

基于模拟电路的 PID 控制器设计与分析

孙智诚

模拟电路课程设计

2025 年 12 月 25 日

摘要

过往的学习和实践中，笔者往往通过算法来实现 PID 控制器，本文意欲以模拟电路的形式，构建一种响应更精确、更迅速，成本更低的 PID 控制器，因其结构简单、不用编程，故可以在一些较为基础的场景进行应用，同时也能用以让笔者更加深刻地了解放大电路中积分器、微分器的实际意义。

1 PID 控制理论

PID 控制器的输出 $u(t)$ 与输入误差 $e(t)$ 的关系为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。也就是说，控制器拿到误差 $e(t)$ 后，并不是只关注当前的误差状态，而是把误差拆成三种不同角度的量来处理，然后把三部分结果叠加成最终的控制输出 $u(t)$ 。

1.1 误差与闭环的基本逻辑

在闭环控制中，误差一般定义为

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

其中 $r(t)$ 为期望输入， $y(t)$ 为实际反馈值。PID 的目的并不复杂：通过合理设计 $u(t)$ 的大小与方向，让系统输出 $y(t)$ 尽可能贴近 $r(t)$ 。

1.2 比例项 P

比例项为 $u_P(t) = K_p e(t)$ 。它的意义很直观：误差越大，纠正力度越大。因此 K_p 往往是调参时首先关注的变量。当 K_p 较小时，系统响应偏慢，输出跟随设定值不够积极，

可能出现较明显的稳态误差；当 K_p 逐渐增大时，响应会更快，但过大时容易带来超调甚至振荡。

在实际电路中，比例项对应的就是一个线性放大环节；如果后续环节本身存在饱和或限幅，那么单纯增大 K_p 往往并不能无限提高效果，反而可能把系统推向不稳定。

1.3 积分项 I

积分项为 $u_I(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$ ，它的核心作用是消除稳态误差，只要误差长期不为零，积分就会不断累加，直到把误差推回到接近零的范围。但积分也有明显的副作用：当系统存在输出限幅、执行器能力不足或起始误差过大时，积分项可能在短时间内累积过多，造成较大的超调；这种现象在控制中常被称为积分 windup 或者超调。因此，在模拟电路实现时通常会配合一定的限幅措施，例如在积分电容并联大电阻，或在输出端加钳位，以避免积分项无限累积。

1.4 微分项 D

微分项为 $u_D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$ ，它反映的是误差变化的快慢。当误差变化很快时，微分项会给出一个减缓其变化速率的纠正量，从而改善系统的动态过程，例如降低超调、加快收敛。然而，微分对高频噪声非常敏感：噪声往往表现为快速抖动，经过微分后会被放大，导致控制输出抖动甚至引起电路自激。因此工程上常用“带限微分”，即在微分网络中加入电阻或电容，形成高频滚降，而不是理想微分。

1.5 本设计采用 PID 的动机

综合来看， P 负责提供基本控制力度， I 用于消除稳态误差， D 则在动态过程中起到抑制超调与改善响应的作用。本文后续将围绕模拟电路实现的可行性，分别给出比例、积分、微分环节的电路结构与参数设计方法，并通过仿真验证其在典型输入（如阶跃）下的响应特性。

2 模拟电路设计

本节给出本文控制器的电路实现思路。相比“直接用程序算 PID”，模拟电路实现的核心在于：用运算放大器与 R 、 C 网络，把误差 $e(t)$ 通过比例/积分/微分三个通道分别处理后，再进行求和得到 $u(t)$ 。整体结构可概括为：

误差检测 $\rightarrow P/I/D$ 三通道 \rightarrow 求和与输出整形

2.1 误差检测与输入调理 (Error Detector)

误差 $e(t)$ 通常由设定值与反馈值之差得到: $e(t) = r(t) - y(t)$ 。在电路上可用运放差动放大器实现该减法运算。为保证后级线性工作, 本设计在误差输入端预留了限幅与简单滤波 (例如输入串联电阻 + 小电容到地), 用于抑制高频毛刺对微分通道的影响。

2.2 比例环节 P (Proportional Stage)

比例环节用运放反相放大器实现, 其传递函数可写为:

$$G_P(s) = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (3)$$

因此比例系数的等效关系为 $K_p = \frac{R_f}{R_{in}}$ (符号取决于系统定义与求和方式)。在实际搭建时, 常用电位器作为 R_f 或 R_{in} 的一部分, 以便于在实验中对 K_p 做连续调节。

2.3 积分环节 I (Integral Stage)

积分环节采用经典运放积分器: 输入端为电阻 R , 反馈为电容 C 。理想情况下:

$$G_I(s) = -\frac{1}{RCs} \quad (4)$$

对应到 PI/PID 中的参数关系为 $K_i = \frac{1}{RC}$ 。需要指出的是, 理想积分器对直流增益无穷大, 实际电路中会因运放失调、偏置电流等导致输出缓慢漂移并最终饱和。因此工程上通常在反馈电容两端并联一个较大的电阻 R_b , 形成“带泄放的积分器”, 使低频增益有限, 从而提升长期稳定性。

2.4 微分环节 D (Derivative Stage)

微分环节的理想形式为 $G_D(s) = K_d s$, 但理想微分会显著放大高频噪声。为避免输出抖动与自激, 本设计采用带限微分 (超前环节) 的实现方式: 输入串联 C_d 与 R_d 形成高通特性, 反馈端再通过小电容/电阻形成高频滚降, 使得微分只在目标频段内发挥作用。在参数设计上, 微分通道更关注有效频带与噪声抑制, 而不是盲目追求“微分越强越好”。

2.5 求和与输出整形 (Summing and Output Shaping)

将 P 、 I 、 D 三路输出用运放反相加法器进行求和, 得到控制输出 $u(t)$ 。反相加法器的一个优点是各路权重可以直接用输入电阻比值体现, 便于参数标定与调整。此外, 考虑到实际执行机构 (电机驱动、功率级等) 通常存在输入范围限制, 输出端可加入对称限幅 (如二极管钳位或运放供电限幅下的饱和保护), 以减少因过大控制量导致的积分饱和现象。

3 参数计算与仿真 (Simulation and Results)

3.1 参数选择

列出选用的电阻、电容值，以及对应的 K_p, K_i, K_d 计算值。

3.2 仿真波形

展示输入阶跃信号时，P、I、D 各环节的输出波形，以及总输出波形。

4 结论 (Conclusion)

总结设计的优缺点，以及未来改进方向。

参考文献

[1] 模拟电子技术基础教材.

[2] 相关电路设计手册.