模糊不一致需求的折衷分析*)

Trade-Off Analysis for Vague Requirement with Inconsistency

王拥军　何华灿　杜永文
（西北工业大学计算机科学与工程系　西安710072）

Abstract The identification and resolution of conflict requirements are inevitable parts in requirement engineering. Due to requirement's elasticity, "White-Black" selection is not unique case on inconsistency and conflict is partly cooperative. The introduction of averaging operator can completely and objectively reflect conflict relationship between imprecise requirements. On the basis of studying deeply averaging operator, this paper presents the principle on how to select proper averaging operator for respective requirement relationship.

Keywords Averaging operator, Inconsistency, Imprecision, Requirment engineering, Aggregation operator, Trade-off analysis

1. 引言

复杂系统的需求工程中，主要的挑战来自于需求本质上的不精确和需求间经常出现的不一致。为了形式化地捕捉到不精确需求的弹性，人们引入了模糊逻辑处理相应的表示和推理问题，这对把具体领域的非形式需求转变为形式化需求起了极大的推动作用。然而，冲突需求间的关系也因此变得更加复杂，传统的模糊逻辑运算模型已不能全面、准确地反映客观现实世界[1,10-11]。如何识别不一致需求并采用合适的方法消解冲突是需求工程中非常棘手的问题之一。

本文集中处理既有冲突又有协调的模糊不一致需求的折衷分析问题。以往，研究者提出了许多不同的聚合函数（Aggregation function）来处理需求的折衷分析，它们大部分是关于t-范和t-余范的，这两类函数被广泛地使用在多属性决策（MADM）系统之中，并取得了一定的应用效果。但是，由于上述两类算子分别在min和max函数之外，使得逻辑运算在min和max函数之间出现了空白，不能反映需求间既相互冲突又部分一致的补偿关系[2]，平均算子的引入对完善逻辑运算、更恰当处理需求之间的关系有着相当重要的意义。本文的"折衷"不同于以往的聚合思想，强调了更多的"平均"内涵。

文中给出的加权平均算子公理集，可以保证其聚合函数落在min和max之间[3]，一个参数化的平均函数簇提供了连续的补偿策略，这有助于把握冲突需求间的复杂关系。本文的研究目的主要在选取合适的平均算子折衷不一致的需求，得到解释合理且综合性能更佳的补偿结果，这里的综合性能与人们当前认识到的多个目标间的相对优先关系（权值大小）有关。

下面介绍需求工程中的不确定性、平均算子、模糊不一致需求的识别及平均算子的选择，最后给出了结论。

2. 需求工程中的不确定性

模糊逻辑能提供表示和处理不精确需求的手段。对于由知识的不完全性引起的需求不一致问题，不能只像经典逻辑一样采用舍弃一方的方法来保持系统的一致性，而应当在模拟人类行为的基础上，针对模糊不一致需求关系的情况，使用不同的折衷策略（完全取舍只是一种特例），本文讨论的情形之一就是具有若干属性的需求在几个合理的规则下可能得出相互冲突的结果，这些不一致行为之间的平均对于合理解释现实中的常识行为有很重要的意义；情形之二是为满足多个相互竞争的目标而在不同需求间实现的折衷，这可以取得更佳的综合性能。

在模糊推理系统中引入平均算子可以更好地把握需求工程中的不确定性。例如，假设在汽车上安装的智能软件系统存在两个合理的行车规则[4]：

R1：若前方有障碍（越近），则刹车（越急）

*）本文得到国家教委博士学科点专项科学基金（98069923）资助。王拥军　博士生，主要研究模糊逻辑、非单调推理和软件工程等。何华灿　教授，博士生导师，主要研究人工智能基础理论和应用、泛逻辑等。杜永文　博士生，主要研究模糊逻辑。

R2：若拐弯（弯度越厉害），则（越不能）刹车或（越轻微）刹车

当有具体的模糊需求"在前方不远的转弯处发现障碍时，汽车行驶安全度应当是高的"加入后，由于此需求的两个属性（障碍和弯度）对安全行驶的目标有相互排斥的作用，故而就隐含着结果的不一致。但是，正如每一位有经验的司机都知道的那样，这种不一致并非不可调和，在此类情形下，合理的做法是根据与障碍物的远近和弯度的大小得出适度的刹车方案来，亦即在最强的刹车和不刹车之间做出选择。

以上反映司机开车经验的选择也是衡量此软件系统智能高低的关键所在。由于需求属性的模糊特性，使得不一致需求中又存在着协调因素，这符合现实世界事物间既对立又统一的本质。平均算子的性质可以弥补其它逻辑算子在此方面的不足，其研究引起了越来越多的工程领域研究者的注意。

上例是说明单一目标（安全行驶）下，需求多属性之间存在的隐含不一致，使用平均算子做折衷有利于处理各种复杂的冲突，取得合乎常理解释的结果。多个目标情形还应当考虑由于目标间的竞争而引起的模糊需求不一致问题，及如何选择相应平均算子进行协调的问题。

3. 加权平均算子

3.1 平均算子的公理

单调性：若 $a_i \leqslant a_i'$ 时，$M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_n,w_n)) \leqslant M((a_1,w_1),\cdots,(a_i',w_i),\cdots,(a_n,w_n))$

若 $w_i \leqslant w_i'$ 时，$M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_n,w_n)) \leqslant M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i'),\cdots,(a_n,w_n))$

交换性：对于任意 i，j 有：

$M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_j,w_j),\cdots,(a_n,w_n)) = M((a_1,w_1),\cdots,(a_j,w_j),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_n,w_n))$

连续性：$M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_n,w_n)) = \lim_{a_i' \to a_i} M((a_1,w_1),\cdots,(a_i',w_i),\cdots,(a_n,w_n))$

$M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i),\cdots,(a_n,w_n)) = \lim_{w_i' \to w_i} M((a_1,w_1),\cdots,(a_i,w_i'),\cdots,(a_n,w_n))$

幂等性：对于任意 $w_i \geqslant 0$；$w_1+\cdots+w_n>0$ 时有：

$M((a,w_1),\cdots,(a,w_i),\cdots,(a,w_n)=a$

双对称性：$M[(M[(a_1,w_1),(a_2,w_2)],w_1+w_2),(M[(a_3,w_3),(a_4,w_4)],w_3+w_4)]$

$=M[(M[(a_1,w_1),(a_3,w_3)],w_1+w_3),(M[(a_2,w_2),(a_4,w_4)],w_2+w_4)]$

其中，单调性和幂等性共同决定了平均算子 M 必然处于 min 和 max 函数之间。证明过程如下（以两个变量为例，取等权；有限多个变量证明大致相同）：

设 $x \leqslant y$，有 $x=M(x,x) \leqslant M(x,y) \leqslant M(x,y)=y$

3.2 生成函数和参数化的平均算子簇

所有的平均算子都同构于用自守（automorphism）函数 f 得到的 f(x) 和 f(y) 之间的算术平均[5]，这里的 f 就称为平均算子的生成元。这可以形式地描述为：

$$M(x,y)=f^{-1}((w_1 f(x)+w_2 f(y))/(w_1,w_2))$$

上式中的 f 由于存在求逆问题，为讨论方便，可以选用严格单调的连续函数。例如，当 $f(t)=\ln t$ 时，$M(x,y)=(x^{w_1}y^{w_2})^{1/(w_1+w_2)}$，是几何平均。以下给出一簇可随参数连续变化的平均算子生成函数：

设 $f(t)=t^n$，则 $f^{-1}(t)=t^{1/n}$，可得出：

$M_n(x,y)=((w_1x^n+w_2y^n)/(w_1+w_2))^{1/n}$，这里的变化参数为 n，范围是 $(-\infty,+\infty)$。可以证明，当 n 取 $-\infty$ 时，M_n 趋近于 $\min(x,y)$；$n=0$，$M_0=(x^{w_1}y^{w_2})^{1/(w_1+w_2)}$；$n=1$ 时，$M_1=(w_1x+w_2y)/(w_1+w_2)$；当 n 取 $+\infty$，M_n 趋近于 $\max(x,y)$。

命题1 M_0 等于几何平均，即 $\lim_{n\to 0} M_n(x,y)=(x^{w_1}y^{w_2})^{1/(w_1+w_2)}$

证明：

$$\begin{aligned}\lim_{n\to 0} M_n(x,y) &= \exp(\lim_{n\to 0} M_n(x,y))\\ &=\exp(\lim_{n\to 0}\ln(((w_1x^n+w_2y^n)/(w_1+w_2))^{1/n})\\ &=\exp(\lim_{n\to 0}(1/n)\ln((w_1x^n+w_2y^n)/(w_1+w_2))\\ &=\exp(d/dn[\ln((w_1x^n+w_2y^n)/(w_1+w_2))]_{n=0}\\ &=\exp((w_1\ln x+w_2\ln y)/(w_1+w_2))\\ &=(x^{w_1}y^{w_2})^{1/(w_1+w_2)}\end{aligned}$$

证毕

当 $w_1=w_2$ 时，即为大家熟悉的 $(xy)^{1/2}$。

命题2 $M_{+\infty}$ 趋近于 max，即 $\lim_{n\to+\infty} M_n(x,y)=\max(x,y)$

证明：

$$\begin{aligned}&\lim_{n\to+\infty} M_n(x,y)\\ &=\lim_{n\to+\infty}(((w_1x^n+w_2y^n)/(w_1+w_2))^{1/n})\\ &=\lim_{n\to+\infty}(w_1/(w_1+w_2))^{1/n}(x^n+(w_2/w_1)y^n)^{1/n}\\ &=\lim_{n\to+\infty}(x^n+(w_2/w_1)y^n)^{1/n}\\ &\qquad\qquad \text{由 } \lim_{n\to+\infty}(w_1/(w_1+w_2))^{1/n}=1\\ &=\lim_{n\to+\infty}(y^n/(1/(x/y)^n+w_2/w_1)))^{1/n}\\ &=\lim_{n\to+\infty} y/(1/((x/y)^n+w_2/w_1)^{1/n})\end{aligned}$$

当 $x \leqslant y$ 时，则分母趋于1，故极限为 y；否则，分母趋于 x/y，极限为 x。证毕。用几乎相同的方法可以证明 $M_{-\infty}(x,y)$ 趋于 min。显然 $M_1=(w_1x+w_2y)/(w_1+w_2)$，是算术平均。当 $w_1=w_2$ 时，即为 $(x+y)/2$。

n 从 $-\infty$ 连续变化到 $+\infty$，上述算子簇也相应地从无补偿经过部分补偿到最大补偿。这正好可以完全涵盖以往聚合算子的空白区域，为人类常识行为中的折衷分析提供合理的形式化工具。通过以上介绍，不难理解本文的难点应当是在恰当地估计模糊不一致需求的冲突程度之后，如何选择与具体问题相对应的平均算子。

为更加突出选择平均算子的不确定性，这里用一一映射 $h=0.5+(1/\Pi)\mathrm{arctg}(n)$ 来将参数变化范围限定在[0,1]区域上，这样更易看出平均算子的选择和模糊变量取值一样，具有模糊性。顺便给出几个典型 h 值，$h=0$ 对应 min，$h=0.5$ 对应几何平均，$h=0.75$ 对应算术平均，$h=1$ 对应 max。

4. 模糊不一致需求的识别及平均算子的选择

关于不精确需求的折衷分析研究，已有的工作主要用于需求工程中的三个重要任务[6]：

(1)验证在聚合优先需求中使用的结构；(2)辅助需求工程师识别不精确性需求表示的基本参数和结构，从用户那里获取不精确需求；(3)估计矛盾需求的相对优先关系。其中，需求关系的识别和如何聚合需求是首先面临的两个关键问题，第(3)点则反映了综合性能中需求的偏重关系。

如引言中所述，本文关心的是介于 min 和 max 之间的聚合算子。因此，如何根据具体背景(Context)选择对低性能需求的补偿程度是不同于以往工作的主要特征之处。

4.1 模糊不一致需求的识别(情形之一)

定义1 设 a_1 和 a_2 是相关于不同推理规则的一类需求的不同属性，p_1 和 p_2 是这类需求的具体形式，当：若 $Sat_{a1}(p_1)<Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)>Sat_{a2}(p_2)$；若 $Sat_{a1}(p_1)>Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)<Sat_{a2}(p_2)$；若 $Sat_{a1}(p_1)=Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)=Sat_{a2}(p_2)$ 都满足时，称 a_1 和 a_2 是相对于此类需求完全冲突的属性。这里 $Sat_a(p)$ 是指此需求对 a 的满足程度。

定义2 设 a_1 和 a_2 是相关于不同推理规则的一类需求的不同属性，p_1 和 p_2 是这类需求的具体形式。又设 $U1=\{(p_1,p_2)\mid(Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2))*(Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2))<0\}$；$U2=\{(p_1,p_2)\mid Sat_{a1}(p_1)\neq Sat_{a1}(p_2)$ 或 $Sat_{a2}(p_1)\neq Sat_{a2}(p_2)\}$，则 a_1 和 a_2 之间的冲突度 $Conf(a_1,a_2)$ 为：

$$\frac{\sum_{(p1,p2)\in u1}|Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2)|*|Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2)|}{\sum_{(p1,p2)\in u2}|Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2)|*|Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2)|}$$

我们知道，两个矛盾的事物可以进行补偿的必要前提是它们间存在一定程度的协调。因此，有必要同时给出协调度的相关定义。

定义3 设 a_1 和 a_2 是相关于不同推理规则的一类需求的不同属性，p_1 和 p_2 是这类需求的具体形式。当：若 $Sat_{a1}(p_1)<Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)<Sat_{a2}(p_2)$；若 $Sat_{a1}(p_1)>Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)>Sat_{a2}(p_2)$；若 $Sat_{a1}(p_1)=Sat_{a1}(p_2)$，则 $Sat_{a2}(p_1)=Sat_{a2}(p_2)$ 都满足时，称 a_1，a_2 是相对于此类需求完全协调的属性。这里 $Sat_a(p)$ 是指此需求对 a 的满足程度。

定义4 设 a_1 和 a_2 是相关于不同推理规则的一类需求的不同属性，p_1 和 p_2 是这类需求的具体形式，又设 $U1=\{(p_1,p_2)\mid(Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2))*(Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2))>0\}$；$U2=\{(p_1,p_2)\mid Sat_{a1}(p_1)\neq Sat_{a1}(p_2)$ 或 $Sat_{a2}(p_1)\neq Sat_{a2}(p_2)\}$，则 a_1 和 a_2 之间的部分协调度 $Coop(a_1,a_2)$ 为：

$$\frac{\sum_{(p1,p2)\in u1}|Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2)|*|Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2)|}{\sum_{(p1,p2)\in u2}|Sat_{a1}(p_1)-Sat_{a1}(p_2)|*|Sat_{a2}(p_1)-Sat_{a2}(p_2)|}$$

从以上定义可以看出，冲突度和协调度之和未必为1，还有反平衡(Counterbalance)、无关和独立几种情形[7]。值得指出的是，由于本文研究的是利用平均算子对模糊不一致需求进行折衷分析，故对于 Coop 和 Conf 皆为0这种情况不考虑(无冲突亦不协调)。

不一致关系 / 条件	最大冲突 ——→ 最大协调						
	冲突为主			反平衡	协调为主		
Conf−Coop	Coop=0	>0	>0	Conf=Coop	<0	<0	Conf=0
Conf+Coop	Conf=1	=1	<1	<1	<1	=1	Coop=1

图1 模糊不一致需求关系

此时，用 Coop 和 Conf 间的关系可以给出需求的模糊不一致关系。如图1所示，当 Conf>Coop 时，Conf 取1为最强冲突，随 Conf 的减少和 Coop 的增加，在冲突占上风情形下呈现连续变化趋势；至二者相等时，冲突与协调取得了平衡；这之后，Conf<Coop，协调成为主流直至 Coop 取1到达最大协调关系。

在识别模糊不一致关系之后，就应当选择适当的平均算子进行折衷分析，使可协调的不一致模糊需求相互让步取得合理的结果。我们知道，不一致关系往往会导致系统的非单调性，本文认为折衷可看作是形成一个非单调推理规则，便于适应由知识不完全性和需求动态变化带来的需求修正问题。以下给出定义：

定义5 非单调推理规则是序偶 $\langle C,f_c\rangle$，其中 $C=(a_1,a_2)$ 是一种不一致情形，f_c 是一个平均算子。

这里的 C 由一组 $p_1,p_2,\cdots,p_n$ 的状态决定，它们不能涵盖所有相关情形，因此以其为根据作出的论断必然会在新需求的加入后发生一些变化。这和人类的常识行为非常类似，可以适应变化的需求。当然，f_c 也应当随之调整。

4.2 模糊不一致需求的识别(情形之二)

多个目标间为追求综合性能更佳的折衷分析，其

基本方法和上述过程很相似。只须将属性 a 换作需求 R，p 表示系统开发过程即可。例如：一个生产两种产品的公司，其产品在利润和贸易平衡方面有不同的作用，产品1在产生2元利润的同时也带来了1元的进口，产品2虽然只有1元的利润但可以有2元的出口。当需求是"利润应当是高的，且贸易应尽可能平衡"时，我们发现这两个目标存在一些冲突，但也有协调，因而平均算子作聚合可以得到更优的综合性能。用 p_1 表示产品1的生产过程，p_2 表示产品2的生产过程，则可得出两个目标间的不一致关系（多种产品亦然）。这种情形的难点也在于找出相应的平均算子 f_c。

多个属性或目标间的相对重要性（权值）是不同的，这反映了人们对折衷结果偏重的选择。

4.3 平均算子的选择

有了需求的模糊不一致关系和一簇连续的平均算子，自然试图找出它们之间的对应关系。本文对于最强冲突情形无补偿作用，取 min 算子；最大协调关系则取 max 算子；反平衡关系宜取几何平均；对于 $Conf-Coop<0$，且 $Conf+Coop=1$ 时取算术平均；对于 $Conf-Coop>0$，且 $Conf+Coop=1$ 时取调和平均；其余值可在相应区间取得。同人对这类问题的处理方式相仿，在大致确定了补偿算子的范围之后，仍需要使用背景知识[8,12]帮助约束具体问题的可选空间，这时并不要求非常精确（人的感觉一般察觉不到微小变化），有正确的序关系即可。

例如第二部分提到的系统，可收集已有的处理各种情形的经验数据（不完全知识），通过其对不同属性的满足程度，得到"安全行驶"目标下属性间的冲突度和协调度，继而选定大致与之对应的平均算子区间，然后根据背景知识来最后确定平均算子。可以看出，一个丰富的初始经验数据集合是关键的，但又是经常不能满足的。因此，建立非单调的修正机制是十分必要的，这与人类认识世界的方法是一致的。关于这一方面，会在以后的文章中讨论。

结论 本文针对传统聚合算子存在 min 和 max 之间的逻辑空白，不能很好地处理模糊不一致需求的折衷分析这一问题，在深入研究平均算子的基础上，给出了一簇连续平均算子和模糊不一致需求关系之间的对应，指出常识方法对选择连续算子的现实重要性，它的研究仍然是焦点之一。

值得指出的是，现实世界中还有一类矛盾需求要用"综合"的思想来处理，我们研究的组合算子和其他人提出的一致范研究[9]能将 t-范、平均算子和 t-余范统一起来，为它提供更全面、更合理的形式基础。

参考文献

1 王拥军，何华灿，艾丽蓉，杜永文. 需求工程中不确定性研究. 计算机科学，2001(2)

2 Scott M J，Antonsson E K. Aggregation Functions for Engineering Design Tradeoffs. Fuzzy Sets and Systems，1998，99：253～264

3 Otto K N. A Formal Representational Theory for Engineering Design：[Ph. D Thesis]. California Institute of Technology，Pasadena，CA，June 1992

4 Castro J L，Trillas E，Zurita J M. Non-monotonic fuzzy reasoning. Fuzzy Sets and Systems，1998，94：217～225

5 Gehrke M，Walker C，Walder E. Averaging Operators on The Unit Interval. International Journal of Intelligent Systems，1999，14：883～898

6 Yen J，Tiao W A. A Formal Methodology for Analyzing Tradeoffs of Imprecise Requirements. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering，1998，8：283～311

7 Lee J，Kuo J-Y. New Approach to Requirements Trade-Off Analysis for Complex Systems. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering，1998，10 (July-August)：551～562

8 Hoffmann A. Non-Factual Knowledge. Paradigms of Artificial Intelligence，Springer，1998. 243～252

9 Li Yong-Ming，Shi Zhong-Ke. Wead uninorm aggregation operators. Information Science，2000，124：317～323

10 何华灿，刘永怀，等. 经验性思维中的泛逻辑. 中国科学(E辑)，1996，26(1)：72～78

11 何华灿，刘永怀，等. 命题泛逻辑学原理. 科学出版社(待出版)

12 Thomason R H. Representing and Reasoning with Context. Paradigms of Artificial Intelligence，Springer，1998. 29～41