

引用格式: 廖晶静, 卢晶, 王治国. 面向对象的SoS体系结构建模方法及应用[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(4): 11-17.

LIAO Jingjing, LU Jing, WANG Zhiguo. An object-oriented modeling approach and its application for the system of systems architecture[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(4): 11-17.

面向对象的SoS体系结构建模方法及应用

廖晶静, 卢晶, 王治国

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: “系统的系统”(System of Systems, SoS)是一类由众多异质的组件系统为了特定的使命而集成起来的松耦合复杂自适应系统。参照美国国防部体系结构框架 DoDAF V2.0, 提出了一种面向对象的 SoS 体系结构建模方法。根据 SoS 的基本特性, 运用统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 技术, 介绍了面向对象的 SoS 体系结构的建模思想、方法及过程。最后以自动着舰系统体系结构设计为例, 详细展示面向对象的体系结构建模方法的实现步骤, 提供组件系统体系结构的建模设计顺序及开发流程。该方法可用于集成系统功能仿真的顶层设计。

关键词: 面向对象; DoDAF; SoS 体系结构; 自动着舰系统

中图分类号: TP311.521

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2014.04.002

An Object-Oriented Modeling Approach and its Application for the System of Systems Architecture

LIAO Jingjing, LU Jing, WANG Zhiguo

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: System of Systems (SoS) is a type of integrated system combined with numerous component systems for a given mission, which is self-adaptive but complex. According to DoDAF V2.0, the specification of Department of Defense Architecture Framework, this paper presents an object-oriented modeling approach for SoS Architecture. By referring to the technique of Unified Modeling Language (UML), the methodology and detailed steps for the modeling process are introduced. The Auto-Landing Architecture of carrier aircrafts is exemplified to show the stages of the object-oriented modeling approach for SoS Architecture, which provides the modeling and design flow for every component within the system architecture. Overall, the proposed method is applicable in the design of the functional simulation of integrated systems.

Key words: object-oriented; DoDAF; SoS architecture; auto-landing system

0 引言

近十年来,在系统工程领域,随着网络通信技术的快速发展,“系统的系统”(System of Systems, SoS)集成规模和系统间信息交互的复杂程度呈现出前所未有的增长趋势。SoS是一类由众多异质的组件系统为了特定的使命而集成起来的松耦合

复杂自适应系统,存在的领域极广。SoS体系结构 (SoS Architecture)^[1]作为大型系统集成的顶层架构以及 SoS 组件系统 (Component Systems) 实现体系使命任务协同合作的依据、平台和指导方针,越来越受人们的重视。

体系结构描述了组件的结构、系统可靠运行和演进的依据,也是区别于传统系统工程的一个

收稿日期: 2013-12-23

网络出版时间: 2014-7-30 9:26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61273207)

作者简介: 廖晶静 (通信作者), 女, 1983 年生, 博士, 工程师。研究方向: 集成系统体系结构设计与仿真。

E-mail: lj0331@163.com

卢晶, 男, 1980 年生, 博士, 工程师。研究方向: 舰船总体设计与集成系统仿真。E-mail: lujing0806@sina.com.cn

重要特征^[2-3]。因此,依据体系结构框架标准,研究 SoS 的体系结构设计、验证和评价方法等成为 SoS 领域的一个重要研究方向^[4]。这方面有代表性的工作是美国 Levis 教授等^[5]提出的体系结构设计开发过程,主要包括 2 类方法:第 1 类是以面向过程的结构化设计方法^[6]为主,采用 IDEF 技术,强调活动是体系结构设计的核心,围绕活动模型,关注活动的抽象与分解,以及相应输入输出的处理与标准化表达等;第 2 类是面向对象方法^[7],常采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)技术,选用类图、用例图、活动图和顺序图等多种模型来详细刻画体系结构,以期增强体系结构设计的可维护性,降低设计的复杂度,提高可重用度和扩展性等。另外,基于系统建模语言(System Modeling Language, SysML)的设计方法也获得了人们的重视^[8],它是 UML 在系统工程领域的延续与扩展,并在 SoS 体系结构设计领域获得了越来越广泛的应用。SysML 建模需要相应的建模环境,目前,单独支持 SysML 的建模环境尚不存在,不适用于复杂系统的顶层设计。面向对象的建模方法具备在设计过程中始终保持良好的连贯性、部件可重用性和系统可扩展性等众多优势,这决定了它必将成为一类更为实用的 SoS 体系结构建模方法^[9-11]。

但这些方法仅停留在理论层上的面向对象的建模及相关语言描述。为了寻求一种能完整指导面向对象 SoS 体系结构的建模方法,本文参照 DoDAF 标准^[2]和 UML 描述工具,提出了基于面向对象的 SoS 体系结构的基本建模思想以及应用步骤,为系统体系结构顶层架构设计提供了可行的参考方法。

1 面向对象的 SoS 体系结构建模思想

依照体系结构的设计框架,系统体系结构是一组抽象的视图或模型,一般通过分解体系结构的基本组件来实现系统具体化。DoDAF(Department of Defense Architecture Framework)是目前在 SoS 体系结构中最具权威以及应用最广的框架标准^[2],从最初的 C4ISR 1.0 到目前的 DoDAF 2.0 共经历了 5 个版本。尽管 DoDAF 描述了结构化分析和设计技术(SADT)以及面向对象的分析和设计(OOAD)技术,但它并不强制使用其中任何一种。DoDAF 明确允许使用任何技术,只要它可以满足组织需求、能够提供合适的体系结构数据、遵

循父层体系结构数据需求,并且能够产生可在联合环境中共享的数据。

在结构化分析驱动的方法下开发的体系结构描述是面向过程的,具有分层次流程分解的特征。历史上,广泛应用的结构化模型源于美国空军开发的集成定义语言,后来用于开发国家标准与技术研究所发布的“活动建模的集成定义”(IDEF0)标准和“联邦信息处理标准”(FIPS)。面向对象的体系结构视图是利用统一建模语言体系结构技术和 DoDAF 逻辑结构及物理交换标准(PES)数据结构构建(图 1)。这种技术对使用需求进行描述,将数据(对象或 DoDAF 数据结构中的“执行者”)置于其使用背景中,并为系统和软件设计提供了可追溯的基础。它以数据抽象概念为基础,继承了面向服务的观点。面向对象技术提供了对业务组织各部分的有序安排,并通过其成熟的标注风格形成了一种特有的设计风格和方法。

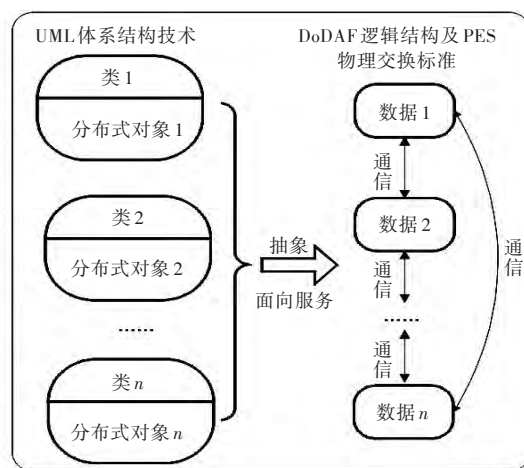


图 1 面向对象的建模思想

Fig.1 The object-oriented modeling idea

面向对象方法的基本思想,是从现实世界中客观存在的事物(即对象)出发,构造系统体系结构,并在构造过程中尽可能运用自然的思维方式。面向对象的体系结构与传统的体系结构不同,它强调的是分布式对象的分配、部件、界面及其面向对象的通信方法。由于其符合人们的认知方式,在表现系统中的实体和用户需求等方面具有很大的优势。从发展的观点看,面向对象由于具有对问题空间的自然分割,以更接近人类思维的方式建立问题域模型,从问题域向解域的自然过渡和支持部件重用及开放系统采办等优点,决定了它成为系统体系结构分析与设计中较有前途的方法。对于一个使用面向对象开发的集成体系结构来说,可以针对不同的需求导向动态重组现

有的组件系统模块,因而拥有更长的生命周期。系统体系结构面向对象分析与设计的基本思想是以类的形式进行描述,并通过对类的引用而创建的对象就是系统的基本构成单位。

2 面向对象的 SoS 体系结构描述方法

面向对象的体系结构视图是利用UML体系结构技术创建的。UML是一种设计得非常好的语言,它包括了内置的扩展机制,允许对特定的用途进行个性化定制。UML为建立系统模型提供了一整套建模机制,通过使用用例图、协作图、顺序图、活动图和状态图等,从不同的侧面、不同的抽象级别为系统建立模型。

UML用类图来描述系统的静态结构,用状态图、活动图、顺序图、协作图来描述系统的动态结构。类图用来描述系统数据,它提供了生成实体关系图所需的全部UML元素。类图由类、接口、协作关系、依赖关系、泛化关系、关联关系和实现关系组成,可对这些类的属性进行扩展以包括关联和基数。DoDAF V2.0中的逻辑数据模型(DIV-2)类图中出现的类与作战资源流矩阵(OV-3)的信息元素和作战活动模型(OV-5b)的输入输出相关。

UML则用活动图描述体系结构流程,用序列图描述对象间的信息交互。活动图常常结合过程流程图使用,描述了活动的顺序和其他属性(即时序)。过程流程图进一步集中反映场景和事件之间的先后与因果关系。在对象建模中,活动图表现的是系统的动态视图。它们对于一个系统的功能建模尤其重要,并强调对象中间的控制流。对象图表现了一组对象(即执行者)及其关系。对象图代表着类图中事例的静态快照。

理论上,依照DoDAF V2.0体系结构框架,选择需要的体系结构视角模型来构建SoS体系结构。对于SoS体系结构的初步设计,主要关注系统的逻辑层面,后续则可根据需要构建物理数据、能力及服务层面模型。因此本文设计的DoDAF模型主要包括:高级作战概念(OV-1)、作战活动模型(OV-5b)、状态转移描述(OV-6b)、事件追踪描述(OV-6c)以及逻辑数据模型(DIV-2)。

上述DoDAF模型对应的UML描述形式如表1所示。用例图由执行者和它们与系统的交互作用组成,描述高级作战概念(OV-1);活动图描述系统活动间的时序关系(OV-5b);状态图描述一个

组件系统在其生命周期内的行为序列(OV-6b);序列图表示事件发生的时间顺序或系统实体间消息交换的时间顺序(OV-6c),用以细化可描述系统实体间的交互协议;数据类图定义组件系统内部以及接口的数据结构(DIV-2)。

表 1 UML 表述形式与 DoDAF 视角模型的对应关系
Tab.1 The mapping relation of UML description forms and DoDAF views

| UML | DoDAF | 描 述 |
|------|-------|---|
| 用例图 | OV-1 | 对作战概念的高层次图形或文本的描述 |
| 活动图 | OV-5a | 能力和活动(作战活动)的背景以及它们与活动、输入和输出间的关系;附加数据 |
| | OV-5b | 可以给出代价、执行者或其它相关信息 |
| 状态图 | OV-6b | 用于描述活动(作战活动)的3个模型之一,标识了与事件(通常是很短的活动)相应的业务过程(活动) |
| | | 用于描述活动(作战活动)的3个模型之一,追踪一个场景或者一系列事件中的各种行动 |
| 序列图 | OV-6c | |
| 数据类图 | DIV-2 | 关于数据需求和结构化业务流程(活动)规则的文档 |

3 面向对象的 SoS 体系结构建模过程

UML用例图主要用于为系统的功能需求建模,它主要描述系统功能,也就是从外部用户的角度观察系统应该完成哪些功能,有利于开发人员以一种可视化的方式理解系统的功能需求。采用UML用例图描述DoDAF V2.0体系结构框架文件中的OV-1,“作战概念”可以产生一些“用例”。以用例为出发点,对每个用例,都有一个由序列图、对象类和状态图建立的经过反复修改(迭代)的过程,它们按照规定的细节要求描述期望行为,在后续用例中加入新的行为时,用这些图作为起始点,如图2所示。

对于最初用例,第一步是把用例图变换为顶层的序列图。这主要涉及到外部角色和系统(把系统视为一个整体模块实体)之间的信息交换顺序。然后从中提取出最初的对象类图和状态图,进而得到期望的系统行为。这些最初的图表示了第一次的反复过程。接下来在分解“序列”和“对象图”中的一个或多个对象时就会开始更多的反复过程,从而定义更详细的行为,以及通过修改状态图或者增加新的状态图实现该行为。这样的反复过程将继续下去,往下深入到更详细的层次,直到满足用例的要求为止。即从OV-1开始,生

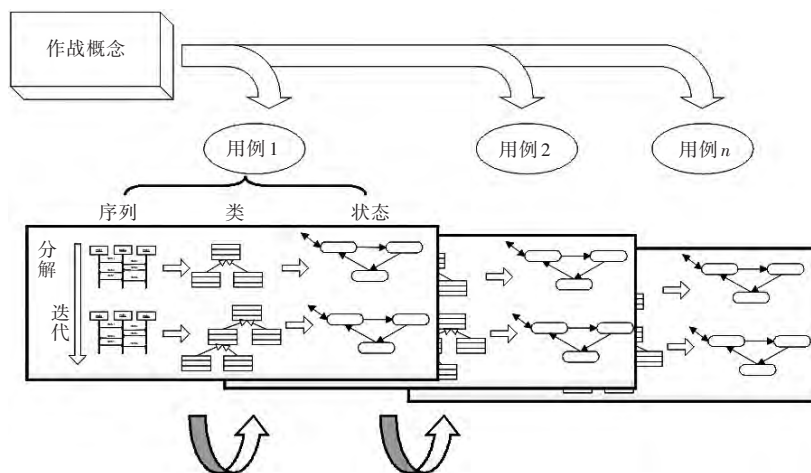


图2 作战概念每个用例产生的顺序图、类图和状态图

Fig.2 The sequence diagram, class diagram and state diagram for each case of the operation concept

成各自的OV-6b, OV-6c及DIV-2,进而根据粒度需求,依照OV-5b对其活动进行分解,对生成的序列图进行细化,形成反复迭代的过程。

首先概览整个系统的输入输出关系,采取UML中用例图定义初步的功能需求,并用序列图来表示具体用例,用类图提取其中的信息对象类。初步细化的过程中,在顶层序列图中开发功能关系,并对最初的信息对象类进行对象分解,分解过程中合理控制分解深度,并得到最终的序列图,然后利用状态图和活动图辅助验证。具体步骤如下:

1) 构造系统的用例图。对SoS体系结构的系统功能作宏观描述,确定参与者(用人形符号表示)与其中包含的各组件系统功能(用椭圆形的用例表示),形成OV-1。

2) 描述信息交互。根据最初的用例图,确定执行系统功能的各个角色之间相互传递消息的顺序关系,形成最初的OV-6c,描述SoS中各组件系统按照时间顺序的交互过程,扩展可定义组件系统之间的交互协议。

3) 提取信息对象类。根据步骤2)中的执行功能的角色,按不同粒度的要求提取划分好的组件系统的对象类图,形成DIV-2,不仅描述了各种类(其中包含了类的属性和操作),也包含了它们之间的关系。

4) 开发功能关系。细化步骤2)中的执行功能,确定输入输出信息流,逐步开发组件系统的功能关系,细化活动模型(OV-5b)。

5) 第一次完成步骤3),4)后,再对步骤2)中的OV-6c进行细化描述,重复步骤2)~4),直到达到满足的粒度要求为止。

6) 最后辅以按上述信息交互关系得出的状态图来验证SoS各组件系统执行功能间的逻辑关

系,形成OV-6b。

上述步骤中,步骤3)的提取信息对象类和步骤4)的开发功能关系是关乎模型粒度的步骤,根据细化的信息对象类不断细化功能关系,是SoS面向对象体系结构建模依照DoDAF逻辑结构及PES数据结构最为核心的部分。

4 面向对象SoS体系结构建模应用示例

舰载机自动着舰系统是由许多相互作用的分散组件系统构成,这些组件系统包括舰载机、母舰、飞行控制系统、着舰引导雷达系统等,是典型的SoS。本文以自动着舰系统建模为例,解释面向对象SoS体系结构建模方法。

4.1 高层作战概念

整个自动着舰系统工作的过程如下:舰载机自动着舰系统工作时,由着舰引导雷达发出询问脉冲信号,机载雷达跟踪增强系统接收到该信号并经过固定延时后返回应答信号,着舰引导雷达则根据该信号得出舰载机在空间中的位置,舰载计算机根据雷达获取到的舰载机位置信息以及航母运动测量装置获取的航母运动信息,计算出引导舰载机着舰的导引指令,舰载数据链发射机则将导引指令发送至舰载机,舰载机上的数据链接收机接收到导引指令后将其送入飞行控制计算机,飞行控制计算机则根据导引指令控制飞机修正航迹,使舰载机保持在理想的下滑轨迹上。

对于给定的基本作战概念,图3表述了自动着舰系统的顶层作战概念,具体为母舰和舰载机作为参与者参与到自动着舰系统中。需要完成的功能为:雷达跟踪测量雷达跟踪器的数据、母舰(着舰环境)运动测量装置测得的母舰位置、着舰

引导系统利用飞行控制系统对舰载机进行着舰引导(生成舰载机纵向和侧向导引指令)。图4依照

图3构建了最初层的用例图,用以描述舰载机自动着舰系统的高层概念模型。

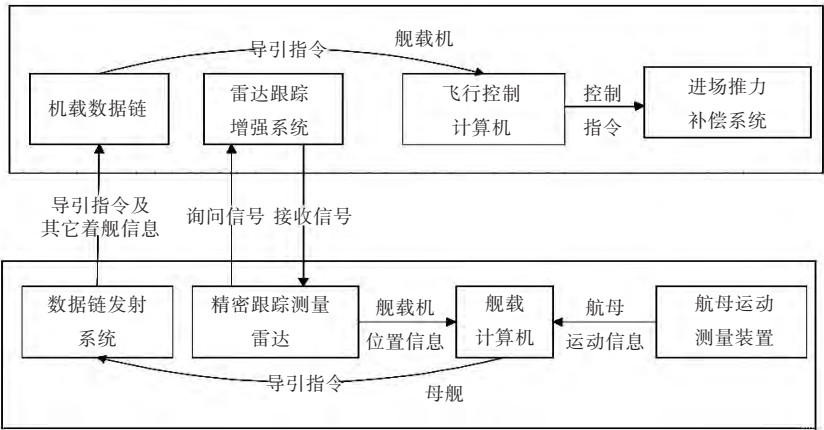


图3 舰载机自动着舰系统概念模型
Fig.3 The concept model of the aircraft auto-landing system

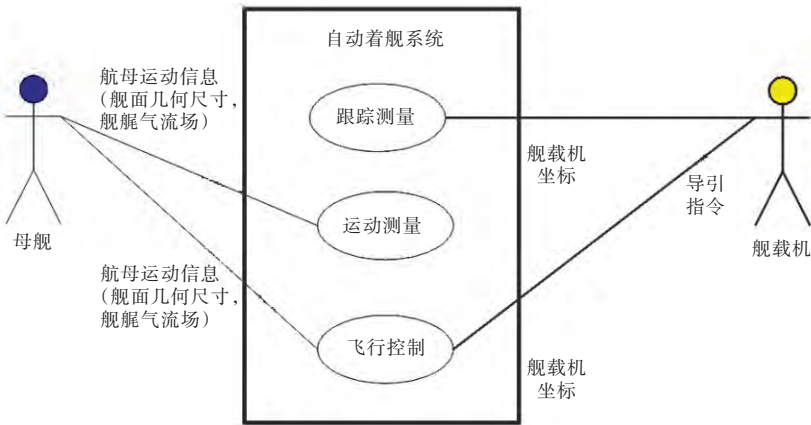


图4 舰载机自动着舰系统顶层用例
Fig.4 A top-level application of the aircraft auto-landing system

4.2 事件轨迹描述

得到自动着舰系统的顶层用例后,第2步需要把用例转换成顶层的序列图。序列图表示事件发生的时间顺序或实体间消息交换的时间顺序。第1个序列图应该只包括1个系统实例和必要的外部执行者,以便能够集中反映顶层系统与外部环境的接口。序列图就是作战事件轨迹描述和系统事件的轨迹描述。图5所示为自动着舰系统,用以构建事件轨迹描述模型的序列图。

4.2.1 提取信息对象类

从图5的顶层序列图中抽取最初的系统视图或作战视图的信息对象。可以在对象类层次上由所表示事件或信息的顺序图中的事件直接作为最初的信息对象类。自动着舰系统最初的对象类如图6所示。图6中“-”代表对象类属性,“+”代表对象类操作。根据图5的顶层序列图,在航母、舰载机及自动着舰系统事件加入联系,即得到信息

对象类的初始联系组。

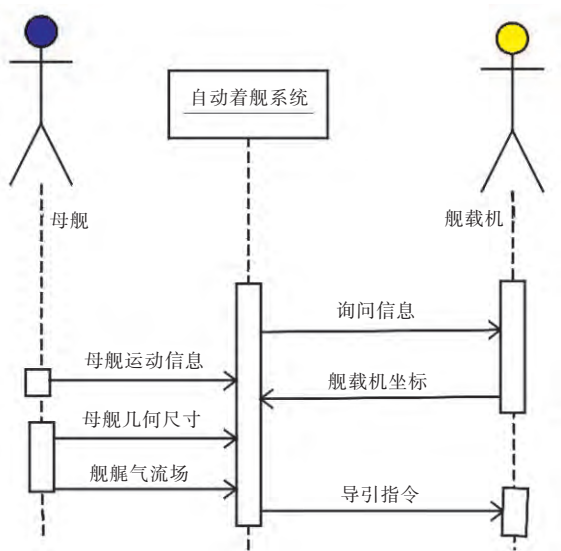


图5 舰载机自动着舰系统顶层序列图
Fig.5 The top-level sequence diagram of the aircraft auto-landing system

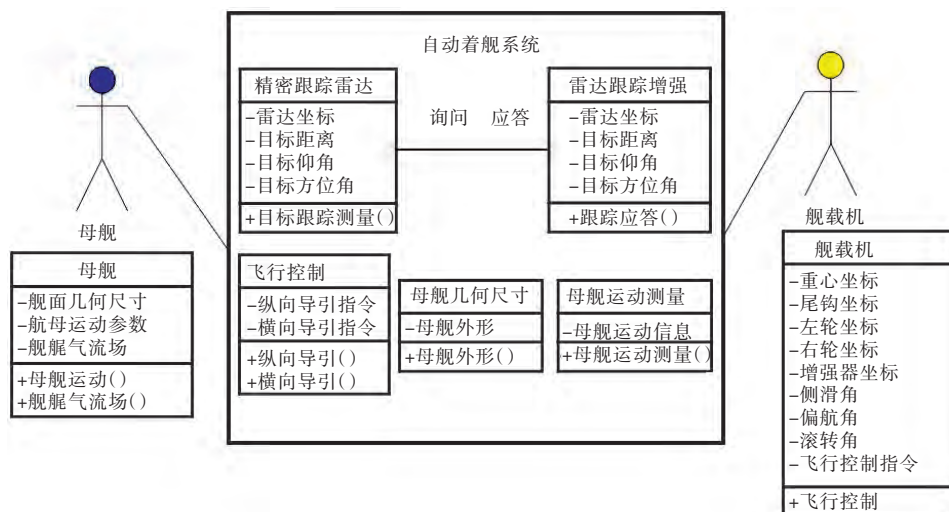


图6 直接从最初顶层顺序图得到对象类

Fig.6 The object classes from the top-level sequence diagram

4.2.2 开发作战活动模型

对顶层顺序图进行功能分解,由舰载机接收询问信息到发送舰载机位置信息之间,机载系统必须执行某种行动或者功能。在输入与输出之间,将功能名字加入系统活动链。沿着系统对象的活动链一直分解下去,加上所需要的功能,基本

上可以确定实现用例所示的自动着舰系统需要完成的子功能。

图7通过此基于顺序图的方法,完成对顶层功能的分解,然后根据对象分解,将功能加入到新的对象活动链中去,由此得到一个较为完整的顺序图及其产生的功能层次结构。

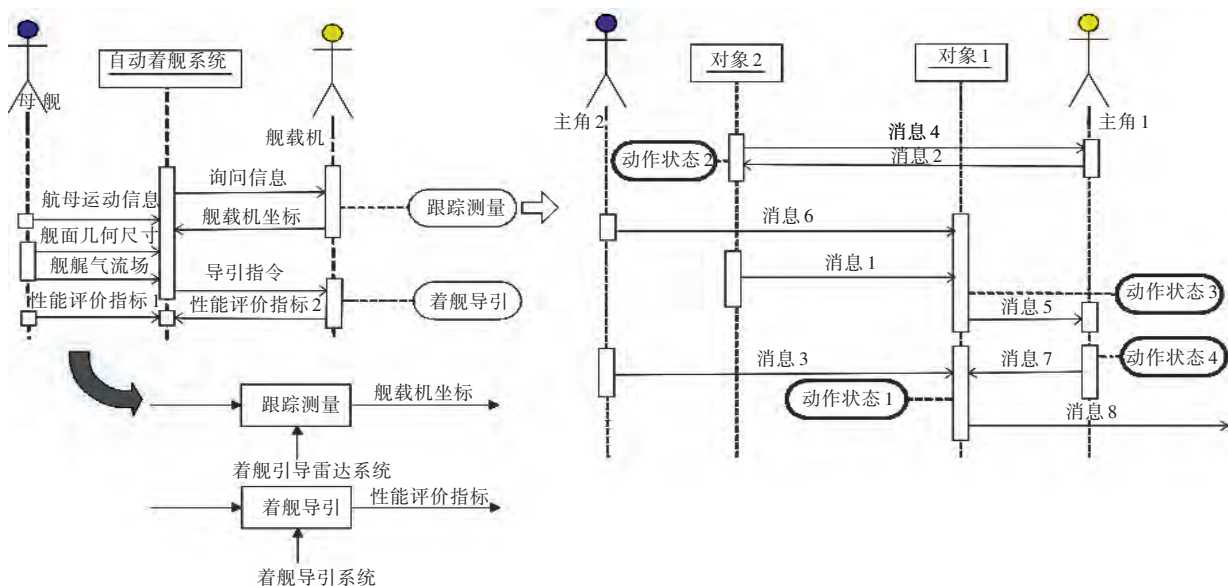


图7 从顶层顺序图开发功能关系图

Fig.7 The function diagrams developed from the top-level sequence diagram

4.3 状态转移描述

在面向对象的方法中,通过状态图能够确定行为,在自动着舰系统体系结构模型的构建中,从图7的顺序图中抽取对象的活动链和全部相关的输入/输出事件,依照抽取的对象活动及输入/输出事件,可以产生顺序图表示的系统行为,用状态图来描述自动着舰系统的状态转移描述(图8),辅

助验证所构建的SoS体系结构模型行为逻辑的合理性和正确性。

5 结语

SoS体系结构已成为当今系统工程界的重要研究热点,成为通向众多系统集成,实现期待的SoS集成体系能力的必由之路,面向对象的建模方法已成为构建SoS体系结构模型最为实用的方法

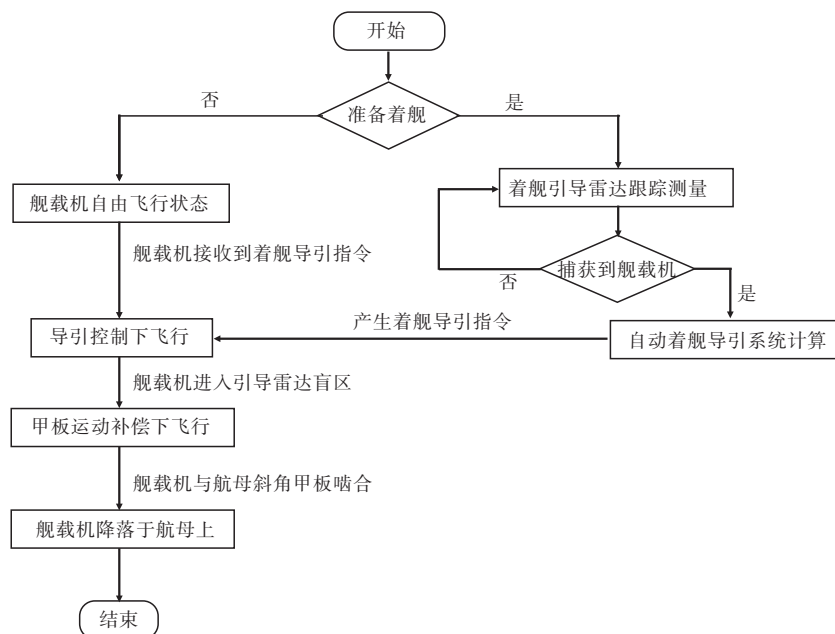


图8 自动着舰系统各对象状态图

Fig. 8 The state diagram for each object of auto-landing system

之一。本文提出了面向对象的SoS体系结构的建模思想、方法及具体步骤,并以舰载机自动着舰系统作为研究对象,使用该方法进行了分析设计,理清了该系统最顶层的组件系统对象以及其间信息交互和互操作的关系,便于后期该SoS的功能实现和数据实现。

参考文献:

- [1] 王明哲. 大型集成系统体系结构研究进展与挑战[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(增刊1): 163-170.
WANG Mingzhe. Large-scale integrated system architecture research: progress and challenges [J]. System Engineering - Theory and Practice, 2008, 28(Supp1): 163-170.
- [2] DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 2.0 [S]. The United States: Department of Defense, 2009.
- [3] BROOKS R T, SAGE A P. System of systems in integration and test [J]. Information Knowledge Systems Management, 2005, 5(4): 261-280.
- [4] JAMSHIDI M. Systems of systems engineering: principles and applications [M]. Florida: CRC press, 2009: 8-26.
- [5] LEVIS A H, WAGENHALS L W. C4ISR architectures-I: developing a process for C4ISR architecture design [J]. Systems Engineering, 2000, 3(4): 225-247.
- [6] WAGENHALS L W, SHIN I, KIM D, et al. C4ISR architectures-II: a structural analysis approach for architecture design [J]. Systems Engineering, 2000, 3(4): 248-287.

- [7] BIENVENM M P, SHIN I, LEVIS A H. C4ISR architectures-III: an object-oriented approach for architecture design [J]. Systems Engineering, 2000, 3(4): 288-312.
- [8] 吴娟, 王明哲, 方华京. 基于SysML的系统体系结构产品设计[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 594-598.
WU Juan, WANG Mingzhe, FANG Huajing. Product design of systems architecture using SysML [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(4): 594-598.
- [9] 倪枫, 王明哲, 郭法滨, 等. 基于面向对象思想的SoS体系结构设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2367-2373.
NI Feng, WANG Mingzhe, GUO Fabin, et al. Design of SoS architecture based on object-oriented idea [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(11): 2367-2373.
- [10] 饶德虎, 余滨, 马永刚. 面向对象的卫星军事应用系统体系结构开发过程[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1498-1500.
RAO Dehu, YU Bin, MA Yonggang. Object-oriented architecture exploiting process of satellite application system for military affairs [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(8): 1498-1500.
- [11] CHARDIGNY S, SERIAI A, OUSSALAH M, et al. Extraction of component-based architecture from object-oriented systems [C]//Proceedings of Seventh Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture. Vancouver, BC, 2008: 285-288.

[责任编辑: 胡文莉]