

PID 控制在医学麻醉过程血压控制中的应用

方桂安^{*}，李雪芳老师[†]

中山大学 智能科学与技术 20354027

【摘 要】 手术中麻醉师需监测多种生命参数并将它们控制在适当的范围内。以实现自动测量、控制某些生命参数，提高受术者的安全。针对这一目标，本文基于 pid 控制开发了一个系统，使麻醉深度自动调节，并且不至于产生大的波动或冲击响应。结果表明，加入所设计的控制器能使原血压控制系统对给定的输入信号超调量小，调节时间变短，且对于给定阶跃输入信号作用下的稳态误差为零，对阶跃扰动输入信号作用下的稳态误差也能保持在一定的范围内，最终稳态输出为零，并且使系统对病人生理参数变化时的灵敏度尽量地小。

【关键词】 PID 控制，麻醉对象的生理模型，血压控制

1 引言

手术中麻醉师需监测多种生命参数，如：麻醉深度、血压、心率、体温、血氧、呼气中二氧化碳浓度等，并将它们控制在适当的范围内。能够自动测量、控制某些生命参数，能够提高受术者的安全。故我们希望开发一个自动调节麻醉深度的系统，病人的安全是最终目标。

许多麻醉师将平均动脉压作为麻醉深度最可靠的度量。根据临床经验和麻醉师所遵从的程序，被控变量确定为平均动脉压。

本文主要是运用 PID 控制器的设计方法，对麻醉过程中的血压控制模型进行控制器的设计，并针对 PI,PD,PID 三种控制器在有无扰动两种情况下进行性能分析的比较，以及参数灵敏度的分析。

2 实验原理

2.1 PID 控制原理

PID 控制器（比例-积分-微分控制器），由比例单元（Proportional）、积分单元（Integral）和微分

单元（Derivative）组成^[1]。可以透过调整这三个单元的增益 K_p K_i K_d 来调定其特性。PID 控制器主要适用于基本上线性，且动态特性不随时间变化的系统。

PID 控制器的比例单元 (P)、积分单元 (I) 和微分单元 (D) 分别对应目前误差、过去累计误差及未来误差。若是不知道受控系统的特性，一般认为 PID 控制器是最适用的控制器^[2]。借由调整 PID 控制器的三个参数，可以调整控制系统，设法满足设计需求。控制器的响应可以用控制器对误差的反应快慢、控制器过冲的程度及系统震荡的程度来表示。不过使用 PID 控制器不一定保证可达到系统的最佳控制，也不保证系统稳定性。

有些应用只需要 PID 控制器的部分单元，可以将不需要单元的参数设为零即可。因此 PID 控制器可以变成 PI 控制器、PD 控制器、P 控制器或 I 控制器。其中又以 PI 控制器比较常用，因为 D 控制器对回授噪声十分敏感，而若没有 I 控制器的话，系统不会回到参考值，会存在一个误差量。

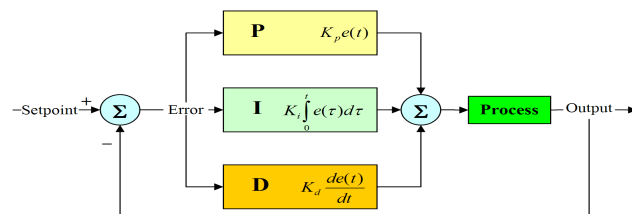


图 1 PID 控制器

实验时间: 2022 年 5 月 4 日

报告时间: 2022 年 5 月 4 日

[†] 指导教师

^{*} 学号: 20354027

^{*} E-mail: fanggan@mail2.sysu.edu.cn

2.2 参数灵敏度

系统中往往会面临环境变化、元件老化、参数不准确等问题,在开环工作时,这些因素会使系统的输出量发生变化,偏离预期值。引入反馈,形成闭环控制系统以后,这些因素引起的输出量的变化就会得到及时纠正,使得系统对参数变化的灵敏度降低,这是反馈控制系统的一个十分重要的特性。

由传递函数 $G(s)$ 所代表的过程,无论它的本质如何,都会受到环境变化、时效、过程参数的精确值未知以及控制过程的其它自然因素的影响。在开环系统中,所有这些误差和变化都将导致输出的变化和不精确。然而,一个闭环系统能够感知由于过程变化引起的输出变化,并试图校正输出,控制系统对于参数变化的灵敏度是最重要的。一个闭环反馈控制系统最根本的优点就在于它具有降低系统灵敏度的能力。

参数灵敏度定义为当参数变化量 $\Delta\alpha$ 趋于零时,函数相对变化量 ΔG 与参数变化量 $\Delta\alpha$ 之比,即

$$S_{\alpha}^G = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta G/G}{\Delta\alpha/\alpha} = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\alpha}{G} \cdot \frac{\Delta G}{\Delta\alpha}$$

使用链式法则,可以表示为

$$S_{\alpha}^G = \frac{\alpha}{G} \cdot \frac{\partial G}{\partial \alpha}$$

其中, α 是一个受环境变化支配的参数。若系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1)$$

显然,开环系统的灵敏度为 1。式1所示闭环控制系统相对于对象 $G(s)$ 的灵敏度为

$$\begin{aligned} S_G^{\Phi} &= \frac{G(s)}{\Phi(s)} \cdot \frac{\partial \Phi(s)}{\partial G(s)} \\ &= \frac{G(s)}{G(s)/(1 + G(s)H(s))} \cdot \frac{1}{(1 + G(s)H(s))^2} \\ &= \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \end{aligned}$$

通过在工作频率范围内增大 $G(s)H(s)$ 的模值,可以降低系统对对象参数变化的灵敏度。利用函数求导法则,可以求得闭环系统的参数灵敏度

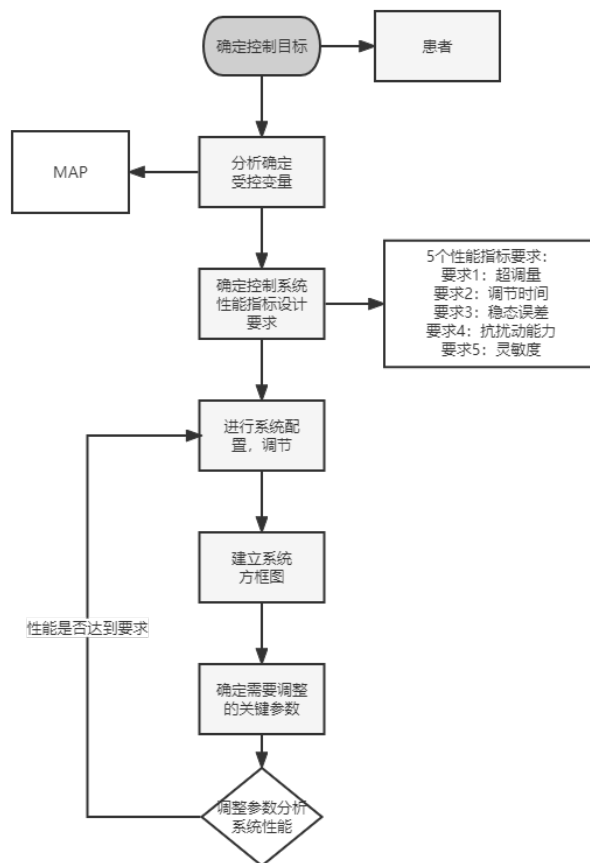
$$S_{\alpha}^{\Phi} = S_G^{\Phi} \cdot S_{\alpha}^G$$

引入反馈控制可以降低系统对参数变化的灵敏度是反馈控制系统的一个重要特性。一般说来,

为获得系统性能稳定的高精度开环系统,必须仔细选择高性能的组成元件,而闭环系统则从原理上降低了对元件精度与性能的要求。

3 实验过程

3.1 系统设计流程图



3.2 控制目标与指标要求

麻醉过程中的血压控制系统控制目标:

- 控制对象: 需麻醉的患者
- 控制任务: 将患者 MAP 调节到任意预期设定的水平, 并在存在干扰信号的情况下将 MAP 维持在预期设定的水平。
- 受控变量: MAP(平均动脉压)
- 系统输入: MAP 的期望值
- 干扰输入: 手术干扰, 噪声干扰
- 误差量: 稳态误差 = 输入—输出
- 系统输出: 实际的 MAP 量

该控制系统的指标设计要求:

1. 调节时间: $R(s) = \frac{10}{s}, t_s < 20 \text{ min};$
2. 百分超调量: $R(s) = \frac{10}{s}, \sigma\% < 15\%;$
3. 稳态跟踪误差: $R(s) = \frac{R_0}{s}, e_{sst} = 0;$
4. 扰动输出: $D(s) = \frac{D_0}{s}, |d(t) \leq 50| \text{ 时},$
 $y_{ss} = 0, y_{\max} - y_{ss} < \pm 5\%;$
5. 灵敏度: $S_{p_{\min}}^T$ (p 为所选病人参数);

3.3 系统设计

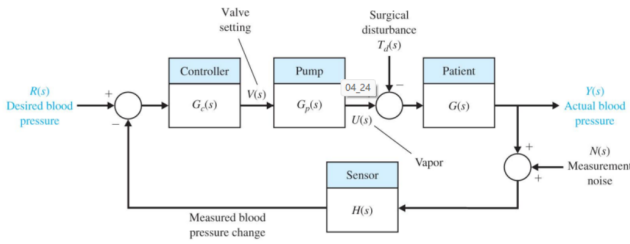


图 2 系统结构方框图

其中, $R(s)$ 和 $Y(s)$ 分别为期望的平均动脉压变化和实际的平均动脉压变化, 两者的偏差被控制器用于确定对泵 1 蒸发器的阀门给定值, 泵/蒸发器给患者输送麻醉药蒸气。而 $T_d(s)$ 和 $N(s)$ 分别为手术过程中的扰动和噪声, $G_c(s)$ 为待加入的控制器传递函数。另外, $G(s)$ 是被控对象, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{(s+p)^2} (y(t) = te^{-pt}, p=2, t \geq 0)$$

传感器 $H(s)$ 传递函数为

$$H(s) = 1 (h(t) = 1, t \geq 0)$$

泵/蒸发器模型 $G_p(s)$ 传递函数为

$$G_p(s) = \frac{U(s)}{V(s)} = \frac{1}{s}$$

$V(s)$ 和 $U(s)$ 分别为喷雾器的输入和输出。

3.4 模拟仿真

3.4.1 原系统

先对未加入 pid 控制器的系统进行响应分析, 通过 matlab 运行程序分别得到原系统的阶跃输入响应和阶跃扰动响应 ($T_d(s) = 50/s$), 如图 3,4。

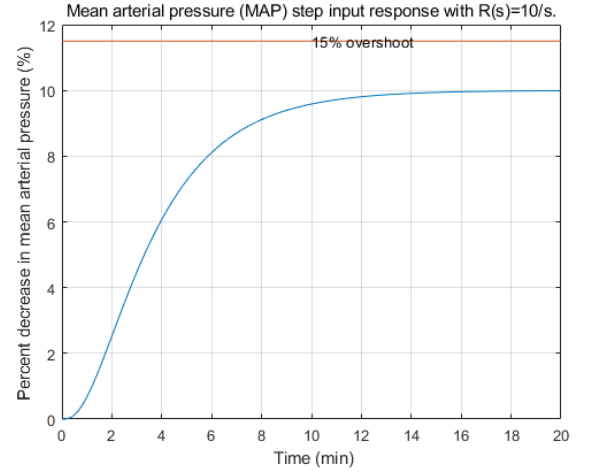


图 3 原系统的阶跃输入响应

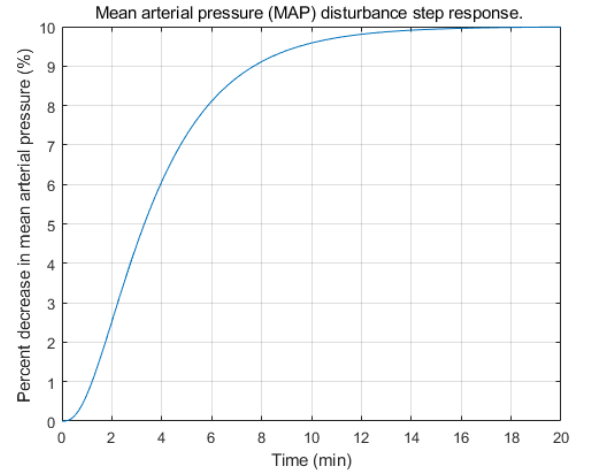


图 4 原系统的阶跃扰动响应

由图 3 可以看到系统在阶跃给定输入作用下的响应超调量为 $\sigma\% = -0.0912\%$, 调节时间为 $t_s = 12.1 \text{ min}$, 是满足设计要求的, 但由图 4 却明显看到在阶跃扰动输入作用下系统的响应不能维持在 $\pm 5\%$ 的稳定范围内。

3.4.2 PD 控制器

此时控制器传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s}{s}$$

假设 MAP 阶跃改变 10%, 即取输入为 $R(s) = \frac{R_0}{s} = \frac{10}{s}$, 运行仿真获得系统阶跃给定输入响应曲线如图 5。

可以得出, PD 控制器作用下系统对于阶跃给定输入的响应的超调量为 $\sigma\% = 5.7207\%$, 时间为

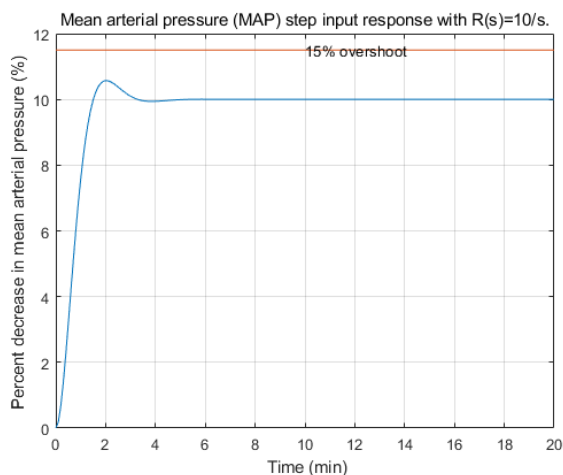


图 5 PD 控制器作用下系统阶跃响应

$t_s = 2.9000 \text{ min}$, 两者均满足设计要求。

接着看该控制器作用下的阶跃扰动输入响应, 取扰动 $T_d(s) = 50/s$, 运行仿真获得系统阶跃扰动响应曲线如图 6。

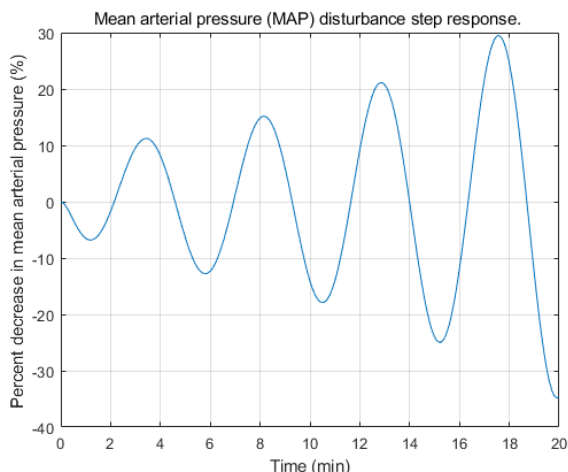


图 6 PD 控制器作用下阶跃扰动响应

可以看出加入 PD 控制器后, 系统的阶跃扰动作用的响应会不稳定, 导致发散振荡。

使用控制变量法, 固定一个参数, 调节另外一个参数。可以得出 K_P 的增加会导致阶跃响应超调量过大; 而 K_D 的增加会导致阶跃扰动响应振荡加剧。

3.4.3 PI 控制器

此时控制器传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{K_P s + K_I}{s}$$

相对应的两幅曲线如图 7,8。

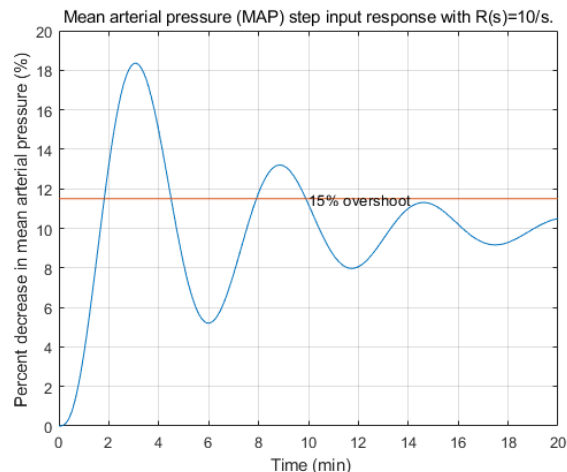


图 7 PI 控制器作用下系统阶跃响应

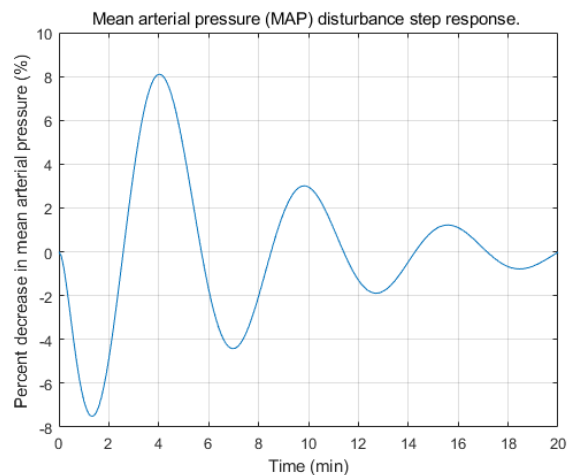


图 8 PI 控制器作用下阶跃扰动响应

可以看出, 积分控制器也像比例控制器那样减少上升时间和增加超调 (双重作用), 上面的响应表明, 在这种情况下, 积分控制器消除了稳态误差。

使用控制变量法, 固定一个参数, 调节另外一个参数。可以得出 K_P 与 K_I 的增加均会导致阶跃响应超调量过大, 但 K_I 的增加有助于系统的稳定。

3.4.4 PID 控制器

此时控制器传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (2)$$

相对应的两幅曲线如图 9,10。

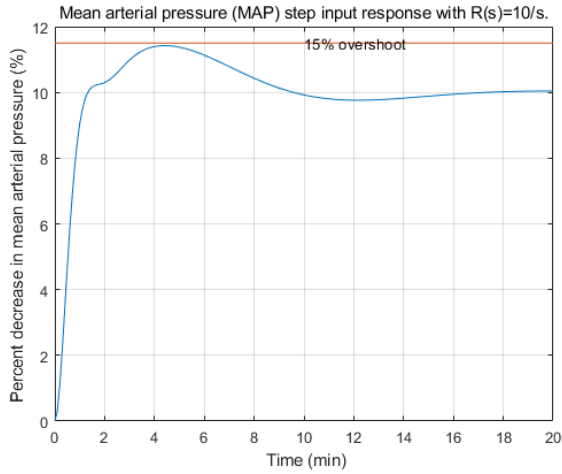


图 9 PID 控制器作用下系统阶跃响应

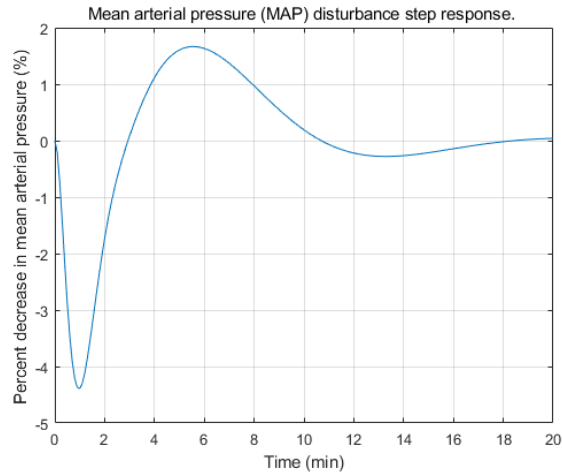


图 10 PID 控制器作用下阶跃扰动响应

可以看出此时系统的超调量和调节时间均满足要求, 扰动输出也趋于稳定。

4 实验分析与结论

系统传递函数 $T(s)$ 对被控对象假想病人 $G(s)$ 的参数 p 的变化灵敏度为

$$S_p^T = S_G^T \cdot S_p^G$$

先计算 S_p^G 和 S_G^T :

$$S_p^G = \frac{\partial G(s)}{\partial p} \cdot \frac{p}{G(s)} = \frac{-2p}{s+p}$$

$$S_G^T = \frac{\partial T(s)}{\partial G(s)} \cdot \frac{G(s)}{T(s)} = \frac{1}{1 + Gc(s)Gp(s)G(s)}$$

将式2所示的控制器代入上式中, 计算得到 S_G^T :

$$S_G^T = \frac{s^2(s+p)^2}{s^4 + 2ps^3 + (p^2 + K_D)s^2 + K_Ps + K_I}$$

$$S_p^T = S_G^T \cdot S_p^G = -\frac{2p(s+p)s^2}{s^4 + 2ps^3 + (s^2 + K_D)s^2 + K_Ps + K_I}$$

对于低频率区域, 可用这样的近似灵敏度 $S_p^T \approx \frac{2p^2s^2}{K_3}$ 。所以在低频处给定的 p 值时, 可通过增加 PID 的增益 K_I 来降低其灵敏度。

计算可得上述设计所得 PID 控制系统低频率区域的灵敏度为: $0.1 \times 10^{-1} s^{-1}$, 高频率区域为: $0.4 \times 10^{-1} s^{-1}$ 。

利用控制变量法及相关资料^[3], 我在 PI/PD/PID 三种控制器的有无扰动两种情况下最终人工调整三个参数获得以下结论:

表 1 PID 参数对系统的影响

调整方式	上升时间	超调量	安定时间	稳态误差	稳定性
↑ Kp	减少 ↓	增加 ↑	小幅增加 ↗	减少 ↓	变差 ↓
↑ Ki	小幅减少 ↘	增加 ↑	增加 ↑	大幅减少 ↓↓	变差 ↓
↑ Kd	小幅减少 ↘	减少 ↓	减少 ↓	变动不大 →	变好 ↑

人工调整有一种作法是先将 K_i 及 K_d 设为零, 增加 K_p 一直到回路输出震荡为止, 之后再 K_p 设定为“1/4 振幅衰减”(使系统第二次过冲量是第一次的 1/4) 增益的一半, 然后增加 K_i 直到一定时间后的稳态误差可被修正为止。不过若 K_i 可能会造成不稳定, 最后若有需要, 可以增加 K_d , 并确认在负载变动后回路可以够快的回到其设定值, 不过若 K_d 太会造成响应太快及过冲。一般而言快速反应的 PID 应该会有轻微的过冲, 只是有些系统不允许过冲。因此需要将回授系统调整为过阻尼系统, 而 K_p 比造成震荡 K_p 的一半还要小很多。

当然历史上 PID 的参数调试还有很多, 例如齐格勒-尼克尔斯方法等, 大部分现代的工业设备也实现了 PID 自动调试及最佳化软件。

参考文献

- [1] YUN L, ANG K H, CHONG G C Y. Patents, software, and hardware for pid control: an overview and analysis of the current art[J]. Control Systems IEEE, 2006, 26(1): 42-54.
- [2] BENNETT S. A history of control engineering 1930-1955[J]. Gaea - Journal of Geoscience, 1993, 8(1): 92-92.
- [3] LI Y, ANG K H, CHONG G C Y. Li, y. and ang, k.h. and chong, g.c.y. (2006) pid control system analysis and design.[J]. 2007.