

文章编号: 1001 - 893X(2012)07 - 1198 - 04

射频仿真系统三轴模拟转台动态误差分析*

杨黎都, 高向东, 郑 星, 刘鹏军, 张 程

(解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要:三轴模拟转台是进行飞行器飞行姿态地面半实物仿真系统的重要设备之一,其精度直接决定了仿真试验的置信度。通过分析转台动态响应能力并结合转台的部分实测数据,求解了转台动态误差系数,得到转台动态误差的计算公式,最后用一个典型仿真试验对三轴模拟转台动态误差进行计算分析。利用该动态误差计算公式得到的仿真结果可以为射频仿真试验设计及精度分析提供参考。

关键词:半实物仿真系统;三轴模拟转台;射频仿真系统;动态误差

中图分类号:TP802 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.031

Dynamic Error Analysis of Three-axis Simulation Rotating Platform Based on RF Simulation System

YANG Li-du, GAO Xiang-dong, ZHENG Xing, LIU Peng-jun, ZHANG Cheng

(Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The three-axis simulation rotating platform is one of the key devices for the hardware-in-the-loop simulation test of the flight attitude of the aircraft on the ground, and its precision directly decides the confidence of the simulation test. Firstly, the dynamic error coefficient of the rotating platform is worked out by analysing the dynamic response capability of the rotating platform with some actually-measured data from it. Then a formula is derived for calculating the dynamic error of the rotating platform. Finally, the dynamic errors of the three-axis simulation rotating platform are calculated and analysed based on a typical simulation test. The simulation results obtained from above formula for dynamic error calculation can be used for reference purposes in RF simulation test design and its precision analysis.

Key words: hardware-in-the-loop simulation system; three-axis simulation rotating platform; RF simulation system; dynamic error

1 引 言

三轴模拟转台是半实物仿真试验系统的关键设备,主要由三轴电动转台、计算机控制系统、实时网络和辅助设备组成。转台是一种典型的伺服系统,属于自动控制系统中的一种。它可以模拟飞行器、导弹在空中实际飞行时的各种姿态,复现其运动时的动态控制特征,从而对其制导、控制系统的性能进

行反复仿真和测试,以获得试验数据。具有良好动态特性的仿真转台是保证半实物仿真取得高置信度的关键^[1]。转台动态误差是指转台的动态测角误差,即转台在运动过程中,转台的测角位置传感器得到的位置与当前时刻的输入位置值的误差。由于三轴模拟转台动态误差不是一个固定值,会随着转台角加速度、角速度等参数的变化而改变^[2-3]。在进行仿真试验时,需要计算三轴模拟转台的动态误差,从而对仿真试验精度分析,并对仿真试验的试验设

* 收稿日期:2011-11-23;修回日期:2012-03-15

计提供参考。

2 转台动态响应能力分析

2.1 转台动态误差的一般分析

转台最大角速度和最大角加速度是反映转台能力的两个参数,实际上是对驱动电机额定转速、转矩和最大承载能力的设计约束。转台动态误差是反映转台各转轴对特定输入驱动信号的响应能力,由转台各转轴的开环幅频特性决定。当转台输入信号的角速度和角加速度限制在转台最大角速度和最大角加速度范围内时,转台对于任意输入信号 $\theta_i(t)$ 的动态误差 $e(t)$ 可用输入信号的各阶导数和转台各阶角误差系数表示为^[4]

$$e(t) = \theta_i(t) - \theta_o(t) = k_0\theta_i + k_1\dot{\theta}_i + k_2\ddot{\theta}_i + k_3\dddot{\theta}_i + \dots \quad (1)$$

式中, $\theta_i(t)$ 为输入驱动信号; $\theta_o(t)$ 为转台响应输入驱动输出的角位置; k_0 为转台角位置误差系数; $\dot{\theta}_i$ 为输入信号的角速度, $\dot{\theta}_i = \frac{d\theta_i(t)}{dt}$; k_1 为转台的角速度误差系数; $\ddot{\theta}_i$ 为输入信号的角加速度, $\ddot{\theta}_i = \frac{d^2\theta_i(t)}{dt^2}$; 转台的角加速度误差系数 k_0, k_1, k_2, \dots 由转台的开环幅频响应特性确定,是转台的固有属性。

由于动态误差同角误差系数和输入驱动信号的形式有密切关系,因此,确定了角误差系数和输入驱动信号形式才能确定对规定输入信号动态标定误差^[5]。

根据式(1),当用正弦信号作为输入驱动转台时,转台动态误差可改写为

$$e(t) = \vartheta \sum_{i=1}^n k_i \omega^i \sin(\omega t + i \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

式中, ϑ 为驱动转台转动的正弦输入信号的幅度; k_i 为转台各阶角误差系数; ω 为正弦信号的角频率, $\omega = 2\pi f$; f 为正弦信号的频率。

为便于分析正弦输入的动态误差,式(2)可展开写为

$$e(t) = (-k_2 + k_4\omega^2 - k_6\omega^4 + \dots)\vartheta\omega^2\sin(\omega t) - (-k_1 + k_3\omega^2 - k_5\omega^4 + \dots)\vartheta\omega\cos(\omega t) \quad (3)$$

令

$$\begin{aligned} A\cos\phi &= (-k_2 + k_4\omega^2 - k_6\omega^4 + \dots)\vartheta\omega^2 \\ A\sin\phi &= (-k_1 + k_3\omega^2 - k_5\omega^4 + \dots)\vartheta\omega \end{aligned}$$

式中, A 为转台在角频率为 ω 时的动态误差的幅值; ϕ 为转台在角频率为 ω 时的动态误差的相位迟后。

$$\begin{aligned} \text{对正弦信号输入的转台动态误差可进一步表示为} \\ e(t) = A\cos\phi\sin(\omega t) - A\sin\phi\cos(\omega t) = \\ A\sin(\omega t - \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

通过建立和求解角误差系数 $k_1, k_2, \dots, k_5, k_6$ 的两个三元联立方程组,可获得计算转台六阶以下角误差系数的公式。

$$\begin{aligned} \text{令 } I_j = \frac{A_j\sin\phi_j}{\vartheta_j\omega_j}, Q_j = \frac{A_j\cos\phi_j}{\vartheta_j\omega_j^2}, j = 1, 2, 3, \text{ 由} \\ \left. \begin{aligned} -k_1 + k_3\omega_1^2 - k_5\omega_1^4 &= I_1 \\ -k_1 + k_3\omega_2^2 - k_5\omega_2^4 &= I_2 \\ -k_1 + k_3\omega_3^2 - k_5\omega_3^4 &= I_3 \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

和

$$\left. \begin{aligned} -k_2 + k_4\omega_1^2 - k_6\omega_1^4 &= Q_1 \\ -k_2 + k_4\omega_2^2 - k_6\omega_2^4 &= Q_2 \\ -k_2 + k_4\omega_3^2 - k_6\omega_3^4 &= Q_3 \end{aligned} \right\}$$

可以得到

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{I_1(\omega_2^4\omega_3^2 - \omega_2^2\omega_3^4) + I_2(\omega_1^4\omega_3^2 - \omega_1^2\omega_3^4) + I_3(\omega_2^4\omega_1^2 - \omega_2^2\omega_1^4)}{(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_1^4 - \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1^2\omega_3^2 + \omega_2^2\omega_3^2)} \\ k_2 &= -\frac{Q_1(\omega_2^4\omega_3^2 - \omega_2^2\omega_3^4) + Q_2(\omega_1^4\omega_3^2 - \omega_1^2\omega_3^4) + Q_3(\omega_2^4\omega_1^2 - \omega_2^2\omega_1^4)}{(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_1^4 - \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1^2\omega_3^2 + \omega_2^2\omega_3^2)} \\ k_3 &= -\frac{I_1(\omega_2^4 - \omega_3^4) + I_2(\omega_3^4 - \omega_1^4) + I_3(\omega_1^4 - \omega_2^4)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_1^2 - \omega_3^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)} \\ k_4 &= -\frac{Q_1(\omega_2^4 - \omega_3^4) + Q_2(\omega_3^4 - \omega_1^4) + Q_3(\omega_1^4 - \omega_2^4)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_1^2 - \omega_3^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)} \\ k_5 &= -\frac{I_1(\omega_2^2 - \omega_3^2) + I_2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + I_3(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_1^4 - \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1^2\omega_3^2 + \omega_2^2\omega_3^2)} \\ k_6 &= -\frac{Q_1(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Q_2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Q_3(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_1^4 - \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1^2\omega_3^2 + \omega_2^2\omega_3^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, ϑ_j 为正弦输入信号的幅值; ω_j 为正弦输入信号的角频率; A_j 为转台在角频率为 ω_j 时的动态误差的幅值; ϕ_j 为转台在角频率为 ω_j 时的动态误差的相位迟后。

2.2 转台动态误差近似计算

当用正弦信号作为输入,测试输入信号角加速度引入的动态误差时,由于正弦输入信号各阶导数正比于 ω' , $\omega = 2\pi f$, 当 $\omega \gg 1$ 时,高阶导数的幅值会急剧增大,从而使所测量的动态误差增大。这一误差有可能远大于输入信号角加速度引入的误差分量,从而不能正确评估输入信号角加速度对转台性能的影响^[6-7]。用某三轴模拟转台偏航轴的测量结果可说明这一问题,根据测试所使用的频率值和

幅值,利用式(2)可计算出正弦输入信号的各阶导数的幅值,见表1。

表1 转台输入指令各阶导数计算

Table 1 Derivative calculations of the input to the rotating platform

幅度 /(°)	频率 /Hz	$\dot{\theta}$ /(°/s)	$\ddot{\theta}$ /(°/s ²)	$\dddot{\theta}$ /(°/s ³)
1.0	1.00	6.28	39.48	248.05
23.0	0.32	46.24	92.98	186.95
12.4	0.77	59.99	290.24	1 404.20
6.2	1.53	59.60	572.97	5 508.20

根据仿真试验的特点,转台产生角加速度及其以上的情况是不存在的,所以式(1)中 $\ddot{\theta}_i(t)$ 及其以上角误差系数都为零。又由于转台是二阶传递函数,其动态跟踪误差是一个稳态误差,所以式(1)中 $k_0=0, k_1=0$,那么转台动态误差近似计算公式为^[3]

$$e(t) = k_2 \ddot{\theta}_i \quad (6)$$

即为角加速度误差系数与角加速度的乘积,可以得到角加速度误差系数

$$k_2 = \frac{e(t)}{\ddot{\theta}_i} \quad (7)$$

以某三轴模拟转台为例,根据测试数据,选取输入信号频率小于1 Hz的一组数据来计算角加速度误差系数,见表2。

表2 转台角加速度误差系数计算

Table 2 Calculations of the error coefficient of angular acceleration of the platform

轴	角加速度 /(°/s ²)	幅度 /(°)	频率 /Hz	实测动态误差 /(°)	角加速度误差系数 /s ²
偏航	93	23	0.32	0.012	1.29×10^{-4}
纵倾	93	23	0.32	0.044	4.84×10^{-4}
横滚	515	145	0.3	0.198	3.84×10^{-4}

3 仿真试验中的转台动态误差分析

用某三轴模拟转台仿真跟踪雷达天线伺服系统对目标跟踪试验为例,把转台角位置作为对目标位置的测量值来处理,转台引入的动态滞后误差将影响跟踪误差,进行仿真试验转台动态分析^[8]。假定目标以1 000 m/s的速度从30 km以远沿直航航路向转台飞行,航路捷径分别选为500 m和100 m。考虑仿真试验中仰角最大为25°,过航路捷径点时的目标仰角设为25°。

该试验中转台横滚轴不参与跟踪,仅对转台偏航轴和俯仰轴作分析。这两个航路的参数见表3。

表3 航路参数值

Table 3 Parameter values for the flight path

航路 捷径 /m	速度 /(m/s)	高度 /m	偏航角 速度最 大值/ (/°/s)	偏航角 加速度 最大值 /(°/s ²)	俯仰角 速度最 大值/ (/°/s)	俯仰角 加速度 最大值 /(°/s ²)
500	1 000	233.154	114.6	148.9	18.0	87.8
100	1 000	46.631	573.0	3 721.5	90.1	2 194.6

利用目标的方位和仰角数据驱动转台跟踪此目标。根据表2的角加速度误差系数计算出的转台偏航轴和俯仰轴的动态误差曲线,见图1和图2。

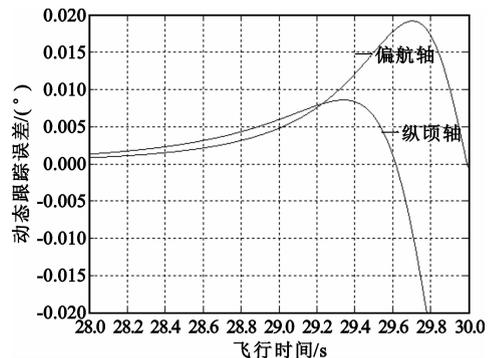


图1 航路捷径500m时的动态误差
Fig.1 Dynamic errors when the flight-path shortcut is 500 m

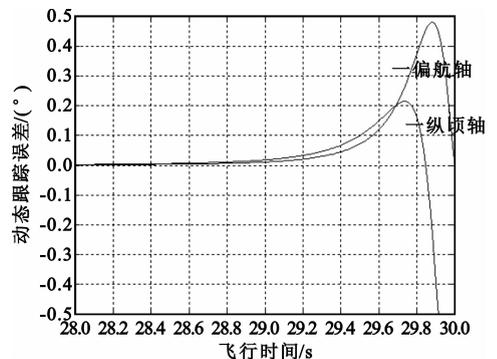


图2 航路捷径100m时的动态误差
Fig.2 Dynamic errors when the flight-path shortcut is 100 m

由图可以看出,目标距离雷达大于1 000 m时,偏航和仰角动态误差都很小。当目标运动到捷径点前800 m以后,由于角加速度的急剧增大,大约有0.6 s的时间动态误差幅值会很大。航路捷径500 m时,目标运动到捷径点前约300 m时,偏航轴动态误差最大,为0.019°;航路捷径100 m时,目标运动到捷径点前约60 m时,偏航轴动态误差最大,为0.48°。

4 结 论

三轴模拟转台动态误差计算需要大量的试验数据支撑才能得出科学合理的分析结果。转台动态误差计算方法虽然仅是结合转台部分试验数据得出的,并且使用了仿真试验中的一例进行了分析,但此分析方法也可以用于基于仿真试验的三轴模拟转台动态误差分析,其分析结果也可以用于整个仿真试验精度分析,为仿真试验的试验设计提供参考。

参考文献:

- [1] 单家元,孟秀云,丁艳.半实物仿真[M].北京:国防工业出版社,2008:28-30.
SHAN Jia-yuan, MENG Xiu-yun, DING Yan. Hardware-in-the-loop Simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:28-30. (in Chinese)
- [2] 扈宏杰,尔联洁,吴森堂,等.基于 DSP 技术的飞行仿真转台控制[J].电气传动,2004(2):35-36.
HU Hong-jie, ER Lian-jie, WU Sen-tang, et al. Servo System of Flight Simulator Based on Digital Signal Processor [J]. Electric Drive, 2004(2):35-36. (in Chinese)
- [3] 王划一,杨西侠,林家恒,等.自动控制原理[M].北京:国防工业出版社,2004:195-209.
WANG Hua-yi, YANG Xi-xia, LIN Jia-heng, et al. Fundamentals of Automatic Control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:195-209. (in Chinese)
- [4] 杨叔子,杨克冲.机械工程控制基础[M].武汉:华中理工大学出版社,1984:102-130.
YANG Shu-zi, YANG Ke-chong. Fundamentals of Mechanical Engineering Control [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1984:102-130. (in Chinese)
- [5] 杨黎都,肖本龙,张程.三轴仿真转台动态性能对仿真试验影响分析[J].电子测量技术,2011(12):28-31.
YANG Li-du, XIAO Ben-long, ZHANG Cheng. An Analysis of Effects of the Dynamic Performance of Three-Axial Simulation Rotating Platform on Simulation Testing [J]. Electronic Measurement Technology, 2011(12):28-31. (in Chinese)
- [6] 杨辉,吴钦章,范永坤,等.高精度位置随动系统的误

差源分析[J].光电工程,2008(8):5-9.

YANG Hui, WU Qin-zhang, FAN Yong-kun, et al. Analysis of Error Source for High Precision Position Servo System [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008(8):5-9. (in Chinese)

- [7] 白雪峰,赵剡.单轴速率三轴位置惯性测试转台误差及传递分析[J].航天控制,2006(2):26-29.
BAI Xue-feng, ZHAO Yan. Errors Propagation Analysis of Single-axis Rate and Three-axis Position Turntable [J]. Aerospace Control, 2006(2):26-29. (in Chinese)
- [8] 肖卫国,尔联洁.雷达寻的制导半实物仿真误差研究[J].计算机仿真,2007(5):259-263.
XIAO Wei-guo, ER Lian-jie. Research on the Error of Hardware-in-the-loop Simulation for Radar Homing Guidance [J]. Computer Simulation, 2007(5):259-263. (in Chinese)

作者简介:

杨黎都(1971—),男,河南洛阳人,1993年于南京理工大学获学士学位,2005年于解放军电子工程学院获硕士学位,现为高级工程师,主要研究射频仿真试验与仿真系统应用技术;

YANG Li-du was born in Luoyang, Henan Province, in 1971. He received the B.S. degree from Nanjing Institute of Technology and the M.S. degree from PLA Electronic Engineering Institute in 1993 and 2005, respectively. He is now a senior engineer. His research concerns RF simulation test and application of the simulation system.

Email: lyld@yahoo.cn

高向东(1969—),男,陕西吴堡人,1991年于空军政治学院获学士学位,现为高级工程师,主要从事科技信息研究;

GAO Xiang-dong was born in Wubu, Shaanxi Province, in 1969. He received the B.S. degree from PLA Air Force Political Institute in 1991. He is now a senior engineer. His research concerns scientific and technical information analysis.

郑星(1976—),男,陕西西安人,2000年于西北大学获学士学位,2007年于国防科学技术大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为射频仿真技术及其应用。

ZHENG Xing was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1976. He received the B.S. degree from Northwest University and the M.S. degree from National University of Defense Technology in 2000 and 2007, respectively. He is now an engineer. His research concerns RF simulation test technology and application.