

面向装配的产品结构设计模糊评价方法与实现^{*}

徐晓慧 童秉枢

【摘要】 从产品结构设计入手,论述了面向装配的机械产品结构设计通用评价指标体系以及针对具体产品的专用评价指标体系的建立方法,探索了产品结构设计的模糊评价方法和步骤,论述了面向装配的机械产品结构设计模糊评价的实现技术。其中包括:框架和规则相结合的知识表达形式、利用 Matlab 建立评价指标知识获取平台的方法、推理确定隶属度函数的方法以及采用德尔非法确定指标权数的步骤等,并针对具体机械产品进行了评价和分析。

关键词: 模糊评价 产品结构设计 面向装配的设计 液力变矩器

中图分类号: TH122; O159; N945.16 **文献标识码:** A

Fuzzy Evaluation and Implementation Techniques of Product Structure Design for Assembly

Xu Xiaohui Tong Bingshu

(Tsinghua University)

Abstract

Starting with the product structure design, the general evaluation index system of mechanical product structure design for assembly and the special evaluation index system for concrete product have been set up, meanwhile the fuzzy evaluation methods and procedure for product structure design were explored. Some techniques related with fuzzy evaluation of mechanical product structure design for assembly have been carried out, and knowledge representing form of combining frame with rule, establishing method of acquiring knowledge platform for evaluation-index by using Matlab, membership function determination method through reasoning, adopting the Delphi method for determining the steps of index weighing were all included in the techniques. Further more, a specific mechanical product was assessed and analyzed.

Key words Fuzzy evaluation, Product structure design, Design for assembly, Hydraulic torque converter

引言

近年来国内外在面向装配的机械产品评价方面开展了很多研究工作,大多集中在产品可装配性评价、可拆卸性评价和可加工性评价等方面。其中,从产品装配角度出发,对产品结构设计的评价尚不充分^[1~3]。因此从结构设计入手,确定评价指标体系的内容,研究评价的方法及实现技术,并对具体机械产品进行评价和分析是十分必要的。

1 产品结构设计评价指标体系

评价指标体系的优劣直接影响评价的结果,因此明确目标,建立尽可能覆盖评价内容的、切实可行的评价指标体系,是评价工作首先必须完成的内容。

机械产品的结构设计随产品的种类和性能不同而千变万化,所涉及的知识大多难以用文字和符号描述,设计准则和评价指标也多为定性的和模糊的,难以量化精确表示。这就给建立评价指标体系带

来了困难。

为了解决这些矛盾,以液力变矩器^[4]为例,将机械产品设计常遇到的问题和所涉及的知识,从结构设计的角度进行分类。首先将知识分为通用和专用

两大类,分别建立相应的评价指标体系,用评价指标树表示如图1和图2所示^[5~6],其目的主要是为了增强系统的通用性,减少用户建立评价指标的工作量。对具体产品的评价,既需要用到专用评价指标

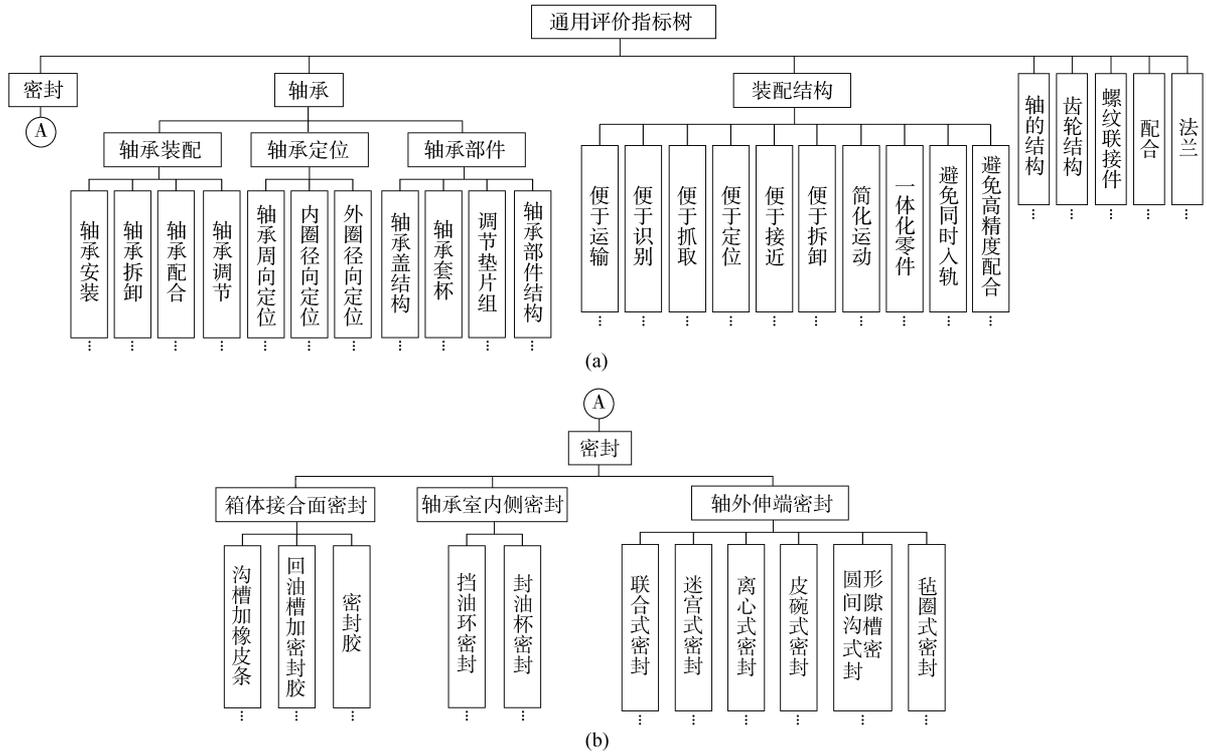


图1 机械产品结构设计通用评价指标树

Fig.1 General evaluation index tree of mechanical product

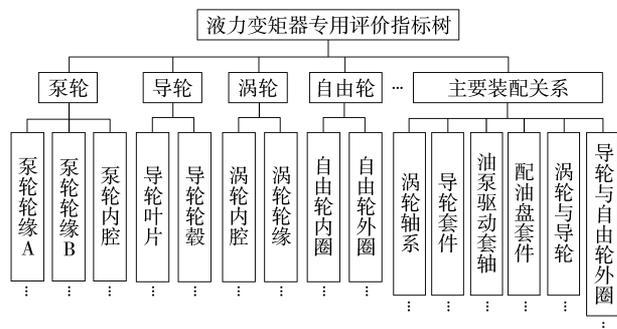


图2 液力变矩器结构设计专用评价指标树

Fig.2 Special evaluation index tree for structure design of hydraulic torque converter

树,又需要用到通用评价指标树,专用评价指标树的指标细分之后往往会包含通用评价指标树中的相关内容。

2 模糊评价方法和步骤

产品结构设计的优劣是一个相对的、定性的、难以定量精确表示的模糊概念。因此面向装配的产品结构设计评价是一个多指标、多层次的模糊评价问题。

首先引入两个模糊数学中的定义:

定义1:设给定论域 U , U 到 $[0,1]$ 闭区间的任一

映射 $\mu_A:U \rightarrow [0,1]$

$$u \rightarrow \mu_A(u)$$

都确定 U 的一个模糊子集 A , μ_A 叫 A 的隶属度函数, $\mu_A(u)$ 叫作 u 对 A 的隶属度^[7]。

定义2:在模糊情形,设给定一个模糊矩阵

$$R = (r_{ij})_{s \times m} \quad (0 \leq r_{ij} \leq 1)$$

和一个模糊向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_s)$

其中 $0 \leq a_i \leq 1 \quad (i=1,2,\dots,s)$

用“ \circ ”表示合成算子,并将 A 写在 R 之前,记为

$$A \circ R = B \quad (1)$$

其中,“ \circ ”的运算规则是将线性变换 $A \cdot R = B$ 中的乘法换为算子“ \wedge ”(表示取极小),加法换为算子“ \vee ”(表示取极大)^[7]。则式(1)称为模糊变换^[7]。

评价采用分层次按因素的模糊评价方法,即按由底层到高层,由单因素向多因素综合的步骤进行。

(1) 确定评价对象的评价指标论域 U ,并分解为 n 个子集,即

$$U = \bigcup_{i=1}^n u_i \quad (2)$$

其中 $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ip_i}\} \quad (i=1,2,\dots,n)$

(2) 对每个评价指标子集 u_i ,分别进行单级单指标模糊评价。设评价等级论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$

其中 q 最好是奇数,这样可有一个中间等级。

对 u_i 中的每个指标进行量化,确定从单指标看产品结构对各等级的隶属度。从而得 u_i 的单指标模糊关系矩阵 R_i 。

确定 u_i 中各指标的模糊权向量

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip_i})$$

在进行合成之前须对 A_i 进行归一化处理,使

$$\sum_{r=1}^{p_i} a_{ir} = 1 \quad (3)$$

对 A_i 与 R_i 实施模糊变换,得 u_i 单级评价结果向量 B_i ,即

$$\begin{cases} A_i \circ R_i = B_i \\ B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, s) \quad (4)$$

取综合指标 $u_i (i=1, 2, \dots, s)$ 的模糊权向量为

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_s)$$

(3) 多级模糊评价^[8]。将 u_i 当作综合指标,用 B_i 作为其单指标评价结果,重复(1)~(2),即得多级模糊评价模型。

(4) 模糊评价结果的分析。采用加权平均法处理模糊评价结果向量。其基本思想是:将评价等级向量按照各分量的位置取其秩,即用 $1, 2, \dots, q$ 表示各等级,将结果向量 B 中各分量的秩加权求和,即得被评价对象的相对位置。记作

$$E = \sum_{j=1}^q b_j^k j / \sum_{j=1}^q b_j^k \quad (5)$$

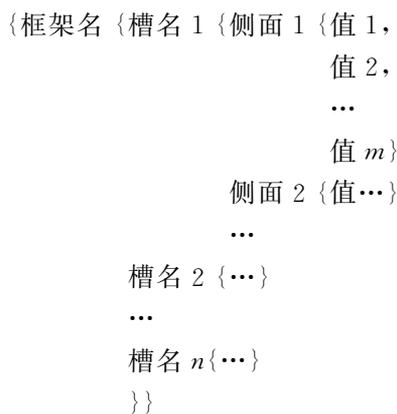
其中 k 为待定系数,用以控制较大 b_j 所起的作用,常取 1 或 2。这样就可以根据 E 的大小对多个被评价对象进行排序^[8]。

3 模糊评价的关键技术

3.1 评价指标的知识表达形式

根据评价指标树的结构特点,采用面向对象的框架结构表达评价指标知识。框架由框架名、槽名、

侧面名、值等组成。其基本逻辑结构可表达为



其中,框架名表示被评价的对象,如液力变矩器等;槽名表示评价指标名,如密封等;侧面名表示子评价指标名,如毡圈式密封等;值表示评价指标的具体内容,如说明项:便于定期更换毡圈及调整径向密封力等。根据指标的内容,一个侧面可有多个值域。其中也可放置产生式规则。由于评价指标树是多层结构,所以表达框架也相应地采用多层嵌套形式。{框架{子框架{槽{子槽{侧面{子侧面{值...}}}}}}}}。

在计算机内,采用多层嵌套的线性表表示框架的内容。

3.2 评价指标知识获取平台

机械产品结构最方便的方式是图形,为了对结构设计进行模糊评价,必须对照评价指标将产品的结构内容输入计算机,从而形成具体的指标内容。因此采用建立评价指标知识获取平台的方法,使用户能够方便地根据设计产品的结构,按照系统设定的方式将相关信息输入计算机,为模糊评价提供依据。按照图 1 和图 2 所示的两个评价指标树的内容,分别建立了机械产品通用评价指标知识获取平台和特定产品专用评价指标知识获取平台。在获取评价指标相关知识的同时,也给用户的结构设计提供了指导。图 3 为通用评价指标知识获取平台示例。

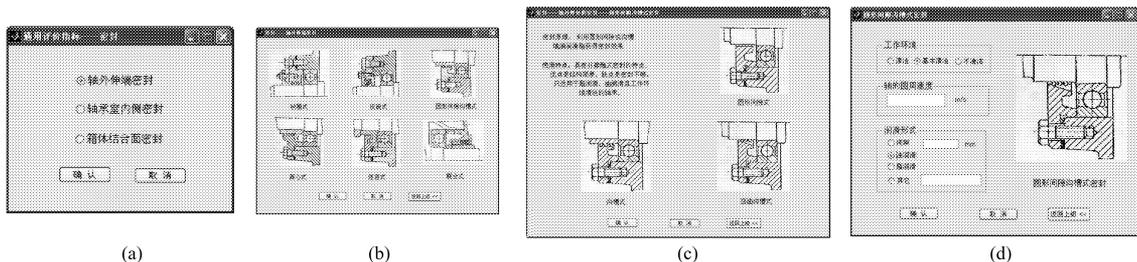


图 3 通用评价指标知识获取平台示例

Fig. 3 Demonstration for general evaluation index knowledge acquiring platform

(a) 评价指标子树一级界面 (b) 评价指标子树二级界面 (c) 评价指标子树三级界面 (d) 评价指标子树叶结点界面

3.3 评价隶属度函数

根据机械产品结构设计的特点,采用推理的方式选择和确定各评价指标的隶属度函数^[7]。确定隶

属度函数的知识采用产生式规则 IF-THEN 的形式表示。规则的内容主要反映机械产品结构设计的知识,其中:IF 前提部分是评价指标的内容,设计

事实相对应;而 THEN 结论部分,就是相对应的隶属度函数。对于大部分定性的结构设计准则,采用专家打分的方法确定隶属度函数。在规则的结论部分直接给出隶属度函数的数值。

如图 1 中评价指标圆形间隙沟槽式密封中的间隙式结构,其 4 个具体评价指标为润滑形式、工作环境、圆周速度、间隙,分别要求油或脂润滑,工作环境清洁,圆周速度不超过 7 m/s,间隙在 0.2~0.5 mm 之间。根据这些知识内容,评价指标润滑形式的相关规则可写成:

IF(润滑形式=油润滑 or 脂润滑)THEN(1,0,0)ELSE(0,0,1)

IF(工作环境=清洁)THEN(1,0,0)

IF(工作环境=基本清洁)THEN(0,1,0)

IF(工作环境=不清洁)THEN(0,0,1)

IF(圆周速度≤7 m/s)THEN(1,0,0)ELSE(0,0,1)

IF(0.2 mm≤间隙≤0.5 mm)THEN(1,0,0)ELSE(0,0,1)

其中,隶属度函数的数值为(1,0,0)表示合格、(0,1,0)表示基本合格、(0,0,1)表示不合格。

这些规则可存储在前面介绍的评价指标框架中,作为侧面的一个值,与评价指标内容紧密相连。规则可利用 Matlab 提供的模糊规则可视化编辑工具进行录入,也可直接在程序中添加^[9]。

3.4 评价指标权数

采用德尔菲法,确定各评价指标的权数。为了方便专家给定权数和对结果进行处理,系统设计了一个权数确定工具,如图 4 所示,其主要功能是确定各评价指标的权数。



图 4 评价指标确定工具界面

Fig. 4 Interface of determining assessment index weighing

4 液力变矩器面向装配结构设计模糊评价

按照上述给定的评价方法和步骤,分别对液力变矩器的两种设计方案(设计图略)进行评价。

设评价等级论域为

$$V = \{\text{合理, 基本合理, 不合理}\}$$

根据液力变矩器结构设计所涉及的问题,选取主要指标,建立评价指标论域,记作

$$U = \{W, T\}$$

其中, $W = \{\text{密封, 轴承, 轴, 齿轮, 螺纹联接件, 配合, 法兰, 装配结构}\}$, 为通用评价指标子集; $T = \{\text{泵轮, 导轮, 涡轮, 自由轮, 主要装配关系}\}$, 为专用评价指标子集。

虽然两个设计方案的评价指标总论域相同,但由于结构不同,评价指标的子集有所差别。篇幅所限,这里只给出设计方案 I 最后一级的评价结果,见表 1。

表 1 设计方案 I 的评价结果

Tab. 1 Evaluation result of design project I

评价指标	合理	基本合理	不合理
密封 I	0.71	0.26	0.03
轴承 I	0.47	0.35	0.18
轴 I	0.21	0.38	0.41
螺纹联接件 I	0.63	0.26	0.11
配合 I	0.36	0.46	0.18
装配结构 I	0.35	0.43	0.22
泵轮 I	0.61	0.26	0.13
导轮 I	0.58	0.30	0.12
涡轮 I	0.68	0.22	0.10
自由轮 I	0.51	0.32	0.17
主要装配关系 I	0.53	0.40	0.07

实际评价时发现,如果把表 1 中的数据作为模糊矩阵 R 进行评价,由于评价指标项目较多,权数向量中各分量的值过小而会影响评价结果,为此将表 1 中的数据划分为 3 组,分别进行模糊变换得

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.40 & 0.22 \\ 0.30 & 0.38 & 0.41 \\ 0.40 & 0.26 & 0.13 \end{bmatrix}$$

取权数向量 $A_1 = (0.3, 0.2, 0.5)$

再进行模糊变换得 $B_1 = (0.4, 0.3, 0.22)$

同理可算得设计方案 II 的模糊评价结果为

$$B_1 = (0.2, 0.42, 0.3)$$

运用加权平均法对两个设计方案的模糊评价结果进行分析处理,将评价等级向量按照各分量的位置取其秩,即:用 1 代表合格、2 代表基本合格、3 代表不合格,按式(5)计算得

$$E_1 = \frac{1 \times 0.4^2 + 2 \times 0.3^2 + 3 \times 0.22^2}{0.4^2 + 0.3^2 + 0.22^2} \approx 1.6$$

$$E_2 = \frac{1 \times 0.2^2 + 2 \times 0.42^2 + 3 \times 0.3^2}{0.2^2 + 0.42^2 + 0.3^2} \approx 2.2$$

$E_1 \approx 1.6$, 说明设计方案 I 的评价结果介于合格与基本合格之间; $E_2 \approx 2.2$, 说明设计方案 II 的评价结果介于基本合格与不合格之间。由此可见设计

方案 I 相对于方案 II 更合理一些。

5 结束语

将机械产品的常用结构进行分类,建立了面向装配的机械产品结构设计通用评价指标体系,同时针对具体产品建立了相应的专用评价指标体系;运用模糊数学的基本原理和方法,确立了单因素多层

次的评价方法和步骤;采用了框架和规则相结合的知识表达形式、推理确定隶属度函数的方法、德尔菲法确定指标权数以及利用 Matlab 建立评价指标知识获取平台等技术。选择两个工程设计示例进行验证。结果表明,建立的评价指标体系、方法以及实现技术,不但能够满足产品结构设计评价的需要,同时还可对产品结构设计提供指导。

参 考 文 献

- 1 单鸿波,刘继红,黄正东. Web 环境下面向装配的设计系统的研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(2): 341~346.
- 2 Ben-Arieh D, Kumar R R, Tiwari M K. Analysis of assembly operations' difficulty using enhanced expert high-level colored fuzzy petri net model[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2004, 20(5): 385~403.
- 3 郑太雄,伍光凤. 基于模糊神经网络产品设计的可装配性评价[J]. 机械设计, 2005, 22(1): 39~41.
- 4 罗邦杰. 工程机械液力传动[M]. 北京:机械工业出版社, 1991.
- 5 杨文彬. 机械结构设计准则及实例[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- 6 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- 7 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1982.
- 8 胡永宏,贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- 9 吴晓莉,林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.

(上接第 124 页)

- 6 Shklyar A, Arbel A. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(12): 1 039~1 059.
- 7 Bartzanas T, Boulard T, Kittas C. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 479~490.
- 8 Teitel M, Shkylar A. Pressure drop across insect-proof screens[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(6): 1 829~1 934.
- 9 Brundrett E. Prediction of pressure drop for incompressible flow through screens[J]. Journal of Fluid Engineering, Transactions American Society of Mechanical Engineers, 1993, 115(2): 239~242.
- 10 李惟毅,李兆力,雷海燕,等. 农业温室微气候研究综述与理论模型研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5):137~140.
- 11 沈明卫,郝飞麟. 自然通风下栽培番茄的单栋温室内气流场模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 101~105.