

基于 AVR 单片机的航空仪表仿真系统设计^{*}

陈又军

(中国民用航空飞行学院模拟机训练中心 广汉 618307)

摘 要: 航空仿真仪表是飞行模拟驾驶舱的重要组成部分。常规航空仪表改装方法开发难度大、维护成本高。研发一种能数据交换、对航空仪表外观、仪表显示和人的操作模拟的航空仪表仿真方法,对于提高航空仪表仿真系统集成度和改进其逼真度,具有重要意义。通过三维数模设计和加工实现航空仪表外形仿真,基于 GLFW 框架进行仪表图形化仿真,基于 AVR 单片机设计了硬件电路,实现了信号实时检测和指示灯的驱动。采用 ASCII 码报文实现仿真仪表面板硬件与仪表仿真程序的数据交换。经直升机飞行训练器装机实验测试,仿真航空仪表的外观、指示和操作响应与机载航空仪表接近,达到设计要求,有效提升了仿真度,降低了研制成本,对于研制飞行模拟训练设备具有重要意义。

关键词: 飞行模拟机;飞行训练器;航空仪表;GLFW;GL Studio;VAPS

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Design of aviation instrument simulation system based on AVR MCU

Chen Youjun

(Flight Simulator Training Center of Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Aviation simulation instrument is an important part of flight simulator. Conventional aviation instrument refitting method is difficult to develop and high maintenance cost. A simulation method is developed, which can exchange data and simulate the aviation instrument in appearance, display and operation. There are great significance for improving the integration and fidelity of aviation instrument simulation system. Digital design and CNC are used to make the aviation instruments panel and bezel; GLFW framework is used to render the graphical aviation instruments; hardware circuit is designed based on AVR MCU to realize real-time signal detection and lamp driving; ASCII code message is used for data exchange between simulation instrument panel and instrument simulation program. Through the test of helicopter flight trainer installation, the appearance, indication and operation response of the simulation aviation instrument is close to that of the airborne aviation instrument, which meets the design requirements, effectively improves the simulation standard and reduces the development cost. It is of great significance for the development of flight simulation training equipment.

Keywords: flight simulator; flight training device; aviation instrument; GLFW; GL Studio; VAPS

0 引 言

航空仪表系统为飞行员提供空速、姿态、高度、导航和发动机状态等信息,并接受飞行员操作。仿真航空仪表是研发模拟飞行驾驶舱的重要环节。常规方法是使用机载航空仪表进行改装,这种方案价格昂贵、开发难度和后期维护成本高。GL Studio 和 VAPS 的是开发虚拟航空仪表的专业软件^[1-2],通过鼠标点击或触摸屏幕进行操作,与飞行员实际习惯差别较大,影响训练效果。飞行训练器、飞行模拟

机需要一种外观、仪表指示、操作方式和响应速度均与飞机接近,并易于通信驱动的仿真航空仪表。

国内学者对仪表仿真分析进行了大量研究。康金兰等^[3]采用 Silverlight 技术及 C# 语言设计实现了航天训练用虚拟仪表仿真软件。方卫宁等^[4]定义了仪表仿真形态逼真度的概念及内涵,建立了基于实时绘制、图像旋转的复杂元素运动算法。袁利毫等^[5]基于实时仿真软件 Vega Prime 和仪表仿真软件 GLStudio 开发深水铺管起重船驾驶模拟系统。李辉等^[6]采用多层次网络和网络接口处理

机,将分处异地的各类飞行和地面管制(指挥)仿真系统组合起来,成为实用的大型分布交互仿真(DIS)系统提供大范围“飞行-地面管制”综合训练环境。金晓明等^[7]介绍了采用 Coryphaeus 软件生成虚拟仪表的模型和 OpenGL 的 C 代码;在微机上贴上仪表面板纹理,然后通过串口 RS-232 进行数据通信,实时地驱动虚拟仪表的指针和表盘数字。陆振宇等^[8]通过光学超精密仪器隔振系统的鲁棒 H ∞ 控制系统仿真分析,认为光学超精密仪器在振动的干扰下具有较好的鲁棒稳定性和控制精度。上述研究有的利用专业软件完成图形化仪表显示,但缺乏真实仪表外观和人操作飞机仪表方式的模拟;有的通过对机械式电机驱动表盘和 RS232 接口完成单个仪表仿真,但缺乏对仪表的仿真。

基于以上问题,本文提出了基于 AVR 单片机的航空仪表仿真系统方案的仪表仿真方法,并设计了仿真系统。在外观仿真中使用三维数模设计和数控加工;仪表指示和显示使用 GLFW 框架实时绘制航空仪表,图形化仿真,实现了 GL Studio 和 VAPS 同类仪表绘制效果;ATMEGA2560 的 GPIO 端口实现航空仪表面板的输入信号检测和指示灯驱动^[9];ASCII 码报文实现仿真仪表面板硬件与仪表仿真程序的数据交换。实验结果表明,本文提出的航空仪表仿真系统实现了对航空仪表外观、仪表指示和操作方式的仿真,满足飞行员通过仪表获取飞行信息的需要,实现了与飞行仿真主程序的交互。

1 仿真航空仪表系统结构

仿真航空仪表系统具有一组航空仪表、开关、警告灯等。图 1 所示为某直升机航空仪表,其中航空仪表通常包含飞行员可操作的旋钮和显示仪表信息的指针、表盘、警告旗等。设计仿真航空仪表系统时,应对仪表外观和功能进行完整模拟。仿真航空仪表的外观进行 1:1 仿真,采用三维数模建模和数控加工实现。仪表功能由仿真航空仪表面板硬件电路和仪表仿真程序共同实现。仪表面板硬件基于 AVR 单片机—ATMEGA2560 设计,单片机检测飞行员对旋钮和开关的操作,通过虚拟串口发送给仪表仿真程序。仪表仿真程序主要功能是与仪表仿真硬件电路和飞行仿真程序进行数据交换和绘制仪表^[10]。仪表仿真程序通过编码器矢量增量的累计,调整仪表显示,响应飞行员对仪表的操作,使用 GLFW 框架实现航空仪表的实时图形绘制,通过以太网的 UDP 协议,实现飞行控制程序与航空仿真仪表的信息交换^[11]。

航空仪表系统结构如图 2 所示,包括仿真航空仪表面板和航空仪表仿真程序^[12]。仿真航空仪表面板包括仿真仪表外壳、开孔面板、开关、旋钮、15.6 英寸液晶显示屏和 ATMEGA2560、ALPS 编码器等组成。ATMEGA2560 内置驱动程序模块完成开关和编码器输入检测,生成和传送通信报文,通过虚拟串口发送给航空仪表仿真程序。航空仪表仿真程序接收仿真航空仪



图 1 某直升机航空仪表

表面板发送的报文,响应人对开关和旋钮操作,通过 GLFW 图形库对图形资源进行实时渲染,通过 VGA 接口驱动航空仿真仪表面板的液晶屏;通过以太网 UDP 协议与飞行仿真程序进行数据交换。

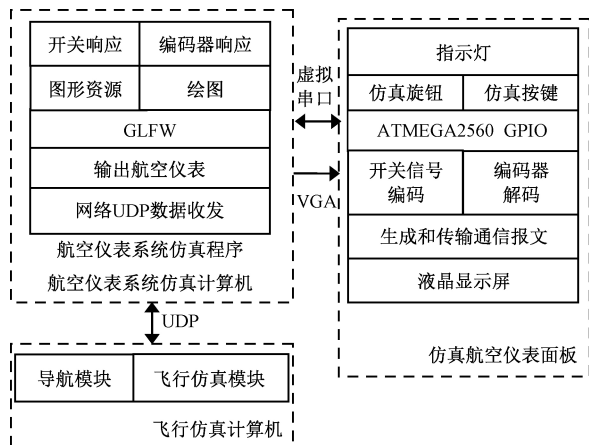


图 2 仿真航空仪表系统结构

2 航空仿真仪表面板设计

研制的直升机航空仪表面板由 8 个仿真仪表、1 个开关、3 个旋钮、13 个信号指示灯和安装金属薄板等组成。航空仿真仪表面板设计包括航空仪表安装固定面板设计和仪表外壳设计。图 3 所示为某直升机航空仪表安装固定面板的 CAD 图纸。首先对航空仪表面板实物测量、选择大小合适的液晶显示屏,确定仪表位置和液晶显示屏安装位置,并绘制 2D 图纸。仪表外壳设计制作中,首先对单个航空仪表实物测量,绘制仪表外壳矢量,通过对矢量组的不同高度三维拉伸,生成仪表外壳三维数模;再使用数控软件选取不同规格铣刀,对加工材料进行粗加工和精加工,完成仪表外壳的生成和加工仿真。水平状态指示仪 HSI 仪表外壳数控加工效果仿真如图 4 所示。

最后将设计完成的航空仪表安装固定面板矢量文件导入数控激光切割设备,切割金属薄板,并喷漆、丝印。将航空仪表外壳数控加工刀路文件导入加工中心,数控加工,制作各个仪表外壳,并喷漆。最后在航空仪表面板上安装指示灯、开关、仪表外壳和编码器等,完成实现航空仪表面板设计和制作。

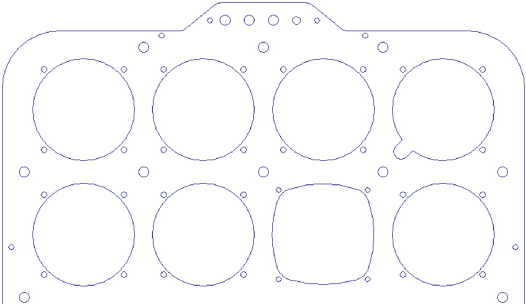


图 3 某直升机仪表面板设计

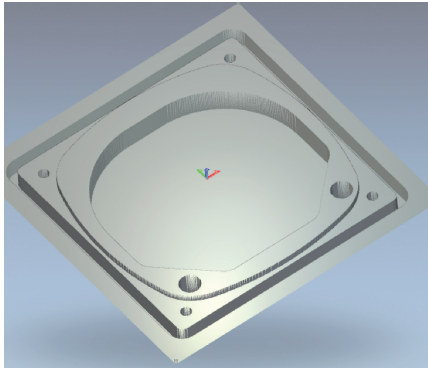


图 4 HSI 仪表圈加工效果仿真

3 基于 AVR 单片机的硬件系统设计

3.1 ATMEGA2560 单片机

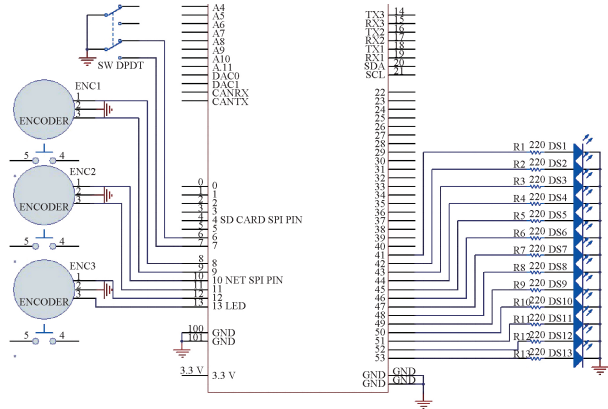
ATMEGA2560 具有 54 路数字输入、输出,适合需要大量 I/O 接口的设计。其中 15 路可作为 PWM 输出,15 路模拟输入,4 路 UART 接口,支持 I²C 接口和 SPI 接口。

ATMEGA2560 单芯片可满足设计较复杂航空仪表面板的信号处理和通信等需求。54 路数字输入、输出能满足数量较多的开关、编码器的输入检测和指示灯的驱动;15 路 PWM 输出引脚可用于设计受程序控制可调背光亮度的仪表面板照明电路;其 GPIO 引脚具有内置上拉电阻,在设计开关和编码器检查电路时,省去上拉电阻,简化外部电路结构;配合 USB 虚拟串口可与计算机运行的飞行仿真程序进行数据交换。

3.2 电路设计

仿真航空仪表面板接口电路由 ATMEGA2560、ALPS 编码器、发光二极管等组成。ATMEGA2560 内置驱动程序模块完成开关和编码器输入检测,生成和传送通信报文,通过虚拟串口发送给航空仪表仿真程序。GPIO 端口设为输入端、内置上拉电阻置高电平位,检测编码器和开关信号。GPIO 端口设为输出端,驱动经电阻限流的发光二极管指示灯。程序采用循环方式检查虚拟串口信息,驱动指示灯,依次检测各开关、编码器输入端,生成的报文通过虚拟串口发送给航空仪表仿真程序。

因航空仪表面板使用的 ALPS 编码器每圈仅 12~24 个脉冲,人工操作脉冲数低,采用将编码器 AB 引脚当前电平与上一次检测电平进行比较的方法,检测编码器增量和方向。电路设计中不使用 ATMEGA2560 外部中断输入引脚,也不设计滤波电容,在检测程序中通过与传统键盘矩阵类似的延时循环电平检测的方式,实现编码器输入信号检测和触点电平毛刺滤波。航空仪表面板电路如图 5 所示。



地 3 个引脚。图 7(a)所示为传统检测方法,即利用单片外部中断引脚,检测 A、B 引脚上升沿电平变化,并根据另一引脚的电平高低,判断旋转增量和方向。使用外部中断的方法可以提供较快的响应速度,但存在两个问题:1)编码器触点电平毛刺容易引起增量和方向检测错误,这时需要增加滤波电容,对电路滤波;2)当编码器数量较多时,单片机外部中断引脚数量不够,需要扩展中断引脚或使用多片单片机。以研制的仿真航空仪表为例需要 6 路外部中断输入引脚,超过了单片机外部中断引脚数量。而采用新方法,最多可以检测 27 个编码器。图 7(b)所示为针对仿真航空仪表设计中编码器数量多、编码器转速相对较低(每圈 12~24 个脉冲),减少触点电平毛刺的检测方法。将单片机 GPIO 引脚设置为输入,将内部上拉电阻置高电平,循环依次检测各编码器 A、B 引脚电平,并与上一次 A、B 引脚电平进行对比,从而判断增量和方向,根据设计最大编码器响应速度,延迟 2~5 ms,再进入下一次循环检测,从而实现编码器的不丢步检测、消除触点电平毛刺。

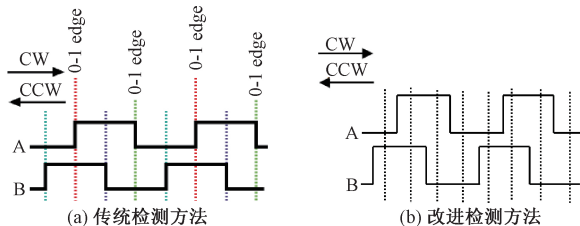


图 7 编码器转速和方向检测

程序如下所示:

```
int enc=0;//编码器计数值
bool ba0,bb0;//AB 引脚状态
bool ba1,bb1;//AB 引脚上一次状态
if (! ba0 && bb0 && ba1 && bb1)enc--;
if (ba0 && bb0 && ba1 && ! bb1)enc--;
if (ba0 && ! bb0 && ba1 && bb1)enc++;
if (ba0 && bb0 && ! ba1 && bb1)enc++;
```

4 航空仪表仿真程序模块

4.1 航空仪表仿真程序流程

仿真航空仪表程序模块接收来自仿真仪表面板硬件 USB 虚拟串口数据,接收飞行仿真程序发送的以太网 UDP 协议数据包。仿真流程如图 8 所示。

通过对数据包的解析,将指示灯信号编码通过 USB 虚拟串口发送给仿真仪表面板硬件;通过对主机发送数据包的解析,并根据刻度盘的非线性区域,进行多点校准和数学插值^[13],计算出各仪表指针、旋转表盘的旋转或偏移量,使用 GLFW 进行仪表实时绘制。

4.2 基于 GLFW 航空仪表图形仿真方法

GLFW 是配合 OpenGL 使用的轻量级开源工具程序

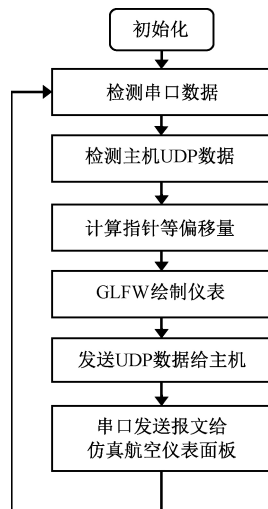


图 8 航空仪表仿真程序流程

库。GLFW 的主要功能是创建并管理窗口和 OpenGL 上下文,同时还提供了处理手柄、键盘、鼠标输入的功能。

航空仪表图形仿真实现本质上是对一组图片或图形元素(直线、矩形、椭圆、多边形)进行位移或旋转,在需要的位置输出适当的文字。图 9(a)所示为分解后的转弯测滑仪的图形元素,包括直接输出的仪表背景,动态指示的仪表变化图形元素(小飞机、测滑小球、警告旗等)^[14]。

使用 GLFW 绘制仪表,首先完成 GLFW 的初始化,创立窗体、调入全部仪表图形资源文件、建立显示投影和模型投影,设置图形的 ALPHA 测试,将不需要显示的部分透明化处理,开启深度测试,根据遮挡关系分层绘制仪表动态指示部件,生成最终仿真仪表。

转弯测滑仪根据获得的侧滑率,设定测滑小球相对于其自身零点的位置偏移量并显示;根据获得的转弯率,设定小飞机图形的旋转角度,最终生成转弯测滑仪。图 9(b)所示为最终效果。

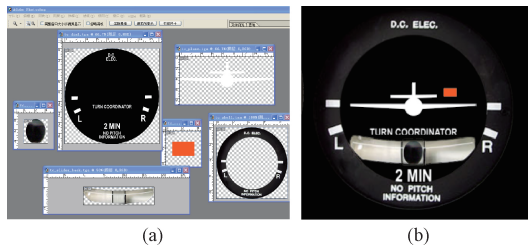


图 9 转弯测滑仪图形资源和最终效果

4.3 通信报文的定义

航空仪表面板硬件与航空仪表仿真程序使用 USB 虚拟串口通信,工作在 115 200 波特率。串口的误码通常与外部线路干扰和单片机 UART 响应速度不足有关^[15]。考虑到 USB 连线距离短,USB 传输线有屏蔽层和磁环,受干扰产生误码的概率很低;ATMEGA2560 最高工作波特率

高于 115 200;航空仪表仿真系统单片机固件程序在初始时,发送全部状态数据,以后每次将检测数据与上一次状态数据进行比较,在数据变化时或上位机要求时,发送状态变化的数据的报文,减小数据通信量。设计一种基于 ASCII 码的明文报文通信机制。在收发程序中对报文头字母 ASCII 码检测,再检测其后的数字 ASCII,按相同错误概率计算,如果每次都有均匀分布错码发生。报文采用 2 个字节时,误码率概率:

$$P=1/256\times 10/256=1.5\times 10^{-4}$$

报文采用 3 个字节时,其误码率概率:

$$P=1/256\times 10/256\times 10/256=5.9\times 10^{-7}$$

对于线路工作稳定,仅状态变化时传送数据的通信方式,其通信误码率极低,对飞行模拟程序无明显负面影响。

航空仪表仿真程序发送给航空仪表面板硬件的报文为 G+N0 或 G+N0+N1。其中,G 为报文字头,l 字节;当 G=‘L’或 G=‘l’时,代表指示灯,N0、N1 是指示灯编号。G=‘L’表示点亮,G=‘l’表示关闭。如 L9l1l1l2 表示点亮 9 号指示灯,关闭 11 号、12 号指示灯。

航空仪表面板硬件发送给航空仪表仿真程序的报文为 G+N0 或 G+N0+N1。其中,G 为报文字头,l 字节;当 G=‘S’或 G=‘s’时,代表开关,N0、N1 是开关编号。G=‘S’表示开关接通,G=‘s’表示开关断开。当 G=‘E’或 G=‘e’时,代表编码器,N0、N1 是编码器编号。G=‘E’表示编码器顺时针转动 1 格,G=‘e’表示编码器逆时针转动 1 格。如 S0s1s2S3 代码 0 号开关接通,1 号、2 号开关断开、3 号开关接通。如 E11E11E11E11E11 代表 11 号编码器顺时针转动 5 格。

5 仿真实验与验证

在直升机飞行训练器中,安装这种仿真航空仪表系统。仿真航空仪表系统能进行数据交换,对航空仪表外观、仪表显示和人的操作均进行模拟。仿真航空仪表的外观、指示和操作响应与机载航空仪表接近,达到设计要求,提高了航空仪表仿真系统集成度,改进仿真逼真度,降低了研制成本。图 10 所示为仿真航空仪表实物图。实验测试中飞行仪表仿真程序与飞行仿真程序进行数据信息交换,并正确绘制航空仪表,飞行员能像使用真实直升机一样,直观获取直升机状态信息。飞行员也能像使用真实直升机一样,用手旋转水平状态指示仪 HSI 的航向旋钮和航道杆调节旋钮,调节 HSI 仪表的航向游标显示位置和航道杆方向。通过手动旋转气压高度表的机场大气压力设定旋钮,调节气压高度表的气压窗口数字设定和气压高度指示。

实验数据如表 1 和 2 所示。实验中仪表显示空速、发动机转速、旋翼转速等均与教员控制台显示数值一致。仿真航空仪表系统其延迟时间由仪表仿真程序更新时间和液晶显示器刷新率构成。飞行训练器传送延迟是从飞行员操



图 10 仿真航空仪表实物照片

纵驾驶杆、舵,通过接口输入到飞行仿真程序,再由仿真仪表显示总时间。仿真仪表仪表在整个环节中占时较少,满足民航 CCAR-60 部中飞行训练器传输延迟应<300 ms 的要求。仪表显示误差取决于仪表刻度校准值、指针旋转中心与表盘中心同心度和飞行仿真计算精度,通过校准能满足仪表设计要求。

表 1 航向游标测试记录

序号	HSI 航向 旋钮	HSI 航向 游标理论 输出/(°)	HSI 航向 游标实际 输出/(°)	误差/ (°)	延时/ ms
1	+1	+1	+1	0	31
2	+170	+170	+169	1	35
3	-1	-1	-1	0	33
4	-170	-170	-171	1	36

表 2 空速表测试记录

序号	空速表/ 海里	理论输出/ 海里	实际输出/ 海里	误差/ 海里	延时/ ms
1	0	0	0	0	27
2	45	45	46	1	29
3	90	90	90	0	26
4	120	120	120	0	30

实验结果表明,本文提出的航空仪表仿真系统实现了对航空仪表外观、仪表指示和操作方式的仿真,满足飞行员通过仪表获取飞行信息的需要,实现了与飞行仿真程序的交互。

6 结 论

仿真航空仪表是飞行模拟驾驶舱的重要组成部分,本文基于 AVR 单片机设计了航空仪表仿真系统,通过对机载航空仪表面板和仪表的测量,构建三维数模和数控加工,实现了仪表面板外观的仿真;采用 AVR 单片机实现了对指示灯的驱动、开关和编码器的检测;通过 USB 虚拟串口采用 ASCII 码报文,实现了仪表面板与仿真仪表程序的通信;运用 GLFW 库对虚拟仪表窗口的初始化,仪表图形资

源的装载和分层实时显示。这种航空仪表仿真仿真系统实现了对航空仪表外观、仪表指示和操作方式的仿真,满足飞行员通过仪表获取飞行信息的需要,实现了与飞行仿真主程序的交互。经直升机飞行训练器装机实验表明,系统结构简单、可靠性高、研制成本低,系统实时性能符合民航 CCAR-60 部中飞行训练器传输延迟 $<300\text{ ms}$ 的要求,仪表误差取决于仪表刻度校准值、指针旋转中心与表盘中心同心度和飞行仿真计算精度,仪表人工操作功能完整^[16]。仿真航空仪表系统能满足飞行模拟驾驶舱需求,达到设计要求,对研制飞行模拟机和飞行训练器等飞行模拟训练设备具有重要的意义。

本文航空仪表仿真方法中仪表绘制采用对仪表位图资源进行操作的方法,仿真对象也是传统机械式航空仪表。未来使用矢量图形的仪表绘制方法,可进行综合航电仿真研究^[17]。

参考文献

- [1] 刘鲁峰.基于 GL Studio 的虚拟仪表的仿真研究[J].甘肃科学学报,2015,27(2):15-18.
- [2] 李洋,张燕平.VAPS XT 在直升机机载显控软件应用研究[J].军民两用技术与产品,2017(4):53-54.
- [3] 康金兰,林万洪.基于 WEB 的航天模拟训练用虚拟仪表仿真设计与实现[J].航天医学与医学工程,2017,30(6):444-448.
- [4] 方卫宁,王鹏.车载仪表仿真的形态逼真度研究[J].北京交通大学学报,2014,38(4):7-13,19.
- [5] 袁利毫,韩端锋,迟迎,等.深水铺管起重船驾驶模拟系统设计与实现[J].船舶工程,2013,35(1):81-84.
- [6] 李辉,张建伟,游健.空地协同分布交互仿真[J].计算机应用,2001(11):3-6.
- [7] 金晓明,丁浩,茅坪.飞行仿真中虚拟航空仪表生成技

术[J].航空电子技术,1999(2):41-44.

- [8] 陆振宇,朱日宏,肖冬荣.光学超精密仪器隔振系统的鲁棒 H_{∞} 控制系统仿真分析[J].仪器仪表学报,2006,27(S1):458-460.
- [9] 牛犇,朱文章,沈汉鑫,等.基于 ATmega2560 的多传感器红外遥控智能 LED 控制器[J].照明工程学报,2015,26(5):37-41.
- [10] 张鹏,刘博,段照斌.新型民航客机虚拟综合显示系统设计[J].电光与控制,2017,24(6):69-73,78.
- [11] 陈怀民,吴锦雯,黄晓波.基于 GL Studio 的飞行仿真虚拟仪表软件设计与实现[J].测控技术,2013,32(5):89-91,95.
- [12] 高颖,邵亚楠,郑涛,等.GL Studio 在飞行座舱模拟器中的仿真研究[J].弹箭与制导学报,2008,28(1):257-260.
- [13] 郑永军,杨春园,王书茂,等.汽车虚拟仪表实验系统设计[J].仪器仪表学报,2007,28(S1):315-318.
- [14] 袁梅,白刚,陈昊.虚拟多功能显示系统设计[J].系统仿真学报,2006,18(6):1578-1581.
- [15] 包贵浩,苏东林,戴飞,等.飞机油量表电磁兼容半实物仿真预测平台设计[J].电子测量与仪器学报,2014,28(2):152-158.
- [16] 罗钧,夏绪伟,卢艳,等.基于图像处理的模拟指针表刻度自动对准[J].仪器仪表学报,2004,25(S2):425-427,435.
- [17] 赵明.通用飞机综合航电技术发展综述[J].电讯技术,2014,54(3):374-378.

作者简介

陈又军,硕士、高级工程师,主要研究方向为飞行模拟机与飞行仿真。

E-mail:cafuccyj@163.com