

微波开关自动测试系统设计

祝军生^{1,2}, 胡顺平³, 李明军⁴, 葛重才⁵, 刘延迪⁴,
杨 旻⁴, 杜 微⁴, 张 璐⁴

1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016;
2. 中国航天科工集团八五一一研究所, 南京 210007;
3. 西安空间无线电技术研究所, 西安 710100;
4. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;
5. 陕西航天时代导航设备有限公司, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 针对当前微波开关指标测试流程复杂、测试方法自动化程度低问题, 提出了一套集指标测试、数据采集和数据管理功能于一体的自动化测试系统; 该系统基于微波开关生产及试验环节的实际使用需求, 通过软件平台实现对通用测量仪器及遥控遥测设备、射频开关矩阵等设备的自动化控制, 单次可满足最多 16 个微波开关的同步测试, 可实现同轴型和波导型两类开关的 S 参数、切换时间、门限电压、接触电阻、跑荷等总计 18 种指标参数的测试和试验数据管理, 达到了测试效率和试验质量的双提升。

关键词: 微波开关; 遥控遥测设备; 射频开关矩阵; 自动测试; 数据管理

Design of Automatic Test System for Microwave Switch

ZHU Junsheng^{1,2}, HU Shunping³, LI Mingjun⁴, GE Chongcai⁵, LIU Yandi⁴,
YANG Yang⁴, DU Wei⁴, ZHANG Lu⁴

1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. China Aerospace Science and Technology Group 8511 Research Institute, Nanjing 210007, China;
3. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;
4. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;
5. Shaanxi Aerospace Times Navigation Equipment Co., Ltd., Baoji 721013, China)

Abstract: To address the problems of complicated testing process and low automation level in current microwave switch evaluation methods, an automated testing system is proposed to integrate the index testing, data acquisition, and data management function. This system is based on the practical needs of microwave switch production and testing, and achieves the automate controls of universal measuring instruments, remote control and telemetry equipment, and radio frequency switch matrices on the software platform, simultaneously meeting a maximum of 16 microwave switches at a time, it can achieve the testing and experimental management, including the S parameter, switching time, threshold voltage, contact resistance, and running load for the coaxial and waveguide type switches, it improves the testing efficiency and experimental quality of data management.

Keywords: microwave switch; remote control and telemetry equipment; radio frequency switch matrix; automate testing; data management

0 引言

微波开关作为卫星载荷、武器装备及自动测试系统的重要组成部分, 其功能是实现信号的切换, 同时对提高系统灵活性具有重要作用。随着电子信息技术的高速发展, 微波开关在通信、导航、雷达及测控等领域的应用也越来越广泛, 市场需求量也逐年递增, 高速增长的需求对微波开关的生产及交付周期提出了严峻的挑战^[1-3]。

在微波开关生产环节中, 性能指标测试是至关重要的环节之一。目前, 针对微波开关性能指标的测试主要面临三大问题:

1) 性能指标繁多、工序复杂、测试一致性无法保障:

微波开关性能指标分为射频和低频两类, 射频指标主要包括驻波、插入损耗、隔离度、相位及通道一致性等, 测试需要使用射频测量设备, 如网络分析仪、微波信号源等。低频指标包括切换时间、门限电压、干扰抑制、跑荷、瞬态抑制、接触电阻和遥测电阻等, 测试这些指标需要使用低频测量设备, 如数字万用表、电源、示波器等。两类指标所需仪器、接线方式及测试流程均不相同, 测试过程耗时长、流程复杂, 测试结果易受人为因素影响。

2) 无法实现多开关同步测试, 反复拆装工装电缆效

收稿日期: 2024-01-16; 修回日期: 2024-02-20。

作者简介: 祝军生(1979-), 男, 研究员。

引用格式: 祝军生, 胡顺平, 李明军, 等. 微波开关自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 31-37, 45.

率低:

受测量仪器和激励设备的通道所限,传统方法同一时刻仅能对单个微波开关进行测试,且微波开关的测试需要频繁切换通道,每组通道测试完成后需要人工拆卸电缆和射频连接器,转接到下一组测试通道后才能继续测试,反复拆装射频连接器,不仅影响微波开关的使用寿命,而且影响射频指标。

3) 测试产生的数据量庞大、数据管理耗时费力:

微波开关性能指标繁多,各类试验所测试指标种类不尽相同,测试过程产生的数据庞大繁杂,人工整理测试数据效率低、易出错。

随着测试技术的日趋完善,扩展测试资源端口、简化测试流程、降低工装拆装次数等提高测试效率的手段,已成为当前微波开关快节奏、高效率生产的必要趋势。针对当前微波开关产业快速发展的现状,亟需提升微波开关测试自动化水平,研制微波开关自动测试系统,满足微波开关设计验证、量产试验等测试需求^[4-8]。

1 系统结构及原理

1.1 系统总体组成

微波开关自动测试系统组成如图 1 所示。包含软件平台和硬件平台,软件平台负责系统的整体调度、流程控制及数据采集和管理,包含设备驱动、流程编辑、任务执行和数据管理四个部分。硬件平台主要由总控计算机、交换机、测量仪器、开关矩阵、遥控遥测设备及测试工装组成,其中开关矩阵分为射频开关矩阵及低频开关矩阵两种,测量仪器包括矢量网络分析仪、微波信号源、示波器及数字万用表等。

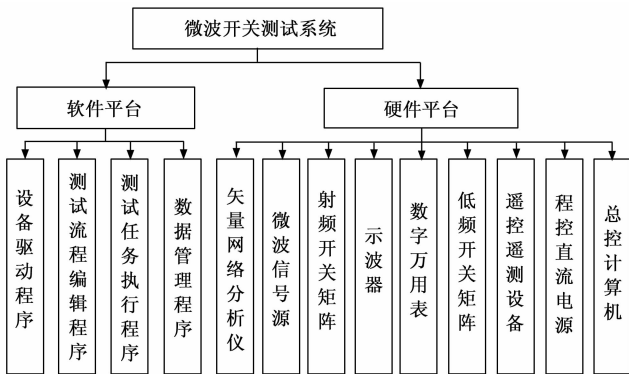


图 1 微波开关自动测试系统组成

微波开关自动测试系统有如下特点。

1) 高性能测试测量仪器:采用高精度、高稳定性的测量仪器和通道扩展设备,可实现对多个微波开关的同时测试,并确保测试结果的准确性和可靠性。

2) 高性能测试测量仪器:采用高精度、高稳定性的测量仪器和通道扩展设备,可实现对多个微波开关的同时测试,并确保测试结果的准确性和可靠性。

3) 高性能测试测量仪器:采用高精度、高稳定性的测

量仪器和通道扩展设备,可实现对多个微波开关的同时测试,并确保测试结果的准确性和可靠性。

4) 自动化控制和数据采集:该系统可实现对微波开关性能指标的自动化测量和数据采集,减少人工操作的时间和精力,提高测试效率。同时,该系统还可实现对多个微波开关的同时测试,提高生产效率。

5) 数据管理和分析评估系统:该系统可实现对测试数据的存储、查询和分析评估,为产品质量控制和改进提供有力支持。同时,该系统还可实现对测试结果的实时监控和预警,及时发现并解决问题。

1.2 系统工作原理

系统工作原理如图 2 所示。总控计算机微波开关测试系统的核心,运行操作系统及测试软件平台,承担测试任务制定、流程编辑、测试执行及数据管理等关键任务,用户通过操作测试软件实现设备的远程控制、被测开关状态切换、指标数据采集及测试数据的分析导出。测量仪器中的矢量网络分析仪用于微波开关各端口的驻波、插损、隔离度等射频指标的测试;示波器及微波信号源组合可实现微波开关切换时间的测试;万用表则用于射频接触电阻及绝缘电阻测试。

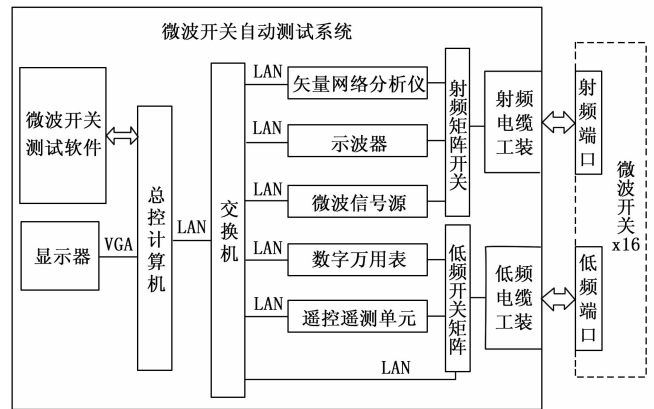


图 2 微波开关测试系统原理框图

遥控遥测设备是微波开关的控制设备,由遥控单元、遥测单元及程控电源三部分组成,主要用于实现微波开关的状态切换及遥测采集,可满足 16 个开关的测试需求。

为了提高测试效率,微波开关测试系统中配置了两类开关矩阵,分别是射频开关矩阵和低频开关矩阵,主要作用是实现测试通道的扩展,最多支持 16 个开关并行测试^[9-12]。

1.3 微波开关测试原理

微波主要由射频部分、驱动机构、遥测遥控电路三部分组成。射频部分实现射频信号的传输和切换;驱动机构是通道切换的执行机构;遥控遥测部分为驱动机构提供外部激励并反馈当前微波开关的状态信息。

微波开关的对外接口分为遥控、遥测和射频三部分,测试要针对这三个端口展开。遥控遥测设备是针对微波开关的遥控接口和遥测接口电气特性而设计的,可提供 64 路电压和脉宽可调的激励信号,通过对某个通道施加激励,

可实现该通道的打开或闭合, 同时提供 64 路电压采集通道, 可采集微波开关的遥测电压, 指示当前微波开关所处的状态。

微波开关自动测试过程如图 3 所示, 微波开关射频性能和低频性能所使用的测试仪器包括遥控遥测设备、微波信号源、矢量网络分析仪、示波器及自动化测试设备, 以上设备均可通过以太网接口实现自动化测试, 借助以太网交换机将各测试设备组网, 进行集中管理, 上位机软件根据用户的测试内容进行综合调度, 进行射频性能指标测试时控制矢量网络分析仪、射频开关矩阵和遥控遥测设备完成测试; 进行低频测试时上位机控制示波器、微波信号源、数字万用表和低频开关矩阵来完成测试。

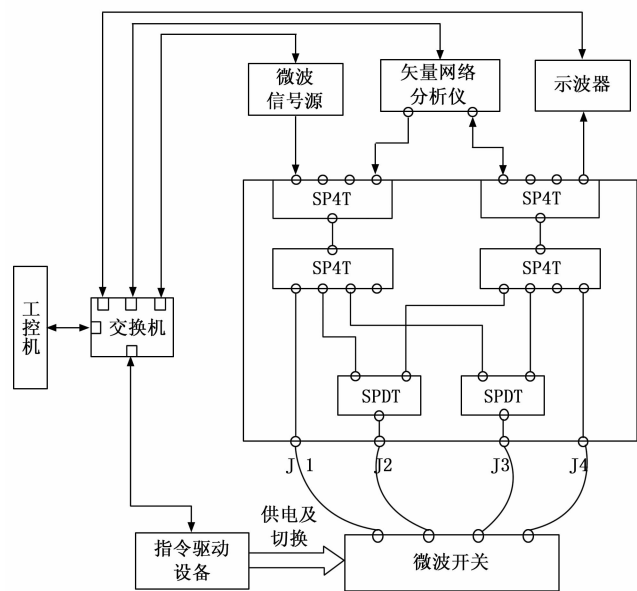


图 3 微波开关测试原理

微波开关指标特性可分为静态特性和动态特性两类, 在微波开关切换完成后, 开展的指标测试为静态特性指标, 在微波开关切换瞬间开展的指标测试为动态特性指标, 微波开关性能参数测试项目如表 1 所示。

如表 1 所示, 微波开关 18 个性能参数按照所使用测试设备的不同可分为四类, 即 I、II、III、IV 类。借助自动化测试设备的自动端口切换, 在不更换电缆的情况下, 即可实现任意两端口与测试测量仪器的联通, 从而避免人工更换电缆, 每类参数仅需完成一次工装连接即可完成组内所有参数的测试, 大大简化了繁琐的反复拆装工序, 提高了测试效率。

2 系统硬件设计

在微波开关测试系统中, 矢量网络分析仪、微波信号源、示波器、万用表、低频矩阵等测量仪器均为通用货架产品, 可通过采购的方式获取。而遥控遥测设备和射频开关矩阵则需根据被测对象的接口和测试需求进行定制。

微波开关按接口形式可划分为同轴开关和波导开关; 微

表 1 微波开关性能参数测试项目表

指标类型	指标项	微波开关状态	测试仪器	指标特性
射频指标	I 类共 6 个: 驻波、插损、隔离度、相位、幅度一致性及相位一致性	状态 1、状态 2、状态 3、状态 4 等	矢量网络分析仪、遥控遥测设备、射频开关矩阵	静态特性
低频指标	II 类共 5 个: 开关切换时间、瞬态抑制、驱动电流、驱动电压、脉冲宽度	1- > 2, 2- > 1, 1- > 3, 3- > 1, 2- > 3, 3- > 2, 2- > 4, 4- > 2, 3- > 4, 4- > 3, 4- > 1, 4- > 1 等	示波器、信号源、遥控遥测设备、检波器、射频开关矩阵	动态特性
	III 类共 4 个: 门限电压、干扰抑制、跑荷、遥测采集	1- > 2, 2- > 1, 1- > 3, 3- > 1, 2- > 3, 3- > 2, 2- > 4, 4- > 2, 3- > 4, 4- > 3, 4- > 1, 4- > 1 等	遥控遥测设备	动态特性
	IV 类共 3 个: 接触电阻、遥测电阻、绝缘电阻	状态 1、状态 2、状态 3、状态 4 等	遥控遥测设备、万用表、低频开关矩阵	静态特性

波开关为电压驱动, 驱动电压 8 ~ 32 V 之间, 驱动电流 ≥ 650 mA, 脉冲控制时间 1 ~ 999 ms, 64 路遥控通道、64 路遥测通道。根据微波开关的接口特性及同步测试需求, 对遥控遥测设备开展设计。

2.1 遥控遥测设备设计

在微波开关自动测试系统中, 遥控遥测设备主要针对被测开关的状态切换、遥测供电及遥测采集等功能, 进而配合测试系统实现对被测开关各项性能指标的测试。

微波开关控制电路在结构上分为遥控部分和遥测部分, 通过给遥控端施加脉冲驱动电压, 促使微波开关发生状态切换, 遥测电路跟随遥控状态发生改变, 通过检测遥测端高电平, 即可获悉当前微波开关所处状态, 而遥测端电压的供方为遥测公共端输入电压, 因此, 除遥控输出和遥测采集外, 还需为微波开关提供遥测供电电路, 图 4 为遥控遥测设备和微波开关的对接示意图。

遥控遥测设备主要由嵌入式控制板、触摸屏、遥控板、遥测板、开关电源模块及程控电源等组成, 具备本地控制和远程控制两种控制方式, 通信接口为 LAN 口。

嵌入式控制板是遥控遥测设备的主控单元, 运行 Windows 系统平台及设备控制软件, 使用人员通过触摸屏可实现参数设置、脉冲输出、遥测供电和遥测采集。在进行自动化系统集成时, 遥控遥测设备可通过 LAN 接口接收上位机指令, 经控制软件解析后, 下发给遥控板、遥测板及程控电源, 实现遥控输出、电源输出及遥测采集等操作。

遥控板是通过 RS232 接口接收来自控制软件下发的输出指令, 控制 64 路输出通道中的指定通道输出 1 ~ 999 ms

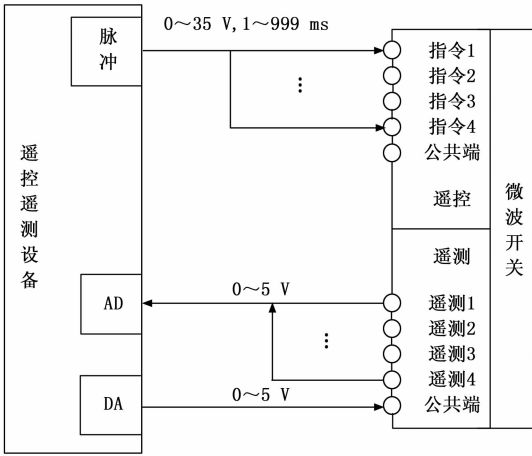


图 4 微波开关驱动原理图

的脉冲信号，同时控制程控电源输出 0~35 V 可调的驱动电压，进而实现电压可调的脉宽可变的控制信号。

遥测板同样通过 RS232 接口接收来自控制软件下发的设置指令，实现 16 路遥测供电的电压调节和输出，进而为微波开关遥测电路供电。同时采集 64 路遥测电压后，将数据上传给控制软件，由控制软件实时显示 64 路遥测通道的电压状态。

遥测遥控设备核心电路为遥控板和遥测板。遥控单元由 FPGA 电路、三极管开关电路、电源电路、串口通信电路等组成。FPGA 接收串口指令，识别输出通道、脉宽等参数，控制 I/O 输出脉宽可调的脉冲信号，脉冲信号通过光耦芯片将控制信号给到三极管开关电路，三极管开关电路负责输出被测微波开关所需的驱动信号，每个通道最大输出电压为 35 V，最大电流 ≥650 mA。

遥测部分由 FPGA 电路、DAC 电路、ADC 电路、电源电路、串口通信电路等组成。FPGA 通过 RS232 接口接收串行控制指令，识别遥测供电通道、遥测供电电压、遥测采集通道等参数，并发送串行控制信号 (SPI) 到 DAC 以及 ADC 电路中，DAC 通过信号放大电路实现 16 路 0~5 V 的电压输出，ADC 电路通过信号调理电路实现 64 路 0~5 V 的电压采集。

2.1.1 脉冲输出电路

FPGA 产生的 1~999 ms 脉冲信号电平仅为 3.3 V，远达不到微波开关的驱动要求，因此需要借助大功率三极管实现最大 35 V 的开关控制，为了防止大功率脉冲信号对 FPGA 电路的影响，采用光耦芯片进行隔离，通过对光耦输入端施加高低电平控制信号，实现大功率三极管的导通与闭合，进而将程控电源输出的可调电压输出至被测微波开关，实现被测微波开关的通道切换。

2.1.2 遥测采集电路

遥测采集电路实现电压采集功能，为了提高测量精度，采用 ADI 公司的 AD7689 芯片，该芯片具有 16 bit 分辨率，8 个输入通道，INL 为 ±4 LSB，运放前端经过分压和 RC

滤波后，经电压跟随进入 AD 进行采集，可满足 ±0.01 V 的采集精度要求。

2.1.3 遥测供电电路

遥测供电电路主要实现 0~5 V 电压输出功能，采用 ADI 公司的 AD5686 芯片，该芯片为 4 通道 DAC 芯片，分辨率 16 位、精确度 ±2 LSB、零位误差 0.4 mV，DAC 电路的输出为 0~2.5 V，而系统需要的输出为 0~5 V，因此需要对输出信号进行放大。选择 TI 公司的 OP07 芯片作为放大器，利用同相放大电路实现 2 倍放大。

2.2 射频开关矩阵设计

传统方法采用人工更换电缆实现两端口 S 参数测试，不仅效率低下，且会加速射频端口的老化寿命。通过射频开关矩阵的切换，可实现被测微波开关两两射频测试端口的自由组合，简化用户反复拆装待测微波开关射频端口的工作，提高测试效率。

如图 5 所示，矩阵由 DC~40 GHz 频段的微波开关组成，分为仪器端和被测产品端，其中仪器端又分为激励仪器端和测量仪器端。激励仪器如信号源输出向激励端口发射射频信号，经开关选择后，进入 J1、J2 或 J3，经微波开关后由 J2、J3 或 J4 端口后进入测量仪器端口进行采集。为了实现 16 个开关同时测试，在 J1、J2、J3、J4 端各扩展 16 个端口，进而实现 16 个微波开关性能指标的同步测试。

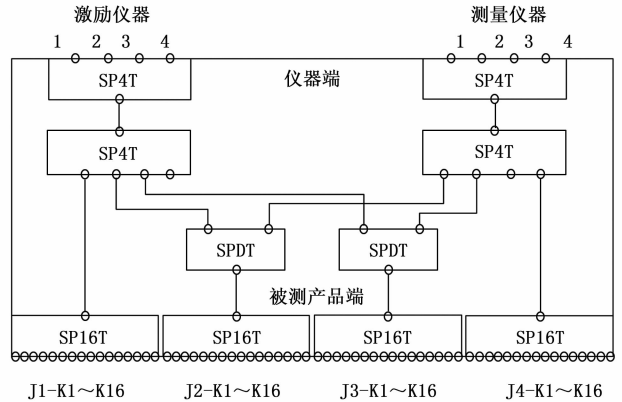


图 5 射频开关矩阵原理图

射频开关矩阵内部由主控板、开关控制板、SP4T 和 SPDT 微波开关及电源电路等组成。主控板负责本地用户人机界面交互和遥控；开关控制板用于接收主控板的控制指令，控制微波开关进行切换；电源电路则为主控板和开关控制板提供直流电源。其中主控板运行操作系统和控制软件，通过 RS232 串行口与开关控制板进行串行通信，发送切换控制信号。开关控制板接收到主控板发送的通道切换控制命令，通过拉高或置低微波开关控制接口电平实现不同链路的切换。

微波开关通过内部控制电路可实现 4 组 SP16T 组间任意两两端口的导通，通过本地软件或远控接口进行自动切换，即可实现 J1-J2、J3-J4、J1-J4、J2-J3、J1-J3、J2-J4 间的联通。

在射频测试系统中, 链路损耗会直接影响测试系统的动态范围, 本方案中射频开关矩阵的多端口扩展均采用机械开关搭建, 相较于固态开关, 机械开关拥有较宽的工作带宽、较低的损耗和较高的隔离度, 可有效降低系统链路插损, 进而提高测试系统的测试精度和稳定性^[13-16]。

3 系统软件设计

3.1 软件架构

软件平台采用 3 层软件架构, 分别为交互层、组件层、数据层。

1) 交互层提供可视化的开发方式以及丰富的辅助调试窗口;

2) 组件层提供仪器组件、界面组件、流程组件等模块, 采用软总线技术, 将各组件有机的组合在一起, 并提供开放的模块接口, 实现无限扩展平台功能。

3) 数据层由测试资源库、测试结果库、VISA 构成, 提供开放的 TPS 文件格式, 实现仪器资源配置、测试结果存储功能、仪器资源访问等。

采用三层软件架构, 可以实现可重构的模块化体系结构, 使得用户可根据测试诊断需求选择组件模块搭配成不同测试诊断系统, 也使得软件平台具有更广泛的通用性。根据用户对软件平台的组件层扩展或裁剪, 能够运行在不同的测试硬件平台之上, 形成专用的智能测试系统, 满足各种测试任务的需要^[17-22]。

3.2 软件功能组成

微波开关测试系统软件的功能组成和相互关系如图 6。

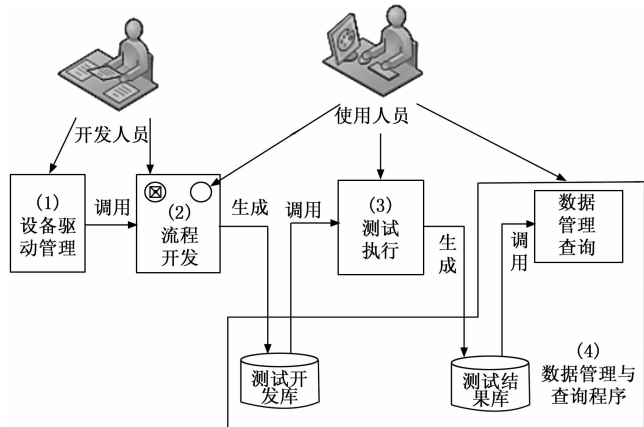


图 6 测试系统软件平台组成及相互关系

测试系统软件平台主要包含 4 部分功能模块。

1) 设备驱动模块: 包括设备资源检查功能、设备资源维护功能、系统校准、用户管理四个子功能模块组成, 主要实现整个系统平台的配置、仪器监测、系统校准、用户操作等功能;

2) 测试流程开发功能模块: 选择指定的测试仪器, 根据测试参数编辑测试流程, 通过配置仪器的输入输出参数, 完成对测试参数库的开发;

3) 测试执行功能模块: 根据测试需求调用测试参数,

并对设置进行修改确认, 形成测试任务, 之后执行该测试任务, 并将测试结果进行处理, 供数据管理与查询程序使用;

4) 数据管理查询功能模块: 提供关键筛选条件供用户进行历史测试数据查询, 并将查询结果根据需要以列表形式或分析图形式将结果显示出来, 同时支持自定义报表输出。

4 指标测试方案设计

针对前文介绍的微波开关四类性能参数进行测试方案设计, 给出测试原理图和测试流程图。

4.1 I 类参数测试方案

如图 7 所示, I 类参数包含驻波、插损、隔离度、相位、幅度一致性及相位一致性, 采用矢量网络分析仪、遥控遥测设备及射频开关矩阵等设备可实现 I 类参数的测试。

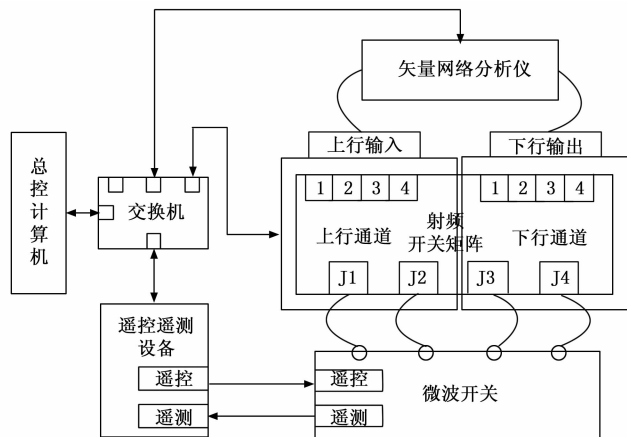


图 7 I 类参数测试方案

I 类参数关注微波开关的射频性能, 微波开关四个射频端口 J1、J2、J3 和 J4, 根据不同的开关状态, 四个端口最多有 6 种组合方式 (J1-J2、J1-J3、J1-J4、J2-J3、J2-J4、J3-J4), 程序通过配置每个状态下的组合, 对射频性能进行测试。测试流程如图 8 所示。

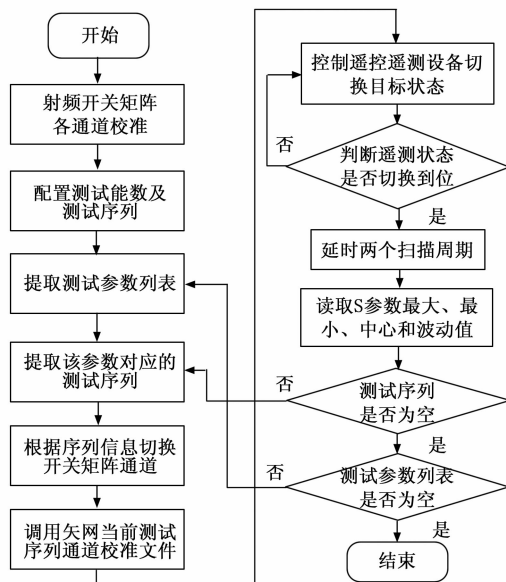


图 8 I 类参数测试流程

4.2 II类参数测试方案

II类参数包含开关切换时间、瞬态抑制、驱动电流、驱动电压和脉冲宽度。采用微波信号源、示波器、射频开关矩阵、遥控遥测设备实现 II类参数的测试，测试方案如图 9 所示。

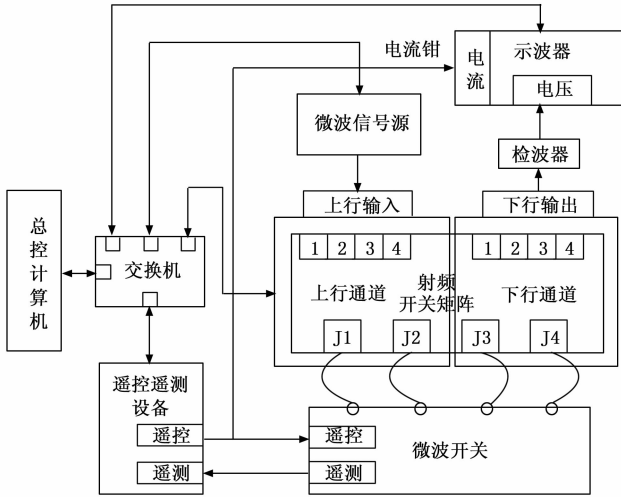


图 9 II类参数测试方案

II类参数主要关注微波开关的切换性能，以四驱开关为例，四驱开关共有四个工作状态，即状态 1、状态 2、状态 3 和状态 4，需完成 1->2、1->3、1->4、2-3、2->4、3->4、4->1、4->2、4->3、3->2、3->1、2->1 共 12 个状态的测试。开关切换时间其检测原理是记录切换指令启动时间 T_1 和射频端口导通时间 T_2 ，二者间的时间差为开关切换时间，由于要借助射频通道的信号，因此需要通过射频开关矩阵才能完成测试。瞬态抑制、驱动电压和驱动电流等参数可在开关切换时间测试过程通过中间数据测得，因此，II类参数测试流程可合并，测试效率得到大幅提升。II类参数测试流程如图 10 所示。

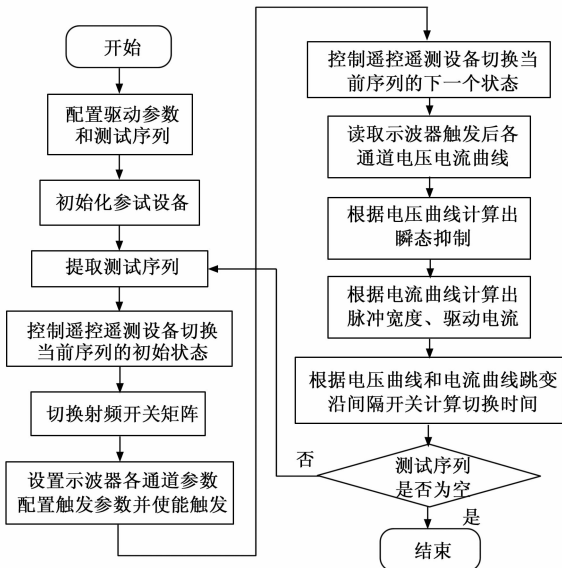


图 10 II类参数测试流程

4.3 III类参数测试方案

III类参数包含门限电压、干扰抑制、跑荷和遥测采集。采用遥控遥测设备和总控计算机实现 III类参数的测试，测试方案如图 11 所示。

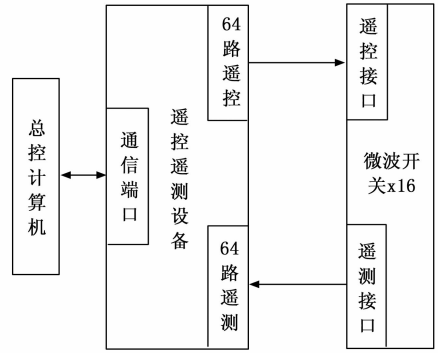


图 11 III类参数测试方案

III类参数关注微波开关的驱动性能、抗干扰性能及寿命情况，门限电压通过拉偏驱动电压，测得能够驱动微波开关的最小电压；干扰抑制则通过对其他状态的驱动管脚施加干扰信号，验证微波开关是否有误动作；跑荷试验则是通过大量的切换验证微波开关的切换寿命。III类测试流程如图 12 所示。

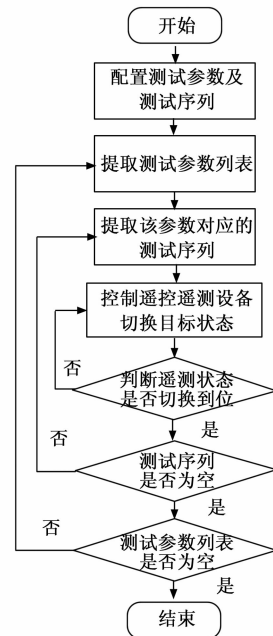


图 12 III类参数测试流程

4.4 IV类参数测试方案

IV类参数包含接触电阻、遥测电阻、绝缘电阻。采用总控计算机、数字万用表、遥控遥测设备及低频开关矩阵可实现 IV类参数测试，测试方案如图 13 所示。

IV类参数主要关注微波开关电阻特性，电阻特性主要通过数字万用表测得，与 I类参数端口组合类似，四个端口微波开关需要完成 6 种组合方式的电阻测试（J1-J2、J1-J3、J1-J4、J2-J3、J2-J4、J3-J4），因此采用低频开关

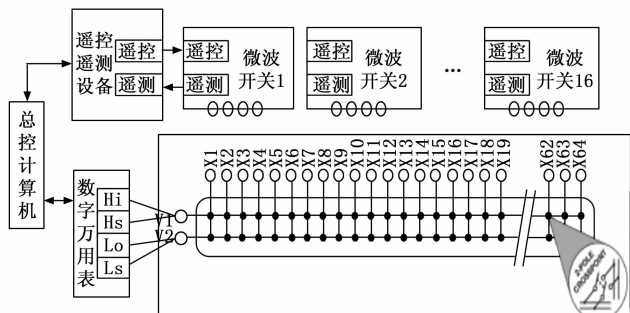


图 13 IV 类参数测试方案

矩阵来实现两两端口组合, 同时由于接触电阻阻值较小, 为了提高测量进度, 采用四线制测量方式, 在低频开关矩阵的选择上, 选用双极 2×64 矩阵开关, 数字万用表的四线连接在行线的四线上, 列线连接 16 个微波开关的测试端口。IV 类参数测试流程如图 14 所示。

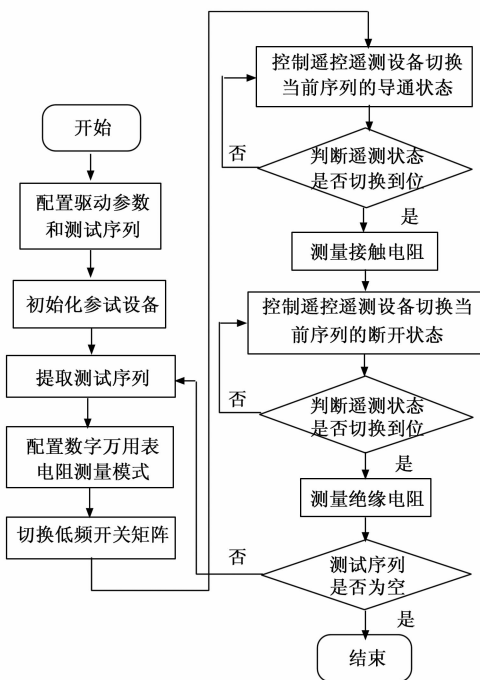


图 14 IV 类参数测试流程

5 实验结果与分析

5.1 系统硬件平台指标

微波开关性能参数自动测试系统完成系统搭建后, 达到的技术指标如表 2 所示。

5.2 基于典型微波开关的测试验证

选取典型四驱微波开关, 工作频率: DC~40 GHz, 电气指标为: 驱动电压 28 V, 驱动电流 300 mA, 切换时间 ≤ 1 s。根据前文介绍的测试方案开展指标测试验证, 测试连接图如图 15。

在测试软件中, 设置仪器地址、驱动类型、驱动电压、脉宽等信息后, 配置端口序列, 选择各个工作状态的导通与不导通关系, 配置结束后, 点击开始测试, 测试数据和

测试图表自动保存至本地数据库, 测试结束后, 可导出 Word 报表。参数测试结束后, 对比自动测试系统和人工测试所需的时长, 可以看出采用自动化的方式进行测试, 避免了人工测试中常见的重复、繁琐的拆装工作, 节省了大量时间。相比之下, 人工测试需要测试人员手动执行每一个测试步骤, 而且容易受到人为因素(如疲劳、经验不足等)的影响, 导致测试效率低下。

测试结果见表 3。

表 2 硬件平台技术指标

指标类别	指标项	技术指标
S 参数测量指标	工作频段	10 MHz~40 GHz
	测试端口	2 或 4
	输出功率	$\geq +10$ dBm
	输出功率稳定度	± 1.5 dB
射频开关矩阵指标	工作频段	DC~40 GHz
	通道数量	上、下行仪器端口 4 路, 被测对象端口 64 路
	驻波	≤ 2.0
电阻测量指标	插损	≤ 10 dB
	阻值测量范围	0~1 G Ω
	最小分辨率	1 $\mu\Omega$
低频开关矩阵	测量精度	100 $\mu\Omega$
	通道数量	2×64
波形采集指标	最大承受功率	15 W
	带宽	500 MHz
遥测遥控指标	采样率	≥ 2.5 GSa/s
	测量通道	≥ 4
	遥控通道	≥ 64
	驱动电压	0~35 V, 步进电压: 0.5 V, 精度: ± 0.1 V
	通道负载能力	≥ 650 mA
	脉冲宽度	1~999 ms, 分辨率 1 ms, 精度: ± 0.1 ms
	采集通道	≥ 64
遥测遥控指标	采集范围	0~5 V, 分辨率: 0.001 V, 精度: ± 0.01 V
	供电通道	≥ 16
	供电范围	0~5 V, 步进 0.1 V, 精度: ± 0.01 V

表 3 四驱波导开关指标测试结果

指标类别	测试说明	自动测试	人工测试
I 类参数	6 个测试参数, 12 组测试序列	30 分钟	1.5 小时
II 类参数	5 个测试参数, 12 组测试序列	20 分钟	1.8 小时
III 类参数	4 个测试参数, 十万次寿命切换	87 小时	—
IV 类参数	3 个测试参数, 12 组测试序列	15 分钟	1.5 小时

综上所述, 微波开关自动测试系统在参数测试中表现出更高的效率, 可以大幅缩短测试时间。

6 结束语

本文设计的微波开关性能参数的自动测试系统, 具有自

(下转第 45 页)