

基于分立晶体管 (BJT) 的模拟 PID 控制器设计与分析

孙智诚

模拟电路课程设计

2025 年 12 月 11 日

摘要

本文旨在设计一种基于分立双极性结型晶体管 (BJT) 的模拟 PID 控制器。不同于常见的运算放大器方案，本设计从底层出发，利用差分放大电路实现误差检测，利用共射极放大电路及其变体构建比例、积分和微分环节。文章详细分析了各级电路的静态工作点 (Q 点) 设置与动态参数计算，并通过仿真验证了该分立元件电路在控制系统中的有效性。该设计有助于深入理解模拟电路中晶体管的放大与运算功能。

1 引言 (Introduction)

简述控制系统的重要性，PID 控制在工业中的广泛应用，以及使用模拟电路实现 PID 控制器的意义（如：响应速度快、成本低、无需编程等）。

2 PID 控制理论基础 (Theoretical Background)

2.1 PID 控制原理

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。

3 模拟电路设计 (Circuit Design)

本设计完全采用分立 BJT 元件构建。主要包含误差检测（差分放大）、PID 运算单元（共射/共基电路）及信号合成（加法器）模块。

3.1 误差检测级 (Error Detector)

采用长尾对 (Long-tailed Pair) 差分放大电路。

- **电路结构:** 两个匹配的 NPN 管 (如 2N3904)，发射极共用一个恒流源 (或大电阻) 接地。
- **功能:** 输入端分别接设定值 (V_{set}) 和反馈值 (V_{fb})，输出差模电压 $V_{err} \propto (V_{set} - V_{fb})$ 。

3.2 比例环节 (Proportional Stage)

采用带发射极负反馈电阻的共射放大电路。

- **原理:** 电压增益 $A_v \approx -\frac{R_C}{R_E}$ 。
- **调节:** 通过改变 R_E 或 R_C 来调节比例系数 K_p 。

3.3 积分环节 (Integral Stage)

采用改进型的米勒积分器 (Miller Integrator)。

- **电路结构:** 在共射放大电路的集电极与基极之间跨接电容 C 。
- **原理:** 利用米勒效应，将电容等效到输入端，形成积分特性。

3.4 微分环节 (Derivative Stage)

采用 RC 高通网络配合射极跟随器。

- **电路结构:** 输入信号先经过 $C - R$ 微分网络，再进入高输入阻抗的射极跟随器 (Common Collector) 进行缓冲，防止负载效应。

3.5 加法环节 (Summing Stage)

采用电阻加法网络接入共射放大器基极。

- **原理:** 将 P、I、D 三路的输出通过电阻汇聚到加法级晶体管的基极，利用基极电流的叠加实现信号相加。

4 参数计算与仿真 (Simulation and Results)

4.1 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。

4.2 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。

5 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.