产品设计质量模糊评价及设计方案决策研究

王宏斌[1], 杨铁牛[2], 商建东[3]
(1 西北农林科技大学 机械与电子学院, 陕西 杨陵 712100; 2 五邑大学 机械与电子工程系, 广东 江门 529020;
3 洛阳工学院 现代教育技术中心, 河南 洛阳 471039)

[摘 要] 提出了面向并行工程的基于功能特征的产品设计质量模糊评价及方案决策方法, 将模糊综合评价与AHP 方法相结合, 构造产品模糊综合决策模型。并以齿轮减速器为例, 从众多的设计方案中选出最佳设计方案。

[关键词] 产品设计; 产品质量模糊评价; 并行工程
[中图分类号] TS04 [文献标识码] A [文章编号]1000-2782(2001)06-104-04

通过"九五"攻关和中国国家 863 项目的组织实施, 中国在 CAD/CAM、并行工程、工程广义优化和全寿命周期设计技术方面有了较好的基础, 浙江大学、华中理工大学、清华大学、北京航空航天大学、上海交通大学和其他院校相继开展了并行优化、并行工程技术的研究工作。早在 1991 年, 这些院校已经开始认识到开展并行工程技术研究的重要性。近年来, 他们一直致力于并行工程环境的研制工作, 并取得了显著的成绩。美国的全寿命周期设计发展很快, 当前正致力于过程软件框架[1~4]的开发。

由于国际市场竞争加剧, 企业既面临生死存亡的挑战, 也可能获得广阔发展机遇, 其关键取决于能否及时而有效地开发出适应市场需求的新产品。并行工程(CE)是一种产品开发的组织管理方法, 即企业为了缩短产品的开发周期对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行集成设计的一种系统化的工作模式, 这种工作模式使产品开发人员从一开始就考虑到从概念形成到产品报废的产品全生命周期中的所有因素, 包括质量、成本、进度和用户需求等。

产品可按其结构功能要求分解成各种功能特征类的组成部分, 这里的功能特征是一个对象类, 它体现了产品的某种功能要求, 具有一定的结构型式、层次性及多种属性, 它是产品功能载体, 遵循了并行模式下功能—物理—几何这种映射关系。在产品设计中, 笔者以产品功能特征对象支持产品设计及方案决策过程。本研究提出了并行工程环境下, 基于功能特征的产品设计质量模糊评价及方案决策方法, 并给出了实现该方法的主要步骤、数学模型及应用实例。

1 基于功能特征的产品设计质量模糊评价

并行工程环境下进行产品设计时, 要求设计人员在产品的设计阶段就考虑从产品的顾客需求到产品最终报废的整个生命周期内的全部问题, 如产品的功能及性能、可靠性、可制造性、可维护性、可装配性、经济性、开发难度等, 从而尽量避免因设计不妥而给后期的设计制造和使用带来的一系列不便和麻烦, 延长产品开发周期并造成成本上升, 故在设计阶段必须进行产品设计质量的评价。但在产品设计质量评价中所使用的一些性能指标的计算和评价结果需要大量的时间, 且有些性能指标在产品定型之前无法精确计算出来。在许多工程实际中或产品设计初期, 有些指标只需作一些定性的评价, 而没有必要知道它们的准确值。在定性数学评价模型中, 常以模糊理论为指导去分析某些事物的性质, 并结合工程实际中的专家知识来创建产品评价模型。其意义在于, 模糊环境中可以考虑多种因素的影响, 按照各因素的影响程度不同, 综合地评价产品各性能的设计质量[5]。

通过分析, 提出基于功能特征的产品设计质量模糊综合评价模型, 它由两层评判模型组成, 上层为产品的各功能特征因素, 下层为对应每一个功能特征的产品质量评价指标。首先定义下列集合:

1) 产品设计质量指标因素集: $QU = \{Qu_1, Qu_2, \cdots, Qu_n\}$, 它表达了所进行评定的各项设计质量指

[收稿日期] 2000-12-29
[作者简介] 王宏斌(1965-), 男, 陕西凤翔人, 讲师, 主要从事木工机械及野生植物加工利用机械与设备的教学及研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

标。

2) 产品功能特征因素集: $FU = \{Fu_1, Fu_2, \cdots, Fu_j\}$, 它表示产品设计中所使用的各类功能特征要素。

3) 评判集: $V = \{V_1, V_2, \cdots, V_m\}$, 它表示了各项设计质量指标的模糊评判等级。

4) 功能特征因素集的权重集: $FD = \{Fd_1, Fd_2, \cdots, Fd_j\}$, 它表示了各功能特征因素对产品设计质量指标影响的权重集。

$$\sum_{j=1}^{K} Fd_j = 1 \tag{1}$$

5) 任一功能特征 Fu_j 的设计质量指标的权重集 QD_j 可表示为式(2), QD 中各数值分别表达了 Fu_j 设计质量指标对设计质量的影响程度, 有 K 类功能特征, 就有 K 个设计质量指标权重阵。

$$\mathrm{QD}_j = \{(Qd_j)_i\} \qquad \sum_{i=1}^{n} (Qd_j)_i = 1 \tag{2}$$

6) 任一功能特征 Fu_j 的设计质量指标对评价集的模糊矩阵 QR_j 可表示为式(3), 它表达了功能特征 Fu_j 的第 j 个设计质量指标对评价集中的第 l 个评价等级的模糊关系。

$$((Qu_j)_i, (V_j)_l) \propto T_{QR}((Qu_j)_i, (V_j)_l) \quad \mathrm{QR}_j = \{(Qr_j)_{il}\} \tag{3}$$

其中, $(Qr_j)_{il} = T_{QR}((Qu_j)_i, (V_j)_l)$, 隶属度 $T_{QR}: QU \times V \to [0, 1]$

$j = 1, \cdots, k;\ i = 1, \cdots, n;\ l = 1, \cdots, m;$

7) 设计质量指标对评判集的映射可表示为式(4), QE 矩阵中每一行表示了任一功能特征 Fu_j 设计质量的评判结果。

$$T_{QR}: QU \to V;\ \mathrm{QE}_{k\times m} = QD \propto T_{QR}(QD) = QD_{k\times n} \times QR_{n\times m} \tag{4}$$

8) 各功能特征对评价集的模糊矩阵 FR 可用 QE 矩阵表示, 即:

$$\mathrm{FR}_{k\times m} = \mathrm{QE}_{k\times m} \tag{5}$$

9) 基于功能特征的产品设计质量模糊综合评判模型如式(6)所示, FE 矩阵表达了对整个产品设计质量指标的评判结果。

$$T_{FR}: FU \to V;\ \mathrm{FE}_{l\times m} = FD \propto T_{FR}(FD) = \mathrm{FD}_{l\times k} \times \mathrm{FR}_{k\times m} \tag{6}$$

2　多准则方案设计的模糊综合评判

产品方案决策是一项复杂的技术经济系统工程, 是多因素、多目标的复杂系统, 进行决策的方案本身具有不确定性和不精确性的特点, 质量驱动的产品方案决策要求综合客户的要求, 即用户的满意度与产品生命周期各要素的影响, 考虑到模糊综合评判的数学模型简单, 对多准则、多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好, 故笔者将模糊综合评价与 AHP 方法相结合, 构造产品模糊综合决策模型, 帮助设计人员在众多的设计方案中选出最合适的设计方案。首先定义下列集合:

1) 设计方案集合。对所决策的设计问题, 首先确定出 N 个候选设计方案, 即

$$U = \{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$$

2) 设计准则集合。确定产品哪些生命周期问题可作为该设计的设计准则, 这些设计准则对应于产品的 M 个设计子目标。即:

$$V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$$

3) 确定隶属函数和隶属度。每一设计准则的隶属函数应较准确地反映出设计环境和设计偏好, 可由专家评分的方式给出。根据隶属函数和专家评分结果, 得到各个设计方案分别对应于每一个设计子目标的隶属度, 它由下述矩阵表示:

$$\mathrm{R} = (r_{ij})_{n\times m}$$

4) 确定设计目标的重要性权重。使用层次分析法(AHP)来确定每一个设计目标的相对重要性权重, 即:

$$W = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T$$

5) 进行一级评判。此时的评判空间为三元组 (U, V, R), 分别按下述三类评判函数模型进行一级评判:

a) 模型 $M(\wedge, \vee)$, 采用 $(\wedge, \vee)$ 这一对算子, 考虑的是取最大值的情况。

$$B_1 = R \circ W \tag{7}$$

b) 模型 $M(\cdot^m, \wedge)$, 采用 $(\cdot^m, \wedge)$ 这一对算子, 考虑的是取最小值的情况。

$$B_2 = R * W \tag{8}$$

c) 模型 $M(\cdot, +)$, 采用 $(\cdot, +)$ 这一对算子, 考虑的是取加权平均值的情况。

$$B_3 = R \bullet W \tag{9}$$

6) 进行二级评判。仅仅用取最大值、最小值、加权平均值的方法可能会有片面性, 因此, 可综合使用 B_1, B_2, B_3 作为因素集 U_1 中的元素。U_1 的评判矩阵 $\mathrm{R}_1 = (B_i)\ (i = 1, 2, 3)$; U_1 的各指标 $B_i\ (i = 1, 2, 3)$ 的权重分配为 $A_1 = (1/3, 1/3, 1/3)$, 取相等的权重, 使用 $(\cdot, +)$ 这一对算子, 再进行下述二级评判:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B = R_1 \bullet A_1 \tag{10}$$

7) 选择最佳设计方案。根据上一步计算出的评判指标, 确定出具有最大评判值的设计方案作为最佳的设计方案。

3 应用实例

3.1 产品设计质量模糊综合评判

以齿轮减速器为例, 建立基于功能特征的产品质量模糊综合评判模型。根据常规设计经验, 确定齿轮减速器的设计质量指标 QU:

QU = {传递效率, 运动平稳性, 可靠度, 功能成本};

通过分析, 建立对齿轮减速器设计质量影响较大的几类功能特征作为功能特征因素集 FU:

FU = {轴(传递扭矩), 齿轮(变速功能),
轴承(支撑轴功能), 箱体(支撑轴承)};

$$QD = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.30 & 0.20 & 0.25 \\ 0.25 & 0.35 & 0.28 & 0.15 \\ 0.20 & 0.25 & 0.25 & 0.30 \\ 0.30 & 0.25 & 0.30 & 0.15 \end{bmatrix}, \quad QR_j = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.85 & 0.30 & 0.10 & 0.00 \\ 0.95 & 0.85 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.90 & 0.80 & 0.30 & 0.10 & 0.00 \\ 0.90 & 0.80 & 0.30 & 0.10 & 0.00 \end{bmatrix}$$

其中, $j = 1, \cdots, k$。

依据式(1～4)、(1～5)得到产品设计质量指标对评价集的映射 QE 及模糊矩阵 FR:

$$FR = QE = QD \times QR = \begin{bmatrix} 0.915 & 0.828 & 0.027 & 0.070 & 0.000 \\ 0.904 & 0.817 & 0.315 & 0.041 & 0.000 \\ 0.911 & 0.831 & 0.170 & 0.097 & 0.000 \\ 0.913 & 0.824 & 0.031 & 0.090 & 0.000 \end{bmatrix}$$

根据式(1～6)得到对整个产品设计质量指标的综合评判结果 FE:

$$FE = FD \times FR = \{0.911\,1, 0.825\,2, 0.143\,0, 0.075\,9, 0\};$$

该结果说明基于该种功能特征分解结构的齿轮减速器在设计质量上属于较好范畴以上, 该评价结果可为产品设计提供设计修改的依据。

3.2 多准则方案模糊设计决策

在笔者进行的齿轮减速器新产品设计中, 要求评判集 V: V = {很好, 好, 较好, 一般, 差};

依据设计的经验取功能特征权重集 FD = {0.2, 0.25, 0.3, 0.25};

依据式(1～2)建立各类功能特征的设计质量指标权重矩阵 QD:

QD 中各数值分别表达了各设计质量指标对产品设计质量的影响程度, 如第 1 行元素分别代表了减速器传递效率、运动平稳性、可靠度、功能成本在轴(传递扭矩)设计质量中的重要程度。依据常规设计经验, 对实例产品设计中各类功能特征进行分析评价, 可分别得到 K 个如下的产品设计质量评价模糊矩阵 QR_j, QR_j 中各数值分别表达了各类产品设计质量指标对评价集的影响程度。如 $j = 1$ 时, 第 1 行元素代表了轴的传递效率对评价集各因素的影响程度。

在 5 个候选设计方案 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 中选取最佳方案, 设计准则是下面 7 个生命周期问题:

V = {功能和性能, 开发难度, 可靠性,
可维护性, 可装配性, 易用性, 经济性}

先将各定性指标分成 9 个等级, 通过征询专家意见并进行综合, 得到各备选方案满足于各设计子目标的隶属度矩阵 $\hat{R}$, 对其进行归一化处理后, 得到评判矩阵 R 为:

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} 0.743 & 0.577 & 0.828 & 0.64 & 0.625 & 0.605 & 0.793 \\ 0.715 & 0.571 & 0.725 & 0.670 & 0.587 & 0.579 & 0.700 \\ 0.759 & 0.584 & 0.828 & 0.636 & 0.612 & 0.647 & 0.887 \\ 0.705 & 0.562 & 0.725 & 0.581 & 0.587 & 0.622 & 0.674 \\ 0.673 & 0.511 & 0.650 & 0.592 & 0.662 & 0.614 & 0.675 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.154\,2 & 0.119\,7 & 0.171\,8 & 0.134\,5 & 0.129\,7 & 0.125\,3 & 0.164\,6 \\ 0.157\,3 & 0.125\,6 & 0.159\,5 & 0.147\,3 & 0.129\,1 & 0.127\,3 & 0.153\,9 \\ 0.153\,2 & 0.117\,9 & 0.167\,2 & 0.128\,4 & 0.123\,6 & 0.130\,6 & 0.179\,1 \\ 0.155\,1 & 0.123\,6 & 0.159\,5 & 0.127\,8 & 0.129\,1 & 0.136\,8 & 0.168\,1 \\ 0.153\,8 & 0.116\,7 & 0.148\,5 & 0.135\,3 & 0.151\,2 & 0.140\,3 & 0.154\,3 \end{bmatrix}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由层次分析法得到每个设计目标的相对重要性权重为:

$$W = (0.15, 0.10, 0.20, 0.13, 0.12, 0.13, 0.17)^T$$

由此可进行一级评判, 得:

$$B_1 = [0.171\ 8, 0.159\ 5, 0.17, 0.168\ 1, 0.154\ 2]^T,$$

$$B_2 = [0.703\ 1, 0.692\ 7, 0.699\ 2, 0.692\ 7, 0.682\ 9]^T, B_3 = [0.146\ 9, 0.146\ 3, 0.147\ 1, 0.146\ 1, 0.144\ 6]^T$$

再进行二级评判, 得:

$$B = \begin{bmatrix} B(u_1) \\ B(u_2) \\ B(u_3) \\ B(u_4) \\ B(u_5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.171\ 8 & 0.703\ 1 & 0.146\ 9 \\ 0.159\ 5 & 0.692\ 7 & 0.146\ 3 \\ 0.170\ 0 & 0.699\ 2 & 0.147\ 1 \\ 0.168\ 1 & 0.692\ 7 & 0.146\ 1 \\ 0.154\ 2 & 0.682\ 9 & 0.144\ 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.340\ 6 \\ 0.332\ 9 \\ 0.338\ 7 \\ 0.335\ 6 \\ 0.327\ 2 \end{bmatrix}$$

这样可以决策出 U_1 为最佳设计方案。

4　结　论

在并行工程环境下进行产品设计时, 要求设计人员在产品的设计阶段就考虑从产品的顾客需求到产品最终报废的整个生命周期内的全部问题, 从而尽量避免因设计不妥而给后期的设计制造和使用带来的一系列不便和麻烦, 以提高产品质量、缩短产品开发周期、降低产品更新换代成本、增加顾客满意程度。笔者提出的产品设计质量模糊评价及多准则方案决策等方法, 对促进并行工程产品设计方法在工程实践中的具体应用, 具有一定的积极作用。

[参考文献]

[1] 何　浩, 徐燕申. 并行设计研究现状及其发展趋势[J]. 机械设计, 1998, 15(1): 1- 4.

[2] 蒋工亮. 面向并行工程的工程设计CAD 集成系统[J]. 机械设计与制造, 2000, (6): 29- 30.

[3] 张海红, 戴　勇. 面向并行工程的车间生产准备[J]. 机械设计与制造, 2000, (6): 75- 76.

[4] 窦万峰, 王保保, 魏天功, 等. 面向并行工程的多域特征映射方法学研究[J]. 机械设计, 1998, 15(9): 1- 3.

[5] 赵丽萍. 面向并行工程的产品功能特征建模信息共享技术的研究[D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 1996.

[6] 冯德益, 娄世博. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1983.

Research on the methods of product design quality fuzzy evaluation and project decision

WANG Hong-bing[1], **YANG Tie-niu**[2], **SHANG Jian-dong**[3]

(1 *College of Mechanical and Electionic Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shannxi* 712100, *China*;
2 *Department of Mechanics and Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong* 529020, *China*;
3 *Center of the Modern Instruction, Luoyang Engineering College, Luoyang, Henan* 471039, *China*)

Abstract: The realization methods of product design quality fuzzy evaluation and project decision for CE based on the function and characteristics are expounded in this paper. Combining fuzzy evaluation and AHP., a mathematics model of product designing quality fuzzy synthesized evaluation is set up. Gear box, for instance, is applied with the method to choose the most optimum project from a group of them.

Key words: product design; product design quality fuzzy evaluation; concurrent engineering

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net