

上海华理自动化系统工程有限公司

PID 整定指导

冯少辉

2020年2月

目 录

1. 前言	1
2. 测试与模型	2
2.1 测试：揭示过程动态特性	2
2.2 自衡对象与积分对象	2
2.3 自衡对象模型	3
2.3.1 增益	3
2.3.2 时间常数	4
2.3.3 纯滞后时间	4
2.4 积分对象模型	5
2.4.1 增益	5
2.4.2 纯滞后时间	5
2.5 动态过程非线性	6
3. PID 控制基础	7
3.1 PID 控制器的形式	7
3.2 PID 控制器参数	8
3.3 PID 控制参数仿真	9
3.3.1 纯比例控制	10
3.3.2 PI 控制	10
3.3.3 PID 控制	11
4. Lambda 整定方法	13
4.1 自衡对象 Lambda 整定参数计算	15
4.1.1 λ 的选择原则分析	16
4.2 积分对象 Lambda 整定参数计算	19
4.2.1 积分对象纯比例控制	20
4.2.2 λ 的选择原则分析	21
5. PID 整定实操指南	23
5.1 控制回路优化流程	23
5.2 试凑法 PID 整定	26
5.2.1 理论基础	26
5.2.2 自衡对象和积分对象的判断	26
5.2.3 自衡对象	27
5.2.4 积分对象	28
5.3 Lambda 整定实操指南	28
5.3.1 自衡对象 Lambda 整定	28
5.3.2 积分对象 Lambda 整定	29
5.4 不同情况下 λ 的选择规则	30
6. 参考文献	32
7. 附录 1: Lambda 整定规则推导	33
7.1 稳定对象的 Lambda 整定规则推导	33
7.2 积分对象的 Lambda 整定规则推导	34

1. 前言

PID 控制器问世以来，因其结构简单、稳定性好、性能可靠、整定方便而成为工业上应用最广泛、最关键的生产过程控制技术。但是被控对象（含测量仪表，执行机构）的特性变化后，原来的 PID 参数不适应“新”的系统，控制效果会变差。过程的稳定性和响应速度随着时间推移也会产生变化，不同控制系统中 PID 控制算法的差别也困扰工程技术人员，因此，PID 控制器整定的难度很大。

有关 PID 整定国内外已经有非常大量的研究，但是现场工程技术人员对 PID 整定掌握的不够深入，工厂的自控投用率普遍比较低。解决这个问题既有利于提高操作人员的效率又能提高装置安全和效益，而且基础控制是智能制造的基础。基于这种情况并结合我们在项目实施中的经验写了这个指导。

本文介绍了简化的、可重复的用于分析过程动态、以及确定模型参数和控制器参数的过程，以及过程控制和 PID 控制器整定背后的技术和科学，包括基本术语、分析过程动态特性的步骤、确定模型参数的方法和其他有价值的见解。通过本文用户要学习摒弃常见的试凑法，通过具有物理意义的参数来选择控制器的预期性能，而不使用那些没那么直观的概念，例如比例度和积分时间，从而实现整定工作的科学化。根据这些基本原则，我们鼓励您进一步研究，并充分了解如何实现安全和高效的操作。

通过使用比例-积分-微分（PID）控制器，自动控制系统使复杂的生产过程以安全和高效的方式运行。它们通过连续测量过程操作参数（如温度、压力、液位、流量和浓度），然后决定如何调节阀门开度、泵速或热量等，从而将过程测量值保持在设定值。PID 控制的目标是在没有超调或发散情况下系统尽快达到设定值。如果控制过于激进，可能出现超调，反之达到设定值的时间可能特别慢。

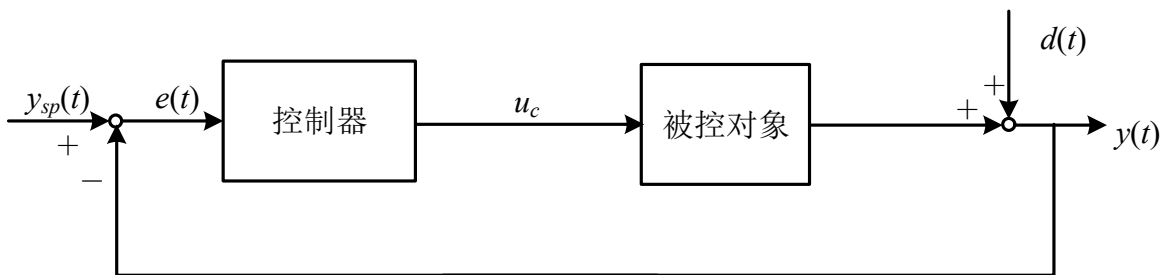


图 1 PID 控制框图

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	1 of 36

2. 测试与模型

2.1 测试：揭示过程动态特性

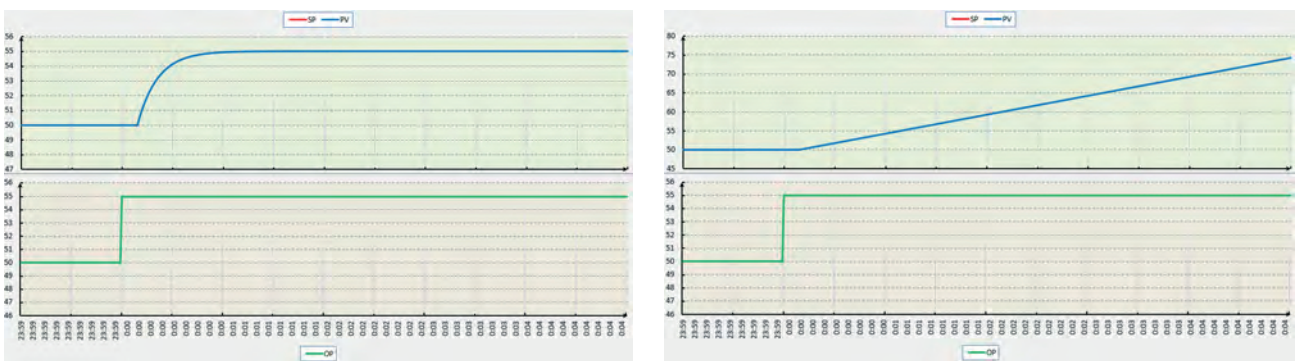
测试是了解过程动态特性的最佳方法。其中，开环（即手动模式）测试能得到最佳的数据，也可以执行闭环（即自动模式）测试。测试的方法是将控制器输出（*OP*）以足够的幅度进行阶跃变化，以便通过被测变量（*PV*）的响应来获得过程动态特性。由于过程动态特性通常在不同的操作范围内有所不同，因此应该在被测变量接近正常操作值时进行测试。

生产过程本身就有噪声，在进行测试之前，必须考虑到这一点。如测试幅度不够，过程噪声很可能会完全或部分掩盖动态，进而影响整定效果。为了生成可靠的过程模型和有效的整定参数，建议进行至少 5-10 倍于噪声大小的测试。

干扰是进行测试时必须考虑的另一个重要细节。一个好的测试能够在控制器输出变化和被测变量变化之间建立清晰的关联。如果在测试过程中出现干扰，它们会影响被测变量的实际变化，由此产生的测试数据可能是不准确的，应进行额外的测试。

2.2 自衡对象与积分对象

工业过程中常见的过程有自衡和非自衡两种，图 2 显示了两个过程对输出阶跃变化的理想化趋势。左边的过程是非积分对象，也叫自衡对象。右边的过程是非自衡对象，也叫积分对象。在过程数据建模之前了解对象的差异至关重要，因为错误的模型可能会对整定参数的计算结果产生重大影响，甚至影响过程安全。



自衡对象

积分对象

图 2 自衡对象与积分对象

自衡对象能够响应控制器输出并逐渐达到新的稳态操作点，如图 2 左侧所示。例如用调节阀控制的流量就是典型的自衡对象。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	2 of 36

积分过程没有平衡点，即控制器输出变化后过程在一个方向持续变化，除非进行新的干预否则积分过程将持续变化而无法达到新的稳态，如图 2 右侧所示。例如液位。

2.3 自衡对象模型

控制器整定能否成功很大程度依赖于能否从大量测试数据中得到好的模型。一阶纯滞后模型（FOPDT）是整定 PID 控制器最常用的模型。

一阶纯滞后模型的价值在于它捕获了对控制非常关键的动态过程行为的核心特征，这对控制非常关键。当控制器输出变化时，一阶纯滞后模型可以基本描述被测变量响应。一阶纯滞后模型相对准确地描述了被测变量响应的方向、大小、快慢和纯滞后。

一阶纯滞后模型由 3 个参数组成：增益 K 、时间常数 T 和纯滞后时间 τ 。

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \tag{2.1}$$

一阶纯滞后模型的开环响应如图 3 所示：

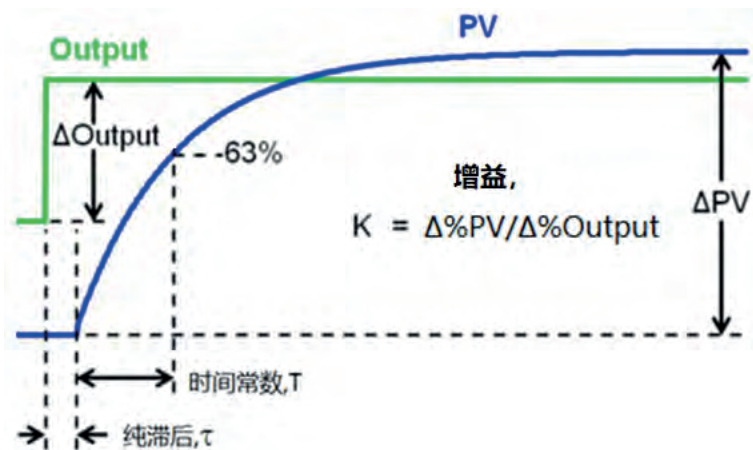


图 3 一阶纯滞后模型的开环响应

一阶纯滞后模型因为只有一阶微分所以称为一阶对象。实际过程动态用二、三或更高阶微分能更准确描述。尽管如此，使用一阶纯滞后模型描述动态过程行为常常也很合理，而且特别适合控制器整定过程。

2.3.1 增益

增益是一个描述控制输出导致被测变量变化幅度的模型参数。增益可以通过用被测变量变化除以引起该变化的控制器输出变化得到。

注意：PID 整定时采用的是量程百分比化的增益。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	3 of 36

2.3.2 时间常数

时间常数描述了控制器输出变化时被测变量的响应速度。如图 4 所示，时间常数等于过程改变后被测变量到达总变化量 63.2%所需的时间。时间常数越小，过程越快。需要注意的是被测变量响应开始时间为被测变量变化的第一反应时间，而不是控制器输出第一次变化的时间。时间常数和被测变化量/总变化量有如下关系：

表格 1 时间常数与变化量/总变化量的关系

时间	变化量/总变化量
T	0.6321
$2T$	0.8647
$3T$	0.9502
$4T$	0.9817
$5T$	0.9933

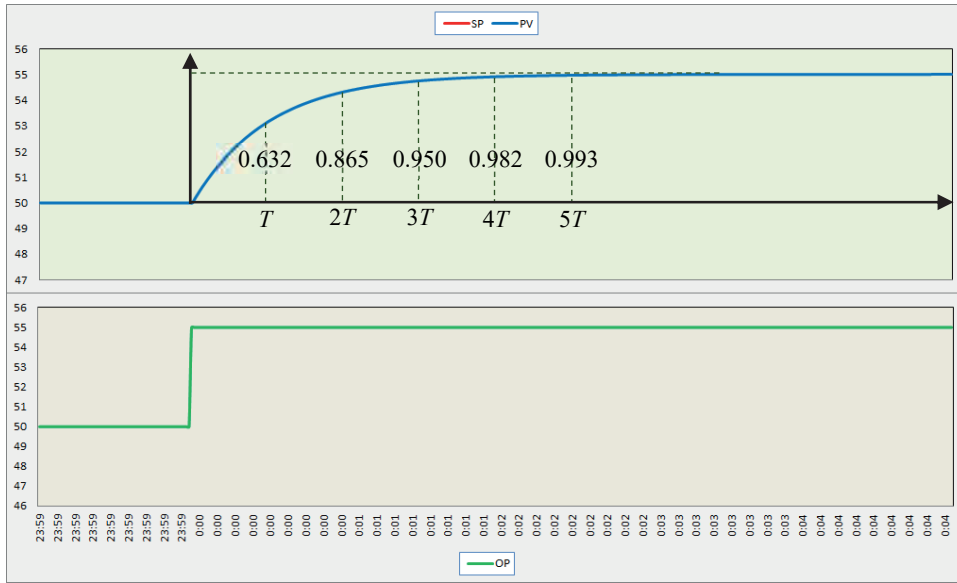


图 4 时间常数与变化量/总变化量

2.3.3 纯滞后时间

纯滞后时间是指从控制器输出的阶跃变化到被测变量显示出对该变化的清晰初始响应的的时间。纯滞后是指由于对象的测量环节、传输环节或其他环节出现的滞后现象。造成整个系统输出纯滞后于输入一个时间 τ 的现象， τ 被称为纯滞后时间。

纯滞后时间相对于时间常数越大，过程的控制难度就越大。通常来说，当纯滞后时间超过时间常数时，控制器对过程中任何给定变化的反应速度都会显著降低。这削弱了 PID 控制器保持稳定的能力。正是由于这个原因，过程纯滞后时间常常被称为“控制杀手”。

计算纯滞后时间相对比较直接。首先确定控制器输出改变的时间。接下来，确定被测变量第一次对控制器输出变化做出反应的时间。纯滞后时间为两者的差。

2.4 积分对象模型

积分纯滞后过程是过程控制中经常遇到的被控对象，许多化工过程可以用一个积分加纯滞后环节的传递函数描述。

积分纯滞后过程模型由 2 个参数组成：增益 K 和纯滞后时间 τ 。

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-\tau s} \quad (2.2)$$

积分纯滞后过程模型的开环响应如图 5 所示：

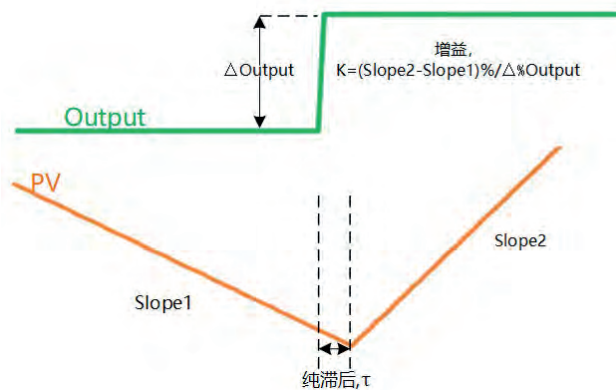


图 5 积分纯滞后模型的开环响应

2.4.1 增益

积分纯滞后过程模型的增益是一个描述控制输出导致被测变量变化速率的模型参数。增益可以通过用被测变量变化速率除以引起该变化的控制器输出变化得到，所以也称为飞升速度。

注意：PID 整定时采用的是量程百分比化的增益。

2.4.2 纯滞后时间

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	5 of 36

纯滞后时间是指从控制器输出的阶跃变化到被测变量显示出对该变化的清晰初始响应的的时间。纯滞后是指由于对象的测量环节、传输环节或其他环节出现的滞后现象。造成整个系统输出纯滞后于输入一个时间 τ 的现象， τ 被称为纯滞后时间。

计算纯滞后时间相对比较直接。首先确定控制器输出改变的时间。接下来，确定被测变量第一次对控制器输出变化做出反应的时间。纯滞后时间为两者的差。

2.5 动态过程非线性

本质上，生产过程的动态行为可以通过一个变量对另一个变量的响应来表征。了解这些动态特性可以使 PID 控制器即使在受到干扰时也能保持有效和安全的控制。

线性过程展示了最基本的动态行为。无论工作范围如何，它们都以相同的方式响应干扰。然而，实际过程往往都存在非线性。所有过程都有污染或腐蚀的表面、机械元件（如密封件或轴承）磨损、原料质量或催化剂活性漂移、环境条件（如温度和湿度变化）和其他影响动态行为的现象。

非线性过程表现出随着工作范围的变化而变化的特点。大多数生产过程在某种程度上都有非线性。因此，根据这一认识，非线性过程的整定应在特定和典型的工作范围进行。

图 6 描绘了某个换热器的非线性动态特性。由图 6 可见，控制器输出以 20% 的等幅阶跃 5 次，但被测变量的 5 次响应都明显不同。

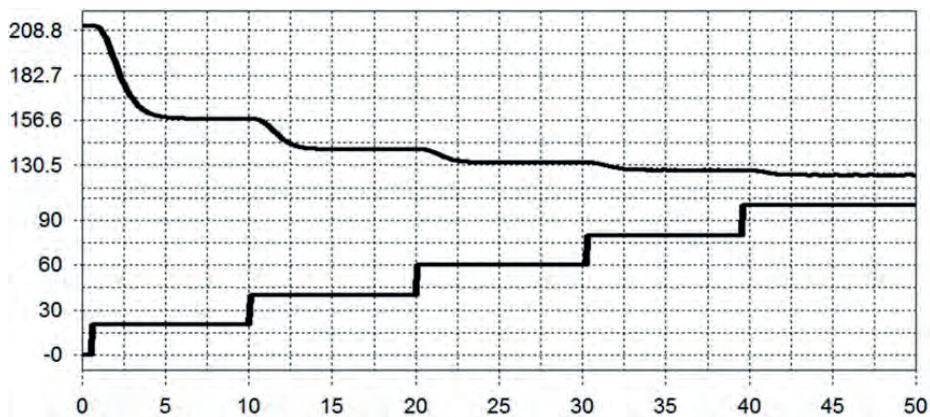


图 6 非线性过程

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	6 of 36

3. PID 控制基础

PID 控制器是目前过程工业中应用最广泛的一类控制器，因此，对 PID 控制器参数之间的相互作用和调节控制的基本理解非常重要。

比例 — 考虑被测变量偏离设定值的偏差。在固定的采样周期内，比例可以加上或减去一个偏差的计算值。当偏差增大或减小时，控制器输出也会立即按比例增大或减小。

积分 — 表示被测变量偏离设定值的时间。积分项是对偏差随时间的积分或连续求和。因此，即使小的持久性偏差也会随着时间的推移累积到相当大的数量。

微分 — 考虑偏差在瞬间变化的速度。微分计算产生偏差曲线的变化率或斜率。无论动态事件是刚刚开始还是已经发生了一段时间，快速变化的偏差都会产生一个大的微分作用。

3.1 PID 控制器的形式

现代 PID 控制器中实现的 PID 方程的形式包括三种：并行（parallel），理想（ideal）和串联（serial）。

并行形式中，三个 PID 参数互相独立：

$$G_C(s) = K_P + \frac{1}{K_I s} + K_D s \quad (3.1)$$

理想或 ISA 形式：

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3.2)$$

串联形式：

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T_D s) \quad (3.3)$$

因此，在处理任何控制器中的 PID 控制算法之前，首先必须考虑用于实现 PID 控制功能的形式，然后再对其进行整定。

本文后面的分析都是基于理想形式 PID。

PI 控制的传递函数为：

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = K_C \frac{T_I s + 1}{T_I s} \quad (3.4)$$

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	7 of 36

PID 控制的传递函数为：

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_C \frac{T_I T_D s^2 + T_I s + 1}{T_I s} \quad (3.5)$$

在上述方程中 $T_I T_D s^2 + T_I s + 1$ 会在闭环系统中引入两个零点。如果这两个零点都在负实轴上整个闭环系统更容易不振荡，而且根据经验闭环响应曲线不平滑绝大部分都是微分时间太大导致的。因此推荐：

$$T_D \leq \frac{T_I}{4} \quad (3.6)$$

与 PI 控制器相比，PID 控制器除了同样具有提高系统稳态性能的优点外，还多提供了一个负实零点，从而在提高系统动态性能方面具有更大的优越性。因此，在工业过程控制系统中，广泛使用 PID 控制器。通常，应使积分发生在系统频率特性的低频段，以提高系统的稳态性能；而使微分部分发生在系统频率特性的中频段，以改善系统的动态性能。

3.2 PID 控制器参数

根据经验，没有两个过程的动态特性完全相同。它们可以生产相同的产品，使用相同的仪器，并在相同的时间生产。然而，像双胞胎一样，他们不可避免地会发展出独特的特点。尽管如此，生产过程确实具有共同的属性，90%的生产过程都可以用 PID 控制器实现有效控制。PID 控制器可以提供如下的控制方式：

1. P 控制 — 只使用比例。这是最简单的控制形式，最容易整定。P 控制还提供了最鲁棒（即稳定）的控制。它提供了一个初始和快速的瞬时响应干扰和设定值的变化，但 P 控制存在余差。P 控制可用于串级控制的副回路。
2. PI 控制 — 工业上最常用的 PID 控制器组态。它提供了 P 控制的快速初始响应，并解决了 P 控制的余差问题。使用 2 个参数使得此组态相对容易优化。
3. PID 控制 — 这种组态使用了 PID 的 3 个参数，允许 **更激进的比例和积分而且没有超调**。PID 控制适用于稳定、响应缓慢和几乎没有噪音的过程。PID 控制的不足是其增加的复杂性和控制器输出信号上的噪声被放大。噪声增加通常会导致执行机构过度磨损，增加维护成本。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	8 of 36

大多数工业过程只需使用 PID 控制器的两个参数（比例和积分）即可有效控制。微分在噪声面前的反应很差，会导致最终控制元件的损耗加大。由于大多数生产过程都有噪声，因此通常不使用微分。

PI 控制器的挑战是有两个可调参数。这些参数互相影响，甚至互相干扰。

图 7 显示了比例和积分时间的差异如何影响 PI 控制器的响应。正中间的图形为基本情况。由图 7 可见，随着参数的整定，无论是翻倍还是减半，过程的每一个动态响应都截然不同。

图 7 左上角的图显示，当比例加倍，积分时间减半时，控制器会产生大而缓慢的阻尼振荡。相反，图 7 右下角的图显示，当控制器比例减半，积分时间加倍时，响应变慢。

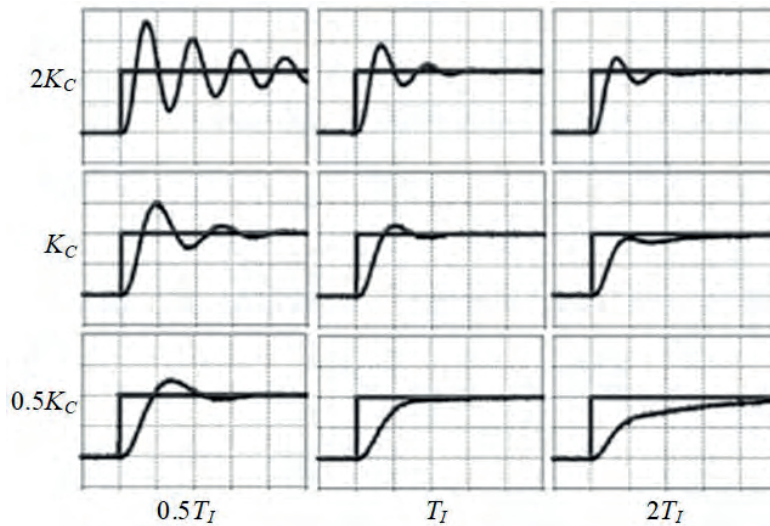


图 7 PID 控制效果示意图

3.3 PID 控制参数仿真

被控对象模型：

$$G(s) = \frac{1}{s + 1} e^{-0.1s} \tag{3.7}$$

其开环阶跃响应如图 8。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	9 of 36

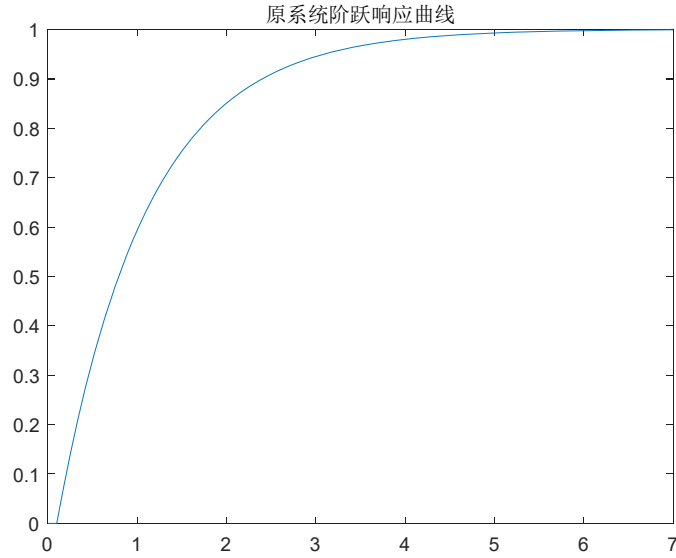


图 8 原系统阶跃响应

3.3.1 纯比例控制

比例系数加大，使系统的动作灵敏，速度加快，振荡次数增多，调节时间变长。当比例系数太大时，系统会趋于不稳定。加大比例系数，在系统稳定的情况下，可以减小余差，提高控制精度，却不能完全消除余差。

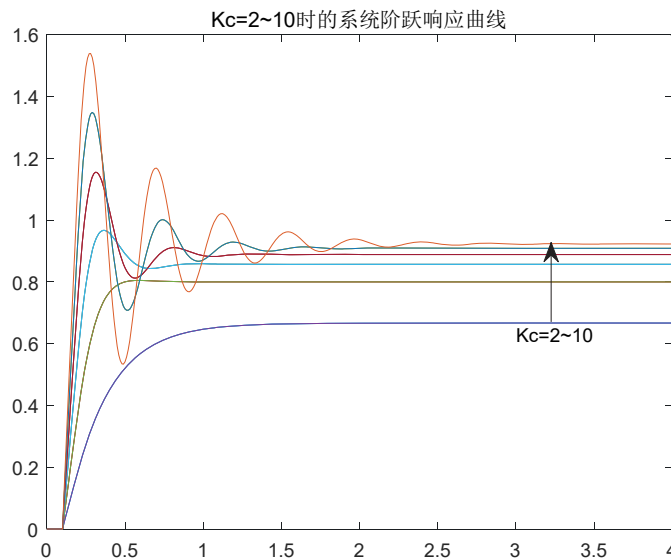


图 9 纯比例控制

3.3.2 PI 控制

PI 控制是在 P 控制基础上增加了积分环节，相当于在系统中增加了一个位于原点的开环极点，同时也增加了一个位于 S 左半平面的开环零点。位于原点的极点可以提高系统的阶次，

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	10 of 36

以消除系统的余差，改善系统的稳态性能。增加的负实零点用来提高系统的阻尼程度，PI 控制器极点对系统稳定性产生不利影响。但是只要积分时间 T_I 足够大，PI 控制器对系统稳定性的不利影响可大为减弱。在控制工程实践中，PI 控制器主要用来改善控制系统的稳态性能。因为单纯增大 P 的方法减小余差的同时会使系统的超调量增大，破坏了系统的平稳性，而积分环节的引入可以与 P 控制合作来消除上述的副作用。现场绝大部分的控制回路都采用 PI 控制。

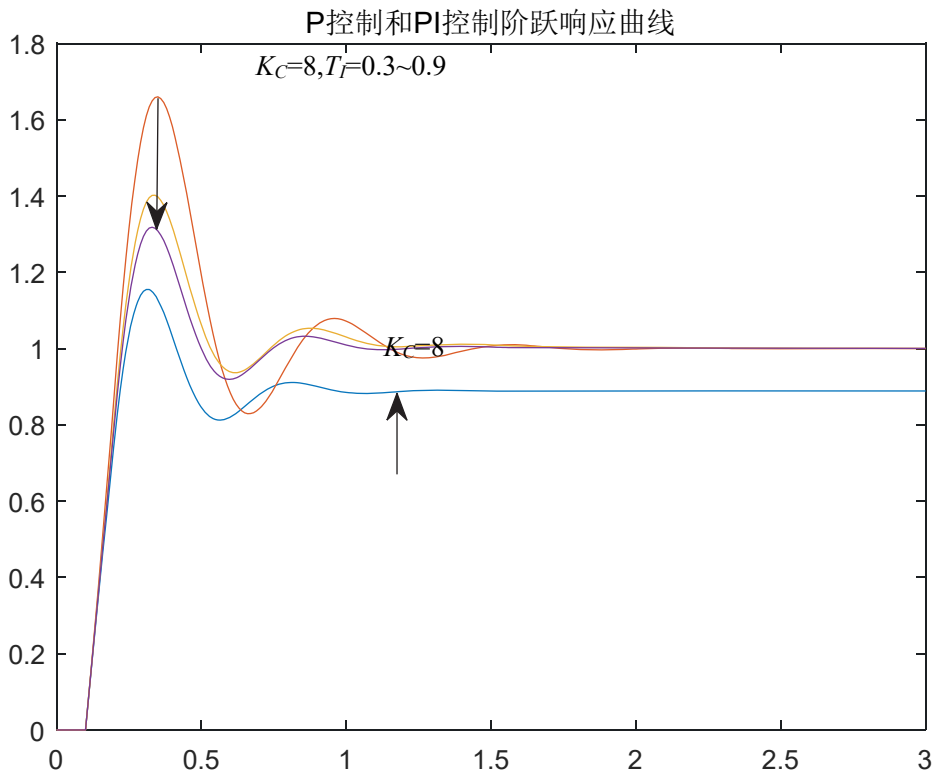


图 10 P 控制和 PI 控制阶跃响应曲线

3.3.3 PID 控制

增加微分有利于加快系统的响应速度，使系统的超调量减小，稳定性增加，同时增大比例可以进一步加快系统的响应速度，使系统更快速。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	11 of 36

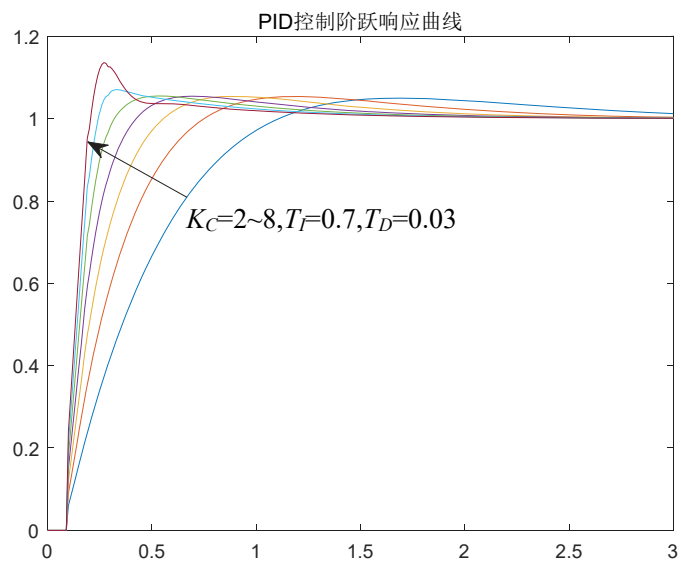


图 11 PID 控制阶跃响应曲线

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	12 of 36

4. Lambda 整定方法

PID 控制器已经成功应用近百年。尽管有各种整定技术但是有明显实际应用效果而且被工业界接受的却很少。许多大学本科课程仍在讲解由 John G. Ziegler 和 Nathaniel B. Nichols 在 20 世纪 40 年代开发的 Ziegler-Nichols 整定方法。

上个世纪八十年代之前的的大多数整定方法都关注克服不可测阶跃扰动时的峰值和累积偏差。这种积极行为对防止激活减灾系统或启动停车条件非常重要，但是由于鲁棒性不足不适合处理实际问题或实现其他控制目标。整定结果存在增益大、积分时间短的问题，不可避免地在系统中引起振荡，难以使系统达到整体性能最佳的控制目标，不适合大多数化工应用。最近的整定方法关注增加鲁棒性、最小化非线性、耦合和振荡影响并满足其他过程目标：最大化吸收干扰的缓冲罐液位控制，比值控制的回路协调和串级控制中底层回路的设定值响应等。

Lambda 整定是用于减少过程波动的成功方法。从最简单的意义上讲，Lambda 整定以所需的闭环响应速度实现回路的非振荡响应。通过选择一个闭环时间常数（通常称为 Lambda）来设置响应速度。通过选择该闭环时间常数，可以在一个单元过程中协调一组回路的协调整定，从而使它们的共同作用有助于建立整个过程的理想动态。Lambda 整定规则仅需要用户指定一个性能参数： λ 。这不仅仅是为了简化 K_C 和 T_I 的计算过程，还是为了让用户能够通过具有物理意义的参数来选择控制器的预期性能，而不使用那些没那么直观的概念，例如比例度和积分时间，从而实现整定工作的科学化。

闭环时间常数的选择随回路及其在整体控制策略中的作用而异。选择闭环时间常数的最常见依据：

1. 在确保鲁棒性和防止过度振荡的前提下，使回路尽可能快。
2. 使回路的响应速度与控制并行管线的另一个回路完全相同。
3. 使回路的响应速度慢于通过该过程耦合的另一个更重要回路的响应速度，以实现解耦。
4. 使串级副回路的响应速度快于串级主回路。
5. 在确保控制器能够处理所有正常需求变化的同时，尽量减小对相关装置的影响，使该回路的响应速度（通常是缓冲罐液位控制器）尽可能慢。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	13 of 36

6. 将闭环时间常数与随机干扰噪声结构相匹配，以使变化最小。

Lambda 整定概念的基础可以追溯到 1957 年 Newton, Gould 和 Kaiser 的分析设计方法。简而言之，一旦知道了过程模型并且选择了闭环特性，该方法就可以直接合成所需的控制器。1968 年，EB Dahlin 在数字控制器上的工作为 Lambda 整定提供了主要推动。Dahlin 将所需的闭环响应速度描述为“Lambda”。Dahlin 只关心一阶纯滞后对象，而 Morari 和 Chien 等人将该技术推广到一般的传递函数。设计方法的基础是零极点配置，其中控制器零点用于抵消过程极点。

Lambda 整定规则（有时也称为内部模型控制（IMC）整定）为针对速度的整定规则（例如 Ziegler-Nichols 和 Cohen-Coon 等）提供了强大的替代方法。尽管 Lambda 和 IMC 规则的推导不同，但对自衡对象的 PI 控制器产生相同的规则。Ziegler-Nichols 和 Cohen-Coon 整定规则的目标是 4:1 衰减振荡，而 Lambda 整定规则的目标是一阶纯滞后对设定值的响应。Lambda 整定规则具有以下优点：

1. 过程变量在发生干扰或设定值变化后不会超调。
2. Lambda 整定规则对通过阶跃测试确定过程纯滞后时间时所犯的任何错误的敏感性要低得多。这个问题在时间常数为主的过程中很常见，因为很容易低估或高估了过程纯滞后时间。当纯滞后时间不正确时，Ziegler-Nichols 和 Cohen-Coon 整定规则可能会给出非常糟糕的结果。
3. 整定非常鲁棒，这意味着即使过程特性与用于整定的过程相比发生了较大变化，控制回路也能保持稳定。
4. Lambda 整定的控制回路可以更好地吸收干扰，并将更少的干扰传递给下游过程。对于高度耦合过程，这是一个非常有吸引力的特性。造纸机上的控制回路通常使用 Lambda 整定规则进行整定，以防止整个机器由于过程相互耦合和反馈控制而发生振荡。
5. 用户可以为控制回路指定所需的响应时间（实际上是闭环时间常数）。这提供了一个 λ 整定因子，可用于加快或减慢回路响应。

不幸的是，Lambda 整定规则也有一个缺点。他们将控制器的积分时间设置为等于过程时间常数。如果过程具有非常长的时间常数，则控制器将因此具有非常长的积分时间。较长的积分时间会使系统从干扰中恢复的速度非常慢。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	14 of 36

Lambda 整定的控制器中使用微分控制毫无意义。如果需要快速回路响应，则应使用微分控制，因此应与快速整定规则（如 Cohen-Coon）结合使用。Lambda 整定不适用于获得超快速的闭环响应。*如果响应速度是整定目标，请使用其他整定规则。*

注意：

1. 整定参数适用于具有串联或理想形式的 PID，但不适用于并行形式（独立增益）PID。
2. 该方法计算控制器增益（ K_C ），而不是比例度（PB）。 $PB=100/K_C$ 。
3. 该方法假定控制器的积分设置为积分时间 T_I （以分钟为单位），而不是积分增益 K_I 。 $K_I=K_C/T_I$ 。

4.1 自衡对象 Lambda 整定参数计算

使用 Lambda 整定的第一步是计算闭环时间常数。闭环时间常数描述控制器响应设定值阶跃变化时的速度。因此，一个小的闭环时间常数（即短响应时间）意味着一个积极的控制器或一个以快速响应为特征的控制器的。

被控对象：

$$\frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (4.1)$$

可使用以下公式确定自衡对象的 PID 整定参数：

$$K_C = \frac{T}{K \lambda + \tau} \quad T_I = T \quad (4.2)$$

最终整定需要在线验证，可能需要调整。如果过程对干扰和（或）设定值的变化反应迟钝，控制器很可能比例太小和（或）积分时间太大。相反，如果过程响应迅速而导致不期望的振荡程度，则控制器比例很可能太大和（或）积分时间太小。

PID 控制器的控制器参数：

$$G_C(s) = \frac{T}{K \lambda + \tau} \frac{1}{Ts} \frac{1 + Ts}{s} = \frac{1}{K \lambda + \tau} \frac{1 + Ts}{s} \quad (4.3)$$

主通道闭环传递函数：

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	15 of 36

$$\frac{\frac{1}{K} \frac{1}{\lambda + \tau} \frac{1 + Ts}{s} \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}}{1 + \frac{T}{K} \frac{1}{\lambda + \tau} \frac{1 + Ts}{Ts} \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}} = \frac{\frac{1}{\lambda + \tau} \frac{1}{s} e^{-\tau s}}{1 + \frac{1}{\lambda + \tau} \frac{1}{s} e^{-\tau s}} = \frac{e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)s + e^{-\tau s}} \quad (4.4)$$

对分母上的纯滞后环节进行一阶 Taylor 近似:

$$\frac{e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)s + 1 - \tau s} = \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.5)$$

主通道闭环传递函数中 λ 正好是其时间常数。而且当 $\lambda = \tau/2$ 时设定值阶跃变化响应接近 4:1 衰减振荡。

4.1.1 λ 的选择原则分析

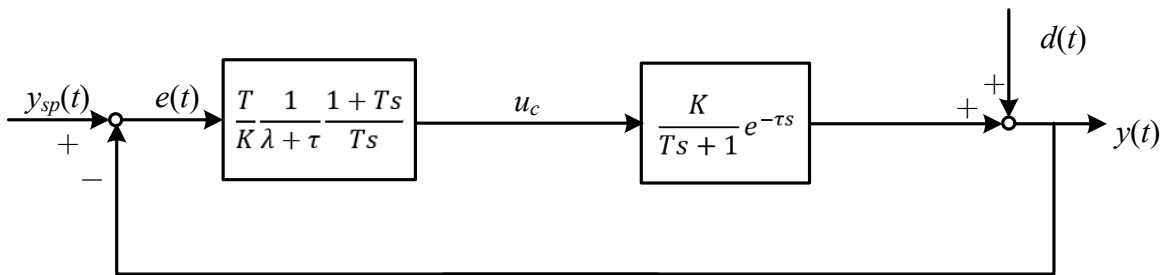


图 12 自衡对象 PID 控制框图

对主通道闭环传递函数(4.4)的分母纯滞后进行一阶 pade 近似:

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - 0.5\tau s}{1 + 0.5\tau s} \quad (4.6)$$

主通道闭环传递函数(4.4)近似为:

$$\frac{e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)s + \frac{1 - 0.5\tau s}{1 + 0.5\tau s}} = \frac{1 + 0.5\tau s}{(\lambda + \tau)0.5\tau s^2 + (0.5\tau + \lambda)s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.7)$$

干扰通道闭环传递函数:

$$\frac{(\lambda + \tau)s e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)s + e^{-\tau s}} \quad (4.8)$$

有积分作用后干扰通道 0 增益，控制器具备无偏抗扰能力。

主通道闭环传递函数的两个极点位置决定了被控对象是否振荡。极点的位置取决于主通道传递函数分母方程根的情况，由判别式 ($\Delta = b^2 - 4ac$) 决定。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	16 of 36

$$\begin{aligned} (0.5\tau + \lambda)^2 - 4(\lambda + \tau)0.5\tau &= 0.25\tau^2 + \lambda\tau + \lambda^2 - 2\tau^2 - 2\lambda\tau \\ &= \lambda^2 - \lambda\tau - 1.75\tau^2 \end{aligned} \tag{4.9}$$

当 $\lambda = \tau$ ，闭环的设定值跟踪会发生振荡。这也是 Lambda 整定方法推荐的最强控制作用。当 $\lambda = 2\tau$ 时，闭环设定值跟踪不振荡。Lambda 整定推荐的鲁棒参数为 $\lambda = 3\tau$ 。

实际过程中如果 $\tau/T < 0.5$ ，最强控制时容易导致控制器输出有非常大的超调幅度。例如被控对象：

$$\frac{1}{s + 1} e^{-0.1s} \tag{4.10}$$

如果取 $\lambda = \tau$ ：

$$K_C = \frac{T}{K} \frac{1}{\tau + \tau} = 5 \quad T_I = T = 1 \tag{4.11}$$

设定值阶跃变化响应如图 13 所示。

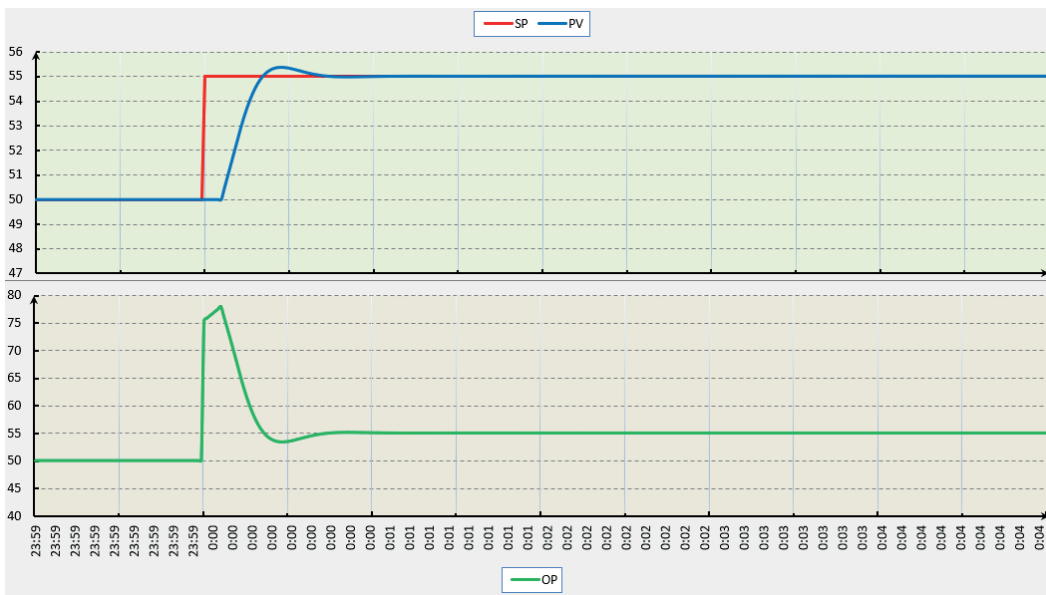


图 13 快速控制设定值阶跃变化

据此设置最强控制时 $\lambda = \max(\tau, T/2)$ 。根据上面的被控对象模型，本文推荐的最强控制参数为：

$$K_C = \frac{T}{K} \frac{1}{\max(\tau, T/2) + \tau} = 1.67 \quad T_I = T = 1 \tag{4.12}$$

设定值阶跃变化响应如图 14 所示。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	17 of 36

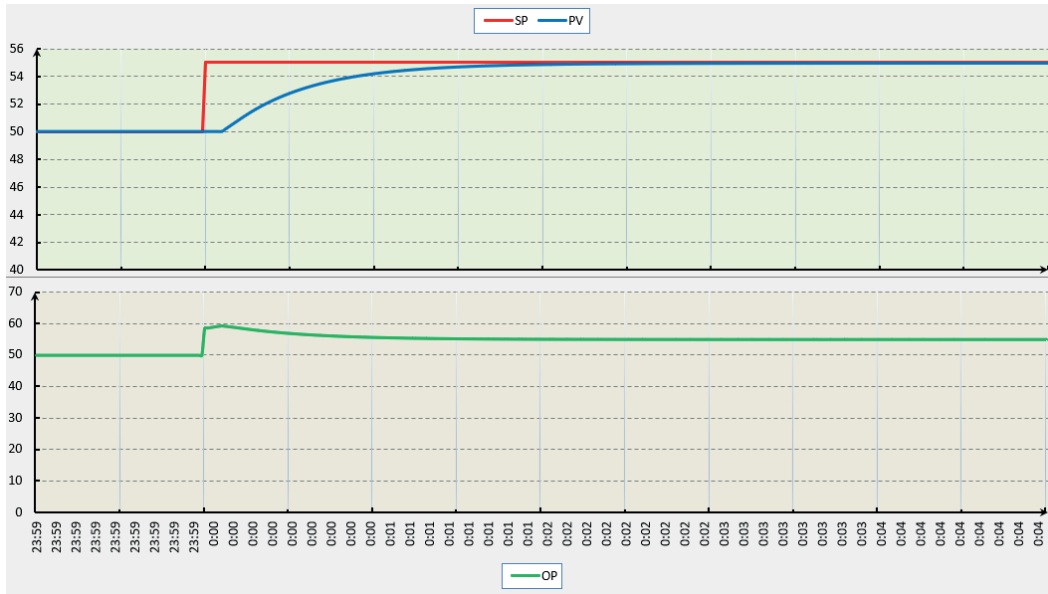


图 14 优化策略后快速控制设定值阶跃变化

对于上述对象选择鲁棒控制策略取 $\lambda = 3\tau$:

$$K_C = \frac{T}{K} \frac{1}{3\tau + \tau} = 2.5 \quad T_I = T = 1 \quad (4.13)$$

设定值阶跃变化响应如图 15 所示。

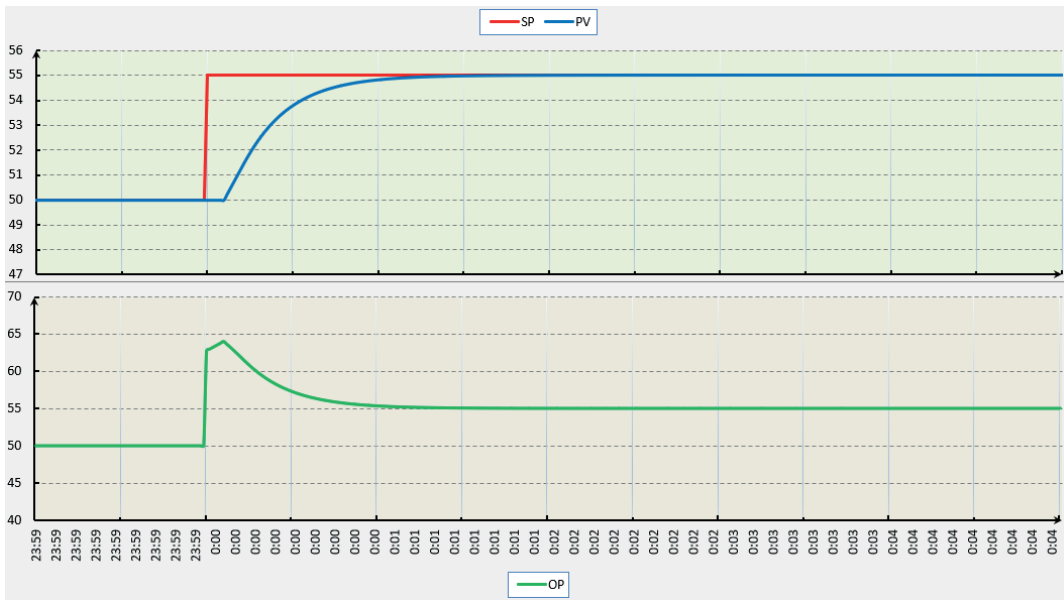


图 15 鲁棒控制设定值阶跃变化

此时也存在控制作用太强的问题。据此设置鲁棒控制时 $\lambda = \max(3\tau, T)$ 。根据上面的被控对象模型，本文推荐的快速控制参数为：

$$K_C = \frac{T}{K} \frac{1}{\max(3\tau, T) + \tau} = 0.91 \quad T_I = T = 1 \quad (4.14)$$

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	18 of 36

设定值阶跃变化响应如图 16 所示。

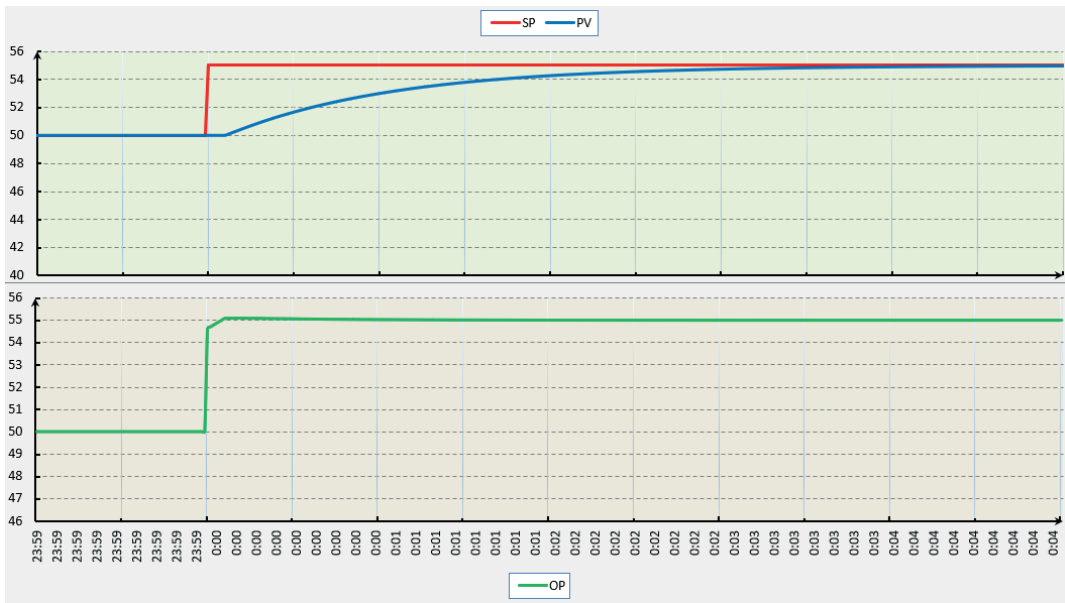


图 16 优化后鲁棒控制设定值阶跃变化

实际整定工作中，最强 PID 提供的是最强 PID 参数，鲁棒 PID 提供的是最稳定的 PID 参数。最强 PID 在模型匹配时可能会振荡加剧，而且在现实中模型失配始终都存在，一般情况推荐使用鲁棒 PID 参数。

4.2 积分对象 Lambda 整定参数计算

积分对象的 Lambda 是克服扰动的闭环停止时间。闭环时间常数描述控制器克服扰动的速度。因此，一个小的闭环时间常数值（即短响应时间）意味着一个积极的控制器。

被控对象：

$$\frac{K}{s} e^{-\tau s} \tag{4.15}$$

可使用以下公式确定积分对象的 PID 整定参数：

$$K_C = \frac{2\lambda + \tau}{K(\lambda + \tau)^2} \quad T_I = 2\lambda + \tau \tag{4.16}$$

最终整定需要在线验证，可能需要调整。如果过程对干扰和（或）设定值的变化反应迟钝，控制器比例很可能太小和（或）积分时间太大。相反，如果过程响应迅速而导致不期望的振荡程度，则控制器比例很可能太大和（或）积分时间太小。

PID 控制器的控制器参数：

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	19 of 36

$$G_c(s) = \frac{2\lambda + \tau}{K(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{(2\lambda + \tau)s} = \frac{1}{K(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{s} \quad (4.17)$$

主通道闭环传递函数：

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{1}{K(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{s} \frac{K}{s} e^{-\tau s}}{1 + \frac{1}{K(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{s} \frac{K}{s} e^{-\tau s}} \\ &= \frac{\frac{1}{(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{s} \frac{1}{s} e^{-\tau s}}{1 + \frac{1}{(\lambda + \tau)^2} \frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{s} \frac{1}{s} e^{-\tau s}} \\ &= \frac{[1 + (2\lambda + \tau)s]e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)^2 s^2 + [1 + (2\lambda + \tau)s]e^{-\tau s}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

对(4.18)分母上的纯滞后环节进行一阶 Taylor 近似：

$$\frac{[1 + (2\lambda + \tau)s]e^{-\tau s}}{(\lambda + \tau)^2 s^2 + [1 + (2\lambda + \tau)s](1 - \tau s)} = \frac{[1 + (2\lambda + \tau)s]e^{-\tau s}}{(\lambda s + 1)^2} \quad (4.19)$$

闭环传递函数是一个二阶对象 λ 正好是两个相同的极点，阶跃响应约 6 倍 λ 达到稳态。而且当 $\lambda = \tau$ 时设定值阶跃变化响应接近 4:1 衰减振荡。

积分对象很多文献提出可以采用纯比例控制。针对该说法下一节将进行详细讨论。

4.2.1 积分对象纯比例控制

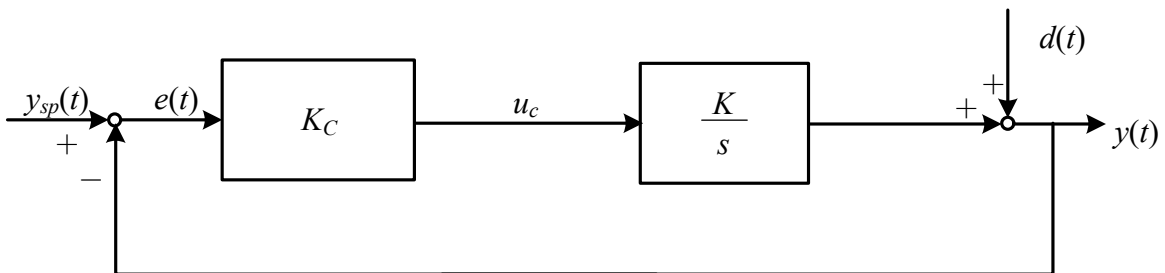


图 17 积分对象纯比例控制 1

主通道传递函数：

$$\frac{K_C \frac{K}{s}}{1 + K_C \frac{K}{s}} = \frac{1}{\frac{1}{K_C K} s + 1} \quad (4.20)$$

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	20 of 36

对纯积分对象的主通道而言，比例控制就能保证闭环稳定，而且比例作用越强闭环传递函数的时间常数越小，闭环响应速度越快，过程始终不振荡。

干扰通道传递函数：

$$\frac{1}{1 + K_C \frac{K}{s}} = \frac{s}{s + K_C K} \tag{4.21}$$

对纯积分对象的干扰通道而言，整个控制系统对于干扰具有无偏校正能力。

看起来按传统文献上说的：使用纯比例控制就能满足积分对象的控制要求，但是实际情况干扰通道可能具有和被控对象一样的积分特性。例如水箱或储罐的进出流量对液位都有积分特性。如图 18 所示。

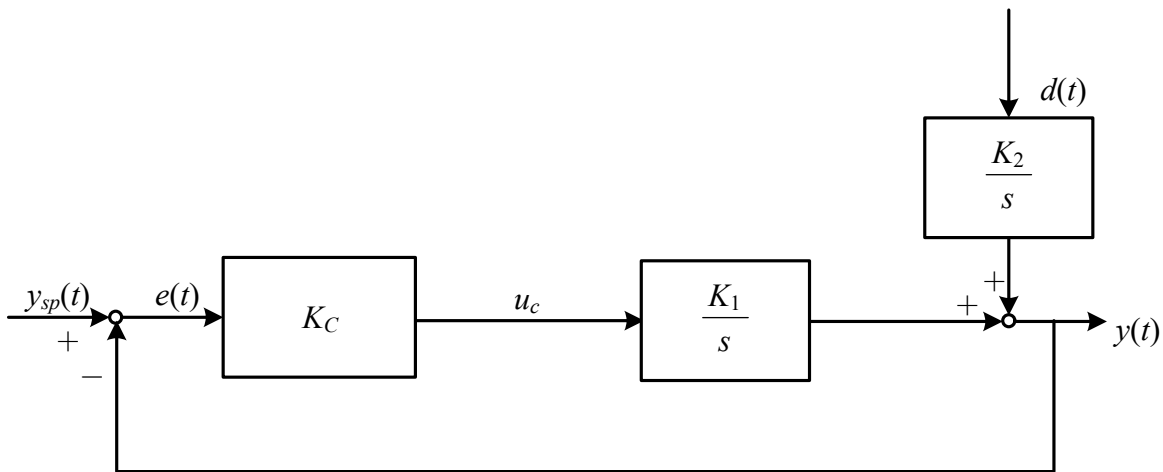


图 18 积分对象纯比例控制 2

这样干扰通道传递函数为：

$$\frac{\frac{K_2}{s}}{1 + K_C \frac{K_1}{s}} = \frac{K_2}{s + K_C K_1} \tag{4.22}$$

此时对纯积分对象而言，干扰会导致系统产生余差。随着比例作用增强，余差逐步减小。

因此即使被控对象是积分对象，考虑到扰动的复杂性为了消除余差，也推荐使用 PI 控制而不是 P 控制。

4.2.2 λ 的选择原则分析

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	21 of 36

积分纯滞后过程的 λ 为负载扰动的最大偏差时间。如果目标是最大抗扰能力，则选择一个较小的 λ 。如果目标是允许被控变量变化并减少控制器输出和利用容器吸收被控变量的波动，则选择更大的 λ 。 λ 没有上限但是 λ 必须足够小，才能将被控变量保持在最大干扰时的允许偏差范围内。

建议的最小 λ 为 1 倍的纯滞后，这是最强的 PID 参数。此时的 PID 参数如下：

$$K_c = \frac{0.75}{K\tau} \quad T_I = 3\tau \quad (4.23)$$

有时候需要最大化吸收扰动以减少对下游装置的影响。最大的 λ 为：

$$\lambda = \left| \frac{\Delta\%PV_{\max}}{K * \Delta\%OP_{\max}} \right| \quad (4.24)$$

其中 $\Delta\%PV_{\max}$ = PV 的允许工艺偏差%， $\Delta\%OP_{\max}$ = 最大控制器输出%， K = 模型增益。

默认的被控变量允许波动可以设计为 30%，最大干扰选择为控制器输出的 40%。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	22 of 36

5. PID 整定实操指南

5.1 控制回路优化流程

控制回路整定优化指改善控制回路的性能，以从中获得最佳性能。控制回路整定优化往往采用试凑法进行，但这通常是无效的，并且很少能获得真正的最佳回路性能。通过遵循最佳实践，可以系统且有效的进行控制回路优化。

1. **了解您的过程。** 看起来显而易见根本不需要特别指出，但是人们往往很想通过整定来解决控制问题，而不考虑更广泛的过程。过程知识可提供有关控制目标、要使用的整定规则、要执行的诊断测试以及进行整定的过程条件的指导。有关过程需要知道的信息包括：过程类型（自衡或积分）、纯滞后时间和时间常数的比、过程增益或动态特性是否会在不同的操作条件下发生变化、所使用的最终控制元件的类型及其特性、过程的干扰以及是否可测、过程变量超调或者快速变化的控制器输出可能会产生的负面影响。
2. **确定控制目标。** 需考虑以下几点：回路应快速执行还是缓慢执行？超调是否可以容忍？控制器输出是否可以尽可能变化？控制器设定值是否经常变化？回路是否必须克服过程干扰？控制目标将决定要使用的整定方法的类型。控制目标可以是快速的设定值跟踪或快速的干扰消除、过程变量零超调、对设定值变化的特定过程响应、最小控制器输出变化以及控制器输出没有超调。例如缓冲罐液位回路应该整定以最大程度地减少控制器输出变化，同时将液位保持在规定的范围内。
3. **检查控制策略。** 借助管道仪表图检查控制策略设计。设计是否支持以上确定的控制目标？是否需要并正确应用串级、前馈、比值和其他控制策略？有耦合控制回路吗？如果是这样，如何处理？在干扰，非线性和其他细微差别的广泛过程中，控制策略应支持控制目标。例如，如果实际需要比值控制，那么简单的反馈控制回路将做的很糟糕。仅当副回路比主回路快得多时，才应使用串级控制。干扰除直接影响通过最终控制元件的流量（需要串级控制）外，应使用前馈控制来补偿。如果检查正确，控制策略有助于控制回路的稳定性和响应性。反之，情况则相反。
4. **现场检查。** 检查过程设备的尺寸和布局，以及仪表和最终控制元件（例如调节阀、挡板或调速泵）的状况和位置。需要确认一切状况都良好且位于正确的位置。通过

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020年2月24日	页:	23 of 36

设备的大小，能够大致了解该过程对控制器输出变化的响应速度有多快。这些知识将有助于阶跃测试。

5. **检查测量设备。** 确保过程测量满足需求。变送器的量程是否合适？这是针对当前条件的最佳传感技术吗？设备安装正确吗？
6. **评估滤波的使用。** 检查是否正在使用变送器阻尼或过程变量滤波。如果需要，应在控制系统中进行滤波，以简化其整定并方便更换变送器，而不必担心设备本身的滤波。检查过程变量的时间趋势，并确定是否需要滤波以及需要多少滤波。如果使用过程变量滤波器，则应检查其时间常数，以确保其设置适当且显著小于主要过程时间常数。
7. **测试最终控制元件。** 最终控制元件工作不正常会损害控制回路性能，并会否定正确的控制器整定方法。典型的问题包括死区、静摩擦、非线性流动曲线和定位器问题。这些问题可能看起来与整定问题非常相似，如果问题出在控制阀上，那么一个不了解情况的整定人员可能会花费很多时间进行徒劳的整定。在尝试进行任何整定之前，应进行一些简单的过程测试以检测和诊断最终控制元件问题。为了获得最佳控制性能，必须解决这些问题。同样，最终的控制元件问题可能会严重影响测试结果，并导致计算出完全不正确的整定参数。
8. **查看控制器配置。** 控制器提供了多种选择，可以针对各种情况优化其性能。即使操作员突然修改设定值，也可以在内部对设定值进行爬坡调整或滤波以获得平滑的控制响应。设定值更改也可以与比例和微分控制模式无关。外部积分反馈可防止在不利条件下出现积分饱和，并且变化率约束可保护下游的敏感设备。在整定控制器之前，请检查控制器算法和可配置的控制器选项。
9. **选择合适的整定方法。** 与普遍的看法相反，**控制器整定是科学而不是艺术**。可以根据控制目标、过程特性和适当的整定规则快速而准确地完成回路整定。可以通过在控制器输出中进行阶跃变化并从所得到的过程响应中进行测量来确定过程特性。尽管试凑法整定很流行，但它只能作为不得已的手段使用，例如处理过程非常易变，以致无法获得可用的阶跃测试数据。作为根据阶跃测试结果手动计算整定参数的替代方法，回路整定软件提供了许多有用的功能，例如过程特征的辨识、针对不同整定目标产生整定参数、提供预期回路响应的仿真、分析控制回路的鲁棒性以及更多。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020年2月24日	页:	24 of 36

但是，整定软件只是一种工具，擅长使用阶跃测试数据和整定规则手动整定控制器的人可能也会发现整定软件很难使用。

10. **通过多次阶跃测试进行模型辨识。**模拟可以是 100%可重复的，但实际过程却并非如此。过程干扰、相互耦合的控制回路、非线性和运行条件都会影响过程特性。如果由于某种原因过程响应不正常，则仅一步测试进行的整定可能会导致整定设置不佳。必须进行多步测试，以获得过程特征的“平均”测量值，并了解它们在正常条件下会发生多少变化。
11. **适应非线性和变化的过程特征。**安装的最终控制元件的流量特性通常不是线性的。此外，许多工艺的特性会在不同的工艺条件（产量、使用中的设备、催化剂浓度、pH 等）下发生变化。控制阀和挡板可能必须使用定位器进行线性化，并且变化的过程特性可能需要持续整定控制器参数（称为增益调度或自适应整定）。
12. **验证并测试新值。**将新计算出的控制器设置与控制器中的设置进行比较，并确保数字上的任何较大差异都是合理且恰当的。实施并测试新的控制器设置。确保整定控制器与所控制的过程动态协调一致，并满足回路的总体控制目标。首先，让回路稳定下来并评估其在稳定条件下的性能。它会振荡吗？控制器输出是否变化太多？如果回路应响应设定值更改，请进行设定值更改，并查找是否有不必要的超调、振荡或控制器输出变化过多等。如果回路用于克服干扰，则将控制器短暂地置于手动状态，将输出更改几个百分点，然后立即将控制器置于自动状态，这模拟了干扰。再次，检查是否有不必要的超调、振荡，控制器输出变化过多。整定后几天，请定期监视控制器的性能，以验证在不同过程条件下的性能提升。
13. **保留记录。**记下以前的控制器设置，新设置以及更改日期和时间。应保留对控制回路的所有更改的电子或纸质日志。将先前的控制器设置留给操作员，以防操作员想恢复到原来的设置而找不到您。如果新设置不起作用，则您可能错过了上述流程的一步或多步工作。

如果遵循这些做法（包括维修故障设备和更改控制策略）无法满足所需的控制目标，则可以将模型预测控制作为一种可能的解决方案进行研究。最后的，也许是最昂贵的选择是修改工艺设备，但这很少需要。在大多数情况下，上述控制回路优化流程都能解决控制回路存在的问题。

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	25 of 36

5.2 试凑法 PID 整定

试凑法不使用过程模型进行 PID 控制器整定，是常见的 PID 整定方法。试凑法基于对过程的观察，该过程处于受控状态，根据过程响应进行参数修改直到满意为止。这种方法非常耗时而且对人的经验要求很高，另外由于没有确定性的公式指导或限制振荡幅度，回路存在振荡甚至发散的风险。

推荐使用测试获得模型并基于 Lambda 方法进行整定，不推荐试凑法。但是在实际工作中的确也有根据正在投用的控制曲线进行参数整定的需求。所以本节对试凑法也给出了一些指导建议。

5.2.1 理论基础

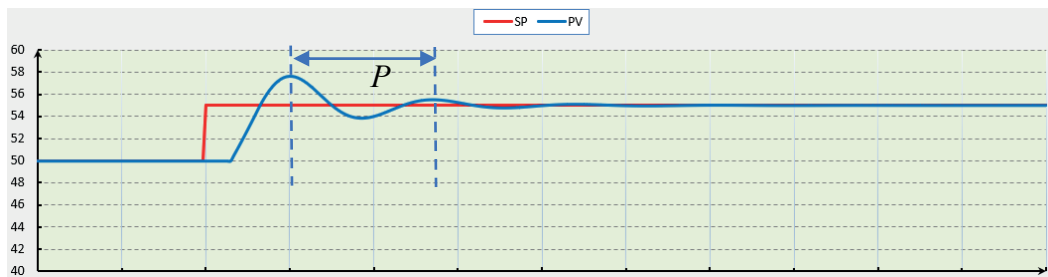


图 19 振荡周期定义

当控制回路有如图 19 所示的设定值阶跃变化响应的振荡特性时，振荡的周期 P 与积分时间 T_I 之间存在可预测的关系：

$$1.5 < \frac{P}{T_I} < 2 \quad (5.1)$$

$$1.5T_I < P < 2T_I \quad (5.2)$$

$$0.5P < T_I < \frac{2}{3}P \quad (5.3)$$

5.2.2 自衡对象和积分对象的判断

如果控制回路已经闭环，可以根据设定值变化时控制器的输出变化确定被控对象是自衡对象还是积分对象。如图 20 左侧所示设定值变化并稳定后如果控制器输出和设定值变化前有明显变化就是自衡对象。如图 20 右侧所示设定值变化并稳定后如果控制器输出和设定值变化前变化不大就是积分对象。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	26 of 36

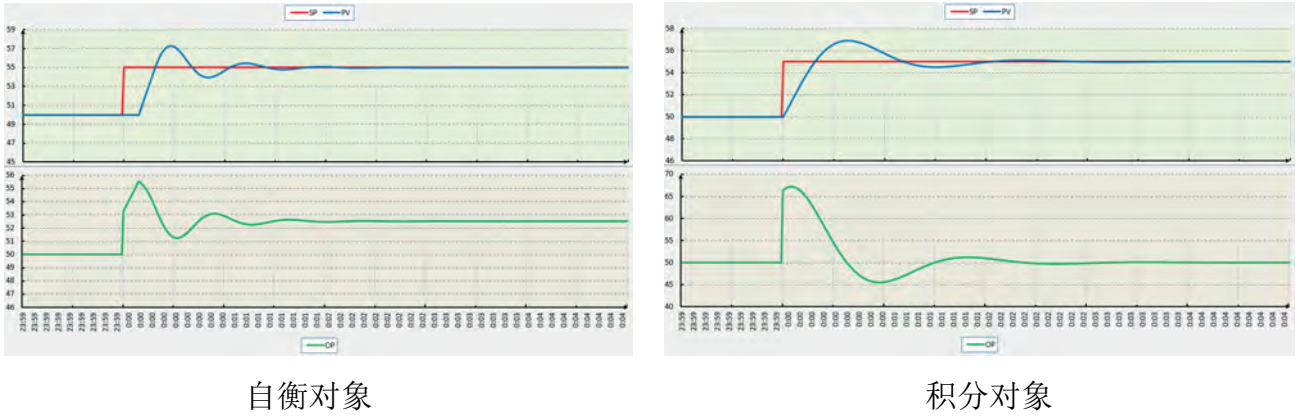


图 20 闭环识别积分对象和自衡对象

5.2.3 自衡对象

推荐进行阶跃测试，辨识模型并基于模型进行 Lambda 整定。如果不允许进行阶跃测试，推荐寻找图 21 的设定值变化数据进行分析。

按图 21，从控制器输出开始变化到测量值开始变化的时间就是纯滞后时间，过程模型的增益 K 就是 $\Delta\%PV/\Delta\%OP$ 。推荐 PID 参数如下：

1. 存在衰减振荡周期 P ，推荐的参数为：

$$K_C = \frac{P}{K \max(P, \tau) + \tau} \quad T_I = P \quad (5.4)$$

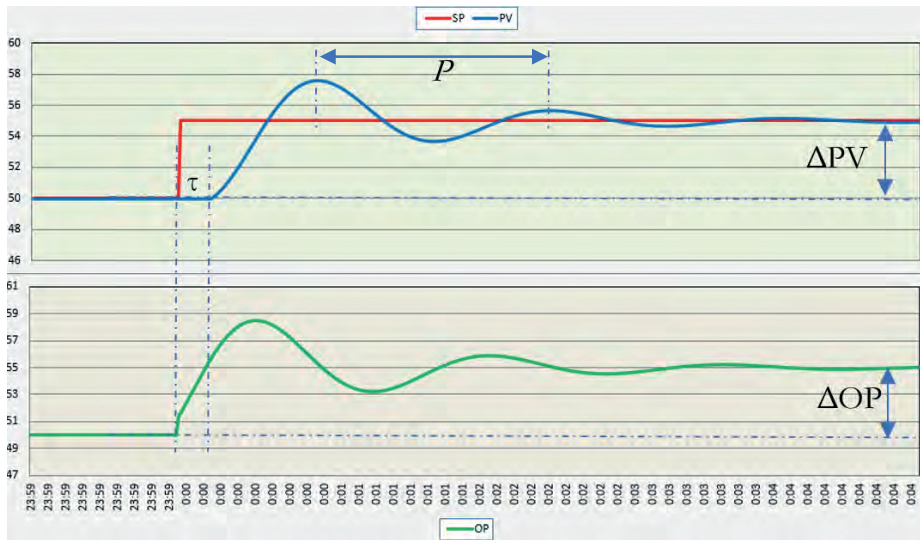


图 21 自衡对象闭环响应

1. 不振荡且 $\tau/T \leq 0.5$ ，推荐的参数为：

$$K_C = \frac{1}{K} \quad T_I \text{ 由大到小直到满意或超调} \quad (5.5)$$

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	27 of 36

- 不振荡且 $\tau/T > 0.5$ ，进行开环测试并根据 Lambda 方法进行整定。

5.2.4 积分对象

在现场常见的积分对象控制回路容易出现如图 22 的振荡过程。这种情况下推荐的整定过程：

- 积分时间设置为振荡周期，如果积分时间足够大后仍振荡，加强比例作用；
- 如果对象仍然震荡甚至发散，请进行开环测试并根据 Lambda 方法进行整定。

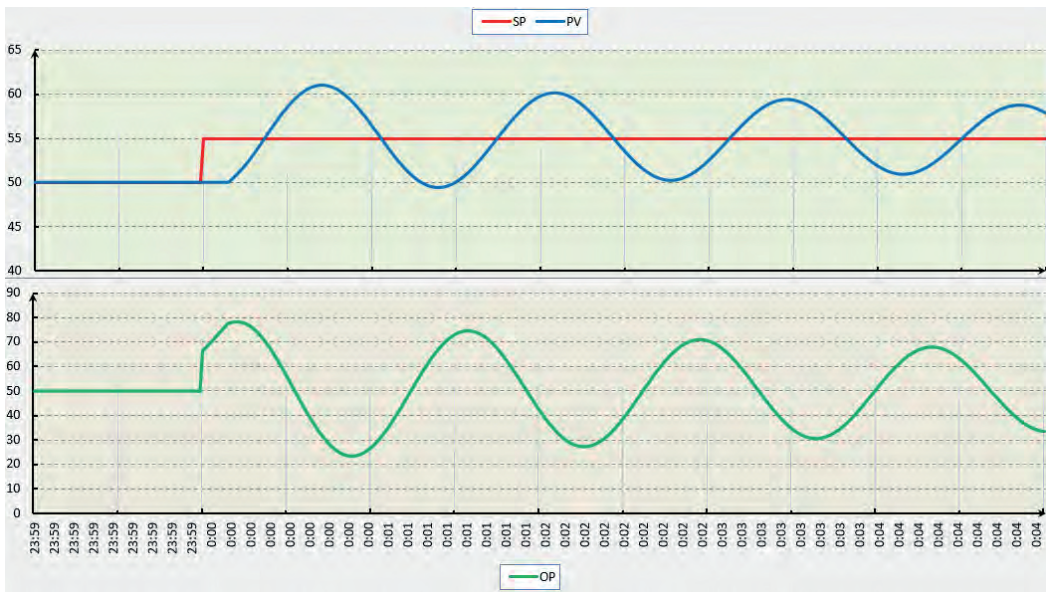


图 22 积分对象闭环响应

5.3 Lambda 整定实操指南

在实际应用中往往是多容对象或者振荡对象，这里主要给出参数选择的实操指南，方便在实际工作中使用。

5.3.1 自衡对象 Lambda 整定

对于自衡对象而言，模型增益无论使用开环测试还是闭环测试，其计算公式都一样：

$$K = \frac{\Delta\%PV}{\Delta\%OP} \quad (5.6)$$

要注意模型增益计算数据可能受到干扰的影响，建议多次测试并选择大的模型增益进行控制器整定参数计算。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	28 of 36

在实际对象中，无论是如图 23 的多容对象还是如图 24 的欠阻尼对象。都使用统一的方法获得 Lambda 整定需要的模型时间常数 T 和纯滞后时间 τ 。

从开环响应的 $63.2\% \Delta PV$ ，沿响应曲线向前做响应曲线的切线，切线与时间坐标轴相交。输出变化到交点为纯滞后时间 τ ，交点到 $63.2\% \Delta PV$ 的时间为时间常数 T 。

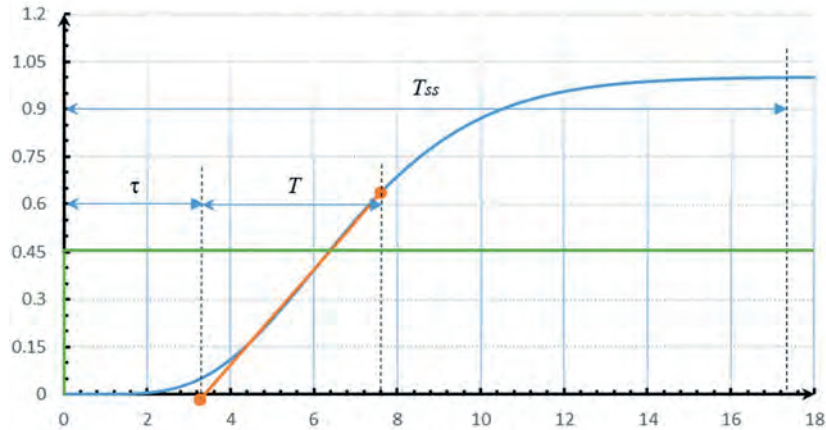


图 23 多容对象开环响应

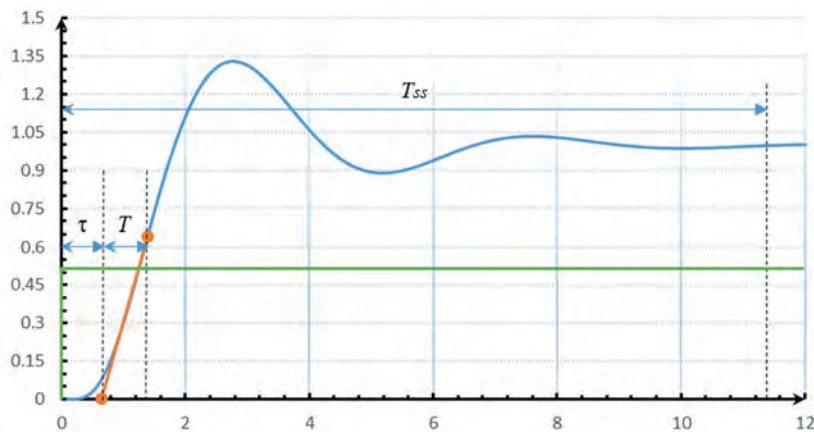


图 24 欠阻尼对象开环响应

考虑被控对象的复杂性，推荐鲁棒的 λ ：

$$\lambda = \max(3\tau, (T_{ss} - \tau) / 4) \tag{5.7}$$

其中 T_{ss} 为稳定时间，稳定时间为阶跃开始时到 PV 稳定时的时间。Lambda 整定参数为：

$$K_C = \frac{T}{K} \frac{1}{\lambda + \tau} \quad T_I = T \tag{5.8}$$

5.3.2 积分对象 Lambda 整定

对积分对象而言，在闭环整定中注意：

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	29 of 36

1. 控制回路的周期性振荡主要是积分时间和比例作用同时太小造成的。
2. PID 控制器的比例不能超过上限：

$$K_C \leq \frac{0.75}{K\tau} \quad (5.9)$$

3. PID 控制器的比例和积分时间的乘积有下限：

$$K_C T_I \geq \frac{2.25}{K} \quad (5.10)$$

对积分对象进行阶跃测试，往往得到类似图 25 的响应。从阶跃响应开始直线变化起，沿变化方向反向延伸与时间轴相交。开始阶跃变化的时间到交点就是纯滞后时间。直线的斜率除以控制器输出变化就是模型增益，其计算公式为：

$$K = \frac{\Delta\%PV}{\Delta\%OP * \Delta t} \quad (5.11)$$

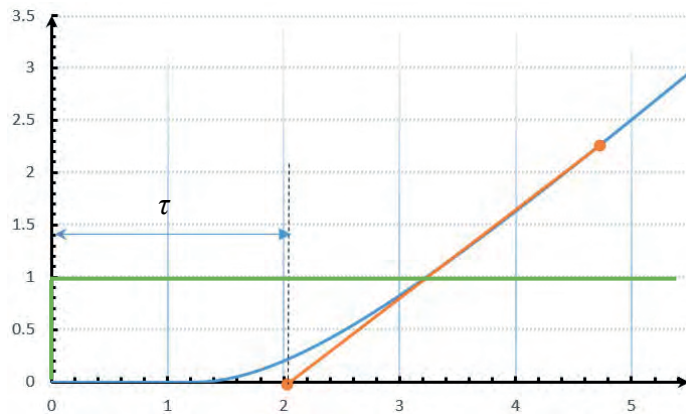


图 25 欠阻尼对象开环响应

考虑被控对象的复杂性，如果均匀控制 λ 应设置的尽可能大。推荐的鲁棒 λ ：

$$\lambda = 3\tau \quad (5.12)$$

积分对象的 Lambda 整定参数为：

$$K_C = \frac{2\lambda + \tau}{K(\lambda + \tau)^2} \quad T_I = 2\lambda + \tau \quad (5.13)$$

5.4 不同情况下 λ 的选择规则

虽然我们已经提供了常规控制回路的 λ 整定规则，但是在很多更具挑战的情况下根据不同控制目标还需要更特殊的整定方案。表格 2 提供了不同情况下建议的 λ 整定参数。

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	30 of 36

表格 2 推荐的 λ 整定参数

过程挑战	要求	λ 整定方法
现有整定振荡	一阶设定值响应或关键抑制干扰响应	$\lambda=5\tau$
需要最小的 PV 波动	控制回路快速响应；波动转移到输出	$\lambda=\tau$
缓冲罐吸收干扰；需要最小的输出变化	液位控制回路慢响应	λ_{level} 尽可能大
串级组态	副回路响应必须比主回路快	$\lambda_{\text{master}}=5\lambda_{\text{slave}}$
物理耦合或互相影响过程	回路动态解耦	$\lambda_{\text{slower}}=5\lambda_{\text{faster}}$
多物料进入混合系统	所有物料对库存控制的响应速度相同	$\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3$

6. 参考文献

1. Ziegler, J.G. and N.B. Nichols (1942). *Optimum settings for automatic controllers*, Trans. of the A.S.M.E.64, 759–768.
2. G. C. Newton, Jr., L. A. Gould, and J. F. Kaiser, *Analytical Design of Linear Feedback Controls*, John Wiley, New York, 1957.
3. Dahlin, E. B., *Designing and Tuning Digital Controllers* Instruments and Control Systems, 41 (6), p. 77 (1968).
4. Garcia, C. E. and M. Morari, *Internal Model Control: 1. A Unifying Review and Some New Results*, I Ed EC Process Des. and Dev. 21 pp. 308-323 (1982).
5. Chien, I.L. and P.S. Fruehauf (1990). *Consider IMC tuning to improve controller performance*, Chemical Engineering Progress pp. 33-41
6. Tim Olsen, Norman Ito, *Implement an Effective Loop Tuning Strategy*, Chemical Engineering Progress), January 2013.
7. Mark T. Coughran, *Lambda Tuning—the Universal Method for PID Controllers in Process Control* whitepaper
8. Gregory K McMillan, *So Many Tuning Rules, So Little Time* whitepaper
9. Robert C. Rice, *PID Tuning Guide*, 2010

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020年2月24日	页:	32 of 36

7. 附录 1: Lambda 整定规则推导

Lambda 整定规则的推导基于图 26 的简化控制框图。

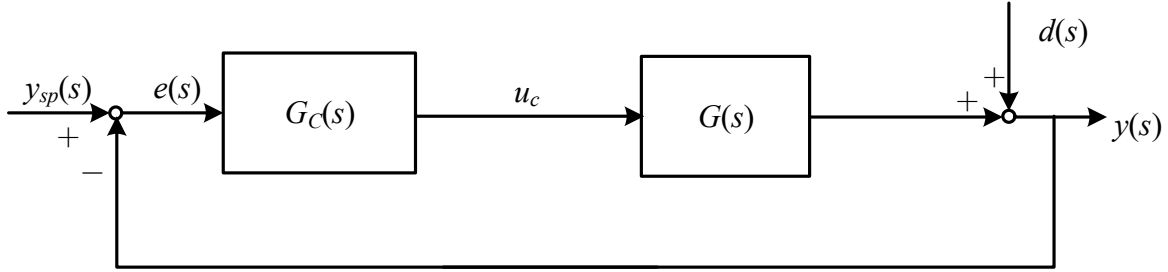


图 26 简化的控制框图

主通道闭环传递函数：

$$\frac{y(s)}{y_{SP}(s)} = \frac{G_C(s)G(s)}{1 + G_C(s)G(s)} \quad (7.1)$$

控制器传递函数：

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{y(s)}{y_{SP}(s) - y(s)} \quad (7.2)$$

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{\frac{y(s)}{y_{SP}(s)}}{1 - \frac{y(s)}{y_{SP}(s)}} \quad (7.3)$$

7.1 稳定对象的 Lambda 整定规则推导

被控对象传递函数：

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (7.4)$$

希望的闭环传递函数为：

$$\frac{y(s)}{y_{SP}(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s} \quad (7.5)$$

闭环控制不能消除纯滞后时间，所以设闭环传递函数仍有固定纯滞后。闭环时间常数 λ 表示设定值阶跃变化时过程的响应速度。

将等式(7.5)带入等式(7.3)，得：

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020 年 2 月 24 日	页：	33 of 36

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{\frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s}}{1 - \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s}} \quad (7.6)$$

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{e^{-\tau s}}{\lambda s + 1 - e^{-\tau s}} \quad (7.7)$$

将模型(7.4)带入上式:

$$G_C(s) = \frac{T s + 1}{K e^{-\tau s}} \frac{e^{-\tau s}}{\lambda s + 1 - e^{-\tau s}} \quad (7.8)$$

对(7.8)纯滞后使用一阶 Taylor 展开近似:

$$e^{-\tau s} \cong 1 - \tau s \quad (7.9)$$

$$\begin{aligned} G_C(s) &\cong \frac{T s + 1}{K} \frac{1}{\lambda s + 1 - 1 + \tau s} = \frac{T s + 1}{K} \frac{1}{(\lambda + \tau) s} \\ &= \frac{T}{K(\lambda + \tau)} \left(1 + \frac{1}{T s}\right) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \end{aligned} \quad (7.10)$$

故:

$$K_C = \frac{T}{K(\lambda + \tau)} \quad T_I = T \quad (7.11)$$

7.2 积分对象的 Lambda 整定规则推导

被控对象可以用积分纯滞后对象描述:

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-\tau s} \quad (7.12)$$

希望的闭环传递函数为:

$$\frac{y(s)}{y_{SP}(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s} \quad (7.13)$$

闭环控制不能消除纯滞后时间, 所以设闭环传递函数仍有固定纯滞后。闭环时间常数 λ 表示设定值变化时过程的响应速度。

将闭环传递函数(7.13)带入方程(7.3), 得:

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020年2月24日	页:	34 of 36

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{\frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s}}{1 - \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-\tau s}} \quad (7.14)$$

$$G_C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{e^{-\tau s}}{\lambda s + 1 - e^{-\tau s}} \quad (7.15)$$

将模型(7.12)代入公式(7.15)得:

$$G_C(s) = \frac{s}{K e^{-\tau s}} \frac{e^{-\tau s}}{\lambda s + 1 - e^{-\tau s}} \quad (7.16)$$

对纯滞后使用一阶 Taylor 展开近似:

$$e^{-\tau s} \cong 1 - \tau s \quad (7.17)$$

控制器传递函数近似为:

$$G_C(s) \cong \frac{s}{K} \frac{1}{\lambda s + 1 - 1 + \tau s} = \frac{1}{K} \frac{1}{(\lambda + \tau)} = K_C \quad (7.18)$$

对积分纯滞后对象使用纯比例控制就能满足主通道的控制要求:

$$K_C = \frac{1}{K(\lambda + \tau)} \quad (7.19)$$

根据 4.2.1 章的结论: **即使被控对象是积分对象, 考虑到扰动的复杂性为了消除余差, 也推荐使用 PI 控制而不是 P 控制。**

我们采用另一种方法进行推导。积分纯滞后对象使用 PI 控制, 主通道闭环传递函数是二阶模型。

主通道闭环传递函数:

$$\frac{K_C \frac{1 + T_I s}{T_I s} \frac{K}{s} e^{-\tau s}}{1 + K_C \frac{1 + T_I s}{T_I s} \frac{K}{s} e^{-\tau s}} = \frac{(1 + T_I s) e^{-\tau s}}{\frac{T_I}{K_C K} s^2 + (1 + T_I s) e^{-\tau s}} \quad (7.20)$$

对分母上的纯滞后使用一阶 Taylor 展开近似:

$$e^{-\tau s} \cong 1 - \tau s \quad (7.21)$$

主通道闭环传递函数(7.20)近似为:

项目:	PID 整定指导	文档名称:	PID 整定指导
版本:	R/3	文档编号:	PID Tuning Guide
日期:	2020 年 2 月 24 日	页:	35 of 36

$$\frac{(1 + T_I s)e^{-\tau s}}{\frac{T_I}{K_C K} s^2 + (1 + T_I s)(1 - \tau s)} = \frac{(1 + T_I s)e^{-\tau s}}{\left(\frac{T_I}{K_C K} - T_I \tau\right) s^2 + (T_I - \tau) s + 1} \quad (7.22)$$

上述函数中分母系数满足：

$$\begin{cases} \frac{T_I}{K_C K} - T_I \tau = \lambda^2 \\ T_I - \tau = 2\lambda \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_C = \frac{2\lambda + \tau}{K(\lambda + \tau)^2} \\ T_I = 2\lambda + \tau \end{cases} \quad (7.23)$$

将解带入闭环传递函数得：

$$\frac{1 + (2\lambda + \tau)s}{(\lambda s + 1)^2} e^{-\tau s} \quad (7.24)$$

故：

$$K_C = \frac{2\lambda + \tau}{K(\lambda + \tau)^2} \quad T_I = 2\lambda + \tau \quad (7.25)$$

项目：	PID 整定指导	文档名称：	PID 整定指导
版本：	R/3	文档编号：	PID Tuning Guide
日期：	2020年2月24日	页：	36 of 36