

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105894

# 自动加样分析仪多轴机械臂控制系统设计

韦宏利 王晴悦 周建波 魏 秀

(西安工业大学 西安 710021)

**摘要:** 针对自动加样分析仪设计出一种的多轴机械臂控制系统,此系统主要由微控制器、三轴机械臂、定位传感器、液晶显示屏、通讯模块等部分组成。单片机通过接收上位机的指令,完成对机械臂的运动控制。机械臂模块采用多轴协同运动的控制策略,实时的修正控制参数,优化运动轨迹,确保机械臂的移动过程精准、平稳、快速。针对一些社区医院等基层医疗机构,考虑其经济、需求等因素,研发一种高精度、高稳定性、低成本的小型自动加样分析仪具有重要意义。经过对系统的实验测试,设计的多轴机械臂控制系统可以满足设备在中小型医院经检测要求。

**关键词:** STM32;S型加减速曲线;多电机同步控制;交叉耦合控制;定位精度

**中图分类号:** TP2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of control system for multi-axis manipulator of automatic sampling analyzer

Wei Hongli Wang Qingyue Zhou Jianbo Wei Xiu

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** This paper designs a multi-axis manipulator control system for automatic sampling analyzer. The system is mainly composed of microcontroller, three-axis manipulator, positioning sensor, liquid crystal display, communication module and other parts. The microcontroller can control the movement of the manipulator by receiving the instruction of the host computer. The manipulator module adopts a control strategy of multi-axis cooperative movement, which can correct the control parameters in real time and optimize the motion trajectory to ensure the precision, stability and speed of the manipulator's moving process. For some community hospitals and other basic medical institutions, considering its economic, demand and other factors, it is of great significance to develop a small automatic sample adding analyzer with high precision, high stability and low cost. After the experimental test of the system, the multi-axis manipulator control system designed can meet the requirements of equipment testing in small and medium-sized hospitals.

**Keywords:** STM32; S-type acceleration and deceleration curve; multi-motor synchronous control; cross coupling control; positioning accuracy

## 0 引言

随着医疗行业的不断发展,体外诊断检测样本的需求增大,检验人员工作效率的要求也越来越高。以往通过手动加样,等待反应,人工检测的方法,无法满足现在的需求。

现如今,市场上的检测仪器主要分为两种,一类是国外进口的大型生化检测仪器,如雅培公司生产的 I2000 化学发光免疫分析系统,该仪器采用智能化分布冲洗,使用磷酸盐缓冲液和表面活性剂,提高了测试结果的可信度,通过压力检测的凝块检测技术可确保样本的前处理质量,另外罗氏公司的 E170 化学免疫分析仪,通过对不同浓度样品的测定对仪器进行准

确度、灵敏度、稳定性和可测范围进行了探讨,国外进口仪器检测效率高,但价格昂贵,性价比低<sup>[1-4]</sup>;另一类国内生产的小型生化检测仪器,如康普生和科美东雅公司的化学检测分析仪,其核心部分技术多采用国外先进模块,没有自主知识产权,相比较国外进口设备虽然价格偏低但检测性能处于劣势<sup>[5-6]</sup>。而国内的大型院所使用的仪器大多受到国外企业的垄断。中小型医院局限于需求和成本等因素,难以推广。小型基层医院多采用的是手工检测或者使用半自动化的仪器,严重影响了检测样本的准确率和工作效率<sup>[7-8]</sup>。因此,本文基于中小型医院所需的自动加样仪器设计出一种具有高精度、高稳定性、低成本的多轴机械臂控制系统。

收稿日期:2021-03-05

### 1 控制系统整体架构设计

机械臂控制系统主要包括上位机、单片机、机械臂驱动模块、编码器模块、光电开关模块、液晶显示模块、通信模块组成,如图 1 所示。

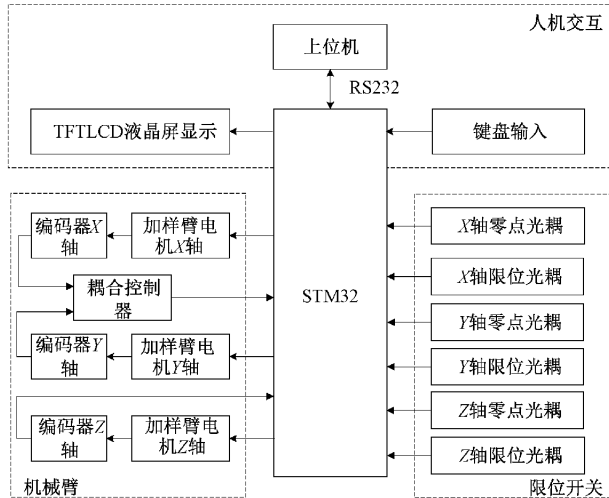


图 1 机械臂控制系统结构

上位机向 STM32 发送控制指令,STM32 接收上位机指令后进行解析处理,然后向机械臂模块发出动作命令,驱动步进电机运转,编码器及定位传感器实时检测机械臂的位置信息并显示在 TFTLCD 屏幕上。等待运动后,向上位机回复完成指令。

步进电机在运行过程中由于机械结构、负载等因素,往往会产生丢步、过冲、堵转等现象,从而影响机械臂的控制精度,本文针对这些问题进行方案的设计与优化,步进电机单轴控制采用简化 S 型加减速曲线模型,结合位置传感器辅助定位,提高了系统的单轴定位精度。多轴联动运动采用交叉耦合的控制策略,有效的减少了在机械臂控制过程中产生的震动和噪音。

#### 1.1 CPU 模块

本文采用 STM32F103ZET6 作为机械臂的微控制器。STM32 主要负责控制步进电机驱动、光电传感器检测、编码器检测、液晶屏显示、上位机通信等任务。STM32F103ZET6 拥有丰富的接口资源和性能稳定的处理能力,能够有效的保障系统稳定、高效的运行。

#### 1.2 机械臂

机械臂部分由三轴机械臂组成,通过在机械臂上搭载加样针模块,对加样平台上的样品进行精准加样。如图 2 所示,通过步进电机控制各个轴的运动,选用增量式编码器进行实时测量,再结合光电定位传感器实时对电机的位置进行修正。

机械臂控制系统是一个复杂的多轴运动系统,在其运动过程中,需要保持较高的移动速度和准确的定位精度。

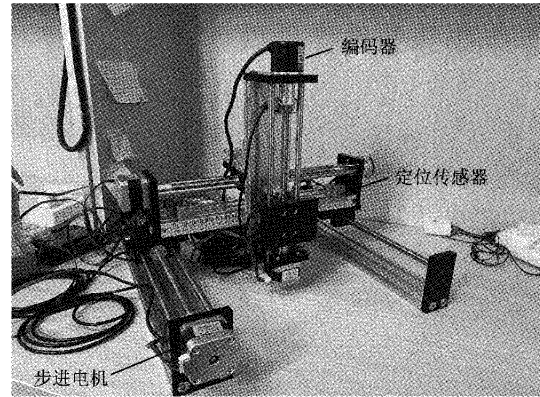


图 2 机械臂结构

#### 1.3 电机驱动模块

由于机械臂模块使用的两项四线步进电机,因此。本文选用的 A4988 作为机械臂模块电机驱动器<sup>[9]</sup>。A4988 内置转换芯片,可以根据实际应用需求,选择不同的电机细分,其控制性能良好,操作简洁,且拥有良好的输出性能。驱动模块电路如图 3 所示。

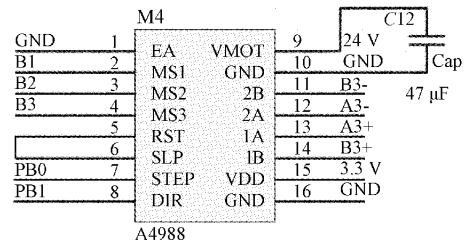


图 3 驱动模块电路

#### 1.4 光电传感器

机械臂模块由  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴构成,每一轴上都需要两个位置传感器作为电机的零位和限位开关,来保证运行过程的准确、稳定。STM32 采用外部中断的触发方式来实现对光电开关的信号采集,该方式完全由 STM32 内部硬件完成,不需要单片反复查询 I/O 口的状态,既提高了系统的有效利用率,又节省了 STM32 的资源。

#### 1.5 编码器

由于机械臂控制过程中需要实时的检测电机运行状态和实时数据,本文选用增量式编码器进行检测。将 STM32 内部的定时器设置成编码器模式,再将各个轴的编码的 A、B 相分别连接到定时器对应的 I/O 口。该模式下 STM32 将自动捕捉编码器发出的上升沿信号并进行记录,从而获取电机位置的编码值。根据位置偏差对电机的轨迹进行修正,有效地避免了运动过程中的过冲和丢步等问题,提高了系统的性能和精度。

#### 1.6 显示模块

为了能更加直观地显示系统的运动状态和具体参数,本系统选用 TFTLCD 液晶显示屏,可以实时显示机械臂的定位坐标、设备运行状况、样本反应时间等参数。

1.7 通信模块

系统采用 STM32 内部的 UART2 串行接口,外扩 MAX232 芯片实现上位机和单片机之间的数据交互。上位机接受用户指令,然后发送指令到下位机;主控制器接收上位机指令后进行划分、解析,解析之后向从控制器发出动作命令,并反馈数据信息给上位机。RS232 通信模块如图 4 所示。

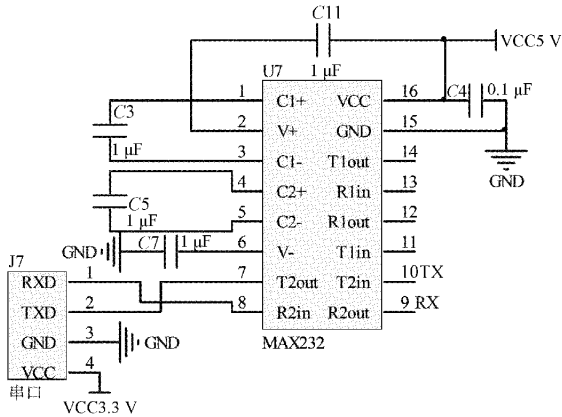


图 4 通信电路

2 机械臂控制策略

2.1 单轴控制算法

考虑系统的精度和平稳性要求,对比常见的梯形加减速控制算法、指数加减速控制算法<sup>[10-12]</sup>,本文选用 S 型加减速曲线算法,由于完整 S 型加减速曲线模型分段情况多,计算复杂<sup>[13]</sup>,在满足实际工程的需求下,对 S 型加减速算法进行简化,简化后的曲线如图 5 所示,运动过程中的速度和加速的变化均不存在突变,电机启停的过程中加速度趋于 0,系统运行稳定,不存在冲击。

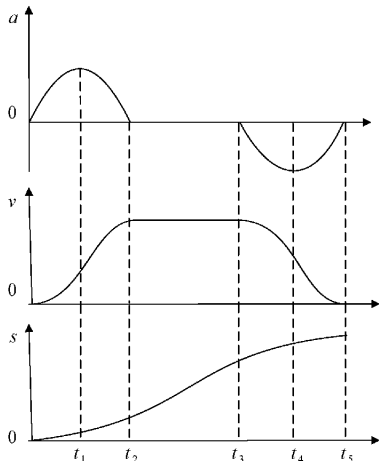


图 5 简化 S 曲线加减速模型

由图 5 可以推导出加速度方程的公式为:

$$a(t) = \begin{cases} -At^2 + Bt, & 0 \leq t \leq t_2 \\ 0, & t_2 \leq t \leq t_3 \\ At^2 - (2TA + B)t + T^2A + TB, & t_3 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)可以看出,加速度变化具有连续性,在机械臂运行过程中不存在柔性冲击。

由  $v(t) = v(t_i) + \int_{t_i}^t a(t)dt$  可以得出电机运行速度和时间关系方程为:

$$v(t) = \begin{cases} -\frac{A}{3}t^3 + \frac{B}{2}t^2, & 0 \leq t \leq t_2 \\ -\frac{A}{3}t_2^3 + \frac{B}{2}t_2^2, & t_2 \leq t \leq t_3 \\ -\frac{A}{3}t^3 - \frac{(2TA+B)}{2}t^2 + (T^2A+TB)t + v(t_2) + c_1, & t_3 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$c_1 = -(T^2A + TB)t_2 + \frac{(2TA + B)}{2}t_2^2 - \frac{A}{3}t_2^3$$

$v(t)$  是步进电机在时间  $t$  时的速度值,曲线是由加速度曲线推导得来的,在运动过程中,系统的速度没有发生跳变,理论上不存在刚性冲击。

由  $s(t) = s(t_i) + \int_{t_i}^t v(x)dx$  推导出移动距离与时间的关系方程为:

$$s(t) = \begin{cases} -\frac{A}{12}t^4 + \frac{B}{6}t^3, & 0 \leq t \leq t_2 \\ -\frac{A}{12}t_2^4 + \frac{B}{6}t_2^3 + v_2(t-t_2), & t_2 \leq t \leq t_3 \\ \frac{A}{12}t^4 - \frac{(2TA+B)}{6}t^3 + \frac{(T^2A+TB)}{2}t^2 - v(t_2)t + s(t_2) - c_1t + c_2, & t_3 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$c_2 = -\frac{A}{12}t_2^4 + \frac{(2TA + B)}{6}t_2^3 - \frac{(T^2A + TB)}{2}t_2^2 - [v(t_2) + c_1]t_2$$

机械臂与其搭载的检测设备的位置是固定的,机械臂搭载平台移动的距离是常数  $s$ 。在实际控制中,要对公式进行计算时,只需要确定加速运行时间  $0-t_2$ ,匀速运行时间  $t_2-t_3$  和加速段运行距离  $s_1$  的数值后,就可以计算出时间常数  $T$  和系数  $A, B$ 。

不同的检测样本,可以根据实际需求设定不同的运行速度。只需要重新确定控制参数即可实现,大大优化了系统的控制和运行的平稳。

2.2 多轴耦合控制

对于机械臂的多轴联动运动,本文采用了多轴耦合控制策略。多轴耦合控制主要对不同轴之间的同步速度误差或运动轨迹的轮廓误差进行反馈控制。一方面保证单轴的控制精度良好,另一方面,提高到多轴同步控制的精度。采用多轴耦合控制策略,可以有效地提高机械臂模块的稳态性能、定位精度以及抗扰能力<sup>[14-15]</sup>。

根据实际情况,为提高控制效率,机械臂控制系统在  $x, y$  轴采用多轴耦合控制策略,  $z$  轴采用跟随控制。在移动的过程中,先在  $xOy$  平面移动到目标位置后,再通过  $z$  轴垂直运动完成操作。

机械臂系统的定位精度主要受单轴误差和轮廓误差

的影响<sup>[16]</sup>。在运动的过程中,单轴仍采用简化后的 S 型加减速曲线模型,来提高机械臂的单轴控制性能,多轴之间采用耦合控制策略,如图 6 所示,通过编码器检测,实时的对步进电机的位置进行修正补偿,最终提高停止位置的准确度。

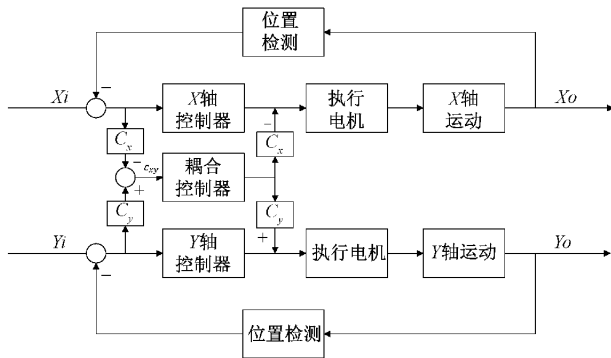


图 6 多轴控制原理

### 3 软件设计

单片机控制系统是通过 C 语言在 Keil uVision5 开发平台上实现的,调用库函数实现对各个部分进行模块化设计。在主程序运行后,通过解析上位机发送的指令,实现对各个模块进行控制,其软件流程如图 7 所示。



图 7 软件流程

### 4 实验验证

在样本的加样过程中,机械臂需要快速、平稳的运动到指定位置,并完成设定的操作。作为一个复杂的多轴运动系统,对其运动过程和定位精度的有着较高的要求。考虑

到自动加样系统中仪器结构间距以及控制的精度,机械臂定位精度和重复定位精度允许误差如表 1 所示。

表 1 机械臂控制精度误差 mm

	x 轴	y 轴	z 轴
定位精度	≤0.4	≤0.4	≤0.3
重复定位精度	≤0.2	≤0.2	≤0.15

#### 4.1 xOy 平面定位精度实验

在 xOy 平面进行 x 轴与 y 轴联动定位实验。联动控制主要检测最终停止位置的精度和重复定位精度,对移动的轨迹要求不高,机械臂系统测试实验如图 8 所示。

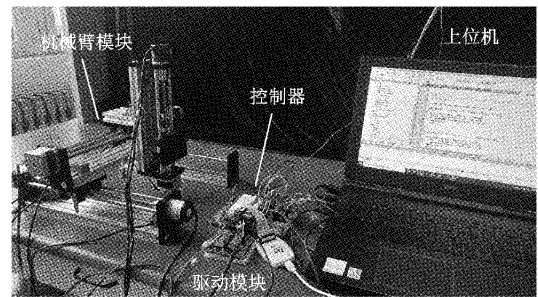


图 8 机械臂实验测试

设运动方向与 x 轴的之间的夹角为  $\theta$ , 设定系统控制机械臂移动的方向为  $\tan\theta = 4/3$ , 控制参数如表 2 所示。

表 2 x、y 轴联动控制参数

	加速时间/s	最大加速度/ (mm·s <sup>-2</sup> )	启动速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	最大速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )
x 轴	0.1	1 500	1.5	37.5
y 轴	0.1	2 000	2.0	50.0

设定目标位置分别 (30, 40)、(60, 80)、(90, 120)、(120, 160)、(150, 200)。多次对 x 轴、y 轴数据进行测量,结果如表 3、4 所示。

表 3 xOy 平面运动实验 x 轴数据

设定位置/mm	30	60	90	120	150
实验 1	29.98	59.98	89.97	120.04	150.05
实验 2	29.96	60.00	89.96	119.98	150.00
实验 3	29.97	60.04	90.03	120.05	150.01
实验 4	30.04	59.94	89.96	120.05	150.03
实验 5	29.95	59.97	90.01	120.03	149.95
重复定位精度/mm	0.151				
定位精度	0.251				

根据夹角  $\tan\theta = 4/3$ , 又根据轮廓误差公式  $\epsilon_{xy} = \cos\theta \cdot e_y - \sin\theta \cdot e_x$ , 计算最终位置点的偏差如表 5 所示。

根据表 3~5 的实验数据可知,机械臂在 xOy 平面进

表4 xOy平面运动实验y轴数据

设定位置/mm	40	80	120	160	200
实验1	39.95	80.04	119.97	159.96	200.02
实验2	40.01	80.03	120.00	159.96	199.98
实验3	39.97	80.00	119.98	160.05	200.02
实验4	39.95	79.98	120.00	160.00	199.99
实验5	39.97	80.01	120.03	160.04	199.98
重复定位精度/mm	0.171				
定位精度	0.261				

表5 xOy平面运动实验数据

设定位置/mm	40	80	120	160	200
实验1	-0.014	0.040	0.006	-0.056	-0.028
实验2	0.038	0.018	0.032	-0.008	-0.012
实验3	0.006	-0.032	-0.036	-0.010	0.004
实验4	-0.062	0.036	0.032	-0.040	-0.030
实验5	0.022	0.030	0.010	-0.010	0.028
重复定位精度/mm	0.155				
定位精度	0.255				

行x轴、y轴联动运动时,其定位精度和重复定位精度分别为0.155 mm和0.255 mm,满足系统的设计要求。x轴、y轴采用交叉耦合的控制策略,有效的提高机械臂系统在xOy平面的定位精度。

4.2 z轴定位精度实验

z轴采用简化S型加减速曲线控制算法,先将电机位置归零,定位位置分别设定为25、50、75、100 mm,每组定位进行5次测试。测试数据如表6所示。

表6 z轴运动实验数据

设定位置/mm	25	50	75	100
实验1	25.02	50.02	75.01	100.02
实验2	24.96	50.01	74.96	99.99
实验3	24.97	50.00	75.00	99.97
实验4	24.99	49.97	75.01	100.01
实验5	25.03	50.02	75.00	99.99
重复定位精度/mm	0.122			
定位精度/mm	0.192			

通过计算可知,z轴的单轴控制定位精度为0.192 mm,重复定位精度为0.122 mm,满足设计要求误差的允许范围。

5 结 论

本文设计的机械臂控制系统采用S型加减速曲线与多轴耦合控制相结合的控制策略,有效地减少了系统在运行过程中的噪音和振动,提高了系统的稳定性、快速性和准确性。通过各个模块的相互配合,能够快速准确的完成加样

任务,目前市面上的大多数进口的自动加样设备存在体积较大、操作复杂成本昂贵并且仅适用于大型医院与研究所。对于一些中小型医院由于检验样本需求较小,且考虑到设备成本等因素,本系统具有稳定性好、精度高、功耗低、成本低以及便携化的特点,可以更好地满足基层医疗机构以及一些小型医院的需求。

参考文献

- [1] 周齐洋,廉倩倩,梁辰,等.中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白化学发光定量免疫分析方法的建立及临床应用[J].标记免疫分析与临床,2020,27(10):1756-1760.
- [2] 闫蔚.化学发光免疫分析在临床检验中的应用[J].临床医药文献电子杂志,2017,4(50):9807,9810.
- [3] 陈兴国,郭继强,徐海伟,等.蛋白芯片检测系统在恶性肿瘤诊断中的临床研究[J].检验医学与临床,2012,9(9):1057-1058.
- [4] 孙姗姗,李昕,宋翠翠,等.血清铁蛋白化学发光免疫分析方法的建立及临床应用[J].食品与生物技术学报,2019,38(3):118-123.
- [5] 潘颖.便携式生化分析仪控制系统的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2016.
- [6] 张啸天,倪屹,郭瑜,等.基于ARM的化学发光免疫分析仪控制系统[J].传感器与微系统,2021,40(2):76-78,82.
- [7] 石燕,魏衍财,朱耿超,等.四种国产化学发光免疫分析系统检测C-肽和胰岛素的性能验证[J].标记免疫分析与临床,2019,26(1):165-168.
- [8] 杨延丽.全自动化学发光免疫分析仪的研制[D].厦门:厦门大学,2017.
- [9] 陆聪,张北伟.基于STM32三轴云台系统的设计[J].国外电子测量技术,2019,38(9):75-78.
- [10] 樊金光.FDM 3D打印机的电机控制系统优化设计[D].天津:河北工业大学,2017.
- [11] 钟前进,王科,丁信忠.一种新型S加减速算法研究[J].电气传动,2019,49(6):12,37.
- [12] 王彩芳.一种简化S型加减速算法的研究[J].机电工程技术,2016,45(7):56-60.
- [13] 王海霞,颜桂定,李宝辉,等.直线电机运动控制系统的软件设计与实现[J].电子测量与仪器学报,2013,27(3):264-269.
- [14] 张团善,潘铜,叶小荣,等.基于交叉耦合的平网印花机同步控制器的设计[J].电子测量技术,2010,33(7):15-18.
- [15] 赵继强.多轴伺服系统的协调控制策略研究[D].福州:福州大学,2017.
- [16] 储婷婷.基于多轴耦合同步控制的机器人高精度轨迹跟踪方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

作者简介

韦宏利,副教授,主要研究方向为智能控制与计算。E-mail:14955437@qq.com  
 王晴悦(通信作者),硕士,主要研究方向为嵌入式系统设计。E-mail:wangqingyue95@sina.com  
 周建波,硕士,主要研究方向为测控与传感器。E-mail:zhoudh0606@qq.com  
 魏秀,硕士,主要研究方向为测控与传感器。E-mail:251318979@qq.com