

# 某型飞机飞行训练模拟器的设计与实现

林亚军,周晓光,谷树山

(海军飞行学院,辽宁葫芦岛 125001)

**摘 要:**论文对某型飞机飞行模拟器进行了设计与实现。首先提出了某型飞机飞行模拟器进行设计的依据和原则,在此基础上提出总体的设计思路;阐述了某型飞机飞行模拟器研制的内容,对某型飞机飞行模拟器体系结构进行了设计;对驾驶杆力仿真、模拟仪表仿真、PWM电机调速、视景生成系统设计、图像校正和边缘融合等关键技术进行了系统的分析;文中所设计与实现的飞行模拟器与同类型、同级别的飞机飞行训练模拟器相比,飞行训练更丰富、视觉更好,特别是驾驶杆操纵感觉更好地模拟了飞行实际。该型号飞机飞行训练模拟器已装备航空兵部队,并取得了良好的训练效果。

**关键词:**飞行模拟器;仿真技术;模拟仪表;视景生成系统

**中图分类号:**TP39

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)03-0226-04

## Design and Realization of Flight Training Simulator of One Type of Airplane

LIN Ya-jun, ZHOU Xiao-guang, GU Shu-shan

(Navy Flight Academy, Huludao 125001, China)

**Abstract:** A flight training simulator of one type airplane is designed and realized. Firstly, it presents the design base and principle of the flight training simulator of one type airplane, on the basis of that, the design thought is analysed. The developed content is described, system structure is designed. Key technology, such as steer stick force, simulative instrument, selection of switch frequency in pulse width modulation electromotor, development of visual simulation system, image emendation and margin blend are analysed. The flight training simulator of one type airplane is designed and realized in this paper, can carry out much more training mission than other training simulator of the same type and same level, and the vision is more fidelity, the steer stick force is more reality. The flight training simulator of one type airplane has been equipped aviation troop, and has a well training effect.

**Key words:** flight simulator; simulation technology; simulative instrument; visual simulation system

## 0 引言

基于飞机的飞行训练不仅受天气等自然条件的制约,还给后勤、机务等部门带来相当大的保障难度,同时对飞行安全也存在严重威胁。国内外的飞行实践表明:基于飞行模拟器的模拟飞行训练是解决上述矛盾的主要有效方法。多家相关单位对某型飞机飞行模拟器进行研制<sup>[1,2]</sup>,取得了一定的成果。但是仍存在驾驶杆操纵感觉差、模拟器视景显示逼真度低的问题。

文章在相关单位的研究基础上,对某型飞机飞行训练模拟器进行了设计和实现,该模拟器具有三通道环形幕视景,能够完成该飞机飞行训练科目和特情训练科目模拟飞行训练。研制结果表明:该模拟器具有良好的训练效果,在保障飞行安全的基础上,提高了教

学训练质量。

## 1 总体思路

### 1.1 设计依据

某型飞机飞行训练模拟器主要应用于新学员的培养、教员飞行技术恢复和特情模拟训练,因此,模拟器各系统,如操纵负荷、仪表指示、视景显示等系统尽可能贴近飞行训练实际,教员台暂停、记录、回放、评分管理等功能尽可能满足教学实际需求。同时,着眼模拟训练发展,系统设计时应充分考虑可扩展性,预留接口以期将来实现飞行模拟器编队训练、多模拟器和塔台指挥训练模拟器结合,直至实现基于飞行模拟器的飞行日指挥、飞行模拟训练。

### 1.2 设计原则

根据飞行训练模拟器性质和将要实现功能,要圆满地实现系统各项功能,达到设计技术指标要求,必须遵循适当的设计原则。飞行训练模拟器研制是一个

收稿日期:2011-08-10;修回日期:2011-11-15

基金项目:国家863高技术研究发展计划(2010AA1Z)

作者简介:林亚军(1971-),男,辽宁葫芦岛人,高级工程师,博士,研究方向为现代作战系统与虚拟现实技术。

复杂的系统工程,它涉及到系统集成、接口技术、电气工程、电机控制、虚拟现实、网络技术等各个领域。模拟器的研制方案在保证整机运行稳定性、可靠性的前提下,尽可能采用各领域的先进技术,即在系统设计时必须坚持可靠性与先进性相结合的原则。

### 1.3 设计思路

首先,注重标准化设计采用通用软件平台,避免大量底层开发工作,缩短研制周期;采用模块化设计,各单一功能的部件及系统均模块化,以保证质量和便于维护;软硬件配置采用柔性化思想,以备扩充、升级、机型更换和联网等,便于系统升级完善;整个系统执行飞行模拟器相关规范要求。

其次,尽可能采用仪表驱动、音响模拟、视景设计、电机控制等领域先进成熟技术以提高系统的可靠性和先进性。

最后,突出研制重点,将操纵负荷系统、成像系统、座舱抖振系统、实装仪表仿真系统作为研制和仿真的重点。

## 2 系统结构设计

### 2.1 研制内容

某型飞机飞行训练模拟器的研制内容主要包括:操纵及操纵负荷系统<sup>[3]</sup>、振动抖动系统、模拟仪表仿真系统、成像显示系统<sup>[4]</sup>、图形仪表音响系统、仿真解算系统<sup>[5]</sup>、评分数据库管理系统、教员台界面管理系统和网络通信接口系统设计和各项模拟训练功能的实现。

### 2.2 系统结构

某型飞机飞行训练模拟器是由计算机组成的大型实时动态仿真系统,主要由十一个分系统组成:模拟座舱房体系统、操纵及操纵负荷系统、座舱仪表指示系统、座舱抖振系统、音响模拟系统、智能评分系统、飞行

模拟解算系统、视景显示系统、教员台系统、计算机通讯与接口系统、电源配电系统。模拟器系统结构框图如图1所示。

### 2.3 总体布局

某型飞机飞行模拟器座舱由实装座舱改造而成,底部放置在专用托架上,舱内设备位置外观及功用与飞机一致。模拟器由房体、模拟座舱、控制台、柱形幕、投影机等几部分组成。模拟器总体布局如图2所示:

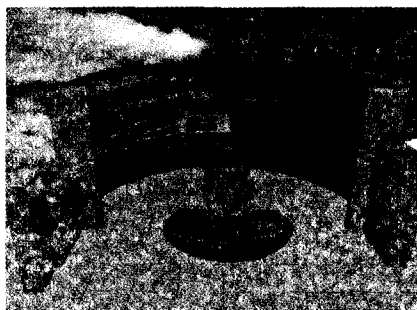


图2 某型飞机飞行模拟器总体布局

## 3 关键技术分析

### 3.1 驾驶杆力仿真技术

对于驾驶杆力仿真,采用先进的力矩电机并充分利用该电机的性能进行杆力系统设计。设计原理是可以通过串口输出三个控制参数:力梯度系数、阻尼系数、调整片位置。其中,力梯度系数、阻尼系数经过控制器输出后,控制力矩电机输出力矩的大小。力梯度系数由杆力解算方程获得;阻尼系数通过阻尼函数得到。调整片位置主要作用是通过飞机调整片实时控制调整驾驶杆中立位置。通过这样设计充分发挥了电机的先进性,使驾驶杆操纵感觉更符合飞行实际。

杆力梯度主要与升降舵上的气动力有关,升降舵上的力矩主要由升降舵上的轴位置、升降舵面积、动压

和舵偏角决定。所以杆力梯度总表达式为<sup>[6]</sup>:

$$F = k_1 q (\delta_i - k_2 \delta_{\text{调整片}}) \quad (1)$$

其中,  $\delta_{\text{调整片}}$  为调整片偏转量,  $k_2$  为舵偏角调整系数。

驾驶杆力的阻尼主要来自三个方面,一是机械间固有的摩擦,二是机械固件的惯性,三是升降舵上下偏转时的气动摩擦。所以阻尼表达式为<sup>[6]</sup>:

$$q = q_0 + k_3 \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + k_4 v \quad (2)$$

其中,  $q_0$  是机械间摩擦力,  $t$  是时间量,  $k_3$ 、 $k_4$  分别为惯性量及气动摩擦调整系数,  $v$  是飞机速度。

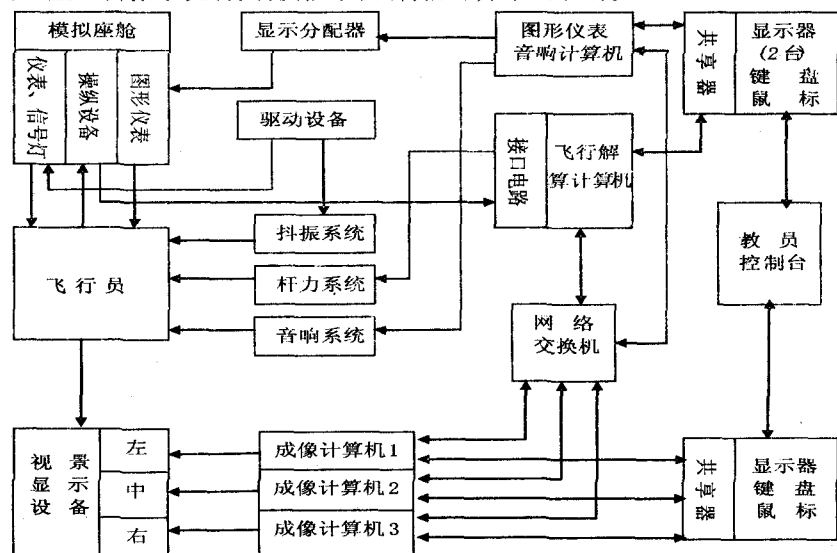


图1 某型飞机飞行模拟器系统结构框图

通过公式(1)、(2)计算杆力梯度和阻尼的值,并将获取的值传送给力矩电机控制器,以实施对杆力的大小控制。可以通过调节杆力梯度系数和阻尼中系数以适应飞行员的操纵感觉。

### 3.2 模拟仪表仿真技术

仪表对于飞行员操纵飞机起着至关重要的作用,在飞行模拟器中它们同样也是非常重要的。首先按仪表的功用、作用原理和仪表的结构改变程度对仪表进行分类,列出其工作特性和性能。在此基础上对常用仪表的结构和原理进行具体分析,设计接口电路及驱动电路,并通过编写计算机软件驱动和校正仪表。模拟仪表的原理如图3所示。驱动板上单片机通过接口接收主仿真计算机输出的模拟量,并根据模拟量的特性,如大小、变化率等,转换成对应的频率和脉冲等,通过驱动电路、放大电路,控制相应伺服或步进电机运动,从而实现模拟仪表仿真。

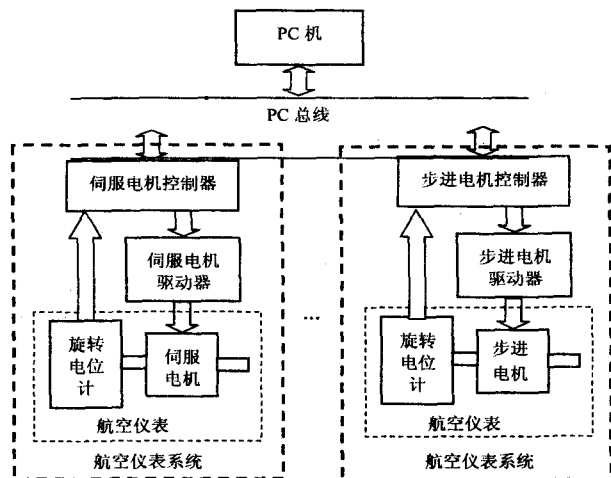


图3 伺服电机工作原理图

### 3.3 PWM 电机调速技术

脉冲宽度调制波由一系列占空比不同的矩形脉冲构成,其占空比与信号的瞬时采样值成比例<sup>[7]</sup>。系统拥有一个比较器和一个周期为 $T_s$ 的锯齿波发生器构成。如果输入信号 $x(t)$ 大于锯齿波的信号,那么比较器输出正常数 $A$ ,否则输出0。如图4所示,比较器输出一列下降沿调制的脉冲宽度调制波。脉冲宽度调制系统的原理和波形如图4所示<sup>[8]</sup>。

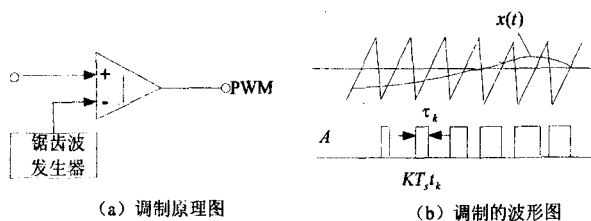


图4 脉冲宽度调制过程

通过对图(b)的分析可知,生成矩形脉冲的宽度取决于脉冲下降沿时刻 $\tau_k$ 的信号幅度值的大小。因

此,采样值之间的时间间隔是非均匀的,如果想获得均匀的采样信号,可以在系统的输入端插入一个采样保持电路。但是,如果 $\tau_k - kT_s \ll T_s$ ,那么均匀采样和非均匀采样差异非常小。假定均匀采样,第 $k$ 个矩形脉冲就可以表示为:

$$\tau_k = \tau_0 [1 + mx(kT_s)] \quad (3)$$

其中, $\tau_0$ 为未调制宽度; $m$ 为调制指数; $x(t)$ 为离散化的信号; $T_s$ 为采样周期。如果对矩形脉冲信号作如下近似:脉冲幅度为 $A$ ,中心在 $t = kT_s$ ,由于 $\tau_k$ 在相邻脉冲间变化缓慢,所以脉冲宽度调制波 $x_p(t)$ 可以表示为:

$$x_p(t) \approx \frac{A\tau_0}{T_0} [1 + mx(t)] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{\pi n} \sin n\varphi(t) \cos n\omega_s t \quad (4)$$

其中, $\varphi(t) = \frac{\pi\tau_0}{T_k} [1 + mx(t)]$ 。由公式(2)可知,脉冲宽度信号是由语音信号 $x(t)$ 加上一个直流成分和相位调制波构成。当 $\tau_0 \ll T_s$ 时,相位调制部分引起的信号交迭非常小,可以忽略,那么,脉冲宽度调制波就可以直接通过低通滤波器进行解调。

在我们的PWM控制方案中,拓展了原始PWM只是调速的传统做法,把频率可调PWM用于振动系统中,把PWM的可调频率用于振动系统的振动频率,把PWM中的脉宽调制用做振动系统中的振幅的调节。

针对系统技术指标要求,控制驱动系统采用H桥驱动芯片驱动电机正反方向转动,H桥驱动采用IR3220与IRF7484组合。IR3220性能指标控制系统主要由单片机处理器及外围电路、电源电路、通信电路组成。电机控制中PWM控制是电机调速的主要控制方案,但在振动系统中主要是控制振动幅度和振动频率,所以在振动系统中PWM控制方案失去了作用。在振动系统中主要的振动频率集中在1kHz~20kHz之间,PWM的调节频率一般在1kHz~20kHz之间,所以我们经过改变PWM控制方案,形成了一套适合抖振系统的控制方案,实践证明:这种控制方案完全适合本振动系统,振幅可达0~15mm,频率可以达到25Hz。

### 3.4 视景生成系统设计

视景仿真环境,采用最先进的成熟的计算机成像技术,视景驱动平台选用Vega Prime2.0,基于C++语言开发,视景数据库大量使用可获取的地理信息数据,如高分辨率卫星遥感数据、数字、高程模型数据等并使用CTS1.1生成极具现实感的地景环境生成。模型数据库采用Creator3.0开发<sup>[9,10]</sup>,包括飞机、机场、建筑物等。视景生成系统的实现主要包含两个过程:视景数据库的建立和视景驱动程序的开发。视景数据库建模工作主要由地形建模和三维物体建模组成,在此基础

上通过实例技术、LOD 技术、纹理映射技术和子面技术来节省系统资源、提高实时运行速度、提高视景清晰度。

视景系统的原理框图如图 5 所示。

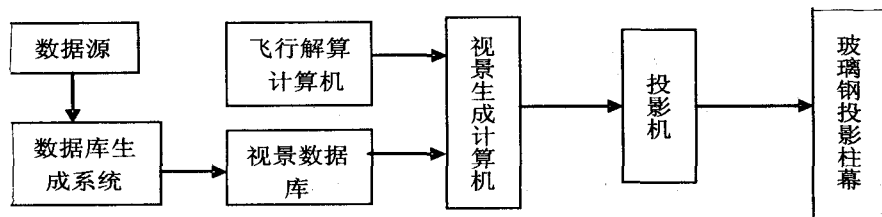


图 5 视景系统原理框图

### 3.5 多视景通道图像校正和边缘融合技术

基于 OpenGL 技术开发图像校正和边缘融合软件,实现了基于环形幕的非线性几何校正、三通道边缘融合和颜色一致性校准功能,得到了一幅无缝、亮度、色彩、鲜艳度、均匀度都比较一致的显示图像,大大加强了系统的沉浸感<sup>[11,12]</sup>。

三通道无缝投影显示系统:

投影面为直径 6.6 米、高 2.8 米、水平视角 180 度、垂直视角 45 度的环形投影区域,3 台投影机将显示内容投影在该投影区域上,产生一个高分辨率、视场连续、无缝、亮度与颜色一致的图像。

要建立这样一套无缝拼接的投影系统,需要完成以下 3 方面的工作:

(1) 非线性几何校正:可以使得投影机投影在任何曲面上,投影方向不受限制,将投影的图像经过矫正以获得一个正规的图像。

(2) 多通道边缘融合:可以任意设置融合区域,采用 Alpha 和 Gamma 两个参数对边缘颜色进行过渡控制,能很好地将两个通道的融合区融合在一起,几乎看不出融合区。

(3) 多通道颜色一致性校准:可以对各通道投影出的图像的亮度、灰度、Gamma 值以及 RGB 颜色进行校准,这样呈现在整个屏幕上的图像的亮度、色彩、鲜艳度、均匀度都比较一致,大大加强了系统的沉浸感。

## 4 结束语

综合国内研制飞行训练模拟器的技术现状,运用先进、成熟的软硬件平台,完成该模拟器的设计、研制。采用了先进的力矩电机并通过合理建模很好地实现了驾驶杆操纵感觉模拟;在 PWM 电机调速的基础上,实现了通过 PWM 技术实现了对运动振幅和频率的控制;模拟仪表仿真,运用了三种实现方式,基本原理驱动、伺服电机驱动和步进电机驱动,为今后实现模拟仪

表仿真打下了坚实的技术基础;视景仿真系统采用先进的 VegaPrime、Creator 平台,运用先进的纹理映射技术实现了系统资源的占用和成像效果的统一;采用最先进的图像校正、融合技术建立一套无缝拼接的投影

系统,产生一个高分辨率、视场连续、无缝、亮度与颜色一致的图像。

与同类型、同级别的飞机飞行训练模拟器相比,研制的“××飞机飞行训练模拟器”视景显示更丰富、清晰、

视觉更好,特别是驾驶杆操纵感觉更好地模拟了飞行实际,该模拟器运行稳定、可靠,总体性能高于同型号、同级别飞行训练模拟器,可在航空兵部队推广使用。

### 参考文献:

- [1] 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [2] 张毅,胡勤友,施朝健. HLA 与 MAS 在分布式仿真领域的应用比较[J]. 计算机技术与发展,2006,16(1):150-155.
- [3] Stewart D. A Platform with Six Degree of Freedom[C]//IME. [s.l.]:[s.n.],1965:371-386.
- [4] 王润杰,李松维,范贤德. 飞行模拟器视景中纹理压缩技术的研究与实现[J]. 系统仿真学报,2003,15(1):90-95.
- [5] 吴军,李铁民,关立文. 飞行模拟器运动平台的计算力矩控制[J]. 清华大学学报,2006,46(8):1405-1408.
- [6] 王平,鄢靖丰,许江东. 基于演化算法的电路自动设计方法[J]. 计算机技术与发展,2006,16(1):47-50.
- [7] Reznik L, Ghanayem O, Bourmistrov A. PID plus fuzzy controllers structures as a design base for industrial applications[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(4):419-430.
- [8] Fan Mingxuan, Clark M, Feng Z C. Implementation and Stability Study of Phaselocked-loop Nonlinear Dynamic Measurement Systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2007, 12(7):1302-1315.
- [9] 王晓东,毕开波. 基于 Creator 的飞行视景三维模型数据库优化技术[J]. 系统仿真学报,2007,19(12):2716-2719.
- [10] MultiGen-Paradigm Inc. MultiGen Creator Users Guide (Version 3.0) [M]. USA: MultiGen-Paradigm Inc., 2004.
- [11] Sijbers J, Verhoye M, Schetmders P. Watershed-based segmentation of 3D mr data for volume quantization[J]. Magnetic Resonance Imaging, 1997, 15(6):679-688.
- [12] 王晓旺,康凤举,唐凯,等. 飞行模拟训练分布交互视景仿真系统研究[J]. 计算机仿真,2007,24(5):264-267.