

基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法

张居凤^{1,2}, 汪玉^{1,2}, 方志刚¹

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 哈尔滨 150001)

摘要 针对武器装备需求论证中性能指标重要度问题, 提出了一种基于 QFD 与 SPA 相结合的方法, 并给出了方法的基本思路和应用过程. 该方法以质量屋作为计算框架建立装备作战需求与性能指标间的相互关系, 通过多元联系数对国内外同类型武器装备的需求满意度进行竞争者评估. 应用结果表明, 该方法可以将模糊、定性的专家意见进行集中, 量化得出装备性能指标的重要度, 增强武器装备需求论证中性能指标分析结果的说服力.

关键词 质量功能展开; 质量屋; 集对分析; 多元联系数; 需求论证

Requirements analysis of weapons and equipment based on QFD and SPA methods

ZHANG Ju-feng^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, FANG Zhi-gang¹

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China;

2. School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Aiming at the problem how to get the importance of measures of performance (MOP) in requirements demonstration of weapons and equipment, an approach based on quality function deployment(QFD) and set pair analysis (SPA) methods was proposed and applied in this paper. As a computation framework, house of quality (HOQ) was used to set interrelationship between operation requirements and MOP. Requirements satisfaction of the same type of equipments was evaluated by multivariate connection number. Application result shows that by the provided approach different opinions of experts are centralized and the importance of MOP are quantified. In addition, the persuasion of MOP analysis result is also enhanced in the process of requirements demonstration of weapons and equipment.

Keywords quality function deployment; house of quality; set pair analysis; multivariate connection number; requirements demonstration

1 引言

需求分析是武器装备立项论证的起点, 通过这一过程装备研制的作战需求被转化为一系列的性能指标要求, 成为后期方案设计的重要依据. 因此, 需求分析结果的科学性和合理性对武器装备研制的成败具有决定意义^[1-2].

装备论证需求分析过程中, 不但要从军事威胁的角度论述发展新型装备的必要性, 而且要通过国内外同类型武器装备在技术水平、发展趋势和特点等方面的对比, 提出新装备的战技术指标. 有时候这些战技术指标之间不可避免的会存在相互矛盾, 某一指标的改善可能会导致另一指标变坏. 如舰船装备的载弹量与航速, 它们都是提高舰船作战效能的追求目标. 然而, 载弹量增加会导致舰船排水量的提高, 排水量增加又会造成航速的下降, 等等. 由于论证过程中缺乏有效的方法与手段支持, 目前, 我国武器装备需求论证仍以定性分析和专家经验为主, 上述情况下对两个指标间的重要关系难以给出明确、量化的结论^[3], 导致武器装备需求论证结果的可信度与说服力不强. 基于这一原因, 本文提出了基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法, 通过

收稿日期: 2011-09-14

资助项目: “十一五” 国家科技支撑计划 (401030701)

作者简介: 张居凤 (1978-), 女, 陕西人, 工程师, 博士研究生, 研究方向: 装备论证与系统工程, E-mail: zjfwdq@163.com; 汪玉 (1964-), 男, 湖北人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 舰船装备论证与优化设计; 方志刚, 男, 湖南人, 高级工程师, 研究方向: 舰船系统工程.

承认, 并把确定性与不确定性作为一个既确定又不确定的同异反系统进行辩证分析和数学处理。

联系数^[10-11]是集对分析的数学工具, 它用来量化和描述具有一定联系的两个集合组成的对子(集对)之间的确定性与不确定性关系, 其表达式如下:

$$U = A + Bi + Cj,$$

其中, A 、 B 、 C 均为非负实数, 它们分别表示两个集合共有属性的相同、相异和相反的程度, 被称为联系数的同一度、差异度和对立度。 i 、 j 分别为差异度 B 的系数和对立度 C 的系数。一般情况下, i 在 $[-1, 1]$ 区间不确定取值; j 取值为 -1 。假设集对中的两个集合有 N 个共有属性, 其中相同属性有 S 个, 相反属性有 P 个, 那么相异属性有 $F = N - S - P$ 个。定义:

$$\text{同一度: } A = S/N; \text{ 差异度: } B = F/N; \text{ 对立度: } C = P/N.$$

多元联系数是联系数 $U = A + Bi + Cj$ 在 Bi 项上展开得到的一种具有层次结构的函数: $U = A + B_1i_1 + B_2i_2 + \cdots + B_ni_n + Cj$, 一般称为 $n + 2$ 元联系数, $A, B_1, B_2, \cdots, B_n, C$ 为联系分量。令联系系数 $N = A + B_1 + B_2 + \cdots + B_n + C$, 可以得到归一化的联系数

$$u = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \cdots + b_ni_n + cj = \frac{A}{N} + \frac{B_1}{N}i_1 + \frac{B_2}{N}i_2 + \cdots + \frac{B_n}{N}i_n + \frac{C}{N}j.$$

为了应用上的方便, 多元联系数有时也改写为如下形式:

$$u = a + bi + cj + dk + el + fm + \cdots + xy.$$

将评价指标的理想值与实际值看作一对具有相互联系的集合时, 可以用联系数来刻画它们之间的相互关系。 a 越大, b_n 和 c 越小, 项目的评价价值就高。另外, 根据 a 、 b_n 和 c 的具体数值, 还可以对评价结果进行等级划分。假定评价指标的等级划分标准 $V = \{V_i\}, i \in \{1, 2, \cdots, n\}$, 其中 n 表示评价结果的等级数; 有 L 个评价准则, 记准则权重 $w = [w_1, w_2, \cdots, w_L]$; 设第 i 个评价准则第 j 个指标的权重为 w_{ij} , 评价准则 i 还包括 k_i 个评价指标, 则有 $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{ik_i}]$; 用 n 元联系数 $u = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \cdots + b_{n-2}i_{n-2} + cj$ 对评价对象进行评价的具体步骤是:

1) 计算评估对象的联系数 u ;

假设 n 个评估等级从优到劣分别记为 $V = \{V_1, V_2, \cdots, V_n\}$, 若评估对象第 i 个评估准则第 j 个指标的评估等级为 p_{ij} , 令

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & p_{ij} = V_1, \\ i_1, & p_{ij} = V_2, \\ \vdots & \vdots \\ i_{n-2}, & p_{ij} = V_{n-1}, \\ j, & p_{ij} = V_n, \end{cases}$$

那么评估结果的联系数 $u = \sum_{i=1}^L w_i (\sum_{j=1}^{k_i} (w_{ij} \cdot b_{ij}))$ 。

假定同时有 m 位专家参与评估, 并且评价人权重为 $\eta = [\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_m]$, 则最终评估结果的联系数 $U = \sum_{i=1}^m (\eta_i \cdot u_i)$, 式中 u_i 表示第 i 位专家评估结果的联系数。

2) 确定联系分量的系数取值, 并计算评估对象的联系数值;

根据多元联系数的定义, 取 $j = -1, i_1, i_2, \cdots, i_v$ 在 $[-1, 1]$ 之间根据“均分原则”取值, 即 $i_v, i_{v-1}, \cdots, i_1$ 分别对应于 $[-1, 1]$ 区间的 v 个 $v + 1$ 等分处。例如, $v=2$, 则 $i_1=0.333, i_2 = -0.333$ 。 $v=3$, 则 $i_1=0.5, i_2=0, i_3 = -0.5$ 等。

3) 确定评估对象的评价等级

根据“均分原则”将 $[-1, 1]$ 区间均分为 n 个区间, 分别对应 $V_n, V_{n-1}, \cdots, V_1$ 的 n 个评价等级, 评估对象的联系数取值落在哪个区间, 则评估结果为该区间对应的评价等级。

4 基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法

4.1 方法的基本思路

用户需求分析是 QFD 过程中最为关键的一个环节, 具体任务主要包括用户需求调查、用户需求重要度评估以及用户需求竞争者评估三方面的内容。其中, 用户需求竞争者评估主要指同类产品及其对手产品在满足用户需求方面所处的市场竞争状况, 评估结果用于填充图 1 中的阴影部分。QFD 应用于武器装备需求分

析时, 国内外同类型竞争装备在满足用户需求方面的技术状况通常都是通过专家经验得到, 但由于专家个人经验、知识水平等方面的不同, 使得不同专家对同一评估对象做出的判断往往有所不同. 通过本文提出的方法可以对模糊、定性的专家判断进行集中和量化分析, 分析结果便于直接填充 QFD 竞争者评估矩阵.

基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法基本思路是: 通过 QFD 质量屋建立装备用户需求与性能指标间的相互关系, 采用 SPA 多元联系数对国内外同类型武器装备在满足用户需求方面的技术状况进行等级评估, 并对新型装备在用户需求方面的定位进行规划. 首先, 需要确定用户需求及其主要的性能指标; 其次, 选定有代表性的若干国内外同类型装备, 邀请专家成立评估小组评定出同类装备的竞争能力; 最后, 建立武器装备用户需求质量屋, 设定新装备对用户需求应该达到的满足程度 (计划水平), 计算新装备在各项用户需求方面的提升率, 并填充质量屋的其它矩阵, 选择适当的算法得出各性能指标的重要度及其排序.

4.2 案例应用

本小节以某水面舰艇 A 概念设计为例, 对提出的方法应用过程进行说明. 选用的用户需求和设计指标均来自弗吉尼亚理工学院 2005 年秋季 -2006 年春季海洋工程专业的课程设计项目《导弹巡洋舰 CGX 概念设计报告》^[12].

1) 用户需求的确定

CGX 主要用于大范围内巡航并到达敏感地区执行弹道导弹防御任务, 同时它还可以用于和平时期的前沿部署. 从作战需求角度来考虑, CGX 应具备的作战能力如表 1 所示. 另外, 表 2 还给出了报告中对于 CGX 的性能指标要求.

表 1 CGX 作战能力分类表

编号	1	2	3	4
作战能力	防空作战能力	反舰作战能力	反潜作战能力	指控通信能力

表 2 CGX 性能指标分类表

编号	1	2	3	4	5	6
性能指标	机动性	隐蔽性	生命力	续航力	防空武器系统	反潜武器系统
编号	7	8	9	10	11	12
性能指标	反舰导弹系统	导弹发射系统	火炮系统	末端防御系统	直升机系统	指控通信系统

2) 用户需求竞争者评估

选取代表 A 当前设计水平的国内水面舰艇 A1 和国外同类型水面舰艇 A2, 作为用户需求竞争者评估对象. 假定邀请到从事舰船总体论证设计的 5 名领域专家 P1-P5 组成评估小组, 评估小组建立了水面舰艇各项作战能力的评估指标体系, 按照专家经验将各项指标的评估结果分为“绝对领先 (O)- 较为领先 (V)- 中等水平 (G)- 较为落后 (F)- 非常落后 (P)”5 个评价等级, 并给出了 A1 和 A2 在用户需求满意度评价指标方面所处的技术水平. 已知专家的权向量 $\eta = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$. 限于篇幅, 这里只给出了反舰作战能力的竞争者评估全过程, 评估指标和专家打分表见表 3 和表 4.

表 3 反舰作战能力评估指标

准则层	机动性 B1 0.35	舰炮火力 B2 0.3	反舰导弹火力 B3 0.3	电子战 B4 0.05
指标层	航速 C11 0.25	主炮直径 C21 0.4	导弹射程 C31 0.3	欺骗干扰 C41 0.5
	加速性 C12 0.25	射击精度 C22 0.4	命中精度 C32 0.4	阻塞干扰 C42 0.5
	适航性 C13 0.25	主炮射程 C23 0.2	导弹基数 C33 0.3	
	续航力 C14 0.25			

根据水面舰艇技术状况的评价等级个数建立等级划分标准 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ 和 5 元联系数的表达式 $u = a + bi + cj + dk + el$, 取 $l = -1$. 根据“照均分原则”, 取 $i = 0.5, j = 0, k = -0.5$. 按照文中给出的竞争者评估计算步骤, 最终计算得到 A1 和 A2 的 5 元联系数值

$$U_1 = 0.071 + 0.372i + 0.291j + 0.158k + 0.108l = 0.07,$$

$$U_2 = 0.256 + 0.369i + 0.199j + 0.107k + 0.071l = 0.316.$$

根据“均分原则”, 划分“绝对领先”、“较为领先”、“中等水平”、“较为落后”和“非常落后”5 个评价等

级的联系系数范围分别是 $[0.6, 1]$ 、 $[0.2, 0.6]$ 、 $[-0.2, 0.2]$ 、 $[-0.6, -0.2]$ 和 $[-1, -0.6]$. 因此, A1 和 A2 在反舰作战能力方面的等级评估结果分别是“中等水平”和“较为领先”. 同样, 还计算得到了 A1 和 A2 在其它三个作战能力方面的等级评估结果, 如表 5 所示. 在 QFD 矩阵中可以采用“5-4-3-2-1”等级标准直接对竞争者评估结果进行填充. 如反舰作战能力方面, QFD 竞争者评估矩阵中 A1 和 A2 所处的技术状况应分别填写等级数“3”和“4”.

表 4 专家打分表

指标	A1					A2				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
C11	G	O	G	G	V	V	V	O	O	O
C12	V	V	V	G	G	O	V	G	O	V
C13	G	G	V	G	G	G	G	V	V	V
C14	G	V	O	V	V	F	F	P	F	P
C21	P	F	P	F	P	O	O	O	O	V
C22	V	V	V	V	V	V	G	G	V	G
C23	F	G	F	G	F	P	P	F	P	F
C31	F	P	P	F	F	V	V	V	V	V
C32	G	V	G	G	V	O	O	O	V	V
C33	O	V	V	O	V	G	G	G	V	V
C41	G	F	F	G	F	F	F	F	F	F
C42	G	O	G	G	V	V	V	O	O	O

表 5 用户需求竞争者评估结果

		作战能力	防空作战能力	反舰作战能力	反潜作战能力	指控通信能力
竞争者评估等级	A1	中等水平 3	中等水平 3	较为领先 4	中等水平 3	
	A2	较为领先 4	较为领先 4	较为领先 4	绝对领先 5	

3) 需求分析质量屋的建立

采用需求分析工具 QFD Capture 建立了水面舰艇“作战能力-性能指标”质量屋, 如图 2 所示. 其中, 作战能力重要度由军事专家结合该舰的使命任务分析得出, 作战能力与性能指标的关系矩阵由经验丰富的论证专家直接给出, 采用了“5-3-1”等级标准, 分别代表各项性能指标与作战能力之间的相关性大小为“强”、“中等”和“弱”. 装备目前水平和计划水平分别以水面舰艇 A1 和 A2 为准, 因此最终的需求重要度 = 作战能力重要度 \times 提升率 = 作战能力重要度 \times (水面舰艇 A2 技术状况/水面舰艇 A1 技术状况). 性能指标重要度计算采用标准加权求和法则, 设第 i 项需求重要度为 I_i , 它与第 j 项性能指标的相关程度为 S_{ij} , 则第 j 项性能指标的重要度 $T_j S_j = \sum_{i=1}^n I_i S_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, m$.

从图 2 中可以看出, 水面舰艇 A 为了完成作战任务, 重要的性能指标为指控通信系统、生命力、反舰导弹系统等. 指控通信系统最为重要的原因主要有两方面, 一方面是因为它对于各项作战能力的提升贡献程度很大, 另一方面是因为当前该系统的技术水平还需要较大的改进. 通过以上分析得出的装备性能指标重要度可供论证人员在方案细化时参考, 对这些指标在设计阶段应该尽可能的进行优化.

5 结束语

性能指标分析是武器装备需求论证的重要内容, 这一过程中不仅要对国内外同类型装备的技术状况进行对比, 而且要定量给出各性能指标的具体要求. 本文提出基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法, 不但可以克服传统定性分析的不足, 量化武器装备性能指标重要度, 而且分析过程清晰直观, 结果可追溯. 另外, 该方法还能够将专家对国内外同类型武器装备技术水平的经验知识进行集中, 既符合装备论证的实际情况, 又保证了竞争者评估结果的全面性和可操作性.

需要指出的是, QFD 提供的只是解决问题的思路和框架, 它的有效使用需要与其它方法进行配合. 本文仅仅是对竞争者评估矩阵的目标值设定进行了探讨, 为了更加客观准确的对武器装备进行需求分析, 还应在

QFD 的集成理论和它相关技术上进行更为深入的研究, 不断完善装备武器需求论证的理论和方法。

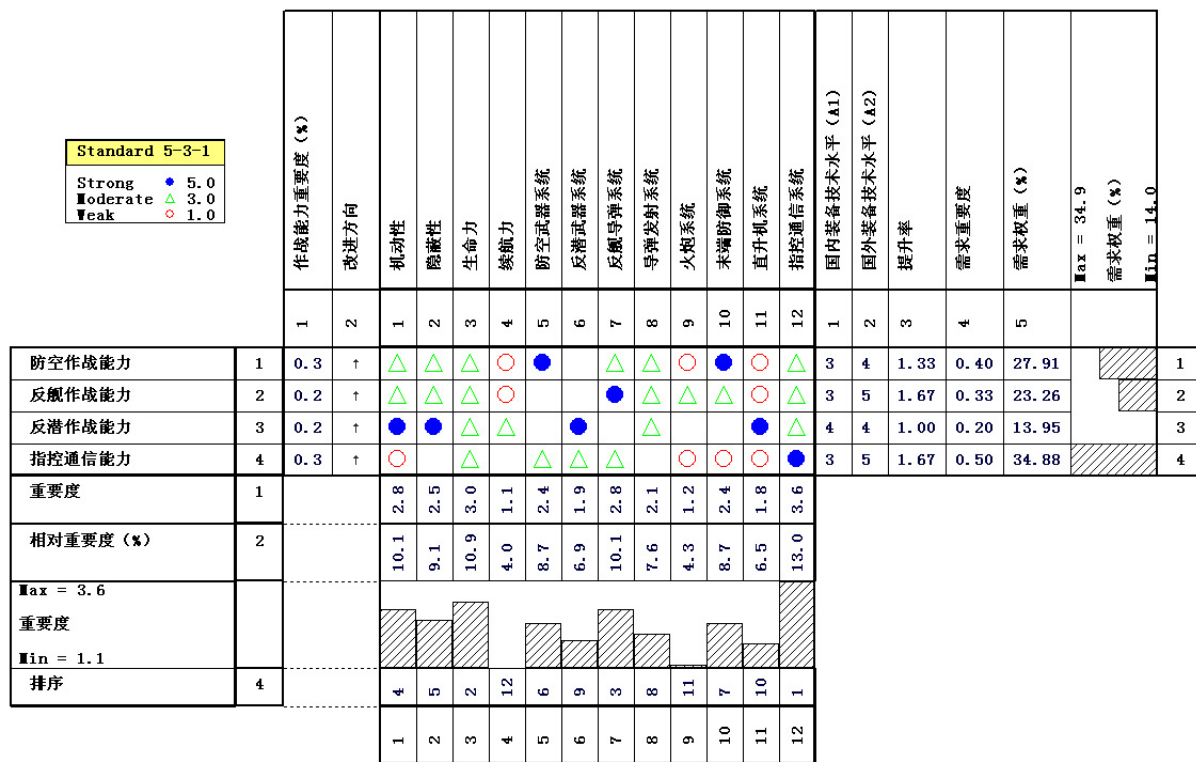


图 2 水面舰艇作战能力 - 性能指标质量屋

参考文献

- [1] 钱东. 对装备论证中有关问题的认识 [J]. 鱼雷技术, 2006, 14(4): 1-7.
Qian D. An understanding of equipment demonstration[J]. Torpedo Technology, 2006, 14(4): 1-7.
- [2] 王凯, 孙万国. 武器装备军事需求论证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 98-106.
Wang K, Sun W G. Requirements Demonstration on Weapons and Equipment[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 98-106.
- [3] 孙杰. 装甲兵武器装备论证手册 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 514-528.
Sun J. Demonstration Handbook on Armored Weapons and Equipment[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 514-528.
- [4] ReVelle J B. Overall review of QFD[C]// The First QFD Seminar of China, Beijing, April, 2009.
- [5] 瞿丽. 质量功能展开技术及其应用综述 [J]. 管理工程学报, 2000, 14(1): 52-60.
Qu L. Review on quality function deployment technology and application[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2000, 14(1): 52-60.
- [6] 刘鸿恩, 张列平. 质量功能展开 (QFD) 理论与方法 —— 研究进展综述 [J]. 系统工程, 2000, 18(2): 1-5.
Liu H E, Zhang L P. Quality function deployment theories and methods — Review on research progress[J]. System Engineering, 2000, 18(2): 1-5.
- [7] Cristiano J J, Liker J K, White C C. Key factors in the successful application of quality function deployment[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001, 48(1): 81-95.
- [8] Bouchereau V, Rowlands H. Analytical approaches to QFD[J]. Manufacturing Engineering, 1999, 78(6): 249-254.
- [9] 邵家骏. 质量功能展开 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 5-8.
Shao J J. Quality Function Deployment[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 5-8.
- [10] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
Zhao K Q. Set Pair Analysis and Preliminary Application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000.
- [11] 赵克勤, 宣爱理. 集对论 —— 一种新的不确定性理论方法与应用 [J]. 系统工程, 1996(1): 18-23.
Zhao K Q, Xuan A L. Set pair theory — A new approach and application on uncertainty theory[J]. System Engineering, 1996(1): 18-23.
- [12] Schultz J, Baity J, Kast E, et al. Design report air superiority cruiser (CGX) [R]. Ocean Engineering Design Project: AOE4065/4066, Virginia Tech, 2006.