

引文格式: 郝博, 汪万炯, 张鹏, 等. 基于混合推理的飞机结构件变型设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 28-35.

HAO Bo, WANG Wanjiang, ZHANG Peng, et al. Variant design of aircraft structure parts based on hybrid reasoning[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 28-35.

基于混合推理的飞机结构件变型设计*

郝博^{1,2}, 汪万炯¹, 张鹏¹, 刘力维¹

(1. 东北大学, 沈阳 110819;

2. 东北大学秦皇岛分校, 秦皇岛 066004)

[摘要] 基于规则推理(Rule-based reasoning, RBR)与实例推理(Case-based reasoning, CBR)相混合的推理方式,对飞机结构件智能设计方法进行了研究。首先,结合模糊理论和规则推理技术,对飞机结构件设计要求的模糊属性进行处理,设计了飞机结构件智能选型系统,实现对飞机结构件的类型选择;其次,运用最近相邻算法与灰色关联分析理论,对飞机结构件设计要求的数值属性进行处理,实现了飞机结构件的实例检索与评价,此后将得到的最佳相似实例进行变型设计,得到目标实例;最后,以型材为例验证了混合推理智能设计系统的可行性。

关键词: 飞机结构件; 规则推理(RBR); 实例推理(CBR); 实例评价; 变型设计

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.21.028



郝博

教授, 博士生导师, 研究方向为智能设计与智能制造。

飞机结构件设计制造是典型的小批量、多品种的生产模式,不利于知识的积累和重用^[1],导致目前飞机结构件设计步骤繁琐、设计质量和效

率低下。飞机结构件逐步趋于复杂化、整体化和大型化,对其设计质量和效率提出了更高的要求。混合推理技术以能提高知识的重用率、缩短产品研发周期和提高产品设计的智能化程度等优点,成为了产品设计领域快速响应制造业发展、提高生产水平的重要手段。

自从基于规则推理(Rule-based reasoning, RBR)与实例推理(Case-based reasoning, CBR)相混合的推理策略^[2-3]被提出之后,其优势逐渐被人们认识,国内外学者进行了广泛的研究和应用。在国外,有学者将混合推理应用于智能辅导、临床决策支持、疾病诊断治疗、主动坠落保护系统等方面,取得了积极的进展^[4-7]。在国内,焦起祥^[8]将混合推理策略应用于飞机概念设计中,方便了飞机设计过程的知识表达并协调不同形式的知识处理设计问题,提高了飞

机设计的智能性与知识重用度。接着,王静等^[9]运用混合推理策略,实现了模架设计参数的智能推理及模型自动生成,提高了设计的准确性和效率。进一步地,张奕等^[10]使用混合推理检索出相似历史案例并对历史案例的解决策略进行修改,解决了传统解决方案决策速度慢、决策不准确等问题,降低了规则推理所需规则的复杂度及获取难度。但是,这种推理方式仍存在着所需规则数过多的问题。因此,陆凌云等^[11]提出了一种基于神经网络和柔性逐层推理相结合的混合推理策略,重新定义了规则描述方式,使得所需的规则数更少,对规则库的可操作性更强。在此基础上,黄新波等^[12]建立了基于混合推理的牵引变压器状态检修决策支持体系,可实现状态检修过程中经验与知识相结合的决策思路,提高了牵引变压器故障检修效率与可靠性。

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018110C012)。

Ni 等^[13]设计了基于混合推理的变压器快速故障诊断系统,该系统能够基于变压器多源综合数据对设备故障进行诊断和分析,诊断结论可靠实用,为实现变压器的状态检修提供了支持。另外,沈子恒等^[14]提出了一种基于混合推理的汽轮机叶片夹具自顶向下设计方法,通过重用实例库中的相似夹具实例,有效地提高了夹具产品的设计质量和效率。

综上所述,通过混合推理策略可以有效提高知识的重用率,从而提高产品设计的准确度、缩短产品研发周期和提高产品设计效率。混合推理技术虽然取得了一些有意义的成果,但针对飞机结构件快速设计的研究还很少,难以准确确定产品设计影响因素与设计的相关规则,所需的规则数过多,实例检索的效率仍比较低,缺乏高效的数值计算方法来检索用于重用的最佳相似实例,自动化程度较低、缺乏智能性等。

本文以飞机结构件为研究对象,运用混合推理策略对其进行变型设计。规则推理系统将模糊技术与规则推理相结合,整理相关规则信息并建立规则库,通过规则推理对飞机结构件选型,以缩小下一步实例推理的检索域;实例推理系统通过最近相邻算法计算飞机结构件各特征属性相似度,为使检索出的实例综合性能最佳,采用灰色关联分析理论对高于临界值的实例进行评价,以此来检索出最佳相似实例,减少变型设计的工作量,进而提高飞机结构件的设计效率。

1 智能设计系统组成

1.1 基于规则推理的智能选型

飞机结构件在设计时往往只能给出要设计零件的一级类型名称,因此如何根据已知的设计要求选择最为合适的飞机结构件二级类型至关重要。飞机结构件的类型影响因素属性在给出时往往是如制造成本、承

载能力和装配工艺性等模糊的、不精确的属性,其对应的规则信息难以获取和被计算机识别,所以为了将模糊属性信息精确化,将模糊技术引入其中,构建飞机结构件设计要求隶属度函数模型。在构建好隶属度函数模型后,即可将模糊的设计要求精确化,再将精确化的设计要求信息与对应的飞机结构件类型通过查阅设计手册、询问设计专家等方式匹配好对应规则信息,将其统计好后存储在推理系统的模糊规则库中,而后设计基于模糊规则推理的飞机结构件智能选型系统,在设计人员给出模糊属性设计要求时,智能选型系统即可根据模糊规则推理自动完成从设计要求到飞机结构件具体类型的转换。基于规则的飞机结构件智能选型系统结构如图 1 所示。

1.2 基于实例推理的变型设计

据统计,在飞机结构件设计过程中,只有 20% 的零件需要重新设计,余下 80% 都可以直接重用或稍做修改后使用^[15]。知识与模型的重用可

以大大缩短产品设计周期,提高产品的设计质量和效率,在飞机结构件产品设计过程中起着至关重要的作用。为了提高飞机结构件设计知识与模型的重用度,将模型特征参数与结构件模型相关联后储存于实例库中,通过实例推理的方式实现知识与模型的重用。基于实例推理的推理方法实质为类比推理,通过相似度计算对已有实例库进行实例检索,找出与解决当前问题相似的旧实例,再通过对以往相似实例解决办法的修改和应用来解决当前问题^[16]。实例推理技术的核心是进行实例检索,其目的是找出与目标结构件各属性相近的相似实例,为后续的实例评价和变型设计奠定基础。通过实例检索与评价过后,得到最佳相似实例,对其进行变型设计后系统评价满意,即得到了目标结构件模型。基于实例推理的飞机结构件变型设计系统如图 2 所示。

1.3 混合推理智能设计系统配置

飞机结构件在设计前,设计人员给出的设计要求可以分为两类:承

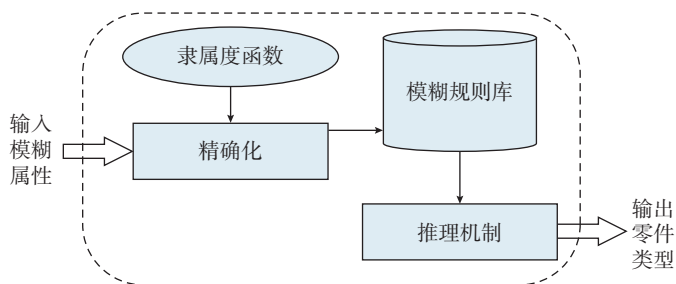


图 1 基于规则推理的智能选型系统结构图

Fig.1 Structure diagram of intelligent selection system based on RBR

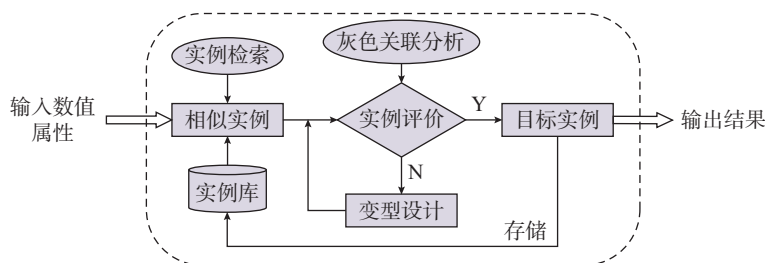


图 2 基于实例推理的飞机结构件变型设计系统结构图

Fig.2 Structure diagram of aircraft structural variant design system based on CBR

载能力、装配工艺性等模糊属性,立边长度、底边长度等数值属性。本文混合推理智能设计系统基于飞机结构件的设计属性参数,对于模糊属性引入模糊理论计算其隶属度,从而获取模糊规则,通过规则推理实现飞机结构件的初步选型;通过上一步确定好的飞机结构件类型,可以缩小实例推理过程中的实例检索域,通过相似度算法计算设计检索域实例库实例的相似度,对相似度较高的零件进行评价,对评价性能最优的实例进行变型设计,即可获得用户所需的目标零件。混合推理智能设计系统结构如图3所示。

2 规则推理模型

2.1 隶属度函数

在模糊理论中,一个对象是否属于某一个集合不是绝对的,它可以部分地属于该集合,而其隶属于该集合的程度可以通过一个函数来度量,即隶属度函数,可表示为: $F_A(x): X \rightarrow [0, 1]$, 其函数值是 $[0, 1]$ 内的一个实数,即表示属于集合的程度,规则推理系统中通常使用不同的隶属度函数表示不同的知识域^[17]。通常

选用的带参数的隶属度函数有三角函数、高斯函数、梯度函数、钟型函数和 Sigmoid 函数^[18]。飞机结构件设计要求的模糊属性主要包括承载能力、装配工艺性、可制造性、剖面高度、裂纹扩展能力及制造成本等,这些属性都是模糊的、不精确的,且属性值连续,因此可采用梯形隶属度函数将飞机结构件设计要求的模糊属性精确化,因为梯形隶属度函数最多只有4个点,用梯形隶属度函数来表示连续模糊属性值比较简单,而且计算速度较快,精确度也比较高^[19]。其表达式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mu(x)$ 为精确化后的隶属度值; a, b, c, d 为精确化前的数值。

梯度隶属度函数图像形式如图4所示。其中装配工艺性、可制造性及裂纹扩展能力不能用具体的数值表达,因此在 $[0, 1]$ 内取值来表示其

大小,各个设计要求相应的梯形隶属度函数的图像如图5所示。

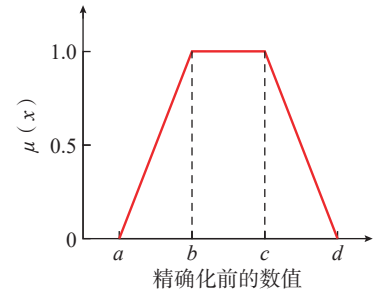
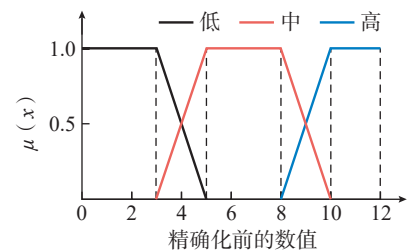
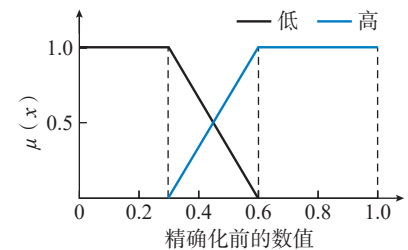


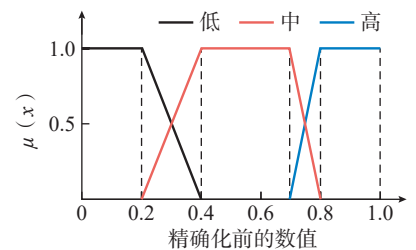
图4 梯度隶属度函数图
Fig.4 Trapezoidal membership function graph



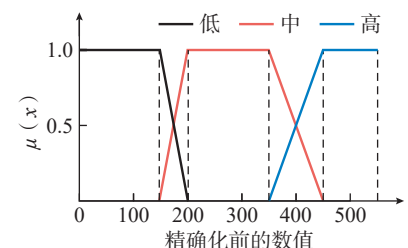
(a) 剖面高度隶属度函数



(b) 裂纹扩展能力隶属度函数



(c) 装配工艺性、可制造性隶属度函数



(d) 制造成本隶属度函数

图5 设计要求隶属度函数图

Fig.5 Design requirement membership function diagram

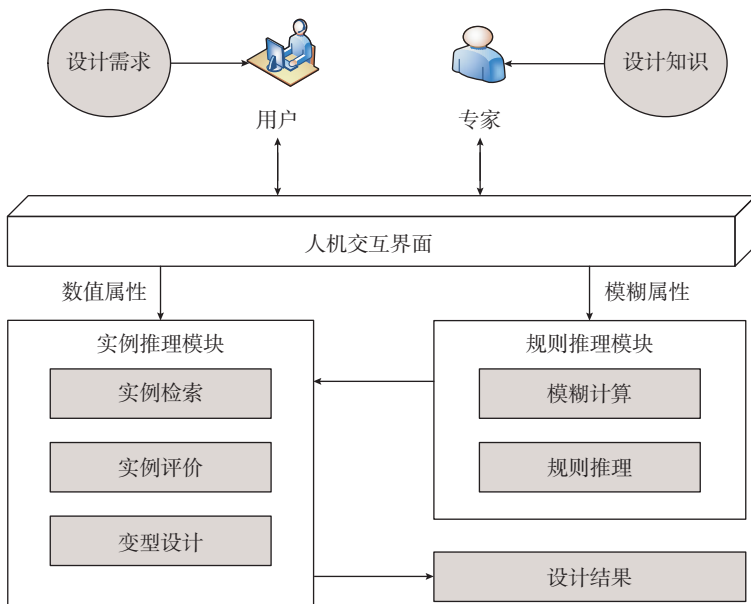


图3 混合推理智能设计系统结构图

Fig.3 Structure diagram of intelligent design system based on hybrid reasoning

2.2 规则推理机制

基于规则推理的知识表示一般有框架树表示法和产生式规则表示法,本文专家系统采用产生式规则表示法,其规则表示的一般形式为

“IF A THEN B ”

式中, A 部分称为前提,本文系统中的前提是由模糊理论中的隶属度函数来获得其隶属度值; B 部分为结论,当表达式的值为“真”时,获得结论,本系统中对应的结论是规则推理出的飞机结构件类型。

推理过程中的推理机制包括正向推理、反向推理和双向推理,本文模糊规则推理系统采用正向推理机制,正向推理的步骤为:(1)输入规则推理的前提,系统自动将规则前提与规则库中的规则进行匹配,可能有多条规则与之匹配,此时将这些规则集合;(2)设计人员对多条规则进行判断,选择置信度最高的规则作为启用规则;(3)执行启用规则,获取规则推理的结论,并将其放入综合数据库中作为事实输出。

3 实例推理模型

3.1 基于最近相邻法的实例检索

实例检索策略主要包括最近相邻法^[20]和归纳推理法,基于这两种实例检索方法的各自优势,本文提出了归纳推理法与最近相邻法相结合的实例检索计算模型。首先,按照归纳推理法,根据目标零件的类型进行分类检索,以此来缩小检索时的搜索域,从而提高检索的效率;然后,在相似度计算过程中,采用最近相邻算法,在同类型零件的实例库中进行实例检索。

当用户需要进行实例检索时,首先需要设计人员输入规则推理出的飞机结构件类型来确定搜索域,然后通过输入目标零件的各属性参数进行实例检索。在相似度计算过程中,采用最近相邻算法。计算设计产品 t 与实例 e 之间的 n 个参数的综合相似度。

$$\text{Similarity}(t, e) = \sum_{i=1}^n f(t_i, e_i) \times \omega_i \quad (2)$$

式中, $f(t_i, e_i)$ 表示数值属性相似度计算相似度函数; ω_i 表示各数值属性所对应的权值,由设计人员给出。

相似度函数表达式为

$$f(t_i, e_i) = 1 - \text{dist}(S_{ti} - S_{ei}) = 1 - |S_{ti} - S_{ei}| / |S_{\max i} - S_{\min i}| \quad (3)$$

式中, S_{ti} 为目标产品的第 i 个特征属性的参数值; S_{ei} 为实例第 i 个特征属性的参数值; $S_{\max i}$ 为第 i 个特征属性参数值的最大值; $S_{\min i}$ 为第 i 个特征属性参数值的最小值。

计算完目标实例与实例库中的旧实例的相似度后,提取相似度大于临界值的实例作为实例评价的对象,这是因为检索出的实例相似度相对越大,变型设计的难度就相对越小。

3.2 基于灰色关联分析的实例评价

在实例检索过后,对于相似度较大的实例,只能说明该实例与目标零件的设计要求相似,而其综合性能不一定最好,因此需要对检索出的相似实例进行评价。由于灰色关联分析法^[21]对样本的大小没有要求,分析过程中也不需要典型的分布规律,其结果与定性分析的吻合性较好,具有较强的客观性^[22],因此本文采用该方法对检索出的相似实例进行实例评价,以得到最佳相似实例。基于灰色关联分析的飞机结构件实例评价模型如下文所述。

(1)确定参考数列和比较数列。将实例检索出的最佳实例的特征信息向量作为参考数列,实例库中飞机结构件的特征信息向量作为比较数列,对两者进行相似度的计算,得到待设计飞机结构件与已有飞机结构件之间的相似度。设实例检索出的最佳实例的特征信息向量为 A_0 ,已有飞机结构件的特征信息向量为 A ,得到

$$A_0 = (a_0(1), a_0(2), \dots, a_0(n)) \quad (4)$$

$$A = (A_1, A_2, \dots, A_m) = \begin{pmatrix} a_1(1) & \dots & a_m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1(n) & \dots & a_m(n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $A_i = (a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(n))^T$, $i = 0, 1, 2, \dots, m$ 。 A_i 表示飞机结构件编号为 i 的结构件, $a_i(j)$ 表示第 i 个飞机结构件的第 j 个特征信息的量值。

(2)归一化处理。每个特征信息向量的值都代表不同的含义,因此它们的单位都是不同的,需要将每个特征信息向量的值表示成相同的单位含义,所以需要特征信息向量的值进行归一化处理。归一化的方法为:将每个特征信息向量的值进行缩放,使每个值都能够达到相同的数量等级。选取最大值为最优指标的归一化计算公式如式(6)所示,选取最小值为最优指标的归一化计算公式如式(7)所示。

$$a'_{\max}(k) = \frac{a_i(k)}{\max_{i \in m} a_i(k)} \quad (6)$$

$$a'_{\min}(k) = \frac{\min_{i \in m} a_i(k)}{a_i(k)} \quad (7)$$

式中, $\max_{i \in m} a_i(k)$ 和 $\min_{i \in m} a_i(k)$ 分别表示第 k 项属性数列在参考数列和比较数列中的最大值和最小值。

(3)关联系数计算。在分析参考数列和比较数列的关联程度时,首先分析各飞机结构件特征信息间的关联程度,即关联系数。关联系数的计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_{i \in m} \min_{k \in n} \Delta_i(k) + \varepsilon \max_{i \in m} \max_{k \in n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \varepsilon \max_{i \in m} \max_{k \in n} \Delta_i(k)} \quad (8)$$

式中, $\xi_i(k)$ 为第 k 个飞机结构件特征信息 $a_0(k)$ 与 $a_i(k)$ 的关系系数; ε 是分辨系数,在计算时一般取 $\varepsilon = 0.5$; $\Delta_i(k) = |a_0(k) - a_i(k)|$ 为第 k 个飞机结构件特征信息 $a_0(k)$ 与 $a_i(k)$ 的绝对差; $\min_{k \in n} \Delta_i(k)$ 为一级最小差,表示在 $a_i(k)$ 曲线上,各相应点与 $a_0(k)$ 中各相应点距离

的最小值;而 $\min_{i \in m} \min_{k \in n} \Delta_i(k)$ 为两级最小差,表示在各曲线上找出最小差 $\min_{k \in n} \Delta_i(k)$ 的基础上,再按照 $i=1, 2, \dots, m$ 找出所有曲线中的最小差; $\max_{i \in m} \max_{k \in n} \Delta_i(k)$ 为两级最大差。

(4) 计算关联度。每个比较数列飞机结构件特征信息关联系数的集中体现数值称为关联度。关联度的大小表示参考数列和比较数列的拟合程度大小。将参考数列作为最优序列,关联度越大,表示数列 $a_i(k)$ 与参考数列 $a_0(k)$ 越接近,在一系列的比较数列中为较优数据。关联度计算公式为

$$R_{i0} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega(k) \xi_i(k) \quad (9)$$

式中, n 为飞机结构件的特征数; R_{i0} 为比较数列 $a_i(k)$ 对应参考数列 $a_0(k)$ 的关联度; $\omega(k)$ 为第 k 个飞机结构件特征信息的权系数。

4 应用

4.1 类型选择

将混合推理技术运用到飞机结构件实际设计过程中。首先根据飞机结构件设计要求中的模糊属性信息,运用模糊规则推理技术对飞机结构件进行选型,下面以典型飞机结构件型材为例论述其推理过程。首先,通过隶属度函数确定各模糊属性的隶属度,结合规则信息即可确立目标结构件的模糊规则库。表1为典型飞机结构件型材的设计要求模糊规则库。

设计人员在通过规则推理对飞机结构件进行选型时,首先通过人机交互界面输入型材的模糊属性设计要求,目标结构件型材的设计要求如表1第2行所示。其规则表示为

“IF 承载能力高 and 装配工艺性高 and 制造成本高 and 承压稳定性中

THEN 普通长桁 T 型型材”

因此匹配到了唯一规则,推理出

的结果为“普通长桁 T 型型材”,通过规则推理系统确定了型材飞机结构件的类型。

4.2 实例检索

在确定好飞机结构件类型后,即确定了下一步实例推理过程中实例检索的检索域,接下来要确定相似实例型号。根据实例库中的数据,实例推理系统对“普通长桁 T 型型材”进行实例检索,实例检索过程通过对设计要求的数值属性进行相似度计算来实现。普通长桁 T 型型材设计要求的数值属性主要包括立边长度 H 、底边长度 B 、底边厚度 δ 、立边厚度 δ_1 、内棱边圆角半径 R 、底边处圆角半径 r 和立边处圆角半径 r_1 。

普通长桁 T 型型材结构件在实例库中的尺寸参数如表2中实例编号 $A_1 \sim A_{10}$ 所示,目标型材结构件尺寸参数设计要求如表2中实例编号 A_0 所示。

将属性参数代入实例检索计算模型,计算可求得目标型材与实例库中各实例的相似度,以目标实例与实例编号 A_1 的特征属性底边长度 B 为例,阐述其特征相似度计算过程。从表2中可以确定, $S_{li} = 40 \text{ mm}$, $S_{ei} = 30 \text{ mm}$, $S_{maxi} = 58 \text{ mm}$, $S_{mini} = 29 \text{ mm}$,由式(3)计算可得其相似度为 $f(40, 30) = 0.6552$ 。同样按上述过程,计算出各特征属性相似度,可以得到相似度矩阵。

表1 型材模糊属性设计要求

Table 1 Requirements for fuzzy parameter attribute design of section steel

型材类型	承载能力	装配工艺性	制造成本	承压稳定性
目标型材	高	高	高	中
普通长桁 T 型型材	高	高	高	中
普通长桁等边 L 型型材	高	高	低	中
普通长桁不等边 L 型型材	高	高	低	高
蒙皮长桁 T 型型材	高	低	高	中
蒙皮长桁等边 L 型型材	高	高	低	低
蒙皮长桁不等边 L 型型材	高	高	低	高

表2 型材数值属性参数

Table 2 Section steel numerical property parameter

mm

实例编号	H	B	δ	δ_1	R	r	r_1
A_0	20	40	1.5	1.5	3.0	0.30	0.30
A_1	20	30	1.5	1.5	2.0	0.75	0.75
A_2	25	29	1.6	1.6	1.6	0.80	0.80
A_3	25	35	1.5	1.5	2.0	0.75	0.75
A_4	25	48	1.5	1.5	1.5	0.20	0.20
A_5	25	50	2.0	2.0	3.0	0.20	0.20
A_6	25	50	2.5	2.5	3.0	0.20	0.20
A_7	29	38	1.6	1.6	1.6	0.20	0.20
A_8	29	58	3.5	3.5	4.0	0.20	0.20
A_9	30	40	1.5	1.5	2.0	0.75	0.75
A_{10}	32	45	3.0	3.0	3.0	0.20	0.20

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.6552 & 1 & 1 \\ 0.5833 & 0.6207 & 0.95 & 0.95 \\ 0.5833 & 0.8276 & 1 & 1 \\ 0.5833 & 0.7241 & 1 & 1 \\ 0.5833 & 0.6552 & 0.75 & 0.75 \\ 0.5833 & 0.6552 & 0.5 & 0.5 \\ 0.25 & 0.9310 & 0.95 & 0.95 \\ 0.25 & 0.3793 & 0 & 0 \\ 0.1667 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.8276 & 0.25 & 0.25 \\ 0.6 & 0.25 & 0.25 & \\ 0.44 & 0.1667 & 0.1667 & \\ 0.6 & 0.25 & 0.25 & \\ 0.4 & 0.8333 & 0.8333 & \\ 1 & 0.8333 & 0.8333 & \\ 1 & 0.8333 & 0.8333 & \\ 0.44 & 0.8333 & 0.8333 & \\ 0.6 & 0.8333 & 0.8333 & \\ 0.6 & 0.25 & 0.25 & \\ 1 & 0.8333 & 0.8333 & \end{bmatrix}$$

各特征属性权值由设计人员给出,各特征属性重要度分别为: $h_1 = 2.5$, $h_2 = 2.1$, $h_3 = 1.25$, $h_4 = 1.25$, $h_5 = 2.0$, $h_6 = 0.9$, $h_7 = 0.9$, 将各特征属性重要度归一化, 计算得到各特征属性的权值, 具体如下:

$$\omega = \{0.2294, 0.1927, 0.1147, 0.1147, 0.1835, 0.0826, 0.0826\}$$

通过加权求和的方法, 利用式(2)求得各特征数值属性参数相似度为

$$\text{Similarity}(t, e) = \{0.7364 \quad 0.5796 \\ 0.6741 \quad 0.7137 \quad 0.7532 \quad 0.6958 \\ 0.6730 \quad 0.3781 \quad 0.6117 \quad 0.5379\}$$

选择相似度 0.6900 作为临界值, 根据计算结果, 可以看出实例编号为 1、4、5、6 的旧实例满足临界条件, 故选择这 4 个实例作为相似实例。

4.3 实例评价

实例检索系统检索出相似实例后, 还需对相似实例进行评价, 从而挑选出综合性能最优的最佳相似实例。依据表 2 数据可知, 其参考数列为

$$A_0 = \{20 \quad 40 \quad 1.5 \quad 1.5 \quad 3 \quad 0.3 \quad 0.3\}$$

通过上面的实例检索步骤可知, 实例 A_1 、 A_4 、 A_5 、 A_6 为所选择的相似实例, 故将这 4 个实例的特征参数作为比较数列, 其比较数列为

$$A = \{A_1 \quad A_4 \quad A_5 \quad A_6\} = \begin{bmatrix} 20 & 30 & 1.5 & 1.5 & 2 & 0.75 & 0.75 \\ 25 & 48 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 0.2 & 0.2 \\ 25 & 50 & 2 & 2 & 3 & 0.2 & 0.2 \\ 25 & 50 & 2.5 & 2.5 & 3 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

然后将得到的参考数列与比较数列进行归一化处理, 归一化处理的结果为

$$A = \{A_0 \quad A_1 \quad A_4 \quad A_5 \quad A_6\} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.8 & 0.6 & 1 & 0.4 \\ 0.8 & 0.6 & 0.6 & 0.6667 & 1 \\ 1 & 0.96 & 0.6 & 0.5 & 0.2667 \\ 1 & 1 & 0.8 & 1 & 0.2667 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.2667 \end{bmatrix}$$

然后进行关联系数求解, 首先求出参考数列与比较数列的绝对差, 结果为

$$\{\Delta_1\} = \{0, 0.200, 0, 0, 0.333, 0.600, 0.600\}$$

$$\{\Delta_4\} = \{0.200, 0.004, 0, 0, 0.500, 0.133, 0.133\}$$

$$\{\Delta_5\} = \{0.200, 0.200, 0.200, 0.200, 0, 0.133, 0.133\}$$

$$\{\Delta_6\} = \{0.200, 0.200, 0.400, 0.400, 0, 0.133, 0.133\}$$

由所求各数列的绝对差, 可求出两级最大差为 0.600, 两级最小差为 0。将最大差与最小差的值代入式(8)中, 求得各关联系数为

$$\xi_1 = (1.0000, 0.8000, 1.0000, 1.0000, 0.4739, 0.3333, 0.3333)$$

$$\xi_4 = (0.6000, 0.9868, 1.0000, 1.0000, 0.3750, 0.6928, 0.6928)$$

$$\xi_5 = (0.6000, 0.6000, 0.6000, 0.6000, 1.0000, 0.6928, 0.6928)$$

$$\xi_6 = (0.6000, 0.6000, 0.4286, 0.4286, 1.0000, 0.6928, 0.6928)$$

将关联系数与各特征所对应权值代入式(9)中, 各特征属性权重采用实例检索时所用的权重, 即

$$\omega = \{0.2294, 0.1927, 0.1147, 0.1147,$$

0.1835, 0.0826, 0.0826\}, 求出各关联度为: $R_1 = 0.1078$, $R_4 = 0.1058$, $R_5 = 0.0984$, $R_6 = 0.0928$ 。由计算结果可知, 实例 A_5 在实例检索过程中相似度值最大, 但关联度评价却不是最高。由此可知, 相似度最大的实例其关联度不一定最高。通过综合考虑相似度和关联度的大小, 得到实例 A_1 为实例推理系统所推理到的最佳相似实例。

4.4 结果分析

将本文的混合推理策略和传统推理策略进行比较, 通过检索出的最佳相似实例与目标实例各特征的相对误差值大小来评判推理结果的优劣。对于同一实例库数据, 混合推理策略推理出的最佳相似实例结果为 A_1 , 其各特征的误差值的百分比为 (0, 25%, 0, 0, 33.33%, 150%, 150%); 传统推理方法所推理出的最佳相似实例结果为实例 A_2 , 其各特征误差值百分比为 (25%, 27.5%, 6.7%, 6.7%, 46.67%, 167%, 167%), 两种推理结果各特征相对误差曲线如图 6 所示。可以看出, 由混合推理策略所检索出的最佳相似实例的各组特征的误差值普遍小于传统推理策略, 当最佳相似实例的特征误差值越小时, 对其进行变型设计的难度就越低, 因而提高了推理的准确性与零件设计效率。

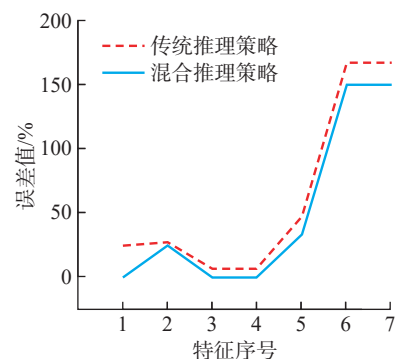


图 6 传统推理策略与混合推理策略结果对比
Fig.6 Comparison of results between traditional reasoning strategy and hybrid reasoning strategy

4.5 变型设计

在完成相似实例的检索与评价后,即得到了与目标实例相似度最高且综合性能最好的最佳相似实例。为了得到目标结构件,还需对最佳相似实例进行变型设计,以得到满足设计要求的最佳结构件模型。本文变型设计系统以最佳相似实例为变型模板,通过对最佳相似实例各特征的尺寸参数修改完成变型。基于混合推理的变型设计技术主要体现了两方面的优势:一是通过实例推理从已有模型库中检索出综合相似度最高的实例进行变型设计,直接对零件各特征进行尺寸的更新修改,与参数化建模技术相比免去了一些重复性操作,使得飞机结构件设计过程更加简便,能有效缩短建模周期,提高零件的设计质量、效率、知识与模型的重用度;二是变型设计时的飞机结构件各设计要求属性参数都由设计人员在设计过程中输入到了建模系统中,使得零件的各属性参数与模型紧密关联,方便设计人员的管理和查验。

图7为型材结构件变型设计前后对比,可以看出,变型设计前后的型材结构没有发生改变,而相应特征的尺寸参数发生了变化,包括底边长度、底边圆角半径、棱边圆角半径等。变型设计前的型材可以和蒙皮实现紧密的贴合,使得蒙皮与其他飞机结构件固结性能好,但由于底边长度

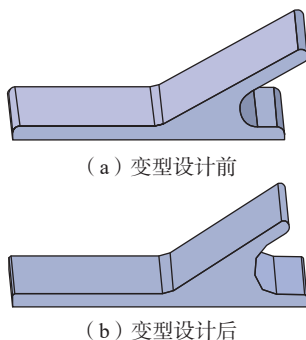


图7 变型设计前后对比

Fig.7 Comparison before and after variant design

小、立边圆角半径小,使其抗弯曲扭转的能力较弱;变型设计后型材的底边长度、立边圆角半径、底边圆角半径、棱边圆角半径都得到了相应的增加,使结构件剖面的绝对尺寸增大。圆角处应力集中减小,其疲劳强度随之提高,剖面的惯性矩增大,提高了型材的临界稳定应力。这使其能够更好地承受复杂的工作载荷,因而变型设计后的型材不仅满足了设计要求,更体现了其结构优势。

5 结论

本文从飞机结构件设计时设计人员给定的设计要求出发,将规则推理与实例推理相混合的推理策略引入飞机结构件设计中。通过混合推理策略对飞机结构件进行智能设计,利用规则推理确定飞机结构件类型,缩小了实例推理的检索域;利用实例检索与评价策略提高了实例推理的准确性,进而提高了飞机结构件设计效率。其主要内容如下。

(1)将模糊理论与规则推理相结合,通过隶属度函数将模糊属性精确化表示,继而匹配相应的模糊规则并储存在模糊规则库中,利用规则推理系统作用于模糊规则库进行正向推理,实现了飞机结构件的选型。

(2)在确定好飞机结构件类型后,通过归纳法缩小实例检索的检索域,通过最近相邻算法将待设计的目标实例与实例库中的旧实例进行相似度计算,从实例库中检索出几个相似度较高的飞机结构件实例。

(3)利用灰色关联分析理论对上一步检索出的几个相似度较高的实例进行评价,从而分析出综合相似度与关联度的最佳相似实例;然后对检索与评价后的最佳相似实例进行变型设计,以得到满足设计需求的飞机结构件模型。

参考文献

- [1] 帅朝林. 飞机结构件数字化设计与制造技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(1/2): 48-52.
- [2] SHUAI Chaolin. Digital design and manufacturing technology for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(1/2): 48-52.
- [3] GOLDING A R, ROSENBLOOM P S. Improving accuracy by combining rule-based and case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence, 1996, 87(1-2): 215-254.
- [4] CHI R T H, KIANG M Y. Reasoning by coordination: An integration of case-based and rule-based reasoning systems[J]. Knowledge-Based Systems, 1993, 6(2): 103-113.
- [5] NOH N M, AHMAD A, HALIM S A, et al. Intelligent tutoring system using rule-based and case-based: A comparison[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 67: 454-463.
- [6] KUMAR K A, SINGH Y, SANYAL S. Hybrid approach using case-based reasoning and rule-based reasoning for domain independent clinical decision support in ICU[J]. Expert Systems With Applications, 2009, 36(1): 65-71.
- [7] GUESSOUM S, LASKRI M T, DJELLALI H, et al. Combining case and rule based reasoning for the diagnosis and therapy of chronic obstructive pulmonary disease[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2012, 5(3): 145-160.
- [8] GOH Y M, GUO B H W. FPSWizard: A web-based CBR-RBR system for supporting the design of active fall protection systems[J]. Automation in Construction, 2018, 85: 40-50.
- [9] 焦起祥. 飞机智能设计技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- [10] JIAO Qixiang. Research on aircraft intelligent design technology[D]. Beijing: Beihang University, 2011.
- [11] 王静, 周来水, 毕建平, 等. 基于CBR/RBR集成推理的注塑模架智能化设计系统的研究[J]. 塑料科技, 2017, 45(6): 68-72.
- [12] WANG Jing, ZHOU Laishui, BI Jianping, et al. Research on intelligent design system for injection mold-base based on CBR/RBR integrated reasoning[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(6): 68-72.
- [13] 张奕, 卜凡亮. 基于CBR与RBR的应急决策支持系统设计与实现[J]. 软件导

刊, 2019, 18(2): 55–59.

ZHANG Yi, BU Fanliang. Design and implementation of emergency decision support system based on CBR and RBR[J]. Software Guide, 2019, 18(2): 55–59.

[11] 陆凌云, 李伟, 杨明, 等. 基于混合推理的仿真实验设计方法智能选择[J]. 自动化学报, 2019, 45(6): 1055–1064.

LU Lingyun, LI Wei, YANG Ming, et al. Intelligent selection of simulation experiment design methods based on hybrid reasoning[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(6): 1055–1064.

[12] 黄新波, 刘成, 张焯, 等. CBR 和 RBR 融合的牵引变压器运维策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 194–200.

HUANG Xinbo, LIU Cheng, ZHANG Ye, et al. Operation and maintenance strategy of traction transformer based on CBR and RBR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 194–200.

[13] NI H, XU X L, GONG H, et al. Design of fast fault diagnosis system for transformer equipment based on CBR and RBR[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(5): 052004.

[14] 沈子恒, 吕彦明, 袁飞, 等. 基于混合推理的汽轮机叶片夹具自顶向下设计方法[J]. 机电工程, 2021, 38(6): 780–786.

SHEN Ziheng, LÜ Yanming, YUAN Fei, et al. Design method of turbine blade fixture from top to bottom based on hybrid reasoning[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(6): 780–786.

[15] 张航, 陈涛, 王玖. CATIA 知识工程技术在飞机结构设计中的应用[J]. 制造业自动化, 2020, 42(9): 1–4, 16.

ZHANG Hang, CHEN Tao, WANG Jiu. The application of CATIA knowledge engineering technology in aircraft structure design[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(9): 1–4, 16.

[16] 张家祺, 孙惠东. 基于实例推理方法的仿生设计研究[J]. 设计, 2021, 34(7): 53–55.

ZHANG Jiaqi, SUN Huidong. Research on bionic design based on case reasoning method[J]. Design, 2021, 34(7): 53–55.

[17] 杨蓓, 蔡西梅, 艾艳. 专家系统中的模糊知识表示及推理研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2004, 36(2): 31–33.

YANG Bei, GOU Ximei, AI Yan. Study on the fuzzy knowledge representation and reasoning in expert system[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2004, 36(2): 31–33.

[18] 毕淑琴, 宋正河, 金晓萍, 等. 履带式联合收割机传动系设计知识库构建[J].

农业工程, 2013, 3(3): 94–98.

BI Shuqin, SONG Zhenghe, JIN Xiaoping, et al. Design of knowledge base for crawler combine harvester transmission system[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(3): 94–98.

[19] 罗率力. 基于医学诊断的模糊专家系统技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

LUO Lili. Research on fuzzy expert system based on medical diagnosis[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[20] 孔繁胜. 知识库系统原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.

KONG Fansheng. Principle of knowledge base system[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.

[21] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng. Grey systems: Theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[22] 张禹, 白晓兰, 张朝彪, 等. 基于实例推理的数控机床智能模块组合方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 120–129.

ZHANG Yu, BAI Xiaolan, ZHANG Chaobiao, et al. CBR-based intelligent modular combination method for CNC lathe[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 120–129.

Variant Design of Aircraft Structure Parts Based on Hybrid Reasoning

HAO Bo^{1,2}, WANG Wanjiang¹, ZHANG Peng¹, LIU Liwei¹

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

[ABSTRACT] Based on the hybrid reasoning method of rule-based reasoning (RBR) and case-based reasoning (CBR), this paper studies the intelligent design method of aircraft structural parts. Firstly, combined with fuzzy theory and rule-based reasoning technology, processing fuzzy parameters for aircraft structure parts design, and the intelligent selection system of aircraft structural parts is designed to realize the type selection of aircraft structural parts. Secondly, the K-nearest neighbor (KNN) and grey relation analysis (GRA) are used to deal with the numeric parameters of aircraft structural parts design, and it implements cases retrieval and evaluation. Then the best similar cases are used for variant design to obtain the target case. Finally, the feasibility of the hybrid reasoning intelligent design system is verified by taking the section steel as an example.

Keywords: Aircraft structure parts; Rule-based reasoning (RBR); Case-based reasoning (CBR); Cases evaluation; Variant design (责编 逸飞)