TM-76457
(1205-9)

N81-22060

HK80072

数模混合系统及其在自动飞行控制系统仿真研究中的应用

中国航空研究院

1980 年 8 月

A DIGITAL-ANALOG HYBRID SYSTEM AND IT'S APPLICATION TO THE AUTOMATIC FLIGHT CONTROL SYSTEM SIMULATION RESEARCH

Group of Hybrid System
(Flight Control Research Institute)

ABSTRACT

Specifications of a digital-analog hybrid system which consists of DJS-8 digital computer and HMJ-200 analog computer and its application to the simulation research for automatic flight control system are introduced in this paper. A hybrid computing example is given to illustrate its application.

数模混合系统及其在自动飞行控制系统仿真研究中的应用*

混合系统课题组**
（飞行控制研究所）

摘　　要

本文介绍由 DJS-8 数字机和 HMJ-200 模拟机组成的数模混合系统的特点以及它在自动飞行控制系统仿真研究中的应用．并通过一应用实例进一步说明了它的应用情况．

一、引　　言

从以往工作来看，自动飞行控制系统的地面飞行模拟试验已贯串于控制系统研制的全过程，从方案论证直到飞行试验的结果分析和修改定型，每个阶段都与地面飞行模拟试验紧紧连在一起．经验证明最终飞行试验的成败与模拟试验是否充分、逼真有着十分密切的关系，而在这试验中，计算装置是一个重要设备，过去大多采用的是全模拟仿真，应用模拟计算机进行计算和控制，模拟机的实时性是其最突出的特点，但是模拟机的精度由于受到器件本身的限制很难进一步提高，而数字机的精度在理论上虽可达到无限精确，但其动态响应速度受计算机运算速度与计算程序的限制不能满足要求，随着自动飞行控制系统的数字化和综合化，兼有数字机精度和模拟机响应速度的数字、模拟混合系统将是进行仿真研究的重要设备．数模混合系统的建立和发展正是为地面飞行仿真创造物质条件，进而开拓新的广阔的应用领域．

二、HMJ-200/DJS-8 混合系统各部分简介

数模混合系统总框图由图 1 所示．

1. 模拟计算机

HMJ-200 型模拟机是一台全晶体管化（少数采用集成电路）的大型模拟计算机．全机由两台主机和 12 台分机组成，每台主机有积分器 40 个，比例反号器 50 个，常系数 180 个、可分别求解不高于 40 阶常系数或变系数微分方程组及模拟由同类型方程所描述的物理系统．每个主机可独立工作，同时也可实现 2—5 个机组并联使用．每个主机均可分别带 10 台以内的分机．整机运算部件为模拟式，控制部件为数字式，运算电平为 ±100V，运算速度高速 1000 次/秒，低速 1000 秒/次．所有积分器均分别由电子开关控制，可实现多种时间比例尺度的高、低速混合计算．常系数全部能自动设置，且其中 1/3

* 本文曾在 1979 年 11 月烟台仿真技术学术交流会上报告、修改稿于 1979 年 12 月 16 日收到．
** 本文由高德华同志整理．

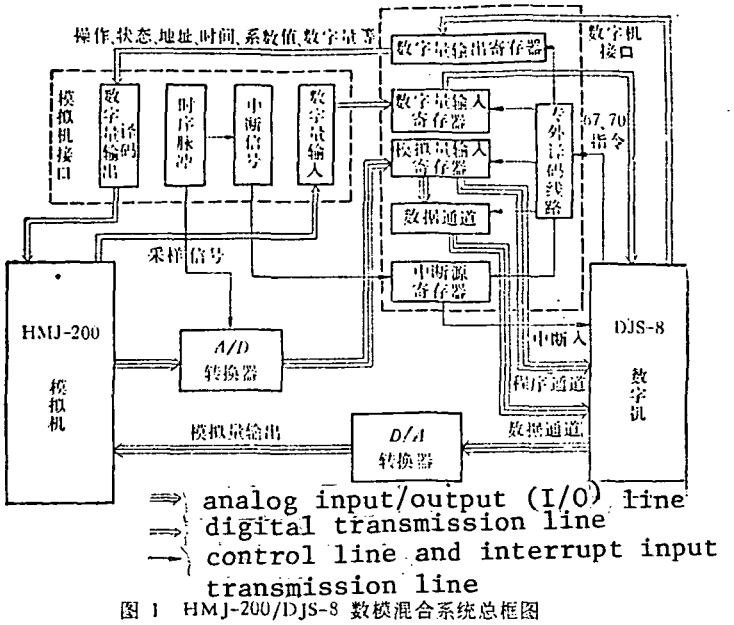

图 1 HMJ-200/DJS-8 数模混合系统总框图

还同时兼有手动设置功能．机器能实现各种典型的寻优技术（随机探索法、梯度法）．由相关随机法原理设计的寻优分机可同时寻找 10 个最优参数．主机除配有模拟排题板外，还配有数字逻辑板和自动控制系统，能编各种复杂的解题程序．整机控制方式可通过主机键盘进行手动操作，也可通过自控分机进行程序操作，后者可实现对运算放大器零位自动检查、数字量输入（纸带或数字机等）、数字量输出（与数字机交换信息或打印等）、运算程序控制（状态设置、操作控制）、定时控制、采样、存贮、送数、逻辑判断、数据处理等，并可由软件来实现．另外整机还有较完善的检测指示系统，其中有双积分数字电压表、四线示波器、多笔记录仪、宽行打印机、窄行打印机、电源控制、分机检测、30 点巡回检测等．分机包括有自控分机、寻优分机、通用非线性分机、脉冲乘法分机、混合函数分机、变系数分机、A/D 转换分机、D/A 转换分机以及光电输入机等．

2. 数字计算机

DJS-8 数字计算机是一台通用、专用结合，并能进行多道、分时操作的硅管电子数字计算机．机器指令平均执行时间为 3—4μs，兼有定、浮点运算功能．机器全字长为 48 位，定点半字长为 24 位，机器内存容量 130K，其中指令存贮器 65K × 24 位，数字存贮器 65K × 48 位．主机部分设有交换器，能实现主机与外部设备并行工作，交换器直接备有 32 个外部输入、输出通道．此外机器还配有专外代码线，可直接与外部并行交换信息．

指令系统为单地址指令，有 60 种操作码，具有变址功能，每条指令占指存一个单元．

中断系统有七级简单中断和六级程序中断．简单中断的处理是通过一条隐指令实现的，级别高于程序中断，处理时不必象程序中断要保留现场和恢复现场；混合系统利用简单中断实现了数据通道的快速信息传输．程序中断在混合系统中主要用于程序通道时的信息输入、输出；采样周期内的信息处理以及混合系统中的控制和管理．

机器外部配有双浮动磁鼓、磁带机、宽行打印机、窄行打印机、纸带作孔输出器、控制

台打字机等设备.

目前已投入运行的软件有单道管理程序、FORTRAN 语言编译程序和 ALGOL 语言编译程序. 数模混合系统解题时可用手编程序或手编和语言相结合的方式.

3. 界面

主要由 A/D 转换器、D/A 转换器、数字机接口、模拟机接口及传输线等部分组成.

A/D 转换器共 48 路,其中慢速 A/D 16 路,转换速度 1500 次/秒,用于系统管理. 快速 A/D 32 路,转换速度 10000 次/秒,用于混合系统计算,两者字长均为 13 位(含符号 1 位).

D/A 转换器共 24 路,字长 10 位,无符号位,输出 0—12V,为适应正负数值,以 6V 作为零点,转换精度为 0.1%,转换速度 10μs/字.

数字机接口由专外译码线路、模拟量输入、模拟量输出、数字量输入、数字量输出、中断源寄存器等部分组成. 模拟量输入部分设有程序通道和数据通道. 程序通道用于慢速 A/D 输入,由程序中断处理方式传输信息,数据通道用于快速 A/D 输入,由简单中断隐指令直接将信息送往内存. 模拟量输入和模拟量输出的信息直接参加混合计算,而数字量输入、数字量输出、中断信号等主要用于逻辑运算和两机之间的相互控制.

模拟机接口的主要功能是产生一系列的采样信号和必要的中断源,使模拟机和数字机协调的完成计算任务;创造条件使模拟机能接受数字机的控制和管理. 它主要由逻辑电平匹配、数字量输出译码、时序脉冲、中断信号源、采样频率选择、A/D 路号控制和数字量输入等部分组成.

模拟机接口中供选择的固定采样频率有 10Hz、20Hz、50Hz、100Hz、200Hz 等五种,另外也可采用外控采样,它可根据不同的使用情况由数字逻辑板自由编排不同的采样频率灵活运用.

4. 混合系统软件

目前混合系统软件主要经 DJS-8 数字机单道管理程序基础上扩展后生成,它主要功能如下:

1) 控制模拟机启动、复原、保持三种操作和准备、检零、设置、静检、动检、重复、寻优、定时八种工作状态.

2) 由光电输入完成一批常系数的自动设置.

3) 由光电输入完成一批放大器的静检.

4) 进行运算中的随机巡检和定时巡检.

5) 完成程序通道采样方式、数据通道采样方式、数据通道满周期运算方式以及数控采样方式等各种情况下的混合运算.

三、数模混合系统在自动飞行控制系统仿真研究中的应用

1. 数字式飞行控制系统的仿真研究

数字式飞行控制系统由于它控制灵活,信号综合方便,更换模态容易,特别适用于多输入、多输出、多模态、多功能的复杂控制系统等特点,已成为当前自动飞行控制系统发展的主要趋向. 例如目前发展的电传飞行控制系统和飞机随控布局技术已大多采用数控

技术，而这类系统从整体上看，其本身就是个数模混合系统，要使这类系统在地面仿真试验研究中具有真实性，就要求仿真设备与实际系统具有类似的采样速度、计算公式、指令系统、计算速度和精度；为便于系统的分析与综合还要求仿真设备对类似于数字网络、数字子系统等控制参数能进行方便的修改和调整，要完成这项工作，无疑只有数模混合系统才是最合适的工具．通常在仿真研究这类系统中，数字机部分常用来仿真控制系统中机载计算机和数字子系统，模拟机部分常用来编排飞机运动方程和部分控制系统传感器和扰动源模型．利用这种仿真研究的方法，在控制系统方案论证阶段就可用来确定机载计算机的速度、容量和指令系统，并为控制系统接口设计和其它功能部件的设计指标要求提供依据；在控制系统研制阶段和最后试飞定型阶段则又可用来进行实物或半实物模拟试验，以便使系统不断完善和提高．

2. 发展新的控制规律

飞机随控布局技术的发展使得飞行自动控制系统在飞机设计中的地位日益与飞机气动布局、结构强度和发动机三大因素并驾齐驱．随着飞机性能的提高，自动飞行控制系统已相继出现了自适应、数字式自动飞行控制系统和多余度电传飞行控制系统，以提高飞机自动化效能，增强可靠性和作战机动性能．这类控制系统的出现，就要求系统设计工作者去研究和发展新的控制规律，探索新的控制理论和综合设计方案，求解自动飞行控制系统最佳化等问题．

数模混合系统由于结合了数字机和模拟机的各自长处，构成了一个具有快速性又具有高度逻辑功能、高精度的计算系统，扩大了解题和仿真能力，为这类控制系统的设计和上述问题的解决提供了一个得力的工具．如求解最佳化问题，往往要求快速求解微分方程(即矢量方程)，这正是当前混合模拟机的独到之处；而另一方面又包含大量的代数运算和逻辑运算，这又恰好是数字机的特长，因此应用数模混合系统就可使这类问题的解决变得容易起来．

四、一个数字式飞行控制系统的混合仿真

这是某飞机纵向外回路自动飞行控制系统在研制阶段初期用来确定系统功能方案和功能部件主要技术要求的地面飞行仿真实例．由于自动飞行控制系统外回路是数字式控制系统，因此在试验中采用了数模混合系统．试验中 DJS-8 数字机仿真了控制系统机载数字机的情况，HMJ-200 模拟机部分仿真了飞机的运动、部分传感器信号和扰动源模型．由于控制系统大部分采用了实际部件，因此试验中还配备了必要的实物模拟设备．

1. 问题概述

1）飞机数学模型

飞机纵向三自由度扰动运动方程式：

$$\begin{bmatrix} \frac{57.3}{v_0}s + n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & (s + n_{22}) & -s \\ n_{31} & (n_0 s + n_{32}) & (s^2 + n_{33}s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \alpha \\ \vartheta \end{bmatrix}$$

$$
= \begin{bmatrix} 0 & n_{11} & \frac{57.3}{v_0} n_{12} \\ -n_{2\delta} & n_{21} & \frac{57.3}{v_0} n_{22} \\ -n_{3\delta} & n_{31} & \frac{57.3}{v_0}[(n_0 + n_{33})s + n_{32}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_e \\ u_g \\ w_g \end{bmatrix}
$$

辅助方程

$$
sH = n_{71}(\vartheta - \alpha)
$$

$$
n_{ycG} = n_{81}(\dot{\vartheta} - \dot{\alpha})
$$

式中 s 微分算子

v_0 初始配平速度[米/秒]；

v 沿 ox 轴(机体轴)速度分量增量[米/秒]；

α 攻角增量[度]，$\dot{\alpha} = s\alpha$；

ϑ 俯仰角增量[度]，$\dot{\vartheta} = s\vartheta$；

H 高度增量[米]，$\dot{H} = sH$；

n_{ycG} 重心处的法向过载[g]；

δ_e 平尾偏角增量[度]；

u_g 水平突风[米/秒]；

w_g 垂直突风[米/秒]；

n_{ij} 运动方程系数。

2）典型扰动形式

① 初始攻角扰动 $\alpha_0 = 2°$

② (1 − cos)型离散突风扰动

3）飞机纵向自动飞行控制系统

飞机纵向自动飞行控制系统原理图见图 2.

机载数字计算机运算规律如下：

执行指令	运算规律
1# 指令(A/P 指令)	$\dot{\vartheta}_c = 0$
2# 指令(A/P 杆力指令)	$\dot{\vartheta}_c = k_1\Delta\vartheta$
3# 指令(平飞指令)	$\dot{\vartheta}_c = -k_4\vartheta \quad \vartheta \leqslant 0{,}5°$ (限幅)
4# 指令(定高指令)	$\dot{\vartheta}_c = k_1\Delta\vartheta + k_2\Delta H_2 + k_3\Delta\dot{H}_2$
	或 $\dot{\vartheta}_c = k_1\Delta\vartheta + k_2\frac{2s+1}{s+1}\Delta H_2$
5# 指令(防撞指令)	$\dot{\vartheta}_c = k_1/2[6° - (\vartheta - \alpha)]$

几点说明

① 模拟量输入共 6 路，除 α 信号暂由模拟机给出外，其它均由传感器经解调器给出.

② 离散量输入共 5 路

1#、2# 指令接通，执行 2# 指令程序.

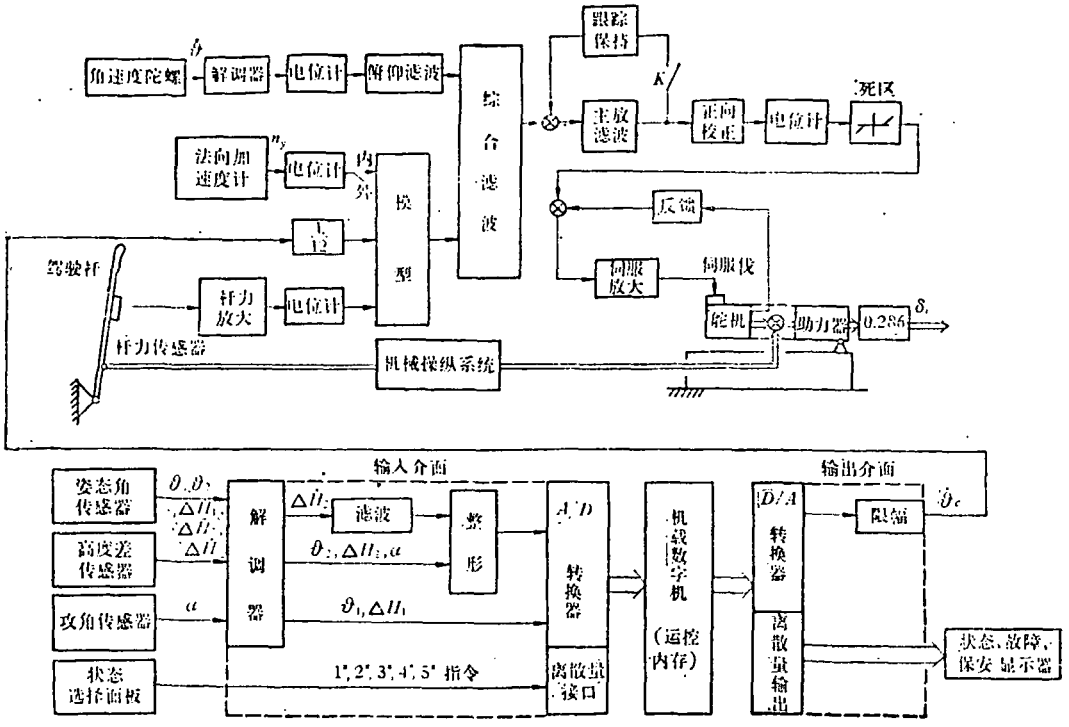

图 2　飞机纵向自动飞行控制系统原理图

1#、2#、3# 指令接通，当满足 $|\vartheta-2|<1°$；$|\Delta H|<3$ 米时，执行 4# 指令程序，否则执行 3# 指令程序.

1#、5# 指令接通，执行 5# 指令程序.

③ 模拟量输出 1 路，即输出外回路指令，并将它限幅后输入到内回路模型输入口进行综合.

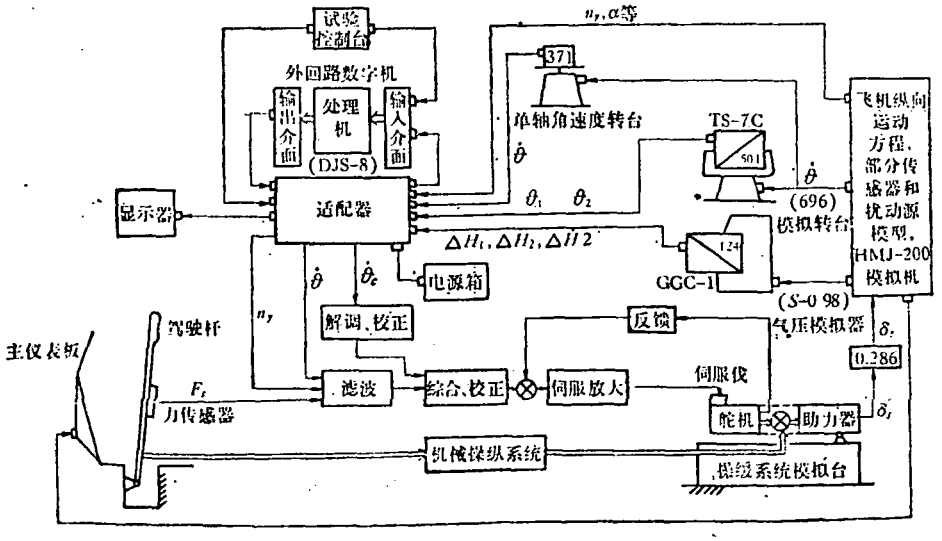

图 3　数字式自动飞行控制系统纵向功能试验框图

④ 离散量输出共 7 路，供状态转换、保安、故障切除和显示用。

2. 仿真试验情况

1）纵向功能试验框图

数字式自动飞行控制系统纵向功能试验框图见图 3.

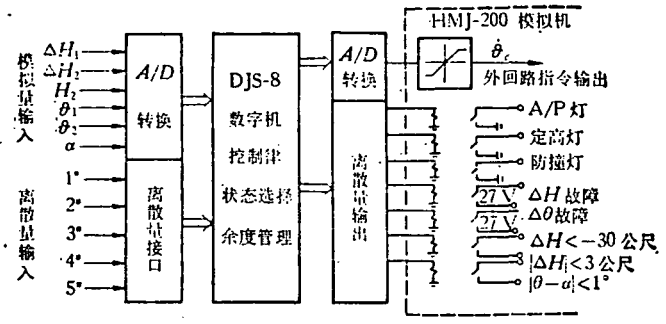

图 4 纵向外回路输入、输出介面框图

纵向外回路输入、输出介面框图见图 4.

2）试验中采样周期分别选择 50Hz 和 20Hz 两种. 模拟机编排图、数字机程序框图及程序略.

3）系统中控制系统实物部件(见表 1).

表 1 系统中控制系统实物部件

序号	名 称	代 号	数量	功 用	备 注
1.	角速度陀螺	TS-7C	1	$\dot{\vartheta}$ 传感器	系统部件
2.	垂直陀螺	501	1	ϑ 传感器	代用试验件
3.	角速度陀螺	553	1	$\dot{\vartheta}$ 传感器	代用试验件
4.	定高装置	124	1	ΔH 传感器	代用试验件
5.	定高装置	GGC-1	1	ΔH、$\dot{H}$ 传感器	代用试验件
6.	力杆组件	GC331-B	1	杆力信号变换器	代用试验件
7.	纵向内回路计算装置		1	内回路控制规律形成、伺服放大、滤波校正等	原理试验件
8.	液压舵机	2311	1	执行机构	代用试验件
9.	操纵控制台		1	状态选择及控制逻辑	代用试验件
10.	适配器		1	试验线路汇总与量测	代用试验件
11.	配电箱		1	试验配电	代用试验件
12.	显示面板		1	配平与警告显示	代用试验件
13.	接线盒		2	外回路计算机电路转接	代用试验件

4）参加试验的主要设备(见表 2).

3. 混合仿真结果

通过这次混合仿真试验可得出如下几点结论:

1）实物模拟与数字模拟的系统结构和参数基本一致，系统品质指标相近.

2）控制系统的数控方案是成功的，它具有较高的性能指标，不仅满足设计要求及有关规范要求，而且主要性能满足规范一级要求.

3）通过仿真试验发现这种控制系统的特点是:

表 2　参加试验的主要设备

序号	设备名称	代　号	数量	功　用	备　注
1.	模拟计算机	HMJ-200	1	模拟飞机纵向运动方程、部分信号源、扰动源模型	占用主机一台
2.	数字计算机	DJS-8	1	外回路信号综合、状态选择和逻辑管理	
3.	介面	A/D、D/A 等	1	实现外回路信号变换及混合系统的控制和管理	
4.	三轴模拟转台	696	1	模拟飞机三轴姿态运动	
5.	单轴液压转台	664C	1	模拟飞机角速度运动	
6.	操纵系统模拟台	212	1	模拟飞机机械操纵系统及能面加载	
7.	气压高度模拟器	S-098	1	模拟飞机飞行时气压高度	
8.	频率响应分析仪	JM-1600	1	测量系统动态频率响应	
9.	十笔记录仪		1	记录系统动态过程	
10.	工业电视和通信		1	各部分之间的通信和监控	

① 稳定精度高；

② 增益稳定贮备大；

③ 系统功能状态完善，使用自如，工作安全，应用范围广泛；

④ 状态接通与转换时过渡平稳，扰动不大.

⑤ 任一状态均保留了杆控机动功能.

但从仿真试验中也发现系统抑制外干扰能力较差，这是造成系统外回路残余振荡的原因之一.

4）从整个试验过程看，数模混合系统试验结果与纯模拟试验结果相同，说明混合仿真试验是成功的，正确的.

五、结　束　语

数模混合系统的建立对开辟仿真研究的新领域提供了一个有利的物质条件. 混合系统自一九七八年底投入使用以来，曾先后进行了两个型号任务的仿真研究工作，取得了良好的效果. 但它的应用并不局限于此，由于它在动态研究上的优越性，几乎可应用于航天、航空的所有分支部门，甚至在化学工业、原子能、冶金、机械制造等一切具有连续量和离散量的物理系统，都可应用混合系统进行仿真研究. 我们希望从事仿真研究工作的同志广泛应用它，使其应用范围得以不断充实和扩展，数模混合系统本身也可在使用过程中不断加以完善和提高.

参　考　文　献

[1] G. A. Korn, Electronic Analog and Hybrid Computers McGraw-Hill Book Company. (1972).

[2] G. A. Korn, Analog/Hybrid Computation and Digital Simulation, *IEEE*, 1—25 (1976).

[3] A. A. Frederickson, Jr. Hybrid Simulation of Lifting Re-Entry Vehicle, *AFIPS* 26, (1964).

[4] G. A. Korn, Recent Computer System Development and Continuous System Simulation, *AICA* No. 2 (1974).