定要求	(149)
第三节	误差的检定方法	(153)
第四节	其它技术指标的测试与检定	(161)
第五节	检定与测试结果的处理	(173)
第六节	交流数字仪表的检定与测试	(175)
第七节	其它数字显示仪器、仪表的检定	(178)
习题		(193)
第七章	数字仪表的误差分析与测试技术	(194)
第一节	数字仪表的误差来源及表达式	(194)
第二节	输入特性对测量误差的影响	(204)
第三节	基准电压源引起的误差	(217)
第四节	数字仪表的测量技术	(220)
习题		(226)
第八章	数字仪表中的干扰及防护	(227)
第一节	串模干扰和共模干扰	(227)
第二节	串模干扰的抑制	(229)
第三节	共模干扰的抑制	(234)
第四节	杂音电压的来源及防护	(242)
习题		(244)
第九章	智能仪器与自动测试系统简介	(245)
第一节	智能仪器的发展概况及特点	(245)
第二节	数字仪表的智能化及技术特点	(248)
第三节	智能化数字仪表性能简介	(257)
第四节	自动测试系统	(260)
习题		(267)
参考文献		(268)

第一章 概 述

第一节 数字仪表的发展过程及用途

随着电测技术、计算机技术、通信技术的飞速发展，对测量仪器和测量技术也提出了更新的要求，数字化测量就是近 20 年来发展起来的新技术。利用数字化技术不仅可以对各种参数进行测量，而且可以通过接口技术与计算机配合实现自动化测量和生产过程的自动控制，数字测量仪表的应用也越来越广泛。

数字化测量技术的基本内容是指将连续的被测物理量转换成相应的量子化了的断续量，即将模拟量自动地转换成数字量，然后予以数字编码，进行传输、存储、显示、打印（即用仪器仪表以数字形式显示和打印测量结果）。

各种物理量从理论上都存在着这种处理的可能性，但最方便、最直接、最容易实现的还是电量，即直流电压和频率，易于实现数字化。其它物理量则可通过中间手段，如传感技术、转换技术将其转换为直流电压和频率后再对其进行数字化测量。

自 1952 年第一台数字式电压表诞生于美国 Non-tinear 公司后，电测仪表数字化才成了一个新的发展方向。数字化测量技术的产生与发展和计算机的发展是密切相关的。

相对于其它仪表，数字测量仪表具有测量精度高、速度快、读数方便，并可以实现自动化测量和将测量结果以数码形式进行传输等优点。

因此，数字电压表问世后，它不仅作为模拟量/数字量转换之用，并被广泛应用于测量技术的领域，它正在逐步取代传统的模拟式电工仪器、仪表。如今，电测技术的发展已成为一个全新的方向。数字化电测仪表的发展也是全方位的。它跨过了电子管、晶体管、小规模集成电路、大规模

集成模块及应用微机等许多发展阶段,成为一个新的发展方向——数字化测量系统。以前在晶体管基础上制成并广泛应用的多路巡回检测装置,它可以对几十点、上千点的参数进行自动的、按规定的顺序测量、显示,越线报警及存储、打印。以后这种装置通过功能组件化而实现了标准化、通用化。性能、功能都得到了很大提高。随着计算机的发展,数字化测量仪表利用 GPIB 或 RS-232C 等通用接口已实现自动化、程序化。

由于微处理器的普遍应用,现代数字测量仪表已经从技术和应用上完成了它的普及阶段,正在向新的阶段发展,其发展趋势有以下几个方面:

(1) 向精密测量领域发展并实现程控操作。

装有微处理器的测量装置,具有很高的稳定性和准确度,这是精密测量领域所期望的。同时,测量过程编排、功能和量程的选择、测量结果的显示均通过键盘及 CRT 实现。

(2) 可实现动态测量。

在测量过程中,它可以自动进行数据处理,输出被测动态过程的各个参数的值,动态测量在电测领域中正在高速发展。

(3) 数字化测量技术与计算机配合可以构成十分复杂的数字化自动测试系统。

由于通用接口技术和通讯技术的普及,使数字化测量技术有了更大的发展空间。实现了程控化、自校准、自诊断故障。以及复杂装置、复杂系统的动态工程的多种参数、多种激励和快速连续的测量。根据获得的测量信息,修正原拟数学模型的参数及规律,达到最优拟合的目的。

第二节 数字仪表的分类、结构及特点

大多数数字化电测仪器仪表是以直流数字电压表为核心,然后根据不同的被测对象,在直流数字电压表的基础上进行放大,衰减或转换,而产生出很多种类的其它仪器仪表。因此,下面将以数字电压表为基本内容进行分析、介绍。

一、数字仪表的分类与特点

(一) 数字仪表的分类

1. 按用途划分

数字仪表种类繁多,它们的内部结构通常也相差较大,其用途和使用环境也不尽相同,分类方法也很多。但仪表命名通常是根据仪表的测量对象及被测量的性质来分。

例如：电子计数器、数字电压表、数字相位表、数字频率计、数字电流表、数字欧姆表、数字式 Q 表、数字静电计、数字电桥、数字血压计、数字温度指示调节仪、数字电能表、数字测厚仪、数字压力计、数字称重显示器、数字指示秤等等。还有许多其它形式的数字测量仪器和数字式测量装置。

2. 按工作原理划分

因为数字电压表是所有数字仪表中最关键的核心部分，那么组成数字电压表的关键部分是模(A)/数(D)转换器。所以数字仪表按 A/D 转换器的原理分类已经被人们所认同。它可以分成如下四大类：

第一类是直接比较型：它有逐次比较式、跟踪比较式。它的基本原理是把被测电压和已知标准电压进行直接比较，从而求得被测电压的值。

第二类是间接比较型：它的基本原理是将被测的模拟信号和标准的模拟信号，各自先转换成另一种同类型的模拟信号 A 和 B（时间、频率等），然后用 A 和 B 进行比较。当两者达到一致时，将代表模拟信号的 B 信号转换成相应的数码输出。这类仪表有：电压-时间转换型（U-T 型），电压-频率转换型（U-f 型）。

第三类是复合类型：它集上述各种 A/D 转换器的优点而形成一种转换器。这类转换器有多次采样电阻分压比较式和电感分压比较式、电流比较式等。

第四类：随着微处理器的普及应用而形成一些 A/D 器。它可以根据不同用途对 A/D 电路进行编排，但基本原理仍属于 A/D 转换器，所以也可以称之为微处理器式 A/D 转换器。

3. 按准确度等级分类

根据 JJG315—1983《直流数字电压表检定规程》，把直流数字电压表分为：0.0005，0.001，0.002，0.005，0.01，0.02，0.05，0.1、0.2，0.5 和 1.0 共 11 个准确度级别。通常 0.005 级以上的仪表在环境条件要求严格的实验室作为标准仪表使用；0.01～0.05 级为通用型仪表；0.05～1.0 级通常为现场使用型仪表。

另有按准确度等级分：高准确度型和普通型；按显示位数分：有三位、四位、五位、多位；按计量速度分：有低速、中速、高速和超高速；按体积分：台式、便携式和袖珍式。

（二）数字仪表的特点

数字仪表除广泛应用于电压测量外，还通过各种转换器用于其它电参量以及非电量的测量。现代数字仪表的稳定性和准确度已和现有的经典的电阻仪器相近，大部分技术特性已远远超过了指针式仪表，所以它的特点

日益突出,归纳起来有如下特点:

1. 读数清晰、直观方便

由于测量结果采用数显方式,因此,可直接读取相应的数值。同时,可自动显示符号、单位、极性、小数点等。从而消除了视差,视角宽阔,功耗也低。

2. 测量速度快

数字仪表的采样速度可通过采样时间灵活控制。其测量速度可由1次/10秒至上万次/秒,远远超出了电测指示仪表和电测仪器的测量速度。由于它具有测量速度快的特点,使计算机便于采集数据,然后进行处理。所以,它可以和计算机组成一个复杂的测试系统。另外操作形式多样,可进行人工控制,单次采样和手动操作等。

3. 测量准确度高

由于数字信号不易受噪声等外界干扰,因此数字仪表测量准确度高。目前直流数字电压表测量直流电压误差一般可达 $\pm 0.0001\%$,达到 0.01% 已经很容易。数字式频率计测量频率时误差可达 $(3 \times 10^{-9}d) \pm 1$ 计数;而直读模拟式指示仪表最高达到 0.1% 的测量误差已经不容易了。

4. 测量范围宽

在电参量的测量中,它几乎覆盖了电学计量专业中所有的电阻仪器和电测指示仪表的测量范围,这还不包括非电量的测量参数。而且,就单一测量项目,它的测量量程范围远远超出了电阻仪器的测量范围。在测量中克服了电阻仪器测量高电压、大电流时所用的中间环节带来的测量误差。目前的数字电压表,测量范围可达 $0.1\mu\text{V}$ 至 1500V 。一般的也能达到 $10\mu\text{V}$ 至 1000V 。

5. 灵敏度高

现在生产的普通数字仪表其电压分辨率达到 $10\mu\text{V}$, $1\mu\text{V}$, $0.1\mu\text{V}$ 甚至更小已不成问题。它已接近于光电检流计电压常数的水平。

6. 输入阻抗高

数字仪表中由于采用了反馈技术,使仪表输入阻抗很高,从而大大提高了输入信号的抗干扰能力。其基本量程可高达几百 $\text{M}\Omega$,甚至 $1000\text{M}\Omega$ 以上,甚至更高的也可以实现。这样,在测量时就大大减小了信号源内阻带来的测量误差,几乎不再从被测对象中吸收能量,基本保持了被测对象的原始状态,这是电测指示仪表所无法比拟的。但需注意的是,它不是无源器件,工作状态有零电流产生。

7. 自动化程度高,操作更方便、快捷,用途广泛

数字仪表操作很简单。只要按使用条件开机预热,即可进行测量。克

服了电阻仪器繁琐的调节、平衡工作。由于它实现了编码信息输出，可通过接口配接打印机、记录仪等进行自动计数，也可通过配接自动化设备进行自动控制和遥控测量。而配接相应的转换器，可实现各种参量的测量。通过配接计算机，可进行程控、数据采集、数据处理、数据运算、逻辑分析、自寻故障、自行诊断等。

8. 电路复杂、成本高

数字仪表可实现多功能、多形式测量，使得仪表组成元器件数量大，线路复杂而且形式多样，所以生产成本低。同时，需要有一定基础和经验的人员进行维护。

二、数字式仪表与数测系统的组成结构

数字仪表是将连续的被测量自动的转换为断续量，用数字编码形式以十进制数字形式自动显示、记录、控制测量结果的一种测量仪表。然而，自然界中许多物理量都是随时间而连续变化的，如电压、电流、频率、温度等。这些随时间连续变化的量统称为“模拟量”。但数字式仪表却是以数字显示的。而数字又是一种“断续量”。因此，数字式仪表要实现数字测量必然有一种能把模拟量转换为断续量即数字量的转换器，这种转换器叫模/数转换器，简称为 A/D 转换器。这样才能实现对模拟量的数字化测量，其关系可以用图 1-1 表示。

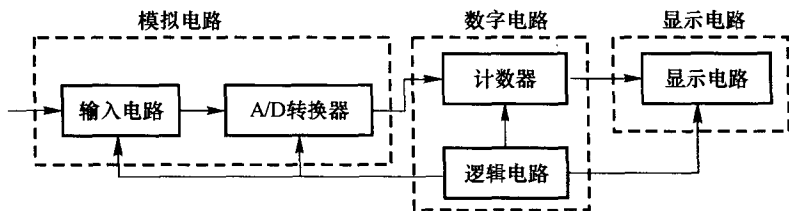


图 1-1 数字式仪表的原理方框图

由图可知，数字式仪表由模拟电路、数字电路、显示电路三大部分组成。其中模拟电路中的 A/D 转换器、数字电路中的十进电子计数器为数字仪表的主要组成部分。虽然各种数字仪表实现的功能不同、形式多样，但最基本的都是由 A/D 转换器和十进电子计数器组成。

数字仪表内部结构和工作原理因所测参数不同而有所差别，但都包含以下主要部件：衰减器、切换开关、前置放大器、基准电源、A/D 或 D/A 转换器、时钟脉冲发生器、十进电子计数器（包括计数器、译码器、显示器）简称 DCA 和逻辑控制电路等。其中，A/D 转换器的种类很多，其原理及电路在第四章中叙述。

数字仪表中的计数器部分大都采用振荡频率非常稳定的石英晶体振荡器作为测量上的一个时间标准。所以它的测量准确度及稳定度是很高的。一般可达到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 数量级，所以它和 A/D 转换器结合时并不造成精度损失。计数器本身也是一种多用途测量仪器，用它可以测量频率、周期、脉冲时间间隔、频率比等。

随着数字技术、传感技术和计算机技术的发展，数字仪表的测量对象已经发展到各个领域。从 50 年代起开始出现如图 1-2 所示的各种简单数字仪表。

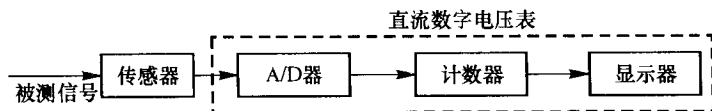


图 1-2 测量各种参数的简单数字式仪表

由图知，其核心部分仍然是图 1-1 的数字式电压表。传感器把被测参数转换成直流电压或电流信号，然后用 A/D 转换器把电压信号转换成数字量，再以数字形式显示测量结果。被测信号可以是位移、压力、转速、流量等等。

由于数字技术具有的高精度、高速度易于运用计算机系统，易于实现自动化等优点，数字技术已成为现代检测与测量的最为普遍的工具。

现代数字测量技术与计算机网络技术、微电脑技术、微电子技术、工业自动化技术等领域相互配合，飞速发展。数字仪表与 PC 机、网络通讯系统兼容的仪器，以及基于 PC 机总线的仪器仪表也已成熟。如图 1-3 即为一个典型的测量系统。

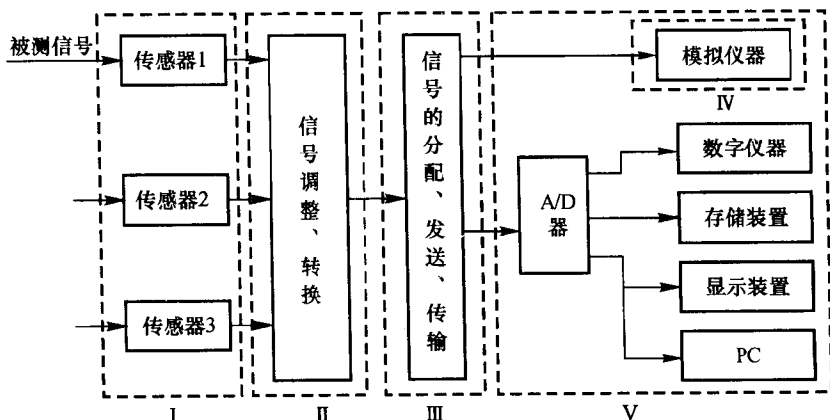


图 1-3 数测系统（数据采集自动测量系统）的基本结构框图

从数测系统的组成结构看,由如下几个主要环节组成,其作用如下:

环节Ⅰ:信息检测及初步转换。在此环节中,传感器将被测信号转换成电信号(电压、电流等)后输出。

环节Ⅱ:信息的转换、调整、滤波及驱动。

(1)信号的转换。将传感器的输出信息转换成易于处理的形式。即转换成标准的模拟信号(直流电压)形式。如终端设备为模拟仪器或仪表。此信号可以直接用来显示和分析。如果终端为数字式仪表,则还要经过A/D转换。

(2)对传感器输送的信号进行调整。如信号的放大与滤波:将传感器输出信息加强,削弱噪声,减少干扰,提高信号/噪声比,保证测量准确度。另外是阻抗调整,为下一环节提供一个较低的相匹配的输入阻抗,以提高抗干扰能力。

(3)传输驱动。加强信号的传输强度并以标准形式[0(或1)~5V的直流电压或者0(或4)~20mA直流电流]发送到传输线上。

环节Ⅲ:对标准模拟信号进行分配、发送和传输。即将环节Ⅱ输出的标准形式的模拟信号传输给不同的使用仪器装置。A/D转换器是为数字显示仪器而设置的,它将连续变化模拟量转换为数字信号(0或1),然后利用现代通用接口通信技术进行分配、传输,送往数字显示仪器或其它设备,以对被测信号进行各个参数的分析。主要有五种传输方式:

(1)直接传输到模拟式仪器的输入端,进行测试。如示波器上。

(2)经A/D转换器对模拟信号进行模数转换成数字信号后再按国际标准协议(串行或并行)传输到现场总线。

(3)经过A/D转换器件转换成数字信号后,经专线(电线、光缆、无线电等)传输到PC机上。

(4)经过串行通信协议的电信号,通过适配器件适配与转换,以电话线为媒体传输到PC机或其它数字仪器。这是目前较先进的远距离、超远距离自动测量、监控系统。

(5)经过HART类型的电信号适配器的适配与转换。将标准的模拟信号转换成以频率形式实现的二进制数字信号,并按国际HART协议方式传输到具有HART接口的现场总线、PC机或其它数字式仪器。

环节Ⅳ:信号的处理与使用。经环节Ⅰ至环节Ⅲ处理后输出的电信号,可直接送专用模拟仪器,进行信号的处理、存储或显示;可经简单的A/D转换送到存储装置,进行存储;送到显示装置,进行显示;送往PC机或各种数字仪器进行处理、分析和计算,然后存储和显示;还可将处理、计算后的数字信号转换成模拟或数字式的控制信号等。