

第 5 章 自适应整定

如第 4 章所述,按需整定的引入,对控制回路的运行方式产生了重大影响。对于需要快速响应的工业过程(例如,液体流量和液体压强),按需整定的使用可以实现快速整定;然而,对于慢响应的工业过程,按需整定所需的整定时间通常会很久。此外,容器内的温度、水平以及成分的响应速度,在许多情况下取决于过程的流速和容器的容量。这样,如果过程操作条件在按需测试中发生了变化,那么可能有必要再次实验,以保证过程增益与动态特性在改变后的过程条件下能被准确地识别。

在某些情况下,只在一个操作点整定可能无法为整个操作范围提供最佳的控制。例如,流速的变化会影响传输延迟以及工业过程中加热和混合操作所需的时间。此外,非线性安装阀门的特性将会引起过程增益。例如,通过 PID 所能看到的随着阀门位置变化而引起的过程增益。当通过 PID 的分程输出对多个阀门进行调整时,在调整某个阀门的同时,阀门的过程增益与动态特性会发生变化。为了解决这些问题,自适应整定可被用于自动识别过程的增益和动态特性,以及基于操作回路设定值变化或输出变化的回路整定。

自适应控制可通过以下方式改善回路整定:

- 在过程输入中对控制器输出变换响应缓慢的过程,不经过测试即可建立初始的回路整定;
- 自动识别由于过程操作条件变化而引起的过程增益或动态特性的变化;
- 自动改变回路整定以补偿工厂操作条件的变化。

一些工业过程案例,将被用来说明在哪些情况下自适应整定可被用于对输入变化响应迟缓的工业过程进行整定。此外,一些实例被用来描述一些控制应用,这些控制应用的过程增益或动态特性与工厂的操作条件或控制回路的变化有关。

5.1 自适应控制——实例

5.1.1 连续反应器控制

由于反应器中液体的体积、连续反应器中温度对冷却液流速的变化反应缓慢。例如,通过控制冷却液的流动,反应器的温度回路 TC305(见图 5-1)对回路 TC306 中再循环流的温度变化响应缓慢。

温度控制回路 TC305 的初始调试,可采用自动整定的方式确定。然而,当过程条件发生很大变化时,在某个操作点上建立的整定可能不适合进行最佳控制。例如,如果在正常操作条件下,反应器的进料速率或者冷却液的温度变化剧烈,将需要使用自适应控制来补偿过

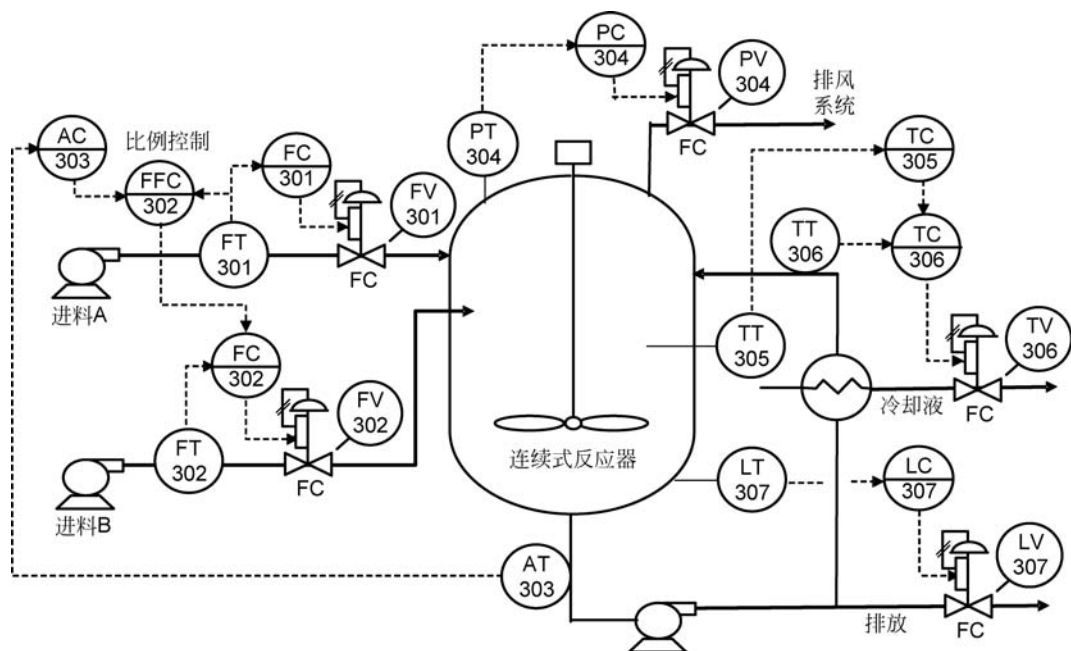


图 5-1 连续反应器

程增益和动态性能的变化。当生产率剧烈下降时,过程增益及吞吐量的变化,是控制利用率下降的一个原因。

5.1.2 批量反应器

在过程工业中,批量反应器被用于生产多种产品。通过调节排气孔的大小来维持反应器中的压力,排气孔被设计成用来移除物料反应中生成的挥发性物质,如图 5-2 所示。

如果在批量的整个过程中都有进料被添加到反应器中,则反应器顶部空间的空气将减少。这样,在整个批量过程中,随着反应器液位的变化,与反应器压力相关的过程增益将增加,如图 5-3 所示。

通过使用自适应控制能够自动修改压力回路的整定,该压力回路的整定作为反应器液位的一个函数。以此方式处理过程增益,可批量实现响应压力控制和稳定压力控制。

5.1.3 氨生产中的氢氮比

一个关键过程流的组成,通常是上游单元反应和混合的结果。为了将此组成维持在其设定值,上游过程中的变化可能不会快速地反映到在线分析仪上,因为上游过程中可能存在巨大的传输延迟和滞后。图 5-4 所示的氨厂就是一个实例。

工厂前端空气与燃气比例的变化,无法快速反映到在线氢/氮分析仪的测量中,该在线氢/氮分析仪被用于氢/氮配比控制(AC333)和氢/氮合成控制(AC334)。因此,以确定这些控制回路的过程增益和动态性能而进行的测试过程,是非常具有挑战性而且非常耗时的。例如,改变空气/燃气比例的过程时间常数通常会耗费数个小时。通过自适应整

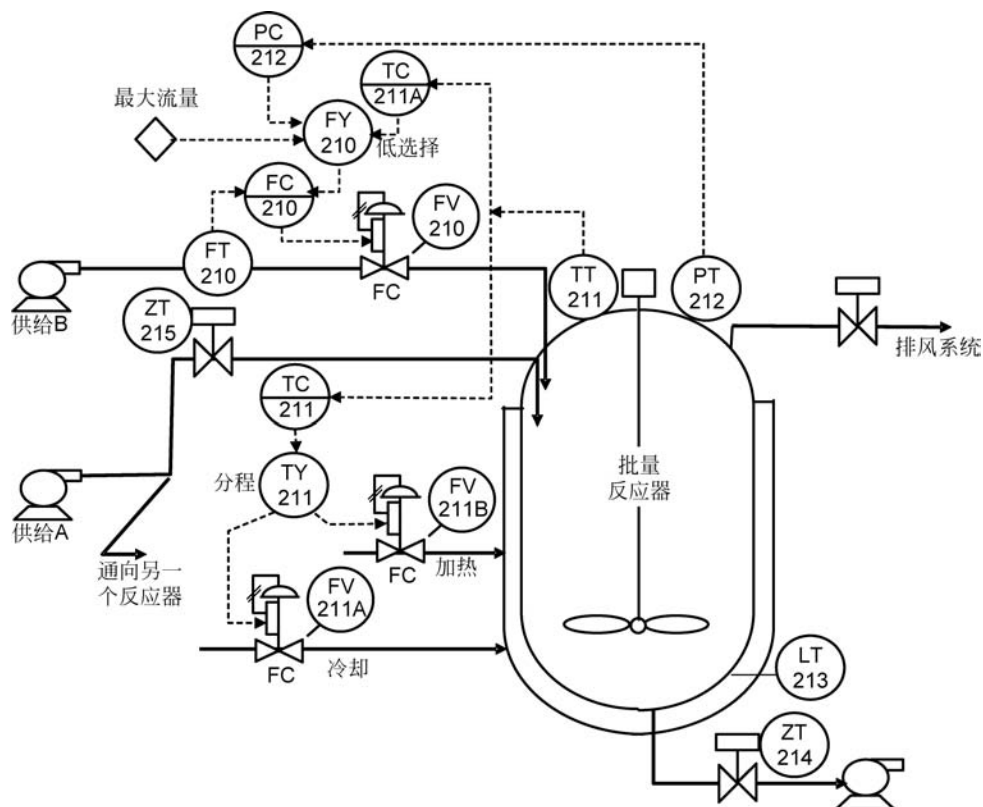


图 5-2 批量反应器

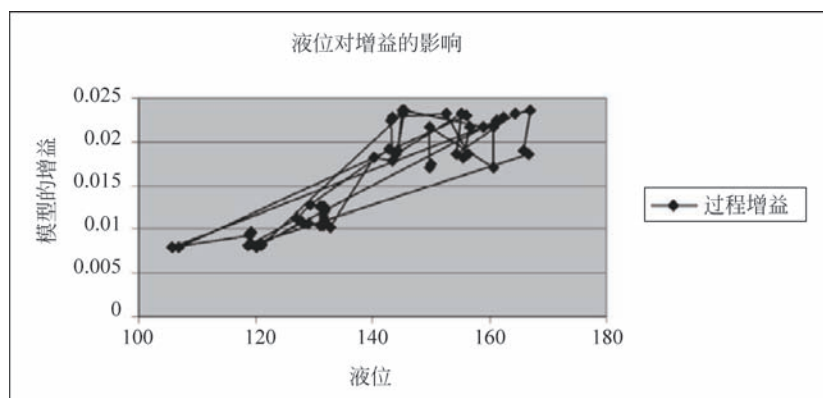


图 5-3 液位对反应器压力增益的影响

定,并根据工厂正常操作过程中操作员做出的判断,能够自动建立过程动态性能和控制器整定。

5.1.4 中和器

在过程工业的废水处理及其他中和应用中,通过调节试剂流量来控制 pH 的做法很常见。与中和器相关的 pH 控制应用实例如图 5-5 所示。

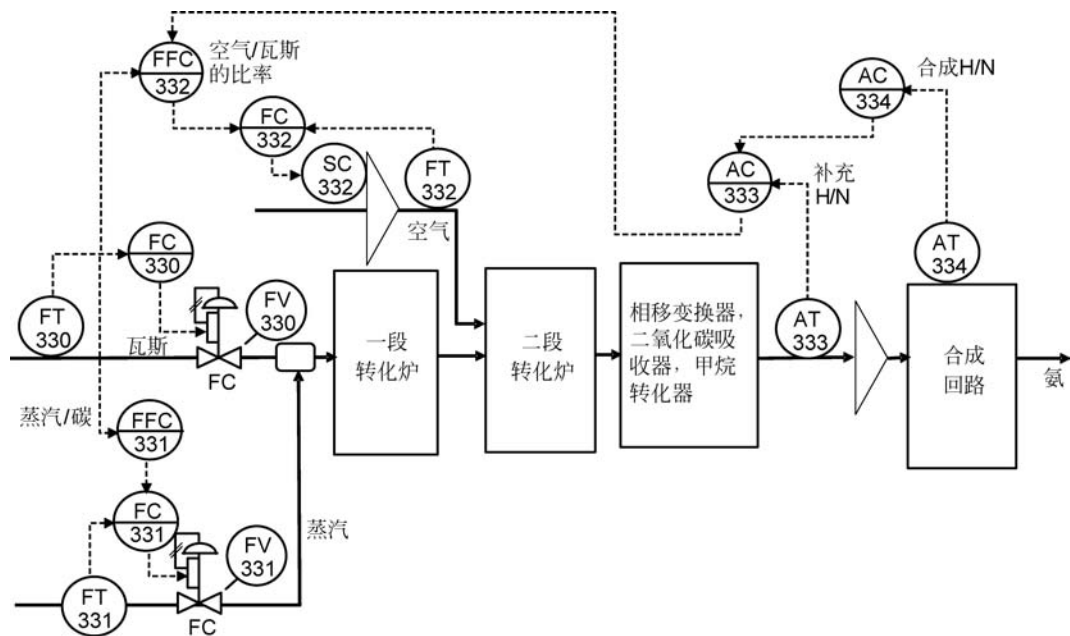


图 5-4 合成氨工厂

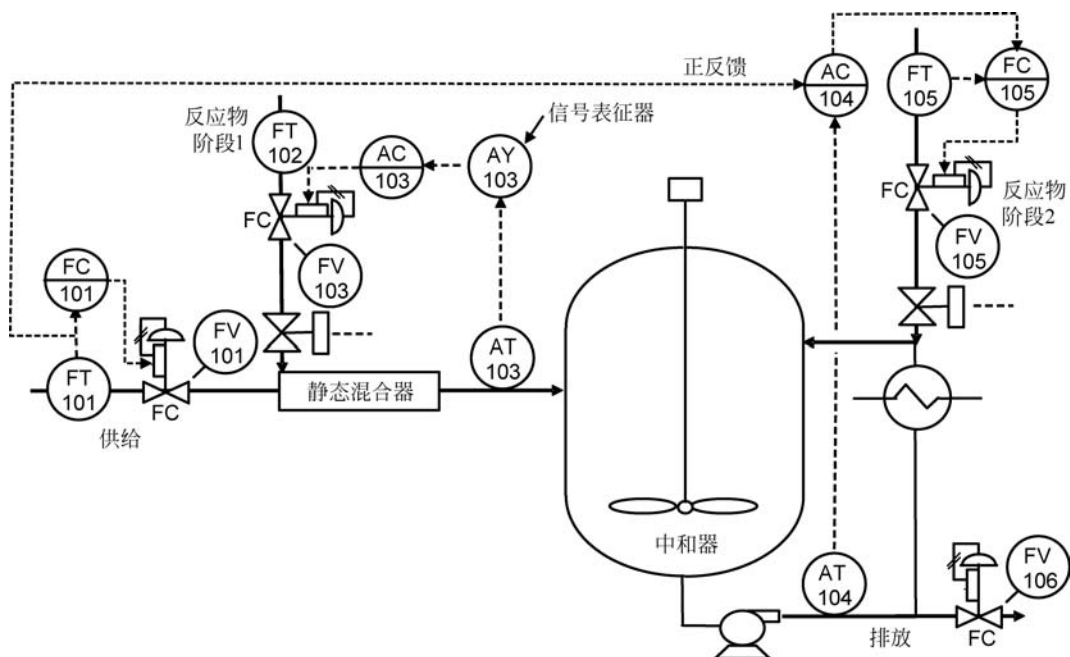


图 5-5 中和器

添加试剂时, pH 测量值的非线性变化增加了实现 pH 控制的难度。添加酸或碱性试剂引起的 pH 变化, 通过实验分析得出的滴定曲线描述, 或者通过观察在线变化来确定。进料成分的变化会影响滴定曲线的形状, 如图 5-6 所示。

使用自适应控制, 可自动确定 pH 和添加试剂之间的关系。此外, 借助于自适应控制,

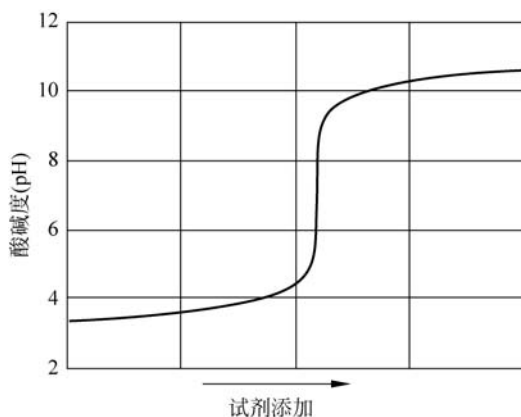


图 5-6 滴定曲线实例

能够自动调节 PID 整定参数,补偿非线性关系。

5.1.5 工厂主控制

与回路相关的过程增益,受可作为 PID 输出的过程单元数目影响。例如,在发电厂主控制器中,在线转向燃烧炉的数目将影响与主压头控制相关的过程增益,工厂主控制实现主压头控制,如图 5-7 所示。

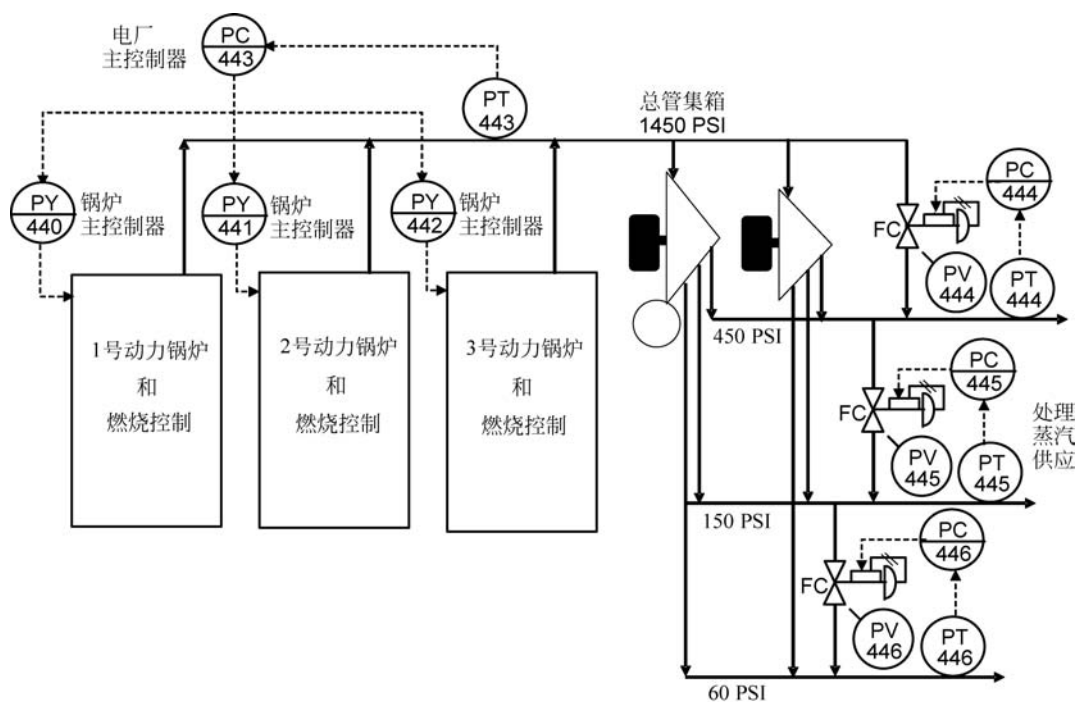


图 5-7 发电厂的主控制器

使用自适应控制,修改工厂主整定,能够自动补偿在线燃烧炉的数目。

5.2 应用实例

在过去的六十多年内,自适应控制是许多研究控制的机构和专家关注的焦点。为调节控制器参数,以补偿过程变化,许多复杂精巧的技术逐渐发展起来。然而,实际过程的发展却不尽如人意,因为对于实际应用,其安全性、可靠性和鲁棒性需求通常无法得到很好的处理。基于多模型转换的改进控制技术是一项相关新技术,在 DeltaV 中央控制系统 DCS 中,是自适应控制的基础。其基本原理是对多模型进行评估,然后选择最能匹配过程输入改变响应的模型。通过使用参数插值和序列参数修正的方法,可完善此项基本技术。以下自适应控制的实现可作为一个好的示例,能很好地说明如何使用自适应控制快速识别过程模型,以及如何使用识别结果设定回路整定参数,或者对回路参数做连续调整,以补偿过程条件的变化。

5.2.1 启动模型识别

自适应控制的基础是根据回路操作中操作的变化,对过程阶跃响应的识别。例如,当控制回路处于自动操作模式时,设定值的变化将触发过程模式识别。如果回路模式转换为手动,操作方改变回路输出,将触发过程模式识别。当触发模型识别过程后,控制器将会自动捕捉并分析内部的控制器参数值、设定值和控制输出,以确定过程特征。自调节过程具备过程增益、时滞和时间常数的特性。借助人机交互界面选择积分过程的相应选项后,可通过积分增益和时滞来确定过程响应。

新过程模型确定后,会显示到在线自适应控制交互界面上。已经标识的过程模型的一致性由界面中的图标以图形化的形式方式表示,绿色表示模型具有高确定性,红色用来表示确定模型的不连续性。新模型确定后,根据模型产生推荐整定参数,用户可选择整定规则,如图 5-8 所示。

如果交互界面显示模型具有精确性,那么用户可以通过选择“升级”,简单方便地将推荐整定参数传送给控制器。因此,如果控制系统中可使用自适应整定,控制回路的整定过程将大大简化。

在大多数应用中,控制回路的设定值极少改变,在正常操作条件下,控制回路通常处于自动模式。提供一个选项,用于应对此类应用,PID 输出变化能够自动以周期为基础校准。输出变化的幅值应该足够小,确保不会对过程造成影响,但同时也要足够大,以便过程能够识别该噪声。因此,输出变化频率和幅度的设定,应当基于过程动态响应变化速率以及测量得到的噪声级别。此外,设定值和输出变化的触发点,可以从如图 5-9 所示的选项中观察得到。

扰动或设定值变化引起的控制回路响应,可能会随着操作条件的变化而变化,例如,生产速率或者阀门非线性安装特性等影响过程增益的条件。通过对控制参数、操纵参数和阀门位置变化趋势的实时观测,可得到上述变化。阀门的非线性安装特性的性能变化实例如图 5-10 所示。

检验自适应控制确认的过程模型,验证控制性能中所测得的变量。自适应控制应用保存了至少 200 个可被识别的过程模型,因此能够观测到操作条件对过程增益和动态性能的影响。选择模型视图后,已被识别的模型按照设定值或输出值变化时间的先后顺序罗列出

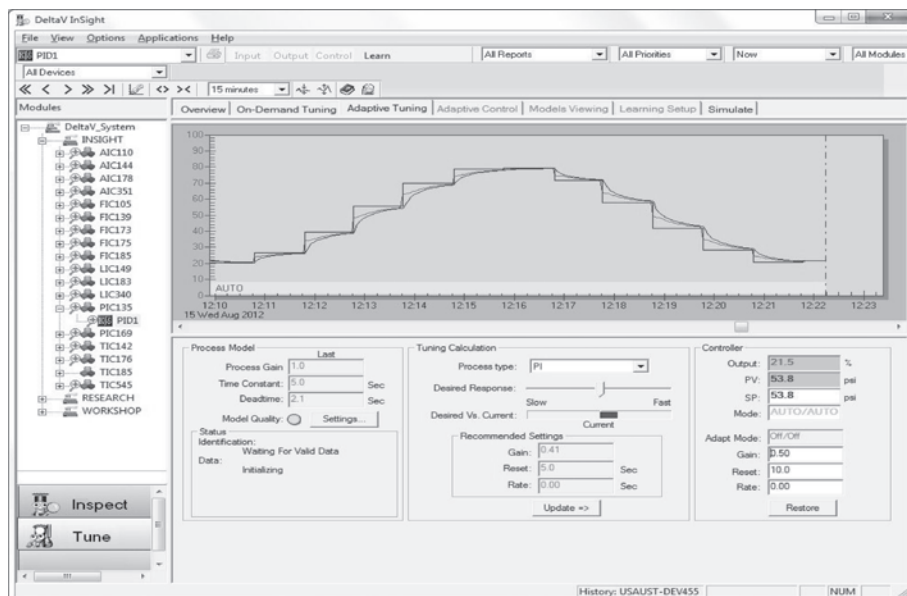


图 5-8 基于确定的过程模型进行整定

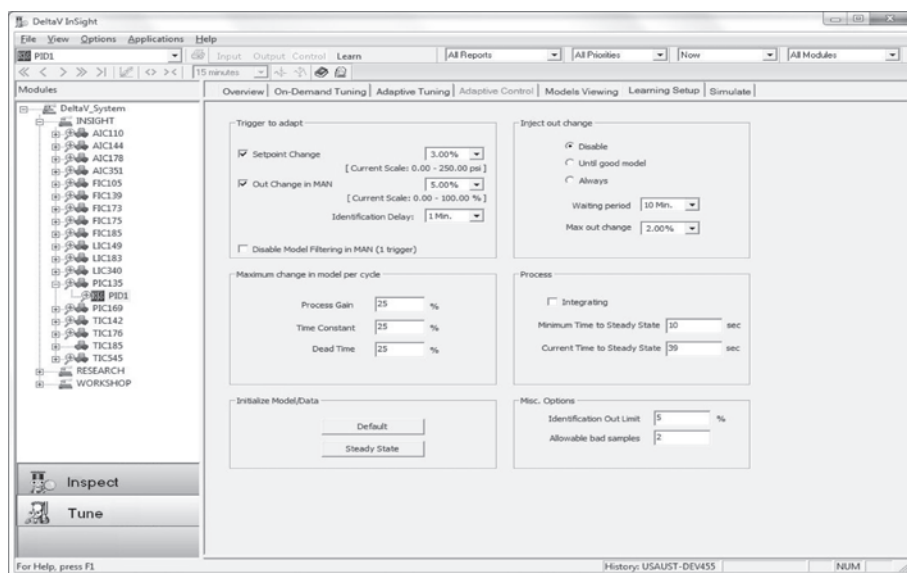


图 5-9 自适应整定的选项

来,正是这些变化触发了模型的识别过程。此外,过程源发生变化时,即状态参数改变时,可以选择绘制一个或多个识别出模型的曲线。例如,在许多情况下,变化的原因与阀门位置有关,如图 5-11 所示为一种标准的绘制方式。

选择“其他”选项后,任何测量或计算得到的条件都可选作状态参数。对于本章前面提到的批量反应器实例,当观测与反应器压力控制相关的模型时,反应器中的液位可选作状态参数。类似地,当查看为发电厂主压力控制确定的模型时,正在运行的转向燃烧炉数量是过程变化产生的主要来源,因此会被当作状态参数。

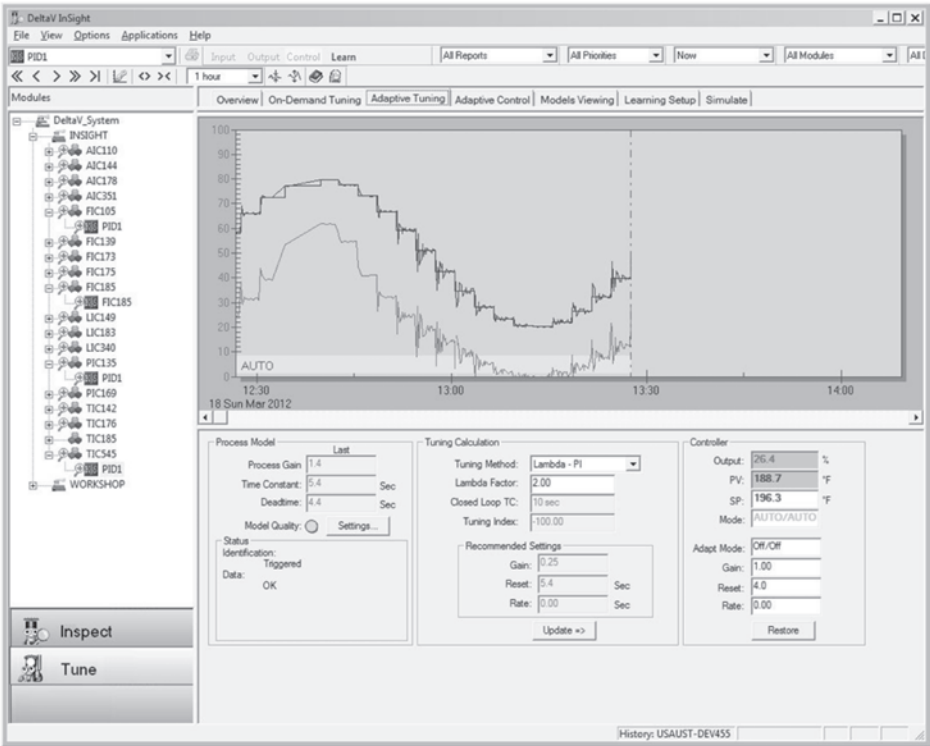


图 5-10 阀门非线性安装特性的回路响应举例

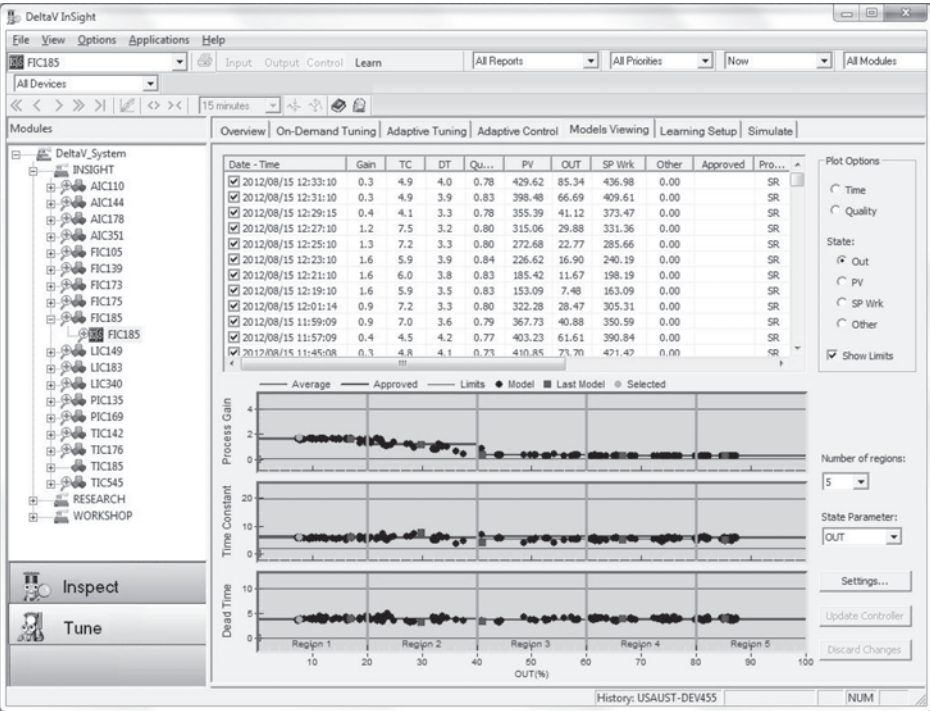


图 5-11 观察识别的模型

当过程增益发生变化时,为了能够给上述控制回路提供稳定控制,可选择最大过程模型增益。然而,当运行条件导致过程增益降低时,会观察到缓慢变化的控制性能。为了在任何操作运行条件下都能得到最佳的系统性能,有必要将控制器整定为状态参数的函数。选择自适应控制后,模型将自动具有回路整定的能力。

5.2.2 将模型应用于回路整定

启用自适应控制选项后,状态参数将被划分为五个区域,对于每个区域,用户可选择某个模型或者取区域内多个模型的平均作为该区域的认证模型。此外,对于任一区域内的每个模型参数,可指定其上下限。可通过自适应控制视图,查看并认证每个区域内的模型和模型界限,以及状态参数的当前值。此外,借助该视图可选择自适应控制的使用方式。选项如下:

关——PID 功能块的整定设置经常被用到。

部分——控制中用到的整定,基于针对状态参数的当前值和选定的整定规则所确立的认证模型。

全部——状态参数从一个区域转移到另一个区域,根据新状态和整定规则确定新的认证模型,并据此设定新整定参数。依据最新状态确定的控制模型,将决定模型参数范围,在该区域操作时,用于确定该整定参数的模型将改变以适应新状态。

控制中对模型的调整将自动限定在每个操作区域指定的模型范围之内。因此,当启用自适应控制后,用户可以选择最大可变值。通过使用部分或全部自适应控制,在所有操作条件下都能得到最好的控制性能,如图 5-12 所示。该结果表明,使用模型自适应前的响应存在振荡,而使用模型自适应后的响应明显改善了。

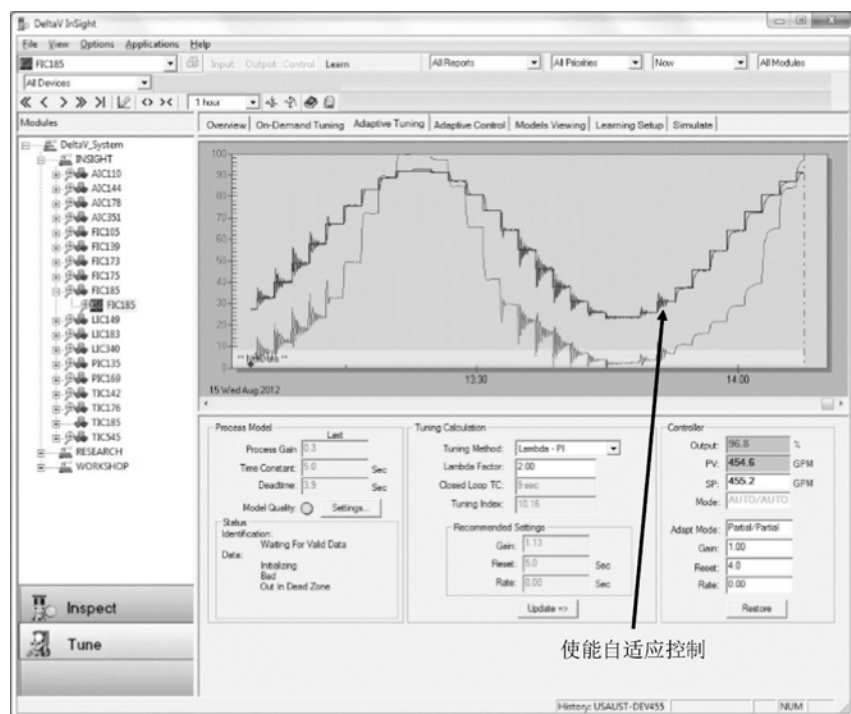


图 5-12 自适应控制的影响

自适应控制设定为“关”，则 PID 整定控制将被复位。

5.3 自适应整定的专题练习

本专题练习提供了几个实践,用于进一步探索自适应控制的使用。一个非线性安装阀门特性的流量过程(见图 5-13)被用于本专题练习。登录本书网站 <http://www.advancedcontrolfoundation.com>,单击“解决方案”选项卡查看此专题练习。

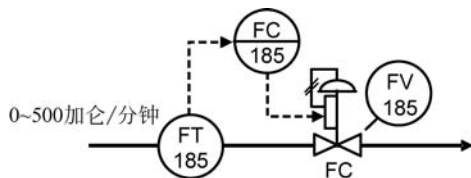


图 5-13 用于本专题练习的流量过程

第一步：选择“整定应用”，单击“自适应整定”选项卡，查看不同流动设定值的控制操作趋势。请注意，流动回路运行范围最低端处的控制响应振荡剧烈，表明此操作区域具有更高的过程增益。

第二步：单击“模块浏览”选项卡，查看过程增益是如何作为流量需求和阀门操作相关区域的功能而变化的。请注意，模型浏览界面下边的状态参数是如何被分割成五个操作区域的。

第三步：单击“自适应控制”选项卡，观察有自适应控制的控制性能是如何转向局部的。

第四步：关闭自适应控制，观察这一动作对控制性能的影响。一旦启用自适应控制，控制性能会得到显著改善。

5.4 技术基础

随着时间的推移，完美整定的 PID 控制器可能会性能下降，或者出现性能振荡。造成这种变化的主要原因有两个：

(1) 被控过程是非线性的，过程操作进入某个区域，在此区域中，过程参数与用于确定整定参数的过程参数差别巨大。

(2) 启用自动整定后，过程参数发生了变化。

增益调度器是以操作点为函数调节 PID 控制器的增益。增益调度器的使用通常足以应对上面提到的第一个原因。在一些要求更高的应用中，即这些应用中的过程增益、滞后和时滞都依赖于操作点，PID 控制器能够在多个范围内自整定。根据任何给定时刻的操作点，关联的过程模型被使用来设置 PID 增益、是否复位和速率。在确定过程模型的操作范围之间，PID 整定被设置为使用加权平均值，并综合考虑邻近区域的参数值以及与该区域间的距离远近因素(Wojciszyn, Borders 和 McMillan, 1994)。

为了在第二种情况下达到预期的性能,整定应该周期性地重复,或者在控制器性能发生变化时重复,这反映在控制变异性的增加上。如果该过程能够自动触发并施加控制,则该操作称为自适应整定。自适应整定也适用于第一种情况。

如图 5-14 所示,可以对应用于 PID 控制器的简单、可靠的自适应控制进行归类。

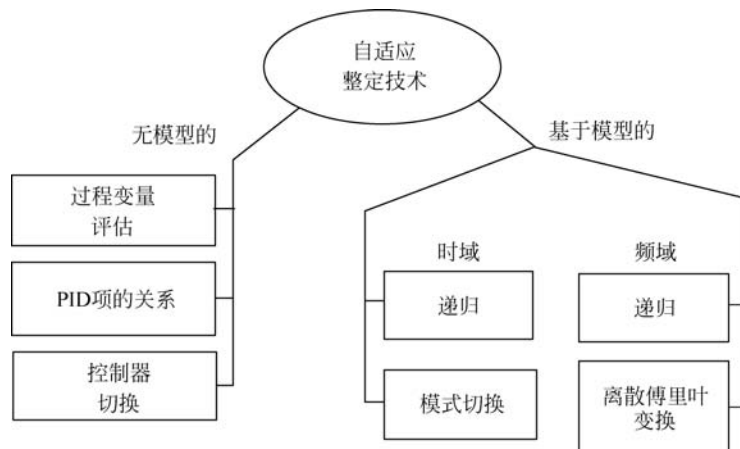


图 5-14 用于 PID 控制器的自适应整定技术

多年以来,研究者们投入了大量精力研究自适应整定的实现。下一章节将简要介绍几种具有广阔应用前景的自适应技术。本章节将重点介绍“带模型转换与参数插值的自适应技术”,该技术已经实现并成为工业产品,在“专题练习”章节中演示了该产品的使用。因此,本章节将比其他基于模型的技术或无模型整定更详细地讨论此技术。

5.4.1 无模型的自适应整定

无模型整定能评估控制器的性能,并调整 PID 控制器参数以达到预期控制性能。该计算中不使用过程模型。无模型整定吸引了许多 PID 自整定的开发者,因为这种类型的整定比基于模型的整定提供了更少的计算和更小的过程激励。而这些正是开发第一代 PID 自整定产品(即无模型自适应整定器)的首要考虑因素。

无模型整定的一个经典例子是 PID 自适应控制器 Exact(Åström 和 Hägglund,1988)、(Åström 和 Hägglund,1995),它能够根据过程变量行为来调整控制器的参数。当识别出实际阻尼和误差信号超调量,并且测得振荡周期后,该控制器根据回路对设定值变化或者负载扰动的响应而自动调整。如果误差信号无振荡,则增加比例控制增益并减少微分和积分时间。如果误差信号中存在振荡,则测量振荡的阻尼和超调量,并据此调整控制器的参数。

自适应控制原理简单,然而它同时也存在一些缺陷:

- (1) 只有当控制响应是振荡时,自适应控制才起作用。
- (2) 当控制响应在平稳的操作期间不振荡时,控制器参数的变化太过剧烈。
- (3) 自适应整定需要一个以上的设定值变化来整定过阻尼控制器。
- (4) 控制器以一个具有较小安全余量的振荡响应进行调试。

还有其他已知的 PID 自适应控制器的实现,它们利用振荡控制误差响应,并因此具有类似的特征(Åström 和 Hägglund,1995)。一个实例是 UDC 6000。

一种更为复杂的无模型自适应控制方法,即基于控制器参数关系的自适应控制,避免了上面提到的一些缺陷。该方法检查控制器的比例、积分和导数项之间的关系,并调整控制器参数以实现期望的关系(Maršik 和 Strejc,1989)。一个利用 PID 参数关系和 PV 行为的自适应系统(Wojciszyn, Gudaz 和 Blevins,2001),如图 5-15 所示。

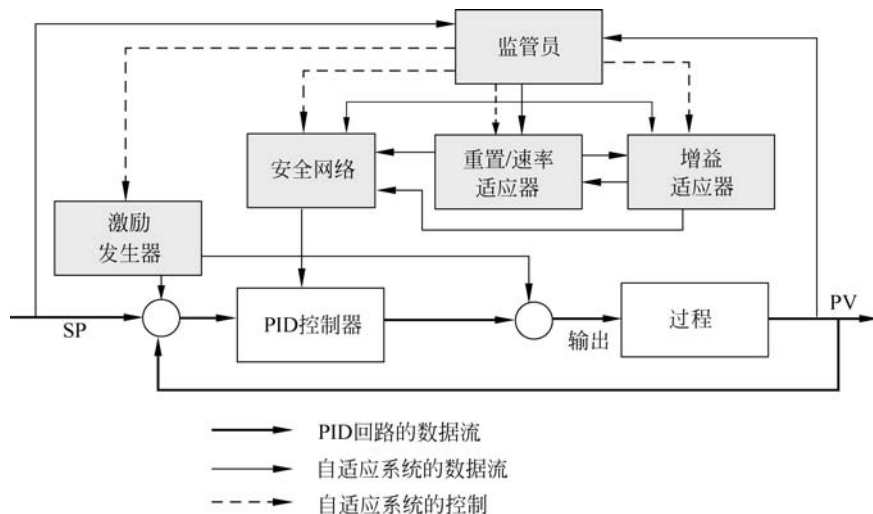


图 5-15 无模型的自适应 PID 控制回路

自适应整定器由五个功能模块组成：监督器、励磁发生器、增益自适应、复位/速率自适应控制和安全网络。

监督器模块协调所有整定器组件的操作,并测试启动增益适配周期的条件：

$$|e(k)| > E_{\min} \quad \text{或} \quad |\Delta e(k)| > \Delta E_{\min} \quad (5-1)$$

$$e(k) = SP(k) - PV(k)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

对于复位自适应控制,应当满足以下附加条件：

$$e(k) \times \Delta e(k) < 0 \quad (5-2)$$

控制器输入(PV)和输出(OUT)应当在其操作范围之内,并且无振荡。如果监督器模块检测到振荡,将激活安全网络组件,每当 PV 值超过 SP 线时,安全网络将减少控制器的增益 K_C 。

$$\text{如果 } e(k) \times e(k-1) < 0, \text{ 那么 } K_C(k+1) = \eta K_C(k) \quad \eta \approx 0.95 \quad (5-3)$$

一些自然产生的或由励磁发生器或负载扰动添加的设定值变动,将会引起自适应控制。当满足增益自适应控制的条件时,将遵循以下公式调节增益：

$$\Delta K_c(k) = \chi K_c(k) (W(k) + W_{\text{ref}}) \quad \chi = 0.02 \div 0.05 \quad (5-4)$$

χ 为启发式系数,定义了增益自适应速度。

$$W(k) = \text{signe}(k) \text{sign}[\Delta^2 e(k)] \quad (5-5)$$

$$\Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

$$\text{signe}(k) = \begin{cases} -1 & e(k) < 0 \\ 0 & e(k) = 0 \\ 1 & e(k) > 0 \end{cases} \quad (5-6)$$

W_{ref} 的取值在区间 -1 与 1 内,实际上,当它取值 -0.3 时,得到的自适应增益与基于模型的调制十分接近。

$W(k)$ 为振荡指数,对于振荡性 PV 取负值,而对于正常阻尼和过阻尼 PV 取正值。在自适应校准期间,通过表达式 $\text{signe}(k)\text{sign}[\Delta^2 e(k)]$ 计算平均值作为 $W(k)$ 的值,通常十分接近回路稳定时间。从式(5-4)可看出, $W(k) + W_{\text{ref}} > 0$ 将导致增益的增加。

通过设置 PID 控制器的属性,复位自适应控制,增长比例与积分项之间的固定关系为

$$\Delta P = \sum_k \Delta P_k; \quad \text{和} \quad \Delta I = \sum_k \Delta I_k; \quad \beta = \frac{\Delta P}{\Delta I \alpha} \quad (5-7)$$

在一个自适应周期或整个自适应周期内,当自适应条件(见式(5-1)和式(5-2))得到满足时,计算其总和。

在式(5-7)中,通过设置 α 得到期望的控制器性能,改变控制器积分时间,通过调节 $T_i(k)$ 直到 $\beta=1$,使控制器达到期望性能,公式如下:

$$\Delta T_i(k) = \gamma T_i(k) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (5-8)$$

γ 约等于 0.05 ,定义了复位自适应的速度。

无模型自适应的另一个简单概念是控制器切换自适应技术,它使用一组预先定义的参数来评估多种控制器的性能,然后从中选出性能最优的控制器(Morse, Pait 和 Weller, 1994)。此技术的最初设计思路是顺序评估控制器。虽然这种概念简单明了,但是对序列中控制器评估需要大量的时间,这是此项技术的显著缺陷。

Safonov 和 Tsao (1997), Jun 和 Safonov (1999), Brozenec, Tsao 和 Safonov (2001) 引入了 PID 控制器虚拟设定值的概念,即假设在回路中的实际控制器和假设控制器中的所有其他控制器同时进行评估。该候选控制器的集合在适配期间被拟合到过程输入和输出的测量数据。为了使相同数据集适用于不同的控制器,应计算与真实设置值不同的设置值。理想 PID 控制器的虚拟设定值是通过倒置 PID 控制器(见式(5-9))计算出来的,如图 5-16 所示。

$$\text{输出} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (\text{SP} - \text{PV}) - \frac{s k_d}{s \tau_f + 1} \text{PV} \quad (5-9)$$

其中 τ_f 是导数项的滤波器时间常数。

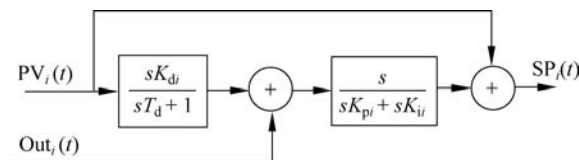


图 5-16 虚拟设定值计算简图

在图 5-16 中,实际控制器(见式(5-9))与带有比例、积分和微分收益 $K_{pi}, K_{ii}, K_{di} i=1, 2, \dots, n$ 的 n 个潜在最优候选控制器集合相比较。

在生成虚拟设定值之后,性能指标计算为相对于虚拟设定值的平方控制误差。性能指标既考虑了控制器的输出动作,又考虑了真实设定值和虚拟设定值之间的差异。

选择具有最低性能指标的控制器作为下一次扫描的主动控制器。该性能指标被集成于适应期内,该适应期定义为检测到过程变量合理变化的时间。

5.4.2 基于模型的递归整定

基于模型的递归整定通过调整过程模型来适应过程本身的变化,并基于模型对控制器参数予以更新(Chien 和 Fruehauf,1990)。该过程模型被建立并适用于时域或频域。时域或频域的最常见的经典方法是如图 5-17 所示的递归适应方法,即在每次扫描时调整模型参数。

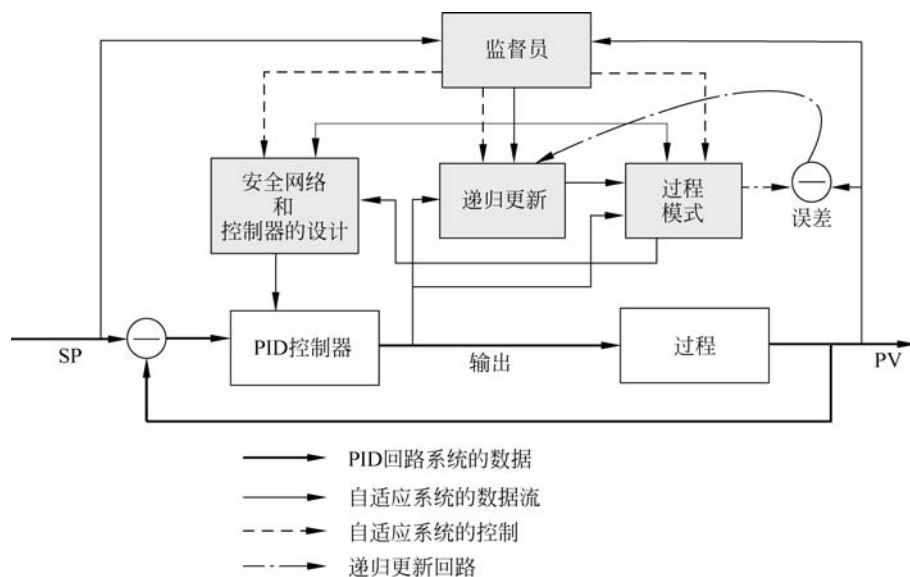


图 5-17 具有递归自适应的 PID 回路

自适应 PID 回路包括监督器和安全网络,这两个典型的功能块适用于任何自适应设计。一旦一些适应条件(主要由控制误差定义)存在,监督器模块就可激活递归模型更新机制。该递归机制首先更新校正项,然后对过程模型参数进行递归更新:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + P_k x_{k-1} e_k \quad (5-10)$$

其中,

θ_k ——过程模型参数向量;

P_k ——校正项(矩阵);

x_{k-1} ——过程输出和输入变量的回归向量;

e_k ——与模型输出相关的模型输出误差。

然后,基于更新的模型对控制器参数进行重新计算。递归识别器的一些典型问题有初始参数的选择、激励不足、滤波、参数饱和以及参数跟踪速度慢等。

5.4.3 离散傅里叶变换的自适应技术

离散傅里叶变换(DFT)是许多信号处理应用中的一种基本运算。离散傅里叶变换的实用价值已在许多技术领域得到认可。由 Lamaire、Valavani、Athans 和 Stein(1991)提出的控制系统识别的 DFT,其实际实现已经引起了人们的极大兴趣。

一些工业控制器有几个应用频域整定的自整定系统,虽然它们不使用 DFT。Hägglund

和 Åström 于 1991 年设计了一种控制器,该控制器从设定值变化和自然扰动处进行整定。通过在过程输入和输出上使用带通滤波器来选择特定的整定频率。该滤波器的频率由一个按需整定器设定,该整定器定义了使用继电器振荡技术的最终周期。整定器通过使用简化的递归最小二乘估计对整定频率的过程增益予以定义。整定器可从设定值变化或自然扰动处执行操作,并且可以包括在控制器输出或设定值处植入的外部激励。通过使用离散傅里叶变换估计器代替递归最小二乘估计(Wojcisz,1996)来实现这种设计的简化。一个 DFT 整定器的设计如图 5-18 所示。

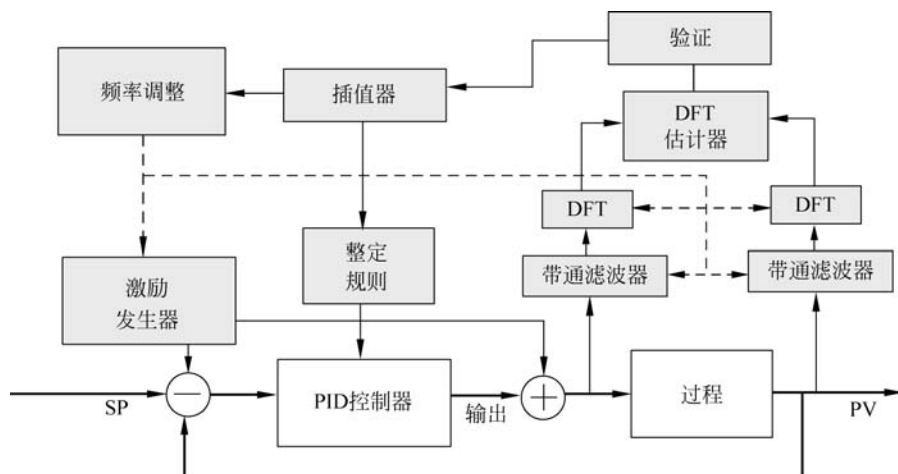


图 5-18 一种带有多频率估计器和内插器的 DFT 整定器

在输入和输出上应用 DFT 计算,并对每个滤波频率的后续传输函数估计进行定义。检定装置检测了随频率增加单调过程增益和相位的减少量。内插器对相移为 $-\pi$ 点位的频率和过程增益进行了确定。根据这两个参数可直接计算最终周期和最终增益,并用于 PID 控制器整定和为下一个周期建立整定频率。所需的激励水平取决于临界频率附近的过程增益和阀门性能。与性能较好的同等回路相比,拥有显著电子管滞后性和黏性的回路需要 2~3 倍的激发能级。虽然从设定值变化处进行整定是可行的,但大多数情况下从注入激励处进行整定可提供一致的结果,并被认为是整定器操作的基本模式。

5.4.4 带模型切换和参数插值的自适应整定

基于逻辑的切换策略已经被许多研究者提出作为实现自适应控制的方法[见(Gendron, 1990)、(Morse, Pait 和 Weller, 1994)]。这种方法使用了基于识别器的参数化控制器,该参数化控制器由两个参数相关的子系统组成,其中一个子系统是识别器,其主要功能是生成输出估计误差;另外一个子系统是内部控制器。反馈给该过程的控制信号基于过程模型的当前估计。一般而言,这种估计是从指定的可容性模型组内选出的。

总的策略是基于“循环切换”的概念,在有或没有过程激励的情况下采用循环切换。Narendra 和 Balakrishnan(1997)提出了一种具有 N 个识别模型且并联运行的架构。与每个模型相一致的是参数化控制器。在每一时刻,通过切换规则选择其中一个模型,并使用相应的控制输入来控制该过程,其中模型可以是固定的或自适应的。使用固定模型的基本原

理是确保至少有一个模型具有足够接近未知过程的参数。这种方法虽无须达到自适应的理想速度,但需要使用大量模型。如果不是切换模型,而是通过模型参数插值进行自适应,那么所需使用的模型数量将会急剧减少。图 5-19 显示了具有模型切换和参数插值的 PID 自适应控制器[见(Wojciszyn, Blevins 和 Wojciszyn, 2003)、(Wojciszyn 和 Blevins, 2006)]。

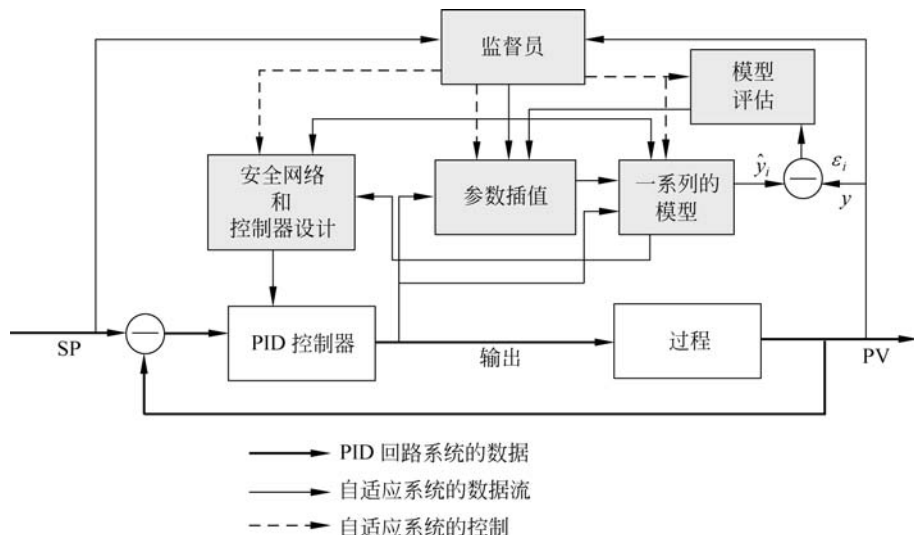


图 5-19 具有模型切换和参数插值的自适应 PID 控制器

此设计的核心是一组模型,而过程识别的基础是多模型评估。每个模型均包含三个参数($p=1,2,3$,即增益、时滞和滞后)。为每个参数设定 N 个值,那么模型组有 $M=N^3$ 个模型。用 $v_p(n)$ 表示参数 p 的第 n 个数值。

$$p=1,2,\dots,P, \quad n=1,2,\dots,N$$

一阶时滞模型的设定值为 $P=3, N=3$,并为每个参数假定三个数值。

自适应模型识别是用以下方式进行执行的:

监督器检测过程输出[即已控变量($y=P\dot{V}$)]、设定值 SP 或操纵过程输入($u=OUT$)中的变化。

如果存在任何超出最低限度的变化,那么模型评价就会启动。这包括:

- 所有模型初始化以及基于当前过程输出的模型输入调整;
- 所有基于操纵过程输入变化的模型增量更新;
- 为每次扫描 k 计算每个模型 i 的均方差 $e_i^2(k) = (y(k) - \hat{y}_i(k))^2$, 其中,
 $y(k)$ —— k 时点的过程输出;
 $\hat{y}_i(k)$ —— k 时点的第 i 个模型输出。

如果参数值被评价模型所使用,方差对应于模型 i 的每个参数值。任何不属于评价模型部分的参数值的赋值均为零。接下来对模型 $i+1$ 进行评估,然后再次将均方差分配到每个参数值,并与之前已分配的均方差一同分配到相应的参数值。持续对模型进行评价,直到完成所有模型的评价为止。根据评价结果,每个参数值都被分配了来自已经使用了该特定参数值的所有模型的均方差的总和。因此,对于一次扫描 k ,每个参数类型在 n -th 的值,即 $v_p(n)$,均被分配了均方差 $SE_p^n(k)$ 。

$$SE_p^n(k) = \sum_{i=1}^M \gamma_p^n e_i^2(k) \quad (5-11)$$

其中, M ——模型的数目。

如果拥有数值 $v_p(n)$ 的参数 p 被用于模型内, 那么 $\gamma_p^n = 1$; 否则, $\gamma_p^n = 0$ 。

在扫描 $k+1$ 重复进行模型评价, 并且将每个参数值的均方差之和加到先前扫描中累积的适当参数值之和。继续进行自适应循环, 直到完成既定的扫描数量 ($1 \sim K$) 或直到输入上已有足够激励为止。作为该过程的结果, 拥有数值 $v_p(n)$ 的每个 p 型参数均在评价期间具有指定的均方差和 SSE_p^n 。

$$SSE_p^n = \sum_{k=1}^K SE_p^n(k) \quad (5-12)$$

在自适应周期内, SSE_p^n 的逆运算为

$$F_p^n = 1/SSE_p^n \quad p=1,2,3; \quad n=1,2,3 \quad (5-13)$$

将参数 p 的自适应参数值 a_p 作为用于评估的参数 $v_p(n)$ $n=1,2,3$ 所有数值加权平均数进行运算。

$$a_p = v_p(1)f_p^1 + v_p(2)f_p^2 + v_p(3)f_p^3 \quad (5-14)$$

其中 f_p^n 是 0-1 值域内的归一化 F_p^n 值:

$$f_p^n = F_p^n \left(\sum_1^N F_p^n \right) \quad (5-15)$$

被用来计算参数 p 的加权平均值的系数 f_p^n , 与分配给该参数的值 n 的均方差之和成反比。因此, 一方面, 如果一个参数值与建模的较大误差相关, 那么该参数对自适应参数值的贡献较小; 另一方面, 如果一个参数值与建模中的小误差相关, 那么此参数对自适应参数值的贡献较大。计算出的适应参数定义了一个新模型组, 该模型组的中心参数值为 a_p , 该模型组的适应周期的参数接受变化范围为 $a_p \pm \Delta a_p$, $p=1,2,\dots,P$ 。在此范围内, 应在下一个适应周期内确定最低限度上的两个参数。通常使用三个参数: $a_p - \Delta a_p$, a_p , $a_p + \Delta a_p$ 。

一阶时滞过程模型以离散形式表示为

$$\Delta y(k) = a \Delta y(k-1) + b \Delta u(k-1-d) \quad (5-16)$$

$$a = e^{-\frac{h}{\tau}}, \quad b = k(1 - e^{-\frac{h}{\tau}}) = k(1-a) \quad (5-17)$$

其中,

Δu ——适应开始后的过程输入递增改变;

Δy ——模型输出增量变化;

τ ——模型时间常数;

h ——回路扫描阶段;

d ——回路扫描阶段的过程滞后。

模型内每个参数有三个数值, 那么评估的模型数量为 $3^3 = 27$ 。

可通过修改以下基本算法增加收敛和减少模型数量:

(1) 依次执行参数适应, 每次一个参数。用这种方法可以将一阶时滞模型的模型组合模型数量减少到 $3 \times 3 = 9$, 如图 5-20 所示。

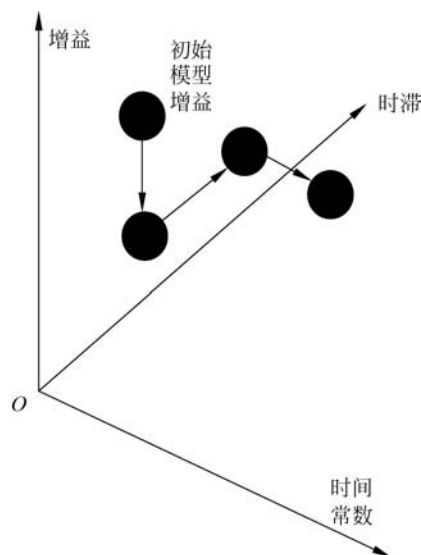


图 5-20 参数适应和插值的顺序

(2) 通过多次运行算法,反复使用原始数据集和执行适应,如图 5-21 所示。

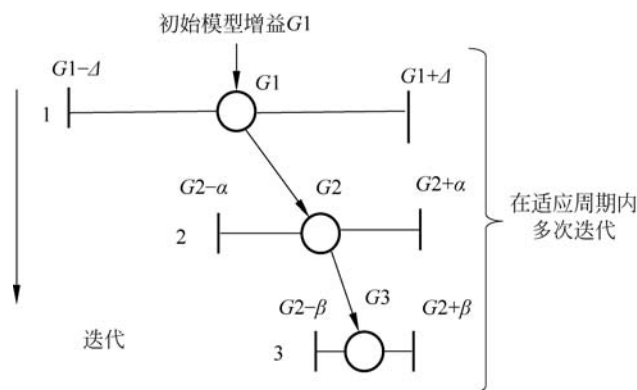


图 5-21 迭代参数适应

对于一个顺序适应过程,其某个参数在一个计算周期中被更新,该更新是按以下顺序执行的:先是过程增益,然后是时滞,最后是模型适应周期的时间常数,如图 5-20 所示。

图 5-21 解释了参数适应,显示了如何使用相同的测试数据集迭代地改进参数适应值。每次迭代后,参数自适应范围变小,提高了参数辨识的精度。

图 5-22 描绘了模型适应,展示了过程输出是如何与三个模型的模型输出相匹配的。

在模型适应完成后,控制器便利用一阶时滞过程模型开始进行重新设计。任何基于整定规则的模型均适用,尤其是 Lambda 或 IMC。如果操纵输入中不频繁的变化,那么外部激励将自动地以自动模式被输入到操纵输入中。振幅为 3%~7% 的 PID 输出脉冲和几个扫描持续时间,对于过程模型识别来说通常是足够的。这种类型的短激励不会对过程输出造成显著干扰。

同样的适应技术可以被应用于反馈通路和前馈通路,其建模结构如图 5-23 所示。

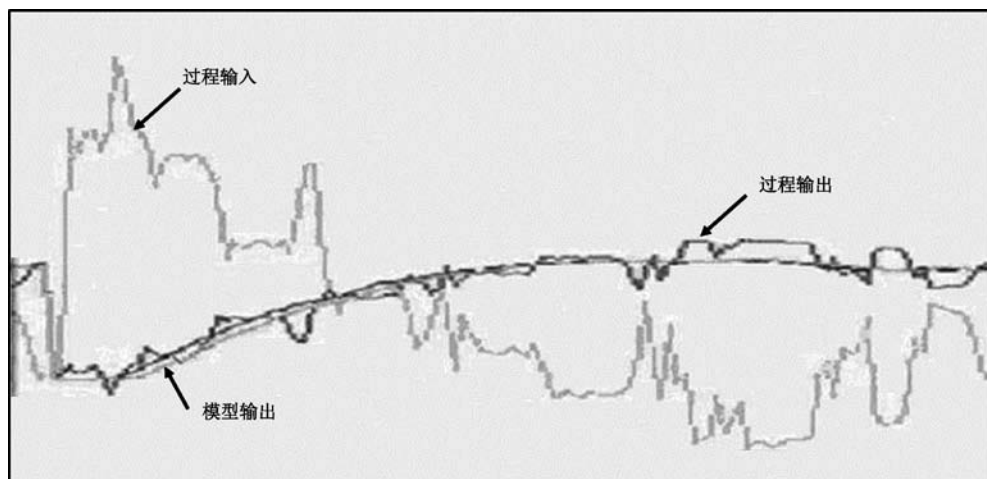


图 5-22 自适应模型验证策略

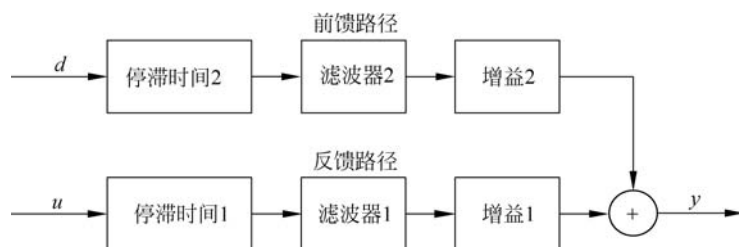


图 5-23 用于适应性反馈/前馈 PID 控制器的模型结构

如果前馈通路模型已知,那么可以应用动态前馈控制器设计式(5-18)(Seborg, Edgar 和 Mellichamp, 2004)

$$G_f = -\frac{K_f}{K} \frac{1+s\tau}{1+s\tau_f} \quad (5-18)$$

其中,

G_f ——前馈控制器传递函数;

K_f, τ_f ——前馈模型的静态增益和时间常数;

K, τ ——反馈模型的静态增益和时间常数。

应用自适应技术允许安全网络的几个级别如下:

- 为模型参数设置限定值;
- 在一个适应周期内模型参数适应的设定范围;
- 验证模型;
- 检测和防止振荡。

在初始化时,对所有模型参数的上限值和下限值进行自动设定。除非操作员做出更改,否则自始至终应满足这些限定值。

在特定的适应周期内,参数变化的最大范围是预先定义的,并且是受到限制的(通常是参数可接受范围的 $\pm 25\%$)。

模型验证和预防是该技术的一个独有特点。可将适应性模型的质量作为过程输出计算值和过程输出实际值之间的均方差来进行计算。计算三个模型的剩余误差,一个是有额定参数 a_p 的模型,另外两个是有 $a_p - \Delta a_p$ 和 $a_p + \Delta a_p$ 的模型。这使得可同时对特定模型和比较模型进行验证评价。

在比较模型验证中涉及几条准则的运用:

- 最大残留误差与最小残留误差之间的比率。如果该比率接近于 1,则意味着噪声水平较高或离模型实际值的距离较为明显。如果该比率较高,则意味着模型参数的噪声水平较低和/或收敛速度较快。
- 测试有参数中间值的模型是否具有最小误差。满足此标准表明模型实际值介于参数下限范围和上限范围之间,且内插参数值应接近于实际值。
- 当前模型质量可被用于调整一些滤波器,该滤波器只适用于过滤自适应模型更新的当前适应模型的一部分。

最后,在适应性方面占有一定数量的统计模型评价,可以提供下一级和明显更为可靠的模型验证。在定义统计模型质量时应考虑的因素如下:

- 适应数量。
- 平均模型质量。
- 当前和先前适应的模型质量。
- 最后一次适应的模型参数标准偏差。

从经验来看(<http://www.easydeltav.com>),被各个行业接受的适应性整定器产品要求一个健壮的整定技术、多级安全网、用户友好的界面以及控制性能报告软件(见第 3 章)。

参考文献

1. Åström, K., Hägglund, T. *Automatic Tuning of PID Controllers*, Research Triangle Park: ISA, 1988.
2. Åström, K., Hägglund, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* Research Triangle Park: ISA, 1995.
3. Åström, K. J., Hägglund, T. *Advanced PID Control*, Research Triangle Park: ISA, 2006.
4. Brozenec, T. F., Tsao, T. C. and Safonov, M. G. "Controller Validation" *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 15, 2001, pp. 431-444.
5. Chien, I-L., Fruehauf, P. S. "Consider IMC Tuning to Improve Controller Performance" *Chemical Engineering Progress*, vol. 86(10), pp. 33-41, October 1990.
6. Gendron, S. "Improving the Robustness of Dead-time Compensators for Plants with Unknown or Varying Delay" *Preprints of the Control Systems 90 Conference*, Helsinki, 1990.
7. <http://www.easydeltav.com/>
8. Jun, M., Safonov, M. G. "Automatic PID Tuning: An Application of Unfalsified Control" *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Hawaii, USA, August 1999.
9. Lataire, R. O., Valavani, L., Athans, M., Stein, G. "A Frequency-domain Estimator for Use in

- Adaptive Control Systems”*Automatica*, Vol. 27, No. 1, 1991, pp. 23-38.
10. Maršik, J., Strejc, V. “Application of Identification-free Algorithms for Adaptive Control”*Automatica*, Vol. 25, No. 2, 1989, pp. 273-277.
 11. Morse A. S., Pait, F. M., Weller, S. R. “Logic-Based Switching Strategies for Self-Adjusting Control”*Presented at 33rd IEEE Conference on Decision and Control, Workshop Number 5. Lake Buena Vista, Florida, USA, December 1994.*
 12. Narendra, K. S., Balakrishnan, J. “Adaptive Control Using Multiple Models”*IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 2, February 1997, pp. 177-187.
 13. Safonov, M. G., Tsao, T. C. “The Unfalsified Control Concept and Learning”*IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 6., Jun. 1997, pp. 843-847.
 14. Seborg, D., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, Hoboken, N. J., 2004.
 15. Wojsznis, W. K., Blevins, T. L. “State Based Adaptive Feedback Feedforward PID Controller” U. S. Patent 7,113,834, 2006.
 16. Wojsznis, W. K., Blevins, T. L., Wojsznis, P. W. “Adaptive Feedback/Feedforward PID Controller” *Proceedings of ISA Technical Conference*, Houston, 2003.
 17. Wojsznis, W. K. “Discrete Fourier Transform Based Self-Tuning”*Advances in Instrumentation and Control, Proceedings of ISA/96 Technical Conference*, Chicago, October, 1996.
 18. Wojsznis, W. K., Borders, G. T. Jr., McMillan, G. K. “Flexible Gain Scheduler”*ISA Transactions* 33(1), May, 1994, pp. 35-41, Elsevier, New York.
 19. Wojsznis, W. K., Gudaz, J., Blevins, T. L. “Adaptive Model Free PID Controller” *Paper presented at Fifth SIAM Conference on Control Applications*, San Diego, CA, July 2001.