

11-30-2023

Requirements of Parallel Combat System Based on GQFD-Coupling Coordination Degree

Zhiming Dong

Army Academy of Armored Forces , Beijing 100071, China, dong_zhiming@163.com

Bingshan Si

Army Academy of Armored Forces , Beijing 100071, China; PLA 75130 Troops, Guigang 537100, China, 18201304269@163.com

Liang Li

Army Academy of Armored Forces , Beijing 100071, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Requirements of Parallel Combat System Based on GQFD-Coupling Coordination Degree

Abstract

Abstract: In view of future intelligent unmanned combat characteristics, the concept of parallel combat is proposed and the model of parallel combat system is built based on OODA ring theory. Meanwhile, this paper builds a demand analysis model based on GQFD-coupling coordination degree to solve the low reliability, lack of objectivity, and single description perspective of the traditional quality function deployment (QFD) method and coupling coordination degree analysis during demand analysis. Additionally, the importance ranking of ability requirements in the parallel combat system is obtained by the house of quality of ability requirement analysis in the combat system based on grey correlation analysis. The capability coupling coordination of the parallel combat system is analyzed. Finally, the study provides a more objective method for the requirement analysis of parallel combat systems and a theoretical basis for the construction of parallel combat systems.

Keywords

parallel combat, parallel combat system, grey quality function deployment(GQFD), demand analysis, coupling coordination

Recommended Citation

Dong Zhiming, Si Bingshan, Li Liang. Requirements of Parallel Combat System Based on GQFD-Coupling Coordination Degree[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2454-2463.

基于 GQFD-耦合协调度的平行作战系统需求研究

董志明¹, 司炳山^{1,2*}, 李亮¹

(1. 陆军装甲兵学院, 北京 100071; 2. 中国人民解放军 75130 部队, 广西 贵港 537100)

摘要: 针对未来智能化无人化作战特点, 结合 OODA 环理论给出平行作战概念, 建立了平行作战系统模型。同时, 针对传统质量功能展开(quality function Deployment, QFD)方法和耦合协调度分析在需求分析过程中存在的可靠性低、客观性不足、描述角度单一等问题, 建立了基于灰关联分析的 QFD(grey quality function deployment, GQFD)耦合协调度需求分析模型, 以及基于灰色关联分析的平行作战系统能力需求分析质量屋, 得到了平行作战系统能力需求重要度排序。对平行作战系统能力的耦合协调情况进行了分析, 为平行作战系统的需求分析提供了更为客观的方法, 为平行作战系统的构建提供了理论依据。

关键词: 平行作战; 平行作战系统; GQFD; 需求分析; 耦合协调度

中图分类号: TP391.9; E919 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2454-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0724

引用格式: 董志明, 司炳山, 李亮. 基于 GQFD-耦合协调度的平行作战系统需求研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2454-2463.

Reference format: Dong Zhiming, Si Bingshan, Li Liang. Requirements of Parallel Combat System Based on GQFD-Coupling Coordination Degree[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2454-2463.

Requirements of Parallel Combat System Based on GQFD-Coupling Coordination Degree

Dong Zhiming¹, Si Bingshan^{1,2*}, Li Liang¹

(1. Army Academy of Armored Forces, Beijing 100071, China; 2. PLA 75130 Troops, Guigang 537100, China)

Abstract: In view of future intelligent unmanned combat characteristics, the concept of parallel combat is proposed and the model of parallel combat system is built based on OODA ring theory. Meanwhile, this paper builds a demand analysis model based on GQFD-coupling coordination degree to solve the low reliability, lack of objectivity, and single description perspective of the traditional quality function deployment (QFD) method and coupling coordination degree analysis during demand analysis. Additionally, the importance ranking of ability requirements in the parallel combat system is obtained by the house of quality of ability requirement analysis in the combat system based on grey correlation analysis. The capability coupling coordination of the parallel combat system is analyzed. Finally, the study provides a more objective method for the requirement analysis of parallel combat systems and a theoretical basis for the construction of parallel combat systems.

Keywords: parallel combat; parallel combat system; grey quality function deployment(GQFD); demand analysis; coupling coordination

收稿日期: 2022-06-23 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(JY2021C107)

第一作者: 董志明(1977-), 男, 教授, 博士, 研究方向为军事装备。E-mail: dong_zhiming@163.com

通讯作者: 司炳山(1991-), 男, 硕士生, 研究方向为军事装备。E-mail: 18201304269@163.com

0 引言

现代战争是一个典型的复杂系统,且这种复杂性随着科技和社会的发展使人对战争本身的认识面临严峻挑战。文献[1]提出了平行系统理论与ACP(artificial system, computational experiments, parallel execution, 人工系统、计算实验、平行执行)方法,为解决复杂系统的建模、控制、分析及管理等问题提供了新的理论依据。ACP方法集成了复杂系统建模仿真和人工智能等先进技术与方法,构建了与实际系统平行的人工系统,并且通过在人工系统中的各类仿真实验、平行执行、反馈控制,对实际系统进行不断模拟分析和优化。

GQFD(grey quality function deployment)方法^[2]是基于灰关联^[3]分析的QFD方法^[4]。GQFD是在QFD方法的基础上,通过灰关联分析对任务的需求重要度进行排序。根据任务需求之间的序关系来确定任务需求的重要度,用灰关联矩阵替代经典QFD质量屋模型中的关系矩阵,能很好地排除人为因素的干扰,使得到的结果更加客观、精确,提高可信度。

耦合度是一个物理学概念,后多被用于社会科学领域^[5],用于对区域经济^[6]、城市科学^[7]、环境政策^[8]等方面的问题进行解答。本文将耦合度模型引入军事需求分析当中,为平行作战系统的构建提供了新的思路和研究方法。

1 平行作战

现代战争中战争双方的对抗领域已经不是单纯的认知域与物理域的对抗,也不是简单的认知域、物理域和信息域的叠加。必将是借助大数据、人工智能、云计算等技术而开展的三域平行的、融合的全时域对抗。借助在信息域建立的平行战场,通过高度还原的战场环境建模技术、超实时仿真技术、态势预测技术等先进手段,进行作战决策的实时优化。能够达到在未来战场上始终领先对手的目的。

平行作战是指采用高效的互联架构、智能化

虚拟兵力、态势博弈推演等技术,以平行战场作为战争大脑,构建信息域、物理域、认知域等有机融合的智能化网络信息体系,三域实时映射、平行执行、共生演进,多作战环同步迭代,实现超前决策、精确指控、智能指挥的作战方式。平行作战系统是平行作战的重要载体,借助平行作战系统,根据物理战场状态信息生成体系要素完整的虚拟战场空间实时对抗态势,进行超实时智能博弈演算,以提升瞬时态势预测准确率,最终形成决策意见反馈至认知战场,实现物理战场精确超前的指挥控制。“以实驱虚,以虚控实”是平行作战与平行作战系统的最大特点与优势。

本文借鉴OODA作战环^[9-11]思想建立针对平行作战的平行作战系统。首先可将战场对抗领域划分为基于同一时间轴的物理战场、认知战场和虚拟战场。物理战场存在于物理域,是传统意义上的实际战场,是交战双方兵力、装备以及战场环境等全部实体存在的战场。认知战场存在于认知域,主要是指指挥员与战斗员的思维意识。虚拟战场存在于信息域是物理战场、认知战场在信息域的投影,同时也是平行作战系统不断进行自我博弈优化的空间。通过构建平行作战系统实现3个领域战场的互联互通互操作(如图1所示)。依靠信息域虚拟战场的超实时仿真推演与评估,不断优化指挥员的战场认知和决策,最终实现物理战场的对敌优势。

信息流由物理域的观察(O)开始,同时到达认知域与信息域,并开始判断(O)、决策(D),在此过程中信息域借助平行战场OODA环与认知域不断交互,以人机共智的形式达成最优决策方案,并产生执行指令(A),最终完成OODA循环。

作战过程中双方的OODA环就像紧密啮合的齿轮(如图2(a)所示)。利用平行作战系统可以有效地加快我方的OODA环循环速度,可以使我方成为对抗中的主动轮。同时使对手OODA循环陷入“打齿”“滑齿”的判断困境、决策困境,无法有效完成OODA的闭合回路。

<http://www.china-simulation.com>

• 2455 •

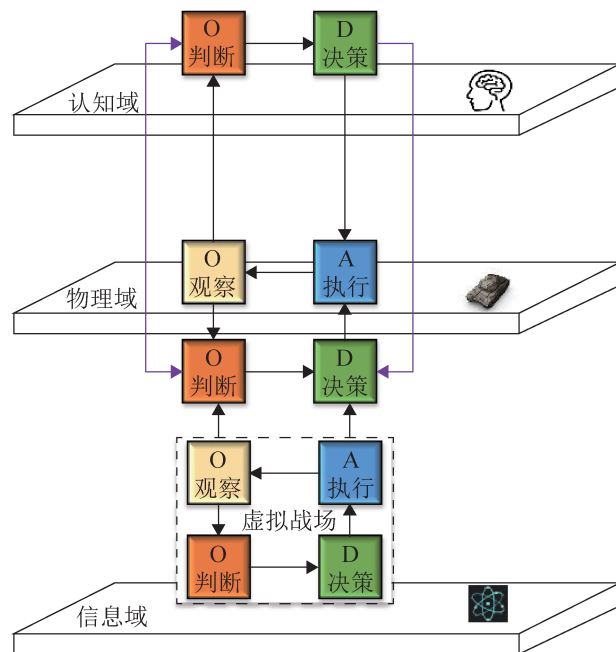


图1 平行作战概念图

Fig. 1 Parallel operation concept

平行作战系统的“加速”作用：加入平行作战系统的OODA环可以针对战场展开超实时的仿真模拟(如图2(b)所示)，对战场情况进行预测研判。能够使我方达到“先知”“先胜”的效果。

平行作战系统的“减速”作用：加入平行作战系统可以对历史的战场数据和场景进行高度有效还原，放大战场细节，能够使指挥员对作战过程进行更加直观的理解和学习，也能为自身的反复博弈提供详实数据(如图2(c)所示)。

2 地面无无人平行作战系统

目前与平行作战系统类似的技术有数字孪生^[12-15]、平行仿真^[16-17]、元宇宙^[18]、信息物理系统^[19](cyber-physical systems, CPS)、实况-虚拟-构造仿真^[20-22](live-virtual-constructive, LVC)等技术。

相比之下，数字孪生是一种将现实中的物理系统在虚拟空间进行数字化映射的综合技术，更加突出静态条件下的模型精准性。平行仿真是将仿真系统作为人工系统，与实际系统协同运行、共同发展，及相互控制的一种仿真技术应用方法。

元宇宙技术尚处于探索阶段，主要应用于游戏。CPS则主要倾向于制造业领域的应用。LVC技术主要面向训练环境构建，同时突出交互的实时性。平行作战系统在底层支撑技术原理上与其他技术有着广泛的联系，但平行作战系统主要聚焦于战场强对抗环境下的动态实时交互，并通过与人工智能技术的结合追求更加精准的智能演化，以实现高度准确的战场预测。

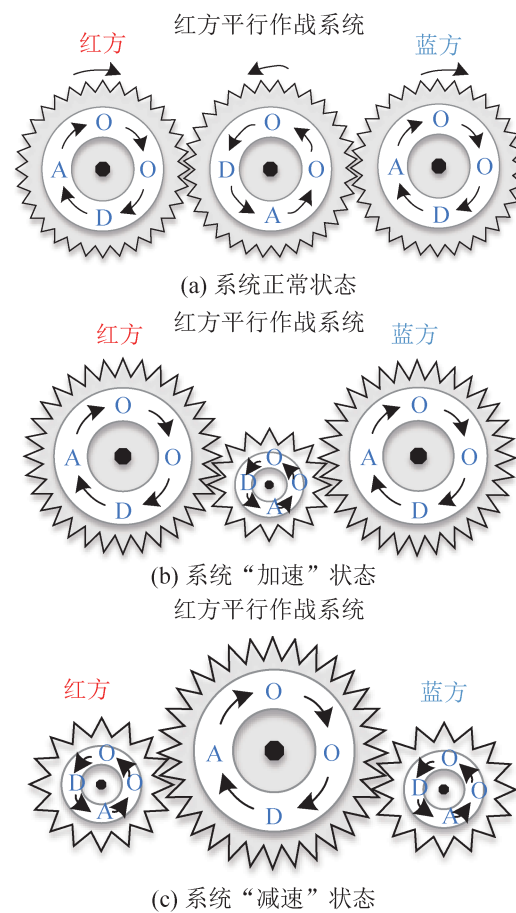


图2 加入平行作战系统的红蓝对抗OODA环

Fig. 2 Adding red and blue parties to the parallel combat system against OODA rings

基于平行作战的特点与需求，本文提出平行作战系统。系统架构如图3所示，系统包括了物理层、系统层、资源层、数据层、应用层等模块。物理层是承载整个系统的硬件基础结构；资源层包括了各种目标的模型库、战场环境模型库、通用工具和中间件等系统资源。数据层主要包含了

作战过程中的各类接受、处理和产生的数据信息以及数据管理系统。系统层包括了实现各层战场交互的战场接口、各类标准规范、系统的总联框架等模块。应用层是实现人机交互、策略管理、

状态监测、评估管理等功能的终端。同时, 整个系统采用开放式架构设计, 为功能扩展和能力的提升留下更大空间。

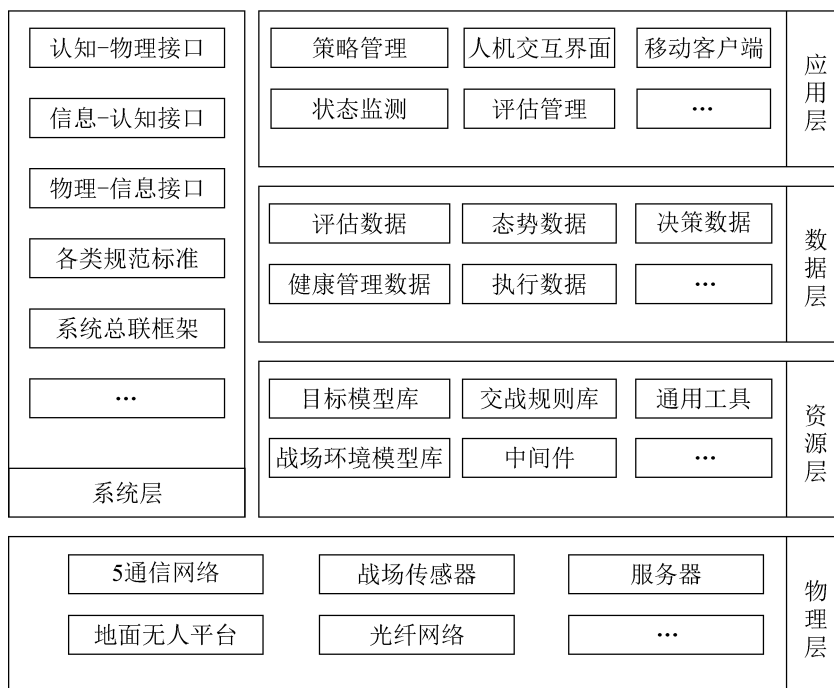


图3 平行作战系统架构图
Fig. 3 Parallel combat system architecture

为了从更加客观的角度对构建平行作战系统进行需求分析和探索。本文在传统QFD方法进行改进和优化, 采用GQFD方法, 通过建立灰色关联矩阵, 进一步排除主观因素对结果的不利影响, 同时在此基础上加入耦合协调度分析方法, 从多个角度对构建平行作战系统的需求进行分析, 使结果更加准确、客观。

3 基于 GQFD-耦合协调度的需求分析

3.1 GQFD-耦合协调度方法

(1) QFD方法

质量功能展开方法起源于日本。QFD是一种用户驱动的产品开发方法。由美国学者 J. R. Hauser 与 D. Clausing 于 1988 年提出的质量屋

(house of quality, HOQ)是QFD的核心技术, 结构如图4所示。

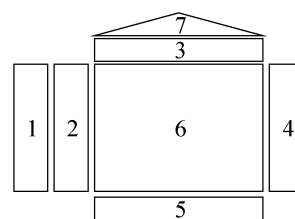


图4 质量屋
Fig. 4 House of quality

图4中1~7为7个广义矩阵, 其中, 1, 2为左墙, 分别为顾客需求及其重要度; 3为天花板, 为工程措施(设计要求或质量特性)矩阵; 4为右墙, 为市场竞争力评估矩阵; 5为地下室, 为工程措施的指标及其重要度与技术竞争能力评估矩阵; 6为房间, 为工程措施与相对顾客需求关系矩阵; 7为

屋顶，为工程措施相关矩阵。

(2) 灰色关联模型^[23]

设 $Y_i=(y_i(1),y_i(2),\dots,y_i(n))(i=1,2,\dots,s)$ 为平行作战系统能力需求， $X_j=(x_j(1),x_j(2),\dots,x_j(n))(j=1,2,\dots,m)$ 为作战任务能力需求， ε_{ij} ， r_{ij} 与 ρ_{ij} 分别为 Y_i 与 X_j 的灰色绝对关联度、灰色绝对关联度与灰色综合关联度，其计算公式如下：

1) 灰色绝对关联度计算

$$\begin{aligned} |Y_{s_i}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_i^0(k) + \frac{1}{2} y_i^0(n) \right|, \\ |X_{s_j}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^0(k) + \frac{1}{2} x_j^0(n) \right|, \\ |X_{s_j} - Y_{s_i}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_j^0(k) - y_i^0(k)) + \frac{1}{2} (x_j^0(n) - y_i^0(n)) \right|, \end{aligned}$$

式中：上标“0”表示数据经过初值化面后又进行了始点零化处理。

Y_i 与 X_j 的灰色绝对关联度为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + |Y_{s_i}| + |X_{s_j}|}{1 + |Y_{s_i}| + |X_{s_j}| + |X_{s_j} - Y_{s_i}|} \quad (1)$$

2) 灰色相对关联度计算

$$\begin{aligned} |Y'_{s_i}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_i^{\prime 0}(k) + \frac{1}{2} y_i^{\prime 0}(n) \right|, \\ |X'_{s_j}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^{\prime 0}(k) + \frac{1}{2} x_j^{\prime 0}(n) \right|, \\ |X'_{s_j} - Y'_{s_i}| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^{\prime 0}(k) - y_i^{\prime 0}(k) + \frac{1}{2} x_j^{\prime 0}(n) - y_i^{\prime 0}(n) \right| \end{aligned}$$

式中：上标“0”为数据经过初值化而后再进行始点零化处理。

Y_i 与 X_j 的灰色相对关联度为

$$r_{ij} = \frac{1 + |Y'_{s_i}| + |X'_{s_j}|}{1 + |Y'_{s_i}| + |X'_{s_j}| + |X'_{s_j} - Y'_{s_i}|} \quad (2)$$

3) 灰色综合关联度计算

Y_i 与 X_j 的灰色综合关联度为

$$\rho_{ij} = \theta \varepsilon_{ij} + (1 - \theta) r_{ij} \quad (3)$$

式中： θ 为关联系数， $\theta=0.5$ ；灰色综合关联度既

体现了折线 Y_i 与 X_j 的相似程度，又反映了 Y_i 与 X_j 相对于始点的变化速率的接近程度，是较为全面表征序列之间联系是否紧密的一个量化指标。

经过计算可得到灰色综合关联矩阵为

$$H=(\rho_{ij})_{s \times m} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{s1} & \rho_{s2} & \dots & \rho_{sm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

GQFD 分析流程如图 5 所示。

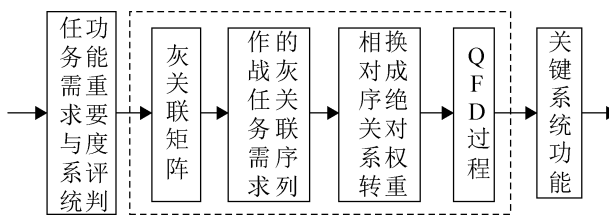


图 5 GQFD 方法流程
Fig. 5 GQFD method flow

(3) 耦合协调度方法

“耦合”用来表示不同系统之间的相互作用强度。当给定 $n \geq 2$ 个系统时，用 U_i 表示系统 S_i 的评价值，则一般耦合度计算可表示为式(5)，(6)两种：

$$C_1 = n \cdot \left\{ \frac{\prod_{i=1}^n U_i}{(\sum_{i=1}^n U_i)^n} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$C_2 = 2 \cdot \left\{ \frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\prod_{i < j} (U_i + U_j)^{\frac{2}{n-1}}} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

协调指数的计算公式为

$$T = \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \dots + \beta_n u_n \quad (7)$$

式中： β_w 为权重， $w=1, 2 \dots n$ ，可使用熵权法、层次分析法等进行确定。

耦合协调度表示为

$$D = (C \cdot T)^{1/2} \quad (8)$$

(4) GQFD-耦合协调度分析流程

经过 GQFD 的需求分析，可得出 $Y_1 \sim Y_{14}$ 的绝对权值。对传统耦合协调度分析过程进行改进。

将 GQFD 分析中得出的绝对权值进行归一化先处理, 并以此代替耦合协调度计算中的 T 值。GQFD-耦合协调度分析流程如图 6 所示。

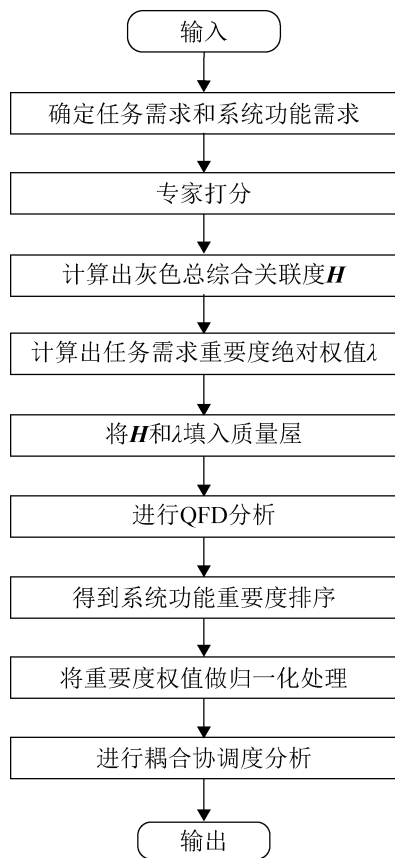


图 6 GQFD-耦合协调度分析流程

Fig. 6 Flow of GQFD- coupling coordination degree analysis

3.2 平行作战任务能力需求^[24-26]指标确定

基于平行作战系统的平行作战是以信息为主导的作战样式。作战的主体为无人系统, 作战的样式有无人自主作战和有人-无人协同作战等样式。平行作战任务需求对应质量屋中的顾客需求, 是质量屋的原始输入数据。根据使命任务要求, 可将平行作战任务需求进行归纳如表 1 所示。

3.3 平行作战系统能力需求指标确定

平行作战系统是平行作战的重要支撑。根据平行作战的任务需求指标, 对完成任务所需要的

平行作战系统能力进行分析。关键是确定作战任务与作战系统能力的映射关系, 可以是一对一映射、多对一映射、一对多映射。经过对平行作战系统的能力需求归纳, 可将需求进行归纳如表 2 所示。

表 1 作战任务能力需求

Table 1 Requirements for combat mission capability		
作战阶段	需求	需求内容
观察 O	X_1	侦查半径
	X_2	目标判别率
	X_3	预警时间
判断 O	X_4	信息传输质量
	X_5	信息处理时间
决策 D	X_6	备选决策方案数量
	X_7	决策方案生成时间
执行 A	X_8	打击效果评估
	X_9	打击效果

表 2 系统能力需求

Table 2 System capability requirements	
需求	需求内容
Y_1	异构数据处理能力
Y_2	态势实时共享能力
Y_3	多源态势感知能力
Y_4	平行映射能力
Y_5	精准定位、授时能力
Y_6	目标快速建模能力
Y_7	高速态势融合能力
Y_8	分布式解算能力
Y_9	多域平行交互能力
Y_{10}	超实时仿真能力
Y_{11}	平行态势可视化能力
Y_{12}	跨域指挥能力
Y_{13}	装备健康管理能力
Y_{14}	态势准确预测能力

3.4 平行作战系统能力需求分析

根据需求指标, 从院校和部队邀请 12 位专家采用 9 级标度法进行打分。打分结果见表 3。

根据式(4)计算可得关联矩阵为

表3 专家打分表
Table 3 Expert grading scale

专家	需求																						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄
a	6	3	9	2	2	5	8	3	8	7	5	8	6	8	2	5	2	3	2	4	2	9	5
b	8	4	2	8	4	7	8	9	6	6	1	1	5	8	4	6	8	3	9	9	3	4	5
c	5	3	7	8	6	7	1	5	1	8	1	7	1	7	5	7	7	2	6	4	5	8	4
d	7	4	9	6	9	3	6	2	4	4	4	3	6	3	5	9	9	7	6	3	3	4	8
e	7	6	3	1	7	2	2	7	6	7	3	8	9	4	6	1	8	5	6	2	8	4	7
f	9	4	1	4	7	6	2	3	4	8	1	2	1	8	4	7	8	3	3	4	8	8	3
g	4	7	2	6	5	8	8	2	3	6	8	6	4	7	5	6	5	7	2	7	9	7	1
h	4	8	8	3	5	3	5	3	2	8	7	4	5	9	8	5	1	2	4	6	6	4	7
i	6	6	9	7	3	6	7	6	8	6	1	6	2	4	4	5	2	3	4	6	7	8	3
j	7	8	5	5	1	6	1	6	7	8	7	9	8	6	6	2	8	7	7	4	7	3	6
k	3	9	4	5	4	3	7	6	3	4	6	6	8	7	3	4	7	4	5	5	9	1	1
l	7	2	2	7	4	6	2	7	2	2	4	4	8	5	8	7	8	9	6	7	4	2	5

$$H=(\rho_{ij})_{9 \times 14} =$$

0.624 1	0.572 9	0.542 5	0.591 1	0.565 0	0.516 0	0.704 0	0.511 6	0.540 2	0.515 6	0.564 1	0.511 6	0.533 7	0.642 7
0.608 3	0.673 4	0.844 0	0.644 7	0.734 1	0.863 5	0.557 7	0.762 3	0.788 1	0.853 0	0.687 8	0.762 3	0.799 2	0.584 9
0.619 1	0.699 4	0.872 5	0.661 2	0.739 8	0.768 8	0.571 4	0.793 3	0.822 3	0.772 2	0.726 4	0.793 3	0.989 1	0.601 6
0.577 1	0.621 7	0.770 0	0.602 6	0.670 5	0.965 5	0.539 4	0.887 7	0.694 5	0.979 3	0.629 6	0.887 7	0.780 8	0.558 7
0.585 3	0.634 7	0.799 0	0.613 6	0.688 8	0.985 2	0.543 6	0.850 3	0.715 3	0.971 2	0.643 4	0.850 3	0.768 1	0.565 0
0.689 8	0.613 1	0.563 5	0.639 9	0.597 4	0.526 7	0.824 7	0.519 3	0.564 6	0.525 9	0.600 9	0.519 3	0.549 9	0.724 2
0.633 4	0.722 2	0.921 4	0.680 3	0.770 8	0.803 0	0.579 0	0.749 4	0.827 3	0.807 7	0.750 9	0.749 4	0.951 6	0.612 7
0.645 4	0.732 9	0.817 9	0.694 3	0.814 7	0.770 7	0.577 4	0.695 4	0.886 3	0.762 9	0.752 0	0.695 4	0.799 1	0.614 0
0.623 7	0.706 2	0.890 7	0.667 2	0.751 1	0.791 1	0.573 3	0.769 5	0.834 8	0.795 1	0.732 9	0.769 5	0.972 6	0.604 6

经过计算可以得出：

$$\sum_{j=1}^{14} \rho_{7j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{9j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{3j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{8j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{5j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{4j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{2j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{6j} > \sum_{j=1}^{14} \rho_{1j}$$

从而可得出：

$$X_7 \succeq X_9 \succeq X_3 \succeq X_8 \succeq X_5 \succeq X_4 \succeq X_2 \succeq X_6 \succeq X_1$$

根据上文定义的赋权方法，取 $\mu=0.5$ ，可

得出：

$$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9) = (0.5, 2.5, 6.5, 3.5, 4.5, 1.5, 8.5, 5.5, 7.5)$$

将 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9)$ 与 H 分别作为作战任务能力需求重要度与关系矩阵，填入质量屋，按常规 QFD 过程计算可得各系统能力需求重要度，见表 4。

表4 系统能力需求重要度排序

Table 4 Importance ranking of system capability requirements

需求	绝对权值	排序	需求	绝对权值	排序
Y ₁	25.156 70	12	Y ₈	30.996 10	6
Y ₂	27.933 95	10	Y ₉	32.249 50	5
Y ₃	34.198 85	2	Y ₁₀	33.021 05	3
Y ₄	26.640 45	11	Y ₁₁	28.738 80	9
Y ₅	29.934 80	8	Y ₁₂	30.996 10	7
Y ₆	33.014 25	4	Y ₁₃	35.486 25	1
Y ₇	23.428 45	14	Y ₁₄	24.397 70	13

从表 4 可以看出，系统能力需求的序关系为： $Y_{13} \succeq Y_3 \succeq Y_{10} \succeq Y_6 \succeq Y_9 \succeq Y_8 \succeq Y_{12} \succeq Y_5 \succeq Y_{11} \succeq Y_2 \succeq Y_4 \succeq Y_1 \succeq Y_{14} \succeq Y_7$ ，即系统能力需求 Y_{13} 为最关键工程措施， Y_3 次之， Y_7 最不关键。在整个系统能力需求重要

程度排序当中, 位于前三位的需求分别为: 装备健康管理能力、多源态势感知能力和超实时仿真能力。位于最后三项的需求分别是: 异构数据处理能力、态势准确预测能力、高速态势融合能力。这符合以决策为重点的地面无人平行作战样式的发展特点, 对于平行作战系统的建设有一定的指导意义。

经过 GQFD 的需求分析, 可得出 $Y_1 \sim Y_{14}$ 的绝对权值。对传统耦合协调度分析过程进行改进。将 GQFD 分析中得出的绝对权值进行归一化先处理, 并以此代替耦合协调度计算中的 T 值。

由式(5), (8)计算可得出 C 值和 D 值如表 5 所示。由文献[6]的耦合协调度衡量标准可得出耦合协调程度的评价结果, 如图 7 所示。

从耦合度 C 值来看, 14 项需求当中 Y_2 还处在磨合期,即与其他需求开始相互制衡、配合, 开始呈现出良性耦合趋势。其余 13 项系统能力需求已经进入了协调耦合时期, 即系统需求之间良性耦合愈发强劲, 并逐渐向更加有序方向发展, 处于高水平的耦合时期。

从协调等级 D 值的划分来看, 系统能力需求 $Y_1 \sim Y_{14}$ 均能达到协调等级 8 以上。14 项需求当中 Y_3, Y_6, Y_{10}, Y_{13} 共 4 项为优质协调, $Y_1, Y_5, Y_8, Y_9, Y_{11}, Y_{12}$ 共 6 项为良好协调, Y_2, Y_4, Y_7, Y_{14} 共 4 项为中级协调。系统需求的耦合协调类型均处于高度耦合的状态, 即各项系统能力需求之间功能

相互促进, 可以满足主体的需求, 整体系统能够实现有序发展。

表 5 耦合协调等级

Table 5 Coupling coordination level					
需求	耦合度 C	协调指数 T	耦合协调度 D	协调等级	耦合协调程度
Y_1	0.937	0.709	0.815	9	良好
Y_2	0.754	0.787	0.770	8	中级
Y_3	0.857	0.964	0.909	10	优质
Y_4	0.806	0.751	0.778	8	中级
Y_5	0.951	0.844	0.896	9	良好
Y_6	0.936	0.930	0.933	10	优质
Y_7	0.878	0.660	0.761	8	中级
Y_8	0.834	0.873	0.853	9	良好
Y_9	0.886	0.909	0.897	9	良好
Y_{10}	0.910	0.931	0.920	10	优质
Y_{11}	0.928	0.810	0.867	9	良好
Y_{12}	0.904	0.873	0.889	9	良好
Y_{13}	0.847	1.000	0.920	10	优质
Y_{14}	0.840	0.688	0.760	8	中级

从两个视角的系统能力需求分析不难看出, 系统能力需求绝对权值排序与系统能力需求的耦合度和耦合协调度分析结果并不一定呈现出绝对的正相关。在 GQFD 的分析结果中, Y_{13} 为系统能力需求的最重要项, 而在耦合协调度的分级结果中, Y_6 对系统的整体协调促进作用最大。

从总体结果来看, 系统协调程度较高。系统总体设计各项需求能够起到相互促进相互发展的作用。

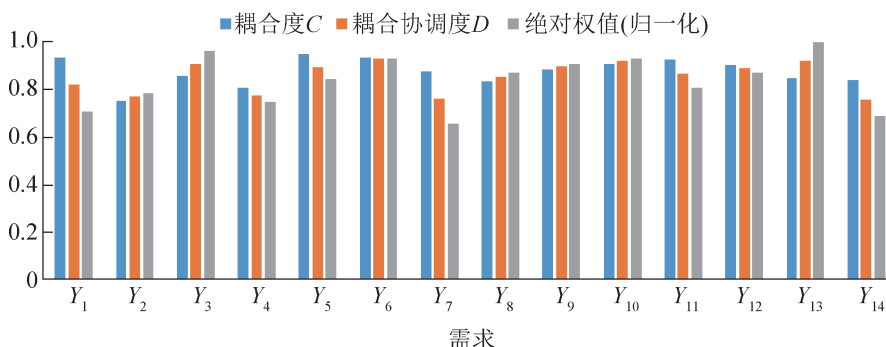


图 7 耦合协调度对比

Fig. 7 Coupling coordination comparison

4 结论

本文通过采用GQFD-耦合协调度方法,建立了基于灰关联分析的地面无人平行作战系统需求分析的质量屋,得到了地面无人平行作战系统能力需求排序。在此基础上使用改进耦合协调度分析方法,对系统能力需求的耦合度和耦合协调度进行分析,得到了系统能力需求的耦合协调程度。对于平行作战系统的构建有一定的指导意义,为其需求分析提供了新的研究思路。

未来随着大数据、云计算、人工智能等技术的发展,为解决战争复杂问题的平行系统的涌现将成为必然趋势。在未来战场上,以平行作战系统为代表的各类决策支持系统将改变传统指挥决策模式,推动战争形态的智能化演进。极大地发挥物理域、认知域、信息域相融合的涌现性效果,满足未来战场巨量信息、指挥要素繁多的处理需求,成为主导未来战场的重要体系支撑力量。

参考文献:

- [1] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平等系统—关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004(4): 25-35.
Wang Feiyue. Artificial Societies Computational Experiments and Parallel Systems A Discussion on Computational Theory of Complex Social-Economic Systems[J]. Complex systems and Computational, 2004 (4): 25-35.
- [2] 姜相争, 刘铁林, 崔帅博, 等. 基于GQFD的智能化装备保障能力需求分析[J]. 现代防御技术, 2022, 50(4): 38-44.
Jiang Xiangzheng, Liu Tielin, Cui Shuaibo, et al. Requirement Analysis of Army Intelligent Equipment Support Capacity Based on GQFD[J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(4): 38-44.
- [3] 李波, 陈海建, 禹琳琳. 基于灰色模型的战时物资需求的定量预测[J]. 物流技术, 2013, 32(10): 269-270.
Li Bo, Chen Haijian, Yu Linlin. Quantitative Forecasting of Wartime Material Demand Based on Grey Model[J]. Logistics Technology, 2013, 32(10): 269-270.
- [4] 黄颖, 段继琨. 基于QFD的电磁蓝军构设需求研究[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(6): 34-37, 77.
Huang Ying, Duan Jikun. Research into the Construction Requirements of Electromagnetic Blue Army Based on QFD[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44 (6): 34-37, 77.
- [5] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 18-25.
Cong Xiaonan. Expression and Mathematical Property of Coupling Model, and Its Misuse in Geographical Science [J]. Economic Geography, 2019, 39(4): 18-25.
- [6] 吴凡. 铁路货运周转量与GDP的耦合协调度分析[J]. 现代商贸工业, 2022, 43(13): 24-26.
- [7] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1100-1114.
Wang Cheng, Tang Ning. Spatio-temporal Characteristics and Evolution of Rural Production-living-ecological Space Function Coupling Coordination in Chongqing Municipality[J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1100-1114.
- [8] 张扬, 师海猛. 黄河流域城镇化高质量发展与生态环境耦合协调度评价[J]. 统计与决策, 2022, 38(10): 71-75.
- [9] 刘翔宇, 姜海洋, 赵洪利, 等. 基于DODAF-OODA的天基信息支援作战视图研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(2): 33-38.
Liu Xiangyu, Jiang Haiyang, Zhao Hongli, et al. Research on OV of Air Precision Striking Operation with Space Information Support Based on DODAF-OODA[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40 (2): 33-38.
- [10] 周波, 戴幻尧, 乔会东, 等. 基于"OODA环"理论的认知电子战与赛博战探析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(6): 556-562.
Zhou Bo, Dai Huanyao, Qiao Huidong, et al. Research on Recognition EW and Cyberspace Operation Based on "OODA Loop" Theory[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(6): 556-562.
- [11] 张明智, 马力. 体系对抗OODA循环鲁棒性建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 1968-1975.
Zhang Mingzhi, Ma Li. System-of-systems Combat OODA Loop Robustness Modeling and Experiment[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1968-1975.
- [12] 王飞跃. 平行控制与数字孪生: 经典控制理论的回顾与重铸[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 293-300.
Wang Feiyue. Parallel Control and Digital Twins: Control Theory Revisited and Reshaped[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2 (3): 293-300.
- [13] 周军华, 薛俊杰, 李鹤宇, 等. 关于武器系统数字孪生的若干思考[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 539-552.
Zhou Junhua, Xue Junjie, Li Heyu, et al. Thinking on

- Digital Twin for Weapon System[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 539-552.
- [14] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.
- Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [15] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
- Zhang Lin, Lu Han. Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.
- [16] 段伟. 平行仿真的内涵、发展与应用[J]. 指挥与控制学报, 2019, 5(2): 82-86.
- Duan Wei. Parallel Simulation: Motivation, Concept and Application[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(2): 82-86.
- [17] 邱晓刚, 张鹏. 面向平行军事系统的领域仿真知识工程研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8): 1665-1669, 1679.
- Qiu Xiaogang, Zhang Peng. Knowledge Engineering in Simulation of Parallel Military System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1665-1669, 1679.
- [18] 方凌智, 沈煌南. 技术和文明的变迁-元宇宙的概念研究[J]. 产业经济评论, 2022(1): 5-19.
- Fang Lingzhi, Shen Huangnan. Conceptualizing Metaverse: A Perspective From Technology and Civilization[J]. Review of Industrial Economics, 2022(1): 5-19.
- [19] 李洪阳, 魏慕恒, 黄洁, 等. 信息物理系统技术综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 37-50.
- Li Hongyang, Wei Muheng, Huang Jie, et al. Survey on Cyber-physical Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 37-50.
- [20] 周玉芳, 余云智, 翟永翠. LVC仿真技术综述[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(4): 1-7.
- Zhou Yufang, Yu Yunzhi, Zhai Yongcui. Review on LVC Simulation Technology[J]. Command Control & Simulation, 2010, 32(4): 1-7.
- [21] 张昱, 张明智, 胡晓峰. 面向LVC训练的多系统互联技术综述[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2515-2521.
- Zhang Yu, Zhang Mingzhi, Hu Xiaofeng. On Multi-system Integration Technology Oriented to LVC Training[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2515-2521.
- [22] 高昂, 董志明, 郭齐胜, 等. 陆军分队LVC战术训练虚实实体配置研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 982-994.
- Gao Ang, Dong Zhiming, Guo Qisheng, et al. Study on Virtual and Real Entity Configuration of Army Units LVC Tactical Training[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 982-994.
- [23] 李亮, 郭齐胜, 李永, 等. 基于灰关联分析的质量功能配置方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(12): 2469-2472, 2486.
- Li Liang, Guo Qisheng, Li Yong, et al. Quality Function Deployment Based on Grey Relational Analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(12): 2469-2472, 2486.
- [24] 蒋晓原, 邓克波. 面向未来信息化作战的指挥信息系统需求[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(4): 1-5.
- Jiang Xiaoyuan, Deng Kebo. Command Information System Requirements for Future Informatization Operation[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(4): 1-5.
- [25] 陈毅雨, 刘硕, 钟斌, 等. 基于GQFD的警用反恐无人机战技性能需求分析[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(9): 142-145, 150.
- Chen Yiyu, Liu Shuo, Zhong Bin, et al. Requirement Analysis of Police Anti-terrorism Unmanned Aerial Vehicle's Tactical Performance Based on GQFD[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(9): 142-145, 150.
- [26] 秦海峰, 侯兴明, 廖兴禾, 等. 基于GQFD航天装备维修保障能力需求分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(7): 228-232.
- Qin Haifeng, Hou Xingming, Liao Xinghe, et al. Requirement Analysis of Space Equipment Maintenance Support Capacity Based on GQFD[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(7): 228-232.