

21世纪信息工程类专业新编系列教材

Sensor and Detection Technique

传感与检测技术

戴 焯 主编



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

21 世纪信息工程类专业新编系列教材

传感与检测技术

主 编 戴 焯

武汉理工大学出版社

内 容 提 要

本书共十九章分三大部分,由第一章~第十三章形成第一部分,介绍各类传感器的工作原理、工作特性及应用领域;由第十四章~第十七章形成第二部分,介绍传感器输出信号的放大、转换、处理等测量电路及其与微机的接口技术;由第十八章、第十九章形成第三部分,介绍传感与检测技术应用系统及系统的抗干扰技术。

本书取材全面,内容丰富,理论联系实际,适于作高等院校电子、电气信息类专业本科生教材,亦可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感与检测技术/戴焯主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2003.8

ISBN 7-5629-1997-6

I. 传… II. 戴… III. 传感器-技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 034530 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://cbs.whut.edu.cn>

E-mail: wutp @ public. wh. hb. cn

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉理工大印刷厂

开 本:787×960 1/16

印 张:24.25

字 数:460 千字

版 次:2003 年 8 月第 1 版

印 次:2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000 册

定 价:34.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

前 言

21 世纪人类社会已全面进入信息时代。随着社会的发展和科学的进步,人类探知工程信息的领域和空间不断拓展,要求信息传递的速度加快和信息处理的能力增强,因而就形成信息时代四大核心技术:信息采集技术——传感技术,信息传递技术——通信技术,信息处理技术——计算机技术,信息控制技术——自动控制技术。显然传感与检测技术位于工程信息系统的最前端,它将成为 21 世纪人们在信息工程技术领域争夺的一个制高点,因而在各高校电子信息类、电气信息类专业开设传感与检测技术课程十分必要。

本书是作者多年从事传感与检测技术类课程教学及科研体验,并参考市场上各类相关书籍和国内外最新研究资料编写而成。全书可分三大部分共 19 章,第一部分主要介绍各类传感器的基本原理、工作特性及其应用领域,它包括常见的应变电阻式、电感式、电容式等结构型传感器和压电式、光电式、霍尔式等物性型传感器,对新型的光纤传感器、图像传感器、生物传感器和智能传感器等也作了较大篇幅的介绍;第二部分主要介绍传感器信号输出的接口电路,如传感器输出信号的放大电路,信号的转换及处理电路,信号检测电路与微机的接口技术等;第三部分介绍传感与现代检测系统及系统的抗干扰技术,以建立一个完整的传感与检测技术工程应用系统。

本书第一章~第四章和第六章~第八章章由戴焯编写,第五章、第九章由郭金旭编写,第十章~第十二章和第十七章由刘红丽编写,第十三章和第十五章、第十六章及第十九章由张菊秀编写,第十四章由刘皓春编写,第十八章由周伟编写。本书由戴焯任主编,负责全书的统编和定稿。

本书取材全面、内容丰富、理论联系实际,可读性强;文字简练、图示清晰、概念准确、深入浅出,便于阅读。本书可作为高等院校电子信息类和电气信息类专业本科生教材,亦可供其他有关专业师生和工程技术人员参考。

由于本书涉及知识面宽,而编者学识水平有限,书中定有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 4 月于武汉理工大学

目 录

第一章 概论	1
第一节 传感与检测技术基本概念	1
一、非电量电测系统的组成及特点	1
二、传感器概述	2
三、现代检测技术	4
第二节 传感器的基本性能	6
一、传感器的静态特性	6
二、传感器的动态特性	10
三、传感器的标定	16
第三节 测量误差分析基础	17
一、误差的定义及分类	17
二、系统误差的消除方法	19
三、随机误差的处理	21
四、粗差的判别与剔除	23
第二章 电阻应变传感器	27
第一节 电阻应变片	27
一、金属电阻应变片	28
二、半导体电阻应变片	31
第二节 电阻应变传感器测量电路	33
一、单臂桥	33
二、半桥	34
三、全桥	35
四、应变测量电桥性能的提高	35
第三节 电阻应变传感器的应用	39
一、应变式力传感器	40
二、应变式压力传感器	43
三、应变式加速度传感器	44
第三章 电感传感器	46
第一节 自感式传感器	46
一、气隙型自感传感器	46
二、差动自感传感器	48
三、差动自感传感器测量电路	50
第二节 差动变压器	54

一、工作原理	54
二、工作特性	56
三、测量电路	57
第三节 电涡流传感器	59
一、高频反射式电涡流传感器	59
二、低频透射式电涡流传感器	64
第四节 电感传感器的应用	65
一、电感测微仪	65
二、力平衡式差压计	65
三、位移计	66
四、振动计	66
第四章 电容传感器	68
第一节 电容传感器工作原理	68
一、变面积(S)型	69
二、变介质的介电常数(ϵ)型	70
三、变极板间距离(d)型	71
四、差动电容传感器	72
第二节 电容传感器测量电路	74
一、测量电桥	74
二、差动脉冲调宽电路	77
三、电容调频电路	79
四、运算放大器测量电路	80
第三节 电容传感器的应用	81
一、误差分析	81
二、灵敏度的提高	82
三、应用举例	83
第五章 热电传感器	87
第一节 热电偶	87
一、热电效应	87
二、热电偶工作特性	89
三、热电偶冷端温度误差及补偿	91
四、热电偶测温电路	94
五、热电偶的选择	95
第二节 电阻温度传感器	97
一、金属热电阻	98
二、半导体热敏电阻	100
第三节 集成温度传感器	103
一、温敏二极管及其应用	103
二、温敏晶体管及其应用	105

三、集成温度传感器·····	107
第六章 压电传感器·····	110
第一节 压电传感器工作原理·····	110
一、压电效应·····	110
二、石英晶体的压电效应·····	110
三、压电陶瓷压电效应·····	113
四、压电材料及其特性·····	115
第二节 压电传感器测量电路·····	116
一、压电元件及其等效电路·····	117
二、电压输出型测量电路·····	117
三、电荷输出型测量电路·····	119
第三节 压电传感器的应用·····	121
一、压电式力传感器·····	121
二、压电式压力传感器·····	122
三、压电式加速度传感器·····	122
第七章 磁电传感器·····	125
第一节 霍尔传感器·····	125
一、霍尔效应·····	125
二、霍尔元件的基本特性·····	126
三、测量电路·····	127
四、误差及其补偿·····	128
五、集成霍尔传感器·····	130
六、霍尔传感器的应用·····	132
第二节 磁敏电阻·····	133
一、磁阻效应·····	133
二、磁敏电阻的基本特性·····	134
三、磁敏电阻的应用·····	136
第三节 磁敏二极管和磁敏三极管·····	137
一、磁敏二极管·····	137
二、磁敏三极管·····	140
三、磁敏管的应用·····	143
第八章 光电传感器·····	144
第一节 常用光电器件·····	144
一、光敏电阻·····	145
二、光电池·····	148
三、光敏二极管和光敏晶体管·····	150
四、常用光电器件的应用·····	153
第二节 光栅传感器·····	158
一、莫尔条纹·····	158

二、光栅传感器的组成	160
三、辨向原理	161
四、细分技术	163
第三节 固态图像传感器	164
一、CCD 基本结构	165
二、CCD 工作原理	166
三、CCD 图像传感器的结构	168
第九章 光纤传感器	171
第一节 光纤的传光原理与特性	171
一、光纤的结构	171
二、光纤的传光原理	172
三、光纤的传光特性	175
第二节 传输光的调制技术	176
一、光强度调制	176
二、光相位调制	177
三、偏振调制	179
四、频率调制	180
第三节 强度调制光纤传感器	180
一、光纤水深探测器	180
二、透射式光纤温度传感器	181
三、反射式光纤位移传感器	181
第四节 相位调制光纤传感器	183
一、马赫-泽德光纤温度传感器	183
二、光纤弱磁场传感器	183
三、法布里-珀罗光纤温度传感器	185
四、光纤陀螺仪	186
第五节 偏振调制光纤电流传感器	187
第六节 频率调制光纤血流传感器	188
第十章 气敏传感器	190
第一节 概述	190
一、气敏传感器的分类	190
二、气敏传感器的性能要求	191
三、气敏传感器的主要参数特性	191
第二节 半导体气敏传感器	192
一、半导体气敏传感器的工作原理	192
二、几种常用的半导体气敏传感器的基本参数	195
三、半导体气敏传感器的应用	196
第三节 接触燃烧气敏传感器	197
一、接触燃烧气敏传感器的工作原理	197

二、接触燃烧气敏传感器的主要参数	198
三、接触燃烧气敏传感器的应用	199
第四节 气敏传感器的应用实例	199
一、一氧化碳浓度的测控	199
二、可燃气体泄漏报警器	201
三、自动换气扇控制电路	202
第十一章 湿度传感器	203
第一节 概述	203
一、湿度及其表示方法	204
二、湿度传感器的特性参数	206
三、湿度传感器的分类	208
第二节 毛发湿度计	208
第三节 干湿球温度计	209
第四节 电阻变化型湿度传感器	211
一、固体电解质湿度传感器	211
二、高分子电阻式湿度传感器	212
三、半导体陶瓷湿度传感器	212
四、热敏电阻式湿度传感器	213
第五节 电容变化型湿度传感器	214
第六节 湿度传感器的应用举例	216
一、自动气象站湿度测报	216
二、仓储温度控制电路	216
三、汽车后窗玻璃自动去湿装置	217
第十二章 生物传感器	219
第一节 概述	219
一、生物传感器的工作原理	220
二、生物传感器的分类	220
第二节 生物传感器的应用	221
一、生物传感器在环境监测领域中应用	222
二、生物传感器在医学检验中的应用	224
三、在生物工程领域中的应用	225
四、在食品领域中的应用	226
第三节 DNA 生物传感器	226
第四节 生物芯片	227
第十三章 智能传感器	230
第一节 概述	230
一、智能传感器的概念	230
二、基本结构	231
三、主要功能	231

四、主要特点·····	232
五、智能传感器的基本实现方式·····	232
第二节 智能传感器的实现技术·····	235
一、标度变换处理技术·····	235
二、非线性自校正技术·····	237
三、温度补偿技术·····	240
四、数字滤波技术·····	245
第三节 智能传感器实例——多通道智能温度传感器·····	247
一、多通道智能温度传感器 AD7417 的性能特点·····	247
二、AD7417 的工作原理·····	248
三、典型应用·····	249
第四节 智能传感器的发展趋势·····	249
第十四章 信号放大电路·····	251
第一节 电桥放大器·····	251
一、通用电桥放大器·····	251
二、传感器反馈式电桥放大器·····	252
三、电桥反馈式放大器·····	253
四、供桥电压稳定性的提高·····	254
第二节 高输入阻抗放大器·····	255
一、反馈式反相放大器·····	256
二、高输入阻抗高增益放大器·····	257
三、增益可调差动放大器·····	258
四、三运放高共模抑制比差动放大器·····	259
第三节 专用单片集成放大器·····	261
一、集成仪器放大器·····	261
二、可编程增益放大器·····	264
三、隔离放大器·····	267
第十五章 信号转换电路·····	270
第一节 电流-电流变换器·····	270
一、负载浮地的 U-I 变换器·····	270
二、负载接地的 U-I 变换器·····	271
三、差动输入 U-I 变换电路·····	272
第二节 电流-电压变换器·····	273
一、I-U 变换原理电路·····	273
二、通用精密 I-U 变换器·····	274
三、高增益微电流 I-U 变换器·····	274
四、高精度微电流 I-U 变换器·····	275
五、大电流-电压变换器·····	276
第三节 交流-直流变换器·····	276

一、AC-DC 变换原理电路	276
二、AC-DC 变换实用电路	277
第四节 电压-脉宽变换器	278
一、三角波发生器	278
二、电压比较器	279
三、输出级	280
第五节 DC-DC 电源变换器	281
一、升压型 DC-DC 变换器	281
二、降压型 DC-DC 变换器	282
三、极性反转型 DC-DC 变换器	283
第十六章 信号处理电路	286
第一节 采样保持电路	286
一、采样过程及定理	286
二、采样保持电路	288
第二节 峰值检测电路	293
一、峰值测量方法	293
二、峰值保持器	293
第三节 绝对值检测电路	298
一、绝对值检测原理电路	298
二、提高测量精度的方法	299
第四节 有效值检测电路	300
一、单片真有效值/直流转换器的基本工作原理	300
二、单片真有效值/直流转换器 AD536A 简介	301
三、AD536A 的内部结构及应用举例	302
第十七章 传感器与微机的接口技术	304
第一节 数据采集系统的结构形式	305
一、基本数据采集系统	305
二、多路数据采集系统	305
三、分布式数据系统	308
四、单片数据采集系统芯片	309
五、数据采集卡	309
第二节 模拟多路开关及其与微机的接口	309
一、多路模拟开关的主要技术指标	310
二、多路模拟开关分类	310
三、多路模拟开关与微机的接口	314
第三节 采样保持器与微机的接口	315
一、采样保持器的参数指标	316
二、采样保持器集成芯片	317
三、采样保持器与微机的接口	317

第四节 A/D 转换器与微机的接口	318
一、A/D 转换器的主要性能指标	318
二、A/D 转换器与微机接口	319
第五节 数字信号的数据采集	328
一、U/F 转换器与微机的接口	328
二、频率信号的采集方式及其接口	329
三、相差信号的采集及其接口	330
第十八章 传感与自动检测系统	332
第一节 差动变压器的典型应用	332
第二节 接近开关的推广应用	337
第三节 差动电容式加速度传感器的典型应用	340
一、动平衡机原理	341
二、测试机设计	342
三、去重机设计	346
四、CAN 接口的实现	348
第四节 CCD 图像传感器的典型应用	348
一、图像定格系统的工作原理	349
二、系统的软件实现	350
第五节 光电传感器的典型应用	352
一、硬件设计	353
二、系统软件设计	354
第十九章 系统抗干扰技术	356
第一节 干扰的来源及分类	356
一、外部干扰	356
二、内部干扰	357
第二节 硬件抗干扰技术	358
一、滤波	358
二、接地	361
三、屏蔽	364
四、隔离技术	365
第三节 软件抗干扰技术	367
一、CPU 抗干扰技术	367
二、输入输出的抗干扰技术	374
参考文献	376

第一章 概 论

工程信息的检测技术(Detection technique)是信息工程学科一门十分重要的综合性技术,它主要研究各类工程信息的获取、传输及处理。不同性质的信息需要不同的检测方法,同一性质的信息往往有几种不同的检测方法。对于温度、湿度、压力、应变、位移、加速度、液位、流量等各种非电量信息,人们普遍采用电测方法;尤其在微电子技术和计算机技术高度发达的今天,非电量的电测技术呈现出许多明显的优势。

第一节 传感与检测技术基本概念

非电量的电测方法是把待测的非电量,通过特定的敏感器件或装置变换成相应的电信号,这些电信号再经过一定的测量或调理电路进行放大、整形及转换后送入终端装置记录、指示或处理,即用电工或电子测量的方法实现非电量的检测。

一、非电量电测系统的组成及特点

非电量电测系统结构图如图 1-1 所示,它由传感器、测量电路和终端装置三大部分组成。

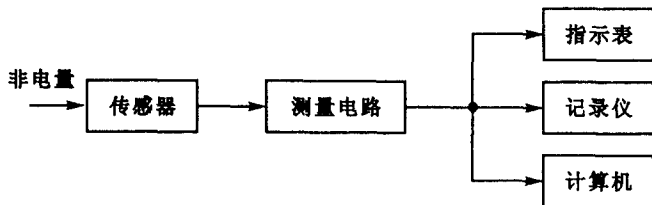


图 1-1 非电量电测系统结构框图

传感器是用来感受被测的非电量,并按一定的规律变换成电信号,不同性质

的非电信号需要不同类型的传感器,它是实现非电信号获取的关键。测量电路是对传感器输出的电信号进行必要的加工,如信号的放大、整形与滤波、调制与解调、阻抗变换、温度补偿、线性化及稳定性等,使得被测信号满足终端输出的要求。终端装置通常为指示表、记录仪和计算机,用于被测信号的数据输出,或记录被测信号的相关波形和数据,或进入计算机系统再处理。这种用专用传感器实现非电信号获取的电测技术称之为感测技术,感测技术的成熟和发展,是现代检测技术水平的标志。

感测技术具有下列主要优点:

- 测量灵敏度高,应用范围广;
- 感测系统结构紧凑,安装调试方便;
- 测量惯性小,反应速度快,频率特性好;
- 可进行无接触测量和远程监测,并有较高的测量精度;
- 在计算机技术的支持下,具有很高的自动测试程度,并向智能化测试方向发展。

二、传感器概述

传感器是人类探知自然界各类信息的触角,信息时代若将计算机比喻为人的大脑,传感器则可喻为人的感觉器官。显然没有功能正常的感觉器官,就不能迅速而准确地采集并转换所需的外界信息,一切科学研究与自动化生产过程都需要通过传感器获取准确的工程信息,因而传感器技术是现代高科技发展的关键。

1. 传感器定义

按照国家标准 GB7666—87,传感器(Transducer 或 sensor)被定义为“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。”“敏感元件(Sensing element)指传感器中能直接感受(或响应)被测量的部分;转换元件(Transduction element)指传感器中能将敏感元件感受(或响应)的被测量转换成适于传输(或)和测量的电信号部分。”

实际上大多数传感器都难以严格分为敏感元件和转换元件两部分,它们都是将感受的被测量直接转换为电信号。在很多书籍或资料中,也常把传感器称为变换器或探测器,而在非电量电测技术中,通常把传感器称为能将非电信号转换为电信号的装置。

2. 传感器的分类

传感器分类方法很多,常用的有下述三种。

(1) 按被测物理量分类

如温度传感器、压力传感器、位移传感器、加速度传感器、流量传感器。

(2) 按转换原理分类

如应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器等。

(3) 按敏感元件的物理现象分类

可分为结构型传感器和物性型传感器。其中结构型传感器是指依赖敏感元件结构参数变化实现信号转换的传感器,如通用的应变电阻传感器、电容传感器和电感传感器。物性型传感器是指依赖敏感元件物理性质变化实现信号转换的传感器,如热电传感器、光电传感器、霍尔传感器、压电传感器等。

3. 传感器技术的发展

人类社会的进步和科学技术的发展与传感器技术是相互促进又相互制约的,传感器技术作为现代工程信息四大核心技术之一,早在 20 世纪 80 年代初各发达国家就将其列为优先发展的新技术,使得传感器技术在近 20 年来获得了高速发展。我国自 20 世纪 80 年代末以来也将传感器技术列入国家高新技术发展的重点,近十年来我国传感器技术与发达国家的差距越来越小,据不完全统计,目前我国敏感元件及传感器产品的品种已有近 6000 种,年产量约 3.5 亿只,生产厂家已超过 1000 家,年生产能力可达 8 亿只;因而有力地带动了我国测试与控制等多学科领域的发展,为我国跟上世界现代技术发展的大潮,顺利进入信息时代提供了必要的基础。但从各学科平衡发展的角度看,传感器技术仍落后于我国通信技术和计算机技术的发展速度,在很多学科领域尚不能满足要求;同时我们还要清醒地看到,我国信息技术与发达国家还有相当一段距离。当我国加入 WTO 后,将执行国际性的信息技术协定,要求 2005 年我国对外国进口信息业产品的关税由目前平均 13.3%降低为零,为了不失去国内电子信息产品市场并竞争国际市场,我国必须加速发展信息科学技术和信息产业。为此,传感器技术的发展至关重要,在未来的 10 年内,我们必须知难而进、奋起直追,迅速建成综合实力较强、品种较齐全、具有国际竞争能力的敏感元件及传感器新兴产业。

当前,根据我国的现实国情及信息技术的发展趋势,传感器技术发展趋势及重点研究开发的有以下几个方面。

(1) 新型敏感材料

敏感元件材料是传感器技术的重要基础,重点开发的新型敏感材料主要有以硅材料为主的半导体材料、化合物半导体材料、石英晶体和压电陶瓷、氧化锌(ZnO)薄膜、铁电聚合物、传感型合金材料及复合材料。

(2) 微细加工技术

微细加工技术即微米加工技术,是开发新型微型传感器的工艺技术,目前大体上分为三类:其一,硅微机械加工技术,如硅集成电路工艺技术、刻蚀技术、薄膜技术及固相键合工艺技术;其二,以激光精密加工为主体的超精密机械加工技术;其三,X射线深层光刻电铸成型技术,这种技术不但可用于加工各种金属、陶瓷和塑料材料的三维结构,而且可实现重复精度很高的大批量生产。

(3) 新型传感器

主要是用于汽车电喷系统、空调排污和自动驾驶系统的车载传感器,用于水质检测、大气污染和工业排污测控传感器,用于检测食品卫生和诊断各种疾病的生物、化学传感器,用于航天系统的小型化、低功耗、高精度、高可靠性航天传感器,用于机器人的具有视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉功能的仿生传感器。

(4) 智能传感器

智能传感器是当代高科技研究的热点,是一种带微处理器的传感器,它兼有信息检测、存贮和处理功能,并能通过软件对传感器内部行为进行调理,使传感器工作在最佳状态。随着科学技术的发展,未来的智能传感器将利用信息融合技术、模糊理论等更高级信息处理技术,使传感器具有分析、判断、自适应、自学习功能,可以完成特征检测、图像识别、多维检测等复杂任务。

三、现代检测技术

随着微电子技术和计算机技术的迅速发展,其性能不断提高、价格日趋低廉,极大地推动了检测技术的进步,自20世纪80年代以来,智能仪器(Intelligent instrument)、虚拟仪器以及网络化检测技术相继问世,逐步形成了功能比较齐全的现代测试系统。

1. 计算机检测系统

以计算机为终端的检测系统如图1-2所示。现场被测信号经模拟传感器和数字传感器接受并转换成模拟信号输出和数字信号或开关信号输出,再经相应的调理电路送入计算机处理,借助计算机丰富的软、硬件资源对被测信号进行实时处理和输出,实现智能化自动检测的目的,这种检测系统在非电量电测技术中已获得广泛应用。

计算机系统通常采用总线结构,总线是连接系统中多个功能部件的一组公用信号线。总线的采用,一方面使得各开发商有了统一的设计标准,另一方面大大加强了计算机检测系统的功能,并优化系统的软、硬件结构。计算机系统总线类型很多,应用于检测系统的总线主要有:

- GPIB(General Purpose Interface Bus) 通用接口总线;
- ISA(Industrial Standard Architecture)总线,也称 AT 总线;

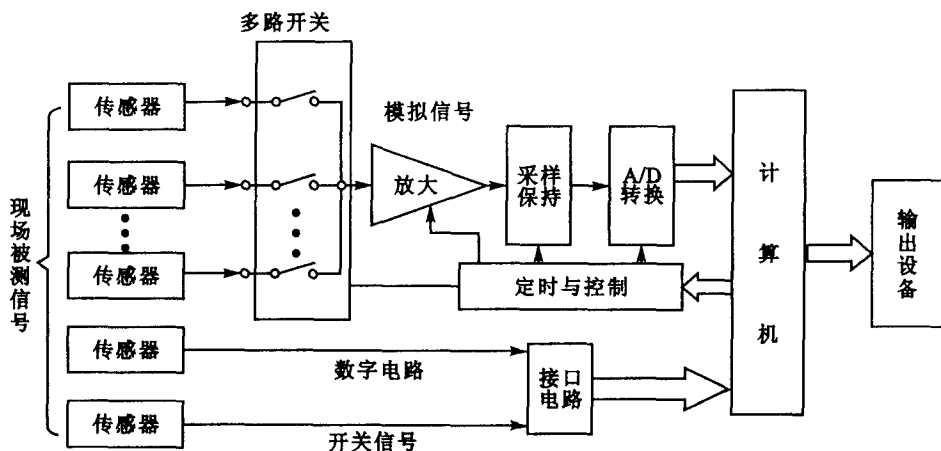


图 1-2 微型计算机检测系统

- PCI(Peripheral Component Interconnect)局部总线;
- VXI(VMEbus Extension for Instrumentation) 开放性仪器总线;
- PXI(PCI Extension for Instrumentation)模块化仪器总线;
- RS-232C 和 RS-485 串行通信总线;
- PROFIBUS(Process Fieldbus)现场总线;
- FF(Fieldbus Foundation)基金会现场总线;
- CAN 和 LONWORKS 现场总线。

2. 虚拟仪器

虚拟仪器 VI(Virtual instrument)是继模拟仪器、数字仪器、智能仪器之后出现的概念性仪器,它由通用计算机、模块化功能硬件和专用控制软件组成。利用计算机丰富的软件资源,可实现部分功能硬件的软件化,以增强检测系统的灵活性;利用计算机强大的运算能力、图形环境和在线帮助功能,建立具有良好人机交互性能的虚拟仪器面板,以适应各种环境下不同信号的检测。虚拟仪器中应用软件是整个仪器的核心,硬件仅仅是信号输出、入部件和软件运行的物理环境。用户只要通过调整或修改部分软件,便可方便地改变或增减仪器的测试功能,给用户充分发挥自己才能和想象的空间,也使仪器系统的组建和功能的开发更为灵活和方便。

虚拟仪器是现代计算机技术和仪器技术完美的结合,虚拟仪器自美国国家仪器公司(NI)1986 年提出以来,走的是一条硬、软件模块化,总线与驱动程序标准化、硬件模块即插即用化、编程平台图形化发展方向,是现代仪器和检测技术发展的方向和潮流。目前已广泛应用于航天工程、军事工程、电力工程、机械工