

航空母舰多阶段弹药转运序列可视分析

郭璇^{1,2,3}, 王宁¹, 于淑彤¹, 刘俊楠^{2,3,4}, 苏昊^{1,2,3}, 陈为⁵, 徐明亮^{1,2,3}*

¹⁾ (郑州大学计算机与人工智能学院 郑州 450001)

²⁾ (智能集群系统教育部工程研究中心 郑州 450001)

³⁾ (国家超级计算郑州中心 郑州 450001)

⁴⁾ (郑州大学地球科学与技术学院 郑州 450001)

⁵⁾ (浙江大学计算机辅助设计与图形系统全国重点实验室 杭州 310058)

(iexumingliang@zzu.edu.cn)

摘要: 航空母舰弹药转运属于多阶段作业过程, 涉及作业步骤众多且具有高危险性, 面临着人工分析数据困难、弹药状态不清晰影响转运效率, 以及潜在安全隐患难以识别等问题。然而, 现有工作难以支持对多阶段弹药转运序列进行特征分析, 识别低效与高危转运环节。为此, 通过尼米兹级航母实体沙盘采集的弹药转运序列数据, 设计并实现了面向多阶段弹药转运过程的可视分析系统, 包含控制面板视图、下层甲板转运视图、上层甲板转运视图、飞行甲板转运视图、作战任务总览视图, 辅助作业人员分析影响弹药转运效率与潜在安全隐患的因素, 锁定转运过程可优化环节。通过对转运效率和安全隐患影响因素 2 个方面进行案例分析, 验证了所提系统对于探索航母弹药转运序列数据的多阶段特征的有效性和实用性。

关键词: 航空母舰; 弹药转运; 可视分析; 序列分析; 多阶段作业

中图法分类号: TP391.41

DOI: 10.3724/SP.J.1089.2024-00060

Visual Analysis for Multi-Stage Ammunition Transfer Sequences on Aircraft Carrier

Guo Xuan^{1,2,3}, Wang Ning¹, Yu Shutong¹, Liu Junnan^{2,3,4}, Su Hao^{1,2,3}, Chen Wei⁵, and Xu Mingliang^{1,2,3}*

¹⁾ (School of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

²⁾ (Engineering Research Center of Intelligent Swarm Systems, Ministry of Education, Zhengzhou 450001)

³⁾ (National Supercomputing Center in Zhengzhou, Zhengzhou 450001)

⁴⁾ (Institute of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

⁵⁾ (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Aircraft carrier ammunition transfer is a multi-stage operation process, which involves many operational steps and is highly hazardous, and faces problems such as difficulty in analyzing the data manually, unclear status of munitions affecting the transfer efficiency, and difficulty in identifying potential safety hazards. However, the existing work is challenging to support the characteristics analysis of multi-stage ammunition transfer sequence and identify inefficient and high-risk transport links. In this regard, a visual analysis system for multi-stage munitions transfer process is designed and implemented through the collection of munitions transfer sequence data from the physical sand table of the Nimitz-class aircraft carrier, including control panel

收稿日期: 2024-01-27; 修回日期: 2024-07-21. 基金项目: 国家自然科学基金(62502457, 62325602, 62036010, 42301526); 浙江大学计算机辅助设计与图形系统全国重点实验室开放课题(A2302); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102211026, 242102210089); 河南省自然科学基金(252300421799). 郭璇(1993—), 女, 博士, 助理研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为信息可视化与可视分析; 王宁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信息可视化; 于淑彤(2001—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为信息可视化; 刘俊楠(1991—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为地理可视分析; 苏昊(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为人工智能; 陈为(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为可视化、数据挖掘、人工智能等相关技术; 徐明亮(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通信作者, 主要研究方向为计算机图形学、人工智能、虚拟现实、科学可视化。

view, lower deck transfer view, upper deck transfer view, flight deck transfer view, and mission overview view, to assist operators in analyzing the factors affecting the efficiency and safety hazards of the ammunition transfer, the optimized parts of the transfer process can be locked. Through the case studies of transfer efficiency and safety hazards, the results verify the effectiveness and practicality of the proposed system for exploring the multi-stage characteristics of munitions transfer sequences on aircraft carriers.

Key words: aircraft carrier; ammunition transfer; visual analysis; sequence analysis; multi-stage

航空母舰(简称航母)作为现代战争的重要军事平台,可为舰载机提供充足的火力投送和空中保障^[1];其中,弹药转运作业是决定舰载机起降率的关键环节^[2-3],对提升航母保障能力具有重要支撑作用.弹药转运作业涉及众多设备与步骤,属于多阶段作业范畴,因此航母弹药转运面临多阶段跨域作业、转运序列复杂等问题,容易导致弹药堆积、转运异常;此外,组装完成后的弹药危险性极高^[4],作业人员既要确保整体过程转运流畅,又要在保证安全的前提下尽快完成弹药挂载^[5-6].因此,分析转运序列数据,帮助作业人员探索影响转运效率和潜在安全隐患的因素,从高效和安全 2 个方面快速锁定转运过程的可优化环节^[7-9]是非常重要的.

序列数据是由一条或多条记录构成的集合,每条记录由一组按照特定顺序排列的离散数据组成^[10-11],对其进行有效的分析可以深入理解数据的内在规律,预测未来发展趋势.数据可视化作为探索序列数据的重要工具^[12-13],可以将弹药转运序列数据转化为合适的视觉表达,借助人的视觉处理能力及丰富的人机交互手段分析并挖掘数据中的隐含信息.当前,序列数据可视化方法在弹药转运方面面临许多挑战:(1) 缺乏面向多阶段转运序列数据的可视分析方法.弹药转运作业人员需严格按照运输路线和规定流程进行出库、组装和分段运输,整体作业过程涉及叉车、推车、升降梯等多台作业设备的协同配合,在不同阶段,设备间的复杂串并行关系增加了序列数据分析难度^[14].因此,亟需研究多阶段的转运序列数据的可视分析方法,辅助作业人员理解转运过程的多阶段关系.(2) 缺乏挖掘转运过程影响因素的可视分析方法.组装完成后的弹药过量堆积、转运异常等情况容易导致转运过程存在安全隐患^[15],因此,亟需对转运序列数据的多阶段特征进行分析,以辅助作业人员深入挖掘影响转运效率和潜在安全隐患的因素,识别低效与高危转运环节,为舰载机作战任务提供支持和保障.

本文设计并实现了一个交互式的可视分析系统(multi-stage ammunition transfer sequence visual analysis system, MATVAS),通过分析弹药转运序列数据的多阶段特征,辅助作业人员挖掘影响弹药转运效率与潜在安全隐患的因素.在开发过程中,首先根据任务背景和专家意见总结可视分析任务需求;然后设计可视化组件及交互式工具,对转运序列数据进行深入挖掘,支持多阶段转运过程的序列数据可视分析;最后从转运效率和安全隐患影响因素 2 个方面,验证 MATVAS 对于探索航母多阶段弹药转运过程的有效性.

1 相关工作

1.1 弹药转运可视化

随着信息化战争的迅速发展,军队作战方式及武器装备发生深刻变化^[16-17],为了促进弹药转运任务适应一体化联合作战的需求,不少学者面向弹药转运任务构建可视分析平台,实现其整体过程的可见、可控和可管,为军事行动提供迅速而精准的决策支持.刘哲等^[18]针对航母弹药调度效率不高的问题设计三维可视化系统,通过虚拟场景演示和交互界面辅助获取关键调度信息并完成调度方案规划;邹向阳等^[19]利用三维可视化技术构建多平台弹药库实时监测系统,实现弹药保障的信息化和精确化;卞光荣等^[20]融合物联网技术、射频识别(radio frequency identification, RFID)技术和无线多媒体传感器网络,建立军械仓库弹药保障可视化系统,实现对目标弹药的定位与跟踪.

上述研究围绕弹药转运任务的实时过程进行可视化,未涉及弹药转运序列数据,无法探索影响转运过程的具体原因.因此,本文利用丰富的可视化设计辅助作业人员理解多阶段的转运序列数据,以分析影响转运过程的因素.

1.2 序列数据可视化

航母弹药转运属于典型的多阶段作业问题,

包含作业流程的序列数据. 近年来, 可视化技术被广泛应用于序列数据分析^[21-22]. 文献[23-26]分别将时间序列嵌入平行坐标、螺旋图、柱状图等可视化图表中, 同时结合适当的布局方法突出呈现序列数据的特征; Liu 等^[27]利用条形图显示离散采样的时间序列数据, 利用折线图显示时间滞后对齐的时间序列, 并将具有相同延迟的传感器进行分组, 帮助用户分析控制策略的时序级联影响; Xu 等^[28]结合堆叠区域视图、水平图、多线图等多种可视形式, 显示了不同指标随着时间推移的变化情况, 在优化空间布局的同时清晰地显示每个性能指标的总体趋势, 便于用户理解数据. 在热力图方面, 纪连恩等^[29]采用正方形螺旋布局方式构建热力图, 实现对火电控制历史数据的序列分析; 周杰辉等^[30]设计面向医保费用增长率的日历热力图, 引导审计人员快速地检测欺诈行为. 在甘特图方面, Su 等^[31]利用传统甘特图比较弹药调度过程中不同资源的分配方案和调度策略; Jo 等^[32]采用资源重排和任务聚合策略设计的 LiveGantt 实现了甘特图的伸缩扩展, 表达了数据间更为详细的序列关系. Gupta 等^[33]提出了自动折叠甘特图中空闲时间间隔的功能, 使得甘特图在展示长时间跨度数据时更加紧凑且易于理解.

上述方法虽然可以在一定程度上满足序列数据的可视分析需求, 但对于弹药转运序列数据的多阶段特征分析仍存在空间利用率低、视觉易混乱等问题. 本文针对航母弹药转运序列过程的多阶段特征设计可视编码方案, 以提高可视表达效果, 便于掌握整体转运过程的多阶段特征.

2 数据和任务

2.1 任务背景

航母是海军配备的一座高度集成化的海上航空作战平台, 设计目标是实现舰载机攻击力量的最大化. 执行作战任务的舰载机需要频繁地完成挂弹作业以保证其持续打击能力, 而弹药转运过程环节复杂且耗时较长, 因此航母弹药转运成为舰载机作战能力的最大瓶颈^[7-9].

航母弹药转运属于多阶段作业问题, 历经弹药出库、下层转运、弹药装配、上层转运、弹药挂载等多阶段作业过程(如图 1 所示), 各阶段之间部分共享资源、任务繁重且耗时较长^[18]. 航母上的弹药类型分为执行对空打击任务的空空导弹、执行对地打击任务的空地导弹和执行对舰打击任务的空舰导弹. 为了确保航母的安全, 弹药通常被拆分为导引头(ammunition seeker, AS)、弹体(ammunition body, AB)、尾翼(ammunition tail, AT)等部件, 分开存储于不同弹药库(ammunition depot, AD)^[34], 且只有当弹药挂载在舰载机挂架上时, 才为其装上引信. 其中, 存储在下层 AD 中的弹药需要根据作战任务及弹药类型进行分类组装, 经由弹药专用升降梯或者舰载机升降梯向上转运^[5]. 通常, 将下层 AD 至上层弹药处理区(ammunition area, AA)的弹药升降梯定义为下层升降梯(ammunition elevator, AE), 上层 AA 至飞行甲板(flight deck, FD)或机库(flight hangar, FH)的弹药升降梯定义为上层升降梯(wardroom elevator, WE), FH 至 FD 的舰载机升降梯称为飞机升降梯(flight elevator, FE).

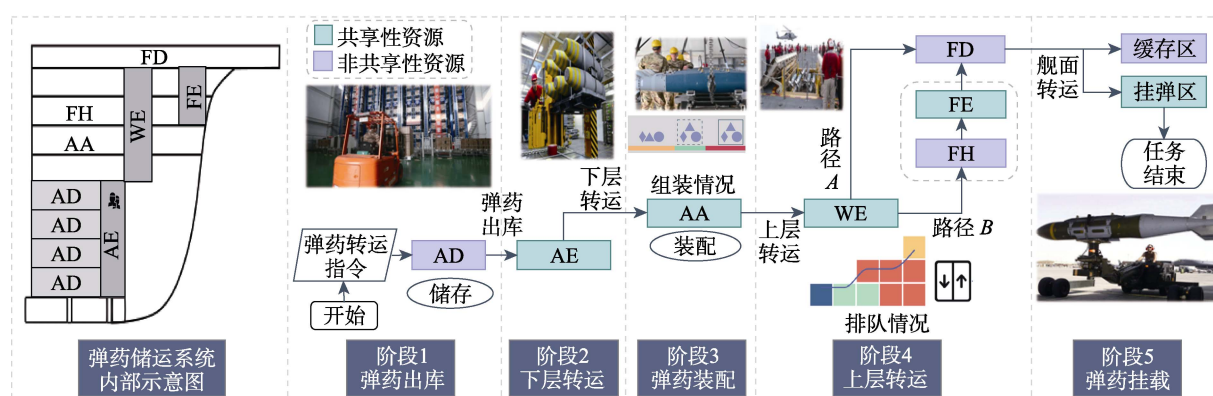


图1 弹药转运流程

接收到转运任务后, 下层 AD 作业人员利用叉车(forklift truck, FR)从下层 AD 取出所需弹药部件, 经过简单处理后用推车(cargo trailer, CT)运至 AE

并转运至上层 AA, 由装配小组完成 AS, AB, AT 等部件的组装作业, 检查无误后再转运至 WE 附近等待排队. 此时, 若 WE 空闲, 则直接转运至 FD 或

中转运至 FH, 并通过 FE 批量转运至 FD 进行挂弹作业; 若 WE 被占用, 则需要将转运申请存入任务列表, 待当前任务执行完毕后, 再根据优先级顺序执行下一波次转运任务. 该过程涉及多个保障小组及部门之间的协调合作, 实时性和安全性要求高, 既要控制各步骤节奏, 确保转运过程连绵不断地按需进行, 又要在保证安全的前提下尽可能提高效率, 尽快运送所需弹药至 FD 并完成挂载^[6].

2.2 数据背景

转运数据中详细记录弹药转运作业的信息, 本文采用尼米兹级航母实体沙盘采集的弹药转运序列脱敏数据, 根据任务背景和专家意见保留设备编号、作业时间、弹药型号、设备状态和作业位置字段, 为后续数据分析过程提供高质量的序列数据. 后续使用的序列数据如表 1 所示.

表 1 转运序列数据示例

设备编号	作业时间	弹药型号	设备状态	作业位置
AS-1 AD FR1	09:17:23	AGM45-1	空载启动	(x_1, y_1)
AS-1 AD FR1	09:18:45	AGM45-1	负载启动	(x_2, y_2)
AS-1 AD FR1	09:20:34	AGM45-1	负载结束	(x_3, y_3)
AS-1 AD CT1	09:20:33	AGM45-1	空载启动	(x_4, y_4)
AS-1 AD CT1	09:20:34	AGM45-1	负载启动	(x_5, y_5)
AS-1 AD CT1	09:22:53	AGM45-1	负载结束	(x_6, y_6)
AS-1 AD AE1	09:23:14	AGM45-1	负载启动	(x_7, y_7)

2.3 任务分析

本课题组与航母领域科研院所的专家保持长期合作关系, 通过与 4 位科研院所专家及 3 位高校专家进行深入的探讨和沟通, 详细地了解了弹药转运流程. 其中, 4 位科研院所专家在航母领域有 5 年以上研究经历; 高校专家中, 1 位在航母领域有 3 年以上研究经历, 2 位具有 5 年以上数据可视化经验. 结合航母弹药转运任务背景与专家讨论弹药转运分析难点, 总结了航母弹药保障可视分析需求, 并结合仿真实验采集的弹药转运轨迹数据, 深入剖析不同转运阶段序列数据的多阶段特征. 专家指出, 现有工作中存在的问题包括人工分析数据困难、弹药状态不清晰影响转运效率, 以及潜在安全隐患难以识别等. 为此, 本文确定任务需求如下:

R1. 转运序列数据多阶段特征探索分析. 弹药转运序列数据的多阶段特征可以通过设计多种可视化组件来表示, 直观地向专家展示理解的序列数据信息, 帮助用户对转运序列数据的多阶段特征进行探索分析.

R2. 转运效率影响因素分析. 分析弹药存储空间信息和弹药状态序列(转运状态、组装状态、

排队状态等), 可以帮助专家掌握转运序列数据的多阶段特征, 发现转运效率较低环节, 进而分析影响转运效率的因素.

R3. 安全隐患因素分析. 除了转运效率影响因素外, 专家还重视弹药堆积和轨迹异常等影响转运过程安全性的情况, 以快速地发现转运过程中潜在安全隐患, 进而分析其产生的因素.

3 可视分析与设计

3.1 设计目标

为了支持 MATVAS 的分析任务并满足用户的探索意图, 本文针对 R1~R3 任务需求制定了设计目标, 指导 MATVAS 视图设计与实现.

G1. 下层甲板转运视图. 利用堆叠符号图和堆叠甘特图表示弹药存储信息及转运状态信息, 辅助用户查看弹药详细信息, 分析影响转运效率的因素, 锁定转运效率可优化环节(R1&R2).

G2. 上层甲板转运视图. 利用桑基图与累积符号表示处理区弹药组装过程, 并利用堆叠矩形表示 WE 弹药排队状态, 帮助用户掌握弹药状态序列信息, 分析影响转运效率和潜在安全隐患的因素(R1&R2&R3).

G3. 飞行甲板转运视图. 将轨迹和玉珏图结合, 表示 FD 保障站位间弹药转运序列信息(速度、方向、弹药数量等), 方便用户快速地分析影响转运过程中潜在安全隐患的因素(R1&R3).

G4. 作战任务总览视图. 利用转运序列数据构建多阶段转移矩阵, 直观地展示弹药转运序列数据, 方便用户快速地理理解转运过程的多阶段特征(R1).

3.2 可视设计

根据设计目标, 设计并开发了 MATVAS, 图 2 所示为其概览图. MATVAS 的首要任务是将转运序列数据中的基本元素和多阶段关系映射为图形元素, 使用三角形、菱形和圆形将它们分别编码 AS, AB 和 AT(如图 2 的①部分所示), 并采用不同颜色编码弹药类型, 便于用户区分各种弹药类型. MATVAS 包含控制面板视图(如图 2 的 A 部分所示)、下层甲板转运视图(如图 2 的 B 部分所示)、上层甲板转运视图(如图 2 的 C 部分所示)、飞行甲板转运视图(如图 2 的 D 部分所示)和作战任务总览视图(如图 2 的 E 部分所示) 5 个视图, 支持用户交互探索并分析航母弹药转运序列数据的多阶段特征, 锁定转运过程可优化环节.

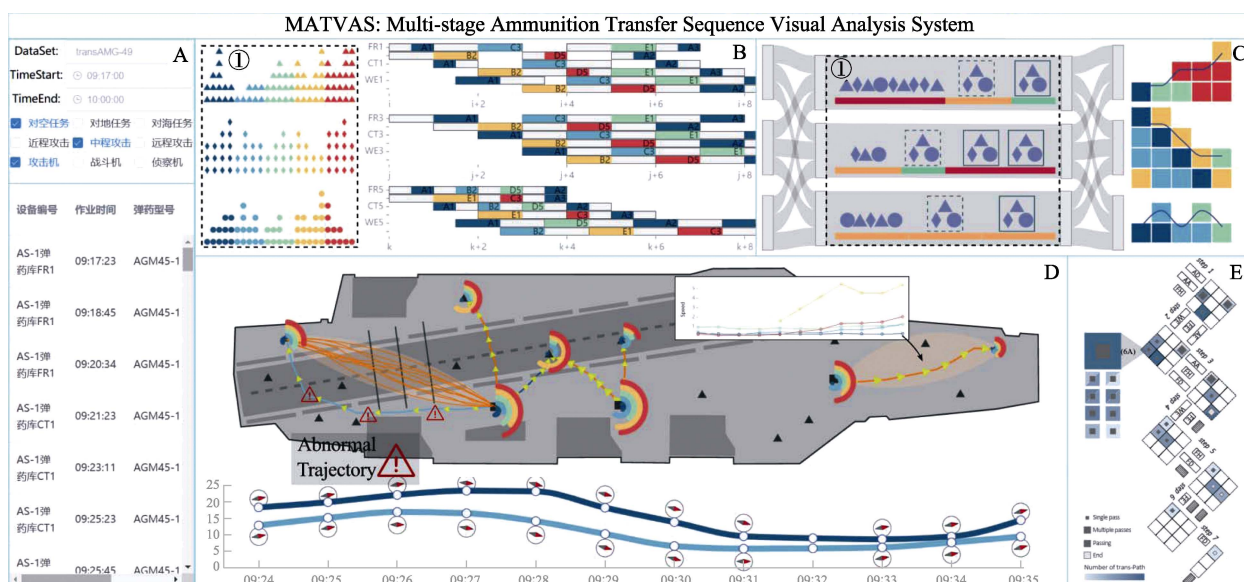


图2 MATVAS 概览图

3.2.1 控制面板视图

该视图上方为 MATVAS 的参数选择面板, 用户可以选择感兴趣的时间段和作战类型加载不同的转运序列数据, 下方通过列表形式显示经过数据预处理的转运序列数据, 为用户提供转运序列的详细信息, 便于直观地查询弹药转运序列数据。

3.2.2 下层甲板转运视图

该视图通过堆叠符号图和堆叠甘特图帮助用户更直观地理解下层甲板的弹药存储信息和状态。堆叠符号图(如图3的A部分所示)中的每个符号表示真实的弹药部件, 符号在堆叠图中的位置编码了部件在下层AD中存储的相对位置。

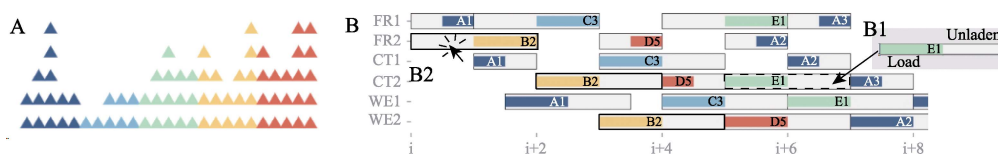


图3 下层甲板转运视图

作业设备包括空闲和运行2种工作状态, 运行状态又包括空载和负载2种情况。为直观地表达弹药转运状态, 避免视觉混乱, 该视图利用堆叠可视化方法将传统甘特图扩展为2个甘特图堆叠的形式(如图3的B1部分所示)。其中, 甘特图的纵轴表示转运设备类型; 灰色条状图表示设备空载运行状态, 灰色条状图上叠加彩色条状图表示负载运行状态, 剩余空间表示空闲状态, 条状图长度映射设备运行时间, 尾部文字表示设备转运的弹药部件编号。为了探索转运任务中不同转运设备间的协作关系, 使用并列条状图展示不同设备的并行转运关系; 同时, 提供选择过滤的方式凸显关键信息(如图3的B2部分所示), 便于用户查看特定转运序列信息。

3.2.3 上层甲板转运视图

该视图利用桑基图与堆叠矩形呈现处理区弹

药状态情况, 帮助用户理解复杂流水线作业过程间串并行关系, 分析影响转运效率和潜在安全隐患的因素。桑基图(如图4的A部分所示)整体表示了3条组装流水线过程, 各级节点从左至右依次表示弹药部件分拣、开始组装、组装完成和排队不同状态, 节点之间的连边表示弹药组件在3条流水线之间的流向以及状态转换; 其中, 开始组装与组装完成节点间多条边并行排列表示弹药组装过程的转变进度。为了进一步详细展示并行组装流水线的作业进度差异, 分别使用无边框、虚线边框和实线边框表示弹药的准备组装阶段、正在组装阶段以及完成组装阶段。进度条长度编码上述作业过程的时间成本, 结合进度条长度、高对比度颜色、符号数量等可视化元素映射转运过程畅通、稳定和堆积状态, 使得作业时间对比更加鲜明, 方便用户直观、清晰地查看弹药堆积情况, 快速锁定转运效率可优化环节。

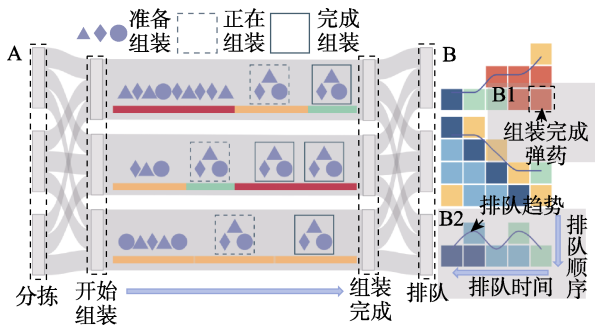


图 4 上层甲板转运视图

该视图右侧利用堆叠矩形表示 WE 的弹药排队情况(如图 4 的 B 部分所示). 堆叠矩形中的每个矩形块表示一个已经组装完成的弹药(如图 4 的 B1 部分所示), 此时弹药具有高危险性, 弹药堆积时存在一定的安全隐患. 堆叠矩形的横轴倒序表示弹药排队时间情况, 即最右侧为最先组装完成的弹药; 纵轴从上而下表示弹药排队数量和排队顺序, 并叠加折线图清晰表达排队趋势(如图 4 的 B2 部分所示), 由此辅助用户分析转运过程安全隐患影响因素.

3.2.4 飞行甲板转运视图

舰面转运过程需要作业人员在 FD 上频繁地往返于升降梯口与停机位之间完成弹药挂载, 且不同保障站位间没有固定路径, 因此, 展示所有轨迹数据会造成视觉混乱(如图 5 的 A1 部分所示). 本文采用 Hausdorff 距离作为聚类相似度函数对转运轨迹进行聚类, 获得不同保障站位间弹药转运轨迹的通行区域. Hausdorff 距离表示轨迹 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ 到轨迹 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_j\}$ 最近点的最大距离, 其值越小, 轨迹相似性越高. 其中, a_i 和 b_j 分别表示 2 条轨迹中的序列轨迹点; $\| \cdot \|$ 表示集合 A 与 B 之间的距离范式; $H(A, B)$ 表示集合 A 与 B 的双向 Hausdorff 距离, $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 分别表示从集合 A 到 B 、集

合 B 到 A 的单向 Hausdorff 距离, 计算公式为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)),$$

$$h(A, B) = \max_{a_i \in A} \left(\min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \right),$$

$$h(B, A) = \max_{b_j \in B} \left(\min_{a_i \in A} \|b_j - a_i\| \right).$$

给定一组轨迹 $L_i \in D$, D 表示给定的轨迹数据集, $H_s(L_i, L_j)$ 表示轨迹 L_i 和 L_j 之间 Hausdorff 距离; $N_\varepsilon(L_i)$ 表示每个轨迹的邻域集合, ε 表示给定的轨迹之间的相似性阈值, 若轨迹邻域集合超出该阈值, 则用特殊符号标记为异常轨迹, 定义为

$$N_\varepsilon(L_i) = \{L_j \in A | H_s(L_i, L_j) \leq \varepsilon\}.$$

该视图综合舰面转运概览部分和转运详细信息部分, 实现不同弹药转运序列数据对比分析, 方便用户快速地分析转运过程中潜在安全隐患的因素. 舰面转运概览部分将轨迹序列和玉珏图结合, 清晰地表示保障站位间弹药转运信息(速度、方向、弹药数量等), 玉珏图编码保障站位间弹药转运数据信息, 扇形的弧度角编码升降梯与停机位间的弹药转运数量. 轨迹上的三角形方向和大小编码弹药转运的方向和速度, 三角形越大转运速度越快, 并使用特殊符号醒目标记异常轨迹(如图 5 的 A2 部分所示). 橙色区域编码转运轨迹主要通行区域, 由于通行区域内轨迹较为密集, 因此在视觉设计过程中选择隐去轨迹线上三角形编码, 当用户将鼠标悬停在通行区域上时, 自动弹出轨迹转运速度详细信息(如图 5 的 A3 部分所示). 由此, 用户可以结合异常轨迹和主要通行区域, 对比不同轨迹的转运速度、方向和位置信息来挖掘转运过程中的异常轨迹信息, 分析潜在安全隐患的影响因素.

为了避免视觉重叠, 该视图增加转运详细信息部分(如图 5 的 B 部分所示)展示多条轨迹转运序列的详细信息. 视觉设计部分利用流程图编码轨

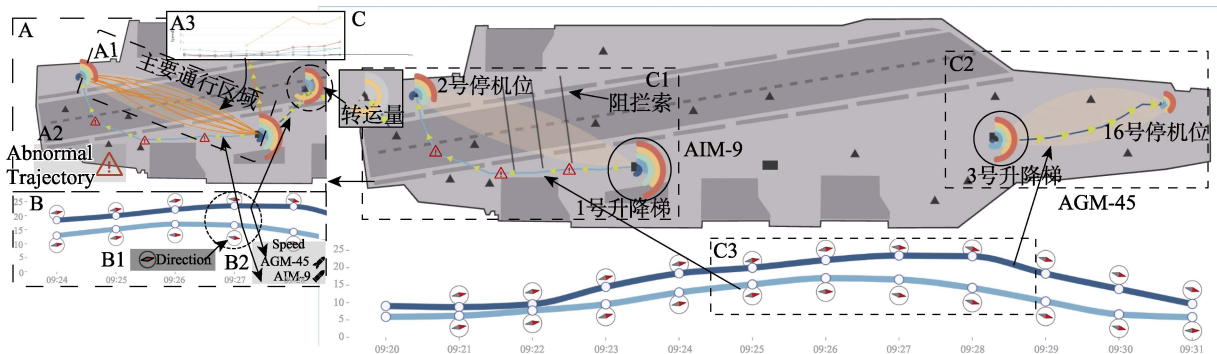


图 5 飞行甲板转运视图

迹速度随时间变化趋势(如图 5 的 B1 部分所示), 流线颜色编码弹药类型, 并同步显示于甲板面上对应轨迹颜色. 流线上箭头图标显示轨迹转运方向(如图 5 的 B2 部分所示), 红色箭头代表转运正方向, 转运正方向突变时说明转运过程存在安全隐患, 用户可以通过选择对比不同轨迹线的详细信息进行深入分析.

3.2.5 作战任务总览视图

MATVAS 根据转运序列数据的多阶段特征, 结合上述 3 个转运过程进行分析, 检索与转运作业任务相关的保障站位及转运序列, 设置保障站位起点为 FH, AA 和 AD, 终点为 FD 及 FH 对转运序列数据进行可视化展示.

作战任务总览视图参考 Zhao 等^[35]的基于矩阵的事件序列数据表示 MatrixWave, 设计了表示弹药转运序列数据的多阶段特征的“之”字矩阵, 直观地呈现弹药转运序列数据总览信息. MATVAS 利用转移矩阵表示不同保障站位及其间的弹药转运情况(如图 6 的 A 部分所示), 其中, 转移矩阵外部的无填充矩形编码不同保障站位, 条形填充矩形表示转运终止节点, 矩形长度编码其出现次数. 转

移矩阵中每个元素表示从一个站位到下一个站位的转运路径, 其中, 灰色矩形方块大小编码了对应的 2 个站位之间的转运序列出现次数, 灰色矩形越大, 表示经过该保障站位的转运序列越多; 浅灰色矩形方块表示转运序列的结束站位, 深灰色矩形方块表示转运序列中途站位. 转移矩阵填充颜色透明度编码了站位间转运序列的优先程度, 填充颜色越深, 表示在转运序列任务优先程度越高, 并且同一颜色表示同一条转运路径. 为了节约可视编码空间, 避免保障站位重复出现, MATVAS 将转移矩阵(如图 6 的 B 部分所示)旋转 45°进行连接并跟踪转运路径, 由此得到 5 条弹药转运路径(如图 6 的 C 部分所示), 即 $FH \rightarrow FE \rightarrow FD$, $AA \rightarrow WE \rightarrow FD$, $AA \rightarrow WE \rightarrow FH \rightarrow FE \rightarrow FD$, $AD \rightarrow AE \rightarrow AA \rightarrow WE \rightarrow FD$ 和 $AD \rightarrow AE \rightarrow AA \rightarrow WE \rightarrow FH \rightarrow FE \rightarrow FD$. 为了能够清晰地查看某一特定路径包含站位信息, 作战任务总览视图提供一种在矩阵上叠加路径信息的方法, 当选择一个或多个站位时, 蓝线表示通过所选站位的弹药转运序列(如图 6 的 D 部分所示), 并高亮显示其源节点和目标节点, 实现弹药转运序列数据多阶段特征对比分析.

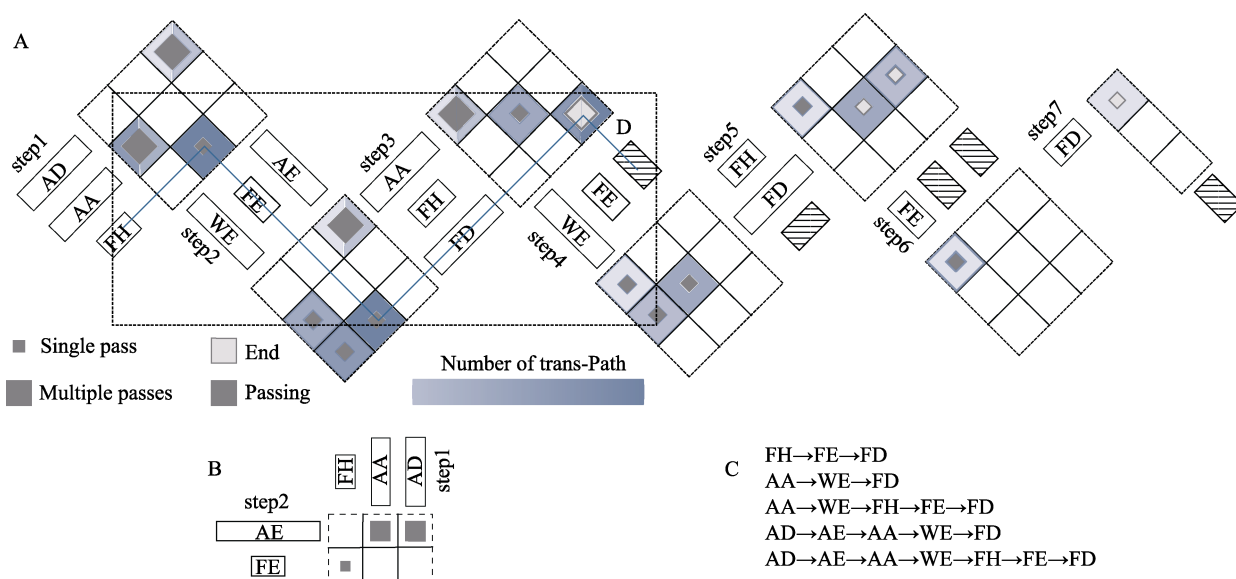


图 6 作战任务总览视图

本文在迭代设计过程中考虑了“之”字矩阵的 2 种替代方案: 桑基图和普通转移矩阵. 最初, 本文设计桑基图(如图 7 的 A 部分所示)表示多阶段的序列节点间的弹药转运路径, 桑基图边的宽度编码经过该站位的路径数, 但桑基图难以实现不同节点间的对比分析; 之后, 又利用普通转移矩阵(如

图 7 的 B 部分所示)代替桑基图链接边, 矩形大小表示节点转运次数, 基于相邻排列的矩阵序列实现弹药转运不同阶段的对比分析, 但普通转移矩阵包含过多重复节点. 最终, 本文选择将转移矩阵旋转 45°连接获得“之”字矩阵, 整合重复节点节省可视编码空间, 实现弹药转运不同阶段的对比分析.

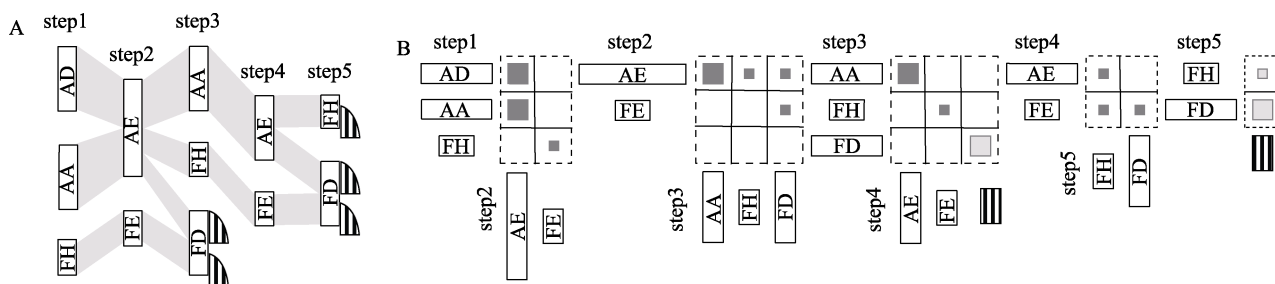


图7 “之”字矩阵迭代方案

4 案例分析

本文采用尼米兹级航母实体沙盘采集的弹药转运序列数据,通过2个案例,分别从影响转运效率和潜在安全隐患的因素角度,说明MATVAS对于探索航母多阶段弹药转运过程的有效性。

4.1 转运效率影响因素

弹药转运过程效率影响因素对弹药保障任务调度决策具有重要意义。本文通过多个视图交互分析弹药转运任务,快速分析影响转运效率的因素,锁定转运效率可优化环节。

用户首先在控制面板视图选择自己感兴趣的时间段, MATVAS根据用户在控制面板视图选择的F/A-18E/F 超级大黄蜂攻击机及中程对空作战任务,确定弹药需求为AGM-45 百舌鸟空地导弹,并在列表栏中显示转运序列详细信息。进一步,用户结合下层与上层甲板转运视图进行详细分析。如图8所示,下层甲板的弹药转运从 $t+2$ 时刻开始转

运雷达AS, AGM-45 AB 和低阻AT。用户对堆叠甘特图(如图8的A部分所示)分析发现, AGM-45 AB 转运速度较慢, 而AS和AT的转运速度较快。由于不同部件转运速度的不匹配容易造成上层处理区弹药部件的堆积, 用户猜测准备组装的弹药组件可能会出现堆积现象, 导致弹药组装效率降低, 进而WE前组装完成的排队弹药数量减少, 甚至出现不排队现象, 最终导致供不应求问题。因此, 为了验证该猜想, 用户查看上层甲板转运视图中表示流水线组装过程的桑基图(如图8的B部分所示)发现, AS 及 AT 等多个部件在组装流水线上排队等待开始组装, 组装完成的弹药数量逐渐减少; 用户又查看WE前弹药排队情况(如图8的C部分所示)发现, 折线图显示弹药排队数量逐渐减少, 呈下降趋势, 结果与猜想一致。因此用户综合分析得出, AGM-45 弹药的AS, AB 与AT之间转运速度不匹配, 引发设备间负载不均衡的问题, 影响弹药转运效率。

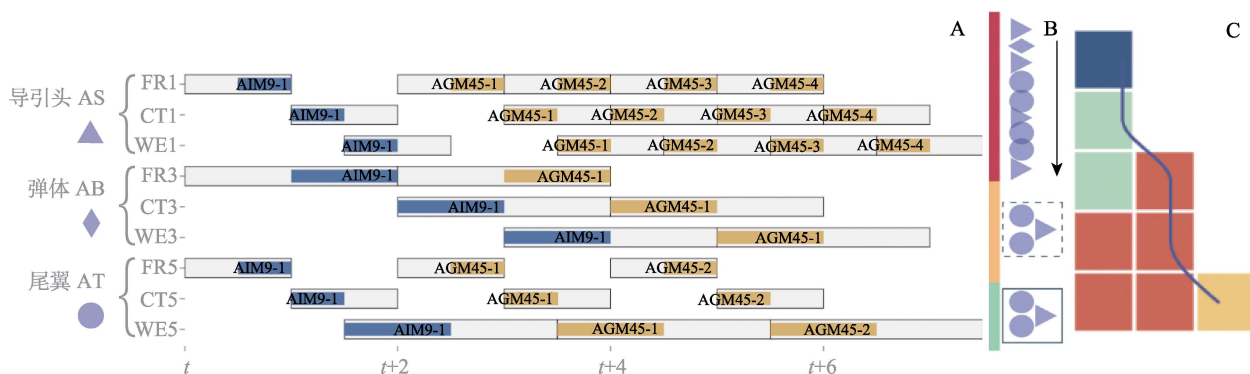


图8 转运效率影响因素分析

4.2 安全隐患影响因素

确保弹药转运过程的安全性是完成转运作业的基础。本文通过分析弹药转运序列数据,重点关注组装完成后的弹药堆积、异常轨迹等情况,分析安全隐患影响因素,辅助作业人员在后续调度决策过程中最大限度地提高转运安全性。

由于组装完成后的弹药产生堆积情况时会造成一定的安全隐患, 用户在对上层转运视图中的弹药排队情况进行分析时发现, 已有的大量部件在组装流水线上排队, 但打包过程较为畅通(如图8的B部分所示), 再结合堆叠矩形分析得出, 已完成组装的AGM-45 导弹在升降梯前排队现象有所

缓解(如图8的C部分所示),因此用户推测AGM-45弹药转运过程较为安全.为了确认后续转运过程是否仍存在安全隐患,用户关注到飞行甲板转运视图上的轨迹信息(如图5的C部分所示),通过轨迹聚类直观、清晰表示弹药升降梯至停机位间的主要转运通行区域.用户依次点击感兴趣的停机位和升降梯, MATVAS显示两者之间所有的弹药转运轨迹详细信息,并利用符号标记异常轨迹(如图5的C1部分所示),未进行标记的则为正常轨迹(如图5的C2部分所示);此时用户发现,3号升降梯与16号停机位间的一条AGM-45弹药转运轨迹较为安全,而1号升降梯与2号停机位间的一条AIM-9弹药转运轨迹被标注为异常轨迹;为了探索该轨迹异常原因,用户又查看转运详细信息部分(如图5的C3部分所示)分析轨迹速度随时间变化趋势,对比2条轨迹发现,AGM-45弹药转运轨迹的舰面转运速度相对较快,但2条轨迹舰面转运速度均处于正常速度范围内,因此速度并不是造成安全隐患的因素;用户结合舰面示意图发现,AGM-45弹药转运轨迹处于主要通行区域内,而AIM-9弹药的正常通行区域跨越阻拦索区域,但此条AIM-9弹药转运轨迹选择绕过主要通行区域进行弹药转运,因此用户推测此时可能在进行舰载机着舰作业,本应及时暂停该通行区域转运作业,但此次弹药转运任务选择绕过阻拦索区域而未停止作业,存在一定安全隐患.

5 总 结

本文面向航母弹药转运序列数据设计MATVAS,提供了直观可交互的可视分析工具,有助于作业人员理解转运过程的多阶段特征,帮助作业人员更加灵活、高效地分析影响弹药转运效率和潜在安全隐患的因素.随着对弹药转运序列数据可视分析的深入研究,专家们不断提出了新的问题与挑战:

(1) 多阶段可扩展性问题.本文探索了弹药在下层甲板、上层甲板和FD阶段的转运序列数据的多阶段特征,但转运过程还可以根据转运方向详细分为垂直转运和水平转运阶段.因此需要探索更多阶段更加细粒度的弹药转运序列数据的可视化方法.

(2) 序列数据可视化问题.本文通过“之”字矩阵、序列堆叠、轨迹聚类等方法展示弹药转运序列数据的多阶段特征,然而该过程还包括丰富的空

间、语义及其他动态特征.因此需要结合弹药转运序列数据的多维特征,探索更加丰富的可视分析方法.

(3) 序列数据深入挖掘问题.本文通过叠加、并列等编码方式比较不同序列数据来分析弹药转运的多阶段特征,但序列数据变量间还存在隐式的时变、因果等复杂依赖关系.因此还需要融合序列模式挖掘算法,发现数据背后的隐藏规律,深入挖掘弹药转运序列数据的多阶段特征.

未来,将考虑使用更细致的弹药转运序列数据分析转运过程的多阶段特征,以便挖掘出更有意义的转运过程信息,帮助作业人员更加灵活地把控转运节奏;进一步,根据作业人员分析出的转运过程多阶段特征,结合更多弹药转运信息改进可视化设计,以期实现转运信息自动挖掘和转运最优路径自动推荐;最后,序列数据可视分析形式不仅可以用于弹药转运中,还可以作为一种广泛的设计,迁移拓展到智能工厂流水线作业、机场摆渡车等需要进行调度决策的民用领域.

参考文献(References):

- [1] Zhang Shaohui, Liu Shun, Li Yafei, *et al.* Optimization algorithm for ammunition support operation scheduling of carrier-borne aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(20): Article No.228485(in Chinese)
(张少辉, 刘舜, 李亚飞, 等. 航空母舰舰载机弹药保障作业调度优化算法[J]. *航空学报*, 2023, 44(20): Article No.228485)
- [2] Yu L F, Zhu C, Li W J, *et al.* Research on the aviation support groups scheduling for multi-wave aircrafts based on the ammunition transportation[C] //Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 383-389
- [3] Liu Y J, Han W, Su X C, *et al.* Optimization of fixed aviation support resource station configuration for aircraft carrier based on aircraft dispatch mission scheduling[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(2): 127-138
- [4] Liu Caiyun. Simulation and optimization on scheduling system of ammunition for aircraft carrier[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018(in Chinese)
(刘彩云. 航母弹药转运系统的仿真及优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018)
- [5] Shi Wenqiang, Li Yanqing, Chen Lian. Flight deck operations and ordnance handling aboard aircraft carrier[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2012, 7(3): 9-14(in Chinese)
(史文强, 李彦庆, 陈练. 航空母舰飞行甲板作业及弹药转运系统分析[J]. *中国舰船研究*, 2012, 7(3): 9-14)
- [6] Li Yafei, Gao Lei, Hao Hongjie, *et al.* Human-machine collaborative decision-making for carrier aircraft support operations[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2023, 53(12): 2493-2510(in Chinese)

- (李亚飞, 高磊, 蒿宏杰, 等. 舰载机保障作业人机协同决策方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(12): 2493-2510)
- [7] Shi Wenqiang, Li Yanqing, Chen Lian. Analysis for the ordnance handling process aboard aircraft carrier[J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(6): 136-141(in Chinese)
(史文强, 李彦庆, 陈练. 航母的航空弹药贮存作业解析[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(6): 136-141)
- [8] Shi Wenqiang, Chen Lian, Jiang Zhiyong. The composition and requirement analysis of aviation ammunition in aircraft carrier[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(5): 139-143(in Chinese)
(史文强, 陈练, 蒋志勇. 航母航空弹药组成及需求分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(5): 139-143)
- [9] Li Yafei, Wu Qingshun, Xu Mingliang, *et al.* Real-time scheduling for carrier-borne aircraft support operations: a reinforcement learning approach[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2021, 51(2): 247-262(in Chinese)
(李亚飞, 吴庆顺, 徐明亮, 等. 基于强化学习的舰载机保障作业实时调度方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(2): 247-262)
- [10] Zhang Y X, Chanana K, Dunne C. IDMMVis: temporal event sequence visualization for type 1 diabetes treatment decision support[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(1): 512-522
- [11] Aigner W, Miksch S, Schumann H, *et al.* Visualization of time-oriented data[M]. London: Springer, 2011
- [12] Zhou F F, Lin X R, Liu C, *et al.* A survey of visualization for smart manufacturing[J]. *Journal of Visualization*, 2019, 22(2): 419-435
- [13] Li D Q, Mei H H, Shen Y, *et al.* ECharts: a declarative framework for rapid construction of web-based visualization[J]. *Visual Informatics*, 2018, 2(2): 136-146
- [14] Ryan J C, Cummings M L. A systems analysis of the introduction of unmanned aircraft into aircraft carrier operations[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2016, 46(2): 209-220
- [15] Cummings M L. Assessing safety through agent-based simulation for aircraft carrier flight decks[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2023, 67(1): 1011-1016
- [16] Chen Jin, Gao Jun. Overall design of ammunition supply visual system in army and tactical-level distribution routing optimization[J]. *Journal of Military Transportation University*, 2016, 18(03): 49-52(in Chinese)
(陈金, 高军. 部队弹药供应可视系统总体设计及战术级配送路径优化[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(03): 49-52)
- [17] Wang X W, Liu J, Su X C, *et al.* A review on carrier aircraft dispatch path planning and control on deck[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(12): 3039-3057
- [18] Liu Zhe, Chen Jiafeng, Ma Junfei, *et al.* Simulation system for carrier-based aircraft ammunition support scheduling[J/OL]. *Journal of System Simulation*, 1-11[2024-01-27]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0393>(in Chinese)
(刘哲, 陈佳峰, 马俊飞, 等. 舰载机弹药保障调度仿真系统[J/OL]. 系统仿真学报, 1-11[2024-01-27]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0393>)
- [19] Zou Xiangyang, Zou Hehui, Liu Rong. Research of ammunition depot real-time monitoring system based on IoT and 3D visualization technology[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(1): 30-33(in Chinese)
(邹向阳, 邹和辉, 刘戎. 基于物联网与三维可视化的弹药库实时监测系统[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(1): 30-33)
- [20] Bian Guangrong, Zhang Hongmei, Shi Hongyan, *et al.* Application of military internet of things in supporting ordnance warehouse ammunition[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(1): 212-219(in Chinese)
(卞光荣, 张洪海, 史红艳, 等. 军用物联网在军械仓库弹药保障中的应用[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 212-219)
- [21] Peng Yanni, Fan Xiaoping, Zhao Ying, *et al.* A survey of visualization of temporal event sequence data[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2019, 31(10): 1698-1710(in Chinese)
(彭燕妮, 樊晓平, 赵颖, 等. 时间事件序列数据可视化综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(10): 1698-1710)
- [22] Han Beibei, Wei Yingmei, Fang Yujie, *et al.* Visual analysis of cross-domain association of time-series data[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(1): 53-61(in Chinese)
(韩贝贝, 魏迎梅, 方玉杰, 等. 时序数据跨域关联可视分析[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 53-61)
- [23] Tsang K W, Li H T, Lam F M, *et al.* TradAO: a visual analytics system for trading algorithm optimization[C] // *Proceedings of the 2020 IEEE Visualization Conference*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 61-65
- [24] Gruendl H, Riehmman P, Pausch Y, *et al.* Time-series plots integrated in parallel-coordinates displays[J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(3): 321-330
- [25] Kim B, Lee B, Knoblach S, *et al.* GeneShelf: a web-based visual interface for large gene expression time-series data repositories[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 905-912
- [26] Sun D, Huang R F, Chen Y Z, *et al.* PlanningVis: a visual analytics approach to production planning in smart factories[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020, 26(1): 579-589
- [27] Liu S H, Weng D, Tian Y, *et al.* ECoalVis: visual analysis of control strategies in coal-fired power plants[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, 29(1): 1091-1101
- [28] Xu K, Wang Y, Yang L N, *et al.* Clouddet: interactive visual analysis of anomalous performances in cloud computing systems[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020, 26(1): 1107-1117
- [29] Ji Lianen, Kong Yumeng, Wang Yanlin, *et al.* Visual analytics of time series data of thermal power control for system identification[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2019, 31(10): 1677-1686(in Chinese)
(纪连恩, 孔雨萌, 王炎林, 等. 面向系统辨识的火电控制时序数据可视分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(10): 1677-1686)
- [30] Zhou Jiehui, Zhu Rongchen, Zhang Wei, *et al.* MedicareVis: a joint visual analytics approach for anti-fraud in medical insurance[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(9): 1311-1317(in Chinese)

- (周杰辉, 朱融晨, 张玮, 等. MedicareVis: 面向医保反欺诈的联合可视分析方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(9): 1311-1317)
- [31] Su X C, Han W, Wu Y, *et al.* A proactive robust scheduling method for aircraft carrier flight deck operations with stochastic durations[J]. Complexity, 2018, 2018: Article No.6932985
- [32] Jo J, Huh J, Park J, *et al.* LiveGantt: interactively visualizing a large manufacturing schedule[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(12): 2329-2338
- [33] Gupta S, Dumas M, McGuffin M, *et al.* MovementSlicer: better Gantt charts for visualizing behaviors and meetings in movement data[C] //Proceedings of the 2016 IEEE Pacific Visualization Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2016: 168-175
- [34] Zhang Bin. Research on optimization of aircraft carrier air ammunition layout and transit dispatching[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021(in Chinese)
(张斌. 航母航空弹药布局及转运调度优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021)
- [35] Zhao J, Liu Z C, Dontcheva M, *et al.* MatrixWave: visual comparison of event sequence data[C] //Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2015: 259-268