

自动飞行系统飞行模式操作验证方法研究

刘 姝* 周 超 魏子博 许浩楠 黄 雄

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 现代民用飞机的自动飞行控制系统是主要的人机交互系统之一,其飞行模式操作控制功能由两大物理部分组成: FMCP 硬件与自动飞行控制软件。对于复杂的人机交互功能的验证,需要采用面向开发过程的模型验证方法,首先由系统功能层级到功能模块层级逐级分解飞行模式操作控制功能开发架构,进而从功能模块层级到系统功能层级自下而上设计飞行模式操作控制功能验证架构,最后针对功能验证架构中的集成模型测试阶段,以 FMCP 速度视窗功能为例,通过对所有相关的人机操作进行分类定义,分别定义了速度目标值的状态转换与动作响应,进而针对定义梳理出完整的速度目标值状态转换与动作响应矩阵,矩阵中的每一个表格均对应着速度目标值的状态转换或者动作操作及其对应的响应情况。为自动飞行模式操作控制的集成模型验证提供了参考。

关键词: 飞行模式操作;人机交互系统;面向开发过程的模型验证;集成模型测试方法

中图分类号: V249

文献标识码: A

OSID:



0 引言

自动飞行控制系统作为主要的人机交互系统,主要由自动飞行软件和飞行模式控制板(flight mode control panel,简称 FMCP)两大物理部分组成。其中,FMCP 作为人机交互设备,其主要功能是为正、副驾驶提供对自动飞行控制系统的操作控制。但作为硬件设备,FMCP 仅负责飞行员操作信号输入与目标值显示功能,而实际复杂的飞行操作控制逻辑则由自动飞行软件实现。对于飞行模式操作控制这一涉及多目标、多要素的复杂人机交互功能,如何进行有效的测试与验证,确保功能综合目标与性能的实现,是自动飞行控制系统设计与验证的关键所在。因此对自动飞行模式操作控制验证方法进行研究很有必要。

1 自动飞行模式操作控制功能介绍

自动飞行功能通常包括飞行指引、自动驾驶仪、飞行模式操作控制和推力管理等功能。其中,

飞行模式操作功能是实现自动飞行控制系统人机交互的主要功能。飞行模式操作功能由 FMCP 硬件设备和自动飞行软件中的模式操作逻辑处理模块两部分组成。FMCP 硬件的主要功能包括接收飞行员的输入指令(按钮、旋钮以及两卡位开关输入)、通过视窗显示当前飞机的飞行目标值及目标类型,以及通过按钮灯显示自动飞行系统状态信息(包括自动驾驶(AP)、自动油门(AT)、飞行指引/推力指引(FD/TD)等预位接通状态)、飞行指引模式接通状态、进近状态及耦合侧指示等。飞行模式操作控制系统物理界面如图 1 所示^[4-6]。

2 面向开发过程的模型验证

对于涉及一个多目标、多要素与多过程的综合功能,如何开展有效的测试与验证,确保验证功能综合目标与性能的实现,是功能验证的关键所在。由于模式操作设计的功能需求与性能需求是通过系统开发过程实现的,系统的偏离也是由系统的开发建模活动决定的。因此,模式操作功能的测试与

* 通信作者。E-mail: liushu@comac.cc

引用格式: 刘姝,周超,魏子博,等. 自动飞行系统飞行模式操作验证方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2024(1):60-65. LIU S,ZHOU C,WEI Z B,et al. Research on verification method for flight mode operation of auto-flight system[J]. Civil Aircraft Design and Research,2024(1):60-65(in Chinese).

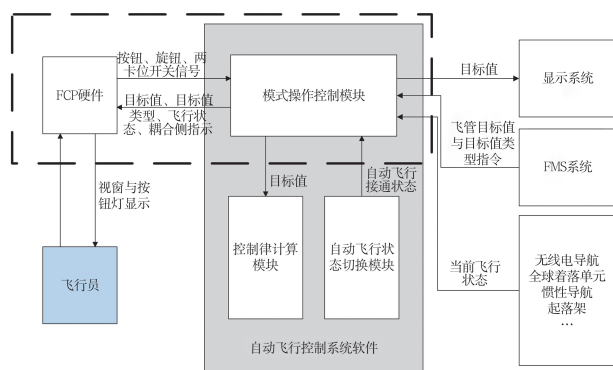


图1 飞行模式操作控制物理界面

验证方法需要面向开发过程,根据功能开发的功能架构与层级来设计。功能验证需要与功能的建模开发过程紧密结合,要综合考虑各功能模块的关联性与耦合性。根据飞行模式操作控制的功能架构,需要分阶段对功能开发每一层级的功能实现结果进行评估^[2,6-7]。

因此,首先需要了解飞行模式操作控制系统开发的功能架构。T1层级模式操作功能由三个功能

分区实现:第一部分主要负责通道选择及信号处理;第二部分负责按钮灯的飞行状态显示;第三部分负责视窗的目标值显示。由于视窗模块的逻辑最为复杂,因此本文针对视窗模块的底层逻辑进行了建模与验证方法研究。针对视窗模块,在T2层级进行分解。FMCP视窗分区分为4个视窗,分别用来显示速度目标值、高度目标值、航向目标值与VS/FPA目标值,因此第二层级按照视窗的显示功能分为四部分。以速度视窗为例,在T3层级对速度视窗的功能模块进行分解时,需要分别从FMS与FMCP获取输入的速度目标值指令。然后,通过逻辑判断计算出不同的速度目标值,并分别传输给AFCS控制律、PFD显示与FMCP显示。由于PFD显示的速度目标值与AFCS控制律中使用的速度目标值相同,因此速度视窗的逻辑架构可以简化为两条逻辑分支。在每个分支内,串联了速度目标值计算与显示的多个功能模块,通过功能模块的架构集成,实现速度视窗功能。飞行模式操作控制的架构如图2所示。

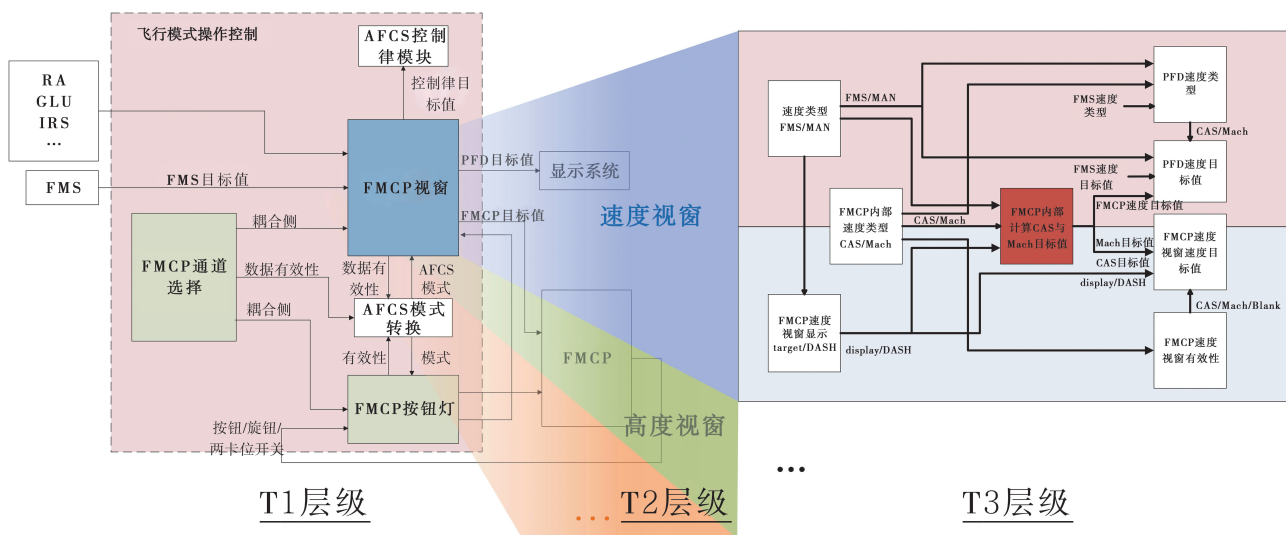


图2 飞行模式操作控制功能架构图

基于上述划分的飞行模式操作控制功能架构,可以进行综合测试与验证架构设计。针对功能架构中的三个层级,可自下而上分别进行独立的试验测试,对每一层级的功能实现结果进行功能及性能效果评估。首先,对开发的功能模块进行功能测试;接着,对模块集成的视窗功能进行功能及性能测试;然后,对通道选择、按钮灯及视窗三个功能分区分别进行功能及性能测试;最后,进行模式操作

控制功能的整体功能性能测试。具体的飞行模式操作控制功能综合测试与验证架构设计如图3所示。

3 集成测试方法设计

根据第2章中的飞行模式操作控制功能综合测试与验证架构,首先需要在建模的过程中,对T3层级的每一个模块进行独立的功能测试,验证每个模

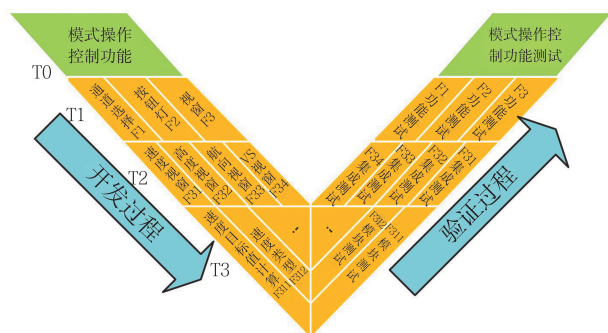


图3 飞行模式操作控制功能综合测试与验证架构

块的基本功能实现是否符合预期。在这个阶段,无法保证验证的场景与功能的全全面性,考虑到模块交联之后的关联性与耦合性,需要进一步对 T2 层级的速度视窗进行集成测试,对于速度视窗多目标、多要素的综合功能进行试验设计。本章通过提出一些定义与假设,将视窗的功能实现全部放在状态转换矩阵当中,进而通过状态转换矩阵来指导复杂人机交互系统的桌面测试,在减少测试工作量的同时,尽可能对飞行模式操作控制功能进行全面的验证。

本章将继续以速度视窗为例对 FMCP 速度视窗人机交互测试方法进行介绍。为了区分复杂的人机交互场景,首先将所有的人机交互操作(包括系统的自动响应与人工操作造成的响应)划分为状态响应与动作响应,如果可以合理地定义飞行模式操作的状态,则可以将部分飞行模式控制操作定义为状态转换,使得飞行模式操作控制表格更具备条理性与全面性。比如当前显示的速度类型 Mach 可以作为状态,速度类型由 Mach 切换为 CAS 则为状态转换;而当前的速度模式 FMS 也是状态,速度模式由 FMS 切换为 MAN 同样是状态转换。不会改变速度目标值状态的人机交互操作定义为动作。根据上一章可以发现,PFD 与 FMCP 的速度目标值与速度类型响应逻辑是不同的。由于 PFD 与 FMCP 的速度响应不同,在进行合并考虑的情况下需要重新定义状态基准。考虑到实际飞机的飞行状态取决于控制律中使用的速度目标值,为了与实际飞机飞行状态保持一致,故将控制律内部所采用的速度源与速度类型定义为状态。而当执行某些操作后,FMCP 视窗显示与控制律内部计算响应不同的情况下,将此时执行的操作定义为动作,而 FMCP 速度视窗的显示定义为该操作的响应。由于 PFD 显示的

速度目标值为控制律内实际使用的,因此将 PFD 显示的速度模式与速度类型定义为状态,速度模式与速度类型两种状态互相不关联,因此它们对应两个状态层级。两个状态层级的两种状态两两组合后可得到如下 4 种基准状态,见表 1。

表 1 速度目标值状态组合

速度模式	FMS 模式		人工模式	
速度类型	Mach	IAS	Mach	IAS
状态组合	FMS/Mach	FMS/IAS	MAN/Mach	MAN/IAS

通过完整梳理每一种状态的转换条件以及对应的状态响应,可以形成速度视窗的状态转换矩阵,通过根据矩阵执行的每一项状态转换操作,可以测试 FMCP 速度视窗与 PFD 的速度目标值显示是否符合预期响应,并以此来设计速度视窗状态转换的桌面测试。

同时,将其余所有不改变速度目标值状态的操作定义为动作,由于每一个动作均是在特定的状态下进行的,因此可以依据所处的状态来梳理人机交互动作:FMS 模式下,速度类型为 IAS(或 Mach)时执行的动作有:1)通过旋转速度旋钮进行速度目标值预选;2)在预选过程中通过按压速度类型切换旋钮切换 FMCP 速度视窗显示的速度类型;3)在预选过程中飞机穿越 XX 高度层,自动切换 FMCP 速度视窗显示的速度类型;4)在预选结束后未激活预选的速度类型,FMCP 速度视窗恢复 Dash;5)FMS 输入的速度目标值更改,输出的速度目标值随之更新。人工模式下,速度类型为 IAS(或 Mach)执行的动作有:1)通过旋钮调整速度目标值。2)当人工输入的速度目标值超过自动飞行速度包线,则 FMCP 上的速度目标值会显示飞行员输入的目标值并进行闪烁提醒;PFD 上显示的速度目标值为限制在速度包线内的目标值并闪烁提醒。3)自动飞行系统初始化,需要进行目标值初始化,并且初始化速度类型为 IAS。

通过以上定义执行动作操作,可以验证速度视窗以及 PFD 响应是否符合预期来进行速度视窗操作测试。由于每一个动作均是在特定的状态下进行的,并且动作操作不会引起状态改变,因此为了便于试验设计,可以将动作操作及响应放置于状态转换矩阵的对角线上,汇总得到状态转换与动作响应矩阵,见表 2(以下所有转换表均从列状态转换到行状态)。

表 2 速度目标值的状态转换与动作响应矩阵

状态转换 响应	FMS/Mach	FMS/IAS	MAN/Mach	MAN/IAS
FMS/Mach	动作 1:输出速度马赫数 目标值改变 动作 2:预选的 Mach 目标 值初始值为当前的 Mach 动作 3:FMCP 速度视窗显 示 Dash 动作 4:自动切换 FMCP 速度类型 动作 5:人工切换 FMCP 速度类型	操作:FMS 输入的速度类 型切换为 IAS 响应:PFD 显示 FMS 输入 的 CAS 目标值,速度类型 切换为 IAS FMCP 显示 Dash	操作:MAN/FMS 两卡位 开关切换到 MAN 条件 1:预选状态,且预选 的速度类型为 Mach 响应:FMCP 与 PFD 显示 的 Mach 为预选的 Mach 目标值 条件 2:非预选状态 响应:FMCP 与 PFD 显示 的 Mach 为当前惯导 的 Mach	操作:MAN/FMS 两卡位开 关切换到 MAN 条件:预选状态,且预选的 速度类型为 IAS 响应:FMCP 与 PFD 显示的 CAS 为预选的 CAS 目标值
FMS/IAS	操作:FMS 输入的速度类 型切换为 Mach 响应:PFD 显示 FMS 输入 的 Mach 目标值,速度类 型为 Mach FMCP 显示 Dash	动作 1:输出速度空速目 标值改变 动作 2:预选的 CAS 目标 值初始值为当前的 CAS 动作 3:FMCP 速度视窗显 示 Dash 动作 4:自动切换 FMCP 速度类型 动作 5:人工切换 FMCP 速度类型	操作:MAN/FMS 两卡位 开关切换到 MAN 条件:预选状态,且预选 的速度类型为 Mach 响应:FMCP 与 PFD 显示 的 Mach 为预选的 Mach 目标值	操作:MAN/FMS 两卡位开 关切换到 MAN 条件 1:预选状态,且预选的 速度类型为 IAS 响应:FMCP 与 PFD 显示的 CAS 为预选的 CAS 目标值 条件 2:非预选状态 响应:FMCP 与 PFD 显示的 CAS 为当前惯导的 CAS
MAN/Mach	操作:两卡位开关置于 FMS 条件:FMS 输入信号有效 且速度类型为 Mach 响应:1. PFD 显示速度目 标值为飞管输入 Mach 2. FMCP 视窗显示 Dash	操作:两卡位开关置 于 FMS 条件:FMS 输入信号有效 且速度类型为 IAS 响应:1. PFD 显示速度目 标值为飞管输入 Mach 2. FMCP 视窗显示 Dash	动作 6:通过旋钮调整速 度目标值 动作 7:当人工输入的速度 目标值超过自动飞行 速度包线,则 FMCP 上的 速度目标值会显示飞行 员输入的目标值并进行 闪烁;PFD 上显示的速度 目标值为限制在速度包 线内的目标值并闪烁	操作:1. 按压 IAS/Mach 切 换按钮;2. 修正气压高向下 穿越 XX 高度带 响应:IAS 目标值为前一时 刻 Mach 的数值转换 操作:自动飞行初始化 响应:IAS 目标值为 200
MAN/IAS	操作:两卡位开关置于 FMS 条件:FMS 输入信号有效 且速度类型为 Mach 响应:1. PFD 显示速度目 标值为飞管输入 Mach 2. FMCP 视窗显示 Dash	操作:两卡位开关置 于 FMS 条件:FMS 输入信号有效 且速度类型为 IAS 响应:1. PFD 显示速度目 标值为飞管输入 Mach 2. FMCP 视窗显示 Dash	操作:1. 按压 IAS/Mach 切换按钮;2. 修正气压高 向上穿越 XX 高度带 响应:Mach 目标值为前一 时刻 IAS 的数值转换	动作 6:通过旋钮调整速度 目标值 动作 7:当人工输入的速度 目标值超过自动飞行速度 包线,则 FMCP 上的速度目 标值会显示飞行员输入的 目标值并进行闪烁;PFD 上 显示的速度目标值为限制 在速度包线内的目标值并 闪烁 动作 8:自动飞行系统初始 化,需要进行目标值初始 化,并且初始化速度类型 为 IAS

表 2 列举了速度视窗的不同状态转换以及不同
动作下的操作方式与预期结果。参考矩阵中的输

入与响应,测试集成模型输出的 FMCP 速度目标值
与 PFD 的速度目标值显示是否符合预期响应,可以

保证集成模型的功能验证的全面性与完整性。

4 结论

1) 本文介绍了一种面向过程开发的飞行操作控制功能的验证方法,首先梳理了飞行模式操作控制功能开发的功能架构,进而根据功能开发的功能架构与层级来设计功能验证方法。将功能验证与功能的建模开发过程相结合,综合考虑各功能模块的关联性与耦合性,分别针对功能架构中的三个层级自下而上分别进行独立的试验测试,对每一层级的功能实现结果进行功能及性能效果评估。

2) 针对系统验证过程的集成模型测试阶段,以 FMCP 速度视窗模型为例介绍了一种集成模型验证策略。定义了 4 种飞行模式操作控制的状态,并且将所有飞行模式操作行为划分为状态转换以及动作两种形式,状态转换操作会导致速度目标值的状态变化,动作操作不会引起速度目标值的状态变化。分别梳理了每种状态转换的操作及响应情况,以及每种动作的触发方式及响应情况,最终汇总形成速度视窗层完整的状态转换响应与动作响应矩阵,为自动飞行模式操作控制的集成模型验证提供参考。

参考文献:

- [1] 王国庆. 航空电子系统综合化与综合技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019: 533-5367.
- [2] 申安玉, 申学仁, 李云保. 自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 6-7.
- [3] 周超, 邵慧, 刘文渊, 等. 基于 Stateflow 的自动飞行模式转换逻辑研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(4): 86-91. <https://doi.org/10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.04.01>.
- [4] 柯劼, 王兴波, 魏强. 民用飞机高度综合化自动飞行控制系统研究[J]. 软件导刊, 2015, 14(7): 90-92. <https://doi.org/10.11907/rjdk.151589>.
- [5] 杨玉蕾, 杨忠, 杨家成. 基于 Stateflow 的民机自动飞行工作模式切换[J]. 应用科技, 2012, 39(1): 65-69. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-671X.201109002>.
- [6] 方俊伟, 汤超, 张翔, 等. 基于模型的民机自动飞行功能分析与设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(1): 68-71, 92. <https://doi.org/10.19416/j.cnki.1674-9804.2016.01.020>.
- [7] 郑海波, 孙明, 王颂. 自动飞行控制板仿真分析与实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 217-222, 277. <https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2022.07.033>.
- [8] 高振兴, 徐彧. 民机自动飞行模式设计规范与适航性分析[J]. 航空计算技术, 2017, 47(3): 80-84.
- [9] 杨玉蕾. 民机自动飞行系统工作模式研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 1-6.
- [10] 杨梦娜. A320 飞机自动飞行系统工作模式研究[J]. 内燃机与配件, 2019(23): 203-205. <https://doi.org/10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2019.23.107>.

作者简介

刘 姝 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 自动飞行。E-mail: liushu@comac.cc

周 超 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 自动飞行系统。E-mail: zhouchao1@comac.cc

魏子博 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 自动飞行系统, 飞管综合。E-mail: weizibo@comac.cc

许浩楠 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 自动飞行, 自动着陆, 大数据综合。E-mail: xuhaonan@comac.cc

黄 雄 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 自动飞行, 综合监视, 结冰适航验证。E-mail: huangxiong@comac.cc

Research on verification method for flight mode operation of auto-flight system

LIU Shu^{*} ZHOU Chao WEI Zibo XU Haonan HUANG Xiong

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

Abstract: The automatic flight control system of modern civil aircraft is one of the primary human-machine interaction systems, and its flight mode operation control function consists of two main physical components: FMCP hardware and automatic flight control software. For the validation of complex human-machine interaction functionalities, an approach oriented towards the development process is necessary. Firstly, the development architecture of flight mode operation control functions was decomposed step by step from the system functional level to the functional module level. Then, an architecture for verifying the flight mode operation control functions was designed from the functional module level to the system functional level, in a bottom-up manner. Finally, focusing on the integrated model testing phase within the functional verification architecture, taking the example of FMCP speed window function, all relevant human-machine interactions were categorized and defined. The state transitions and action responses for speed target values were defined separately, and a comprehensive matrix of state transition and action response of speed target value was sorted out based on the definitions. Each table in the matrix corresponds to the state transition or action operation of the speed target value and its corresponding response situation. This provides a reference for the integrated model validation of automatic flight mode operation control.

Keywords: flight mode operation control; man-machine interaction system; model verification oriented towards the development process; integrated model testing method

^{*} Corresponding author. E-mail: liushu@comac.cc