基于 MATLAB 的电液力伺服控制系统的研究

撰文／陕西国防工业职业技术学院　数控工程学院　曹旭妍

本文根据电液力伺服控制系统的工作原理，建立其数学模型，利用 MATLAB 软件为其构建仿真模型，并获得反映系统性能的仿真曲线，完成系统的静、动态分析。基于 Simulink 工具箱设计出 PID 控制器，有效解决了系统本身非线性所造成的控制效果不佳的问题，仿真结果表明，该控制器满足控制系统要求，控制效果良好。

一、引言

电液力伺服控制系统普遍具有精度高、响应快以及结构简单等特点，广泛应用于工业控制等领域。但是液压伺服控制系统是非线性复杂系统，在控制精度和稳定性上不能满足要求，有时需要附加合适的控制器才能取得比较理想的控制效果。在电液力伺服系统的设计过程中， 基于 Matlab 软件，能快速准确地完成系统的静、动态分析，提高了设计效率，并根据分析结果，采用 Simulink 工具箱，设计出 PID 控制器，

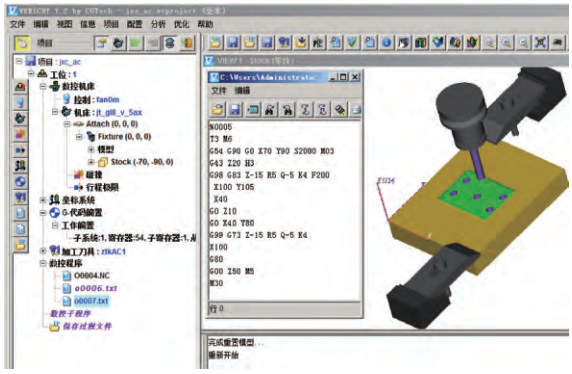

图 4　基于 HNC_M 编制程序的仿真加工

修改定制的原 fanuc10m 系统库，由于未进行基于 HNC 钻镗循环新增变量的注册设置，当执行程序语法检查或运行加工仿真时，将会在信息区显示“xx 代码不支持”的信息警示。改用新定制的 HNC_M 系统库后重新进行仿真检查，则不再出现这些警示信息。

另外，若将图 3 所示的 01 组 G 代码取消固定循环均设定为“否”，当程序在几个钻镗循环之间使用了 G0/G1 的 Z 向运动时，就会出现“循环进给应沿着刀轴运动”的信息警示。只有将这些均设定为“是”，才不会出现警示信息。

由此可见，以上针对 HNC 数控铣削加工进行的 VERICUT 系统库环境的定制设置是成功的。

五、结语

VERICUT 作为一款基于 NC 程序实施加工仿真验证的软件，在业内具有较为广泛的应用，但其对国产数控系统的支持尚需用户自行构建系统库文件，方可实施正确的仿真。本文针对 HNC 与 FANUC 指令功能的相似性，仅就其间个性化差异展开探索，较粗浅地介绍了开发定制 VERICUT 控制系统库的方法，期望能对使用 VERICUT 进行数控系统环境定制的相关研究者提供一定的借鉴。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

该控制算法解决了电液力伺服系统的非线性，使系统的快速性、稳定性等都能满足要求，具有良好的控制效果。

二、系统组成及数学模型的建立

本文设计的电液力伺服系统实验平台主要由个人计算机、伺服阀、液压缸、测力传感器、受力对象、传感器信号单路放大器和数据采集卡所组成。给系统输入负载力后便开始工作，使液压缸活塞杆输出负载力。该力由测力传感器检测，转换为电压信号，由数据采集卡进行 A/D 转换后反馈到计算机中，与指令电压信号进行比较，计算机根据电压偏差来计算当前电压控制量，进行 D/A 转换后来驱动电液伺服阀，以伺服阀开口方向和大小来控制进入液压缸的液压油的多少及方向，并作用在活塞杆上，从而使输出力达到期望值。图 1 为电液力伺服控制系统的总体框图。

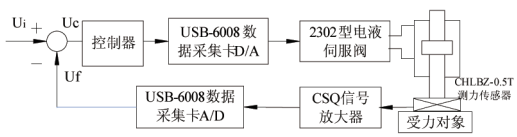

图 1　电液力伺服控制系统总体框图

对系统方框图和王世富所著文章《液压控制系统建模和仿真方法的研究》中的研究结果进行分析，得出电液力伺服控制系统的传递函数为：

$$G(s)H(s)=\frac{k_0G_{SV}(s)(\frac{s^2}{w_m^2}+1)}{(\frac{S}{w_r}+1)(\frac{S^2}{w_0^2}+\frac{2\xi_0}{w_0}S+1)}$$

式中，k_0 为力控制系统的开环增益。

$$k_0=k_fk_{sv}\frac{k_q}{k_{ce}}A_p$$

三、系统模型仿真分析

根据实际系统，我们确定电液力伺服控制系统的参数如下：

（1）系统液压源的额定压力是 21MPa，额定流量是 15L/min，供油压力是 8MPa，电动机功率为 12KW。

（2）液压缸的参数有：液压缸行程：0 ～ 150mm；液压缸有效面积：$A_P=3.12\times10^{-3}m^2$；有效容积：$v_t=2\times10^{-4}m^3$；工作压力：10MPa；固有频率：4911rad/s；阻尼比：$\varepsilon_0=0.18$；液压体积弹性模数：$\beta_e=690MPa$，得液压缸动态方程如下式：

$$G_p(S)=\frac{\frac{6.75}{1}(\frac{S^2}{395.3^2}+1)}{(\frac{S}{54}+1)(\frac{S^2}{2843.3^2}+\frac{2\times0.18}{2843.3}S+1)}$$

（3）伺服阀参数：伺服阀的固有频率 $w_{sv}=628rad/s$，伺服阀的阻尼比 $\varepsilon_{sv}=0.5$，额定电流 $I_A=40mA$，流量 $Q_{sv}=30L/min$，得伺服阀的流量增益如下式：

$$k_{sv}=\frac{Q_{sv}}{I_c}=\frac{30\times10^{-3}/60}{0.04}=0.05m^3/sA$$

伺服阀传递函数为：

$$G_{sv}(S)=\frac{0.05}{\frac{s^2}{628^2}+\frac{2\times0.5}{628}s+1}$$

（4）本系统中将测力传感器视为比例环节。测力传感器的量程为 500kg，电压为 0 ～ 5v，测力传感器的增益为：

$$k_f=\frac{5v}{500kg}=0.01mv/kg=0.001V/N$$

将液压缸动态方程，伺服阀传递函数和测力传感器增益等值代入传递函数的表达式，可以得出电液力伺服控制系统的传递函数为：

$$G(s)=k_0G_{sv}(s)G_p(s)$$

$$=4.31\times\frac{1}{\frac{s^2}{628^2}+\frac{2\times0.5}{628}s+1}\times\frac{\frac{6.75}{1}(\frac{S^2}{395.3^2}+1)}{(\frac{S}{54}+1)(\frac{S^2}{2843.3^2}+\frac{2\times0.18}{2843.3}S+1)}$$

$$=\frac{0.01191s^2+29.09}{1.525\times10^{-10}s^5+9.663\times10^{-8}s^4+7.597\times10^{-5}s^3+0.01044s^2+6.029s+1}$$

由此传递函数可以得出系统开环波德图，如图 2 所示。

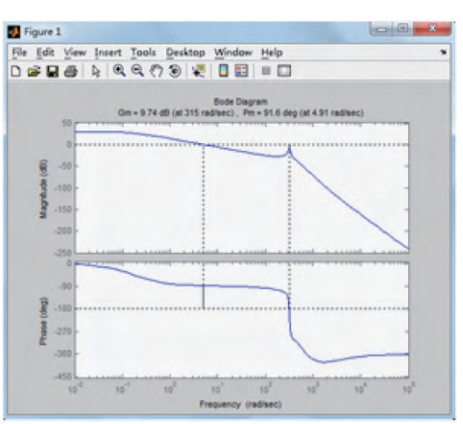

图 2 系统开环伯德图

根据力伺服控制系统开环传递函数及系统伯德图便可以对理想情况下的力控制系统的快、准、稳三个特性进行比较和分析：

（1）系统的稳定性。一般系统的相位裕度、幅值裕度越大系统则越稳定，由系统开环伯德图可以得知，该系统的相位裕度是 91.6°，增益裕度是 9.74dB，可得该力伺服控制系统是稳定的。但是在实际的力伺服系统中，系统的稳定性与负载质量等因素都是相关的，因此系统的稳定性也会不断变化。

（2）系统的响应速度。此系统开环增益过小，使得系统的穿越频率 仅有 4.91rad/s，从而使该系统的响应速度较慢。

（3）系统的稳态精度。通过分析可以得知未加校正的电液力伺服控制系统是典型的零型有差系统，零型系统不能同时满足稳定性、精准性还有快速性的要求。在该力伺服系统中输入力为阶跃信号，若只是提高开环增益，虽然系统的快速性和精确性会得到显著提高，但是系统的稳定性又会有所降低，甚至还可能发生振荡现象。因此，该系统通常要进行 PID 校正，以解决系统稳定性不足等缺陷。

该系统的数学模型是理想状态下建立起的线性模型，可在实际应用中，伺服阀本身就具有死区、滞环以及零偏等特性；电液力伺服控制系统是复杂的非线性时变系统，需要设计合适恰当的控制器才能取得较好的控制效果。

四、PID 控制

PID 控制是由系统误差的现在因素 P、过去因素 I 以及未来因素 D，通过线性组合方法来确定其输出控制量的一种经典的控制方法，该控制方法具有结构简单、稳定性好和可靠稳定等优点，因此在液压伺服控制系统中广泛应用。

1.PID 控制的基本原理

PID 控制器的系统组成是由模拟 PID 控制器加上被控对象所组成的。模拟 PID 控制系统的原理框图如图 3 所示：

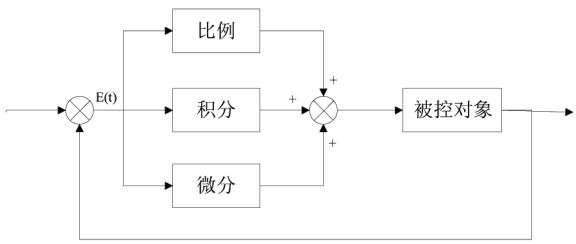

图 3 PID 控制基本原理图

控制偏差是根据输入给定信号和实际输出值所组成，其偏差为：

$$e(t)=r(t)-y(t)$$

该控制器的控制规律为：

$$u(t)=K_p\left(e+\frac{1}{T_i}\int_0^t edt+T_d\frac{de}{dt}\right)$$

式中，K_P 为控制器的比例系数；T_i 为控制器的积分时间常数；T_d 为控制器的微分时间常数。

2. 基于 PID 控制算法的系统仿真分析

首先应用线性 PID 控制算法进行系统仿真，应用 Matlab/Simulink 仿真工具搭建系统仿真模型，对电液力伺服控系统进行仿真，如图 4 所示，点击 Simulink 仿真界面上的运行，进行系统的仿真，系统仿真曲线如图 5 所示。

通过仿真曲线，可以看出，给系统输入给定的阶跃信号，其输出曲线能快速响应并跟踪输入信号，响应速度快，超调量小，稳定性高，能满足电液力伺服控制系统的要求。

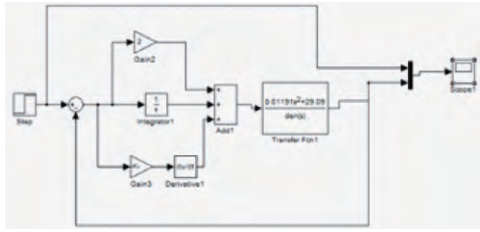

图 4 PID 控制系统仿真模型

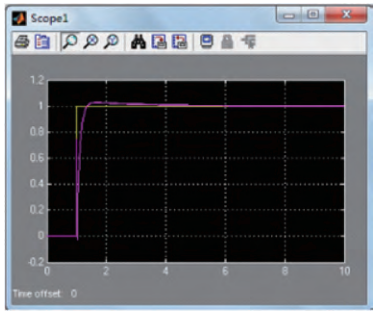

图 5 PID 控制系统响应曲线

五、结语

基于 MATLAB 软件对电液力伺服控制系统进行分析，简化分析和设计过程，能准确地分析系统的快速性，准确性和稳定性三个主要特性；并根据实际力伺服控制系统存在的非线性特性，采用 Matble/Simulink 工具箱设计出 PID 控制器，该控制算法在快速性、准确性以及稳定性方面都有相当程度的提高，并且在运行过程中也基本无明显震荡，效果较好。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn