

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801946

舵机带宽测试系统设计与试验方法研究

赵志俊 孟祥喆 郑浩

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 舵机的性能直接影响无人机系统闭环综合特性和飞行安全,针对现阶段常用数字舵机未提供带宽指标的现状和控制律设计的实际需求,介绍了频域响应法进行舵机带宽测试的原理和采用相关测量法进行试验数据处理的方法,提出了利用无人机自身设备集成舵机带宽测试系统的设计思想和方案,总结了测试流程和注意事项,并以某型数字舵机为实例,将测试得到的频率特性数据与舵机标准二阶数学模型进行比较,分析发现测量系统存在时间延时导致相位误差较大,最后给出了舵机带宽修正方案,得到最符合实测结果的舵机标准近似二阶数学模型,从而得到该型舵机空载和带载情况下带宽和阻尼比指标,对指导无人机舵机选型和控制律设计优化提供了技术支持。

关键词: 数字舵机;频率特性;测试系统;无人机

中图分类号: TN710.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5010

Research on design and test method of actuator bandwidth testing system

Zhao Zhijun Meng Xiangzhe Zheng Hao

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: The performance of the actuator directly affects the closed loop comprehensive characteristics and flight safety of the UAV system. In view of the current situation that the digital actuator does not provide the bandwidth technical index and the actual demand of control law design, the principle and data processing method of bandwidth by using correlation measurement method are introduced, the design idea and scheme of using the UAV's own equipment to integrate the actuator bandwidth test system is put forward, and the test process and precautions are summed up. Finally, the actuator is taken as an example, the frequency characteristic data obtained by the test is compared with the two standard order mathematical model of the actuator. It is found that the time delay of the measurement system leads to the phase error, and the bandwidth correction scheme of the actuator bandwidth is given. The approximate two standard order mathematical model of the actuator which is most consistent with the measured results is sought, and the bandwidth and damping ratio of the rudder under no load and load condition are obtained. It provides technical support for actuator selection and control law design optimization.

Keywords: digital actuator; frequency characteristic; test system; unmanned aerial vehicle

0 引言

舵机作为无人机系统中的重要执行机构,是一个高精度的位置伺服系统,其工作原理是接收无人机自驾仪给出的控制指令驱动无人机舵面偏转,改变无人机飞行姿态或飞行轨迹,以达到精确控制无人机飞行和完成规划航线任务的目的。

舵机对输入指令的跟踪能力直接影响着无人机的飞行控制性能^[1-3],由于舵机本身的复杂性、元件参数测量的困难性以及元件参数测量的不准确性,并受环境变化、元器件老化等因素影响,检测舵机带宽指标对于保证控制系统设

计的有效性,提高无人机飞行时的动态品质与制导、控制性能指标尤为重要。

传统舵机带宽测试采用的设备仪器是频谱分析仪,测试设备费用昂贵,采用手工记录测试结果自动化程度较低,测试过程费时费力^[4-5]。为解决这些问题,国内研制了基于虚拟仪器的舵机测试系统^[6-12],实现了对舵机频率特性更好的直观性和易操纵性,但是该舵机测试系统的研究对象主要是针对大型的模拟舵机,由于模拟舵机控制指令为电压信号,而数字舵机控制指令信号为PWM信号,并且舵机负载扭矩加载系统量程较大,因此该测试系统并不适用于小型数字舵机带宽测试。并且,作为舵机性能指标测试的

专用设备,该测试系统方案未充分利用无人机系统自身现有设备,而是重新构建了一套软/硬件系统,需要采购硬件设备,并基于其软件平台开发软件系统,研制周期较长,费用高,并且功能单一。

FUTABA、JR 和 HITEC 等公司的常用舵机产品已广泛应用于小型无人机系统设计中,但产品说明书提供的参数列表只包括尺寸、重量、最大偏转速度和最大扭矩,不提供带宽技术指标。针对该现状和无人机控制律设计的实际需求,本文首先介绍了数字舵机带宽测试原理和试验方法,并以无人机自身设备为基础集成构建了小型数字舵机带宽测试方案,完成软硬件系统设计与开发,通过该测试系统对某型舵机带宽指标进行实际测试和分析,获得了最符合实测结果的舵机标准近似二阶数学模型和性能指标,从而为无人机舵机选型和设计人员进行制导控制系统新一轮迭代设计提供了技术支持。

1 舵机带宽测试方案

1.1 带宽指标

控制数字舵机进行 1 度幅值的正弦偏转运动时,幅值 -3 dB 处的频率值称为舵机带宽指标。舵机带宽指标是由无人机本体自然频率确定,对于静稳定无人机一般可取 5~10 倍^[13-15]。对于静不稳定无人机系统,由于主要依靠飞行控制系统保证无人机满足飞行品质要求,因此对舵机系统动态指标要求更高。

1.2 测试及数据处理方法

本文采用频域响应法测量舵机带宽,选取频率测试点序列,依次在每个频率点上输入等幅正弦信号 $x(t) = A \sin \omega t$ 作为舵机激励信号,并对输出信号进行取样,根据线性系统理论,理想情况下系统稳态响应为 $y_0(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$,实际工程测试中有谐波和噪声干扰信号 $N(t)$,即 $y_0(t) = B \sin(\omega t + \varphi) + N(t)$ 。

采用相关测量法对试验原始数据进行处理。为方便计算,暂不考虑噪声影响,假设 $N(t) = 0$ 。分别用 $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ 与 $y(t)$ 进行互相关运算,有:

$$R_{1y}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega t \cdot y(t - \tau) dt \quad (1)$$

$$R_{2y}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \cos \omega t \cdot y(t - \tau) dt \quad (2)$$

在 $\tau = 0$ 时,有:

$$R = 2R_{1y}(0) = B \cos \varphi \quad (3)$$

$$I = 2R_{2y}(0) = B \sin \varphi \quad (4)$$

由此可得:

$$B = \sqrt{R^2 + I^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{I}{R}\right) \quad (5)$$

当 $N(t) \neq 0$ 时,由于三角函数的正交性与噪声的独立性,相关测量法相当于以当前激励频率 ω 为中心频率的带通滤波器,随着积分时间 T 的增加,输出信号中的谐波

和干扰信号将被滤除。实验中采集数据为离散点序列,假设采样率为 f_s ,积分时间为 T ,则采样点数 N 为 $T \cdot f_s$,相应的离散计算公式为:

$$R = \frac{2}{T} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin\left(\frac{\omega k T}{N}\right) \quad (6)$$

$$I = \frac{2}{T} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(\frac{\omega k T}{N}\right) \quad (7)$$

$y(k)$ 为信号在第 k 个采样点的值,由上式可求得系统幅值增益 A_m 和相位 φ 为:

$$A_m = \frac{\sqrt{R^2 + I^2}}{A} \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I}{R}\right) \quad (9)$$

对每个实验点都按照上式进行求取。当获得了所有实验点的频率、输入和输出信号的幅值及二者的相位差后,即可绘制处舵机系统的波特图或幅频特性图。

2 舵机带宽测试系统设计

下面介绍以无人机自身设备为基础集成构建的小型数字舵机带宽测试方案,如图 1 所示,整个舵机带宽测试系统由硬件系统和软件系统组成,硬件系统包括舵机测试台架、无人机飞控系统、待测舵机、舵偏角传感器、磁滞制动器、扭矩传感器和工控机等。软件系统包括舵机带宽测试软件、人机交互软件和数据记录软件,在无人机自身软系统基础上集成开发。

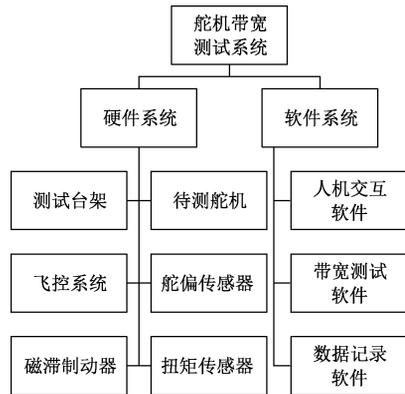


图 1 舵机带宽测试系统组成

带宽测试原理如图 2 所示,扭矩传感器、磁滞制动器、舵偏角传感器以及待测舵机通过联轴器连接,以减小间隙,并固定于舵机测试台架上。磁滞制动器是一种优越的扭矩控制设备,利用磁制原理通过控制输入的励磁电流产生连续可调的负载扭矩,且控制电流和输出扭矩具有较好的线性关系,实现舵机任意载荷谱的自动加载;扭矩传感器用于测定舵机实际受到的扭矩;飞控系统是整个测试系统的核心,主要功能为:1)响应人机交互软件对舵机激励信号的配置,包括激励信号幅值、频率及执行时间等;2)输出不同频率的正弦激励 PWM 信号驱动待测舵机;3)通过舵偏角传

感器实时采集舵机输出响应;4)记录保存各试验点数据,包括时间、扭矩、输入指令以及输出响应数据等。

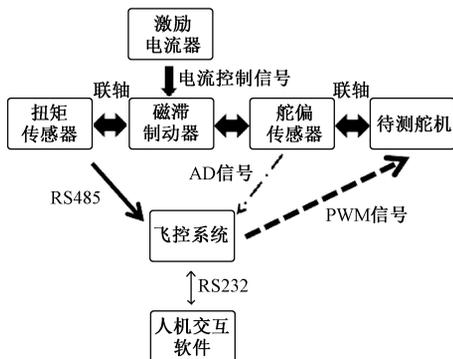


图2 舵机带宽测试原理

3 测试步骤及注意事项

以某型FUTABA常用数字舵机为测试案例,简要阐述试验过程中的测试步骤及注意事项。试验步骤如下:

1)估算待测舵机频带,确定激励用的正弦信号幅值范围和频率范围,将频率范围等分,并绘制试验表格,表格中填好各试验点的幅值和频率值;

2)检查确认各测试系统设备连接正常后上电;

3)标定待测舵机输入激励PWM指令和舵偏角采集输出电压信号与实际偏转角度对应表;

4)设置各试验点处待测舵机激励输入信号幅值、频率和执行时间;

5)启动舵机,记录并保存本次试验点响应数据;

6)重复步骤4)~5),直至所有试验点测试完毕;

7)调节磁滞制动器控制励磁电流输入,给待测舵机加载指定的铰链力矩,重复步骤4)~6),完成不同负载情况下所有试验点测试;

8)整理和分析试验数据。

整个测试过程中需要注意事项包括:1)测试数据应在激励正弦信号的第5个周期后采集记录,以避免系统尚未稳定影响测量精度;2)随着频率的增大,防止因衰减过大导致输出信号不明显,激励正弦信号的幅值也应逐渐递增,但须保证最大偏转角速度不要超过舵机指标要求;3)整个测试过程中因舵机进行频繁的换向操作,其温升较快,为避免温升对测量结果的影响,在每个频率点测试完之后延迟一段时间再进行下一点的测试。

4 试验结果与数据分析

4.1 数据处理

图3所示为空载情况下0.1 Hz频率测试点原始试验曲线,按提供的数据处理方法得到舵偏角传感器输出测量信号与舵机输入控制指令的幅值比为1.0,相位差为 -3.5° 。

汇总各频率测试点序列的幅频特性和相频特性实验结果,如图4所示,根据图4实测舵机的幅值和相位差与频率

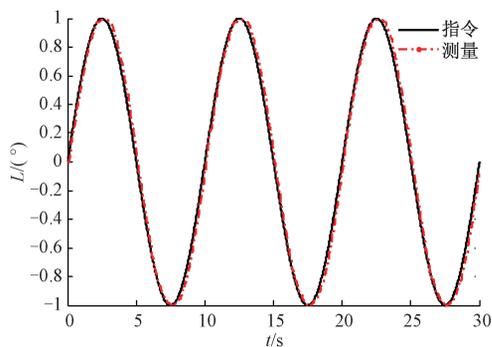
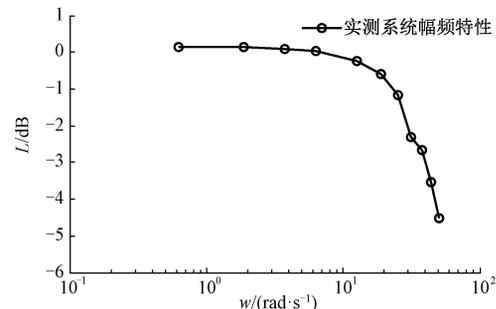
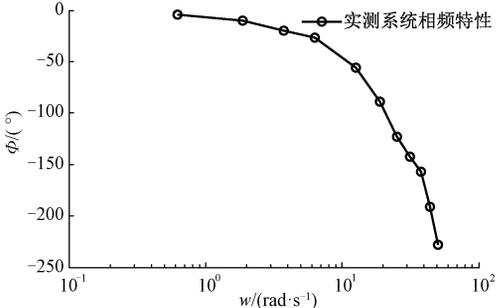


图3 待测舵机空载下0.1 Hz频率响应试验曲线

的曲线结果可知,结合幅频特性和相频特性定义,可以得到幅值下降 -3 dB时待测舵机的频率为 39.14 rad/s,即舵机带宽 ω_H 为 6.23 Hz,而相位差相差 -90° 时的频率为 21.55 rad/s,即舵机的相频特性(固有频率) ω_n 为 3.43 Hz。



(a) 待测舵机空载下实测幅频特性曲线



(b) 待测舵机空载下实测相频特性曲线

图4 待测舵机空载下实测幅相曲线

4.2 误差分析

不考虑舵机的死区和非线性,一般可以采用标准的二阶模型来模拟舵机真实响应特性:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

按照上述标准二阶模型,可以计算舵机带宽 ω_H 与固有频率关系理论上为:

$$\omega_H = \omega_n [(1 - 2\xi^2) + \sqrt{4\xi^4 - 4\xi^2 + 2}]^{1/2} \quad (11)$$

因此,当获得二阶等效模型的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 后,其幅频特性、相频特性及带宽就确定了。

对于二阶等效模型, 阻尼比 ξ 一般介于 0 到 1, 根据式(11), 舵机的带宽理论上介于固有频率的 0 至 $\sqrt{1+\sqrt{2}}$ 倍之间, 然而 4.1 节根据原始试验数据测得舵机幅频特性(带宽)与相频特性(固有频率)比值等于 1.82, 不属于上述理论范围, 经分析研究认为: 真实测量系统存在时间延迟, 这对系统的幅频特性影响较小, 因此幅频特性经过不需要修正, 但系统延时对舵机相位滞后的影响很大, 导致测得的相位误差较大, 因此需要对相位差进行修正和补偿。

4.3 延时修正和试验结果

为得到舵机实测的近似标准二阶模型, 需要修正系统相位差, 具体步骤如下:

- 1) 假设延迟时间, 修正各测试频率下测试相位差;
- 2) 由测试频率与修正后的相位差插值得到系统相频特性(固有频率);
- 3) 计算得到系统阻尼比, 确定系统二阶模型;
- 4) 计算不同频率下系统二阶模型幅频特性和相频特性;
- 5) 分别计算实测结果与对应频率下二阶模型对应频率下的幅频特性与相频特性差值的平方和;
- 6) 改变延迟时间, 寻求差值平方和最小时对应的延迟时间;
- 7) 绘制实测结果与二阶模型 bode 图验证计算结果。

按照上述修正方案, 通过 MATLAB 寻优算法得到系统延迟时间为 46 ms, 舵机标准二阶模型固有频率 ω_n 为 48.63 rad/s, 阻尼比 ξ 为 0.85 时, 其幅频和相频特性曲线与实测系统差值平方和最小, 两者对比曲线如图 5 所示, 从图 5 中可以看出二者曲线基本吻合, 表明上述修正方案的正确性与可行性。

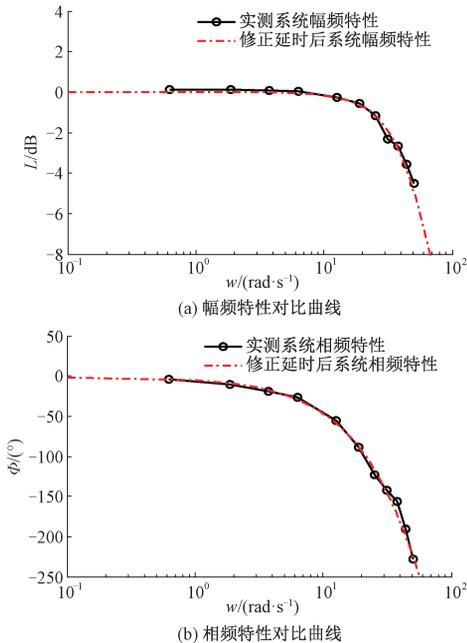


图 5 46 ms 延时下舵机标准二阶模型和实测系统幅相特性对比曲线

按照上述系统延迟修正方法对所有原始试验数据进行了处理分析, 汇总得到该型舵机最终试验结果如表 1 所示, 根据表 1 结果可知, 在有负载情况下待测舵机带宽和阻尼比技术指标略有下降。

表 1 待测舵机试验结果汇总表

负载情况	延迟时间/ ms	带宽/ (rad·s ⁻¹)	固有频率/ (rad·s ⁻¹)	阻尼比 ξ
空载	46	39.14	48.63	0.85
8.8 kg·cm	46	36.69	39.26	0.75

5 结 论

本文针对常用数字舵机产品未提供舵机带宽技术指标的现状和无人机控制律设计的实际需求, 兼顾技术先进性和工程实用性, 基于无人机自身软硬件设备构建了小型数字舵机带宽测试系统, 完成了测试系统的软硬件架构设计与集成, 利用该测试系统对小型无人机常用数字舵机空载和带载情况下的带宽指标进行了检测, 考虑到实际测量系统存在时间延迟, 修正并寻求了最符合实测结果的近似标准二阶数学模型, 建立了常用舵机实际性能数据库, 为后续无人机研制和控制律优化设计提供了技术支持。实际工程应用表明以无人机自身软/硬件系统为基础构建的舵机带宽测试系统方案可行, 功能完备, 可靠性好, 成本低, 为小型数字舵机带宽指标检测提供一种新手段。

参考文献

- [1] 张西涛, 江飞鸿, 赵海. 飞控系统极限环抑制对舵机性能的需求计算[J]. 飞行力学, 2009, 27(4):39-42.
- [2] 孟捷, 徐浩军, 李大伟. 舵机带宽对 II 型 PIO 预测影响研究[J]. 系统仿学报, 2011, 23(4):813-816.
- [3] 刘艳, 高正红, 张星雨. 基于人机闭环稳定性的舵机速率限制边界[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1):28-34.
- [4] 习赵军. 基于虚拟仪器的多路舵机测试系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [5] 王文辉. 基于虚拟仪器技术的舵机振动测试系统研制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [6] 牛海发, 牛明博. 一种基于虚拟仪器的舵机测试系统研制[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(2):67-71.
- [7] 谭营, 许化龙, 吴琳. 基于 LabVIEW 的舵机测试系统设计[J]. 微计算机信息, 2007(31):133-134, 286.
- [8] 苏继杰, 鲍传美, 郑幸, 等. 虚拟仪器的无人机舵机测试系统设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(S2):164-165, 173.
- [9] 崔伟, 赵波. 便携式舵机测试系统的设计与应用[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(3):57-61.
- [10] 毛先柏, 谢东, 李昌禧. 基于支持向量机的舵机带宽测试[J]. 计算机测量与控制, 2007(11):1482-1483, 1518.

- [11] 牛海发,牛明博. 无人机舵机测试系统软件设计与应用[J]. 测控技术, 2006, 25(12):64-67.
- [12] 刘冰,曹克强,胡良谋. 自主式液压舵机测试系统设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(5):638-640.
- [13] 郭晓楠,罗绪涛,徐挺. 大攻角导弹舵机时频域特性与飞控系统匹配性研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2015, 29(1):27-32.
- [14] 靳凌,董继鹏. 考虑舵机故障的空空导弹飞行控制系统主动容错控制[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(6):5-7, 16.
- [15] 张跃,段镇. 轴对称飞行器滚转稳定控制与舵机技术指标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):100-107.

作者简介

赵志俊, 1990年出生, 硕士、工程师, 主要研究方向为飞行试验前沿技术。

E-mail: 1090059396@qq.com

是德科技入门级示波器提供专业级测量功能

全新 200 MHz, 4 通道示波器确保用户以心仪的价格进行测量

2019年1月10日,中国北京——是德科技(NYSE: KEYS)宣布推出 200 MHz, 4 通道的 InfiniiVision 1000 X 系列示波器,以入门级的价格提供专业级的测量和功能。相比之前的 2 通道 1000 X 示波器,新的 4 通道示波器具有 4 线 SPI 解码和通过局域网(LAN)实现的远程连接功能。是德科技是一家领先的技术公司,致力于帮助企业、服务提供商和政府客户加速创新,创造一个安全互联的世界。

全新 InfiniiVision 1000 X 系列示波器使用了与更高性能的 Keysight InfiniiVision 示波器相同的用户界面和测量技术。直观的前面板易于操作;内置的帮助选项可让用户快速了解示波器的功能,进而提高测试和学习效率。示波器预装了 17 个培训信号,能让用户快速掌握 InfiniiVision 1000 X 系列所自带的先进测量和分析功能。这些培训信号还可与免费的教育培训套件结合使用;培训套件中包含了全面的示波器实验室指南,以及示波器基础知识的幻灯片。

Altoo Measurement Science 负责人 Teit Poulsen 表示:“将电信号可视化以了解时序以及电压波形质量,这是电气工程师测试产品性能的一个重要方法。价位极低的是德科技全新 4 通道 DSOX1000 系列示波器提供了高水平的信号洞察力和分析能力,同时保留了是德科技一贯的高品质水准。它使得更多工程师能够更深入地了解其电气设计的特性。”

全新 InfiniiVision 1000 X 系列示波器可通过软件许可证

升级带宽,支持客户购买当前所需的带宽,并随着未来设计的演变需求而升级。InfiniiVision 1000 X 系列示波器可提供 70、100 和 200 MHz 带宽,并通过以下方式加速创新:

- 定制的 Keysight MegaZoom IV ASIC 技术,可提供每秒 50 000 个波形的更新速率和 2 GSa/s 采样率,可以显示其他类似价位的示波器可能会遗漏的随机、偶发的毛刺信号和异常。
- 六合一仪器集成,包括频响分析仪(波特图),函数发生器,协议分析仪,数字电压表和频率计数器,能够节省宝贵的工作台空间。
- 标准 LAN 连接,允许多个工程师通过 LAN 连接到网络,并通过互联网浏览器进行远程控制,从而在一台仪器上开展工作。这使得学生和同事们可以在各种场所共享设备和开展项目合作,以便节省时间和预算。
- 专业级测量和软件分析功能,包括 24 种自动测量,选通快速傅里叶变换(FFT)功能和模板测试,有助于快速分析和确定信号参数。

是德科技副总裁兼数字和光产品卓越中心总经理 Dave Cipriani 表示:“在开发全新 4 通道 1000 X 系列型号时,我们始终以质量为重。业界需要以他们满意的价格来获得可信的测量,从而做出正确的设计决策。是德科技利用高端示波器中采用的成熟技术,为客户提供了值得信赖的测量保障。”更多信息,请访问 www.keysight.com。