

自动测试系统 与 可编程仪器

孙 续 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书全面地阐述了自动测试系统与可编程仪器的原理和应用,全书共七章。前三章介绍了 GPIB(IEC-625、IEEE-488)系统的基本知识,包括系统组成、基本特性、消息传递和接口功能等。第四、五章介绍可编程仪器,重点介绍智能仪器的组成、工作原理和远地控制。第六章结合大量实例,介绍了自动测试系统的组建和编程。第七章讨论自动测试系统的检测和发展,重点介绍了刚刚出现并正在迅速发展的 VXI 系统。

本书内容丰富、新颖,论述深入浅出、简明实用,可供从事自动测试和现代电子测量工作的科技人员参考,也可作为理工科有关专业研究生、本科生的教材或各类成人教育、继续教育的教材。

自动测试系统与可编程仪器

孙 续 编著

责任编辑 魏永昌

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

开本 850×1168毫米 1/32 印张: 13.875 字数 371千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数: 5000册 定价: 11.80元

ISBN-7-5053-2360-1/TN·686

目 录

第一章 迅速发展的自动测试系统	1
第一节 自动测试系统的产生和发展.....	1
一、对自动测试的迫切需要	1
二、自动测试系统的发展	4
第二节 GPIB 系统概述	16
一、从人工测试到自动测试	10
二、GPIB 系统的组成	13
三、GPIB 系统的基本特性	20
第二章 通用接口系统中消息的传递	23
第一节 器件内部功能的划分和消息的分类.....	23
一、器件内部功能的划分	23
二、GPIB 系统内消息的分类	25
三、消息的发送和接收	30
第二节 多线消息及其编码.....	33
一、多线接口消息	34
二、器件消息	43
第三节 挂钩母线及管理母线传递的消息.....	48
一、挂钩母线和挂钩消息	48
二、三线挂钩的工作过程	50
三、管理母线传递的消息	56
第四节 自动测试系统的基本操作和相应消息序列.....	60
一、器件消息传递序列	61
二、远地控制和本地控制的转换	62
三、服务请求和串行查询序列	63

四、并行查询序列	65
五、器件清除和器件触发	69
第三章 通用接口系统中的接口功能	72
第一节 接口功能概述	73
一、接口功能的基本概念	73
二、接口功能的状态图表示法	75
第二节 五种主要接口功能	78
一、讲者接口功能	78
二、听者接口功能	86
三、控者接口功能	91
四、源方挂钩接口功能	106
五、受方挂钩接口功能	113
第三节 五种辅助接口功能	119
一、服务请求接口功能	119
二、远地/本地接口功能	122
三、并行查询接口功能	126
四、器件清除接口功能	130
五、器件触发接口功能	132
第四章 智能仪器及个人仪器	134
第一节 微计算机化仪器	134
第二节 智能仪器	137
一、智能仪器的组成结构	137
二、智能仪器的面板控制和输出显示	138
三、智能仪器的仪器功能	149
四、智能仪器实例	163
第三节 个人仪器	192
一、个人仪器的崛起	192
二、个人仪器与个人仪器系统的构成	193
三、插件式仪器的广阔前景	197
第五章 可编程仪器及其远地控制	200

第一节 接口功能的配置.....	201
一、仪器接口功能的选配	201
二、接口功能子集	204
第二节 接口功能的实现.....	208
一、概述	208
二、采用大规模集成电路实现接口功能	209
三、接口功能的其它实现方法	219
第三节 编码和格式惯例.....	230
一、由数据拜特构成的消息单元	232
二、数据的表示法及编码	234
三、状态数据的结构和编码	239
第四节 可编程仪器及其远控特性实例.....	240
一、Fluke 8520A 数字多用表.....	241
二、HP 3325A 合成器/函数发生器	248
第六章 自动测试系统的组建和测试程序的编制.....	265
第一节 自动测试系统的组建.....	266
一、组建自动测试系统的准备工作	266
二、组建自动测试系统的几项主要工作	267
第二节 用 IBM PC 担任控者及其编程——DS-GPIB 介 绍.....	273
一、引言	273
二、DS-GPIB 接口板的硬件配置	275
三、DS-GPIB 的软件及其装配	278
四、GPIB 功能调用及编程实例	285
第三节 采用 HP BASIC 4.0 语言编程	295
一、HP BASIC 4.0 语言选介	296
二、采用 HP BASIC 4.0 编程实例	311
第四节 使用 BASIC 语言编程	316
一、使用 BASIC 语言编程的主要特点	316
二、使用 BASIC 语言程控仪器——实例之一	320



三、用 BASIC 语言编写自动测试程序——实例之二	325
第五节 其它扩展 BASIC 语言编程实例及测试程序调试	330
一、副地址使用实例	331
二、服务请求处理程序实例	333
三、测试程序调试简介	336
第七章 GPIB 系统的检测和自动测试系统的发展	338
第一节 自动测试系统的检测	338
一、GPIB 系统的检测要求	339
二、用逻辑分析仪检测 GPIB 系统	341
三、用专用 GPIB 分析仪器进行检测	353
第二节 IEEE 488.1 及 488.2 的公布及自动测试系统的 发展	358
一、IEEE 488.1 及 488.2 标准简介	358
二、GPIB 系统的发展	362
三、第三代自动测试系统的原理与应用	366
第三节 采用 VXI 母线的模块式仪器系统	377
一、VXI 母线的产生背景	377
二、VXI 系统的组成结构	381
三、VXI 系统中的母线、器件和通信规程(协议)	388
四、未来测试系统的设想	393
附录	396
附录一 远地消息编码表	396
附录二 本地消息一览表	403
附录三 信息处理交换用的七位编码字符集(ASCII 码表) 及 ATN = 1 时相应接口消息	404
附录四 最大时限和最小时限时值表	405
附录五 接口功能子集及其具有的能力	406
附录六 HP 9836A 微计算机的基本操作	408
附录七 掌握仪器遥控特性练习参考材料	417

习题	421
第一章习题.....	421
第二章习题.....	421
第三章习题.....	422
第四章习题.....	424
第五章习题.....	425
第六章习题.....	426
第七章习题.....	427
参考文献	429

第一章 迅速发展的自动测试系统

第一节 自动测试系统的产生和发展

通常把在人工最少参与的情况下，能自动进行测量、数据处理，并以适当方式显示或输出测试结果的系统称为自动测试系统(ATS——Automated Test System)。在这种系统中，整个测试工作通常都是在预先编制好的测试程序统一指挥下自动完成的。

在自动测试系统中的各种设备大多可以程控，称为自动测试设备或可编程设备。采用这种系统进行测试时，人的作用主要是根据测试任务组建系统和编制测试软件。系统一旦正常工作，它的各种操作一般都由系统本身自动完成。

自动测试系统的产生和发展，是电子测量与现代科技及现代大生产相结合的产物，也是测量科学与计算机科学相互作用的结果。

一、对自动测试的迫切需要

随着科学技术和生产的发展，对电子测量提出了越来越高的要求。特别是六十年代以来，电子计算机的广泛应用，在各个领域引起一连串深刻的反响。测试内容日趋复杂，测试工作量急剧增加，对测试设备在功能、性能、测试速度、测试准确度等方面的要求也日愈提高。在这种形势下，传统的人工测试已经很难满足要求，发展自动测试成为必然的出路。对自动测试的迫切需要主要表现在以下方面：

(1) 测试任务复杂、工作量大，对测试系统的功能、性能要求

越来越高。例如有些大规模或超大规模集成电路，每个单片上有十万个以上的元件，电路构造复杂，需要测试的参数很多。其中有些集成电路的测试，还需要在复杂的定时条件下加入多种输入信号，通过有限的端子，在规定的时间内快速进行多种测试。这些若采用人工测试，就不仅是费时、费事的问题，而是往往无法完成测试要求。又如近代相控阵雷达，可以有上万个天线振子，如果对每个天线的阻抗、驻波、相位等参数用传统人工方法测量，一个人就要用上百年时间，只有采用自动测试装置才能对它进行全面的测量。

随着生产规模增加、产品复杂程度提高，生产领域的测试也日趋繁重。对生产过程和产品的测试、检验手段是否完善，是提高经济效益、维护产品信誉和增加竞争力的重要方面。在现代化大生产中，用于测试的工时和费用均约占20~30%。现代国防武器，如导弹、飞机上的电子设备，其价值甚至可能占整体的60~70%，其中主要是测试和控制设备。在这些领域中采用自动测试技术，不仅可以解决很多测试中遇到的困难，降低测试的工时和费用，而且对国民经济的发展也会起到良好的作用。

在自动测试系统中通常采用计算机（主要是微计算机）控制，具有很强的实时控制、逻辑判断、记忆存储和运算处理能力。这种系统可按事先编好的程序快速、准确地进行操作，可以自动切换测试点和进行巡回检测，容易适应测试内容复杂、工作量大的要求。另一方面，利用计算机的功能，还可以把一些复杂的测试加以简化。例如对一个原来要求测几十种参数的任务，可以只直接测几个参数，然后通过计算机算出其它所需要的多种参数来，降低了测试任务的复杂性。

(2) 要求测试速度快。在现代科技和生产领域，对测试速度要求越来越高。且不说象空间对抗、宇宙航天等要求速度极快的测试，就是在生产领域，现代化大生产的控制系统、监视系统也往

往要求很高的测量速度。在传统的人工测试中，一般只能先取得测量数据，再经过人工分析数据，最后才能根据分析的结果去调整或改进生产过程。但是现代化的生产线往往要求实时检测和自适应处理。在自动测试系统中，用计算机指挥操作，还可以自动校准、自动调整测试点、自动切换量程和频段，自动记录和处理数据，测试速度通常比人工测试快几十到几百倍。只有采用自动测试，才能提供足够快的速度进行实时测量、实时处理和实时控制，使测试、分析和测试结果的应用融为一体。

此外，随着对测量精度要求的提高，往往要求在相同条件下对被测量进行多次测量，取其平均值作为测量值。在这种情况下，只有提高测量速度才能保证其多次测量真正处于相同的条件下，即保证等精度测量。自动测试的高速度为短时间内多次测量及平差处理提供了条件。

(3) 要求测量的准确度高。自动测试系统首先是在那些对测试要求严格的军事部门发展起来的。在这些部门中，测试人员的疏忽可能造成严重的后果。采用自动测试系统，可以严格按照程序自动操作，避免操作人员由于测试技术、生理上的分辨能力及偶然疏失造成的误差，即使非熟练人员上机操作，通常对测试结果也不会产生影响。

随着科学技术的发展，在军事和非军事的各个领域，对测量准确度的要求都越来越高了。在很多情况下，如果误差超过一定的范围，测量就变得毫无意义。众所周知，除了由于疏失等原因造成的粗大误差外，测量误差主要有系统误差和随机误差两大类。系统误差是在测量条件改变时按确定规律变化的误差。自动测试系统正可以把这种规律存储起来，在测试过程中加以修正，还可以通过自动校准克服某些系统误差的影响。另一方面，随着测试速度的提高，测量条件变化引起的误差也会减小。单次测量的随机误差没有规律，但多次测量的随机误差是相互抵偿的。自动测试系

统用快速多次测量求平均值的方法,正可以削弱随机误差。

(4) 要求长期进行定时或不间断测试。为了发现一些偶然出现的异常情况或间歇性故障,或者为了监测某些不定期出现的客观现象,在生产和科技领域常要求长期进行定时的或不间断的测试。即使测试人员责任心很强,这种测试也是困难的,例如曾经有过某石油化工厂由于电磁阀间歇短路造成较大损失的报导。类似的故障,只有采用自动测试才容易及时发现、及时报警或及时转入处理故障的中断服务程序。

在计量工作和科研、生产中也常有一些要求长期按时测量的任务,例如频率源长期稳定度的测量,物质衰变时间的测量等等。对于类似情况,如用人工测试不但繁琐、枯燥,而且难于严格按照规定执行。在自动测试系统中,则可利用计算机控制定时电路,按时开启测试程序。对于要求连续测试或监测的场合,则可在循环程序中进行。运用计算机的逻辑判断和数据处理等功能,还可在测试程序中加入条件转移、中断处理等方式,使测试工作既严格准确又灵活方便。

(5) 危险或测试人员难于进入测试场地的测试。随着人类活动或探索领域的扩展,要求测试的范围也不断扩大。其中有些具有一定的危险性或有损测试人员健康的地方,即有些测试人员难于进入的场合。例如对核爆炸现场、海底、高寒山区、高炉、管道内部的测试,均可通过自动测试取得结果。

客观的需要是科学技术发展的最大动力,正是上述迫切需要促进了自动测试系统的产生和发展。

二、自动测试系统的发展

(一) 科学技术的发展为测试自动化提供了条件

科学技术的发展,特别是电子科学的发展,一方面不断地向测

试和测量(主要是电子测量)提出新任务、新课题,要求它实现自动化;另一方面科学技术中的新理论、新技术、新器件、新材料、新工艺又为电子测量自动化的发展准备了条件,形成相辅相成不可分割的关系。

(1) 计算机科学和大规模集成电路技术的发展,为测试自动化准备了最重要的条件。在自动测试系统中,首先需要解决如何代替人工组织测试的问题。电子计算机具有实时控制、逻辑判断、数据存储、信息处理、数字运算、人工智能等多种功能,利用它可以方便地对测试系统进行编程控制。特别是七十年代以来,超大规模集成电路的发展产生了体积小、价格低的微计算机和单片计算机。把它们用于自动测试系统,可以代替人工控制测试过程,而且通常还可以使测试质量得到改进。

在自动测试系统中还需要解决仪器、设备间的接口问题。如果采用分立元件或中小规模集成电路,接口电路的设计、调试都比较复杂。近代大规模集成电路技术的发展,提供了多种用于自动测试的接口芯片,使接口电路的实现变得简单、方便。这也是促进自动测试系统发展的一个重要条件。

(2) 近代理论研究和应用科学的成果,特别是电子科学技术的成果,从多方面为测试自动化作了准备。现代系统工程理论、可靠性理论、控制论、信息论等理论研究和现代科技中的数字技术、传感技术、自动控制和调节技术、编码技术、接口技术、A/D 和 D/A 变换技术的发展、一些数字化、小型化、固体化元器件及电调、电控等多种新器件的生产,都从多方面为自动测试系统的发展提供了条件。

(3) 测量技术,特别是电子测量技术本身的发展为测试自动化提供必不可少的条件。微计算机化仪器(主要是智能仪器和个人仪器)的发展,数字化、自动化仪器仪表的普遍应用,频率合成技术、取样技术、扫频技术、频段和量程的自动选择技术等很多新技

术的发展和采用,都为发展自动测试系统作了直接的准备。

自动测试系统的产生和发展涉及多种学科,运用和吸收了很多领域的新科技成果。特别是它的发展过程和具体实现都与电子计算机的发展和应用有着十分紧密的联系。因此,有人把采用计算机的自动测试叫做计算机辅助测试(CAT)。

(二) 自动测试系统的发展概况

自动测试系统的研制工作可以追溯到五十年代甚至再早一些,只是到了六十年代,在系统中采用了电子计算机以后,才真正构成比较完善的自动测试系统。从那时起到现在,经历的时间虽然不算太长,但却得到了迅速的发展和普及。它的发展大体上可以分为三个阶段。

1. 第一代自动测试系统

早期的自动测试系统多为专用系统,是针对某项具体测试任务而设计的,通常称为第一代自动测试系统。它主要用于要求大量重复测试、要求可靠性高的复杂测试,或者为了提高测试速度及工作于测试人员难于停留的场合。常见的第一代自动测试系统,主要有数据自动采集系统、产品自动检验系统、自动分析及自动监测系统等等。

第一代自动测试系统至今仍在应用,它们能完成大量的、复杂的测试任务,承担繁重的数据分析、信息处理工作,快速、准确地给出测试结果。在测试系统功能丰富、性能提高、使用方便等很多方面比人工测试有明显改进,甚至可以完成不少人工测试无法完成的任务,显示出很大优越性。

设计和组建第一代自动测试系统也存在不少困难,主要是系统组建者需自行解决仪器与仪器、仪器与计算机之间的接口问题。当这种系统比较复杂,需要程控的设备较多时,研制工作量很大,所需费用亦较昂贵。更重要的是,这种系统适应性不强,改变测试

内容一般需要重新设计电路,即它的接口电路不具备通用性,这是第一代自动测试系统最主要的缺点。因此,很快就发展了采用标准化通用接口母线的第二代自动测试系统。

2. 第二代自动测试系统

七十年代,自动测试系统解决了标准化的通用接口母线问题,进而使自动测试进入了目前应用最广泛的第二代。在这种自动测试系统中,各设备都用标准化的接口和母线按积木的形式连接起来。系统中的各种设备,包括计算机、可编程仪器、可控开关等均统称为器件或装置(device),各器件均配以标准化的接口功能电路,用统一的无源母线联接起来。这种系统组建方便,组建者不需自己设计接口电路,更改、增加测试内容也很灵活,使用完毕后拆散容易、拆散后的计算机及其它设备又可移作它用,显示了很大优越性,因此得到了广泛的应用。

目前普遍使用的一种可编程测量仪器的接口系统,是在1972年由美国惠普(Hewlett Packard,缩写为HP)公司首先提出的,后来定名为HP-IB。以后这套系统陆续为美国电气与电子工程师学会(IEEE)及国际电工委员会(IEC)接受,并正式颁布了标准文件。这套系统在美国常称为IEEE488、GPIB或HP-IB,在欧洲、苏联和日本常称为GPIB或IEC625。名称不尽相同。但基本内容是一样的,只是作为国际电工委员会的标准IEC625的母线系统比IEEE488标准及HP-IB多了一条地线。有些公司为使自己生产的仪器对两种母线和插头都能适应,还专门生产了一种转换插头,使上述通用接口相互兼容。

目前这套标准接口母线系统(简称接口系统)已被我国作为标准采用。作为可编程测量仪器的一种接口系统,我国原电子工业部等几个中央部先后颁布了部级标准,以后又正式定为国家标准(GB 249.1~249.2-85),于1986年1月1日开始实施。在我国科技人员中,通常把这套系统称为GPIB或IEEE488。考虑到后者

只是一种美国标准，我们主张把这套由通用接口母线组成的自动测试系统简称为 GPIB 系统，并在本书的讨论中使用它。

GPIB 主要用于受干扰较小的实验室及生产测试条件下的台式自动测试系统。它可以把世界上不同国度、不同厂家生产的仪器设备，用通用的标准接口和母线联接起来，避免了以往每次组建系统时都要设计一套专用接口的重复劳动。在这套系统中采用比特 (bit) 并联、拜特 (byte) 串联的方式传输信息，便于用计算机控制。同时由于它通用性强、对被联仪器设备没有什么苛刻要求，结构简单，性能可靠，操作灵活、方便，体积小，价格亦较低廉，因此作为一项国际标准，它获得了世界各国的广泛承认和采用。近年来作为系统的控制者的微型计算机价格大幅度下降，同时作为 GPIB 系统的接口电路，已生产出多种大规模集成电路芯片，这些都促使这套系统快速地得到普及，与这套系统兼容的仪器、设备的品种和数量也迅速增长。目前世界重要电子仪器厂家的大量产品都带有 GPIB 接口。我国制造的一些微计算机和电子仪器也开始配备与 GPIB 兼容的功能，已经生产出带这种接口的微计算机、计数器、数字多用表、电压标准源、多功能校准器、打印机和逻辑分析仪等多种仪器设备，还生产了母线控制器和用于 IBM PC 机、Apple-II 机及其兼容机的 GPIB 接口板和相应的软件。

GPIB 系统虽然主要是为把电子测量仪器组成自动测试系统而研制出来的，但是它的应用范围正在扩大。在自动控制、数据交换、计算机、雷达、导航、通讯、电视、宇航、核物理、过程控制、医疗保健、生物工程和环境保护等很多领域都得到应用。GPIB 的有关原理和使用方法不仅成为仪表、测试领域的基本知识，而且也成为整个电子科学技术领域里科技人员的必备知识。

除了 GPIB 接口系统，还存在一些其它的通用接口系统。例如 CAMAC 系统 (即 IEEE538 系统)，又称为计算机辅助测量与控制接口系统，它主要用于核物理中的电子测量系统或其它较

大型的自动测试系统，也可以和 GPIB 系统结合起来共同使用。此外，RS232 是一种串行接口系统。这种接口除用于设备间传递信息外，还可与通讯线路等连接，经过一定的变换进行远距离数据传输。为便于现场维修，近年来还发展了一些便携式的接口系统，有代表性的是惠普公司的便携式 HP-IL (HP-Interface Loop) 接口，它是一个较简单的串行系统，用手持计算器作控制器，对于现场测试和维修比较方便。

采用标准化通用接口母线是第二代自动测试系统的主要特征，这是目前应用最广泛的系统，也是本书介绍的重点。

3. 第三代自动测试系统

第一、二代自动测试系统虽然比人工测试显示出前所未有的优越性，但是在这些系统中，电子计算机并没有充分发挥作用，整个系统和它的工作过程基本上还是对人工测试的模拟。七十年代中期提出了第三代自动测试系统的概念，它把计算机和测试系统更紧密地结合了起来，融合为一体。在第三代自动测试系统中，用强有力的计算机软件代替传统仪器的某些硬件，用人的智力资源代替很多物质资源。特别是，在这种系统中用微计算机直接参与测试信号的产生和测量特性的解析，即通过计算机直接产生测试信号和测试功能。这样，仪器中的一些硬件甚至整件仪器都从系统中“消失”了，而由计算机及其软件来完成它们的功能，形成一种所谓的“虚仪器” (Virtual Instrument)。在第一、二代自动测试系统中，包括多件仪器的测试系统所完成的功能，在第三代中可能由一个以计算机为中心的设备来完成，所以第三代自动测试系统有时也叫第三代自动测试设备，即在第三代中有时不再严格区分系统和设备了。

第三代自动测试系统的出现给电子测量带来了真正革命性的冲击，在测量原理、仪器设计等很多方面都产生了重大影响。但是第三代自动测试系统还处在开始发展的阶段，同时它还存在工

作频率不够高等重要缺点,因此它的应用不如第二代那么普遍。但是,充分发挥计算机的作用,用计算机的软、硬件资源代替测量仪器中的大量硬件,无疑是电子测量发展的一个重要方向。

第二节 GPIB系统概述

一、从人工测试到自动测试

在阐述 GPIB 系统的具体内容之前,首先了解一下自动测试系统为什么可以代替人工测试和怎样代替人工测试,这对理解 GPIB 系统的组成、工作原理及系统内各部分的关系都是有帮助的。

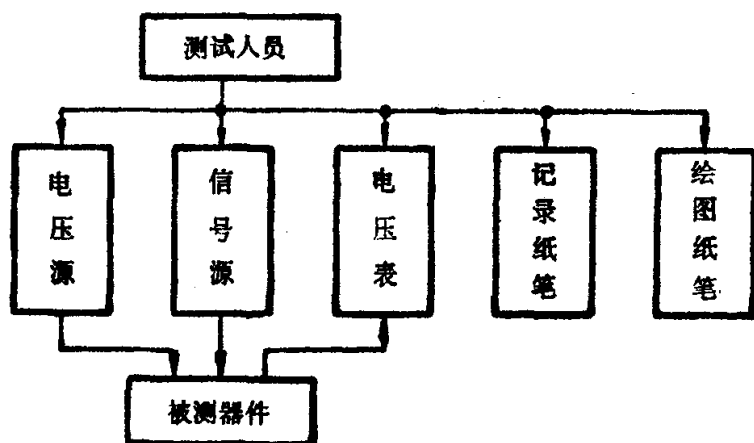


图 1-1 人工测试系统实例

首先观察一个简单的人工测试系统。图 1-1 为人工测试网络(例如放大器)幅频特性的系统。最原始的人工测试方法是:调电压源,给被测电路设置适当的直流工作状态;调交流信号源,产生一定频率和电平的正弦信号作为被测电路的激励信号;调数字电压表的功能和量程,用它测量被测电路的输出电压;记录读数并画图。改变输入信号频率并保持输入电平不变,重复上述过程,直至