

压延制品厚度 Fuzzy 控制器设计方法

余艾地 叶智慧 汤 毅 王英德

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司正泰橡胶厂 200082]

摘要 介绍了压延制品厚度 Fuzzy 控制器的设计方法。简要叙述了设计的主要过程,对隶属度函数的确定、控制规则的数量和质量、模糊运算子的选取以及反模糊化的方法等几个设计中的关键问题进行了较为详细的介绍。提出了橡胶四辊压延机压延制品厚度 Fuzzy 控制器的主要设计思路。

关键词 压延,厚度控制,Fuzzy 控制器,模糊控制

在四辊压延机压延过程中,影响压延制品厚度的因素很多,且这些因素具有很大程度的不确定性。传统压延制品厚度控制中建立的控制模型要么过于复杂难以实际应用,要么过于简单不能切实保证压延制品设计指标的实现。因此,大多数压延机至今依然沿用着依靠操作者对机械设备、制品性能的熟悉程度,采取经验操作法对压延制品厚度进行控制。

Fuzzy 控制与传统控制方法相比具有许多优点,它特别适合那些难以建立精确数学模型、非线性、大时滞的工业过程。Fuzzy 控制器设计的主要思想也是依据人们生产实践过程中的思维形式而产生的。

1 Fuzzy 控制器设计的主要过程

(1) 首先必须对压延机及压延制品进行定性的分析,确定 Fuzzy 控制器的输入变量、输出变量和它们所对应的数值变化范围,即工艺指标公差 ($-\delta \sim +\delta$),以及必须达到的控制精度等。这些要求和数据都必须依据对压延过程的实际情况及条件进行具体的分析。

综合考虑这些因素并确定以上数据后,压延过程控制模型的结构也就被确定了。这是控制系统设计的关键所在,因为总体设计思想和控制决策的正确与否往往是关系到设计系统能否达到设计指标以及控制效果好坏的关键。

(2) 确定隶属度函数。它主要包括:输入变量、输出变量、Fuzzy 控制规则、运算子的选取和反模糊化方法的选择。

这与 Fuzzy 控制器的内部结构密切相关,因为只有明确了以上隶属度函数的定义,才能对它们进行模糊化、模糊推理和反模糊化等过程,从而实现模糊控制。

(3) 模糊控制器设计的优化。对经过模糊化处理完成的模糊控制器设计进行模拟试验。可以离线进行仿真试验,也可以在线进行实时测量。模拟试验和在线实测的目的都在于检验所设计的模糊控制器是否能够达到设计的预期控制目标,如果没有达到要求就必须对设计进行进一步的调整工作,需进行调整的参数有:

- ① 控制器结构;
- ② 隶属度函数的形状、位置;
- ③ 控制规则和置信度;
- ④ 模糊运算子;
- ⑤ 反模糊化的方法。

一般来说,对已设计好的模糊控制器进行调整,主要是更改隶属度函数,补充和完善控制规则库,这也称为对模糊控制器的优化设计。优化后的模糊控制器的控制效果往往比优化前要好得多,当然,它也是模糊控制器设计时费时较多的部分。

Fuzzy 控制器的设计过程如图 1 所示。

2 Fuzzy 控制器设计中的几个关键问题

现以四辊压延机制品厚度 Fuzzy 控制器为例,说明 Fuzzy 控制器设计过程中隶属度函数的确定、控制规则的数量和质量、运算子的选取和反模糊化方法等几个关键问题。

2.1 隶属度函数的确定

由压延机制品厚度工艺指标 ($D \pm \delta$) mm 或 ($D \pm \delta$) g m⁻² 可知,它是以目标值 (Y) 与实

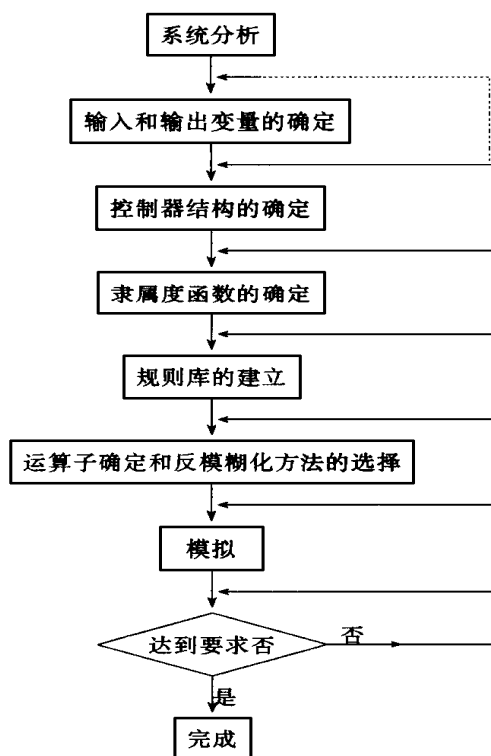


图1 Fuzzy控制器的设计过程

际值(s)间偏差量 e 的大小作为这一系统的控制目标的,即

$$Y_i - S_i = e \quad (-\delta \leq e \leq +\delta)$$

为了对压延制品的厚度偏差 e 进行控制,必须对它的各个语言描述值,如厚、薄、很厚等这些模糊子集进行具体定义。要注意的是这些语言值模糊子集之间并没有明确的分界线,反映在模糊子集的隶属度函数上,就是这些函数的曲线必定是相互重叠的,如图2所示。在模糊控制器的设计理论中,常将输入量的隶属度函数平均划分成7级,即正大(NL)、正中(NM)、正小(NS)、零(ZE)、负小(PS)、负中(PM)和负大(PL)。

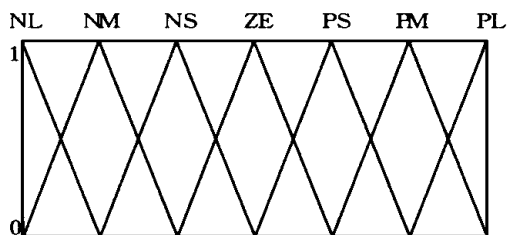


图2 隶属度函数曲线

压延制品厚度隶属度函数曲线,一般采用三角形或梯形曲线(根据压延机机械性能确定)。这是因为它们的形状简单、计算量小、可

节约存储空间,而且在实际工作中,三角形的隶属度函数比钟形(正态分布)隶属度函数具有更好的动态响应性能(灵敏度)。

在压延过程中,当实际值与目标值之间产生偏差时,要求控制系统能够以适宜的速度产生相应的调节控制量输出,这一点对于所设计控制器的特性来说非常重要。如果需要在某一量值范围内使控制器响应得快,那么相对应范围的三角形隶属度函数曲线的斜率可取得大些,反之如并不要求其响应得很快,则将其曲线的斜率取得小些,甚至可为水平状态(如图3所示)

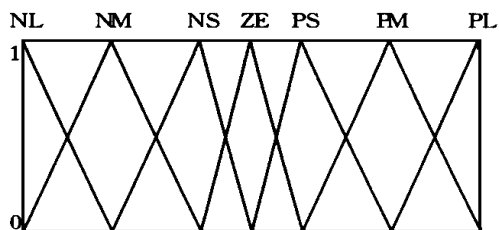


图3 隶属度函数非均匀分布

将输入量隶属度函数平均划分成7级对于精密控制是十分必要的,但将其任意套用于各种压延制品厚度控制上就不一定合适了。一般来说,语言变量 $(-\delta \sim +\delta)$ 可任意地划分成 n 个语言值,但并不是分得越细越多,其控制的质量就会越高。如压延制品厚度公差 δ 为 $-50 \sim +50$,则将其分成 $+50, +40, +10, 0, -10, -40$ 和 -50 共7级,也可分成 $+40, +30, 0, -30$ 和 -40 等5级。而从实际控制效果看,分成7级和5级的差别并不明显。因此在设计压延制品厚度Fuzzy控制器时选取了5级。压延制品厚度隶属度函数分布图如图4所示。

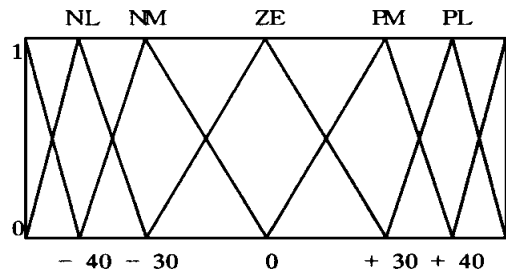


图4 压延制品厚度隶属度函数分布图

由图4可见,压延制品偏差 e 的隶属度函数在变化区间 $(-\delta \sim +\delta)$ 内并非平均分布,这是因为偏差 e 在 $-30 \sim +30$ 的范围内都属合

格工艺偏差量,在工作中对此范围的偏差调节控制速度可以较平缓;而在 $e \geq +30$ 和 $e \leq -30$ 两个危险范围则必须有灵敏的控制响应,故此处函数斜率较大。

2.2 控制规则的数量和质量

2.2.1 控制规则的数量

在对压延机模糊控制器的语言变量进行定义时,往往会把语言变量的级数定义得过多(对控制器的精度期望值太高),然而实际工作经验中并没有足够的控制知识(if ..then ...),这样就会造成因模糊控制规则太多而使实际控制质量达不到期望值的问题。

对压延机模糊控制系统来说,若将输入的语言变量划分成 5 级,按矩阵排列(见图 5),可得出 9 条规则。

- (1) if $e = ZE$ and $\Delta e = ZE$ then $U = ZE$;
- ⋮
- (9) if $e = ZE$ and $\Delta e = PL$ then $U = NL$ 。

		e				
		NL	NM	ZE	PM	PL
Δe	NL			PL		
	NM			PM		
	ZE	NL	NM	ZE	PM	PL
	PM			NM		
	PL			NL		

图 5 模糊控制规则库
 Δe 为偏差变化率

由图 5 可见,如果取这 9 条控制规则进行模糊推理,就会出现“未定义”的控制盲区,这样的控制效果将是非常差的。因此,必须对这一控制规则的矩阵进行对称扩充(如图 6 所示),并得出另外几条控制规则。

- (10) if $e = NM$ and $\Delta e = PM$ then $U = NL$;
- ⋮
- (15) if $e = PM$ and $\Delta e = PM$ then $U = ZE$ 。

图 6 所示模糊推理矩阵有 $5 \times 5 = 25$ 条控制规则,以此推算,若每个输入语言变量划分为 7 级,就必须有 49 条规则才能够全部覆盖。可见,规则的数目是以级数的平方增长的,即使是

		e				
		NL	NM	ZE	PM	PL
Δe	NL	ZE	PL	PL	PL	PL
	NM	NL	ZE	PM	PL	PL
	ZE	NL	NM	ZE	PM	PL
	PM	NL	NL	NM	ZE	PL
	PL	NL	NL	NL	NL	ZE

图 6 扩充模糊规则库

具有相当丰富经验的操作者和系统工程师,也很难保证这么多控制规则的质量。

2.2.2 控制规则的质量

因实际工况条件的限制,控制规则会受到一定的约束,因此还必须对模糊控制规则的数量和质量进行优化。

方法 1:选取适合的规则数目和正确的规则分布形式。如在压延厚度控制隶属度函数设计时取 5 级,而舍 7 级;对输入量偏差 e 采取如图 4 所示的非均匀分布划分。

方法 2:给已建立的控制规则赋以适当的权重数。

在轮胎制造过程中,有 30 多个规格的压延制品,且各自的目标值和偏差变化范围也不同。但压延机模糊控制器设计时不可能针对每一规格的压延制品都设计一种(25 条)不同的控制规则。因此在设计压延制品厚度模糊控制系统时,就采用了给已建立的控制规则赋以适当的权重数(置信度)的方法。即当某一条规则是不受限制的适用时,它的权重数因子等于 1;而当它仅在一定的过程状态下适用时,则它的权重数因子便为小于 1 或大于 1 的数。

以上对压延机模糊控制规则的优化方法的实施,可以凭操作者实践的经验总结得出,也可以根据模拟仿真试验通过理论计算来确定。

2.3 模糊运算符(Fuzzy Operator)的选取

在压延制品厚度的实际控制过程中,厚度的输入量并非单一变量,而是包括厚度偏差 e 及偏差变化率 Δe 。确定这两个输入变量(或者说两个模糊集合)之间的关系的过程称为模糊运算。

计算机的二值逻辑运算,对于普通集合 A 和 B ,一般有“并”(OR)、“交”(AND)和“补”(NO)运算。而对于模糊集合 A 和 B ,同样可以定义它们的“并”、“交”和“补”运算。实际变量的逻辑定义为 x ,运算结果 μ 为运算符。

定义1 当 C 为模糊集合 A 和 B 的并集,即 $C = A \cup B$,则

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

定义2 当 C 为模糊集合 A 和 B 的交集,即 $C = A \cap B$,则

$$\mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

定义3 当 C 为模糊集合 A 的补集,即 $C = \bar{A}$,则

$$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x)$$

由于压延制品厚度偏差 e 的逻辑定义 x 为连续变量,按定义1,2和3,将其进行并、交和补的运算,结果如图7所示。

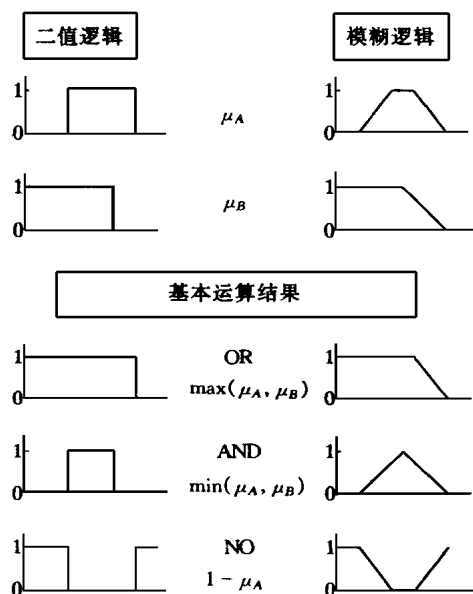
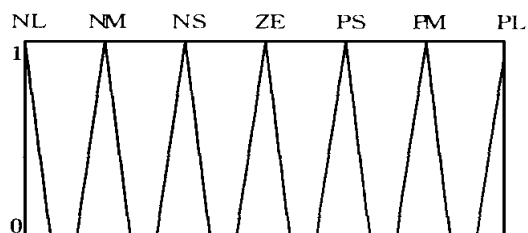


图7 二值逻辑和模糊逻辑运算比较

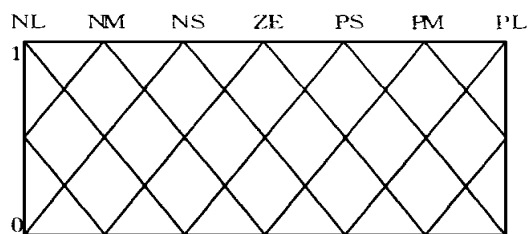
由图7可见,模糊集合 A 和 B 的并、交和补逻辑运算方法与普通集合是相同的,也就是说,模糊集合和逻辑集合的逻辑运算实质上就是隶属度函数的运算过程。

对隶属度函数值取大或取小是目前对模糊集合进行逻辑运算的最常用方法之一。虽然在模糊控制的实际工程应用中这种方法并不是最优的运算方法,但它却是一种比较实际有效的方法。

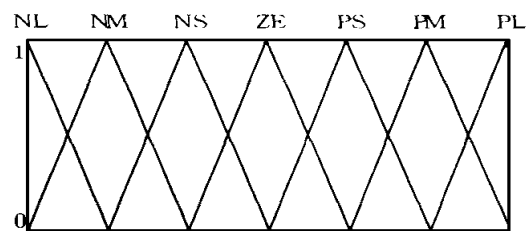
隶属度函数幅宽(w)的大小对控制器实际控制性能影响较大。图8所示为3种不同幅宽的压延控制器厚度偏差模糊变量隶属度函数,它们均为三角形函数。当幅宽 $w \leq 10$ 时[见图8(a)],部分区间没有规则相适应,因此其收敛性不好;如果 w 取得过大[见图8(b)],就会出现重叠规则增加,规则之间的相互影响过大,只能采取取平均值的方法,但是使规则的响应时间变慢;当幅宽 w 为 $20 \sim 40$ 时[见图8(c)],调节和控制的效果比较好。



(a) $w \leq 10$



(b) $w = 60$



(c) $w = 20 \sim 40$

图8 不同幅宽的隶属度函数

当然,在压延高品质制品时,这样设计的模糊控制器控制规则是不够的,还应根据实际的过程进行不同的控制策略设计。

2.4 反模糊化方法

反模糊化(Defuzzification),即是人们用语言表达的模糊量回复到精确的数值,也就是根据输出模糊子集计算出确定的输出数值。反模糊化有许多方法,其中最简单的一种就是最大隶属度法。

最大隶属度法就是在输出模糊集 ($- \delta \sim + \delta$) 中,选取隶属度函数最大的元素作为判决结果,如果在多个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,并作为模糊控制器的执行量。

这种方法的优点是简单易行、实时性好、速度快;缺点是概括的信息量少,因为它完全排除了隶属度较小的元素(其它量化等级)的作用。

3 结语

模糊控制器是按一定的语言控制规则进行工作的,而这些控制规则是建立在对被控对象手动控制策略的基础之上,或归纳被控过程所得的模糊信息基础之上的。因此,模糊控制特别适用于控制对象具有高度非线性,参数随工作点变化大,环境因素干扰强,而且不易建立精确数学模型和控制模型的被控过程,如橡胶制品(轮胎)制造加工过程中的压延和挤出等。

模糊控制的设计方法,就目前来说,大多采用通过取大或取小逻辑运算的推理合成法则,属于直接试探法中的一种。

模糊控制器的控制规则不受任何条件的约束,可以是完全不可解析的。因此在实际工程应用中,系统工程师和有经验的操作者可以一起对被控过程进行讨论和修改,定性地采纳各种好的控制思想。

应用现代计算机技术实现过程的模糊控制,这种控制思想及规则具有很大的通用性,只要通过较小的修改组合就可使控制器适用于多种不同的被控过程,如轮胎胎面挤出过程中的质量、形状和长度的多变量的优化控制。

致谢 在此特别感谢青岛化工学院的吕柏源老师、李丽鹃博士,桂林橡胶工业设计研究院的杨顺根高级工程师和上海正泰橡胶厂技术科的王信岳。

第十届全国轮胎技术研讨会论文(三等奖)

国泰公司设备良性循环带来高效益

1998年山东成山橡胶集团国泰轮胎有限公司继续加强对现有设备的管理,建立设备资产台帐,规范了资产管理,提高了设备水平。

首先,公司对19台(套)闲置设备进行报废处理,定出了卖出价格。在设备和技术部门的配合下,1998年公司共开发和改造70多种规格的产品,其中开发了50多种新规格外胎模具580余副,自制水胎、垫带内胎、胶囊模具30副。公司还投入210余万元,完成技改项目近60项,加快了引进设备配件的国产化。美国两用四辊压延机辊筒的国产化改造,在满足工艺要求的同时节约资金60余万元;VMI和KRUPP成型机机头采用国产技术制造,全年共节约资金130余万元;合理修改7台VMI成型机PLC程序,使单坯循环时间平均缩短5s,班产能力提高80条;完成德国三复合挤出机螺杆及旁压辊的图纸测绘工作,为1999年扩大半钢子午线轮胎生产能力提供了有利条件。

其次,公司加大能源管理力度,提高能源综合利用水平。随着厂区用水面积的扩大,公司

强化了全员节水意识,水耗由1997年的213万t降至1998年的183万t,水费支出由115万元降至72万元。另一方面,通过技改合理利用余热,对蒸汽压力和温度标准要求较低的部分工序改用回汽,日节省蒸汽约5t;对部分除氧加热器的外水系统进行改造,使外给水温度平均提高20℃,日节汽48t;合理调整工程胎车间冷却水回水温度,使锅炉房原水温度控制在60℃左右,减少了锅炉除氧器的蒸汽消耗。在采暖面积增大2万m²、产值增加2亿元的情况下,净节省原煤1.16万t。此外,公司还对供、用电计量表进行了校正,避免了173万元的电费损失。

设备部门采用热喷涂、热喷焊技术修复损坏机件,仅这一项,全年节约配件购置费190余万元;采用变频技术改造半钢高台裁断机,节约设备购置费30万元。

通过对设备开发、改造,降低了设备的综合能耗,公司经济效益稳步提高。

(山东成山橡胶集团《成山报》

黄彩霞供稿)