

基于 PID 参数优化的弹性系统控制器 设计

参赛者：解永超、许明宇、赵康

指导老师：赵永瑞

学校：中国石油大学（华东）

摘要

由直流电机驱动的弹性扭转系统，其稳态电压对噪声比较敏感。可以由机理建模法建立系统的数学模型，然后对不能直接测出模型参数，利用 Matlab 系统辨识工具箱进行估计得出比较准确的系统参数。PID 控制器是应用十分广泛，灵活方便的控制器，但是人工整定 PID 参数非常困难，并且需要技术人员很好的经验，在此借助 Matlab 的 PID 参数优化工具箱，通过设定合适的约束和目标要求，可以计算出合适的 PID 参数，使弹性系统得到很好的控制效果。

关键词：弹性系统 机理建模 系统辨识 设计最优化 PID

Abstract

The elastic system driven by a DC motor can establish the mathematical model of the system with mechanism modeling method , and then we use Matlab system identification toolbox to estimate the model parameters that can not be measured directly and calculated the parameters of the system. The PID controller is in wide application, It's convenient and flexible. But the manual tuning PID parameters is very difficult, and needs for technical personnel experience. By means of Matlab optimization toolbox, setting the appropriate constraints and objectives and requirements, appropriate PID parameters can be calculated. And in this way the elastic system could be controlled almost perfectly.

Keywords: elastic system, mechanism modeling method, system identification, design optimization, PID

目录

1.对象特性分析及建模.....	4
1.1 模型假设:	4
1.2 模型主要参数说明.....	4
1.3 电机及质量块 1.....	6
1.4 弹簧及质量块 2.....	7
1.5 系统模型在 Matlab/simulink 中的构建	7
1.6 模型参数校准.....	8
1.6.1 对原模型硬件部分进行封装.....	8
1.6.2 输入数据.....	8
1.6.3 选择要进行估计的参数.....	9
1.6.4 开始.....	9
2.控制器设计及控制器的参数整定.....	10
2.1 控制器设计.....	10
2.1.1 控制器的选取.....	10
2.1.2 控制器的原理.....	10
2.1.3 控制器的特性.....	10
2.2 PID 参数优化	10
2.2.1 工作原理.....	10
2.2.2 参数设置.....	11
2.2.3 束缚及目标要求.....	12
3.控制器代码转换与控制结果.....	12
3.1 控制器代码转换.....	12
3.1.1 编辑自动生成代码的 Simulink 模型	12
3.1.2 打开 AS 并创建一个新项目	12
3.1.3 代码转换设置及转换结果.....	12
3.2 控制结果.....	13
3.2.1 添加附加程序与变量.....	13
3.2.2 与硬件实现连接, 采集控制结果.....	14
3.2.3 控制结果分析与结论.....	14

1 对象特性分析及建模

控制对象由直流电机、减速器、联轴器、质量块 1、弹簧、质量块 2 组成(图 1-1)。质量块 1 和质量块 2 之间由弹簧连接。在质量块 1 和质量块 2 的右侧分别装有光电编码器，用于测量两个质量块的位置。由于弹簧的柔性，使得质量块 2 的启动和步调滞后于质量块 1，在转动过程中质量块 2 产生大的波动，在较长的一段时间内不能达到稳定状态。

弹性系统有两个质量块和一根弹簧，其数学模型比较容易建立，较为复杂的是直流电机的模型建立。由于机理建模法可以形象的表现实际系统的每一部分的关系及状态，所以在此采用机理建模法对整个被控对象进行建模。

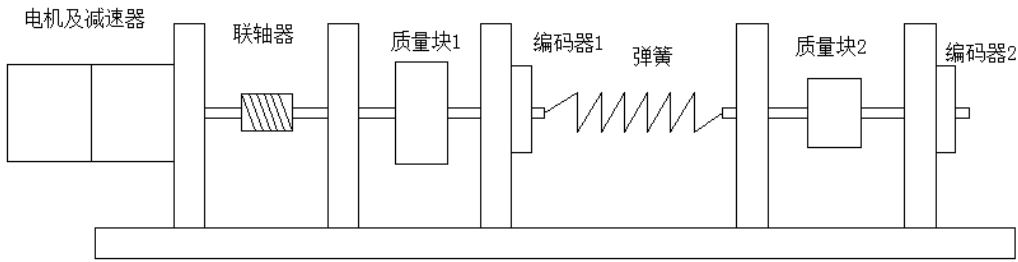


图 1-1 被控对象简图

1.1 模型假设

- (1) 电机为碳刷直流电机；
- (2) 忽略联轴器的转动惯量对系统的影响；
- (3) 将质量块与轴承之间的摩擦系数定为常数，不考虑速度、温度、湿度等变化对其的影响。

1.2 模型主要参数说明

1.2.2 质量块及弹簧参数

符号表示	数值	物理意义
J_1	4.6630×10^{-5}	质量块 1 转动惯量
J_2	1.5865×10^{-5}	质量块 2 转动惯量
f_1	—	质量块 1 的静摩擦阻力矩
f_2	—	质量块 2 的静摩擦阻力矩
K	—	弹簧扭转系数
a_2	—	转子 2 的粘滞摩擦系数

1.2.1 电机减速器参数

符号表示	数值或公式	物理意义
J_0	1.4×10^{-6}	电机转子与减速器在电机轴上的等效转动惯量之和
I	14	减速器传动比
L	1.95×10^{-4}	电机电感
J	$J_1/I^2 + J_0$	等效在电动机轴上的转动惯量，包括电机转子，减速器，质量块 1
K_e	0.0027	电机反电动势常数
K_m	0.0258	电机转矩常数
R	2.36	电机电阻
U_d	24	输入电压
Z	—	电机，减速器，质量块 1 的合粘滞摩擦系数
T_m	$J \cdot R / (K_e \cdot K_m) \cdot \pi / 30$	系统机电时间常数
T_1	L/R	系统电气时间常数

符号表示	数值	意义
KP	—	比例系数
KD	—	微分系数
KI	—	积分系数
KN	—	滤波系数

1.2.3PID 参数

1.3 电机及质量块 1

为了方便建立数学模型，将电机、联轴器、质量块 1 放在一起，根据机械原理，建立机械系统的等效动力学方程，电机轴上的等效转动惯量：

$$J = J_0 + \frac{J_1}{I^2} \dots\dots\dots (1-1)$$

电机部分为 Maxon 空心杯直流有刷电机及行星齿轮减速器组合，在额定励磁下的等效电路如下图所示

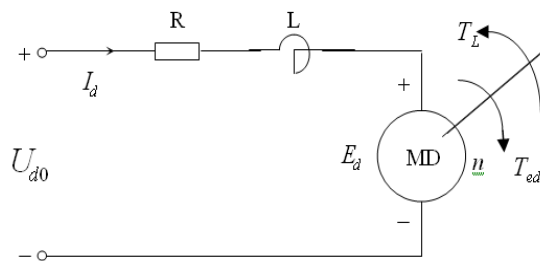


图 1-2 他励直流电动机在额定励磁下的等效电路

对电枢回路，可以列如下电压平衡方程。

电枢两端电压： $u_{d0} = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + E_d \dots\dots\dots (1-2)$

在零初始条件下，取拉氏变换

$$U_{d0}(s) = (R + Ls)I_d(s) + E_d(s) \dots\dots\dots (1-3)$$

电动机轴上的动力学方程 $T_{ed} - T_L = J \frac{dn}{dt} \dots\dots\dots (1-4)$

额定励磁下的负载转矩和电磁转矩，以及转速和反电动势之间的关系分别为

负载转矩： $T_L = C_m I_L \dots\dots\dots (1-5)$

电磁转矩： $T_{ed} = C_m I_d \dots\dots\dots (1-6)$

转速： $n = E_d / C_e \dots\dots\dots (1-7)$

将式 (5) (6) (7) 带入式 (4)，并取拉氏变换可得

$$C_m [I_d(s) - I_L(s)] = JsE_d(s) \dots\dots\dots (1-8)$$

将式 (3) (7) (8) 整理后可得：

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E_d(s)} &= \frac{1/R}{T_L s + 1} \end{aligned} \right.$$

$$N(s) = \frac{1}{K_e} E(s)$$

$$\frac{E_d(s)}{I_d(s) - I_L(s)} = \frac{R}{T_m s}$$

由以上传递函数可以绘制直流电机的动态结构框图如图 1-2 所示

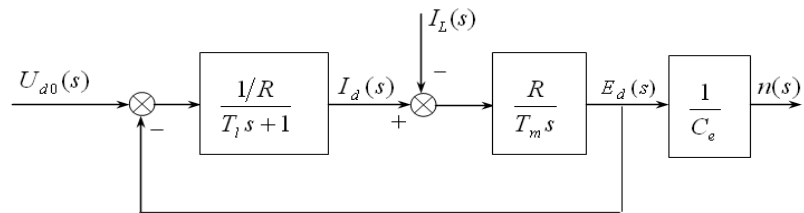


图 1-3 额定励磁状态下直流电动机的动态结构框图

1.4 弹簧及质量块 2

弹簧及质量块 2 动力学方程：

$$K(\theta_1 - \theta_2) - (\alpha_2 \frac{d\theta_2}{dt} + f_2) = J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} \dots\dots\dots (1-9)$$

拉氏变换：

$$K\theta_1(s) - f_2(s) = [J_2 s^2 + \alpha_2 s + K]\theta_2(s) \dots\dots\dots (1-10)$$

整理后得：

$$\frac{\theta_2(s)}{K\theta_1(s) - f_2(s)} = \frac{1}{[J_2 s^2 + \alpha_2 s + K]} \dots\dots\dots (1-11)$$

1.5 系统模型在 Matlab/simulink 中的构建

用 Matlab/simulink 进行建模整体模型如下：

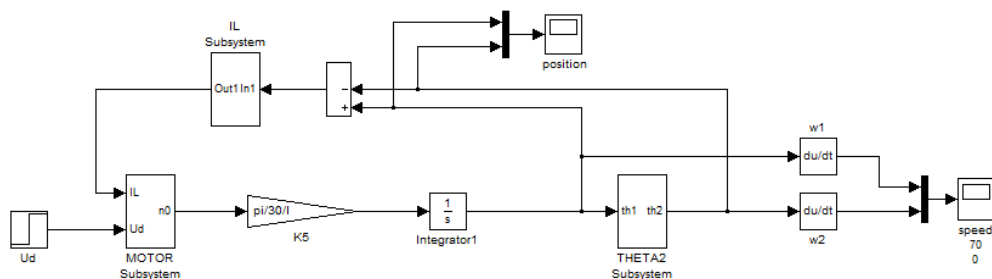


图 1-4 控制对象整体模型

其中有三个子模型如下图

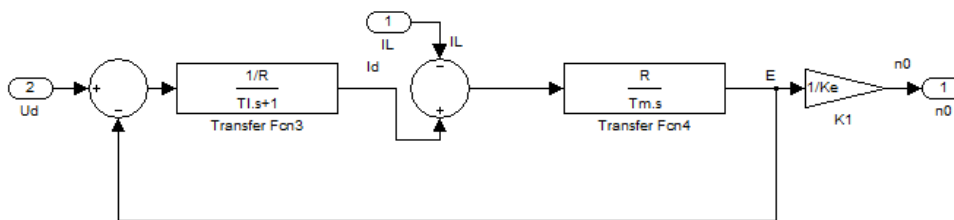


图 1-5 (1) 电机模型 MOTOR Subsystem

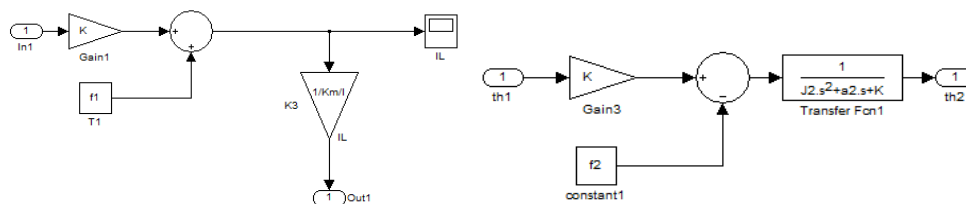


图 1-5 (2)负载电流 IL Subsystem (3) 弹簧质量块 2 模 THETA2Subsystem

1.6 模型参数校准

大多数模型参数可通过计算获得精准值，但还有部分参数比如弹簧扭转系数、转子的粘滞摩擦系数、质量块静摩擦阻力矩等无法通过计算得到精确值，影响模型的准确性，对此可利用 matlab 的模型参数估计工具 parameter estimation 来校准。

1.6.1 开环参数采集

对原模型硬件部分进行封装得到如图 1-5 模型。在 AS 中建立不加控制器的开环控制程序，以 75%电压对模型采集一组数据，得到对应输出 w1、w2，以 mat 文件保存。

1.6.2 输入数据

在 matlab 中导入已知参数及(1)中测得数据，打开模型参数估计工具，输入图 1-5 中系统的输入和输出（如图 1-6）。

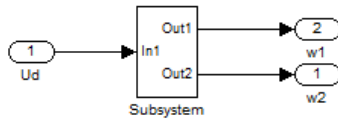


图 1-6 模型参数估计模型

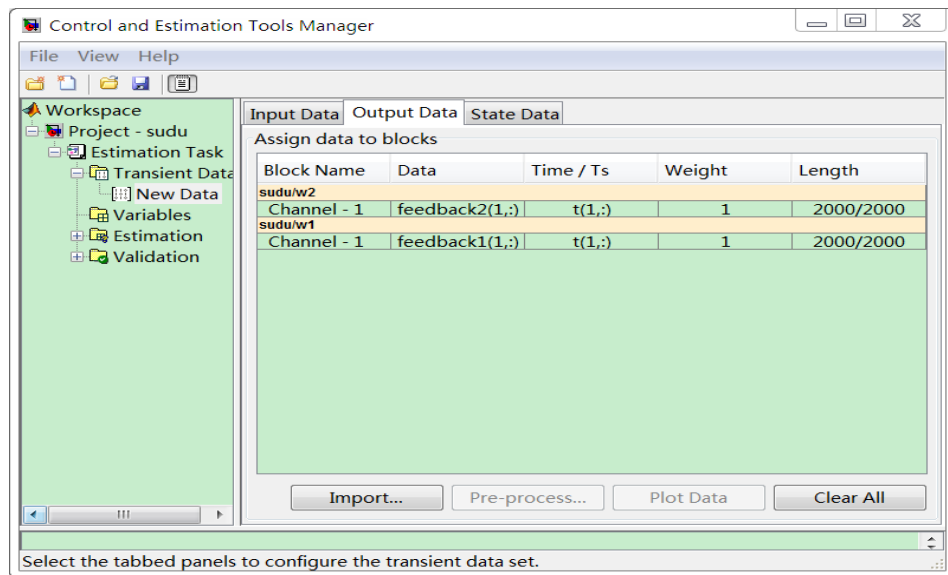


图 1-7 接口数据

1.6.3 选择要进行估计的参数

弹簧扭转系数 K ，转子的粘滞摩擦系数 a_2 ，质量块静摩擦阻力矩 f_1 、 f_2 ，电机、减速器、质量块1的合粘滞摩擦系数 Z 。并设定其估计范围以加快估计速度。

1.6.4 开始

点击 start 开始进行参数估计，则得到各参数估计值，将其导入原数据文件中。

2 控制器设计及控制器的参数整定

2.1 控制器设计

2.1.1 控制器的选取

在控制系统中，按照偏差的比例、积分和微分进行控制的 PID 控制器是最为常见的一种控制器。它具有原理简单、易于实现、鲁棒性强和适用范围光等优点。PID 控制器的参数相互独立，整定方便。

2.1.2 控制器的原理

PID 控制器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。

2.1.3 控制器的特性

(1) 比例系数 K_P

增大比例系数 K_P 将加快系统的响应速度，但是过大的 K_P 会是系统产生超调，并产生震荡或使震荡次数增多，使调解时间加长破坏系统的稳定性；若 K_P 选得太小，又会使系统动作迟缓。

(2) 积分系数 K_I

减小积分系数有利于减小超调，减小震荡，使系统更稳定同时延长系统消除静差的时间；增大 K_I 会降低系统的稳定性，增大系统的震荡次数。

(3) 微分系数 K_D

微分控制可以改善系统的动态特性，如减少超调量、缩短调节时间、允许加大比例控制、使稳态误差减小提高控制精度；但是 K_D 过大或过小系统的超调量依然很大调节时间仍然较长，只有当 K_D 比较合适时，才能得到满意的过渡过程。

2.2 PID 参数优化

用手工的方法调节 pid 参数难以获得较好的控制效果，在此使用 Matlab 设计最优化工具箱里面的参数整定工具 `signal constraint`。

2.2.1 工作原理

- (1) 任意选择初始点 $x_0 \in X$;
- (2) 在第 k 步迭代，得到迭代点 $x_k \in X$;
- (3) 对点 x_k ，解与之对应的辅助线性规划得到此规划的最优解 $F(x_k)$;

(4) 检验 $F(x_k) < e$ 是否成立，此处 e 为给定的允许误差，如果成立则停止迭代，否则转入下一步骤；

(5) 取 $Z(x_k)$ 作为迭代方程向量，在此方向上进行一维搜索，按照限制最小化规则决定步长参量，其中限制区间 $[0, S]$ ，使得任意 $a \in [0, S]$ ， $x = x_k + a * Z(x_k)$ ，都有 $x \in X$ ；

(6) 求点 $x(k+1) = x_k + a_k * Z(x_k)$ 并且以 $x(k+1)$ 取代 x_k ，回到步骤 2。

2.2.2 参数设置

如图 2-1 在原模型输出接 **signal constraint** 工具块，点击打开后可设定理想系统响应参数及 P、I、D、N 的范围（如图 2-2）。

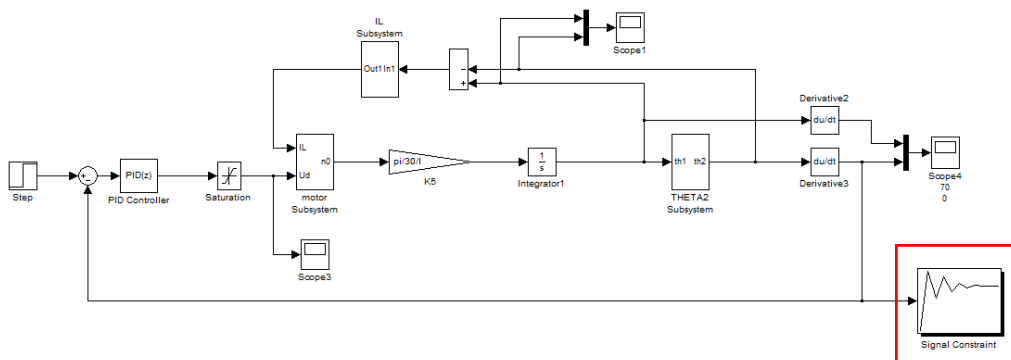


图 2-1 pid 最优化整定模型

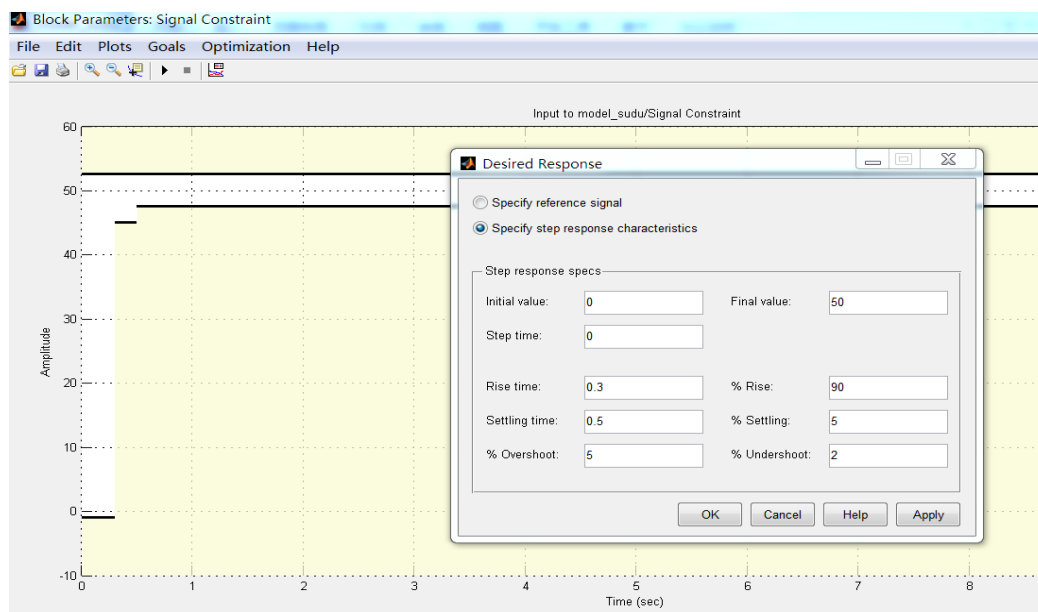


图 2-2 设定理想响应曲线参数

2.2.3 束缚及目标要求

设定好后进行最优化整定,可得到符合条件的响应曲线及对应 pid 参数 P、I、D、N。

3 控制器代码转换与控制结果

3.1 控制器代码转换

在 matlab 中使用 B&R automation studio toolbox 工具自动生成代码,可省去在 AS 中编程的麻烦。

3.1.1 编辑代码

编辑自动生成代码的 Simulink 模型如图 3-1。

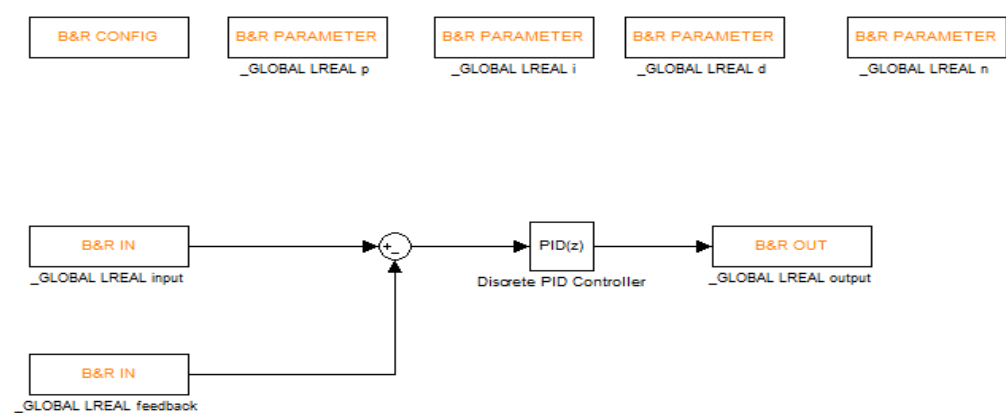


图 3-1 自动生成代码的 Simulink 模型

3.1.2 打开 AS 并创建一个新项目

项目名称为 plc, 添加控制器程序 pid 用来作为代码转换目标, 循环时间设为 0.005s, 添加所需库文件。添加系统硬件, 做好代码转换准备。

3.1.3 代码转换设置及转换结果

在 matlab 中设置好转换参数及位置, 完成代码转换, 则在 AS 中 pid 程序中出现转换结果程序(如图 3-2)。

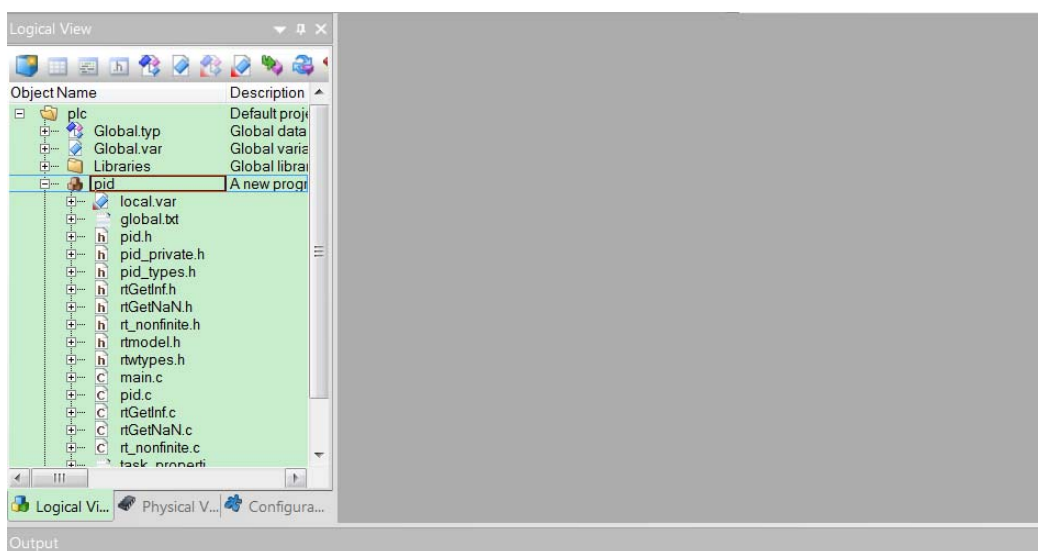


图 3-2 代码转换结果图

3.2 控制结果

3.2.1 添加附加程序与变量

(1) 添加 connect 程序，完成对采集数据的处理和变量之间的转换。在 connect 程序中添加滤波程序块，实现对反馈回路信号的滤波。

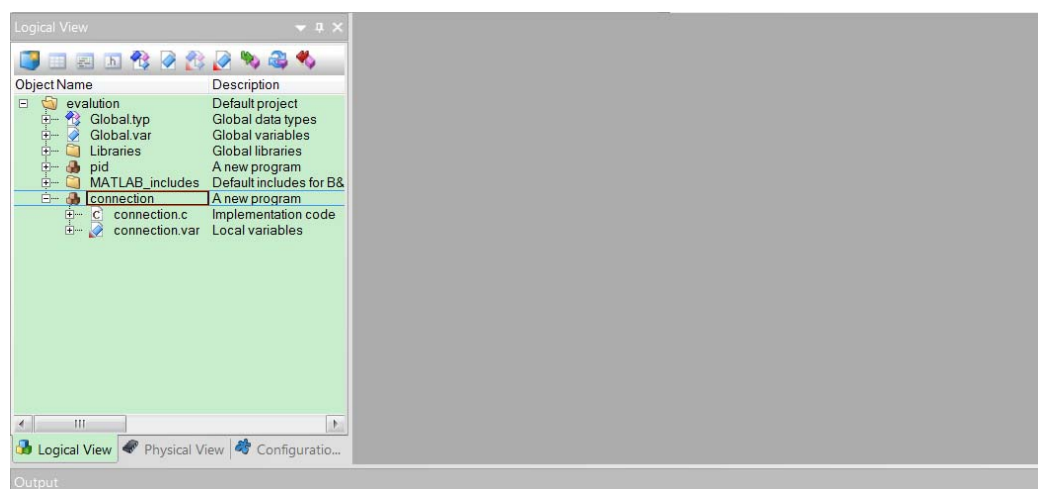


图 3-3 附加程序和滤波程序

(2) 添加所需全局变量，并将优化后的 pid 参数及各变量初始值带入其中（如图 3-4）。

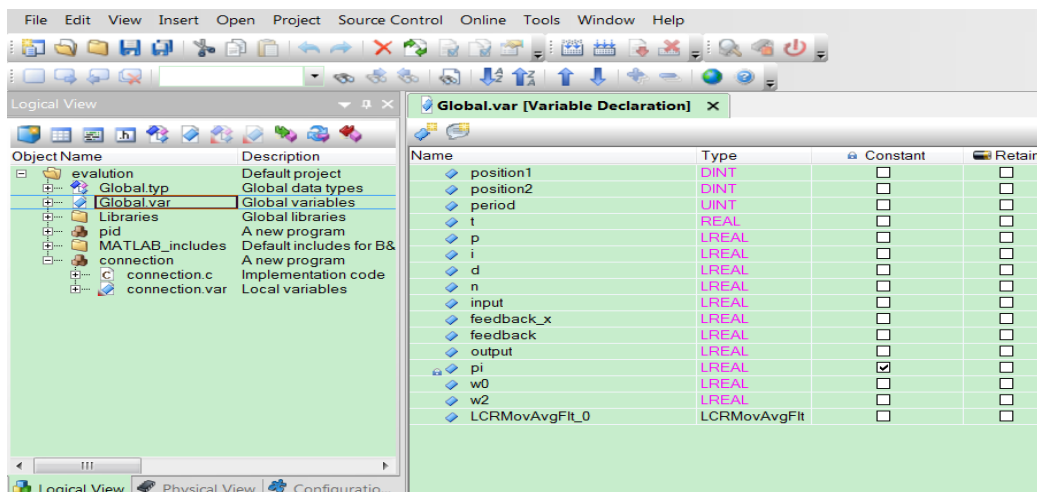


图 3-4 变量添加

3.2.2 与硬件实现连接，采集控制结果

- (1) 利用网线连接 plc 与电脑，编译程序，无误后下载到 plc 芯片上；
- (2) 打开 watch 模块，添加必要变量（输入速度 w0, pwm）进行监控；打开 trace 模块，添加变量（编码器 2 采集结果）进行追踪，追踪时间起点设为 w0 不为 0，采集时间为 1000 个数据点。
- (3) 在 watch 中进行目标速度设定，令 w0=2500，则系统开始运转，待系统稳定后，令 w0=0 使系统停止。

3.2.3 控制结果分析与结论

(1) 结果分析

Matlab 系统仿真结果（图 3-5）：可见系统无静差,最大超调在 5%内, 0.4s 内可达到预先控制要求。

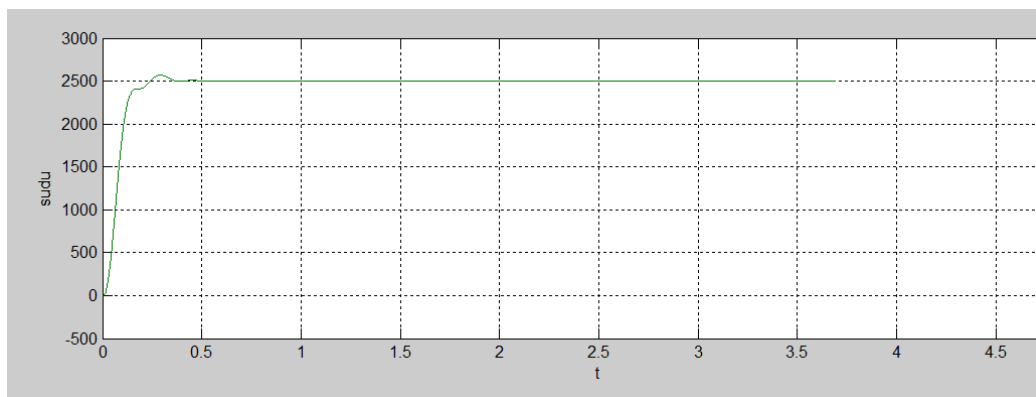


图 3-5 matlab 仿真速度响应曲线

对采集到的编码器位置量进行微分处理，即得到质量块 2 的实际速度响应