

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.005

一种无人机多舵面同步时域分析方法

李 瑾¹, 安苏阳², 杨金龙², 王宝平²

(1. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局, 重庆 400060;

2. 中航贵州飞机有限责任公司无人机试验试飞部, 贵州 安顺 561000)

摘要: 试验试飞是无人机科研的后期阶段, 在无人机的试验过程中, 对于舵面的试验是及其重要的, 关系到无人机的飞行安全, 目前, 无人机的舵面时域分析试验中, 需要逐一对每个舵面分别进行阶跃响应试验, 耗时长, 影响试验效率。对现有舵面时域分析方向进行改进, 通过多舵面同步时域分析方法完成舵面阶跃响应。试验结果显示, 在满足实验要求的前提下, 实验时间复杂度降低了 83%, 提高了实验效率。

关键词: 无人机; 舵面; 时域分析; 阶跃响应

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

A Synchronous Time Domain Analysis Method for Multi-control Surface of UAV

Li Cui¹, An Suyang², Yang Jinlong², Wang Baoping²

(1. Army Representative Bureau of Army Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400060, China;

2. Department of UAV Flight Test, AVIC Guizhou Aircraft Co., Ltd., Anshun 561000, China)

Abstract: The flight test is in the post stage of UAV research and development. In UAV flight test, the control surface test is important for UAV flight safety. At present, control surface need time domain analysis test one by one, which is time-consuming and low efficiency. In this paper, current time domain analysis of control surface is improved, use synchronous time domain analysis method of multi-control surface for control surface step response. The experimental results show that the experimental time complexity can be reduced by 83% and the experimental efficiency is improved under satisfying the experimental requirements.

Keywords: UAV; control surface; time domain analysis; step response

0 引言

无人机是一种不载人飞行器的总称^[1-5]。自 1917 年第一架无人机试飞以来, 无人机便成为各个军事强国航空发展的重要标准^[6]。目前, 随着电子计算机技术和工业水平的发展, 无人机也越来越成熟。据统计, 在全球有 30 多个国家正在发展超过 300 种无人机, 其中一些无人机被成功地应用在全球的几次局部战争中, 并取得了突出的成绩^[7]。2014 年, 美国提出了空海一体战计划, 其航母上装备的战略性飞机之一就是 X47B 隐形无人机^[8]。如今, 全球的主要军事大国都试飞成功了自己的隐形无人机, 像美国的 X47B、英国的雷神、法国的神经元无人机, 都代表了其在航空发展的战略方向^[9]。

在飞行中作用在无人机上的力包括升力、牵引力、阻力和重力, 而对于无人机的控制目前只停留在改变推力和空气动力上^[1-12]。其中: 推力的改变

主要是靠发动机的控制; 空气动力的改变主要是靠机翼的设计和舵面的控制; 而舵面的控制, 主要是通过控制各个舵面的方向, 改变飞行俯仰、滚转和偏航达到对于飞机姿态的控制来实现, 即舵面的控制是无人机空气动力改变的重要方法。

无人机舵面试验是无人机重要的地面实验, 直接关系到无人机的滑行和飞行实验安全, 时域分析是无人机舵面试验的重要检查项。通过给舵机输入阶跃信号, 检查舵机输出及内部状态随时间变化的规律, 被称为阶跃响应试验。无人机的阶跃响应实验, 主要通过一个测试系统和飞机连接, 该测试系统通过软硬件接口的控制来实现阶跃响应试验。无人机一般包括多个舵面, 每次阶跃试验中, 一个舵面的主备通道阶跃响应均需要测试, 每架无人机就需要做多次阶跃响应实验, 这样费时又费力。基于此, 笔者对现有舵面时域分析方向进行改进, 实现多舵面同步时域分析。

收稿日期: 2020-09-22; 修回日期: 2020-11-18

作者简介: 李 瑾(1986—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事雷达电子研究。E-mail: 372339516@qq.com.com。

1 无人机舵面时域分析

无人机的舵面时域响应分析可分为瞬态响应和稳态响应分析 2 部分。通过给舵机输入舵面运动频率、幅值等阶跃信号，对舵面做以下检查：

1) 舵机位置与指令跟随性：舵面运动的瞬态及其稳态过程反馈的电气位置和输入的幅值在舵面设定运动频率下的误差值应满足舵机设计指标。

2) 舵面偏转极性：舵面运动的方向应与舵机输入的幅值指令满足舵机极性定义，并且舵机反馈的电气位置也应与舵机输入的幅值指令满足舵机极性定义。

3) 舵机额定速度：反馈的舵面电气位置运动曲线瞬态上升和下降的速度，即上升和下降曲线幅值变化量和时间变化量的比值，应满足舵机额定运动速度指标。

4) 舵机工作状态：舵面运动的瞬态及其稳态过程，舵机工作状态应正常，无舵机故障。

5) 舵机超调：舵面运动的瞬态过程反馈的电气位置以及从瞬态到稳态时的电气位置，应无超调，即电气位置突变不超过舵机设计指标要求。

2 无人机单舵面时域分析

目前典型的无人机伺服作动系统构型有 6 个舵面，包括左右副翼、左右升降襟副翼、左右升降方向舵等，共有 6 个舵机。每个舵机又有主、备 2 个通道，分别为左副翼主通道、左副翼备通道、右副翼主通道、右副翼备通道、左升降襟副翼主通道、左升降襟副翼备通道、右升降襟副翼主通道、右升降襟副翼备通道、左升降方向舵主通道、左升降方向舵备通道、右升降方向舵主通道、右升降方向舵备通道共 12 个通道。默认情况下舵机优先通过舵机的主通道与舵面进行交联，一旦主通道工作异常时，系统会自动切换到该舵面的备通道上工作。图 1 为左副翼的阶跃响应实验。

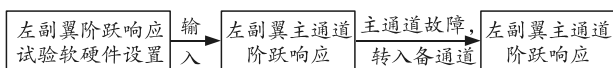


图 1 左副翼主备通道阶跃响应

假设 6 个舵面及其主备通道的阶跃响应检查需要的时间均为 n ，则 6 个舵面完成主备通道的阶跃响应时间复杂度 $T(n)$ 如下式所示：

$$T(n)=12n。 \tag{1}$$

可以看出：如果对每个舵面进行时域分析，时间复杂度为 $12n$ ，需要 12 次实验操作，而每次对舵面的时域分析本身就很耗时，如果要完成所有舵面

的时域试验分析，耗时耗力，影响实验效率。

3 无人机多舵面同步时域分析

为提高工作效率，将所有舵面以及舵面的主、备通道的测试端串接在一起，然后由信号发生器输入相关信号，进行舵面的时域分析。当输入一定频率和不同幅值的激励信号时，可同时对所有舵面主通道进行时域分析；之后，对各个左右舵面分别造成故障，使其自动切换到相应舵面的备通道进行工作，从而完成对所有舵面备通道的时域分析。多舵面时域分析如图 2 所示。

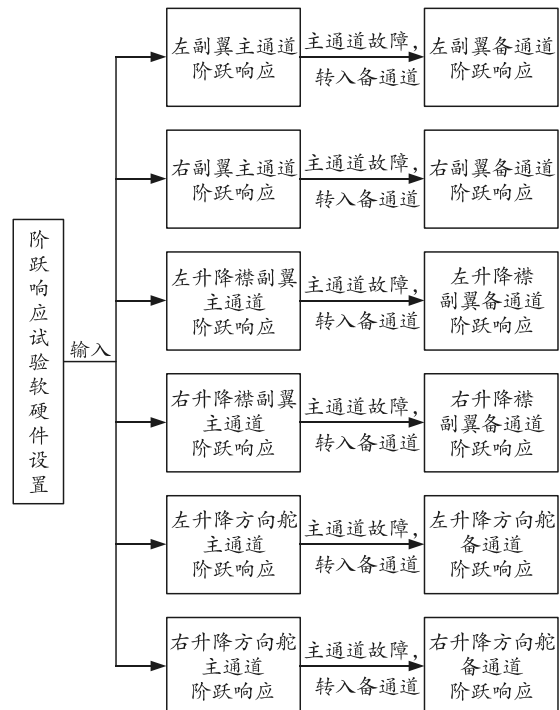


图 2 多舵面同步阶跃响应实验

假设 6 个舵面及其主备通道的阶跃响应检查需要的时间均为 n ，则 6 个舵面同步完成主通道，再同步完成备通道的阶跃响应时间复杂度 $T(n)$ 如下：

$$T(n)=2n。 \tag{2}$$

可以看出：如果分别对 6 个舵面同步进行时域分析，时间复杂度为 $2n$ ，相对于单舵面时域分析，时间复杂度缩短了 $5/6$ ，只需要 2 次实验操作，有效地提高了实验效率。

4 实验结果与分析

4.1 实验环境设置

无人机的时域分析实验环境包括飞机和测试系统 2 部分。通过连接测试系统电缆到飞机平台接口上。测试系统配置信号发生器、测试计算机和相关测试软件等。

4.2 实验过程

时域分析实验过程如下:

- 1) 通过测试系统软件设置实验环境;
- 2) 伺服作动系统上电, 液压驱动, 地面液压系统供压;
- 3) 通过测试系统软件将舵机置于零位, 并开始记录数据;
- 4) 施加激励信号, 激励信号分别为一定频率和幅值的激励指令;
- 5) 完成激励测试后, 停止数据记录。

4.3 单舵面实验结果与分析

以左副翼阶跃响应为例, 其单舵面主备通道阶跃响应实验结果如表 1 和表 2。

表 1 左副翼单舵面主通道阶跃响应实验结果分析

确认参数	期望值	实测值
位置与指令跟随性/mV	≥100	20
舵面偏转极性	正确	正确
舵机额定速度/(V/s)	≥20	22
舵机工作状态	正常	正常
舵机超调	无	无

表 2 左副翼单舵面备通道阶跃响应实验结果分析

确认参数	期望值	实测值
位置与指令跟随性/mV	≥100	15
舵面偏转极性	正确	正确
舵机额定速度/(V/s)	≥20	23
舵机工作状态	正常	正常
舵机超调	无	无

4.4 多舵面同步实验结果与分析

同样以左副翼阶跃响应为例, 其多舵面同步主备通道阶跃响应实验结果如表 3 和表 4。

表 3 左副翼多舵面同步主通道阶跃响应实验结果分析

确认参数	期望值	实测值
位置与指令跟随性/mV	≥100	20
舵面偏转极性	正确	正确
舵机额定速度/(V/s)	≥20	22
舵机工作状态	正常	正常
舵机超调	无	无

表 4 左副翼多舵面同步备通道阶跃响应实验结果分析

确认参数	期望值	实测值
位置与指令跟随性/mV	≤100	15
舵面偏转极性	正确	正确
舵机额定速度/(V/s)	≥20	23
舵机工作状态	正常	正常
舵机超调	无	无

通过实验结果可知: 多舵面同步阶跃响应试验能够达到单舵面阶跃响应实验的结果, 满足舵面阶跃响应实验要求, 在实验的时间复杂度上缩短了 5/6, 有效地提高了效率。

5 结论

无人机的试验试飞是无人机科研的后期阶段, 对最终无人机的科研定型起着及其重要的作用。笔者对无人机舵面的时域分析试验进行了改进, 把原来舵面时域分析中的舵面逐一阶跃响应试验方法, 改为多舵面同步阶跃响应试验方法。实验结果显示: 在满足实验要求的同时, 较之于舵面逐一阶跃响应试验, 多舵面同步阶跃响应试验的时间复杂度缩短了 5/6, 有效提高了实验效率。

参考文献:

- [1] PACHTER M, SWAROOP D, FOWLER J M et al. Complexity in UAV cooperative control[D]. American Control Conference. 2002: 1831-1836.
- [2] PACHER M, RASMUSSEN. UAV cooperative control[D]. American Control Conference. 2002: 50-55.
- [3] PAUL F. Introduction to UAV systems[M]. John Wiley & Sons, 2012: 1-20.
- [4] DE GARMO M. Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace[J]. MTTRE, Center for Advanced Aviation System Development. McLean, Virginia, November, 2004: 1-1.
- [5] CHEN H Y, JOHN P, JOHN O. International Journal of Intelligent Unmanned Systems[M]. Emerald Group Publishing Limited, 2013: 1-15.
- [6] 周洁. 国际无人机发展掠影[J]. 人民公安, 2015(17): 20-21.
- [7] 胡光曲. 俄研制五代隐身直升机具备战斗机的攻击能力 <http://www.huaxia.com/thjq/jswz/2012/10/3045813.html>. 华夏经纬网, 2012: 1-1.
- [8] 王晓易. 美隐身无人舰载机 X47B 首次收起落架巡航飞行 [OL]. <http://news.163.com/11/1013/17/7G8TGCS600011MTO.html>. 环球网, 2011: 1-1.
- [9] 秦博, 王蕾. 无人机发展综述[J]. 飞航导弹, 2002(8): 4-10.
- [10] ILLMAN, PAUL E. The Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge[J]. McGraw-Hill Professional, 2013: 31-61.
- [11] 曾庆华, 张为华. 无人飞行控制系统试验教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-30.
- [12] 黄国江. “全球鹰”高空长航时无人机侦察机系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 1-20.