

一种便携式导弹电液伺服机构动态测试系统设计

王学进¹, 董海迪², 王浙娜¹

(1. 中国人民解放军 92578 部队, 北京 100161; 2. 海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430030)

摘要: 针对现有导弹测试设备存在的装备体积大、结构复杂、维修困难、测试时间长等突出问题, 提出一种基于 PCI 总线和虚拟仪器技术的便携式测试系统设计方案; 在分析电液伺服机构工作原理基础上, 推导建立其数学模型; 根据伺服机构动态测试需求, 完成测试系统硬件设计和选型, 按照“模块化、标准化、小型化”的原则, 采用工控机控制 PCI-1742U 多功能数据采集卡实现测试过程中的信号激励和采集; 基于 Visual Studio 软件开发平台, 编制动态测试软件, 实现测试过程中激励信号参数设置、数据采集、信号处理以及数据管理等功能; 最后通过基于正弦相关分析法和基于 chirp 信号的测试方法的仿真测试实验分析了采样频率对测试结果的影响。

关键词: 伺服机构; 相关分析; 动态测试

Design of Dynamic Test System for Portable Missile Electro-hydraulic Servo Mechanism

WANG Xuejin¹, DONG Haidi², WANG Xina¹

(1. Unit 92578, Beijing 100161, China;

2. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China)

Abstract: Aimed at the problems of existing missile test equipment such as large size, complex structure, difficult maintenance and long test time, a portable test system based on PCI bus and virtual instrument technology was proposed. On the basis of analyzing the working principle of electro-hydraulic servomechanism, its mathematical model was deduced and established. The hardware design and selection of the test system were completed through the dynamic testing requirements of the servo mechanism. According to the principle of “modularization, standardization and miniaturization”, the industrial computer was used to control the PCI-1742U multi-function data acquisition card, and realize the signal excitation and acquisition during the test process. Based on the Visual Studio software development platform, the dynamic test software was written to achieve the functions of excitation signal parameter setting, data acquisition, signal processing and data management in the testing process. Finally, the influence of sampling frequency on the test results was analyzed through simulation test experiments based on the sine correlation analysis and chirp signal test method.

Keywords: servo mechanism; correlation analysis; dynamic test

0 引言

伺服机构作为导弹控制系统的重要执行部件, 其功能是在飞控计算机的控制作用下, 调节固体火箭发动机喷管的偏转角度, 从而改变燃气喷射的方向, 利用燃气喷射的反作用力调整导弹的飞行姿态。导弹的飞行姿态直接影响到飞行稳定性和射击精度^[1-2], 因此导弹发射前必须对包括伺服机构在内的姿态控制系统进行测试^[3]。伺服机构动态测试作为导弹姿态控制系统测试的重要科目, 方法原理为对伺服机构施加激励信号, 同步采集激励和响应输出, 经过相关分析处理, 确定伺服机构的动态特性, 具体表现为时间阶跃特性和频率特性两种。

某型导弹原有动态测试采用相关分析法, 测试设备存在装备体积大、结构复杂、维修困难、测试时间长和随着服役年限的增加设备老化等突出问题, 严重影响导弹动态

测试结果^[4-5]。为此, 研究新型动态测试设备具有迫切需要。课题组采用调频脉冲扫描法, 结合 PCI 总线技术和虚拟仪器技术, 保证测试精度, 缩短测试时间, 研制了基于 chirp 信号某型导弹电液伺服机构测试系统。

1 总体设计方案

导弹电液伺服机构动态测试系统设计应按照测试系统功能要求完成系统方案设计。在各种总线的测试系统中, 基于 PCI 总线的测试系统能够充分利用计算机的软件、总线、机箱和电源等资源^[6], 是性价比较高的形式, 课题组采用基于 PCI 总线的测试系统设计。

动态测试系统应具有如下功能模块: 激励信号模块、信号调理电路、信号采集模块、打印机、显示器和鼠标、键盘等, 其测试系统结构如图 1 所示。

动态测试系统的主要功能是完成导弹伺服机构动态测

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-06-28。

基金项目: 国家自然科学基金(62101579)。

作者简介: 王学进(1973-), 男, 高级工程师。

通讯作者: 董海迪(1988-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 王学进, 董海迪, 王浙娜. 一种便携式导弹电液伺服机构动态测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 172-177, 185.

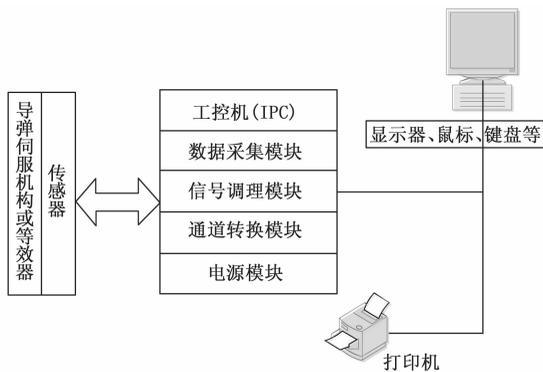


图 1 伺服机构动态测试系统结构图

试信号产生、数据采集、信号变换等, 单台导弹电液伺服机构动态测试系统组成如图 2 所示。

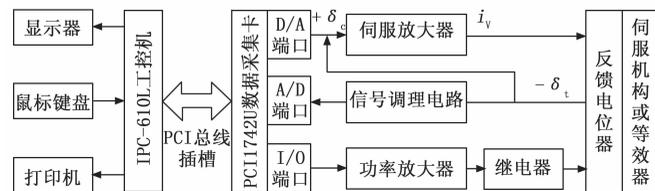


图 2 伺服机构测试系统原理图

2 伺服机构数学模型建立

由于伺服机构油液特性随温度变化、运动过程中存在非线性摩擦、作动筒活塞杆与喷管铰连接处的非线性间隙、电液伺服阀中的磁滞现象等原因, 使得电液伺服机构是典型的非线性系统^[7]。但是, 伺服机构实际工作过程中伺服机构表现出了较好的近似线性系统特性^[8-9]。因此, 测试过程中常对伺服机构模型进行简化。伺服机构测试过程中, 根据测试要求, 可将伺服机构非线性模型线性化, 简化至一阶系统、二阶系统或者高阶系统。

2.1 系统组成部分特性

1) 伺服放大器:

伺服放大器是指驱动伺服阀的信号功率放大器件, 前置级和后置级分别完成电压和电流信号的放大。电液伺服机构是一个负反馈系统, 伺服放大器的输入端对激励信号与反馈信号进行综合。伺服放大器的输入信号为控制电压信号 δ_c 与反馈电压信号 δ_f 综合后的信号, $\Delta u = \delta_c - \delta_f$, 输出信号为电流信号 i_v 。伺服放大器为一个比例环节。 I_v 为阀控电流 i_v 的拉氏变换, ΔU 为输入电压 Δu 的拉氏变换。

$$I_v = K_u \Delta U \quad (1)$$

2) 电液伺服阀:

电液伺服阀能够完成从电信号到液压能的转换, 是伺服机构的关键部件之一。电液伺服阀由于其本身的结构特性是典型的非线性系统。但是, 实际应用过程中常用一阶惯性环节来简化, 电液伺服阀模型即:

$$Q_v = \frac{K_Q}{T_v s + 1} I_v \quad (2)$$

式中, Q_v 为电液伺服阀输出流量; K_Q 为电液伺服阀流量增

益; T_v 为电液伺服阀的时间系数。

3) 作动筒:

作动筒是伺服机构的执行元件, 将液压能转换为推动负载的机械能。课题研究导弹电液伺服机构选用等截面双作用作动筒。作动筒工作过程中, 它将伺服阀输出流量变成推动作动筒活塞杆按照一定速度运动的位移输出, 活塞杆推动发动机喷管, 实现推力矢量控制。作动筒通过改变作动筒油液端口的油液进出方向, 活塞杆实现双向的往复运动。双作用作动筒原理如图 3 所示。

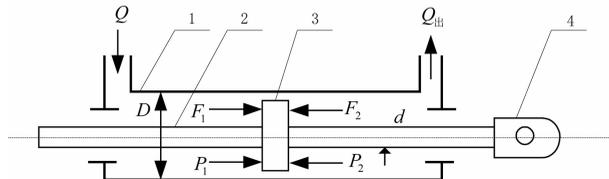


图 3 双作用作动筒原理示意图

作动筒工作原理: 筒体固定, 当左腔流入的工作液的液压足以克服外部的负载时, 活塞杆从左向右运动, 若工作液供给连续不断, 活塞杆便能够以一定速度运动, 一直到输入工作液流量为零, 活塞杆停止运动。同理, 当工作液从右腔输入, 活塞杆从右向左运动。

活塞杆力平衡式:

$$F = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (3)$$

式中, P_1 、 P_2 表示作动筒左、右腔对应的压力, A_1 、 A_2 表示对应压力作用的有效面积。

双作用(等截面)活塞杆对应有效面积:

$$A = A_1 = A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (4)$$

则输出速度:

$$v = \frac{Q_v}{A} \eta_v \quad (5)$$

式中, $\eta_v = \frac{Q_v - Q_L}{Q_v}$ 表示泄露影响系数, Q_L 表示作动筒泄露流量。

作动筒输出位移:

$$y = \frac{\eta_v}{A} \int Q_v dt \quad (6)$$

作动筒的输入、输出功率:

$$W_\lambda = P_1 Q \quad (7)$$

$$W_\text{出} = F v \quad (8)$$

作动筒效率为:

$$\eta = \frac{F v}{P_1 Q} \quad (9)$$

4) 反馈电位器:

绝大多数导弹伺服机构都是闭环控制系统, 一般为负反馈系统, 反馈电位器为伺服机构中的反馈元件。课题研究伺服机构采用位移电位器作为反馈元件。位移电位器的作用是将作动筒活塞杆位移线性地转换为直流电压, 并将电压信号反馈到伺服放大器的反馈信号输入端上。伺服机构的控制精度在取决于位移电位器的精度, 电位器的精度

是系统的控制精度上限。

当忽略负载影响时，电位计的位移与输出电压之间的关系为：

$$U = K_F E \quad (10)$$

式中， $K_F = E/L$ 为电位计增益。

此外，除了上述主要构件外，伺服机构中还有电机、油泵、蓄能器等组成。

2.2 系统数学模型

电液伺服机构受多种因素影响，是一个复杂的典型非线性系统。测试过程中，往往根据实际需要，在给定的误差内对伺服机构的模型进行适当的简化，采用线性系统模型来简化非线性系统模型。伺服机构的模型可以简化至一阶惯性环节，也可以根据需要采用二阶或者是高阶系统代替。根据伺服机构各部分传递特性经过线性化后得到伺服机构线性系统方框图如图 4 所示。

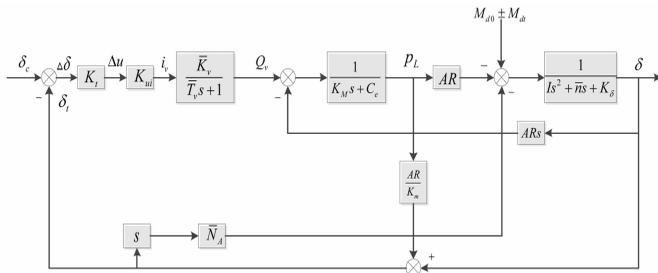


图 4 电液伺服机构简化线性系统方框图

由线性系统方框图可以推导伺服机构的系统线性化传递函数：

$$\delta(s) = \frac{D_0(1 - D_1 s)\delta_c - (B_2 s^2 + B_1 s + B_0)[\pm(M_{d0} \pm M_{di})]}{A_1 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0} \quad (11)$$

式中， δ_c 表示输入指令， $\pm(M_{d0} \pm M_{di})$ 表示干扰， A_i, B_j, D_k 表示由电液伺服机构各组成部分确定的系数项，系数项由伺服机构本身决定。图 4 中各部分的参数对应伺服机构的结构参数。

上述线性化系统输出表达式虽然形式简单，但是实用性差。因为其中包含的每个非线性谐波线性化因子，它们大都有输出条件。所以，上述简化公式应用比较困难。

对伺服机构利用线性控制理论进行粗略地分析，这就需要线性简化系统的方框图。简化伺服机构数学模型，忽略非线性因素，可以得到如下方程组：

$$\begin{cases} \delta_i = \delta \\ \Delta U = K_i(\delta_c - \delta) \\ I_v = K_m \Delta U \\ Y_v = \frac{K_v}{T_v s + 1} I_v \\ K_Q Y_v = AR s \delta + p_L (\frac{V_T}{4B} s + K_{ce}) \\ ARP_L = I s^2 \delta + n s \delta + K_\delta \delta + M \end{cases} \quad (12)$$

式中， $K_{ce} = K_c + C_e$ ，表示总压力流量系数； K_c 表示系统压

力流量系数；

伺服机构线性简化方块图如图 5 所示。

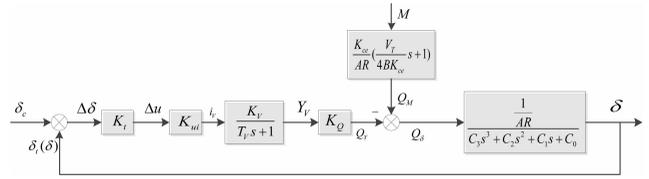


图 5 伺服机构线性简化方块图

由上述方程可得：

$$\delta = \frac{D_Y Y_V - D_M M}{C_3 s^3 + C_2 s^2 + C_1 s + C_0} \quad (13)$$

其中：

$$C_3 = \frac{IV_T}{4B(AR)^2} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{IK_{ce}}{(AR)^2} + \frac{nV_T}{4B(AR)^2} \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{K_\delta V_T}{4B(AR)^2} + \frac{nK_{ce}}{(AR)^2} + 1 \quad (16)$$

$$C_0 = \frac{K_\delta K_{ce}}{(AR)^2} \quad (17)$$

$$D_Y = \frac{K_Q}{AR} \quad (18)$$

$$D_M = \frac{K_{ce}}{(AR)^2} (\frac{V_T}{4BK_{ce}} s + 1) \quad (19)$$

各参数物理含义如列表 1 如下。

表 1 伺服机构模型参数列表

参数	名称	参数	名称
δ_i	指令摆角(rad)	C_e	阀和作动器的相关部分泄漏系数/($m^3/(s \cdot MPa)$)
δ_c	反馈摆角(rad)	M	负载总力矩/($N \cdot m$)
K_i	反馈系数(V/rad)	K_v	电液伺服阀系数/($m^3/(\sqrt{MPa} \cdot mA \cdot s)$)
ΔU	误差信号的拉氏变换	p_L	电液伺服阀输出负载压差/(MPa 或 Pa)
K_m	放大器静态放大系数	P_L	负载压差/MPa
I_v	放大器电流的拉氏变换	K_{ce}	总压力流量系数/(1/s)
Y_v	阀芯真实位移的拉氏变换	R	摆动力臂零位长度/m
A	作动筒活塞有效面积/ m^2	B	液压油容积弹性系数/(MPa/rad)
I	喷管部分绕摆轴的转动惯量/($kg \cdot m^2$)	K_δ	位置力矩系数/($N \cdot m/rad$)
T_v	阀芯运动开环时间常数/s	V_T	阀输出槽口至作动器的受压容积/ m^3
n	绝热指数	K_Q	喷嘴一挡板液液压弹性系数/(MPa $\cdot s/m^3$)

将本课题研究的某电液伺服机构表 1 中所对应相关参数依次代入伺服机构模型公式 (13) ~ (19)，忽略次要因素和高阶小项，并进行适当简化作为课题的伺服机构数学模型。通过劳斯判据对该传递函数进行判定，可知系统稳定。

伺服机构的数学模型确定,可以通过详细查阅伺服机构各组成部分的相关参数,分析伺服机构的外部负载,参考现有的数学模型进行相应计算得出,也可根据伺服机构生产厂家给定的模型根据实际需要直接应用或者适当简化后再使用。此外,伺服机构的数学模型也可通过系统辨识^[10]的方式获得。

3 测试系统硬件设计

动态测试系统设计不仅要满足功能要求,还要满足精度要求。为此课题组对测试系统各功能模块进行选型,根据功能要求,选择能满足功能和精度要求而且成本低廉的模块。论文对测试系统的硬件功能进行具体介绍,对测试过程中各模块功能的实现过程进行了详细说明。

3.1 主控设备

测试系统中计算机是测试系统的关键部分,计算机性能好坏对测试系统有着重要影响^[11]。计算机的主要作用是管理测试系统、运行测试软件、测试数据分析以及测试结果显示、存储和查询等功能。计算机作为操作系统和测试软件的运行平台,其运算速度、存储量等性能对测试系统有重要影响。基于实验室现有设备资源,结合测试系统的性能要求,课题组选择研华 IPC-610L 工控机作为主控设备,IPC-610L 工控机标配支持 4 个 COM 口,2 个千兆网口,1 个 PCI-E * 16,1 个 PCI-E * 4,5 个 PCI 插槽。

3.2 数据采集和信号发生模块

导弹伺服机构动态测试过程中,必须完成激励信号的产生,输入信号和输出信号的同步采集。激励信号的产生需要信号发生模块。信号发生模块通常可以分为通用信号发生器和专用信号发生器,随着信号发生器的不断发展,信号发生器的频率精度越来越高,出现了基于单片机的智能信号发生器、DDS 信号发生器和基于虚拟仪器技术的信号发生器等^[12]。伺服机构动态测试系统中,需要产生超低频信号。购买符合测试需求的信号发生器不仅价格昂贵,体积较大,而且测试过程需产生复杂的波形较麻烦。为此,课题组采用基于虚拟仪器技术的多功能数字信号发生器。基于虚拟仪器的信号发生器不仅能够根据需要产生不同的激励信号,同时还具有体积小,易于控制的特点^[13]。

伺服机构机构动态测试过程中,不仅需要能够产生特定波形的超低频信号发生器,还需要对数据进行同步采集。伺服机构动态测试过程中,需要完成伺服机构输入信号和输出信号的同步采集。I 级伺服机构和 II 级伺服机构均具有多台,其中 I 级伺服机构具有四台相同的导弹电液伺服机构。测试过程中,为提高测试精度,采用差动输入的方式抑制共模干扰。因此,I 级伺服机构测试过程中需要 16 个模拟量输入(AI)端口。动态测试中,采用 chirp 信号作为激励信号,信号大小类型相同,因此至少需要 1 路模拟量输出(AO)端口。综合以上对输入端口和输出端口的要求,以及测试过程中的功能需求,选择研华 PCI-1742U 多功能数据采集卡作为测试系统信号发生和数据采集的功能模块。

PCI-1742U 采集卡是一种多功能数据采集卡,执行 PCI

总线的 Rev2.1 标准,支持即插即用功能。板卡自带先入先出缓冲器(FIFO),保证了连续高速数据的传输功能。板卡带有可编程计数器,3 个 16 位的 10 MHz 时钟的计数器,一个为事件计数器,另外 2 个计数器可级联在一起作为脉冲触发的 32 位计数器。此外,板卡内建校准电路,可通过相应程序对板卡进行增益和偏差的校准。

3.3 伺服放大模块

PCI-1742U 采集卡的模拟输出范围为 $0 \sim \pm 10$ V,板卡产生的激励信号需要经过功率驱动放大后再作用于伺服机构。具体的功率驱动放大过程为:将板卡产生的激励信号与实际采集到的响应信号进行负反馈处理,输出信号作为伺服放大器的输入,分别经过电压放大、电流放大后,再驱动伺服机构工作。

3.4 信号调理模块

信号采集过程中,不同形式的被测量由传感器直接转化为电信号处理,但受到传感器性能参数,数据采集卡量程和分辨率等限制,实际传感器输出的电信号还需要相关处理后再传递给数据采集卡。常见处理环节如下。

1) 电压调节:

传感器采集到被测量后直接转化为电信号,由数据采集卡进行采样处理。不同的被测量,传感器的输出信号的幅值差异较大。当传感器输出的电信号幅值超过数据采集卡的测量量程时,需要先将电信号进行衰减处理,满足测量范围后再传递给数据采集卡,否则容易损坏数据采集卡的测量端口;当传感器输出电信号幅值低于数据采集卡的测量分辨率时,需要先将电信号进行放大处理,满足最小测量分辨率要求。

2) 信号转换:

设备测试操作过程中,涉及到电压与电流信号的转换操作。测控计算机控制数据采集卡输出模拟电压信号,通过信号转换电路转为电流信号,作用于电液伺服阀,转换过程中不仅涉及信号放大,同时也包含由电压信号到电流信号的转换。除此之外,还包括电压转换成电流信号等变换。

3) 滤波:

信号传输时,不可避免地引入了噪声干扰。为此,需要根据噪声的类型选取相应办法去除干扰。去除干扰不仅可以通过算法运算去除噪声,还可以通过物理器件去除干扰。课题组选择的是 $0.1 \sim 20$ Hz 频带的 chirp 信号,可以通过在激励信号采集通道上增加低通滤波器,有效滤除高频噪声。同时为减少信号传输干扰,将滤波器安放在靠近传感器的位置,能够在信号放大前有效滤除干扰从而提高信号的信噪比。

4) 伺服机构等效器:

伺服机构的动态测试过程中,为了验证设计系统的有效性,需要进行试验验证。但是受硬件条件影响,导弹的伺服机构比较难以获得。为此,根据伺服机构的传递函数,采用等效器代替电液伺服机构完成测试过程。伺服机构等效器采用 RC 网络来实现,根据传递函数选择构建 RC 网络。

4 测试系统软件设计

导弹电液伺服机构动态测试系统的实现不仅需要对接硬件电路进行设计,同时还需要对测试软件进行编程实现。选择一款合适的软件开发平台,不仅能够简化编程过程,而且能够缩短开发周期,达到事半功倍的效果。虚拟仪器(Virtual Instrument)采用“软件即仪器”的设计思想,采用应用软件将计算机与各种功能模块结合起来,除了继承传统硬件具有的功能外,同时还具有传统硬件不具备的功能^[14-15]。编制虚拟仪器软件时通常分为两种。一种是采用传统的高级语言进行编译:VC++、VB、Delphi等;另外一种是采用图形化编程软件开发平台,如采用高级语言C#、LabView、LabWindows/CVI软件以及HP公司的VEE软件等。图形化的编程语言开发周期短,编译容易,大大降低了对工程技术人员的要求^[16]。课题组选择C#语言进行软件实现。

4.1 软件功能

测试软件开发过程中需完成如下功能。

1) 系统自检:测试前,需系统自检以确保测试系统各功能模块正常工作。系统自检不仅需要对接测试系统各组成部分的功能自检,同时也要对测试系统进行自检确保动态测试前测试系统功能完好。

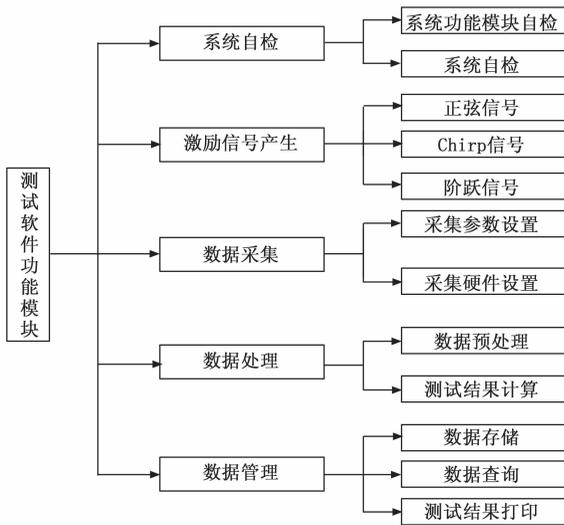


图 6 测试程序功能规划图

2) 激励信号产生:伺服机构激励信号的产生由软件进行控制实现。通过调用板卡驱动程序,通过LabView信号发生器控制模拟量输出口产生激励信号。为充分利用多功能数据采集卡功能,通过软件控制AO端口产生不同的激励信号。伺服机构的激励信号产生需要软件控制,通过测试软件控制多功能数据采集卡产生系统所需的激励信号,完成激励信号幅值、频率设置等。

3) 测试数据的采集:测试过程中,数据采集是重点。数据采集过程需完成测试通道的选择、信号转换触发方式以及数据采集卡板卡相关参数设置等。

4) 数据处理:数据处理是测试软件的核心,数据处理的结果对测试结果有重要影响。数据处理可分为两部分,数据预处理过程与预处理后的测试数据到测试结果的转换。良好的数据预处理过程是获得准确的测试结果的保证。

5) 测试数据的管理:测试结果是反映伺服机构状态,必须对测试进行存储和相关管理。测试数据的管理分为数据的存储、打印、查询和输出等。

4.2 软件设计

测试功能的实现离不开测试软件的开发,课题组选用Visual Studio软件作为测试系统的开发平台,在该软件平台环境下采用C#语言进行编程。本节对设计过程中的关键问题进行说明。

1) 登录程序系统:

登录程序主要通过控制权限对特性用户开放,这对于保护伺服机构动态测试系统具有重要意义,主要包括用户名、密码以及分系统选择等功能。

实现登陆功能的程序主要采用for循环+if/else语句,通过点击前面板程序,触发事件响应事件选择结构执行语言。程序通过读取用户名以及密码后判断是否为有效用户,从而决定是否释放打开在线测试系统以及离线分析系统的权限。以及是否检测软件连接可用的板卡。

2) 在线测试系统:

在线测试系统主要包括主页显示功能、调频脉冲扫频法、相关分析法和阶跃特性测试等功能组成。

主页显示功能主要用于采集卡的模拟输出口、采样频率、接线方式、伺服机构选择以及自检功能等设置。在设置好采集卡参数中的模拟输出口、采样频率、接线方式的设置以及伺服机构选择通过点击自检按钮,触发程序语言。

调频脉冲扫频法主要是通过产生一个chirp信号,通过板卡模拟量输出口输出,同时采集测试数据,对测试数据进行幅频特性和相频特性的分析处理。首先配置chirp信号,设置chirp信号以及信号预处理设置;然后通过软件程序控制研华采集卡得到采集结果,依次为激励信号、响应信号和附加信号;再对板卡输出值进行设置,依次为激励信号和附加信号得到所需的chirp信号。在调频脉冲扫频法中获取采集得到的chirp信号相关参数并启动相关时钟。利用程序语言中的相关事件选择语言,对所采集得到的信号信息进行测试,并将信号信息以幅频特性和相频特性的形式展现出来,而且可以将数据进行分析与数据保存到事先建立好路径的Excel表格中。

正弦相关分析法是通过产生一个正弦信号通过板卡输出,并同步采集信号进行幅频特性以及相频特性的分析。配置正弦信号和信号采集端口设置。与调频脉冲扫频法类似,通过软件程序控制研华采集卡得到采集结果和对输出值进行设置得到所需的正弦信号,从采集卡中获取正弦信号并启动相关时钟。通过程序的事件选择语言,对正弦信号进行离散化处理,将相关法的输入输出转换成波特图对应的点,在软件界面中分别以幅频特性和相频特性的形式

展现出来, 而且可以将数据进行分析与数据保存到事先建立好路径的 Excel 表格中。

阶跃特性测试是通过产生一个阶跃信号通过板卡输出, 并同步采集信号获得系统达到稳定幅值时的响应时间界面图。首先配置阶跃信号和信号采集端口设置。与调频脉冲扫描法类似, 通过软件程序控制研华采集卡得到采集结果和对输出值进行设置得到阶跃信号, 从采集卡中获取得到阶跃信号并产生相关时钟, 利用事件结构语言对阶跃特性产生的激励信号进行分析对比, 最终绘成响应输出图形, 而且可以将数据进行分析与数据保存到事先建立好路径的 Excel 表格中。

3) 离线分析:

离线分析软件主要用于读取在线测试系统测试操作总存储的调频脉冲法、相关分析法和阶跃特性的测试数据, 进行数据访问分析、查询打印等操作, 通过点击读取数据按钮读取, 并通过取图表显示数据。程序设计中涉及事件结构、Excel 表格文件读取函数等操作。

5 采样频率对测试结果影响分析

为研究采样频率对伺服机构测试精度的影响^[17], 课题在研究过程中, 分别采用正弦相关分析法和基于 chirp 信号的测试方法进行测试仿真。仿真过程中, 正弦相关分析法的测试频率 f 选择为 0.1、0.5、1、5、10、15、20 Hz; 基于 chirp 信号的测试方法测试频率设置为 0.1~20 Hz。激励信号的幅值选择与实际测试幅值相似, 激励信号的幅值均为 3 V, 测试对象选择基于伺服机构数学模型搭建的伺服机构等效器^[18-19]。考虑到激励信号的最高频率为 20 Hz, 采样频率分别选择 500 Hz、1 kHz、2 kHz、5 kHz、10 kHz。

5.1 正弦相关分析法

为研究采样频率对基于正弦相关分析法的动态测试方法的影响, 采用不同的采样频率对仿真过程进行采样。仿真过程中, 比较不同采样频率下, 测试结果的误差大小以及分布状况, 为测试系统设计确定合适的采样频率^[20]。

仿真测试结果如表 2 所示, 正弦相关分析法的测试结果受采样频率影响较大, 当采样频率较低时, 系统的动态特性误差就越大; 当系统采样频率越高时, 系统的动态特性误差结果越小。

表 2 正弦相关分析法采样速率与系统动态特性误差

采样频率/Hz	最大频率特性误差/dB	最大相位特性误差/(°)
500	0.032	7.0
1 k	0.022	3.4
2 k	0.021	1.7
5 k	0.020	0.8
10 k	0.020	0.5

5.2 基于 chirp 信号的测试方法

为研究采样频率对基于 chirp 信号的动态测试方法的影响, 采用不同的采样频率对仿真过程进行采样。仿真过程中, 比较不同采样频率下, 测试结果的误差大小以及分布状况, 为测试系统设计确定合适的采样频率。

仿真测试结果如表 3 所示, 基于 chirp 信号测试方法的测试结果受采样频率影响较大, 当采样频率较低时, 系统的动态特性误差就越大; 当系统采样频率越高时, 系统的动态特性误差结果越小。

表 3 调频脉冲扫描法采样速率与系统动态特性误差

采样频率/Hz	最大幅频特性误差/dB	最大相频特性误差/(°)
500	0.09	7.8
1 k	0.07	4.0
2 k	0.06	2.4
5 k	0.06	1.45
10 k	0.06	0.9

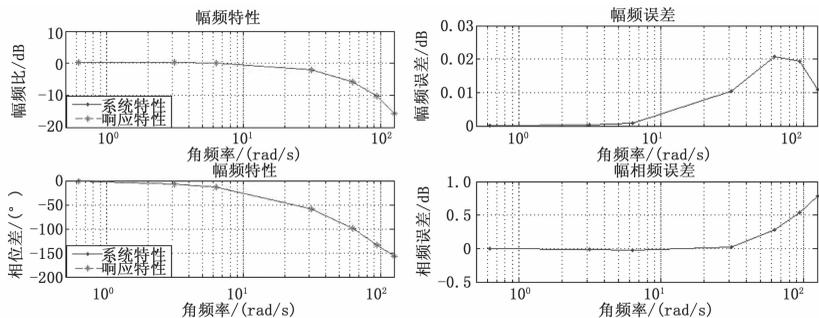


图 7 采样速率 5 kHz 的系统动态特性和误差

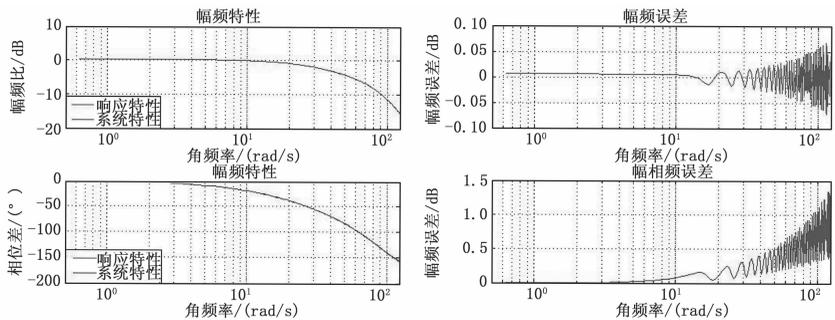


图 8 采样速率 5 kHz 的系统动态特性和误差

通过分析图 7、图 8 显示的系统频率特性和误差, 以及表 2 和 3 表结果, 可得出如下结论: 随着采样频率的增加, 测试精度相应提高; 当采样频率达到一定值时, 通过增加采样提高测试结果精度的作用逐渐不明显, 而且增加采样数据增加了计算量。针对频率范围为 0.1~20 Hz 的激励信号, 通过正弦相关分析法和基于 chirp 信号的测试法测试结果比较, 当采样频率接近 5 kHz 时, 增加采样频率对测试结果精度影响逐渐变小。为此, 课题选择 5 kHz 作为测试系统的采样频率。

(下转第 185 页)