

doi: 10.7690/bgzd.2018.06.012

基于任务的联合机动编队反舰作战效能模型

宋艳波^{1,2}, 许 腾¹, 孙钧正^{1,2}

(1. 海军指挥学院合同系, 南京 210016; 2. 海军航空大学指挥系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为计算对抗条件下联合舰队编队反舰作战任务的完成程度, 在分析联合机动编队体系结构和作战流程的基础上, 建立基于任务的联合机动编队反舰作战效能评估模型。根据作战任务和作战流程, 构建“任务效能-元任务效能-装备性能”三级效能评估指标体系, 给出对舰探测效能、指挥控制效能、综合打击效能和作战任务效能计算模型, 并通过实例进行仿真分析。仿真结果表明: 该模型能有效体现作战环境和对抗对作战效能的影响, 具有一定的理论意义和实践价值。

关键词: 作战任务; 联合机动编队; 反舰作战; 指标体系; 作战效能评估

中图分类号: TP15 **文献标志码:** A

Anti-ship Combat Effectiveness Model of JTF Based on Mission

Song Yanbo^{1,2}, Xu Teng¹, Sun Junzheng^{1,2}

(1. Department of Contract, Naval Command College, Nanjing 210016, China;

2. Department of Command, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to calculate the anti-ship mission completion degree of JTF under counter condition, the anti-ship operational effectiveness model of JTF is established on the analysis of the battle procession and system constitute of JTF. According to mission and battle procession, the grade-3 the criteria system is built as “mission efficiency, meta-mission efficiency, weapon performance”. We analyze the sea-detecting effectiveness, command effectiveness and comprehensive strike effectiveness, then we get the model of the way to calculate mission effectiveness. The simulation results show that the model can effectively reflect the effect of combat environment and confrontation to the operational effectiveness, and also has certain theoretical and practical significance.

Keywords: combat mission; JTF; anti-ship combat; criteria system; combat effectiveness evaluation

0 引言

未来信息化条件下的海上联合战斗, 将不再是单个作战单元之间的对抗, 而是建立在作战平台、作战单元、作战要素综合集成基础上的体系与体系的对抗。联合机动编队是当今世界海军部队遂行海上机动作战任务的主要作战力量, 其作战效能的高低攸关海上作战的胜负。近年来, 关于体系作战效能的研究有很多, 根据评估方法大致可分为解析评估和仿真评估 2 类^[1]。文献[2]通过灰色关联分析与层次分析综合集成来研究武器装备体系的作战效能; 文献[3]将能力测试方法与探索性分析方法相结合, 通过仿真来研究体系的作战效能。这些研究大多以装备体系的建设为目标, 与装备体系的作战过程结合不够紧密, 对装备体系的作战运用指导意义不大。文献[4-5]虽然考虑了装备体系的作战运用问题, 但与作战效能“给定条件下完成作战任务程度^[6]”这一本质内涵尚有一定差距。因此, 在对联合机动编队体系结构和作战过程研究的基础上, 笔者提出一种基

于任务的联合机动编队体系作战效能评估方法, 为联合机动编队的作战运用提供指导。

1 联合机动编队的体系结构

体系(system of systems)一词首先出现于美国武器装备的采办领域, 其基本含义是“由系统组成的更为复杂的系统”^[7]。联合机动编队就是由海军潜、舰、机组成的更为复杂的作战系统, 具有典型体系作战特征。联合机动编队体系结构可以划分为体系级(联合编队)、系统级(作战平台)和单元级(武器装备)3 个层次^[8], 如图 1 所示。

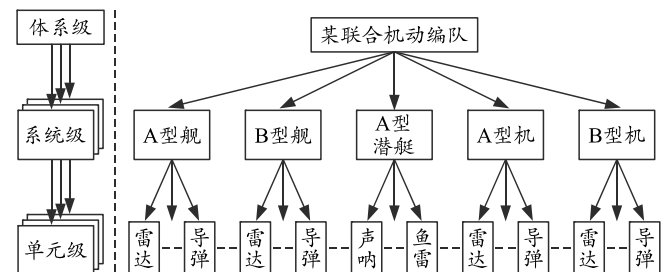


图 1 联合机动编队体系结构

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 十三五装备预研(315050401)

作者简介: 宋艳波(1979—), 男, 湖北人, 博士研究生, 讲师, 从事作战交通评估研究。

联合机动编队体系作战能力的形成取决于多个层次的因素：从最底层的武器单元(如雷达、导弹、火炮等)的技术性能，到系统级的作战平台(如各种飞机、舰艇等)的效能，并最终归结于编队体系结构的合理配置以及作战运用。

1) 单元级：武器装备单元是由具备一定功能但不能独立作战的装备组件构成，不具备独立作战能力，如雷达、反舰导弹等。

2) 系统级：由作战平台将具备不同功能的武器装备单元结合起来，构成能够独立行动的作战系统，每一个作战平台是一个独立行动的作战实体。

3) 体系级：联合机动编队是为完成一定联合作战任务，由多个作战实体在统一指挥控制下融合而成的大系统。

2 联合机动编队作战流程分析

随着信息技术和远程精确打击武器的发展，海上作战的节奏越来越快。联合机动编队在遂行作战任务过程中，更多地采用预先计划基础上的临机指挥方式实施作战行动，将侦察预警、指挥控制、综合打击和效果评估等作战环节实时联动，从而构成闭合的杀伤链路。联合机动编队的作战流程可以概括为“侦—控—打—评”4个环节，如图2所示。

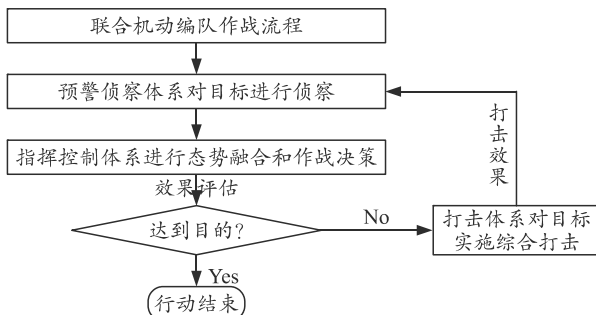


图2 联合机动编队的作战流程

首先，由卫星及各作战平台的雷达、声呐等探测设备组成编队预警探测体系，实时地感知海上战场情况，并将获取的各类目标信息通过通信系统传输给编队指控系统，实现对作战海域的持续侦察与监视。

其次，联合机动编队指控系统对于所获取的各类目标信息进行识别和信息融合，形成整体的战场态势图，编队指挥所根据战场态势选择打击目标，进行威胁排序和火力分配，并将打击决策结果和目标信息分发给执行打击任务的作战平台。

然后，执行打击任务的作战平台根据编队指挥所的作战指令，进行战术机动，对预定目标实施电

子和火力的综合打击。

最后，编队指挥所通过雷达、无人机、卫星等探测设备，对作战效果进行评估，判断综合打击效果是否满足作战任务要求，进入下一步作战决策行动，往复循环“侦—控—打—评”过程，直至作战结束。

3 编队反舰作战效能指标体系

作战效能是武器装备实现特定作战任务目标的有效程度，即在给定的威胁、条件环境和作战方案下，武器装备完成任务的效果^[1]。

从作战流程来看，联合机动编队执行反舰作战任务需要经历预警探测、指挥控制和综合打击等关键环节。反舰作战任务的完成需要通过综合打击来实现，综合打击的实施需要预警探测和指挥控制进行支撑；因此，可将联合机动编队完成反舰作战任务的作战效能分解为预警探测效能、指挥控制效能和综合打击效能等元任务效能。而每个元任务效能取决于执行元任务的武器装备的战技性能和作战环境。根据联合机动编队的作战任务和作战流程，建立“任务效能—元任务效能—装备性能”三级效能评估指标体系，如图3所示。

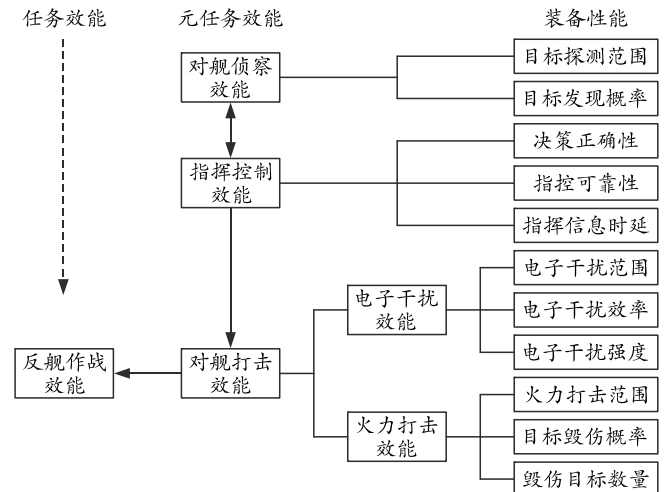


图3 联合机动编队反舰作战效能指标体系

4 编队反舰作战效能模型

4.1 编队对舰探测效能

联合机动编队的预警侦察体系主要由空中预警探测系统(预警机、侦察机、无人机等)、水面预警探测系统(舰载雷达、声呐等)、水下预警探测系统(潜艇声呐等)和配套嵌入的各种电子对抗系统组成^[9]。

信息化条件下对敌水面舰艇主要采用超视距

导弹攻击。由于地球曲率的影响，己方的舰载雷达很难发现视距外的敌舰艇，而潜艇声呐的探测距离通常都比较近；因此，信息化条件下对敌水面舰艇远程侦察，通常由编队的预警机、侦察机，在卫星或战役情报支援下完成。假设卫星向编队提供目标位置信息，目标位置误差为 $D_q(\text{km})$ ，航行速度为 v_m ，经时间 T 侦察机飞至目标海域，此时目标活动范围为

$$S = \pi(D_q + v_m T)^2 \tag{1}$$

由于水面舰艇相对侦察机的速度较慢，不考虑舰载雷达搜索时目标的运动问题，则侦察机在目标可能获得范围 S 内搜索，发现目标的概率^[10]为

$$P_f = 1 - e^{-\frac{\pi D_r^2 R_k K}{S}} \tag{2}$$

式中： P_f 为侦察机对目标的发现概率；机载雷达对海面目标的有效探测距离为 $D_r(\text{km})$ ； P_k 为侦察机与目标发生接触的概率，通常取 0.8； K 为探测兵力搜索目标的可能性天气系数，良好天气取 1，恶劣天气取 0.8。

4.2 编队指挥控制效能

指挥控制体系作战效能是指控体系在敌干扰条件下可靠获取情报、快速科学决策并下达作战指令的能力，其作战效能主要受指挥体系的可靠性、决策的正确性和指挥控制的快速性 3 方面因素的影响。指挥决策的正确性主要取决于指挥员的素质，决策效能需要通过侦察、机动和打击等作战行动，最终以侦察效能和打击效能的形式体现出来，在侦察和打击相关研究中考虑决策因素的影响；因此，指挥控制体系作战效能主要考虑指挥体系的可靠性和指挥信息时延。编队效能传递关系如图 4 所示。

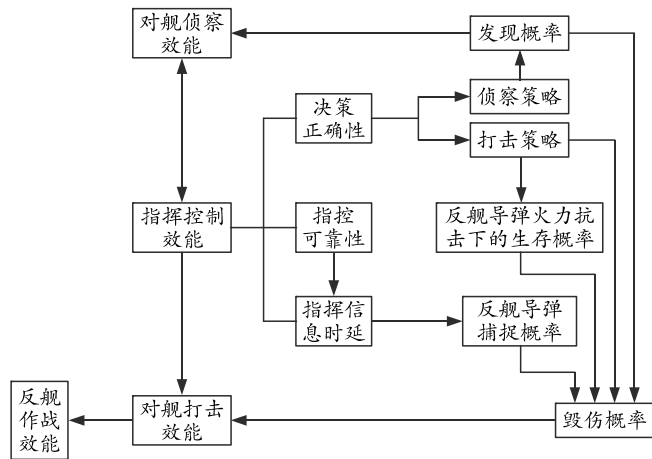


图 4 编队效能传递关系

4.2.1 指控体系的可靠性

指控体系的可靠性主要受通信网络、指控计算装备以及指控人员影响。即可以认为指挥体系的可靠性主要由通信装备完好性、指控计算装备完好性和指控人员成功决策概率决定，用下式表示：

$$P_{\text{可靠}} = P_{\text{通信}} P_{\text{计算}} P_{\text{决策}} \tag{3}$$

式中： $P_{\text{可靠}}$ 为指挥体系的可靠性概率； $P_{\text{通信}}$ 为指挥体系可靠通信的概率； $P_{\text{计算}}$ 为指挥体系计算装备的可靠性概率； $P_{\text{决策}}$ 为指控人员成功决策概率。

指控人员通常经过严格训练达到一定的职业资格。笔者认为指控人员的可靠度为 1。指控计算装备通常采用双机备份方式工作，可靠度很高。指挥体系的可靠性主要取决于指挥体系的通信可靠性。

指控体系的通信可靠性可用指挥链路上信息转发次数和信息转发误码率表示：

$$P_{\text{通信}} = \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \tag{4}$$

式中： p_i 为指挥链路上第 i 次信息转发的误码率； m 为指挥链路上信息转发次数。

综上所述，指挥体系可靠性可表示为：

$$P_{\text{可靠}} = P_{\text{计算}} \prod_{i=1}^m (1 - p_i) \tag{5}$$

4.2.2 指挥信息时延

联合机动编队反舰作战的指挥信息时延，是指从侦察兵力发现目标到反舰导弹离架所用的时间，其取决于信息传输延迟时间、指挥决策时间和导弹发射时间，指挥信息时延可用下式表示：

$$T_{\text{延迟}} = T_{\text{传输}} + T_{\text{决策}} + T_{\text{发射}} \tag{6}$$

式中： $T_{\text{延迟}}$ 为指挥信息时延； $T_{\text{传输}}$ 为信息传输延迟时间； $T_{\text{决策}}$ 为指挥决策时间； $T_{\text{发射}}$ 为导弹发射时间。

信息传输延迟时间取决于信息转发次数和每次转发传输时间，可用下式表示：

$$T_{\text{传输}} = t_c m \tag{7}$$

式中： t_c 为指挥链路上信息转发一次所用的平均时间； m 为指挥链路上信息转发次数。

指挥决策时间取决于指挥员素质，导弹发射时间取决于导弹武器装备的性能。

综上所述，则指挥信息时延可表示为：

$$T_{\text{延迟}} = t_c m + T_{\text{决策}} + T_{\text{发射}} \tag{8}$$

4.2.3 指挥信息时延对捕捉概率的影响

假设反舰导弹最大允许目标信息时延为 T_0 ，指控延迟时间为 $T_{\text{延迟}}$ ，则反舰导弹捕捉概率可用下式表示：

$$P_{\text{捕捉}} = \begin{cases} P_{\text{捕}} & T_0 \geq T_{\text{延迟}} \\ \frac{K_{\text{捕}} T_0}{T_{\text{延迟}}} P_{\text{捕}} & T_0 < T_{\text{延迟}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $K_{\text{捕}}$ 为指控时延对反舰导弹捕捉概率的影响系数； $P_{\text{捕}}$ 为满足目标指示精度情况下反舰导弹捕捉概率。

4.3 编队对舰综合打击效能

联合机动编队对舰综合打击效能是指编队的电子干扰机和反舰导弹协同对敌水面舰艇打击的有效程度，包括电子干扰效能和反舰导弹打击效能 2 方面。

4.3.1 电子干扰效能

电子干扰已成为现代空袭作战常用而有效的手段，电子干扰效能主要体现在电子压制降低敌雷达的探测范围，从而减小敌防空火力对反舰导弹的拦截能力。电子干扰机在反舰导弹对敌攻击的同时对敌水面舰艇实施远距离支援干扰，此时敌雷达探测距离可用下式^[11]表示：

$$R'_{\text{max}} = \left(\frac{K_j P_r G_r^2 \sigma R_j^2 B_j}{4\pi \gamma_j P_j G_j G_r(\theta) B_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

式中： K_j 为干扰压制系数； P_r 为雷达发射机功率； G_r 为雷达天线主瓣增益； σ 为目标雷达反射面积； R_j 为干扰机与雷达的距离； B_j 为干扰机频带宽度； γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化系数； P_j 为干扰机发射功率； G_j 为干扰天线增益； $G_r(\theta)$ 为雷达天线在干扰机方向上的增益， θ 为雷达与干扰机连线和雷达主瓣照射方向的夹角； B_r 为雷达频带宽度。

敌雷达在干扰条件下会采取对抗措施，且敌雷达相关技术参数难以准确获取，根据姚跃亭等^[12]的相关研究成果，干扰条件下雷达的探测距离 R'_{max} 不妨用下式表示：

$$R'_{\text{max}} = K_g R_{\text{max}} \quad (11)$$

式中： R_{max} 为无干扰条件下敌雷达最大探测距离； K_g 为干扰系数，1 架干扰机实施干扰时取 0.8，2 架

以上干扰机实施干扰时取 0.7。

4.3.2 反舰导弹打击效能

在反舰导弹对敌水面舰艇编队攻击的过程中，将受到敌水面舰艇编队软、硬 2 方面的抗击。

反舰导弹在敌火力抗击下的生存概率与反舰导弹的速度、机动性、敌舰艇防空能力以及我对敌干扰措施有关，文献^[13]给出了反舰导弹在敌软硬抗击下的突防概率，但没有考虑我干扰机对敌雷达压制导致的反舰导弹突防能力增加问题。仅用反舰导弹对敌打击时（打击时不伴随对敌干扰），反舰导弹在敌火力抗击下的生存概率可用下式^[13]表示：

$$Q_{\text{火抗}} = Q_{\text{jk}} Q_{\text{hp}} Q_{\text{miz}} \quad (12)$$

式中： $Q_{\text{火抗}}$ 为未采取干扰措施情况下反舰导弹在敌火力抗击下的生存概率； Q_{jk} 、 Q_{hp} 、 Q_{miz} 分别为反舰导弹突破敌舰空导弹、火炮、密集阵的生成概率。

若在反舰导弹攻击同时对敌实施电子干扰，敌防空火力杀伤区必然减小^[12]，反舰导弹突防概率将增加，根据式(11)，在采取干扰措施情况下（协同打击），反舰导弹在敌火力抗击下的生存概率可用下式表示：

$$Q'_{\text{火抗}} = 1 - (1 - Q_{\text{火抗}}) \times K_h K_g \quad (13)$$

式中： $Q'_{\text{火抗}}$ 采取干扰措施情况下反舰导弹在敌火力抗击下的生存概率； K_h 为干扰措施对敌火力影响系数。

反舰导弹抗击条件下的命中概率 $P_{\text{抗击}}$ ^[14]为：

$$P_{\text{抗击}} = P_{\text{可靠}} P_{\text{捕捉}} P_{\text{自导}} Q'_{\text{火抗}} \quad (14)$$

式中： $P_{\text{可靠}}$ 为反舰导弹可靠度； $P_{\text{捕捉}}$ 为反舰导弹捕捉预定目标概率； $P_{\text{自导}}$ 为反舰导弹自导系统引导导弹命中目标的概率； $Q_{\text{干扰}}$ 为反舰导弹在敌干扰下的生存概率。

假设海上编队对敌水面舰艇编队组织 K 批反舰导弹对其进行攻击，第 x 批攻击，齐射的反舰导弹数量为 m_x ，对敌舰艇编队的毁伤概率为 W_x ，敌舰艇编队内舰艇数量为 N_x 。

反舰导弹对敌舰艇编队的毁伤概率

$$W_x = 1 - \left(1 - \frac{P_{\text{抗击}}}{\sum_{i=1}^{N_x} \omega_i} \right)^{m_x} \quad (15)$$

式中 ω_i 为击沉第 i 个目标平均必须命中的导弹数。

根据式(2)和式(15), 可求得毁伤目标期望为

$$M = \sum_{x=1}^K P_f W_x N_x \quad (16)$$

4.4 编队反舰作战任务效能

联合机动编队反舰作战效能是联合机动编队在给定的作战任务条件和任务环境下, 完成给定反舰作战任务的程度。编队的反舰作战效能可用下式表示:

$$P_{\text{任务}} = \frac{M_{\text{完成}}}{M_{\text{要求}}} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{任务}}$ 为联合机动编队完成任务程度; $M_{\text{完成}}$ 为联合机动编队在任务条件下实际毁伤目标的期望数; $M_{\text{要求}}$ 为作战任务要求毁伤的目标数量。

5 实例计算

笔者假设联合机动编队执行某作战任务, 任务条件和要求如下: $D_q=3 \text{ km}$, $v_m=30 \text{ km/h}$, $T=0.8 \text{ h}$, $D_f=60 \text{ km}$, $P_k=0.8$, $K=0.8$; $t_c=0.5 \text{ min}$, $m=2$, $T_{\text{决策}}=2 \text{ min}$, $T_{\text{发射}}=1.5 \text{ min}$, $T_0=10 \text{ min}$, $K_{\text{捕}}=0.9$, $P_{\text{捕}}=0.95$; $K_g=0.8$, $K_h=0.9$, $Q_{\text{火抗}}=0.5$; $P_{\text{可靠}}=0.97$, $P_{\text{自导}}=0.95$, $Q_{\text{干扰}}=0.6$, $\omega_i=2$; $N_x=4$, $m_x=8$, $K=1$, $M_{\text{要求}}=2$ 。

经仿真计算, 可得: $P_f=0.957$, $P_{\text{捕捉}}=0.95$, $Q'_{\text{火抗}}=0.64$, $P_{\text{抗击}}=0.336$, $W_x=0.2907$, $M_{\text{完成}}=1.11$, 编队的作战效能为 $P_{\text{任务}}=0.557$ 。

若一次齐射 16 枚导弹, 即 $m_x=16$, 可得 $P_{\text{任务}}=0.95$ 。可见提高齐射的反舰导弹数量可显著提升打击效果。

6 结束语

该模型体现了联合机动编队的作战流程, 揭示了编队体系作战效能的传递关系, 反映了作战环境和对抗对作战效能的影响, 能够较好地体现编队完成任务的程度。该模型较易通过

计算机编程实现, 便于指挥员优选兵力运用与火力打击方案, 充分发挥编队的作战效能, 具有一定的理论意义和实践价值, 为联合机动编队反舰作战理论研究及编队武器装备体系论证提供参考依据。

参考文献:

- [1] 罗鹏程, 傅攀峰, 周经伦. 武器装备体系作战效能与作战能力评估分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 4-5.
- [2] 张亮, 赵振南, 王利. 基于体系作战效能的武器装备体系评估[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(3): 50-52.
- [3] 李元锋, 刘建平, 石成英, 等. 基于能力测试方法和探索回归分析的体系作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 36(7): 1339-1345.
- [4] 李兴兵, 谭跃进, 杨克巍, 等. 基于体系对抗仿真的装甲装备体系效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(6): 122-125.
- [5] 陆耀宾, 李明忠, 邓桂龙. 基于任务的空军装备体系效能建模框架研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 122-125.
- [6] 胡晓峰, 杨靖宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008: 282-283.
- [7] 刘磊. 面向武器装备体系发展的体系演化建模与探索分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2011: 1-2.
- [8] 王振宇. 联合作战力量能力分析与建模方法研究[D]. 北京: 国防大学, 2005: 36-37.
- [9] 张川, 解付强, 陈云翔, 等. 预警探测体系作战效能评估框架[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 84-87.
- [10] 李登峰, 许腾. 海军作战运筹分析及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 24-25.
- [11] 罗金亮, 汤金平, 党立坤, 等. 压制干扰下火控雷达最大探测距离的评估[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(5): 41-43.
- [12] 姚跃亭, 赵建军, 杨利斌, 等. 电子干扰下的编队防空探测距离及杀伤区[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 234-240.
- [13] 曹山根, 姚奕, 刘吉军. 反舰导弹突防概率[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(6): 36-41.
- [14] 许腾. 海军合同战斗模型[M]. 北京: 海潮出版社, 2010: 106-107.