基于 STT 与模糊 QFD 的装备质量特性分解方法

郭婧宜 孙宇锋 吴寒雪 赵广燕

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 装备综合质量特性参数是度量装备系统方案优劣的重要指标. 在从战略到任务 STT(Strategy to Task Technique)法、模糊质量功能展开 QFD(Quality Function Deployment)法和武器效能评估 ADC 模型的基础上,提出一种装备综合质量特性参数分解方法. 运用上述方法对装备进行结构和任务分解,把装备总体系统效能分解到相关任务及其功能系统的关键质量特性中,进一步建立考虑了任务和相关功能系统质量特性影响的系统效能模型. 分解结果为装备不同系统方案的评价及确定影响装备系统效能的关键质量特性参数提供了依据.

关 键 词: 装备; 质量特性; STT; QFD; 系统效能

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)08-1090-06

Decomposition method of equipment quality characteristic based on STT and fuzzy QFD

Guo Jingyi Sun Yufeng Wu Hanxue Zhao Guangyan

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Integrative quality characteristic is an important indicator of the system project for equipment. On the basis of strategy to task technique (STT), fuzzy quality function deployment (QFD) and ADC model for evaluating weapon effectiveness, a decomposition method of equipment integrative quality characteristic was proposed. Equipment structure and mission were decomposed with this method; then, the whole system effectiveness was broken down into some key quality characteristics relating missions and lower function systems; finally a system effectiveness model formed based on these characteristics. The result makes reference to evaluate different system projects for the equipment and to choose the key quality characteristics working on the system effectiveness.

Key words: equipment; quality characteristic; strategy to task technique; quality function deployment; system effectiveness

质量工程和系统工程学科的发展促进了质量概念的不断演进[1],现代质量观认为质量包含了系统所要满足的全部使用要求特性的总和.

在武器装备论证工作中,为评价装备系统方案的优劣,必须采用某种尺度去度量系统方案的质量,这种尺度被称为质量特性. 由于系统的复杂性和任务需求的多样性,装备的质量特性往往不是单个明确定义的参数,而是由多个参数构成的一组指标序列. 依据内涵的不同,装备质量特性可分为综合质量特性(如系统效能、战备完好性等)和单项质量特性(如可靠性、维修性,速度、精度等). 综合质量特性与用户需求或装备使用密切相关,单项质量特性则更多与设计特性密切相关. 装备质量特性是度量装备系统方案优劣的重要指标,装备质量特性的确定对装备系统方案选择及质量特性的综合设计具有重要意义.

系统效能概念最早是由美国工业界武器效能咨询委员会提出的,它是衡量一个系统满足一组

收稿日期: 2011-04-14; **网络出版时间**: 2012-08-23 14:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120823.1455.010.html

作者简介: 郭婧宜(1987 -),女,河南洛阳人,硕士生,SY0914117@dse.buaa.edu.cn.

特定任务需求的程度的度量,是系统可用性 A、可信性 D 和能力 C 的函数,是度量装备质量特性最重要的参数之一.

本文结合从战略到任务 STT(Strategy to Task Technique)法、模糊质量功能展开 QFD(Quality Function Deployment)法、围绕系统效能 ADC 模型,给出了一种基于 STT 与模糊 QFD 的装备总体质量特性分解的通用方法.

1　STT 和模糊 QFD 方法

1.1　基于 STT 的分解

STT 方法[2]是通过一系列分解方法和分解过程,从上到下,从总体战略需求着手直到作战任务层,最终得到装备典型任务剖面或装备能力需求信息的方法. 其核心是根据上层需求信息分析、映射,从而得到下一层的属性信息. 如何分析、映射上层信息是 STT 分析方法中的重要内容.

本文基于 STT 方法,以任务分解为核心,同时进行装备结构分解,自顶向下逐层进行装备质量特性的分解.

如图 1 所示,从装备总体战略目标入手,进行任务需求分析,建立装备任务剖面,分析任务构成,其顺序可以是高层战略目标→战术任务→系统级任务→低层次目标. 将装备总体任务目标分解为子任务 $M_1, M_2, \cdots, M_m$ 后,可以对其中任一子任务 M_j 建立任务系统效能 e_j,其中 $j = 1, 2, \cdots, m$.

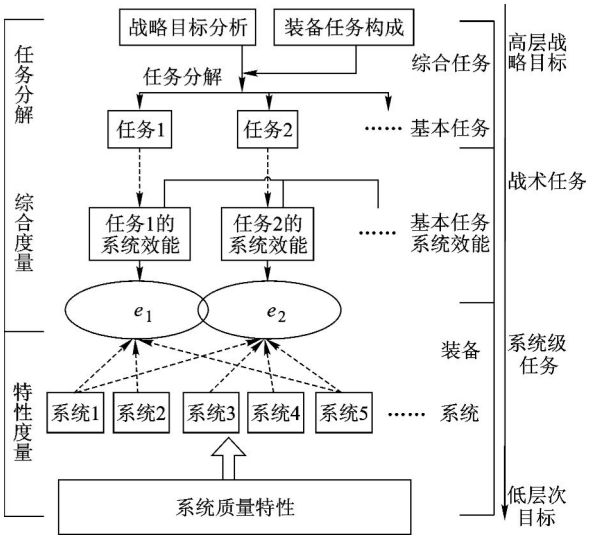


图 1　装备质量特性分解过程

依次递推,顶层效能目标逐步分解为基本任务系统效能,并进一步分解为装备各功能系统的目标特性,得到表征装备及其组成系统的质量特性参数,从而建立起装备质量特性参数集.

将各子任务的任务系统效能 e_j 组合加权,建立装备总体效能 E,即

$$E = a_1 e_1 + a_2 e_2 + \cdots + a_m e_m = \sum_{j=1}^{m} a_j e_j \quad (1)$$

a_j 是子任务 M_j 对总任务目标的权重系数,可由一般的加权平均法获得,且 $\sum_{j=1}^{m} a_j = 1$.

1.2　基于模糊 QFD 的分解

QFD 方法[3]是一种面向用户需求的产品开发决策方法,可将顾客需求逐级分解为有关的技术特性,并且通过对各级技术要求等项目的重要度加权评价找出对产品质量及其关键作用的因素. QFD 的核心是质量屋(HOQ, House of Quality),它是一种形象直观的二元展开图表. 加权评分法是用于 HOQ 评估的基本方法. 考虑到 QFD 过程中存在大量主观的、不确定的、边界模糊的和定性的评分信息,本论文将结合模糊集理论来处理这些评分信息.

在应用 HOQ 前,先用层次分析法建立任务与系统相互关系矩阵,进行权重分析,并根据分析结果找到任务中最主要的系统及其对任务的权重. 在此基础上建立如图 2 所示的 HOQ,用于分析某确定子任务下系统与质量特性之间的关系,从而找到该子任务下最主要的质量特性.

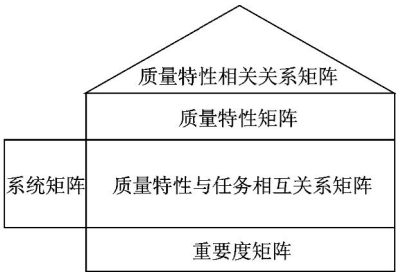


图 2　装备质量特性分解的 HOQ

2　装备质量特性分解流程

设装备经 STT 分析后,具有 m 个子任务($M_1, M_2, \cdots, M_m$)、n 个系统($S_1, S_2, \cdots, S_n$)及 l 个单项质量特性($Q_1, Q_2, \cdots, Q_l$).

2.1　子任务权重比 a_j

假设有 f 位专家对影响武器装备系统效能 E 的 m 个子任务($M_1, M_2, \cdots, M_m$)的权重进行评分,得到专家评分矩阵 $\boldsymbol{F} = [p_{jt}]_{m \times f}$,根据式(2)确定子任务 M_j 对总任务的权重比 a_j:

$$a_j = \sum_{t=1}^{f} p_{jt} \Big/ \sum_{j=1}^{m} \sum_{t=1}^{f} p_{jt} \quad (2)$$

其中 $j = 1, 2, \cdots, m$; $t = 1, 2, \cdots, f$ 且 $\sum_{j=1}^{m} a_j = 1$.

2.2 系统对任务的权重比 ω_{ji}

对$(S_1,S_2,\cdots,S_n)$和$(M_1,M_2,\cdots,M_m)$的重要性进行两两比较,构造权重判断矩阵 $\boldsymbol{K}=[p_{ji}]_{m\times n}$,并由式(3)确定系统 S_i 对任务 M_j 的权重比 ω_{ji}:

$$\omega_{ji}=p_{ji}\Big/\sum_{i=1}^{n}p_{ji} \tag{3}$$

其中 $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m.$

2.3 系统的可用度 A_i 和可信度 D_i

设装备所要求达到的可用度和可信度为 A 和 D,为获得各系统的可用度和可信度,必须知道各系统在总任务中的重要度. 设系统 S_i 在总任务中的重要度为 ω_i,可由式(4)得到:

$$\omega_i=\sum_{j}^{m}\omega_{ji}a_j \tag{4}$$

系统 S_i 的可用度和可信度由式(5)得到:

$$\left.\begin{aligned}A_i&=A^{\omega_i}\\D_i&=D^{\omega_i}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

2.4 建立子任务 HOQ

对子任务 M_j 建立一张如图3所示的HOQ,左墙取该任务环境下重要度 $\omega_{ji}>\varepsilon$(ε 为任意小数)的 n^* 个系统$(S_1^*,S_2^*,\cdots,S_{n^*}^*)$,并按重要度大小从上到下排列.

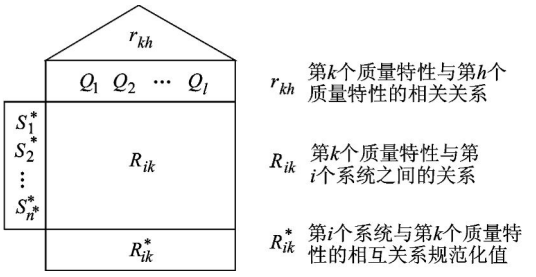


图3 M_j 任务下的HOQ

根据图3中 R_{ik} 和 r_{kh} 的含义构建相关关系矩阵 $\boldsymbol{R}=[R_{ik}]_{n^*\times l}$ 及 $\boldsymbol{r}=[r_{kh}]_{l\times l}$,其中 $i=1,2,\cdots,n^*;k,h=1,2,\cdots,l.$

R_{ik}^* 规范化表述为[4-5]

$$R_{ik}^*=\frac{\sum_{g=1}^{l}R_{ig}r_{gk}}{\sum_{k=1}^{l}\sum_{g=1}^{l}R_{ig}r_{gk}} \tag{6}$$

其中 $g,k=1,2,\cdots,l.$

2.5 模糊处理求重要度

任务与质量特性间的相互关系是由专业人员根据工程经验进行定义和分类的,常不能用精确数值反映实际情况. 为此引入模糊集进行处理.

用$\tilde{\mathscr{R}}_{ik}$,$\tilde{\gamma}_{kh}$分别表示 R_{ik} 的模糊关系值和 r_{kh} 的模糊相关值,$\tilde{\mathscr{R}}_{ik}\in[0,1]$,$\tilde{\gamma}_{kh}\in[0,1]$,将其代入式(6),得到模糊规范矩阵$\tilde{\mathscr{R}}_{ik}^*$.

以 α 截集和扩张原理来定义模糊规范矩阵 $\tilde{\mathscr{R}}_{ik}^*$ 的隶属函数[6]. $\tilde{\mathscr{R}}_{ik}$ 和 $\tilde{\gamma}_{kh}$ 的 α 截集公式如下:

$$\begin{aligned}(\mathscr{R}_{ik})_\alpha=&\Big[\min_{R_{ik}}\{R_{ik}\in\mathscr{R}_{ik}\mid\mu_{\tilde{\mathscr{R}}_{ik}}(R_{ik})\geqslant\alpha\},\\&\max_{R_{ik}}\{R_{ik}\in\mathscr{R}_{ik}\mid\mu_{\tilde{\mathscr{R}}_{ik}}(R_{ik})\geqslant\alpha\}\Big]=\\&[(\mathscr{R}_{ik})_\alpha^L,(\mathscr{R}_{ik})_\alpha^U]\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}(\gamma_{kh})_\alpha=&\Big[\min_{r_{kh}}\{r_{kh}\in\gamma_{kh}\mid\mu_{\tilde{\gamma}_{kh}}(r_{kh})\geqslant\alpha\},\\&\max_{r_{kh}}\{r_{kh}\in\gamma_{kh}\mid\mu_{\tilde{\gamma}_{kh}}(r_{kh})\geqslant\alpha\}\Big]=\\&[(\gamma_{kh})_\alpha^L,(\gamma_{kh})_\alpha^U]\end{aligned} \tag{8}$$

其中,$i=1,2,\cdots,n^*;g,k=1,2,\cdots,l;\alpha\in[0,1]$.

$\mu_{\tilde{\gamma}_{ik}}(r_{ik})\in[0,1]$和$\mu_{\tilde{\mathscr{R}}_{ik}}(R_{ik})\in[0,1]$是 R_{ik}和 r_{kh} 的隶属函数. 根据扩张原理,可定义的 $\tilde{\mathscr{R}}_{ik}^*$隶属函数:

$$\begin{aligned}&\mu_{\tilde{\mathscr{R}}_{ik}^*}(R_{ik}^*)=\\&\operatorname*{supmin}_{R,r}\left\{\mu_{\tilde{\mathscr{R}}_{ig}}(R_{ig}),\mu_{\tilde{\gamma}_{gk}}(r_{gk}),\forall g,k\;\middle|\;R_{ik}^*=\sum_{g=1}^{l}R_{ig}r_{gk}\Big/\sum_{k=1}^{l}\sum_{g=1}^{l}R_{ig}r_{gk}\right\}\end{aligned} \tag{9}$$

由式(9)得到$\tilde{\mathscr{R}}_{ik}^*$的 α 截集的上下边界. 并通过综合式(6)~式(8),简化$(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^U$ 和 $(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^L$,如下式:

$$(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^L=\sum_{g=1}^{l}(\mathscr{R}_{ig})_\alpha^L(\gamma_{gk})_\alpha^L\Big/\left[\sum_{g=1}^{l}\sum_{k=1}^{l}(\mathscr{R}_{ig})_\alpha^U(\gamma_{gk})_\alpha^U\right] \tag{10}$$

$$(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^U=\sum_{g=1}^{l}(\mathscr{R}_{ig})_\alpha^U(\gamma_{gk})_\alpha^U\Big/\left[\sum_{g=1}^{l}\sum_{k=1}^{l}(\mathscr{R}_{ig})_\alpha^L(\gamma_{gk})_\alpha^L\right] \tag{11}$$

在QFD中,M_j 任务下的第 k 个质量特性 Q_k 的重要度 $\tilde{W}_k^j$ 可由下式得到:

$$\tilde{W}_k^j=\sum_{i=1}^{n^*}\omega_{ji}\mathscr{R}_{ik}^* \tag{12}$$

其中,$i=1,2,\cdots,n^*;k=1,2,\cdots,l;j=1,2,\cdots,m.$

在特定的 α 水平下,$\tilde{W}_k^j$ 的 α 截集的上下界为

$$(W_k^j)_\alpha=[(W_k^j)_\alpha^L,(W_k^j)_\alpha^U]=\left[\sum_{i=1}^{n^*}\omega_{ji}(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^L,\sum_{i=1}^{n^*}\omega_{ji}(\mathscr{R}_{ik}^*)_\alpha^U\right] \tag{13}$$

其中,W_k^j 是每个质量特性重要度的最优值.

2.6　装备系统效能 E

综上所述 M_j 任务下的任务系统效能为

$$e_j = \sum_{i=1}^{n} A_i D_i (W_k^j Q_k)_{k\subset i} \tag{14}$$

其中,$j=1,2,\cdots,m$;$k=1,2,\cdots,l$;$(W_k^j Q_k)_{k\subset i}$的含义为第 i 个子系统的质量特性与其重要度的乘积.

将式(2)、式(14)代入式(1),得到武器装备总体效能 E:

$$E = \sum_{j=1}^{m} a_j e_j = \sum_{j=1}^{m} a_j \left[\sum_{i=1}^{n} A_i D_i (W_k^j Q_k)_{k\subset i} \right] \tag{15}$$

3　案例分析

3.1　装备 Z 的 STT 分析

假设有某装备 Z,其战略目标是海上作战. 经过对此装备的 STT 分析后认为该装备具有船体装置等 5 个系统以及对空任务 M_1 和反潜任务 M_2 2 个分任务和 6 个下级子任务,同时具有 15 个质量特性($Q_1,Q_2,\cdots,Q_{15}$). 如图 4、图 5 所示.

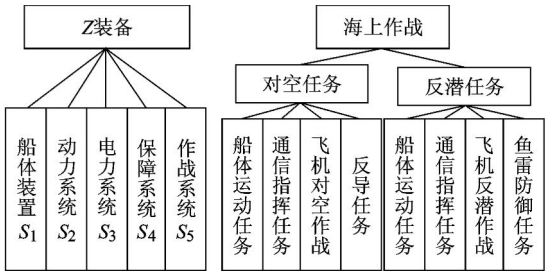


图 4　装备结构和任务分解

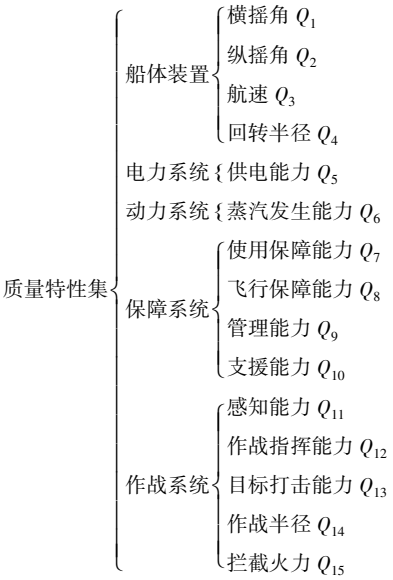


图 5　装备 Z 的质量特性参数集

3.2　确定分任务和子系统权重

假设有 4 位专家 $b_1 \sim b_4$ 对分任务权重进行评分,评分矩阵如表 1.

表 1　分任务对总目标权重的专家评分矩阵

任务	b_1	b_2	b_3	b_4
M_1	9	10	7	6
M_2	5	3	4	4

由式(2)可得到 2 个分任务的权重

$$a_1 = 0.667 \qquad a_2 = 0.333$$

由于每个分任务对系统的要求不同,本文采用层次分析法判断系统对每个分任务的权重. 对空任务系统权重判断矩阵如表 2.

表 2　对空任务中子系统权重判断矩阵

子任务	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
M_{11}	9	10	6	3	6
M_{12}	4	1	10	3	6
M_{13}	1	1	1	2	7
M_{14}	3	1	3	3	4

注:$M_{11} \sim M_{14}$分别代表船体运动任务、通信指挥任务、飞机对空任务和反导任务.

根据式(3)计算各系统在对空任务下的权重值:

$$\omega_{11} = 0.202 \qquad \omega_{12} = 0.155$$
$$\omega_{13} = 0.238 \qquad \omega_{14} = 0.131$$
$$\omega_{15} = 0.274$$

并得到权重值排序:

$$\omega_{15} > \omega_{13} > \omega_{11} > \omega_{12} > \omega_{14}$$

同样可得到各系统在反潜任务下的权重. 由各系统在不同任务下的重要度可得到各系统在总任务中的重要度,根据式(4)得到:

$$\omega_1 = 0.194 \qquad \omega_2 = 0.151$$
$$\omega_3 = 0.266 \qquad \omega_4 = 0.110$$
$$\omega_5 = 0.279$$

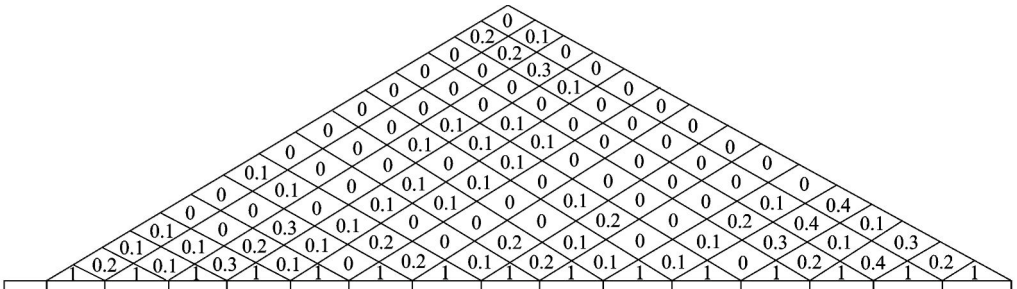
设装备所要求达到的可用度 A 为 0.95,可信度 D 为 0.9. 根据式(5),分配至各系统的可用度和可信度为

$$A_1 = 0.95^{0.194} = 0.990$$
$$A_2 = 0.95^{0.151} = 0.992$$
$$A_3 = 0.95^{0.266} = 0.986$$
$$A_4 = 0.95^{0.110} = 0.994$$
$$A_5 = 0.95^{0.276} = 0.986$$
$$D_1 = 0.9^{0.194} = 0.980$$
$$D_2 = 0.9^{0.151} = 0.984$$
$$D_3 = 0.9^{0.266} = 0.972$$
$$D_4 = 0.9^{0.110} = 0.988$$
$$D_5 = 0.9^{0.276} = 0.971$$

3.3　建立分任务 HOQ

1) 对空任务 HOQ.

此处省略模糊处理过程,根据对空任务 HOQ



	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}
S_5	1	1	3	2	2	2	1	1	1	1	5	6	8	9	9
S_3	1	1	1	1	9	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1
$S1$	8	8	8	6	3	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1
S_2	1	1	1	1	1	8	1	2	1	1	2	1	1	1	1
S_4	1	1	2	1	1	1	8	8	8	7	1	1	1	1	1

图 6 对空任务 HOQ

图(图 6)数据、式(6)和式(12)直接得到对空任务下各质量特性的重要度:

$$W_1^1 = 0.0498, W_2^1 = 0.0530, W_3^1 = 0.0931$$
$$W_4^1 = 0.0698, W_5^1 = 0.0824, W_6^1 = 0.0687$$
$$W_7^1 = 0.0692, W_8^1 = 0.0465, W_9^1 = 0.0472$$
$$W_{10}^1 = 0.0565, W_{11}^1 = 0.0845, W_{12}^1 = 0.0480$$
$$W_{13}^1 = 0.0713, W_{14}^1 = 0.0923, W_{15}^1 = 0.0669$$

2) 反潜任务.

在反潜任务环境中,由于保障系统 S_4 在总任务中的权重 $\omega_{24}=0.067$ 过小,所以在该任务环境下,取重要度前 4 位的 4 个系统建立 HOQ,最终得到反潜任务下各质量特性的重要度值:

$$W_1^2 = 0.0458, W_2^2 = 0.0493, W_3^2 = 0.0901$$
$$W_4^2 = 0.0644, W_5^2 = 0.0848, W_6^2 = 0.0641$$
$$W_7^2 = 0.0556, W_8^2 = 0.0304, W_9^2 = 0.0308$$
$$W_{10}^2 = 0.0464, W_{11}^2 = 0.0837, W_{12}^2 = 0.0506$$
$$W_{13}^2 = 0.0738, W_{14}^2 = 0.0934, W_{15}^2 = 0.0708$$

3.4 装备 Z 的系统效能

根据式(14),对空任务的系统效能为

$$e_1 = A_1D_1\sum_{k=1}^{4}W_k^1Q_k + A_2D_2W_5^1Q_5 + A_3D_3W_6^1Q_6 + A_4D_4\sum_{k=7}^{10}W_k^1Q_k + A_5D_5\sum_{k=11}^{15}W_k^1Q_k$$

反潜任务的系统效能为

$$e_2 = A_1D_1\sum_{k=1}^{4}W_k^2Q_k + A_2D_2W_5^2Q_5 + A_3D_3W_6^2Q_6 + A_4D_4\sum_{k=7}^{10}W_k^2Q_k + A_5D_5\sum_{k=11}^{15}W_k^2Q_k$$

则装备 Z 总体系统效能为

$$E = \sum_{j=1}^{2}a_je_j =$$
$$a_1\left[A_1D_1\sum_{k=1}^{4}W_k^1Q_k + A_2D_2W_5^1Q_5 + A_3D_3W_6^1Q_6 + A_4D_4\sum_{k=7}^{10}W_k^1Q_k + A_5D_5\sum_{k=11}^{15}W_k^1Q_k\right] +$$
$$a_2\left[A_1D_1\sum_{k=1}^{4}W_k^2Q_k + A_2D_2W_5^2Q_5 + A_3D_3W_6^2Q_6 + A_4D_4\sum_{k=7}^{10}W_k^2Q_k + A_5D_5\sum_{k=11}^{15}W_k^2Q_k\right]$$

带入数据得到(保留两位有效数字):

$$E = 0.047Q_1 + 0.050Q_2 + 0.089Q_3 + 0.066Q_4 + 0.082Q_5 + 0.064Q_6 + 0.063Q_7 + 0.040Q_8 + 0.041Q_9 + 0.052Q_{10} + 0.081Q_{11} + 0.047Q_{12} + 0.069Q_{13} + 0.089Q_{14} + 0.065Q_{15} \quad (16)$$

需要注意的是,计算中不同质量特性参数的量纲归一化十分重要,为了解决这个问题,本文引入“能力指数”概念. 能力指数定义为:“预期可接受能力或实际能力与理想能力的比值”. 能力指数是一个(0,1)区间上无量纲的数. 在进行系统效能计算时,将各种质量特性用其能力指数代替,以此统一各质量特性的单位.

在不考虑系统风险、经济承受性等情况下,可以认为效能最大的系统方案为最优方案. 由式(16)可知,装备 Z 的系统效能大小决定于 15 个单项质量特性参数的值,因此开展装备 Z 质量特性综合设计时,要以获得系统效能最大值为原则,同时结合其他设计因素进行.

4 结 论

通过对基于 STT 与模糊 QFD 的装备质量特性分解方法的介绍和案例分析,得到以下结论:

1) 装备总体系统效能指标可以具体分解到相关任务及功能系统的关键质量特性指标中,同

时建立起综合考虑任务和相关功能系统质量特性影响的更为精确的系统效能模型.

2）根据通过该方法建立起的装备总体系统效能的模型,可以分析确定影响装备系统效能的关键质量特性参数.

参考文献（References）

[1] 胡关勃. 质量与可靠性技术在产品研制中的应用研究[D]. 天津:天津工业大学管理学院,2008
Hu Guanbo. Technology application research on quality and reliability for products development and production [D]. Tianjin: School of Management, Tianjin Polytechnic University, 2008 (in Chinese)

[2] 李巧莉,郭齐胜,李亮,等. 基于 STT/QFD 的需求分析方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(4):17 - 19
Li Qiaoli, Guo Qisheng, Li Liang, et al. Analyzing method on equipment requirements based on STT/QFD [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(4): 17 - 19(in Chinese)

[3] 苗宇涛. 质量功能展开的数学模型及其应用研究[D]. 西安:西北工业大学理学院,2006
Miao Yutao. Study on mathematic model and application of quality function deployment [D]. Xi'an: School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnic University, 2006 (in Chinese)

[4] Wasserman G S. On how to prioritize design requirements during the QFD planning process [J]. IIE Transactions, 1993, 25(3): 59 - 63

[5] Tang Jiafu, Fung Richard Y K, Xu Baodong, et al. A new approach to quality function deployment planning with financial consideration [J]. Computer & Operation Research, 2002, 29(11): 1447 - 1462

[6] 刘鸿恩,张列平. 质量功能展开(QFD)理论方法-研究进展综述[J]. 系统工程,2000,18(2):1 - 6
Liu Hongen, Zhang Lieping. Quality function deployment theories and methods review on research progress [J]. System Engineering, 2000, 18(2): 1 - 6(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)

(上接第 1074 页)

参考文献（References）

[1] Tzou H S, Ding J H. Distributed modal voltages of nonlinear paraboloidal shells with distributed neurons[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126: 47 - 53

[2] Yue H H, Deng Z Q, Tzou H S. Distributed signal analysis of free-floating paraboloidal membrane shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304: 625 - 639

[3] Dehaven J G, Han Y, Tzou H S. Transition of membrane/ bending neural signals on transforming adaptive shells[J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(7): 1007 - 1029

[4] Tzou H S, Fu H Q. A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, part 1: theoretical analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(2): 247 - 259

[5] Tzou H S, Fu H Q. A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, part 2: parametric study and active vibration controls [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(2): 261 - 275

[6] Xu S X, Koko T S. Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40: 241 - 262

[7] Huang D, Sun B H. Approximate solution an smart composite beams by using MATLAB[J]. Composite Structures, 2001, 54: 197 - 205

[8] Alessandroni S, Isola F, Porfiri M. A revival of electric analogs for vibrating mechanical systems aimed to their efficient control by PZT actuators[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39: 5295 - 5324

[9] Tzou H S, Ding J H, Smithmaitrie P. Electric circuit design and testing of integrated distributed structronic systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 257: 931 - 943

[10] Tzou H S, Chai W K. Design and testing of a hybrid polymeric elcetrostritive/piezoelectric beam with bang-bang control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21: 417 - 429

[11] Tzou H S. Piezoelectric shells: distributed sensing and control of continua [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 115 - 147

[12] Lenning L G, Shah A, Bibyk S B. Integration of VLSI circuits and mechanics for vibration control of flexible structures[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, 2(1): 30 - 40

(编　辑:文丽芳)