

## 飞控系统风洞虚拟飞行试验评估指标与评估要求\*

黄敏,王中伟,郭振云,钮耀斌

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**为明确风洞虚拟飞行试验能够评估的飞控系统性能,并为风洞虚拟飞行试验评估方法设计做出铺垫,针对风洞虚拟飞行试验特点,提出了风洞虚拟飞行试验能够评估的飞行性能指标及飞行品质指标,比较了风洞虚拟飞行试验与半实物仿真和飞行试验的评估能力差异;仿真分析了风洞虚拟飞行试验特点会造成风洞虚拟飞行试验与自由飞行的评估结果差异;从试验、数据处理、性能评定等方面,提出了评估这些指标对风洞虚拟飞行试验评估方法的具体要求,并比较了它与半实物仿真和飞行试验的评估要求差异。

**关键词:**飞行控制系统评估;风洞虚拟飞行试验;评估指标;评估方法;半实物仿真;飞行试验

**中图分类号:**V211.4; V249.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)04-144-05

## Evaluation indexes and requirements of wind tunnel based virtual flight testing for flight control systems

HUANG Min, WANG Zhongwei, GUO Zhenyun, NIU Yaobin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to determine the FCS (flight control system) performances which the WTBVFT (wind tunnel based virtual flight testing) can evaluate, and lay the foundations for designing the WTBVFT evaluation methods, the flight performance indexes and flight quality indexes of FCSs which WTBVFT can perform the work of evaluation were proposed according to the features of WTBVFT; the evaluation capability differences among the WTBVFT, the HILS (hardware-in-the-loop simulation) and the flight tests were compared; the differences of evaluation results between WTBVFT and free flight caused by the features of WTBVFT were analyzed; from the aspects of testing, data processing, and the performance determination, the specific requirements of the WTBVFT evaluation methods for evaluating the above indexes were proposed and the evaluation requirement differences among the WTBVFT, HILS, and flight tests were compared.

**Key words:** flight control system evaluation; wind tunnel based virtual flight testing; evaluation indexes; evaluation methods; hardware-in-the-loop simulation; flight tests

鉴于风洞虚拟飞行试验(Wind Tunnel Based Virtual Flight Testing, WTBVFT)能够将气动、运动及控制综合起来考核飞行控制系统,较之于系统仿真方法如半实物仿真(Hardware-In-the-Loop Simulation, HILS)其更接近真实飞行,国内外的—些气动研究部门(如美国阿诺德工程发展中心<sup>[1]</sup>、俄罗斯西伯利亚航空科学研究院<sup>[2]</sup>、中国空气动力研究与发展中心<sup>[3-4]</sup>)和一些大学(如剑桥大学<sup>[5]</sup>、布里斯托尔大学<sup>[6]</sup>)正在积极发展用于评估飞控系统的 WTBVFT 技术,试图将其穿插于 HILS 与飞行试验之间,进一步考核飞控系统,降低试飞风险。

文献[7]提出了用于评估飞控系统的 WTBVFT 关键技术,包括 WTBVFT 评估方法及

WTBVFT 系统方面的关键技术(飞行器模型设计技术、飞控系统改进技术及模型支撑技术)。目前,已建成了低速<sup>[2,4-6]</sup>、亚声速<sup>[1]</sup>、跨声速<sup>[3]</sup>的 WTBVFT 系统,进行了初步的试验验证工作。然而,对如何利用 WTBVFT 来评估飞控系统性能即 WTBVFT 评估方法还鲜有文献提及。在设计 WTBVFT 评估方法前,需要明确 WTBVFT 能够评估的飞控系统性能指标以及评估这些指标对评估方法有哪些要求,因此,本文将着力于解决这两大问题。

### 1 飞控系统 WTBVFT 评估指标

#### 1.1 评估能力分析

飞行器控制系统性能通常由在飞控系统作用

\* 收稿日期:2016-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505487);国防科技大学科研计划资助项目(JC15-01-02)

作者简介:黄敏(1989—),男,江西进贤人,博士研究生,E-mail:hm653925451@icloud.com;

王中伟(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhwwang@nudt.edu.cn

下的飞行性能和飞行品质来表征。飞行性能可以对飞行器质心运动特性进行较为全面的描述,主要包括飞行速度指标、飞行高度指标、续航性能指标、起飞着陆性能指标、导航制导精度、机动性能指标及飞行包线等<sup>[8-10]</sup>。飞行品质可以对飞行器绕质心转动运动特性进行较为全面的描述,主要包括飞行器纵向与横航向稳定性和操纵性能、飞行器大迎角飞行特性及其改出性能、敏捷性等<sup>[10-12]</sup>。

由于目前风洞尚不能实时调节来流速度,WTBVFT 并不能评估上面所有的飞行性能指标和飞行品质指标,其评估能力分析如下:

1) 目前 WTBVFT 尚难以评估要求速度变化的飞行性能。由于在风洞中仍无法实时改变速度,故 WTBVFT 难以评估飞行速度指标、续航性能、变速下的飞行高度指标、起飞着陆飞行性能指标、导航制导精度、飞行器改变飞行速度的机动能力及飞行包线。WTBVFT 可以评估速度不变情况下的飞行性能指标,如飞行器等速飞行下的目标跟踪指标、改变空间位置及飞行方向的机动性指标(如飞行器在水平面内定常盘旋时的盘旋半径与盘旋周期指标<sup>[9]</sup>)等。

2) WTBVFT 能评估飞行器纵向短周期运动、横航向运动的稳定性和操纵性能。在常规运动(即小幅值机动飞行)情形下,可以按两通道解耦方法将飞行器三通道运动分解为纵向和横航向运动。飞行器纵向运动通常可分为短周期模态和长周期模态,短周期模态的主要扰动量是迎角和俯仰角,速度的变化值可以忽略,而长周期模态的主要扰动量是速度和俯仰角(主要表现为航迹倾角,迎角基本不变)<sup>[8,11]</sup>。飞行器横航向运动主要由荷兰滚模态、滚转模态与螺旋模态组成,这些运动模态与滚转角、侧滑角和偏航角等有关,可以忽略速度的影响。因此,WTBVFT 可以对飞行器短周期运动及横航向运动的稳定性和操纵性能进行评估,尚不能评估长周期运动性能。

3) WTBVFT 能评估非定常运动情形下的控制系统性能,如大迎角、大侧滑、级间分离等大扰动、控制系统效率不够(即运动超出了稳定极限)等运动情形。在这些运动情形下,飞行器空气动力流场较为复杂,飞行器气动特性呈现出明显的非线性特征,与姿态运动有着明显耦合。传统的仿真评估方法,如 HILS 必须先通过风洞试验或计算流体动力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)获取气动表,再通过插值得到某一状态的气动载荷,尽管可以考虑一些非定常因素,但和

WTBVFT 中实际作用到飞行器上面的气动载荷有一定差距,且建立精确的非线性气动表工作量非常大,难以准确评估这些运动情形下的控制系统效能。因此,WTBVFT 为地面评估非定常非线性运动时的控制系统性能提供了更为有效的途径。

4) WTBVFT 能评估飞行器头部指向敏捷性。对于机体敏捷性,可将其分为飞行轨迹敏捷性和头部指向敏捷性,前者定义为“利用控制手段精确改变速度矢量的方向和大小的能力”,后者定义为“利用控制手段精确改变升力矢量大小和方向(即头部指向,包括俯仰、偏航等飞行姿态)的能力”<sup>[11]</sup>。WTBVFT 可以评估头部指向敏捷性,尚不能评估飞行轨迹敏捷性。敏捷性能的好坏采用时间尺度来衡量,即一个机动到另一个机动所需要的时间,花费的时间越短,说明敏捷性能越好。按时间尺度大小,可将敏捷性的度量指标分为瞬态敏捷性指标(约 3~4 s 机动时间)和功能敏捷性指标(约 10~20 s 机动时间)。按运动形式,敏捷性的度量指标分为纵向(俯仰)敏捷性、扭转(航向和倾斜角)敏捷性及轴向敏捷性<sup>[11]</sup>。其中,轴向敏捷性是对改变所具有能量状态(高度/速度)的时间度量,WTBVFT 难以评估这一指标。

## 1.2 评估指标示例

根据前面对 WTBVFT 评估能力的分析,飞行品质与飞行性能的指标评估受到限制,以飞行品质为例,纵向长周期稳定性及飞行轨迹稳定性均要求速度变化,无法在 WTBVFT 中评估,可评估的飞行品质指标包括纵向短周期运动与操纵性指标、横航向稳定性与操纵响应指标。表 1 列出的是作为例子的纵向操纵时域响应性能及其指标要求,其中,指标要求仅作为示例,不针对特定飞行器。

表 1 纵向飞行品质指标

Tab. 1 Longitudinal flight quality indexes

纵向飞行品质	品质指标	指标要求示例
纵向操纵时域 响应性能	稳态跟踪误差 $e_{tr}$	[0,3%]
	超调量 $\sigma$	[0,145%]
	过渡时间 $t_s$	(0,1]

## 1.3 评估能力比较

就飞控系统开发而言,对 WTBVFT 的定位及其作用是将其穿插于 HILS 和飞行试验之间,在 HILS 评估完飞控系统后,将飞控系统硬件按照真

实飞行时的布局进行综合,气流真实作用于飞行器,更加真实地考核飞控系统,以期在试飞前暴露出一些在试飞中可能会出现的设计缺陷。但正如上面对 WTBVFT 评估指标的分析,它不能完全地评估各项飞控系统指标。WTBVFT 评估能力与 HILS 和飞行试验有所差异,比较如下:

1) HILS 通过建立气动力模型及运动模型,采用真实的飞控系统硬件可以评估加入硬件后的飞控系统常规飞行品质,如飞行器纵向短周期、长周期的运动性能,但由于在大迎角、大侧滑、大扰动等明显的非定常运动过程中,空气动力学与飞行力学物理量耦合强烈,其难以建立准确的气动/运动耦合模型,因而难以准确评估这些运动状态时的飞控系统性能。

相比而言,WTBVFT 将含硬件综合的飞行器置于流场中,气动与运动是实时耦合的,能更加真实地考核常规飞行品质,也可以有效评估大迎角、大侧滑、大扰动等飞行过程的控制性能。但由于 WTBVFT 自身的一些特点,如气流速度不能实时调整,质量特性、扰动特性等参量不能实时调整,一次试验周期较长等,其主要用于评估某个特征点上的姿态稳定性能,无法评估长周期运动时的飞控系统性能,不能像 HILS 那样快速地利用蒙特卡洛方法评估飞控系统鲁棒性能。

2) WTBVFT 由于在地面上开展,可以在有模型的保护下,测试各种状态的控制性能,即使姿态运动超出了控制极限也可以保证飞行器不受到破坏。而飞行试验由于在空中,风险较大,一旦姿态运动超出了控制极限,飞行器就会失控,将造成飞行任务失败,甚至飞行器坠毁,如 2009 年 HTV-2 的试飞失败,据美国国防高级研究计划局的调查是因为飞行攻角超出了操纵极限<sup>[13]</sup>。因此,WTBVFT 可以以较低的成本和风险评估姿态控制性能,特别是控制系统操纵极限,而不用等到风险和成本都更高的飞行试验再测试出其操纵极限。

尽管有上述优势,WTBVFT 还是不能代替飞行试验。飞行试验的气流完全真实,且飞行器的质量特性变化和外部扰动等在 WTBVFT 中难以再现,因此,完全真实的姿态控制能力需要由飞行试验来考核。另外,飞行试验可以真实考核飞行器从起飞到降落整个飞行过程的姿态与导航制导控制能力,而 WTBVFT 由于速度变化的限制,仅能评估定常飞行(线加速度为 0)时的控制系统性能。

## 2 WTBVFT 评估方法要求

为获取表 1 列出的动态响应指标,需要开展纵向虚拟飞行试验,本文利用文献[14]中的仿真结果来说明 WTBVFT 评估这些指标与自由飞行的差异。然后,再基于该分析结果,分析评估这些指标对 WTBVFT 评估方法的要求,包括试验要求、数据处理要求与性能评定要求。在这些要求中,有些要求对每个评估方法(HILS 评估方法、WTBVFT 评估方法及飞行试验评估方法等)而言是一致的,有些要求是 WTBVFT 评估方法独有的。下面将具体分析这些要求,比较各种评估方法的要求的异同,并按一致要求与特定要求的分类对这些要求进行综合。

### 2.1 评估差异分析

WTBVFT 的特点是来流速度不变且质心运动受限,如图 1 所示,文献[14]针对 WTBVFT 的这两大特点,进行了纵向动力学仿真(实线),并与速度变化的单自由度俯仰运动(点划线)和速度不变的三自由度运动(虚线)进行对比。尽管图 1 展示的是俯仰角速度  $q$  的变化曲线,但它可以直接计算得到表 1 中的指标,通过比较俯仰角速度差异,亦能说明 WTBVFT 与自由飞行的评估结果差异。

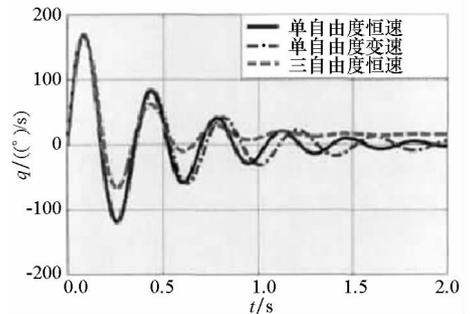


图 1 风洞虚拟飞行纵向动力学仿真

Fig. 1 Longitudinal dynamic simulation of WTBVFT

比较风洞虚拟飞行与速度变化的单自由度俯仰运动仿真结果可以看出,二者存在差异,这是因为风洞虚拟飞行未能考虑速度变化的影响,这也正好说明了前面所提出的 WTBVFT 尚不能评估变速情况下的飞控系统性能。比较风洞虚拟飞行与速度不变的三自由度运动仿真结果可以看出,二者存在显著差异,这是因为风洞虚拟飞行中的模型质心运动受限导致在风洞中无法再现速度倾角,从而使得风洞虚拟飞行的俯仰角等于攻角,并非真实的俯仰角。为使得风洞虚拟飞行评估结果贴近自由飞行评估结果,需要对线位移约束进行

修正。

## 2.2 要求分析

试验要求主要包括试验类型及其相应的试验回路形式、试验输入、试验流程。为评估表1中的指标,各评估方法均需开展阶跃响应试验,这就是所谓的试验类型是一致的,输入指令为阶跃信号,有些评估方法还需要输入一些其他参数,如HILS需要输入气动力等数据。由于各评估方法试验环境的差异,它们的试验回路有明显不同,相应地,试验流程也有所差异。

经过上述阶跃响应试验,会获取到阶跃响应数据。对于HILS及飞行试验,均可通过传感器测量得到俯仰角响应数据,而对于WTBVFT,传感器测量到的是攻角数据,这就是前面所提到的线位移约束造成的。因此,需要考虑如何根据测量到的数据重构得到俯仰角,在这一点上WTBVFT和HILS及飞行试验是有差异的。在获取到俯仰角数据后,需要对这些数据进行处理,以计算到表1中的指标量,用于性能评定。其中,指标计算的方法是根据获取到的俯仰角数据绘制一条响应曲线,再读取该响应曲线,计算到指标参数。由于各评估方法均能得到俯仰角响应数据,因此,各评估方法的指标计算方法是一致的。

在获取到指标数据后,需对飞控系统性能进行评定,对评定方法的要求是事先制定好各指标的评定标准,然后再根据该标准评定各指标的等级。通常,若各评估方法的指标一致,则各评估方法的评定标准也应当是一致的。

## 2.3 评估方法要求综合

将性能评估对各方法的要求按一致要求和特定要求总结于表2中。在研究WTBVFT评估方法时,将着重研究其特定要求。

表2 评估方法要求综合

Tab.2 Requirement integration of evaluation methods

要求	试验要求	数据处理要求	性能评定要求
一致要求	试验类型, 输入指令	指标计算方法	指标评估标准
特定要求	试验回路, 输入参数(HILS), 试验流程	俯仰角重构(WTBVFT)	无

## 3 结论

综合上述对WTBVFT评估指标与评估方法

要求的分析,得出如下结论:

1) 鉴于WTBVFT不能实时调速的特点,WTBVFT评估飞控系统的能力受到限制,尚不能评估飞行速度变化时的飞控系统性能指标。

2) WTBVFT可以有效考核大迎角、大侧滑、大扰动等飞行过程的飞行控制能力,而这是传统仿真方法如HILS难以做到的。

3) WTBVFT相比飞行试验,能以较低的成本和风险测试飞控系统性能,但它不能代替飞行试验,完全真实的飞控系统性能仍需要飞行试验来考核。

4) 仿真分析了风洞虚拟飞行与自由飞行的评估差异,说明了速度变化和线位移约束的影响会造成WTBVFT评估结果和真实飞行有一定差异,基于该差异分析进一步对WTBVFT评估提出了要求,以指导WTBVFT评估方法的设计。

## 参考文献(References)

- [1] Magill J C, Cataldi P, Morency J R, et al. Demonstration of a wire suspension for wind-tunnel virtual flight testing [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2009, 46(3): 624-633.
- [2] Sohi N P. Modeling of spin modes of supersonic aircraft in horizontal wind tunnel [C]//Proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- [3] 赵忠良, 吴军强, 李浩, 等. 2.4米跨声速风洞虚拟飞行试验技术初步研究[J]. 航空学报, 2015, 37(2): 504-512.
- [4] ZHAO Zhongliang, WU Junqiang, LI Hao, et al. Investigation of virtual flight testing technique based on 2.4m transonic wind tunnel [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 37(2): 504-512. (in Chinese)
- [5] 聂博文, 祝明红, 郭林亮, 等. 风洞虚拟飞行试验系统关键技术及方案设计[C]//中国制导、导航与控制学术会议(CGNC2012), 北京, 2012.
- [6] NIE Bowen, ZHU Minghong, GUO Linliang, et al. Key technique and design scheme of the wind tunnel virtual flight system [C]//Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNC2012), Beijing, 2012. (in Chinese)
- [7] Papageorgiou G, Glover K. Two-degree-of-freedom control of an actively controlled wind-tunnel model [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2002, 25(3): 510-516.
- [8] Richardson T S, Dubs A, Lowenberg M H, et al. Wind-tunnel testing of a dynamic state-feedback gain scheduled control system [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2005-5976, 2005.
- [9] Huang M, Wang Z W. A review of wind tunnel based virtual flight testing techniques for evaluation of flight control systems [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015: 672423.
- [10] 陈廷楠. 飞机飞行性能品质与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [11] CHEN Tingnan. Aircraft flight performance quality and control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

- [9] 徐明友, 丁松滨. 飞行动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
XU Mingyou, DING Songbin. Flight mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 曾庆华, 郭振云. 无人飞行控制技术与工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
ZENG Qinghua, GUO Zhenyun. Unmanned flight control techniques and engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 高金源, 李陆豫, 冯亚昌, 等. 飞机飞行品质 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
GAO Jinyuan, LI Luyu, FENG Yachang, et al. Aircraft flight qualities [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 陶于金, 王建培. 无人机飞行品质标准研究 [J]. 飞行力学, 2010, 28(1): 13-15, 19.  
TAO Yujin, WANG Jianpei. Research on flying quality criteria of unmanned aerial vehicles [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(1): 13-15, 19. (in Chinese)
- [13] 李惠峰. 高超声速飞行器制导与控制技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.  
LI Huifeng. Guidance and control techniques of hypersonic vehicles [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 李浩. 风洞虚拟飞行试验相似准则和模拟方法研究 [D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2012.  
LI Hao. Study on the similarity criteria and simulation method of the wind tunnel based virtual flight testing [D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2012. (in Chinese)