

基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析方法

许永平, 石福丽, 杨 峰, 朱一凡

(国防科技大学 信息系统与管理学院系统工程系, 长沙 410073)

摘 要 针对舰艇装备需求分析中不能将模糊的军事需求科学合理地映射到量化的装备需求的问题, 提出了一种基于质量功能部署 (QFD) 和作战仿真的定性定量相结合的舰艇装备需求分析方法和步骤, 辅助需求分析人员确定能从根本上充分反映使命任务需求的舰艇装备作战使用性能重要度排序, 作为舰艇总体设计的参考。

关键词 质量功能部署; 需求分析; 使命任务; 作战使用性能

Requirement analysis method in naval battleships design based on QFD and operational simulation techniques

XU Yong-ping, SHI Fu-li, YANG Feng, ZHU Yi-fan

(Department of Systems Engineering, College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to ensure that the uncertain operational requirements can be logically and reasonably mapped onto quantitative indexes of technical requirement in naval battleship design, we proposed a requirement analysis method based on the Quality Function Development (QFD) and operational simulation techniques. This approach can help naval analysts to work out the main operational performance indexes in sequence that satisfactorily reflect operational requirements of naval battleship to be designed for future marine battles.

Keywords quality function development(QFD); requirement analysis; mission; operational performance

1 引言

舰艇装备研制是一项周期长、投资高的庞大的系统工程。研制舰艇装备的目的在于提升其在各种作战条件下完成使命任务的能力, 这就要求在舰艇装备研制的过程中, 要以舰艇装备的使命任务为牵引, 确定它的作战使用性能需求, 这也是舰艇装备需求分析的主要任务。由于复杂多变的国际形势和不确定的未来作战环境, 以及多种作战使用性能组合形成的不同作战能力, 使得舰艇装备需求分析成为一个复杂的过程, 其复杂性主要体现在: 多类使命任务对作战使用性能需求的多样性, 使命任务和作战使用性能之间的非线性, 未来使命任务重要度的不确定性。

美国海军作战部长办公室水面作战部门主任 John 海军少将^[1] 给出了美国一般舰艇的需求确定与描述方法, 提出舰艇装备的作战使用性能需求应该由顶层的作战需求及总体作战能力要求决定。美国弗吉尼亚理工学院的研究小组^[2] 描述了美国海军对一种多用途攻击型潜艇——SSG 进行的概念设计工作, 在从 SSG 作战需求到作战使用性能需求的需求分析过程中, 不同程度的应用了作战仿真方法。美国乔治亚理工学院航空航天系统设计实验室 (ASDL)^[3] 针对美国海军舰艇装备在立项论证阶段的需要, 将 QFD 应用于舰艇需求分析中, 这种分析方法较好的反映了舰艇设计制造中需求的映射关系, 但是这种需求分析方法只是一种定性的分析方法, 不能将研制各层之间的关系量化表示, 在充分反映这些关系时具有一定的局限性。

收稿日期: 2009-03-30

作者简介: 许永平 (1979-), 男, 河北宣化人, 博士研究生, 研究方向: 系统论证与仿真评估, E-mail: xypnudt@sina.com; 石福丽 (1983-), 女, 甘肃靖远人, 博士研究生, 研究方向: 装备体系论证与仿真评估; 杨峰 (1975-), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 研究方向: 系统论证与仿真评估; 朱一凡 (1963-), 男, 福建武平人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 装备体系论证与仿真评估。

我国舰艇装备的设计和研制中,一方面作战使用性能往往是参照国内已有的或其它国家的类似装备,基于经验进行定性分析;另一方面需求分析的结果很大程度上取决于需求分析人员的偏好,提出的作战使用性能需求不能充分反映使命任务需求.因此,需要规范的舰艇装备需求分析理论、方法和技术,以保证分析结论切实反映使命任务和作战使用性能之间的关系,保证海军舰艇装备的完整配套,形成整体战斗力^[4].针对这种情况,本文提出了一种基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析方法.这是一种定性定量相结合的舰艇装备需求分析方法,能够辅助需求分析人员确定那些从根本上反映使命任务需求的舰艇装备作战使用性能及其重要度排序,为舰艇总体设计提供参考.

2 基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析方法

2.1 舰艇装备需求分析的基本思路

类似于其它复杂武器装备的需求分析^[5],舰艇装备需求分析是指根据舰艇装备的构成特点和作战任务需要,通过分析、综合和权衡,确定舰艇装备的作战使用性能需求的过程.传统的舰艇装备需求分析主要工作可划分为以下三项:

- 1) 根据舰艇装备的构成特点和完成作战任务需要,确定舰艇装备可能担负的使命任务类型;
- 2) 根据使命任务特点,提出舰艇装备能力需求;
- 3) 根据舰艇装备能力需求,确定舰艇装备的作战使用性能需求;

这三项工作及其之间的关系构成了需求分析模型结构图,如图 1 所示.

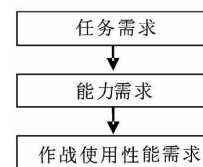


图 1 传统的需求分析模型结构图

2.2 QFD 简介及其在舰艇装备需求分析中的应用

20 世纪 60 年代,随着全面质量控制 (TQC, Total quality control) 技术应用的深入,日本企业开始考虑能否在产品的设计阶段就确定制造过程中的质量控制要点,以减少生产初期大量错误的发生.由此日本质量管理专家水野滋及赤尾洋二于 20 世纪 60 年代提出了进行全面质量管理的质量功能部署 (QFD, quality function development) 方法,它最初是为了解决船舶领域中船舶设计与建造之间的关系而提出的一种映射方法. QFD 的基本思想是产品开发过程中,所有活动都是由顾客的需求、偏好和期望驱动,从而使产品满足顾客的需求^[6]. 1972 年,三菱重工的神户造船厂在赤尾洋二的建议下首先使用了 QFD,在实践的过程中,神户造船厂的工程师们用矩阵的形式将顾客需求和政府法规同如何实现这些要求的控制因素联系起来,计算出每个控制因素的相对重要度,以保证把有限的资源优先配置到重要的项目中去,取得了很大的成功.

舰艇装备的发展规划与产品设计有许多相似点^[7]: 1) 由顾客需求决定“产品”的设计特点; 2) 顾客的需求都是有层次的,随着设计的不断进展,顾客的需求不断具体化和明确化.因此,可以用 QFD 方法像设计产品一样来对舰艇装备进行规划^[8-9],建立基于 QFD 的舰艇装备需求分析模型(图 2),图 2 中的两个质量屋 (HOQ, House of Quality) 分别是“使命任务-作战能力”和“作战能力-作战使用性能”映射质量屋,它们与图 1 中传统需求分析模型的两层映射相对应,其不同之处在于图 2 中的 HOQ 将这种映射关系用关联矩阵的形式表示了出来,同时还给出了同层元素之间相互影响的强弱关系(用屋顶三角阵表示)作参考.图 3 所示的是“使命任务-作战能力”映射质量屋 (HOQ),HOQ 的左墙是使命任务列表,天花板是作战能力列表,房间是作战能力对使命任务影响大小构成的关联矩阵,矩阵的第 i 行第 j 个元素表示的是第 j 个作战能力的变化对完成第 i 个使命任务影响的重要度等级/大小,在该矩阵中是通过专家打分来确定的. HOQ 的屋顶就是作战能力之间的相互影响关系,分为强相关、弱相关、强负相关和弱负相关四类. HOQ 的右墙是通过问卷调查确定的使命任务权重.基于使命任务权重和关联矩阵,通过加权求和、正负理想点等 QFD 重要度变化方法,可以得到作战能力的重要度/权重.继而作为下一个 HOQ 即“作战能力-作战使用性能”映射质量屋的输入,该 HOQ 的结构同图 3 所示的相似,区别是在构造关联矩阵时,参考了作战仿真效能分析结果.详细说明见

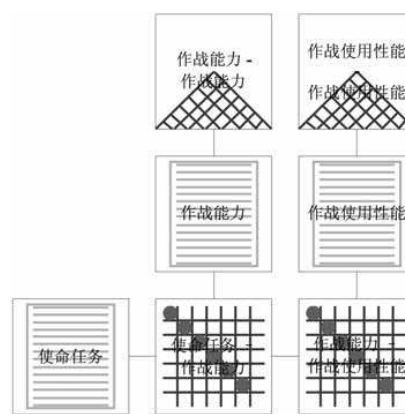


图 2 基于 QFD 的舰艇装备需求分析模型

3.5 节.

2.3 基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析方法

针对舰艇装备需求分析的三个复杂性特点, 本文提出了以下应对措施:

1) 多类使命任务对作战使用性能要求的多样性: 使用 QFD 方法, 可以将多个使命任务对作战使用性能的要求综合起来. 在 QFD 中, 通过两个质量屋中的关联矩阵建立使命任务 - 作战能力 - 作战使用性能之间的层次化映射关系, 使用加权求和、正负理想点等 QFD 重要度变化方法, 可以将多个使命任务的重要度映射为作战使用性能的重要度.

2) 使命任务和作战使用性能之间的非线性: QFD 方法的重点和起点是听取顾客或用户需求, 其关键点是建立质量屋, 传统建立质量屋的方法是用户调查或专家打分等定性方法, 其结果很大程度上取决于某些参与人员的偏好, 不能从根本上反映任务 - 能力 - 性能指标之间的影响关系. 结合作战仿真方法, 可以将舰艇装备的部分作战使用性能与作战能力之间的关系量化, 为需求分析人员构造 HOQ 中的关联矩阵提供定量信息, 使得作战使用性能与使命任务之间的关系不再那么模糊, 可帮助舰艇装备需求分析人员能从定性和定量相结合角度进行分析.

3) 未来使命任务重要度的不确定性: 通过分析未来使命任务重要度变化范围, 且将其用 QFD 方法映射到作战使用性能重要度的过程, 可以确定主要的作战使用性能.

因此, 结合舰艇装备需求分析的基本思路, 本文提出了一种基于 QFD 与

作战仿真的舰艇装备需求分析方法流程图 (图 4), 具体分析过程可以参见本文的第 3 部分.

1) 确定舰艇装备作战需求 (参见 3.1 节): 根据未来战争的军事需求和海军装备体系建设规划, 确定舰艇将要执行的使命任务, 形成作战需求报告.

2) 使命任务分析 (参见 3.2 节): 根据作战需求报告, 对使命任务进行分类, 继而分析舰艇装备可能需要的作战能力及作战使用性能指标, 且将它们用层次化形式表示, 形成使命任务分析报告.

3) 确定使命任务权重 (参见 3.3 节): 根据使命任务分析报告中对使命任务的分类, 用层次分析法、问卷调查等方法确定使命任务的重要度/权重.

4) 基于仿真的作战效能分析 (参见 3.4 节): 根据使命任务分析报告中舰艇装备可能担负的使命任务、活动海区、需要具有的作战能力及主要的作战使用性能指标, 建立一个作战仿真系统, 其中使命任务分析报告中的作战使用性能指标是该仿真系统的部分输入参数. 然后建立舰艇装备作战能力评估指标体系, 变换作战使用性能指标值, 运行仿真系统, 用数理统计及数据挖掘方法对作战仿真系统的输入、输出数据及其对应的作战能力大小进行分析, 得到每个作战使用性能指标对每种作战能力的影响程度.

5) 建立需求分析质量屋 (参见 3.5 节): 首先采用德尔菲或问卷调查等定性方法构造 HOQ 中的关联矩阵; 然后根据步骤 4) 得到的作战使用性能对作战能力的影响程度, 修正 HOQ 中的关联矩阵. 最后利用 QFD 的重要度变换方法, 由使命任务权重及关联矩阵值, 算出作战使用性能的综合重要度排序. 变化使命任务权重, 观察作战使用性能重要度排序的变化情况, 确定主要的作战使用性能指标.

6) 生成需求分析报告: 综合前面的分析过程, 形成需求分析报告, 供舰艇设计人员参考. 报告中需要包含以上每个步骤的输入、输出及所用算法或工具等等.

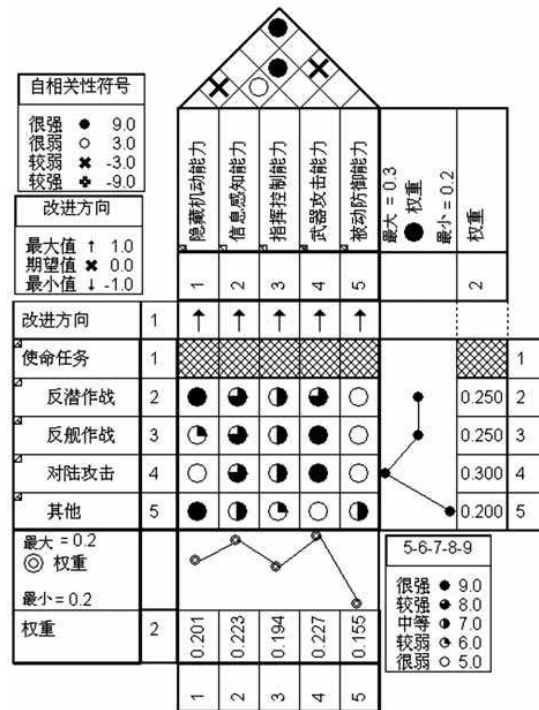


图 3 潜艇使命任务 - 作战能力质量屋

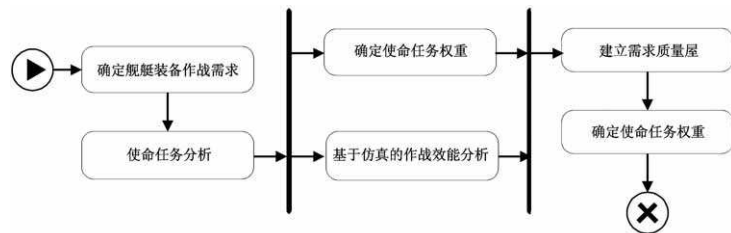


图 4 基于 QFD 和作战仿真的舰艇装备需求分析流程图

3 应用实例

本节以某多用途攻击型潜艇为例,给出基于 QFD 与作战仿真的舰艇装备需求分析应用实例。

3.1 确定舰艇装备作战需求

假设这种多用途攻击型潜艇将可能在某海域执行以下任务^[10-11]:

- 反舰: 攻击敌大、中型水面舰艇及编队
- 对陆攻击: 攻击陆上目标
- 反潜: 攻击敌核潜艇
- 遂行护航、侦察、巡逻和布雷等任务

在执行任务过程中,潜艇可能会遇到敌军的密集探测. 潜艇需要保护自己以免受到以下的一些攻击: 1) 常规武器或核武器; 2) 反潜水雷; 3) 水面舰艇、核潜艇的攻击; 4) 空中或者陆上的攻击. 在濒海地区面对这些威胁,多用途攻击型潜艇将会采取躲避或者防御措施。

3.2 使命任务分析

限于文章篇幅,这里仅用表格给出潜艇使命任务分析报告中对使命任务、作战能力和作战使用性能的分类,如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 使命任务分类表

编号	1	2	3	4
使命任务	反潜作战	反舰作战	对陆攻击	其它

表 2 作战能力分类表

编号	1	2	3	4	5
作战能力	隐藏机动能力	信息感知能力	指挥控制能力	武器攻击能力	被动防御能力

表 3 作战使用性能分类表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作战使用性能	噪声	水下最大航速	安静航速	极限下潜深度	声纳对潜作用距离	声纳对舰作用距离	声纳对雷作用距离	通信能力	导弹武器系统反应时间	目标运动解算精度
指标类型	成本型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型	成本型	效益型
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
作战使用性能	目标处理能力	引导攻击能力	鱼雷武器系统反应时间	巡航导弹发射管数	鱼雷备弹量	鱼雷发射管数	水雷备弹量	气幕弹备弹量	干扰器数量	声诱饵数量
指标类型	效益型	效益型	成本型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型	效益型

3.3 确定使命任务权重

试验中邀请了四个军事专家,使用问卷调查法,让他们对使命任务重要度进行比较打分,使用 AHP 方法确定使命任务权重及其变化范围,比较结果如表 4 所示。

表 4 使命任务分类表

使命任务	军事专家一	军事专家二	军事专家三	军事专家四	权重变化范围
反潜作战	0.3899	0.1448	0.3346	0.3899	0.15~0.39
反舰作战	0.3899	0.2515	0.1496	0.3899	0.15~0.39
对陆攻击	0.0679	0.5311	0.4489	0.0679	0.07~0.50
其它	0.1524	0.0726	0.0669	0.1524	0.07~0.15

3.4 基于仿真的作战效能分析

以多用途攻击型潜艇的作战需求背景为想定,建立一个潜艇作战仿真系统.如图 5 所示。

其中,潜艇作战使用性能指标是该仿真系统部分输入参数.试验中,首先建立潜艇作战能力评估指标体系;然后变化作战使用性能指标值,运行仿真系统,采集仿真运行结果数据;最后,分析作战使用性能指标值变化对作战能力的影响大小.例如:潜艇隐藏机动能力评估指标体系如图 6 所示,底层评估指标是作战使用性能,其变化范围如表 5 所示,变化潜艇作战仿真系统的输入参数噪声的取值范围,固定水下最大航速、安静航速和极限下潜深度等其它参数的取值范围,采集仿真数据,分析数据得到噪声对隐藏机动能力的影响关系图,以及水下最大航速、安静航速和极限下潜深度对隐藏机动能力的影响关系图(见图 7)。

表 5 部分作战使用性能变化范围

作战使用性能	噪声	水下最大航速	安静航速	极限下潜深度
变化范围	90—170 分贝	0—40 节/小时	0—30 节/小时	0—1000 米

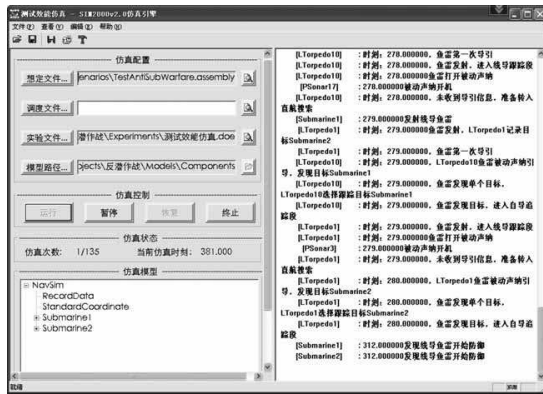


图 5 潜艇作战仿真系统

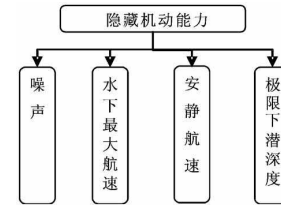


图 6 潜艇隐藏机动能力评估指标体系

3.5 建立需求分析质量屋

该试验中需要用 QFD Capture 工具建立两个质量屋. 第一, 采用专家打分法建立“使命任务——作战能力”质量屋(图 3). 第二, 利用基于仿真的作战效能分析结果, 把作战使用性能与作战能力之间的相关性程度根据 QFD Capture 软件中的相关性等级进行划分, 建立“作战能力——作战使用性能”质量屋(图 8). 如: 利用 3.4 节的基于仿真的作战效能分析结果, 通过比较噪声、水下最大航速、安静航速和最大下潜深度对潜艇隐藏机动能力的影响, 划分它们的相关性等级. 由图 7 的曲线变化率可以

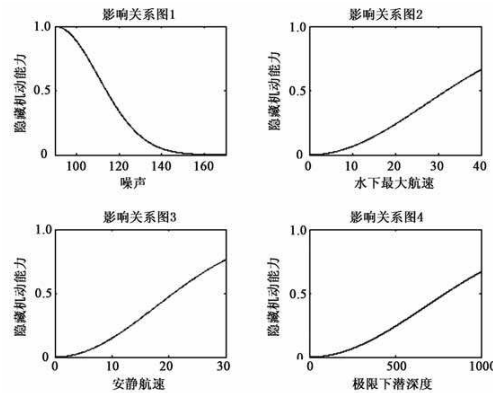


图 7 作战使用性能对潜艇隐藏机动能力的影响关系图

可以得到噪声变化对潜艇的隐藏机动能力影响最大, 因此选择 QFD Capture 中最大的相关性等级“9”与之对应; 其次是安静航速对潜艇的隐藏机动能力影响比较大, 但其曲线变化率比噪声的要小, 比水下最大航速和最大下潜深度的都大, 且相距后两者的较近, 从而选择 QFD Capture 中的相关性等级“5”与之相对应; 由于水下最大航速与最大下潜深度对潜艇隐藏机动能力影响曲线曲率相同, 再通过与其它影响程度比较, 选择 QFD Capture 中的相关性等级“3”与之相对应.

结合图 8, 可以看出当使命任务权重向量(反潜作战, 反舰作战, 对陆攻击, 其它)=(0.4, 0.3, 0.2, 0.1) 时, 重要性排在前五位的作战使用性能依次是噪声、巡航导弹发射管数、声纳对潜作用距离、通信能力和安静航速. 变化使命任务权重, 记录作战使用性能重要度变化情况, 结果如表 6 所示. 通过以上分析, 发现噪声和巡航导弹发射管数是最重要的两个作战使用性能指标, 可供设计制造人员参考.

表 6 作战使用性能重要度变化

使命任务权重向量	第一位	第二位	第三位	第四位	第五位
(0.25, 0.35, 0.25, 0.15)	巡航导弹发射管数	噪声	声纳对潜作用距离	通信能力	安静航速
(0.30, 0.40, 0.15, 0.15)	噪声	巡航导弹发射管数	声纳对潜作用距离	通信能力	安静航速
(0.30, 0.30, 0.30, 0.10)	巡航导弹发射管数	噪声	声纳对潜作用距离	通信能力	安静航速
(0.25, 0.25, 0.30, 0.20)	噪声	巡航导弹发射管数	声纳对潜作用距离	通信能力	安静航速

4 结束语

本文针对舰艇装备需求分析的三个复杂性特点, 提出了基于 QFD 与作战仿真相结合的舰艇装备需求分析方法, 给出了基于 QFD 和仿真的舰艇装备需求分析方法的主要步骤, 进行了简单的实例验证. 为了更加全面的对舰艇装备进行需求分析, 还需要在其它理论、技术和工具的支撑下进行分析研究, 来完善舰艇装备需求论证的理论.

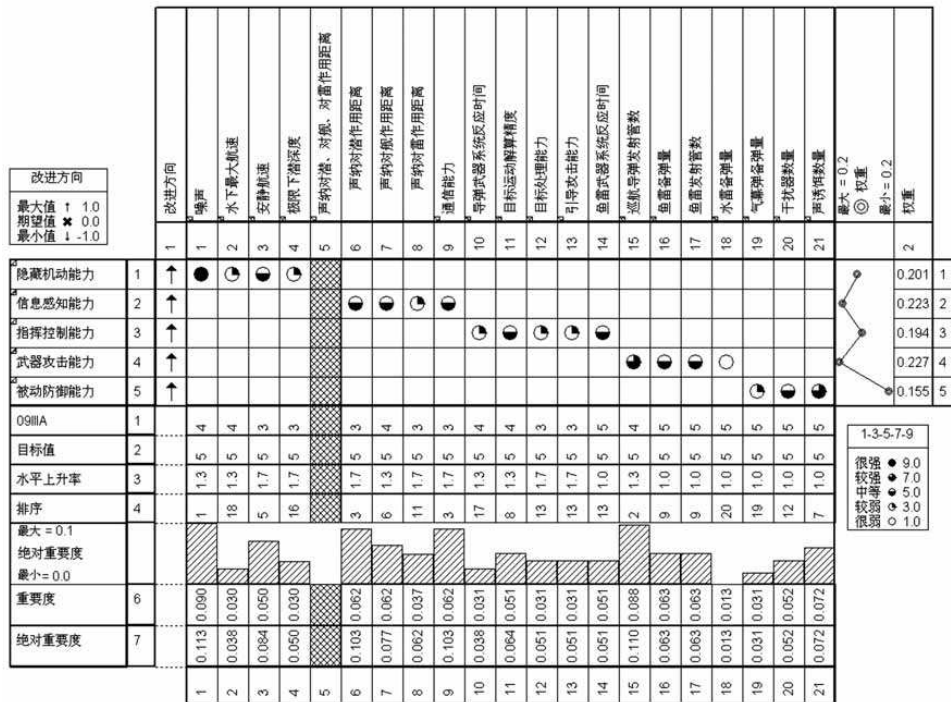


图 8 潜艇作战能力 - 作战使用性能质量屋

参考文献

- [1] John T P. USN development of requirements[J]. Naval Engineers Journal, 1981, (2): 89-102.
- [2] Desta A, Robert B B, Elizabeth E, et al. Design Report of Guided Missile Submarine SSG(X)[EB/OL]. [2007-09-10]. <http://www.aoe.vt.edu/~brown/VTShipDesign/SSLWXTeam3T30.pdf>.
- [3] Danielle S, Daniel D. An approach to the design of a new system: Methodology as applied to the MAGTF expeditionary family of fighting vehicles[R]. Georgia Institute of Technology, 2003.
- [4] 李俊华. 基于仿真的舰艇研制评估系统报告 [R]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Li J H. Report of naval warship development and evaluation system based on simulation[R]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [5] 张宝书. 陆军武器装备作战需求论证概论 [M]. 北京: 解放军出版社, 2005: 340-364.
Zhang B S. Introduction of Operational Requirements Demonstration of Army Weaponry[M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Publishing House, 2005: 340-364.
- [6] 袁贵勇, 刘晓东. QFD 方法在空战武器装备需求分析中的应用 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(8): 23-26.
Yuan G Y, Liu X D. Application of QFD in the requirement analysis of aerial warfare weapon and equipment[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2004, 15(8): 23-26.
- [7] 车阿大, 林志航. 质量功能配置的多目标规划模型 [J]. 计算机集成制造, 1998, (6): 26-30.
Che A D, Lin Z H. A multi-goal programming model for quality function deployment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1998, (6): 26-30.
- [8] 刘伟, 李智华. 基于质量功能展开方法的登陆艇装备需求分析 [J]. 炮兵学院学报, 2006, (2): 46-48.
Liu W, Li Z H. Requirements analysis of landing craft based on quality function deployment[J]. Journal of Artillery Institute of the Chinese People's Liberation Army, 2006, (2): 46-48.
- [9] 周宏, 蒋志勇. 质量功能展开在潜艇研制中的应用 [J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2005, 19(1): 10-14.
Zhou H, Jiang Z Y. Application of quality function deployment in manufacture of submarine[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute: Natural Science Edition, 2005, 19(1): 10-14.
- [10] 沈国鉴. 潜艇设计原理 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988.
Shen G J. Submarine Design Methodology[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1988.
- [11] 众总. 潜艇基础知识 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
Zhong X. Elementary Knowledge of Submarine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.