第11卷 第2期　　自 动 化 学 报　　Vol. 11, No. 2
1985 年 4 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　Apr., 1985

关于 Fuzzy 调节器的积分作用

徐 承 伟
(昆 明 工 学 院)

摘　　要

本文讨论了在 Fuzzy 调节器中引入积分作用减少稳态误差的问题. Fuzzy 调节器引入积分作用后，一般也不能保证稳态误差严格趋于零，但可以使稳态误差小到足以满足工程要求. 文章提出了对误差信号的 "Fuzzy 值" 积分的方法以兼顾动、静态性能. 数字仿真表明方法是可行的.

Fuzzy 调节器的原理、实验及应用，迄今已有不少文献述及[1,4,5]. 然而，在 Fuzzy 调节器中如何引入积分作用以达到消除余差的目的，讨论较少. 积分作用的引入及其强弱，对系统的动态性能颇有影响，本文就此谈一点粗浅的看法.

Fuzzy 调节器的算法，一般是由被调量 $y(t)$ 对设定点 SP 的偏差 $e(t)\triangleq SP-y(t)$ 及 $e(t)$ 的增量 $c(t)\triangleq e(t)-e(t-1)$ 导出控制量 $u(t)$: $u(t)=F(e(t),c(t))$. 由于 $\{u(t)\}$ 是个有限集合，$u(t)$ 只能呈阶跃地改变，所以 Fuzzy 调节器即使加入了积分作用一般也不能保证稳态时严格地有 $e(t)\to 0$，但从工程的观点看，要求严格的 $e(t)\to 0$ 既无必要亦无可能. 事实上，只要理论上稳态误差的绝对值 $|e(\infty)|$ 能小于预给的充分小的正数 ε，就足以满足实际的需要了. 对于给定的 $\varepsilon>0$，若 $|e(\infty)|<\varepsilon$，不妨说稳态的"Fuzzy 误差"已为零. 若自某个 t 之后恒有 $|e(t)|<\varepsilon$，则称系统已进入了 "Fuzzy 稳态".

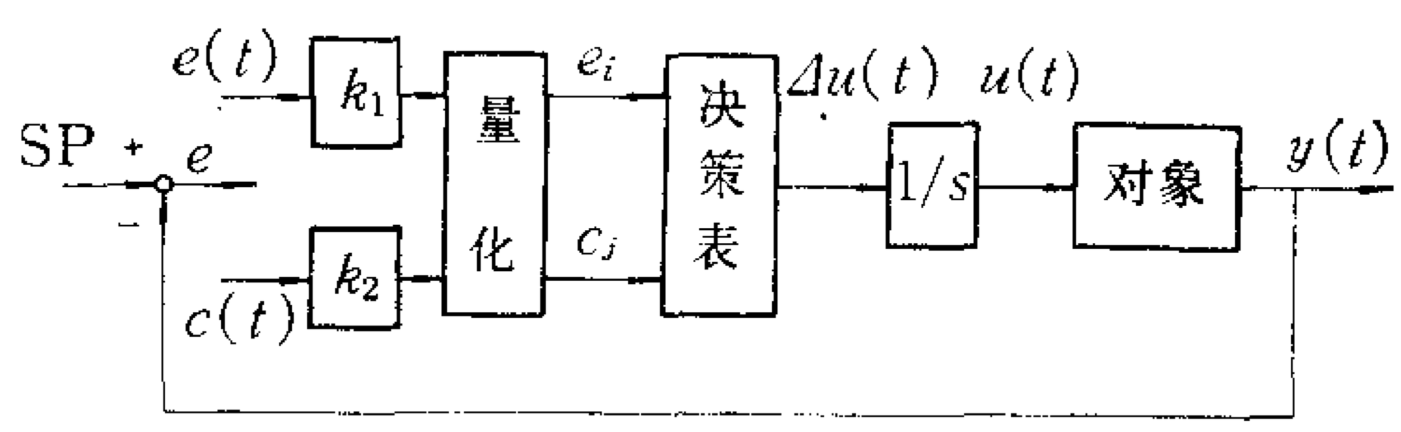

图 1　第二种 Fuzzy 调节器的结构

下面考察几种不同的 Fuzzy 调节器结构及其稳态、动态特性(假定对象传递函数不含积分因子).

1. 调节器无积分作用

将图 1 中的积分器 $(1/s)$ 方框去掉，即为此种情形. 这时系统必然存在稳态误差，由于 Fuzzy 调节器的继电型非线性特性，系统又极易产生振荡. 图 4 的曲线①即为一例.

本文于 1983 年 12 月 13 日收到.

2. 调节器输出处串入一个积分器

这是大多数文献采用的方法．系统的结构见图 1．k_1，k_2 为比例因子，决策表的输出为 $\Delta u(t)$．增量式算法在 $\Delta u(t)$ 和对象之间加了一级积分器．纯积分环节的串入，将使响应变慢、振荡加剧，但有可能使稳态的 Fuzzy 误差为零 ($|e(\infty)| < \varepsilon$)，且消除极限环．

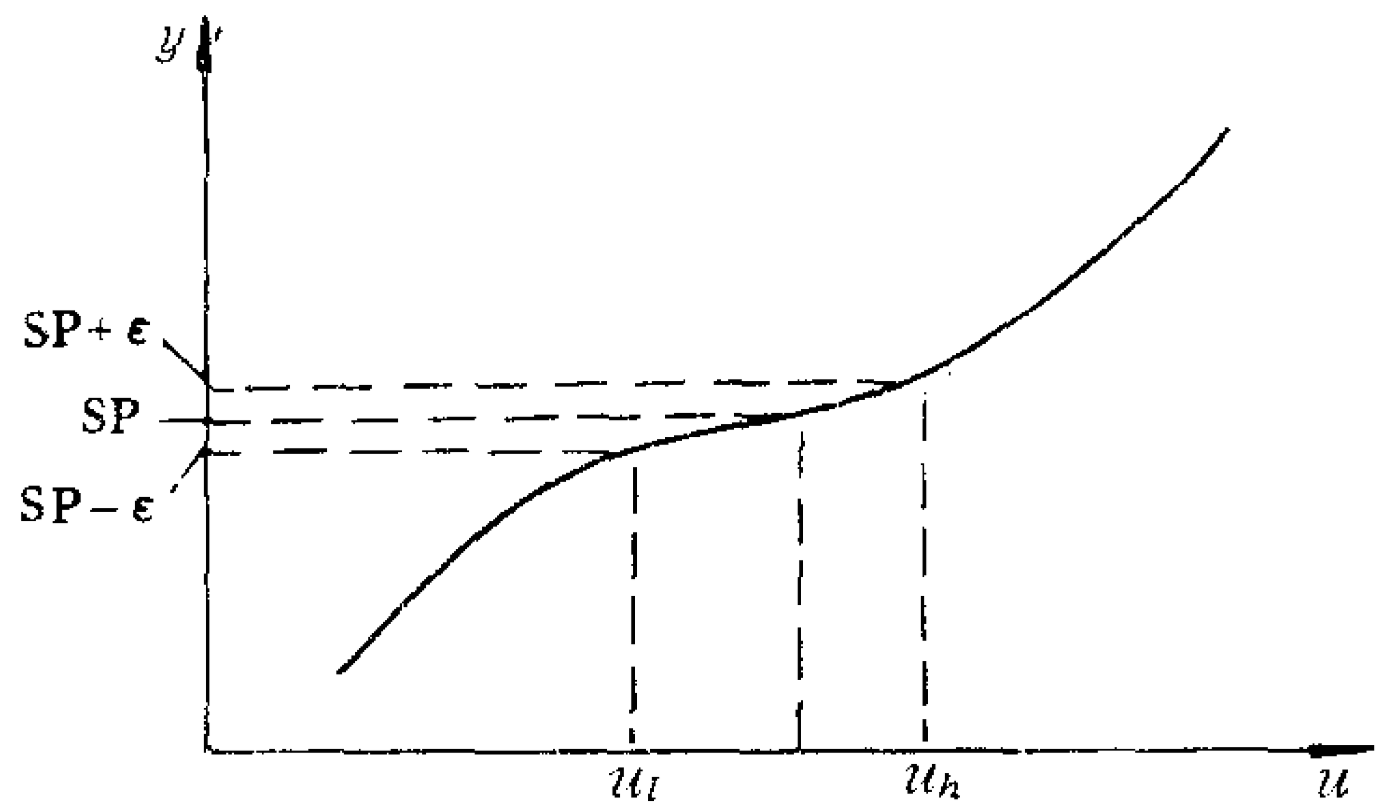

图 2　y-u 的静态关系

图 2 是 y-u 的静态关系．结合图 1 可知，Fuzzy 误差为零的条件为

$$|e(t)| < \varepsilon \tag{1}$$

或

$$|SP - y(t)| < \varepsilon, \tag{2}$$

相当于

$$SP - \varepsilon < y(t) < SP + \varepsilon. \tag{3}$$

由图 2 知，此时的 $u(t)$ 应满足

$$u_l < u(t) < u_h. \tag{4}$$

若记 $|\Delta u(t)|$ 的最小非零值为 $\Delta u_{\min}$（算法必然使接近稳态时的 $\Delta u(t)$ 较小），容易理解，当 $\Delta u_{\min}$ 较大时，$u(t)$ 在改变过程中落在 (u_l, u_h) 上的几率便较小，容易形成极限环，难于控制稳态误差；当 $\Delta u_{\min}$ 较小时，则 $u(t)$ 有较多的机会落入区间 (u_l, u_h)．一般至少应使

$$\Delta u_{\min} < u_h - u_l, \ \forall SP. \tag{5}$$

图 4 的曲线② 是图 1 系统 $y(t)$ 对 $SP = 10$ 的阶跃响应，其中 $\Delta u_{\min} = (u_h - u_l)/25$．$\varepsilon$ 取 0.2．$y(t)$ 的新稳态值 $y(\infty) = 10.176$，满足

$$|SP - y(\infty)| < \varepsilon.$$

因此稳态时 Fuzzy 误差为零．

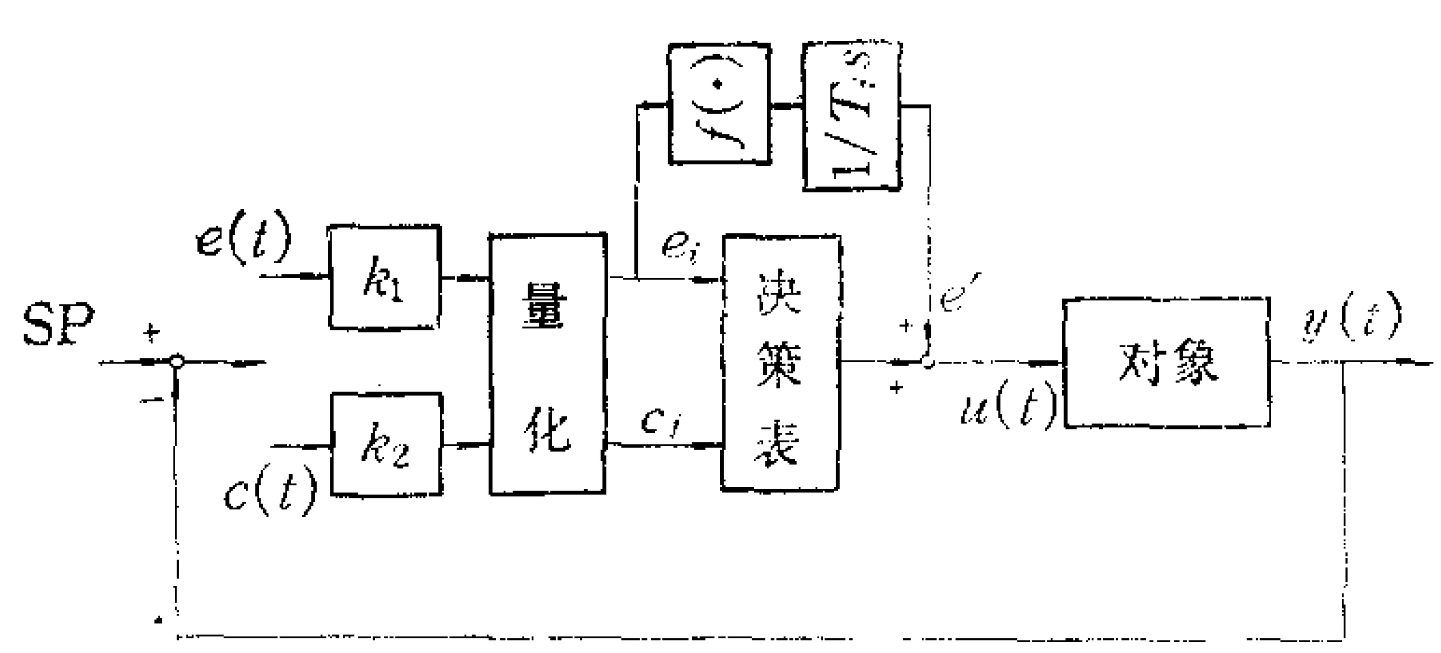

图 3　第三种 Fuzzy 调节器的结构——对误差信号"Fuzzy 值"积分

3. 如何保持好的动态特性

串入纯积分环节后，使稳态的 Fuzzy 误差为零，又如何保持好的动态特性呢？根据 PID 调节器的传递函数 $K_p(1+1/T_is+T_ds)$，设想用图 3 形式的 Fuzzy 调节器来改进图 1 的结果．经仿真试验说明这一设想是合理的．

图 3 与图 1 的区别，在于积分作用的引入方式不同．图 3 中的积分输出为 e'．可以看出

$$e'=\frac{1}{T_i}\int f(e_i)dt. \tag{6}$$

这里 e_i 是误差论域 E 中的元素，$f(e_i)$ 是 e_i 的不减函数，可以认为 $f(e_i)$ 是 $k_1e(t)$ 的“Fuzzy 值”．因此，e' 反映了对 $k_1e(t)$ 的 fuzzy 值的积分．若 e' 由直接对 $k_1e(t)$ 积分获得，则必然出现极限环．

与 (5) 式类似，为保证稳态的 Fuzzy 误差为零及消除极限环，至少应使

$$\Delta u_{\min}<u_h-u_l,\ \forall SP. \tag{7}$$

图 4 之曲线③是图 3 系统 $y(t)$ 对 $SP=10$ 的阶跃响应．这里 $\Delta u_{\min}=(u_h-u_l)/6$，$\varepsilon=0.2$，$y(\infty)=10.198$．与曲线②相比，曲线③上升快，超调小，而稳态时同样有

$$|SP-y(\infty)|<\varepsilon.$$

可见图 3 的结构较图 1 有所改善．

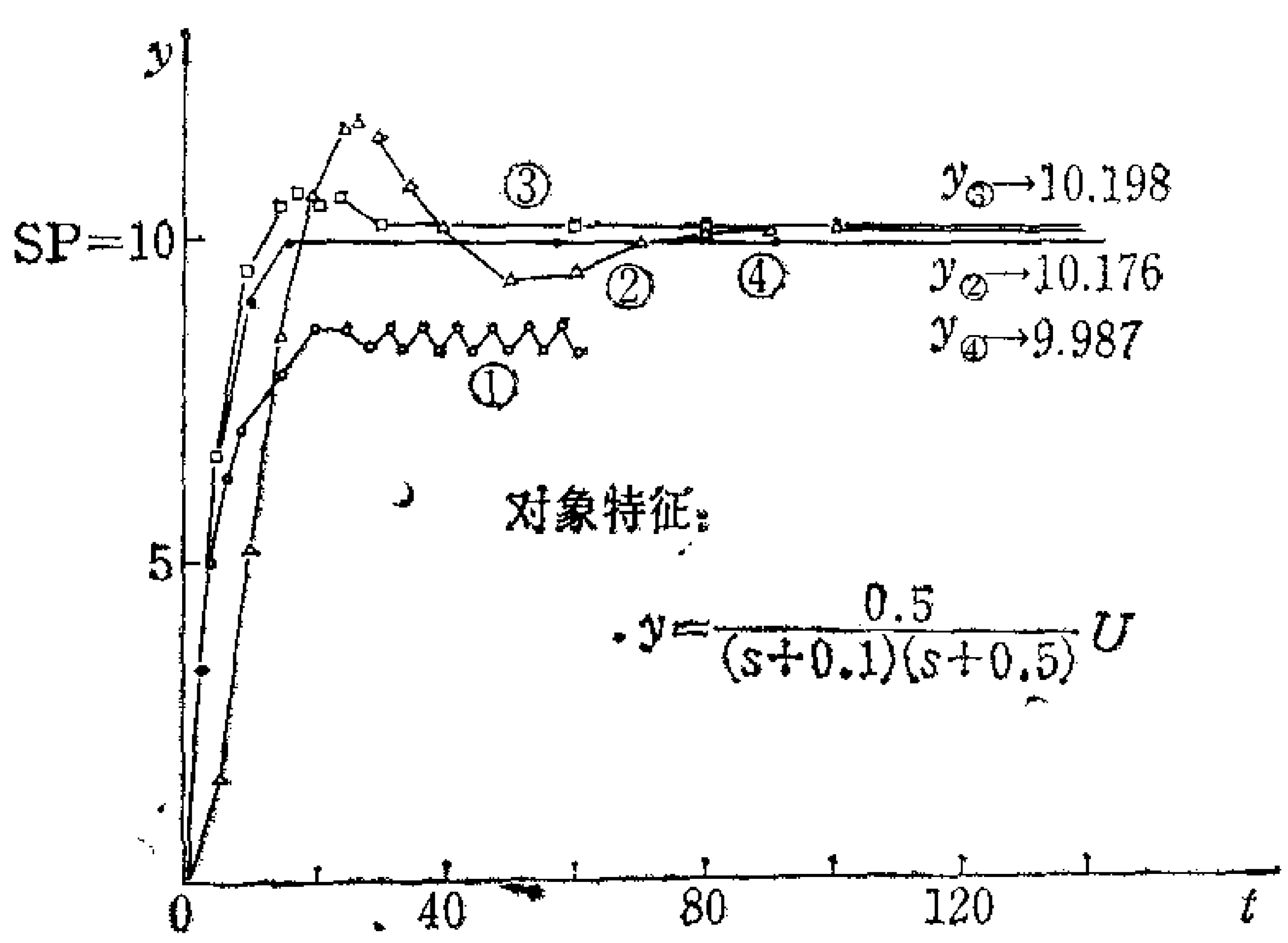

图 4 不同结构 Fuzzy 调节器 y 对 $SP=10$ 的阶跃响应

注 1) 四条曲线有相同的决策表及量化过程；2) $|u|\leqslant3$．

(5) 或 (7) 式能在多大“程度”上成立，与 k_1，k_2、决策表和 $y=f(u)$ 都有关，在图 3 中还与 T_i 和 $f(\cdot)$ 有关．适当调整其中可调因素，可把稳态误差 $e(\infty)$ 控制得非常小，足以满足工程需要．图 4 曲线④是图 3 系统取 $\varepsilon=0.02$ 时 $y(t)$ 对 $SP=10$ 的阶跃响应，$e(\infty)=0.013$，可见确实可以把稳态误差控制得相当小．

参 考 文 献

[1] 扎德著，模糊集合、语言变量及模糊逻辑，陈国权译(原书名 The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning.) 科学出版社，1982.

[2] Dubois, D. and Prade, H., Fuzzy Sets and Systems——Theory and Applications, Academic, New York, 1980, 301—306.

[3] Kickert, W. J. M. and Van Nauta Lemke, Applications of Fuzzy Controller in a Warm Water Plant, *Automatica,* **12**(1976), No. 4, 301—308.
[4] Procyk, T. J. and Mamdani, E. H., A Linguistic Selfo-rganizing Process Controller, *Automatica,* **15** (1979), No. 1, 15—30.
[5] Mamdani, E. H., Applications of Fuzzy Sets Theory to Control Systems: A Survey, Fuzzy Automata and Decision Processes, North-Holland, New York, 1977, 77—88.

ON INTEGRAL ACTION OF THE FUZZY CONTROLLER

Xu Chengwei
(Kunming Institute of Technology)

Abstract

The problem of introducing integral term in a fuzzy controller to reduce steady state error is considered. It is pointed out that, in general, the error can not be completely eliminated by the fuzzy controller even integral action is applied; however, the error can be made so small by the controller as to be accepted in applications. A method of integrating the "fuzzy value" of the error signal to take care of both dynamic and steady performances is proposed, which is proved reasonable by digital simulation.