

第 3 章 模糊 PID 控制

模糊控制在理论上突飞猛进的同时，也越来越多地、成功地应用于现实世界中。然而相对于传统的控制方法，应用于实时控制中的模糊控制到底有什么优势，许多学者在研究证明采用启发式规则的模糊控制器性能优于常规控制器性能时，是否进行了平等的比较？

传统的控制理论(包括经典控制理论和现代控制理论)是利用受控对象的数学模型(即传递函数模型或状态空间模型)对系统进行定量分析，而后设计控制策略。这种方法由于其本质的不相容性，当系统变得复杂时，难以对其工作特性进行精确描述。而且，这样的数学模型结构也不利于表达和处理有关受控对象的一些不确定信息，更不便于利用人的经验、知识、技巧和直觉推理。所以难以对复杂系统进行有效控创。

经典的模糊控制器利用模糊集合理论将专家知识或操作人员经验形成的语言规则直接转化为自动控制策略(通常是模糊规则查询表)，其设计不依靠对象精确数学模型，而是利用其语言知识模型进行设计和修正控制算法，性能优于常规 PID 控制。

3.1 PID 和 Fuzzy 控制策略剖析与方案选择

3.1.1 常规 PID

在 PID 控制算法中，存在着比例、积分、微分 3 种控制作用。这 3 种控制作用的特点如下

(1) 比例控制作用的特点

系统误差一旦产生，控制器立即就有控制作用，使被 PID 控制的对象朝着减小误差的方向变化，控制作用的强弱取决于比例系数 K_p 。缺点是对于具有自平衡(即系统阶跃响应终值为一有限值)能力的被控对象存在静差。加大 K_p 可减小静差，但 K_p 过大，会导致系统超调增大，使系统的动态性能变坏。

(2) 积分控制作用的特点

能对误差进行记忆并积分，有利于消除系统的静差。不足之处在于积分作

用具有滞后特性，积分作用太强会使被控对象的动态品质变坏，以至于导致闭环系统不稳定。

(3)微分控制作用的特点

通过对误差进行微分，能感觉出误差的变化趋势，增大微分控制作用可加快系统响应，使超调减小。缺点是对干扰同样敏感，使系统对干扰的抑制能力降低。

根据被控对象的不同，适当地调整 PID 参数，可以获得比较满意的控制效果。因为其算法简单，参数调控方便，并且有一定的控制精度，因此它已成为当前最为普遍采用的控制算法。PID 控制算法也有它的局限性和不足，由于 PID 算法只有在系统模型参数为非时变的情况下，才能获得理想的效果。当一个调好参数的 PID 控制器被应用到模型参数时变系统时，系统的性能会变差，甚至不稳定。另外，在对 PID 参数进行整定的过程中，PID 参数的整定值是具有一定局域性的优化值，而不是全局性的最优值，因此这种控制作用无法从根本上解决动态品质和稳态精度的矛盾。

3.1.2 Fuzzy 控制

模糊控制器和常规的控制(如 PID 调节器)相比具有无须建立被控对象的数学模型，对被控对象的时滞、非线性和时变性具有一定的适应能力等优点，同时对噪声也具有较强的抑制能力，即鲁棒性较好。但它也有一些需要进一步改进和提高的地方。模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差，难以达到较高的控制精度。尤其是在离散有限论域设计时，更为明显。模糊控制器要把误差输入信号转化为误差论域上的点，即

$$n' = INT(kl * e' + 0.5) \quad (3-1)$$

式中： e' 为某时刻的输入误差； kl 是误差的量程转换比例因子； n' 为转化到误差论域上的点。

当 $n' = 0$ 时，仍有

$$|kl * e'| < 0.5 \quad (3-2)$$

即 $|e'| < 0.5 / kl$

式中 kl 是误差信号的物理范围 $[-e, e]$ 到误差论域

$\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ 量程转换的比例因子 $kl = n / e$ 。于是上式变为

$$|e'| < 0.5e/n \quad (3-3)$$

一般规范化的离散论域形式通常取 $n=6$ ，因此大约有

$$|e'| < 7\%e \quad (3-4)$$

也就是说， $|e'|$ 在误差量程最大值 e' 的大约 7% 以内时，模糊控制器已经把它当作 0 来对待了，因此，对 $|e'| < 7\%e$ 地的稳态误差模糊控制器无法消除，这是控制点附近的一个控制上的盲区和死区。

对于控制作用，模糊控制器可以采用它的增量 ΔU 作为输出，积分后输出给被控对象，这样相当于引入了积分作用，有利于消除稳态误差。然而， ΔU 是解模糊后的离散点，不连续，因而控制作用不细腻，不利于精调消除稳态误差。

3.1.3 模糊 PID 控制器的选择

通过上述分析，对于感应电机这样具有高阶、非线性、强耦合的控制对象，单独采用常规 PID 或模糊控制都不会取得较好的控制效果。大量的理论研究和工程应用也充分证明了这一点。而采用 FUZZY-PID 的复合控制方式来控制感应电机，不失为一种好的方法。模糊控制在交流传动系统中的应用主要是速度控制。模糊控制器处于最外环，而内环仍保留矢量控制等传统控制方法。在本设计中在速度 PID 调节器中，加入模糊控制器，构成模糊 PID。

常用的模糊 PID 控制器有调整系统控制量的模糊 PID 控制器和模糊自整定 PID 控制器。

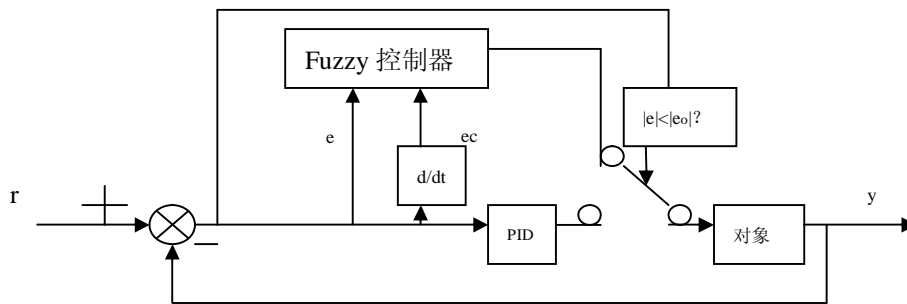


图 3-1 调整系统控制量的模糊 PID 控制

1. 调整系统控制量的模糊 PID 控制器

如图 3-1 所示,控制器的特点是在大偏差范围内利用模糊推理的方法调整系统的控制量,而在小偏差范围内转换成 PID 控制,两者的转换根据实现给定的偏差范围自动实现。仿真时由于 e_0 (为转换设定值) 不好确定,使得两者之间的转换不定,仿真结果时超调量和响应时间跟常规 PID 差不多,并且仿真时间长。

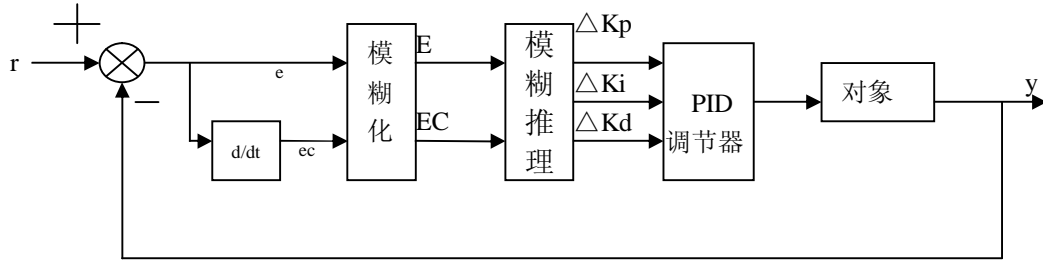


图 3-2 模糊自整定 PID 控制器系统结构图

2. 模糊自整定 PID 控制器

如图 3-2 所示,在常规的 PID 基础上,以被控对象的反馈值与目标值的误差 E 和误差变化率 EC 作为输入,用模糊推理的方法对 PID 的参数 K_p' 、 K_i' 、 K_d' 进行在线自整定,以满足不同 E 和 EC 对控制器参数的不同要求,从而使被控对象具有良好的动态性能和静态性能。

3.1.4 模糊 PID 控制器的建模

根据上节的选择,建立模糊自整定 PID 控制器的模型。根据系统在受控过程中的原则对应不同的 E 和 EC ,将 PID 参数整定的原则归纳如下:

1. 当 $|E|$ 较大时,说明误差的绝对值较大, ΔK_p 取较大值,以提高相应的快速性;为防止 $|EC|$ 瞬时值过大, ΔK_d 应取较小的值;为了避免出现较大的超调,应对积分加以限制,通常取 $\Delta K_i = 0$ 。

2. 当 $|E|$ 中等大小时,为了使系统相应超调较小, ΔK_p 取较小些;在这种情况下, ΔK_d 对系统响应影响较大,数值要取得适当; ΔK_i 的数值也要取得适当。

3. 当 $|E|$ 较小时,为了使系统具有很好的稳定性, ΔK_p 、 ΔK_i 取较大值,同时为避免系统在设定附近出现振荡,应该考虑抗干扰性能,适当地选取 ΔK_d 值。 $|EC|$ 的取值与 ΔK_d 取值规律相反,通常情况 ΔK_d 为中等大小。

本文将偏差 E 和 EC 的变化范围设定为[-3, +3]区间连续变化量，使之离散化，构成含 7 个整数元素的离散集合：

$$E=EC=\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

即：{负大，负中，负小，不变，正小，正中，正大}

并将误差 E 误差的变化量 EC 小量化为 7 个等级

$$E=EC=\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

在实际工作中，精确输入量的变化一般不会在[-3, 3]之间，如果其范围是在 [a, b]之间的话，可以通过变换

$$y = \frac{6}{b-a} \left[x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (3-6)$$

将在 [a, b]之间变换的变量 x 转换为[-3, 3]之间变化的变量 y。

输出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 用以确定控制量，并规定论域为：

$$\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

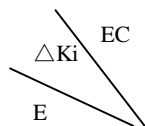
输出量的语言变量模糊集为： $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$

各个语言值的定义分别由给出的三角隶属函数曲线来描述，建立相关的模糊规则表如表所示：

表 3-1 ΔK_p 规则表

ΔK_p \ EC E	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	0
NM	PB	PB	PB	PB	PM	0	0
NS	PM	PM	PM	PM	0	PS	PS
0	PM	PM	PS	0	NS	NS	NM
PS	PS	PS	0	NS	NM	NM	NM
PM	PS	0	NS	NM	NM	NM	NB
PB	0	0	NM	NM	NM	NB	NB

表 3-2 ΔK_i 规则表



	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	0	0
NM	NB	NB	NM	NS	NS	0	0
NS	NB	NM	NS	NS	0	PS	PS
0	NM	NM	NS	0	PS	PM	PM
PS	NM	NS	0	PS	PS	PM	PB
PM	0	0	PS	NM	PM	PB	PB
PB	0	0	PS	PM	PM	PB	PB

表 3-3 ΔK_d 规则表

ΔK_d / EC	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
E							
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	0
NS	0	NS	NM	NS	NS	NS	0
0	0	NS	NS	NS	NS	NS	0
PS	0	0	0	0	0	0	0
PM	0	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据模糊规则表在线修订 PID 参数，计算公式如下：

$$\begin{cases} K_p = K_p' + \Delta K_p \\ K_i = K_i' + \Delta K_i \\ K_d = K_d' + \Delta K_d \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 K_p' 、 K_i' 、 K_d' 为原先定好的初始 PID 参数， ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为模糊控制器的三个输出参数，可以根据被控对象的状态自动调整 PID 参数。

如上所述，在 MATLAB/fuzzy editor 和 SIMULINK 建立如下仿真模型：

1. 在 fuzzy editor 下建立二输入三输出的模型框架，如图 3-3。

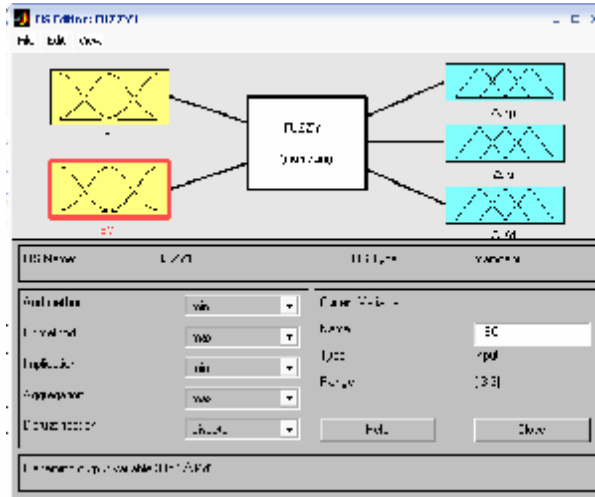


图 3-3 自整定模糊 PID 的框架

2. 在 E、EC、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 中，建立如下三角隶属函数，如图 3-4。

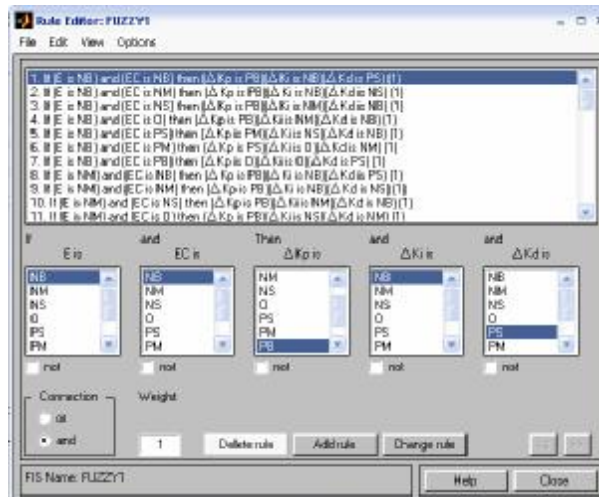


图 3-4 隶属函数的建立

3. 打开 rule editor 建立如表 3-1、3-2、3-3 的模糊规则，如图 3-5。

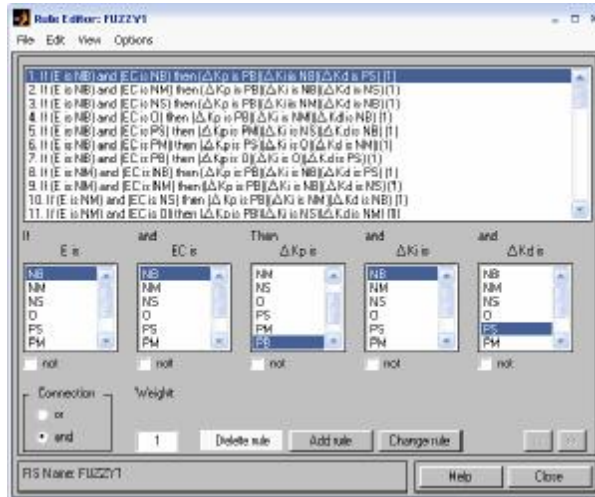


图 3-5 模糊规则的建立

4. 打开 rule viewer 可以看到根据模糊规则在论域范围内的分布，如图 3-6。

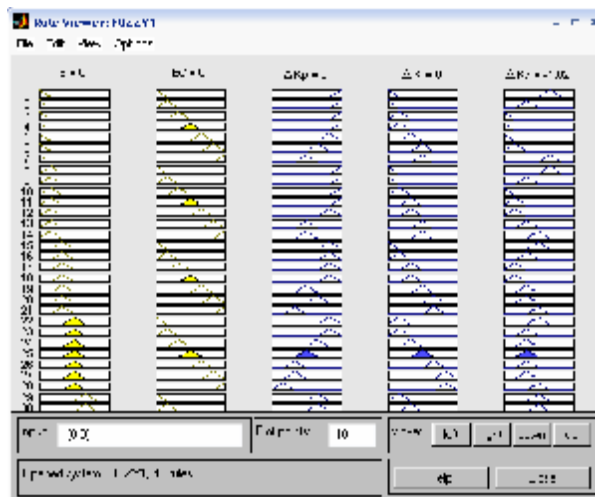


图 3-6 模糊规则下论域分布

5. 在 SIMULINK 下建立如图 3-7 的自整定模糊 PID 控制器模型。

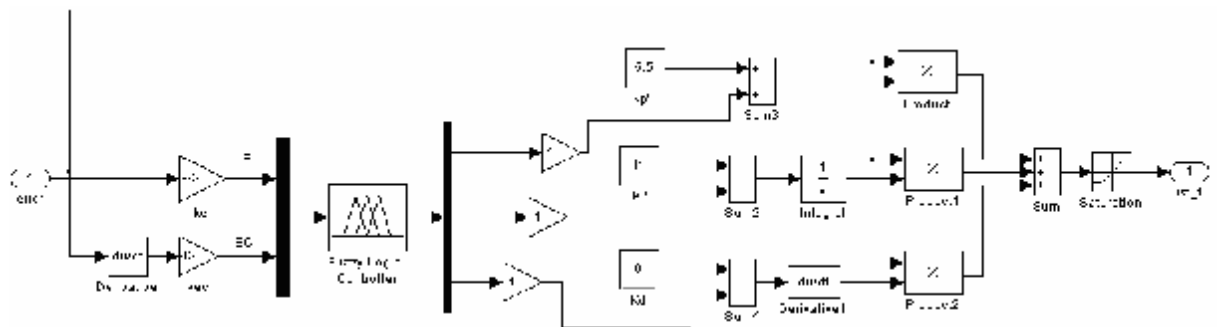


图 3-7 自整定模糊 PID 模型

3.2 本章小结

本章从常规 PID 和模糊控制的各自优缺点出发，引出模糊控制和常规 PID 相结合的模糊 PID 控制方式，又从两种模糊 PID 的控制形式，通过大量的仿真结果确定了自整定模糊 PID 控制作为控制方式，并在 MATLAB/fuzzy 和 SIMULINK 建立其模型。