

简易旋转倒立摆和控制装置

摘要：系统采用 STM32F401 作为控制核心，通过串级 PID 控制算法对摆杆进行控制。摆杆可以摆动到完成圆周运动并能够在倒立状态下抵抗干扰、保持平衡。硬件电路由单片机最小系统、电机模块、L298N 电机驱动模块、WDD35D4 角度传感器和倒立摆的机械结构组成，使用按键进行模式选择和切换。软件通过测量摆杆角度和电机转速对旋转臂进行 PID 控制，最终实现了摆杆摆动直至完成圆周运动、摆杆倒立并在受干扰后仍保持倒立、由自然下垂状态开始起摆至倒立并保持倒立状态等功能，测试表明各项指标均符合要求。

关键词：串级 PID 调节；倒立摆；STM32F4

一、系统方案

（一）系统结构

本旋转倒立摆装置主要包括单片机最小系统板、旋转臂、摆杆、减速直流电机、AB 相磁编码器和角度传感器。编码器采集电机转速，角度传感器获取摆杆的角度。处理两者数据后赋给电机相应占空比的 PWM 波，进而改变电机转速，控制摆杆姿态。

总体框图如图 1 所示：

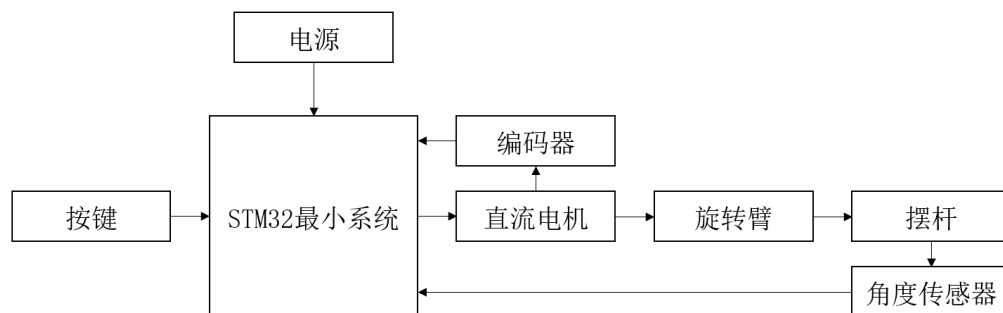


图 1 系统总体框图

（二）方案比较与选择

1. 电动机选型

方案一：步进电机。

步进电机是将电脉冲信号转化为角位移或线位移的开环控制元件，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数。但步进电机难以获得较大的转矩。而本装置要使摆杆产生较大的加速度，必须选用能产生较大力矩的电机。

方案二：直流电机

直流电机能实现直流电能和机械能的相互转换，启动和调速性能好，调速范围好且平滑，并且具有较大的转矩。所以采用直流电机，可以方便地使摆杆获得较大的加速度。

方案确定：因为装置对电机的转矩有较大的要求，故选择方案二。本装置选用带有 AB 相磁编码器的 MINI 直流减速电机，输出功率为 4.32W，额定扭矩为 $1\text{kg} \cdot \text{cm}$ ，减速比为 30:1，驱动能力及转速均满足摆杆快速摆起的要求。

2. 控制算法方案比较与选择

方案一：采用 LQR 线性系统模型。

LQR 是一种二元线性调节器，能够得到状态线性反馈的最优控制规律，易于构成闭环最优控制，方法简单便于实现。将摆杆的摆动视为线性变化，取转轴的加速度、速度和摆杆的角加速度、角速度为状态变量 x ，其中摆杆的角速度、端点的速度为可观测量 y ，旋转臂端点的加速度为控制量 u ，由动力学定律

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bux \\ y = Cx \end{cases}$$

设置状态与输入的权重 Q 后求出系数 $K = lqr(A, B, Q, R)$ ，最终得到运动状态以及调节方式。LQR 不需要精确的建模分析，能够把系统偏差降低到最小，但是参数整定量远远多于 PID，而且摩擦系数和摆杆中心位置等参数难以精确测量。

方案二：采用单环 PID 算法。

PID 算法是常用的控制算法，可通过测量摆杆角度值，实现对摆杆角度的闭环控制。该方法实现简单，且需要调整的参数较少，但是在控制过程中，无法对摆臂转速进行控制，当电机转速达到极限值时，系统将会进入失控状态。

方案三：采用串级 PID 算法。

速度环作为外环，对摆臂速度进行控制，角度环作为内环，对摆杆角度进行控制。与单级 PID 相比，串级 PID 的抗干扰能力能提高十几倍，能大大提高装置的鲁棒性。并且该算法可实现对摆臂速度的控制，使摆臂维持在一定角度并使摆杆保持倒立状态。

方案确定：本系统对摆臂速度有要求，并且要求在保持倒立的同时限制旋转臂的旋转角度，故选择方案三。

二、理论分析与计算

PID 控制算法

在模拟控制系统中，控制器最常用的控制规律是 PID 控制。常规 PID 控制系统原理框图如图 2 所示。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。

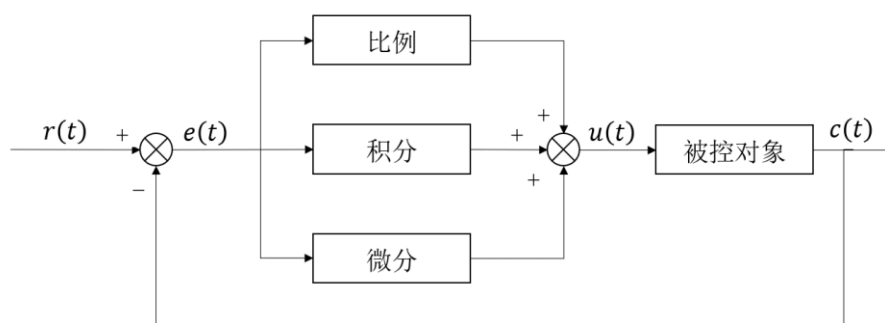


图 2 PID 控制系统原理框图

PID 控制器是一种线性控制器，给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1)$$

PID 通过将偏差的比例（P）、积分（I）、微分（D）通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。本装置采用位置式 PID 控制，控制方程如下：

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

PID 控制器各部分校正环节的作用如下：

比例环节：成比例地反映系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。

积分环节：主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱主要取决于积分时间常数 T_I ， T_I 越大，积分作用越弱，反之则越强。

微分环节：反映偏差信号的变化趋势，并能在偏差信号变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

本装置要求在保持倒立的同时控制旋转臂的角位移，所以该装置具有两个观测量。为了实现题目要求，装置将采用串级 PID 算法，将电机的转速作为外环 PID 的观测量，摆杆的角度作为内环 PID 的观测量，外环 PID 的输出作为内环 PID 设定值，当转角过大时，系统可以在保持倒立状态的条件下往回调节转角，调节得到合适的参数可以使电机转角逐渐收敛。

图 3 为本装置 PID 控制的流程图：

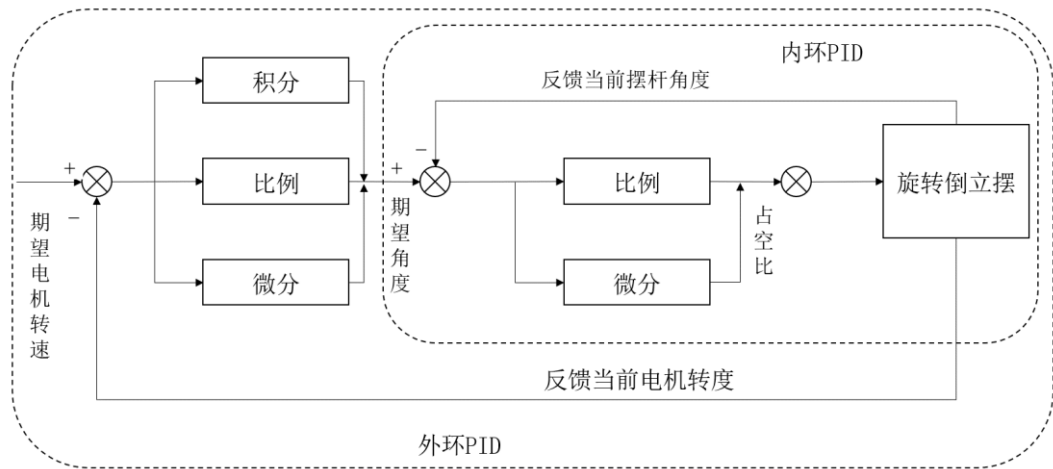


图 3 串级 PID 流程图

三、 电路与程序设计

（一）电路设计

电机驱动电路：考虑到摆杆摆起过程需要较大的加速度，对电机驱动能力要求较大，故本装置选用 L298N 作为电机驱动芯片，其工作电压高，最高工作电压可达 46V；输出电流大，瞬间峰值电流可达 3A，持续工作电流为 2A；额定功率为 25W。电机驱动电路如图 4 所示

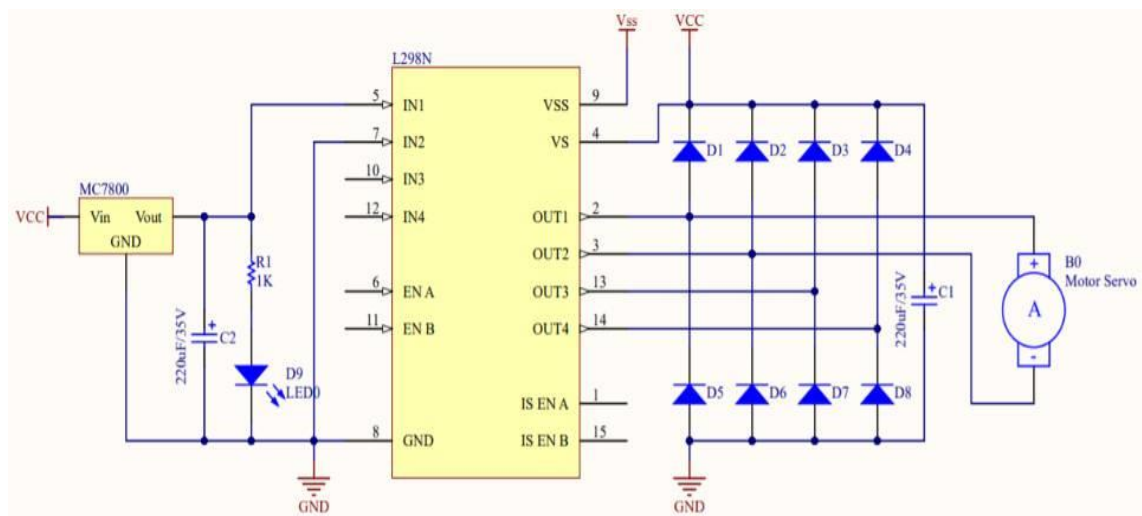


图 4 电机驱动电路图

（二）程序结构与与设计

1. 程序功能描述

本系统共有五个模式选择，依次为：往复摆动模式、摆杆圆周运动模式、倒立保持模式、摆杆起摆并保持倒立模式、摆杆倒立同时旋转臂作圆周运动模式。各模式通过按键进行切换与选择。

2. 主程序流程图

主程序流程图如图 5 所示。

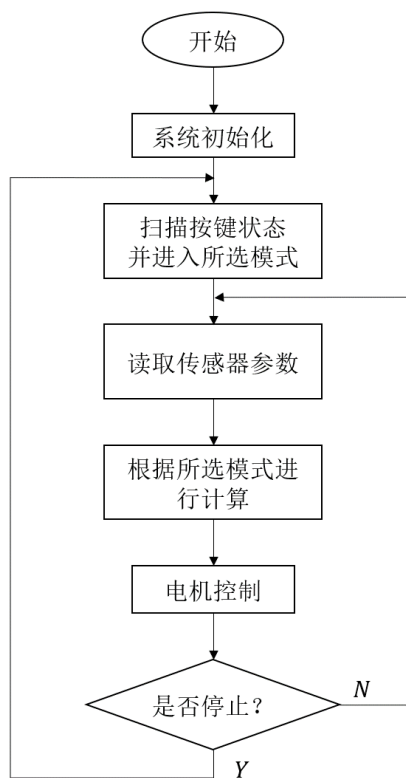


图 5 主程序流程图

3. 子程序流程图

子程序流程图如图 6 和图 7 所示。

(1) 165° 处开始倒立

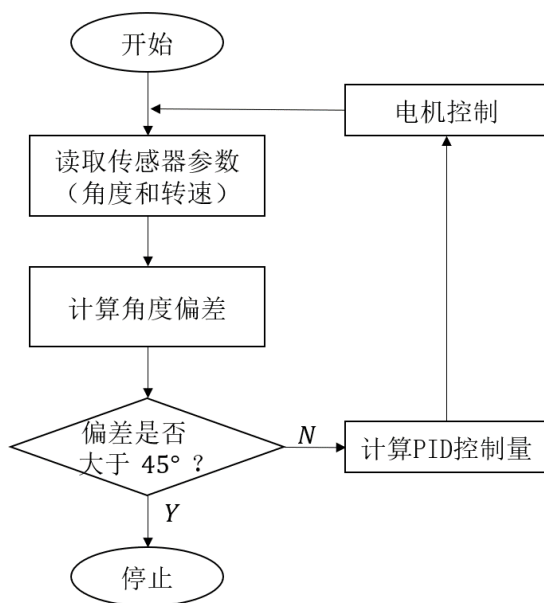


图 6 165° 处开始倒立的子流程图

(2) 摆杆由自然下垂摆至倒立状态

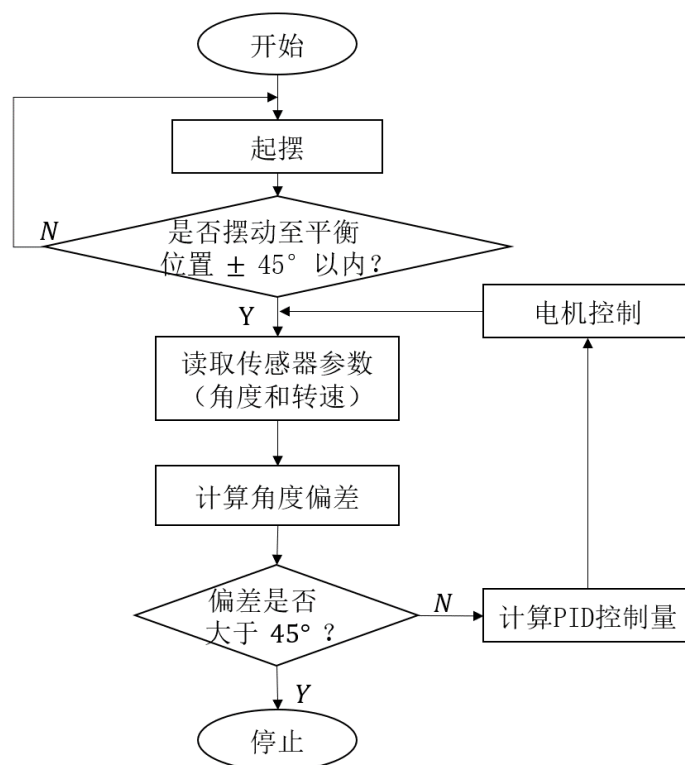


图 7 摆杆由自然下垂摆至倒立状态的子流程图

四、 测试方案与测试结果

(一) 测试工具

1. 秒表。
2. 量角器。

(二) 测试方案及结果

1. 基本要求部分测试

基本要求 1: 使摆杆自然下垂, 切换模式使电机带动旋转臂往复运动, 记录最大摆角 β 和达到最大摆角时间 t_1 。

基本要求 2: 使摆杆自然下垂, 切换模式使电机带动旋转臂作往复运动, 观察摆杆是否能完成圆周运动, 并记录完成圆周运动所用的时间 t_2 。

基本要求 3: 使摆杆处于 165° 附近, 外力撤除的同时, 启动控制旋转臂 使摆杆保持倒立, 记录倒立状态保持时间 t_3 和旋转臂转动角度 θ 。

2. 发挥要求部分测试

发挥要求 1: 使摆杆自然下垂, 控制旋转臂作往复旋转运动, 进款使摆杆倒

立，记录摆起时间 t_4 和倒立状态保持时间 t_5 。

发挥要求 2：使摆杆倒立，施加干扰后，记录摆杆恢复倒立状态时间 t_6 。

发挥要求 3：使摆杆倒立，旋转臂作圆周运动，并尽快使单方向转动角度达到 360° ，记录旋转臂完成圆周运动所用时间 t_7 。

3. 测试结果

具体测试数据见附录表 1，表 2，表 3，表 4，表 5，表 6.

（三）测试结果分析

由测试结果可以看出，系统可以实现摆杆往复摆动并完成圆周运动、摆杆倒立且受干扰后仍保持倒立、由自然下垂状态开始起摆至倒立并保持倒立状态等功能，满足题目中基本部分和发挥部分的所有要求。