

稳定平台电机负载仿真模型的建立及验证

王乐勇,毛武军,邓方艺,赵文普
(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘要: 稳定平台可以很好地隔离载机飞行过程中的角扰动,而控制系统的设计对其隔离性能的实现至关重要。针对在使用 Simulink 仿真时,数学模型中电机特性以及负载的影响难以确定的问题,通过实验数据对模型校准,以及设计的 3 种不同模拟负载进行了试验验证,从而得到了精确的仿真模型。研究表明,该模型能够真实反应电机及负载的特性,有利于稳定平台控制系统的仿真设计,保证了稳定平台的顺利交付。

关键词: 稳定平台;数学仿真模型;Simulink 工具箱;模拟负载

中图分类号: TP273;TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)07-0831-04

Design and validate of electromotor loading model on stabilization platform

WANG Le-yong, MAO Wu-jun, DENG Fang-yi, ZHAO Wen-pu
(The Air-Air Missile Research Insititute of China, luoyang 471009, China)

Abstract: The stabilized platform can be used to isolate carrier aircraft angle disturbance, so the design of stabilization platform control system is very important to realize the performance of platform. In order to solve the problems that the mathematical model of motor characteristics and the loading is difficult to determine the influence of the problem by using Simulink toolbox, through the experimental data, the model calibration, and the design of three different load simulation were tested, thus the accurate simulation model was obtained. Research results show that the model can true respond motor and load characteristics, and it is favorable for the simulation design of the stabized platform control system, guarantees the smooth delivery of stabilized platform.

Key words: stabilized platform; mathematic model; Simulink toolbox; structural loading

0 引 言

稳定平台不仅能隔离载体(导弹、飞机、战车、舰船)扰动,而且能够不断测量平台空间姿态和位置的变化,精确保持空间姿态,所以在现代武器系统中得到了广泛的应用^[1]。

本研究首先根据对某航空相机稳定平台项目的分析^[2],设计了控制系统框图,然后使用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱进行了数字仿真,通过数字仿真指导控制系统的设计参数,并通过系统调试过程中的试验数据对仿真进行了校正,然后再次通过数字仿真对控制系统进行指导,最终建立准确的数字仿真模型^[3],并实现了陀螺稳定平台的设计。本研究以其中

的一个通道为例,着重说明其数字仿真精确模型的建立及验证。

1 控制系统简介

稳定平台既是一个陀螺稳定平台,同时它又是一个位置随动系统^[4]。通常,在位置伺服控制时,其位置偏差由速度变化引起,如果在位置回路内设置一个速度回路,通过反馈作用抑制速度变化,能够减小甚至消除其造成的位置偏差。与位置回路中通过速度到位置的积分所产生抑制作用不同,速度回路的抑制过程很快,分担了对扰动的抑制功能,而位置回路主要用于位置指令跟踪。这种速度、位置回路构成了高性能运动控制系统的结构^[5]。

根据伺服控制系统的分析,本研究进行了控制模型的建模,如图 1 所示。它包括由功放电路、电机、测速机组成的测速回路;由控制电路、测量放大器、测速回路、陀螺组成的稳定回路;由控制电路、电位计、稳定回路组成的位置回路。控制系统采用以上三环结构实现了系统的闭环控制,有效地提高了系统稳定回路的带宽,从而提高了系统的抗干扰能力和动态指标。本研究模型中除了不能准确确定的模型参数(主要是发生在电机模型及负载因素的影响),其他的电路控制参数可以准确的确定。因此本研究以包含了电机模型及负载因素的测速回路作为研究对象,对其参数进行校正,进而得到准确的模型^[6]。

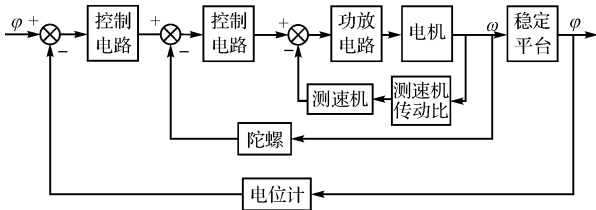


图 1 系统控制框图

2 仿真模型的建立及相关参数的计算

2.1 数学仿真模型的建立

伺服电机一般都是采用定子、转子结构。定子和转子一般由永磁体或绕在铁芯上的线圈构成。永磁体自身存在着磁场,而铁芯通电后也会产生磁场。定子磁场和转子磁场相互作用产生力矩,使电机带动负载运动,从而通过磁的形式将电能转换为机械能。其原理图如图 2 所示。

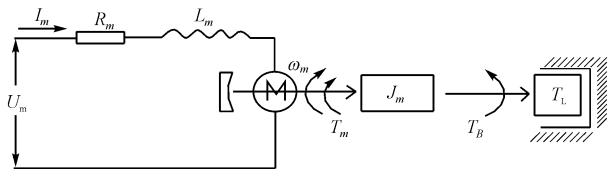


图 2 电枢控制直流电动机原理图

电机统一理论指出:若定子磁势用 \vec{F}_s 表示,转子磁势用 \vec{F}_r 表示,则电机产生的转矩可表示为: $\vec{T} = \vec{F}_s \times \vec{F}_r$ 。建立电机的运动学方程为:

$$\begin{cases} T_m = C_m \times I_m \\ T_m - T_L - T_B = (J_m + J_L) \frac{d\omega_m}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_m —机械时间参数, I_m —电枢电流, C_m —电机力矩系数, ω_m —电机转速, T_L —负载转矩, T_B —粘性摩擦转矩, J_L —负载转动惯量, J_m —电机转动惯量。

且:

$$E_b = K_E \times \omega_m \quad (2)$$

式中: K_E —反电势常数, ω_m —电机转速, E_b —反电势。

电枢回路电势平衡方程为:

$$U_m - E_b = I_m R_m + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (3)$$

电机所需数学模型的参数:电枢电阻 R_m , 电枢电感 L_m ; 电机力矩系数 C_m ; 电机反电势系数 C_e 。

根据以上参数可以建立电机的数学模型如图 3 所示。根据理论推导,当电机参数已知的情况下,其力矩系数 C_m, T_e, R_m, L_m 就可以确定。本研究通过设计的模拟负载去校正模型中其余的参数,最终得到准确的模型^[7]。

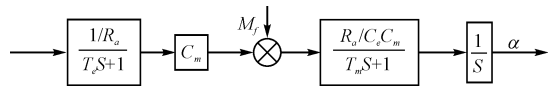


图 3 电机数学模型

2.2 仿真模型参数的校正

为了能够较好地校正电机的机械时间参数 T_m 以及反电势系数 C_e , 本研究对电机空载时进行了测试。当电机空载的转动惯量为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时,理论计算出 $T_m = 0.003 \text{ s}$, 笔者使用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱建立了仿真模型,根据仿真模型得到其开环频率曲线,如图 4 所示,其低频段的增益为 28.2 dB, 下降 -3 dB 处的频率为 26.4 Hz, 此时的相位为 -80.9° 。

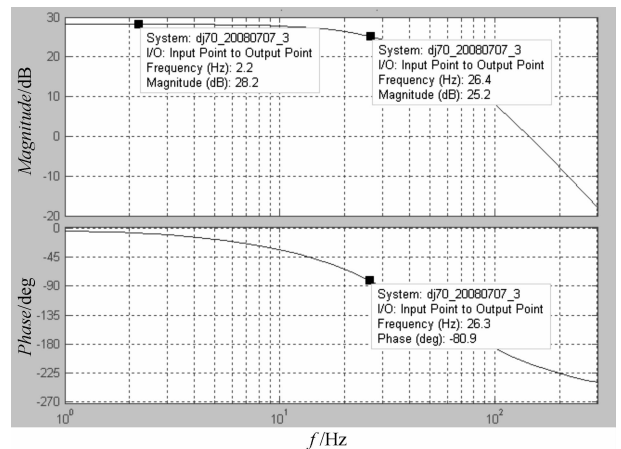


图 4 理论计算的电机空载的仿真结果

本研究使用 Agilent 生产的 35670A 频率特性分析仪,测试电机空载时的开环频率特性 bode 图,如图 5 所示,其低频增益为 16.64 dB, 下降 -3 dB 处的频率为 22.28 Hz, 此时的相位为: $105.8^\circ - 180^\circ = -75.2^\circ$ 。

从实际测试结果与仿真的模型的对比上看,其差

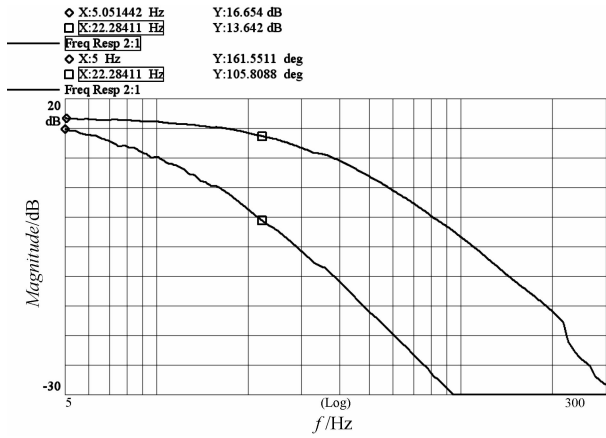


图5 实际的电机空载的实测结果

别较大。经分析,低频增益的误差主要来源于电机设计参数中的 C_e ,其下降 -3 dB 处的频率的差异来源于 C_e 和空载时的转动惯量 J_d 。根据理论模型与实际实验的数据,对数字仿真模型中的 C_e 、 J_d 进行修正,修正后 $C_e = 0.7449$,转动惯量为 $9.9 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。校正后的电机空载时的仿真曲线如图6所示,其低频增益为 16.6 dB,下降 -3 dB 处的频率为 22.1 Hz,此时的相位为: -79.3° 。

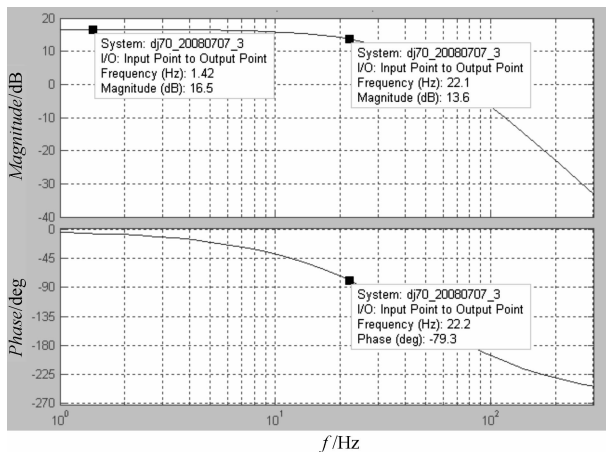


图6 校正后的电机空载的频率特性仿真曲线

3 数字仿真模型的验证

3.1 实验装置及测试方法

根据实际情况,本研究设计了3种不同的模拟负载。模拟测试结构示意图如图7所示,主动轮与电机测速机组相连,通过中间的惰轮模拟实际传动情况,传动比为 $1:2$ 。模拟负载进行了简化设计,其转动惯量分别为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.105 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。使用直接传动的方式驱动负载。利用公式 $T_j = T_j/i^2$ 将其折合到电机轴上的转动惯量分别为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.105 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

测试时,根据图1系统框图中的测速回路控制系统,从测速回路中测速机反馈的加法器上加入控制扫频信号,测速机将电机轴上的转速信号转换为成比例的电压信号,输入到频谱分析仪35670A中,得到测速回路的频率特性曲线,从而对电机的模型进行测试与校准。

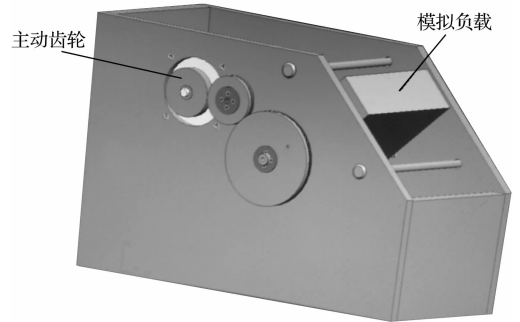


图7 模拟测试结构示意图

本研究根据校正过的模型参数,计算出3种负载分别对应的 T_m 为 0.053 s , 0.104 s , 1.92 s 。因为加入了转动惯量较大的负载,为了提高其控制精度,本研究针对这3种负载测试时,将其开环增益增大为原来的2倍,数字仿真模型中也进行了相应的更改^[8]。

3.2 使用 $T_m = 0.104 \text{ s}$ 负载时的验证

使用 $T_m = 0.104 \text{ s}$ 的负载时,其闭环频率特性 bode 图的仿真结果如图8所示, -3 dB 带宽为 25.2 Hz ,此时的相位为 -54.3° 。使用35670A测试的实际频率特性曲线如图9所示, -3 dB 带宽为 24.88 Hz ,此时的相位为 $122.5 - 180 = -57.5^\circ$ 。理论仿真与实际结果吻合。

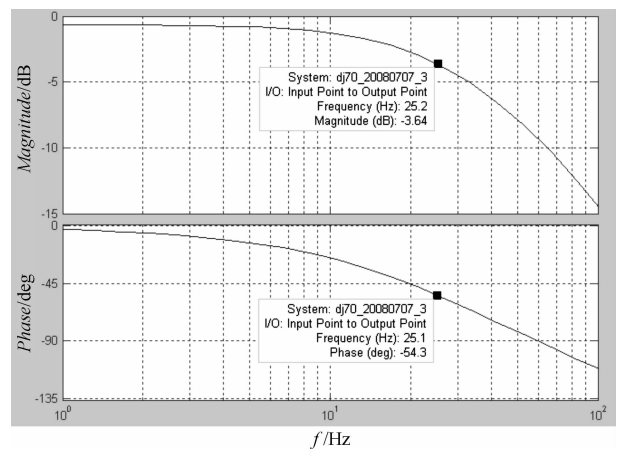


图8 负载 $T_m = 0.104 \text{ s}$ 时的仿真结果

3.3 使用 $T_m = 0.104 \text{ s}$ 负载并增加超前-滞后时的验证

为了验证控制系统的控制方式改变后,数字仿真模型与实际物理模型的结果的一致性,本研究在测速机输出的后一级增加了“超前-滞后”校正环节,从仿

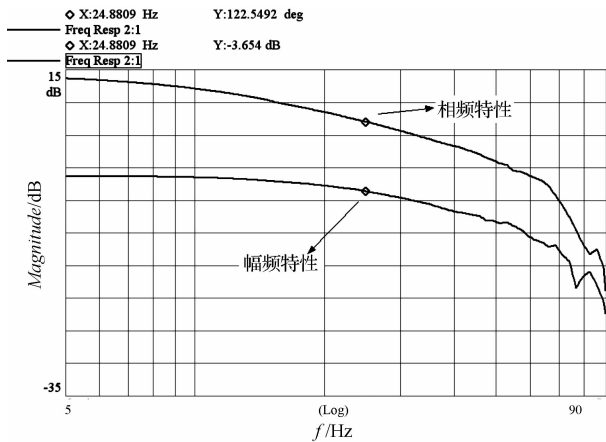


图9 负载 $T_m = 0.104$ s 时的实测结果

真的闭环频率特性曲线中可以得出:其超调量为 2.53 dB,发生的频率点为 8.77 Hz,相位为 -58.8° ; -3 dB 时带宽为 14.7 Hz,此时的相位为 -120° 。实测的频率特性曲线中:超调量为 2.242 dB,发生的频率点为 10 Hz,相位为 $117.2^\circ - 180^\circ = -62.8^\circ$; -3 dB 时带宽为 15.5 Hz,此时的相位为 $59.7^\circ - 180^\circ = -120.3^\circ$ 。理论仿真与实际结果吻合,也验证了在控制回路里面增加相应的控制环节,通过数字仿真能够较好地仿真结果,对其他控制回路的调试具有重要意义^[9-10]。

3.4 使用 $T_m = 1.92$ s 负载并增加超前-滞后时的验证

使用 $T_m = 1.92$ s 的负载时,其闭环频率特性 bode 图的仿真结果中可得出:2 Hz 时的增益为 -5.81 dB,此时的相位为 -79.4° ;5 Hz 时的增益为 -15.7 dB,此时的相位为 -124° 。根据实测的频率特性曲线可以得出:2 Hz 时的增益为 -5.835 dB,此时的相位为 -73.2° ;5 Hz 时的增益为 -16.7 dB,此时的相位为 -122.5° 。理论仿真与实际结果吻合。

3.5 使用 $T_m = 0.053$ s 负载并增加超前-滞后时的验证

使用 $T_m = 0.053$ s 的负载时,其闭环频率特性 bode 图的仿真结果中可得出:超调量为 2.79 dB,发生的频率点为 12.2 Hz,相位为 -56.8° ; -3 dB 时带宽为 20.5 Hz,此时的相位为 -119° 。实测的频率特性曲线得出:超调量为 2.539 dB,发生的频率点为 13 Hz,相位为 $121.7^\circ -$

$180^\circ = -58.3^\circ$; -3 dB 时带宽为 20.8 Hz,此时的相位为 $60.5^\circ - 180^\circ = -119.5^\circ$ 。理论仿真与实际结果吻合。

4 结束语

本研究通过理论分析,建立了稳定平台的测速回路数学模型,通过实验结果对该数学模型中存在的结构以及电机等不能准确确定的参数进行了校正。并设计了 3 种不同的负载,对校正了参数后的模型进行了验证,验证结果说明了校正后的数字仿真模型能够准确的反映控制系统的实际情况。同时,本研究通过在控制回路里面增加控制环节,来验证了控制系统调试时,通过该数字仿真模型能够较好的仿真结果,并利用此模型完成了其他控制回路的调试。

参考文献 (References):

- [1] 郭富强. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.
- [2] 赵育良,许兆林,李开端. 航空 CCD 光电侦察系统的发展现状与展望[J]. 光电子技术,2001,21(4):290-293.
- [3] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [4] 朱涛,鲍德宁,许江宁,等. 航空摄影陀螺稳定平台的嵌入式计算机控制系统[J]. 中国惯性技术学报,2002,10(3):42-45.
- [5] 徐生林,郑敏,卢航远,等. 永磁同步电机直接转矩控制的改进与仿真[J]. 机电工程,2009,26(2):38-41.
- [6] PILLAY P, KRISHNAN R. modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives [J]. Part II: The Brushless DC Motor Drive, 1989,25(2):274-279.
- [7] 李连升. 雷达伺服系统[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [8] RAHMAN M F. A direct torque controlled permanent magnet synchronous motor drive without a speed sensor[C]. Electric Machines and Drives, International Conference IEMD '99,1999.
- [9] 秦继荣,沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [10] WAI R J, SU K H. Adaptive enhanced fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2006,53(2):569-580.

[编辑:张翔]