

基于 SCADA 的航空发动机 HMU 自动化 试验系统设计与应用

李军伟, 张海明, 张运山, 杜鑫, 武忠华

(中国航发北京航科发动机控制系统科技有限公司, 北京 102200)

摘要: 航空发动机 HMU 是发动机燃油控制系统中的一个关键单元, 主要作用是根据发动机电子控制器的输入要求对燃油增压、计量以及伺服作动, 为发动机提供燃油, 确保发动机发挥其最佳性能, 为保证其产品在生产过程中更高效、更高精度的试验及交付过程, 需要进行智能化试验系统交付平台的设计, 从而消除因人工主观因素对产品的影响, 针对整个系统进行网络部署和技术架构进行研究, 分别采用硬件和软件两方面进行升级配置, 基于 LabVIEW 软件进行算法程序编辑, 并创新性地将程序与 SCADA 系统进行通讯连接, 实现自动化试验的功能, 同时采用二分法自动找点的方式进行自动交付报告的生成, 经实际产品应用已验证其系统设计的科学可行性, 满足集中控制自动化试验及交付的目标, 具有非常重大的工程意义。

关键词: 航空发动机; HMU; SCADA 系统; 控制平台; 系统设计

Design and Application of Automated Testing System for Aircraft Engine HMU Based on SCADA

LI Junwei, ZHANG Haiming, ZHANG Yunshan, DU Xing, WU Zhonghua

(Beijing Hangke Engine Control System Science Technology Co., Ltd., AECC, Beijing 102200, China)

Abstract: The hydro mechanical unit (HMU) of aircraft engines are a key unit in engine fuel control systems. Its main functions are to pressurize, meter and servo operations, provide fuel to engines according to the input requirements of engine electronic controllers, and ensure the best performance of engines. In order to ensure the high efficiency, precision testing and delivery of products, it is necessary to design an intelligent test system delivery platform to eliminate the impacts of human subjective factors on products. Aimed at the network deployment and technical architecture of the entire system, it upgrades and configures from the aspects of hardware and software, edits the algorithm program based on LabVIEW software, and innovatively communicates with the supervisory control and data acquisition (SCADA) system to realize the automated testing function. At the same time, the automatic point-finding method of dichotomy is used to generate automatic delivery reports. It verifies the scientific feasibility of the design through the actual product applications, and meets the goals of the centralized control, automated testing and delivery, which has an important engineering significance.

Keywords: fuel regulator; HMU; SCADA system; control platform; system design

0 引言

随着全球各项制造技术与智能化不断结合发展, 越来越多的国家针对传统制造业进行了重大的调整。如今云计算、物联网、大数据等相关技术飞速发展, 多样化、个性化需求也极大提升。正是在此环境下, 智能制造之路正在悄然全面展开^[1]。2013年4月德国率先发布了《工业4.0战略计划实施》, 其主要内容可以总结为: “1个网络” “2重战略” “3大集成” 和 “8项举措”^[2], 描绘了人类在未来制造业高度自动化的美好愿景, 同时提出了第四次工业革

命的概念。2015年3月, 我国也发布了《中国制造2025》, 规划了未来10年里面制造业发展的指导方针及目标^[3], 提出了进一步实现智能化制造新标准, 大力推进智能制造业的新模式。

航空器作为人类重要的交通工具之一, 其性能、安全性、可靠性和经济性等各项因素不仅是一个国家的科研水平的体现, 更是一个国家综合国力的展示^[4]。发动机作为航空器的最关键部件之一, 负责提供航空器在飞行过程中的整个动力输出, 在整个航空发动机中有极其复杂的结构

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-01-11。

基金项目: 部委级基金项目中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2018-046)。

作者简介: 李军伟(1980-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 李军伟, 张海明, 张运山, 等. 基于 SCADA 的航空发动机 HMU 自动化试验系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 299-306.

以及组成部件^[5]，其中液压机械组件（HMU, hydromechanical unit）就是整个发动机核心部件之一，作为航空发动机控制系统中关键组成部分，其结合液压和机械系统，实现对发动机燃料流量、压力和供应的精确控制，从而保证发动机流畅性能及性能需求^[6]。具体主要功能包括：可实现燃料的供给控制；可完成对引擎工作保护；进一步实现节能环保功能，以及可以实现自动控制功能^[7]。

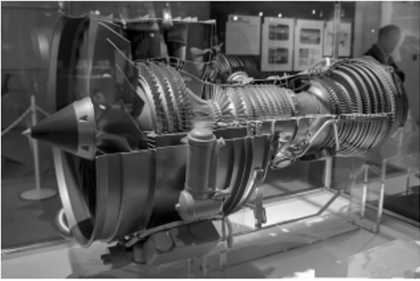


图 1 航空发动机模型图

综上所述，HMU 在航空发动机中的重要性不容忽视。它对于燃油供应的控制、燃油喷射的调节以及发动机性能的优化等等都起着至关重要的作用。然而在传统验收交付方面，试验数据完全通过操作人员手工记录，常常因习惯不同，导致产品质量一致性较差，导致效率低下，费时费力；在寿命试验方面，随着生产力的提高，产品种类增加以及试验需求提高，科研寿命试验小时数大幅度增加，操作人员工作强度急剧升高。种种因素直接影响到产品的交付质量和效果，因此实现试验台集中控制以及完成产品的自动化交付是一项具有较大意义的研究方向，本文针对传统交付方式的不足，制定了智能化自动交付系统设计方案并进行了实施验证。

在国内外，智能试验系统自动化交付已经是软件开发和部署领域的一个重要研究方向。国外方面，自动化交付系统主要研究方向集中在以下 3 个方面：DevOps、容器技术以及对于自动化交付的持续优化。DevOps 是一种高结合度的开发和运维方法，与自动化交付系统有着紧密的关系。Ankur 等人^[8]指出 DevOps 是一个相对较新的现象，不少软件组织正在向该方向发展，其具有高速度、高稳定性以及通信协作等优势，他们的研究提出了一个有效管理 DevOps 实践的框架，并进行验证最后还通过人工网络算法搭建了相关预测模型。Mudadi 等人^[9]认为目前针对 DevOps 对信息技术组织的影响方面研究较少，因此基于理论知识同时应用在一个大型公司的情况下，重建了 DevOps 框架，从而更好地理解 DevOps 的影响。

容器技术（如 Docker）的发展又为自动化交付方式提供了新的可能性。Sergeev 等人^[10]认为 Docker 技术虽然目前应用越来越广泛，但在出现资源不足时的情况没有足够的理论依据证明其工作状态，他们讨论了没有足够的处理器或 RAM 来服务所有正在运行的容器的情况，采用了应

力和体积试验来研究 Docker 容器的稳定性和可靠性，最终证明运行在 Windows 系统中的 Docker 容器已可以在极端负载条件下工作。Mahendra 等人^[11]认为虽然容器技术的虚拟化在云行业中应用越来越广泛，但如何实现高效率创建和部署容器仍然是一个较大的考验，他们通过数学方法及模型验算对 Docker 容器的创建和部署进行了相关验证。自动化交付系统的持续优化能力，目前也是国外研究非常关注的方向，国外学者根据在不同行业的实践研究进行不断对比最终实现自动化交付系统的持续优化功能。

国内方面，自动化交付系统虽然起步较晚但是目前也逐步得到重视。国内学者在自动化交付系统方面的研究主要集中在以下 3 个方面：自动化部署与测试、持续交付实践案例研究以及自动化交付工具研发。自动化部署与测试，研究者重点关注如何提高软件交付的效率和精度，通常会关系到自动化测试框架、持续集成等内容。北京邮电大学的张容齐^[12]分别从两个层面研究并提出了可结合云平台的服务自动化部署，并证明有良好的扩展性和容错性。哈尔滨工业大学张海瑞^[13]根据 PaaS 平台对自动化部署的需求，设计出了基于迭代部署的可随时增添功能的云平台自动化部署模块。关于持续交付实践案例的研究，也为自动化交付系统的优化提供了一些成功的案例供研究参考，这些案例通常涉及团队的组织架构、流程设计以及所采用的工具链等。最后是关于自动化交付工具研发，其目的是为了可以实现更好的自动化交付。王红蕾^[14]指出传统交付方式缺乏标准化，故提出一种基于 DevOps 轻量级的持续交付框架实现交付过程可视化，极大程度上提高了效率。孟庆峰和孟祥勇^[15]通过云技术结合软件开发，实现软件开发过程全过程的自动化、规范化管控。

智能试验系统自动化交付一直保持迅猛发展的趋势，其应用领域已经逐步从传统的航空航天行业向兵器、船舶、核电、汽车、新能源等各项行业展开，其业务范围也从简单的试验数据管理向全面的试验全过程管理进行扩展。针对智能试验自动化交付系统国内航空发动机行业内暂无其他单位实现了完善的自动化集控实验平台且实现自动化交付交检系统，属于行业内创新技术的一次突破，开展本课题项目具有较高的工程实践意义。

1 系统结构及原理

1.1 网络及部署架构

智能试验系统运行在安全可控的局域网内如图 2 所示。智能试验系统涉及 3 台服务器，分别是应用服务器（部署系统服务和采集服务）、数据库服务器和数据库备份服务器，且都部署在工控网内，未来和办公网的数据通信交互可以增加单向导入设备来实现。智能试验系统通过集中控制室实现试验设备之间的远程控制与自动化交检功能，并通过设置 TDM 客户端实现数据、经验信息的录入和试验数据的管理与应用。

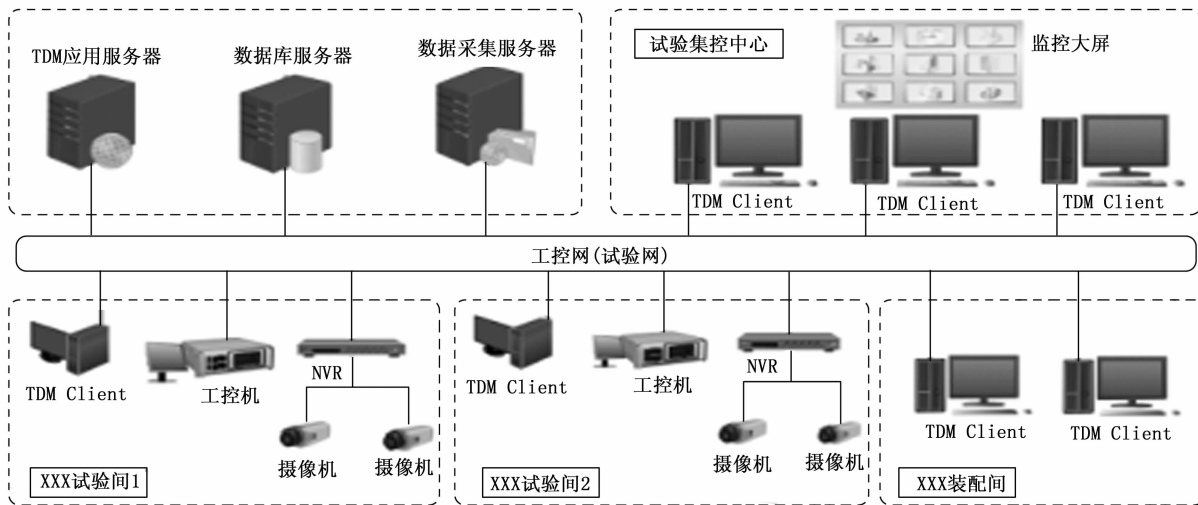


图 2 智能试验架构系统硬件

1.2 技术架构

自动化验收交付试验智能运行系统主要由两大部分组成, 如图 3 所示: 自动化序列(程序)的编辑和自动化序列的执行。不管是自动化序列的编辑还是执行都是很复杂的一个过程, 考虑到软件的应用性、安全性和运行性能,

验收交付试验智能运行系统软件整体是一个 BS+CS 的混合架构, 系统管理平台是采用 Java EE 企业级开发规范开发的 WEB 应用, 是典型的、主流的企业级平台软件; CS 端采用 C 开发语言来开发, 编辑和运行都是桌面 winForm 程序。

1.3 SCADA 系统和 OPC 协议

监控与数据采集系统(SCADA, supervisory control and data acquisition)是一种常用于结合监视、控制和采集数据的系统, 应用广泛。该系统往往结合软、硬件, 实现监控、数据记录、报警管理和远程控制等功能^[16]。

SCADA 系统的核心组成部分包括以下几个方面: 1) 监视与控制, 该系统能够监视和控制远程的设备。并通过传感器采集数据将所需信号传输到中控设备中; 2) 数据采集与存储, 该系统可以采集大量实时数据, 同时可存储这些数据, 为后续进行进一步数据挖掘工作做准备; 3) 远程通信, 该系统通常涉及远程通信设备, 通过不同的通信协议(例如 Modbus、OPC 等)实现与中央计算机或控制中心进行通信; 4) 报警与通知, 该系统能够监测设备实时状态, 并在检测到异常状态时及时发出警报通知相关人员; 5) 人机界面(HMI), 该系统具有友好的人机界面, 方便试验操作员通过图形化界面随时进行必要的分析^[17]。

连接各试验设备与智能试验系统是实现设备集中控制的基础条件, 工控机与远程控制计算机采用 OPC 协议进行数据及控制信号的传输。工控机、TDM 服务器、存储服务器以及远程控制电脑都会通过网络交换机进行连接, 最终实现远程控制电脑对所有试验台的控制, 从而达到远程集控的功能。

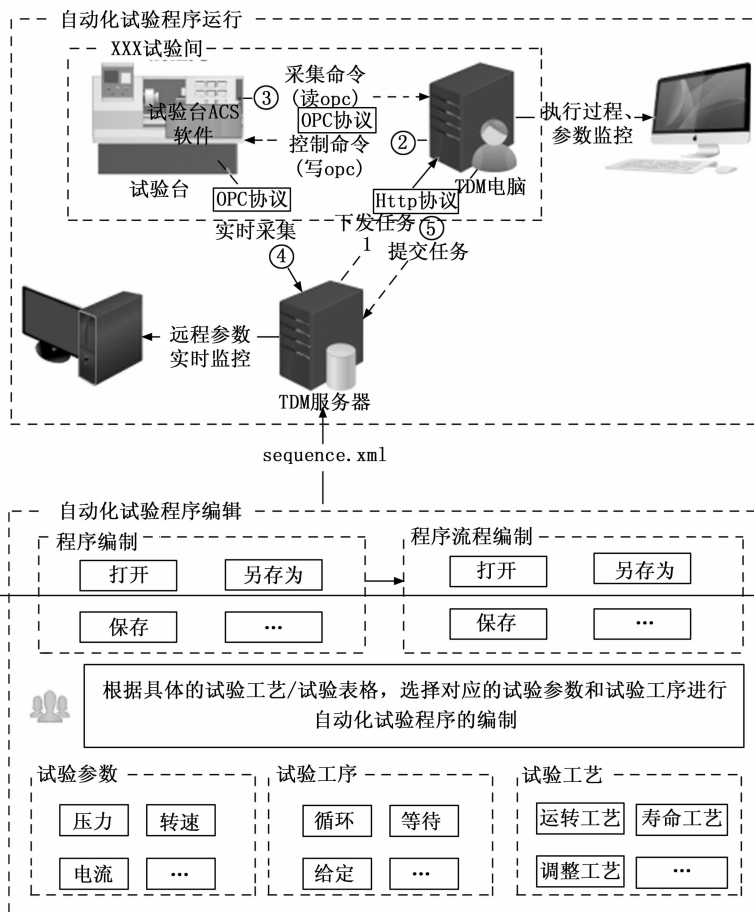


图 3 自动化验收系统组成

其中 OPC 协议是关键通讯协议技术, OPC 协议是一种用于工业自动化系统的开放性标准,其目的是提高不同批次、不同厂家的自动化设备、控制系统和软件之间的通信和关联性。该协议是基于微软的 Component Object Model 组件对象模型技术^[18]。正是 OPC 协议的自身特点从而广泛应用于工业自动化和监控数采等领域,其作为工业自动化方向的关键技术之一,不仅为实现设备之间联通做出贡献,同时也为后续更高的安全性和多平台通讯打下一定的基础^[19]。

2 系统硬件设计

为实现试验台全自动试验功能,首先需采用硬件设计,硬件设计包含执行系统设计、自动化控制系统设计、配置数据管理系统以及安全系统设计^[20]。

2.1 执行系统与自动化控制系统设计

在传统试验台系统中执行元件多采用手动阀门,控制元件也多旋钮开关、按钮开关、电位器等手动控制元件,数字采集元件多使用数字表,为满足智能试验系统自动化交付功能需将此类元件全部升级为电控执行或电气控制执行元件。

自动化控制系统设计其上位机通过 OPC 协议实现控制信号的下发,可实现对伺服阀的精确闭环控制、电磁阀控制以及自动标定等其他功能。同时每台工控机均采用专用板卡进行数据采集,实现专卡专用,提升数采速度,可实现采集信号与上位机直接连接上传,同时对执行元件进行必要的开闭环控制,此外通过变频器也可以完成电机转速及转向的控制,极大程度完成各项所需数据的数字化控制,配合后续 Labview 软件实现自动化试验系统的搭建。

2.2 配置数据管理系统

为满足上述需求,实现数据传输、处理等功能,需进行服务器配置,满足其所有试验设备的数据处理需求。具体配置为:1) 运算处理能力,工控机 CPU 主要用于指令的执行和数据的处理功能,因此它的性能将会直接与数据处理速度相关联;一级缓存主要是为 CPU 直接提供数据和指令;二级缓存主要用于数据的存储和缓存检索功能;后端总线是用来实现对于 CPU 与二级缓存相连接的功能,前端总线用于互连 CPU 与主机芯片组的总线;2) 磁盘存储能力,磁盘存储能力往往体现在磁盘存储容量与 I/O 服务速度上,而针对磁盘存储容量和 I/O 服务速度的影响因素又体现在磁盘总线与硬盘两个方面;3) 系统高可用性,在进行配置选择时需充分考虑平均无故障时间/(平均无故障时间+平均修复时间),服务器一旦出现故障,其造成的经济损失非常大;4) 网络配置,每台试验台需配置最少 4 个网络接口,且可分配独立的网路地址,分别用于试验台通讯、数据管理系统通讯、摄像头通讯和急停系统通讯。

2.3 安全系统设计

任何系统其安全性都具有举足轻重的地位,在智能试

验自动化交付系统中也配备了完善的安全系统,既可保证整个自动交检过程中的安全,也可以防止在试验过程中被试产品出现损坏,对整个试验过程进行保障。试验台一般配备 4 台摄像头,分别实现对被试验的产品、试验台传动区、试验液压区以及试验台动力间进行全天实时状态监控。通过 TCP/IP 协议可以将摄像头监控画面以及试验台本地控制器界面进行传输,实现中控室的统一控制。

此外所有安全系统均设计配备各种指标安全范围安全逻辑,在试验过程中出现任何意外状况第一时间进行报警提醒,同时中控室和本地均配备紧急停车按钮处理各项意外或极端情况下,做到任何时刻均可停止试验最大限度保障人员与试验设备的安全。

3 系统软件设计

软件设计需满足对实时监控和测试、大规模数据的采集及处理以及可完成对远程设备的管理和控制,故考虑基于 SCADA 系统进行设计。

3.1 试验台测控系统编程

试验台测控系统选择 LabVIEW 进行编程, LabVIEW 是一种基于图形化编程的软件平台,由 National Instruments 公司开发,主要用于测试、测量和控制系统的的设计、模拟和实施。其核心概念基于数据流编程模型,允许用户以可视化的方式构建程序。这种编程环境由 Virtual Instruments (VI) 组成,这些 VI 代表模块化的功能单元,类似于传统编程语言中的函数或子程序。用户可通过连接 VI 之间的数据连接线来传递数据,使得程序结构和数据流动变得直观且易于理解^[21]。

为满足试验台的自动化试验,通过 LabVIEW 软件编程实现设备的底层算法设计。图 4 为基于 SCADA 系统研发试验设备的试验界面,其核心参数主要分为采集类、报警类、控制类以及控制反馈类,通过系统与试验台的数据交互,实现程序对试验台试验的控制。

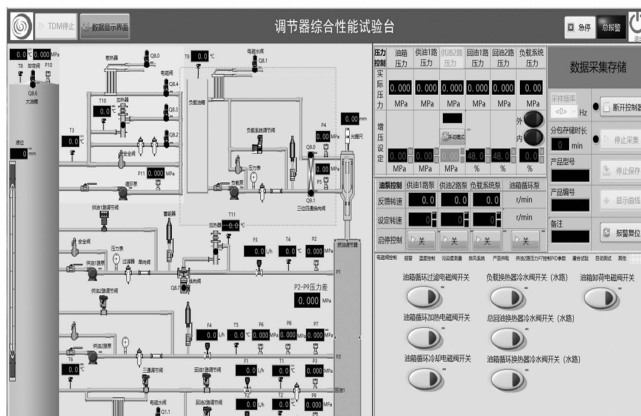


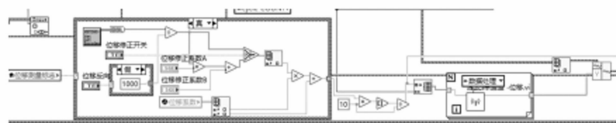
图 4 LabView 编程实现界面

针对采集类参数控制,试验台将设备运行的相关物理量通过选配的采集卡的物理通道接口、配套的驱动模块子

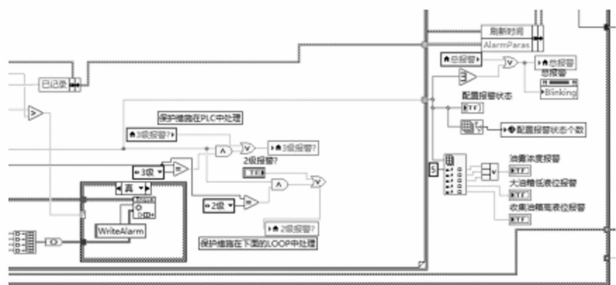
VI 以及数据转换子 VI 等算法模块处理后的数据组成数组反馈给 SCADA 系统, 方便其对设备运行状态进行读取、监控。参数类型主要包括流量、温度、压力、位移等物理量, 其中位移的实时采集主要通过图 5 (a) 中展现的编程思路进行实现。

报警类参数主要由试验设备底层 LabVIEW 程序的判断逻辑组成的数组, 可以分为设备安全逻辑、操作逻辑以及故障报警等。在本次编程中, 设置有油雾浓度报警、油箱低液位报警以及高液位报警等等, 其中编程逻辑如图 5 (b) 中展现。

控制类参数在试验台 LabVIEW 程序前面板中主要是用来指代可以实现特定功能的虚拟控件, 其主要通过底层程序中编写的设备通讯接口子 VI、模拟/数字量板卡驱动子 VI 以及虚拟控件共享变量的数据绑定的变量组成指令集数组, 通过 SCADA 系统的指令集输出实现试验设备元件的远程控制。图中 5 (c) 油箱循环过滤电磁阀开关的控制就是通过共享变量的数据绑定实现的控制功能。控制反馈类实为控制类参数的使能信号, SCADA 系统会实时读取控制指令的使能信号, 并及时反馈试验台当前所处工作状态。



(a) 采集类编程实现



(b) 报警类编程实现



(c) 控制类编程实现

图 5 LabVIEW 编程图

3.2 测控系统与 SCADA 平台接口设计

验收交付试验智能运行系统在系统运行时需要和试验台 ACS 测控软件通信, 双方通信的基础是 OPC 协议, OPC 有单独的 OPC Server 服务器, 验收交付试验智能运行系统

和 ACS 两者均作为客户端来使用; 验收交付试验智能运行系统与试验台 ACS 测控软件通讯协议如图 6 所示。在该系统中采用 LabView 编程软件实现智能试验自动化交付, 同时遵循 OPC 协议。

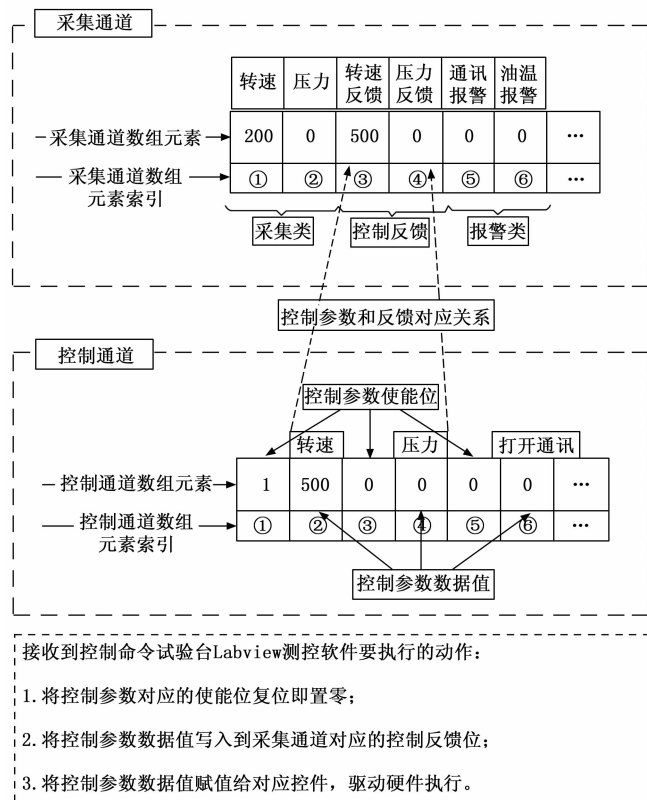


图 6 试验台通讯协议

对于采用 LabView 开发的试验台软件, 通过网络共享变量图 7 (a) 来实现 OPC Server 功能, 在试验台软件中创建共享变量库图 7 (b), 然后在库中创建以下两个网络共享变量, 即建立了 OPC 采集通道和控制通道。



(a) 网络共享变量图

(b) 共享变量库图

图 7 网络贡献变量图

试验台软件创建 Signal Value 网络共享变量用于将 DMS-TDM 需要采集的数据发布至网络中, 以方便 DMS-TDM 实时读取试验台数据; 创建 Ctrl Cmd 网络共享变量并发布到网络中, 用于存储 DMS-TDM 试验台与 DMS-TDM 需要控制试验台的指令或数据。其中试验台测试设备需要以 Excel 文件的形式提供一个试验台测控参数和控制通道参数的对照表, 以方便 DMS-TDM 进行数据解析, 试验台采

集通道参数对照表举例如图 8 (a) 所示, 控制通道参数对照表举例如图 8 (b) 所示。

名称	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1路供油泵转速设定反馈		1470	0		0 r/min		feedback		0	
2路供油泵转速设定反馈		1430	0		0 r/min		feedback		1	
负载泵转速设定反馈		1455	0		0 r/min		feedback		2	
油箱增压反馈		0.5	0		2 MPa		feedback		3	
供油1路增压反馈		9	0		2 MPa		feedback		4	
回油1路增压反馈		97	0		1%		feedback		5	数越大压力越高
供油2路增压反馈		96	0		1%		feedback		6	数越大压力越高
回油2路增压反馈		97	0		1%		feedback		7	数越大压力越高
回油冷却反馈		100	0		1%		feedback		8	数越大压力越高
1. 负载系统增压反馈		50	0		1%		feedback		9	数越大压力越高
2. 油箱加热器出口设定温度反馈		200	0		1℃		feedback		10	
3. 管道加热器出口设定温度反馈		200	0		1℃		feedback		11	
4. 总回油温度反馈		200	0		1℃		feedback		12	
5. 产品电压1设定反馈		35	0		1V		feedback		13	
6. 产品电压2设定反馈		35	0		1V		feedback		14	
7. 供油2路压力P7设定反馈		2.5	0		2 MPa		feedback		15	
8. 数据保存时长反馈		200	0		0 min		feedback		16	

(a) 采集通道参数图

名称	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1路供油泵		1470	0		0 r/min		control		1	
2路供油泵		1430	0		0 r/min		control		3	
负载泵转速		1455	0		0 r/min		control		5	2
油箱增压		0.5	0		2 MPa		control		7	3
供油1路增压		9	0		2 MPa		control		9	4
回油1路增压		97	0		1%		control		11	5
供油2路增压		96	0		1%		control		13	6
回油2路增压		97	0		1%		control		15	7
回油冷却		100	0		1%		control		17	8
负载系统增压		50	0		1%		control		19	9
油箱加热器		200	0		1℃		control		21	10
管道加热器		200	0		1℃		control		23	11

(b) 控制通道参数图

图 8 参数对照表

采集参数数组中的数据按照使用方式分为 3 大类即采集、报警和控制反馈。在控制参数数组中, 数据的使用方式只有“控制”一种。且对于控制指令来说, 其使能信号, DMS-TDM 设置该值为 1, 则试验台软件读取到有效 1 时, 更新对应的控制指令值, 然后将该使能信号设置为 0, 防止再次误执行控制命令。DMS-TDM 会实时读取使能信号和控制值, 及时反馈试验台当前所处工作状态。其具体编程实现方式如图 9 所示。

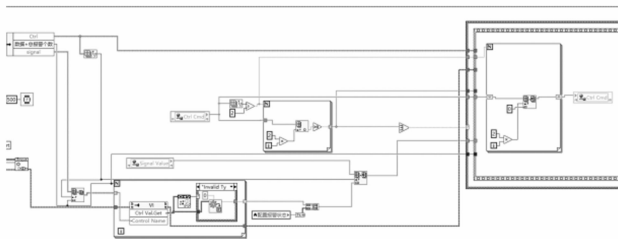


图 9 通讯接口设计编程图

3.3 控制终端设计

控制终端建立在 SCADA 平台上, 该平台功能包括自动试验程序编辑、开始自动试验、试验报告模板编辑、数据采集模板编辑等其他模块, 如图 10 所示。

3.3.1 自动化试验程序编辑

在自动化试验编程部分主要包括参数设置、结果判定、延时环节、多条件控制、循环环节等等, 在编程设置的同时加入各种参数判断确保试验过程出现误差时及时报警提醒, 如图 11 所示。



图 10 SCADA 系统功能模块



图 11 程序编程界面

3.3.2 自动化试验

完成自动化试验编程之后首先需先进行发布激活操作, 然后实验操作员收到任务后登录自己的内部账号后可进行具体试验内容, 其自动化试验界面如图 12 所示。

名称	描述	执行结果
试验准备工序		
参数设置	[控制条件] 开始123=开始	成功
延时等待	[延时等待] 1.2秒	6秒
结果判定	[稳定条件] 采集参数3=67, 超时=30秒, 数据标记=ewoi, 采样数=...	
手动录入		
结果判定	[稳定条件] 采集参数2=22, 超时=30秒, 数据标记=数据标记2:	
参数设置	[控制条件] 控制参数2=3	
结果判定	[稳定条件] 采集参数2=3, 超时=30秒, 数据标记=...\\... , 采样数=...	
试验执行工序		
结果判定	[稳定条件] 采集参数1=1, 超时=30秒, 数据标记=1111:	
结果判定	[稳定条件] 采集参数2=3, 超时=30秒, 数据标记=@@@:	
结果判定	[稳定条件] 采集参数5=33, 超时=30秒, 数据标记=555:	
结果判定	[稳定条件] 采集参数7=4, 超时=30秒, 数据标记=%^&*0=-_+:	
试验就位工序		
参数设置	[控制条件] 退出=退出	

图 12 自动化试验界面

3.3.3 数据采集及报告生成

验收交付试验过程中, 试验数据采集和储存依赖于 DMS-TDM 系统的采集模块实现。试验报表自动生成功能根据产品交付试验表格要求, 建立实时试验数据和交付表格中对应内容的联系, 在产品运行至交付试验状态时, 对试验设备数据进行采集, 并自动实现试验数据填充。

数据采集完成后, 利用报告模板的功能, 配置模板, 自动生成报告, 如图 13 所示。

表 1 部分试验结果展示

序号	检验项目	要求	实测值	结果	备注		
1	滞环性能检验 (30%状态)	流量滞环最大差值 $\Delta Q < 3 \text{ L/h}$	1.09	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	原始数据 详见图		
2	电液伺服阀零偏特性检验	等效控制器 A 通道控制	计量电液伺服阀 I: 通电, 计量活门应至最大止动位置, 此时 $V_A > V_B$; 断电, 计量活门应至最小止动位置。	至最大位置是	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	原始数据 详见图	
			$V_A > V_B$	至最小位置是			
			计量电液伺服阀 II: 通电, 计量活门应至最大止动位置; 断电, 计量活门应至最小止动位置。	至最大位置是			
			至最小位置是				
			导叶电液伺服阀 I: 通电, 导叶作动前应缩入至最小止动位置; 断电, 导叶作动筒应伸出至最大止动位置。此时 $V_A > V_B$ 。	至最小位置是			
			$V_A < V_B$	至最大位置是			
3	停车性能检验	漏油量: $Q_L \leq 1 \text{ 滴/min}$	0	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	原始数据 详见图		
			停车时, 泵调节器出口压力应下降为不超过泵调节器进口燃油压力 0.1 MPa; 恢复后, 泵调出口流量与停车前出口流量之差 $ \Delta Q \leq 2 \text{ L/h}$ 。			$P_{2A} - P_{1A} \leq 0.1 \text{ MPa}$	0.01
			$ \Delta Q_A $			0.33	
			$P_{2B} - P_{1B} \leq 0.1 \text{ MPa}$			0.01	
		$ \Delta Q_B $	0.34				
		高温停车性能, 出口流量应为 0, 每 20 台抽 1 台检验。 <input type="checkbox"/> 检验 <input type="checkbox"/> 不检验	A 通道			是	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
B 通道	是	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格					
4	导叶作动筒 LVDT 安装位置检验	$\Delta V f_2 \leq 0.002$	0	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	原始数据 详见图		
		两通道控制位置差异 $ \Delta L \leq 0.25 \text{ mm}$	0				

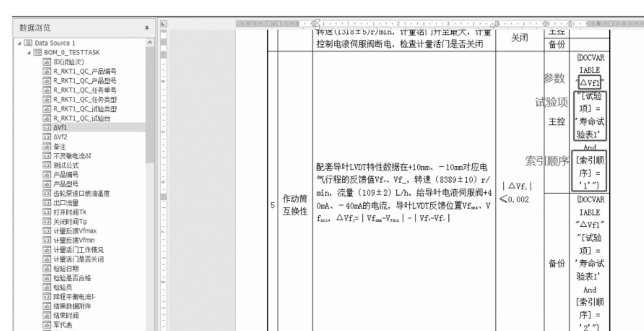


图 13 自动生成报告模板

4 试验结果与分析

4.1 自动化试验步骤

其试验结果部分展示如表 1 所示。

通过实际验证, 我单位已有多台试验台已经具备自动化试验功能, 其中多台试验台已完成自动化交付工作, 实现了自动化试验的自动运转、自动考核以及自动交付的过程。

参考已交付的某型燃油调节器, 其试验过程需重点关注项目包括流量检测、压力检测、时间响应检测、LVDT 位置检测这 4 种类型。在自动化试验过程中, 结果准确性也是一项关键信息, 实时进行试验结果正确与否的判断, 可及时反映出产品某项性能是否合格, 在自动化试验程序中编程设置可允许的公差值, 试验过程中当采集结果出现

不在公差条件范围内时, 自动化试验编程设置报警程序, 出现报警提示之后试验工可及时终止试验并分析进行必要的程序调整。

整个过程可大致分成 4 部分, 分别为自动程序编辑、采集模板配置、报告模板配置和自动程序执行。在自动程序编辑中, 通过过滤条件确定唯一数据; 再计算出均值。在采集模板配置部分预先根据业务需求设计好模板, 主要为自动计算参数, 在采集模板配置时选择公式计算。报告模板配置将需要动态插入数据的部分绑定到对应数据源上, 添加参数和过滤条件标签, 当使用模板时就会自动从系统中调用数据加载到模板中, 实现报告的自动生成功能。经过上述流程, 将数据库中的数据自动填入报告中, 实现试验报表的自动生成, 其流程如图 14 所示。

4.2 试验数据结果

针对某型燃油调节器其试验过程重点关注指标流量、压力、时间响应、LVDT 位置数据。

由结果所示该智能试验自动化交付系统完全科学可行, 验证其具有很高的实际工程价值, 实现了试验参数高精度自动化控制、试验台网络化控制和数据采集以及中央集中控制。在实际工程应用中, 中央集中控制实现了由单人单机操作到单人多机操作, 同时在交付过程中由检验员现场单机监控变成可远程实现多机监控, 交付时间由原来的 4 h 降低到 2.5 h, 未来实现无检验员监控目标, 极大程度排除了由人工主观因素导致的产品差异化使得产品质量一致性进一步提高, 同时该智能试验自动交付系统可以实现大量

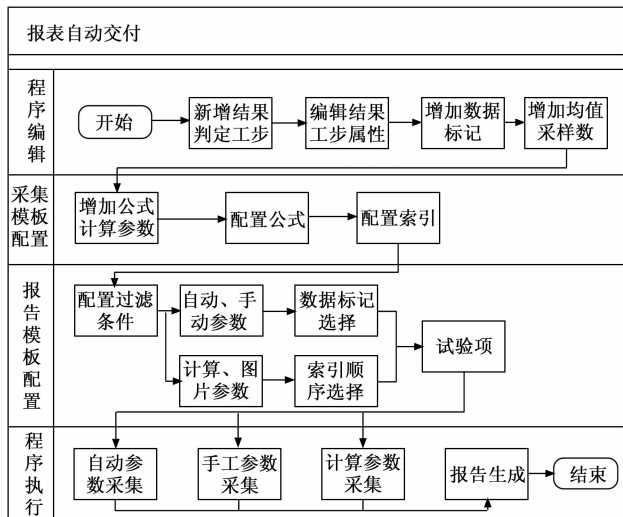


图 14 自动生成流程图

数据处理和储存功能，大量试验数据为后续寿命预测和人工智能相结合打下有力的基础。

总而言之，智能化试验自动交付系统其具备 3 大功能，不仅仅完成了试验台群控，同时实现了产品试验自动化以及后续进行的产品调试、排故的智能决策，极大程度提升了试验精度以及试验台控制精度，完成高精度的自动化控制，在整个工程应用中具有极高的应用价值和研究意义。

5 结束语

本文详细介绍了在“工业 4.0”和“中国制造 2025”背景下进一步实现智能化制造新标准，实现更程度的自动化和智能化。在 SCADA 系统搭建完成航空发动机 HMU 的智能试验自动化交付系统，本文首先从总体框架入手进行网络架构和部署，再通过硬件和软件两方面去设计实现其具体功能，其中在软件部分重点介绍了 LabVIEW 编程实现对试验台的需求控制、程序与 SCADA 接口设计的介绍以及 SCADA 系统的介绍，最终完成在中控室对多台试验设备的集中控制，完成全自动化试验的目标，同时自动生产报告，实现自动化交付过程。极大程度解决了传统试验及交付过程中的效率低下、误差较大以及耗时严重等诸多问题，同时在我单位的成功应用更是为后续其他产品以及行业内发展打下了坚实的基础，为未来进一步实现现代化生产的目标迈出重要的一步。

同时未来将考虑到进一步提高深度学习与生产的结合，将试验数据与人工智能结合起来，将实验过程中出现参数不合格或异常情况时实验数据进行算法结合，完成寿命预测及智能决策，可实现在产品安装、调试、自动化交付和排故提供智能决策支持，为后续试验一体化奠定基础。

参考文献:

[1] 陈明, 梁乃明. 智能制造之路数字化工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[2] 丁纯, 李君扬. 德国“工业 4.0”: 内容、动因与前景及其启示 [J]. 德国研究, 2014, 29 (4): 49-66.

[3] 李金华. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示 [J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2015, 15 (5): 71-79.

[4] 黄维, 黄春峰, 王永明, 等. 先进航空发动机关键制造技术研究 [J]. 国防制造技术, 2009 (3): 42-48.

[5] 陈光. 航空发动机发展综述 [J]. 航空制造技术, 2000 (6): 24-27.

[6] 司国雷, 陆亮, 陈君辉, 等. 航空发动机燃油调节器技术发展综述 [J]. 液压与气动, 2022, 46 (5): 167-174.

[7] 王珂. 航空发动机燃油调节器建模与故障诊断 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 10-25.

[8] ANKUR K, MOHAMMAD N, MOHAMMAD S. Machine learning based predictive modeling to effectively implement DevOps practices in software organizations [J]. Automated Software Engineering, 2023, 30 (2): 21.

[9] MUDADI A, LOTRIET H. An analysis of DEVOPS' impact on information technology organisations: a case study [J]. South African Journal of Industrial Engineering, 2023, 34 (1): 155-167.

[10] SERGEEV A, REZEDINOVA E, KHAKHINA A. Stress testing of Docker containers running on a Windows operating system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022 (1): 012010.

[11] MAHENDRA P, NISHA P, DHARMENDRA K. A formal approach for Docker container deployment [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, 33 (20): 6364.

[12] 张容齐. 基于云计算平台的服务自动化部署机制研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

[13] 张海瑞. 云平台自动化部署模块的设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[14] 王红蕾. 基于 DevOps 的轻量级持续交付方案 [J]. 计算机系统应用, 2020, 29 (9): 87-94.

[15] 孟庆峰, 孟祥勇. 某大型国有企业持续交付平台设计与应用 [J]. 石化技术, 2019, 26 (6): 75-77.

[16] 余勇, 林为民. 工业控制 SCADA 系统的信息安全防护体系研究 [J]. 信息安全, 2012 (5): 74-77.

[17] 马国华. 监控组态软件的相关技术发展趋势 [J]. 自动化博览, 2009, 26 (2): 16-19.

[18] 王韬, 石昊东, 季春梅. 基于 OPC 协议的集中自动化控制系统 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45 (1): 212-214.

[19] 马庄宇. 工业控制系统 OPC UA 协议的安全评估研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.

[20] 付一鹏, 雷勇, 唐敏. 燃油调节器防喘装置试验台测控系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (12): 1825-1827.

[21] 杨忠仁, 饶程, 邹建, 等. 基于 LabVIEW 数据采集系统 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2004 (2): 32-35.