

某型运输机纵向等效拟配的问题及分析

李雅静, 宋攀, 焦岗

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 某型运输机试飞纵向短周期等效拟配中在两个问题, 一是纵向杆输入时长较长, 频域辨识时高频段结果较差, 二是在高阶电传飞机等效拟配时选择单拟配还是双拟配的问题, 为了解决这两个问题, 提出了时域辨识方法和对比分析传统机械式飞机和电传飞机试验数据方法; 飞行试验数据处理结果表明, 对于输入时间较长的试验动作, 时域辨识效果较频域辨识好, 使用时域和频域辨识结合的方法, 大大提高了试飞数据的适用性; 通过比较传统机械式飞机和现代电传飞机的试飞数据及拟配结果, 发现高阶电传飞机必须使用双拟配方法才能更全面评价飞机特性; 文中提出的辨识方法和分析方法很好地解决了某型运输机等效拟配中遇到的问题, 可供其他电传飞机飞行试验参考。

关键词: 频域辨识; 时域辨识; 等效拟配; 单拟配; 双拟配

Problems and Analysis of Pitch Axis Equivalent Matching for Transporter

Li Yajing, Song Pan, Jiao Gang

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

Abstract: Two problems in the pitch axis equivalent matching of the transporter were researched and solved in this paper. One problem is the result of high frequency range was bad in frequency response identification due to the long time of the pitch axis input. To solve these problems, domain identification method and contrastive analysis were proposed. The results of the flight test data show that, time domain identification method had better matching result than frequency domain identification method for long time input. A contrastive analysis of one parameter matching and two parameters matching result was made and the two parameters matching method was chosen. Identification method and analysis approach proposed here were effective and can be adopted to the quality assessment of other aircraft.

Keywords: frequency response identification; time domain identification; equivalent matching; one parameter matching; two parameters matching

0 引言

飞机纵向短周期动态特性评价是飞行试验中一项十分重要并且基础的内容, 等效拟配方法是 GJB-2874 推荐的最常用的方法, 等效拟配有单拟配和双拟配两种方式, 单拟配是指在拟配时只使用一个低阶等效模型, 双拟配则是在拟配时使用并求出两个低阶等效模型。文献 [1] 指出很多情况下单拟配能给出正确的低阶等效模型, 所以要仔细研究单拟配, 文献详细研究了单拟配的方法及结果, 近年来出现很多有关等效系统准则及拟配方法的文章^[2-3], 讨论的问题包括: 等效系统模型的选取, 最优拟配方法, 迭代初值的选取, 评价拟配效果等, 但以往的文章中都没涉及纵向短周期单拟配和双拟配的区别, 或如何确定电传运输机进行飞行品质评价时使用单拟配还是双拟配, 本文通过某型运输机纵向短周期等效拟配的结果分析了两者差别, 通过与设计指标比对, 最终确定该型机需使用双拟配方法进行纵向短周期特性的评价。

此外, 在飞行试验中, 纵向短周期评价时使用驾驶杆俯仰倍脉冲输入, 某型运输机纵向倍脉冲输入时间较长, 频域辨识的结果在高频段产生振荡, 使得拟配结果较差, 本文研究了时域辨识与频域辨识相结合的方法, 解决了这一问题, 并应用于某型运输机飞行试验的数据处理中, 大大提高了试飞数据的有效性。

收稿日期: 2016-04-19; 修回日期: 2016-05-05。

作者简介: 李雅静(1985-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事飞机飞行品质试验方向的研究。

1 等效系统拟配

根据 1797A 中提出等效系统方法, 采集飞机纵向杆输入 d_e 、俯仰角速率响应 q 、法向过载响应 n_z 数据, 对输入输出进行频域辨识得到系统频域响应, 选取合适的等效系统模型采用阻尼最小二乘法拟配飞机的长、短周期反应, 得出相应的等效系统品质指标。等效系统模型如下:

$$\frac{q(s)}{d_e(s)} = \frac{k_q s(s+1/T_{\theta 1})(s+1/T_{\theta 2})e^{-\tau}}{(s^2 + 2\omega_{sp}\zeta_{sp} + \omega_{sp}^2)(s^2 + 2\omega_p\zeta_p + \omega_p^2)} \quad (1)$$

$$\frac{n_z(s)}{d_e(s)} = \frac{k_n(s+1/T_{n1})(s+1/T_{n2})e^{-\tau}}{(s^2 + 2\omega_{sp}\zeta_{sp} + \omega_{sp}^2)(s^2 + 2\omega_p\zeta_p + \omega_p^2)} \quad (2)$$

式中, ω_{sp} 为短周期无阻尼自然频率, ζ_{sp} 为短周期阻尼比, ω_p 长周期无阻尼自然频率, ζ_p 为长周期阻尼比。

单拟配分为俯仰角速率单拟配、法向过载单拟配, 以往大部分飞机的短周期特性评价使用的是俯仰角速率单拟配, 因为单拟配结果描述飞机的短周期特性, 而且计算简便。

双拟配要求对俯仰角速率和过载同时进行拟配, 这样是为了保持常规飞机操纵时姿态和轨迹运动符合客观规律^[3]。

2 时域辨识

2.1 时域辨识方法

设飞机的高阶增稳系统及其等效系统在相同的输入 $u(t)$ 作用下的输出响应分别为 $y_H(t)$ 和 $y_L(t)$, 如果 $y_H(t)$ 和 $y_L(t)$ 足够接近, 则 $u(t)$ 到 $y_L(t)$ 的辨识出的线性模型可等效飞机高阶系统。

代价函数^[4]为:

$$M = \int_{t_0}^t \|y_H(t) - y_L(t)\|^2 dt < \epsilon \tag{3}$$

$y_H(t)$ 可以通过直接测量得到; $y_L(t)$ 在第 k 个采样时刻的数值应满足如下差分方程:

$$A(q^{-1})y_L(k) = B(q^{-1})u(k) + e(k) \tag{4}$$

其中:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \tag{5}$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n+1} \tag{6}$$

式中, $e(k)$ 为方程残差, 由剩余高阶特性、随机风干扰及测量噪声等引起。MATLAB 自带的系统辨识工具箱^[5]中现有的函数包括 ARX, PEM, BJ, OE, ARMAX 等。使用不同辨识方法得到输入输出之间的时域高阶线性模型, 将飞机真实输入通过这个高阶线性模型, 得到的输出与飞机真实输出比较, 选择与飞机真实输出相似度最大的模型进行频域响应计算, 之后使用最小二乘法进行等效拟配。

2.2 某型运输机纵向短周期时域辨识

在飞行试验中, 纵向短周期评价时使用驾驶杆俯仰倍脉冲输入, 某型运输机属大型运输机, 纵向倍脉冲输入时间较长, 图 1 为某型运输机纵向杆输入、飞机俯仰角速率响应、过载响应, 纵向杆输入时长 2.5 s, 频率较低, 会导致辨识结果在高频段较差。频域辨识的结果如图 2、图 3 所示, 图 2 为俯仰角速率频域辨识结果, 图 3 为过载频域辨识结果, 图中实线为时域辨识结果即时域法高阶线性模型的 bode 图, 虚线为频域辨识结果, 由图可见, 频域辨识结果在高频段出现振荡, 尤其体现在俯仰角速率的幅值曲线, 影响等效拟配结果, 而时域辨识得到的 bode 图很平滑, 两种辨识曲线比较接近, 这种情况下, 可以直接使用时域辨识的结果进行等效拟配, 频域拟配结果如图 4、图 5 所示, 图中实线为辨识得到系统 bode 图, 虚线为拟配得到等效系统 bode 图, 时间历程拟合程度如图 6、图 7 所示, 图中实线为系统真实响应, 虚线为等效系统响应, 可见使用时域辨识得到频域响应进行拟配效果较好。

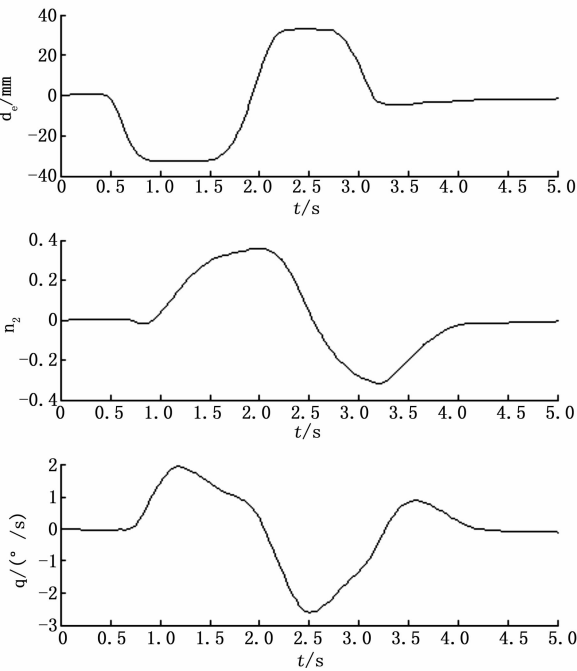


图 1 某型运输机俯仰倍脉冲输入输出时间历程

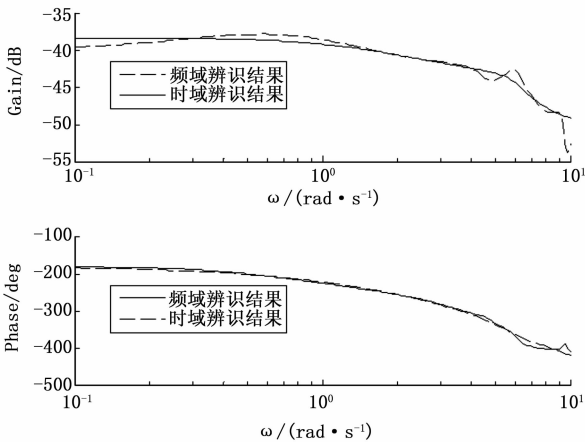


图 2 过载频域辨识结果

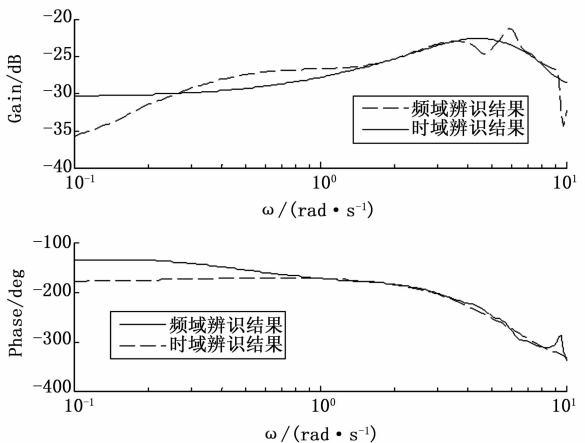


图 3 俯仰角速率频域辨识结果

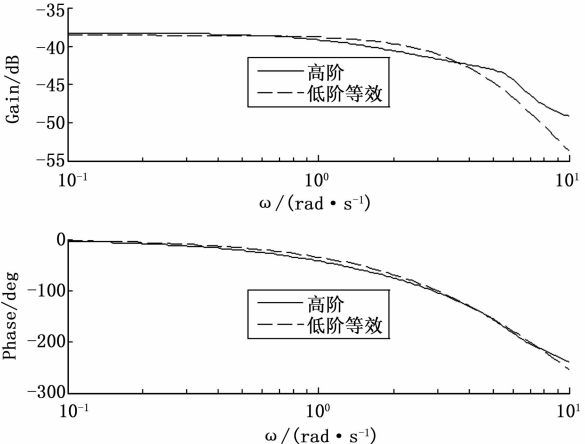


图 4 过载拟配结果 (频域)

3 单拟配、双拟配差别及分析

以往飞机试飞中, 纵向短周期评价一般使用俯仰角速率单拟配, 很少使用俯仰角速率和过载同时拟配, 这是因为这些飞机的俯仰角速率和过载分别进行拟配的结果相近, 如图 8 所示为某二代机纵向输入输出时间历程, 图中从时间历程看飞机俯仰角速率和过载响应都表现出了明显的欠阻尼特性, 等效拟配结果见表 1, 计算数据也说明单拟配和双拟配计算结果十分接近, 失配度都在可接受范围内, 单拟配俯仰角速率的结果可以

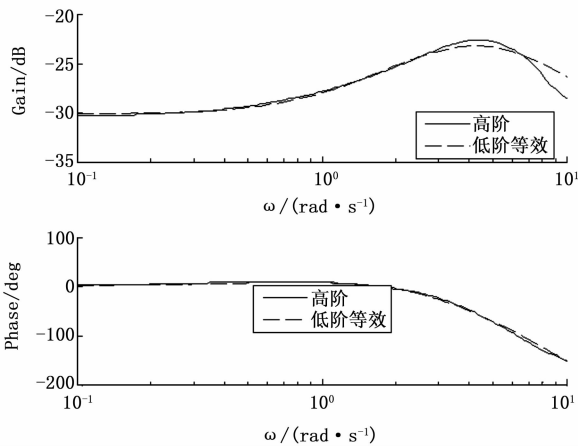


图 5 俯仰角速率拟配结果（频域）

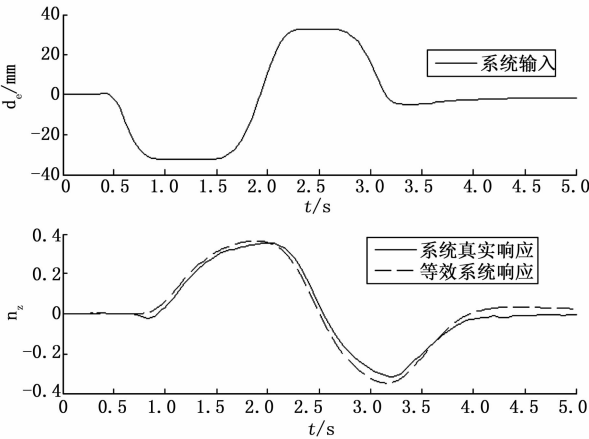


图 6 过载拟配结果（时域）

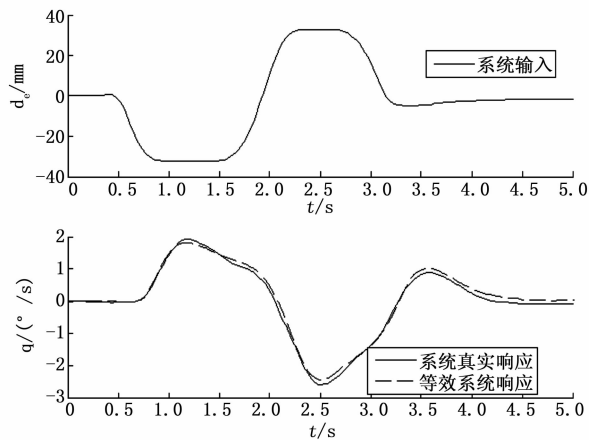


图 7 俯仰角速率拟配结果（时域）

用于描述飞机纵向短周期特性。

在某型运输机纵向短周期动态特性试飞的数据处理中，发现俯仰角速率和过载分别拟配的结果相差较大，对第 3 节的试飞数据作进一步分析。观察图 1 时间历程可以发现，俯仰角速率自由响应有震荡，表明阻尼较小，而过载响应无振荡、阻尼较大，实际对俯仰角速率和过载分别进行单拟配的结果如表 2 所示。表 2 数据显示某型运输机俯仰角单拟配的结果阻尼较小

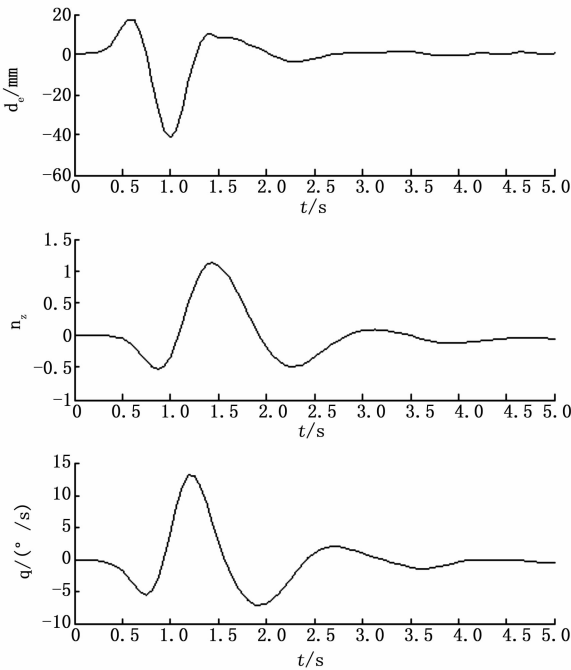


图 8 某二代机俯仰倍脉冲输入输出时间历程

表 1 某二代机俯仰轴等效拟配结果

	单拟配计算			双拟配计算		
	ω_{sp}	ζ_{sp}	失配	ω_{sp}	ζ_{sp}	失配
q	3.38	0.43	0.17	3.18	0.48	9.631
n_z	3.29	0.42	15.56			

为 0.57，而飞行员评述飞机俯仰响应慢、阻尼较大，俯仰角单拟配的结果不能描述飞机纵向短周期特性。大量试飞数据计算结果显示，双拟配结果与设计值（某型运输机纵向短周期阻尼设计值在 0.7~1.3 之间）和飞行员评述相符，分别比较图 9 与图 5、图 10 与图 7、图 11 与图 4、图 12 与图 6，虽然双拟

表 2 某型运输型机等效拟配结果

	单拟配计算			双拟配计算		
	ω_{sp}	ζ_{sp}	失配	ω_{sp}	ζ_{sp}	失配
q	4.83	0.57	0.026	4.47	0.91	13.15
n_z	3.90	1.02	41.29			

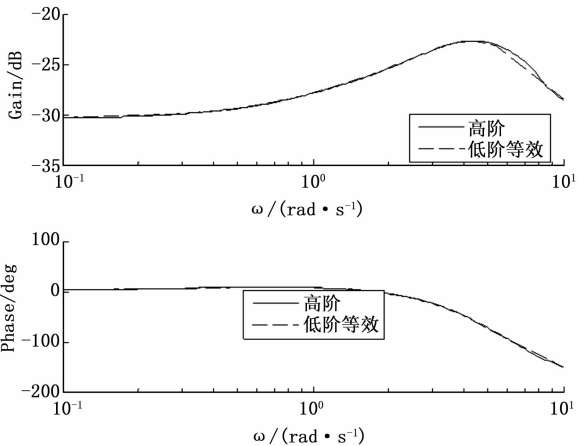


图 9 俯仰角单拟配结果（频域）

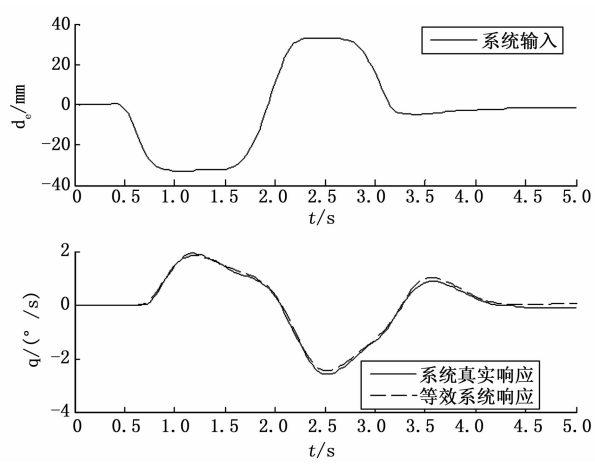


图 10 俯仰角速率单拟配结果 (时域)

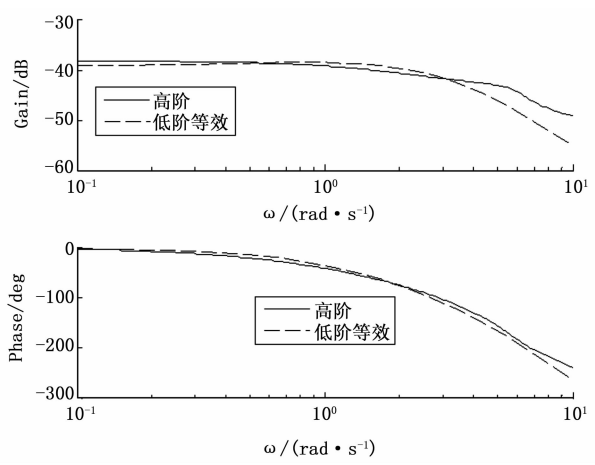


图 11 过载单拟配结果 (频域)

配的拟合程度与单拟配结果相比较差,但双拟配兼顾了俯仰角速率和过载两方面信息,且失配度在可接受范围内,得到的结果更可信,所以最终该型机短周期特性评价选用双拟配俯仰角速率和法向过载。

分别单拟配俯仰角速率和法向过载与二者同时拟配之所以结果不同,是因为拟配算法只是寻找使代价函数最小的一组解,单拟配俯仰角速率或单拟配过载都会使计算结果偏离真实值,俯仰角速率和过载同时拟配二者相互制约,得到的结果更

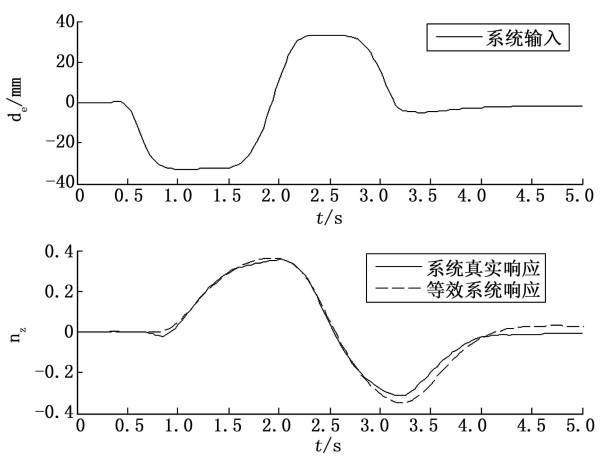


图 12 过载单拟配结果 (时域)

接近真实值,所以对于飞行控制系统设计比较复杂的现代飞机,短周期特性试飞科目的数据处理应选择同时拟配俯仰角速率和法向过载的方法。

4 结论

本文分析并解决了某型运输机纵向短周期特性评价中发现的问题,包括频域辨识结果较差时,先使用时域辨识先得到输入输出的高阶时域模型,之后用最小二乘法进行拟配,结果较好,如此大大提高了试飞数据的可用性,节省了试飞架次;分析了该型机纵向短周期单拟配和双拟配结果的差异,最终确定使用双拟配方法,双拟配方法计算得到结果更可靠。文中提到的问题及解决方法可为以后飞机纵向短周期飞行试验提供参考。

参考文献:

[1] 田海燕. 飞行品质中低阶等效系统的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
[2] 王水英, 黄俊. 基于 MatLab 的俯仰轴等效系统拟配及飞行品质评价 [J]. 飞机设计, 2009, 29 (11): 32-36.
[3] 陈桂孙, 方振平. 俯仰轴飞行品质中等效系统准则的计算与模拟 [J]. 飞行力学, 2003, 21 (1): 16-20.
[4] 马维金, 王俊元, 李凤兰, 等. 基于 ARX 模型的控制系统的辨识及稳定性分析 [J]. 中北大学学报, 2010, 31 (1): 9-13.
[5] 徐昕, 李涛, 伯晓晨. MATLAB 工具箱应用指南控制工程篇 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

(上接第 246 页)

集与处理系统运行结果表明,能够快速提取钨极、核燃料棒端塞、焊室圆孔内腔等边缘特征,准确计算出极距,可以简化钨极调整工作、稳定焊接质量;焊接试验结果表明,在上述焊接参数条件下,极距在 0.8~1.2 mm 范围内可以获得理想的密实区深度。

参考文献:

[1] 张生玲, 李强. 低碳约束下中国核电发展及其规模分析 [J]. 中国人口、资源与环境, 2015, 25 (6): 47-52.
[2] 梁宇, 钟标全, 邹杰. MSR 管接管板封口焊钨极影响因素研究 [J]. 东方电气评论, 2015, 29 (1): 50-53.
[3] 冯英超, 石爱强, 刘丽丽, 等. 钨极对不添丝自动 TIG 焊工艺的

影响 [J]. 电焊机, 2009, 39 (4): 151-152.
[4] 陈宝山, 刘承新. 轻水堆燃料元件 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
[5] 王敏. 激光-TIG 复合热源焊接钛合金 T 形结构焊缝成形特点及影响因素分析 [J]. 焊接学报, 2010, 31 (12): 105-108.
[6] 王军, 冯吉才, 何鹏, 等. TIG-MIG 间接电弧焊工艺 [J]. 焊接学报, 2009, 30 (2): 145-148.
[7] 王天先. 高压换热器管子管板自动脉冲钨极氩弧焊 [J]. 电焊机, 2007, 37 (8): 64-68.
[8] 朱焱丹. 基于 LabVIEW 的机器视觉系统的标定 [J]. 中国测试, 2009, 35 (6): 54-56.
[9] 张艳清, 高辉, 孙立强. 基于 LabVIEW 平台的焊接电弧图像研究 [J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 19 (4): 35-37.

基于 CompactRIO 的载人航天器 外场试验平台设计

应 鹏, 赵吉明, 刘武通

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 针对目前载人航天器外场试验的需要, 提出一种基于 CompactRIO 的小型化试验平台; 系统采用可配置的仪器系统进行设计, 硬件可模块化配置, 能适应外场环境, 使用图形化编程软件进行虚拟仪器设计, 具备实时性、多任务、可配置的特点, 具备数据分析和存储能力, 可进行灵活定制、快速开发; 分析了外场试验小型化测试平台的优势及关键要素, 对试验需求、系统设计、硬件设计、软件设计、使用效果进行说明, 对整个系统性能的满足情况进行说明; 经验证, 该平台可提高外场试验的效率及试验稳定性, 可为后续航天器外场试验提供参考。

关键词: 载人航天器; 外场试验; CompactRIO; 小型化

Design of Manned Spacecraft Field Testing Platform Based on CompactRIO

Ying Peng, Zhao Jiming, Liu Wutong

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: For the current needs of the manned spacecraft field test, propose a miniaturized test platform based on CompactRIO. The system uses a configurable instrument system, hardware can be modular configurations, able to adapt to the external environment, uses graphical programming software to make virtual instrument design, with real-time, multi-tasking, configurable features, with data analysis and storage capacity, can be used to make flexible customization and rapid development. Analyzing the advantages and key elements of field tests of miniaturized test platform, illustrating test requirements, system design, hardware design, software design, describing the overall system performance. The platform can improve the efficiency and stability of the field test experiments. It can provide a reference for subsequent field testing of spacecraft.

Keywords: manned spacecraft; field test; CompactRIO; miniaturization

0 引言

航天器研制过程中需要对实际性能进行真实环境考核, 需要进行相关的外场试验^[1]。随着航天科技的迅速发展, 各类航天器进行外场试验的需求逐渐增多。传统的外场试验用测试系统基本使用本地测试用的各类专用设备进行组合, 试验设备体积较大, 数量较多, 部分设备在室外恶劣条件下工作稳定性下降, 设备的整合及调试花费较多时间。

通过总结前期的试验经验, 能适应外场试验的测试平台从功能上需要实现各类信号的采集, 产生激励信号, 具备一定的通信功能, 在噪声环境下具备良好的性能, 方便携带, 功耗较低^[2]。测试平台应具备以下特点。

1) 小型化: 测试平台在体积上、重量上相比目前常用测试设备有一定优势, 方便携带, 分解件少, 方便组装, 应能够适应外场试验的温度、震动、电磁干扰的影响, 功耗较低, 电源的续航能力强, 在保证稳定性的前提下, 提高系统便携性。

2) 模块化: 模块尽量通用化, 便于拆卸和更换, 支持热插拔功能。模块带有信号调理功能, 采样速率与精度达到设计要求, 可测量电压信号、数字时序信号, 具备一定的输出功能, 能够作为激励源或参考信号, 具备通信功能。

3) 方便开发: 上位软件方便易用, 可进行快速定制开发和原型设计, 适应不同的测试需求, 能够实现一定的算法功能。

4) 降低成本: 测试平台具有较高的测试灵活性, 能够做到测试复用, 覆盖大多数需求。通过更换模块, 更改软件达到应对新需求目的。设备实用性强, 便于长期使用。

出于提高外场试验效果及测试水平的需要, 提出一种外场试验专用小型化测试平台。该平台采用相对灵活、可配置的仪器系统进行设计, 硬件方便携带, 能适应外场环境, 可模块化配置; 使用图形化编程软件进行快捷开发, 系统具备实时性、多任务、可配置的特点, 具备数据分析和存储能力, 软件可进行灵活定制。

1 系统方案设计

CompactRIO 是一款能适应较恶劣环境和有限空间的嵌入式系统, 属于面向仪器的 PCI 拓展的小型化系统, 结合了 PC 的成熟优势和 PCI 总线向仪器领域扩展的能力。该系统包括三部分——实时处理器 (Real-time processor)、内置 FPGA 的

收稿日期: 2016-06-27; 修回日期: 2016-07-18。

作者简介: 应 鹏 (1985-), 男, 山西长治人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事自动化测量测控系统研究。

赵吉明 (1963-), 男, 山东人, 研究员, 主要从事航天器综合测试技术方向的研究。

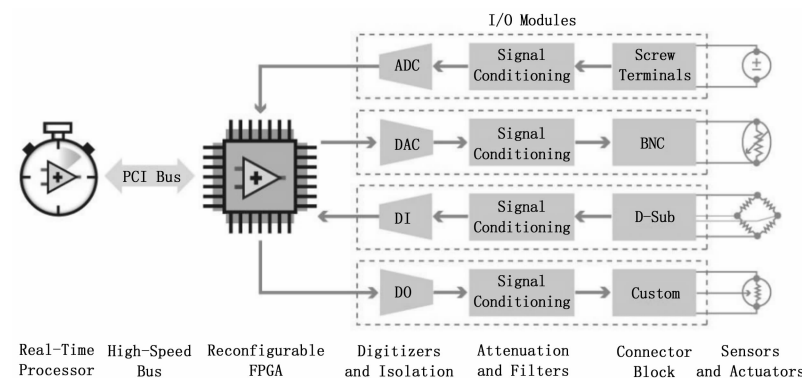


图1 CompactRIO 系统组成图

可重配置机箱、可插拔的输入输出模块。系统本身可适应 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境,结构坚固。CompactRIO 平台软件可基于 LabVIEW 开发,架构开放灵活,可以便捷控制底层硬件设备。使用该系统开发出的测量测控系统,具备实时性、灵活性、高可靠性等特点^[3]。

采用基于 CompactRIO 设计的测试系统架构图如图 2 所示。该系统由监控上位机、CompactRIO 系统、外围扩展调理接口模块组成。上位机通过 USB 接口、网络接口与 CompactRIO 系统中的实时控制器通信,接受处理完成的各类测量数据,发送相关监控及调度指令;实时控制器实现控制算法与数据处理,控制 FPGA 背板及可插拔模块的硬件逻辑及接口,调度系统内的软硬件资源;可重配置机箱包含一块 FPGA 背板,用于连接实时控制器与可插拔模块,可插拔模块安装在机箱中与 FPGA 建立通信,模块采样到的数字量数据在 FPGA 中会经过预先的处理,如进行傅里叶变换、曲线拟合等, FPGA 完成数据处理后会通过高速数据总线传送至实时控制器进行处理,实时控制器发出的控制指令在 FPGA 中也会进行解码用于控制各个模块,转换为各类输出和通信信号, FPGA 由于时钟统一、硬件并行特点使得数据的传输量及实时性得到保证,工作性能可以等同于专门定制的硬件电路^[4];可插拔模块内置信号调理和数模转换电路,并且具备工业级的隔离设计,可直接与外部传感器/驱动器互联。

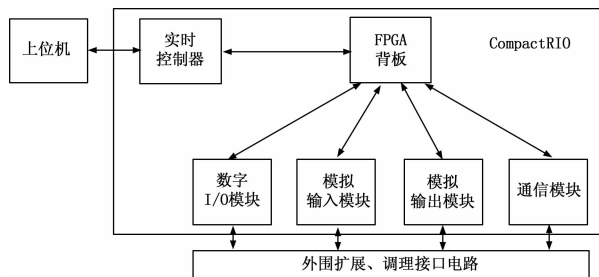


图2 基于 CompactRIO 的测试系统架构

在程序开发方面:利用图形化开发环境,可以使用 LabVIEW 对嵌入式系统的处理器、FPGA 和 I/O 进行编程,以实现嵌入式控制、监测、处理和数据录入应用。上位机运行 LabVIEW 开发的监控程序, CompactRIO 实时控制器运行 LabVIEW RT 开发的嵌入式程序,可重配置机箱中的 FPGA 运行开发的 FPGA 硬件逻辑,鉴于 LabVIEW 开发的便捷性,

在完成上位机至外围接口的配置后,利用开发环境可以方便的访问控制底层硬件,可缩短程序开发时间。

CompactRIO 包含可软件定制的仪器系统,仪器模块化集成、数据吞吐量较大,可以配置为各种外场试验的测量测控系统使用,使用 LabVIEW 图形化编程软可以整合软硬件资源,实现整个定制过程的自动化,能够继承使用大量成熟的开发模块及算法,开发速度比传统嵌入式系统研发从硬件到软件全定制的过程有很大提升^[5]。从分析航天器外场试验小型化测试平台的系统设计方案来看,在目前的技术趋势下,选择 CompactRIO 系统为基础来搭建测试平台具备一定的优势。使用相对成熟、接口丰富的模块化仪器来实现信号的输入输出、信号调理、数据滤波、数据采集与存储,以上功能集成于相对紧凑、坚固的仪器系统中,平台的工作性能及适应性得到满足。

2 硬件设计

2.1 总体方案

总体硬件方案采用典型的上位机一下位机模式,即选用通用便携计算机作为上位机, CompactRIO 模块及外围拓展及调理接口作为下位机,上位机下位机间通过网络或 USB 连接,上位机用于数据存储、状态监控,下位机以 CompactRIO 系统为核心,搭配相应功能的输入输出模块及外围拓展模块。系统能适应野外工作能力,所有设备支持使用直流电源供电。硬件设计考虑便携性及可靠性,整体结构进行紧凑布局,约为一个手提箱大小,方便携带和运输。

2.2 外围拓展、调理接口设计

被试验对象有各种不同类型的连接接口,包括有线信号、无线信号、模拟电压电流信号、温度信号、振动信号、应力信号、声信号、射频信号、高低速数字信号等。外围拓展及调理接口模块需要能适应被试验对象的各类接口,同时需要与 CompactRIO 系统进行连接,将各类信号经过信号隔离、信号解调、信号放大、信号滤波,电平转换,确保待测信号安全、稳定。外围接口进行模块化设计,采用背板一板卡插接式进行集成,最大限度适应各类信号需求。待测信号经后面板输入,通过背板进行跳线分路、经信号处理办卡进行信号调理后,由前面板输出至 CompactRIO 可插拔模块,完成信号的输入输出。如电压输入首先通过板卡的隔离放大器进行信号隔离,隔离后的电压信号通过电压调理电路转换为模块采集的使用电压范围(一般为 $\pm 10\text{ V}$),电压信号再进入模块进行模数转换、信号滤波及处理等;电流输出信号首先由 CompactRIO 发出相应配置指令,由 FPGA 选通相应的可插拔模块中的电流输出接口,电流输出信号为 $0\sim 20\text{ mA}$ 信号,经过外围接口模块进行信号隔离、电流放大器放大,输出被测对象适用的相应电流。

2.3 CompactRIO 模块选用

1) 实时控制器与 FPGA 背板:

使用实时控制器与 FPGA 背板集成的 CompactRIO 系统 9073,内含主频 266MHz 工业实时处理器,可用于控制、数据记录和分析; FPGA 拥有 2 百万门,背板上布置了 8 个槽位,用于定制的 I/O 定时、控制和处理。实时控制器循环周期

抖动在微秒级。需要内置一定容量的固态存储器用于数据存储、具备相应的存储扩展接口便于数据查询。控制器具备相对较低的功耗,具备直流电源供电的能力,外壳能适应振动及冲击,能够满足复杂的环境需要。

FPGA 背板使用 40 MHz 基准时钟,以 25 ns 时间周期执行定时和控制循环,是实时控制器与可插拔模块的桥梁,可编程逻辑模块直接与 I/O 模块互联,计算速率可达到 200 kHz。可编程逻辑并行执行数据采集、计算和控制操作,使用 FPGA 开发可修改底层硬件配置,快速变换硬件的跳线,不需要重复投产硬件,可适应多种模式的测试,达到一机多用的目的^[6]。

2) 可插拔模块:

模拟电压输入模块使用 NI-9221 作为模拟输入模块,拥有 8 个通道,量程为 ± 60 V,分辨率 12 位,采样率 800 kS/s,单端输入,多路复用。模拟信号在模拟输入模块中经过噪声滤波后做数字化处理,通过背板总线传入 FPGA 做进一步处理。模拟电压输出模块使用 NI-9263 作为模拟输出模块,拥有 4 个通道,采样率 100 kS/s,精度达到 16 位,范围为 ± 10 V。在测试过程中产生模拟激励信号,如正弦波、特定电压值等。数字输入输出模块使用 NI-9401 作为高速双向数字 I/O 模块,电平标准为 5 V/TTL,速率为 100 ns,漏极/源极数字输入输出,可按半字节配置,该模块同时作为计数器、定时器、信号发生器来使用。通信模块使用 NI-9871 进行 RS422/RS485 信号的收发。

可插拔模块主要用于信号调理及通信。可插拔模块具备信号隔离能力,保证安全性,具备模拟输入输出、数字输入输出、数字通信能力。在数据输入方面,信号调理模块将数字信号进行调理,调理成实时处理服务器可接入的电平标准,还可将模拟信号进行模数转换,转换出的数字信号供处理器进行处理。在数据输出方面,信号调理模块可将数字信号进行放大调理,将弱电平数字信号调理成与接口设备电平匹配的数字信号,还可进行数模转换,将数字信号转换为模拟信号,再经过放大电路,输出所需要的模拟电压电流信号;在通信方面,支持主流的串行、并行、GPIO 通信功能。

3 软件设计

基于 CompactRIO 系统的测试平台软件通用结构与功能如图 3 所示。

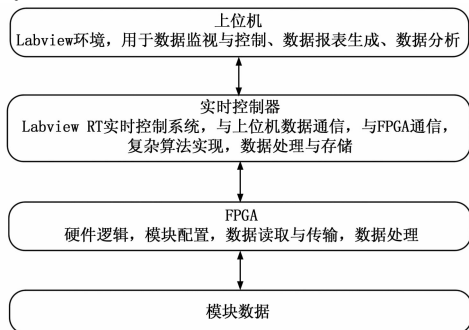


图 3 软件结构与功能说明

软件通用结构包括三部分,分别是上位机软件、实时控制器 RT 软件、FPGA 逻辑。

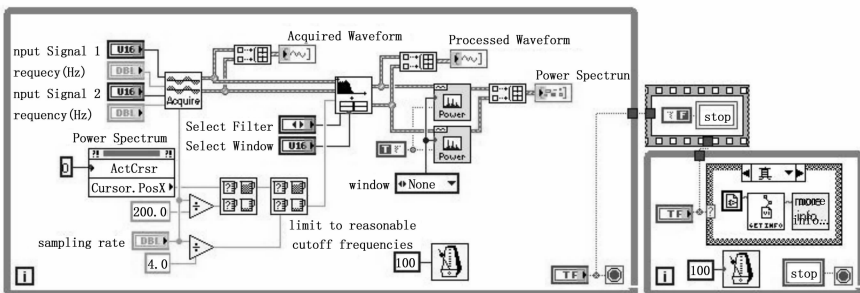


图 4 采集及信号模拟软件框图

1) 上位机软件:

上位机软件基于 Labview 设计,用于 CompactRIO 的数据监视与控制,具备进行数据分析的功能,同时快速生成数据报表。上位机与实时控制器间通过以太网连接,基于 TCP/IP 协议进行数据通信,带宽达到 100 M,上位机软件可实时读取实时控制器中的状态数据,也可读取存储在实时控制器存储器中的数据,新的配置模块也可通过网络实时地部署到实时控制器中。上位机软件基于 Labview 的图形化优势,可以开发出功能较为丰富的操作与监控界面,使得用户直观全面掌控 CompactRIO 系统的实时信息。

2) 实时控制器软件:

实时控制器软件基于 LabVIEW RT 开发,具备较强的实时性,对事件能够迅速反应,同时处理较为复杂的算法程序,将处理后的数据打包上传至上位机。实时控制器与上位机间基于 TCP/IP 协议进行数据通信,实时控制器软件的各项配置、执行任务情况都可上传至上位机;实时控制器与 FPGA 背板间通过高速总线实现通信,实时性强,具备较大的数据吞吐率。

CompactRIO 运行 Labview RT 实时操作系统,可以实现精确的定时运行,及时响应各类事件。操作系统按抢先式和时间片循环式对执行任务进行排序,当高优先级线程需要进行处理时,低优先级线程停止运行以保证高优先级线程运行,同等优先级线程由时间片循环排序^[7]。混合了抢先式和时间片循环的任务排序能确保 LabVIEW RT 具有较好的时间确定性。

LabVIEW RT 支持 TCP/IP、UDP、VISA RS232 等多种通讯协议,与上位机进行数据通信;提供 FPGA 接口函数,可将 FPGA bit 文件下载至目标 FPGA 并实现控制变量读写;可通过 DMA、握手、中断等模式与 FPGA 进行通信;可以实现信号生成、时域/频谱分析、曲线拟合、线性代数等功能。

3) FPGA 逻辑:

FPGA 逻辑基于 LabVIEW FPGA 模块编写,并行度高,包括模块配置逻辑、数据读取逻辑、数据输出逻辑、数据滤波处理逻辑等,实现与实时控制器的数据通信、中断同步、数据缓存 (FIFO) 和内存读写。各类测量模块的采集到的信号会经过转换与调制隔离,变为易处理的数字信号,FPGA 逻辑可以定制为多种应用,对采样到的模拟电压量进行数字化滤波处理,模拟总线时序输出总线信号,与外部接口进行实时通信。LabVIEW FPGA 模块上运行需要并行执行、重复执行、数据处理等逻辑。确保各类逻辑执行的并行性,循环速率能达到

MHz 以上,完成大量的数据滤波,数据组帧等功能。目前有很多成熟的 FPGA 信号处理 IP 核可供使用,完成波形合成、滤波、FFT、连续/离散控制,PID 控制等功能。

4 系统实现及测试

基于搭建的小型化试验平台,针对某外场试验进行测试验证。通过环境搭建将后方的上位机与前置的 CompactRIO 及信号调理模块连接,并与被测真实电子设备进行电气连接,自带电源为被测设备正常供电,按照约定的电气协议由 CompactRIO 控制相应模块发送数字信号,与被测对象完成协议握手,开始数据通信。标识被测对象状态的各类模拟量信号、数字信号通过电气接口由前置模块正常采集,经过信号调理滤波发送至 CompactRIO 进行处理,并在后台上位机上进行数据显示及存储;通过握手协议向被测设备发送模拟的数据注入,并从状态监视上监视设备的响应情况;模拟故障模拟量及故障注入,从输入接口观察设备的响应情况,模拟出被仿真设备和被测设备的真实接口。经过测试验证复合,该系统能有效覆盖被测对象的外场测试项目,设备工作稳定正常,且能快速进行重复测试。

5 结论

构建载人航天器外场试验小型化测试平台,一方面,有益于根据需求快速进行试验的准备及定制,提高外场试验的效率,压缩不必要的准备时间和调试时间,让试验人员更多精力集中于试验过程;另一方面,相对灵活的定制平台及丰富的功能也能帮助参试人员试验更多的功能,试验的全面性得到提

高,对现有航天器研制工作起到有益的作用。

参考文献:

- [1] 孙亚楠,涂歆滢,向开恒,等. 航天器仿真与测试一体化系统 [J]. 航天器工程,2015,13 (4): 73-78.
- [2] 宋海峰,张 敏. 基于 cRIO 的时序控制软件架构设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2009,18 (1): 619-624.
- [3] 谢 宽,吴杰长. 基于 CompactRIO 平台的舰船实船训练系统 [J]. 机电工程,2013,30 (4): 505-508.
- [4] 何芝霞,黄 昶,何云东. 基于 CompactRIO 的数据采集系统 [J]. 仪器仪表用户,2009,16 (1): 37-39.
- [5] 李 猛,金世俊. 基于 CompactRIO 的应变采集系统的设计和实现 [J]. 国外电子测量技术,2007,26 (6): 29-31.
- [6] Wolfram Keorver. 基于 CompactRIO 的状态监控平台 [J]. 国外电子测量技术,2013,32 (10): 2-3
- [7] 李 振,张晓东. 李一波. 基于 CompactRIO 的航空发动机便携式测试仪 [J]. 仪表技术与传感器,2011 (5): 24-26.
- [8] 黄晓燕,冯西安,高天德. 基于 CompactRIO 的多通道阵列数据采集系统实现 [J]. 测控技术,2009,28 (12): 17-19.
- [9] 王 凯,李 峰,于 杰. 基于 CompactRIO 的电液伺服机构实时测控平台设计 [J]. 液压与气动,2013 (5): 32-35.
- [10] 陈淑梅,颜滨曲,王孟杰. 基于 CompactRIO 的比例阀测控平台设计及性能研究. [J]. 机床与液压,2015,43 (5): 44-48.
- [11] 卫 鹏,刘建坤,周 前,等. 基于 CompactRIO 的 SVC 控制器半实物仿真系统. [J]. 电气应用,2014 (3): 80-84.
- [12] 席亚克,刘桂莲. CompactRIO 在分布式太阳能发电监测中的应用. [J]. 电气制造,2013 (9): 38-41.

(上接第 269 页)

舶机舱火灾、烟雾效果。

4 仿真软件和三维场景交互

虚拟场景可以为用户提供视觉、听觉、触觉和嗅觉上接近真实环境的感受^[9]。为了加强学员的沉浸感和真实感,在使用仿真软件进行模拟训练时有一种身临其境的感觉,将三维虚拟场景与可视化仿真软件进行数据交互。这样学员在可视化仿真软件进行操作时,三维虚拟场景中的实景情况可以达到同步的效果。同样,在三维虚拟场景中进行的操作也可以在可视化仿真软件中同步得到实现。

采用客户机/服务器模式,可视化仿真软件中的系统数据类通过序列化转化为数组形式,每经过 0.2 s 的时间向三维虚拟场景端进行一次数据发送;而三维虚拟场景端向可视化仿真软件端发送数据则采用有数据改变才发送,否则不发送的交互机制。

5 结论

本文开发的基于 Unity 3D 的船舶压缩空气系统解决了常规二维压缩空气系统仿真的训练效果不佳等问题,系统具有良好实际应用价值。将虚拟现实技术引入到船舶压缩空气系统中,实现虚拟仿真程序和三维虚拟场景的实时交互,满足当今船员培训与考核的要求。学员在逼真的虚拟机舱环境中进行漫游,熟悉系统结构。节省培训中的场地、设备、经费等其它资

源。另外,可以虚拟现实技术应用到整个船舶相关的系统中,实现无限制反复训练,节省船舶相关系统的维护费用,规避实物操作设备中可能出现的各种风险,提高船员培训的训练效果。

参考文献:

- [1] 张可超. 船舶压缩空气系统虚拟现实的设计与研究 [D]. 大连:大连海事大学,2014.
- [2] 甘辉兵,张均东,蒋丁宇,等. 超大型油轮货油泵透平系统仿真研究 [J]. 中国造船,2014 (1): 164-174.
- [3] 韩 杰,谢元华,李拜依,等. 活塞式压缩机的研究进展 [J]. 节能,2014,12: 17-23.
- [4] 许金元. 活塞式压缩机主传动系统动力学优化问题研究 [D]. 芜湖:安徽工程大学,2014.
- [5] 胡锦晖,胡大斌,何其伟. 某型船舶动力装置建模及仿真 [J]. 大连海事大学学报,2015 (2): 17-22.
- [6] 石宪章,黄 明,赵振峰,等. 气辅成型过程中可压缩空气流动数值模拟 [J]. 化工学报,2013 (3): 906-911.
- [7] 范晓勇,余历军,王战辉. 往复活塞式压缩机的变工况压气性能研究 [J]. 化工机械,2015 (2): 180-183.
- [8] 李 坤,徐小照. 基于飞轮矩计算的活塞式压缩机计算机辅助设计研究 [J]. 化工设备与管道,2015 (2): 58-60.
- [9] 沈浩生,张均东,曾 鸿. 船舶集控室虚拟仿真系统的设计与实现 [J]. 图学报,2013 (4): 126-131.