

# 中南大学

## 《虚拟仪器》 课程设计报告

设计题目    一阶倒立摆控制系统设计

指导老师    周敏老师、熊红云老师

设计者        李明

专业班级    测控 16 级 03 班 15 号

设计日期    2019 年 5 月



# 目录

第一章、 一阶倒立摆控制系统设计的目的及要求.....	1
1.1、设计目的.....	1
1.2、设计要求.....	1
1.3、倒立摆的分类.....	2
1.4、国内外研究现状.....	2
第二章 系统的硬件构成.....	3
2.1、系统总体结构.....	3
2.2、直流电机.....	5
2.3、角度检测—光学编码器.....	5
2.4、电机速度检测—速度计.....	6
2.5、其他硬件参数.....	6
2.6、系统结构示意图.....	6
第三章 系统软件设计.....	7
3.1、倒立摆的建模方法.....	7
3.2、一阶倒立摆模型的建立.....	7
3.3、倒立摆系统的控制方法.....	11
3.4、项目总体设计.....	12
3.5、前面板设计.....	13
3.6 功能模块设计.....	14
第四章 系统调试与总结.....	18
4.1 PID 参数整定.....	18
4.2 实验中遇到的问题及解决方法.....	20
4.3 设计体会与建议.....	21
参考文献.....	23



# 第一章、一阶倒立摆控制系统设计的目的及要求

## 1.1、设计目的

倒立摆系统是一个非线性、多变量、强耦合及绝对不稳定的复杂的高阶系统，它通常作为一个典型的被控对象来检验控制方法对非线性、快速性及稳定性的处理能力。倒立摆实验模型不仅作为现代控制理论教学的一个理想实验模型，而且对系统的研究有很强的实用价值，如海上钻井平台的稳定性控制问题、飞机安全着陆问题、火箭姿态控制问题及机器人行走平衡控制等都与倒立摆的控制有很大的相似性。因此对倒立摆系统的研究具有很强的理论意义和实践意义。

自动控制理论和过程控制是测控技术与仪器专业学生的两门必修课，课程中的一些概念相对比较抽象，如系统的稳定性、可控性、收敛速度和抗干扰能力等。倒立摆系统是一个典型的非线性、强耦合、多变量和不稳定系统，作为控制系统的被控对象，它是一个理想的教学实验设备，许多抽象的控制概念都可以通过倒立摆直观地表现出来。LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言。传统文本编程语言根据语句和指令的先后顺序决定程序执行顺序，而LabVIEW 则采用数据流编程方式，程序框图中节点之间的数据流向决定了VI及函数的执行顺序。PID 控制器以其良好的通用性在工业过程控制中得到了普遍的应用。PID 控制很好地体现了自动控制所要求的快速性、准确性和稳定性三个重要特征。PID 控制器具有结构简单、可靠性高和鲁棒性好的显著优点，在工业控制领域的应用中占据重要地位。

本次课程设计以一阶倒立摆为被控对象，基于 LabVIEW 设计开发倒立摆控制仿真实验软件，让被控对象以三维图像的形式进行显示，利用控制理论设计 PID 控制器的设计方法，实现对一阶倒立摆系统的控制。通过学生对控制系统进行不断地调试的过程，将控制理论的运用和控制效果直观地呈现在学生面前，加深学生对所学课程的理解，培养学生理论联系实际的能力。

## 1.2、设计要求

1)、通过设计相应的起摆程序和稳摆程序使倒立摆系统完成起摆并让摆臂稳定在竖直向上状态。

2)、系统在稳摆状态应有一定的抗干扰能力，当外加一定干扰时系统能保持稳定状态。

- 3)、当摆臂从平衡状态偏离时, 系统应快速回复到平衡位置。
- 4)、摆臂旋转的角度在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$  之间(初始位置为 $0^{\circ}$ ), 不能绕线。

### 1.3、倒立摆的分类

目前倒立摆的种类很多,按照摆杆的数量可以分为一级倒立摆、二级倒立摆、三级倒立摆、四级倒立摆;按照机械结构又可分为直线倒立摆、平面倒立摆、环形倒立摆、直线柔性链接倒立摆等。教学实验中常见的倒立摆有三种:直线型倒立摆、平面型倒立摆、环型倒立摆。

#### (1)直线型倒立摆

直线型倒立摆系统也称车摆系统,是最普遍的倒立摆系统,主要由小车、摆杆等组成。摆杆在铅垂的平面内自由摆动,小车沿水平导轨运动,它们之间自由链接。根据摆杆数目的不同又可以将其分为一级至四级倒立摆。

#### (2)环型倒立摆

环型倒立摆也称摆杆式倒立摆,或旋转式倒立摆一般是由水平放置的连杆以及固定于其末端的摆杆组成,连杆由伺服电机驱动,可以绕中心运动。根据串联的摆体组件的级数,也可以组成多级的倒立摆系统。环形倒立摆在导轨上做圆周运动,这就不可避免的产生了离心力,

给研究带来了新的难题。

#### (3)平面倒立摆

平面倒立摆是在可以做平面运动的运动模块上装有摆杆组件。摆杆的底端可以在平面内自由移动,摆杆可以在空间内的任意轴线转动,这样系统维数变大,大大增加了控制器的设计难度,整个系统复杂、不稳定。

由于能力有限,所以本次课程设计选用的是中等复杂程度旋转式倒立摆,为最容易分析和控制一阶倒立摆。

### 1.4、国内外研究现状

对倒立摆系统的研究始于 20 世纪 50 年代,麻省理工学院的专家教授首先设计出一级倒立摆实验设备。直到 20 世纪 60 年代后期,作为典型的多变量、非线性、不稳定的系统,倒立摆的概念才被提出来,并受到世界各国控制界科学家的重视。倒立摆常被引用用于检验不同控制方法的有效性、快速性及其控制能力。倒立摆系统的控制目标就是引入不同的控制方法使得倒立摆这个不稳定的系统成为稳定的系统。此外,倒立摆结构简单、装置成本低、物理参数和结构易于调整,

是进行控制实验、教学、科研的理想平台。

目前对于倒立摆的研究主要集中于亚洲，如中国的北京航空航天大学、中国科技大学、北京师范大学、大连理工大学，韩国的忠南大学、釜山大学，日本的东京大学、东北大学、东京电机大学等。此外，意大利的佛罗伦萨大学、美国的东佛罗里达大学、俄罗斯的圣彼得堡大学以及波兰的波兹南技术大学等也都对倒立摆问题有持续的研究。特别地，2002 年时任北京师范大学的教授李洪兴教授利用变论域自适应模糊控制的方法首次实现了四级倒立摆的实物控制。

## 第二章 系统的硬件构成

### 2.1、系统总体结构

倒立摆系统如图 2.1、图 2.2 所示，各部分说明如表 2.1。

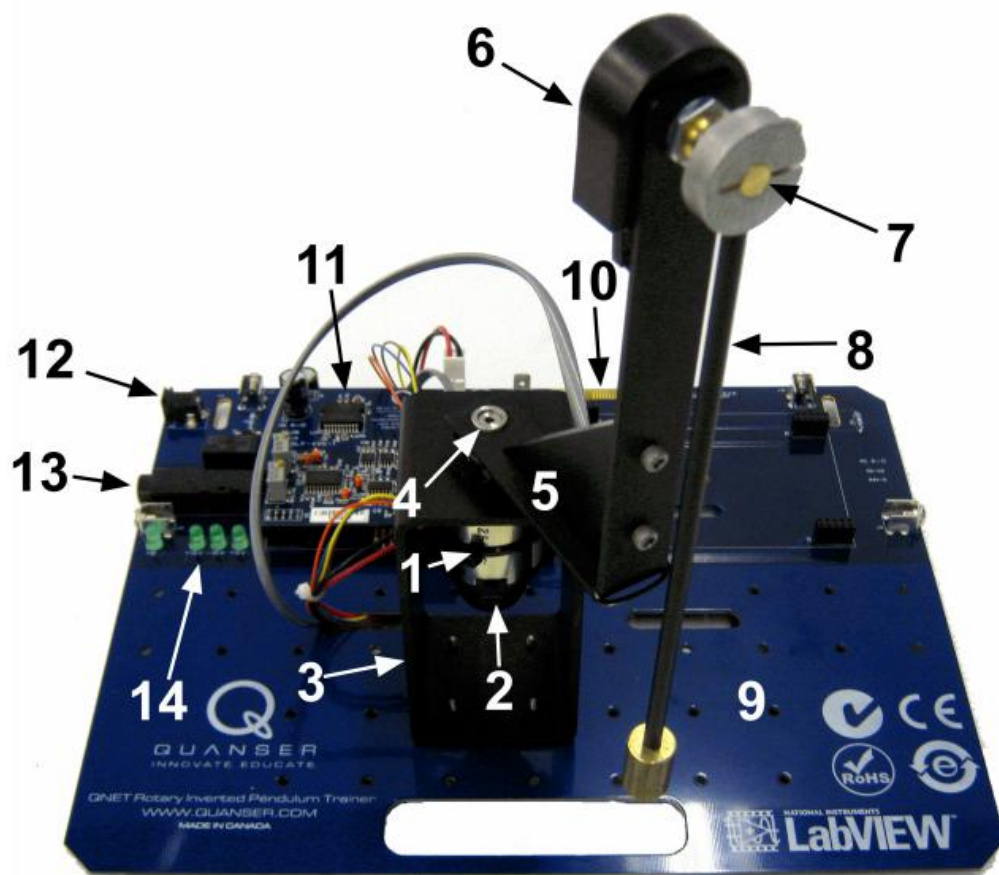


图 2.1 倒立摆总体结构图

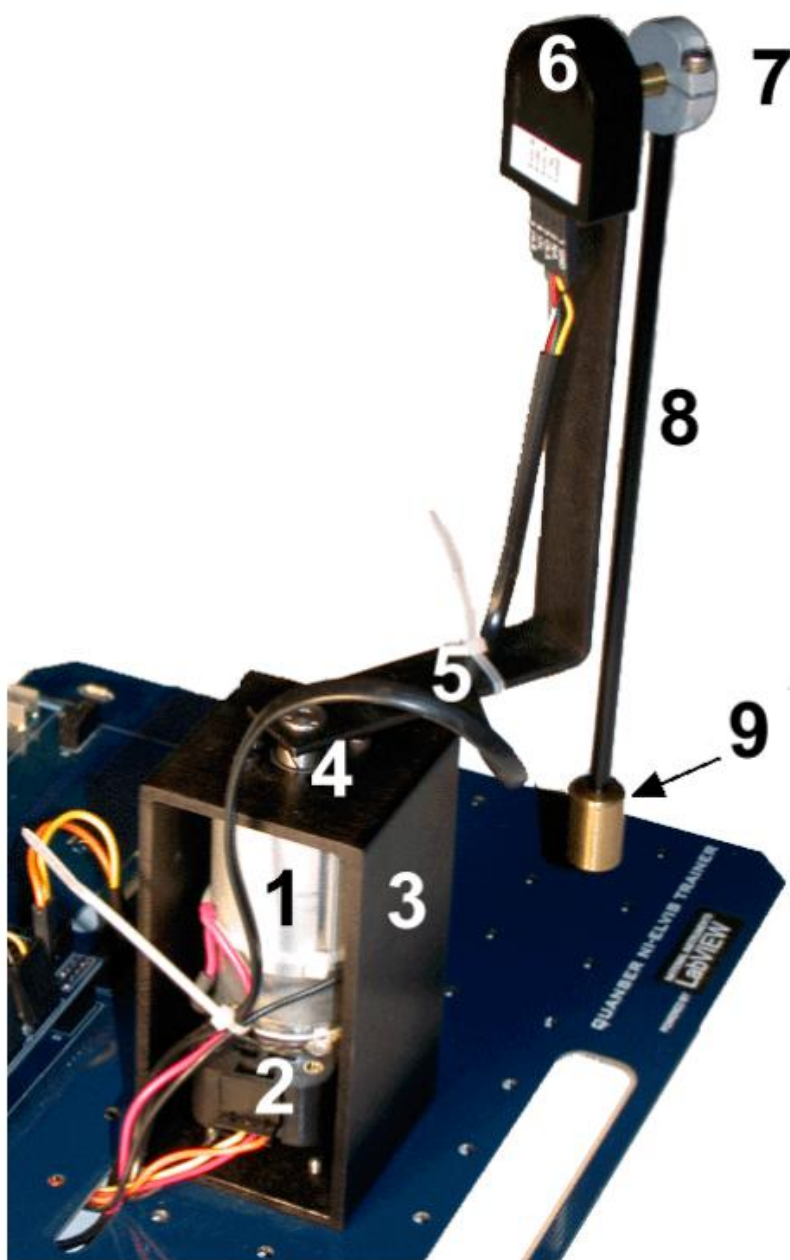


图 2.2 摆臂细节结构图

编号	描述	编号	描述
1	直流电机	8	摆臂
2	旋转臂角度编码器	9	摆臂重锤
3	电机支架	10	PCI 接口
4	旋转臂旋转中心点	11	QENT 主板
5	旋转臂	12	24V 电源插口
6	旋转臂上的摆臂摆角编码器	13	保险
7	摆臂旋转中心点	14	+8V, +15V, -15V, +5V LED 指示灯

表 2.1 倒立摆各部分说明表



## 2.2、直流电机

12V 直流电机，型号为 Micro-Drives DC Motors M3138U，电机的静摩擦相当于 0.5 到 1.5V 电压产生的力。通过 Elvis II+ 的模量输出 A0 的 0 通道 (A00)，可以控制施加直流电机的电压，控制其正反转。直流电机参数如表 2.2。

参数	值
电枢电阻	8.7 $\Omega$
电流转矩常数	0.03334 N·m
电势系数	0.03334 V/(rad/s)
电机转子转动惯量	$1.80 \times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup>
最大连续转矩	0.1 N·m
最大功率	20 W
最大电流	1.0 A

表 2.2 直流电机参数表

电机串联一电流检测电阻，用于监测电机电流，检测电阻阻值为 0.1  $\Omega$ ，可以从模量输入 0 通道 (AI0) 读取其值。

## 2.3、角度检测—光学编码器

直流电机上的光学编码器，可以检测旋转臂角度与旋转速度，编码器为 360 线，经 A、B 相 4 倍频后，相当于每旋转一周编码器产生 1440 个脉冲。电机编码器的值可在 DAQ 中读取数字输入 0 通道 (DI0) 获取，编码器参数如表 2.3。

参数	值
线数	360 Lines/res
分辨率	0.25 deg/count
编码器类型	TTL
信号通道	A, B

表 2.3 直流电机编码器参数表

摆臂上的光学编码器用于检测摆臂摆角，编码器为 1024 线，经 A、B 相 4 倍频后，相当于每旋转一周编码器产生 4096 个脉冲。在 DAQ 中读取数字输入 1 通道 (DI1) 可以获得编码器的值，编码器参数如表 2.4。

参数	值
线数	1024 Lines/res
分辨率	0.0879 deg/count
编码器类型	TTL
信号通道	A, B

表 2.4 摆臂摆角编码器参数表

## 2.4、电机速度检测—速度计

直流电机上还安装有速度计，检测电机转速。速度计的值可以在 DAQ 的模量输入 4 通道(AI4)中读取。速度计规格为 2987 rpm/V。

## 2.5、其他硬件参数

Symbol	Description	Value	Unit
<b>Pendulum Arm:</b>			
$M_{arm}$	Mass of the arm	0.08	kg
$r$	Length of arm pivot to pendulum pivot	0.0826	m
$B_{eq}$	Arm viscous damping	0.000	N·m/(rad/s)
<b>Pendulum Link:</b>			
$M_p$	Mass of the pendulum link and weight combined	0.0270	kg
$L_p$	Total length of pendulum	0.191	m
$l_p$	Length of pendulum center of mass from pivot	0.153	m
$M_{p1}$	Mass of the pendulum link	0.008	kg
$M_{p2}$	Mass of the pendulum weight	0.019	kg
$L_{p1}$	Length of pendulum link	0.171	m
$L_{p2}$	Length of pendulum weight	0.0190	m
$J_p$	Pendulum moment of inertia about its pivot axis	$1.70 \times 10^{-4}$	kg·m <sup>2</sup>
$B_p$	Pendulum viscous damping	0.000	N·m/(rad/s)
<b>Pulse-Width Modulated Amplifier:</b>			
$V_{MAX}$	PWM amplifier maximum output voltage	24	V
	PWM amplifier maximum output current	5	A
	PWM amplifier gain	2.3	V/V

## 2.6、系统结构示意图

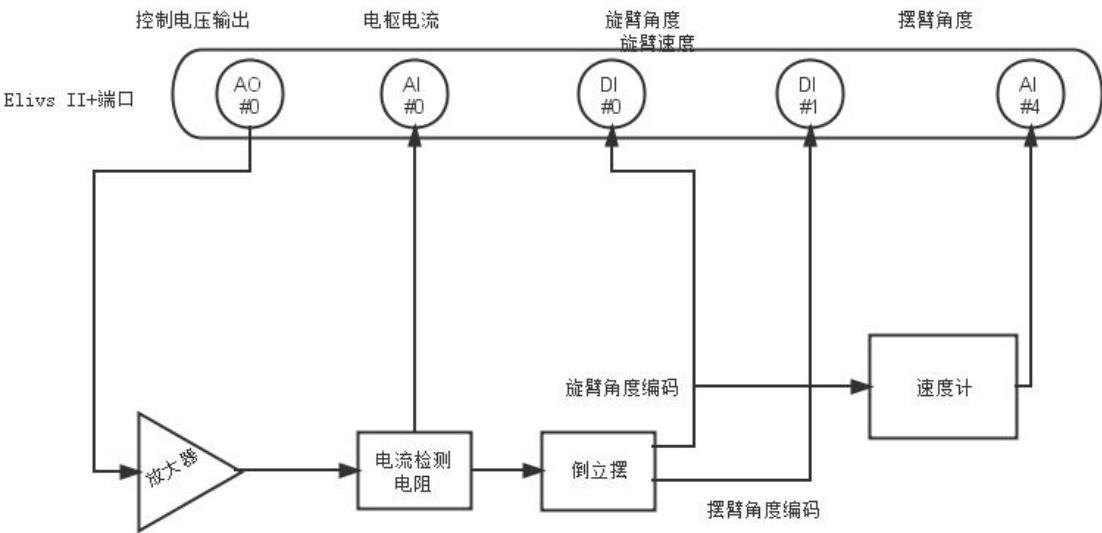


图 2.3 旋转倒立摆系统结构示意图

## 第三章 系统软件设计

### 3.1、倒立摆的建模方法

系统建模可以分为两种：机理建模和实验建模。实验建模就是通过在研究对象上加上一系列的研究者事先确定的输入信号，激励研究对象并通过传感器检测其可观测的输出，应用数学手段建立起系统的输入—输出关系。这里面包括输入信号的设计选取，输出信号的精确检测，数学算法的研究等等内容。机理建模就是在了解研究对象的运动规律基础上，通过物理、化学的知识和数学手段建立起系统内部的输入—状态关系。利用不同的方法建模会得到不同的倒立摆数学模型，但是同一个倒立摆系统建立的模型本质上是相同的。常见的倒立摆建模方法有两个：牛顿力学分析法和 Lagrange 方程法。

#### (1) Lagrange 方程法

Lagrange 方程式以广义坐标表达的任意完整系统的运动学方程，方程组中方程的数目和自由度数是一致的。在建立运动方程时不会出现理想约束力，只考虑已知的主动力。此法是以能量的观点建立方程式的，只需从动能和广义力的角度对系统进行分析就可建立数学模型。法大大简化了建模过程，适应于高阶复杂的倒立摆系统，同时适应于复杂的动力学系统的数学建模。

#### (2) 牛顿力学法

牛顿力学法是通过倒立摆系统中的小车摆杆在水平平面和垂直平面做受力分析，建立力矩平衡方程。然后对建立的方程进行数学分析即可得到系统的数学模型。显然，此方法有大量的微分计算，如果考虑的约束条件很多，建模会更加复杂。所以此法适应于低阶理想的倒立摆系统。

对于倒立摆系统，由于其本身是自不稳定的系统，实验建模存在一定的困难。但是忽略掉一些次要的因素后，可以在惯性坐标系内应用经典力学理论建立倒立摆系统的动力学方程。本次课程设计采用牛顿—欧拉方法建立一阶环形倒立摆系统的数学模型。

### 3.2、一阶倒立摆模型的建立

一阶环形倒立摆系统的模型结构如图 3.1 所示，在忽略各种阻力和摩擦的条件下，旋臂和摆杆可以抽象为的两个匀质杆，其中旋臂长度为  $r$ ，相对其水平方向零位的角位移为  $\theta$ ；摆杆质心与铰链距离为  $L$ ，相对其竖直方向零位的角位移为  $\alpha$ 。相应地，为旋臂角速度，为摆杆角速度。

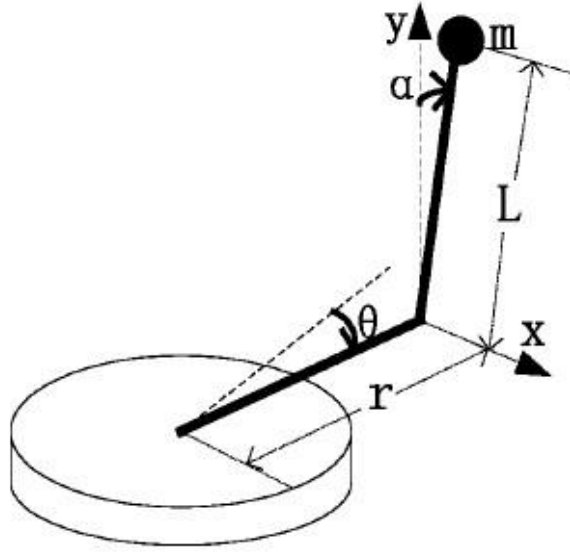


图 3.1 旋转倒立摆简化结构图

摆杆质心的速度由水平和竖直两个分量构成：

$$V_{\text{摆杆质心}} = -L\cos\alpha(\dot{\alpha})\hat{x} - L\sin\alpha(\dot{\alpha})\hat{y}$$

其中， $-L\sin\alpha(\dot{\alpha})\hat{x}$  表示摆杆质心的水平速度分量， $-L\cos\alpha(\dot{\alpha})\hat{y}$  表示摆杆质心的竖直速度分量。旋臂和摆杆一起运动，其沿水平方向 x 的线速度为：

$$V_{\text{旋臂}} = r\dot{\theta}$$

摆杆质心在 x 方向和 y 方向的速度分量为：

$$V_x = r\dot{\theta} - L\cos\alpha(\dot{\alpha})$$

$$V_y = -L\sin\alpha(\dot{\alpha})$$

应用 Lagrange 方程可推导出系统的动态方程。

以旋臂所在水平面为零势能面，则系统的势能 V 即为摆杆的重力势能，因此系统势能 V 可以表示为： $V=mgh=mgL\cos\alpha$ ，系统的动能由四部分因素构成，它们包括：旋臂在水平面内的转动，摆杆在竖直平面内的转动，摆杆质心沿 x 轴方向的速度、沿 y 轴方向的速度，对应的动能分量这里分别  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  用表示。即系统动能： $T=T_1+T_2+T_3+T_4$

$$T = \frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_p\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}m(r\dot{\theta} - L\cos\alpha(\dot{\alpha}))^2 + \frac{1}{2}m(-L\sin\alpha(\dot{\alpha}))^2$$

可推导出 Lagrange 函数：

$$L = T - V = \frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_p\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}mr^2\dot{\theta}^2 - mgL\cos\alpha - mLr\cos\alpha(\dot{\alpha})(\dot{\theta})$$

应用 Lagrange 方程  $L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q})$ ，其中  $L$  为拉格朗日算子， $q$  为系统的广义坐标， $T$  为系统动能， $V$  为系统势能。Lagrange 方程由广义坐标  $q_i$  和  $H$  表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i。$$

本系统中， $i=1, 2$ ； $q=\{\theta, \alpha\}$ ； $\theta$  为旋臂选中角度， $\alpha$  为摆杆旋转角度， $Q_i$  为系统沿广义坐标上的外力，可以得出方程组：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = T_{output} - B_{eq} \dot{\theta} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \end{cases}$$

其中  $T_{output}$  为直流电机的输出转矩， $B_{eq}$  为旋臂的摩擦系数。

$$T_{output} = \frac{n_m n_g K_t K_g (V_m - K_g K_m \theta)}{R_m} \quad (\text{电机输出转矩与电机输入电压关系})$$

我们讨论平衡问题时，可以把  $\alpha$  看作为 0，所以可以得到：

$$\begin{cases} (J_{eq} + mr^2) \ddot{\theta} - mLr \ddot{\alpha} = T_{output} - B_{eq} \dot{\theta} \\ J_p \ddot{\alpha} - mLr \ddot{\theta} - mgL\alpha = 0 \end{cases}$$

由上式可以得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 76.2884 & -0.568905 & 0 \\ 0 & 82.2655 & -0.239941 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 17.0842 \\ 7.20542 \end{bmatrix} V_m$$

$$A_1 = \frac{m^2 L^2 r g}{J_{eq} J_p + J_{eq} m L^2 + J_p m r^2} ;$$

$$A_2 = - \frac{(J_p K_t K_m + m L^2 K_t K_m) (J_{eq} J_p + J_{eq} m L^2 + m r^2 L)}{R_m} ;$$

$$A_3 = \frac{m^2 L^2 r g + J_{eq} m g L}{J_{eq} J_p + J_{eq} m L^2 + J_p m r^2} ;$$

$$A_4 = -\frac{(mLrK_tK_m)(J_{eq}J_p + J_{eq}mL^2 + mr^2L)}{R_m};$$

$$B_1 = \frac{K_t(J_{eq}mL^2 + J_pmr^2)(J_q + mL^2)}{R_m};$$

$$B_2 = \frac{(J_{eq}J_p + J_{eq}mL^2 + J_pmr^2)mLK_tr}{R_m}$$

将系统的各个参数数值代进去，可得单级旋转倒立摆的线性化数学模型如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 76.2884 & -0.568905 & 0 \\ 0 & 82.2655 & -0.239941 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 17.0842 \\ 7.20542 \end{bmatrix} V_m$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m$$

系统建模过程中各参数的物理意义及数值大小表如表 1.1 所示。

表 3.1 系统建模过程中各参数的物理意义及数值大小表

参数符号	物理意义及单位	数值
r	电机轴距倒立摆中心长度/m	0.0826
m	倒立摆摆件质量/kg	0.027
L	倒立摆摆件的质心位置/m	0.153
Jp	倒立摆相对于摆中心的转动惯量/ kg. m2	$1.7 \times 10^{-4}$
Jeq	作用于电机轴的等效转动惯量/ kg. m2	$1.84 \times 10^{-4}$
g	重力加速度/ $m/s^2$	9.81
Kt	直流电机电流转矩常数/ N. m/A	0.03334
Km	直流电机反电动势常数/ V. s/rad	0.03334
Rm	直流电机阻抗常数/ ohm	8.7
	电机角度编码器测量的倒立摆臂角度/rad	
$\alpha$	倒立摆上角度编码器测量的摆角度/rad	
	旋臂角速度/rad/s	
	摆杆角速度/rad/s	

### 3.3、倒立摆系统的控制方法

倒立摆位于平衡点附近偏移距离很小，系统可以用线性模型描述时，可以应用线性控制方法对倒立摆系统进行稳定控制。通过设计得到期望的控制器以满足要求的性能指标。典型的线性控制有 PID 控制、线性二次最优控制、状态反馈控制、滑模变结构控制、可拓控制算法等。

#### (1)PID 控制器

PID 控制器是发展及应用最早的控制方法之一。控制器十分适应于工程应用，设计方法和控制结构简单，并且不要求被控系统精确的数学模型，控制效果通常比较理想，所以控制依然是工业中应用最广泛的控制策略。PID 控制器由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成。通过  $K_p$ ， $K_i$  和  $K_d$  三个参数的设定。PID 控制器主要适用于基本线性和动态特性不随时间变化的系统。这个控制器把收集到的数据和一个参考值进行比较，然后把这个差别用于计算新的输入值，这个新的输入值的目的是可以让系统的数据达到或者保持在参考值。和其他简单的控制运算不同，PID 控制器可以根据历史数据和差别的出现率来调整输入值，这样可以使系统更加准确，更加稳定。可以通过数学的方法证明，在其他控制方法导致系统有稳定误差或过程反复的情况下，一个 PID 反馈回路却可以保持系统的稳定。

但是，由于 PID 参数的选择通常使用尝试法确定，主要依赖于设计者的工程经验，所以往往很难获得最佳的控制方案。

#### (2)线性二次最优控制(LQR 控制)

线性二次最优控制是现代控制理论的重要组成部分之一。在不断地探索中，人们发现两条最有效的求解最优控制问题的途径：极大值原理、动态规划。前者源于前苏联学者庞特里亚金，后者是美国学者贝尔曼发明的。线性二次最优控制实质上属于线性反馈控制的范畴，是通过寻求最优的反馈控制律实现闭环系统的最优控制。也就是寻求使得下述的性能指标达到最小。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

虽然二次最优控制的理论已经得到了成熟的发展，但是实际应用中依然存在一些问题，其中最关键的莫过于二次性能指标中加权阵  $Q$  和  $R$  的选取。通常研究人员通过分析多次调试找到允许的加权阵，但是根据经验选择很难找到最佳的矩阵  $Q$  和  $R$ 。

#### (3)滑模变结构控制

1959 年，Adronov 首次发表关于变结构控制的论文，至今已经形成为一种学

科体系。变结构控制系统以原点为平衡点，滑动模态决定了系统暂态过程中的特性。在滑动模态运动中系统的动态过程与原系统的参数无关，仅于切换函数的参数有关。因此，变结构控制对系统结构不确定性和外部干扰具有完全鲁棒性，并且变结构控制器设计简单，易于实现应用于实际工程中。滑模控制已经应用于很多领域，如电网系统的控制，机器人手臂控制，航空航天系统中的飞行控制等。目前变结构控制发展的新趋势是与其他控制方法相结合，形成新的控制方法。此外，高为炳教授对变结构控制的研究做出了杰出的贡献，率先提出了趋近律的概念。

#### (4)可拓控制算法

可拓控制是在蔡文等学者提出的可拓学的基础上提出来的，以信息转换的角度去分析控制问题的理论与方法。可拓控制是以控制输入信息的关联度（合格度）作为分析计算控制输出校正量的依据。进行可拓变换后，能够使被控参数转移到合格范围内，由此就解决了控制系统中需要控制和不可控之间的矛盾问题。

目前国内外对可拓控制的研究还处于初始阶段，成果还不多，但已经建立了可拓控制的基本理论和方法，随着研究的不断深入，它将会成为人们解决复杂控制问题的一种有效方法。

#### (5)其他控制方法

如模糊控制，神经网络控制，遗传算法，云模型控制等。

为了切合所学知识与熟悉 PID 整定过程，本次课程设计选用了 PID 控制，控制模式为双回路 PID 控制。

### 3.4、项目总体设计

倒立摆系统的控制是通过给直流电机相应的电压值来完成起摆和稳摆功能。控制的实际参数为摆臂角度，为了防止绕线情况的发生，引入了旋转臂角度的控制。在控制之前，我们应该先从对象（即一阶倒立摆系统）处测量获取被控量的数据信息，即获取摆臂角度大小和旋转臂角度大小；然后将摆臂角度和旋转臂角度的值进行标度变换，得到与控制模块统一的数据值；通过对摆臂角度大小的判断来决策程序进行起摆还是稳摆，在起摆和稳摆过程中，通过对旋转臂角度的控制来避免“绕线”情况的发生；最后将计算出的电压值输出到电机，实现对倒立摆系统的控制。总体流程图如图 3.2 所示。



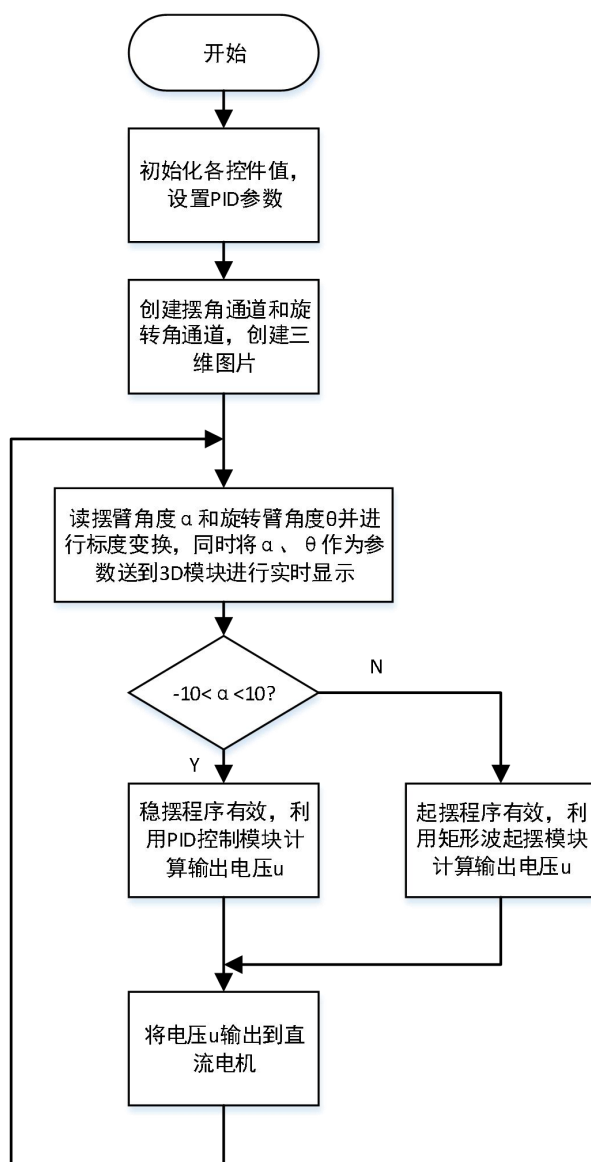


图 3.2 系统总体设计流程图

### 3.5、前面板设计

前面板是人机交互的窗口，优秀的前面板布局会让用户获得良好的使用体验。本次课程设计的前面板如图 3.3 所示，主要分为参数设置区、被控量变化曲线即电压输出曲线、3D 实时显示和停止 4 个部分，图片上中是参数设置区，主要完成起摆参数、稳摆参数、PID 参数的设置，其中 PID 参数的设置也是后续调试中提到最多的部分。右上是系统停止区，用于停止整个系统的运行。左下是被控量变化曲线即电压输出曲线，用于实时监控摆角、旋转角及输出电压的大小。右下是倒立摆系统的 3D 模型实时显示，用于在线远程监控。整个前面板以明亮淡雅的浅蓝色为底色，给人温馨舒适的享受，并用区别度较大的颜色突出各个模

块，最重要的停止按钮则用红色警戒色来装饰，一目了然。整个前面板显得简洁轻快，让人赏心悦目。



图 3.3 系统前面板设计展示

### 3.6 功能模块设计

本次课程设计共有 14 个 VI，其中 1 个主 VI，13 个子 VI。主 VI 是系统整体控制的具体实现，由子 VI 进行逻辑配合搭建而构成，各 VI 按照总体设计流程图进行组合实现。子 VI 为具体某一功能的实现，包括旋转角/摆角通道创建、旋转角/摆角读取、3D 创建、标度变换、摆角大小判断、计算输出电压值、给电机输出电压等。由于限于篇幅，此处只对其中几个子 VI 进行具体介绍。

#### 3.6.1 旋转角/摆角通道创建

旋转角和摆角通道的建立如图 3.4、图 3.5 所示。摆臂角度编码器安装在摆臂与旋转臂的结合处，用于检测摆臂角度。其型号为 US Digital S1-1024-250-N-B-D，为 1024 线光学编码器，经 A、B 相 4 倍频后，相当于每旋



码器读出值后将脉冲数转为角度值才可以被输入到 PID 控制器。具体代码实现如图 3.6、图 3.7 所示。其中 task/channel in 和 task out 2 都是任务输入（一般来自于通道创建子 VI 的任务输出），error in 和 error out 皆为错误簇输入（一般来源于上一 DAQ 函数的错误簇输出）。

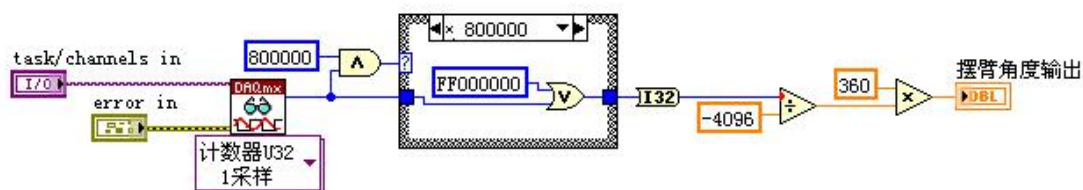


图 3.6 摆角读取子 VI

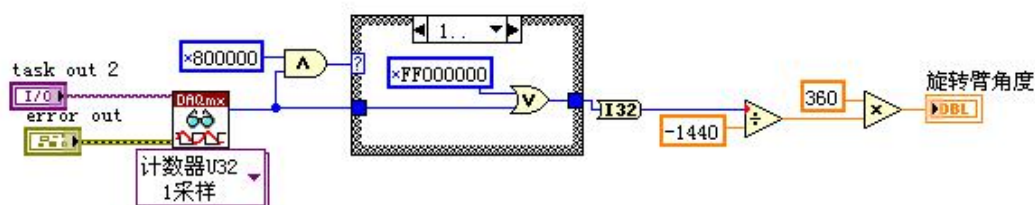


图 3.7 旋转角读取子 VI

### 3.6.3 标度变换

通过摆角读取子 VI 读出的摆角值可能会超出摆角规定范围 ( $-180^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ), 所以在传入控制模块前要先对摆角值进行标度变换。具体过程为, 当摆角大于  $180^{\circ}$ , 则将摆角减去  $360^{\circ}$ , 即认为摆角正向旋转过了一圈。当摆角小于  $-180^{\circ}$ , 则将摆角加上  $360^{\circ}$ , 即认为摆角反向旋转过了一圈。具体实现如图 3.8 所示。

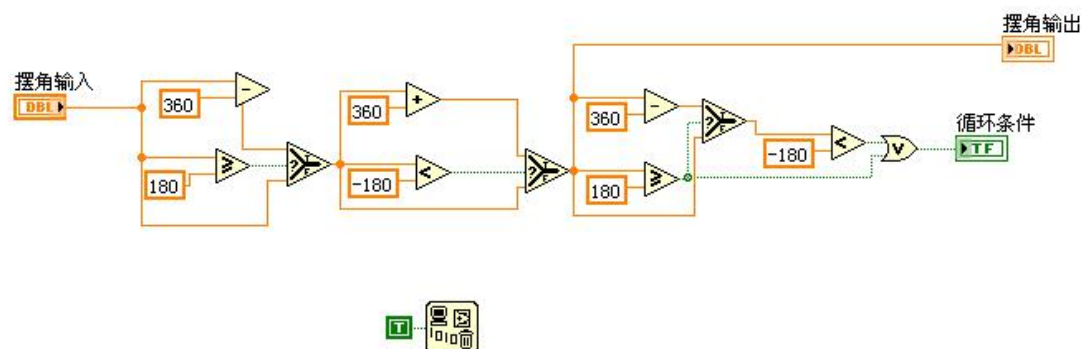


图 3.8 标度变换子 VI

### 3.6.4 给电机输出电压

无论是稳摆是控制器算出的电压还是起摆时算出的电压，最后都要输出到直流电机才能实现对倒立摆系统的控制，所以给电机输出电压子 VI 是最重要的一环。利用 DAQmx 创建通道函数来将物理通道和 DAQ 通道关联，设置 DAQmx 创建通道函数的模式为 AO 电压，DAQmx 创建通道函数物理通道端接 NI ELVIS 实验平台物理通道的模拟量电压输出端口 0（即 Dev3/ao0）。再接一个 DAQmx 开始任务函数、一个 DAQmx 写入函数。DAQmx 写入函数的模式设置为模拟 DBL1 通道 1 采样，将要输出的电压值接到 DAQmx 写入函数的数据端即可。具体实现如图 3.9 所示。

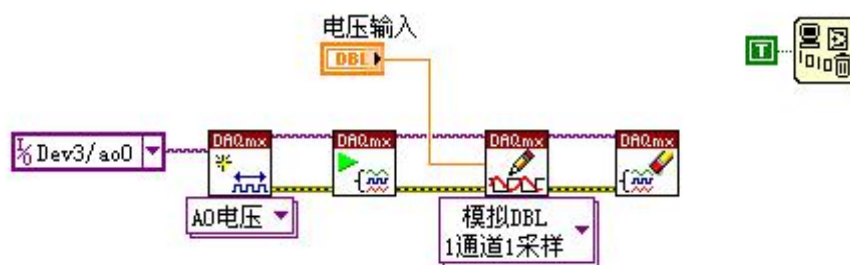


图 3.9 给电机输出电压子 VI

### 3.6.4 起摆和稳摆条件判断

前面提到，起摆和稳摆的选择是根据摆臂角度的大小来决策的，当摆角值不在  $(-10^\circ, 10^\circ)$  范围内时，认为系统暂时无法依靠惯性达到平衡位置，此时继续启用起摆程序。当摆角值在  $(-10^\circ, 10^\circ)$  范围内时，认为系统已经可以依靠惯性达到平衡位置，此时继续启用稳摆程序。具体实现见图 3.10、图 3.11。

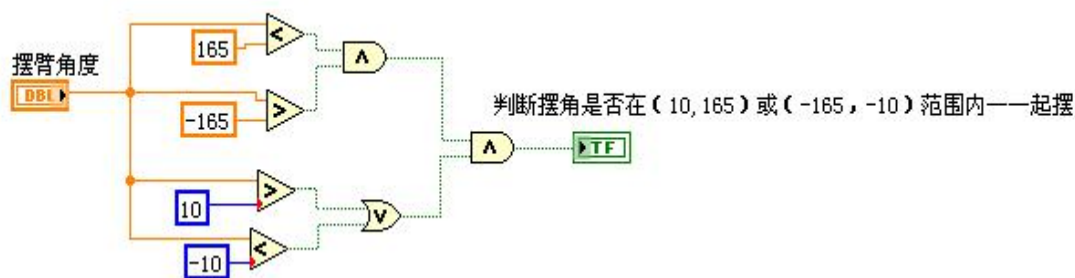


图 3.10 起摆判断子 VI



图 3.11 稳摆判断子 VI

## 第四章 系统调试与总结

### 4.1 PID 参数整定

在整个系统调试中，PID 参数的整定是最麻烦也是最花费时间的环节。由于采用的是双闭环控制，所以 PID 的参数整定更加麻烦。常规 PID 控制系统主要由广义被控对象和控制器两部分组成。PID 控制的过程为：控制系统在输入端将输入值与输出值做差，得到系统偏差，对偏差进行比例、积分和微分运算，将三种运算的结果分别给予相应增益处理，再将处理后结果相加得到总的控制量，再对被控对象进行控制，构成 PID 控制器。PID 控制是基于对偏差“过去”、“现在”和“未来”信息估计的一种线性控制算法。常见模拟 PID 控制系统如图 4.1 所示。

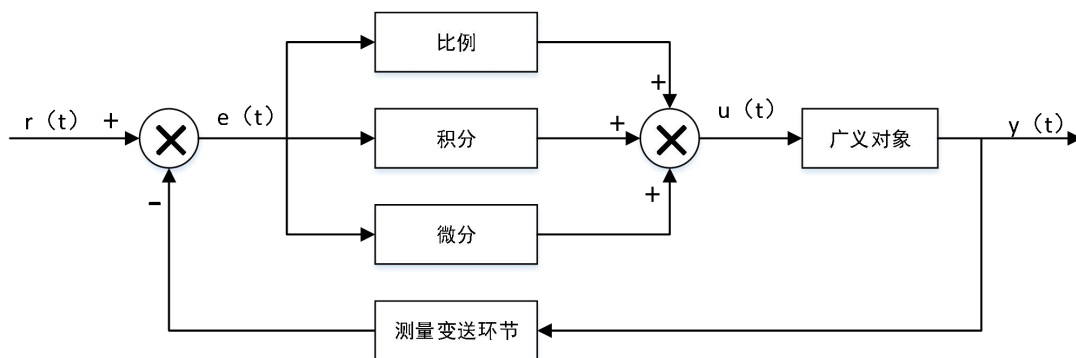


图 4.1 PID 控制系统原理框图

PID 控制器的输出  $u(t)$  是系统误差  $e(t)$  分别经过各环节处理后线性结合的关系，表达式如下：

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (4-1)$$

其传递函数形式通常为：

$$U(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) E(s)$$

(4-2)

式中,  $e(t)$ 、 $r(t)$ 、 $y(t)$ ,  $p_k$  是比例增益,  $iT$  是积分时间,  $dT$  是微分时间。

在数字控制系统中, 通常采用增量式 PID 控制算法。这时, 控制器的输出与输入之间的关系为:

$$u(kT) = k_p \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e(kT - T)] \right\} \quad (4-3)$$

其中:  $pK$ 、 $iT$ 、 $dT$  分别为比例系数、积分时间常数和微分时间常数;  $T$  为采样周期;  $k$  为采样序号,  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $u(kT)$  为第  $k$  次采样输出值,  $e(kT)$  为第  $k$  次采样输出偏差值,  $e(kT - T)$  为第  $k-1$  次采样输出偏差值。增量式 PID 控制的主要特点是: 计算机中的执行机构具有记忆功能, 在外界环境改变的情况下不会影响系统状态, 增量式 PID 控制输出数值小, 误动率小, 控制方式转换时可以平稳过渡。

PID 控制器中的共有三个参数, 分别为比例系数、积分时间常数和微分时间常数。这三个常数对系统的动态和稳态性能有不同的影响, 这三个参数的取值直接决定 PID 控制系统的控制效果。

#### (1) 比例系数

比例作用线性反映系统的偏差信号  $e(t)$ , 偏差产生以后, 以最快速度来产生控制作用, 减小偏差。比例作用体现了 PID 控制的快速性, 比例控制参数  $K_p$  越大, 控制系统的动作越快, 振荡次数越多, 调节时间变长。当  $K_p$  过大时, 系统会趋于不稳定, 若  $K_p$  过小, 将导致系统动作过慢, 调节时间变长。

#### (2) 积分时间常数

积分作用主要是为了消除稳态误差。积分作用体现了 PID 控制的准确性, 对系统的性能影响主要表现如下: 积分作用会影响系统的稳定性,  $T_i$  太小, 系统稳定性降低,  $T_i$  偏小到一定程度时, 系统会出现振荡;  $T_i$  太大, 对系统性能的影响力会降低, 只有当  $T_i$  合适时, 才有比较理想的过渡特性。

#### (3) 微分时间常数

微分作用体现了 PID 控制的稳定性, 根据误差信号的变化趋势, 通过提前动作改善闭环系统的动态特性。 $T_d$  偏大时, 会有较大超调量和较长调节时间;  $T_d$  偏小时, 超调量也较大, 相应调节时间也就会很长。

本次课程设计是基于继电反馈控制的 PID 参数整定方法实现对 PID 参数的整定。基于继电反馈控制的 PID 参数整定方法是目前应用较为广泛的一种方法, 也称为继电自整定法, 该方法由 Astrom 和 Hagglund 在 1984 年提出, 它的设计思想是在继电反馈下观测被控对象的极限振荡, 得到被控对象的特征参数, 根据给定公式计算 PID 的控制参数。通过引入继电反馈环节, 该系统存在



测试和工作两种状态，控制开关切换到测试状态时，系统输出稳定的震荡，可以得到振荡周期  $C_T$  和临界震荡比例增益  $C_K$ ，当控制开关切换到控制状态时，由特征参数  $C_T$  和  $C_K$  计算出 PID 控制参数进入控制过程。

## 4.2 实验中遇到的问题及解决方法

### （1）读摆臂值的物理通道找不到

问题描述：在按照实验指导书进行一阶旋转倒立摆编码器读取与电机控制实验时，发现摆臂的物理通道始终无法读到数据。把所有的位口都试过，没有任何反应。

解决过程：经老师与学长的检查，发现是编码线出了问题，之后欢乐一条编码线，从 1 号通道的 2 号位口读到了数据（即 `ctrl1/PFI2` 口）。

### （2）输出电压到电机发现电机不动

问题描述：在向电机输出电压时，发现电机不会转动，但电压值在标准（-4V，4V）范围，而且通过电压实时显示可以看到电压是有输出的。但电机始终不动。

解决过程：经过思考和查阅资料，突然醒悟是忘了实际系统存在死区的问题，经测量发现死区范围为（-1.5V，1.5V）。在对输出电压进行避开死区调整后，电机按给定电压进行正反转，实验结果与预期一致。

### （3）在控制过程中出现了绕线现象

问题描述：在对倒立摆进行控制时，旋转臂会往一个方向转，出现绕线现象，且系统很快崩溃，无法进行下去。

解决过程：在刚开始控制时，采用的是单闭环的控制，被控量只有摆臂角度，未对旋转臂的旋转角度进行限制，从理论上来讲这种单被控量是可以实现倒立摆的控制的，但经分析发现，若要完成控制，需要旋转臂往一个方向绕很多圈，在不考虑摆角编码线存在的情况下，此控制方案是满足要求的，但由于摆角编码线的存在，此方案是无法实现倒立摆的控制的。所以采用了双闭环的控制，同时对旋转臂和摆臂进行角度控制，使旋转臂的角度始终在（ $-180^\circ$ ， $180^\circ$ ）之间（加起来刚好一圈  $360^\circ$ ），如此一来便避免了绕线情况的发生。

### （4）3D 实时显示是静态的

问题描述：在运行程序后，发现 3D 实时显示模块是完全静态的，仅有一个倒立摆的模型，而不会随系统的运动而实时显示。

解决过程：在和同学沟通时发现，自己并未将从 NI ELVIS 读进来的摆臂角度和旋转臂角度实时送到 3D 显示模块，所以整个模块是静态的，在将 3D 模块在主程序中循环调用，并将实时采集到的摆臂角度和旋转臂角度给到 3D 模块后，3D



实时显示可以实时显示系统的状态。

#### (5) 3D 实时显示只有旋转臂转动

问题描述：在运行程序时，发现虽然 D 实时显示可以实时跟踪系统的状态，但只有旋转臂在实时跟踪运动，而摆臂始终竖直向下。且摆臂变化曲线是有变化的。

解决过程：在检查了 3D 实时显示模块后发现，在设定旋转轴参数时将摆臂和旋转臂参数设置为同一参数，而实际上旋转臂是绕 z 轴旋转，而摆臂是绕 x 轴旋转。二者的中心轴不同，自然参数不应一致。

#### (6) 由于 PID 参数的不准导致无法得到预期结果

问题描述：由于 PID 参数的难以整定，所以在参数设置上有较大缺陷，按照前文介绍的方法得到了大致的 PID 参数，但实际运行效果却不尽人意。倒立摆的起摆和稳摆始终无法很好结合。

解决过程：由于整个控制过程是一个动态平衡、快速跟踪的过程，所以最重要的指标是快速性。所以在设计时没用积分作用（积分消除余差的作用用不到）整个过程是对  $K_p$ 、 $T_d$  的整定。将控件增量设置为 0.01，分别测试多组 PD 组合的性能。并进行横向对比，最后确定最好的一组或几组参数。

## 4.3 设计体会与建议

倒立摆的控制本身就较难，被控变量多，非线性强，还有耦合，整个系统是一个较为复杂的过程。尽管是最容易的一阶倒立摆的控制，从最初的建模到控制器的设计，再到参数的整定、界面的设计，最后实现对倒立摆的控制。整个过程是非常有意义的，在此期间我也学到了很多。主要的收获可分为以下三点。

首先，这是虚拟仪器的课程设计，用到的一切工具都是虚拟仪器的相关知识。通过此次课程设计，不仅加深了对一些基础知识的掌握，如控件的使用、函数的必要接入端、局部变量全局变量的使用、子 VI 等；还通过自学掌握了许多老师课堂上未曾讲过的知识，如 3D 建图、平移、旋转、缩放。真正经历了一个工程项目的整个过程。使用了之前不太重视的冷门知识，如颜色的设置、组合、前后背景色等。通过此次课程设计，使得我在虚拟仪器的使用上上了一个台阶，能力得到了提升。

其次，为了完成此次课程设计，在开题时下载了二十余篇有关倒立摆控制的论文，通过阅读论文观看别人是怎么处理问题的，用的什么方法，有什么新奇之处。然后理出自己的思路与想法，明确采用何种控制模式，控制器要如何设计；各参数要如何匹配。在阅读论文的过程中，自身的素养得到了很大提升，一些论

文中提到的思想和独特的见解让自己拓宽了眼界。在模型建立的过程中看到了几种截然不同的建模方式，但最后的模型都大同小异，这十分让人惊叹。

最后，因为正好这学期在学习过程控制，所以 PID 控制器的设计与参数的整定对我来说意义非凡，此次课程设计就是一个平台，一个让我展示所学所想的平台，通过对实际系统的 ID 控制器的设计和参数整定与分析，让我可以将自动控制原理和过程控制中学到的知识一一试验，既加深了对相关知识的理解，还让自己熟悉了实际工程系统设计的基本流程。

总体来说，本次课程设计让我获益良多，此间涉及到的知识面特别广，又是我们专业特别核心的控制知识，包括 PID 控制器的设计，参数的整定，实际工程中如何投用 PID 控制等。通过此次课程设计，虽然不敢说对以上知识点能熟练使用，但可以说对上述知识点有了更深的了解，有了利用以上知识来解决实际问题的经历与经验。除此之外，对虚拟仪器知识的掌握和对 labview 软件的使用都更上一层楼。

## 参考文献

- [1] 张东军, 从爽, 秦志强倒立摆控制系统研究综述[J], 控制工程 2003,10 (7) 9-13
- [2] 尤丽华, 周洋. 基于虚拟仪器的测试技术实验教学系统建立 [J] . 实验技术与管理, 2011, 28( 2) : 83—86.
- [3] 刘瑞歌, 宋锋. 基于虚拟仪器技术的自动控制原理教学实验平台 [J] . 自动化与仪器仪表, 2011( 4) : 171—173.
- [4] 孙斌, 赵玉晓, 张新娜. 基于虚拟仪器的自控原理实验教学软件开发 [J] . 实验技术与管理, 2012, 29( 5) : 105—108.
- [5] 吴震宇, 方敏, 丁康. 基于 LabVIEW 的二级倒立摆控制系统三维仿真 [J] . 合肥工业大学学报( 自然科学版) , 2011, 34( 10) :1480—1484.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理 [M] . 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 孙灵芳, 孔辉, 刘长国, 等. 倒立摆系统及研究现状 [J]. 机床与液压, 2008, 36( 7) : 306-310.
- [8] 杨世勇, 徐莉苹, 王培进. 单级倒立摆的 PID 控制研究 [J] . 控制工程, 2007( 14) : 26-30.
- [9] 张伟, 王亚维, 洪权, 等. 基于倒立摆系统的自控原理实验设计 [J] . 中国现代教育装备, 2010, 15( 39) : 35-39.
- [10] 刘丽, 何华灿, 倒立摆系统稳定控制之研究计算机科学, 2006,33(5):214-218
- [11] 刘微微, 张静单级倒立摆控制方法的鲁棒稳定性分析黑龙江水专学报, 2010,37 (2) :105-108