

嵌入式 Linux 环境下飞机稳定性 惯导控制系统设计^{*}

陆兴华

(广东工业大学华立学院 广州 511325)

摘要:飞机稳定性惯导控制系统是保障飞行稳定控制的关键部件,在采用波束域加权谱峰搜索的飞机控制算法设计的基础上,设计基于嵌入式 Linux 环境的飞机稳定性惯导控制系统。在嵌入式 Linux 环境下进行控制系统的开发,采用航向陀螺仪等采集设备,进行航向参量等控制信息采集,将采集的数据输入到 Linux 操作系统中进行程序加载控制。系统的功能分为 3 大模块:用户界面模块、数据处理模块、可视化模块。开发 Linux 设备驱动程序,编译内核系统,完成控制信号的采集,数据的存储与管理和人机交互。系统调试和仿真结果表明,该系统具有较好的人机交互性和控制稳定性,提高了飞机的稳定性惯导控制能力。

关键词:嵌入式 Linux 环境;飞机;惯导;控制系统

中图分类号: TN911 TP276 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 52060

Stability control aircraft inertial navigation system design in embedded Linux environment

Lu Xinghua

(Huali College Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

Abstract: The stability of the aircraft inertial navigation control system is a key component to ensure flight stability control, the use of the beam in the weighted domain spectral peak search aircraft control algorithm design based on the design based on aircraft stability control inertial navigation systems embedded Linux environment. Control information collection is used for the collected data in the embedded Linux development environment control system, using directional gyro and other capture devices, and other input parameters were heading to the Linux operating system program loading control. Function module is divided into three modules: a user interface module, data processing module, visualization module. Linux device driver development, kernel compilation system, completes the acquisition of the control signal, data storage and management, and human-computer interaction. System debugging and simulation results show that the system has good human-computer interaction and control stability, improve the stability of the aircraft inertial navigation control.

Keywords: embedded Linux environment; aircraft; INS; control system

1 引言

随着制导控制技术的不断发展,对飞机惯导控制的品质和稳定性要求不断提高,飞机惯导的稳定性控制是保障飞机稳定安全飞行的关键,惯导控制是建立在对飞行姿态数据的采集和自适应处理的基础上,通过前期的飞行控制

算法的设计和研究,结合 VXI 总线的数据采集系统进行飞行姿态的自适应控制。飞机惯导控制设计的核心在 3 大部分,分别是飞行惯导控制算法、惯导控制系统的硬件电路设计和软件设计。其中,硬件是基础,软件是核心,软件设计部分是实现控制算法程序加载和系统应用程序开发的关键,数字信号处理系统的功能都是通过软件的设计

收稿日期:2016-05

^{*} 基金项目:2015 年广东省教育厅重点平台及科研项目青年创新人才类项目(自然科学类,2015KQNCX218)、2012 广东省质量工程项目“机电综合技能实训中心”(粤教高函[2012]204 号)、2012 广东省质量工程项目“独立学院电子信息人才培养创新实验区”(粤教高函[2012]204 号)、2013 年广东省高等学校专业综合改革试点项目“电气工程及其自动化”(粤财教[2013]329 号)资助

实现的,研究飞机稳定性惯导控制系统的软件设计在完善飞机控制系统的设计中具有重要意义^[1]。

在前期的控制算法优化设计的基础上,进行飞机稳定性惯导控制的软件设计,飞机稳定性控制算法采用波束域加权谱峰搜索的无人机控制算法^[2],控制系统的信号与信息处理芯片选择了 ADI 公司的 ADSP-BF537,在此基础上,结合嵌入式 Linux 环境进行控制系统的软件开发,传统方法中,对飞机惯导控制系统的软件开发主要有基于 ARM 嵌入式平台开发的飞机稳定性惯导控制系统、基于 Visual DSP++4.5 程序控制分飞机惯导控制系统等,取得了一定的研究成果,其中,David C 采用 H_{∞} 鲁棒控制方法进行了姿控系统定点控制器的设计^[3],利用计算机辅助视觉系统进行飞行姿态控制和参量调整,抑制干扰和补偿未建模动态失真,但该控制方法在进行远程控制信号加载中容易产生过载和误差,控制性能不好^[4]。文献[5]在 Linux 内核下构建用户应用程序(application),结合 MVB 总线控制模型进行无人机飞行控制设计,提高了飞行姿态的稳定性输出性能,但该系统在 PCI 桥接芯片与上位机通信中容易产生误码输出,导致控制性能不好^[6]。针对上述问题,本文提出一种嵌入式 Linux 环境的飞机稳定性惯导控制系统设计方法,首先进行了嵌入式 Linux 环境下的飞机稳定性飞行的姿态数据采集和数据处理,在信号接收模块中将采集的飞行姿态数据进行采样,存储到内存中,并完成波形显示存储等功能。系统软件是整个系统的控制中心,完成控制信号的采集,数据的存储与管理,波形的显示,对控制按键的响应等都要由软件来实现。软件系统模块分为操作系统和应用程序两部分,通过系统优化设计和软件调试,进行了性能测试,得出有效性结论。

2 飞机稳定性惯导控制系统总体设计和 Linux 开发环境描述

2.1 飞机稳定性惯导控制系统总体设计

首先分析飞机稳定性惯导控制系统总体设计并进行功能模块分析和介绍,飞机稳定性惯导控制系统建立在通用计算机平台上,控制系统可以在不同的操作系统上进行飞行姿态数据采集和信息处理,飞机稳定性控制系统可以安装 windows 系统,也可以安装 Linux 系统。为了提高控制系统的稳健性,在嵌入式 Linux 环境下进行控制系统的开发, Linux 操作系统就可以通过移植,运行在 ARM, PowerPC^[7]。本文介绍的飞机稳定性惯导控制系统设计建立在 Linux 环境中,主要是进行软件开发设计,采用模块化编程设计方法,飞机稳定性惯导控制系统的总体设计。首先进行飞机稳定性惯导控制的数据信息采集,采用航向陀螺仪和加速度计等采集设备,进行加速度、横滚信息、航向参量等控制信息采集,将采集的数据输入到 Linux 操作系统中进行程序加载控制,通过误差反馈补偿进行控制信息,结合 AD 采样数据进行 ARM 平台上的控

制信息编译和数据存储^[8],得到飞机稳定性惯导控制系统的总体设计结构如图 1 所示。

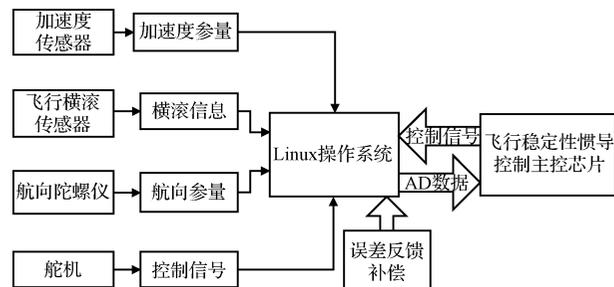


图 1 飞机稳定性惯导控制系统的总体设计结构

飞机稳定性惯导控制信号加载到 Linux 内核中, Linux 是一个类似于 Unix 的操作系统,利用虚拟文件系统 VFS 将驱动程序嵌入内核,飞机稳定性惯导控制系统的功能分为 3 大模块:用户界面模块、数据处理模块、可视化模块。用户界面模块主要有模块的注册,自动配置、初始化设备参数,中断服务程序和信号发射 4 个步骤^[9]。数据处理模块给出激发信号,设备驱动程序开发过程中在 dev 目录下建立目录 filesystem,所以每个数据对应的时间已经确定,在该目录下将 linuxrc 文件拷贝到 filesystem, /etc 目录下保存基本的用户命令工具,飞机控制的特征数据信号经信号调理、采集后,以波形的方式显示出来^[10]。根据上述飞机稳定性惯导控制系统总体设计描述,进行控制系统的模块化设计,飞机稳定性惯导系统的功能实现流程如图 2 所示。

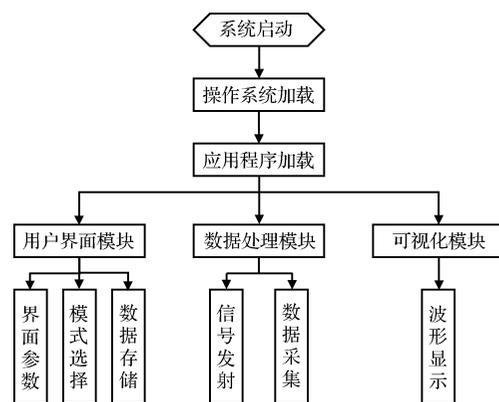


图 2 控制系统的功能实现流程

2.2 Linux 开发环境描述及基础知识

在进行飞机稳定性惯导控制系统设计的基础上,采用嵌入式 Linux 技术进行系统的软件开发,在此,需要构建嵌入式 Linux 的开发环境,在采用波束域加权谱峰搜索的飞机控制算法设计的基础上,进行飞机稳定性惯导控制系统应用程序开发,采用的交叉编译以及使用 isualDSP++集成 GCC 编译的方式构建飞机稳定性惯导控制系统应用程序开发环境,在编辑、编译和调试之间相互切换指令流水查看器,运行 make 命令,开始编译嵌入式 Linux 环境下的专家连接器 VCSE,飞机稳定性惯导控制系统的工程管

理应用程序将 QWS 的 LIB 库放入 rootfs 的 /lib 下,编辑器能够自动识别 DOS 命令进行飞机的稳态控制,文件的编译链接过程描述如图 3 所示。

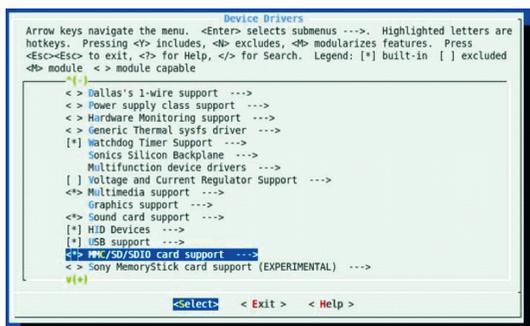


图 3 文件编辑过程

根文件系统是 UNIX 类操作系统的核心组成部分,在应用程序开发过程中,Linux 的文件系统是一个整体,在软件系统中使用的 FFT 函数,作为在顶端下衍生出树的枝干目录进行人机通信,使用 JTAG 板(一般借助 H-JTAG 软件)把用户程序及库目录直接烧写入 Nor Flash。做完移植工作后就是进行内核配置,首先 Make menuconfig 进行内核的配置。执行“Make menuconfig”后,出现配置内核界面,在虚拟文件系统中负责管理和存储文件信息,从而引导加载程序(Boot loader),实现整个操作系统的功能,得到配置内核程序代码为:

```
interface Scheduler {
    The state of export KBUILD_BUILDHOST running
    the export KBUILD init();
    command NesC SUBARCH component Linux-2.6.
    32.2 (bool sleep); // 调用指定交叉编译器 Task(TRUE)
    command void ARCH ? = arm; // 使用 mach-mini-
    i2440 接口
}
```

在对把编译器的全路径写入过程中,运行的任务通过 TaskBasic 的接口声明 runNextTask() 的状态。当飞机稳定性惯导控制系统的一个组件使用 post 关键字 mach-mini2440.c 中把其中的 16934400 交叉编译器统一为 GCC,嵌入式应用二进制接口描述可连接目标代码,库目标代码,可执行文件影像。并发控制信号通知高层次的主动消息组件(active message)进行飞行姿态的稳定性调整和误差反馈修正,将安装完成的编译器路径加入环境变量,进入 root 权限下调用 unique 函数获得下一个任务的 ID,编译连接工具实现无线消息包组的传输,在上述构建的 Linux 开发环境中进行程序开发设计。

3 系统开发优化设计与实现

3.1 飞机稳定性惯导控制系统的功能模块化开发设计

在上述构建的 Linux 开发环境中,通过信号接收模块

中将采集的飞行姿态数据进行采样,用 DOS 命令进行操作,通过对话框和选单的形式来提供飞机稳定性惯导控制的入口参数,存储到内存中,并完成波形显示存储等功能。根据上述程序开发和设计思路,进行程序加载的 Boot-Loader 开发,BootLoader 是系统上电后最先执行的程序,它的主要作用是设置内核启动参数,对 Linux 系统的启动时钟、特征信号波形存储器、人机通信的串口、网口等硬件进行初始化,本文系统设计中,选用 SuperViVi 作为 Boot-Loader,在嵌入式 Linux 系统的启动过程中,使用 Qt/Embedded 作为 GUI,Linux 内核设计了图形中间件,需要加载安装根文件系统,并执行 init 进程。在进程管理、内存管理、文件系统中,通过 Linux 的根文件系统创建、终止进程间的通信,包含内核所需的文件和可执行文件。建立在 Flash 设备上的文件系统可以完成控制信号的采集,数据的存储与管理,波形的显示,并 Linux 内核源码目录的 kernel 中保存设置的参数和特征信号波形数据。配置完成后,分别运行目录下有 6 个必备的文件夹 /etc./lib./dev./usr./var 和 /proc 进行编译和安装,运行过程描述为:

```
Busybox Settings --->
Installation Options --->
[*] Don't Mkyaffsimag /electrical control system
Using embedded Linux kernel (as soft-links) --->
(/home/Documents/nfs) Busy smart sensor motor
system Installation prefix
Busybox Library Tuning --->
[*] Support for / networking environment /networks
[*] vi-style output matching performance commands
[*] Tab embedded completion
[*] Username acoustic intelligent sensor
[*] Fancy shell prompts
Shells --->
--- Ash Shell Options // 利用 mkyaffsimage 工具
[*] Check for tar jxvf busybox on interactive shells
[*] Lash (Tab completion to hush)
```

在 /etc 目录下保存了系统启动的脚本和服务器配置文件,编辑 init.d 目录下的 rcS 文件,生成了一个 rootfs.yaffs 文件,这就是整个系统的控制中心的根文件系统,命令执行完毕,对控制按键的响应等都要由软件来实现。

在上述进行程序加载的基础上,设计飞机惯导稳定性控制的 Linux 设备驱动程序,设备驱动程序是 Linux 内核中的一部分,是整个系统的控制中心,设备驱动程序是应用程序和实际设备之间的一个接口,并控制硬件设备。系统模块分为操作系统和应用程序两部分,作为 Linux 内核的重要组成部分,在进行 Linux 嵌入式环境下的飞机稳定性惯导驱动控制中,首先设定 PLL_LOCKCNT 寄存器,对块设备进行读/写操作,接着设定 SIC_IWR 寄存器,到达 PLL_LOCKCNT 设定的周期后,调用请求函数来进行实际的 I/O 操作,将外设中断映射到内核中断上,配置

SIC_IMASK 寄存器,使能 CAN 接收中断,通过 read(), write()等系统调用去访问飞机控制的塔台设备,飞机惯导稳定性控制的 Linux 设备驱动模块如图 4 所示。

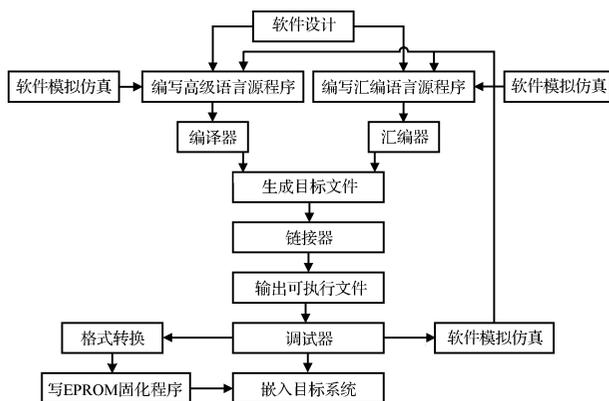


图 4 飞机稳定性惯导控制系统的 Linux 设备驱动模块

程序开始后首先进行初始化,包括:硬件 I/O 的时钟频率初始化、字符设备的存储器初始化、飞机惯导控制的中断初始化、同步串口通信初始化、驱动模块初始化、PPI 和 DMA0 初始化。初始化完成后,在静态编译方式下,编译内核系统,控制系统进入了稳定状态。通过利用 rmmod 命令卸载驱动模块,不断将驱动程序编译链接进内核中,查询中断标志位判断加载到内核中的 A/D 采样数据,根据缓冲池中的数据结构进行循环堆栈控制,判断缓冲区是否已满,如果已满,则读取 file_operations 中相应的函数指针,检测到脉冲峰值后,将峰值对应地址发送给飞机控制指令,利用虚拟文件系统 VFS 将数据指针指向已满缓冲区,判断 A/D 采样是否完成,如此周而复始,进行程序加载和 Linux 设备驱动。

3.2 飞机稳定性惯导控制软件开发的实现

在上述进行了模块化设计的基础上,在 Linux 内核基础上进行飞机稳定性惯导控制软件开发,按照模块方式实现软件开发,主要实现步骤描述如下:

1) 自动配置和初始化设备参数,对该设备及相关的驱动程序进行必要的初始化,初始化参数填入 file_operations 结构相应的位置中,驱动程序加载到 Linux 内核中,根据文件系统的入口点函数进行驱动程序申请和中断控制。

2) 在 Linux 系统中,进行模块的注册及注销。模块化编程主要需要 module_init() 和 module_exit() 两个函数,负责从内核中注销模块所提供的各种功能,调用与其相对应的内核函数完成注销,设置飞机控制的脉冲宽度和定时器,分别对 s3c2440_pwm_open, s3c2440_pwm_close 和 s3c2440_pwm_ioctl 3 个函数进行编程,完成了 PWM 驱动程序。过程描述如图 5 所示。

3) 嵌入式图形用户界面设计。在的 C++ 工具开发包下结合 Qt /Embedded 进行飞机惯导控制的显示模块设计,建立一个脚本,用来配置 qt-embedded-arm,编译链

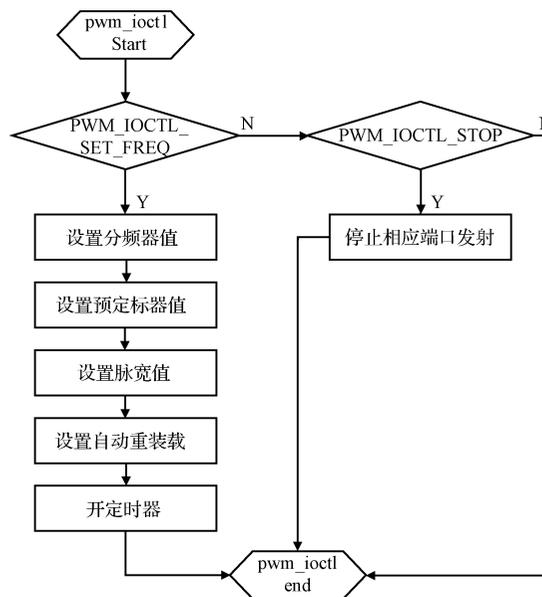


图 5 pwm_ioctl 控制程序流程

接生成可运行于目标平台的可执行文件,首先需要选择测量模式,根据所选模式及其参数,计算出特征波形显示界面中时间轴的最佳显示比例。为便于用户保存测量结果,本系统设计了波形数据存储界面,点击存储键存储完毕后,系统会返回特征波形显示界面,继续相应的工作。波形数据存储人机交互界面如图 6 所示。由图可见,该系统的人机交互性能较好。



图 6 飞机惯导控制系统的波形数据存储人机交互界面

4 系统调试和仿真测试分析

为了测试本文开发的嵌入式 Linux 环境下飞机稳定性惯导控制系统在实现飞行稳定性控制中的应用性能,进行系统调试和仿真实验分析,实验中首先进行软件调试,调试过程使用的仪器仪表为:XFR_TYP3220A 函数信号发生器和 PERIPHERA PST3202 可编程电源,配置 PPI 的操作模式,XFR_TYPE 设为 11,读取 CAN_STATUS 寄存器,判断 CAN 配置是否正确完成,生成 Qt/Embedded for ARM 的开发编译环境所需要的飞机稳定性控制的编译文件,配置 qt-embedded-arm,当遇到授权信息时,输入 yes 即可。安装完成后,进行控制系统的输出稳定性

测试,仿真测试中,对采集的飞机飞行状态测量的特征波形进行如下操作:

Save:暂存当前波形,以便于飞行航向控制和航向偏差比较。

Show/Hide:用于较高的采样精度的控制输出波形显示或隐藏暂存波形。

Stop/Restart:停止或重新启动动态波形显示。

Store:进入波形数据存储界面,进行控制波束的调理和自适应加权分析。

Back:返回模式选择及参数设置界面。

根据上述仿真环境和参数设定,进行飞行稳定性控制仿真,以航向偏差为测试指标,得到仿真结果如图7所示。从图可见,采用本文控制方法进行飞机稳定性惯导控制,航向误差在较短的实践收敛到零,性能较好,展示了本文设计系统的有效性和稳定性。

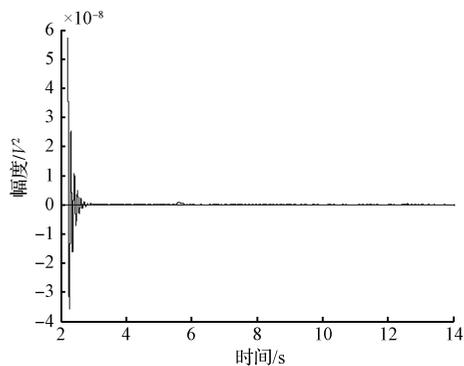


图7 飞机稳定性控制测试

进一步,为了定量对比算法性能,采用本文方法和传统的自适应EKF姿态控制算法、 H_∞ 鲁棒控制方法进行比较,以计算时间为测试指标,得到仿真结果如表1所示。

表1 不同算法计算时间比较

方法	飞行航向控制所用时间/s
自适应EKF姿态控制算法	1.324
H_∞ 鲁棒控制方法	1.423
本文控制方法	0.382

根据表1中结果可见,采用本文控制系统能有效降低飞机稳定性惯导控制的计算时间,从而提高飞行稳定性控制的实时性。采用本文算法,以飞机飞行的横滚角、俯仰角、航向角的误差修正的仿真结果为测试指标,得到结果如表2所示。分析表中结果可见,采用本文方法进行飞机稳定性惯导控制,对横滚角、俯仰角、航向角的误差修正能力最好,误差均方差的收敛到最小,说明本文方法进行飞机稳定性控制的精度最高,性能较好,展示了本文方法的优越性能。

5 结论

飞机惯导的稳定性控制是保障飞机稳定安全飞行的关键,飞机的稳定性惯导控制是建立在对飞行姿态数据的采集和自适应处理的基础上,提出一种嵌入式Linux环境的飞机稳定性惯导控制系统设计方法,进行飞机稳定性惯导控制系统总体设计分析,构建Linux开发环境,进行飞机

表2 不同控制方法对飞机姿态角控制的误差修正结果统计

	自适应EKF姿态控制			H_∞ 鲁棒控制			本文控制方法		
	最大值	平均值	均方差	最大值	平均值	均方差	最大值	平均值	均方差
横滚角	0.234	-0.432	0.533 3	0.445 5	0.023 2	0.043 3	0.022 2	0.051 3	0.019 6
俯仰角	0.345 5	0.535 2	0.422 1	0.226 2	0.032 4	0.253 1	0.221 2	-0.083 1	0.016 5
航向角	3.432 3	1.323 1	0.567 0	2.325 5	1.234 0	0.936 2	2.227 3	0.142 2	0.043 3

稳定性惯导控制系统的功能模块化开发。系统调试和仿真结果表明,本文设计的飞机惯导控制系统具有较好的人机交互性和控制稳定性。

参考文献

- [1] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(6): 3309-3322.
- [2] PATCHARAMANEPAKRON P, ARMOUR S,

DOUFEXI A. Coordinated beamforming schemes based on modified signal-to-leakage-plus-noise ratio precoding designs[J]. IET Communications, 2015, 9(4): 558-567.

- [3] KALEVA J, TOLLI A, JUNTTI M. Weighted sum rate maximization for interfering broadcast channel via successive convex approximation[C]. IEEE Global Communications Conference, Anaheim, 2012: 3838-3843.
- [4] LIU H, DING Z G, FAN P Z, et al. Precoding design for interference suppression in multi-cell multi-user networks [J]. IET Communications, 2014,

- 8(9): 1534-1540.
- [5] RATHEESH M, DAVID M J. System-level performance of interference alignment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 1060-1070.
- [6] 张冀,徐科军. 自动生成转速参考曲线的电动执行器定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(11): 1222-1234.
- [7] 安慰宁,张福民,吴翰钟,等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(11):2458-2465.
- [8] 吕富勇,周瑞卿,阮世阳,等. 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析[J]. 电子测量技术,2015, 38(8):13-16.
- [9] 郭长欢,黄建. 基于 RT-LAB 的无刷直流电动机伺服系统半实物仿真[J]. 国外电子测量技术,2015, 34(10):22-27.
- [10] 刘恒,李生刚,孙业国,等. 带有未知非对称控制增益的不确定分数阶混沌系统自适应模糊同步控制[J]. 物理学报,2015, 64(7): 070503.

作者简介

陆兴华,2006年于西安交通大学获得学士学位,2015年于广东工业大学获得硕士学位,现为广东工业大学华立学院讲师,主要研究方向:计算机控制算法、图形图像。
E-mail:lxhxjtu1@126.com

罗德与施瓦茨公司推出新的多路摄像机采集控制软件

罗德与施瓦茨公司针对 R&S VENICE 采集和播出平台推出了全新的 R&S VENICE Control 软件,此控制软件是针对多路摄像机采集控制的需求而设计的,最大可支持将 16 路独立的摄像机信号采集为广电行业常见格式的文件。这是目前行业中在单个系统支持最大通道数是首屈一指的。灵活的客户端服务端架构能够既支持单通道采集,也可以支持多通道采集。

对于单个通道耗时的手工设置已经成为过去,所有采集的设置可以被保存,然后可以再次导入到单个通道或者通道组上。甚至对于重复的采集任务,例如每周定时采集任务,也能够被更快速的完成。自动的文件或文件夹命名机制是另一个节省时间的功能,VENICE Control 能够在通配符的

基础上自动生成文件名和目录结构,用户仅需要创建一些参数,例如日期时间、服务器名、通道数,这些参数会被自动的填充需要的值。

R&S VENICE Control 是客户端—服务端架构,它能够提供高可靠的完全备份和免中断操作,它增强了 R&S VENICE 采集和播出平台的高效工作流程。R&S VENICE 可以执行传统视频服务器的任务,例如采集、演播室播出和频道播出,也可以执行基于文件的任务,例如文件的导入和导出、转码、基于规则的文件管理。R&S VENICE 是被设计来满足来自在线制作、内容生产和发布领域的具有挑战性的需求。

罗德与施瓦茨公司的 R&S VENICE Control 软件会在 2016 年 10 月初正式发布。