

doi: 10.7690/bgzdh.2023.12.011

基于有限状态机的航电显控系统仿真

王旭明¹, 于凤全², 姜涛¹, 曹建¹

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学作战勤务学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对当前飞行训练模拟器中航电系统显控逻辑仿真软件开发困难、可维护性差的问题, 提出一种将显控逻辑判断与显示画面仿真独立设计的模块化、松耦合的显控系统功能仿真思路。根据显控系统交互式、多输入多输出的时序逻辑决策特点, 基于有限状态机 (finite state machine, FSM) 理论构建显控逻辑仿真模块, 并应用 Simulink/Stateflow 进行实现。结果表明: 该设计思路结构合理, 开发过程直观, 程序可维护性、可移植性强, 有利于提高显控逻辑仿真度和开发效率。

关键词: 飞行仿真; 综合航电; 显控系统; 有限状态机

中图分类号: TP391.9; V247.1 **文献标志码:** A

Simulation of Avionics Display and Control Management System Based on FSM

Wang Xuming¹, Yu Fengquan², Jiang Tao¹, Cao Jian¹

(1. School of Aviation Foundation, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. School of Operational Service, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult development and poor maintainability of display and control logic simulation software of avionics system in current flight training simulator, a modular and loosely coupled display and control system function simulation idea is proposed, in which the display and control logic judgment and display picture simulation are designed independently. The display and control logic simulation module is constructed based on the finite state machine (FSM) theory according to the interactive, multiple input and multiple output temporal logic decision-making characteristics of the display and control system, and is implemented by Simulink/Stateflow. The results show that the design idea and structure are reasonable, the development process is intuitive, and the program is easy to maintain and transplant, which is conducive to improving the display and control logic simulation and development efficiency.

Keywords: flight simulation; integrated avionics system; display and control management system; finite state machine

0 引言

显控系统作为综合航电系统的核心, 负责整个系统的调度控制、总线通信管理、综合信息显示等工作, 同时也是主要的人机接口^[1-3]。综合航电系统的突出特点之一是采用了综合式的显示与控制, 在减轻操作负担的同时, 也对飞行员操作技能提出了更高要求。为充分发挥航电系统作战效能, 在机型改装教学和训练中, 通常使用高仿真度的飞行训练模拟器帮助飞行员缩短掌握航电系统的时间、降低训练成本, 从而提高教学和训练效益。

显控系统作为人机接口, 需要对航空电子启动板、正前方控制板、武器控制板等面板上的多个控制部件的动作进行响应, 控制航电系统进行模式转换、传感器工作方式转换、外挂武器及投放程序选择等, 并将相关信息综合显示在平显 (head up display, HUD)、多功能显示器 (multi function display, MFD)

的不同画面上, 其多输入多输出的时序显控逻辑是航电系统功能仿真的难点。此外, 战机航电系统还经常需要根据飞行员使用反馈进行状态更新和迭代; 因此, 探索高效、便于修改、可移植性强的显控逻辑仿真具有重要意义。

当前对航电显控系统的仿真研究主要考虑信息的实时性处理要求, 根据航电系统的总线拓扑结构, 基于 1553B 总线进行半实物仿真^[4-9]。从教学和训练的实际需求出发, 降低对实时性的要求, 采用软件方法对显控逻辑进行仿真更为经济, 且便于移植到半实物模拟座舱或开发桌面级教学训练软件。由于涉及复杂的逻辑判断, 以往按航电系统功能进行模块划分采用文本编程的方式工作量大, 修改、调试困难, 软件开发和维护非常不便。笔者在对显控系统特点进行分析的基础上, 介绍一种模块化、松耦合的显控系统仿真设计思路, 基于有限状态机 (FSM) 构建显控逻辑仿真模块, 并以某型多用途战

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-09-05

基金项目: “十三五”海军模拟训练项目 (2021-HCX-MN-030041)

第一作者: 王旭明 (1982—), 男, 河北人, 博士。

斗机为例，应用 Simulink/Stateflow 进行仿真实现。

1 显控系统仿真分析

1.1 显控系统功能

显控系统典型结构如图 1 所示。显控处理机 (DCMP1、DCMP2) 运行作战飞行程序 (operational flight program, OFP)，采集飞行员操作输入信号，通过总线接口板完成 1553B 总线管理并与其他子系统通信，将显示数据送字符发生器生成显示信息在 HUD、MFD 上进行综合显示，从而实现人机接口、总线数据通信控制、航电系统管理等功能^[10]。

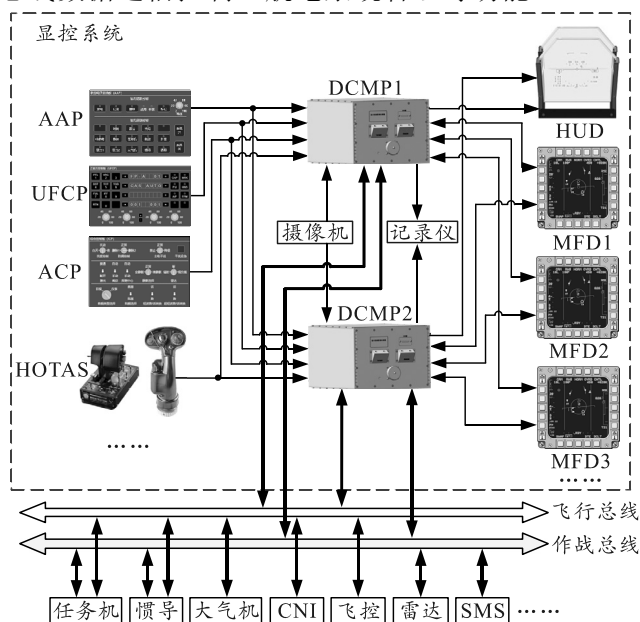


图 1 显控系统典型结构

为减轻飞行员操作负荷，显控系统采用了综合式的显示控制。输入包括航电启动板 (AAP)、正前方控制板 (UFCP)、武器控制板 (ACP)、握杆控制器 (HOTAS)、MFD 等上的开关、按键、旋钮等多个部件的控制信号 (以某型多用途战斗机显控系统为例，控制部件达到 60 余个，且部分部件在航电系统不同工作模式下有多种功能定义)；飞行、作战等信息主要显示在 HUD 和 3 台 MFD 的多个画面中，如 HUD 要显示飞行数据、导航数据、目标数据、瞄准符号、告警信息等 40 多种数据，每台 MFD 可根据切换显示 20 多种画面，部分画面又有多种子画面。

输入部件中，除旋钮用于输入数据外，开关、按键都是有限个状态的输入，其不同的操作顺序、开关不同状态的组合会影响航电系统的工作模式、各子系统的工作状态，进而改变 HUD 和 MFD 的显示画面和显示数据；因此，可将显控系统的功能仿真视为交互性、有限状态的多输入多输出时序逻辑

决策问题。

1.2 有限状态机理论

FSM 是表示有限个状态以及在这些状态之间转移和动作等行为的数学模型，广泛应用于建模应用行为。一个有限状态机模型 M 可用一个五元组来描述^[11]：

$$M = (Q, X, Y, q_0, \delta, O)$$

式中： Q 为有限的状态集合； X 为有限的非空输入集合； Y 为有限的输出集合； $q_0 \in Q$ 为初始状态； δ 为 $Q \times X \rightarrow Q$ ，状态转移函数； O 为 $Q \times X \rightarrow Y$ ，输出函数。

若有限状态机模型中所有状态均最多有一个后续状态，则该模型称为确定的有限状态机模型。

将开关、按键等多个控制部件的有限个输入的组合作为时序输入 X ，将 HUD、3 台 MFD 的画面组合及每个画面的显示信息作为输出 Y ，通过定义初始状态 q_0 、合理设计转移函数 δ 及输出函数 O 来构建一个确定的有限状态机模型，即可利用可视化编程工具实现与实际装备操作控制逻辑一致的显控系统功能仿真。

2 仿真设计

2.1 总体设计

某型多用途战斗机飞行训练模拟器采用半实物仿真方案，座舱部分用与实装布局一致的硬件实现，航电系统功能仿真由软件实现，如图 2 所示。

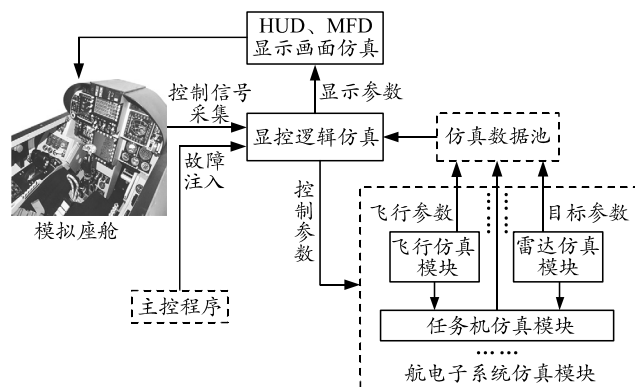


图 2 显控系统仿真总体设计

显控系统功能仿真主要包括显控逻辑仿真和显示画面仿真 2 个模块。

2.2 显示画面仿真设计

显示画面仿真模块主要包括由仪表虚拟仿真软件 GLStudio 开发的 HUD、MFD 的多个画面，如图 3 所示。为简化设计的复杂性、降低模块之间的耦

合度，各显示画面独立工作，且不负任何控制处理，只接收显控逻辑仿真模块送来的显示参数在相应位置进行显示并实时更新。

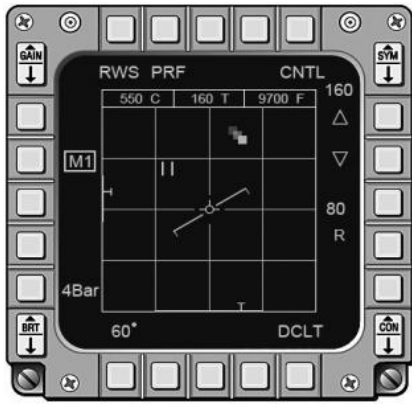


图 3 显示画面仿真设计

2.3 显控逻辑仿真设计

显控逻辑仿真模块主要包括信号转换、系统/子系统状态判断逻辑、显示逻辑 3 部分，如图 4 所示。

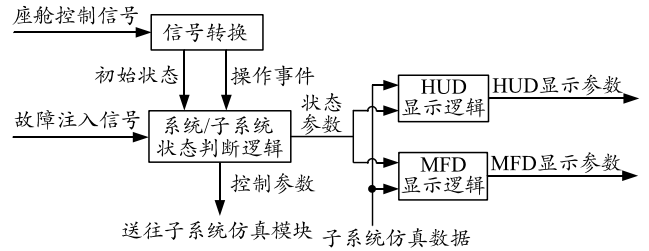


图 4 显控逻辑仿真设计

信号转换部分负责实时采集模拟座舱控制部件的初始状态和输入信号，对信号进行去抖动处理，将变换开关位置、按下按键等输入信号转换为操作事件，用于驱动系统/子系统的状态转移。

系统/子系统状态判断逻辑部分和显示逻辑部分采用有限状态机模型实现，如图 5 所示。定义座舱控制部件输入信号及操作事件、仿真故障注入为输入 X ；定义 HUD、3 台 MFD 显示画面为输出 Y ；定义航电系统/子系统的工作状态组合构成有限状态集合 Q ；定义航电系统/子系统关机状态时的 Q 为初始状态 q_0 。

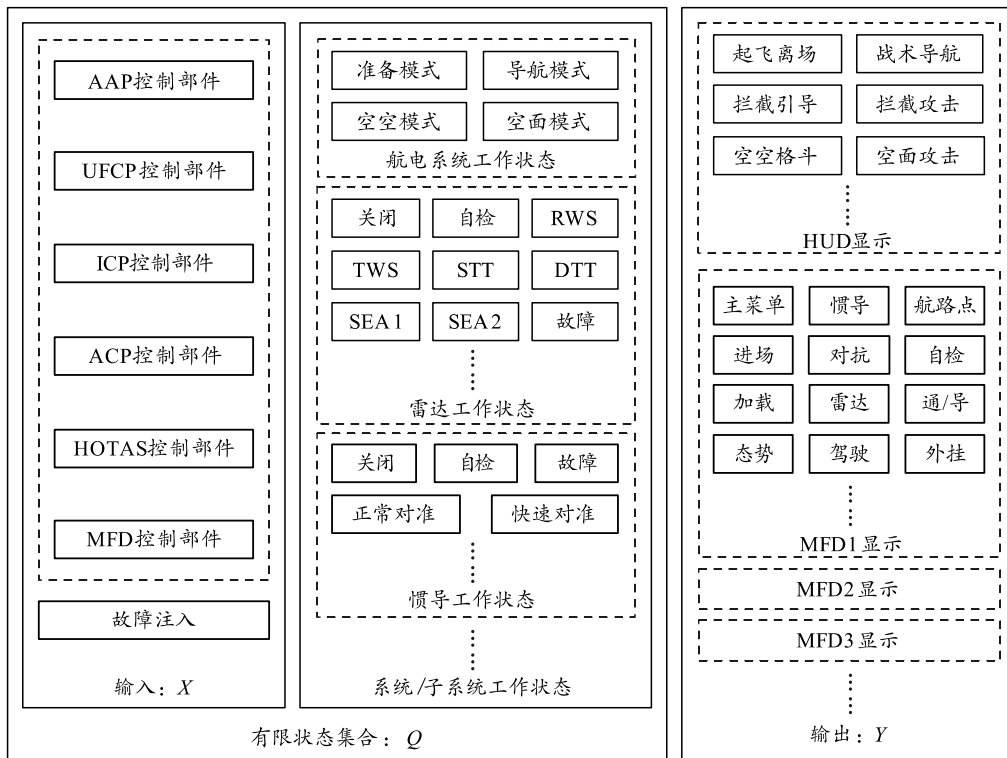


图 5 显控逻辑仿真状态模型

根据飞行手册 (POP) 中航电系统操作说明，设计故障注入、操作事件触发下 Q 的状态转移函数 δ ，如按压 AAP “惯导” 按键时，惯导开机、自检，根据惯导状态选择开关设置的方式进行对准；按压 AAP “雷达” 按键时，雷达开机、自检；按压油门杆主模式开关左键时，航电系统进入空空拦截模式，

雷达进入 RWS 工作方式等。

有限状态集合 Q 在某一时刻的状态是确定的，即航电系统工作模式、各子系统的工作状态确定。显示逻辑部分只需确定 HUD 和 3 台 MFD 需要显示的画面，即可根据 Q 的状态输出相应的画面索引、显示信息等显示参数，驱动仿真画面显示。如航电

系统导航主模式下，HUD 根据 UFCP 上设置的导航子模式显示相应信息；左 MFD 默认显示外挂物画面、中 MFD 默认显示雷达画面、右 MFD 显示态势画面，并可根据航电系统工作模式的变换和按压周边键等操作进行切换。

3 基于 Stateflow 的仿真实现

Stateflow 是 Matlab 基于有限状态机的图形化建模工具，通过状态转移图、流程图等图形化对象，

针对系统对事件、基于事件的条件以及外部输入信号的反应方式等组合和时序逻辑决策进行建模^[12]。构建的有限状态机模型可以作为 Simulink 模型中的模块执行，执行过程中通过图形动画能够直观地进行分析和调试，调试完成后可生成 C++代码嵌入入主仿真程序中。

基于 Simulink/Stateflow 的航电显控系统功能仿真实现如图 6 所示。

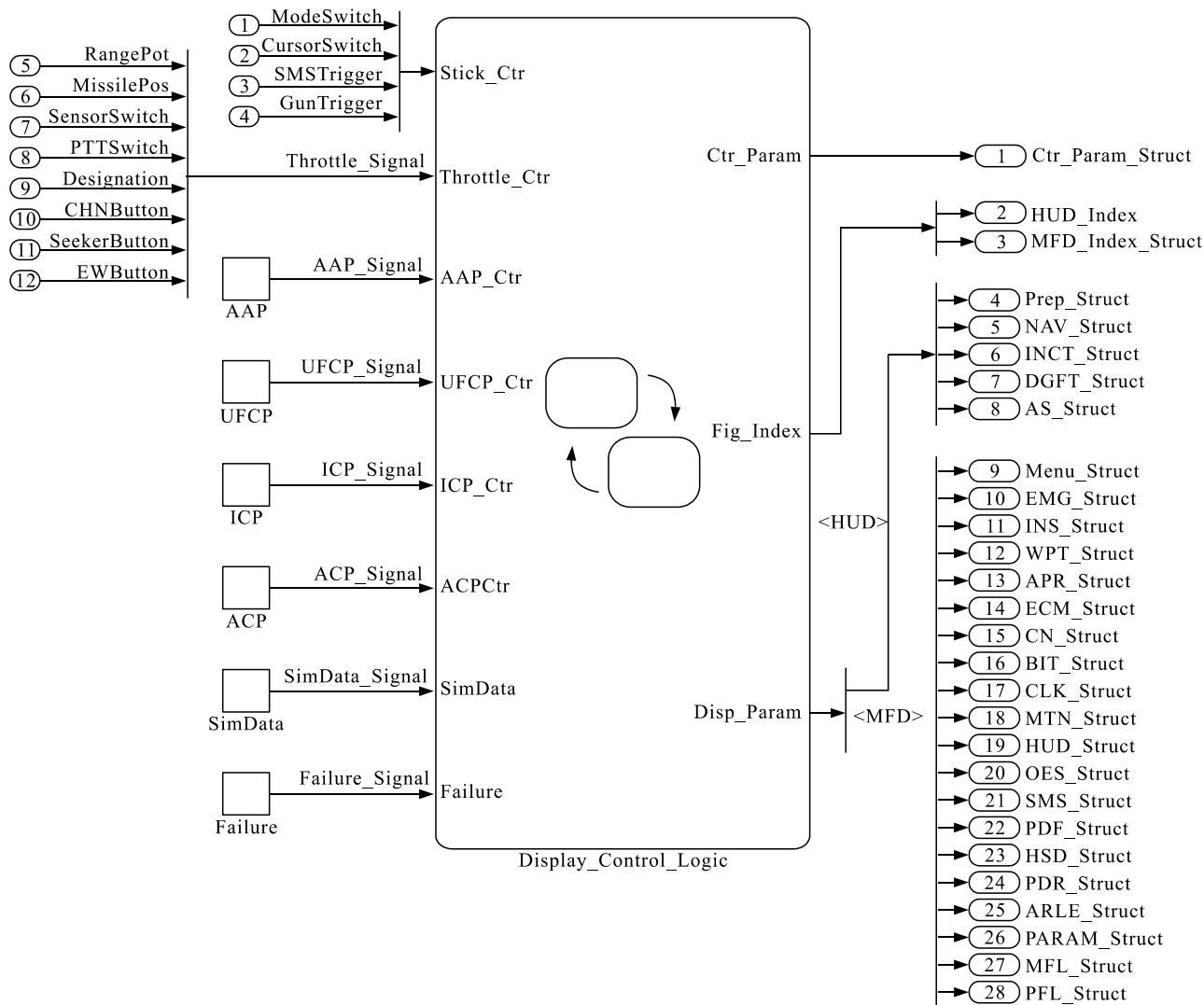


图 6 基于 Stateflow 的显控系统功能仿真

输入端口对应结构体形式的控制部件采集信号、仿真数据和故障注入数据(限于篇幅，图中除驾驶杆、油门杆外，其余输入信号封装成了子系统形式)；输出参数包括子系统工作状态(送往航电系统仿真程序)、HUD 和 3 台 MFD 的画面索引号及各画面显示参数结构体。

显控逻辑部分由 Stateflow 模型实现。为使结构清晰，采用分层的模块化设计，共包含 4 个并行状

态，如图 7 所示。

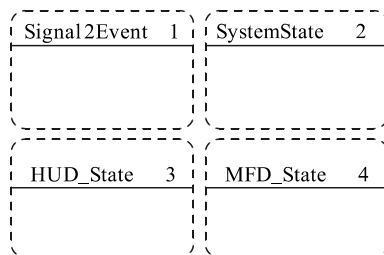


图 7 显控逻辑 Stateflow 模型

图中：Signal2Event 模块负责采集输入信号，并将信号变化转换为事件，用于驱动其余 3 个模块的状态转换；System_State 模块负责判断航电系统工作模式、各子系统的工作状态，各子系统并行运

行，在事件触发下转换各自工作状态。图 8 以雷达系统为例展示了各工作方式之间的转换逻辑；HUD_State、MFD_State 模块负责判断 HUD 和 MFD 的显示画面，输出画面索引号和显示数据结构体。

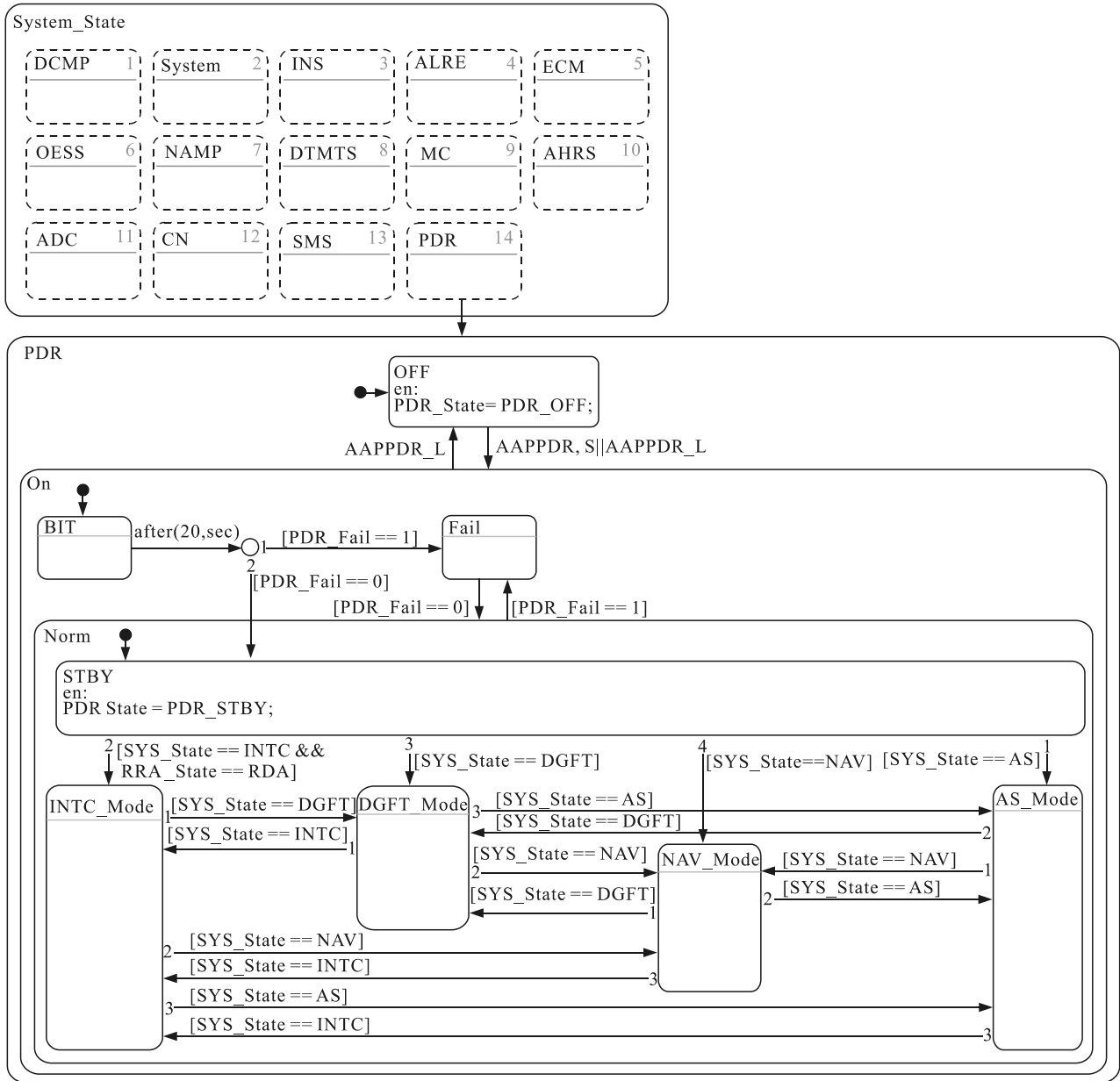


图 8 系统/子系统工作状态判断逻辑模型

构建的模型通过 Simulink Coder 可直接生成 C++ 类代码，定义了输入、输出参数，以及 initialize()、step()、terminate() 3 个主要参数。在主仿真程序中实例化一个类对象，调用 initialize() 函数进行初始化；根据设置的时钟间隔读取模拟座舱各控制面板的采集信号对类对象的输入参数进行赋值；然后调用 step() 函数得到输出值，送往显示画面仿真程序驱动显示并持续更新。

4 结束语

相比于实际航电系统的测试与验证仿真，教学与模拟训练仿真对实时性要求相对较低，但要求操作控制逻辑与实际装备严格一致，采用脱离 1553B 总线及板卡的软件仿真方法具有较好的经济性和实用性。