基于知识模型的产品设计方案失效风险评估

王 彬 唐晓青

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：考虑失效模式间的关联性，提出了一种基于知识模型的机械产品设计方案失效风险评估与优选方法.该方法使用数据聚类法鉴别失效模式的主要关联关系，给出了失效模式关联系数的计算方法，实现了对失效模式关联知识的有效获取；并在产品“功能—失效模式—失效风险”知识表示的基础上，通过二维“屋顶”形三角阵和三维立方阵实现了对失效模式关联系数的表达，建立了产品“功能—失效模式—失效风险—模式关联”知识模型.在知识模型的支持下，研究了加权线性合成的关联失效模式严重度评估方法，给出了失效模式和产品功能的风险优先数计算方法，实现了基于知识的机械产品设计方案失效风险评估过程与优选.最后，通过实例说明了上述方法的有效性.

关 键 词：设计方案评估；知识模型；失效模式关联；失效风险评估

中图分类号：TH 122；TH 165^{+}.4

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)07-0763-06

Evaluating failure risk for product design scheme based on knowledge model

Wang Bin Tang Xiaoqing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Considered the relationship among failure modes, a failure risk evaluation and optimization method for mechanical product design scheme based on knowledge model was proposed. The main relationship among failure modes was identified by data clustering. The method of computing the relationship coefficient of failure mode was given, thereby the relationship knowledge for failure mode could be effectively obtained. On the basis of the knowledge model of “function-failure mode-failure risk”, “roof” triangle matrix and three-dimension cube were used to represent the relationship coefficient of failure mode as well as the knowledge model of “function-failure mode-failure risk-mode relationship” was set up. By means of the knowledge model, the severity evaluation method of relationship failure mode based on weighted linear synthesis was studied, and the approach to making risk priority number (RPN) of failure mode and product function was given, then the evaluation and optimization based on product failure risk knowledge for mechanical product design scheme were presented. Finally a case was studied to illustrate the proposed method.

Key words: design scheme evaluation; knowledge model; failure mode relationship; failure risk evaluation

产品设计方案评估与优选是产品设计过程的重要环节，是保证和控制产品设计质量的重要手段.国内外学者对产品设计方案的评估理论与方法进行了大量研究，所提出的评估方法主要分为2类：一类是由专家通过评审会等方式完成评估.此类方法的评估过程是人为驱动的，评价结果带

收稿日期：2007-06-07

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50475005)

作者简介：王 彬(1972—)，男，湖北麻城人，博士生，wb916@me.buaa.edu.cn.

有主观性;另一类方法是利用人工智能和知识工程等技术来辅助进行设计方案的评估,此类方法在一定程度上克服了单纯由一组专家进行评估的不足,能够较大范围地利用专家群体知识与经验,更加客观、准确地进行评价.但长期以来对知识、经验的获取和通识化表达上存在困难,这类研究多侧重理论方法和模型的研究,影响了应用效能.

失效是影响机械产品性能的重要因素之一,是产品设计质量问题的一种主要表现形式.因此,从潜在失效风险的角度出发,对产品设计方案进行评估与优选是在设计过程的早期阶段实施质量控制的有效手段.机械产品概念设计阶段产生的设计方案一般由基本的产品组件或零部件结构组合构成,这些组件或零部件体现了产品的功能特征.在产品设计过程中,存在相同功能特征的产品组件或零部件很可能存在相同的潜在失效模式,从而使产品设计方案具有失效风险.因此,利用知识工程技术获取以往类似产品在使用过程中所产生的失效风险相关知识,建立机械产品失效风险知识模型并构建相应的知识库,从而利用知识进行新产品设计方案的失效风险评估和优选,对保证和控制产品设计质量具有重要作用.

基于此,本文建立了机械产品"功能—失效模式—失效风险—模式关联(F^3M,Function-Failure mode-Failure risk-Mode relationship)"知识模型,提出了基于知识的机械产品设计方案失效风险评估方法.

1 产品"F^3M"知识获取与模型

1.1 产品"F^3M"知识的获取

产品失效模式是产品失效的一种具体表现形式.产品失效模式的发生一般会影响具体功能,同一产品功能往往会受到不同类型失效模式的影响,且这些失效模式可能以独立失效和关联失效的不同方式影响功能.以往类似产品出现的功能与失效模式间的对应关系知识、失效模式的失效风险知识以及失效模式的关联知识构成了产品"F^3M"知识.失效模式的关联关系一般由关联系数量化表示,关联系数的集合构成了失效模式的关联知识.这里重点介绍失效模式关联知识获取方法,功能与失效模式的对应关系知识和失效模式的失效风险知识的获取详见文献[1].本文仅对机械产品组件或零部件的失效模式进行研究.因此,这里的功能具体是指产品的支持功能(也称功能元).

1.1.1 失效模式的关联性

机械产品零部件的不同失效模式具有关联性.这种关联性是指在同一时间段内,由于载荷的随机性、使用环境的不确定性等因素的影响,系统的2个或几个失效模式一起出现的情形.由于关联问题的复杂性,在有限条件下,研究失效模式间的主要关联关系而忽略次要关联关系成为必然.本文使用聚类分析方法[2]以确定这种主要的关联关系.该方法通过如图1所示的"失效模式—失效模式(FF)"矩阵记录产品在一定时期内失效模式的关联发生情况(矩阵元素 F_pF_k 表示失效模式 F_p 和 F_k 的关联发生次数);然后使用聚类算法对FF矩阵处理,最终可以将失效模式聚类和归并为3大类:Ⅰ类、Ⅱ类和 Ⅲ类.研究关联关系时,针对不同类别分别采取不同的处理策略[2].

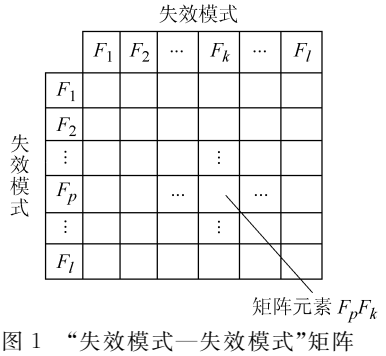


图1 "失效模式—失效模式"矩阵

1.1.2 失效模式关联系数计算

从失效概率的角度,3个以上失效模式关联发生的情形是很少出现的[3].因此,本文只考虑2个失效模式关联(简称二重关联失效)和3个失效模式关联(简称三重关联失效)的情形.参考失效元素间关联度的定义[4],失效模式关联系数的计算方法如下:

1) 二重关联失效的关联系数计算

① 对于属于Ⅰ类别的聚类(类中一般只有一个失效模式,设为 F_p),考虑 F_p 与类外失效模式 F_k 关联,由式(1)计算关联系数 R_{pk}.F_pF_k 表示 F_p 和 F_k 的关联发生次数,Sum(F_p)和Sum(F_k)表示 F_p 和 F_k 的独立发生次数.

$$R_{pk}=\frac{F_pF_k}{\min(\mathrm{Sum}(F_p)+F_pF_k,\mathrm{Sum}(F_k)+F_pF_k)} \tag{1}$$

② 对于属于Ⅱ类别的聚类,只需考虑本类中失效模式的关联关系,仍采用式(1)计算其关联系数.只是这里的 F_p 和 F_k 都是本类中的失效模式.

③ 对于属于Ⅲ类别的聚类,类中失效模式按独立失效模式处理,不考虑关联性.

2) 三重关联失效的关联系数计算

首先使用如图 2 所示的“失效模式—失效模式—失效模式”立方阵(FFF 立方阵)对产品三重关联失效的发生次数进行统计记录,即 FFF 立方阵$=\{F_pF_kF_t\}$($p=1,2,\cdots,l;k=1,2,\cdots,l;t=1,2,\cdots,l;p\neq k\neq t$). $F_pF_kF_t$是立方阵元素,表示失效模式 F_p,F_k和 F_t的三重关联失效发生次数. 以此为基础,计算关联系数如下:

① 对于属于Ⅰ类别的聚类(类中一般只有一个失效模式,设为 F_p),考虑 F_p与类外失效模式关联,由式(2)计算关联系数. 其中,$N=\min(F_pF_k+F_pF_kF_t,\ F_pF_t+F_pF_kF_t,\ F_kF_t+F_pF_kF_t)$,$F_pF_k$,$F_pF_t$,$F_kF_t$分别表示失效模式 F_p和 F_k,F_p和 F_t,F_k和 F_t的二重关联失效发生次数,$F_pF_kF_t$表示 F_p,F_k和 F_t的三重关联失效发生次数.

$$R_{pkt}=\frac{F_pF_kF_t}{N} \tag{2}$$

② 对于属于Ⅱ类别的聚类,只需考虑本类中失效模式的关联关系,仍采用式(2)计算其关联系数. 其中,F_p,F_k和 F_t表示本类中的 3 个相异失效模式.

③ 对于属于Ⅲ类别的聚类,类中失效模式按独立失效模式处理,不考虑关联性.

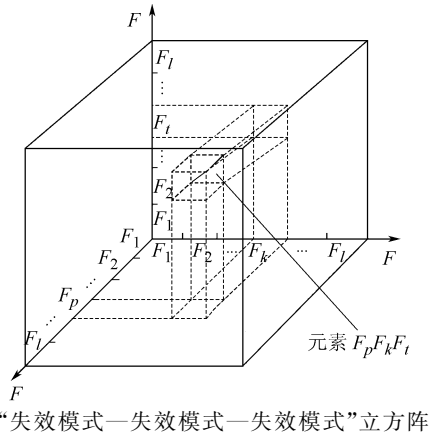


图 2　“失效模式—失效模式—失效模式”立方阵

1.2　产品“F³M”知识模型

在“功能—失效模式—失效风险”知识的表达方面,作者在文献[1]中已提出了机械产品“功能—失效模式—失效风险”知识表示模型. 通过在此模型中加入“屋顶”形三角阵表示二重关联失效的关联系数,建立产品“功能—失效模式—失效风险—二重模式关联”知识表示模型,如图 3 所示. 其中,“屋顶”形三角阵的元素为 R_{pk}($p=1,2,\cdots,l;k=1,2,\cdots,l$),表示失效模式 F_p和 F_k的关联系数. 而三重关联失效的关联系数使用关联系数立方阵(FFFR 立方阵)表示,即 FFFR 立方阵$=\{R_{pkt}\}$($p=1,2,\cdots,l;k=1,2,\cdots,l;t=1,2,\cdots,l$). 其中 R_{pkt}是立方阵元素,表示失效模式 F_p,F_k和 F_t的关联系数. 上述两者的组合就构成了如图 3 所示产品“F³M”知识模型. 通过在计算机中对该模型进行表示和实现即可构建相应知识库. 通过不断收集新的类似成熟产品的知识信息加入到库中,能够实现知识的不断丰富和更新,提高了利用知识进行定量化失效风险评估的准确性和可靠性.

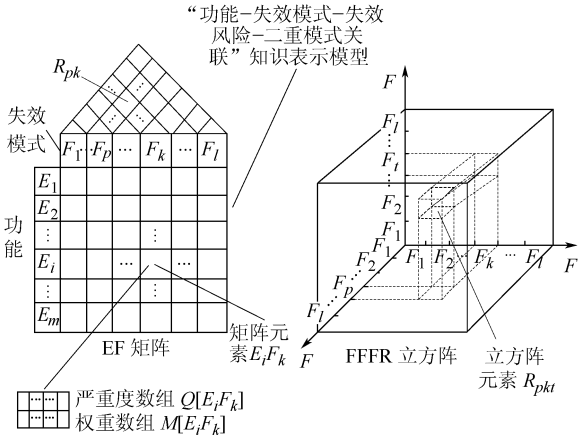


图 3　“功能—失效模式—失效风险—模式关联”知识模型

2　失效风险评估

2.1　失效模式风险评估

失效模式的失效风险基本要素是:失效发生可能性 O 和失效后果严重度 S[1]. 因此,在进行具体失效模式的风险优先数(RPN,Risk Priority Number)(以字母 T 表示)评估计算时,可以认为 $T=O\times S$.

1) 独立失效模式的失效风险评估. 具体方法作者在文献[1]中已详述.

2) 二重关联失效模式的失效风险评估. 方法如图 4 所示. 步骤如下:

① 知识抽取. 将已规范化表达的待设计产品的支持功能项与知识库中的功能项相比照,从中抽取相同项构成产品的功能—失效模式矩阵 EF_p(以 $\boldsymbol{H}_p$ 表示),并得到 $\boldsymbol{H}_p$中各元素的失效严重度数组 $FS_{uv}[E_uF_v]$(以 $Q_{uv}[E_uF_v]$表示)和相应的权重数组 $FW_{uv}[E_uF_v]$(以 $M_{uv}[E_uF_v]$表示)以及二重失效关联系数“屋顶”三角阵 FF_{rp}(以 $\boldsymbol{N}_{rp}$ 表示). 其中,E_uF_v为 $\boldsymbol{H}_p$的元素;R_{gh}是 $\boldsymbol{N}_{rp}$的元素,表示失效模式 F_g和 F_h的关联系数.

② 失效可能性(O)计算. 设二重关联失效模式为 F_g和 F_h,其关联系数为 R_{gh};F_g和 F_h的独立发生可能性 O_g和 O_h的计算[5]如式(3)、式(4)所示. 由式(5)计算 F_g和 F_h的二重关联失效发生可

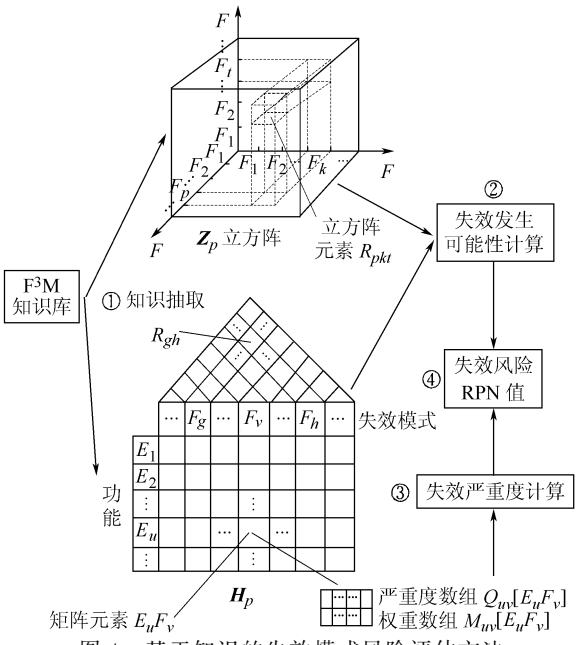


图 4 基于知识的失效模式风险评估方法

能性 O_{gh}. n 和 m 为 $\boldsymbol{H}_p$ 的行数和列数，$0\leqslant O_g\leqslant 10$，$0\leqslant O_h\leqslant 10$，$0\leqslant O_{gh}\leqslant 10$.

$$O_g=10\frac{E_uF_g}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)} \tag{3}$$

$$O_h=10\frac{E_uF_h}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)} \tag{4}$$

$$O_{gh}=R_{gh}\times\min(O_g,O_h) \tag{5}$$

③ 失效严重度(S)计算. 采用加权平均的方法计算失效模式 F_g 和 F_h 的独立发生严重度 S_g 和 S_h，如式(6)、式(7)所示. t_g 和 t_h 分别表示数组 $\boldsymbol{Q}_{ug}[E_uF_g]$ 和 $\boldsymbol{Q}_{uh}[E_uF_h]$ 的大小. $0\leqslant S_g\leqslant 10$，$0\leqslant S_h\leqslant 10$.

$$S_g=\left(\sum_{k=0}^{t_g-1}M_{ug}[k]\times\boldsymbol{Q}_{ug}[k]\right)\Bigg/\left(\sum_{k=0}^{t_g-1}M_{ug}[k]\right) \tag{6}$$

$$S_h=\left(\sum_{k=0}^{t_h-1}M_{uh}[k]\times\boldsymbol{Q}_{uh}[k]\right)\Bigg/\left(\sum_{k=0}^{t_h-1}M_{uh}[k]\right) \tag{7}$$

为了计算 F_g 和 F_h 的关联失效严重度 S_{gh}，提出基于加权线性合成的严重度评估方法，即 $S_{gh}=w_gS_g+w_hS_h$. 其中，w_g 和 w_h 表示 S_g 和 S_h 的折衷权重，其值根据 S_g 和 S_h 由产品设计人员根据经验确定；$0\leqslant S_{gh}\leqslant 10$.

④ 失效风险 RPN 值(T)计算. F_g 和 F_h 的二重关联失效风险值 $T_{F_{gh}}$ 计算如下：

$$T_{F_{gh}}=O_{gh}\times S_{gh} \tag{8}$$

3) 三重关联失效模式的失效风险评估. 方法如图 4 所示. 步骤如下：

① 知识抽取. 使用与上面相同的方法从知识库中抽取 $\boldsymbol{H}_p$，$\boldsymbol{Q}_{uv}[E_uF_v]$ 和 $M_{uv}[E_uF_v]$ 及三重关联失效的关联系数立方阵 FFFR_p(以 $\boldsymbol{Z}_p$ 表示). R_{pkt} 是 $\boldsymbol{Z}_p$ 的元素，表示失效模式 F_p，F_k 和 F_t 的关联系数.

② 失效可能性(O)计算. 设发生三重关联失效的失效模式为 F_p，F_k 和 F_t，其关联系数为 R_{pkt}；F_p，F_k 和 F_t 的独立发生可能性 O_p，O_k 和 O_t 的计算如式(9)～式(11)所示[5]. n 和 m 表示矩阵 $\boldsymbol{H}_p$ 的行数和列数. F_p，F_k 和 F_t 的三重关联失效可能性 O_{pkt} 计算如式(12)所示. $0\leqslant O_p\leqslant 10$，$0\leqslant O_k\leqslant 10$，$0\leqslant O_t\leqslant 10$，$0\leqslant O_{pkt}\leqslant 10$.

$$O_p=10\frac{E_uF_p}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)} \tag{9}$$

$$O_k=10\frac{E_uF_k}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)} \tag{10}$$

$$O_t=10\frac{E_uF_t}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)} \tag{11}$$

$$O_{pkt}=R_{pkt}\times\min(O_p,O_k,O_t) \tag{12}$$

③ 失效严重度(S)计算. 采用加权平均的方法计算 F_p，F_k 和 F_t 的独立发生严重度 S_p，S_k 和 S_t，如式(13)～式(15)所示. 其中，t_p，t_k 和 t_t 表示数组 $\boldsymbol{Q}_{up}[E_uF_p]$，$\boldsymbol{Q}_{uk}[E_uF_k]$ 和 $\boldsymbol{Q}_{ut}[E_uF_t]$ 的大小. $0\leqslant S_p\leqslant 10$，$0\leqslant S_k\leqslant 10$，$0\leqslant S_t\leqslant 10$.

$$S_p=\left(\sum_{i=0}^{t_p-1}M_{up}[i]\times\boldsymbol{Q}_{up}[i]\right)\Bigg/\left(\sum_{i=0}^{t_p-1}M_{up}[i]\right) \tag{13}$$

$$S_k=\left(\sum_{i=0}^{t_k-1}M_{uk}[i]\times\boldsymbol{Q}_{uk}[i]\right)\Bigg/\left(\sum_{i=0}^{t_k-1}M_{uk}[i]\right) \tag{14}$$

$$S_t=\left(\sum_{i=0}^{t_t-1}M_{ut}[i]\times\boldsymbol{Q}_{ut}[i]\right)\Bigg/\left(\sum_{i=0}^{t_t-1}M_{ut}[i]\right) \tag{15}$$

为了计算 F_p，F_k 和 F_t 的三重关联失效严重度 S_{pkt}，提出基于加权线性合成的严重度评估方法，即 $S_{pkt}=w_pS_p+w_kS_k+w_tS_t$. w_p，w_k 和 w_t 表示 S_p，S_k 和 S_t 的折衷权重，其值根据 S_p，S_k 和 S_t 由产品设计人员根据经验确定. $0\leqslant S_{pkt}\leqslant 10$.

④ 失效风险 RPN 值(T)计算. F_p，F_k 和 F_t 的三重关联失效风险值 $T_{F_{pkt}}$ 计算如下：

$$T_{F_{pkt}}=O_{pkt}\times S_{pkt} \tag{16}$$

2.2 产品功能失效风险计算

同一产品支持功能往往会受到独立、二重关联和三重关联失效模式的影响；从集合的角度，这

3 类失效模式与产品功能间是“或”的关系. 基于此,给出基于知识的产品功能失效风险计算方法:

1) “功能—失效模式”与或关系图构建. 针对某一具体产品功能 E_i,利用图 4 的 $\boldsymbol{H}_p$,$\boldsymbol{N}_{rp}$ 以及 $\boldsymbol{Z}_p$ 得到影响 E_i 的失效模式(包括关联失效)集合,并建立如图 5 所示的“功能—失效模式”与或关系图[6].

2) 失效模式的失效风险计算. 利用 2.1 节的方法分别计算图 5 中的独立、二重关联和三重关联失效模式的失效风险 RPN 值.

3) 支持功能的失效风险计算. 从图 5 中的“与或”关系可知,功能 E_i 的 RPN 值计算如下:

$$\begin{aligned} T_{E_i} = 100 \times [1 - (1 - T_a/100) \times \cdots \times \\ (1 - T_k/100) \times (1 - T_{st}/100) \times \cdots \times \\ (1 - T_{uv}/100) \times (1 - T_{mnr}/100) \times \cdots \times \\ (1 - T_{pqw}/100)] \end{aligned} \tag{17}$$

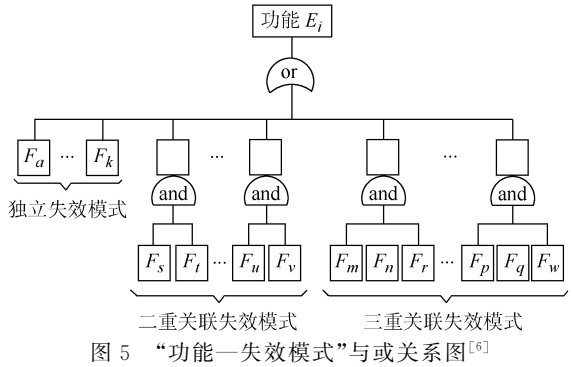


图 5　“功能—失效模式”与或关系图[6]

2.3　设计方案失效风险评估与优选

机械产品设计方案一般用树型结构表达[1],处于最底层的是与支持功能对应的基本结构件. 产品设计方案的失效风险评估与优选方法如下:

1) 确定各基本结构件的相对失效风险. 设某一产品设计方案的基本结构件集合 $BS' = \{BS_1, BS_2, \cdots, BS_n\}$,对应的支持功能集合 $E' = \{E_1, E_2, \cdots, E_n\}$. 利用 2.2 节的方法可得到这些支持功能的失效风险值 T_{E_i} $(i = 1, 2, \cdots, n)$. 对 T_{E_i} 进行归一化处理:$e_i = T_{E_i} \Big/ \sum_{k=1}^{n} T_{E_k}$,可获得基本结构件的相对失效风险向量 $\boldsymbol{e} = (e_1, e_2, \cdots, e_m)$.

2) 确定设计方案结构树中倒数第 2 层组件的 RPN 值. 这一层的组件一般是由基本结构件组合构成;并且,从集合的角度出发,构成某一组件的各基本结构件之间是“与”的关系. 而基本结构件的 RPN 值已在上一步中确定,按“与”关系的成熟算法即可计算组件的 RPN 值. 具体计算方法详见文献[1].

3) 确定整个产品方案的 RPN 值. 依据上两步的计算结果,依次层层计算设计方案结构树中各组件和部件的失效风险,直至到达树的顶点,从而得到整个产品设计方案的 RPN 值.

4) 根据计算得到的各设计方案 RPN 值的大小进行方案排序,从而实现设计方案的优选.

3　应用实例

某汽车离合器专业厂已生产了多系列的汽车离合器产品,通过用户反馈、专家分析等手段形成了较完整的产品历史文档,从中获取了离合器产品的“F³M”知识,构建了知识模型和知识库. 现在,该厂在进行某离合器的改进设计,形成了两种设计方案分别如图 6、图 7 所示. 最底层的结构体是基本结构件. 使用本文的方法确定设计方案的失效风险并根据风险大小进行方案优选. 具体设计方案的失效风险值计算以方案 1 为例.

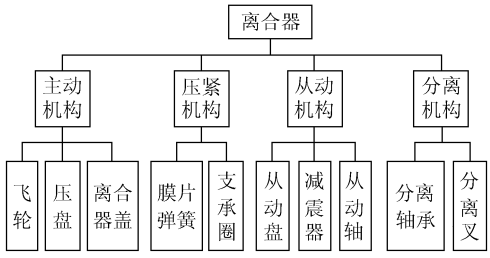


图 6　设计方案 1

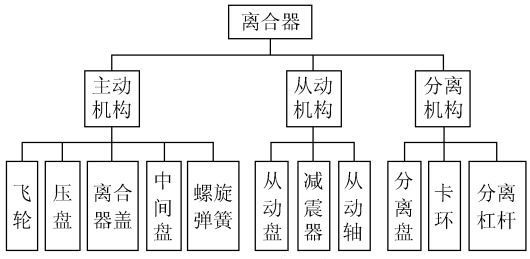


图 7　设计方案 2

1) 确定各基本结构件的相对失效风险. 通过支持功能与已经建立的离合器产品“F³M”知识库比照,得到如图 8 所示的失效风险相关知识(无三重关联失效). 其中 $A, B, \cdots, I, J$ 分别表示方案 1 的 10 个基本结构件对应的支持功能,a, b, c, d, e, f, g 表示这些功能的失效模式.

支持功能 A 的潜在独立失效模式是 a,c 和 g,二重关联失效是 d 和 e. 对于 a,c 和 g,按独立失效模式风险计算方法可得:

$$S_a = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} M_{uv}[k] \times Q_{uv}[k]}{\sum_{k=0}^{t-1} M_{uv}[k]}$$

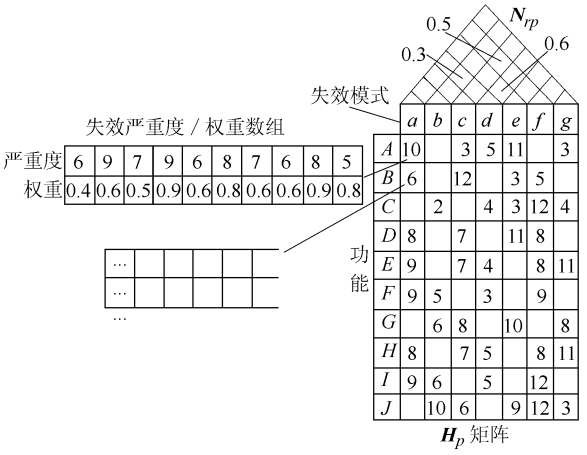


图 8 汽车离合器的失效风险相关知识

$$O_a=\frac{E_uF_v}{\max\limits_{\substack{1<u<n\\1<v<m}}(E_uF_v)}\qquad T_a=S_a\times O_a$$

即

$$T_a=\frac{6\times0.4+9\times0.6+\cdots+8\times0.9+5\times0.8}{0.4+0.6+\cdots+0.9+0.8}\times\frac{10\times10}{13}=55.52$$

同理：$T_c=39.61$；$T_g=30.26$.

对于 d 和 e，按二重关联失效模式风险计算方法，由式(3)～式(8)可得：$O_d=6.83$；$O_e=8.36$；$O_{de}=R_{de}\times\min(O_d,O_e)=0.6\times6.83=4.10$；$S_d=5.6$；$S_e=6.9$；给定权重系数 $w_d=0.4$，$w_e=0.6$，则 $S_{de}=w_dS_d+w_eS_e=0.4\times5.6+0.6\times6.9=6.38$，$T_{F_{de}}=O_{de}\times S_{de}=4.10\times6.38=26.16$.

按 2.2 节的方法得：$T_A=86.17$. 同理可得其它基本结构件的 RPN 值. 经归一化处理得：$e_A=0.144$；$e_B=0.111$；$e_C=0.098$；$e_D=0.121$；$e_E=0.072$；$e_F=0.135$；$e_G=0.065$；$e_H=0.104$；$e_I=0.054$；$e_J=0.098$.

2) 确定设计方案中倒数第 2 层组件的失效风险. 设主动、压紧、从动和分离机构的代号为 M,N,P,Q. 由上面的相对失效风险值得：$T_M=31.43$；$T_N=18.43$；$T_P=27.53$；$T_Q=14.67$.

3) 确定整个产品方案的失效风险. 方案 1 的失效风险值 $T_1=65.41$；同理可得方案 2 的失效风险值 $T_2=83.62$.

4) 根据失效风险值进行方案优选. $T_2>T_1$，说明方案 1 具有较小的失效风险，故可选择方案 1 作为最终设计方案.

通过上述方法确定的方案一次通过了设计评审，减少了设计反复，降低了纠错成本，达到了预期效果.

4 结束语

提出了在产品设计方案失效风险评估与优选中利用知识进行评估的思路，在获取以往产品的失效风险相关知识的基础上，建立了机械产品“功能—失效模式—失效风险—模式关联”知识模型，构建了相应知识库；给出了基于知识的失效模式与产品功能风险值的计算方法，并在此基础上提出了机械产品设计方案失效风险评估方法. 通过在某汽车离合器产品设计方案失效风险评估与优选过程中应用，证明了该方法能有效减少设计反复，降低纠错成本，为产品设计质量提升提供了可操作性的方法.

参考文献（References）

[1] 王彬，唐晓青，王美清. 基于知识的机械产品设计方案失效风险评估[J]. 计算机集成制造系统，2007，13(10)：1880－1885
Wang Bin, Tang Xiaoqing, Wang Meiqing. Based on knowledge evaluating failure risk to mechanical product design scheme[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(10): 1880－1885 (in Chinese)

[2] Arunajadai S G, Uder S J, Stone R B, et al. Failure mode identification through clustering analysis[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2004, 20(5): 511－526

[3] Pickard K, Müller P, Bertsche B. Multiple failure mode and effects analysis-an approach to risk assessment of multiple failures with FMEA[C]//2005 Proceedings: The International Symposium on Product Quality and Integrity. Alexandria, VA: IEEE, 2005: 457－462

[4] 吴穹，田宏，付燕平，等. 元素失效相依时系统失效概率的计算[J]. 系统工程与电子技术，2004，26(12)：1933－1935
Wu Qiong, Tian Hong, Fu Yanping, et al. Calculation of system failure probability with dependent failure element [J]. Systems Engineering and Electronic, 2004, 26(12): 1933－1935 (in Chinese)

[5] Lough K G, Stone R B. Function based risk assessment: mapping function to likelihood [C]//Proceedings of DETC'05: ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Long Beach, CA: ASME, 2005: 455－467

[6] Bluvband Z, Polak R, Grabov P. Bouncing failure analysis (BFA): the unified FTA-FMEA methodology[C]//2005 Proceedings: The International Symposium on Product Quality and Integrity. Alexandria, VA: IEEE, 2005: 463－467

（责任编辑：文丽芳）