

非公式计算机机械设计参数决策专家系统的一种推理模型

殷国富

赵汝嘉

(成都科技大学) (西安交通大学)

摘 要

This paper, based on the theory of expert system techniques and the features of parameter decision-making of non-formulas computation in design of mechanical products, deals with the representation method of uncertain knowledge and introduces that the authors develop a new reasoning model that combines qualitative analysis of rule inference with algorithm of fuzzy comprehensive evaluation. Examination by living examples shows that the inference model is reasonable and can carry out automatic decision-making of design parameters in higher accuracy.

一 问题的提出

机械产品设计过程中的一项重要工作是决策若干参数。参数获取的主要途径有两条，一是用精确的数学公式（有的也是经验公式）计算，即定量分析法；二是依据并不完全确定的设计环境条件、经验知识和基本准则，经综合考虑后从设计规范的参数集合中，选择设计者认为“比较合理”的具体值。

这是一种定性分析法，在工程设计中是大量存在的，例如选择零件材料的极限应力、安全系数、许用位移、动载荷系数等。此类参数决策问题抽象描述如下：

设参数决策所涉及的因素全体构成论域 $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ ，参数决策就是根据对决策因素的综合评判，从某一离散数据集合 $\Omega = (v_1, v_2, \dots,$

同的表示方法：一阶谓词逻辑；框架结构；产生式规则等等。

3. 推理

根据各种不同问题的性质，我们采用了正向推理和反向推理两种方法。每种方法中都包含精确推理和不精确推理。

4. 系统的具体实现

我们以PROLOG语言为工具，在与IBM兼容的T1100计算机上实现。在实现过程中，由于该语言对于机器的内存容量限制很大（只有61K），我们采用了模块覆盖技术并灵活运用“/”操作，合理地解决了时间与空间的矛盾。

四、运行效果

该系统在某集团军的两次战役演习中，受到了比较全面的检验，实践证明，系统设计思想先进，

合理；运行稳定、可靠；结论科学、可信。曾受到总参韩怀智副总长、海军刘华清司令员、李耀文政委及国防大学等院校专家们的高度评价，并在1986年全军软件评比中荣获最高奖（二等奖）。

参考文献

- [1] N. J. 尼尔逊《人工智能原理》科学出版社 1984.
- [2] 史忠植, 杨至成, 方健梅“知识工程”《计算机学报》1986, 4.
- [3] Frederick, Hayes-Roth, Donald A. Waterman and Douglas B. Lenat. 《Building Expert Systems》1983.
- [4] Paul R. Cohen and Edward A. Feigenbaum 《The handbook of Artificial Intelligence》Vol. II 1982.

v_n) 或某一连续区间 $\Omega = [v_a, v_b]$ 中选定某个元素作为设计依据, 本文把 Ω 称为参数备择集, 从集合论的观点来看, 参数决策可以认为是从 E 到 Ω 的映射, 这种映射必须以工程设计知识和经验为基础, 这类参数决策问题有如下特点:

- 参数备择集 Ω 是人们实践经验总结的结果;
- 选择参数的原则、因素指标常常是不确定的或模糊的;
- 尽管决策的信息是不精确和非量化的, 而决策的结果却要求是有一定精度和唯一的值;
- 这类参数对设计结果的优劣常常起着较为主要作用。

在现行的机械设计CAD系统中, 这类问题通常采用交互方式, 由使用者根据自己的经验知识给出具体的参数值, 因此, 设计结果的质量在很大程度上依赖于设计人员的素质。如何使这类决策自动化并尽可能最优, 是CAD技术进一步发展所必须解决的问题, 近年来国内外不少学者把专家系统技术引入机械工程领域, 进行智能CAD系统的开发研究^[1], 从质上提高CAD的应用深度, 从量上扩充CAD的应用范围。本文利用专家系统技术, 提出了不确定知识本身可信度和知识引起操作的可能度分布函数综合描述的概念以及可能度分布函数的自动确定方法, 构造了基于知识的逻辑推理和定量分析计算相结合的推理模型, 能在较高精度上对非公式计算参数进行自动决策。

二 参数决策知识的描述

根据对设计专家进行参数决策的思维过程的分析可知, 决策的依据主要体现在三种形式的产生式规则, 即取值区间选择规则、因素到取值区间映射的规则和因素之间相对重要程度权因子分配规则。现分述如下:

2.1 取值区间选择规则

设计中一般是根据设计环境条件在较大的参数取值集合 Ω 中选择一个小的取值集合 $V (V \subset \Omega)$, 作为进一步分析决策的依据。同时设计手册上常常也给出的是同一参数在不同状态下的取值区间。对于这类启发性知识可用规则表示为:

$$\begin{aligned} & \langle \text{Rule-name} \rangle \quad \langle \text{Rule-number} \rangle \\ & \text{IF } \langle P = (p_1, p_2, \dots, p_m) \rangle \quad (1) \\ & \text{THEN } \langle (\text{ISA value-range } V \subset \Omega) \rangle \end{aligned}$$

式(1)中, V 亦称为参数备择集, V 中各元素 v_i 就是决策的对象, 如果 V 是连续区间, 一般是根据

实际问题的需要离散为若干档次, 然后从中选择。为了便于统一处理这类问题和确定可能度分布函数, 将 V 转化为 $[0, 1]$ 区间上的 V' , 即

$$\begin{aligned} V \rightarrow V' &= \left(\frac{v_1 - v_1'}{v_n - v_1'}, \frac{v_2 - v_1'}{v_n - v_1'}, \dots, \frac{v_n - v_1'}{v_n - v_1'} \right) \\ &= (0, V_2, \dots, V_{n-1}', 1) \end{aligned} \quad (2)$$

这种转化并不影响决策结果(见下一节), 但却给程序设计带来方便。

2.2 用可能度分布函数描述的参数决策规则

参数决策的实质就是以知识和经验为基础, 实现从 E 到 V 的映射, 而实际使用中这种映射并不是明确的函数关系, 多是一些定性描述的原则和模糊语言, 例如, 在选择轴承静载荷安全系数时, 当取值区间是 $[1.2, 2.5]$ 时, 选择规则之一是: 如果轴承与轴的配合刚度较高时, 应选取较小的安全系数。这一规则里“较高”和“较小”都是模糊变量。本文对这类规则的描述是:

1. **可能度分布函数** 前一节给出了模糊信息用一个可信度数值来表示其模糊特性的方法, 但实际设计中还有一些规则是描述设计信息在某一集合上的分布情况, 例如选择齿轮动载荷系数 $K_v = [1, 1.6]$ 时, 离散为 $K_v = (1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6)$ 。设计中常用“选择偏大的值”“偏小的值”等模糊语言来表征选择其中某一值的可能性大小。这种可能性大小在这个集合上构成了可能度分布函数, 定义为:

令 U 是一个普通集合, x 是在 U 中取值的一个变量, F 是 U 的一个模糊子集, 语言“ x 是 F ”就产生一个 x 的可能度分布, 记为 $\Pi_x(v)$, $v \in V$ 。

按照Zadeh^[2,3]的理论, 在缺乏有关 x 的其它信息的情况下, 可以认为 $\Pi_x(v) = \mu(v)$, 这样就可以把可能度分布函数和隶属函数结合起来, 例如在 K_v 上取偏小值这一模糊命题的可能度分布函数为:

$$\Pi_x(v) = 1/1 + 1/1.1 + 0.8/1.2 + 0.6/1.3 + 0.4/1.4 + 0.2/1.5 + 0/1.6$$

其中任一项, 例如 $0.6/1.3$ 表示“取偏小值”这一模糊命题存在时, K_v 取值 1.3 的可能度为 0.6 。

2. **参数决策规则** 设计中, 参数决策的模糊因素关系描述仅仅给出了取值的趋势, 即可能度分布, 同时规则本身描述的知识亦是不确定的, 所以这类规则不能仅用一个可信度因子表征, 为此本文提出用可信度因子和可能度分布函数来描述, 定义为:

(Rule-name, Rule-number)
 IF <P = (p₁, p₂, ..., p_n)> (3)
 THEN <SELECT value T (t_i)>

(CFr ≥ & Π_r(v))

式中CFr指出规则本身的可信度，Π_r(v)描述在CFr=1时规则蕴涵的模糊取值操作。这里着重讨论一般情况下可能度分布Π_r(v)的建立方法。

由于把取值区间V→V'=[0, 1]区间上，在V'区间上对元素取值的可能性大小等效于在区间V相应选取元素可能性大小。因此可以在V'区间上对蕴涵命题用统一的可能度分布来作近似推理。经统计分析，在区间V上取值的模糊语言一般有五种形式，即

T(t) = (小值, 较小值, 中值, 较大值, 大值)

T(t)中每一元素在集合(0, 0.1, 0.2, ..., 1.0)上都可以构造一个可能度分布。例如在[0, 1]区间上“取大值”的可能度分布函数定义为：

$$\Pi_x(v) = 0/.1 + 0/.2 + 0/.3 + 0/.4 + .4/.5 + .7/.6 + .9/.7 + 1/.8 + .8/.9 + .7/1$$

由上式可见，在V'上有一点使可能度最大，即Π_r(v_k)=1，这一点可看作模糊集的“核心”，并根据经验判定在v_k的左右存在两点v₁和v₂，在[v₁, v₂]区间的所有元素可能度大于零，其余区间均为0。对这种要求，一种自然的想法是用二次曲线来得到其余各点的可能度。对于T(t)的不同取值，可用同一母函数^[4]φ(x)来生成，φ(x)形为：

$$\phi(x) = \max\{0, 1 - |ax|^p\} \quad (4)$$

其中a、p为参数，a≠0，p≥0。对于T(t)的五个等级，其可能度分布函数如下：

$$\Pi_x(V) = \begin{cases} \max\{0, 1 - 9(v - c_i)^2\} & v \in [0, 1] \\ 0 & v \notin [0, 1] \end{cases} \quad (5)$$

i=1, 2, 3, 4, 5

式中c_i取值定义为(0, 0.2, 0.5, 0.8, 1)。由此构造的可能度分布函数的图形见1所示。因此，不

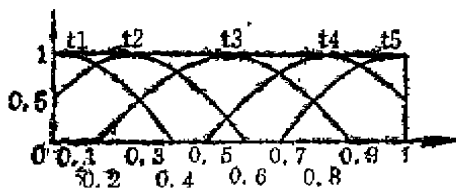


图1 可能度分布函数图形

论V的构成如何，按前述方法转换到[0, 1]区间后，根据T(t)和式(5)便可获得相应的可能度分布函数，这样避免了为每个具体的x去构造不同的Π_r(v)，用户在输入规则时只需给出CFr值，Π_r(v)由推理机根据规则的语义自动追加。

2.3 加权系数规则

对于因素集E中的每一因素，设计人员在评价决策时并不是一视同仁，而是根据实际情况而强调某些因素，为此需对不同的因素e_i按重要程度赋予不同的权系数w_i (w_i ∈ [0, 1])，其规则形式为：

(Rule-Name) (Number) IF <e_i ∈ E> THEN <WEIGHT e_i w_i> (6)

加权系数规则是大量经验的概括，需要利用启发式信息来指导w_i的选择。如果规则集里没有提供加权系数规则或推断出加权系数个数与因素集个数不等，推理系统自动分配权系数w_i=1/m (i=1, 2, ..., m)。

三 参数决策的推理模型

将决策参数的经验知识按上述要求总结成若干规则以形成决策某一参数的规则集，那么，推理过程就是利用这些识知以模拟人脑的模糊多因素决策评价，最后以确定的数值表示决策结果。完成这一过程主要依据如下算法：

1. 可能度分布的修正 由式(4)可知，描述参数决策规则带有两项系数CFr和Π_r(v)，而Π_r(v)是在规则完全成立条件下的可能度分布。事实上，规则本身和前提条件P均可能是模糊信息。所以，由规则推出的结果亦带有可信度因子CFa，因而需要根据CFr值对Π_r(v)进行修正。一般来说，可能度随着CFr值的下降，Π_r(v)中各元素被选择的可能性亦相应减少，所以按下式进行修正：

$$\Pi_x'(v) = \Pi_x(v) \cdot CFr \quad (7)$$

2. 评价综合过程 每一因素的可能度分布中各元素选取的可能度作为行矩阵相应的元素，将m个因素的行矩阵构造成因素评价矩阵R：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中r_{ij}表示因素集E的第i个因素对参数备择集V上第j个数值的选取可能性大小。

由加权系数规则推断出各因素的相对重要性，其系数就构成权系数矩阵；

$$W = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m) \quad (9)$$

其中 $w_i \geq 0$, 并满足规范化条件 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

从模糊集观点来考虑, R 可视为由 E 到 V 的模糊关系 $E \times V$, $R = (r_{ij})_{mn}$ 中 r_{ij} 为隶属度, 借助于模糊变换原理, 利用下式可求出决策集 V 上的模糊子集 B:

$$B = W \cdot R \quad (10)$$

即

$$(b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m) = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

式中

$$b_j = (w_1 \dot{\circ} r_{1j}) \dot{\bullet} (w_2 \dot{\circ} r_{2j}) \dot{\bullet} \dots \dot{\bullet} (w_m \dot{\circ} r_{mj}) \quad (11)$$

式(11)中, $(\dot{\circ}, \dot{\bullet})$ 是广义模糊算子, 是取大 (\vee) 和取小 (\wedge) 运算的一种推广。目前, 模糊数学界已构造了多种具体的算子供选用^[5], 本文根据参数决策的特点, 将 $(\dot{\circ}, \dot{\bullet})$ 定义为 $(\cdot, +)$, 即一般意义下的矩阵运算:

$$b_j = w_1 \cdot r_{1j} + w_2 \cdot r_{2j} + \dots + w_m \cdot r_{mj} \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

3. 输出信息的模糊判决 由式(11)得到的 B 矩阵是参数备择集 V 上的一个模糊子集, 它反映了不同因素共同作用下的取值可能度的组合, 为此需要从 B 中判决出一个具体数值, 也就是要得到由模糊子集 B 到普通集合 V 的映射, 这个映射亦称为判决。为了充分利用获得的信息, 不排除其它可能度小的元素的影响, 本文选用加权平均与最大隶属度相结合的方法来进行判决, 即:

$$V_{max} = \sum_{j=1}^n b_j \cdot v_j / \sum_{j=1}^n v_j \quad (12)$$

如果参数备择集 V 属于连续量, 则决策的结果就是 V_{max} ; 如果 V 是离散参数集, 则选择与 V_{max} 最接近的值为决策结果。

四 参数决策程序结构

基于上述模型研制的参数决策推理程序 PARA-DECISION, 其特征是把利用知识的逻辑推理和利用模型的定量分析计算结合, 以模拟专家决策参数的思维过程, 输入的是不确定信息而输出的则是一个精确的量。PARA-DECISION 主要由两部分组成: 演绎推理控制和模糊评价算法模块, 前者采

用作者研制的机械产品设计专家系统开发工具 MDEST^[6]提供的模糊推理程序 FUZZY-REASON 的主要控制结构, 后者包括参数决策冲突处理、可能度分布生成和评价算法, 其程序结构见图 2 所示。

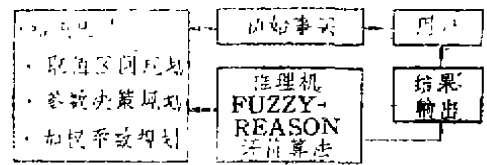


图 2. PARA-DECISION 程序结构 (图中规划应为规则)

五 实例

在机械设计中, 选择轴承时需要验算轴承的额定载荷 $C_0 (C_0 \geq S_0 \cdot P_0)$, 式中涉及决策静强度安全系数, 一般情况下是根据表 1 的原则决策 S_0 ^[7].

根据表 1, 选择 S_0 主要考虑的因素是 $E = (\text{旋转精度 } e_1, \text{ 平稳性 } e_2, \text{ 载荷冲击性能 } e_3, \text{ 装配刚度 } e_4)$, 针对不同情况, 评价决策出的参数见表 2。

六 结论

1. 针对机械设计中非公式计算参数决策问题的特征, 本文提出了对参数决策规则本身描述知识的不确定性和规则蕴涵操作的模糊性分别用可信度因子和可能度分布函数来进行综合刻画的方法, 并实现了可能度分布函数的自动确定。

2. 本文把基于知识的智能模拟与模糊综合评价算法结合在一个完整的参数决策模型之中, 从使用效果上看, 这种推理方法是合理的, 能在较高精度上对主要凭经验才能确定的参数进行自动决策。

3. PARA-DECISION 程序可作为机械设计专家系统的一种推理模式, 嵌套在需要对非公式计算参数决策的地方, 提高专家系统的质量。

参考文献

- [1] T. Tomigama and H. Yoshikawa. Requirements and Principles for Intelligence CAD System. In: Proc. of the IFIP, Knowledge Engineering in CAD, North-Holland Publishing Company, 1985
- [2] Zadeh L. A., Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Systems. Amsterdam, North Holland, 1978

表1 (摘录)

使用要求 载荷性质和使用场合	So	说 明
对旋转精度和平稳运转要求较高, 承受较大冲击载荷	1.2~2.5	轴承座与轴的刚度较差时, 应选取较高的安全系数; 对于刚度较高时, 可选取较低的安全系数
正常使用	0.8~1.2	
对旋转精度和平稳运转要求较低, 没有冲击载荷	0.5~0.8	

表2

因 素	T(t)	w _i	So	T̂(t)	w _i	So	T(t)	w _i	So
旋转精度要求	高	0.4		一般	0.3		较低	0.3	
平稳性要求	较高	0.2	2.08	较高	0.3	1.39	一般	0.3	0.72
载荷冲击性能	较大	0.2		较小	0.2		较小	0.2	
装配刚度	一般	0.2		一般	0.2		较大	0.2	

第一组值的部分程序运行记录如下:

```

0 (V) value-range of decision-making => (0.8 2.5)
1 (F) actor : (ROTATION-PRECISION)
  (W) eight-value=0.4
  (G) et value-trend=>LARGE
2 (F) actor : (STABLENESS-REQUIRE)
  (W) eight-value=0.2
  (G) et value-trend=>LARGER
3 (F) actor : (IMPACT-LOAD)
  (W) eight-value=0.2
  (G) et value-trend=>LARGER
4 (F) actor : (RIGIDITY-ASSEMBLY)
  (W) eight-value=0.2
  (G) et value-trend=>MIDDLE
--Are you sure[Y/N]? Y
--Decision-making set=>
  0.8 0.97 1.14 1.31 1.48 1.65 1.82 1.99 2.16 2.33 2.5
--Matrix of relation from F-sets to D-sets:R=
  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.19 0.64 0.91 1.0
  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.19 0.64 0.91 1.0 0.91 0.64
  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.19 0.61 0.91 1.0 0.91 0.64
  0.0 0.0 0.19 0.64 0.91 1.0 0.91 0.64 0.19 0.0 0.0
--Weight-value of factor =>((1 (0.4 0.2 0.2 0.2)))
--Result matrix of fuzzy evaluation=>
  0.0 0.00 0.088 0.128 0.182 0.276 0.438 0.588 0.694 0.728 0.656
--Result matrix of fuzzy evaluation =>2.07619
    
```

[3] 陈永义, 汪培庄. 最优Fuzzy蕴涵与近似推理的直接方法. 模糊数学, 1983 (1): 61-70

Algebra, Some Results, Int. J. Fuzzy Sets and Systems, 1979 (2): 327-348

[4] Dubois D. and Prade H., Fuzzy Real