

模糊控制 理论与实践

涂承宇 涂承媛 杨晓莱 贺 佳 编著

FUZZY CONTROL THEORY AND PRACTICE

地震出版社

北京市科技新星计划资助项目

模糊控制理论与实践

涂承宇 涂承媛 杨晓莱 贺 佳 编著

地 震 出 版 社

1998

750.01

内 容 提 要

本书从模糊控制的兴起与发展谈起,对传统的模糊控制理论进行了归纳综合,深入浅出地介绍了什么叫模糊控制。并按初级、高级和智能模糊控制的顺序,即基本模糊控制、复合模糊控制、仿生模糊控制的顺序,详细介绍了模糊控制理论及其最新进展,以及在工业控制、交通系统、家用电器等领域中的应用与实践。本书概念清楚、逻辑严谨,既有理论又有实践,易于理解。本书可作为大学本科生、研究生教材或参考用书,也可供科研工作者和工程技术人员使用。

模糊控制理论与实践

涂承宇 涂承媛 杨晓莱 贺 佳 编著

责任编辑 陈晏群

责任校对 张晓梅

地 大 民 族 院 出版发行

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 11.75印张 316千字

1998年8月第一版 1998年8月第一次印刷

印数 001—900

ISBN 7-5028-1460-4/O·26

(1874) 定价: 28.00元

前 言

《模糊控制理论与实践》一书包括基本理论与应用实践两部分,不过,这样的划分是粗略的,为了深入浅出,阐述理论过程中有时也需佐以联系实际的例子,而介绍应用实例每每又离不开理论分析,只是各自有所侧重而已。

本书的第一至三章是基本理论。第一章讨论基本模糊控制,采用了一套便于理解的概念和符号体系。第二章介绍四类典型的复合模糊控制,大体上囊括了见诸文献的、名目繁多的复合模糊控制。第三章介绍新近兴起的仿生模糊控制,其中介绍的基于遗传算法的模糊控制,系首次见诸国内出版的模糊控制书籍。随后几章介绍模糊控制在众多领域中的应用。

本书还转载了贺仲雄教授的学术论文“模糊可拓经济控制”,介绍其创新的、领先的研究成果,作为本书的压轴篇。

限于篇幅,本书对不少有价值的理论研究(包括模糊控制算法的硬件实现)和实际应用成果不得不予以割爱。为了便于各个领域的读者查阅有关信息,本书提供了大量文献的目录,从1965年L.A.Zadeh发表的第一篇关于模糊集的学术论文,直到1997年4月份的论文。文献目录逐章编排,并分别按在各章中出现的先后顺序编号。书中的图、表和公式均按章节编顺序号以便查阅。

考虑到有关模糊集的基本知识可以在已出版的多种书籍中读到,本书未行编入,以节约篇幅。

本书的撰写参考和援引了大量的文献,在此,谨向有关书籍和论文的作者表示我们衷心的感谢。

作者水平有限,书中不当之处,敬请指正。

作 者

1997年6月

主要字母符号表

符 号	含 义	说 明
x'	被控参数的实际值	清晰量,实测值
x_s	被控参数的期望值(给定值)	清晰量,可调
e'	偏差的实际值	清晰量, $e' = x_s - x'$
e	偏差的等级值变量	清晰量
$\{e\}$	以 e 为变元(遍历 e 的各个可能取值)的集合	常规集合
e_i	$\{e\}$ 的第 i 元素	清晰量,确定的值
$e_{(\omega)}$	变量 e 的第 ω 个取值	清晰量,确定的值
e^*	变量 e 的某一取值	清晰量,确定的值
E	偏差的语言变量	
$\{E\}$	以 E 为变元(遍历 E 的各个可能取值)的集合	常规集合,离散集合
$\underline{E}$	变量 E 的模糊集表示	模糊集型变量
$\{E\}$	以 $\underline{E}$ 为变元(遍历 $\underline{E}$ 的各个可能取值)的幂集	常规幂集(其元素均为模糊集),离散集合
E_l	$\{E\}$ 的第 l 个元素	确定的值,模糊集型
$E_{(\omega)}$	变量 $\underline{E}$ 第 ω 个取值	确定的值,模糊集型
E^*	变量 $\underline{E}$ 的某一取值	确定的值,模糊集型
$\dot{e}'$	偏差率的实际值	清晰量
$\dot{e}$	偏差率的等级值变量	清晰量
$\{\dot{e}\}$	以 $\dot{e}$ 的为变元(遍历 $\dot{e}$ 的各个可能取值)的集合	常规集合,离散集合
$\dot{e}_j$	$\{\dot{e}\}$ 的第 j 个元素	清晰量,确定的值
$\dot{e}_{(\omega)}$	变量 $\dot{e}$ 的第 ω 个取值	清晰量,确定的值
$\dot{e}^*$	变量 $\dot{e}$ 的某一取值	清晰量,确定的值
$\dot{E}$	偏差率的语言变量	

续表

符 号	含 义	说 明
$\{E\}$	以 E 为变元(遍历 E 的各个可能取值)的集合	常规集合,离散集合
$\dot{E}$	变量 E 的模糊集表示	模糊集型变量
$\{\dot{E}\}$	以 $\dot{E}$ 为变元(遍历 $\dot{E}$ 的各个可能取值)的幂集	常规幂集(其元素均为模糊集),离散集合
$\dot{E}_m$	$\dot{E}$ 的第 m 个元素	确定的值,模糊集型
$\dot{E}_{(\omega)}$	变量 $\dot{E}$ 的第 ω 个取值	确定的值,模糊集型
$\dot{E}^*$	变量 $\dot{E}$ 的某一取值	确定的值,模糊集型
u'	控制作用(量)的实际值	清晰量
u	控制作用的等级值变量	清晰量
$\{u\}$	以 u 为变元(遍历 u 的各个可能值)的集合	常规集合
u_k	$\{u\}$ 的第 k 个元素	清晰量,确定的值
$u_{(\omega)}$	u 变量的第 ω 个取值	清晰量,确定的值
u^*	变量 u 的某一取值	清晰量,确定的值
U	控制作用的语言变量	
$\{U\}$	以 U 为变元(遍历 U 的各个可能取值)的集合	常规集合,离散集合
$\dot{U}$	变量 U 的模糊集表示	模糊集型变量
$\{\dot{U}\}$	以 $\dot{U}$ 为变元(遍历 $\dot{U}$ 的各个可能取值)的幂集	常规幂集(其元素均为模糊集),离散集合
$\dot{U}_n$	$\{\dot{U}\}$ 的第 n 个元素	确定的值,模糊集型
$\dot{U}_{(\omega)}$	变量 $\dot{U}$ 的第 ω 个取值	确定的值,模糊集型
$\dot{U}^*$	变量 $\dot{U}$ 的某一取值	确定的值,模糊集型
$E_l(e_i), E_l(i), \mu_{E_l}(e_i)$	e_j 对 E_l 的隶属度	
$\dot{E}_m(\dot{e}_j), \dot{E}_m(j), \mu_{\dot{E}_m}(\dot{e}_j)$	$\dot{e}_j$ 对 $\dot{E}_m$ 的隶属度	
$\dot{U}_n(u_k), \dot{U}_n(k), \mu_{\dot{U}_n}(u_k)$	u_k 对 $\dot{U}_n$ 的隶属度	
$A(x), \mu_A(x),$	x 对 A 的隶属度	
$\triangle$	定义为	

目 录

主要字母符号表

绪 论	(1)
第一章 基本模糊控制	(4)
1.1 基本模糊控制器的算法模型	(4)
1.1.1 数据库	(6)
1.1.2 元控制规则库	(10)
1.1.3 推理机	(16)
1.1.4 决策库	(24)
1.2 基本模糊控制器的运行模型	(28)
1.2.1 运行模型的系统图	(28)
1.2.2 论域变换	(29)
1.2.3 论域逆变换	(30)
1.3 基本模糊控制器的控制品质及其分析	(32)
1.3.1 基本模糊控制器的动态特性	(32)
1.3.2 基本模糊控制器的静态特性	(34)
1.3.3 基本模糊控制系统的稳定性	(38)
1.4 基本模糊控制的进一步研究	(42)
1.4.1 控制表的修正	(42)
1.4.2 构造控制表的简捷算法	(46)
1.4.3 几种模糊蕴涵关系	(50)
1.4.4 一种近似的推理方法	(52)
第二章 复合模糊控制	(56)
2.1 参数自调整模糊控制	(56)
2.1.1 权系数可调的模糊控制	(57)

2.1.2	运行参数可调的模糊控制	(67)
2.1.3	模糊控制器参数的优化	(71)
2.2	模糊 PID 控制	(77)
2.2.1	结构参数模糊自调整的 PID 控制	(77)
2.2.2	CRI- I 型模糊控制	(88)
2.2.3	三维输入变量模糊化的控制	(93)
2.2.4	关于四维模糊控制的设想	(109)
2.3	变结构模糊控制	(110)
2.3.1	档级可变的模糊控制	(112)
2.3.2	F/PID 控制	(117)
2.3.3	乐观/悲观规则模糊控制	(122)
2.4	自适应模糊控制	(127)
2.4.1	模糊辨识总论	(128)
2.4.2	辨识与建模的模糊推理合成法	(139)
2.4.3	模型参考自适应系统的模糊算法	(147)
2.4.4	基于模糊自适应信号的控制系统	(154)
2.4.5	基于模糊推理的自校正控制	(161)
2.4.6	自组织型模糊自适应控制	(166)
第三章	仿生模糊控制	(176)
3.1	神经网络模糊控制	(176)
3.1.1	神经模糊技术总论	(176)
3.1.2	采用 BP 算法的模糊控制	(182)
3.1.3	基于 CPN 神经网络的模糊控制	(187)
3.1.4	用 B 样条神经网络设计自适应模糊 控制器	(195)
3.2	遗传算法模糊控制	(204)
3.2.1	遗传算法简述	(205)
3.2.2	基于遗传算法的模糊控制器分析	(208)
3.2.3	基于遗传算法的模糊控制规则优化	(213)

3.2.4 基于遗传算法的多变量模糊控制	(216)
3.3 遗传算法同模糊神经网络技术的结合	(219)
3.3.1 杂交算法 GA-QP	(220)
3.3.2 并行的 GA-ACGNN 混合学习算法	(223)
3.3.3 GA-FNN 技术及其用于辨识 T-S 模糊 模型	(226)
第四章 工业模糊控制系统	(236)
4.1 粉末冶金中的模糊控制	(236)
4.1.1 被控对象的结构及控制任务	(236)
4.1.2 模糊控制器的设计	(237)
4.1.3 实用效果	(244)
4.2 高炉的模糊控制	(244)
4.2.1 对温控系统的基本要求	(245)
4.2.2 模糊控温专家系统的实现	(246)
4.3 雨水泵站的模糊控制	(251)
4.3.1 问题背景	(251)
4.3.2 泵站模糊控制系统	(252)
4.3.3 运行结果	(256)
4.4 水泥回转窑的模糊控制	(259)
4.4.1 模糊控制方案的建立	(260)
4.4.2 控制系统的实现	(267)
4.4.3 控制效果	(268)
第五章 交通模糊控制系统	(270)
5.1 汽车速度的模糊控制	(270)
5.1.1 车速模糊控制系统简介	(270)
5.1.2 车速模糊控制系统的实现	(271)
5.1.3 自学习功能	(275)
5.1.4 实测和仿真结果	(276)
5.2 模糊控制汽车防滑防撞系统	(278)

5.2.1	无人驾驶的模型汽车	(278)
5.2.2	汽车驾驶模糊控制演示的原理	(279)
5.2.3	避免碰撞的模糊控制方法	(284)
5.2.4	展望	(287)
5.3	城市交通系统的模糊控制及其神经网络实现	(288)
5.3.1	交通系统的特点及其模糊控制器的设计	(288)
5.3.2	模糊控制器的神经网络实现	(292)
5.3.3	仿真结果	(294)
5.3.4	结论	(295)
5.4	地铁自动运行的模糊控制	(295)
5.4.1	预测型模糊控制的原理	(297)
5.4.2	预测型模糊控制的实现	(297)
5.4.3	应用效果分析	(300)
第六章	模糊控制在经济中的应用	(303)
6.1	模糊控制用于确定财政收支的政策	(303)
6.1.1	设定模糊控制的关系表达式	(303)
6.1.2	政策模型的求解	(305)
6.2	模糊生产平衡	(309)
6.2.1	生产过程中的模糊性	(309)
6.2.2	生产平衡集的一些性质	(309)
6.3	动态投入产出模糊最优控制	(312)
6.3.1	模型的建立	(312)
6.3.2	FOC 问题的解	(314)
6.3.3	例子	(316)
第七章	模糊控制用于运筹决策	(318)
7.1	基于模糊控制的决策支持系统	(318)
7.1.1	模糊系统的整体描述及模糊控制器的结构	(318)
7.1.2	基于模糊控制的 DSS 系统	(321)
7.2	模糊控制与变权的确定	(323)

7.2.1 评价与权重	(323)
7.2.2 应用实例	(326)
第八章 家用电器的模糊控制算法	(331)
8.1 模糊控制洗衣机	(331)
8.1.1 测试机理	(331)
8.1.2 建立隶属函数及其在 MPU 中的表达	(332)
8.1.3 对“重量”的模糊识别	(334)
8.1.4 对“布质”的模糊识别	(336)
8.1.5 模糊推理规则与输出	(336)
8.2 模糊控制电冰箱	(337)
8.2.1 对精确值的模糊化处理	(339)
8.2.2 模糊推理规则的归纳	(341)
8.2.3 模糊量向精确量的转化	(342)
8.3 模糊控制空调器	(343)
8.3.1 模糊控制算法	(343)
8.3.2 软件设计	(345)
附录 模糊可拓经济控制	(347)
参考文献	(355)

绪 论

客观世界的万千现象可分成两类:确定性的和不确定性的,后一类又分为两小类:随机不确定性的和模糊不确定性的。比如说,“明天有八成可能要下大雨”,这句话中的“八成可能”属于随机不确定性,而“大”属于模糊不确定性。相应地,出现了三类数学:普通数学处理确定性现象,概率论和统计数学处理随机不确定性现象,而模糊数学(模糊集理论)处理模糊不确定性现象。普通数学中的经典集合论涉及的概念是硬划分的:“非此即彼”。例如,平谷县属于北京市,而不属于天津市,这是个清晰概念,因此,经典集合是清晰集合。然而,模糊数学涉及的概念是软划分的:“亦此亦彼”。例如,“大”和“小”,其划分是相对的,不分明的,于是诞生了模糊集理论。

模糊集理论中的“模糊(Fuzzy)”一词,源于词根“Fuzz(绒毛)”,本意为“绒毛状的”,或转义为“边界不分明的”。模糊集理论在我国经历了20多年的发展,众多文献中都约定俗成地使用“模糊”这个译名。所谓的模糊控制,当然不能理解为“模模糊糊的控制方法”。或“不精确的控制方法”。实际上,模糊控制是采用模糊集理论对一类不确定性系统(模糊系统)进行有效控制的方法。

日常生活中,我们遇到的模糊控制实例比比皆是。例如,司机驾驶汽车时,便是根据“快点”或“慢点”、“向左点”或“向右点”等等判断,而穿行于拥挤的市区道路上,以期安全地到达目的地。在此,实施的是以模糊语言规则为控制算法的简单有效的自动控制。

在现实世界,大多数系统都是不确定性的,或者说,都带有或多或少的不确定性,即不确定性的存在是绝对的。只有在施以某种近似的前提下,传统的确定性控制方法才有用武之地。于是,无

需依赖被控制对象精确数学模型的模糊控制便应运而生了。

1. 模糊控制的兴起

英国伦敦大学教授 E.H.Mamdani 于 1974 年在实验室研制成功锅炉和蒸汽机模糊控制系统^[1],通常都以此作为模糊控制发展史上的第一里程碑。实际上,模糊集理论的奠基者、美国 California 大学教授 L.A.Zadeh 在此前的 1972 年和 1973 年先后发表的两篇论文^[2,3]中,已系统地提出了模糊控制原理。

从此,模糊控制蓬勃发展,研究成果和学术论文层出不穷,令人目不暇接。更为可喜的是,模糊控制从诞生之日起,就走上了理论密切联系实际的健康大道,广泛深入到各个领域,用之于实际,扎根于实际,赖以茁壮成长。从本书的后几章可以看到,举凡工业过程控制、交通管理、经济系统、医疗诊断、运筹决策、乃至日常家用电器等诸多方面,模糊控制都大显身手,当前模糊产品热,也从一个侧面说明了这种情况。

2. 模糊控制发展的几个阶段

模糊控制的发展大体上可分成三个阶段:基本模糊控制、复合模糊控制和仿生模糊控制。

(1) 基本模糊控制

早期研制的模糊控制器均属此列,并仍在现今的一些较简单的模糊控制系统中应用。基本模糊控制以模糊语言逻辑控制为出发点,大都采用 L.A.Zadeh 教授提出的模糊关系合成推理规则,即 CRI 方法(Compositional Rule of Inference)^[4]进行推理,以得出控制决策;E.H.Mamdani 教授率先以 Max-Min 运算用之于他的第一个模糊控制系统中,因此,此法又通称 Max-Min 法。

随后,不少学者对基本模糊控制的雏型不断改进,提出了一系

列优化性能、简化运算的方案,极大地丰富了基本模糊控制的内容(详见本书的第一章)。

(2) 复合模糊控制

“承上启下,继往开来”,是发展人类文明的必由之路,也是发展任何一种科学技术的必由之路,模糊控制的发展也是这样。从经典控制理论到现代控制理论,历经几十年的研究与实践,传统控制方法已积累了丰富的、有价值的知识和经验;另一方面,基本模糊控制在发展进程中也逐渐暴露了自身的某些局限性和不足之处。何以解脱?唯一的出路是:模糊控制同传统控制相结合,扬长补短,为虎添翼,于是,进入了复合模糊控制阶段(详见本书第二章)。

(3) 仿生模糊控制

生物界,从低级生物到高级生物,特别是人,无一不是简单有效的自动控制系统——貌似简单的、实为高级的自动控制系统。理所当然地,自动控制领域的专家学者们日益向往仿生控制,而本世纪末仿生学的巨大发展也提供了逐步实现这一理想的有利条件。

近几年来,首先是神经网络理论的系统化和完善化,促进了神经网络控制,包括神经网络模糊控制的发展,紧接着是进化计算,特别是作为其发展主流的遗传算法(即基因算法)的蓬勃兴起,为仿生模糊控制的发展注入了新活力。这两方面的内容,都可以在本书的第三章中读到。

第一章 基本模糊控制

模糊控制系统的简化框图如图 1.1.1 所示,其中 x' 是被控参数的实测值,是某种物理量(例如温度)的瞬时值; x_s 是 x' 的期望值(设定值),而 $e' = x_s - x'$ 是 x' 对 x_s 的偏离程度,称偏差值,它是模糊控制器的输入变量;此控制器的输出变量是送往执行机构的控制作用量 u' 。在这儿,诸物理量 x' , x_s , e' 和 u' 都是清晰值。

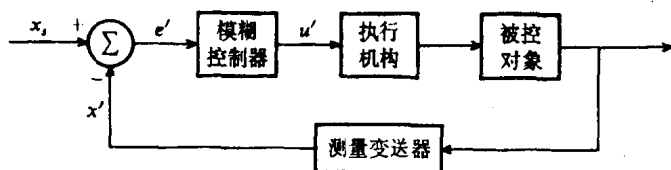


图 1.1.1 模糊控制系统的框图

图 1.1.1 是典型的偏差模糊控制系统框图,该系统的核心部分是模糊控制器,也就是本章讨论的基本模糊控制器。

1.1 基本模糊控制器的算法模型

当前通用的基本模糊控制器都是按偏差值 e' 以及偏差(变化)率 $\dot{e}' = de'/dt$ 来进行控制,它一般包括图 1.1.2 所示的众多功能块,分别隶属于模糊控制器算法模型(离线子系统)和模糊控制器运行模型(在线子系统)两大部分。

由图 1.1.2 不难看出,如此复杂结构的设计工作量是相当繁重的,而且主要集中于前一部分——模糊控制器算法模型的建造,本章从这里开始讨论。

如图 1.1.2 所示,语言值数据库提供三组数据:语言值偏差

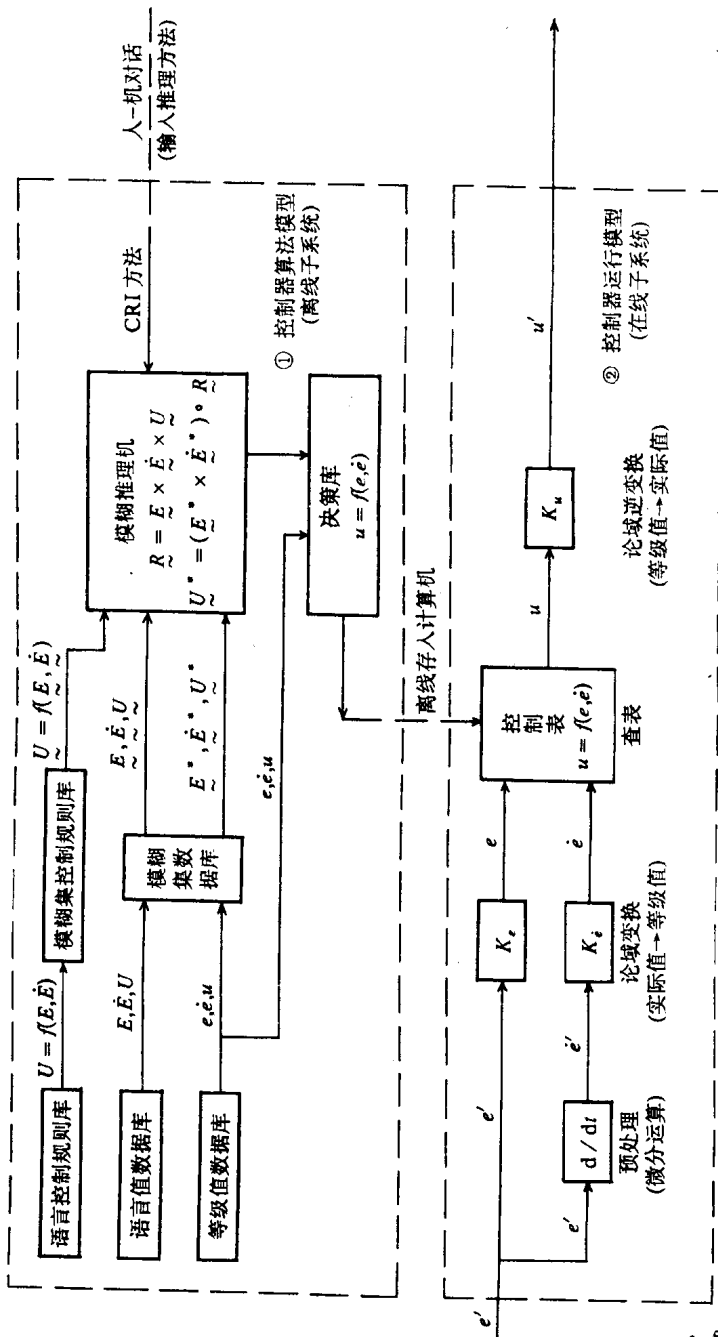


图 1.1.2 基本模糊控制器总体结构

E , 语言值偏差率 $\dot{E}$ 和语言值控制(作用)量 U 。为了进行定量运算,我们将之送入模糊集数据库,同时还要送入等级值数据库中三组数据:等级值偏差 e 、等级值偏差率 $\dot{e}$ 和等级值控制量 u 。模糊数据库输出的三组数据为:模糊集型偏差 $\underline{E}$ 、模糊集型偏差率 $\underline{\dot{E}}$ 和模糊集型控制量 $\underline{U}$ 。三者都送入模糊推理机,当然,还必须输入相应的模糊集控制规则 $\underline{U} = f(\underline{E}, \underline{\dot{E}})$,它同来自语言控制规则库的语言控制规则 $U = f(E, \dot{E})$ 一一对应。

本节介绍的模糊推理机按 CRI 方法,即 Max-Min 法进行推理,这将在随后的章节中详细介绍。推理的目的在于建成决策库,即制成控制表 $u = f(e, \dot{e})$,以便离线存入计算机中。至此,控制器算法模型(离线子系统)的任务即告完成。

1.1.1 数据库

如上所述,图 1.1.2 所示的模糊控制器算法模型涉及三类数据:(模糊)语言值数据、等级值数据和模糊集数据。

1. 语言值数据

通常把语言值数据分为 7 档或 8 档^[5],请参见例 1.1。

例 1.1 令偏差的语言值变量 E 取如下的 8 档:

$$\begin{aligned}\{E\} \triangleq \{E_l\} &= \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8\} \\ l &\in L, L = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} \\ &= \{\text{负大}_E, \text{负中}_E, \text{负小}_E, \text{负零}_E, \text{正零}_E, \text{正小}_E, \text{正中}_E, \text{正大}_E\} \\ &= \{NB_E, NM_E, NS_E, NO_E, PO_E, PS_E, PM_E, PB_E\} \quad (1.1.1)\end{aligned}$$

式中,符号 $\triangleq$ 表示“定义为”,下标集 L 是以前 8 个自然数为元素的常规集合。在式(1.1.1)中,区分开 NO(负零)和 PO(正零),其目的在于提高稳态精度。

令偏差率语言值变量 $\dot{E}$ 和控制作用语言值变量 U 取如下的 7 档: