

民机方向舵伺服作动系统频率特性分析研究

Frequency Characteristic Analysis of the Rudder Servo Actuator System for the Civil Aircraft

刘彩志 / Liu Caizhi

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

现代飞机越来越多地采用电传飞控技术, 相较机械系统具有便于多功能综合、易于实现主动控制的优势。舵回路作为电传飞控系统的重要组成部分, 用于执行控制指令实现舵面偏转, 其控制特性对飞行品质影响至关重要。就某民机方向舵伺服作动系统进行频域特性的分析研究, 建立数学模型, 仿真分析其频域特性, 并通过铁鸟综合实验台验证仿真结果。

关键词: 飞控系统; 舵回路; 频率特性

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

[Abstract] Fly-by-wire flight control system is more and more applied in modern airplanes. It's easier to integrate multi-functions and easier to apply active control technology in contrast with mechanical control system. Rudder loop drives the rudder by control command. The rudder loop control characteristic is essential to the handling quality. A math model is established for the rudder servo actuator system of a civil aircraft in this paper. The frequency characteristic is studied by simulation. The simulation result is verified by the iron-bird test bench.

[Key words] Flight Control System; Rudder Loop; Frequency Characteristic

0 引言

舵回路(又称伺服系统)是飞行控制系统不可或缺的组成部分,由反馈通道和舵机构成,按照指令模型装置或敏感元件输出的电信号操纵舵面,实现飞机角运动或航迹运动的自动稳定和控制^[1]。伺服回路设计的主要目的是通过足够的稳定裕度和满意的性能设计来补偿飞行控制系统,以确保飞机的飞行安全和实现好的操纵品质^[2]。

1 研究目的

本文通过对某飞机方向舵伺服作动系统频率特性的分析研究实现以下目的:

(1) 通过开环频域特性分析验证系统的稳定性。

(2) 通过闭环频域特性分析验证系统有足够的

频率域,能够提供正常操纵的平稳性。

(3) 通过闭环频域特性分析验证系统在高频域受到非正常信号干扰时,不会发生谐振。

(4) 通过闭环频域特性分析验证系统的相位滞后情况,并确认系统跟随性能的好坏。

2 频率特性分析研究方法

2.1 基于模型的频率特性仿真分析研究方法

分析原理图如图 1 所示。

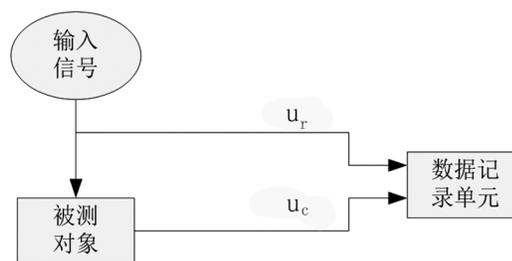


图 1 频率特性分析原理图

由于高阶系统的非线性特性,仿真中在被测系统单元中加入幅值为 $\pm 5^\circ$ 的正弦扫频信号,将信号的频率设成可变量并设好适当的仿真时间,仿真记录输入与输出信号的值 U_r 和 U_c 。然后通过输入输出值计算出幅频特性和相频特性,然后绘制对数幅频和对数相频曲线。

2.2 频率响应特性试验分析研究方法

测定系统和元部件频率特性原理图如图2所示。

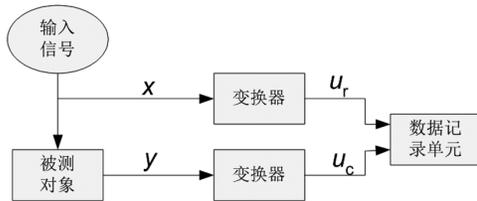


图2 频率特性试验原理图

图2中,输入信号源有机械、电气和气动等形式,频率也有不同的范围,可根据被测对象的要求和类型选定,但波形必须没有畸变。由于被测对象总有非线性因素,故应仔细考虑正弦输入信号幅值。输入信号幅值太大,引起系统饱和,稳态输出不是正弦信号,从而得不到准确试验数据;如果输入信号幅值太小,也会有死区,使稳态输出波形畸变严重,导致过大的测量误差。因此在本文例子中取舵面幅值指令为 $\pm 0.5^\circ$ 。

变换器用来将输入信号 x 和输出信号 y 变换为电量 U_r 和 U_c (如果 x 和 y 为电量则勿须变换)。

数据处理单元用来记录 U_r 和 U_c 的波形。如果变换器均为比例环节,且有相同的传递系数,则不断改变输入信号的频率,记录稳态下对应的 U_r 和 U_c ,即可求得幅频特性和相频特性,然后绘制对数幅频和对数相频曲线。

3 方向舵伺服控制系统描述

该飞机方向舵伺服控制系统的构成如图3所示。

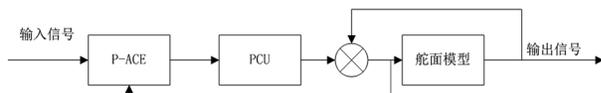


图3 方向舵伺服控制系统原理框图

P-ACE:主作动器控制电子装置,模拟处理器单元,是驾驶舱控制传感器和电液作动器之间的直接电子装置。

PCU:具有独立动力源和伺服控制回路的动力

控制装置。

该飞机方向舵控制系统包括一个方向舵,正常模式下由三个采用工作/工作/工作方式的有独立动力源和伺服控制回路的电液伺服作动器来驱动舵面运动,这种方式允许每个作动器都可移动舵面。这种设计可以满足当三个PCU中的一个或两个发生故障被切断或者处于旁通状态时,余下的PCU仍可以实现对方向舵的控制。本文针对三个作动器分别处于工作/旁通/断开状态下进行频率特性分析。

4 方向舵伺服作动系统频率特性分析算例

4.1 仿真模型及其参数

本文仿真模型在Matlab/Simulink仿真设计平台环境中建模,然后生成动态链接库函数在C++环境下调用,仿真结果在Matlab设计仿真平台中对数据进行处理并编写相应的函数,分别用来实现计算增益、相位计算和绘制幅相特性曲线。

输入信号采用正弦信号:

$$X(i) = A \times \sin(2 \times \pi \times f \times t) \quad (1)$$

式(1)中, A 为输入幅值,取 $\pm 0.5^\circ$;

$\pi = 3.1415926$;

f 为输入信号频率;

其它部分仿真参数如下:

(1)电液伺服阀

自然频率:125 Hz;阻尼:0.8。

(2)PCU刚度

轴承刚度:4.42E5 lbs/in(最软区域);

PCU结构刚度:1.0E6 lbs/in。

(3)结构模型参数:

J_s :170.5741 slug * in²;

KR:4.33e5 lbs/in(上)

5.396e5 lbs/in(中)

5.373e5 lbs/in(下)

KL:5.96e6 in. lbs/rad(上)

5.96e6 in. lbs/rad(中)

5.96e6 in. lbs/rad(下)

4.2 开环频率特性分析

在对系统的稳定性分析当中,相角裕度和幅值裕度用来表征开环幅相曲线接近临近点的程度,作为系统稳定程度的度量。在MIL-F-9490D,即有人驾驶飞机飞行操纵系统设计、安装、试验通用规范中规定了系统稳定裕度的要求;在模态频率低于一

阶气动弹性模态范围内,系统稳定裕度应满足增益裕度 $|G_M| \geq 6\text{dB}$, 相位裕度 $P_M \geq 45^\circ$; 如果频率等于或大于一阶气动弹性模态时,系统稳定裕度要求满足 $|G_M| \geq 8\text{dB}$, 相位裕度 $P_M \geq 60^\circ$ 。但对非线性和高阶动态等因素引入的稳定裕度误差范围应为上述值的 50%。

对于该飞机方向舵系统,要求对三个作动器分别处于工作-旁通-断开模式时该方向舵作动系统应具有 6dB 最小增益裕度和 50° 最小相位裕度。

三个作动器分别工作在工作/旁通/断开的伺服回路开环频率特性仿真结果如图 4 所示。

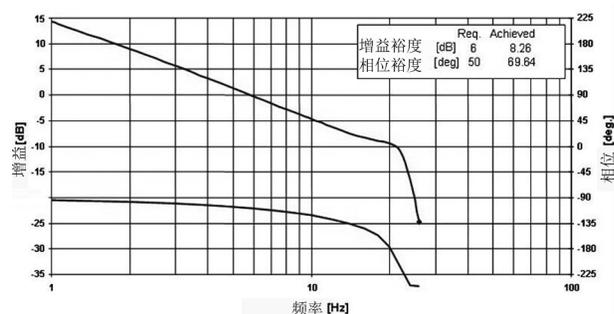


图 4 开环频率特性仿真结果

由仿真测试结果可以看出方向舵伺服稳定性幅值裕度为 8.26dB, 相位裕度为 69.64° , 满足设计要求。

4.3 闭环频率特性分析

带宽是频率域中的一项重要指标。带宽大,表明系统能够通过较宽频率的输入;带宽小,系统只能通过较低的输入。因此带宽大的系统,一方面重现输入信号的能力强;另一方面,抑制输入端高频噪声的能力就弱,故在系统设计中应该折中考虑。

对于该飞机方向舵系统,对带宽的设计要求如表 1 所示。

表 1 系统带宽设计要求

频率 (Hz)	最小增益 (dB)	最大增益 (dB)	最小相位 (deg)
0.1	-3	1.5	-10
0.3		1.5	-16
0.6		1.5	-20
3.0	-3	1.5	-40
3.2		1.5	-42
4.5	-6	1.5	-90
7.5	-11	1.5	
10.7		1.5	
>10.7		1.5	

三个作动器分别工作在工作/旁通/断开的伺服回路闭环频率特性仿真结果如图 5 所示。

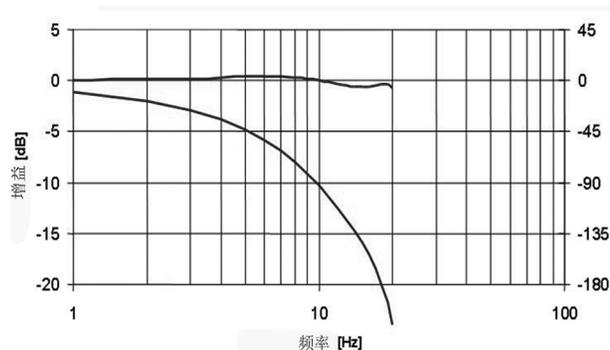


图 5 闭环频率特性仿真结果

由仿真测试结果可以看出闭环频率特性增益和相位在系统设计范围之内,满足系统带宽设计要求。

4.4 铁鸟闭环频域响应测试结果

在三个作动器分别工作在工作/旁通/断开模式时,该飞机方向舵铁鸟闭环特性试验结果如图 6 所示。

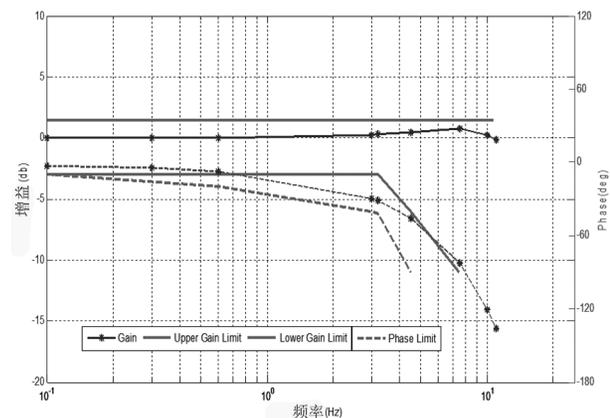


图 6 铁鸟闭环频率特性试验结果

由测试结果可以看出在该状态下闭环频域响应特性在系统设计范围之内,增益和相位特性均满足系统带宽设计要求。

从幅频曲线的趋势来看,铁鸟试验曲线同仿真曲线相比,铁鸟试验曲线在高频率幅值过大,这有可能是系统惯量过大、系统刚度(供油压力和回油压力会影响系统的刚度)过小所致。从铁鸟试验结果来看,在 8Hz 频率处最小增益幅值较大,但仍然小于 1.5dB,满足设计要求。

由于铁鸟试验件在制造时未考虑结构内部开孔等工艺,并且后期减重措施未在铁鸟试验件上实施,因此铁鸟试验件重量大于系统设计要求的重量,据统计试验件超重幅度约为 10% ~ 20%,例如

方向舵的设计重量为 51kg,铁鸟试验件的实际重量为 60kg。下面是将模型惯量参数增大 20% 时的闭环仿真对比结果,如图 7 所示。

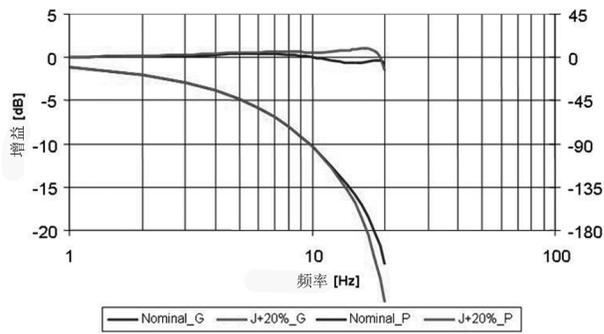


图 7 闭环频率特性对比仿真结果

从图 6 仿真结果与图 7 的仿真结果对比来看,当频率低于 8Hz 时,原惯量的幅频和相频特性与增大 20% 惯量后的幅频和相频特性基本一致,但当频率大于 8Hz 时,增大 20% 惯量后的幅频曲线明显高于原惯量的幅频曲线,说明在频率高于 8Hz 时,惯量对幅频特性影响较大,因此证明铁鸟试验的高频增益值过大是超重导致惯量过大造成的影响。

(上接第 5 页)

4.2 RAT 侧滑带载试验数据分析

整理每个试验点数据,根据 RAT 出厂的 RAT 空速与带载能力的关系,查找对应的 RAT 空速。绘制同一侧滑角和构形下的 RAT 空速对当量空速的平滑曲线。对于三种侧滑角下的试验数据,可以绘制三条曲线。图 2 为巡航构型下不同侧滑角的 RAT 空速对当量空速曲线。其它构形下试验结果类似。

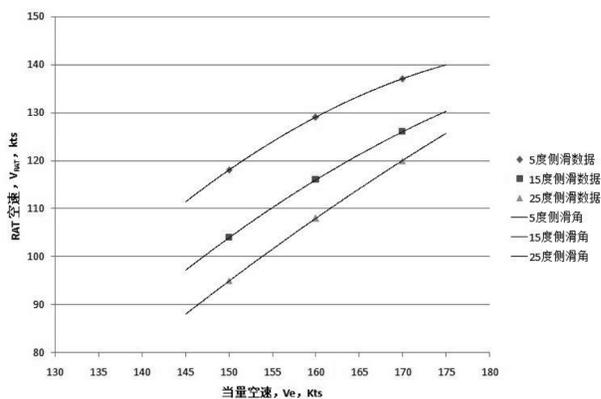


图 2 RAT 侧滑带载试验曲线

4.3 试飞结果

通过试飞,获得的主要结果为 RAT 空速与飞机空速的关系曲线(如图 1、2 所示)。该试飞结果可如下运用:对于稳定侧滑飞行,先根据空速按图 2 查对应的 RAT 空速值,然后以此空速值和飞机重量在

从相频曲线来看,在频率低于 10.7Hz 时,相频特性满足系统设计要求,但在高频段相位滞后较大。由于间隙,饱和等非线性特性影响系统的稳态误差,使系统的快速性和稳态跟踪精度下降,因此在系统以及试验安装时要考虑好这些非线性环节。

5 结论

根据以上模型仿真和铁鸟试验结果,可以看出该机方向舵作动系统在三个作动器分别在工作/旁通/断开模式时,开环频域特性满足稳定性设计要求,闭环频域特性满足带宽设计要求,达到了预期设计目标。

参考文献:

- [1] 王永,梁德芳.民用飞机电传飞行控制系统初探[J].航空标准化与质量,2008,227(5):24-28.
- [2] 浦传彬.民用飞机的乘坐特性[J].民用飞机的设计与研究,2000,1:1-2.

图 1 中查 RAT 空速大小,最后可以获得此时 RAT 带载能力;对于机动飞行,将飞机升力作为飞机重量来计算,可同理得到 RAT 对应的带载能力;将试飞曲线延伸,可以推导出在飞机失速附近时的 RAT 带载能力;也可推算出在平飞时,各重量下 RAT 带满载的最小速度;根据飞机应急负载大小,可以推导出飞机应急负载正常工作的最小速度;并可推出飞机 RAT 带特定负载下的最大侧滑角和空速。

5 结论

基于飞机供电型 RAT,研究了如何获得在各种飞行姿态下的 RAT 实际带载能力。本文设计了一种飞行试验方法,通过 RAT 平飞带载和 RAT 侧滑带载两部分试验,获得两组 RAT 空速与飞机空速的关系曲线,利用这些曲线,可推导出任意重量和任意飞行姿态下 RAT 空速,并最终获得飞机 RAT 的实际带载能力。

参考文献:

- [1] 吴晓辉,等.基于飞机发动机测试的电负载控制系统[J].航空制造技术,2011,3:81-84.
- [2] 孙乐成,等.某型冲压空气涡轮试验器测控系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2007,15(6):701-702.