

基于 Solidworks/Matlab 的液压伺服扭转试验机系统联合建模与仿真*

陈 志¹ 龚宪生^{*,1,2}

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:针对液压伺服扭转试验机系统,提出一种基于 Solidworks/Matlab 的系统联合建模与仿真方法,通过机构的实体造型建立机构模型并进行仿真。该建模方法具有较高的准确性与便捷性。分别在位置闭环与力闭环控制器的作用下,对系统的响应性能进行仿真分析,验证了液压伺服扭转试验机系统的可行性,为液压扭转试验机系统的设计提供理论依据。

关键词:Solidworks/Matlab 建模;液压伺服扭转平台;系统仿真

中图分类号:TH13 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2013.05.011

Modeling and Simulation of Servo Hydraulic System of Torsional Testing Machine Based on Solidworks/Matlab *

CHEN Zhi¹ GONG Xiansheng^{*,1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract:For the hydraulic servo system of torsional testing machine, a method of modeling and simulation based on Solidworks/Matlab is designed, which is established from the entity structure of the mechanism. This method is of higher accuracy and convenience. With the MATLAB/Simulink, dynamic simulation of the control systems of the forces closed loop and the position closed loop is performed. Simulation results verify the feasibility of the system and provide a theoretical basis for the design.

Key words:solidworks/Matlab; the hydraulic servo system of torsional testing machine; system simulation

1 引言

大型扭转试验机一般采用液压伺服系统驱动,国内外对此展开了广泛的研究^[1,2],但因其体积庞大、制造成本高,如果通过加工样机后对其进行测试,会耗费大量的时间和物料,因此有必要通过模型仿真验证试验机性能,从而有效缩短开发周期,节约成本^[3]。

传统的单纯使用 Matlab 等工具进行系统建模,研究人员往往因模型复杂或建模工具功能单一,在建模过程中不得不忽略很多重要因素,对模型进行简化,但简化后模型难以反映系统的真实特性^[4]。同时,在建模过程中需要设置大量参数,降低了建模效率。而一些三维建模软件自带的仿真功能较弱,难以满足用户需求。

近年来广泛使用的 Matlab/SimMechanics 工具箱是基于面向对象的建模方法^[5],具有多种模块的连接接口^[6],在机构仿真上得到了广泛应用^[7,8]。它提供一种快捷建模的方法:将 Solidworks 等 CAD 软件通过 CAD 转换器,转换成 XML 格式的文件,然后生成 SimMechanics 模型^[9]。生成的模型具有原三维模型的所有几何特征,无需重新设置,通过仿真可直接得到机构运动数据。与传统的建模方法相比,这种基于 Solidworks/Matlab 的联合建模方法简化了建模步骤,提高了模型准确性,降低了建模的工作强度,更适用于复杂和大型的机构很多研究人员通过该方法对机构进行建模与仿真,如 Hernandez-Santos C^[10]等结合上述软件建立了双足机器人的动力学模型,对模型进行了验证,省去了繁琐的公式和计算,

Li Ying 等^[11]建立了下肢外骨骼模型,并进行了仿真分析,获得了较好的仿真效果。

本文基于上述思想,对扭转试验机系统进行联合仿真,通过 Solidworks 软件建立力转换机构三维实体模型,并结合 Matlab 软件搭建试验机平台系统模型。以惯量、弹簧和阻尼作为系统负载,分别在控制端加载力信号与位置信号,进行扭矩闭环与位置闭环仿真实验,测试系统的响应性能,通过仿真结果验证系统的可行性。

2 液压伺服扭转试验平台分析

液压伺服扭转试验平台由液压系统和力转换机构两部分组成,其中液压系统提供动力源,力转换机构将直线运动转换为旋转运动。液压伺服扭转试验机的工作原理是:将伺服液压缸的活塞杆与力转换机构的一端相连,力转换机构的另一端与被测试件相连。当伺服液压缸给定驱动信号时,活塞杆做往复运动,力转换机构将活塞杆的往复直线运动转换为输出端的转动,带动被测件运动,实现动、静态扭转实验。试验机为大型扭转试验平台,输出扭矩为 0~30 kN·m,输出转角为 $\pm 10^\circ$,其值均可调。

2.1 数学模型

通过建立试验机开环传递函数及力转换机构输出力矩平衡方程,获得系统输入输出之间的关系,为系统模型的控制器参数设计提供理论依据。如图 1 所示为扭转试验机系统原理图。试验机系统由 PID 控制器、放大器、电液伺服阀、液压缸、动力源、力转换机构、传感器和负载组成。其中,力转换机构是基于逆滚珠螺旋传动原理的一种大扭矩力转换机构。输入端为螺杆,与液压缸的输出杆相连,可沿其轴向做平移运动,并通过螺旋套筒与输出端的负载连接。螺旋套筒在输入端的带动下做旋转运动。为避免自锁,设计较大的

* 国家自然科学基金(51175525),重庆大学机械传动国家重点实验室自主研究基金(0301002109137)资助

** E-mail: cqxsong@cqu.edu.cn

螺旋升角,力转换机构的输出扭矩 T_c 可以表示为:

$$T_c = \frac{\eta F_c d \tan \alpha}{2}$$

(1)

式中, F_c 为力转换机构所受到的轴向推力; d 为滚珠螺旋机构中径; α 为滚珠螺旋机构的螺旋升角; η 为滚珠螺旋机构的传动效率。

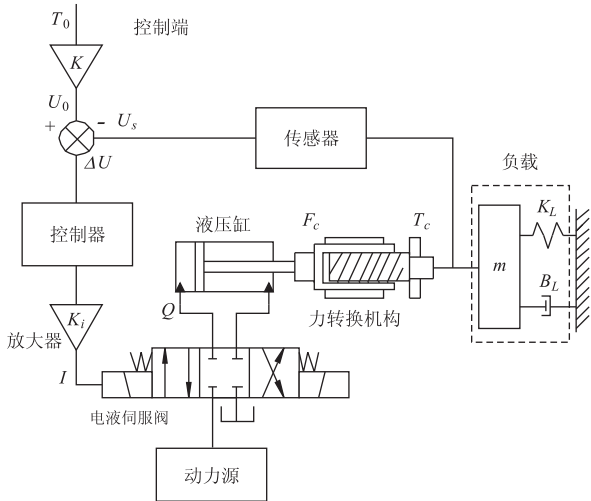


图1 扭转试验机系统原理图

Figure 1 The system principle diagram of torsional testing machine
为反映系统本身的特性以及系统参数对输出的影响,经计算得到电液伺服阀的传递函数^[12]近似为:

$$\frac{X_v}{I} = \frac{K_v}{T_v s + 1}$$

(2)

式中, X_v 为电液伺服阀位移, m ; I 为电液伺服阀电流, A ; K_v 为伺服阀增益, $m^3/(s \cdot A)$; T_v 为伺服阀时间常数, s ;

负载压降对电液伺服阀位移传递函数为:

$$\frac{P_L}{X_v} = \frac{\frac{K_q}{K_{ce}} (\frac{s^2}{\omega_m^2} + \frac{2\xi_m s}{\omega_m} + 1)}{(\frac{s}{\omega_r} + 1) (\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0 s}{\omega_0} + 1)}$$

(3)

式中, K_q 为伺服阀的流量增益, $(m^3/s)/m$; K_{ce} 为总流量-压力系数, $(m^3/s)/Pa$; ω_m 为负载弹簧与质量构成的机械固有频率, rad/s ; ω_r 为刚度与阻尼系数比, rad/s ; ω_0 为液压弹簧、负载弹簧与质量固有频率, rad/s ; ξ_m 为负载弹簧与质量构成振动系统阻尼比; ξ_0 为液压阻尼比;

由式(2)~(3)可得试验机的开环传递函数为:

$$\frac{U_s}{\Delta U} = \frac{AK_A K_v K_f K_T \frac{K_q}{K_{ce}} (\frac{s^2}{\omega_m^2} + \frac{2\xi_m s}{\omega_m} + 1)}{(T_v s + 1) (\frac{s}{\omega_r} + 1) (\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0 s}{\omega_0} + 1)}$$

(4)

式中, U_s 为力传感器输出的反馈电压, V/N ; A 为液压缸推杆位移与输出力转换系数, n/N ; K_A 为放大器增益, A/V ; K_f 为力传感器系数, V/N ; K_T 为力矩转换系数, $(N \cdot m)/N$ 。

负载可以表示为惯量、弹簧和阻尼,其力矩动态平衡方程为:

$$T_c = J_L \frac{d^2}{dt^2} \theta_c(t) + B_L \frac{d}{dt} \theta_c(t) + K_L \theta_c(t)$$

(5)

式中, T_c 为负载力矩, $N \cdot m$; θ_c 为负载旋转角度, rad ; J_L 为负载转动惯量, $kg \cdot m^2$; B_L 为负载粘性阻尼系数, $(N \cdot m)/(rad/s)$; K_L - 负载刚度系数, $(N \cdot m)/rad$ 。

由传递函数可知,系统为 0 型系统,由一个惯性环节和两个二阶积分环节组成,该系统在稳定性、精度和快速响应性之间存在矛盾,因此选用 PID 控制器校正^[13]。

2.2 系统建模

在液压伺服扭转试验机系统中,液压系统可由 Matlab/Simhydraulics 模块得到准确的模型,只对力转换机构建立三维实体模型。系统建模流程如下^[14]:

1)在 Solidworks 软件中建立力转换机构三维实体模型,生成 Matlab 可以识别的 XML 文件,该文件包含模型的所有信息;

2)分别在 Solidworks 软件和 Matlab 软件中安装对应的插件,建立链接后,在 Matlab 命令窗口运行“import_physmod”命令,导入上一步生成的三维实体模型,系统将生成对应的 SimMechanics 模块,而且会自动设置构件的参数。添加必要的驱动及检测模块;

3)在 Matlab/Simhydraulics 中建立液压伺服系统模型,设置模型参数,根据 2.1 节分析结果,添加 PID 控制器与惯量、弹簧和阻尼的负载模型;

4)将 SimMechanics 模块导入 Simhydraulics 伺服系统模型中,连接并运行程序。

建立的力转换机构 Solidworks 模型如图 2 所示。由上述步骤建立的试验机系统 Matlab 模型如图 3 所示:“SimMechanics system”模块为 Solidworks 软件自动生成的模型,其中输出端螺旋杆的 SimMechanics 模型如图 4 所示。

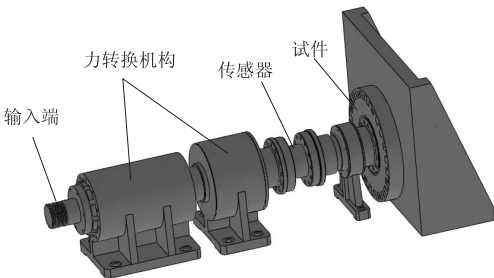


图2 力转换机构 Solidworks 三维模型图

Figure 2 3D Solidworks model of the force switching mechanism

3 仿真结果分析

为测试系统性能,在力转换机构末端分别连接角度传感器模块和力矩传感器模块,测量力转换机构的转角和扭矩。通过位置闭环和扭矩闭环实验进行测试。仿真主要参数如表 1 所示。

表1 实验仿真参数

Table 1 Experimental simulate parameters	
参数名	数值
负载粘性阻尼系数 B_L , $kN \cdot m/(rad/s)$	5
负载转动惯量 J_L , $kg \cdot m^2$	2.5
负载刚度系数 K_L , $kN \cdot m/rad$	100
伺服放大器增益 K_A , A/V	0.01

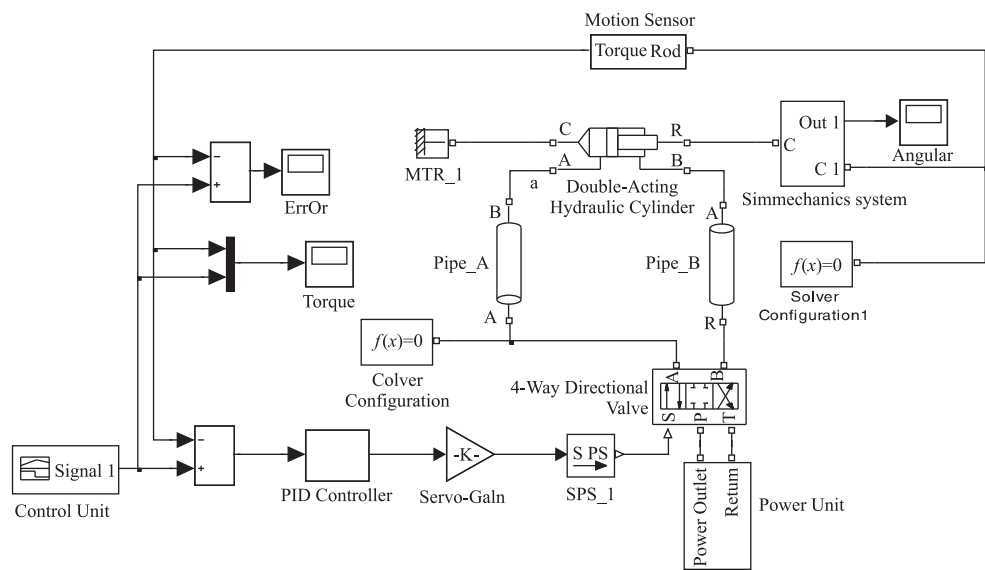


图 3 试验机系统 Matlab 模型
Figure 3 Matlab model of testing machine

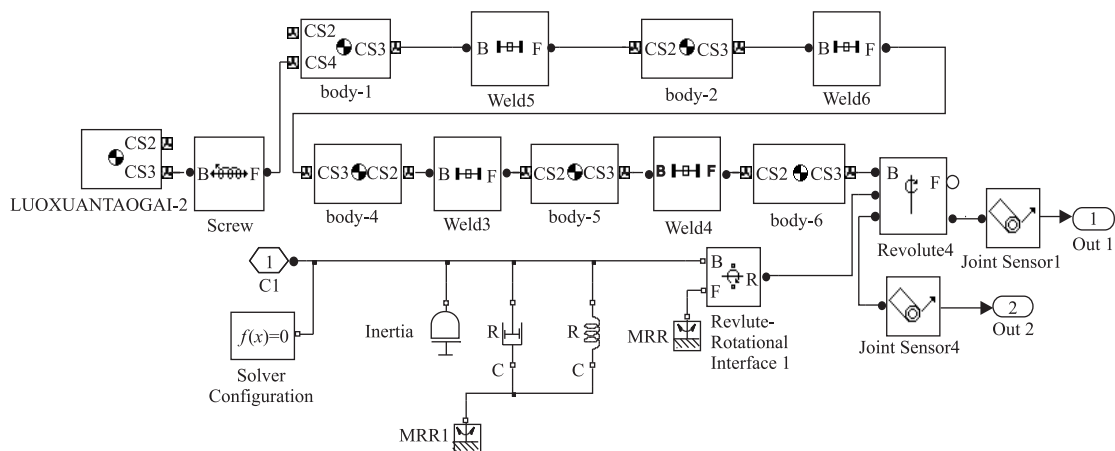


图 4 输出端螺旋杆的 SimMechanics 模型
Figure 4 SimMechanics model of screw rod on the output

当系统加载位置阶跃信号分别为 5° 和 10° , 周期为 1 s , PID 控制器的比例、积分和微分系数分别设置为: 1.35 、 0.2 和 0.004 时, 对系统位置的跟踪情况进行仿真。当系统加载力矩阶跃信号分别为 $20\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $30\text{ kN}\cdot\text{m}$, 周期为 0.03 s 、 0.06 s , PID 控制器的比例、积分、微分系数分别设置为: 2.1 、 0.0025 和 0 时, 对系统的力矩跟踪情况进行仿真, 得到的仿真曲线如图 5 所示。

由图 5 可知, 在位置闭环试验中, 给定转角为 5° 时, 反馈信号的响应时间为 0.06 s , 超调量为 0.03° ; 稳态误差为 0.02° , 精度分别为 0.6% 和 0.4% 。给定转角为 10° 时, 反馈信号的响应时间为 0.08 s , 超调量为 0.04° , 稳态误差为 0.03° , 精度分别为 0.4% 和 0.3% ; 在扭矩跟踪实验中, 给定信号为 $20\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时, 反馈信号的响应时间为 0.008 s , 超调量为 $0.03\text{ kN}\cdot\text{m}$, 稳态误差为 $0.01\text{ kN}\cdot\text{m}$, 分别为 0.15% 和 0.05% , 给定信号为 $30\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时, 反馈信号的响应时间为 0.02 s , 超调量为 $0.03\text{ kN}\cdot\text{m}$, 稳态误差为 $0.02\text{ kN}\cdot\text{m}$, 分别

为 0.1% 和 0.07% 。通过位置闭环跟踪和力闭环跟踪效果实验可知, 系统通过 PID 控制器校正, 在响应时间、超调量、稳态误差方面均取得较满意的结果, 证明了液压伺服扭转试验机系统的可行性。

4 结束语

本文基于 Solidworks/Matlab 对液压伺服扭转试验机进行联合建模与仿真, 得到以下结论: 首先通过试验机系统的数学模型分析了系统的性能和控制器的需求。由此建立基于 Solidworks/Matlab 的试验机完整系统模型, 实现 Solidworks 与 Matlab 软件的无缝集成。该方法利用三维实体模型自动生成 Matlab 仿真模型, 直接获得机构参数, 通过添加必要的驱动、检测、输入输出模块后即可进行模型仿真, 提高了建模效率。同时, 建立的模型准确的反映了系统的特性, 如机构的形状、质量、密度等要素。最后, 为测试系统性能, 进行了基于位置闭环和扭矩闭环的控制仿真结果表明该系统经过

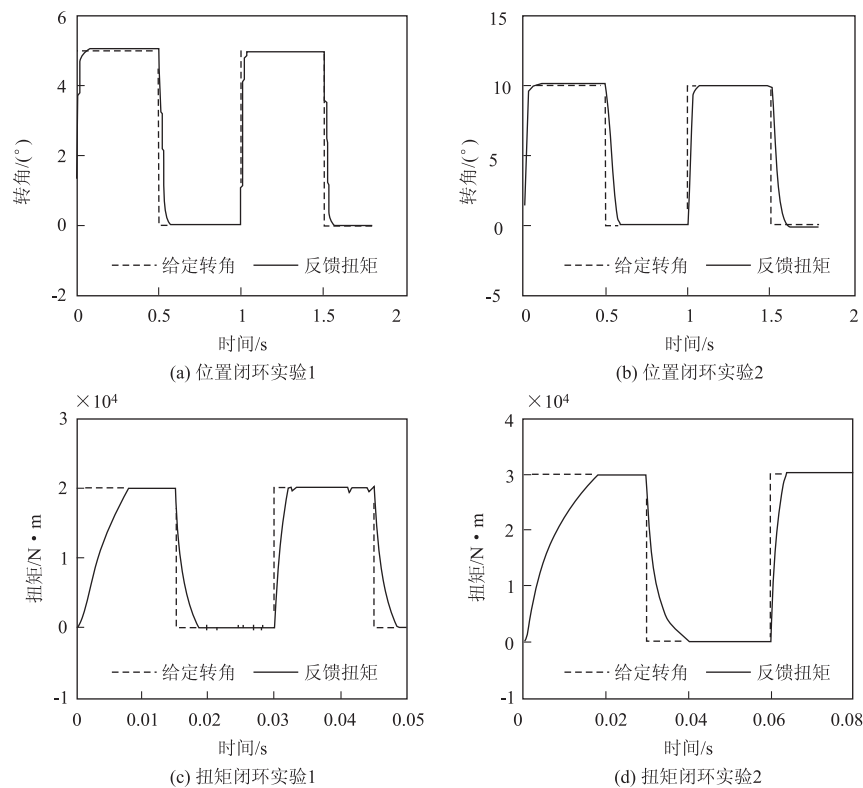


图5 位置、扭矩跟踪仿真计算结果

Figure 5 Simulation result of location,torsion tracking test

PID 控制器的校正后具有较好的位置和力矩跟踪效果。本文的研究验证液压伺服扭转试验机系统的可行性,也为实现复杂机电液一体化系统在 Solidworks/Matlab 平台下的仿真提供一个新的研究思路。

参考文献

[1]梁蕊. 微机控制扭转材料试验机系统的研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[2]LI Y. A New Control Algorithm for Hydraulic Universal Testing Machine Based on Extenics[C]. Computational Intelligence and Communication Networks (CICN),2012 Fourth International Conference on IEEE,2012;681-684.

[3]邓小东,龚宪生,刘志强,等. 摆振疲劳试验机伺服系统模糊 PID 控制半实物仿真研究[J]. 控制与检测,2010(10):67-74.

[4]赵建玉,王旭东,何芳,等. 电液伺服疲劳试验机的计算机控制系统研究[J]. 仪器仪表学报,2002(3):320-323.

[5]BORUTZKY W. Bond Graph Modeling from an Object Oriented Modeling Point of View[J]. Simulation Practice and Theory,1999,7 (5-6):439-461.

[6]薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[7]谢志江,毕军,聂博文,等. 基于 SimMechanics 的 6-PTS 并联机构仿真与分析[J]. 世界科技研究与发展,2012,34(2):265-268.

[8]] WU Haidong, Xu H B. Motorcycle Modeling with SimMechanics [J]. Advanced Materials Research,2012(605-607):673-678.

[9]葛挺,王海名,陆云凤. CAD 软件与 Matlab/SimMechanics 接口问题研究[J]. 机电信息,2011(24):201-202.

[10]HERNANDEZ-SANTOS C, SOTO R, RODRIGUEZ E. Design and Dynamic Modeling of Humanoid Biped Robot e-Robot [C]. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA),2011 IEEE. IEEE,2011;191-196.

[11]LI Y, WANG X, XU P, et al. SolidWorks/SimMechanics-Based Lower Extremity Exoskeleton Modeling Procedure for Rehabilitation [C], World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering,2012, Beijing, China. Springer Berlin Heidelberg,2013;2 058-2 061.

[12]梁利华. 液压传动与电液伺服系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.

[13]江桂云,王勇勤,严兴春. 液压伺服阀控缸动态特性数学建模及仿真分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(5):195-198.

[14]面向科学计算的 Matlab[EB/OL]. 2013-3-11. <http://www.mathworks.cn>.

作者简介

龚宪生(1956-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:机械振动分析及控制、机械传动智能化设计及应用。