基于突变理论的维修保障系统效能评估研究

杨　懿，　武　昌，　齐胜利

(空军工程大学电讯工程学院，陕西西安 710077)

摘要：基于突变理论，采用突变评价法对空军通信装备维修保障系统效能评估的方法进行了研究，并与层次分析法的结果进行了比较，结论基本一致。为维修保障系统的效能评估寻求出一种新的方法，其评估结果可为决策提供定量依据。

关键词：突变理论；维修保障系统；效能评估

中图分类号：E92　　文献标识码：A　文章编号：1009-3516(2005)05-0027-06

突变理论[1]是一门新兴的、主要由结构稳定的拓扑概念发展而来的数学分支，以非连续事件为研究对象，以系统结构稳定性研究为基本出发点。突变理论的基本特点是根据一个系统的势函数将系统的临界点分类，研究分类临界点附近非连续性态的特征，从而归纳出若干个初等突变模型，并以此为基础探索自然和社会中的突变现象。

根据拓扑学原理构造突变理论的数学模型，对形形色色的突变现象进行分类。可以证明当控制变量的个数不超过4时，只有7种基本的突变模型(折迭型、尖点型、燕尾型、蝴蝶型、双曲型、椭圆型和抛物型)。对于突变模型的势函数 $v(x,c)$，根据突变理论，它的所有临界点集合可由 $v'(x,c)=0$ 得出，成一平衡曲面，并与 $\det v''(x,c)=0$ (奇点集)联立消去 x 得到突变模型的分歧点集方程，分歧点集方程是由状态变量表示的反映状态变量与各控制变量之间关系的分解形式，表明诸控制变量满足此方程时就会发生突变。

维修保障系统是由实施装备维修的所有维修保障要素经过综合和优化的总体，是一个对象复杂、要素众多、环境多变的系统[2]。本文基于突变理论，采用突变评价法对维修保障系统效能进行了评估，并与层次分析法的结果进行了比较，结论基本一致，为解决军事领域的类似效能评估问题提供了一种新思路。

1　突变评价法的基本步骤

突变评价法是在突变理论基础上发展起来的一种综合评价方法，其核心是利用突变理论中分解形式的分歧点集方程推导出归一公式，归一公式是利用突变理论进行综合分析和评价的递归运算法则，其实质是一种多维模糊隶属函数，可将系统内部各控制变量不同的质态化为同一种可比较的质态，即化为状态变量表示的质态。并由归一公式对系统进行综合量化递归运算，最后求出表征系统状态特征的总突变隶属函数值，进而进行综合评价。

1.1　按突变评价法构造评价指标体系

按评价对象的内在作用机理，从评价总指标到下层指标再到下层子指标，将评价对象进行多层分组(或分解)为由若干评价指标组成的目标层次结构，原始数据只需要知道最下层子指标的数据即可。将一个指标进行分解是为能获得更具体的指标从而便于量化。当分解到对某子指标可以量化时，分解即可停止。评价指标确定后，评价者可根据经验(定性)确定各指标的重要性，在同一属性、同一层次的指标中，重要程度相对大的指标放在前面，相对次要的指标放在后面，这样就解决了权重确定的困难。同时，由于一般突变系

收稿日期：2005-04-20
基金项目：军队科研基金资助项目
作者简介：杨　懿(1978-)，男，陕西西安人，博士生，主要从事军事系统工程研究；
武　昌(1944-)，男，辽宁沈阳人，教授，博士生导师，主要从事军事装备学研究.

统的控制变量不超过 4 个,所以相应的各层指标(相当于控制变量)不要超过 4 个。

1.2 评价指标突变类型的识别

系统势函数的状态变量和控制变量是矛盾的 2 个方面。运用突变评价法时,较常用的是尖点突变、燕尾突变及蝴蝶突变模型(皆为一个状态变量的突变模型),见表 1。一般情况,如果 1 个指标分解为 2、3 或 4 个子指标,则可分别视为尖点突变、燕尾突变或蝴蝶突变。

表 1 常用突变模型及控制变量对突变作用的重要性排序

类型	势函数 $v(x)$	分歧集方程	归一公式	控制变量重要性排序
尖点模型	x^4+ax^2+bx	$a=-6x^2$ $b=8x^3$	$x_a=a^{1/2}$ $x_b=b^{1/3}$	x a b
燕尾模型	$\frac{1}{5}x^5+\frac{1}{3}ax^3+\frac{1}{2}bx^2+cx$	$a=-6x^2$ $b=8x^3$ $c=-3x^4$	$x_a=a^{1/2}$ $x_b=b^{1/3}$ $x_c=c^{1/4}$	x a b c
蝴蝶模型	$\frac{1}{6}x^6+\frac{1}{4}ax^4+\frac{1}{3}bx^3+\frac{1}{2}cx^2+dx$	$a=-10x^2$ $b=20x^3$ $c=-15x^4$ $d=4x^5$	$x_a=a^{1/2}$ $x_b=b^{1/3}$ $x_c=c^{1/4}$ $x_d=d^{1/5}$	x c d a b

注:x 为状态变量;a、b、c、d 为控制变量。突变模型的内在机制决定控制变量的重要性由左至右排列。

1.3 确定底层评价指标的评分

对底层指标(控制变量)进行原始数据规格化,得到初始模糊隶属函数值。在归一公式中,控制变量 a,b,c,d 表征的是状态变量 x 不同方面特征,其原始数据取值范围和度量单位各不相同,它们之间无法进行相互比较。因此,在使用归一公式之前,应依据突变理论综合评判的要求,将控制变量的原始数据转化到[0,1] 取值范围内的越大越好型无量纲可比较数值,即对控制变量进行原始数据规格化。

无论是定量指标,还是定性指标大多属于模糊变量,底层指标原始数据规格化也存在着一定的模糊性,因此将其称为初始模糊隶属函数值。各指标中的定性指标,可以通过区间打分法等各种打分方法由多位专家评分后确定原始数据。同时,无论指标为效益型(越大越优型)指标还是成本型(越小越优型)指标,都可通过标准化处理将其转换为[0,1] 取值范围内的越大越优型指标值。具体标准化处理形成初始模糊隶属函数值方法如下[3]:

$$\text{效益型指标:}\begin{cases} y_{ij}=\dfrac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \\ y_{ij}=\dfrac{x_{ij}}{\max(x_{ij})+\min(x_{ij})} \\ y_{ij}=\dfrac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \end{cases};\qquad \text{成本型指标:}\begin{cases} y_{ij}=\dfrac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \\ y_{ij}=1-\dfrac{x_{ij}}{\max(x_{ij})+\min(x_{ij})} \\ y_{ij}=\dfrac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \end{cases}$$

其中,所有 $x_{ij}\geqslant 0, i=1,2,\cdots,m$ (m 为指标数);$j=1,2,\cdots,n$ (n 为评价对象数)。

1.4 利用归一公式进行量化递归运算

根据初始模糊隶属函数值,按表 1 中的归一公式可以计算出各控制变量的相应中间值,称为突变级数值。利用系统中各突变模型的归一公式逐步向上综合,直至得到最高层的总突变隶属函数值。

利用突变理论进行模糊综合评价时,必须考虑两个原则,即"互补"与"非互补"原则。若同一对象各控制变量(如 a,b,c,d 等)之间不存在明显的相互关联作用,则称该对象各控制变量为"非互补"型,否则称该对象各控制变量为"互补"型。

根据多目标模糊决策理论,对同一方案,在多种目标情况下,如设 $A_1,A_2,\cdots,A_m$ 为模糊目标,则理想的策略为 $C=A_1\cap A_2\cap\cdots\cap A_m$,其隶属函数 $\mu_c(x)=\mu_{A_1}(x)\wedge\mu_{A_2}(x)\wedge\cdots\wedge\mu_{A_m}(x)$ (其中 μ_{A_i} 为 A_i 的隶属函数)

因而利用归一公式对同一对象各控制变量(指标)计算出的对应 x 值按"大中取小"的原则取值,即从诸控制变量相应的突变级数值中选取最小值作为系统的 x 值,$x=\min\{x_a,x_b,x_c,x_d\}$。但对于互补型的指标,

通常对应的 x 按平均值法取值,即取诸控制变量相应突变级数值的平均值作为系统的 x 值,$x=(x_a+x_b+x_c+x_d)/4$。可以从理论上证明,只有遵循上述原则,才能满足突变理论中分歧点集方程的要求。

1.5　综合评价

根据多目标模糊决策理论,对不同的方案 $C_1,C_2,\cdots,C_n$,记方案 C_i 的隶属函数为 $\mu_{c_i}(x)$。对方案 C_i 和方案 C_j,若 $\mu_{c_i}(x)>\mu_{c_j}(x)$,则表示方案 C_i 优于方案 C_j。由于在突变评价法中,系统诸控制变量的初始模糊隶属函数值和突变级数值均转化为[0,1]取值范围内的越大越优型指标值,因此,对各评价对象按其总评价指标的得分大小进行优劣排序,最终的总突变隶属函数值越大越优。突变评价法流程图如图1所示。

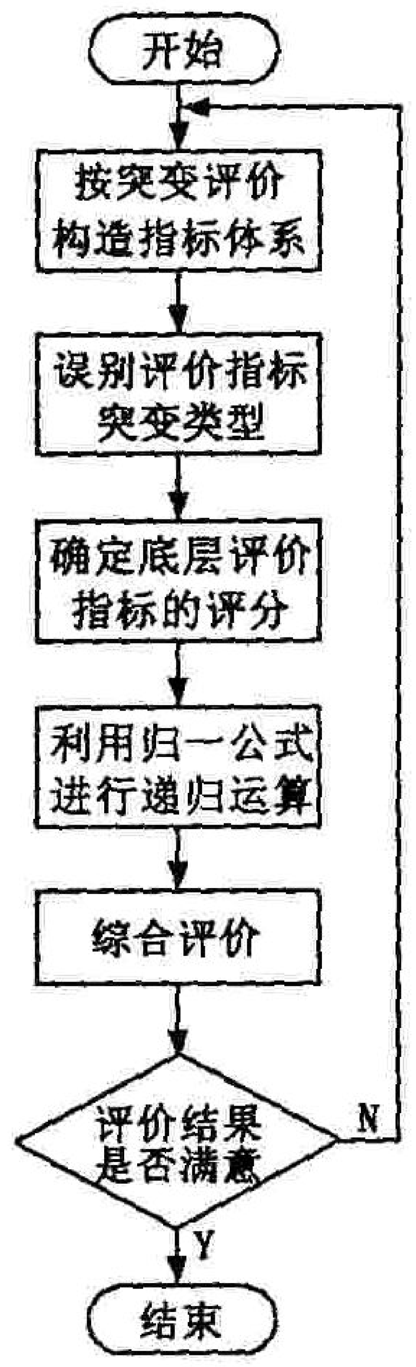

图1　突变评价法流程图

2　维修保障系统效能评估指标体系

建立指标体系,是对系统效能评估中涉及到的一系列评估要素,按照一定的结构层次关系进行排列组合,使其成为一个有机的整体。完整的评估指标体系是系统整体综合能力的集中体现。建立科学合理的评估指标体系是维修保障系统效能评估研究中较为关键的一环,是对维修保障系统进行评价的重要基础和依据[1]。

2.1　指标体系构建思路

维修保障系统是一个具有多层次结构的、复杂的开放系统,是自然系统(人)和人造系统的混合,由人力资源、物质资源、信息资源和维修管理等4部分组成。同时,维修保障系统还受环境系统(软环境、硬环境和自然环境)等的影响。指标体系的内涵应该反映这一结构上的特征。

在构建维修保障系统效能评估指标体系时,系统对应于一个复杂的问题,将该复杂问题通过不断细化成较小的问题,即将大系统分解成分系统,并且根据分问题的复杂程度不同再决定是否需要进一步细分,当问题的粒度符合评估的要求或者问题的粒度已经达到了对其能做较好描述的时候,问题就不需要再进一步细分。从维修保障系统这样一个复杂的大问题细化到适合描述和评估的小问题,其过程是通过不断缩小问题的粒度以构建出维修保障系统效能评估指标体系模型。

2.2 指标体系构建的原则

维修保障系统是一个复杂的系统,构建其效能评估指标体系是一项很困难的问题。在构建时,评估指标的范围越宽,数量越多,确定评估指标的重要顺序就越难,处理和建模的过程就越复杂,歪曲系统本质特性的可能性就越大。因此,必须遵循以下几项基本原则以得到科学的评估指标体系。

科学性原则:运用科学的方法,对维修保障系统的功能、各要素之间的联系进行分析研究,并结合部队的实际情况确定,使所设置的指标名称及涵义、计算途径和方法等建立在科学分析的基础上。

系统性原则:指标体系应能全面系统地反映被评估对象各方面的特征和综合情况,从中抓住主要因素,既能反映直接效果,又能反映间接效果,以保证综合评估的全面性和可信性。

完备性原则:指标体系的完备性包括充分性和必要性两个方面。在选择指标时,应作到任何一个指标下的子指标,不仅最能反映系统的主要性状,充分全面地刻画该指标的特性,而且任何一个子指标的放弃都将影响到这种刻画。

互斥性原则:各指标之间不能相容,具有时空可比性,即不能相互代替或包含。有些相关指标反映的内容可能出现交叉,但相关并不等于相容,指标体系中允许相关指标的存在,但不允许相容指标的并存。

可行性原则:指标体系各指标的含义要通俗易懂,并且指标数据的收集有统计基础,能得到相关信息资料的支持,便于计算。尽量选用定量指标,对于不能量化的定性指标应明确其内涵。

简洁性原则:尽量采用有代表性的重要指标作为系统的评价尺度,既简明扼要,又疏而不漏,避免包罗万象,繁琐复杂。

2.3 指标体系的结构框架

在构建空军通信装备维修保障系统效能评估指标体系工作的过程中,为使条目众多、影响不一、标准不同的定性指标在参与评估后能最终给出清晰、直观的定量结果,我们从空军通信装备维修保障系统的客观性出发,通过详尽、全面地收集和研究有关的信息和数据,运用从定性到定量的综合集成方法,组织专家进行广

泛的调查研究和系统分析,依据专家调查法的步骤,通过匿名调查和公开讨论,反复交流信息,统计处理、综合归纳,从而按照全面完整、层次分明、简明科学的原则,并根据突变评价法的要求(重要指标放在上面,次要指标放在下面),提出了空军通信装备维修保障系统效能评估指标体系,如图 2 所示。

- 维修保障系统效能
  - 人力资源
    - 技术人员
      - 称职率
      - 编配率
    - 管理人员
      - 称职率
      - 编配率
  - 维修管理
    - 质量管理
      - 装备失修率
      - 装备返修率
    - 资源管理
      - 人员参训率
      - 器材完好率
      - 仪表、设备、设施完好率
    - 经费管理
      - 使用有效率
      - 到位率
  - 物质资源
    - 维修器材
      - 数量配置率
      - 种类配套率
    - 维修用仪表、设备、设施
      - 种类配套率
      - 数量配置率
  - 信息资源
    - 技术资料
      - 种类配套率
      - 数量配置率
    - 计算机软件
      - 可用率
      - 配套率

图 2 空军通信装备维修保障系统效能评估指标体系

3 示例

突变评价法是一种新的综合评价方法,在一种新的评价方法出现时,人们普遍关心的问题是这种评价方法的评价结果是否可靠,是否具有实用价值。为此,本文利用图 2 所示的系统效能评估指标体系,对同一对象采用比较成熟的结合 AHP 与常权综合法的计算程序,与突变评价法计算程序分别计算,将两者所得的评估结果进行比较,判断两者的评估结果是否一致。若两者的评估结果基本一致,则有理由认为突变评价法的结果是基本可靠的。5 个拟进行效能评估的维修保障系统基本数据如表 2 所示。

运用突变评价法进行维修保障系统效能评估时,最上层为总的效能评估指标记为 A; 第 2 层由 4 个指标构成,依次记为 $B_1, B_2, \cdots, B_4$,呈蝴蝶突变型;第 3 层由 9 个指标构成,依次记为 $C_1, C_2, \cdots, C_9$,自上至下呈尖点突变型、燕尾突变型、尖点突变型和尖点突变型;最下层由 19 个指标构成,依次记为 $D_1, D_2, \cdots, D_{19}$,其中,D_7, D_8, D_9呈燕尾突变型,其余均呈尖点突变型;D_5, D_6为成本型指标,其余各指标均为效益型指标。并且指标体系中指标 D_5 与 D_6、D_{10}与 D_{11}、D_{18}与 D_{19}为非互补型,其余均为互补型。

表 2 维修保障系统效能原始及规格化评估数据

维修保障系统效能评估指标	指标权重	系统 1	系统 2	系统 3	系统 4	系统 5
技术人员称职率	0.098 5	0.5/0.5	1.0/1.0	0.6/0.6	0.7/0.7	0.8/0.8
技术人员编配率	0.076 6	0.85/0.85	0.85/0.85	1.0/1.0	0.7/0.7	0.7/0.7
管理人员称职率	0.076 6	0.9/0.9	0.9/0.9	0.8/0.8	0.7/0.7	1.0/1.0
管理人员编配率	0.059 6	0.9/0.9	0.9/0.9	0.9/0.9	1.0/1.0	0.7/0.7
装备失修率	0.054 0	0.25/0.8	0.25/0.8	0.2/1.0	0.3/0.666 7	0.35/0.571 4
装备返修率	0.036 0	0.25/0.8	0.25/0.8	0.3/0.666 7	0.2/1.0	0.4/0.5
人员参训率	0.036 6	0.75/0.75	0.75/0.75	0.8/0.8	1.0/1.0	0.8/0.8
器材完好率	0.036 6	0.75/0.75	0.75/0.75	1.0/1.0	0.7/0.7	0.8/0.8
仪表、设备、设施完好率	0.028 4	0.8/0.8	0.8/0.8	0.7/0.7	0.8/0.8	1.0/1.0
经费使用有效率	0.044 8	0.75/0.75	0.75/0.75	0.7/0.7	1.0/1.0	0.9/0.9
经费到位率	0.034 8	0.7/0.7	0.7/0.7	0.7/0.7	0.8/0.8	1.0/1.0
器材数量配置率	0.075 3	0.85/0.85	0.85/0.85	0.8/0.8	1.0/1.0	0.7/0.7
器材种类配套率	0.058 6	0.9/0.9	0.9/0.9	1.0/1.0	0.7/0.7	0.9/0.9
维修仪表、设备、设施种类配套率	0.058 6	0.85/0.85	0.85/0.85	0.8/0.8	0.8/0.8	1.0/1.0
维修仪表、设备、设施数量配置率	0.045 5	0.85/0.85	0.85/0.85	0.8/0.8	1.0/1.0	0.9/0.9
技术资料种类配套率	0.064 6	0.85/0.85	0.85/0.85	0.8/0.8	1.0/1.0	0.9/0.9
技术资料数量配置率	0.043 1	0.85/0.85	0.85/0.85	0.8/0.8	0.8/0.8	1.0/1.0
计算机软件可用率	0.043 1	0.7/0.7	0.7/0.7	0.8/0.8	0.8/0.8	1.0/1.0
计算机软件配套率	0.028 7	0.5/0.5	1.0/1.0	0.6/0.6	0.7/0.7	0.8/0.8

注:“/”前表示原始数据,“/”后表示规格化变换后的数据。各指标权重通过专家调查法和层次分析法计算得出。

突变评价法计算过程按照图 1 所示流程,将最下层各指标原始数值利用规格化变换公式 $y_{ij}=x_{ij}/\max(x_{ij})$ 和 $y_{ij}=\min(x_{ij})/x_{ij}$ 转换为[0,1]之间的数,其中,$i=1,2,\cdots,m$ ($m=19$ 为指标数);$j=1,2,\cdots,n$($n=5$ 为拟进行效能评估的维修保障系统数)。然后利用各突变系统的归一公式逐步向上综合,直至得到最高层"维修保障系统效能"评估指标,主要计算结果见表 3。

表 3　维修保障系统效能评估结果

评估的维修保障系统	结合 AHP 与常权综合法 效能评估值	名次	突变评价法 效能评估值	名次
系统 1	0.785 815	5	0.986 835 9	5
系统 2	0.849 415	1	0.990 018 9	1
系统 3	0.810 080 1	4	0.987 320 5	4
系统 4	0.827 719 9	3	0.989 256 7	3
系统 5	0.833 977 2	2	0.989 704 1	2

以维修保障系统 1 为对象,从第 3 层开始计算至最终结果为例,说明具体计算过程:

指标 C_1、C_2(互补)有:$x_{B_1}=(x_{C_1}^{1/2}+x_{C_2}^{1/3})/2=(0.827\ 2^{1/2}+0.957\ 1^{1/3})/2=0.947\ 5$;

指标 C_3、C_4、C_5(互补)有:$x_{B_2}=(x_{C_3}^{1/2}+x_{C_4}^{1/3}+x_{C_5}^{1/4})/3=(0.894\ 4^{1/2}+0.906\ 8^{1/3}+0.866\ 0^{1/4})/2=0.959\ 4$;

指标 C_6、C_7(互补)有:$x_{B_3}=(x_{C_6}^{1/2}+x_{C_7}^{1/3})/2=(0.943\ 7^{1/2}+0.934\ 6^{1/3})/2=0.974\ 6$;

指标 C_8、C_9(互补)有:$x_{B_4}=(x_{C_8}^{1/2}+x_{C_9}^{1/3})/2=(0.934\ 6^{1/2}+0.793\ 7^{1/3})/2=0.946\ 3$;

指标 B_1、B_2、B_3、B_4(互补)有:$x_A=(x_{B_1}^{1/4}+x_{B_2}^{1/5}+x_{B_3}^{1/2}+x_{B_4}^{1/3})/4=0.986\ 835\ 9$。

其它对象的计算类似,根据总评估指标"维修保障系统的效能"的得分(x_A)大小排出相应名次,并与 AHP 与常权综合法相结合的方法进行比较(结果见表 3)。其中,运用 AHP 与常权综合法相结合的方法进行维修保障系统效能评估时,通过专家调查法和层次分析法计算得出各指标权重,并采用 $E=\sum_{i=1}^{19}\omega_i x_i$(其中,$E$ 为维修保障系统的效能,其理想值为 1;ω_i 为各指标的权重系数;x_i 为经过标准化处理后的指标值)计算线性加权值。

4　结束语

本文利用突变理论将定性与定量评估相结合,对维修保障系统效能进行了评估。在定性评估上考虑了评估指标的相对重要性,避免了直接使用难于确定且主观性较大的"权重"概念;在定量评估上由于归一公式在一定程度上反映了评估指标之间的内在矛盾、地位和机制,各指标根据归一公式本身确定量化值,从而相对地减少人为主观性而又不失科学性和合理性。实例表明,本文所采用的方法是合理、客观而可行的,并且计算公式和计算步骤简便快捷,便于实际应用,为解决军事领域的类似效能评估问题提供了一种新思路。

参考文献:

[1] 谭跃进,周曼殊. 系统学原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1996.

[2] 张所新. 空军通信装备维修保障系统效能评估研究[D]. 西安:空军工程大学,2001.

[3] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

[4] 勒内. 托姆. 突变论:思想和应用[M]. 上海:上海译文出版社,1998.

[5] 谷新建,柴红保. 应用突变评价理论选择采矿方法[J]. 中国安全科学学报, 2004,14(7):13-15.

[6] 黄继东,郭有全,黄　飞. 层次分析法在地空导弹团战斗力评估中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2004,5(1):80-83.

(编辑:门向生)

Abstract:Based on catastrophe theory, catastrophe evaluation is used to study the effectiveness evaluation method of maintenance support system of air force communication equipment, and compared with the results of AHP, the conclusions are accordant on the whole. This study provides a new method for effectiveness evaluation of maintenance support system and a quantitative basis for decision.
Key words:catastrophe theory; maintenance support system; effectiveness evaluation

(上接第13页)

6 结论

变论域自适应模糊PID控制方法是在模糊控制和模糊PID控制的基础上,引入变论域思想,并通过对输入变量加入伸缩因子的方式来实现变论域的目的;同时采用基于函数模型的伸缩因子选取方法,进行复杂非线性大系统仿真,取得了较好的效果,达到了期望的目的。相对于模糊控制和模糊PID控制,其自适应能力和抗干扰能力明显增强。

参考文献:

[1] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学E辑,1999,29(1):32-42.
[2] 章卫国. 模糊控制理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
[3] 李洪兴. 非线性系统的变轮域稳定自适应模糊控制器[J]. 中国科学E辑,2000,32(2):211-223.
[4] He Shi-Zhong, Tan Shaohua, Hang Chang-Chieh, et al. Control Dynamical Processes Using an On-line Rule-Adaptive Fuzzy Control System[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 54:11-22.
[5] Malki H A, Li H, Chen G. New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems[J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst, 1994, 2:245-254.

(编辑:门向生)

The Study and Simulation of Fuzzy PID Based on Mutative Field

ZHU Yah, GUO Jun-ping
(School of Electronics and Information Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi' an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: From the point of view of the optimization in fuzzy control, the idea of variable domain and the concept of flex factor are discussed. At the same time the preponderance of variable domain and the relationship between the quantization factor, the proportional factor and the flex factor are explained. In addition, the method of selecting the two flex factors is analyzed in detail. Another new intelligence control means - fuzzy logic adjusting PID online based on variable domain on self - adaptation is realized by putting the idea of variable domain into fuzzy PID. The research is based on some complicated nonlinear system, and the result of simulation is predominant.
Key words: variable domain ; flex factor; fuzzy control ; self - adaptation ; simulation