

磁悬浮模糊控制

一、模糊控制算法的理论基础

模糊控制是建立在模糊推理基础上的一种非线性控制策略。它通过模糊语言表达了人们的操作经验以及常识推理规则。采用这种控制策略的控制器就叫模糊控制器，它是一种语言型控制器。模糊控制器是以模糊集理论为基础发展起来的，并已成为把人的控制经验及推理纳入自动控制策略的一条简洁的途径。

1.1 模糊控制器的工作原理

模糊控制系统一般按系统偏差及偏差变化率来实现对工业过程的控制。图1.1给出了模糊控制系统的基本结构，包括模糊化、模糊规则库、模糊推理和解模糊化等部分。

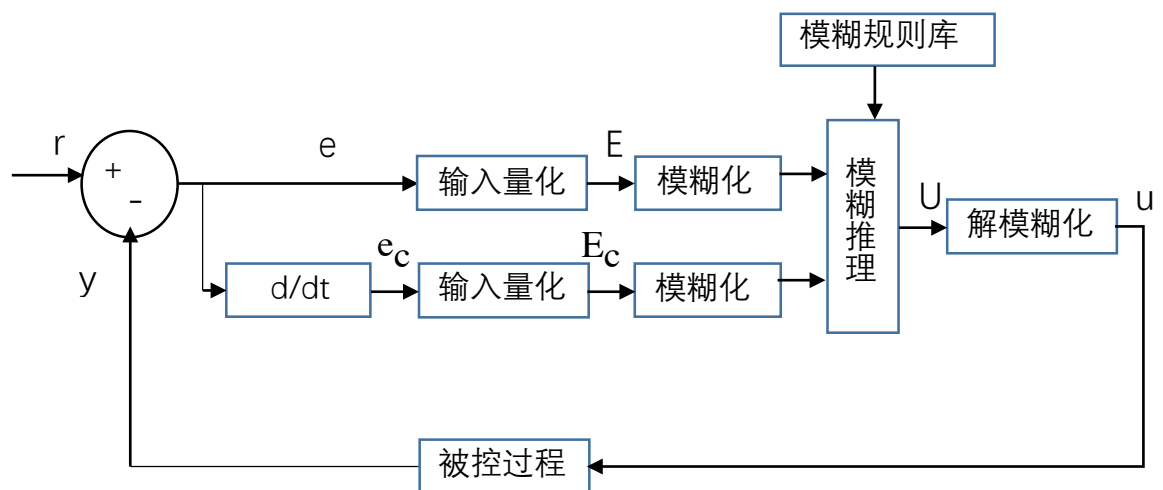


图1.1 基本模糊控制器结构

图中 r 为设定值， y 为构成输出， e 和 e_c 分别为控制偏差和偏差变化率， E 和 E_c 分别是 e 和 e_c 经过输入量化后的语言变量， U 为基本模糊控制器语言化变量， u 为经过输出量化后的实际输出值。

1.1.1 模糊化

模糊化模块的作用是将一个精确的输入变量通过定义在其论域上的隶属度函数计算出其属于模糊集合的隶属度，从而将其转化为一个模糊变量。以偏差e为例，假设其模糊论域上定义了{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}七个模糊集合，为便于工程实施，实际应用中通常采用三角形或梯形隶属度函数。图1.2给出了隶属度函数为等分三角形时的情况。对于任意的输入变量，可以通过上面定义的隶属度函数计算出其属于这七个模糊集合的隶属度。

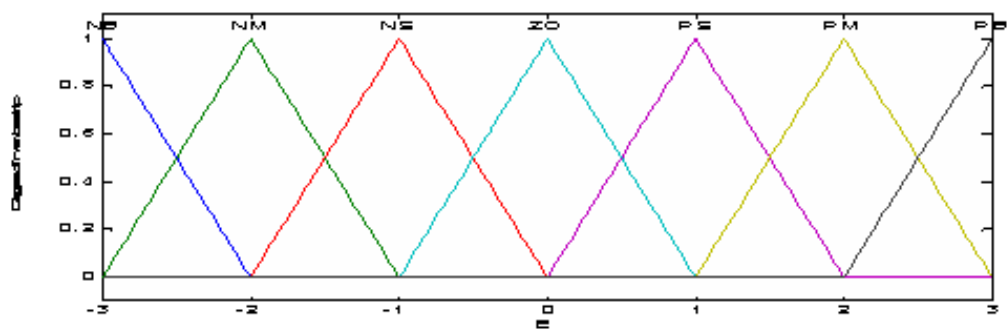


图1.2 等分三角形隶属度函数

1.1.2模糊规则库

模糊规则库是模糊控制器的一个重要组成部分，由操作经验和专家知识总结得到的模糊规则均存放于此，表1-1给出了模糊控制规则库的一个实例。表中:NB-负大;NM-负中; NS-负小;Z-零;PS-正小;PM-正中;PB-正大。

模糊规则库由一组模糊IF-THEN规则组成，模糊推理机使用模糊IF-THEN规则

| E \ E _C | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | PB | PB | PM | PS | PS | Z | Z |
| NM | PB | PB | PM | PM | PS | PS | Z |
| NS | PB | PB | PM | PS | PS | Z | Z |
| Z | PB | PM | PM | Z | NM | NM | NB |
| PS | NZ | NZ | NZ | NS | NS | NM | NB |
| PM | NZ | NZ | NS | NS | NM | NB | NB |
| PB | NZ | NZ | NS | NS | NM | NB | NB |

表1-1 模糊控制规则库

来确定从输入模糊集合到输出模糊集合的一个映射。表中的模糊规则可以表述为：

第*i*条规则:if E is E_i and E_c is E_{ci} then U is U_i , $i=1,2 \dots, m$ 。其中 $E_i, E_{ci}, U \in \{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ 。模糊规则是设计模糊控制器的核心。建立模糊控制规则的方法常用是经验归纳法。

1.1.3模糊推理

模糊推理是模糊控制器中，根据输入模糊量，由模糊控制规则完成模糊推理来求解模糊关系方程，并获得模糊控制量的功能部分。模糊推理是模糊逻辑理论中最基本的问题。常用的模糊推理方法是最大最小推理。下面以具有三角形隶属函数的模糊子集为例，具体介绍推理方法。

对于有两个输入变量E和 E_c 、一个输出变量U的模糊控制器，通常它们所取模糊子集总数 $S = (2n + 1) \approx 5 : 7$ 为宜。控制规则取为：

if E is A_{11} and E_c is A_{12} then U is U_1

if E is A_{21} and E_c is A_{21} then U is U_2

其中, A_{11} 与 A_{12} 和 A_{21} 与 A_{22} 分别是输入语言变量 E 和 E_c 的两个相邻模糊子集;而 U_1 与 U_2 是输出语言变量 U 的两个相邻子集。如果已知 $E = e_0$, $E_c = e_{c0}$, 则可以根据它们的隶属函数 $\mu_{A_{i1}}(e_0)$ 和 $\mu_{A_{i2}}(e_{c0})$ ($i=1,2$ 是相邻两个模糊子集的序号), 可以求出合成度 ω_i 为:

$$\omega_i = \mu_{A_{i1}}(e_0) * \mu_{A_{i2}}(e_{c0}) \quad (1-1)$$

式中, 算符 $*$ 取 \min (极小)或者取代数积, 则对于序号为 I 的规则其推理结果为

$$\mu U_i(u) = \omega_i * \mu U_i(u) \quad (1-2)$$

那么其两条规则的合成推理结果为:

$$\mu U^*(u) = \vee \omega_i * \mu U_i(u) \quad (1-3)$$

当 $*$ 取 \min 时, $\mu U^*(u) = [\omega_1 \wedge \mu U_1(u)] \vee [\omega_2 \wedge \mu U_2(u)]$

当 $*$ 取 \cdot 时, 则 $\mu U^*(u) = [\omega_1 U_1(u)] \vee [\omega_2 U_2(u)]$

推理结果的获得, 表示模糊控制的规则推理功能已经完成, 但是至此所获得的结果仍是一个模糊矢量, 不能直接用来作为控制量, 还必须作一次转换, 求得清晰的控制量输出, 即解模糊化。

1.1.4 解模糊化

解模糊化实际上就是一个从模糊控制作用空间到精确控制作用空间的映射, 即解模糊判决。判决的方法很多, 较常用的有下几种:

a) 最大隶属度法

这个方法在输出模糊集合中选取隶属度最大的论域元素作为判决结果, 如果在多个论域元素上同时出现隶属度最大值, 则取它们的平均值作为判决结果。因为该法排除了其他一切隶属度较小的论

域元素(量化等级)的作用，显得比较粗糙，只能用于控制性能要求一般的系统中。

b) 取中位法

为充分利用输出模糊集合所包含的信息，可将描述输出模糊集合的隶属函数曲线与横坐标围成的面积均分点对应的论域元素作为判决结果。这种方法称为取中位法。与第一种方法相比，取中位法概括了更多的信息，但计算比较复杂，特别是在连续隶属函数时，需求解积分方程，因此应用场合要比第三种加权平均法少。

c) 加权平均法

加权平均法即所谓的重心法。它针对论域中的每个元素 X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 乘积和 $\sum X_i \mu U_i(u)$ 对于隶属度和 $\sum \mu U_i(u)$ 的平均值 X_0 ，即

$$X_0 = \sum X_i \mu U_i(u) / \sum \mu U_i(u) \quad (1-4)$$

平均值 X_0 便是应用加权平均法为模糊集合 U 求得的判决结果。该方法既突出了主要信息，又兼顾了其它信息，所以显得较为贴近实际情况，从而应用较为广泛。

以上三种方法各有优缺点，在实际应用中，究竟采用何种方法不能一概而论，应视情况而定。已有的研究表明，加权平均法比中位数法具有更佳的性能，而中位数法的动态性能更优于加权平均法，静态性能则略逊于后者。研究还表明，使用中位数法的模糊控制器类似于多级继电控制，加权平均法则类似于PI控制器。一般情况下，这两种方法都优于最大隶属度法。

1.1.5 输入输出量化

输入量化的作用是将实际输入变量的基本论域变换成为其相应语言化变量的论域。以偏差 e 为例，其论域是由实际过程和操作习惯决定的，其对应的语言化变量 E 的论域则是由 E 上定义的模糊集合个数决定的，以7个为例，则 E 的论域为 $[-3,3]$ ，偏差输入量化的作用是将输入 e 乘上一个比例因子变为 E ，以便将 e 的论域变换为 $[-3,3]$ 。同样， e_c 也需要通过相应比例因子进行输入量化。输出语言化变量 U 也需要通过输出比例因子进行输出量化，将 U 的论域转化为实际输出变量 u 的论域。

基本模糊控制器的两个量化因子和一个比例因子对控制效果有很大影响。一般情况下，偏差量化因子选得越大，系统超调越大，过渡时间越长，但稳态控制精度高；偏差变化量化因子对系统超调的抑制作用十分明显，偏差变化量化因子选择较大时，超调量减小，但会减慢系统响应速度。输出比例因子的大小也影响着模糊控制的特性。输出比例因子选择过小会使系统动态响应过程变长，而输出比例因子选择过大会导致系统振荡。量化因子和比例因子的选择并不是唯一的，可能有几组不同的值，都能使系统获得较好的响应特性。

1.2 模糊PID控制器

磁悬浮控制系统是典型的非线性迟滞系统，所以难以为系统建立精确的数学模型。传统的PID控制由于得不到精确的数学模型，并且动态性能较差，所以控制效果并不很理想。模糊控制其优点是不需

要掌握受控对象的精确数学模型，而根据人工控制规则组织控制决策表，然后由该表决定控制量的大小，且系统的动态性能好。但稳态性能差，控制效果受控制规则和变量的量化级别限制。另外，对于普通的模糊控制而言，它类似于比例微分的、控制方式，还有一个非零的稳态误差，属于有差调节。PID控制的动态性能较差，但其积分功能可以消除静差,可以使稳态性能变好。而模糊PID控制器将两种方法结合起来，取长补短，具有良好的动态性能(模糊控制器)和稳态性能(PID控制器)。常规PID控制器无法实现参数的在线调整，而模糊PID在常规PID的基础上加设模糊参数自整定控制器，使其根据系统的偏差的大小、方向、以及变化趋势等特征，通过Fuzzy推理作出相应决策，自动的在线调整PID的三个参数 K_p, K_i, K_d ，以便达到更加满意的控制效果的目的。模糊PID控制器主要包括模糊参数整定器和变参数PID控制器两部分。

1.2.1 模糊PID控制器的结构

参数自适应模糊PID控制器的系统结构主要由参数可调PID和模糊控制系统两部分构成，其结构如图1.3所示。

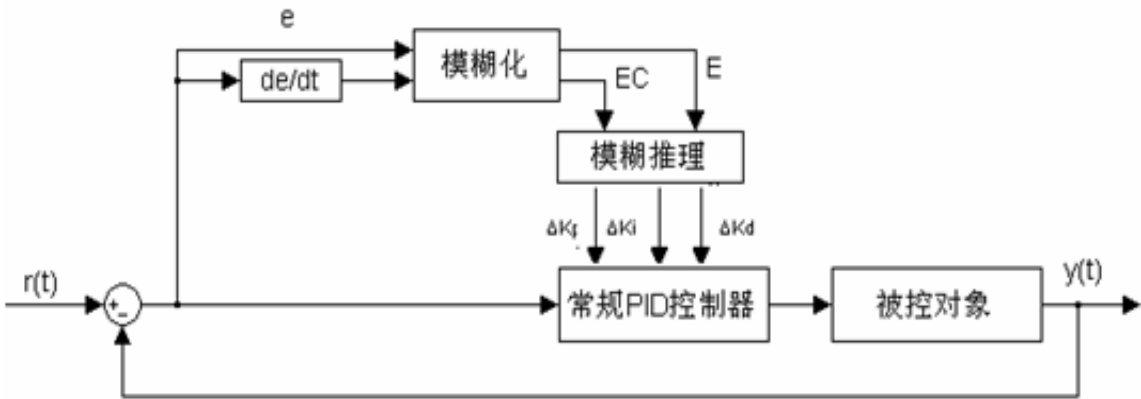


图1.3 模糊自调整

PID控制器结构PID控制器实现对系统的控制，模糊推理系统以误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入，采用模糊推理方法对PID参数 K_p, K_i, K_d 进行在线整定，以满足不同的误差 e 和误差变化率 e_c 对控制器参数的不同要求，而使被控对象具有良好的动态、静态性能。

1.2.2 模糊PID控制器的基本形式

根据模糊推理机输出量的直接物理含义，模糊PID控制器可以分成：增益调整型、直接控制量型和混合型。

1.2.2.1 增益调整型模糊PID控制器

该类控制器中输出的物理量直接对应增益参数，通过应用模糊规则在线对三个增益参数调整。一种是基于性能监督的增益调整型模糊PID控制器如：

If ("Perform Index is ...") then (ΔK_p is ...) and (ΔK_i is ...) and (ΔK_d is ...) 这里性能指标(Perform Index)可以是超调量、稳态误差或其他指标。

增益调整型的另一种形式是基于误差驱动的模糊PID控制器。规则形式如下：

If(e is ...) and (e_c is ...) then (ΔK_p 或 K_p is ...) and (ΔK_i 或 K_i is ...) and (ΔK_d 或 K_d is ...)

该类控制器的PID增益参数是将误差 e 和误差变化 Δe 的非线性函数。如比例增益可记为： $K_p = f(e, \Delta e)$ 。近几年，对这种类型模糊PID控制器的研究和应用比较多。根据整定参数的方式不同，又有模糊自整定PID参数控制器和模糊自校正PID控制器两种形式。

1.2.2.2 直接控制量型模糊PID控制器

如果模糊推理机的输出是PID原理范围内的控制作用量，则该控制器属于直接控制量型。Mann等归纳了该类控制器的12种结构单元。由于各单元在控制作用效果上的不完全等效，可以进一步认为每个单元是独立的。

1.2.2.3 混合型模糊PID控制器

混合型模糊PID控制器可以有各种形式出现。如增益调整型与直接控制量型的结合，或传统线性PID控制器与模糊控制器的结合。一些学者提出了应用模糊控制进行初始的快速响应调整，之后采用传统线性PID控制器进行细节调整。这种Fuzzy-PID控制比PID控制有更快的动态响应，更小的超调，同时它比Fuzzy控制具有更高的稳态精度。然而，何时并如何实现无扰切换将是应用中的附加问题。另一方面，为了解决模糊PD控制器无法消除稳态误差的问题，可以增加积分环节，并称为模糊PD+线性I。除此之外，还有很多形式的混合型模糊PID控制器，这里就不作介绍了。

1.2.3 模糊PID控制器的设计步骤

有了前面的理论基础，我们就可以根据需要设计适用的模糊PID控制器，下面简要说明模糊PID控制器的设计步骤。

(1)确定模糊控制器的输入、输出变量，从而也就确定了模糊控制器的维数。一般输入变量取为系统的偏差和偏差变化率，输出变量为PID参数 K_p, K_i, K_d 或者PID参数的增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。

(2) 根据实际需要确定各个输入、输出变量的变化范围，然后确定它们的量化等级、量化因子和比例因子。

(3) 在每个变量的量化论域内定义模糊子集。首先确定模糊子集个数，确定每个模糊子集的语言变量，然后为各语言变量选择隶属度函数。

(4) 确定模糊控制规则。这实质上是将操作人员的控制经验加以总结得出的一条条模糊条件语句的集合。确定模糊控制规则要遵守的原则是保证控制器的输出能够使系统输出响应的动态性能达到最佳。

(5) 求出模糊控制表。根据(4)的模糊控制规则和(2)、(3)中确定的输入、输出变量求出模糊控制器的输出。这些输出值是PID参数的调整量，把它们与输入量在一个表中按一定关系列出就构成了模糊控制表。PID三个参数一般是独立调整，所以有三个模糊控制表。

(6) 把采样得到的偏差、变化率经过(2)、(3)后，代入模糊控制规则表，得出新的PID参数，经过PID算法的计算就可得出了最后的输出量，也就是系统的控制量。

(7)根据仿真效果或实验结果分析模糊PID的控制性能，再对量化因子和比例因子进行调整已达到理想的控制效果。

1.3 模糊PID的实现

1.3.1 确定系统的输入输出变量

由模糊PID控制器结构图4.46可知，PID参数的校正部分实质是一个模糊控制器。磁悬浮实验系统控制的目的是使小球悬浮在某一期望值，因此这里选择模糊控制器的输入变量为小球的位置(V)偏差 e 和偏

差变化率 e_c ，输出量为PID参数的修正量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。它们的语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域及量化因子如表1-2所示。

| 变量 | e | e_c | Δk_p | Δk_i | Δk_d |
|------|------------------------|--------|--------------|----------------|--------------|
| 语言变量 | E | EC | ΔK_p | ΔK_i | ΔK_d |
| 基本论域 | [-2 2] | [-1 1] | [-0.2 0.2] | [-0.001 0.001] | [-3 3] |
| 模糊子集 | [NB NM NS ZO PS PM PB] | | | | |
| 模糊论域 | [-3 3] | [-3 3] | [-0.2 0.2] | [-0.001 0.001] | [-3 3] |
| 量化因子 | 1.5 | 3 | 1 | 1 | 1 |

表1-2 模糊 PID 参数表

选择各变量的隶属度函数为均匀三角形，则根据表4-6作出各个变量的隶属度函数如图1.4所示。

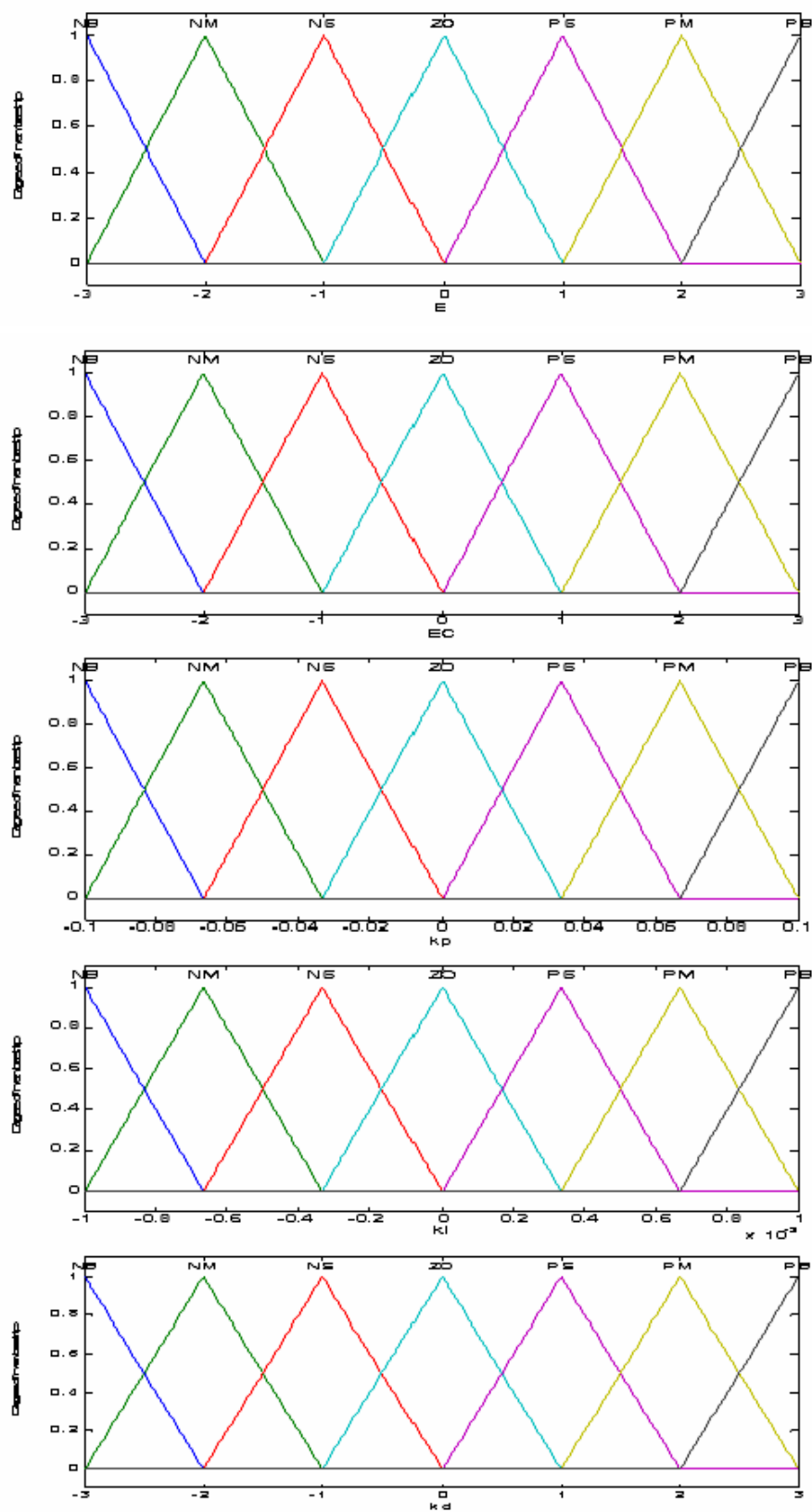


图1.4 各变量隶属度函数

1.3.2 PID 参数模糊调整规则

参数模糊自调整PID控制器就是找处在不同时刻PID三个参数与 e 和 e_c 之间的模糊关系，在运行中通过不断检测 e 和 e_c ，根据模糊控制原理来对三个参数进行在线修改，以满足不同 e 和 e_c 对控制参数的不同要求，而使被控对象有良好的动、静态性能。由前人的经验得知被控过程对参数 K_p, K_i, K_d 的自整定要求如下：

a)当偏差 $|e|$ 较大时，为了加快系统的响应速度，应取较大的 K_p ；同时为了避免由于开始时偏差 e 的瞬时变大可能出现的微分过饱和而使控制作用超出许可的范围，应取较小的 K_d ；同时为了防止系统响应出现较大的超调，产生积分饱和，应对积分作用加以限制，通常 $K_i = 0$ ，去掉积分作用。

b)当 $|e|$ 和 $|e_c|$ 处于中等大小时，为使系统响应具有较小的超调， K_p 应取的小一些， K_i 的取值要适当，这种情况 K_d 的取值对系统响应的影响较大，取值要大小适中，以保证系统响应速度。

c)当 $|e|$ 较小即接近于设定值时，为使系统有良好的稳态性能，应增加 K_p 和 K_i 的取值，同时为避免系统在设定值附近出现振荡，并考虑系统的抗干扰性能， K_d 的取值是相当重要的。一般是当 $|e_c|$ 较小时， K_d 可取大一些；当 $|e_c|$ 较大时， K_d 应取小一些。

d)偏差变化量 $|e_c|$ 的大小表明偏差变化的速率， $|e_c|$ 值越大， K_p 的取值越小， K_i 取值越大。

这里根据一般系统响应曲线(图1.5)，进一步分析在不同的 e 和 e_c 时，对于参数 K_p, K_i, K_d 的要求。

在系统响应动态过程中，PID控制作用应跟随系统状态变化而变化。设维持系统输出与设定值相等的 $u(t)$ 为 U_0 ，从图1.5中可以看出， $y(t)$ 在bc段的超调量是由于ab段 $u(t)$ 大于 U_0 ，而且过程存在惯性(或滞后)造成的，cd段回调是由于bc段 $u(t)$ 小于 U_0 。同样de段下超调是因为cd段 $u(t)$ 小和惯性的原因，ef段回升是因为de段 $u(t)$ 的升高。因此，在各段对于各个参数的要求如下：

ab段($e>0, e_c < 0$):系统呈现向稳态变化的趋势，所以在开始时取较大的比例系数以加快系统的响应速度，取较小的积分系数和微分系数，当快接近b点时为了防止超调，应减小比例系数，甚至取消积分作用，而微分作用要适当增加，抑制超调。

bc段($e<0, e_c < 0$):系统输出值已超过稳态值，继续向偏差增大的方向变化。在此阶段，控制作用应尽快压低超调。在整个阶段都应取较大的微分系数，而比例系数和积分系数取较小值。

cd段($e<0, e_c > 0$) 系统输出趋向稳态值的速度越快越好，即应尽快消除偏差使系统进入稳态，在c点时应取较大的比例系数，当快接近d点时为了减小超调，应加大微分系数，适当减小积分作用，以避免积分超调及随之而来的振荡，有利于控制。

de段($e>0, e_c > 0$):系统出现下超调，偏差向增大的方向变化，此时在d点应取较大的微分系数，当接近e点时适当减小微分系数，增大积

分系数与比例系数。

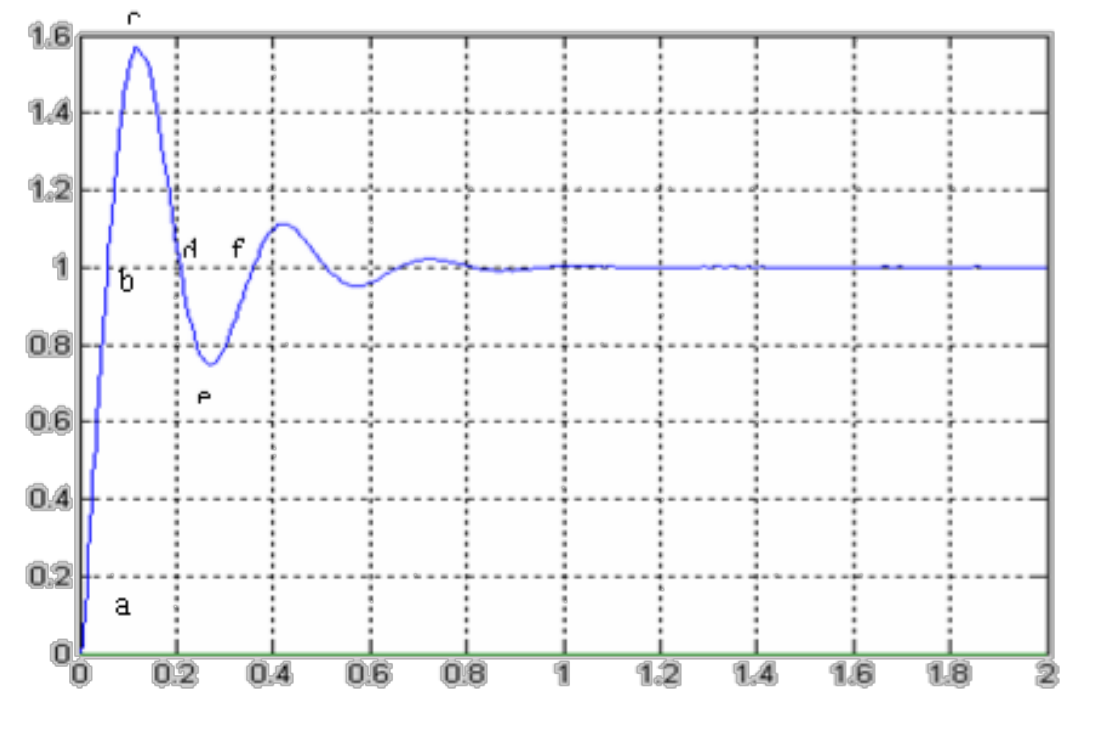


图1.5 系统响应曲线

根据上述PID参数的作用以及在不同的偏差及偏差变化下对PID参数的要求，总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验，得到针对 K_p , K_i , K_d 三个参数分别整定的模糊控制表。

(1) K_p 的模糊规则表

| <div><div></div><div>E_c</div><div></div></div> | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|--|----|----|----|----|----|----|----|
| <div><div>E</div><div></div><div></div></div> | | | | | | | |
| NB | PB | PB | PM | PM | PS | ZE | ZE |
| NM | PB | PB | PM | PS | PS | ZE | NS |
| NS | PM | PM | PM | PS | ZE | NS | NS |
| ZE | PM | PM | PS | ZE | NS | NM | NM |

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| PS | PS | PS | ZE | NS | NS | NM | NM |
| PM | PS | ZE | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB | ZE | ZE | NM | NM | NM | NB | NB |

(2) K_i 的模糊规则表

| | | | | | | | |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| $E \backslash E_c$ | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZE | ZE |
| NM | NB | NB | NM | NS | NS | ZE | ZE |
| NS | NB | NM | NS | NS | ZE | PS | PS |
| ZE | NM | NM | NS | ZE | PS | PM | PM |
| PS | NM | NS | ZE | PS | PS | PM | PB |
| PM | ZE | ZE | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB | ZE | ZE | PS | PM | PM | PB | PB |

(3) K_d 的模糊控制规则表

| | | | | | | | |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| $E \backslash E_c$ | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NB | PS | NS | NB | NB | NB | NM | PS |
| NM | PS | NS | NB | NM | NM | NS | ZE |
| NS | ZE | NS | NM | NM | NS | NS | ZE |

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| ZE | ZE | NS | NS | NS | NS | NS | ZE |
| PS | ZE | ZE | ZE | ZE | ZE | ZE | ZE |
| PM | PB | NS | PS | PS | PS | PS | PB |
| PB | PB | PM | PM | PM | PS | PS | PB |

1.3.3 模糊推理及解模糊化

根据前面的模糊规则，对于输入偏差 e 和偏差变化 e_c 经过推理可以得出相应的输出。首先求出输出变量的隶属度如:对应于 K_p 的第一条模糊规则的隶属度为： $\mu_{p1} = \mu_{NB}(E) * \mu_{NB}(E_C)$ ，在这里运算符“*”为取小，即 $\mu_P = \min\{\mu_{NB}(E), \mu_{NB}(E_C)\}$ 1

以此类推，可以求得输出量 K_p 在不同偏差和偏差变化下的所有模糊规则调整的隶属度。在某一采样时刻，根据偏差和偏差变化的测量值可以求得此时 K_p 的值为

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p) \Delta \Delta K_{pj}}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p)} \quad (1-5)$$

式中， $\mu_{pj}(\Delta K_p)$ ($j=1,2, \dots, 49$)是由当前偏差 e 和偏差变化 e_c 的测量值经量化后的 E 和 E_C 对应的隶属度求得的对应用于表1-2中各种组合的 ΔK_p 的隶属度。同理，对于输出量 ΔK_i ， ΔK_d 的模糊推理和解模糊过程与 ΔK_p 相同，也可以得出类似于式(1-5)的计算式，事实上，这里采用的解模糊方法为常用的重心法，即加权平均法。根据上面推导的公式就可以计算出在不同的偏差和偏差变化时，PID参数的调整量的输

出值，但这些值还不能用于修正PID参数，他还是个模糊量，所以还要乘以一个比例因子。PID参数的调整算式为：

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases}$$

式中， k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 是 k_p, k_i, k_d 的初始值，他们通过常规的方法得到。

$\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 控制器的输出，即PID参数的校正量。

1.3.4 模糊PID在Matlab下的实现

前面我们已经详细的介绍了模糊PID的基本原理及其实现方式，这其中涉及到比较复杂的数学运算。所幸的是，我们可以利用Matlab软件来实现这些运算，Matlab语言是美国学者Cleve Moler构思发明的一种计算机语言，该软件提供了丰富的矩阵处理功能，使矩阵的运算变得非常容易。Simulink是Matlab提供的系统模型图形化仿真工具，它有两个显著的功能:SIMU(仿真)与LINK(连接)，既可以利用鼠标在模型窗口上“画”出所需要的控制系统模型，然后利用Simulink提供的功能来对系统进行仿真，使得复杂系统得的仿真变得简单和直观。在这里我们将利用Simulink模块库及Fuzzy logic toolbox(模糊逻辑工具箱)来完成系统控制器的设计。

首先，在MATLAB的Command Window窗口中输入”fuzzy”，即弹出如图1.5所示的”FIS Editor”编辑器。

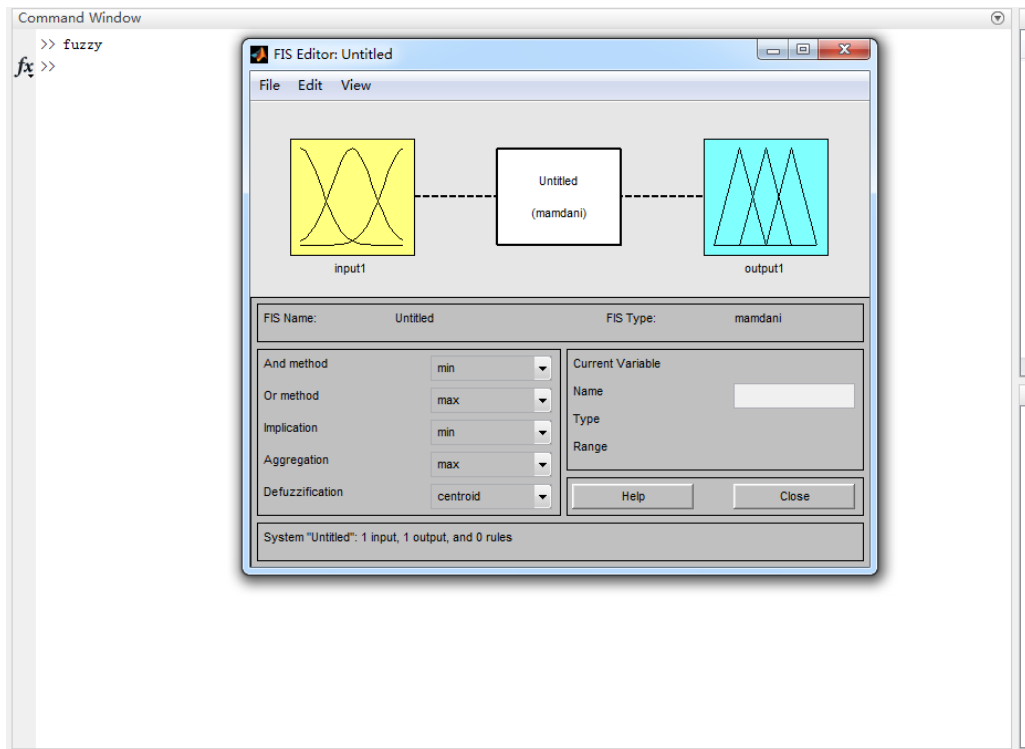


图1.5 模糊控制编辑器

随后，再如图1.6所示点击”File——Import——From File”

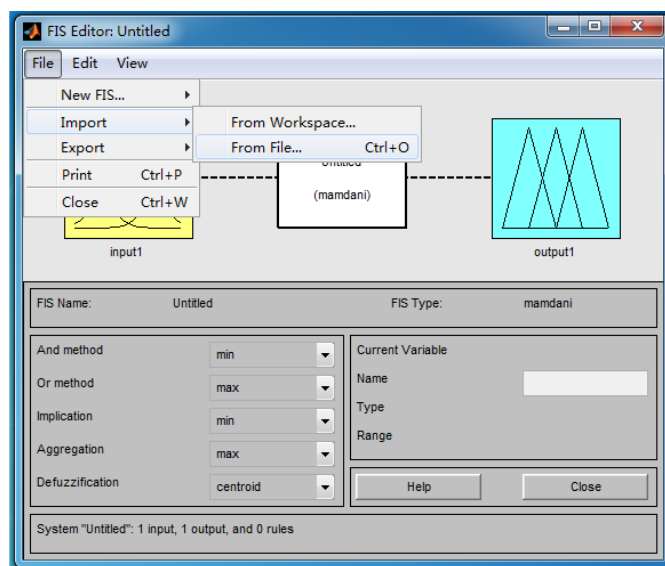


图1.6 导入文件

点击后会弹出图1.8，选择磁悬浮的模糊控制.fis文件
“GML001.fis”

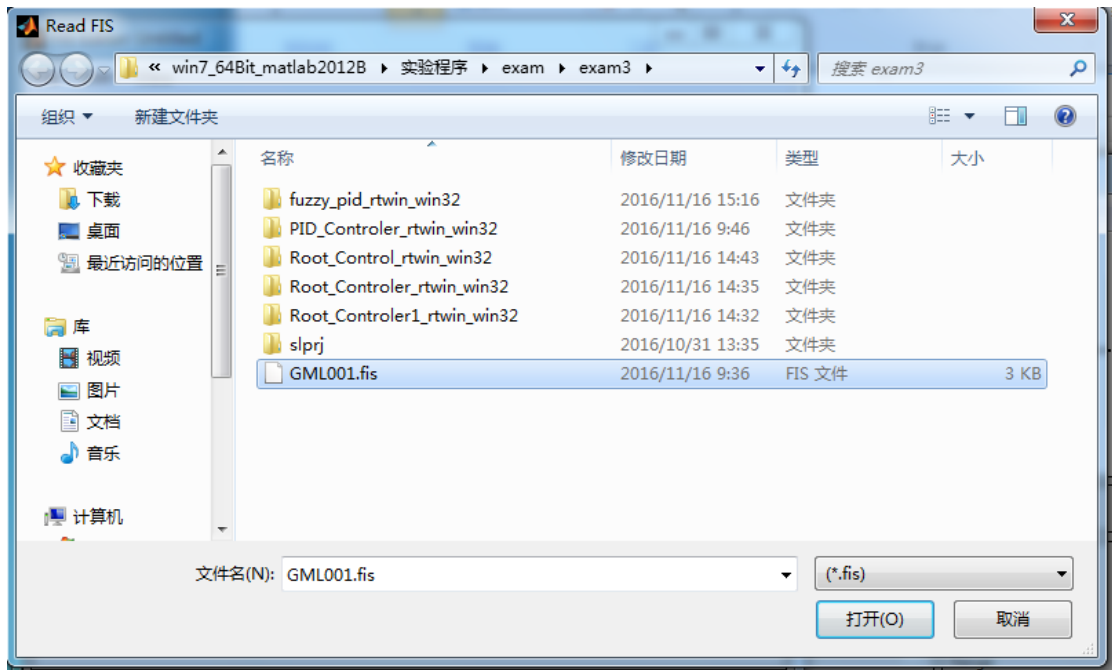


图1.7 确认文件

如图1.8所示，在GML1001的编辑器中，点击”File——Export——To Workspace”后弹出填写Workspace variable的对话框，点击”OK”

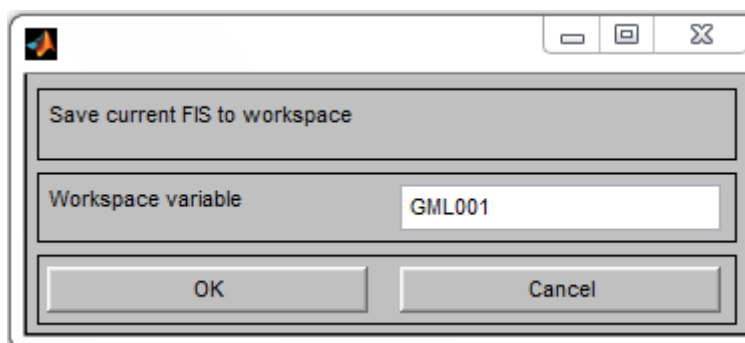
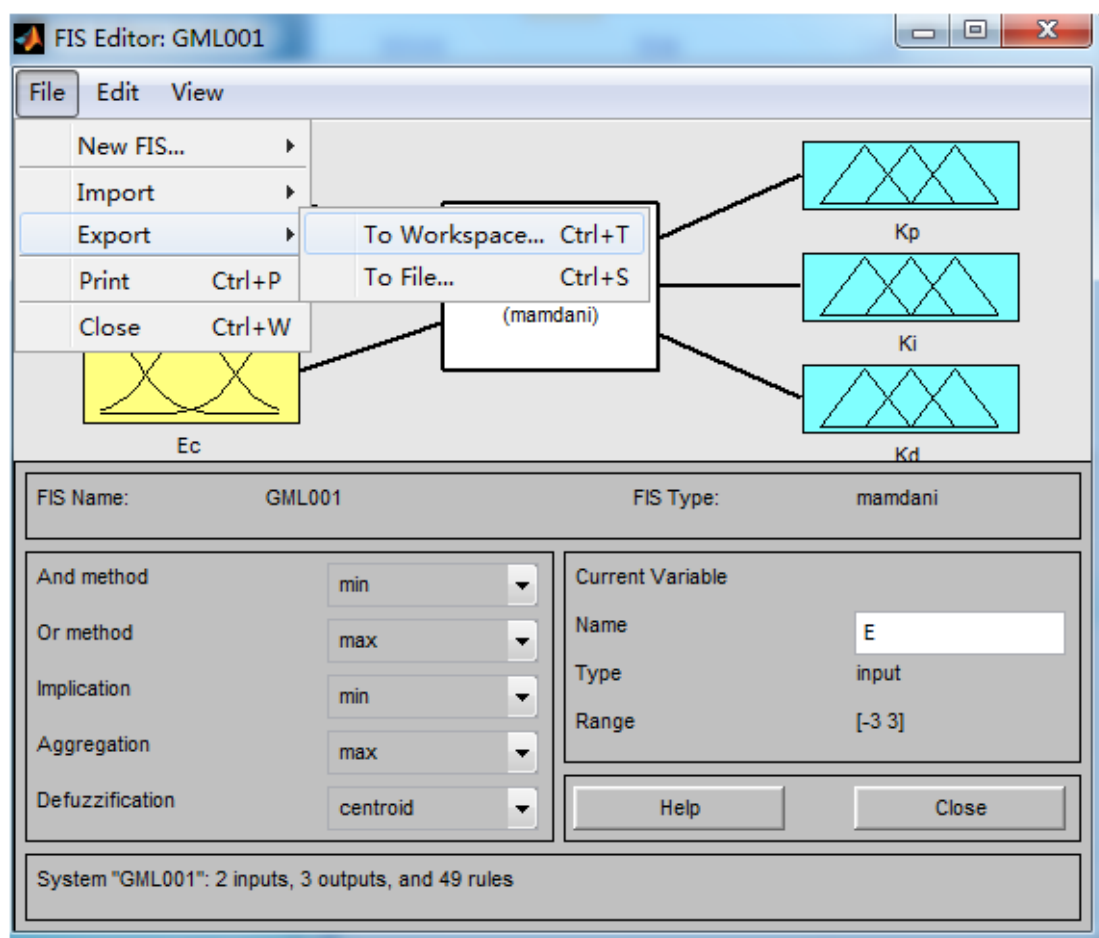


图1.8 文件导出

这时，我们就可以在MATLAB的Workspace中可以看到GML001的文件

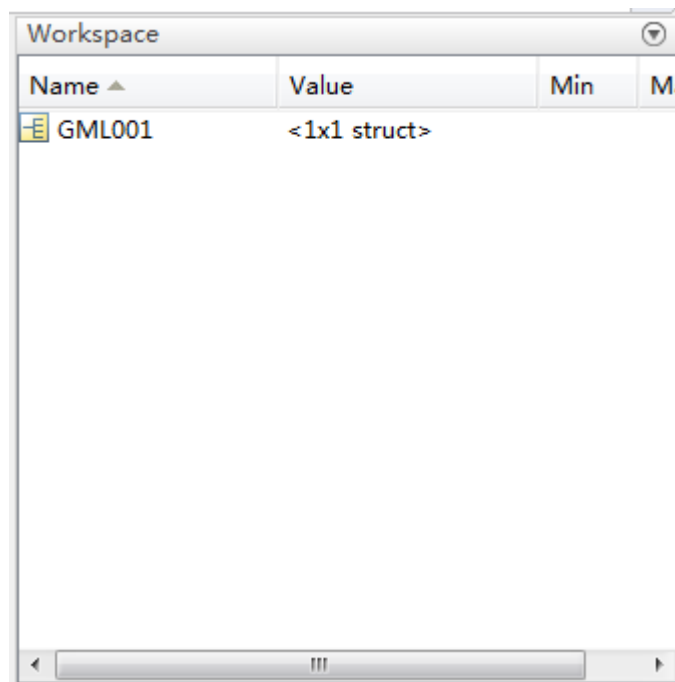


图1.9 文件生成

至此我们完成了控制器的设计，但要在实际中应用，还需要有模糊控制表，因此我们根据MATLAB中的模糊规则观察器Rule viewer(图1.10)得出该模糊PID控制器中三个参数的模糊控制表(表1-3)。根据该表就可以利用软件来实现该控制器。

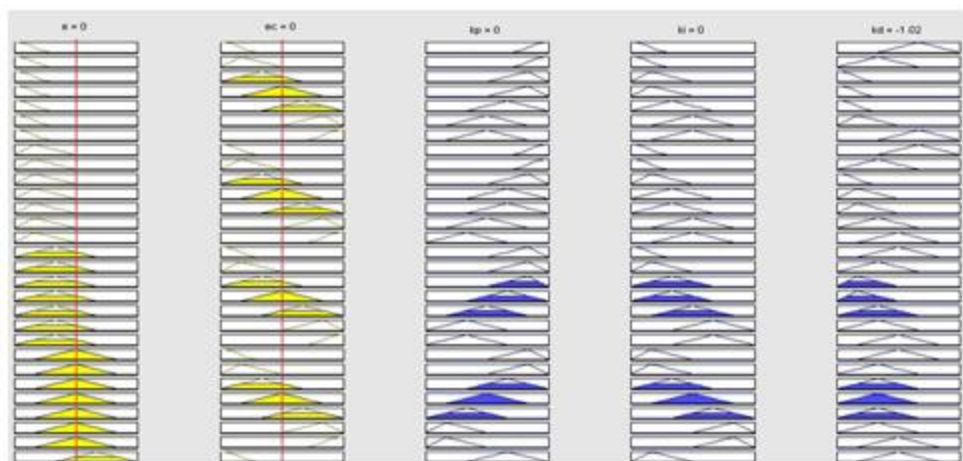


图1.10 模糊规则观察期

| VKpKiKd EC | | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|------------|----|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| E | EC | 0.135 | 0.135 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0 | 0 |
| | | -0.001 | -0.001 | -0.0007 | -0.0007 | -0.0003 | 0 | 0 |
| -3 | 1 | 1 | -1 | -2.69 | -2.69 | -2.69 | -2 | 1 |
| | EC | 0.135 | 0.135 | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 0 | 0 |
| -2 | 1 | -0.001 | -0.001 | -0.0007 | -0.0003 | -0.0003 | 0 | 0 |
| | EC | 1 | -1 | -2.69 | -2 | -2 | -1 | 0 |
| -1 | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0 | -0.05 | -0.05 |
| | EC | -0.001 | -0.0007 | -0.0003 | -0.0003 | 0 | 0.0003 | 0.0003 |
| 0 | 1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -1 | -1 | 0 |
| | EC | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0 | -0.05 | -0.1 | -0.1 |
| 1 | 1 | -0.0007 | -0.0007 | -0.0003 | 0 | 0.0003 | 0.0007 | 0.0007 |
| | EC | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 |
| 2 | 1 | 0.05 | 0.05 | 0 | -0.05 | -0.05 | -0.1 | -0.1 |
| | EC | -0.0007 | -0.0003 | 0 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0007 | 0.001 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | EC | 0.05 | 0 | -0.05 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.135 |
| | 1 | 0 | 0 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0007 | 0.001 | 0.001 |
| | EC | 2.69 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2.69 |
| | 1 | 0 | 0 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.135 | -0.135 |
| | EC | 0 | 0 | 0.0003 | 0.0007 | 0.0007 | 0.001 | 0.001 |
| | 1 | 2.69 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2.69 |
| | EC | | | | | | | |

表1-3 模糊控制表

1.3.5 实验结果及分析

利用所建立的模糊控制规则表1-3，在Matlab下仿真，根据相应曲线不断调整参数，获得最优控制效果。模糊—PID控制器模型如图1.12。

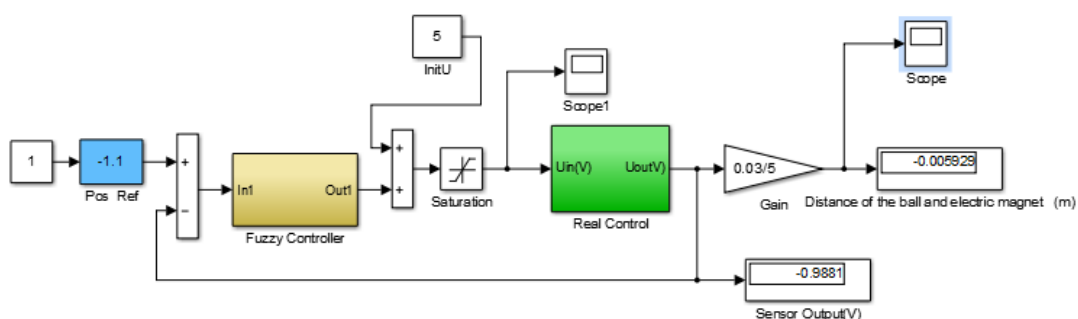


图1.11 磁悬浮控制系统

调节Pos Ref值，可调整小球位置，此控制程序允许Pos Ref值在0.7—1.3之间。通过示波器可以看出系统稳态性能好，抗干扰能力强，但上升时间比较慢，读者可以自行进一步仿真出最佳参数，并完成实时控制，检验仿真结果。完成实验报告。