

doi: 10.7690/bgzd.2013.09.002

基于 DEVS 的舰艇作战模拟训练操作行为建模

李雪飞, 孙永侃, 熊正祥

(海军大连舰艇学院作战软件与仿真研究所, 辽宁 大连 116018)

摘要: 为进一步科学评估操作训练水平, 从而提高操作训练质量, 基于离散事件系统规范 (discrete EVent system specification, DEVS) 对舰艇作战模拟训练操作进行行为建模。在分析操作训练中操作手的行为特点基础上, 从人机系统的角度建立了操作手信息传递模型, 从系统论、控制理论的角度分析了操作手的交互信息流向, 采用离散事件系统理论来描述和分析舰艇作战模拟训练中操作手的操作行为, 建立了基于 DEVS 的模拟训练操作行为描述模型。结果表明: 该方法能较好地反映舰艇作战模拟训练中操作训练特点, 合理地描述操作信息构成。

关键词: 舰艇作战模拟训练; 离散事件系统规范; 操作行为; 人机系统

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

DEVS-Based Operating Behavior Modeling for Simulated Warship Operational Training

Li Xuefei, Sun Yongkan, Xiong Zhengxiang

(Combat Software & Simulation Institute, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China)

Abstract: For further evaluating operation training, and improving training quality, based on discrete EVent system specification (DEVS) to establish behavior model of warship operation modeling training. Based on analyzing characteristics of operator's behavior, information transmission model is established from the aspect of man-machine system, the operators operating behavior in simulated warship operational training as well as the information interaction between operators and environment are analyzed under the theory of discrete event systems. Furthermore, the operating behavior model was formulated based on DEVS methodology. The result shows that the proposed models reflect its training peculiarity and provide better description of operating information structure in the warship operation simulation training field.

Key words: simulated warship operational training; DEVS; operating behavior; man-machine system

0 引言

信息化条件下的体系对抗中, 任何一个网络节点的行为产生都将影响到全作战体系的整体作战效果。作为指挥决策的执行力量, 各武器系统操作平台的操作者是作战体系中的决策核心与作战资源有效链接的桥梁, 其操作水平的好坏直接影响到武器装备性能发挥的程度及各种决策方案得以实施的有效程度; 因此, 评估操作手的操作水平显得尤为重要。基于计算机仿真技术及作战模拟理论建立的舰艇作战模拟训练系统, 是模拟体系对抗中水面舰艇在多复杂条件下海上协同作战的有效方式, 并能提供各种日常训练中难以出现的复杂战场环境与操作环境, 研究模拟操作训练条件下操作手的操作行为特点, 对于更好评估操作训练成绩意义深远。

DEVS 是由美国 Arizona 大学电子与计算机工程系教授 Bernard P. Zeigler 首先提出的一种形式化描述离散事件系统的方法^[1]。DEVS 将每个子系统

看作为一个具有内部独立结构和输入输出接口的模型, 对模型的组分、结构和接口及其相互关系进行规范化、一致性描述, 是离散事件系统的一种形式化、层次化和模块化的描述方式, 具有较为成熟的理论基础^[2-3]。

基于此, 笔者从人机系统的角度分析了操作训练中操作手从感知信息到发出操作动作的信息传递流程, 从系统的角度分析了操作训练中的输入输出关系, 并以离散事件系统规范 (discrete EVent system specification, DEVS) 为基础建立了操作行为描述模型。

1 操作手的操作行为特点分析

舰艇作战模拟训练中, 各模拟平台的操作手不断接受外界信息并以自身所学、所训的知识和经验为基础进行判断, 最终给出响应行为与整个作战体系进行互动, 发挥各武器装备性能, 从而实现作战目标。归纳起来, 操作行为具有以下特点:

收稿日期: 2013-03-10; 修回日期: 2013-04-22

作者简介: 李雪飞(1984—), 男, 河北人, 在读博士, 从事舰艇作战模拟及训练系统建设研究。

1) 交互性。操作行为是在想定作战背景下由操作手发出的，非随意为之，即按照操作规则，特定的输入就应产生相应的输出，因此操作行为具有较强的交互性^[4]；

2) 动态离散性。动态是指操作行为随着作战需求、作战任务及作战条件不同而产生变化，即根据海战场情况实时调整操作输出。每一操作行为的发出由操作手对操控部件(如按键、旋钮、开关、操纵杆等)进行的一系列技术性元操作组成^[5]，构成离散事件系统；

3) 模式化、可记录。武器装备系统的功能相对固定，通过模式化的操作流程即可发挥其作战性能，操作手通常只需掌握好操作时机、操作顺序及操作精度即可完成操作任务。若将操作任务分解为时序上相关联的操作事件，每一操作事件通过按下/弹起按键、锁定/复位旋钮开关等操作(即改变操控部件的状态)产生，因此利用计算机记录操作时间、操控部件状态转移的方式来实现操作行为的记录。

2 基于人机系统的操作手信息传递模型

基于作战模拟训练的仿真实想定，操作手操控各武器系统、探测设备等模拟平台完成特定的作战任务，构成了一个“人在回路”的复杂系统。人，即各岗位的武器装备操作手，是受训者；机，指基于计算机仿真技术建立的舰艇作战模拟训练系统，包括指挥控制系统、武器系统、情报探测系统等相关作战指挥装备的模拟设备。两者及所形成的模拟训练环境共同构成了舰艇作战模拟训练的人机系统。人机系统中的操作手实际上是一个与环境存在交互的“事件-响应”系统，并由 3 个子系统构成，即感知系统、神经中枢和运动系统，如图 1 所示。

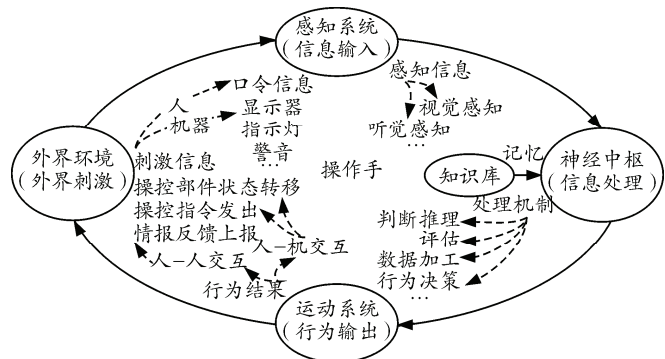


图 1 操作手操作训练信息传递模型

感知系统接收外界环境刺激形成感知信息。操作手的视觉信息来源主要是模拟操控台的显示器、状态指示灯、操控面板等，当其状态转移时，操作

手通过感知系统接收刺激信号，做出简单反应或选择性反应。听觉信息来源主要是指指挥员的口令信息、其他战位的通报信息、训练平台语音通道信息、警音等。通过训练，不同受训者从发现刺激信号到输入神经中枢的时间差异不大，操作水平高低主要体现在对与信息的加工处理到做出反应结果上。

神经中枢对接收到的感知信息进行处理。获取感知信息以后，操作手基于自身知识和操作经验对所获信息进行一系列处理，如判断推理、评估、决策等，使之作为下一步行动的依据。通过训练，可以强化操作手神经中枢对于武器装备作战使用相关信息的能力，丰富知识库中该类信息的结构组成及处理方法。

运动系统以操控动作为载体输出感知信息的处理结果，如果决策结果是对外界刺激采取反应活动，则通过相应的效应器官发出动作，作用到外界环境中形成人机交互(输出操控动作，使操控部件状态发生转移并发出操控指令)和人人交互(情报反馈，将处理后的信息传达其他受训者)。

本质上，决定操作水平高低的是操作手神经中枢子系统对感知信息的处理能力，但直接对其进行考评难度较大，因此以操作行为发出(即信息的处理结果)为研究对象可使抽象问题具体化，例如将操作手经过分析决定按下某一按钮而对武器系统发出战术指令的操控行为，作为评估操作训练的依据。

从系统论、控制理论的角度进一步认识操作手的交互信息流向，如图 2 所示。

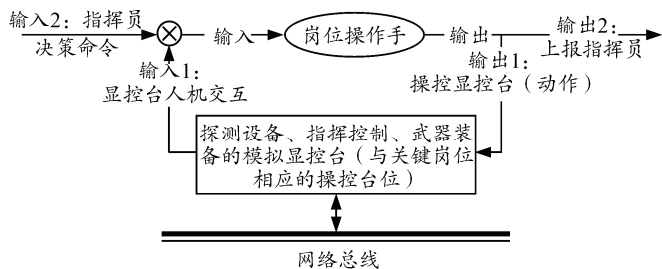


图 2 操作信息传递的系统描述

系统的输入主要包括：

输入 1：操作手通过模拟显控台的人机交互界面获得相关作战信息，主要有武器系统的状态信息、探测设备的目标信息以及战场的态势信息等；

输入 2：指挥员直接下达的决策命令。

系统的输出主要包括：

输出 1：操作手操控模拟显控台，执行各种操作动作；

输出 2：直接上报上级指挥员。

由输入 1、操作手、输出 1 和模拟显控台 4 部分构成一个人机信息交互的回环，即事件—响应系统。例如：雷达操作手执行有序技术操作设置检测区，显控台通过显示屏将检测区显示出来，此时操作手可视为显控台交互系统的外部环境，反之显控台的输入输出响应亦可视为操作手的外部环境对其操作行为的反馈。

仅考虑单岗位操作平台情况下，上级指挥员下达命令产生输入 2，基于信息传递模型，操作手发出操作动作产生输出 1，显控台执行相应程序，并显示相关操作结果，操作手通过感知系统获取产生输入 1，再经神经中枢处理后上报指挥员产生输出 2。因此，从人机系统的角度来分析，整个操作模拟训练过程就是上述输入/输出的不断循环往复。

3 基于 DEVS 的操作行为描述模型

若将操作训练中组成操作手的操作行为的最小操作单元称为元操作，那么操作手完成每一操作任务均是由一系列时间维度上离散的元操作来完成的。“按下”或“弹起”一个按键、“接通”或“断开”一个开关、点击窗口控件发送一次指令等均为执行一步元操作。若执行一步元操作，可将相关的信息描述为： t 时刻，在条件 c_j 下，某岗位操作手 $operator_i$ 发出操作动作 op_{ij} 作用到操控部件 com_k 上，引起该部件状态由 $s_{i|com_k}$ 变为 $s'_{i|com_k}$ （其中 $s_{i|com_k}$ 表示 t 时刻部件 com_k 的状态）。

t ，既是部件 com_k 状态发生转移的时间，又是操作手执行操作任务发出操作动作形成操作事件的时间。结合战术背景， t 能够反映操作手执行操作的时机是否合适，发出操作动作是否及时； t 的间隔反映了操作的熟练度；若干元操作按照 t 不同进行排列成序列，从而反映操作流程是否正确。

$\delta'_i : s_{i|com_k} \rightarrow s'_{i|com_k}$ ，是部件 com_k 于 t 时刻的状态转移情况，是操作行为的直观体现，融合了操作手对战术任务、操作任务及装备使用的理解、判断与掌握，部件状态转移结果的正确与否反映了操作的正确/准确度。

若操作动作 op_{ij} 产生的操作事件记为 $event_{ij}$ ，对于操控部件 com_k 所属的操控训练平台而言， $event_{ij}$ 是外部事件，平台内部的运算机制和规则将确定如何响应。而平台内部事件产生时（如战术条件满足时、系统运行状态发生异常时等）亦按照运算机制和规则，改变系统状态传送到外部环境（例如报警音、指示灯、按键颜色变化等）。

通过分析，可采用离散事件系统理论来描述和分析舰艇作战模拟训练中操作手的操作行为。离散事件系统是描述系统的框架结构，描述的是一类由离散事件触发而引起状态转移的自然或人造系统。系统的状态仅在离散的时间点上发生变化，且这些离散时间点一般是不确定的，系统中引起状态变化的原因是事件，通常状态变化与事件发生是一一对应的，即反映系统本质属性的对象是离散事件，离散事件是一系列按时序随机发生的具体事实，并只在离散的、有限的时刻上发生，这些事件一旦出现，将使系统中一个或若干个状态变量发生瞬时跃变。在舰艇作战模拟训练中，操作手完成操作任务是通过在模拟训练设备上执行一系列在时间上随机、离散的元操作组成，形成一系列与元操作相对应的操作事件，并随之引起模拟训练系统状态发生转移，系统的状态转移由外部事件（即操作事件）引起^[6]。

DEVS 原子模型为

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle \quad (1)$$

式中： X 为外部输入事件集合； S 为系统状态集合； Y 为输出事件集合； ta 为 $S \rightarrow R_{0,\infty}^+$ ，时间推进函数，是从 S 到非负实数集的映射； λ 为 $S \rightarrow Y$ ，输出函数； δ_{int} 为 $S \rightarrow S$ ，模型内部状态转移函数； δ_{ext} 为 $Q \times X \rightarrow S$ ，外部状态转移函数，其中， $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ 表示系统 M 总的状态集合， s 是系统当前状态， e 是在该状态 s 停留的时间， (s, e) 是总状态， $ta(s)$ 是没有外部事件到达时系统状态保持为 s 的时间。

如果没有外部事件到达，根据 δ_{int} ，系统经过 $ta(s)$ 时间单位后，从状态 s 转移到 $\delta_{int}(s)$ ，同时 e 置0；如果有一个外部事件 $x \in X$ 到达，系统在 s 已停留的时间为 e ，则它立即转移到 $\delta_{ext}(s, e, x)$ ，然后将停留时间 e 置0。

DEVS 耦合模型由多个原子模型通过连接组成，其中包含多种成员，每个成员既可以是基本模型，也可以是耦合模型，可用以下结构定义：

$$\text{CoupledDEVS} = \langle X_{self}, Y_{self}, D, \{M_i\}, \{I_i\}, \{Z_i\}, \text{select} \rangle \quad (2)$$

式中： X_{self} 为耦合模型的外部输入事件的集合； Y_{self} 为耦合模型输出事件的集合； D 为成员（组件）的名字集合； $\{M_i\}$ 为成员集合； M_i 表示第 i 个成员的 DEVS 基本模型，即：

$$\{M_i | i \in D\}, M_i = \langle X_i, Y_i, S_i, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle, \forall i \in D \quad (3)$$

式中： $\{I_i\}$ 为对成员 i 有影响的成员集合； I_i 亦表示受第 i 个成员影响的成员下标集； Z_{ij} 为输出—输入解释函数，表示第 i 个成员到第 j 个成员的输出转换；

select 为选择函数，用于选择耦合模型的下一事件。
以 DEVS 模型为研究起点，可以根据操作行为特点建立操作行为描述模型，建模原理如图 3。

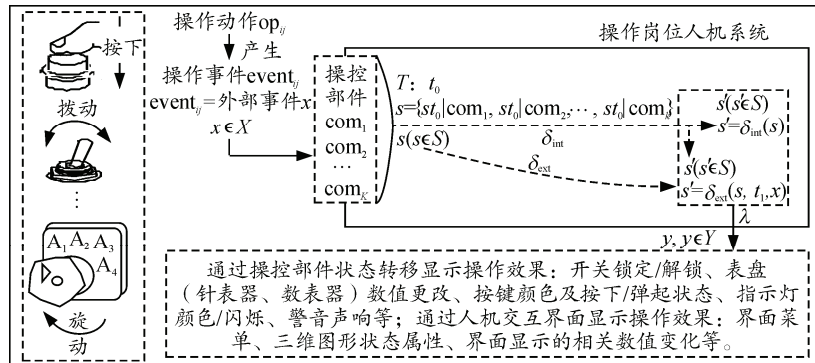


图 3 基于 DEVS 的操作描述建模原理

假设某一岗位的操作平台所含的操控部件集为 Com_k ，可根据具体的装备人机交互操控硬件组成以及装备使用规程来明确 Com_k 集合中的有限个元素组成， $Com_K = \{com_1, com_2, \dots, com_K\}$ ，此时（设 t_0 时刻），系统状态可通过人机交互中的全部操控部件的状态描述，即 $s_{t_0} = \{s_{t_0/com_1}, s_{t_0/com_2}, \dots, s_{t_0/com_k}\}$ ， $s_{t_0} \in S$ 。若 t_1 时刻，在条件（触发条件） c_j 下，操作手 $operator_i$ 发出操作动作 op_{ij} 产生操作事件 $event_{ij}$ 并作用到操控部件 $com_k (k \in \{1, 2, \dots, K\})$ 上，则 $x = event_{ij}$ ，基于规则函数 δ_{ext} ，系统状态发生转移 $s \rightarrow s', s' = \delta_{ext}(s, t_1, x)$ 并输出 y 。不考虑网络环境下各分系统之间交互的情况下，输出主要有 2 种主要形式：通过操控部件状态转移和人机交互界面显示操作效果。

式中： $\{c_j\}$ 为触发条件集； $\{operator_i\}$ 为操作事件源集，即关键岗位操作手群体； $\{event_{ij}\}$ 为操作事件集，操作事件可用下式描述：

$$event = \langle event.condition, event.source, event.target, event.time, event.state \rangle$$

在上述假设条件下，可确定关键岗位人机系统中的操作事件具有以下关系：

$$\begin{cases} event_{ij} \cdot condition = c_j \\ event_{ij} \cdot source = operator_i \\ event_{ij} \cdot target = com_k \\ event_{ij} \cdot time = t_1 \\ event_{ij} \cdot state = s_{t_0} \end{cases} \quad (5)$$

式中： com_K 为操作事件目标集，即操控部件集； S 为系统状态集合； Y 为输出事件集，为内部状态转移函数； δ_{ext} 为外部状态转移函数。

模拟平台中操控部件集 com_K 中的元素是有限的，其中每一操控部件元素分属不同类型，其状态通常也是有限的，因此在任意仿真时刻整个系统的状态是确定的。信息化作战条件下，作战模拟系统中的操控部件并非仅由按键、开关、旋钮等硬件组成，还包含大量人机交互界面（或战术软件）中的各种窗体、控件等，在软件拟制过程中，人机交互界面中的各元素都具有唯一的标识或 ID，并且其状态也是有限可确定的；因此，在基于信息系统的作战训练中，训练组织者与设计人员亦可通过建立操控部件集与部件状态空间来确定整个系统的状态。

状态转移函数是根据模拟训练系统的功能性操作规则以及战术功能的需求而确定的，不同的岗位及其操控部件之间的操作规则可以根据部件状态属性自定义。

内、外部事件状态转移函数由系统的功能使用规则来确定，将外部事件输入或其他战术前提作为函数运行的先决条件（或触发条件），通过定义不同的规则来实现多样化的系统功能。

t ：训练时间，与 DEVS 基本模型不同之处在于 t 表示与 $event_{ij}$ 相对应的时刻，即操作事件发生的时刻。

基于 DEVS，操作行为的形式化描述结构为：

根据假设条件及上述操作描述模型，元操作可用下式描述：

$$OP = \langle \{c_j\}, \{operator_i\}, \{event_{ij}\}, Com_K, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, t \rangle \quad (4)$$

$$OP_{ij} = \langle c_j, operator_i, event_{ij}, Com_K, s_{t_0}, y, \delta_{int}, \delta_{ext}(s, t_1, event_{ij}), (t_0 \rightarrow t_1) \rangle \quad (6)$$

以操作行为描述模型为基础，结合文献[7]提出的操作训练评估需求，进而建立操作数据记录需求模型，可将采集记录的训练数据进行模式化管理，

为评估操作手操作水平提供数据基础。多岗位操作手的元操作序列如图 4。

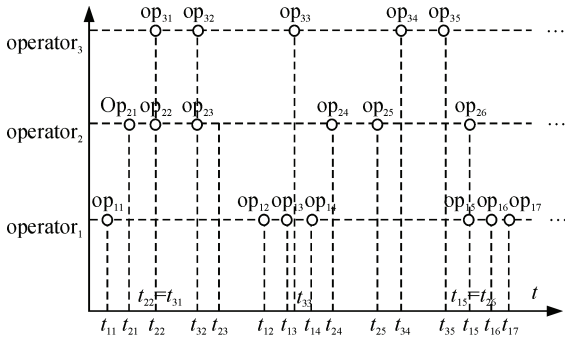


图 4 多岗位操作手的元操作序列示意图

4 结束语

操作行为是舰艇作战模拟训练中各岗位操作手的主要外在行为表现，其操作水平的高低以及各种操作问题均包含于操作行为当中；因此，深入探究操作行为的内在变化规律是对其更好评估的必要前提。笔者在分析操作行为特点基础上，从人机系统角度建立了操作手信息传递模型，并基于 DEVS 建

(上接第 3 页)

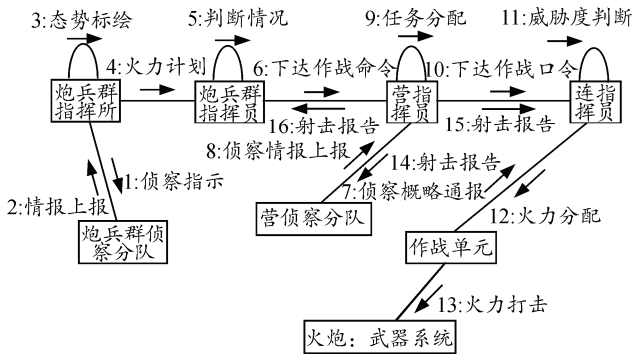


图 6 炮兵指挥控制协作

2.3 UML 模型向数学模型的转换

UML 模型将炮兵作战的特性和行为以军事人员和开发人员理解一致的方式进行了抽象表达。完成了 UML 模型后要合理地向数学模型转换。数学模型更侧重于用数学理论和方法对模型所针对的炮兵作战实验中的各种定量关系、逻辑关系的抽取和表达，如火力毁伤任务量模型。火力毁伤任务量以标准目标公顷数来表示；因此，计算压制火力毁伤任务量时，首先需要完成各压制类目标向标准目标的转换，转换后的各标准目标的幅员总和即为压制火力毁伤总任务量。

计算模型为

$$A_{\text{压}}^o = \sum_k m_k K_{mk} K_{hk}$$

式中： m_k 为第 k 个或第 k 类目标的公顷数； K_{mk} 为

立了操作行为描述模型，有助于进一步科学评估操作训练水平，提高操作训练质量。

参考文献：

[1] 黄柯棣, 等. 系统仿真技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 267.

[2] 胡睿, 张国春, 柳少军. 基于 DEVS 的防空作战模型可重用研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(z1): 30-33.

[3] 施毅, 汪新林. 基于 DEVS-SysML-CPN 的复杂武器体系建模方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5571-5575.

[4] 王上军, 时和平, 窦云杰. 某装备虚拟维修训练系统设计与实现[J]. 兵工自动化, 2009, 28(9): 11-13.

[5] 李柯, 郑思龙, 韩红彦. 某型地空导弹半实物仿真系统训练效果的评估[J]. 兵工自动化, 2008, 27(12): 1-2.

[6] 安儒奎, 邢昌凤. 一种改进的模糊 AHP 法在舰艇作战效能分析中的应用[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(1): 57.

[7] Li Xuefei, Sun Yongkan, Xiong Zhengxiang. Study on requirements of operation data logging in warship operation simulation training evaluation[C]. Proceedings of 14th Chinese Conference on System Simulation Technology & Application, 2012.

第 k 类目标向标准目标的换算系数； K_{hk} 为第 k 个目标需求的毁伤指标向标准毁伤指标的换算系数。

3 结论

炮兵作战实验是一项复杂的系统工程，而炮兵作战实验模型是炮兵作战实验重要的组成部分，加强对炮兵作战实验模型的构建，对增强炮兵作战实验的针对性、科学性、有效性和可靠性具有重要意义。笔者初步构建了炮兵作战实验模型体系，并利用 UML 进行模型设计，为开展炮兵作战实验提供了模型支撑。

参考文献：

[1] 江敬灼. 作战实验若干问题研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010: 6-12.

[2] 姚超, 魏先军, 孟宪海. 装甲兵作战实验基本理论问题[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(3): 26-30.

[3] 杨志强, 张东亮. 空间作战实验室建设的思考[J]. 兵工自动化, 2008, 27(5): 26-30.

[4] 吕跃广, 方胜良. 作战实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 6-12.

[5] David S Alberts, Richard E Hayes. Campaigns of Experimentation[M]. USA: CCRP Publications, Information Age Transformation Series, 2005: 6-12.

[6] Richard A Kass. The Logic of the Warfighting Experiments[M]. USA: CCRP Publications, 2006: 11-32.

[7] B McCue. The Practice of Military Experimentation [EB/OL]. http://www.cna.org, 2003.