

基于 xPC 实时控制的液压飞行转台控制系统设计与实现

Design and Realization of Hydraulic Rotational Flight Simulator's Control System Based on xPC Realtime Control

中国人民解放军 91336 部队

徐东东 彭伟伟 万红坡

[摘要] 在比较国内主流实时控制系统的基础上,介绍了 xPC 快速原型的基本原理,构造了液压飞行转台控制系统数学模型并进行了仿真分析,并以此为基础设计实现了某型液压飞行转台的实时控制系统。

关键词: xPC 快速原型 实时控制 液压飞行转台

[ABSTRACT] The internal popular RT control systems were compacted, principle of xPC rapid prototype were presented. Control system model of hydraulic rotational flight simulator was constructed, and with this, RT control system of one hydraulic rotational flight simulator was actualized.

Keywords: xPC Rapid prototype Realtime control Hydraulic rotational flight simulator

仿真转台在导弹制导仿真试验研究过程中起着至关重要的作用,相比电动仿真转台而言,液压伺服转台具有动态响应快、重量轻、惯量小、输出力矩大、调速宽的性能,而且液压油本身可以起到润滑的作用,因此液压驱动飞行转台在制导仿真试验领域占有较大比重。而如何选择实时系统、快速完成转台实时控制系统的构造,不但关系到后期转台控制系统开发、调试时的工作量,而且关系到开发的难度和成败。目前国内典型的实时系统主要有以下几种。

(1) 传统的基于 DOS 系统的实时控制可以直接对相关硬件进行操作以达到实时控制的目地,但开发人员要编写全部的控制和界面代码,工作量和难度大,修改调试不易,而且性能和可靠性也不能保证,人机交互界面不友好。

(2) 在 Windows 下开发实时控制系统,编写虚拟设备驱动程序,达到实时控制的目的。然而编写虚拟设备驱动程序涉及到系统底层核心,编程技术难度大且编程工作量大,没有丰富的系统底层开发经验很难编写出可靠性较高的实时控制系统。

(3) VxWorks 嵌入式实时系统是一种具有较好灵活性的控制软件平台。但从编程工作量和难度、编程可靠

性和效率、软件使用维护、性价比等角度考虑,这种方案选择在竞争力上仍有不足。

(4) 基于 xPC 快速原型原理的控制是一种先进的高效便捷方案。快速原型的简要原理如图 1 所示。

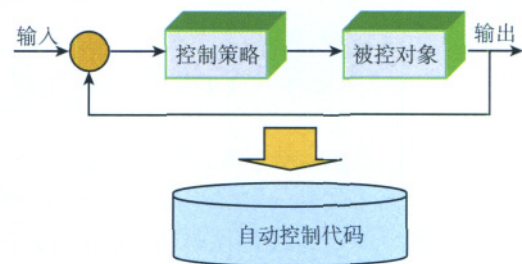


图1 xPC快速原型原理简图

Fig.1 Principle of xPC rapid prototype

传统的控制系统编程存在着开发周期长、调试难、不易维护等缺点,且先进复杂的控制思想很难快速应用到控制工程的实践中去。xPC 快速原型的实施方案在控制理论与控制工程之间架起一座坚实的桥梁,由控制方块图自动生成控制代码,使控制工程师不需要程序员就能把自己熟悉的方块图所表示的控制策略建立成可以执行的代码,使参数的调整以及信号的采集和分析都非常方便。

1 xPC 快速原型基本原理^[1-3]

xPC 目标可将 Intel 80×86/Pentium 计算机或 PC 兼容机转变为一个实时系统,而且支持许多类型的 I/O 设备板。用户只需要安装相关的软件、一个编译器和 I/O 设备板,就可将一个 PC 兼容机作为实时系统,来实现控制系统或 DSP 系统得快速原型化、硬件在回路中的测试和配备实时系统功能。

图 2 为快速原型化环境中 xPC 目标原理图,管理机为一般 PC 机,Windows 操作系统运行 LabVIEW 编写的人机交互软件,方便操作和使用,安装 MARLAB 软件,用于运行 Simulink 环境,设计、创建目标应用程序;目标机为研华工控机,通过以太网连接来实现和管理机之间的通信,用于执行管理机所生成的控制程序代码,在

2 液压伺服马达实时控制系统

三轴液压飞行转台内、中、外框的伺服控制在原理上基本相同,以内框液压摆动马达伺服控制系统为例进行数学建模,并在 xPC 实时平台上进行仿真分析。

2.1 构造控制系统数学模型

液压马达位置伺服系统的原理方框图如图 3 所示。

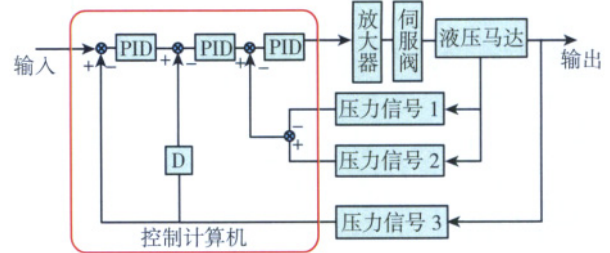


图3 液压马达位置伺服系统原理方框图

Fig.3 Principle pane of Hydraulic motor position servo

其中,电液伺服阀的实际动态响应非常复杂,可将其简化为一个二阶振荡环节:

$$\frac{Q_o(s)}{I(s)} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1}, \quad (1)$$

式中: Q_o 为伺服阀输出流量(m^3/s); I 为电液伺服阀输入电流(A); K_{sv} 为电液伺服阀空载流量增益($m^3/s \cdot V$); ω_{sv} 为电液伺服阀等效无阻尼自振频率(rad/s); ζ_{sv} 为电液伺服阀等效阻尼系数,无量纲。

液压马达位置伺服系统传递函数方框图如图 4 所示。

由于折算到马达轴的总粘性阻尼系数 B_m 较小,总惯量 J_t 较大,所以可以忽略马达轴的粘性阻尼的影响,

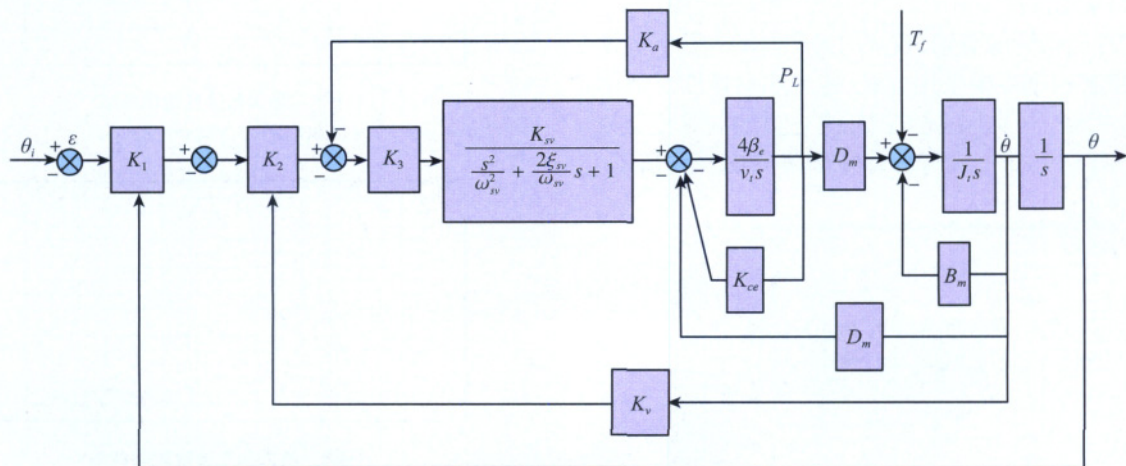


图4 液压马达位置伺服系统传递函数方框图

Fig.4 Transfer function pane of Hydraulic motor position servo

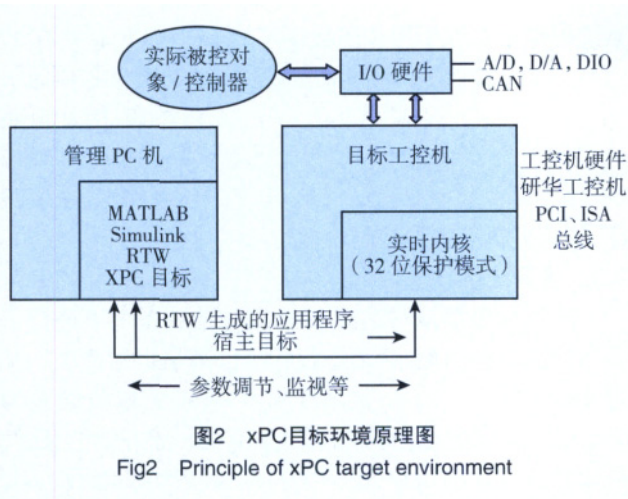


图2 xPC目标环境原理图

Fig2 Principle of xPC target environment

xPC 实时内核上运行系统的控制器算法程序和实时监控程序。xPC 目标提供了一个高度缩减型的实时操作内核,运行在目标机上,该实时内核采用了 32 位保护模式,以保证程序的实时运行。管理机软件的运行基础为:计算机硬件和各种硬件的底层驱动,Windows XP 操作系统,NIActiveX 控件,xPC 实时内核动态链接库 API 函数。控制机软件的运行基础为:计算机硬件及硬件的驱动程序,xPC 实时内核。

xPC 目标快速原型化的工作流程为:首先在管理 PC 机的 MATLAB 环境下创建控制程序文件,通过以太网的 TCP/IP 协议编译、下载到目标机上;目标工控机用 DOS 方式引导进入 xPC 实时平台,接收并运行从管理机上下下载的控制程序代码,对 PCI、ISA 地址进行操作,直接读写板卡,而这些板卡又与物理系统的传感器或执行元件连接,接收各种传感器信号并发出控制指令;在程序运行期间用户还可以从管理机上对 xPC 目标程序进行在线参数调节、保存数据等控制操作。

近似的认为 $B_m=0$ 。所以,当 $B_m=0$ 时,由图 4 可以求得系统的开环传递函数:

$$G(s) = \frac{K\omega_h^2\omega_{sv}^2}{s^5 + 2(\omega_h\xi_h + \omega_{sv}\xi_{sv})s^4 + (\omega_h^2 + 4\omega_h\xi_h\omega_{sv}\xi_{sv} + \omega_{sv}^2)s^3 + 2\omega_{sv}\omega_h(\omega_{sv}\xi_h + \omega_h\omega_{sv})s^2 + \omega_h^2\omega_{sv}^2s} \quad (2)$$

式中, $K = \frac{K_1K_2K_3K_{sv}}{D_m}$ 。

由于电液伺服阀的固有频率远大于液压马达的固有频率,所以,可以将电液伺服阀简化为比例环节,得到系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1\right)s} \quad (3)$$

系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{K}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \left(\frac{2\xi_h}{\omega_h} + \frac{KK_v}{K_1K_2}\right)s^2 + \left(1 + \frac{KK_v}{K_1}\right)s + K} \quad (4)$$

将执行元件的参数带入式(3)、(4),得

$$\omega_h = 189.06\text{rad/s} = 30.10\text{Hz} ,$$

$$\xi_h = 0.2 ,$$

$$K_{sv} = \frac{(800/60) \times 10^{-3}}{10} = 0.00133\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{V}) ,$$

$$D_m = 1.02 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{rad} .$$

由于采用计算机数字控制,对采集来的信号可以任意改变增益,所以,为了系统分析方便,可设

$$K_1=K_2=K_3=K_v=K_a=1 ,$$

系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{46610}{s^3 + 75.6s^2 + 35744s} \quad (5)$$

系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{46610}{s^3 + 46685.6s^2 + 82354s + 46610} \quad (6)$$

2.2 控制系统仿真

根据性能指标的要求,系统的采样时间和控制周期为 1ms,控制程序主要采用位置、速度和加速度反馈的三环 PID 控制,以及非线性控制、自适应控制等复合控制方法。用 Simulink 进行仿真,控制模型如图 5 所示。

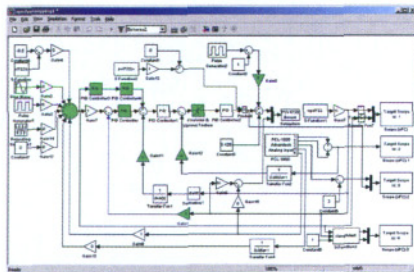


图5 液压马达控制系统模型

Fig.5 Control system model of Hydraulic Motor

系统模型中有 5 个用 S 函数编写的 I/O 模块,总共有 27 路数字 I/O (22 路用于位移传感器,其余为数字控制量), 2 路 D/A, 5 路 A/D, 可实现位置跟踪、速度跟

踪、频响分析等多种控制功能。

2.3 仿真结果

液压伺服摆动马达在 xPC 实时控制系统下进行了动态性能指标的测试,动态指标全部满足指标要求。其中 8Hz 双十指标结果如图 6 所示,系统的幅值误差为 9%,相位滞后 9°;系统响应输入幅值 20° 的方波信号时,最大角速度达到 400°/s,最大角加速度达到 40000°/s²,如图 7、8 所示。

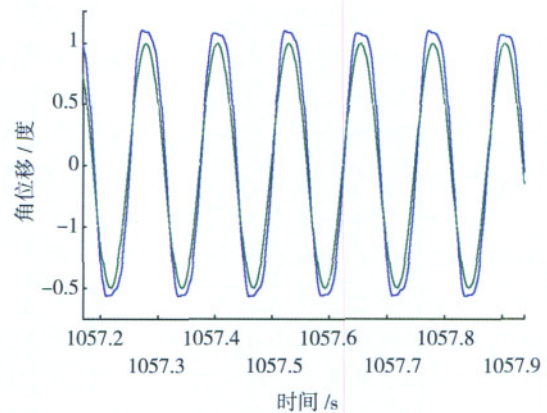


图6 8Hz频率响应曲线

Fig.6 8Hz frequency response curve

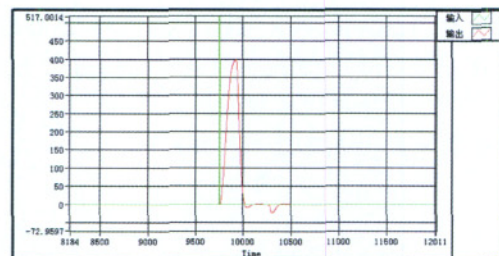


图7 最大角速度运动曲线

Fig.7 Max velocity curve

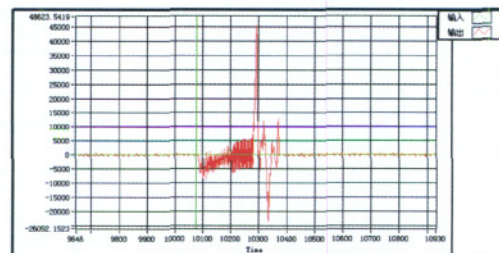


图8 最大角加速度运动曲线

Fig.8 Max acceleration curve

(下转第 88 页)

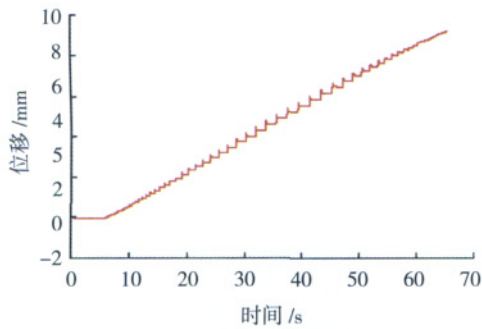


图7 $R=0.85\text{mm}$ 时主节流阀芯位移曲线

Fig.7 Displacement curve of main throttle valve spool at $R=0.85\text{mm}$

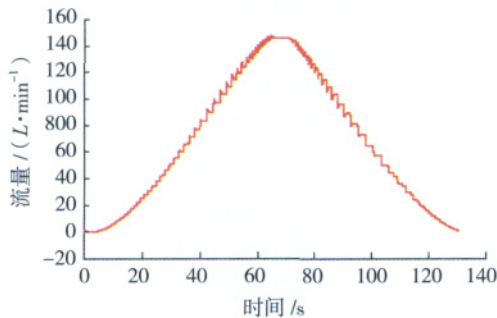


图8 调速阀流量曲线

Fig.8 Flow curve of control valve

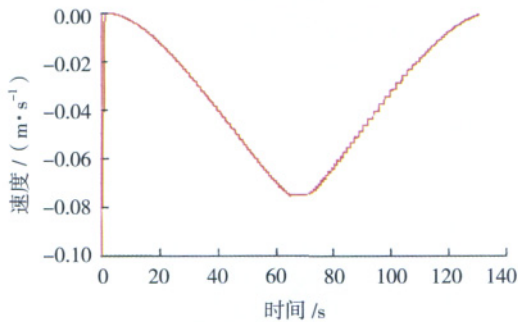


图9 油缸速度曲线

Fig.9 Speed curve of cylinder

4 结束语

本课题根据实际物理模型建立了电液比例调速阀及所在调速系统的AMESim仿真模型,得到了系统流量及油缸的位移曲线,逼真预测了比例调速阀在实际工况中的特性。通过建立的模型,可以对比例调速阀中的液阻、液容、弹簧刚度、先导阀开度等参数设置优化,进而能够为该型调速阀的设计改进提供重要的参考依据。

参考文献

[1] 付永领. AMESim系统建模与仿真—从入门到精通. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006:1-3.
 [2] 吴根茂. 实用新编电液比例技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2006:29-32.

[3] 王强. 基于AMESim的电液伺服速度控制系统仿真分析. 液压气动与密封, 2008 (4):31-34.

[4] 余佑官. AMESim仿真技术及其在液压系统中的应用. 液压气动与密封, 2005 (3):29-32. (责编 岭雾)

(上接第80页)

3 设计实现

上述仿真已成功应用于某型液压飞行转台控制程序,用LabVIEW在管理机上开发基于Windows环境下的人机界面程序,将转台实时控制程序下载到目标机xPC实时平台上。软件运行界面分别如图9、10所示。



图9 运行在管理机Windows环境下的人机界面程序

Fig.9 User interface based on Windows on manage PC

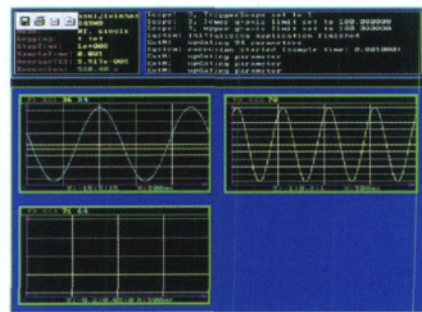


图10 运行在目标机xPC实时平台上的液压飞行转台控制程序

Fig.10 Control system of hydraulic flight simulator based on xPC on target PC

经过实际运行测试,该液压飞行转台控制系统采样时间和控制周期为0.001s;其中程序运算最长执行时间是0.000424s,最短执行时间是0.000324s,平均执行时间是0.000374s;连续运行时间超过8h,xPC系统运行稳定、完全满足系统强实时性要求。

参考文献

[1] 杨涤,李立涛,杨旭. 系统实时仿真开发环境与应用. 北京: 清华大学出版社, 2002.
 [2] 张乐飞,刘利,王旭永. 基于xPC实时控制的中空液压马达伺服系统的研究. 液压与气动, 2005 (6):45-47.
 [3] 武志刚,刘利,张乐飞. 基于xPC的液压伺服实时控制系统. 机床与液压, 2006 (2):171-173. (责编 泰山)