

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.05.008

基于系统辨识的框架控制系统设计

刘浩伟^{1,2}, 谢长生^{1,2}, 吴丹丽¹

- (1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;
2. 中国航天科技集团公司 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘要:为提高框架系统控制性能,采用系统扫频方法对系统实际模型进行扫频辨识。由于加工和安装工艺等原因,框架不同位置处的摩擦力矩差异较大。研究了固定补偿值摩擦力矩补偿算法和变补偿值积分摩擦力矩补偿算法,并重新进行了扫频。根据辨识得到的模型设计了校正网络,提高了系统控制性能。

关键词:控制系统设计; 强非线性框架系统; 系统辨识; 摩擦力矩补偿算法; 校正网络

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)05-0044-05

Design of Frame Control System Based on System Identification

LIU Hao-wei^{1,2}, XIE Chang-sheng^{1,2}, WU Dan-li¹

- (1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Infrared Detection Technology Research & Development Center, CASC, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to improve the control performance of frame control system, control system frequency-sweeping method is used to identify the system model. Due to the machining technology and installation process, there is large frictional moment difference between different positions of the frame. The friction moment compensation algorithm of fixed compensating value and variable compensating value integration are studied, and frequency sweeping is conducted. Then the identified system model is used to design the corrective network, and the control performance of frame system is improved.

Key words: Control system design; Strongly non-linear frame system; System identification; Friction moment compensation algorithm; Corrective network

0 引言

导引头伺服机构是导引头的一个重要部件,是进行目标探测、识别与跟踪的基础。导引头伺服机构通常采用两轴两框架结构,其主要功能是隔离载体扰动,实现对目标的跟踪。因此框架的控制性能直接影响了导弹的制导精度^[1]。

在控制系统设计时,一般先根据系统结构参数及选型器件的机电参数建立系统的理论模型,再利用理论模型进行控制系统设计和闭环调试^[2]。然

而,实际系统中存在死区和各种处理器解算周期延迟,利用理论模型设计的控制系统调试困难,控制性能难以提高,并直接导致导引头跟踪性能很差。因此,需要采用系统扫频的方法对系统的实际模型进行识别,并为控制系统设计优化提供支持。文献[3]利用 Matlab 的 xPC 组件及机载光电硬件平台搭建了半实物仿真平台,利用系统辨识工具箱对输入输出数据进行了辨识,得到了平台控制系统模型,对控制系统进行优化设计后,提高了机载光电平台的锁定精度。文献[4]针对宽频大尺寸振动台

收稿日期:2017-06-30;修订日期:2017-11-06

作者简介:刘浩伟(1986-),男,硕士,工程师,主要从事导引头系统设计。E-mail:24097526@163.com

动态特性复杂的特点,采用正弦扫频方法对振动台进行了系统辨识,设计了分段 PID 算法,实现了宽频大尺度振动台高精度的扫频控制。文献[5]分析了摩擦力矩对伺服系统的影响,并对相关分析法激励信号进行了补偿,提高了不能忽略摩擦条件下的伺服系统辨识准确性。

本文针对框架系统不同位置处摩擦力矩差异较大的特点,研究了补偿非线性摩擦力矩的方法,克服了系统的死区非线性特性,利用 Matlab 提供的系统辨识工具箱对输入输出数据进行了辨识,获得了系统的模型,并设计了校正网络,改善了系统的控制性能。

1 系统辨识原理分析与方法

所谓系统辨识是指通过分析未知系统的实验或输入输出数据,建立与所测系统等价的数学模型^[6]。设输入序列为 $U(n)$,输出序列为 $Y(n)$,则一个单输入单输出的线性系统可以用 n 阶差分方程描述为

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k U(n-k) - \sum_{k=1}^N b_k Y(n-k) + w(k)$$

式中, $\{w(k)\}$ 为零均值高斯白噪声序列,且有 $E(w(k)w^T(j)) = R_k \delta_{kj}$ 。

系统辨识的目的就是利用输入数据序列和输出数据序列辨识得到模型参数 $\{a_k\}$ 和 $\{b_k\}$ 。系统辨识主要步骤包括^[7-8]:

1) 系统辨识信号产生

输入信号可以采用两种方式产生:一种利用 DSP 处理器指令直接产生;另一种可以利用 Matlab 系统辨识工具箱自带函数 `idinput` 产生数据序列, DSP 定时对数据序列中的数据进行调用。两种方法各有优缺点:利用 DSP 指令产生输入信号编程比较麻烦,但是可以获得任意长的数据序列;而利用 Matlab 自带函数产生输入信号编程方便,但受 DSP 芯片的存储空间限制,数据序列的长度不能太长。

2) 数据预处理

将采集到的系统输入信号和输出信号进行简单的滤波处理以及去趋势项。利用函数 `detrend` 可以去除数据中的线性趋势项。

3) 参数估计

Matlab 系统辨识工具箱提供的系统辨识函数包括 AR、ARX、ARMAX、IVX、`n4sid` 等辨识函数,利用辨识函数进行辨识的关键是确定系统模型阶

次。系统模型阶次可以根据系统结构参数及选型器件机电参数估计的系统理论模型确定;或者采用试凑方法,即利用多个辨识函数分别对系统模型进行辨识,调整模型阶次,直到几个辨识函数得到的系统模型波特图一致性比较高时,认为当前模型阶次接近系统真实阶次。

4) 模型检验与动态仿真

获得系统数学模型后,需要与实际系统进行试验对比,确认模型准确性,并根据需要重新修改模型进行参数估计。Matlab 系统辨识工具箱提供了用于模型验证和仿真的函数。

2 摩擦力矩非线性补偿算法

受系统非线性摩擦力矩影响,扫频后进行模型辨识得到的系统模型与实际系统模型差异较大,需要在系统中加入摩擦力矩补偿算法,以提高系统辨识准确性。

为降低死区影响,研究了固定补偿值摩擦力矩补偿算法和变补偿值积分摩擦力矩补偿算法,补偿系统非线性摩擦力矩影响。

1) 固定补偿值摩擦力矩补偿算法

当框架不动时,输入信号加固定电压 2V(或 -2V);框架运动时撤消补偿。内框摩擦力矩补偿如图 1 所示。

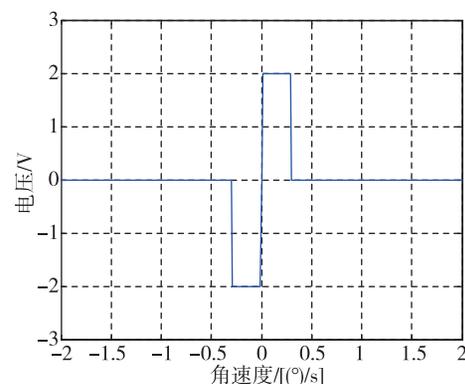


图 1 固定补偿值摩擦力矩补偿算法

Fig. 1 Frictional moment compensation algorithm of fixed compensation value

2) 变补偿值积分摩擦力矩补偿算法

采用变补偿值积分摩擦力矩补偿算法进行摩擦非线性补偿,补偿值为 $1.5V-0.75V-0.4V-0.4V-\dots$ 。当判断框架运动速度超过某个阈值时,认为框架已经克服静摩擦力,开始运动,此时系统逐步减小补偿值,减小的补偿值也是 $1.5V-$

0.75V—0.4V—0.4V—……。变补偿值积分摩擦力矩补偿算法如图2所示。

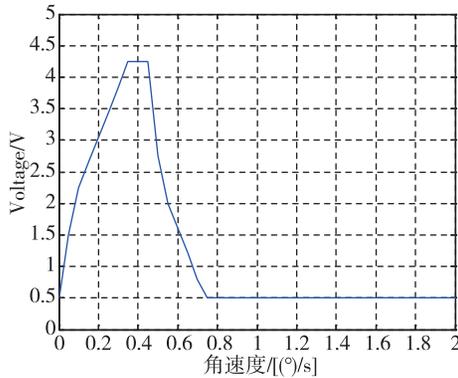


图2 变补偿值积分摩擦力矩补偿算法

Fig.2 Frictional moment compensation algorithm of variable compensation value integration

3 系统模型辨识与校正网络设计

在实物平台上,利用 DSP 对电机进行开环控制,控制框架运动,模拟系统实际工作过程;同时采集框架角位置反馈信号;通过对系统输入、输出信号进行 FFT 分析或拟合运算,计算电机、框架、角位置传感器的开环传递函数。在系统数学模型的基础上,设计校正网络,实现系统控制性能的优化与提高。

3.1 扫频信号产生

扫频输入信号利用 Matlab 自带函数 idinput 产生数据序列,DSP 定时对数据序列中的数据进行调用。试验中利用 idinput 函数产生了高斯随机信号和正弦扫描信号。在 DSP 程序中,每 1ms 输出数据序列中的一个点,即采样周期为 1ms,通过改变对数据序列的采样频率可以改变输入到系统的信号的实际频率范围^[9]。利用 idinput 函数产生的正弦叠加信号和高斯随机信号的时域和频域分布图如图3和图4所示。

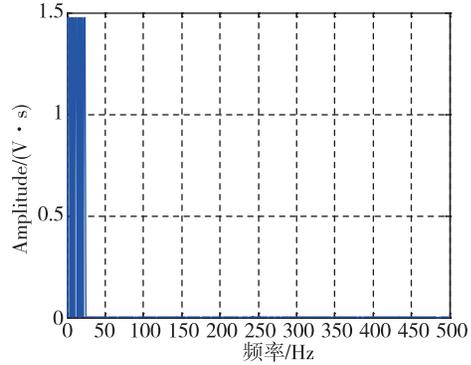
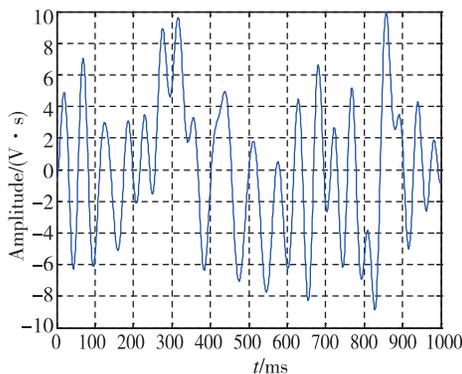


图3 频率为 1Hz~25Hz 的正弦叠加信号时域和频域分布图

Fig.3 Time domain and frequency domain of the sine superposition signal (1Hz~25Hz)

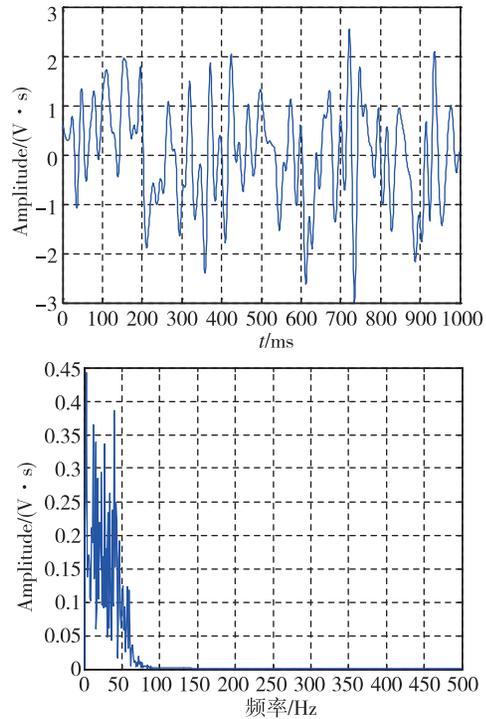


图4 频率为 1Hz~100Hz 的高斯随机信号时域和频域分布图

Fig.4 Time domain and frequency domain of the gauss random signal (1Hz~100Hz)

3.2 无摩擦力矩补偿算法系统模型辨识结果

系统输入为 Matlab 函数产生的正弦叠加信号,利用 DSP 软件将信号转换为框架电机控制量,控制电机运动。利用测试软件通过 RS422 串口通信记录输入电压值及框架角位置传感器反馈的角位置,利用 Matlab 系统辨识函数识别系统模型。改变系统输入信号的幅值,得到系统开环模型的波特图如图5所示。

扫频结果表明:当框架处于不同位置时,系统的强非线性摩擦力矩特性严重影响扫频结果,使得

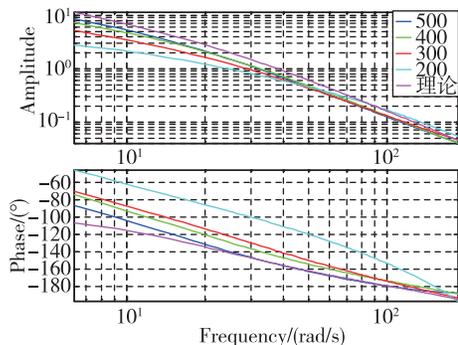


图 5 无摩擦力矩补偿,系统开环波特图

Fig. 5 Open loop bode diagram without frictional moment compensation algorithm

辨识得到的系统波特图失真。为降低非线性摩擦力矩影响,加入摩擦力矩补偿算法,提高系统模型辨识准确度。

3.3 摩擦力矩补偿算法系统模型辨识结果

采用固定补偿值摩擦力矩补偿算法和变补偿值积分摩擦力矩补偿算法后,重新利用不同幅值的正弦叠加信号输入到系统中,扫频并进行系统辨识,得到系统开环模型的波特图分别如图 6 和图 7 所示。

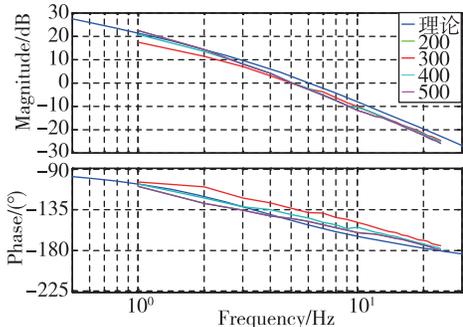


图 6 固定补偿值摩擦力矩补偿算法扫频结果图

Fig. 6 Results of frequency sweeping with frictional moment compensation algorithm of fixed value

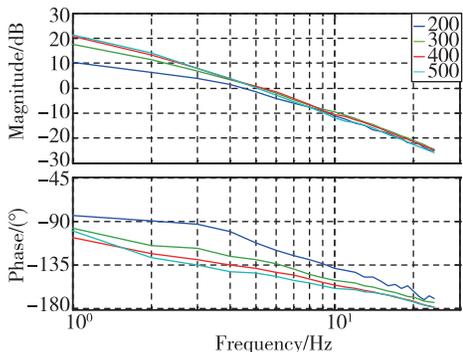


图 7 变补偿值积分摩擦力矩补偿扫频结果图

Fig. 7 Results of frequency sweeping with frictional moment compensation algorithm of variable compensation value integration

3.4 校正网络设计^[10]

对比引入死区补偿前后的扫频结果,引入死区补偿算法后扫频结果一致性明显增强,可以用于模型辨识和系统设计。利用 Matlab 提供的系统辨识函数拟合得到内框传递函数为 $\frac{666007.8512}{s(s+299.6)(s+20.91)}^\circ$ 。

分析系统开环频率特性,系统由于死区等非线性环节的影响,导致系统的相位在中频段快速衰减到 -180° ,当考虑要求系统稳定裕度为 6dB、 30° 时,系统最大截止频率只有 5Hz 左右,系统控制性能很差,需要引入校正网络才能确保系统性能。

该系统可采用超前校正或滞后超前校正来提高系统稳定裕度和开环放大倍数,同时提高截止频率。当系统相位裕度大于 30° ,幅值裕度大于 6dB 时,加入不同的校正网络理论分析结果如图 8 所示。

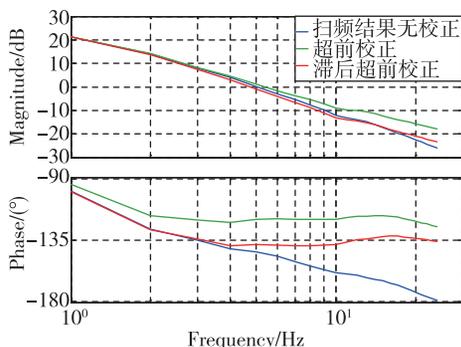


图 8 框架加超前校正网络结果图

Fig. 8 Frequency sweeping results of frame with phase-lead correction network

采用超前校正网络可以大幅提高系统的稳定裕度,但是会放大中高频噪声,对系统性能产生一定影响。采用滞后超前校正网络可以提高系统的稳定域度,同时不会放大系统的中高频噪声。因此,拟采用滞后超前校正网络。

设计内框超前校正网络为 $\frac{0.3333(s+628.3)(s+18.85)}{(s+62.83)(s+62.83)}$,实际扫频结果如图 9 所示。

4 试验结果及分析

利用模型辨识后得到的系统开环模型,设计了校正网络,为验证系统控制性能,给闭环系统输入不同步长的阶跃信号,记录输入指令与反馈信号,得到测试曲线如图 10 所示。

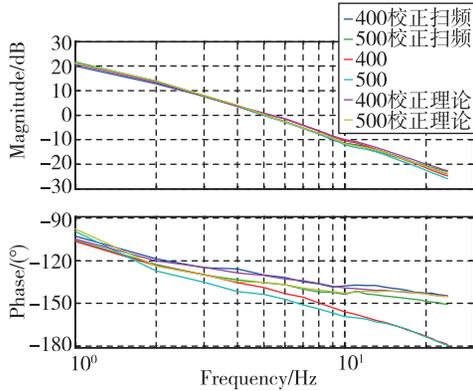


图 9 框架滞后超前校正实际扫频结果图

Fig. 9 Frequency sweeping results of fram with lag-lead compensation network

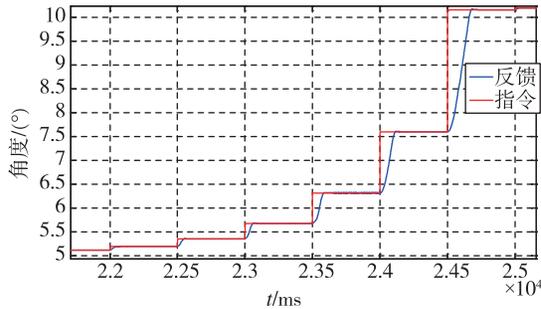


图 10 变死区补偿框架阶跃响应测试曲线

Fig. 10 Curve of step response of variable dead zone compensation

系统输入不同频率正弦信号,记录输入指令与反馈信号,得到测试曲线如图 11 所示。

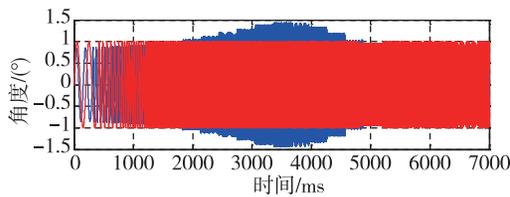


图 11 框架正弦信号闭环扫频测试曲线

Fig. 11 Closed-loop sweep-frequency test curve of sine signal

5 结论

不同于传统的扫频仪的方法对系统进行模型辨识,本文采用直接在实物平台进行扫频,模拟实际

系统的工作特性,全面考虑了真实系统中所有的非线性因素,进行整体建模分析。该方法简单高效,且更符合系统真实工作状态。

对于运行范围较大的控制对象,框架在不同位置的摩擦力矩差异较大,采用固定补偿值摩擦力矩补偿算法不能有效解决摩擦力造成的非线性,而采用积分环节容易造成系统超调。本文采用的变补偿值积分摩擦力矩补偿结合了两种方法的优点,避免了各自缺点,能更有效地补偿摩擦力矩影响。

依据系统的真实数学模型进行了死区特性补偿,设计了校正网络,提高了系统稳定裕度和跟踪精度。扫频结果为提高系统的控制性能提供了理论依据和技术支持。

参考文献

[1] 穆虹. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1996: 381-394.

[2] 张平,董小萌,付奎生. 机载/弹载视觉导引稳定平台的建模与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 20-58.

[3] 王蕾,吉书鹏. 利用系统辨识提高机载光电平台的锁定精度[J]. 微电机, 2012, 45(6): 49-51.

[4] 孙明,沈润杰,郭吉丰,等. 基于系统辨识的宽频大尺寸振动台正弦扫频控制[J]. 机电工程, 2008, 25(6): 95-96.

[5] 周阳,王磊,周涛. 摩擦条件下面向控制的伺服系统辨识相关分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 814-818.

[6] 丁锋. 系统辨识(1):辨识导引[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2011, 3(1): 1-22.

[7] 齐晓慧,田庆民,董海瑞. 基于 Matlab 系统辨识工具箱的系统建模[J]. 兵工自动化, 2006, 25(10): 88-90.

[8] 郑剑翔. MATLAB 系统辨识工具箱在系统控制设计中的应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 703-707.

[9] 孙承龙. DSP 开发宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 795-800.

[10] 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 219-265.