

1. 基础部分:

1.1. 自动控制系统分类

自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。

1.1.1. 开环控制系统

开环控制系统(open-loop control system)是指被控对象的输出(被控制量)对控制器(controller)的输出没有影响。在这种控制系统中,不依赖将被控量反送回来以形成任何闭环回路。

1.1.2. 闭环控制系统

闭环控制系统(closed-loop control system)的特点是系统被控对象的输出(被控制量)会反送回来影响控制器的输出,形成一个或多个闭环。闭环控制系统有正反馈和负反馈,若反馈信号与系统给定值信号相反,则称为负反馈(Negative Feedback),若极性相同,则称为正反馈,一般闭环控制系统均采用负反馈,又称负反馈控制系统。闭环控制系统的例子很多。比如人就是一个具有负反馈的闭环控制系统,眼睛便是传感器,充当反馈,人体系统能通过不断的修正最后作出各种正确的动作。如果没有眼睛,就没有了反馈回路,也就成了一个开环控制系统。另例,当一台真正的全自动洗衣机具有能连续检查衣物是否洗净,并在洗净之后能自动切断电源,它就是一个闭环控制系统。

1.1.3. 阶跃响应

阶跃响应是指将一个阶跃输入(step function)加到系统上时,系统的输出。稳态误差是指系统的响应进入稳态后,系统的期望输出与实际输出之差。控制系统的性能可以用稳、准、快三个字来描述。稳是指系统的稳定性(stability),一个系统要能正常工作,首先必须是稳定的,从阶跃响应上看应该是收敛的;准是指控制系统的准确性、控制精度,通常用稳态误差来(Steady-state error)描述,它表示系统输出稳态值与期望值之差;快是指控制系统响应的快速性,通常用上升时间来定量描述。

1.1.4. PID 控制的原理和特点

在工程实际中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,简称 PID 控制,又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史,它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象的结构和参数不能完全掌握,或得不到精确的数学模型时,控制理论的其它技术难以采用时,系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定,这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象,或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时,最适合用 PID 控制技术。PID 控制,实际中也有 PI 和 PD 控制。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。

(1) 比例 (P) 控制

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差 (Steady-state error)。

(2) 积分 (I) 控制

在积分控制中,控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对一个自动控制系统,如果在进入稳态后存在稳态误差,则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统 (System with Steady-state Error)。为了消除稳态误差,在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分,随着时间的增加,积分项会增大。这样,即便误差很小,积分项也会随着时间的增加而加大,它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小,直到等于零。因此,比例+积分(PI)控制器,可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

(3) 微分 (D) 控制

在微分控制中,控制器的输出与输入误差信号的微分(即误差的变化率)成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件(环节)或有滞后(delay)组件,具有抑制误差的作用,其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”,即在误差接近零时,抑制误差的作用就应该是零。这就是说,在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的,比例项的作用仅是放大误差的幅值,而目前需要增加的是“微分项”,它能预测误差变化的趋势,这样,具有比例+微分的控制器,就能够提前使抑制误差的控制作用等于零,甚至为负值,从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象,比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

1.1.5. PID 控制器的参数整定

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。PID 控制器参数整定的方法很多,概括起来有两大类:一是理论计算整定法。它主要是依据系统的数学模型,经过理论计算确定控制器参数。这种方法所得到的计算数据未必可以直接用,还必须通过工程实际进行调整和修改。二是工程整定方法,它主要依赖工程经验,直接在控制系统的试验中进行,且方法简单、易于掌握,在工程实际中被广泛采用。PID 控制器参数的工程整定方法,主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。三种方法各有其特点,其共同点都是通过试验,然后按照工程经验公式对控制器参数进行整定。但无论采用哪一种方法所得到的控制器参数,都需要在实际运行中进行最后调整与完善。现在一般采用的是临界比例法。利用该方法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下:

(1) 首先预选择一个足够短的采样周期让系统工作;

(2) 仅加入比例控制环节,直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡,记下这时的比例放大系数

和临界振荡周期；

(3) 在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数。

在实际调试中，只能先大致设定一个经验值，然后根据调节效果修改。

比较常用的 PID 调节方法，可以参考如下总结：

参数整定找最佳，从小到大顺序查

先是比例后积分，最后再把微分加

曲线振荡很频繁，比例系数要放大

曲线漂浮绕大湾，比例系数往小扳

曲线偏离回复慢，积分时间往下降

曲线波动周期长，积分时间再加长

曲线振荡频率快，先把微分降下来

动差大来波动慢。微分时间应加长

理想曲线两个波，前高后低 4 比 1

一看二调多分析，调节质量不会低

1.1.6. PID 与自适应 PID 的区别

首先弄清楚什么是自适应控制：

在生产过程中为了提高产品质量，增加产量，节约原材料，要求生产管理及生产过程始终处于最优工作状态。因此产生了一种最优控制的方法，这就叫自适应控制。在这种控制中要求系统能够根据被测参数，环境及原材料的成本的变化而自动对系统进行调节，使系统随时处于最佳状态。自适应控制包括性能估计（辨别）、决策和修改三个环节。它是微机控制系统的发展方向。但由于控制规律难以掌握，所以推广起来尚有一些难以解决的问题。

加入自适应的 PID 控制就带有了一些智能特点，像生物一样能适应外界条件的变化。

还有自学习系统，就更加智能化了。

1.1.7. PI, PD, PID 系统的适用范围

不同的控制策略适用于不同的控制系统，对于 PID 策略，用户也可仅使用其中一部分功能或所有参数来控制不同的系统，例如可以使用 PD 调节器来调节大滞后环节。

(1) P 调节器

快速响应

无法消除静差

(2) PI 调节器

兼顾快速性

减小或消除静差（I 调节器无调节静差）

(3) PD 调节器

调节偏差快速变化时使调解量在最短的时间内得到强化调节

有调节静差

适用于大滞后环节

(4) PID 调节器

兼顾 PD 调节器快速性

结合 I 调节器的无静差特点

达到比较高的调节质量

2. 应用部分:

2.1. FB41/42/43/58/59, SFB41/42/43 的区别

STEP 7 从 V3.2 开始在标准软件库中开始提供免费版的 FB41/42/43 标准 PID 功能块，从 STEP 7 V5.0 开始在标准软件库中开始提供免费版的 FB58/59 温度 PID 模块（带参数自整定功能），可以在任何 S7-300/400 的符合版本要求 CPU 上运行，用户可以从 STEP 7 Standard Library PID Blocks 中拷贝并调用。

SFB41/42/43 是集成在 S7-300C CPU 中的系统功能块，功能同 FB41/42/43，两者参数和数据结构完全相同，S7-300C 的用户可以直接在程序中调用。出于程序通用性及可移植性的考虑，用户可以只用 FB41/42/43。

PID Control Parameter Assignment 工具进行参数设置并调试。FB58/59 因自带自整定功能，用户还可以通过该工具进行在线参数整定；而 FB/SFB 41/42 则需要另外安装 PID Self Tuner 软件才能实现在线的参数整定工作。◇ FB41/42/58/59 SFB41/42 均可通过 STEP 7

2.2. Continuous controller 与 Step controller 的区别

Continuous controller 指输出为连续变量的 PID 控制器，比如 SFB/FB41 或 FB58，输出可以是模拟量，也可与 FB43 脉宽调制功能块组合使用 PWM 脉冲输出，适用于比例执行器，例如比例阀，

变频器，调功器，固态继电器等。

而 Step controller 是指输出为开关量信号的 PI 控制器，比如 SFB/FB42 或 FB 59，适用于积分型执行器，例如电机驱动的阀门或液压执行机构等。

2.3. FB41/42/43/58/59, SFB41/42/43 的适用范围

- (1) 压力，流量控制 FB/SFB41/42
- (2) 速度控制，位置控制 FB/SFB41
- (3) 张力控制 FB/SFB41
- (4) 温度控制 FB/SFB41/42/43 FB58/59

虽然 FB41 和 FB58 都可以应用与温度控制，但纯线性的温度控制系统很少，一般都是 3 阶以上的高阶系统，这时 FB58 的 CONTROL_ZONE 的功能针对高阶大惯性系统，认为以设定值为中间值的 CONTROL_ZONE 为线性区，在线性区外实行开环控制，在线性区内实现闭环控制，提高了系统的响应特性和控制精度。

2.4. PID 功能块的调用

2.4.1. 定时中断与 PID 功能块采样周期 CYCLE 的关系

软件 PID 属于数字 PID 范畴，因此其采样周期必须是等间隔的。通常我们采用定时中断来保证相同的采样周期，因此一般情况下 PID 功能块都必须在定时中断中调用。定时中断周期 T 与 PID 采样周期 CYCLE 的关系应该是 $CYCLE = n * T$ ($n=1,2,3,4,.....$)。对于一些慢响应过程，当 CPU 的扫描周期 $OB1_CYCLE < CYCLE * 1\%$ 时，PID 功能块可以在 OB1 中调用（调用触发标志位必须在中断中产生）。

一般，控制器的采样时间 CYCLE 不超过计算所得控制器积分时间 TI 的 10%。

2.4.2. 定时中断与 PID 功能块输出控制精度的关系

对于连续控制器 Continuous Controller，如 FB/SFB41，FB58 使用 PMW 输出时，脉冲调制周期应等于控制器采样周期 $PER_TM = CYCLE$ ，定时中断应与脉冲发生器采样周期满足 CYCLE 或 $CYCLE_P = n * T$ ($n=1,2,3,4,.....$)， $PER_TM \lambda \geq 20 * CYCLE_P$ 。

例：OB35 的中断周期 $T=10ms$ ，脉冲发生器采样周期 $CYCLE_P=10ms$ ，控制器采样周期 $CYCLE=2s$ ，输出控制精度为 0.5%。

对于步进控制器 Step Controller，如 FB/SFB42，FB59，MTR_TM 为电动执行机构从一个极限位运行到另一个极限位所需的时间，比如为 50s，如果需要达到 0.1%的输出精度，则控制器采样周期 $CYCLE=50ms$ 。最小脉冲时间（指脉宽时间）指电动执行机构的单位执行时间， $PULSE_TM = n * CYCLE$ ($n=1,2,3,4,.....$)，比如 $PULSE_TM=1s$ 。同时，应满足 $TI \lambda \geq MTR_TM$ 。

控制器采样周期与定时中断的关系应该是 $CYCLE = n \cdot T$ ($n=1,2,3,4,\dots$)

2.4.3. PID 功能块的初始化

PID 功能块都有一个初始化例行程序，当置位输入参数 $COM_RST = TRUE$ 时执行该例行程序。在处理完初始化例行程序后，功能块将 COM_RST 重新设置成 $FALSE$ ，所有输出都被设置成各自的初始值。

如果需要在 CPU 重启时执行初始化，则可在 $OB100$ 中通过 $COM_RST = TRUE$ 调用该功能块。

2.4.4. PID 功能块的工作模式及模式切换

所有的 PID 功能块都有手动/自动切换功能，通过 $MAN_ON = TRUE$ 使能 PID 功能块的手动模式， MAN 参数可设定手动输出值。默认状态下，PID 功能块置于手动模式，并且手动输出值为 0 的安全模式下。这也是初学者编程时总是遇到 PID 没有输出的原因之一。

我们总是希望在手自动切换时对系统的扰动最小，这就是无扰切换。从自动模式无扰切换到手动模式：在自动模式下把控制输出值 LMN 送到手动值 MAN 即可，那切换到手动模式时的输出值就是切换瞬间自动模式下最后的输出值。从手动模式无扰切换到自动模式：在手动模式下把控制输出值 LMN 送到积分初始值 I_ITLVAL ，并且 $I_ITL_ON=TRUE$ ，可能的话让设定值 SP_INT 等于反馈值 PV 。

2.4.5. PID 功能块的各主要输入输出变量的定义与关系

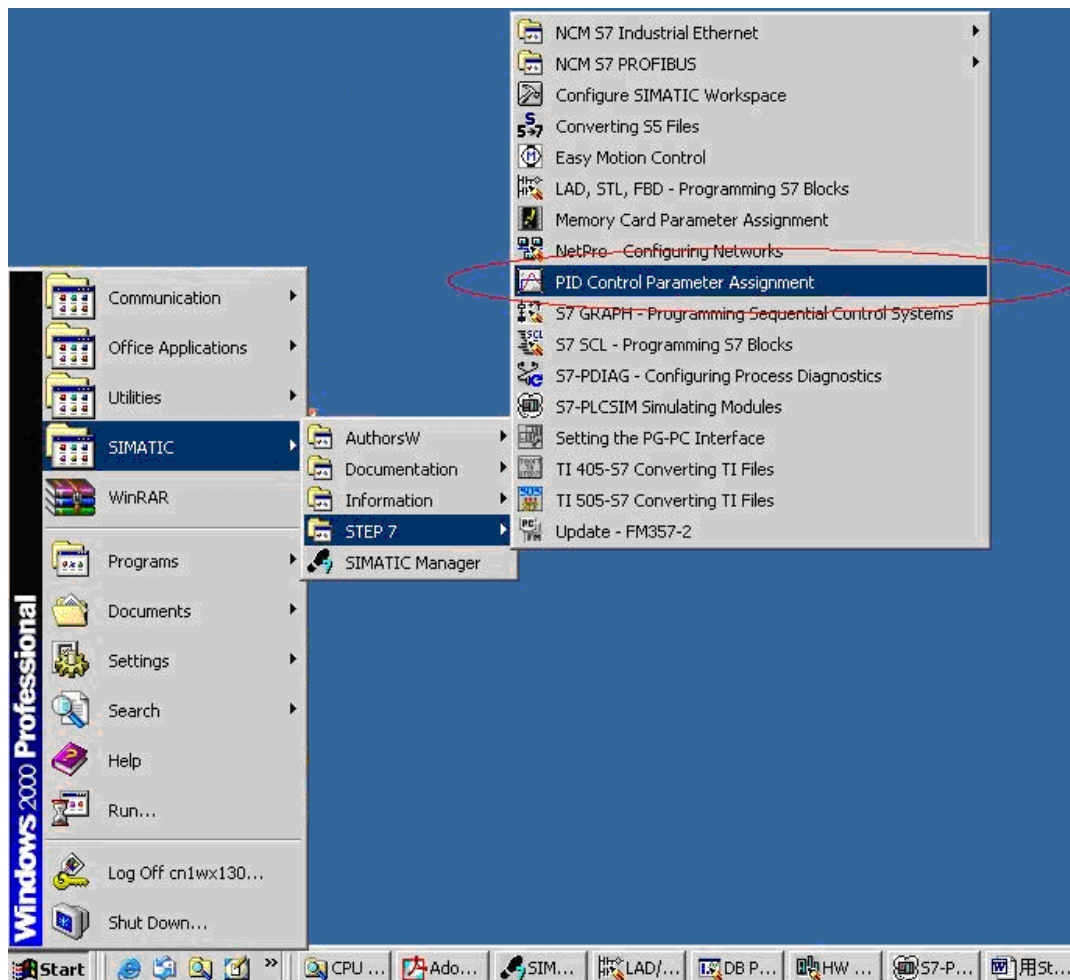
	变量名	数据类型	单位
采样周期:	$CYCLE$		Time ms
脉冲采样周期:	$CYCLE_P$		Time ms
脉宽调制周期:	PER_TM		Time ms
给定值:	SP_INT	Real	
计算反馈值:	PV_IN	Real	
模拟量反馈:	PV_PER	Word	
增益:	Gain	Real	
积分:	TI	Time	ms
微分:	TD	Time	ms
死区:	DEAD_W	Real	
线性控制区:	CON_ZONE	Real	

手动给定:	MAN	Real	
控制值:	LMN	Real	0-100%
模拟量输出:	LMN_PER	Word	
	CYCLE	<=	TI/10
	CYCLE_P	<=	PER_TM/50
	PER_TM	<=	TI/5
	CON_ZONE	<=	250/Gain

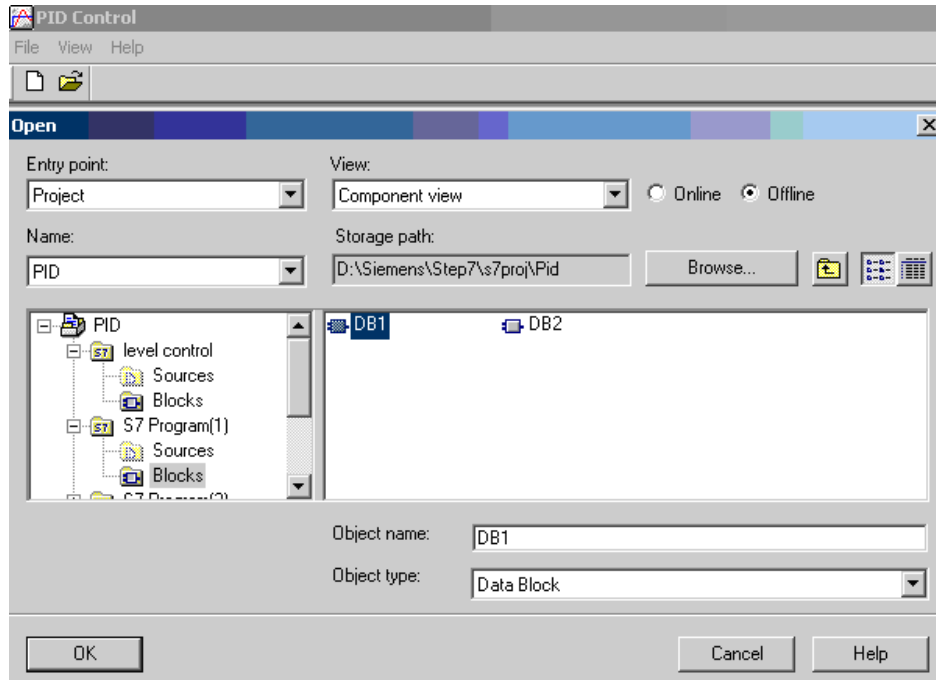
2.5. 利用 PID Control Parameter Assignment 进行参数设置

用户可以在 Windows 操作系统中，调用“调试 PID 参数用户界面”，操作过程如下：

(1) Start > SIMATIC > STEP 7 > PID Control Parameter Assignment。



调用调试界面

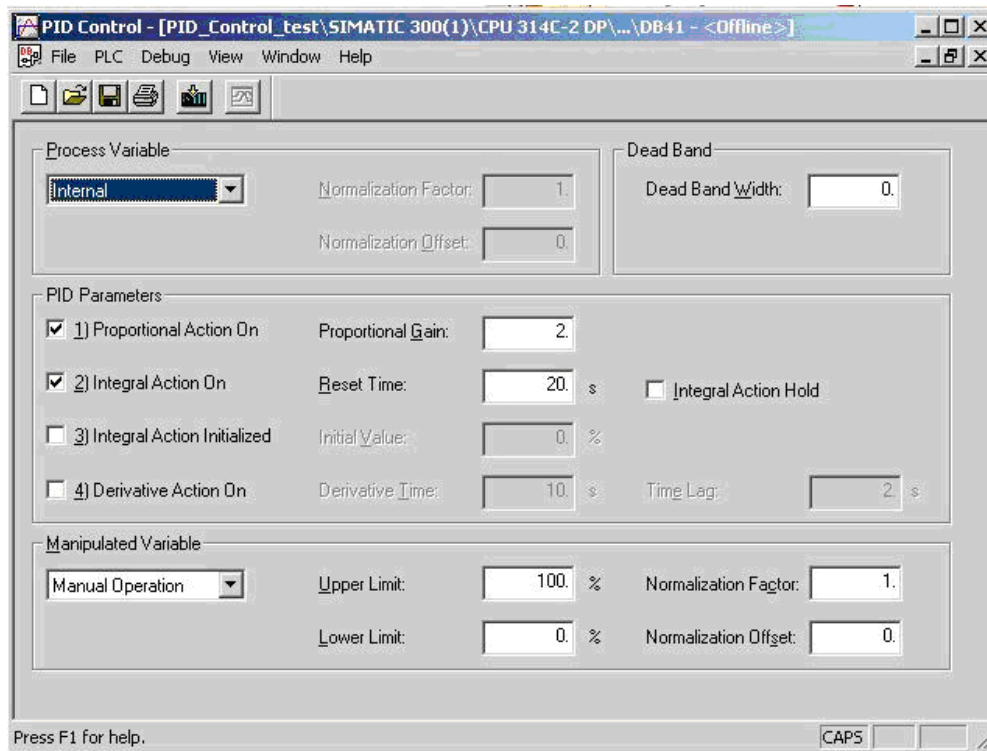


(2) 选择打开的数据块

- a) 在最开始的对话框中，用户既可以打开一个已经存在的 FB41/SFB41 “CONT_C” 或者 FB42/ SFB42 “CONT_S”的背景数据块。也可以生成一个新的数据块，然后再分配给 FB41/ SFB41 “CONT_C” 或者 FB42/ SFB42 “CONT_S”，作为背景数据块。
- b) 如果用户仅希望修改 PID 参数，可以选择 **Offline** 的数据块，如果用户希望在线监控 PID 调节曲线，可以选择 **Online** 的数据块（注意此数据块应当已经被下载到 PLC 中，并且计算机与 PLC 连接正常）。
- c) FB43/SFB43 “PULSEGEN” 没有参数设置的用户界面工具。用户必须在 STEP 7 中去设置它的参数。

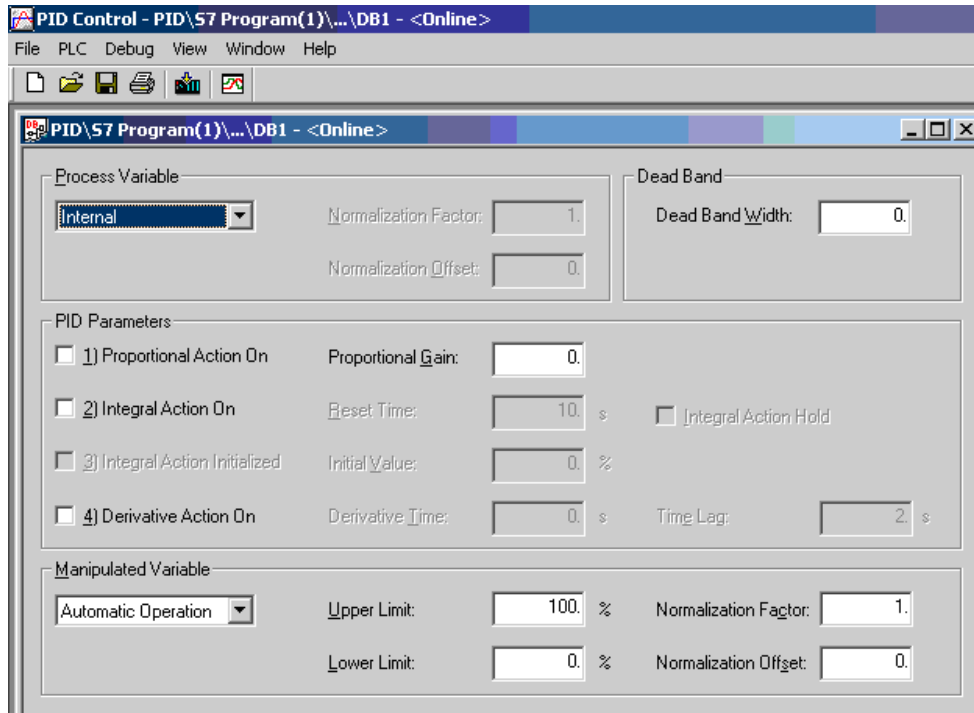
(3) 设置参数

用户可以在界面中设置 PID 各项参数

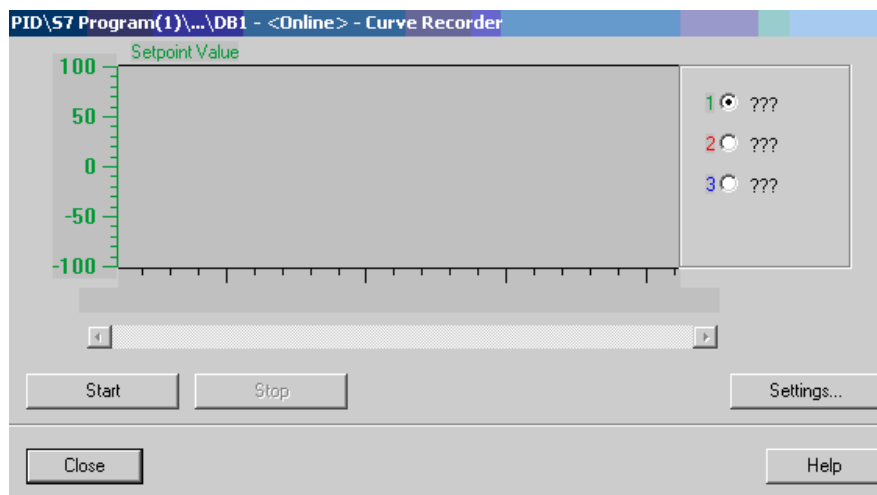


(4) 监控曲线

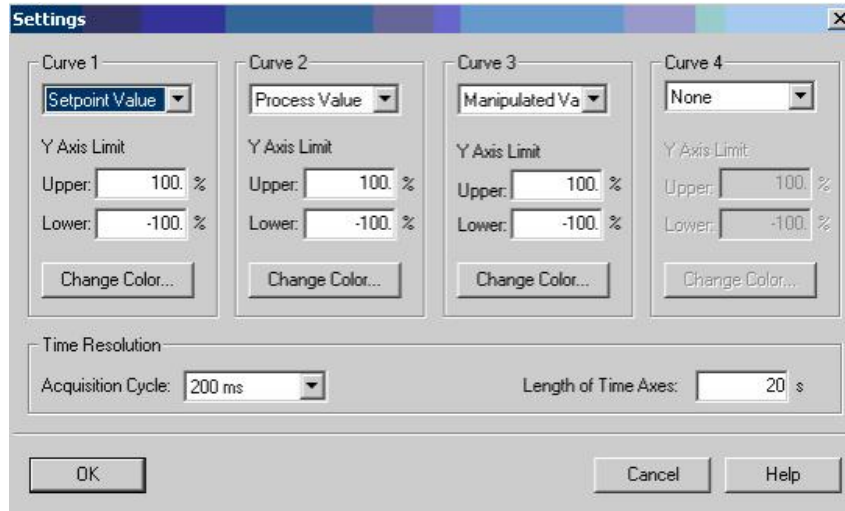
- a) 如果用户打开了在线的背景数据块，可以在界面打开监控曲线，如图中所示



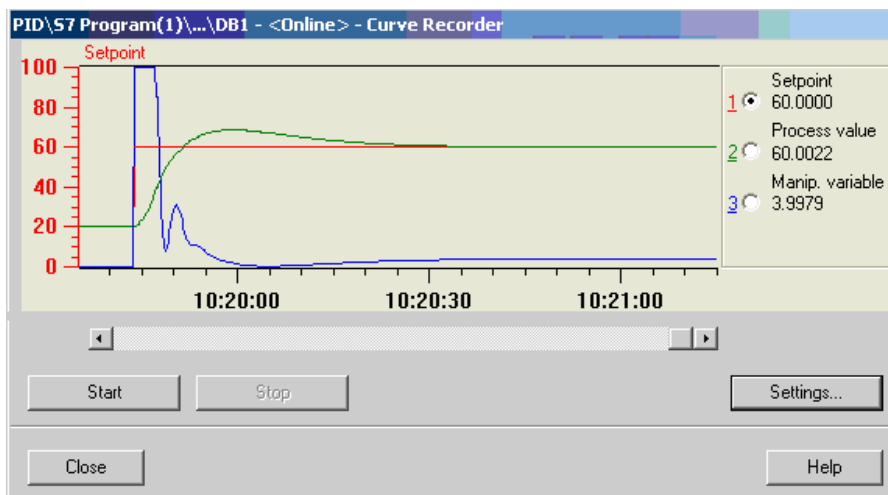
b) 用户可以点击 **Settings** 按钮，打开曲线参数设置界面。



c) 用户可以在如下界面下设置曲线参数，如采样数值及更新频率等。



- d) 用户可以在如下界面中通过点击启动/停止按钮来监控 PID 曲线。通过观察 PID 调节曲线的特性，可以为用户更改参数提供参考。



2.6. FB 58 的一些使用经验

FB58 用于温度控制，具有很高的性能价格比，由于其带自整定的功能，输出形式模拟量开关量兼顾，因此执行代码比较大，在 CPU315-2DP 以下的中低端 CPU 上使用多回路控制，很多人担心会影响控制性能。

当然，随着控制回路的增加，处理速度对控制性能的影响肯定是有的，但在允许的精度范围内，以较高的中断速度来处理 10-20 控温回路还是有可能的，具体如下：

1. 大多数的温控系统都不属于快速响应系统，其采样周期属于秒级，甚至达到几十秒，我们可以取一个较快的采样周期比如 4 秒。
2. 我们都知道，FB58 有一个 Select 的调用模式参数用于脉冲控制的各种调用选项。在一个快速过程中，需要特别短的脉冲发生器采样时间(例如 10 毫秒)。由于程序运行时间(CPU 使用率)的存在，在脉冲输出计算所在的周期性中断 OB 中处理控制程序段是不现实的。因此，或者将控制功能移到 OB1 中，或者将其移到一个较慢的周期性中断 OB (S7-400)中。详细参见 FB58 的手册。
3. 在 S7-300 中，推荐在快速中断 OB35 中调用 FB58 Select= 2，在在 OB1 中通过 SELECT = 1 执行条件调用(QC_ACT =TRUE)。
4. 假如我有 20 个控制回路，OB35 中断时间为 10 毫秒，我的采样周期为 4 秒，那我可以把 20 个控制回路分为 4 组，OB35 每 10 毫秒处理 1 组 5 个回路，由于在 SELECT=2 的模式下，FB58 只是执行脉冲输出的程序，一次处理时间极短，10 毫秒内处理 5 个回路是绰绰有余的，相关参数如下：

CYCLE = 4 秒

CYCLE_P = 40 毫秒

PER_TM = 4 秒

其控制精度应该在 1%

5. 其实，此时如果不用脉宽调制输出，直接在 OB1 中使用模拟量输出形式来控温也是允许的，这就给我们带来的极大方便，所以无论是在 S7-300 或 S7-400，是否使用脉宽调制 PWM 输出形式来控温，建议程序上都采用这种形式，以不变应万变，同时可以最大限度的利用到系统的资源。
6. 在上述模式下，只要将控制器最小输出值 LLmn 改为-100%，即可实现双向温控，比如用模拟量输出控制冷却水比例阀，同时用 PWM 控制加热 。