

第 3 章 评价控制系统性能

如图 3-1 所示,许多工业过程控制系统都涉及对多个运行单元的控制,其中包含数以百计的测量工具与控制回路。尽管这些控制系统被设计成能对历史运行数据自动归档,但是检查历史数据以确定控制系统的性能是否发生了可能影响工厂吞吐量或最终产品质量的变化是很耗时的。因此,在大多数情况下,工厂的过程工程师、控制工程师以及设备技术员都需要花费大量的时间来应对这类问题。控制系统通常没有时间或资源来用于检查控制性能,以便提前主动处理影响操作性能或产量的问题。

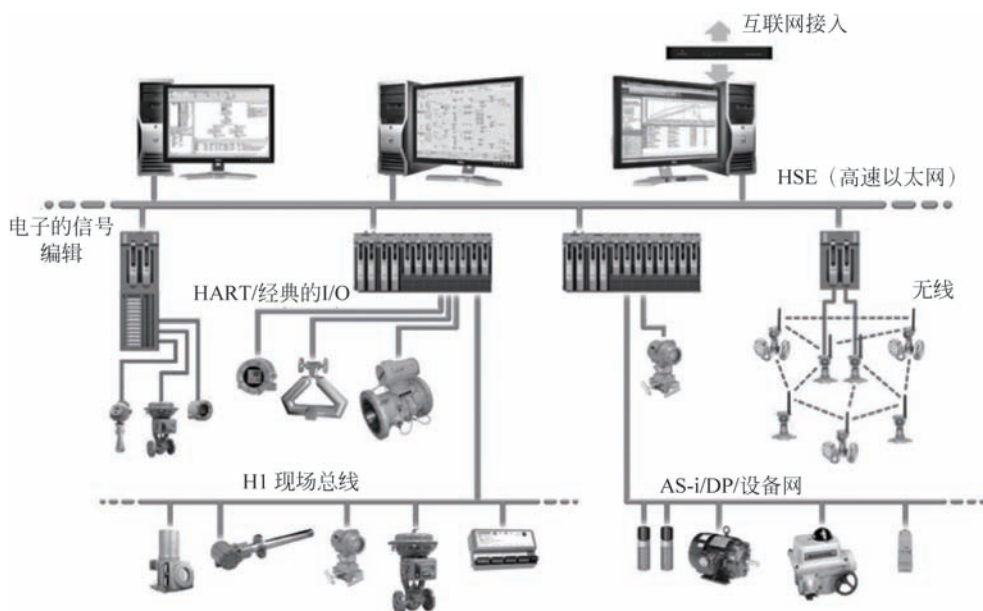


图 3-1 分布式控制系统实例

许多北美工厂都存在人力资源匮乏的现象,在过去的 20 年间,公司工程人员数目急剧下降。因此,运行中的工厂不能像过去一样,向工程人员寻求帮助,来分析并校正限制工厂生产及效率的测量和控制的问题。现在,控制系统中应当有合适的工具,用于自动评估控制性能,并快速识别并校正量测或控制错误。

基于场地的可调整量的过程控制系统以及现场总线设备,在 20 世纪 90 年代末期首次引入,支持嵌入式工具,用来提供过程分析、测量及控制问题诊断等功能,如图 3-1 所示。这些工具可用于分析快速和慢速系统。其中某些系统中使用的核心技术支持对反常控制及现场设备操作连续性监测。对于传统的分布式控制系统,通过在控制系统的顶层放置性能监测工具,可实现类似功能。然而,在某些情况下,分层应用的通信速度,可能会限制系统监测更快控制回路的能力。对于用于老的分布式控制系统和可编程逻辑控制器(PLC)系统的任何分层应用程序,这些限制是固有的。

在现代分布式控制系统中,性能监测工具可被用于监测控制回路,自动检测回路性能下

降,以及检测在测量、执行器或控制功能块中的不正常状况。通过使用自动系统性能监测和内置的诊断工具,通常有限的工厂维护资源可被用于解决测量、执行器和控制功能块的问题。这样一来,可削减工厂维护成本,系统性能可维护在较高水平,并且减少过程中的波动。任何总体系统性能的增加或者可变性的减少,都可以直接导致更高的工厂吞吐量、更高的操作效率和(或)更好的产品质量。

为获得最大收益,安装在控制系统中的、用于评估工厂性能的监测工具,应当同时支持过程分析和过程诊断。

- 过程分析是对过程、过程各个组成部分以及各部分之间的关系所做的检查。
- 过程诊断是对过程条件或问题的起因或特性所做的调查。

对过程性能的评估是一个实时过程,包含过程分析和过程诊断,如图 3-2 所示。

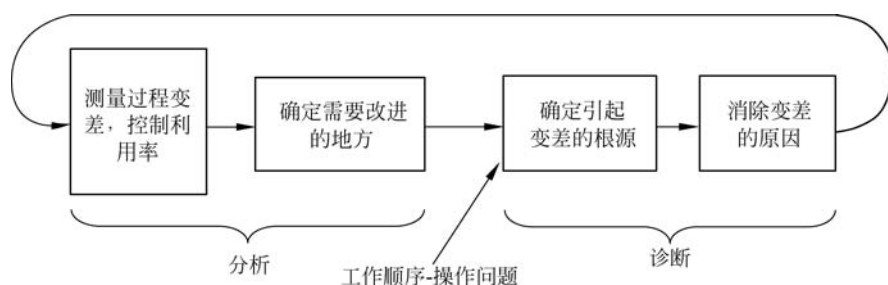


图 3-2 对过程性能的评估是一个持续性过程

大多数性能监测工具,能够检测控制回路的瞬时利用率及在一段历史时间内的平均利用率。控制回路利用率(通常简称为控制利用率)是指:控制回路在某个指定周期内,其设计模式(“正常模式”)的运行时间百分比。如果控制利用率低于正常水平,那么用户可以选择过程区域的详细视图,该视图显示了每个控制回路的利用率。一个控制性能监测工具的功能实例,如图 3-3 所示。该图也显示了自动收集到的关于控制系统性能的某些信息。

- 资源管理树允许简易的导航的控制层次结构
- 总体展示总结了系统、区域、单元和模块的性能
- 针对问题回路的异常控制条件
 - 控制服务状态
 - 错误的模式
 - 被限制的控制输出
 - 坏的或者不确定的输入
 - 控制性能状态
 - 标准的微分
 - 变差的指示
 - 振荡的指示
 - 整定的指示
- 设备和阀的诊断

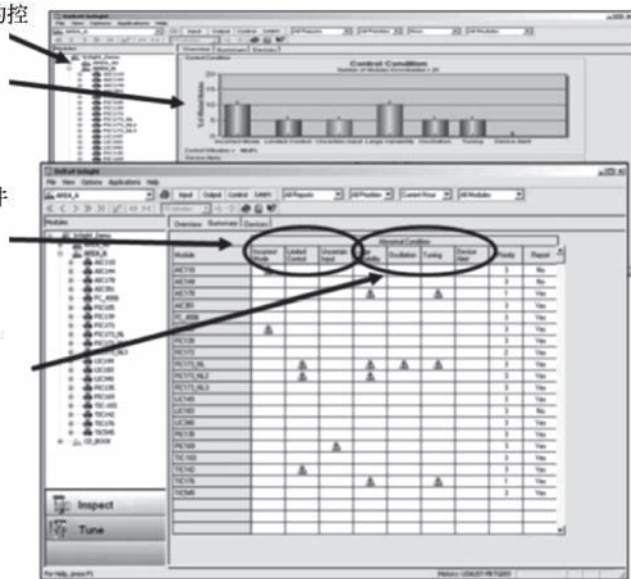


图 3-3 检测控制利用率的工具

报告生成是性能监测工具的重要特色。报告可用来生产应对低控制利用率的管理方案,也可用于确定影响工厂产量和产品质量的多余的过程变差。性能监控报告实例如下所示。根据报告的目的不同,通常有多个报告选项:总体报告、区域性能报告、控制回路详细报告以及用户定制报告。区域性能报告实例如图 3-4 所示。

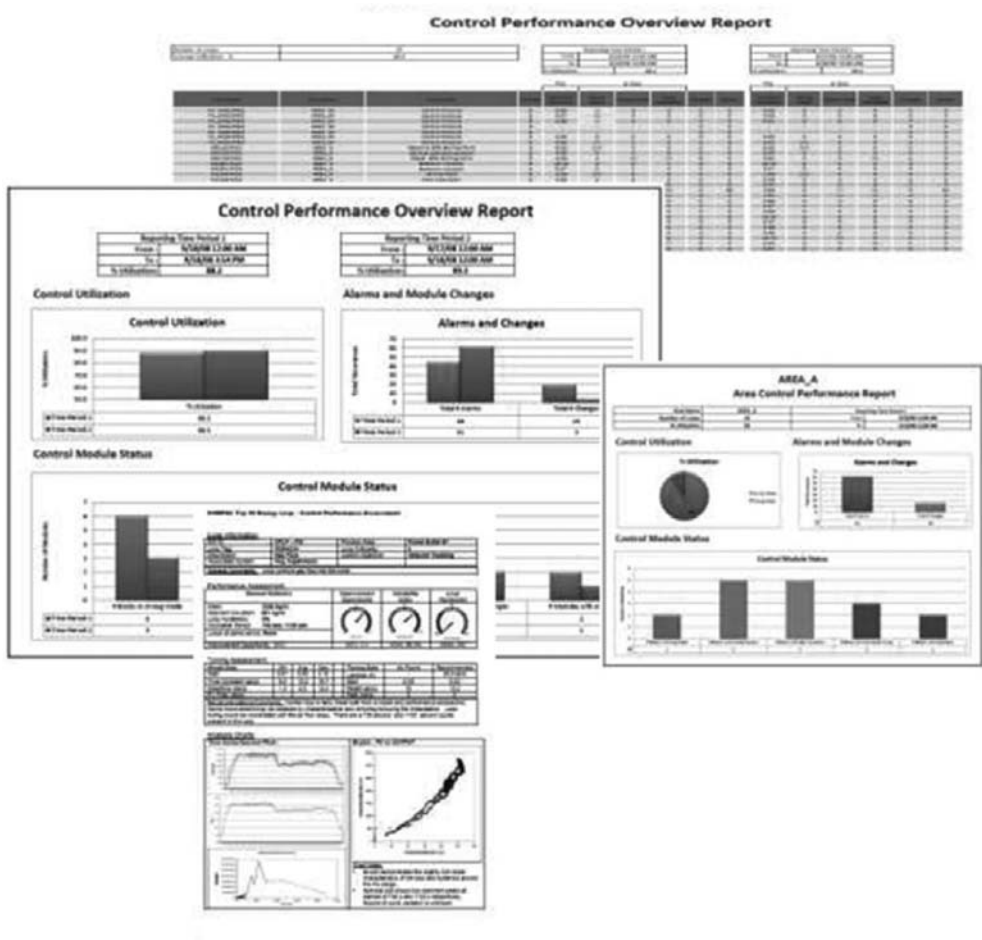


图 3-4 性能报告实例

总之,使用性能监测工具,在有限的人力资源支持下,能够高效地分析并诊断控制性能。使用此类工具,能够显著提升工厂产量和产品质量。

3.1 控制性能评估

工厂操作员通常要管理一个或多个过程区域,每个过程区域又包含数百个控制回路和过程量测。如果过程区域中的控制回路处于自动模式下,并且能够自动补偿扰动,还能够将运行状态维持在操作员设置的控制回路设定值上,那么操作人员的工作将会变得更加轻松。因此,只有当某个测量或控制问题导致控制回路无法满足操作要求或性能要求时,操作员才

会将控制回路设置为手动模式。因此,在评价测量和控制性能时,应当首先量化工厂内各过程区域中当前及之前的平均控制回路利用率。

大多数性能监测工具能够检测控制回路的瞬时利用率及一段历史时间内的平均利用率。如果利用率低于正常水平,用户可查看过程区域细节视图,其中显示了每个控制回路的利用率。

通过比较模式参数的实际值和标准值,可确定控制利用率。PID 功能块的模式参数,可确定功能块设定值的源和输出值的源。该参数是操作员与 PID 功能块接口的重要组成部分,由四个属性组成:

- 目标值——操作员要求的操作模式;
- 实际值——基于目标模式可得到的操作模式,以及 PID 功能块的输入状态;
- 允许值——针对特定应用,操作员可使用的模式;
- 正常值——PID 功能块的正常操作模式。

实际模式属性可以采用除目标模式属性指定的值以外的值。当某个内部条件或输入状态表明操作员通过目标模式属性所要求的操作模式无法实现时,就会发生这种情况。在正常操作条件下,目标模式属性和实际模式属性是匹配的。当实际模式属性变为本地覆写(Local Override, LO)时,输出跟踪或内部应用(如自动整定)将被设置成功能块输出。类似地,如果通向过程的路径损坏,那么实际模式属性将变为手动初始化(Initialization Manual, IMan),如表 3-1 所示。

表 3-1 实际模式属性及其说明

实际模式	含 义
本地覆写(LO)	激活跟踪或自动调整,控制输出量
手动初始化	物理输出的前向路径损坏,输出跟随下游功能块变化

如果 PID 控制的实际模式为手动初始化,则通向该过程的路径是不完整的。如果从级联模式中取出一个下游功能块,则通向该进程的路径可以变成完整的。路径不完整可能是由于下游功能块不处于级联模式,也可能是因为物理条件的限制,例如 PID 控制的某个执行器不能正常工作。

在没有安装和/或没有使用性能工具的工厂中,检查控制利用率可能会令人震惊。例如,在 20 世纪 80 年代中期,针对一个主要的纸浆和造纸工厂进行了一项控制调查,工厂的控制系统被更新到最新的分布式控制系统,当时还没有性能工具来自动评估控制系统的性能。但是,可能可以通过使用工厂操作的快照来人为地评估控制利用率。调查的结果如表 3-2 所示。

表 3-2 制浆造纸厂控制利用率

过程区域	控制回路	正常模式	利用率/%
漂白车间	78	60	76
动力车间	185	130	70
制浆车间	174	116	66
造纸车间	236	134	56

当管理层看到了这次调查的结果之后,一个仪器小组成立了,以调查那些没有在正常(设计)模式下运行的回路。该小组负责及时解决测量、控制阀门以及过程中出现的问题。过程变化的减少,极大地提升了工厂的产量和产品质量。两年之后,工厂产生了新的生产记录。

即便是今天,安装有最新控制系统和现场设备的过程区域仍然有类似情况发生。例如,近期对石油化工工厂中七个区域的调查,用到了嵌入控制系统中的性能监测工具。该工厂中控制利用率如表 3-3 所示。

表 3-3 石油化工工厂控制利用率

系 统	回 路	利用率/%
PX	471	67.3
APS& VPS,CLE,硫回收	469	59.7
精炼车间	478	60.9
联合循环发电/辅助锅炉	946	52.7
乙烯	1355	77.5
催化裂化装置	475	48
C4	164	68.9

一旦石油化工工厂的管理层意识到工厂核心过程区域的控制利用率低下,势必要投入人力和资金,调查和纠正妨碍操作员按照设计使用控制的测量、控制和过程问题,这导致了重大的操作改进。

这些例子表明,改进控制性能的途径应该从对控制利用率的评估开始。控制系统自动收集控制利用统计信息,这对于识别测量、控制、过程设计和操作中的问题具有重要的意义。

如果某些工厂没有一个可以提供控制性能监控的嵌入式控制系统,那么该功能实现可以放置在现有的控制系统中。当控制回路没有被充分利用时,应当找到造成该情况的原因,并采取措施解决。一旦控制利用问题得到解决,就可以开始检查控制参数中的可变性,用它的标准偏差表示。当参数变化巨大,对工厂产量或产品质量造成影响时,应当调查参数变化的原因,并采取措施减少变化。在随后的章节中,我们将探索当控制回路按照其设计操作模式运行时,改善控制利用率和减少过程变化的步骤。

3.2 提高控制的利用率

在工厂正常操作条件下,当控制回路利用率下降时,应当进一步探索影响控制回路在其设计操作模式下运行的测量或控制问题,如图 3-5 所示。为使系统利用率达到最大化,改善系统维护与操作之间的交互是十分重要的。

当一个控制回路不在正常模式(通常是自动模式)下运行时,就需要对回路控制利用率低的原因做进一步研究。在自动模式下,影响回路控制利用率的常见原因包括:

- 测量稳健性;
- 不正确整定;
- 阀门/执行器故障;

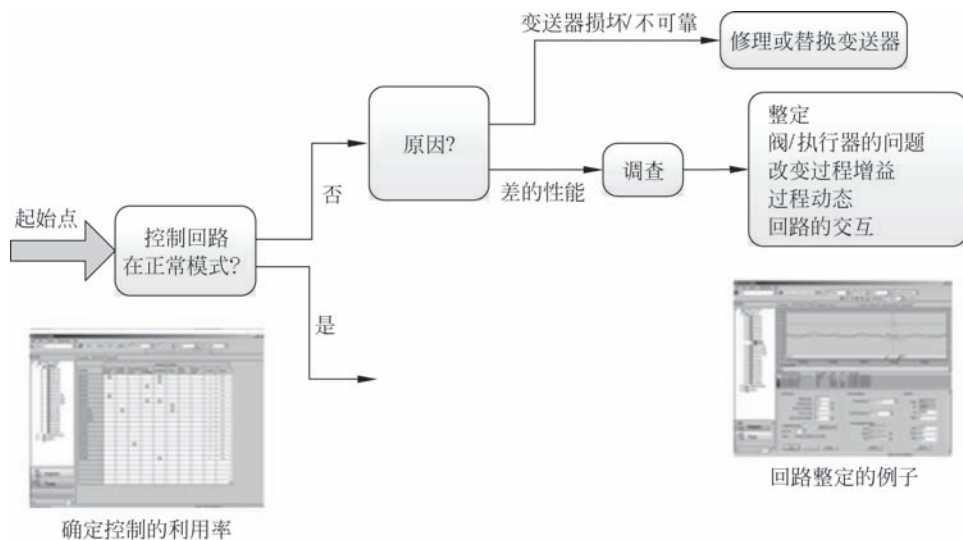


图 3-5 解决影响控制利用率的问题

- 改变过程增益；
- 分程设置；
- 过程动态响应；
- 回路交互作用。

控制性能评测工具提供了一些信息,来指导用户解决性能问题。然而,如果没有明显迹象表明问题来源,则有必要测试并观察回路在手动和自动模式下的操作状态。

3.2.1 变送器的问题

导致控制利用率低下的一个显著原因是变送器损坏或者其性能不可靠。如果控制系统遵循国际功能块标准 IEC 61804,如图 3-6 所示,状态属性总是与测量值进行通信,并提供了测量条件的直接指示。测量状态处于“差”“不确定”“受限制”的时间与运行时间的百分比,可用于确定测量的准确性。该标准定义的模式参数,其目标属性和实际值属性可被用于确定 PID 是否工作在其设计的操作模式。因此,功能块的状态和模式属性是评价测量健康度和控制利用率的基础。

测量值附带的状态属性提供了测量质量的指示。由传统变送器提供的测量输入,其状态属性由模拟输入卡确定。对于传统变送器提供的一个数字值,其状态属性也可由变送器提供。状态属性值由八位组成。最前面两位被用来表示测量的质量,分为“差的”“不确定的”“控制良好的”和“测量良好的”四种状态。状态属性的最后两位,即低优先级位,用于表示高限制、低限制、没有限制或者常数。状态属性的中间四位用于表明为什么质量是好的、坏的或不确定的。一个测量值的健康程度可以根据其状态处于某些值的时间百分比来评估,这些状态值包括坏的状态、不确定的状态或者良好但处于极限的状态。

在模拟输入块生成测量值和状态后,其他使用该输入量的功能块,以某种方式处理并使用该状态量,并向下游功能块传送一个状态量。如果输入块的状态为“差”,那么使用该测量值的块,其实际工作模式无法实现自动操作模式,因此,正常模式属性及实际模式属性

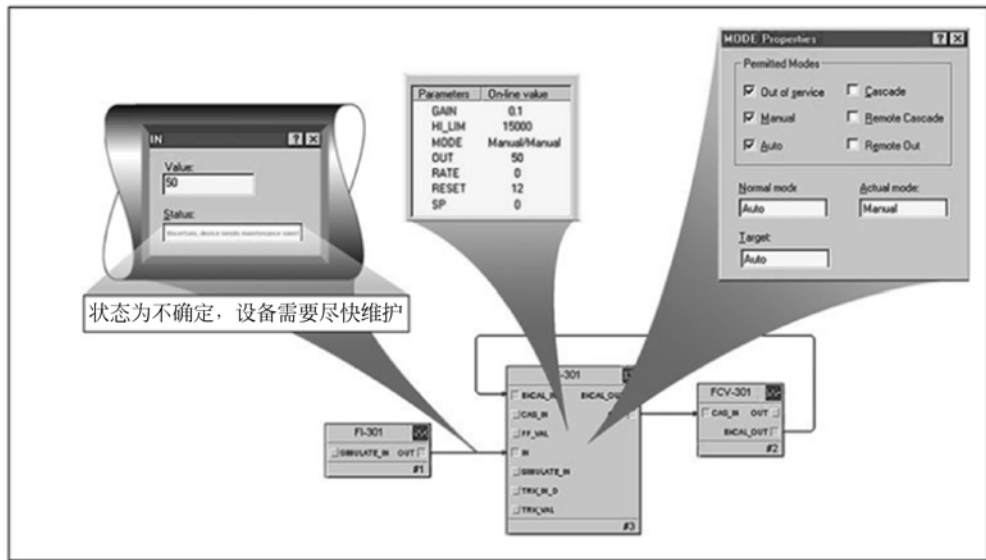


图 3-6 标准 PID 参数

将显示控制没有达到所设计的利用率要求。

与测量相关的大多数问题都可通过校准或更换变送器来快速解决。

3.2.2 不正确整定

回路整定对回路的利用率和性能有着重要影响。控制器的整定参数可以很容易地在较大量程范围内变化,以针对各种不同过程要求调整回路操作。然而,即使在使用先进控制工具时,也需要一些回路整定方面的专业知识;而且,在为控制回路选择的整定过程中,可能无法解释某个进程的行为。这些都是将回路整定视为回路性能下降的主要原因。

在工厂或过程区域设计中,可以根据与控制回路相关联的测量类型(即压力、电平、温度、流量或其他的受控过程变量)来确定初始回路整定。在大多数情况下,默认设定值足够应对新过程区域或工厂的初始设置值。然而,为减小过程变量相对于设定值的变化,减少输入扰动,并且在过程启动或启动完成之后,提供多项操作条件的稳定运行,有必要根据观测到的各个控制回路过程增益和动态响应设定 PID 整定值。不幸的是,参与工程调试的仪表工程师或操作员没有整定回路的机会,这导致了工厂操作效率无法达到最大值。

在工厂实际操作中,工厂职员可采取多种方式修整控制回路的整定参数,以改善控制性能。获得回路整定参数的最直接、最可靠的方式是:基于可测过程增益和动态性能,手动或自动地设置 PID 调节功能块参数(在后面章节中将详细描述)。一些旧的控制系统所使用的模拟单回路控制器和可编程逻辑控制器(PLC),可能不包括一些 PID 整定的工具,使用这类工具时可以基于观察到的输入变化的过程响应而自动建立 PID 整定。现代控制系统通常提供一些功能来自动建立回路整定。

当整定控制回路时,通常会有以下问题:“针对某个特定回路,何为最佳整定?回路控制的性能测量应当基于设定值变化引起的可观测过程响应,还是负载扰动引起的响应?评判回路控制性能时,应当考虑哪些因素?”

这些问题的答案取决于回路的控制目标。如果设定值经常改变,那么回路对其响应情况将成为评价回路性能的重要因素。然而,如果回路设定值为某一个固定值,那么回路对扰动输入的响应将成为评价回路性能的最重要因素。如果回路对设定值和扰动输入的响应都很重要,那么回路整定必须在控制响应之间寻求平衡。

当选择 PID 增益时,应注意过程增益会随着操作条件的变化而改变。为了在控制回路的整个操作范围中,都能够实现稳定可靠的操作,通常采取的方式是:当某个过程在其过程增益最高的区域运行时,对其进行 PID 整定。其结果是,当过程过渡到低增益区域操作时,被控参数变化较大。

3.2.3 阀门/执行器故障

当控制回路被设定为自动控制时,可以很容易地检测到某个阀门或阻尼器对控制系统的响应是否正确。这可以通过观察 PID 输出中被控参数对控制系统变化的响应来实现,如图 3-7 所示。

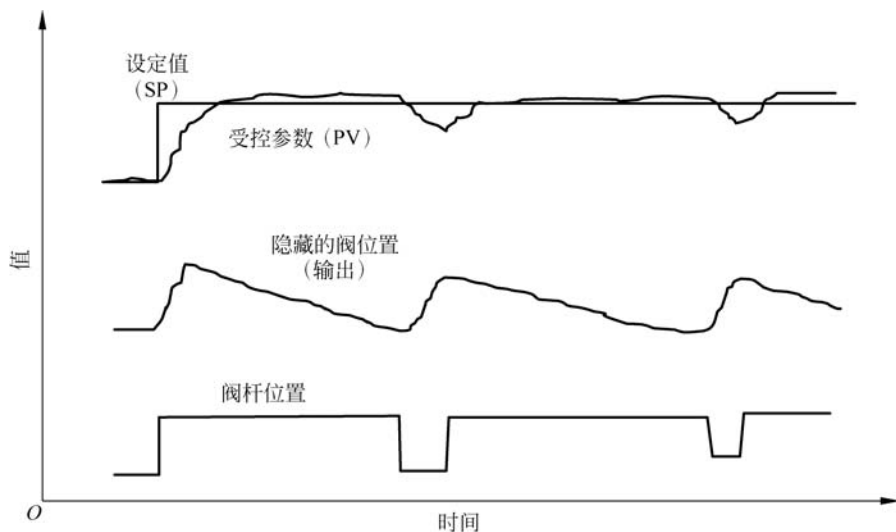


图 3-7 黏性阀门对控制的影响

控制系统调试过程中,最常遇到的问题往往可以追溯到阀门没有安装定位器、定位器安装不当或者定位器故障。控制的首要原则是获得最好的控制性能,所有调节阀都应当安装定位器。没有定位器的帮助,当阀门具有黏性时——大部分阀门都具有此属性,系统的控制性能将严重受限。

黏性阀门(没有定位器)或故障定位器引起的滞回效应,不能通过整定来消除。整定的变化只会影响滞回效应的循环周期。要从根本上消除该效应,唯一的方法是安装阀门定位器。

3.2.4 改变过程增益

从控制角度来看,非常期望过程增益是恒定的。如果该值为常数,则在控制回路的整个操作范围内,都可以使用相同的比例增益。以控制阀门为例,如果阀门特性不是基于过程要求选择的,那么其安装特性将为非线性。

图 3-8 为非线性安装特性的例子,过程增益在 0.5~4 变化,即过程增益可以在其 8 倍范围内变化。

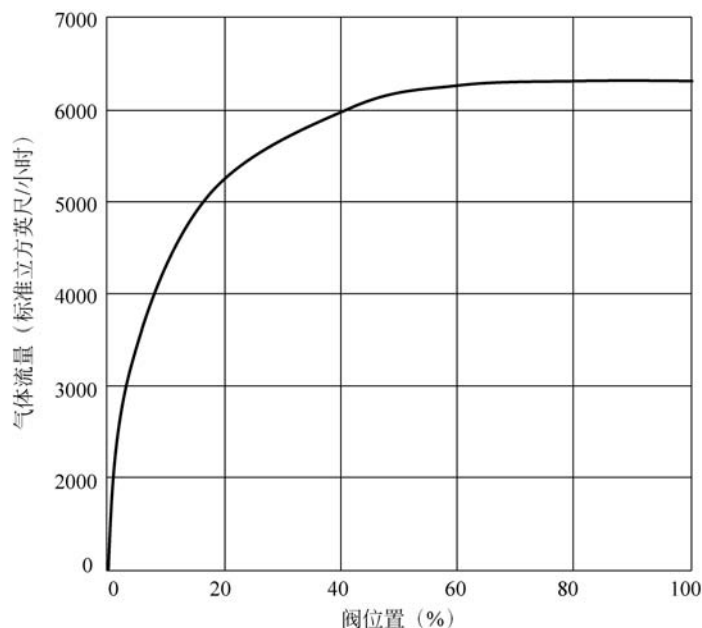


图 3-8 非线性安装特性

对于这种非线性安装特性,通常可以通过被控参数(PV)、设定值(SP)和控制器输出(OUT)的趋势,来观察过程增益随阀门位置变化的影响,如图 3-9 所示。

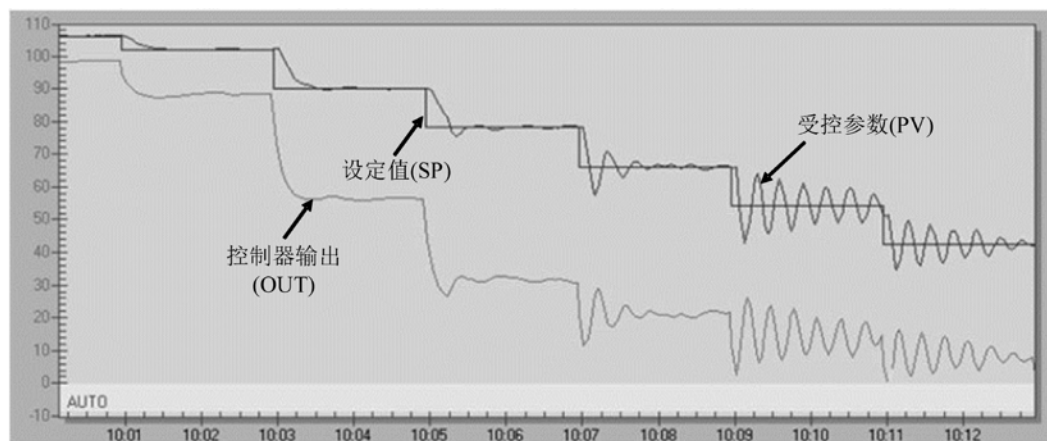


图 3-9 非线性过程实例

如前所述,通过整定高增益区域的控制回路,可以得到稳定的过程操作,但是当在低增益区域操作时,会降低响应的速率。为补偿过程增益变化,可在 PID 和模拟量输出功能块之间安装一个信号表征器(SGCR)功能块,如图 3-10 所示。

表征器功能块的主要输入与输出之间的关系,可以在阀门的工作范围内定义。由特征点定义的曲线与阀门的安装特性曲线成反比。表征器功能块的一个设置实例如图 3-11 所示。

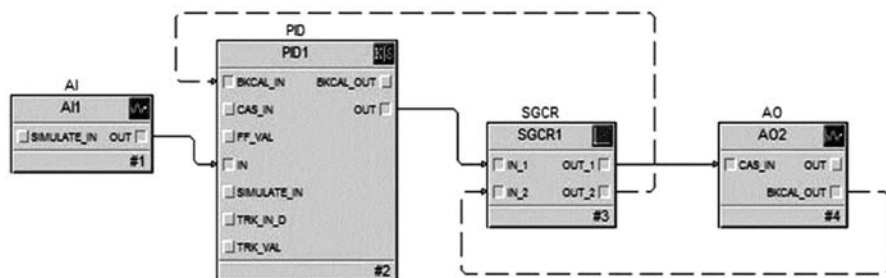


图 3-10 补偿非线性安装特性的工具

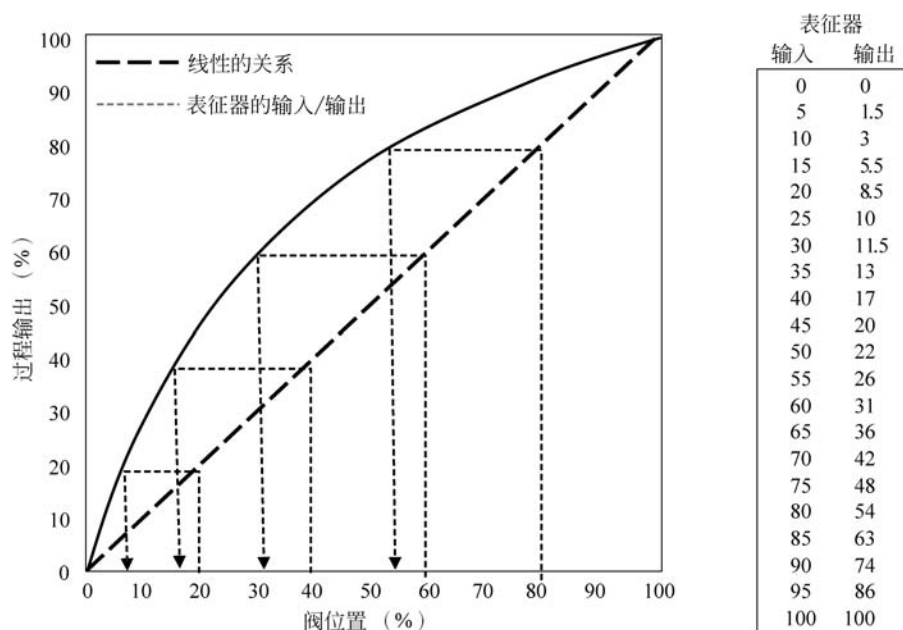


图 3-11 表征器功能块的设置

由于包含有表征器功能块的控制回路,其安装、调试和维护都需要一定的时间及专业知识,所以该方法在过程工业中并不常用。为了提高控制性能,可以修改阀门安装以提供线性安装特性。例如,可以修改阀门内件或安装支持特性描述的数字阀门定位器。

3.2.5 不正确的分程设置

处理多个过程输入的最常用方法是分程控制。在控制策略中,可以使用一个分程功能块(在PID块中作为一个阀门)来定义控制器输出和每个过程操纵输入之间的固定关系。分程控制的一个实例如图3-12所示。

分程功能块的设置要考虑到与每个过程输入相关的增益,以便保持控制操作的一致性。不幸的是,在很多安装过程中,在调试期间,分程范围设置被任意定义为过程输入之间的相等分割。当控制器输出从一个输入转换到另一个输入时,这种的设置可能导致缓慢的或不稳定的操作。

分程功能块的设置对与每个过程输入相关增益的影响,可通过蒸汽压头的压力控制应

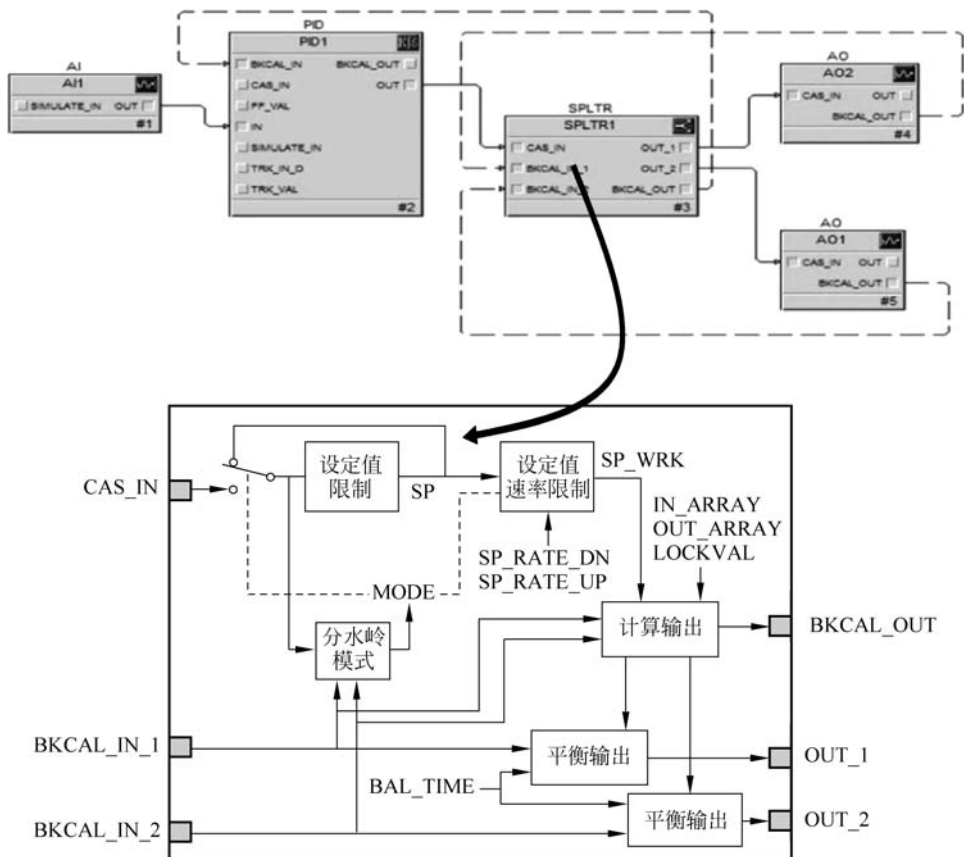


图 3-12 分程控制

用实例来说明。一台或多台动力锅炉可能被用于满足某个工厂的过程蒸汽要求。此外,该蒸汽也可用于涡轮发电机,以满足工厂对蒸汽的部分要求或全部要求。用于发电的汽轮机是由高压蒸汽驱动的。例如,在较新的安装中,压头可能为 1475 磅/平方英寸。蒸汽流经涡轮机时,其压力会降低,从而可以在不同的地方提取低压蒸汽。这种低压蒸汽可用于满足工厂的一些过程蒸汽需求。例如,在某一点上,可以调节抽汽阀以满足 400 磅/平方英寸的集管的蒸汽需求。与涡轮相关的抽汽阀自动调节,以保持较低的联箱压力恒定。为了让工厂在涡轮机或发电机发生故障并必须关闭时能继续运行,可以调节高压头和低压头之间的减压阀(PRV),以满足低压头的蒸汽需求,并维持低压头的压力恒定。

通过使用分程功能块与 PID 功能块来调节减压阀,可实现上述要求,如图 3-13 所示。

由于阀门大小或运行环境各不相同,所以有必要针对这些不同点,对表征器功能块的性能进行配置。

如果某个分程区域内的回路利用率较低,应当检查分程设置中的假设,如果有必要,则可基于控制器的监测结果修改设置,以维持平稳的过程增益。

3.2.6 回路交互

在某些情况下,控制回路的操纵参数能够影响其他回路的控制参数,如图 3-14 所示。

两个回路同时以自动模式运行,通过减少其中一个控制回路的比例增益,这样就可消除

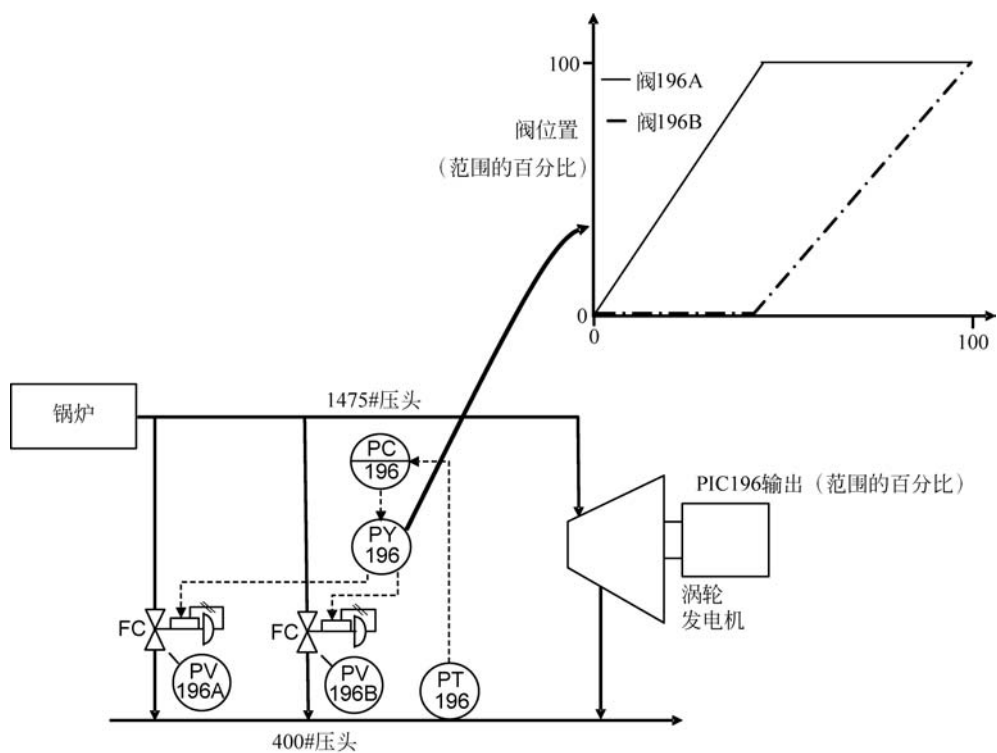


图 3-13 蒸汽压头控制实例

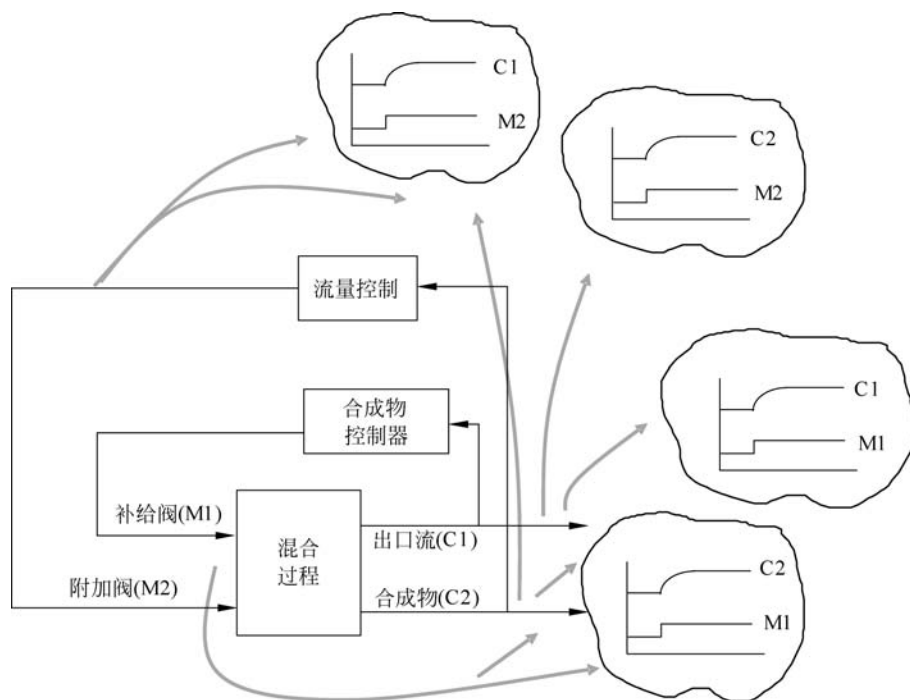


图 3-14 交互回路

回路间的交互作用。与失谐回路相关的阀门(或另一个最终控制元件)将缓慢改变位置。这样,这两个回路将不会相互交互,但付出的代价是失谐控制回路中更高的可变性。

3.3 过程可变性的处理

即使某个控制回路的利用率较高,但是传统的控制技术可能不足以减少增加工厂产量或实现产品质量目标所需的过程可变性。如第2章所述,关键工艺参数的变化会影响产品质量和生产效率。同时,当产量受到过程限制时,通过减少过程变差并使操作接近工艺或设备的极限,可以提高过程的产量。控制回路应当将过程可变性降低到何种程度,在许多情况下取决于控制回路的目标。因此,性能监控应用为检测过度可变性而设定的极限值,应当基于控制回路的设计目标进行调整。例如,借助浮动液位控制,使用过程存储能力缓冲过程可变性,此时设定宽泛的极限值范围是合适的。

系统处于自动控制模式时,性能监视工具可被用于自动量化所看到的过程变化。如果控制系统中不包含自动检测控制变量并生成报告的功能,可以使用工厂历史数据中的统计计算量,或者添加回路性能监控包,该监控包能够直接连接到 DCS 系统或者通过 OPC 连接到工厂历史数据中。OPC 标准是针对不同厂家的控制设备之间的实时数据通信标准。上述两种方式都可以监测控制回路的可变性,并通过先进控制产品的使用来观察过程区域内有待提升的控制性能。

当发现控制利用率可接受,即控制回路在正常过程运行时几乎 100% 处于其设计的运行模式时,那么可根据控制的变化性来检测控制性能(见图 3-15)。如果控制中存在变化量放大时,就需要调查控制性能变差的原因。假设影响控制利用率的问题已经得到解决,控制器也已经被正确整定,在自动模式下,可能会影响控制回路可变性的常见问题如下:

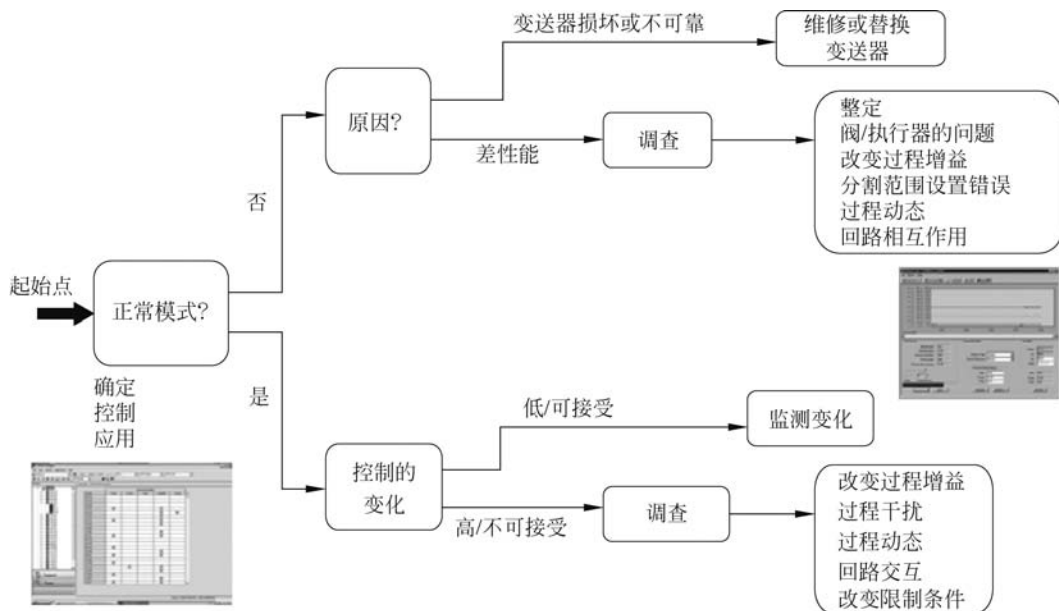


图 3-15 检测控制高可变性

- 过程增益的变化；
- 非测量过程扰动；
- 过程动态性能；
- 回路交互；
- 极限条件的变化；
- 质量参数为实验室测量值。

3.3.1 过程增益和动态性能的变化

在某些情况下,控制性能工具可以提供信息,来指导用户查找控制变化的原因。当不能明确找到问题原因时,有必要在手动模式和自动模式下,观察回路的操作。正如本章所讨论的,在许多情况下,可能需要使用本书其余章节中详细介绍的高级控制工具,来将过程变化减少到实现最佳过程操作所需的水平。

如果控制的变化是由过程增益的变化引起的,那么正如本章前面所述,可以在控制功能块和控制系统输出之间安装一个表征器功能块。此外,如果增益改变是由不正确的分程范围设置造成的,那么应当检查分程功能块的调试过程。然而,如果控制系统支持自适应控制(见第5章),那么使用这种能力来处理过程增益的变化要容易得多。当过程增益变化与控制器输出无关时,自适应控制特别有效。例如,在某些应用中,过程增益随着工厂产量的变化而变化,或者随着某个未测量参数(例如,进料流的组成)的变化而变化。此外,当过程动态性能随增益变化时,自适应控制可能是纠正这些变化的唯一方式,并且可为所有操作条件提供最佳的整定。

3.3.2 非测量过程扰动

有时,高的过程可变性可能是由未测量过程干扰引起的。此时,通常可以通过控制参数与可能影响控制参数的上游测量条件之间的相互关联找到变化的根源。控制性能差的根本原因通常可以追溯到控制设计、整定、测量准确性或执行器性能。例如,主级联回路的性能,可能会因次级回路性能的限制而下降。

在某些性能监控工具中,测量值或者需分析的执行器位置变化分布,通常通过直方图描点来分析。钟形分布表示变化源具有随机性。功率谱是组成测量或执行器信号的元件在选定时间内的频率分布。这些信息有助于确定过程噪声的大小和频率,或者确定由回路相互作用或上游过程引起的频率扰动。其他控制回路以及上游运行环境对控制回路可变性的影响,可通过两者之间交叉相关性确定。图3-16展示了如何在性能监控系统中显示直方图、功率谱、交叉关联和自关联。

如第2章所述,当过程扰动的源可以用测量参数表示时,该输入可作为正馈输入被添加到反馈控制中。通过这种方式修改控制,可以在控制行动中预测和考虑干扰的影响。当多个测量参数对被控参数产生影响,或者可扰动变量与操纵参数变化产生的影响存在动态差异,此时,可使用模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)处理复合扰动或动态差异产生的影响,如第11章和第12章所述。

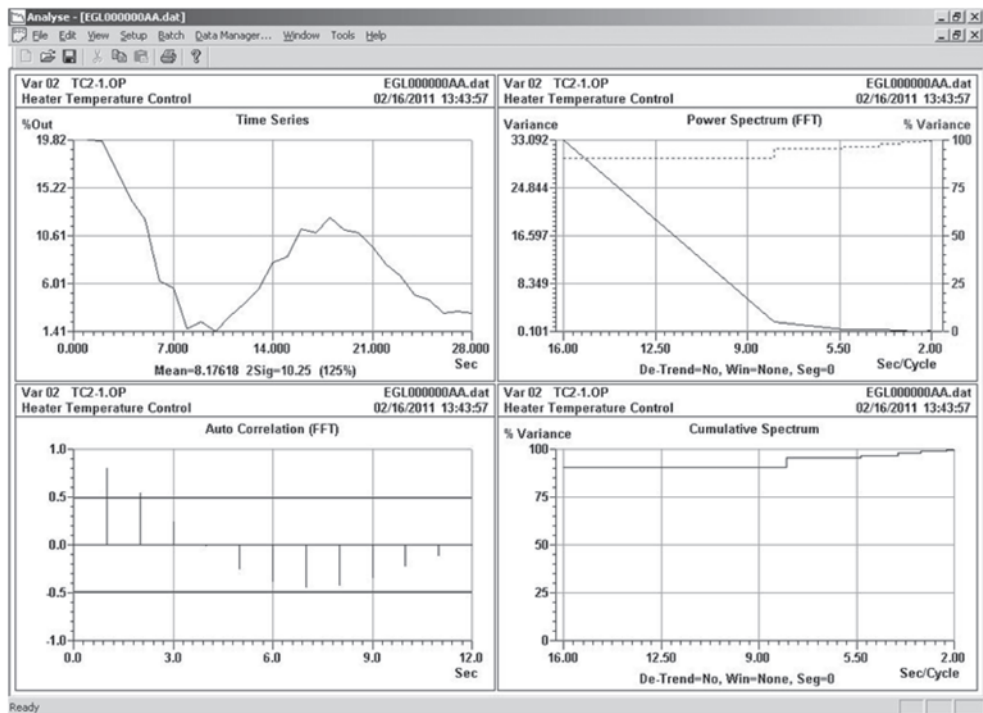


图 3-16 诊断信息显示

3.3.3 过程动态性能

在某些情况下,当一个过程具有显性滞后特征,即当它具有很小的时滞和很大的时间常数时,设定值变化和过程扰动引起的系统动态响应可能无法满足所期望的控制目标。如果系统的设计目标是在最短的时间内达到系统设定值,且无超调量,那么模糊逻辑控制相对于 PID 控制而言,具有更好的响应。在控制参数与设定值之间的大误差范围内,模糊逻辑控制采用非线性措施,获得更好的系统性能。

当过程是时滞占优时,即过程时滞大于或等于过程时间常数,即使是最好的 PID 整定,也无法及时响应设定值变化,或者校正过程扰动。随着空载时间与时间常数比例的增加,为了保持系统稳定,比例及复位增益要随之减少。这就导致设定值变化和负载扰动引起的控制响应速度通常低于最佳过程操作要求的速度。这样,使用模型预测控制取代 PID 反馈控制,即可改善控制性能,如第 11 章和第 12 章所述。

这种对 PID 反馈控制性能的改进是可能的,因为 MPC 算法是基于对过程输入的阶跃变化(称为阶跃响应模型)的流程响应生成的,而不是像 PID 算法那样基于预先定义的算法。具有时滞特性的系统,当其输入发生变化时,与 PID 算法不同,MPC 算法能够识别出,该变化不会立即反映到过程中。MPC 算法对过程响应的识别,能够更好地控制一个时滞占主导的过程。

3.3.4 回路交互

如果过程具有多个可操作过程输入和多个可控过程输出,那么该过程可能会存在过程

交互,即某个可控输入的变化会影响多个可控输出。当控制回路之间的交互作用较大时,解调 PID 控制是常用的解决方法。如果使用 MPC 控制,可操作输入与可控输出之间的交互作用将不复存在,并且能够为所有控制回路提供最好的性能。

如第 11 章和第 12 章所述,MPC 功能块的生成中使用的阶跃响应模型,能够识别每个操作输入参数对可控输出参数的影响。因此,当使用模型预测控制时,任何交互都会被自动补偿。

3.3.5 限制条件的变化

MPC 用于过程控制,且在 PID 反馈控制中,过程输出为约束参数,此时,约束参数测量值作为输入值,简单地叠加到 MPC 功能块上。使用 MPC 功能块设计并实现超驰控制策略,与使用两个 PID 功能块和控制选择器功能块实现超驰控制相比,要简单得多。

如第 11 章和第 12 章所述,使用 MPC 应用测试过程并产生阶跃响应模型,可自动识别约束参数对过程输入变化的阶跃响应。由于可使用过程阶跃响应产生 MPC 控制器,所以当检测限制约束时,为最小化相对于设定值的波动,过程中约束参数及被控参数的响应将会被自动加以考虑。

3.3.6 质量参数——实验室测量

在线测量物理属性、液体或蒸汽成分的在线分析仪,可能在市场上无法购买到,其他条件也可能会限制在线分析仪的安装。此时,只能通过实验室对过程随机取样进行分析来得到测量数据。采集过程随机取样,然后进行实验室分析,这样一来,得到分析数据要经过很长的时间。工厂操作人员或控制系统需要参考过程测量分析结果,通过调整工厂操作运行条件,维持与质量相关的关键运行操纵参数,使产品属性达到标准要求。采样处理的时间延迟将影响测量数据的可用性。

为了得到与产品质量相关参数的即时变化信息,通常可以使用上游测量数据(例如,流速、温度、进料组成等)计算出质量参数的一个预估值。例如,利用大多数分式控制系统都含有的计算工具,可生成一个动态线性估计器,如第 9 章和第 10 章所述。此外,某些控制系统支持基于神经网络技术的非线性估计器功能块,如第 7 章所述。当在线控制系统中有线性或非线性估计器可用时,可将收集到的实验室分析结果与上游测量的历史数据库结合起来创建一个估计器。一旦估计器被创建了,实验室分析结果将被用来验证估计器的准确性,并对过程中影响估计值的未测量变化进行修正,以补偿其影响。

3.4 应用实例

控制系统制造商和第三方公司已经引入了能够监控过程控制和仪表的工具。除提供控制利用率的在线信息外,一般也会提供其他各类信息来帮助用户确定控制利用率低的原因和解决方案。本节讨论了过程检测性能,即嵌入在商业分布式控制系统中的标准性能。在控制系统内的任何操作员和工程师站点均可访问该性能检测能力。

与许多其他控制应用程序类似,用户界面允许在树状结构中轻松地找到过程测量和控

制回路,其中树状结构是以如下方式组成的:

- 概况界面和摘要界面,显示在与工厂相关的模块中,或与选定的过程区域、单元或单元相关的模块中检测到的异常情况。
- 模块视图,显示有一处或多处活跃异常状态的模块。
- 详细块视图,提供有关影响测量、执行器和控制性能的条件的更多信息。

当首次打开性能监视应用程序时,将显示工厂的概况。根据界面左侧的资源管理器视图,用户可以选择一个他想要审查的独立过程域、单元或房间。被选过程域的概况如图 3-17 所示。

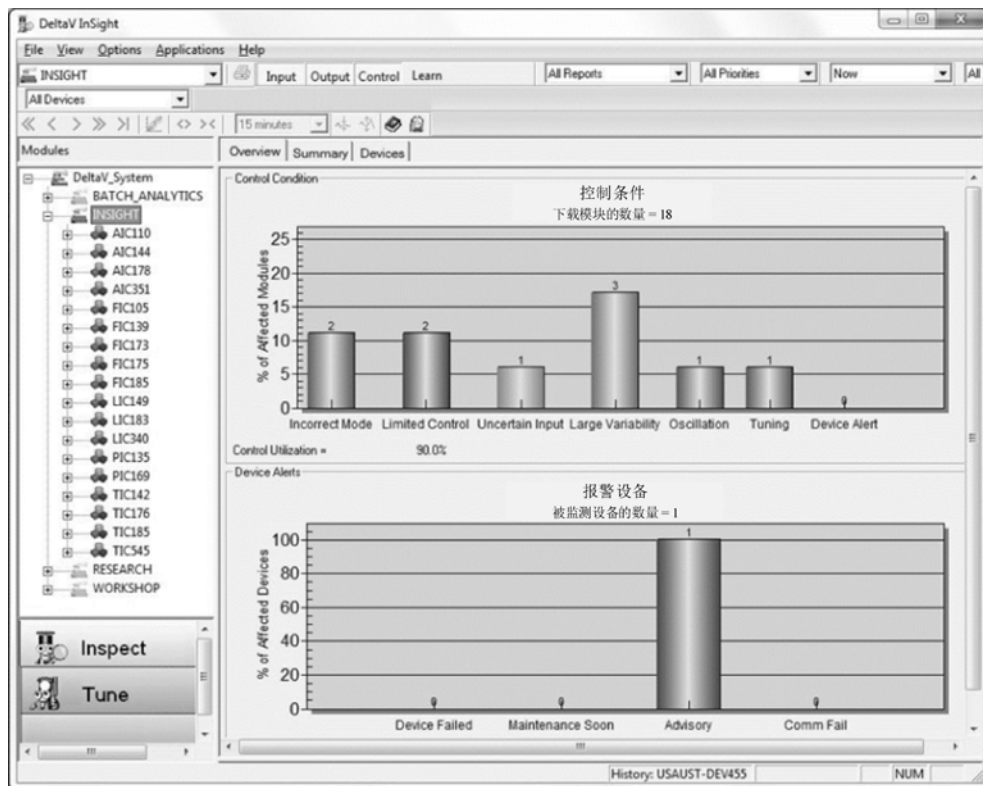


图 3-17 过程区域的概括图的实例

如本例所示,使用图形显示和数字数据的组合,可以显示模块违反关键性能指标的次數。

以下类型的异常状态在模块中被自动检测,且被显示在概况界面中:

- 实际功能块模式不是正常(计划)运作模式;
- 控制作用受制于下边界条件;
- 输入状态表明数值受到限制或具有不佳或不确定状态;
- 在测量或控制模块作用中检测到大幅变化;
- 控制模块的输出不稳定;
- 通过在模块中重新整定控制块,可提高控制性能;
- 现场设备检测出硬件或软件运行失败。

通过单击摘要选项卡,可以看到被选域、单元或房间的特定模块。如图 3-18 所示,在摘要视图中,一个图标被用来表明模块中检测到了异常状态。

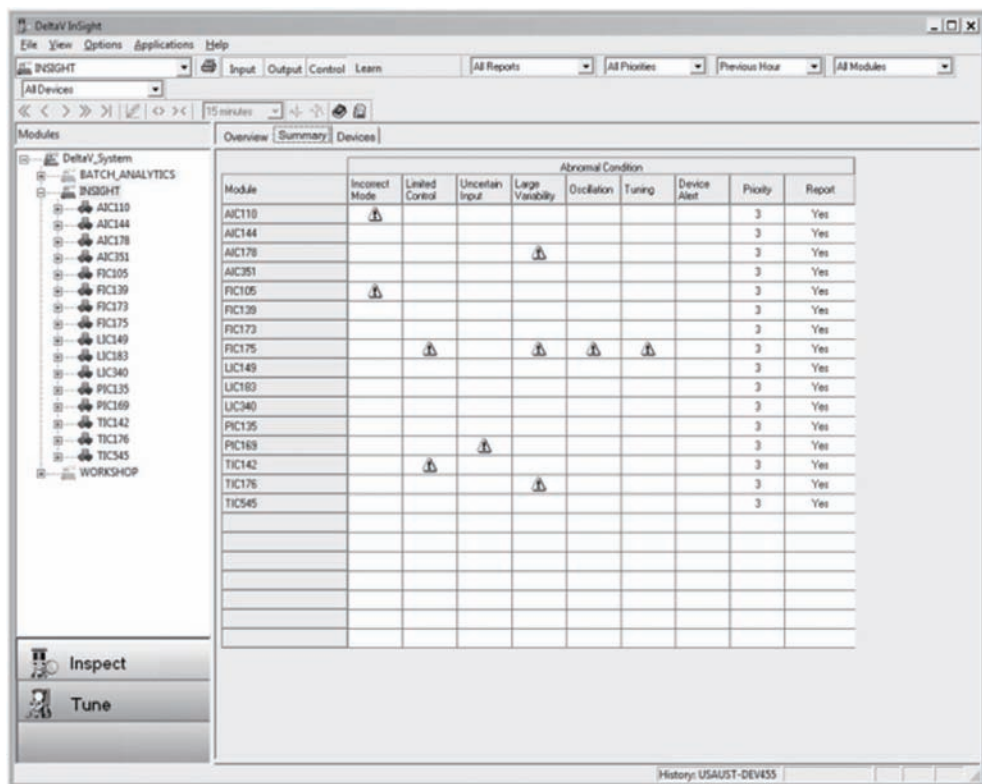


图 3-18 过程的摘要视图

在摘要视图中,状态异常的单个模块被列在界面的右侧窗格中。当在摘要列表中选择一个模块时,该模块中的单个 I/O 和控制功能块将被列在模块视图的右侧窗格内,如图 3-19 所示。

在模块视图选中 I/O 或控制功能块时,模块内存在异常情况的时间百分比被显示在模块详细信息视图中,如图 3-20 所示。若百分比时间超过该条件的配置时间上限,则在模块详细信息视图中使用颜色变化来标记此状态,同时异常状态被标记并显示在概述视图和摘要视图中。

通过选择界面菜单栏的过滤器,用户可浏览前一个小时和当前一小时、一个班次或一天的信息。除此之外,用户可以选择要显示的模块类型,并通过设置过滤器来显示所有模块或仅显示有部分异常状态的模块。

在许多工厂里,设备在一批生产结束时关闭或停止服务进行日常维护是很常见的。在停机期间,该设备的测量值可能会显示状态不良。为了避免将此信息纳入到性能检测视图中,用户可以选择一个区域并指定相关的设备为脱机状态。设备视图中应突出显示此区域,并将其从监测中移除。

通过单击界面的详情选项卡,用户可以找到有关异常状态的更多信息。同时,也可撰写一系列的性能报告来概述控制利用率、控制仪器和报告期内检测到的控制问题。

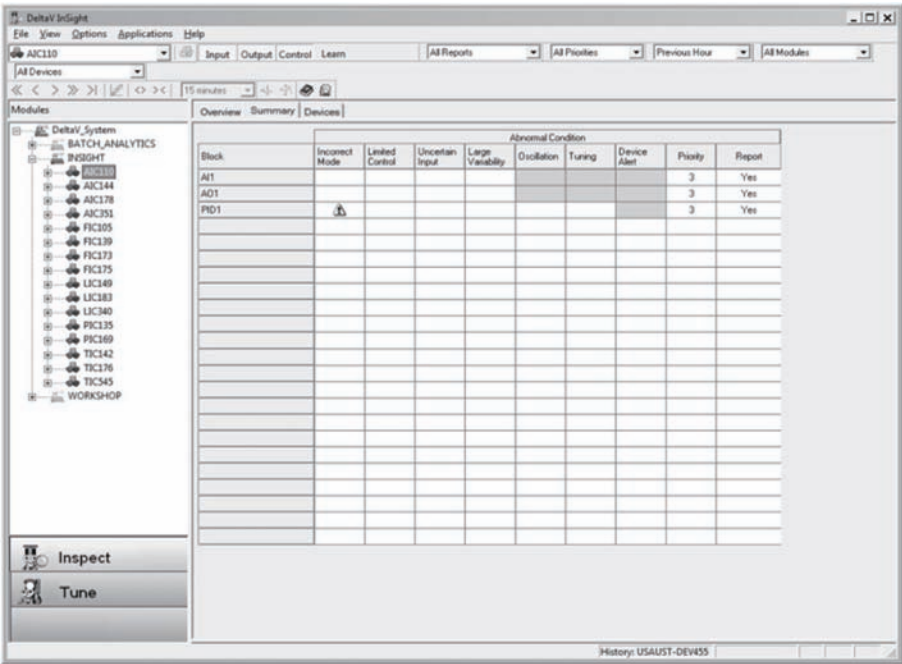


图 3-19 模块视图

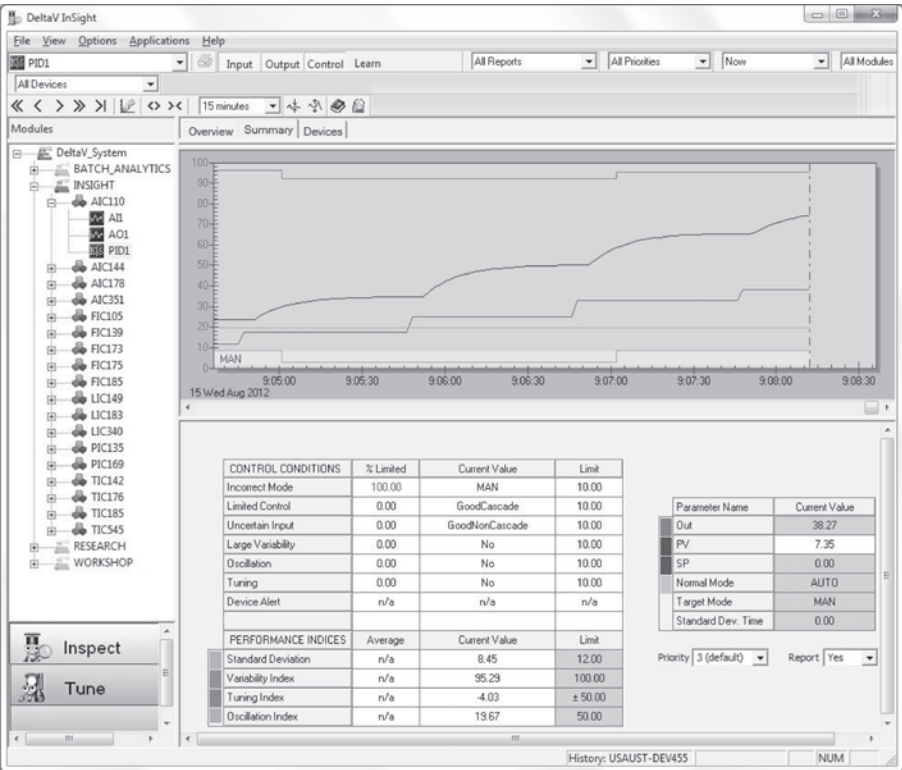


图 3-20 模块性能的具体视图

3.5 专题练习——介绍

本章及后续章节中提供的专题练习,用于帮助读者理解先进控制工具的具体应用。专题练习演示中使用的动态过程仿真,提供了极其类似于实际运行工厂的操作条件。

在数字化控制系统中,系统提供的测量、计算和控制功能,通常由一系列标准功能块定义。在系统配置过程中,工程师选择最合适的功能块组合,实现工厂需要的测量、计算和控制功能。功能块之间传递的信息,由功能块输入与输出之间的配置连接实现。例如,为创建简单控制回路(见图 3-21),选择模拟输入功能块(AI)、控制功能块(PID)和模拟输出功能块(AO),访问变送器测量值,实现 PID 控制计算功能,并将计算后的结果传输到阀门。为这些功能块定义的标准显示组件将被包含在操作员接口中,以允许操作员访问该控制回路。

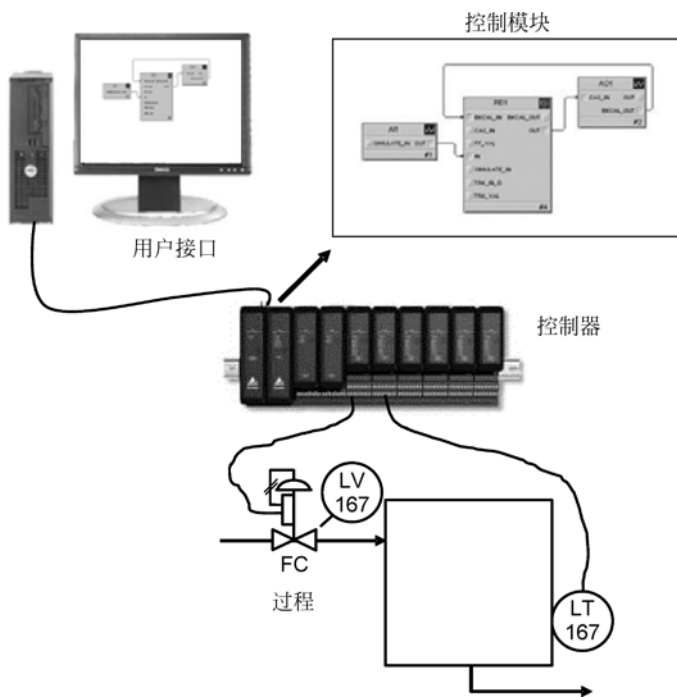


图 3-21 典型控制回路

为了支持本专题练习,创建了与通常用于访问现场设备的功能块相链接的动态过程仿真,如图 3-22 所示。在过程仿真的精度范围内,运行功能块和操作员界面所需要的参数值和功能块间交互,与实现运行的工厂是相同的。

使用 Web 浏览器,可以浏览每个章节定义的专题练习解决方案。本书的附录提供了访问和使用此 Web 接口的指南。

后续的过程性能监控专题练习模拟了分配给工厂一个过程区域的测量和控制模块。本专题练习的目的是:展示如何使用性能监控工具来识别在过程中引入可变性或阻止控制系

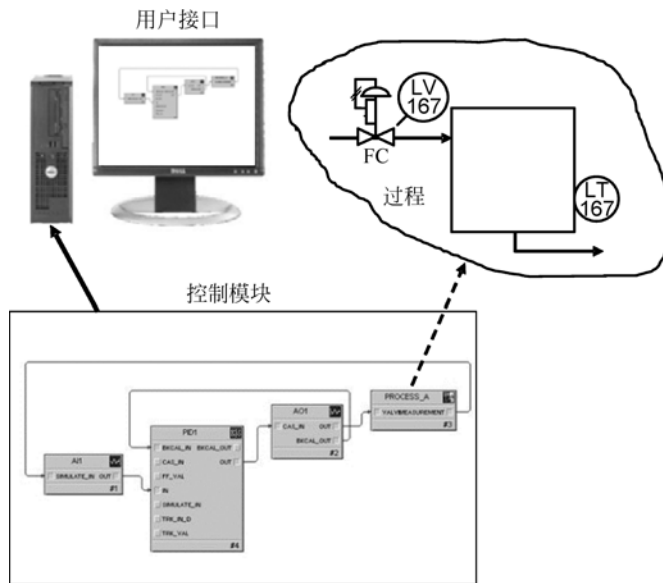


图 3-22 专题练习仿真过程

统在自动模式下运行的操作问题。前文应用中提及的过程性能监控工具,被应用于本专题练习,以甄别控制或测量问题。

3.6 专题练习——评估控制系统性能

本专题练习被用于描述性能监控工业产品的某些典型特性。过程选项卡显示了所涉及的区域。访问本书网址 <http://www.advancedcontrolfoundation.com>, 选择解决方案选项卡来得到用于模拟的专题练习信息。

步骤 1, 从性能监控工具总览选项卡中, 查看选定过程区域内多个模块中有一个或多个功能块没有按设计操作模式运行(见图 3-23)。

步骤 2, 访问摘要选项卡, 查找模块中包含一个或多个功能块未按照其设计模式运行。

步骤 3, 根据区域摘要中信息, 甄别包含一个或多个较差测量值的模块。

步骤 4, 选择含有较差测量值的模块, 然后标记含有较差测量值的功能块。

步骤 5, 详细检查功能块, 计算测量值较差时间段在总测量时间段中占有的百分比。

步骤 6, 借助过程区域摘要, 查找具有高可变性并且可变性不是由 PID 整定引起的模块。

步骤 7, 详细检查 PID, 确定控制参数与设定值之间的偏差。

步骤 8, 在过程区域摘要中, 查找由 PID 整定引起可变性的模块。检查 PID 功能块的整定指数, 确定当前整定是否过于激进, 或是过于缓慢。

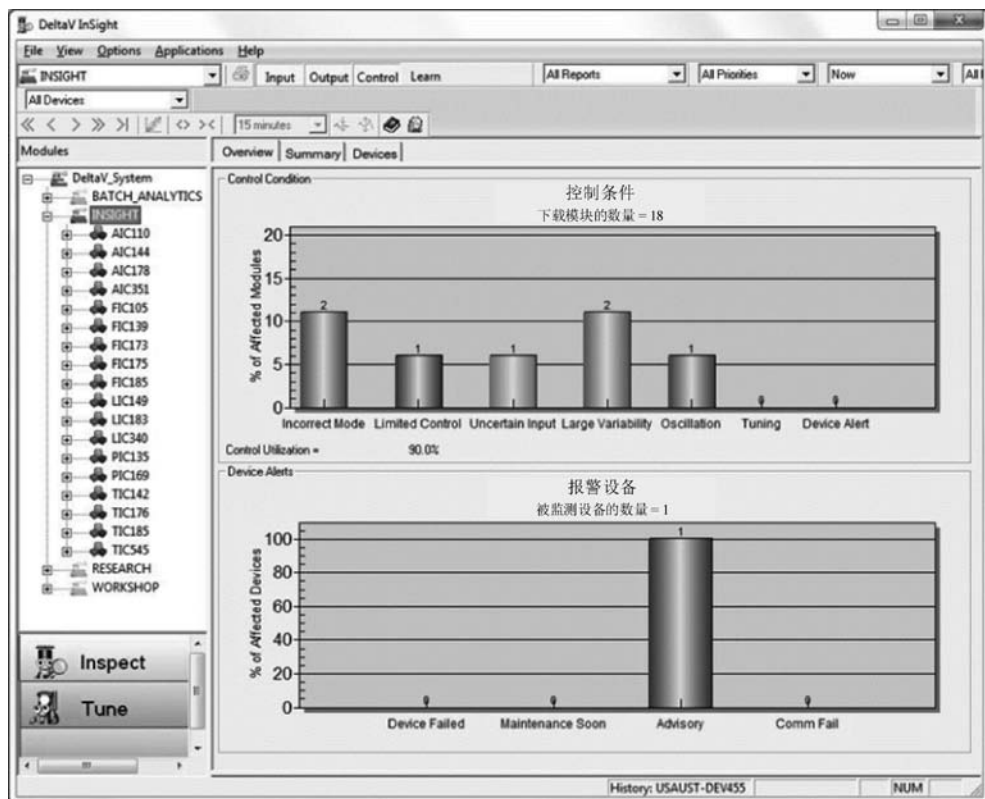


图 3-23 过程区域实例

3.7 技术基础

前面章节讨论了控制系统性能的主要方面,以及将性能通知操作人员的实用标志。其中许多标志都是直接定义的,也很容易理解。其他指示(如可变性指示、整定指示)则需要有更多的说明并涉及数学的定义。不想仅仅停留在满足日常操作需求,而渴望扩展本主题相关知识和了解更多有关系统操作细节的读者,本章节提供了一些重要信息。为了更精确地理解本主题,给出了一些主要算法和相应的(但最少量的)数学描述定义,以实现 3.1 节~3.5 节中讨论的控制性能评估功能。

后续章节的结构将以类似的方式出现,即首先讨论操作和功能以及参考的专题练习,算法和相关信息将在章节的最后进行讨论。通过这种方式,本书将针对高级用户的可选材料(技术基础)与针对所有用户的基本材料分开。

3.7.1 控制性能监测构架

用于控制性能监测的信息流结构的一个实例如图 3-24 所示。该结构由一个服务器和多个客户端组成。服务器是控制器获取信息的中心收集点。服务器计算异常情况出现在一个小时/班次/日的时间百分比,并将这些计算结果与用户设置的异常时间比的门限值进行

比较,或者与性能不佳的回路进行比较,最后根据要求将该信息提供给用户。客户端只能通过服务器访问这些信息。

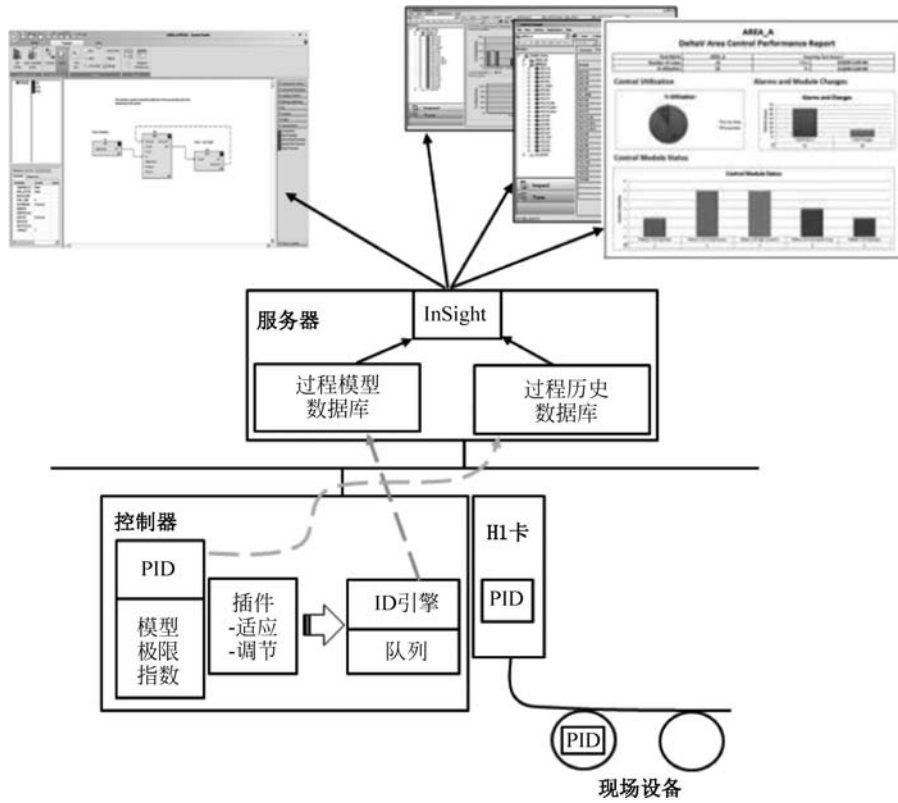


图 3-24 用于控制性能监控的信息流结构
(注：InSight 代表性能监视/自适应调优应用程序)

根据测量状态、反算输入状态、标准差、整定指标、方式等功能块参数,确定控制器内是否存在异常情况。这些被监测的参数如果出现异常,则会自动报告给服务器。

功能块通过状态和实际模式参数来确定异常模式、受限制控制、较差测量、受限制测量或不确定测量状态。功能块使用其他参数计算标准偏差、整定参数和变化指数,并判断这些值是否超过功能块的设置范围。只有当被监测的条件发生变化时,这些条件才以单个参数形式发送给服务器。因此,用于传输这些参数的通信负载通常非常小。当服务器初始上线时,控制器将当前监测到的状态信息上传至服务器。自此,只有当监测的条件发生状态变化时,控制器才会发送上述参数报告。

3.7.2 控制性能评估算法

学术研究和实际应用都高度重视控制性能评估,尤其在 20 世纪 90 年代以后。人们的主要工作集中在以最小方差控制器作为参考,评估控制回路性能。该方法由哈里斯(Harris)于 1989 年提出,并且于 1992 年、1993 年分别由德斯伯勒(Desborough)和哈里斯(Harris)作了进一步发展。莱因哈特(Rhinehard)于 1992 年探索出了一些简单方法,计算不同测量间的偏差,并对数据过滤以得到标准偏差。哈里斯、博德鲁(Boudreau)和麦格雷

戈(Macgregor)、黄(Huang)、萨哈(Shah)以及克沃克(Kwok) 分别于 1996 年和 1997 年提出了多变量控制器性能评估指南。俊多(Shunta)于 1995 年提出了用于性能评估的极其实用的总结。

本章详细介绍了评估控制性能的细节。可变性指数(Variability Index, VI)和整定指数(Tuning Index, TI)是最为有用的两项控制性能指标。可变性指数为控制质量的测量;而整定指数表示根据确定的过程模型和选择的或默认的整定规则更新控制器整定,从而改进系统控制性能的潜力。

通过可变性指数和整定指数的计算,可以更好地判断工厂的控制性能。图 3-24 所示的性能监控应用程序标识了一个控制功能块,该功能块的可变性指数和总体标准偏差超过了所配置的范围。大多数输入/输出功能块都同时计算了总体标准偏差及能力标准偏差。这两个参数是变异性指数计算所需要的。功能块中确定的状态被报告给服务器。该服务器计算出性能(被定义为控制可变性保持在限制范围内的时间百分比)和利用率(被定义为控制块在正常(设计)模式下运行的时间百分比)。

1. 主要性能指数

标准偏差为过程可变性评估的主要指数。此外,标准偏差是计算其他更加复杂指数的基础。在每个控制块和测量块中,标准偏差都是使用一个通用式(3-1)来计算的,尽管在某些实现中为了避免耗时的平方根计算而使用式(3-3)来代替。

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3-1)$$

其中 $\bar{x}$ 是 $x(i)$ 的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \quad (3-2)$$

对大约 100 个样本的移动窗口,连续地计算标准偏差。在控制功能块中,根据功能块的模式,选择使用工作设定值或者测量值用作 $\bar{x}$ 。

标准偏差的一个简化的替代公式,它不使用平方根计算,对在线应用程序很有用。

$$\sigma_{\text{tot}} = 1.25 |\bar{\epsilon}| \quad (3-3)$$

其中 $|\bar{\epsilon}|$ 是平均绝对误差:

$$|\bar{\epsilon}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (3-4)$$

对每个功能块的执行都进行中间计算。然后,功能块每执行 n 次,就更新一次参数值。对于某个典型的实现,功能块每执行 100 次后,就对参数进行更新。I/O 功能块使用测量值计算 $\bar{x}$ 。在控制功能块中,根据功能块的模式,选择使用工作设定值或者测量值。

式(3-3)表明标准偏差和平均绝对误差之间的关系,可通过计算正态高斯分布的平均绝对误差 $p(x)$ 来验证:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned}
|\bar{x}| &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} |x| e^{-\frac{x^2}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(-\int_{-\infty}^0 x e^{-\frac{x^2}{2}} + \int_0^{\infty} x e^{-\frac{x^2}{2}} \right) \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{x^2}{2}} \Big|_{-\infty}^0 - e^{-\frac{x^2}{2}} \Big|_0^{\infty} \right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} = 0.7978845
\end{aligned}$$

正态高斯分布的标准差 $\sigma=1$,

$$|\bar{x}| = 0.7978845\sigma \quad \text{或} \quad \sigma = 1.2533141 |\bar{x}| \quad (3-6)$$

能力标准偏差 σ_{cap} 可通过如下公式计算得到

$$\sigma_{\text{cap}} = \frac{\bar{x}_{\Delta}}{1.128} \quad (3-7)$$

其中, $\bar{x}_{\Delta}$ 是过程参数 x 的平均移动范围, 该范围带有一个估计的时滞等于扫描 d :

$$\bar{x}_{\Delta} = \frac{1}{n-1-d} \sum_{i=2+d}^n |x(i) - x(i-1-d)| \quad (3-8)$$

对于每次执行, 只有与 $\bar{x}$ 和 $\bar{x}_{\Delta}$ 相关的求和组件被运行。作为 σ_{tot} 参数计算的一部分, 求得和除以 n 或 $n-1-d$, 执行 n 次后 (默认情况下 $n=120$), 会计算一次 σ_{cap} 值。计算能力标准方差, 要求采样速率足够快。对采样速率的要求与对控制回路扫描速率的要求类似。控制回路选择的扫描速率期望值为每个过程时间常数内, 采样五次或更多。

为了稳定的数据采集, 被计算参数的新值使用系数变量 f 进行过滤, 通常 f 的取值范围为 $0 < f \leq 1$, 如计算平均值的式(3-9)所示:

$$\bar{x}' = \bar{x} + f \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} \right) \quad (3-9)$$

2. 可变性指数

在完成 σ_{cap} 和 σ_{tot} 的计算后, 可变性指数(VI)可根据式(3-10)和式(3-1)计算得到

$$VI = 1 - \frac{\sigma_{\text{lq}} + s}{\sigma_{\text{tot}} + s} \quad (3-10)$$

其中 s 为敏感度系数, 用于平稳计算值, 尤其是针对取值较小的 σ_{tot} ; 默认情况下, s 的取值为可变范围的 0.1%。对于取值较高的 σ_{tot} 变量, s 不会对计算结果造成影响。

σ_{lq} 为最小标准偏差, 可通过反馈控制实现, 计算方式如下:

$$\sigma_{\text{lq}} = \sigma_{\text{cap}} \sqrt{2 - \left[\frac{\sigma_{\text{cap}}}{\sigma_{\text{tot}}} \right]^2} \quad (3-11)$$

可变性指数能够反映控制性能与最小方差控制之间的接近程度。在实际应用中, 可变性指数采用百分比的方式表示。

现在有多种改进的计算可变性指数的方法。基于模型的计算方法, 假定控制回路和噪声模型, 根据模型的可变性(Qin, 1998), 计算得到最小方差控制。另一种方法是预估 PID 最小可实现可变性, 而不是最小可变性控制器(Ko, Edgar, 1998)。估计的最小 PID 控制可变性可以用于计算可变性指数。

3. 整定指数

带有内模控制(Internal Model Control, IMC)整定的 PID 控制器被应用于一阶时滞过程, 等价于 IMC 控制器(Qin, 1998; Ko 和 Edgar, 1998), 因此, PID 能够实现的最小方差可用如下方式表示:

$$\sigma_{\text{PID}}^2 = \sigma_{\text{Iq}}^2 + \sigma_{\Delta \text{PID}}^2 \quad (3-12)$$

最小 PID 方差大于 $\sigma_{\Delta \text{PID}}^2$ 中的最小方差控制 σ_{Iq}^2 。

$$\sigma_{\Delta \text{PID}}^2 = \frac{(\tilde{c}_1 - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_1^2} \sigma_w^2 \quad (3-13)$$

其中,

$\tilde{c}_1 = e^{-\frac{s}{\lambda}} =$ 方差整定项;

$s =$ 采样周期;

$\lambda =$ 所需的闭环时间常数;

$c_1 =$ 假设噪声模型 $G_w = \frac{1 - c_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$ 的参数;

$c_1 = e^{-\frac{s}{\lambda_{\text{noise}}}}$, 其中 λ_{noise} 是一个白噪声过滤时间常数并且 $\lambda_{\text{noise}} < \lambda$ 。

对其做粗略估计, 假设其取值为 $\lambda_{\text{noise}} \approx \min\{0.2\lambda, 0.1\tau, s\}$ 。

σ_w^2 为噪声标准差。

τ 为过程时间常数。

式(3-7)、式(3-8)中假设时滞为零的能力标准差 σ_{cap} , 可以作为 σ_w 的实际估计。

借助式(3-12), 可以方便地计算可获得的实际最小方差。该公式由两项组成: 第一部分为理论最小方差 σ_{Iq}^2 , 该项可基于式(3-7)定义的能力标准差, 使用式(3-11)计算得到; 第二项是由带 IMC 整定的实际 PID 控制器引起的方差增量。该项的计算要求三个参数 ($\tilde{c}_1$, c_1 , λ_{noise}) 的预估。

总体方差 σ_{tot}^2 包含随机性方差和确定性方差。随机性方差来自于测量噪声。确定性方差来自于回路的振荡操作, 可能是由过程扰动、过程非线性或较差的回路整定(见 3.3 节)引起。剩余方差 σ_{res}^2 可以作为当前总方差与为假设整定而设置的 PID 最小方差(非补偿的)之间的差值:

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{res}}^2 + \sigma_{\text{PID}}^2 \quad (3-14)$$

计算 σ_{PID}^2 方差, 要首先假定特定闭环回路的时间常数 λ 。如果实际 PID 中控制器参数的假设与方差 σ_{PID}^2 的计算相同, σ_{res}^2 的值应当接近 0。

如果 $\sigma_{\text{res}}^2 > 0$, 即 $\sigma_{\text{tot}} > \sigma_{\text{PID}}$, 那么可能是下列某种原因造成的:

(1) 控制器未调节到最佳状态。很可能是因为用于控制器整定的实际 λ 大于公式中输入的 λ , 导致整定过于缓慢, 或者是由于增益不够、复位或者速率等问题, 导致控制器不稳定。

(2) σ_{PID} 计算中的噪声估计功能关闭。可能是由于能够通过 PID 补偿的噪声大于估计值。

(3) 过程模型可能不准确。 σ_{PID} 估计值与实际过程不相符。

(4) 假定的一阶时滞过程模型不能完整地描述高阶系统模型、过程非线性阀门运行条件等。

在实际应用中, 方差之间的关系 $0 < \sigma_{\text{res}}^2 < \sigma_{\text{resMAX}}^2$ 在大多数情况下是吻合的。

从可变性角度而言, 当整定更好时, 非补偿方差 σ_{PID}^2 更小, 进而总体方差 σ_{tot}^2 也就

更小。

整定指数表明,改进后的整定能有效地降低随机扰动的变异性。因为该估计中只包含有非补偿 PID 可变性,所以可以假设式(3-15)所示的 $\Delta\sigma_{\text{res}}^2$, 由于 PID1 和 PID2 的不同整定,对可能的可变性变化的估计偏低。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{\text{res}}^2 &= \sigma_{\text{PID1}}^2 - \sigma_{\text{PID2}}^2 = \sigma_{\text{MVC}}^2 + \frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2} \sigma_w^2 - \sigma_{\text{MVC}}^2 - \frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2} \sigma_w^2 \\ &= \left(\frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2} - \frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2} \right) \sigma_w^2\end{aligned}\quad (3-15)$$

整定指数定义为:潜在的非补偿 PID 可变性减少与实际 PID 非补偿可变性之间的比例,即

$$\text{TI} = \frac{\Delta\sigma_{\text{res}}^2}{\sigma_{\text{PID1}}^2} = \frac{\left(\frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2} - \frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2} \right) \sigma_w^2}{\frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2} \sigma_w^2} = 1 - \frac{\frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2}}{\frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2}}\quad (3-16)$$

使用最大函数归一化整定指数,其取值范围为 $-1 \leq \text{TI} \leq 1$ 。

$$\text{TI} = \max \left\{ \left[1 - \frac{\frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2}}{\frac{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1)^2}{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2}} \right], -1 \right\}\quad (3-17)$$

在该公式的实现中,通常使用百分比表示。为了与可变性指数保持一致,有必要使用标准差比例取代方差比例。

$$\text{TI} = \max \left\{ \left(1 - \frac{(\tilde{c}_{\text{PID2}} - c_1) \sqrt{1 - \tilde{c}_{\text{PID1}}^2}}{(\tilde{c}_{\text{PID1}} - c_1) \sqrt{1 - \tilde{c}_{\text{PID2}}^2}} \right), -1 \right\} \times 100\%\quad (3-18)$$

整定指数估计了通过应用整 PID2 定(被用于计算方差 σ_{PID2}^2 的整定),可以减少多少非补偿 PID 可变性。负的整定指数表明当前 PID1 整定能够提供更小的可变性。在这种情况下,用户可能会考虑针对除可变性目标之外的其他目标(例如,回路稳定性和鲁棒性或所需的闭环时间常数)进行整定修改。

以下章节提供了关于各种先进控制工具和程序的详细信息,这些工具和程序用于识别过程可变性的来源并改进控制性能。

参考文献

1. Desborough, L., Harris, T. J. "Performance Assessment Measures for Univariate Feedback Control" *Can. J. Chem. Eng.*, 70:1186, 1992.
2. Desborough, L., Harris, T. J. "Performance Assessment Measures for Univariate Feedforward/Feedback Control" *Can. J. Chem. Eng.*, 71:605, 1993.
3. Eriksson, P. G., Isaksson, A. J. "Some Aspects of Control Loop Performance Monitoring,"

-
- Conference on Decision and Control (CDC) IEEE, Lake Buena Vista, FL., 1994.
4. Harris, T. "Assessment of Control Loop Performance" *Can. J. Chem. Eng.*, 67(10):856-861, 1989.
 5. Harris, T., Boudreau, F., MacGregor, J. F. "Performance Assessment of Multivariable Feedback Controllers" *Automatica*, 32(11): 1505-1518, 1996.
 6. Huang, B., Shah, S. L., Kwok, K. Y. "Good, Bad or Optimal? Performance Assessment of MIMO Processes" *Automatica*, 33(6): 1175-1183, 1997.
 7. Isaksson, A. J. "PID Controller Performance Assessment" Control Systems Conference, Halifax, Canada, 1996, Conference Proceedings, pp. 163-169.
 8. Ko, B. S. and Edgar, T. F. "Assessment of Achievable PI Control Performance for Linear Processes with Dead Time," In proceedings of American Control Conference (ACC), Philadelphia, PA, June, 1998, pp. 1548-52.
 9. Qin, S. J. "Control Performance Monitoring—A Review and Assessment" *Computers and Chemical Engineering*, 23: 173-186, 1998.
 10. Rhinehart, R. R. "A Cusum Type On-line Filter" *Process Control and Quality*, 2: 169-179, 1992.
 11. Shunta, J. *Achieving World Class Manufacturing Through Process Control*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, (ISBN 0-13-309030-2), 1995.