

扭振系统试验方案的可行性仿真验证

尹猛^{1,2}, 贺云^{1,2}, 徐志刚¹, 张世轩³

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了考核实验系统对对日定向装置的加载精度, 提出了扭振系统试验方案。为了验证用扭振系统试验方案考核加载精度的可行性, 在忽略扭杆挠性与摩擦力下建立其动力学与控制系统模型进行仿真, 在考虑扭杆挠性与摩擦力下建立 Adams 模型进行仿真, 得到仿真结果并对其进行分析。负载扭矩在幅值达到 30 Nm 时, 以一定频率变化的扰动扭矩都在 2 Nm 以下, 满足加载精度验证方案可信度条件, 因此试验方案合理可信。通过仿真, 加深了对扭振系统特性的认识, 验证了通过扭振系统试验方案考核加载精度的可行性, 降低了制作实体样机的风险与成本。

关键词: 对日定向装置; 扭振系统; 可行性; 仿真验证

中图分类号: V448.22

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3206-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808047

Simulation and Verification of Feasibility for the Torsional Vibration System Test Scheme

Yin Meng^{1,2}, He Yun^{1,2}, Xu Zhigang¹, Zhang Shixuan³

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To test the loading accuracy of the directional device for the experiment system, a test scheme of torsional vibration system is proposed. To verify the feasibility for assessing the loading accuracy through the test scheme, a dynamics and control system model is established and simulated in the condition of ignoring torsion bar flexibility and friction; an Adams model is established and simulated in consideration of the torsion bar flexibility and friction. Both simulation results are obtained and analyzed. When the load torque amplitude reaches 30Nm, the disturbance torques under a certain frequency are all below 2Nm, which meets the requirements of loading accuracy. It shows that the test scheme is reasonable and credible. The test scheme is verified by simulation, which reduces the risk and cost of manufacturing physical prototype.

Keywords: sun orientation device; torsional vibration system; feasibility; simulation verification

引言

空间站既是人类开发和利用空间资源的独特

平台, 也是载人航天技术发展的重要里程碑^[1], 太阳能帆板是整个空间站能量的来源, 通过对日定向装置保持其对日定向具有重要意义。

为了考核所研制对日定向装置的运动控制性能和在轨工作可靠性, 需要在地面建立对日定向实验系统来测试对日定向装置的动态特性^[2-3]。为了保证测试的准确性, 需要提前通过其他方案来完成



收稿日期: 2016-11-07 修回日期: 2017-06-27;
作者简介: 尹猛(1992-), 男, 山东泰安, 硕士生, 研究方向为机器人与工业自动化; 贺云(1979-), 男, 辽宁沈阳, 博士生, 副研究员, 研究方向为航天地面仿真设备; 徐志刚(1971-), 男, 辽宁沈阳, 博士, 研究员, 研究方向为机器人机构学。

http: www.china-simulation.com

• 3206 •

对试验系统的验证,为此,提出了扭振系统试验方案,并通过仿真来验证方案的合理性以降低制造物理样机的成本与风险。

扭振系统多应用于汽车传动^[4],利用扭振系统来验证对日定向装置实验系统国内外尚属首次。国内外对虚拟样机与机电系统仿真进行了大量研究^[5-8],Matlab 与 Adams 的仿真得到了广泛应用^[9-12]。仿真的难点在于系统地考虑机械和控制两大组成部分,尽可能建立较为完整和真实的虚拟样机以保证仿真结果具有较好的参考性。

针对上述情况,本文提出了扭振系统试验方案,在忽略扭杆挠性与摩擦力下,建立其动力学与控制系统模型进行仿真,在考虑扭杆挠性与摩擦力下建立 Adams 模型进行仿真,并对仿真结果进行了分析。结果表明,负载扭矩曲线在幅值达到 30 Nm 时,以一定频率变化的扰动扭矩都在 2 Nm 以下,满足加载精度验证方案可信度条件,因此试验方案合理可信。

1 对日定向装置试验原理

空间站对日定向装置试验系统采用半物理仿真的方法,由加载电机实时生成驱动机构与柔性负载间相互耦合的作用力矩,代替大型太阳能帆板对对日定向装置施加加载力矩。通过再现驱动机构在各种工作模式和驱动不同柔性负载时的动态特性,测试、考核对日定向装置驱动柔性负载时的动态控制性能。

对日定向装置半物理试验系统模拟加载对象为实际太阳能帆板,但由于实际太阳能帆板特性非常复杂,为多自由度柔性系统,其特性难以认识清楚。因此加载精度考核试验利用特性已知的单自由度扭转振动系统模拟太阳能帆板,利用其在转动过程中可实际精确测量的对驱动机构的扰动扭矩模拟太阳能帆板对驱动机构的扰动扭矩。如图 1 所示,通过单自由度扭振系统的加载力矩曲线与动力学模型驱动的加载电机的力矩曲线作对比,从而验证半物理试验系统的加载精度。

2 扭振系统试验方案可行性分析

对日定向装置半物理试验系统如图 2 所示,系统主要由支撑平台、扭杆、气浮转台、惯量调整单元及光电传感器组成。弹性扭杆为扭振系统中的关键部件,上下扭杆轴线与气浮轴承回转中心同轴,上扭杆下部及下扭杆上部通过连接工装与气浮轴承转动端固定,上扭杆上部通过连接工装固定在试验系统支持架体上,下扭杆下部通过弹性联轴器可与驱动电机驱动轴连接。惯量调整单元由成正交布置的支撑梁及杠铃盘组成,可通过增加及减少杠铃盘数量减少质量,或通过调整杠铃盘距离中心的距离来调整系统惯量。采用气浮转台可避免机械摩擦对扭振系统频率的影响,使扭杆的阻尼仅包括扭杆的内部阻尼。光电传感器可实时测量记录系统扭振周期,可实现系统固有频率的精确调整。

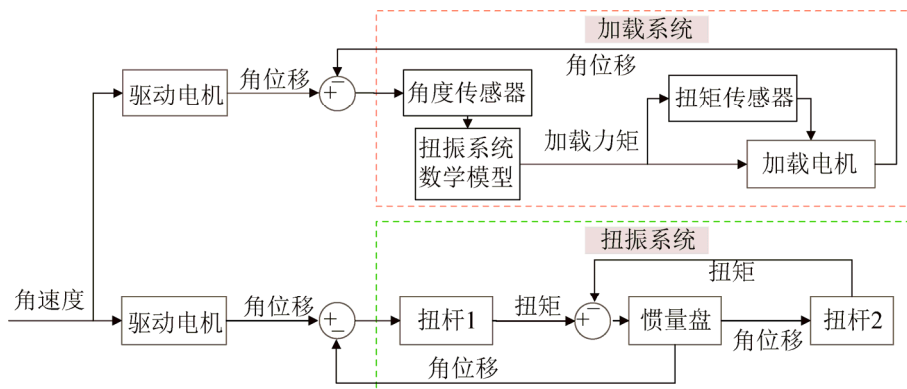


图 1 加载有效性验证原理
Fig. 1 Principle of load validation

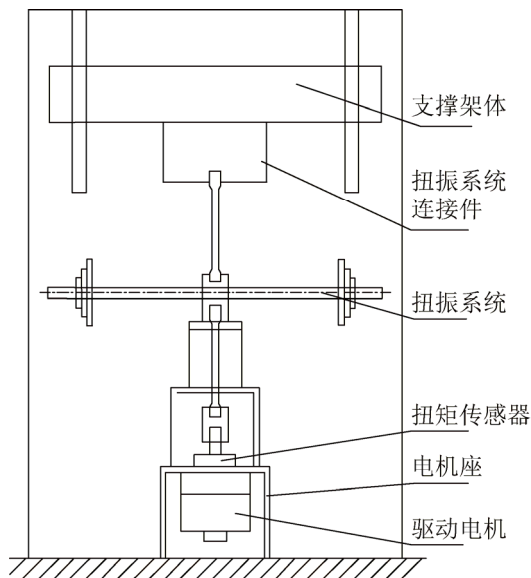


图2 扭转系统结构图
Fig. 2 Structural diagram of torsion system

满足如下条件即表明扭振系统试验方案考核加载精度可行:加载扭矩幅值应大于 30 Nm;当驱动机构以一定的转速曲线转动时,激励不同频率的扭振系统产生受迫振动,驱动机构应在某一时间段内产生与扭振系统固有频率一致的扰动负载扭矩;以一定频率变化的扰动负载扭矩幅值应大于要求控制精度 1Nm,否则变化幅值小于控制精度,不具有验证意义;扭转角度应不小于 8°,既在扭杆最大可变形范围内,又可提供一定的验证时间。

3 数学模型的建立及仿真

3.1 扭振系统数学模型的建立

扭振系统由惯量盘和两扭杆组成,如图3所示,不考虑扭杆挠性,设扭杆刚度分别为 k_1 和 k_2 ,惯量盘惯量为 J ,驱动电机输出端转角为 θ_m ,惯量盘转角为 θ_s 。当驱动电机匀速转动时,扭振系统对电机的反作用力矩是 T_m ,忽略摩擦对系统的影响。

扭振系统的动力学推导过程如下:

$$k_1(\theta_m - \theta_s) = T_m \quad (1)$$

$$k_1\theta_m = J\ddot{\theta}_s + (k_1 + k_2)\theta_s \quad (2)$$

初始速度、初始加速度为 0,进行拉氏变换得:

$$\theta_s(s) / \theta_m(s) = \frac{k_1}{Js^2 + (k_1 + k_2)} \quad (3)$$

$$T_m(s) = k_1\theta_m(s)\left(1 - \frac{k_1}{Js^2 + (k_1 + k_2)}\right) = \theta_m(s) \frac{k_1(Js^2 + k_2)}{Js^2 + (k_1 + k_2)} \quad (4)$$

系统动态扰动扭矩为:

$$T_d = \theta_m \frac{Js^2 k_1}{Js^2 + k_1 + k_2} \quad (5)$$

扭振系统的固有频率和周期为:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_s}{k_1 + k_2}} \quad (6)$$

由数学模型建立 Simulink 仿真模型如图 4(a)所示。其中,杆1长度 L_1 为 100 mm,杆1直径 D_1 为 11.8 mm,杆1刚度 K_1 为 1433 N·m/rad,杆2刚度 K_2 为 358 N·m/rad,惯量盘惯量 J_s 为 181 kg·m²。

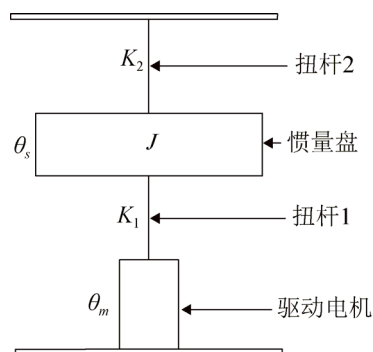


图3 力学模型简图
Fig. 3 Diagram of mechanical model

3.2 驱动电机模型

驱动电机是扭振系统及加载系统的运动输出执行环节,驱动电机一般由高速小惯量的直流电动机和减速环节等组成。驱动电机在经过减速器后,通过扭矩传感器分别与扭振系统及加载电机连接。

从系统输入 U 到输出 θ_r 的开环传递函数:

$$\frac{\theta_r(s)}{U(s)} = \frac{K_{PWM}K_{T1}}{J_r L_r s^3 + (R_r J_r + B_r L_r) s^2 + (B_r R_r + K_{T1} K_{e1}) s} \quad (7)$$

式中: U 为直流伺服电机电枢电压, R_r 为直流伺

服电机电枢回路总电阻, L_r 为直流伺服电机回路总电感, θ_r 为直流伺服电机角位移, K_{e1} 为直流伺服电机反电动势系数, K_{T1} 为直流伺服电机转矩系数, J_r 为等效转动惯量, B_r 为直流电机阻尼系数。

PWM 脉宽调节装置由脉宽调制器和变换器组成, 虽然调制的频率很高, 但是变换电压要到下一个周期才能改变, 因此脉宽调节装置相当于延时环节, 其传递函数为:

$$G_{PWM} = K_{PWM} e^{-T_{PWM}s} \quad (8)$$

$$K_{PWM} = u_d / u_c \quad (9)$$

式中: G_{PWM} 为 PWM 脉宽调制传函, K_{PWM} 为驱动环节放大系数, u_d 为 PWM 变换器的输出电压, u_c 为脉宽调制器的控制电压。由于式中包含指数函数, 使得系统为非最小相位系统。为便于分析, 将其按泰勒级数展开, 由于 PWM 周期很小, 常用的开关频率为 10 kHz, 因此忽略上式中的高阶项, 脉宽调节装置近似为一阶惯性环节, 其传函为:

$$G_{PWM} = K_{PWM} e^{-T_{PWM}s} = \frac{K_{PWM}}{1 + T_{PWM}s + \frac{(T_{PWM}s)^2}{2!} + \frac{(T_{PWM}s)^3}{3!} + \dots} \approx \frac{K_{PWM}}{T_{PWM}s + 1} \quad (10)$$

采用转速、电流反馈双闭环控制驱动电机, 其闭环数学模型如图 4(b)所示。其中 T_{PWM} 为 PWM 驱动环节延时周期, 电机回路总电感 L_r 为 82.1 mH, 电机回路总电阻 R_r 为 5.553 Ω , 反电动

势系数 K_{e1} 为 12.45 V·s/rad, 力矩常数 K_{T1} 为 38.07 N·m/A, 电机阻尼系数 B_r 为 0.001 N·m·s/rad, 等效惯量 J_r 为 0.1043 kg·m²。

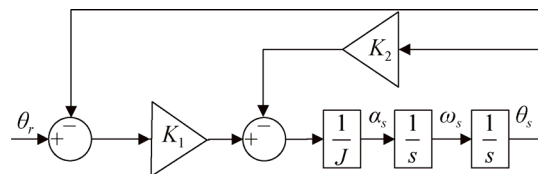
3.3 加载电机模型

加载系统的输入为由上位机计算得到的加载力矩指令, 输出为承载对象受到的实际力矩, 采用力矩、电流反馈双闭环控制加载电机, 其数学模型如图 4(c)所示。其中, T_m 为加载力矩指令, K_T 为电机转矩系数, K_e 为反电势系数, L_m 为电机线电感, R_m 为驱动电机线电阻, J_m 为转子转动惯量, B_m 为摩擦阻力系数, K_f 为电流反馈系数, 各参数数值对应与驱动电机相同。

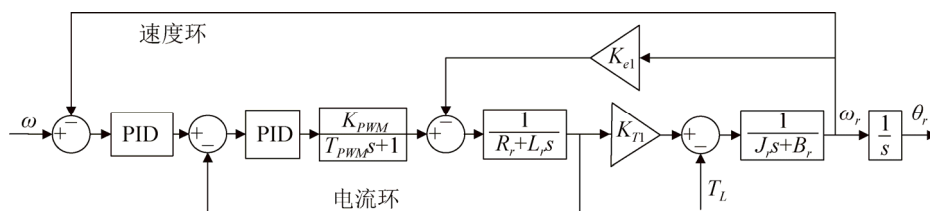
3.4 仿真及结果分析

建立实物考核模型与对拖模型, 分别通过调整扭振系统惯量及刚度构建不同频率的扭振系统, 在相同激励的情况下仿真分析各扭振系统的扰动扭矩。取扭振系统的激励为速度阶跃曲线, 阶跃速度为 0.3°/s, 通过更换扭杆调整扭振系统刚度与惯量实现对 0.5 Hz、1 Hz、1.5 Hz、2 Hz 太阳能帆板的仿真, 选取 0.5 Hz 时扭振系统加载扭矩曲线与扰动扭矩曲线如图 5(a)~(b)所示。

从仿真结果可以看到, 负载扭矩曲线在幅值达到 30 Nm 的同时, 以一定频率变化的扰动扭矩都在 2 Nm 以下, 满足加载精度验证方案可信度条件, 因此试验方案合理可信。

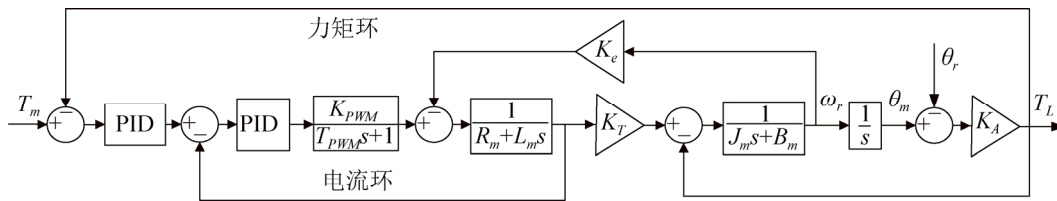


(a) 扭振系统数学模型



(b) 驱动电机闭环对象模型

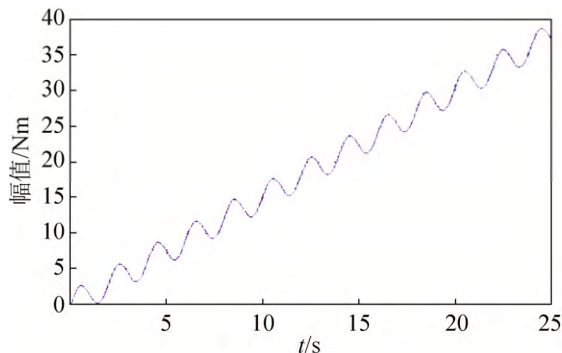
http: www.china-simulation.com



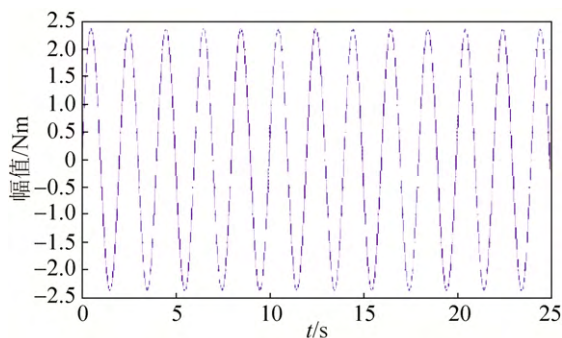
(c) 加载系统结构框图

图4 控制系统模型

Fig. 4 Model of control system



(a) 0.5 Hz 扭振系统加载扭矩曲线



(b) 0.5 Hz 扭振系统扰动扭矩曲线

图5 MATLAB 仿真结果

Fig. 5 Simulation result of MATLAB

4 机电系统联合仿真

考虑到数学模型对细节进行了简化，没有考虑扭杆的挠性与摩擦力等因素对结果的影响。运用 Adams 对系统进行动力学建模，可以更真实反映系统特性，下面运用联合仿真对系统进行进一步验证。

4.1 Adams 动力学模型的建立

通过商用动力学软件进行仿真，其中扭杆为弹性元件，根据实际情况选择合理的参数运用 ANSYS 软件将扭杆转化为柔性体，扭振系统惯量通过附值

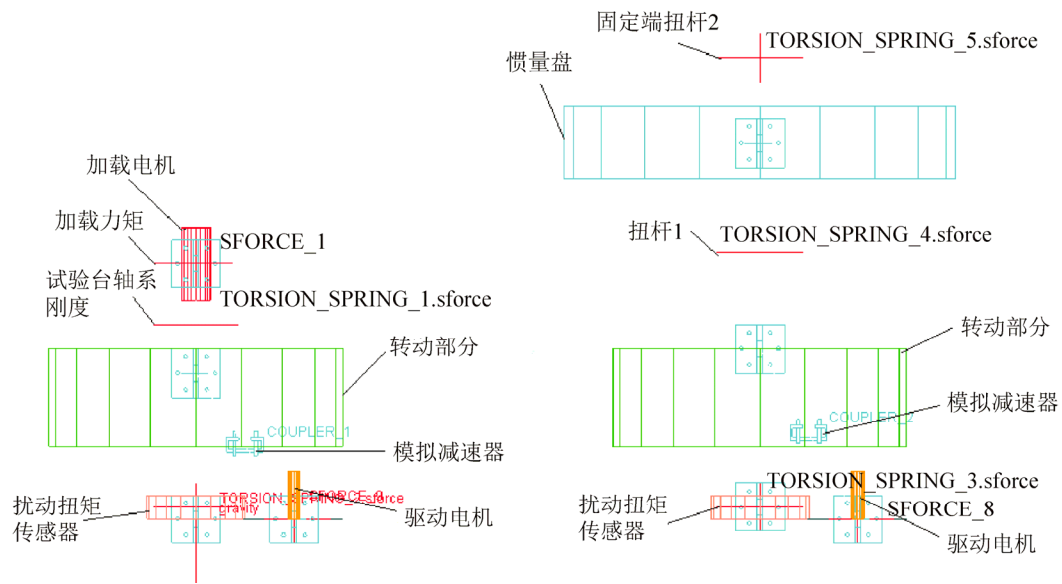
进行设定。设定后添加约束条件，上端扭杆末端为固定约束，下端扭杆末端以上述阶跃运动曲线驱动运动。按同样的方式建立电机加载模型，惯量盘扭振系统动力学用数学模型替代，其它机械装置一致。ADAMS 仿真模型如图 6(a)所示，左侧为半物理仿真考核部分，右侧为实物考核部分。运动过程中实时测量下端扭杆末端负载扭矩曲线，也即电机负载扭矩曲线，看其是否满足验证方案可信度条件。

系统动力学模型接口如图 6(b)所示，输入为扭振系统驱动电机力矩、对拖系统驱动电机力矩和对拖系统加载电机力矩，输出为扭振系统驱动电机角速度、对拖系统驱动电机角速度、对拖系统加载电机角速度、对拖系统驱动电机角度和对拖系统加载电机力矩。

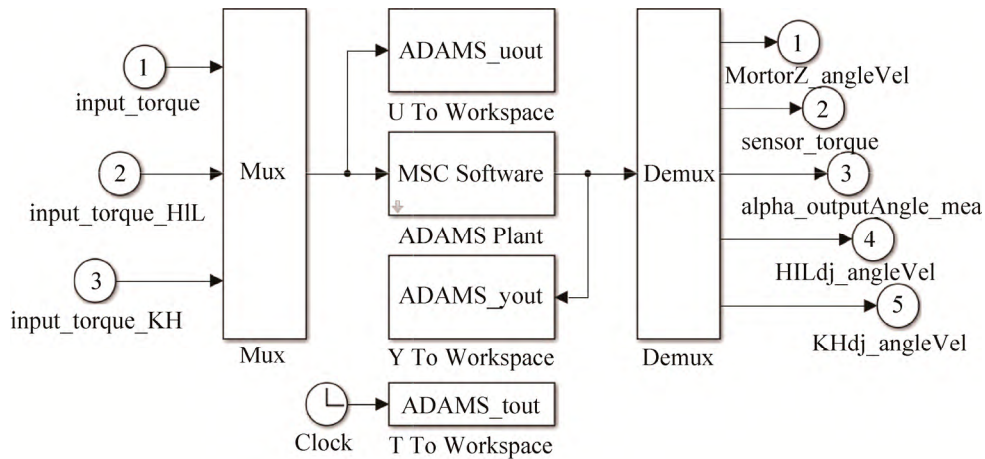
4.2 仿真及结果分析

建立联合仿真模型，设立 Adams 与 Simulink 接口模块，数据交换周期 2 ms，分别通过调整扭振系统惯量及刚度构建不同频率的扭振系统，以接近实际工况的激励来仿真分析各扭振系统的扰动扭矩。取扭振系统的激励为速度阶跃曲线，阶跃速度为 0.3 %/s，选取 0.5 Hz 时扭振系统加载扭矩曲线与扰动扭矩曲线如图 7(a)~(b)所示。

从仿真结果可以看到，由于摩擦力和扭杆挠性的存在，仿真曲线没有数学模型仿真时平滑，但负载扭矩曲线在幅值达到 30 Nm 的同时，以一定频率变化的扰动扭矩都在 2 Nm 以下，仿真结果与数学模型仿真结果具有较好的一致性，两者互为验证，充分说明了扭振系统试验方案能够满足加载精度验证方案可信度条件，因此试验方案合理可信。



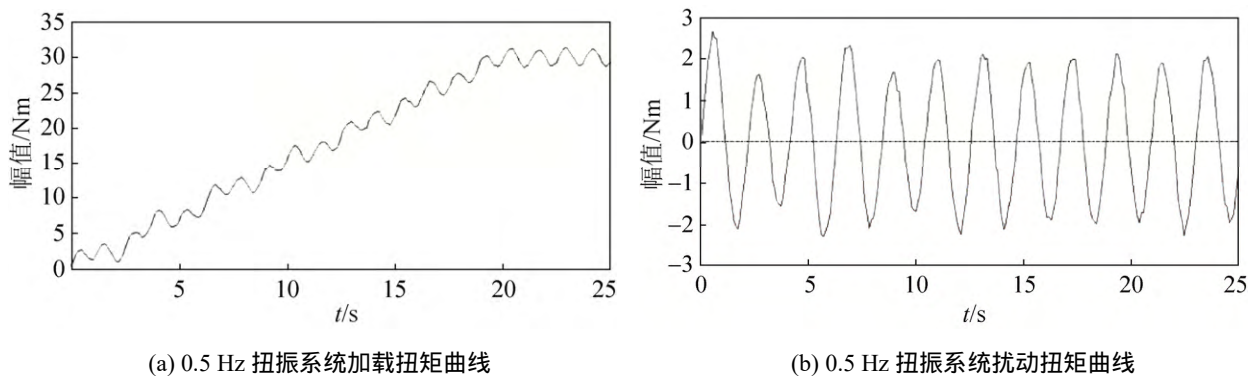
(a) Adams 动力学模型



(b) Adams 动力学模型接口

图 6 系统动力学模型

Fig. 6 Model of system dynamics



(a) 0.5 Hz 扭振系统加载扭矩曲线

(b) 0.5 Hz 扭振系统扰动扭矩曲线

图 7 联合仿真结果

Fig. 7 Results of joint simulation

5 结论

本文提出了扭振系统试验方案,建立扭振系统数学模型及控制系统模型进行仿真,运用软件建立扭振系统动力学模型,对系统进行了交互式仿真,并对仿真结果进行了分析。通过动力学和数学模型两种方式的仿真,加深了对扭振系统特性的认识,验证了用扭振系统试验方案考核加载精度的可行性。结果表明,负载扭矩曲线在幅值达到 30 Nm 时,以一定频率变化的扰动扭矩都在 2 Nm 以下,满足加载精度验证方案可信度条件,因此试验方案合理可信。

通过仿真对试验方案进行验证,降低了制作物理样机的风险与成本,此方法对其他系统的地面性能测试具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 陈善广,陈金盾,姜国华,等.我国载人航天成就与空间站建设[J].航天医学与医学工程,2012,25(6):391-396.
Chen Shan-guang, Chen Jin-dun, Jiang Guo-hua, et al. Achievements of Manned Space Program and Construction of Space Station in China[J]. Space Medicine&Medical Engineering, 2012, 25(6): 391-396.

[2] 徐志刚,白鑫林,王军义,等.基于等效惯量模拟的空间站转位机械臂承载性能测试[J].机器人,2015,37(2):231-236.
Xu Zhi-gang, Bai Xin-lin, Wang Jun-yi, et al. Load Carrying Capacity Test of the Space Station Redocking Manipulator Based on the Equivalent Inertia Simulation Method[J]. Robot, 2015, 37(2): 231-236.

[3] 周军,陈欢龙,刘莹莹,等.多体卫星地面物理仿真的一致性研究[J].宇航学报,2010,31(2):355-360.
Zhou Jun, Chen Huan-long, Liu Ying-ying, et al. Investigation on Consistency between Multi-body Satellite and Ground Physical Simulation System[J]. Journal of Astronautic, 2010, 31(2): 355-360.

[4] 赵孝峰.汽车双质量飞轮扭振系统结构分析与性能研究[D].重庆:重庆大学机械工程学院,2009.
Zhao Xiao-feng. Structure Analysis and Performance Study of Dual Mass Flywheel Torsional Vibration System[D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2009.

[5] 邱彦强,李伯虎,柴旭东,等.多学科虚拟样机协同建模与仿真平台及其关键技术研究[J].计算机集

成制造系统,2005,11(7):901-908.
Di Yan-qiang, Li Bo-hu, Chai Xu-dong, et al. Research on collaborative modeling & simulation platform for multi-disciplinary virtual prototype and its key technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(7): 901-908.

[6] 夏鸿建.机械系统虚拟样机平台建模技术与动力学求解研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
Xia Hong-jian. Research on Modeling and Dynamic Numerical Solution of Mechanism System Virtual Prototyping Platform [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[7] 朱德泉.基于联合仿真的机电液一体化系统优化方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
Zhu De-quan. Study on Optimization Design Method for Mechanical-electrical-hydraulic Integrated System Based on Collaborative Simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.

[8] 马长林,李锋,郝琳,等.基于 Simulink 的机电液系统集成化仿真平台研究[J].系统仿真学报,2008,20(17):4578-4581.
Ma Chang-lin, Li Feng, Hao Lin, et al. Study of Integrated Simulation Platform for Mechanical Electro-hydraulic System Based on Simulink[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(17): 4578-4581.

[9] 李斌茂,钱志博,程洪杰,等.AUV发动机的ADAMS/MATLAB联合仿真研究[J].系统仿真学报,2010,22(7):1668-1673.
Li B M, Qian Z B, Cheng H J, et al. Co-simulation of Engine for AUV in ADAMS and MATLAB[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(7): 1668-1673.

[10] 殷翔,董正筑,王继燕.ADAMS和Matlab交互仿真的机械臂定位控制[J].长春工业大学学报(自然科学版),2005,26(4):332-334.
Yin Xiang, Dong Zheng-zhu, Wang Ji-yan. Position control of mechanical arms based on the ADAMS and Matlab alternant system[J]. Journal of Changchun University of Technology(Natural Science Edition), 2005, 26(4): 332-334.

[11] 郑黎明,黄剑波.基于ADAMS和Simulink的太阳跟踪器联合仿真[J].光学精密工程,2014,22(5):1212-1219.
Zheng Li-ming, Huang Jian-bo. Co-simulation of solar tracker based on ADAMS and Simulink[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1212-1219.

[12] 杨晓强,齐媛,史雷蕾,等.基于Matlab和ADAMS的光电稳瞄系统结构控制联合仿真[J].应用光学,2016,37(5):657-662.
Yang Xiao-qiang, Qi Yuan, Shi Lei-lei. Structure-control co-simulation of electro-optic stabilization system using Matlab and ADAMS[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5): 657-662.