

典型系统基于架构的层级化建模技术研究

武仲芝

(中航工业信息技术中心 北京 100028)

摘要 随着工业化与信息化的深度融合,计算机建模与仿真技术已广泛应用于系统或产品的研发过程中,但其存在模型混乱、碎片化、层次不清晰、复用性差的问题。基于对系统架构的理解,提出了一种基于系统架构开展系统层级化建模的方法。在建立模型时将整个系统分解为系统层、子系统层和部件层的多层次模型;各层级模型的接口均与系统架构定义的接口关系保持一致,实现设计的连续性,为基于模型的设计提供有效的支撑。该方法能清晰表述模型的目的、层级和颗粒度。文中以典型伺服作动系统为例进行了验证,结果证明了方法的有效性。

关键词 系统架构,层级化建模,伺服作动系统

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Research on Hierarchical Modeling Technology of Typical System Based on Architecture

WU Zhong-zhi

(AVIC Information Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract With the deep integration of industry technology and information technology, computer modeling and simulation has been widely used in the development process of systems or products. However, the models have some problems such as disordered, fragmented, unclear in hierarchy, poor in reusability and so on. A method based on system architecture was proposed to develop system hierarchical models. When building the models, the whole system can be divided into multi-level with system level, subsystem level and component level. The interface of each hierarchical model is consistent with the interface defined by the system architecture. It can achieve the continuity of the design and provide effective support for the model-based design. The method can clearly describe the purpose, level and granularity of the model. The typical servo actuation system was used as an example to verify the effectiveness of the method.

Keywords System architecture, Hierarchical modeling, Servo actuation system

1 引言

计算机建模和仿真技术随着计算机和工业软件信息化等相关技术的发展而快速发展,其应用范围也越来越广泛,已成为支撑基于模型的系统工程的关键技术^[1]。目前,在系统或产品的研制过程中,可利用建模和仿真技术指导系统设计,同时可实现对系统需求、设计的提前验证,但在不同的技术人员搭建不同置信度、不同颗粒度或不同层级的模型时,随着模型数量的爆炸式增加,容易导致搭建的模型碎片、分散且复用性差等问题。

系统架构虚拟综合(Systems Architecture Virtual Integration, SAVI)项目^[1]是一个包括美国、欧洲和日本的政府部门以及知名跨国企业在内的全球性合作组织——国际航空航天运载器系统研究机构(Aerospace Vehicle Systems Institute, AVSI)于 2009 年组织发起,旨在解决当前航空航天与防务领域等工程的规模和复杂性呈指数增长的问题,其以架构为中心的基于模型的工程协同^[2]。但目前国内基于架构的研究基本处于起步阶段。

针对国外的研究和国内的现状,本文提出了基于架构开展层级化建模的方法。基于对系统架构的理解,以典型伺服作动系统为例,基于物理架构开展层级化建模,包括系统级、子系统级和部件层^[2],不同层级的模型接口均与架构定义的

接口关系统一,通过该方法可有效实现建模规范化、模型层级清晰、模型复用性高等。

2 系统架构

架构定义的目的是生成系统架构备选方案,选择出满足系统需求的一个或多个备选方案。系统架构是抽象的,以概念为方向专注于实现系统的任务。系统的架构定义可能包括相关逻辑架构模型和物理架构模型的开发^[3],即在复杂系统(如飞机),应既包括逻辑架构也包括物理架构;在软件领域,仅包括逻辑架构,本文讨论的重点是物理架构。

系统需求与逻辑架构都是在功能上组织起来的,与实现技术无关,逻辑架构模型是系统需求和物理架构模型的中间模型,如图 1 所示。逻辑架构是定义执行功能的逻辑元素以及逻辑接口。物理架构是在逻辑架构的基础上,详细定义物理元素以及物理接口,考虑了非功能性需求且可通过技术来实现,物理架构模型示例如图 2 所示。

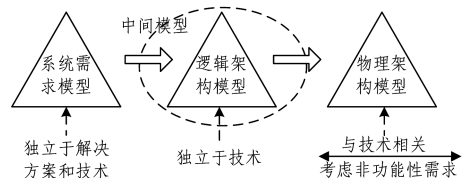


图 1 从系统需求到逻辑和物理架构模型的转换

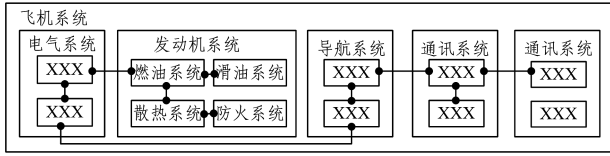


图 2 物理架构模型示例

无论系统是已经理解的将要演变的,还是前所未有的,架构活动都需要在逻辑架构模型开发和物理架构模型开发之间进行迭代,直到逻辑和物理架构模型都一致。第一次架构活动是基于表面的功能创建逻辑架构模型,物理架构模型用于确定可以执行系统功能的主要系统元素,随后的逻辑架构模型迭代将考虑来自物理解决方案选择的系统元素和派生功能。它还通过引入其他场景、故障分析和以前未考虑的操作需求来补充最初的逻辑架构模型。派生功能被分配给系统元素,这反过来影响了物理架构模型。总之,迭代的重点是产生逻辑和物理完整且一致的解决方案。

表 1 飞控系统的作动系统需求条目化

需求 ID	需求条目	需求类型	验证方法	验证状态	优先级
SRS-1	伺服作动系统能实现功率放大	功能需求	建模与仿真	未验证	高
SRS-2	伺服作动系统的阶跃响应:时间超调量小于 5%,调节时间小于 0.7 s	性能需求	先建模与仿真,然后物理实验	未验证	中
SRS-3	运动行程极限位移为±0.1 m	性能需求	先建模与仿真,然后物理实验	未验证	高
SRS-4	伺服作动系统能够实现双余度	可靠性需求	建模与仿真	未验证	高

3.1 搭建系统架构

根据使用的能源不同,伺服作动系统通常可以分为机电伺服作动系统、气动伺服作动系统、电液伺服作动系统。现在飞行控制系统中最广泛采用的是电液伺服作动系统^[5]。

本文采用电液伺服作动系统,由于系统的成熟度较高,可基于系统需求,利用启发法直接进行物理架构模型开发。系统架构师识别物理元素,典型的伺服作动系统的原理框图如图 3 所示。

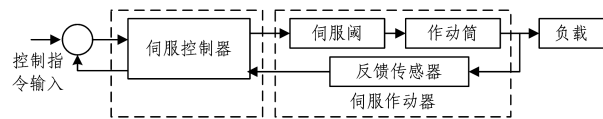


图 3 典型伺服作动系统原理框图

伺服作动系统内部本身包括伺服控制器和伺服作动器,与之有交联关系的外部系统包括指令输入和输出负载,同时还包括液压源。识别完各系统元素后,定义它们之间的物理接口,即系统的物理架构如图 4 所示,比如作动器和负载之间传递的是机械量;控制器和作动器传递的是控制信号量。

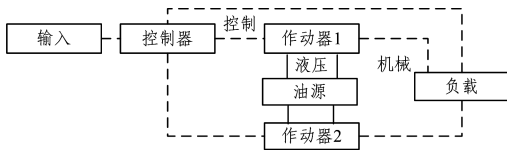


图 4 伺服作动系统的物理架构

3.2 基于物理架构搭建系统层模型

本文提到的系统层、子系统层和部件层仅是概念上的层级划分,不同的系统可根据其复杂程度进行不同层级的具体划分。

系统层模型通常用于方案设计阶段。以快速验证方案和权衡多种设计方案为目标,通常为满足初步分析需求的等效

3 典型系统基于架构的层级化建模

随着飞行控制系统由简单的机械式操纵发展到电传操纵,其作动器逐步演变成电气指令伺服作动系统,伺服系统涉及机械、控制、电子、液压等多学科领域,是一项复杂的工程。

因此,基于以上背景和系统架构的理解,本文以典型伺服作动系统为例进行实例化。

伺服作动系统是飞行控制系统的执行机构,其主要功能是根据控制计算机指令,按规定的动态和静态要求,实现对飞行器各执行机构的控制。首先,需求工程师参考该系统上一层级派生的系统需求,如表 1 所列,构建该系统的需求矩阵,即定义需求条目和相应的需求属性^[4](如需求识别号、需求类型、验证方法、验证状态、优先级、编写人、确认方法、确认状态等)。依据需求属性,仿真工程师针对需要用建模与仿真方法验证的需求进行逐一验证实现。

功能/性能模型,如使用曲线/曲面、传递函数、等效模型等,即颗粒度较粗的模型,基于系统需求以及其物理架构,搭建其系统层模型,如图 5 所示。

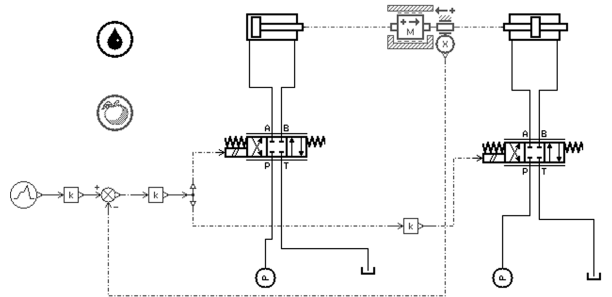


图 5 基于物理架构的系统层模型的搭建

执行机构由 2 个液压缸驱动,确保实现系统的双余度。在这种情况下,使 2 个伺服阀的输入信号是相同的,给定阶跃信号观察到执行机构控制的动态行为(见图 6),满足系统的伺服作动系统的阶跃响应需求,即时间超调量小于 5%,调节时间小于 0.7 s。

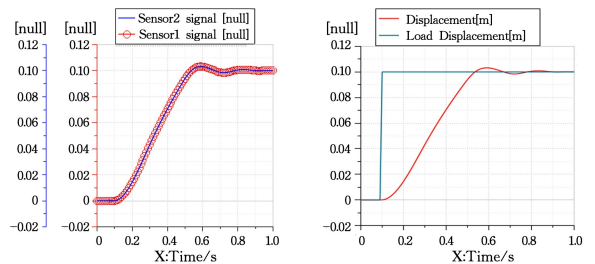


图 6 系统层级模型的阶跃响应

因此,根据设置的模型参数可以确定系统的主要关键参数,以作动筒为例,系统关键参数的设定如表 2 所列。

表 2 系统关键参数确定

部件	名称	数值	单位
作动筒	活塞直径	38.5	mm
	活塞杆直径	20.5	mm
油源	行程	0.1	m
	压力	40	Mpa

通过对系统层模型的搭建,可以初步验证该液压伺服作动系统方案的可行性,可实现系统需求的提前验证,指导后续子系统的详细设计。

3.3 基于物理架构搭建子系统层模型

搭建子系统层模型通常用于详细设计阶段。以全面、多角度、细致的模型表征系统或产品的动态行为,其颗粒度的详细程度需足够深。

基于系统需求和物理架构(接口关系保持一致),参考系统层模型和关键参数的确定展开子系统层设计,以进一步确定系统的详细参数,如:活塞杆的质量、缸体的质量、活塞与缸体之间的摩擦和阻尼等,以作动器为例展开搭建其子系统的详细模型,作动筒模型如图 7 所示,伺服阀模型如图 8 所示,子系统层模型如图 9 所示。

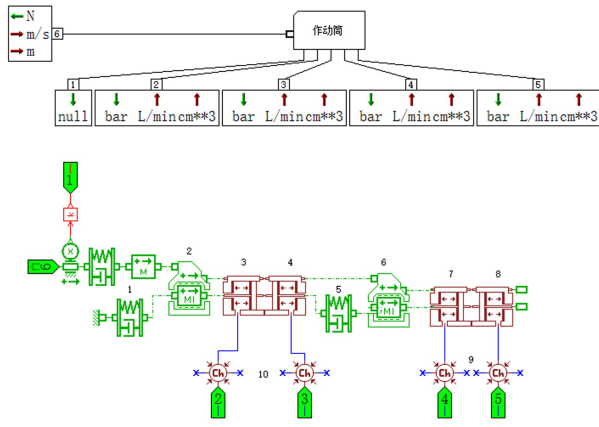


图 7 作动筒的详细设计

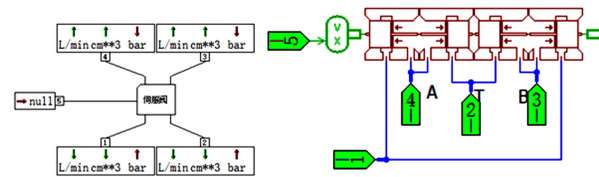


图 8 伺服阀的详细设计

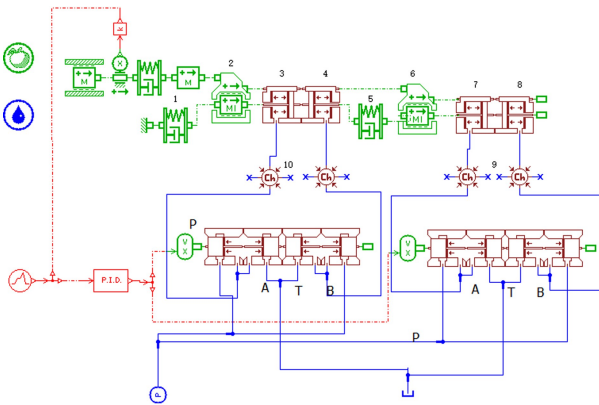


图 9 子系统层模型

给定阶跃信号,我们观察到执行机构控制的动态行为(见图 10),由此可见,子系统的详细设计满足系统需求。

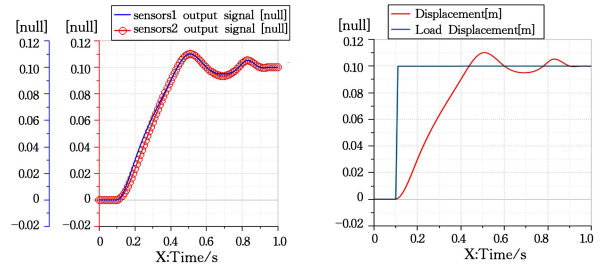


图 10 子系统层级模型的阶跃响应

根据模型设置的参数可以确定子系统的详细参数,以作动筒为例,系统详细参数的确定如表 3 所列。

表 3 系统详细参数的确定

部件	名称	数值	单位
1	连接刚度	3.2×10^7	N/m
2	上半缸体质量	0.3	Kg
3	活塞直径/活塞杆直径	36/0	mm
4	活塞直径/活塞杆直径	36/20.5	mm
5	连接刚度	10^9	N/m
6	下半缸体质量	0.3	Kg
7	活塞直径/活塞杆直径	41/20.5	mm
8	活塞直径/活塞杆直径	41/29	mm
9/10	油液不灵敏区	1	cm ³

完成对子系统的详细设计后,下一层级进入部件层的详细设计,如对阀芯进行不同均压槽流场分析、对活塞杆进行强度校核并开展优化设计等^[6],本文不再详述。

结束语 针对不同设计目的有不同的建模目的,不同的建模目的就需要开发不同颗粒度的模型,为避免模型的混乱、分散和复用性差等问题,要基于统一的架构实现不同颗粒度级别模型的开发,基于架构即在不同的层级均保持接口关系的一致性,以实现设计连续性,使设计流程规范、清晰,有效地支撑基于模型的设计过程。同时,如若系统在后续需要改进或扩展某子系统,如作动筒,可直接复用现有的不同层级伺服阀模型和其他相关子系统的模型,有效提高模型库的复用性。

参考文献

- [1] CHILENSKI J J, WARD D T. SAVI AFE 59S1 Report[D]. Aerospace Vehicle System Institute/Texas Engineering Experiment Station, 2015.
- [2] 陶剑. 基于智能建模与仿真的系统架构虚拟集成技术研究[J/OL]. 中国航空报, <http://www.cannews.com.cn/2017/0322/163163.shtml>.
- [3] WALDEN D D, ROEDLER G J, FORSBERG K J, et al. System Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Process and Activities (4th ed.) [M]. San Diego, CA: International Council on Systems Engineering, John Wiley & Sons, Inc. 2015: 47-77.
- [4] 吕宁, 熊智华, 王雄. SDG 故障诊断中的分层建模递阶推理方法[J]. 控制工程, 2010, 17(4): 561-564.
- [5] BKCASE Editorial Board. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) (Version 1. 8)[EB/OL]. <http://www.bkcase.org/sebok/>.
- [6] HULL E, JACKSON K, DICK J. Requirements Engineering [M]. Springer, 2011: 80-82.
- [7] 饶小龙. 飞控系统伺服作动性能评估与可靠性分析方法研究与软件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [8] 颜高社, 刘光明, 蒋桂林. 基于 ANSYS 的活塞杆校核与模态分析[J]. 机械工程师, 2010(9): 119-120.