Development of General Test System for Multiple Servomechanisms Based on CRIO

WEI Qingyan[1*], REN Yanping[2], ZHANG Tianhong[1], LI Jiaao[3], XU Aimin[1], FANG Jun[1]
(1.College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;
2.Nanjing Chenguang Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210006, China; 3.College of Aeronautical Engineering,
Jilin University of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China)

Abstract: To test resistances and those parameters such as real-time state, speed, frequency, location of multiple servomechanisms, a general test system is developed based on modularization and NI CRIO hardware platform. The system includes hardware units such as acquisition and control, amplifier, signal conditioning, resistance test, relay switching and aviation interface. In view of upper-computer software independence, hardware sharing and lower-computer software sharing, a software is designed based on CRIO three-tier architecture. The software modules such as upper-computer, real-time and FPGA are developed on LabVIEW platform, which can be applied to test multiple parameters automatically and continuously for multiple servo-mechanisms. The experiment results show that it is configurable, versatile and efficient for multiple servomechanisms testing. Due to high acquisition precision and accurate, reliable, repeatable testing, the system has been successfully applied in the mass production of servo-mechanisms.

Key words: CRIO; LabVIEW; data acquisition; modular design; servomechanism
EEACC: 7210A **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.10.002

基于 CRIO 的多种伺服机构通用测试系统研制

韦青燕[1*], 任艳萍[2], 张天宏[1], 李佳翱[3], 徐爱民[1], 方 鋆[1]
(1.南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2.南京晨光集团有限责任公司, 江苏 南京 210006;
3.吉林化工大学航空工程学院, 吉林 吉林 132022)

摘 要: 面向多种伺服机构的实时状态参数、速度特性、频率特性和位置特性等多性能测试和电阻测试, 基于模块化思想和 NI CRIO 硬件平台研发了伺服机构通用测试系统。该系统包括采集控制、伺服放大、信号调理、电阻测试、继电器切换和航空接口等硬件单元; 同时基于上位机软件独立、硬件和下位机软件共享的原则, 采用 CRIO 三层体系结构设计了通用测试软件, 基于 LabVIEW 平台开发了上位机、Real-Time 和 FPGA 软件模块, 实现了多种伺服机构通用的多种特性、全自动连续测试。试验结果表明: 基于 CRIO 的伺服机构通用测试系统硬件配置便捷, 通用性好, 能提高现场测试效率; 采集精度高, 测试结果准确、可靠、重复性好, 已在多种伺服机构批量生产中得到成功应用。

关键词: CRIO; LabVIEW; 数据采集; 模块化设计; 伺服机构
中图分类号: TP273.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)10-1734-07

NI CRIO 提供了一个开放的嵌入式架构, 包括内置的嵌入式 RT 控制器、实时操作系统、可编程 FPGA 以及小型、坚固且可热插拔的工业 I/O 模块。既具备了计算机的功能, 又可完成对测试系统的管理。可以快速实现测量与控制系统的自定义设计、原型及产品开发。因此在很多领域都得到了应用。核工业西南物理研究院的任磊磊等[1]基于 CRIO 设计了稳定可靠、抗干扰性能强的中性束高压平台电源数据采集系统; 李玲等[2]研制的基于 CRIO 架构的便携式卫星脱插监测设备, 解决了信号测量效率低下问题, 其通用性和扩展性强; Hao 等[3]基于 NI-CRIO 设计了水下多通道声纳数据采集系统, 并实现了大量原始数据存储功能; Himanshu Tyagi 等[4]基于 CRIO 设计和开发了 60 kV 的高压套管实验数据采集与控制系统。

针对多种伺服机构空载性能测试、负载性能测试、批次例行试验性能测试以及多通道电阻测试要求, 本文基于 NI-CRIO-9053 控制器同时配置 NI-

收稿日期: 2023-08-28 **修改日期**: 2023-12-20

9205、NI-9263 和 NI-9477 I/O 模块,设计和研制了伺服机构测试系统的采集控制、信号调理、伺服放大器、继电器切换和电阻测试等硬件模块,采用三层体系结构开发了 2 套独立的上位机软件,实现了硬件和下位机软件共享;空载和负载台架试验表明,该伺服机构测试系统在测试精度和稳定性上能同时满足 2 种伺服机构在不同工况下的多状态参数监控、速度/频率/位置特性等多种性能测试和电阻测试需求。

1　伺服机构测试需求及性能特性计算判别原理

1.1　伺服机构测试系统功能测试需求

①发控不同信号类型的电压指令,并具有伺服放大器功能;②实现阀电流、阀入口压力、油泵压力、电机电流/电压、反馈以及供电电压等多状态参数实时监控;③实现极性检查、速度特性、频率特性、位置特性和电机毛刺电压等[5-7]多种性能测试以及组合测试;④实现直流 & 绝缘电阻测试;⑤对测试数据进行分析计算和判别,形成报表输出打印;⑥能同时实现 2 种伺服机构①~⑤的所有测试功能。

1.2　性能测试指令设置及其参数计算判别原理[5-7]

①指令信号种类:包括任意初始相位和 0~150 Hz 频率正弦波、方波、方波叠加正弦波、低频正弦波叠加高频正弦波等波形及其组合,指令信号以段信号形式呈现。

②速度特性参数计算判别:对伺服机构提供控制电流,采用一元线性回归算法计算反馈信号 δ_t 在 ±10°之间的速率 a,如图 1 所示。

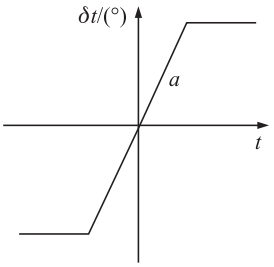


图 1　速度特性分析示意图

计算过程如下:

$$\begin{cases}\bar{\delta}_t=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=0}^{n-1}\delta_{ti},\bar{t}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=0}^{n-1}t_i\\ a=\dfrac{\sum\limits_{i=0}^{n-1}(t_i-\bar{t})(\delta_{ti}-\bar{\delta}_t)}{\sum\limits_{i=0}^{n-1}(t_i-\bar{t})^2}\end{cases}\tag{1}$$

③频率特性参数计算判别:采用 FFT 方法对指令信号 δ_c 与反馈信号 δ_t 进行频率特性分析,每个频率点进行测试和数据处理的周期个数可以选择,如图 2 所示。指令信号记为 $\delta_c(t)=A\sin(\omega t)$,反馈信号记为 $\delta_t(t)=B\sin(\omega t+\theta)$,$n$ 为每周期的采集点数,k 为所选择的周期数,总计算点数 $N=kn$,则幅值比 F 和相位差 θ(rad)的计算过程为:

$$\begin{cases}a=\dfrac{2}{N}\sum\limits_{i=0}^{N-1}\delta_{ti}\cos\left(2\pi\dfrac{i}{N}\right)\\ b=\dfrac{2}{N}\sum\limits_{i=0}^{N-1}\delta_{ti}\sin\left(2\pi\dfrac{i}{N}\right),B=\sqrt{a^2+b^2}\\ F=20\log\left(\dfrac{B}{A}\right),\theta=\arctan\left(\dfrac{b}{a}\right)\end{cases}\tag{2}$$

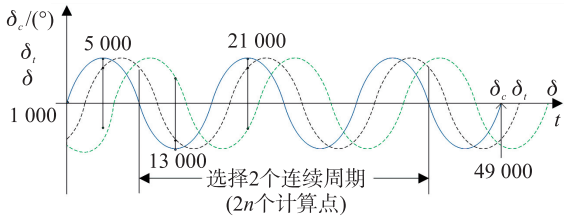


图 2　频率特性和位置特性采样示意图

④位置特性参数计算判别:通过对指令信号 δ_c 与反馈信号 δ_t、指令信号 δ_c 与摆角信号 δ 数据的统计分析,计算伺服机构的位置特性名义位置曲线、零位、最大回环、静态增益的偏差、线性度和不对称度。指令信号表达式为:

$$\delta_c=A\sin(\omega(t-1))\quad 1\leqslant t\leqslant 49\tag{3}$$

记录周期内采集 49 000 个数据,如图 2 所示。

①名义位置曲线的算法及定义:

$$\begin{cases}x_1(1:8\ 001)=\delta_c(5\ 000:13\ 000)\\ x_2(1:8\ 001)=\delta_t(5\ 000:13\ 000)\\ x_3(1:8\ 001)=\delta(5\ 000:13\ 000)\\ x_4(1:8\ 001)=\delta_c(21\ 000:13\ 000)\\ x_5(1:8\ 001)=\delta_t(21\ 000:13\ 000)\\ x_6(1:8\ 001)=\delta(21\ 000:13\ 000)\end{cases}\tag{4}$$

则 δ_t 和 δ 的名义位置曲线为:

$$\begin{cases}\tilde{\delta}_t=\dfrac{x_2+x_5}{2}\\ \tilde{\delta}=\dfrac{x_3+x_6}{2}\end{cases}\tag{5}$$

以 x_1 为横坐标,$\tilde{\delta}_t$ 和 $\tilde{\delta}$ 分别为纵坐标,做出 δ_t 和 δ 的名义位置曲线如图 3 所示。

②名义位置曲线基准线的算法

从名义位置曲线的零点出发作一条与其相差最小的直线,称为名义位置曲线基准线,该基准线的斜率为名义位置增益。

记$|\tilde{\delta}_t|$和$|\tilde{\delta}|$最小值对应的行数分别为 $n_{t\min}$ 和

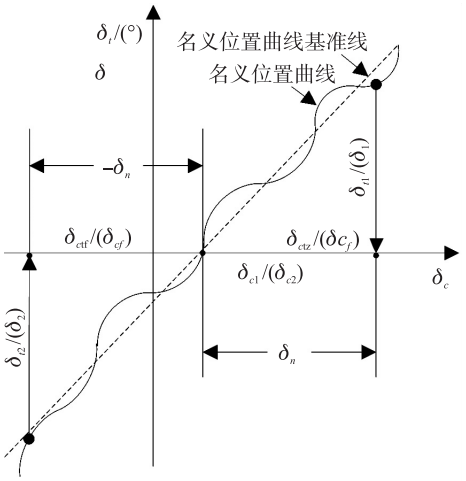


图 3 位置特性分析示意图

$n_{\min}$，则其对应的零点为：

$$\begin{cases}\delta_{c1}=x_1(n_{t\min})\\ \delta_{c2}=x_1(n_{\min})\end{cases} \tag{6}$$

分别以 $x_1-\delta_{c1}$ 和 $x_1-\delta_{c2}$ 为自变量，$\tilde{\delta}_t$ 和 $\tilde{\delta}$ 为变量，利用多项式拟合工具进行一阶多项式逼近，求取基准线的斜率 k_1 和 k_2。则 $\tilde{\delta}_t$ 和 $\tilde{\delta}$ 的基准线表达式为：

$$\begin{cases}\hat{\tilde{\delta}}_t=k_1(x_1-\delta_{c1})\\ \hat{\tilde{\delta}}=k_2(x_1-\delta_{c2})\end{cases} \tag{7}$$

③回环的算法：

δ_t 和 δ 的回环为：

$$\begin{cases}|\Delta\delta_t|=|x_2-x_5|_{\max}\\ |\Delta\delta|=|x_3-x_6|_{\max}\end{cases} \tag{8}$$

④偏差的算法

偏差定义为静态增益减 1 的绝对值乘百分比，则 δ_t 和 δ 的偏差为：

$$\begin{cases}\Delta(\delta_t)=|k_1-1|\times100\%\\ \Delta(\delta)=|k_2-1|\times100\%\end{cases} \tag{9}$$

⑤线性度的算法

线性度定义为名义位置曲线基准线的最大偏差与额定角度 δ_n 幅值之比的百分比，则 δ_t 和 δ 的线性度算法为：

$$\begin{cases}L(\delta_t)=\dfrac{|\tilde{\delta}_t-\hat{\tilde{\delta}}_t|_{\max}}{\delta_n}\\ L(\delta)=\dfrac{|\tilde{\delta}-\hat{\tilde{\delta}}|_{\max}}{\delta_n}\end{cases} \tag{10}$$

⑥不对称度的算法

对伺服机构输入正负额定角度幅值，不对称度定义为所对应名义位置曲线的正负输出角度幅值之差与其中较大者的百分比。

定义 $\delta_{ctz}=\delta_n+\delta_{c1}$，$\delta_{ctf}=-\delta_n+\delta_{c1}$；$\delta_{cz}=\delta_n+\delta_{c2}$，$\delta_{cf}=-\delta_n+\delta_{c2}$，则有：

$$\begin{cases}\delta_{t1}=|\tilde{\delta}_t(\delta_{ctz})|,\delta_{t2}=|\tilde{\delta}_t(\delta_{ctf})|\\ \delta_1=|\tilde{\delta}_t(\delta_{cz})|,\delta_2=|\tilde{\delta}_t(\delta_{cz})|\end{cases} \tag{11}$$

则 δ_t 和 δ 的不对称度为：

$$\begin{cases}\chi(\delta_t)=\dfrac{\delta_{t1}-\delta_{t2}}{\max(\delta_{t1}-\delta_{t2})}\\ \chi(\delta)=\dfrac{\delta_1-\delta_2}{\max(\delta_1-\delta_2)}\end{cases} \tag{12}$$

2 测试框架模块化总体设计

伺服机构测试系统总体框架如图 4 所示，主要由测试计算机、CRIO 采集控制单元、伺服放大器 *V/I* 模块、信号调理模块、电阻测试模块、信号切换模块、继电器切换模块和航空接口模块等组成，其中测试计算机与 CRIO 采集控制单元通过 TCP/IP 进行通信。将各模块置于 5 层机柜中，布局紧凑，机柜底座配备滑轮以便移动于不同测试场所，提高了现场测试和管理效率。

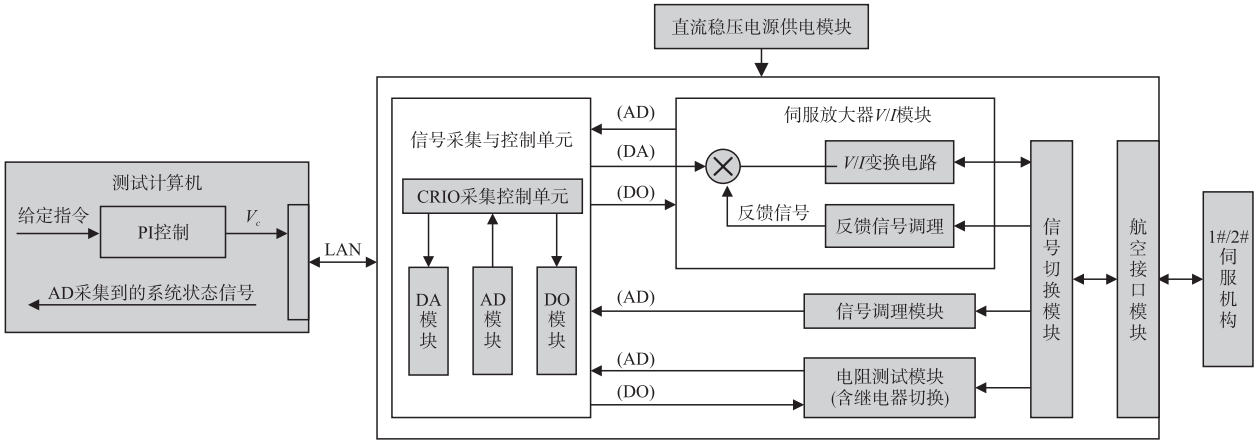


图 4 伺服机构测试系统总体框图

3　核心硬件模块设计

3.1　CRIO 采集控制单元[8-9]

选用 NI CRIO-9053 嵌入式采集控制单元作为测控平台,4 个模块插槽均支持 LabVIEW FPGA 编程模式;同时配置 4 通道 NI-9263 1 块、32 通道 NI-9205 1 块以及 32 通道 NI-9477 2 块,这一组合配置在通道数、采集精度和采样率上能满足本测试系统 3 通道指令信号发控、31 路综合采集和 59 路 DO 开关控制要求。

3.2　伺服放大器 V/I 模块

设计了图 5 所示的 3 个伺服放大器 *V/I* 模块,给定指令经过 PI 数字控制器后得到控制量 V_c,通过 CRIO 采集控制单元 DA 端口输出到 *V/I* 变换电路输入端;*V/I* 变换电路实现电压控制转化为电流输出到伺服机构进行控制。同时 CRIO 采集控制单元 AD 模块采集电流、反馈等各种状态参数,通过加法器形成闭环控制,使被测伺服机构按指令信号工作,从而达到伺服控制目的。

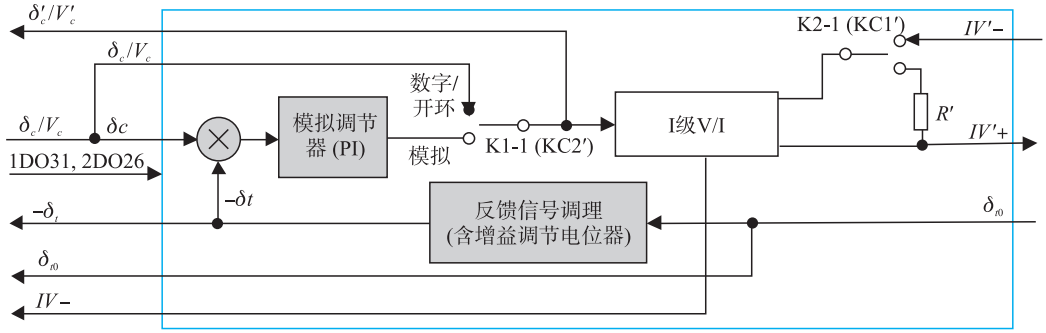


图 5　伺服放大器 *V/I* 模块

3.3　继电器切换模块

继电器切换模块如图 6 所示,选用双刀双掷继电器,主要用于信号通道切换。其中图 5 所示的 3 个伺服放大器 VI 模块配置 6 个继电器、信号调理模块配置 2 个继电器、电阻测试模块配置 64 个继电器、信号切换模块配置 40 个继电器。其中电阻测试模块基于硬件共享原则,采用被测电阻节点复用设计,通过图 6 所示继电器矩阵切换不同被测电阻节点,实现了 1#伺服机构 46 路和 2#伺服机构 68 路直流 & 绝缘电阻测试。

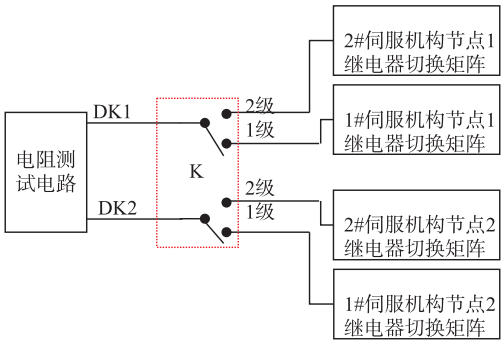


图 6　电阻测试继电器矩阵切换示意图

3.4　信号切换模块

信号切换模块通过电路模块机箱前面板手动开关 K 控制 40 个继电器,进行 1#/2#伺服机构 79 路信号的切换,实现性能测试和电阻测试。当进行伺服机构性能测试时,信号切换模块接通伺服 *V/I* 电路模块和信号调理模块中 41 个信号通道,参与电源供电、指令控制和状态参数采集;当进行电阻测试时,则接通电阻测试电路模块中 65 个信号通道,参与电源供电、DO 开关控制和电阻节点电压采集。这种设计方案使性能测试和电阻测试通道互不干扰,同时避免了测试过程中频繁插拔连接电缆,提高了工作效率,延长了航插的使用寿命。

3.5　航空接口模块设计

基于航空插座端口复用要求,在测试系统端 1#/2#伺服机构共用一个 120 芯航空插座,并与其连接;设计 2 套电缆如图 7 所示,在产品端分别分成 3 个航空接口和 5 个航空接口与 1#/2#伺服机构连接。

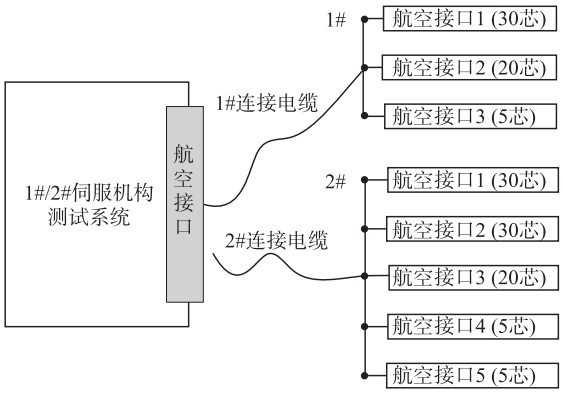


图 7　航空接口示意图

4　软件模块设计

本伺服机构测试系统采用 Laview 和 NI CRIO 三层架构进行软件开发,其软件体系结构如图 8

所示。

包括上位机 LabVIEW、下位机机箱 RT 实时控制器 LabVIEW Real-Time 和机箱背板 FPGA 的 LabVIEW FPGA[10-11]。

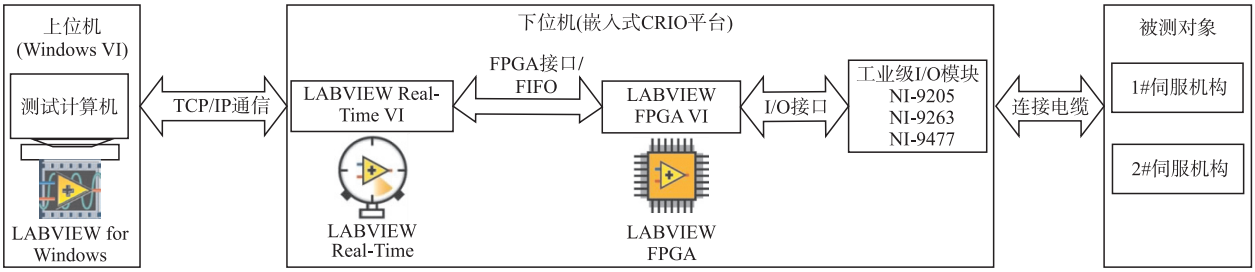


图 8 伺服机构测试系统软件体系结构

4.1 软件功能模块

本文基于模块化思想,设计了 1#/2#伺服机构测试系统软件功能模块,主要包括系统维护、性能测试、电阻测试、测试结果和报表输出模块,其中系统维护包括系统自检、指令信号配置、伺服控制器配置和系统校准-鉴定模块。

4.2 基于 CRIO 的三层软件架构实现

基于硬件和下位机共享原则,设计了图 9 所示的通用总指令结构和图 10 所示的基于 LabVIEW 的 CRIO 三层软件架构[12],1#/2#伺服机构测试系统上位机程序 LabVIEW.vi 独立,而同时共享下位机程序 RT. vi 和 FPGA. vi。两个独立的上位机程序 LabVIEW.vi 采用图 9 所示的通用总指令与 RT.vi 建立正常的 TCP/IP 通信,RT.vi 根据“伺服机构标志位”来确定对 1#或 2#伺服机构的控制。

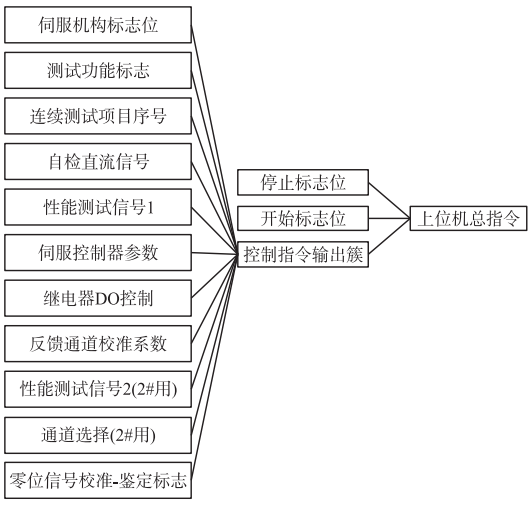


图 9 上位机总指令构成

4.3 基于 FIFO 的数据传输[13]

伺服机构测试项目要求数据采样率为 1 kHz 或 3 kHz,数据采集量大。为防止数据传送速率下降、数据异常、数据丢失或延迟,在 FPGA. vi 中利用图 10所示 5 个 FIFO 实现 FPGA 和 RT 之间的高速数据传输。

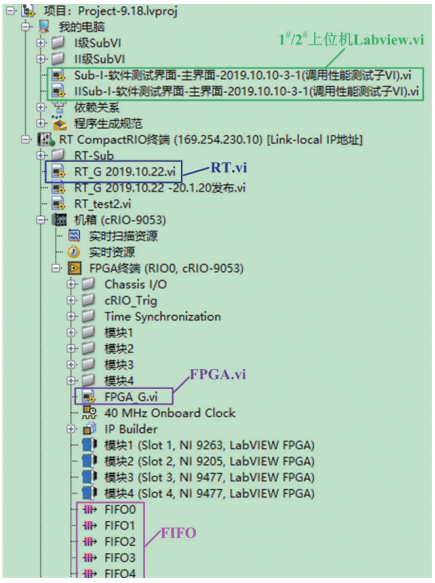


图 10 基于 CRIO 的三层软件架构

5 试验测试

利用本测试系统对 1#和 2#伺服机构进行性能测试和电阻测试,并对测试结果进行保存、回放和分析,最后生成报表打印输出。

5.1 指令信号配置

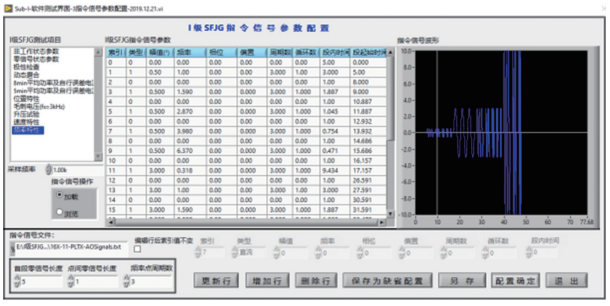
指令信号配置界面如图 11 所示,能直接加载默认的指令信号.txt 文件,同时能对段信号的类型、幅值、频率、相位等参数进行编辑以生成不同参数的指令信号,满足不同测试项目的指令信号要求。

5.2 性能测试

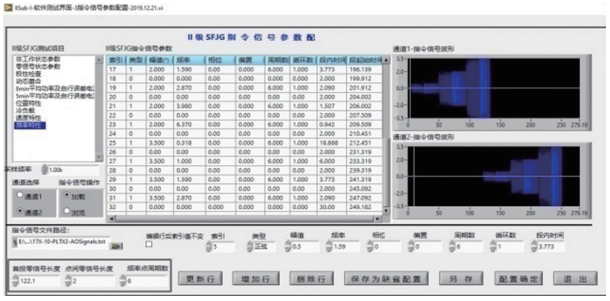
性能测试界面如图 12 所示,可以选择多个测试项目进行连续测试,同时可以选择多个状态参数进行分屏显示和监测;当项目测试结束后,可以对测试数据按默认路径或任意路径进行保存。

5.3 电阻测试

电阻测试界面如图 13 所示,可以选择不同插座上的节点电阻进行逐个测试,并实时判定被测节点电阻是否合格,不合格者标红显示。



(a) 1#伺服机构指令配置



(b) 2#伺服机构指令配置

图 11　指令信号配置界面

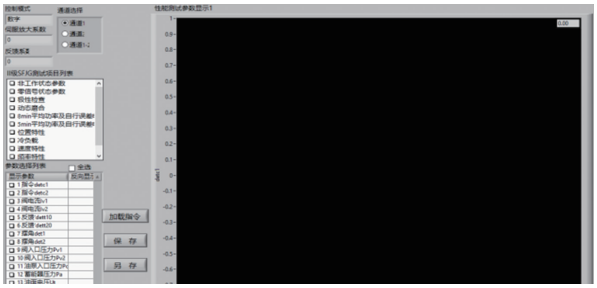


图 12　2#伺服机构性能测试界面

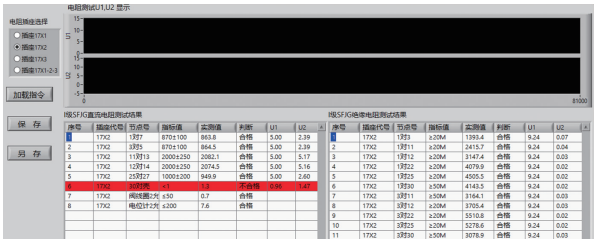


图 13　2#伺服机构电阻测试界面

图 14　测试结果回放和分析界面

5.4　测试结果

测试结果回放和分析界面如图 14 所示,可以查看伺服机构产品已完成测试项目的测试数据,多个状态参数均能同时以曲线形式显示,并设置了光标用于数据测量。此外,对测试数据进行计算分析和判别,不合格者进行标红显示。

5.5　报表输出

报表输出界面如图 15 所示,可以将某一伺服机构产品号已完成测试项目的所有测试数据生成报表打印,“单个报表”表示所选项目测试数据分别生成在单独报表模板中,“3 个报表”表示将所选位置特性、速度特性和频率特性 3 个项目测试数据部分或全部生成在 3 个报表模板中,“全部报表”将所选项目测试数据均生成在全部报表模板中。

图 15　报表输出界面

6　结束语

一系列空载和负载台架试验表明,基于 LaVIEW 和 NI CRIO 三层架构研发的伺服机构测试系统兼顾了硬件和下位机软件共享、上位机软件独立原则,能同时满足 2 种伺服机构在不同工况下多种功能项目测试精度要求:1#和 2#伺服机构的伺服放大系数精度分别为 1% 和 2%,各类性能测试参数精度优于 1%;能对多个性能项目、46 路或 68 路直流 & 绝缘电阻进行连续测试,有效提高了现场测试效率,测试稳定性和重复性好;基于模块化设计和一体化布局,体积小,维护方便。

目前该伺服机构测试系统已应用于 2 种伺服机构批产中,使批产测试及数据分析能高效完成。

参考文献:

[1]　任磊磊,余佩炫,罗萃文,等. 基于 CompactRIO 的中性束高压平台电源数据采集系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制,2019,27(1):181-184.

[2]　李玲,刘思言,邢思瑞,等. 一种基于 CRIO 架构的便携式卫星脱插监测设备[J]. 测试技术学报,2021,35(1):17-23.

[3]　Hao Y B,Kang Z W,Zhao H L. Design of Small Platform Sonar Data Acquisition and Storage System Based on NI-

CRIO90[J]. Journal of Physics:Conference Series,2022,2290:012107.
[4] Tyagi H,Shah S,Yadav R,et al. Design and Development of CRIO based Data Acquisition and Control System for High Voltage Bushing Experiment [J]. Journal of Physics:Conference Series,2017,823:012047.
[5] 黄玉龙,杨广志. 基于伺服机构的动态测试系统[J]. 计算机测量与控制,2005,13(9):892-893.
[6] 谢伟,王静,胡涟. 伺服机构测试软件系统的发展及新技术的应用[J]. 流体传动与控制,2008(5):61-65.
[7] 卢礼兵,任杰,唐海洋. 基于 LabVIEW_RT 技术的伺服机构测试仪远程监控系统设计[J]. 仪器仪表与检测技术,2018(11):45-47.
[8] 沈意平,陈齐林,王送来,等. 基于 CRIO 和无线传输的结构损伤主动监测系统设计[J]. 测控技术,2020,39(6):100-103.
[9] 姜金辉,叶可. 一种基于 CompactRIO 的实时主动减振系统及减振方法:CN112415899A[P]. 2021-02-26.
[10] 刘忠华,王术青,陈祖荣,等. 基于 CRIO 的 TPS 短舱模拟试验测量及报警系统设计[J]. 测控技术,2017,36(3):146-150.
[11] 杨键刚,吴运新,龚海,等. 基于 LabVIEW 的电磁超声热态金属在线缺陷检测系统[J]. 传感技术学报,2018,31(5):809-814.
[12] 吴智哲,闫希,徐涛,等. 基于 CompactRIO 的便携式航空发动机频率测试系统[J]. 测控技术,2016,35(12):106-109.
[13] 王树东,何明,王焕宇. 基于 LabVIEW 双 FIFO 高速采集方法的研究[J]. 计算机技术及其应用,2015,37(1):42-43.

韦青燕(1978—),女,南京航空航天大学讲师,主要研究方向为计算机测控技术,wqy_nuaa@126.com;

任艳萍(1977—),南京晨光集团有限责任公司高级工程师,主要从事伺服装配测试方面技术工作,43153729@qq.com;

张天宏(1968—),男,南京航空航天大学教授、博士生导师,主要研究方向为航空发动机控制、试验、测试及计算机测控,thz@nuaa.edu.cn;

李佳翱(1995—),男,吉林化工学院助教,主要研究方向为航空发动机试验和测试,lja@jlict.edu.cn;

徐爱民(1967—),男,南京航空航大学讲师,主要从事航空发动机控制相关课程实验教学,xuaimin@nuaa.edu.cn;

方　鋆(1997—),男,南京航空航天大学博士研究生,主要研究方向为多电航空发动机建模与控制,fangjun@nuaa.edu.cn。