

〈系统与amp;设计〉

## 小型便携式步进凝视IRST的转台控制系统软件设计

瞿祖鑫, 田桂平, 陈洁

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650023)

**摘要:** 构建了一种以国产的MM32F031为控制芯片的小型便携式步进凝视型IRST的转台控制系统。主要进行了控制转台进行步进运动的软件设计。为了实现转台步进运动的精确控制,对运动控制功能实现进行分析。结合软件设计方式与数据通讯方式,对软件进行设计并设计了配套的上位机软件。进行测试后该软件符合系统需求。

**关键词:** MM32; 转台电机; 控制系统; 软件设计; 国产化

**中图分类号:** TP732.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2021)04-0385-06

## Software Design for Turntable Control System of Small Portable Step Gaze Infrared Search and Track System

QU Zuxin, TIAN Guiping, CHEN Jie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650023, China)

**Abstract:** A turntable motor control system was constructed using domestic MM32F031 as the control chip. The software design for controlling movement was mainly carried out. To realize the different motion modes of the turntable, the motion control function was analyzed. Combined with the software design mode and data communication mode, the software was designed, and the supporting upper computer software was designed. After testing, the software met the system requirements.

**Key words:** MM32, turntable motor, control system, communication protocol, localization

### 0 引言

红外搜索跟踪系统IRST(infrared search and track system)通常采用全景成像方式,该方式是指利用全景技术获得水平和垂直方向均大于180°的半球视场或者水平方向上全360°,在垂直方向上一定角度的视场<sup>[1]</sup>。全景成像系统分为两类:使用全景镜头的和使用常规光学镜头的。使用常规光学镜头的全景成像系统主要通过旋转拼接和折反射来实现全景成像。IRST通常采用旋转拼接式,采用一个或多个镜头,绕着与光轴垂直的固定轴旋转<sup>[2]</sup>,将所得图像进行拼接,从而获得全景图像。

当前主流的IRST主要分为基于线列器件和凝视器件两类,凝视型的应用更为广泛。但凝视型器件在进行扫描时会造成图像拖尾,需对系统进行凝视补偿<sup>[3]</sup>,补偿方式主要分为摆镜补偿和步进凝视两类,

摆镜补偿成本高,控制复杂;步进凝视成本低,结构相对简单,可以实现小型便携,一般适用于车载(即在坦克或战车上对四周一定距离内进行全景成像)等应用场景,故本系统采用步进凝视型。为实现步进凝视,需要在360°范围内不停地快速启动停止,在每次停止进行凝视成像,凝视成像需要足够长的积分时间,步进时间需要足够快,这对控制的精度和响应速度提出了要求,控制精度直接影响成像质量。

以往的IRST往往使用了大量非国产器件,从焦平面阵列到芯片和电路板,往往都从国外购买。而从美国长期的技术封锁到中美贸易战导致的形势变化,将技术限制从军用领域推进到了民用领域,这导致从软件到硬件都对国产化提出了更高需求。而国产化进程中也遇到了众多问题,硬件方面加工工艺仍有较大差距,软件方面缺乏足够的生态,对现有的国产硬件的适配也不足。为实现自主可控,本文构建了一种使

收稿日期: 2021-02-01; 修订日期: 2021-04-06.

作者简介: 瞿祖鑫(1994-),男,硕士研究生,研究方向是光学工程(光电信息工程)。E-mail: yukinoyu@sina.com.

通信作者: 陈洁(1975-),女,研究员级高级工程师,主要研究方向是红外系统研发。E-mail: c\_jie2007@126.com.

用国产的 MM32F031 为控制芯片的转台电机控制系统。MM32F031 是上海灵动微电子公司推出的一款高性能、多功能、高性价比的 32 位 ARM 芯片, 针对本设计的需求, 本文详细介绍了转台控制系统的软件设计, 并针对采用非国产芯片如 STM32 的系统进行对比, 以说明本软件国产化设计的优势所在。

## 1 系统概述

本系统的研究主体是架在三脚架上的传感头主机部分, 如图 1 所示。主机前方传感头集成了长波 640 × 512 非制冷热像仪, 通过高速启停的步进扫描小型精密转塔机构做全景扫描, 形成全景图像。由于在工程实现上想要快速停止再快速启动不易实现, 因此选择控制平台进行不等速运动。扫描运动平台在系统进行凝视采样时进行低速运动来采集图像, 待图像采集完成后平台加速运动到下一个采样位置前, 然后开始减速, 减速之后采集下一幅图像, 如此周期步进, 就得到了各个视场的图像, 再进行拼接, 就可得到完整的全景图像。传感头的运动速度可近似为正弦曲线。图 2 即为步进凝视控制方法的速度曲线图。

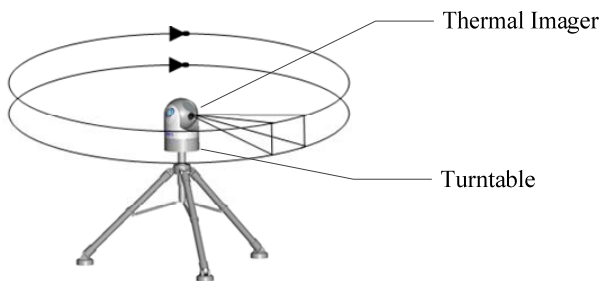


图 1 全景成像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of panoramic imaging system

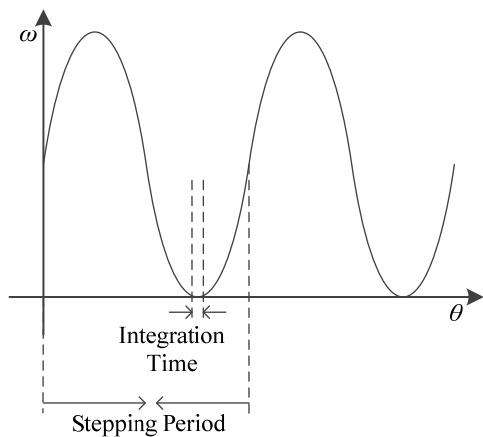


图 2 速度曲线图

Fig.2 Velocity diagram

根据对系统的分析以及系统工作方式得知, 传感头主机将要进行 ±20° 的俯仰旋转和连续 360° 的方位旋转。传感头前方的 640 × 512 非制冷长波热像仪, 已知其水平视场为 20°, 探测频率为 25 Hz。为了补偿凝视器件在快速扫描时造成的图像拖尾现象, 本系统采用的是步进运动。为了使其采集到的每幅图像能够达到拼接的要求, 传感头旋转需要达到的要求是在 360° 范围内, 有 20 个步进周期, 并且需要在 12 s 内完成周扫运动, 其转动最大角速度为 60°/s, 最大角加速度为 30°/s<sup>2</sup>。将本运动等效成正弦曲线, 则等效速度曲线为:

$$\omega_1 = 30 \sin\left(\frac{10\pi t}{3} - 0.5\pi\right) + 30 \quad (1)$$

对其取积分, 得到等效位置曲线为:

$$\theta_1 = -\frac{9}{\pi} \cos\left(\frac{5\pi t}{3} - 0.5\pi\right) + 30t \quad (2)$$

该系统一个步进周期为 600 ms, 转动范围为 20°, 凝视器件需求的积分时间约为 10 ms。取  $t_1 = 0.595$  s,  $t_2 = 0.605$  s, 求得积分时间内传感头转动角度约为 0.0001371°, 而水平方向单个像素的瞬时视场为 20°/640 = 0.031°, 积分时间内图像在探测器焦平面上移动不超过一个像素, 故可视为相对静止状态, 此时可以进行积分图像采集。虽然实际上由于控制精度有限可能无法达到如此低的角速度, 但此理论速度说明了该方案的可行性。

## 2 算法仿真

在转台控制系统中, 控制算法输出的控制量经过电机驱动放大电路以 PWM 信号的形式输入电机, 驱动转台进行运动<sup>[4]</sup>, 从而实现控制。因此, 我们的研究对象是驱动电路、电机本身和转台的负载所组成的一个系统<sup>[5]</sup>。本设计中的直流力矩电机, 其简单的驱动负载模型如图 3 所示。其中:  $U_a$  为电枢电压, V;  $\varepsilon$  为电枢反电势, V;  $I_a$  为电枢电流, A;  $L_a$  为电枢电感, H;  $R_a$  为电枢电阻, Ω;  $M$  表示电磁转矩, N·m。

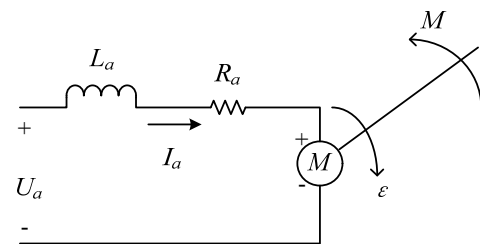


图 3 电机模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of motor model

经推导, 其传函为:

$$G_m(s) = \frac{n(s)}{u_a(s)} = \frac{1/C_e\Phi}{(T_a s + 1)(T_m s + 1)} \quad (3)$$

式中:  $\Phi$  为表示每极磁通, Wb;  $T_a = L_a/R$  为示电枢回路电磁时间常数, s;  $T_m$  为机电时间常数, s;  $C_e$  为电势常数;  $J$  为转速惯量,  $N \cdot m \cdot s \cdot \min \cdot r^{-1}$ ;

根据本系统所采用直流力矩电机的参数, 可计算出电枢回路电磁时间常数  $T_a \approx 0.00092$ <sup>[6]</sup>, 机电时间常数  $T_m \approx 0.1$ 。

采用 Simulink 对其进行经典 PID 控制仿真, 框图如图 4 所示, 将被控对象的输出与目标值的差值通过比例积分微分环节, 构成控制量, 对被控对象进行控制。

经调整, 设  $K_p = 1.355$ ,  $K_i = 26.54$ ,  $K_d = -0.004655$ , 阶跃源从 0 s 开始, 幅值为 1, 仿真结果如图 5 所示。

从图中可以看出, 响应时间为 0.06 s, 收敛时间在 0.18 s。显示经典 PID 响应速度快、稳定性好, 预计可满足本系统要求。

### 3 控制系统软件设计

控制系统软件的主要功能是实现转台的步进运动, 在转台速度不符合要求时, 根据控制指令能够自

动精准、快速地回到预订的速度进行运动, 因此, 本软件应该具有的功能主要包括以下 3 方面:

**通信功能:** 通信功能由 2 个部分组成。第一个部分是 MM32 与上位机之间的通信, 主要功能是接受上位机指令与在上位机界面对控制状态进行直观显示; 第二个是 MM32 与视频源之间的通信, 控制视频源工作。

**初始化功能:** 软件在运行前需要对各个变量与函数进行初始化, 在断电重启后也需要进行初始化。

**速度控制功能:** 运动控制功能是控制转台以近似正弦的速度曲线进行步进运动, 并在速度不符预期时调节至需求速度, 要求 600 ms 一个周期, 每个周期可用于凝视成像的时间大于 10 ms。

为满足控制系统对步进运行实现自动控制的要求, 明确控制各方面运行控制逻辑关系, 提高系统平台运行效率<sup>[6]</sup>, 对控制软件所依托的转台伺服系统进行设计, 其结构如图 6 所示。

为方便调试, 将软件进行模块化设计, 包括初始化模块、数据采集模块、运动控制模块以及通信模块<sup>[7]</sup>。各模块所需实现功能均由相应的硬件设备来与软件共同实现, 模块间的数据、指令交互通过通信协议来传输。

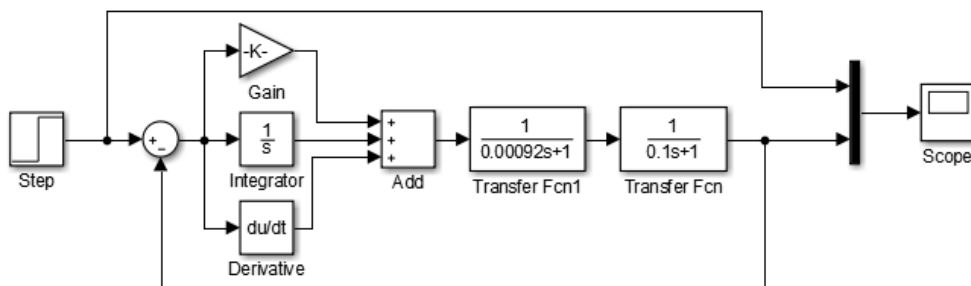


图 4 经典 PID 框图

Fig.4 Classic PID block diagram

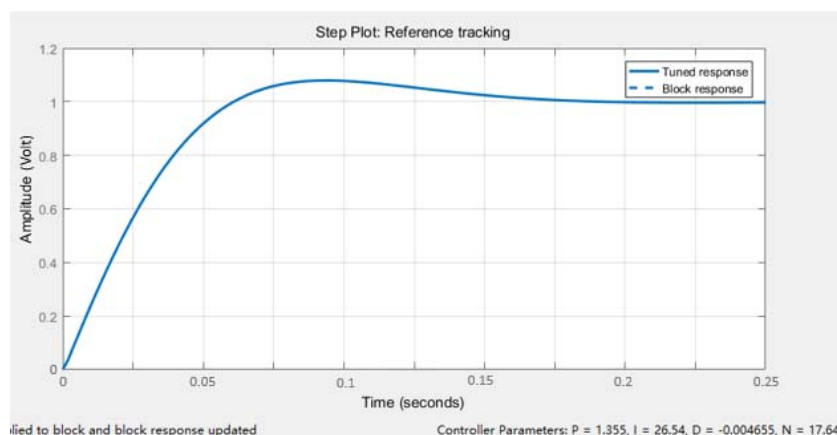


图 5 PID 仿真结果

Fig.5 PID simulation results

接口设计及模块设计均如图6所示,各模块执行优先级由中断来实现。软件通过硬件中断来执行多任务操作,每个硬件设备都有自己的中断请求(IRQ),CPU可以根据IRQ将相应的请求分发到对应的硬件驱动上。处理中断的驱动是需要运行在CPU上的,因此,当中断产生时,CPU会中断当前正在运行的任务,来处理中断。软件中断不会直接中断CPU,只有当前正在运行的任务才会产生软中断,这种中断是一种需要内核为正在运行的进程去做一些事情的请求。

本系统若采用非国产硬件进行设计,常用的有DSP、FPGA与ARM,此处选择STM32来举例说明设计时采用非国产ARM与采用国产ARM的区别。首先从硬件使用条件对比:STM32稳定,价格贵,服务周期长,安全性较差;MM32为国内厂商生产,运行速度稍强但偶尔不稳定,价格便宜,服务及时,安全性较好。其次从硬件本身对比:引脚定义相同、IO相同、内核一样;时钟不同、寄存器不同、MM32库函数更为丰富。

因此,本软件采用MM32作为主控芯片进行设计,其优势主要在于MM32有着比STM32更为丰富的库函数。实际设计中将更多功能使用库函数来实现,而不是直接对寄存器进行操作,在软件设计上提供了很多便利。本设计中采用了库函数的功能包括通道选择初始化、系统延时、外部中断初始化、寄存器串口初始化、定时器初始化等许多功能,精简了约300行代码,减小了芯片FLASH约5%的占用。此外,MM32价格比STM32便宜,也能降低成本。

#### 4 软件测试结果与分析

搭建测试平台并在平台上进行测试,将结合系统需求对运动状态进行测试。为了对转台伺服系统工作中的实际设备运行情况通过上位机进行监测和控制<sup>[8]</sup>。本系统在设计中针对上位机程序采用LabVIEW平台进行编写,实现对主控软件功能的控制<sup>[9]</sup>,并可以实时直观地看到程序运行状况<sup>[10]</sup>。前面板如图7所示,该界面图可以操作转台做相应的运动,在系统运行过程中,界面上侧的方位数据界面用来显示传感器的数据,下侧的操控按钮部分用来控制转台的运动,字符串操作用来调试串口。

将系统上电后,在上位机界面启动转台,此时上位机面板开始有数据输出,如图8所示,这表明前面板发送的指令被控制器接收执行,反馈回上位机电机的执行状态,证明反馈功能是正常的,且上位机和控制器进行了有效的串口通信,说明系统主要功能可以正常实现<sup>[11]</sup>。

方位数据采集时,每毫秒采集一次数据,进行一个完整的圆周运动需要12s,共有12000个数据点,如图9所示,12s内进行了20次步进运动,可进行20次凝视成像,满足系统需求。将采集到的方位数据导入Matlab生成图像,如图9所示,图像上毛刺很多,说明采样时受到很大干扰,系统会受到扰动影响。任意选取1个步进周期,如图10所示,接近静止时间达到10ms,满足了凝视成像的要求,符合设计需求。

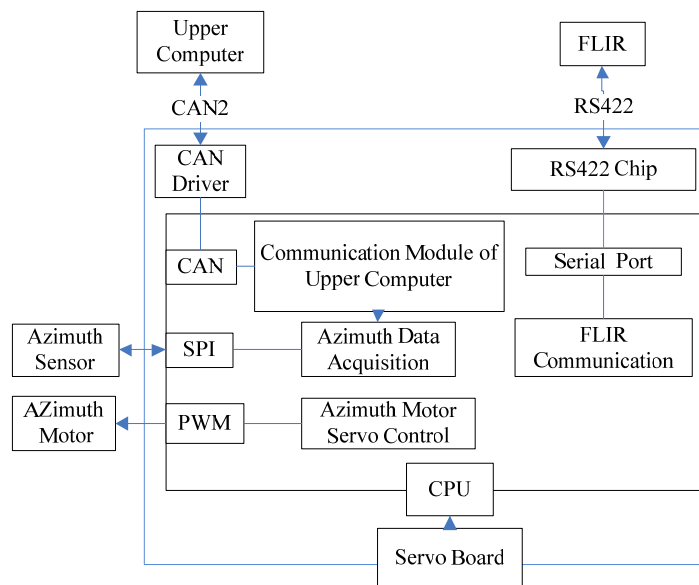


图6 转台伺服系统结构设计图

Fig.6 Turntable Servo system structure design diagram

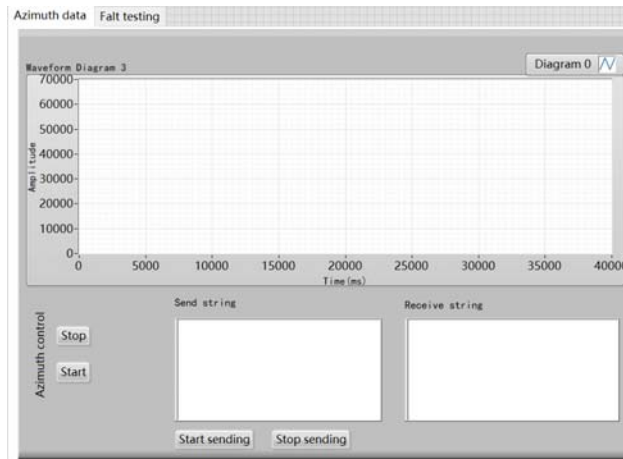


图 7 上位机程序面板设计图

Fig.7 Upper computer program interface design diagram

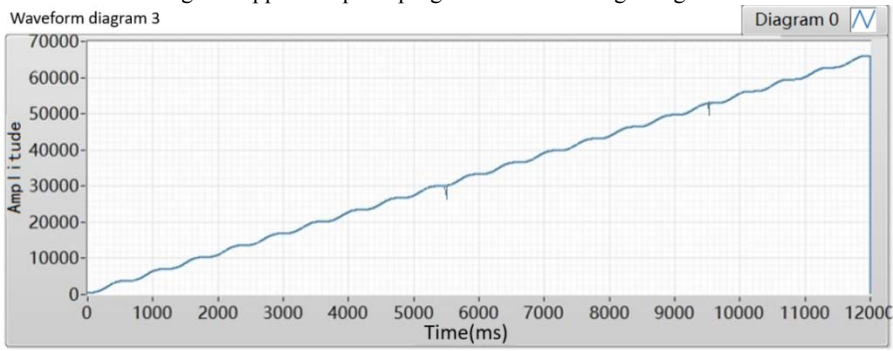


图 8 上位机软件输出图

Fig.8 Upper computer software output diagram

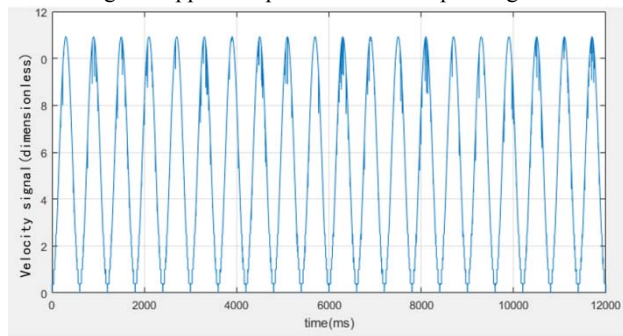


图 9 系统速度曲线图

Fig.9 System velocity diagram

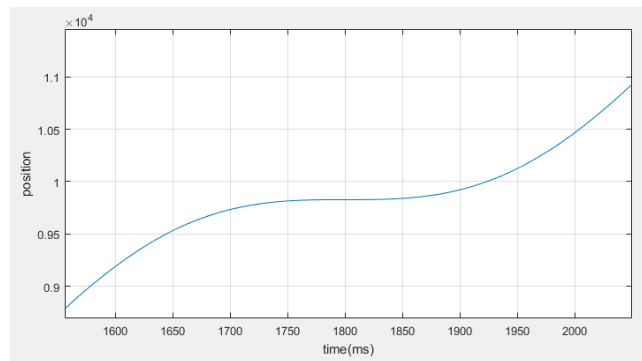


图 10 1.5~2.1s 内位置曲线图

Fig.10 Position curve in 1.5-2.1s

## 5 结束语

文中主要对一种步进凝视IRST转台电机控制系统的重要组成部分主控软件的设计进行概述,经实验测试表明该软件的设计及其实现方式切实可行,可以满足本系统的需求,通过和采用非国产化器件对比可说明本设计使软件更为精简。但是信号图上也有一些毛刺,说明系统会受到扰动影响,此问题将留待后续研究解决。

### 参考文献:

- [1] 冯科. 基于PAL的高分辨全景成像系统设计研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.  
FENG Ke. A Research on Design of High Resolution -Based Panoramic Imaging System[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.
- [2] 付大鹏. 高速运动线缆表面检测中全景图像采集系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
FU Dapeng. Research on Panorama Image Capture System of High Speed Moving Cable Surface Inspection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [3] 陈洁, 张若岚. 应用于红外搜索跟踪和态势感知系统的全景成像技术[J]. 红外技术, 2016, 38(4): 269-279.  
CHEN Jie, ZHANG Ruolan. Panoramic imaging technology applied in IRST and status awareness system[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(4): 269-279.
- [4] 李中. 高精度转台控制方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
LI Zhong. Research on Control Methods of High Precision Turntable[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [5] 胡勤. 红外小目标检测跟踪系统的伺服控制研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.  
HU Qin. The Study of Servo Control on Infrared Small Target Detection and Tracking System[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- [6] 朱国龙. 蒙皮拉形机快速换模系统设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
ZHU Guolong. Design and Research of Quick Die Change System for Skin Stretch Forming Machine[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [7] 蔡润佳. USB 插接件的寿命预测及其实验研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.  
CAI Runjia. Research on USB Connector Life Prediction and Experiment[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019.
- [8] 甘凯. 基于虚拟夹具的空间机器人遥操作与示教技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
GAN Kai. Telemanipulation and Teaching Control of Space Robot Based on Virtual Fixtures[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [9] 郑艳文. 基于DSP转台伺服控制系统的设计及仿真[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.  
ZHEN Yanwen. Design and Simulation of Turntable Servo Control System Based on DSP[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [10] 王盛杰. 基于雷达导引头系统的上位机控制平台软件设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.  
WANG Shengjie. Techniques in the Design of Monitoring Platform System for Upper Computers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [11] 薛红琳. 基于DSP的位置伺服控制系统软件设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
XUE Honglin. Software Design and Implementation of DSP Based Position Servo Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.