☞空天防御体系与武器☜

基于 DoDAF 的预警卫星系统作战体系结构建模*

胡磊[a],闫世强[b],刘辉[b],魏文斌[b],黄晓斌[b]

(空军预警学院 a. 研究生管理大队; b. 某实验室,湖北 武汉　430019)

摘要:预警卫星系统在弹道导弹防御系统中处在最前沿,在战争中起着其他装备无法替代的作用。首先分析了 DoDAF 作战体系结构产品的内容和相互关系,提出了作战体系结构具体的设计步骤。依据预警卫星系统的作战流程,建立了部分作战体系结构模型,从不同侧面描述了预警卫星系统节点及节点间的信息关系。最后,对模型进行了语法和语义一致性验证,结果表明,建立的模型是正确的。

关键词:预警卫星系统;DoDAF;作战体系结构;Petri 网;模型验证

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2014.06.006

中图分类号:TJ861;TP391.9　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1009-086X(2014)-06-0033-09

DoDAF-Based Operational Architecture Design of Early Warning Satellite System

HU Lei[a], YAN Shi-qiang[b], LIU Hui[b], WEI Wen-bin[b], HUANG Xiao-bin[b]

(Air Force Early Warning Academy, a. Graduate Management Department;
b. X Laboratory, Hubei Wuhan 430019, China)

Abstract: Early warning satellite system is on the front edge of ballistic missile defense system, and plays an indispensable role in wars. First, the operational architecture products of DoDAF (department of defense architecture framework) and their relations are analyzed, and the design steps are put forward. Based on the operational process of early warning satellite system, some operational architecture models are established, and the points and information relation of points of early warning satellite system are described in different aspects. Finally, grammatical consistency and semantic consistency of the models established are validated, and the results show the correctness.

Key words: early warning satellite system; department of defense architecture framework (DoDAF); operational architecture; Petri net; model validate

0　引言

信息时代的到来、指挥体系结构的日趋扁平化,使我们越来越多地面对复杂系统。在系统研制建设前,依据军事需求建立起体系结构模型并对其进行验证检验,对于保证系统的互操作性、降低研制风险等方面有着重要的意义。为了解决体系结构模型应该从哪些角度和方面描述、以及如何描述整个系统

* **收稿日期**:2013-10-17;**修回日期**:2013-11-20
基金项目:有
作者简介:胡磊(1985-),男,江苏沭阳人。博士生,研究方向为预警卫星系统体系结构建模与效能评估。
通信地址:430019　湖北省武汉市江岸区黄浦大街 288 号　**E-mail**:huleikjld@126.com

资料整理 火龙果软件 荐

才是完备的问题,美国先后颁布了 C^4ISR 体系结构框架 1.0 和 2.0,国防部体系结构框架(department of defense architecture framework,DoDAF)1.0,1.5 和 2.0[1-2],为复杂系统体系结构建模提供了相应的规范和指导。借鉴美军 DoDAF,深化体系结构设计的实用化研究,加强预警卫星系统作战体系结构的设计,以改善军事需求描述不明、强化对作战活动过程的本质刻画,推动预警卫星系统顶层设计。

1 作战体系结构设计内容与方法

DoDAF1.0 中定义了作战体系结构(OV)、系统体系结构(SV)和技术体系结构(TV),用这 3 个不同的侧面来描述系统体系结构[3]。其中作战体系结构设计的任务是确定系统的作战任务、作战行动和作战要素完成军事作战要求的信息流。与之对应的作战视图主要有作战概念图 OV-1,作战节点连接描述 OV-2,作战节点信息交换矩阵 OV-3,组织关系图 OV-4,作战活动模型 OV-5,作战规则模型 OV-6a,作战状态转换描述 OV-6b,作战事件跟踪描述 OV-6c,逻辑数据模型 OV-7 等 9 个方面。

在作战视图产品中,OV-4,OV-2 和 OV-5 是核心产品,其他产品基本上都与之相关,是对 OV-4,OV-2 和 OV-5 中的实体,包括组织、作战活动、作战节点和作战信息交换的细化和说明。作战体系结构设计步骤如下[3-7]:

第 1 步:设计 OV-1 和 OV-4,以确定系统作战任务、作战节点及其指挥关系。OV-1 主要描述系统作战使命、作战节点部署等作战概念;OV-4 主要描述整个系统以及作战节点间的隶属关系和指挥层次。

第 2 步:设计 OV-5 和 OV-6(OV-6c、OV-6a 和 OV-6b),以描述系统作战过程。OV-5 主要依据作战阶段和节点功能对整个作战过程进行分解,描述作战活动的顺序和相互关系;OV-6c 主要对整个作战过程按照作战节点和作战活动进行分解,以事件时序方式描述各作战节点之间的动态交互关系和行为逻辑,是对 OV-5 中活动之间传送的信息的细化,并定义了进行信息交换的事件的时序关系;OV-6a 主要是各作战节点在整个作战过程中的作战规则描述;OV-6b 主要描述某作战节点或作战场景在一系列事件触发下产生的作战状态转变和行动,OV-6b 主要以 OV-6c 和 OV-5 为依据。

第 3 步:设计 OV-2,OV-3 和 OV-7,描述作战节点的连接关系和信息交互。OV-2,OV-3 主要依据整个系统动态模型描述作战节点之间的信息连接关系,重点反映了作战体系结构的两种数据流关系:指挥控制流和信息流;OV-7 是对节点间的信息流和控制流进一步详细设计,描述它们的具体数据内容和特征。

2 预警卫星系统作战体系结构设计

本文基于明确预警卫星系统军事需求和细化系统作战过程的目的,主要从 OV-1,OV-2,OV-3,OV-4,OV-5,OV-6b 和 OV-6c 等 7 个方面描述预警卫星系统作战体系结构。

2.1 预警卫星系统作战过程描述

预警卫星系统由指挥中心、空间预警卫星、通信系统、固定地面站、移动地面站等组成。指挥中心主要负责整个系统作战的全局规划和指挥;空间预警卫星装载红外探测器和可见光探测器等遥感装置,根据固定地面站的控制指令对指定区域的弹道导弹发射进行探测监视;通信系统作为整个系统的神经中枢,负责地面站和空间预警卫星之间的数据传送;固定地面站是整个系统的核心,主要负责对空间预警卫星的控制和情报数据的处理与分发;移动地面站主要负责接收和处理特定区域卫星的情报数据。

弹道导弹早期预警与概略引导场景下预警卫星系统作战流程简述如下[8-9]:预警卫星系统指挥中心根据上级命令下达反导预警任务,空间预警卫星的星载探测器根据任务指令进行扫描探测以捕获导弹尾焰辐射信息,当发现可疑目标时,调用凝视相机进行精确跟踪,并将数据实时传送到地面站,地面站根据测量参数对目标进行识别判断,生成多级情报数据和实时战场态势,指挥中心根据战场态势下达作战计划,地面站根据作战计划制定相应的情报分发策略,对远程预警雷达以及拦截系统等进行引导,从而完成早期预警和概略引导的目的。

根据功能将固定地面站分解为信息处理系统、情报综合系统、任务管控系统和情报收发系统等 4 部分。其作战流程为:在反导预警任务的指引下,情

资料整理 火龙果软件 荐

报收发系统对接收到的卫星下传数据进行解密解码处理，将所得探测数据送至信息处理系统，信息处理系统对探测数据进行信息处理，将所得目标信息传给情报综合系统进行情报综合处理，得到预警信息。任务管控系统根据预警信息生成战场态势并对预警卫星载荷进行实时调度，指挥中心收到战场态势后制定相应作战计划，任务管控系统根据作战计划生成情报分发策略，情报收发系统根据情报分发策略向相应的基地和部门传送预警信息以及引导信息等，情报收发系统收到任务结束命令后立即进入结束状态。

2.2 预警卫星系统作战体系结构设计

（1）作战概念图 OV－1

以弹道导弹早期预警与概略引导为例，根据预警卫星系统作战过程描述，得到预警卫星系统的作战概念图，如图 1 所示。确定的预警卫星系统主要作战节点（包括外部节点）有：空间预警卫星、指挥中心、固定地面站、移动地面站、弹道导弹以及远程预警雷达等。

（2）组织关系图 OV－4

预警卫星系统的指挥层次和各个作战节点之间指挥协同关系如图 2 所示，预警卫星系统指挥中心负责全局指挥规划，地基预警雷达作为参与者，与预警卫星系统之间是协同关系。

（3）作战活动模型 OV－5

笔者采用 IDEF0 语言建立预警卫星系统在弹道导弹早期预警与概略引导场景下的作战活动模型，以描述系统在作战过程中进行的作战活动、它们之间的关系以及其输入/输出信息流等。图 3－A.0 为顶层活动模型，主要包括作战规划、战场探测、情报分析处理、指挥控制以及概略引导等作战活动；作战规划（A.1）的子活动以及相互关系如图 3－A.1 所示，主要由预警卫星系统指挥中心完成，包含任务规划（A.1.1）、作战指挥（A.1.2）和命令发送（A.1.3）等子活动；战场探测（A.2）的子活动以及相互关系如图3－A.2所示，主要由空间预警卫星完成，

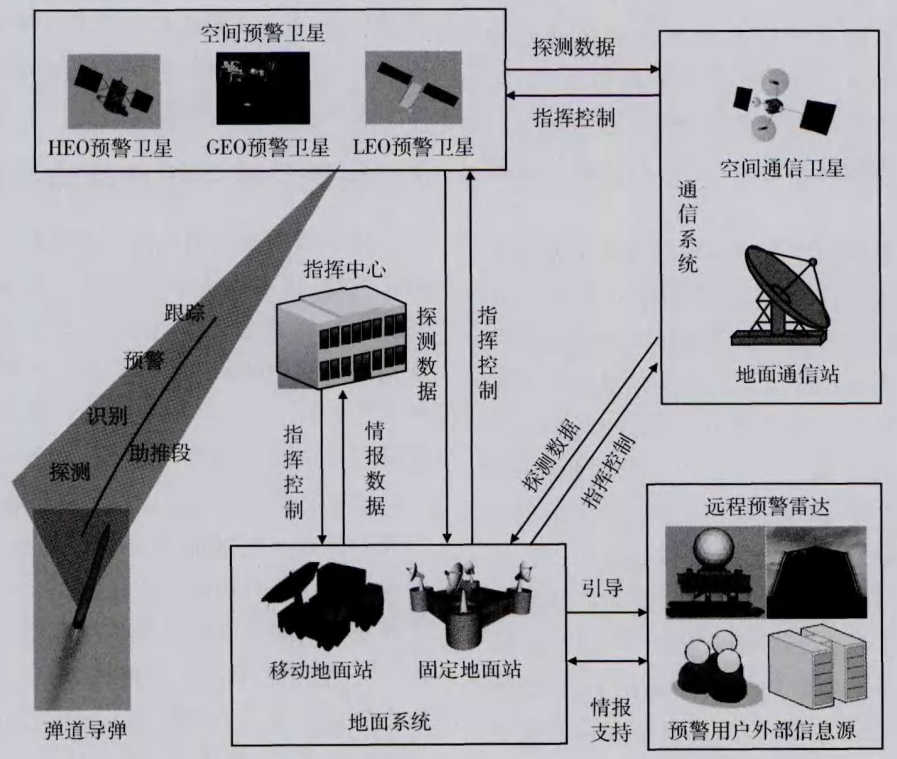

图 1 作战概念图 OV－1

Fig. 1 Operational concept view OV－1

资料整理 火龙果软件 荐

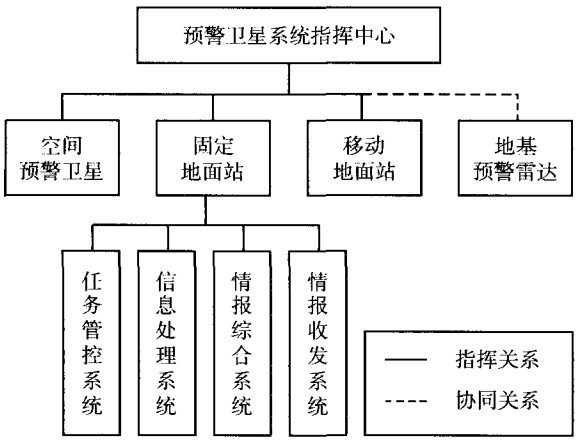

图 2 组织关系图 OV - 4

Fig. 2 Organization relation view OV - 4

包含目标搜索(A. 2. 1)、目标跟踪(A. 2. 2)和星上预处理(A. 2. 3)等子活动;情报分析处理(A. 3)的子活动以及相互关系如图 3 - A. 3 所示,主要由固定地面站和移动地面站完成,包含数据接收(A. 3. 1)、信息处理(A. 3. 2)和情报综合(A. 3. 3)等子活动;指挥控制(A. 4)的子活动以及相互关系如图 3 - A. 4所示,主要由固定地面站和移动地面站完成,包含态势显示(A. 4. 1)和指挥决策(A. 4. 2)等子活动。根据需求还可以对子活动进一步分解。

(4) 作战事件跟踪描述 OV - 6c 与作战状态转换描述 OV - 6b

以弹道导弹早期预警与概略引导场景为背景建立的作战事件跟踪描述 OV - 6c 如图 4 所示。其中,上级机关节点、弹道导弹节点和地基预警雷达节点作为参与者。由于作战节点之间的信息交换关系是由节点完成的作战活动引起的,信息的产生和消耗都是由作战活动完成的[10],因此笔者在此将 OV - 5 中的作战活动引入 OV - 6c,以便更清楚地刻画节点之间信息交换的原因,从而更好地对其进行建模描述,所以在生命线上添加了表示活动的建模元素以此描述节点上特定的活动。从图中可以看出,移动地面站和固定地面站的区别主要在于:移动地面站只负责接收卫星数据,不具备卫星载荷调度功能。

OV - 6b 主要以 OV - 6c 为依据,OV - 6b 与 OV - 6c 的关系如下[1,11]:①OV - 6b 中的作战节点对应于 OV - 6c 描绘的场景中的作战节点;②OV - 6b 中的各状态转变响应的事件对应于 OV - 6c 中相同作战节点接收信息的事件序列;③OV - 6b 中的作战状态转换是以 OV - 6c 中的事件序列为基础的作战活动序列。依据上述关系,以作战节点为单位,建立的预警卫星系统作战状态转换描述 OV - 6b 如图 5 所示。由于上级机关节点、弹道导弹节点和地基预警雷达节点是外部节点,其状态转换在此不再描述。

(5) 作战节点连接描述 OV - 2 与信息交换矩阵 OV - 3

OV - 2 和 OV - 3 主要以 OV - 5 为依据,OV - 5 中的作战活动映射到 OV - 2 中的作战节点,作战活动由这些作战节点实施,作战活动的输入/输出信息流映射到需求线。OV - 5 活动的输入/输出信息映射到 OV - 3 中的作战信息交换,但这种映射并不是一对一的关系,只有当输入/输出信息流对应着跨作战节点边界的活动时,作战活动之间的输入/输出流才对应着信息交换。

根据上文构建的 OV - 5 模型,本文建立了预警卫星系统顶层节点连接关系、每个节点完成的作战活动以及节点之间的信息交换矩阵,如图 6 和表 1 所示。固定地面站内部节点之间的连接关系和信息流关系在此就不再描述。

3 预警卫星系统作战体系结构验证

体系结构验证的主要目的是检查体系结构设计的正确性,确定体系结构描述是否符合系统的功能需求和性能需求[11]。笔者主要对预警卫星系统作战体系结构中的 OV - 2 与 OV - 5 进行了实体关系一致性验证,对 OV - 6b 和 OV - 6c 等动态行为产品进行了语法一致性和语义一致性验证。

动态行为的语法一致,主要是指构成动态行为产品的元素在数据描述上不存在相互冲突的现象。体系结构动态行为的语义一致是指描述动态行为的产品在逻辑关系和时序关系上不存在相互冲突的现象[11]。笔者采用基于实体关系矩阵的实体关系一致性分析方法[12]分析了 OV - 2 与 OV - 5 之间的实体关系一致性,并从系统作战体系结构的节点一致、作战节点接收事件数目一致、引用一致以及顺序一致等 4 个方面对 OV - 6b 和 OV - 6c 进行了动态行为语法一致性验证,最后采用 Petri 网方式对预警卫星系统作战体系结构进行驱动,对逻辑行为进行了

资料整理 火龙果软件 荐

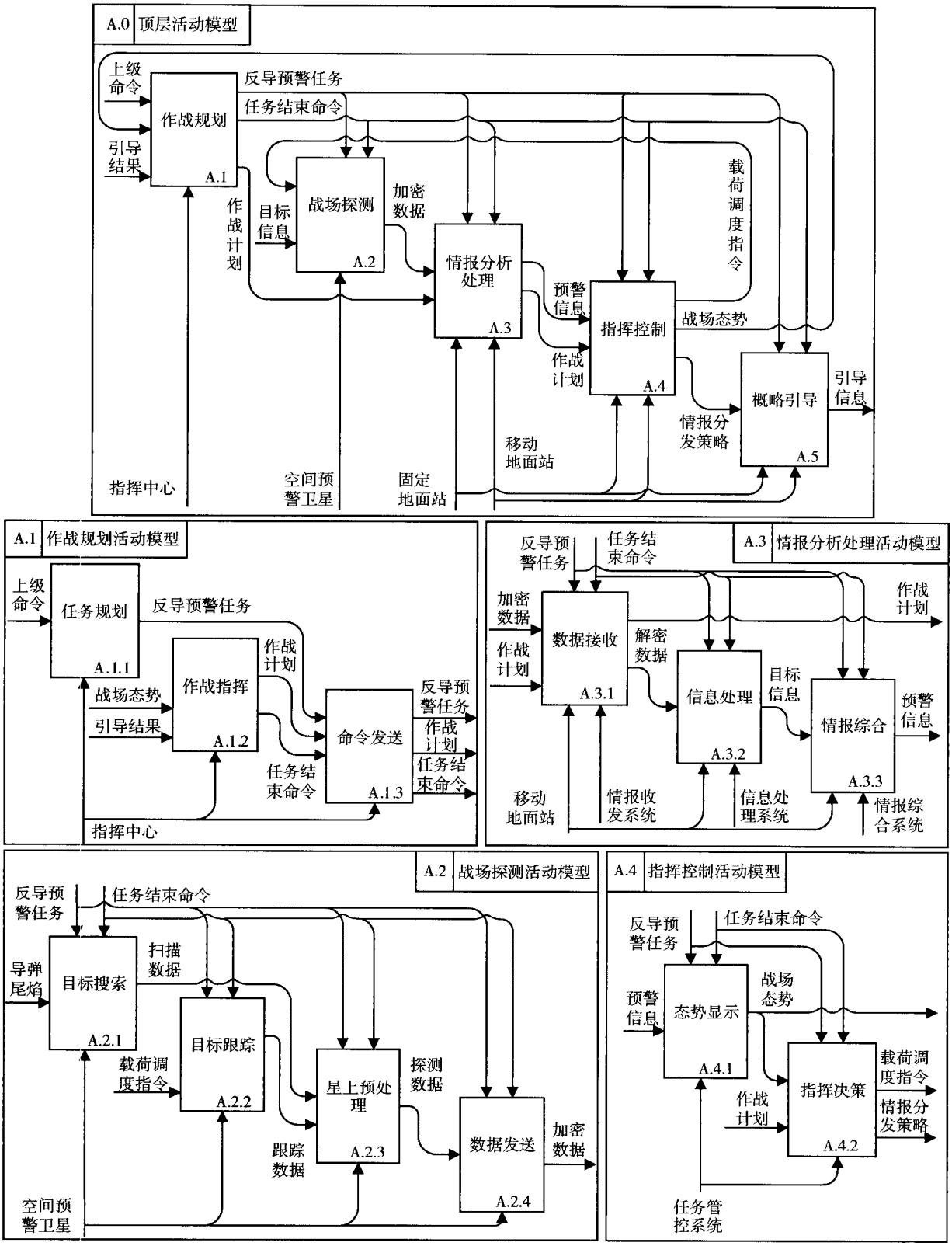

图 3 作战活动模型 OV－5

Fig. 3 Operational activity model OV－5

资料整理 火龙果软件 荐

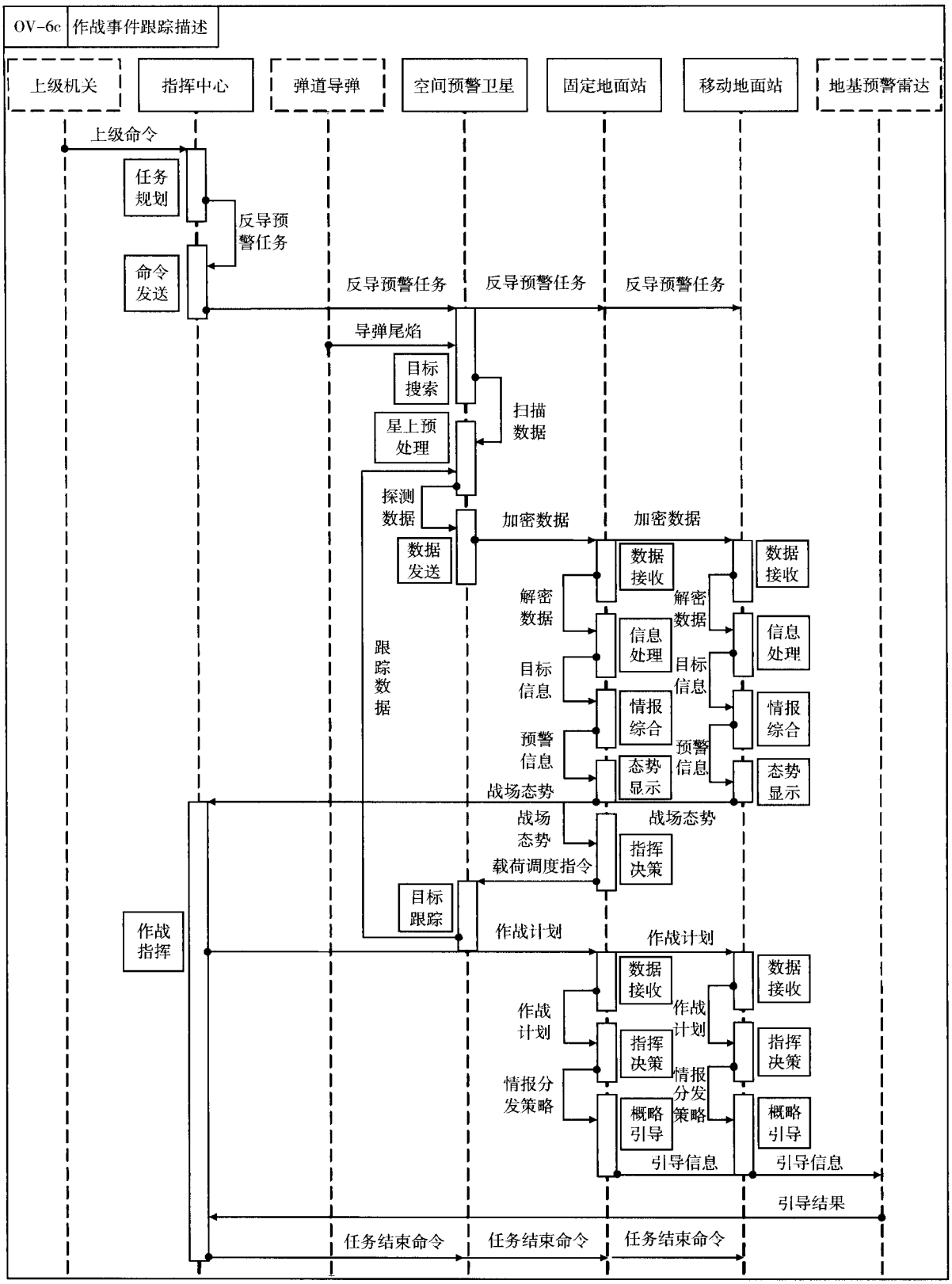

图 4 作战事件跟踪描述 OV－6c

Fig. 4 Operational event trace description view OV－6c

资料整理 火龙果软件 荐

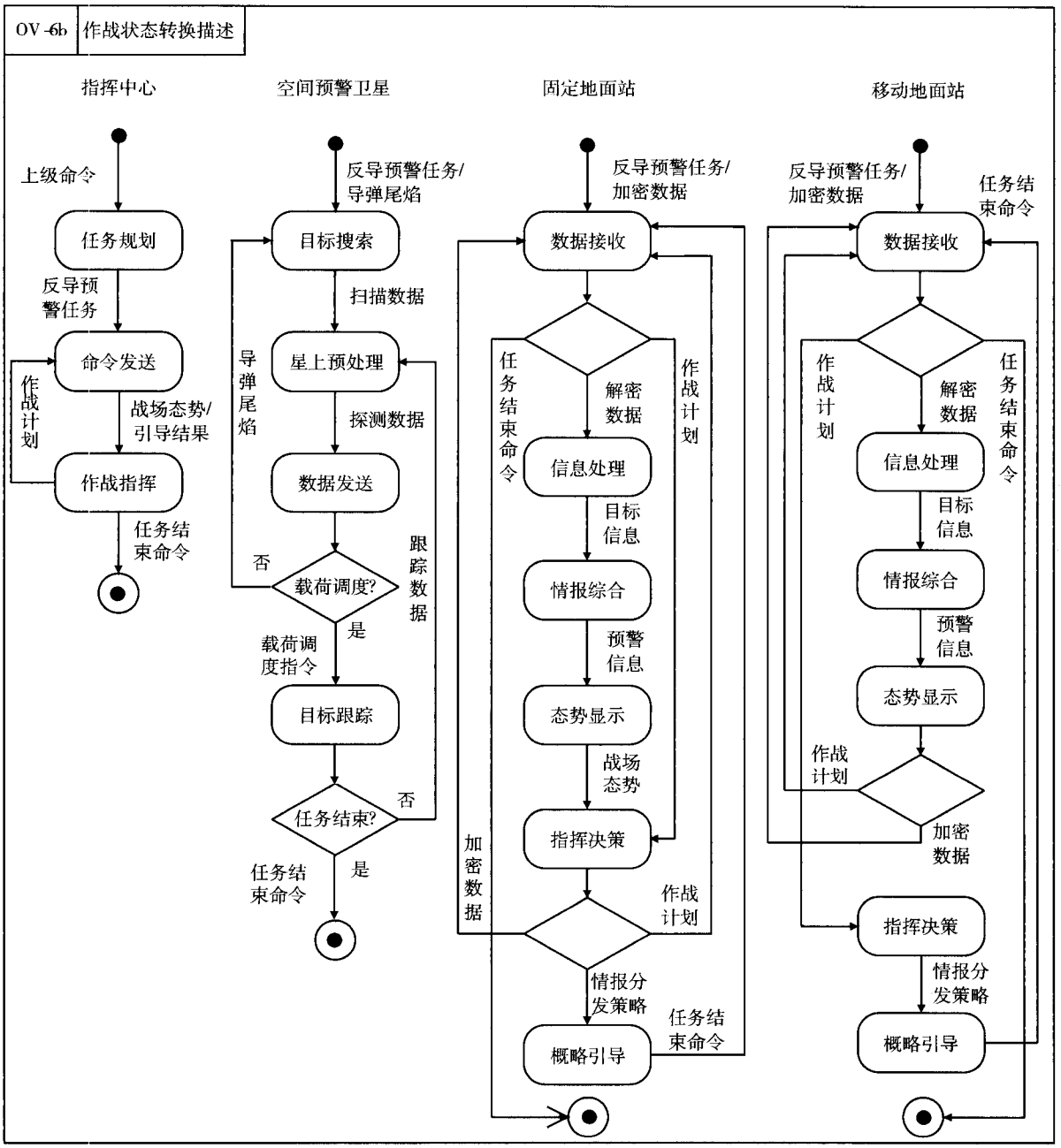

图 5 作战状态转换 OV-6b

Fig. 5 Operational state transition description view OV-6b

活性、有界性和状态可达性等分析,以验证其动态行为语义一致性,由于篇幅问题,在此不再展开。验证结果表明,本文设计的预警卫星系统作战体系结构模型语法和语义均与预期一致,符合系统需求和设计要求。

资料整理 火龙果软件 荐

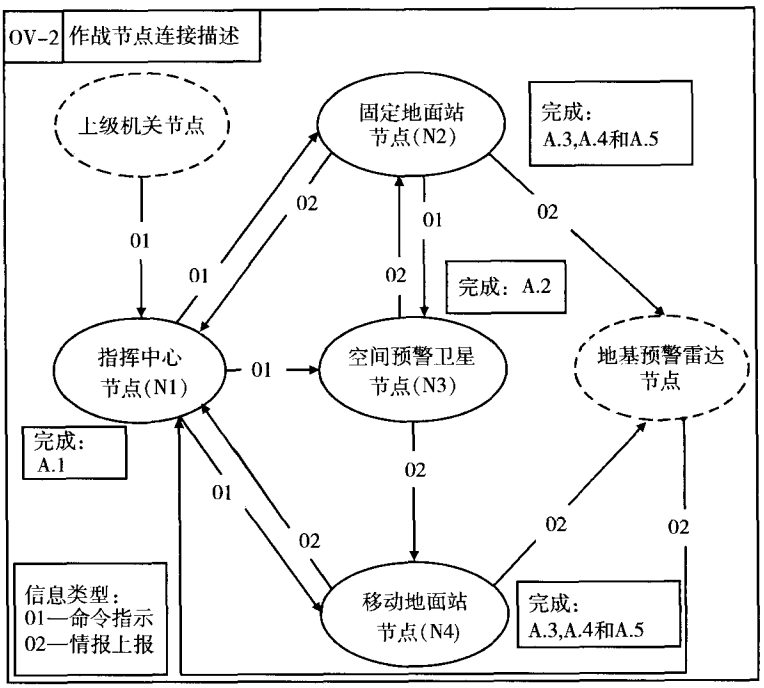

图 6 作战节点连接描述 OV－2

Fig. 6 Operational node point connect Description view OV－2

表 1 信息交换矩阵 OV－3

Table 1 Information exchange matrix OV－3

标识	节点连接关系	起始节点名称	终止节点名称	完成的信息交换
NL01	命令指示	上级机关节点	指挥中心节点	上级命令
NL02	命令指示	指挥中心节点	固定地面站节点	反导预警任务、作战计划、任务结束命令等
NL03	命令指示	指挥中心节点	移动地面站节点	反导预警任务、作战计划、任务结束命令等
NL04	命令指示	指挥中心节点	空间预警卫星节点	反导预警任务、任务结束命令等
NL05	命令指示	固定地面站节点	空间预警卫星节点	载荷调度指令等
NL06	情报上报	固定地面站节点	指挥中心节点	战场态势等
NL07	情报上报	固定地面站节点	地基预警雷达节点	引导信息等
NL08	情报上报	移动地面站节点	指挥中心节点	战场态势等
NL09	情报上报	移动地面站节点	地基预警雷达节点	引导信息等
NL10	情报上报	空间预警卫星节点	固定地面站节点	加密数据等
NL11	情报上报	空间预警卫星节点	移动地面站节点	加密数据等
NL12	情报上报	地基预警雷达节点	指挥中心节点	引导结果等

4 结束语

预警卫星系统是弹道导弹防御系统的重要组成部分，建立预警卫星系统作战体系结构对于明确军事需求和预警卫星系统效能评估具有重要的意义。本文在对预警卫星系统作战过程进行分析的基础上，建立了预警卫星系统的作战体系结构模型，运用 DoDAF 作战视图中的作战概念图、组织关系图、作战活动模型、作战事件跟踪描述、作战状态转换描述、作战节点连接描述以及信息交换矩阵等对复杂的预警卫星系统作战体系结构及其信息交互进行了可视化的描述，并对构建的模型进行了语法和语义一致性验证，明确了作战需求、作战活动以及信息流等要素之间的相互关系，对预警卫星系统的顶层设计和作战过程的理解具有一定的参考意义。

资料整理 火龙果软件 荐

参考文献:

[1] 罗雪山,罗爱民,张耀鸿,等. 军事信息系统体系结构技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010:20-24.
LUO Xue-shan, LUO Ai-min, ZHANG Yao-hong, et al. The Architecture Technology of C^4ISR System[J]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:20-24.

[2] 高昂,王增福,赵慧波,等. DoDAF 体系结构分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2011,6(5):461-466.
GAO Ang, WANG Zeng-fu, ZHAO Hui-bo, et al. Review of the Research on DoDAF Architecture [J]. Journal of CAEIT, 2011, 6(5):461-466.

[3] 岳增坤,陈炜,夏学知. 基于 DoDAF 的体系结构模型设计与验证[J]. 系统仿真学报,2011,30(3):18-20.
YUN Zeng-kun, CHEN Wei, XIA Xue-zhi. Model Design and Validation of C^4ISR System Architecture based on DoDAF[J]. Journal of System Simulation, 2011, 30(3):18-20.

[4] 丛树学,白奕. 基于 DoDAF 的舰载武器系统体系结构建模[J]. 指挥控制与仿真,2008,30(5):23-26.
CONG Shu-xue, BAI Yi. Shipborne Weapon System Modeling Based on DoDAF[J]. Command Control& Simulation, 2008, 30(5):23-26.

[5] 张少兵,郭忠伟,钱晓进,等. 基于 DoDAF 的防空兵指挥信息系统作战体系结构[J]. 兵工自动化,2011,30(3):18-20.
ZHANG Shao-bing, GUO Zhong-wei, QIAN Xiao-jin, et al. Operational Architecture of Air Defense Force Information System Based on DoDAF[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(3):18-20.

[6] 李雪超,张金成. C^4ISR 体系结构框架的新发展[J]. 现代防御技术,2011,39(2):83-88.
LI Xue-chao, ZHANG Jin-cheng. Novel Development of C^4ISR Architecture Framework [J]. Modern Defence Technology, 2011, 39(2):83-88.

[7] 李剑. 基于 DoDAF 的作战体系结构建模方法[J]. 四川兵工学报,2009,30(7):14-16.
LI Jian. Model method of Operational Architecture based on DoDAF[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2009, 30(7):14-16.

[8] 宋伟,伍晓华,杨晶. 预警卫星探测预警效能指标体系研究[J]. 飞航导弹,2012(10):41-44.
SONG Wei, WU Xiao-hua, YANG Jing. Research of Detecting and Early-Warning Efficiency Index System of Early Warning Satellite [J]. Winged Missiles, 2012(10):41-44.

[9] 高桂清,刘刚,刘风林,等. 预警卫星对战术弹道导弹预警能力研究[J]. 现代防御技术,2007,35(4):79-82.
GAO Gui-qing, LIU Gang, LIU Feng-lin, et al. Research on Early Warning Ability of DSP Satellite to TBM[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(4):79-82.

[10] 刘刚,罗爱民,皇甫先鹏. 作战事件跟踪描述建模及验证方法研究[J]. 计算机科学,2012,39(1):291-293.
LIU Gang, LUO Ai-min, HUANG-FU Xian-peng. Study on Method for Operational Event-Trace Description Modeling and Validation[J]. Computer Science, 2012, 39(1):291-293.

[11] 丁泽柳. C^4ISR 体系结构动态行为一致性验证方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007:33-38.
DING Ze-liu. Research on The Method of C^4ISR Architecture Dynamic Behavior Consistency Verification[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007, 11:33-38.

[12] 罗爱民,姜军,罗雪山. C4ISR 体系结构产品实体关系一致性分析方法[J]. 计算机应用,2008,28(1):224-225.
LUO Ai-min, JIANG Jun, LUO Xue-shan. Consistency Analysis Method Ofentity Relationship of C^4ISR Architecture Products[J]. Computer Applications, 2008, 28(1):224-225.

资料整理 火龙果软件 荐