

一种柔性测试系统的设计

饶振东

(中国电子科技集团公司 第10研究所, 成都 610036)

摘要: 针对军工高端复杂电子设备生产需求变化多、种类更新换代快、测试需求变化多样, 对测试人员技能要求较高, 生产成本居高不下现状, 对军工高端电子设备柔性化、少人化测试进行了研究; 以节约被测产品所需的人工工时和仪器资源、兼容多种被测产品、自动适应多变的测试任务为目标; 采用自动测试技术、机械传动技术、接口适配技术、自动分配算法相互配合, 设计了一种柔性测试系统, 经实际应用, 该系统使用原本二分之一的测试仪器资源, 可以满足6种产品的生产测试, 降低人工工时80%以上, 实现在有限资源条件下产能提高4倍, 面对随机变化的不同种类和数量的被测产品, 能够自动以最优方式完成分配测试, 满足复杂多变的军工设备的测试需求。

关键词: 柔性测试; 自动测试; 智能制造; 网络化测试; 分布式系统; 可重构

Design of Flexible Testing System

RAO Zhendong

(The 10th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: Advanced complex electronic equipment in the military industry has the characteristics of many changes in demands, rapid updates in types, high skill requirements for testing personnel, and high production costs, this paper studies the flexible and labor-minimized testing of advanced electronic equipment in the military industry. The purpose is to reduce required labor hours and instrument resources for tested products, to be compatible with multiple tested products, and to automatically adapt to changing test tasks. A flexible testing system is designed by cooperating with the technologies of automatic testing, mechanical transmission, interface adaptation, and automatic distribution algorithms. In practical applications, the system can meet the testing requirements for 6 types of products with half of the original testing instrument resources, reduces the labor hours by over 80%, and improves the production capacity by 4 times under limited resource conditions. The system can automatically distribute testing in the optimal way for different types and quantities of tested products with random variation, thereby satisfying needs of complex and diverse testing military equipment.

Keywords: flexible test system; automatic test; intelligent manufacturing; networked testing; distributed systems; reconfigurability

0 引言

当前国际局势紧张严峻, 受疫情影响、经济衰退、政治激化等因素影响, 我国的安全形势不确定性和不稳定性增大, 一方面以美国为首的西方国家对我国实行多领域的科技成果封锁和打压, 另一方面印度等周边国家与我国在边境上摩擦不断, 为了应对来自各方面的压力和挑衅, 国家对军工领域的建设和投入逐步加强。军工电子装备的生产一直面临着不可预估的突发性生产需求, 这类需求一般具有时间上的突发性、周期上的短期性、产量上的爆发性的特点, 要求在短时间内完成数倍于日常产量的装备生产。军工装备对质量的高要求, 使

得生产过程中的必需完成的大量试验和高精度的测试, 而高精度的测试对测试仪器的技术指标提出了更高的要求, 目前只有高端的台式仪器才能达到所需的技术指标, 这使得测试仪器成为测试环节中的一种重要资源。复杂多变的产品种类, 一方面要求配套的测试工装, 另一方面也大大提高了对测试人员的技能要求。一般的自动测试系统是针对某一个具体的测试对象进行相应的设计^[1-8], 开发对应测试程序^[9-11], 属于一对一的测试, 对仪器的利用率较低, 难以在低成本条件下满足军工电子装备的突发性生产需求。

为了满足军工电子装备的生产需求, 围绕适应性、

收稿日期: 2024-06-19; 修回日期: 2024-08-28。

基金项目: 四川省重大科技专项项目(2022ZDZX0007)。

作者简介: 饶振东(1990-), 男, 工程师。

引用格式: 饶振东. 一种柔性测试系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(1): 85-92.

灵活性、扩展性的特点,通过测试自动化、工装统一化提升工作效率;通过测试资源柔性化提升测试资源的利用效率^[12-15];通过数据自动采集建立生产大数据^[16-18],实现数字化生产管理、工艺设计、质量管理。

设计一种柔性测试系统^[19],该系统可以满足军工电子装备突发性生产需求,提高仪器利用率,大幅降低测试人员技能要求,缩减人工工时。

1 系统架构及原理

模块类柔性测试系统整体布置框图如图 1 所示。

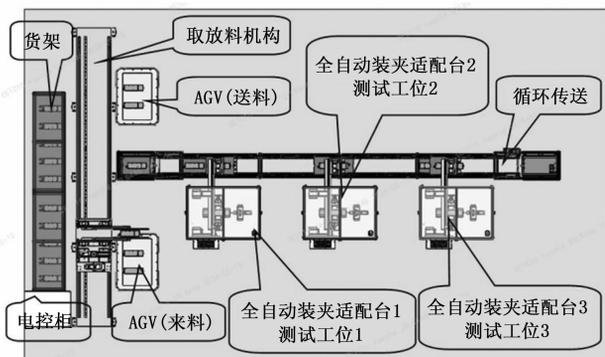


图 1 模块类柔性测试系统整体布置

模块类柔性测试系统(以下简称测试系统)的目的,是可以灵活的适应测试资源的变动和测试任务的变化,以更高的效率完成被测产品的功能性能测试。

被测产品(UUT, unit under test),是测试系统的测试目标,它有多种类型,一般具有不同的外形特征,不同的控制接口,不同的性能指标,不同的测试仪器需求以及不同的测试方法。由于被测产品的差异性,需要设计相应的适配器来对其硬件接口进行统一。测试过程中被测产品需要在各个测试点流转,需要设计线边库、循环传送带、抓料机构等来完成其自动转运。

测试工位依据其配置仪器的种类数量不同,具备不同的测试能力,完成被测产品的性能指标测试。测试系统在测试工位配备不同种类、数量仪器时,可以通过识别测试工位仪器情况,统计出每个测试工位的测试能力。面对不同的测试任务工单时,自动将被测产品的测试路线进行最优化分配,使得总体测试时间最短。也可以在已知任务工单,测试时间要求的情况下,推荐各个测试工位所需仪器资源。

被测产品在库房完成适配器的装夹,通过 AGV 小车运送至模块类柔性测试系统,测试系统由测试工位、线边库和循环传送带组成,每个工位设置一个抓料机构。工位数量可按需求进行扩充或者缩减。传送带负责将被测产品从线边库输送至测试工位附近,由抓料机构将被测件取出或放入。传送带可向前循环移动并且直接接受管控系统的调度,保证被测件在工位之间的正常流

转。实际运行时,可以选择按照流水线的模式将被测模块在工位之间依次流转;也可以利用线边库的缓存功能,按照每个工位测试完成的先后顺序投放被测件,被测件在工位均测试完成后即可流出,最大程度地保留了生产模式调整的灵活性。当被测件正常测试完成后或在任意工位出现测试异常时,抓料机构可快速将异常被测件从工位抓出,放入传送带,通过传送带运送至线边库,线边库再将异常被测件放入 AGV 小车上,由 AGV 小车将异常模块运往调试准备区进行排故。

2 系统硬件设计

2.1 传动系统

传动系统由 AGV 小车、线边库、全自动装夹适配器、循环传送带、模块适配器组成。电子设备的测试工艺流程,需要完成常温测试、环境适应性测试。传动系统通过 AGV 小车完成电子设备在不同区域之间的传输,将电子设备运送至不同区域的线边库。线边库完成产品的暂存,循环传送带将线边库中的被测电子设备运送到不同的测试工位,全自动装夹适配器完成循环传送带与测试工位之间的移动和测试线缆的对接。模块适配器将各类不同的被测产品外形和接口进行统一。

线边库用于实现测试产品的自动存放,本库最大存放容量为 20 个模块适配器。通过线边库取放料机构,可实现测试产品在缓存货架、产品转运 AGV、产品循环传送带三者之间自动转移,避免上下料环节人工参与,能极大提高产品测试站位的自动化程度。

线边库由货架,取放料机构(堆垛机)、控制系统构成,组成及布局如图 2 所示。

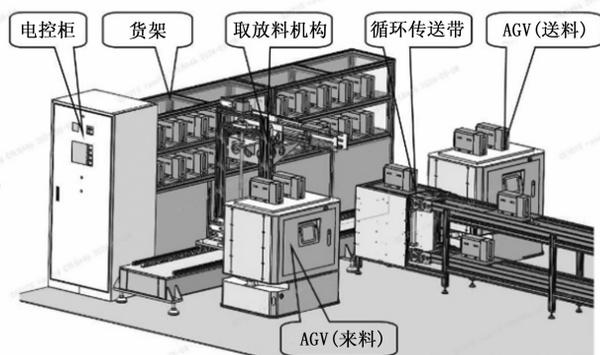


图 2 线边库组成布局图

线边库工作原理框图如图 3 所示,线边库的所有执行动作和状态信息上报均通过 PLC 控制系统来完成,而 PLC 控制系统又接受储料控制计算机的控制,管控调度系统通过储料控制计算机下发控制命令间接实现对线边库的控制。此外,储料控制计算机还可实现对二维码扫码器的控制,统一接收来自管控调度系统的命令,上传当前管控的各个部分的状态信息。

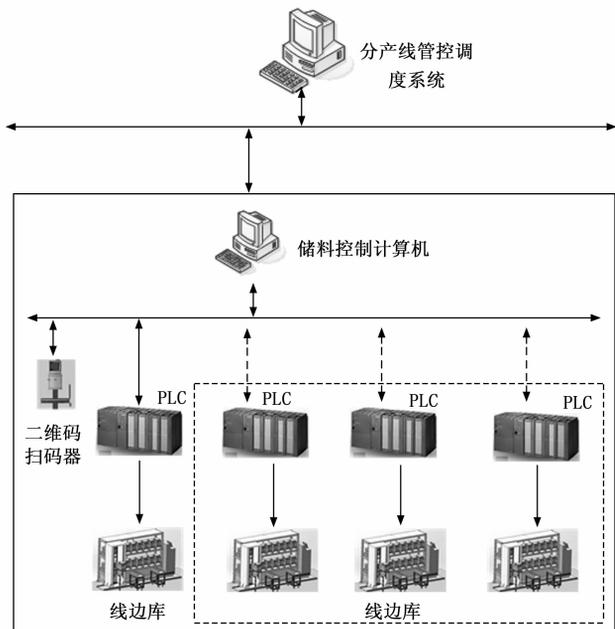


图 3 线边库工作原理图

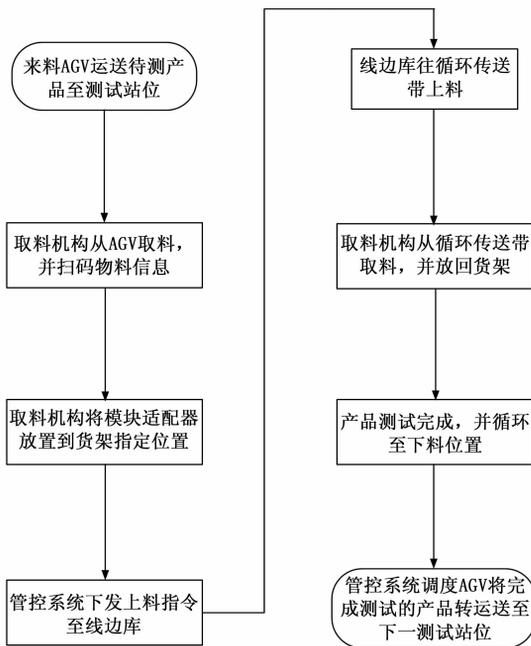


图 4 线边库工作流程图

来料 AGV 小车从准备区装载被测试产品并运输至测试站位，取放料机构从来料 AGV 抓取模块适配器，同时取放料机构上的二维码扫码器扫描并上传物料信息。然后，取放料机构将模块适配器放置到货架指定位置上。

当线边库接收到上料指令时，取放料机构将需要出库的产品从货架搬运至循环传送带上料位置。产品测试完成后，产品随循环传送带循环至上料位置，再由取放料机构将产品搬离循环传送带。

完成测试的产品可暂存于线边库货架上。待送料 AGV 将完成测试的产品转运至下一测试工位。

线边库工作流程如图 4 所示，全自动装夹适配台共有 3 套，平行于循环传送带布置。各适配台相互独立，通过增加适配台及测试仪器的方式，可较轻易地进行扩展，以提高产能。

全自动装夹适配台主要由基座、外罩、自动对插机构、自动定位夹紧机构、抓料机构等组成。全自动装夹适配台组成如图 6 所示

抓料机构用于将产品从循环传送带抓取到装夹适配台进行测试，自动定位夹紧机构用实现对测试产品的快速定位和夹紧。自动对插机构用于实现模块适配器接头和测试电缆接头的自动拔插。通过安装于对插接头后端的力传感器，可实现对插拔力大小进行检测，防止插拔力过大损坏插拔接头或产品。

自动对插机构由伺服电缸进行驱动，其结构如图 5 所示。

全自动装夹适配台的所有执行动作和状态信息上报均通过 PLC 控制系统来完成，而 PLC 控制系统又接受

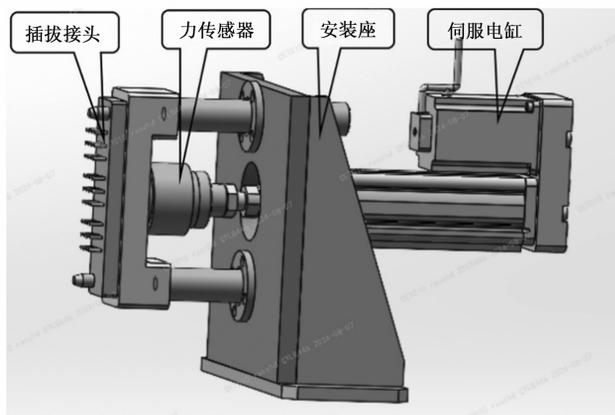


图 5 自动对插机构示意图

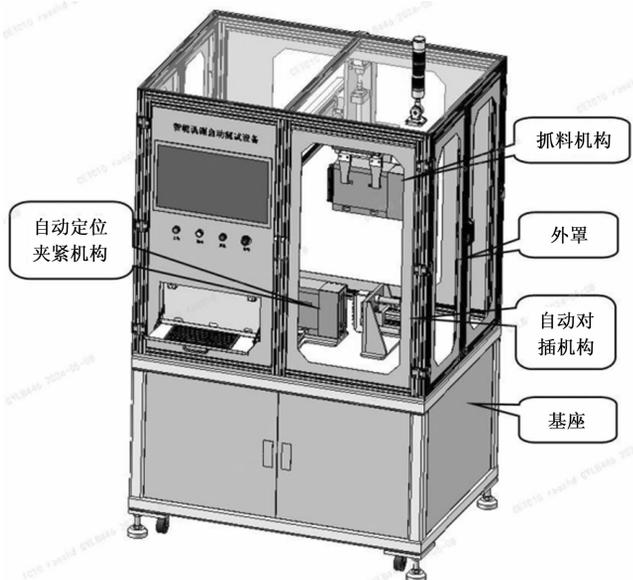


图 6 全自动装夹适配台

适配台控制计算机的控制,分产线管控调度系统通过适配台控制计算机下发控制命令间接实现对线边库的控制。此外,适配台控制计算机还可实现循环传送带和扫码器的控制,统一接收来自管控调度系统的命令,上传当前管控的各个部分的状态信息。

通过全自动装夹适配台可以实现测试模块的自动装夹及测试电缆接头的自动拔插,实现模块测试环节的完全自动化,避免人工参与。其工作流程如图 7 所示。

循环传送带用于实现测试产品的在线流转。线边库取放料机构可自动从循环传送带上取放被测产品,从而实现测试产品的自动上料和下料。全自动装夹适配台抓料机构可从循环传送带上抓取被测产品。通过循环传送带,测试产品可流转至相应的测试工位进行相关测试。

测试产品随传送带流转。循环传送带各取料位设置有二维码扫码器和阻挡。当模块适配器随托盘运动到取料位时,阻挡气缸伸出,将产品准确地阻挡在取料位,同时二维码器扫码产品信息。

通过扫码产品信息,能够避免产品重复测试或漏测试;且经过扫码,管控系统能实时获取循环传送带上的产品测试状态。

当某全自动装夹适配台出现拥堵时(适配台正在测试,而新的被测产品又流转至该测试工位),控制系统会让新到的测试件继续随循环传送带流转,直到该测试站位空闲后,才能将流转至该测试位的产品抓取至全自动装夹适配台进行测试。

2.2 自动测试系统

自动测试系统(ATS)由测试主控设备、射频开关网络组成。

测试主控设备采用了 XMC 构架的主控设备,具备

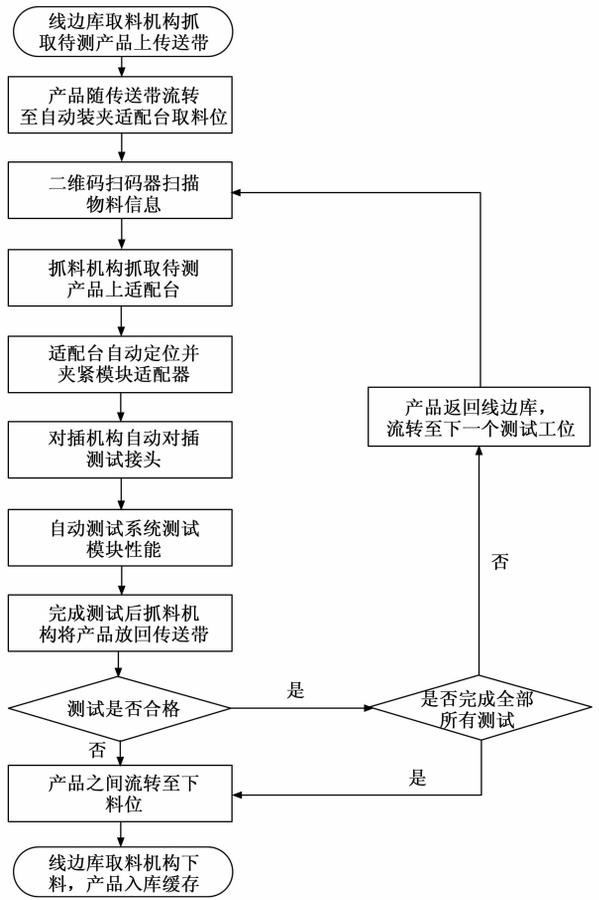


图 7 全自动装夹适配台工作流程图

体积接口小、易于集成、结构可靠、可配置等优点。主控设备由三部分组成,包括主控板、扩展板、电源模块、结构和功能模块,组成原理框图如图 8 所示。

主控板:为整个设备的控制核心,包含 X86 架构

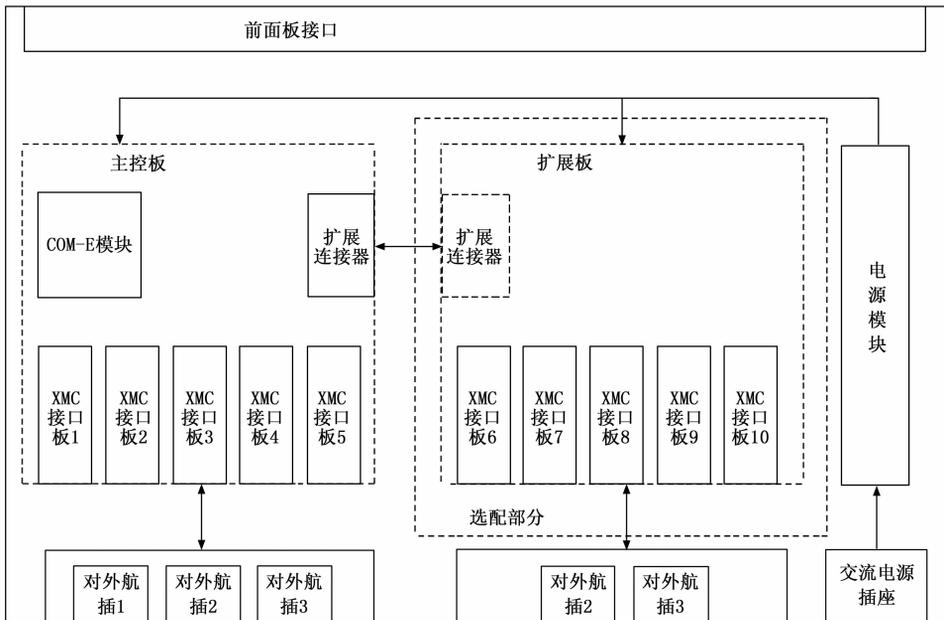


图 8 主控设备内部组成框图

的高性能 CPU 及外围电路，同时提供载板 XMC 接口，同时实现 XMC 模块之间的同步；可使用 COMe 模块作为核心电路。

扩展板：用来支持扩展更多的 XMC 模块；

电源模块：给便携式主控板和 XMC 子模块提供必要的电源；

结构：2U 可上架形式，对外通讯接口为军用航插；

功能模块：根据主控设备需求，共分成 5 个子模块，分别是 LVDS 多功能接口模块、LVCMOS/地开/离散量多功能 IO 接口模块、CAN2.0B 总线模块。

控制器核心电路以 COMe 模块为核心，主要用来扩展 XMC 模块。内部链路如图 9 所示。

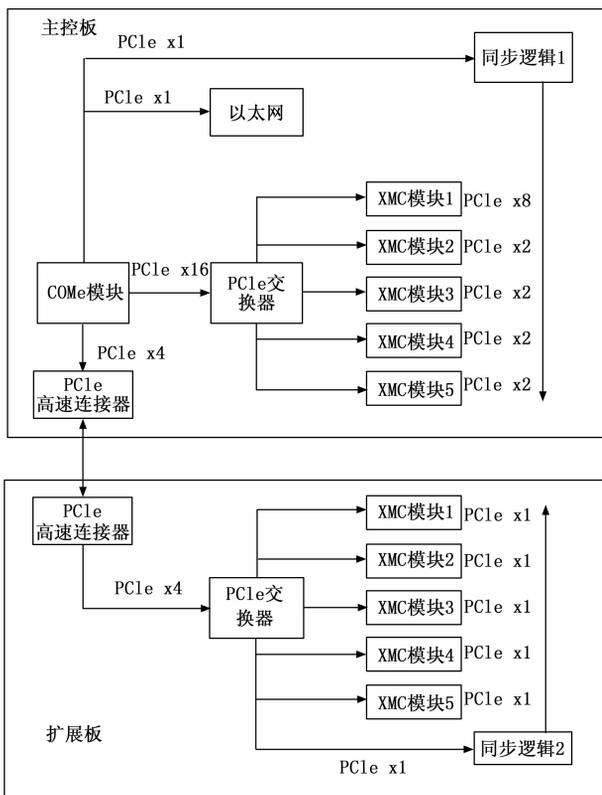


图 9 主控板/扩展板 PCIe 链路组成

COMe (COM Express) 模块是由 PICMG (PCI 工业计算机制造协会) 于 2005 年夏天发布的计算机模块标准，是目前嵌入式计算机领域非常流行的一种工业标准。它定义了模块化电脑的物理尺寸、接口连接及散热接口。COMe 的外设接口包括 USB、SATA、PATA、Ethernet、VGA、DVI、LVDS、SDVO、PCI 和 PCIE。PICMG 定义了几种引脚分配类型，每种类型都有特定的外设、扩展接口和连接器布局。包括 TYPE1、2、3、6 和 10。COMe 规范还定义了三种模块尺寸：紧凑型、基本型和扩展型等三种尺寸规格。

选用尺寸为 125 mm×95 mm 基本型，接口类型为

TYPE6 的 COMe 模块，选用康佳特的 conga-TS170/i7-6820EQ 子模块扩展电路主要进行模块扩展，子模块通过 XMC 接口和外部模块相连，XMC 接口通过 PCIE 接口和模块相连。

XMC 接口直接将 COMe 的 PCIE 总线引到 XMC 连接器，包括 1 路 PCIE X8，2 路 PCIE X4，2 路 PCIE X1，共设计 5 个 XMC/PMC 兼容扩展接口。同时将 XMC/PMC 的预留接口引入触发总线，方便各模块之间的同步功能。

根据实际测试需求，插入各种功能的 XMC 接口板，实现 LVDS、CAN、SPI、RS422、等各种总线控制。

射频开关网络的设计，考虑后期扩展能力，采用模块化设计，使用 PXI 机箱搭建。选择了 18 槽的 PXI 机箱，除了零槽被控制板卡占用，其余 17 个槽位均可以插入开关板卡，按实际测试需求，组成射频开关网络。系统考虑了 6 种被测产品需求，使用了 1 个二分开关板卡 40-780A-524，2 个四分开关板卡 40-784A-103，1 个六分开关板卡 40-784A-002，三张板卡共提供了 4 个二分开关、6 个四分开关、2 个六分开关，共占据了 8 个槽位，还剩余 9 个槽位可供后续产品扩展使用，设计扩展冗余充分。

2.3 接口转换设计

为了解决不同被测产品的接口差异问题，实现工作站的全自动生产，设计了一套接口转换规则。通过外形、接口统一的模块适配器，完成被测产品与测试系统接口的统一。

模块适配器需满足工作站三个工位之间传递和流水线的上料和下料作业过程中的装夹、定位、对插、测试等功能。测试不同模块时，无需更换线缆，自动装夹适配台将模块适配器与内部背板对插，即可实现被测模块与测试设备之间的连接。模块适配器设计架构如图 10 所示。

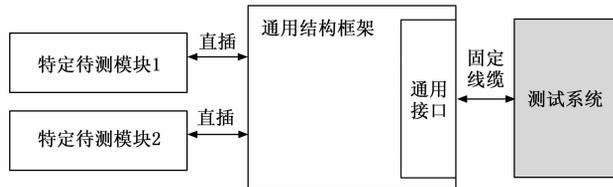


图 10 模块适配器设计架构图

模块适配器内部和外部链接如图 11 所示。

模块适配器主要由框架、背板组件和面板组件组成，框架用于待测模块的导向、固定和散热，背板组件用于待测模块的接口适配，面板组件用于实现待测模块接口和测试接口的转换。模块适配器三维爆炸图如图 12 所示。

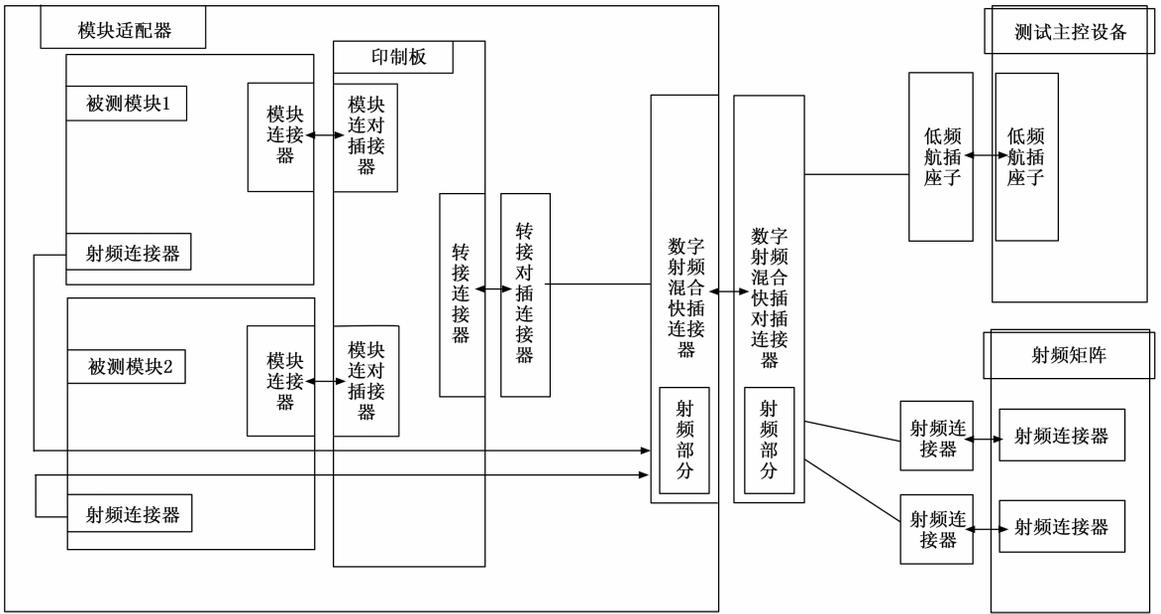


图 11 模块适配器整体互联图

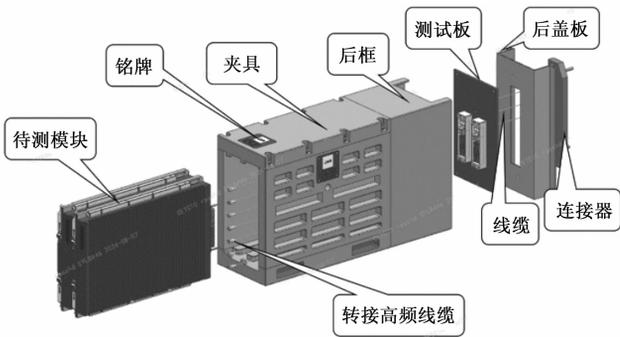


图 12 模块适配器爆炸图

测试系统与模块适配器之间的接口按固定规则进行设计，产品供电、低频与高频信号进行空间隔离，保证各信号的完整性。选择了模块化的矩形连接器件，可以根据实际产品需求进行链接优化，也给后续系统升级扩容，留下了足够的冗余。连接器如图 13 所示。

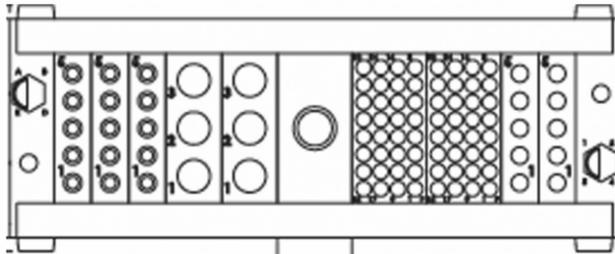


图 13 矩形连接器示意图

3 系统软件设计

3.1 自动测试系统软件设计

自动测试系统软件采用了周阳明^[20]等人提出的基

于 Python 的自动测试软件通用平台，具有中文化的脚本，模块化设计的软件功能，能够很方便的进行二次开发，通过自定义编写的服务器/客户端函数包，接入管控系统，达到管控系统控制自动测试软件的目的。自动测试软件包含被测产品状态控制模块，测试仪器控制模块，测试程序集模块，通信模块。被测产品状态控制模块，实现对各种产品各种状态的控制信号收发。测试仪器控制模块，实现对各种仪器的读写操作和矩阵的控制。测试程序集模块，通过调用被测产品状态控制模块、测试仪器控制模块，实现测试逻辑。通信模块，实现与管控系统的通信，接收来自管控系统的测试命令，并将测试结果返回给管控系统。

自动测试系统对生产中所需的各类测试仪器进行管控。它基于产品控制程序、测试项程序，结合对应仪器的驱动，实现覆盖全工步测试项的、对被测件的调测和结果校验。同时形成测试服务，将测试过程数据和结果数据统一提供到上层系统。

3.2 任务分配算法设计

柔性测试系统中，被测产品的测试、运转均由传送带、自动装夹、自动测试程序完成，各工步时间基本固定，如何对生产中产品测试路径进行分配，能使得最终测试时间最优，仪器使用率最高，成为一个难题。由于被测产品的数量和种类都是不定的，而且仪器设备作为贵重资源，也存在难以固化的情况。如果固定每种产品的测试路径，则无法获得最优的资源使用效率，更不可能人工来对各测试路径进行分配。

建立产品信息库（包含产品测试项集合、测试项仪器需求集合、各测试项测试时间集合）；建立工作站状

态库，包含工作站仪器状态情况。

在各要素间建立映射关系，收集各工作站当前能够满足的测试项情况、输入生产任务（被测产品型号及数量），通过运算分配各被测产品的测试项。实现当批任务生产用时最低。

分配的核心思想，是将被测单元的每一项测试时间块状化，时间越长，对应的时间块越大，并按先大后小的逻辑，将时间块均匀的放置到测试工位上。在分配过程中，同时要考虑因实际环境导致的约束条件。分配方法的逻辑运算简单，可以轻松通过代码实现。分配逻辑流程图如图 14 所示。

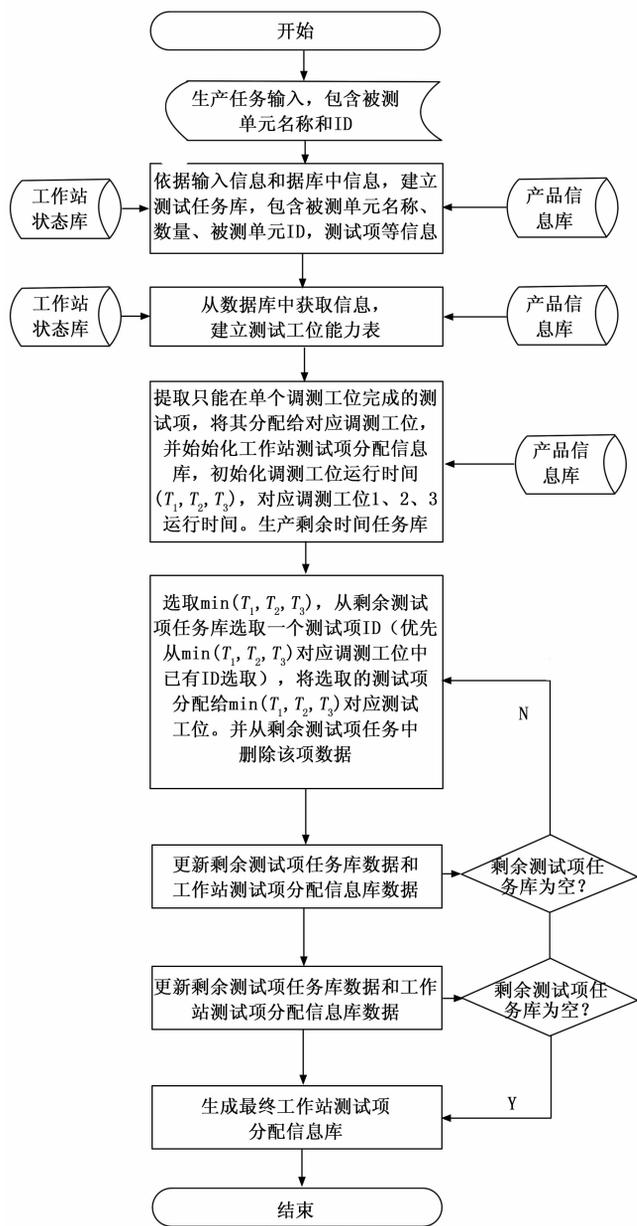


图 14 分配逻辑流程图

3.3 ALC 环路调试方法设计

在功放类产品的生产过程中，通常会通过调节数字电位器来控制不同频率输出功率的大小。器件差异、装配差异，会使得每个产品需要写入的数据不同，如何快速有效的寻找出数字电位器所需的数值，经历了从人工测试寻找到自动测试寻找的过程。古老的人工测试寻找，需要在不同的频率下，手动输入不同的值，进行调试确定，费时费力。所以后来通常使用程序代码模仿人工操作，完成电位器数值的调试。原代码采用“预植入频点的固定经验值+循环逼近”的方法，一般单套产品的调试时间在 85~95 分钟。这种算法存在两个缺陷：1) 由于分布参数变化，固定经验值往往与实际值相差甚远，导致调试时间长，易报错退出程序；2) 产品一般采用 C 类功率放大设计，其实际效率在 50~60%，长时间调试 UV 功放管产生的大量热量聚集对产品安全带来隐患。3) 功放产品存在多种功率档位，每个档位都要进行重复调试。

为了解决传统调试方法时间长、效率低的问题，提出了新的 ALC 环路调试方法，利用耦合器耦合度的线性、相邻频点耦合度变化不大特性，只设定初始频点 F1 对应档位 1 初始值 SF1，程序循环运算找到满足功率值要求的实际 SF1' 并写入初始频点 F1 档位 1 对应地址后，同时将初始频点参数值 SF1' 作为 F2 频点初值，依次进行直到结束。实际分析电路设计，不同档位间的差异主要在于其 ALC 数据存储地址不同，可将参数同时写入不同档位，实现统一调试。调试逻辑如图 15 所示。

4 实验结果与分析

柔性测试系统通过机械传动技术、自动测试技术，实现了少人化的生产测试；通过接口转换技术，解决了因不同产品接口差异导致测试环境专用的问题，满足了 6 种不同的被测产品的测试需求；通过任务分配算法，解决了多种类产品同时测试时，测试任务的分配问题，提高了测试系统的仪器利用率；通过 ALC 环路调试方法，提高了被测产品的调试效率。

以实际被测产品为例，有生产测试任务需要测试 A 产品 4 套，B 产品 16 套。若使用原测试环境，A 产品需要测试人员 1 人，测试资源 1 套，人工工时 301.5 分钟；B 产品需要测试人员 1 人，测试资源 1 套，人工工时 1 483 分钟。总计需要 2 人，2 套测试资源，总人工工时 2 084.5 分钟。若使用柔性测试系统，需要测试人员 1 人，测试资源 1 套，总人工工时 240 分钟，节约人员 50%，节约测试资源 50%，节约人工工时 88.48%。

再以某两种类型产品混产 60 套为例，原生产模式需要生产资源 2 套，人工工时 1 784.5 分钟。使用柔性

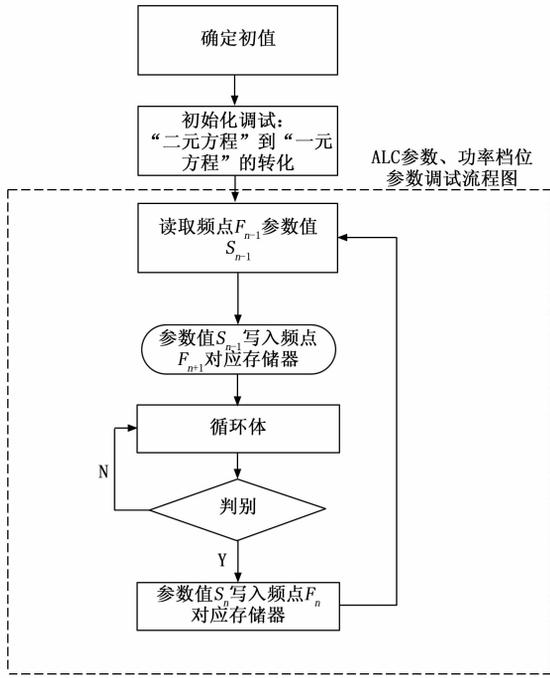


图 15 ALC 环路调试法逻辑图

测试系统，需要生产资源 1 套，人工工时 240 分钟。节约测试资源 50%，节约人工工时 86.5%。

得益于任务分配算法设计和接口转换设计，柔性测试系统可在内部测试资源完成变动、调测任务输入后，自动进行识别适配，规划调测路径。可变的测试资源，可变的测试任务输入，保证了柔性测试系统对复杂多变的军工设备测试需求的满足。

5 结束语

柔性测试系统以提高生产测试效率为目标，通过少人化、智能化、柔性化的手段，集成了多种成熟的工业技术，在 2022 年 12 月投入使用，以对单批次 20 套产品进行测试的工时进行统计对比，原有 20 套产品测试人工工时 36.78 小时，使用柔性测试系统后，人工工时 2.52 小时；原有 20 套产品测试设备工时 36.78 小时，使用柔性测试系统后，设备工时 8.4 小时，柔性测试系统每天工作时间为 18 小时。单套节约人工工时： $(36.78 - 2.52) / 20 = 1.71$ 小时；单套节约设备工时： $(36.78 - 8.4) / 20 = 1.42$ 小时；柔性测试系统产能提升为 $(36.78 / 20 / 7.5) / (8.4 / 20 / 18) = 10.51$ 倍。系统有效的提高了产品的生产测试效率，降低了对生产人员的技能需求。

参考文献：

[1] 逢晨, 余志勇, 孙亚民. 基于双频测试的功率放大器非线性特性研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 12: 18 - 21, 26.

[2] 彭安虎, 韩周安, 李志强. T/R 阵列自动测试系统去嵌入技术研究 [J]. 中国测试, 2021 (7): 92 - 98.

[3] 于雅丽, 齐同斌. 基于 ATML 的 ATS 软件平台的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 138 - 141.

[4] 陈波, 孔凡立, 牟弘. 基于 STD 和 ATML 标准的面向信号软件 [J]. 测控技术, 2018, 37 (6): 43 - 46.

[5] 陈靖宇, 刘收. 新一代综合自动测试系统在船用雷达测试保障中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 146 - 151.

[6] 康祥熙. 通导系统通用自动测试平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020 (1): 30 - 34.

[7] 李泽明, 王鹤, 胡顺平, 等. 基于高频开关网络的自动测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020 (2): 48 - 52.

[8] 戴日辉, 陈帅, 杨昊旻. 信号调理模块的 LXI 自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 15 - 19, 24.

[9] 肖勇. 测试程序组件化设计研究与实现 [J]. 现代电子技术, 2023 (8): 154 - 158.

[10] STEVEN K. Application of IEEE standards and ATML in TPS development for ministry of defence UK [C] // 2014IEEE Autotestcon, 2014.

[11] 李涛涛, 包亮. ATML 标准结构及其应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 45 - 49.

[12] 肖勇. 通用自动测试系统软件平台中仪器互换技术的研究 [J]. 计量与测试技术, 2020 (2): 22 - 24.

[13] 张倩, 张硕, 侯燕春. 基于 PXI 平台的环境试验并行测试系统设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2020 (2): 122 - 126.

[14] 牟宗磊, 宋萍. 分布式测试系统时间同步技术的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 21 - 25.

[15] 李姗, 骆培, 安军社. 航天器综合电子系统通用测试系统设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014 (9): 92 - 99.

[16] 唐小峰, 孙智敏, 文永康, 等. 基于 ATML 标准的网络化自动测试实现方法 [J]. 中国测试, 2020 (s1): 110 - 113.

[17] 罗广恒. 基于 Django 和 MySQL 的网络化测试数据查询系统研究 [J]. 智能物联技术, 2019 (2): 15 - 21, 31.

[18] 刘福军, 蔡德咏, 孟晨, 等. 下一代自动测试系统体系结构研究进展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 339 - 341.

[19] CLENDEN IN C K. Flexible test systems-an adaptive architecture to preserve existing investment and enable use of emerging technologies [C] // IEEE Autotestcon 2004. Piscataway: IEEE, 2004: 45 - 51.

[20] 周阳明. 基于 Python 语言的自动测试系统通用软件平台实现 [J]. 电子设计工程, 2019 (5): 81 - 85.