

一类计算系统的 MBSE 建模方法

姜芳峰^{1,2},王长帅^{1,2},罗清林^{1,2},杨任农³,李锁在^{1,2,4}

(1.中电(海南)联合创新研究院有限公司,海南 澄迈 571924;

2.海南省 PK 体系关键技术研究重点实验室,海南 澄迈 571924;

3.空军工程大学 空管领航学院,陕西 西安 710051;4.中软信息系统工程有限公司,北京 102209)

摘要:随着社会各领域对于算力需求的快速增长,通过计算架构创新提升计算系统算力越来越受到重视。计算系统的研制是一项复杂的系统工程,计算架构的创新使得计算系统的复杂程度不断增加,传统的系统工程方法难以满足系统研制需求。采用基于模型的系统工程(MBSE)方法对一类计算系统的建模方法进行了研究,提出了建模框架,建立了系统模型。运用此建模方法建立了某国产化计算系统模型,证明了建模方法的有效性,为下一步运用计算机仿真技术进行一类计算系统研制奠定了基础。

关键词:MBSE;计算架构;SysML;复杂系统

中图分类号: TP311

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222910

中文引用格式: 姜芳峰,王长帅,罗清林,等. 一类计算系统的 MBSE 建模方法[J]. 电子技术应用,2022,48(12):116-121.

英文引用格式: Jiang Lifeng, Wang Changshuai, Luo Qinglin, et al. A MBSE modeling method for a class of computing systems[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(12): 116-121.

A MBSE modeling method for a class of computing systems

Jiang Lifeng^{1,2}, Wang Changshuai^{1,2}, Luo Qinglin^{1,2}, Yang Rennong³, Li Suozai^{1,2,4}

(1.CEC Joint Innovation Research Institute, Chengmai 571924, China;

2.Key Laboratory of PK System Technologies Research of Hainan Province, Chengmai 571924, China;

3.Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

4.China Software Information System Engineering Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: With the rapid growth of demand for computing power in various fields of society, more and more attention has been paid to improving computing power of computing systems through computing architecture innovation. The development of computing system is a complex system engineering. Innovations in computing architectures have resulted in ever-increasing complexity of computing systems. Traditional systems engineering methods are difficult to meet the needs of system development. The modeling method of a kind of computing system is studied by the method of model-based systems engineering(MBSE), the modeling framework is proposed, and the system model is established. Using this modeling method, a model of a localized computing system was established, which proved the effectiveness of the modeling method, and laid the foundation for the next step to use computer simulation technology to develop a type of computing system.

Key words: MBSE; computing architecture; SysML; complex systems

0 引言

近年来,集成电路制程工艺进步与计算架构演进是计算系统在发展过程中得以不断提升算力的主要原因。随着摩尔定律与狄纳德缩放定律逐步逼近物理极限^[1],通过制程工艺进步提升算力的模式难以为继。这就使得通过计算架构创新提升算力将成为今后提升算力的主要途径。

计算架构是人工复杂系统研究的核心范畴^[2],因而借鉴国内外航天航空领域系统工程经验,运用系统工程的工具和方法进行计算架构创新研究是可行和必要的。

基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)方法是指通过形式化的建模语言描述系统的结构、行为、参数,以模型驱动的形式结合现代设计方法进行系统综合设计,并贯穿整个设计周期的设计方法^[3]。目前 MBSE 方法已经被国内外广泛应用于航空^[4-6]、航天^[7-9]等领域并取得了诸多科研成果。

如何运用 MBSE 方法开展计算架构创新研究,通过系统设计提升计算系统的安全能力,实现计算机系统总体性能的最优化,是具有重要研究意义的课题。在运用此方法开展课题研究的过程中建立准确的模型是关键。

建立准确模型的前提条件是获得建模对象准确而充分的信息。从系统的角度看,这些信息可分为两类:一类是构成系统的实体的信息;另一类是实体之间关系的信息。就此条件来看,本文认为并非所有计算系统都可成为课题的研究对象,因此在开展建模研究之前论文首先对计算系统进行分类并最终确定了最适合开展研究的一类计算系统。在此基础上,本文建立了此类计算系统的建模框架及模型,为研究如何通过计算机仿真的方法开展系统研制,如何提升此类计算系统的安全以及如何优化系统性能奠定了基础。由于此类系统具有成为网信产业主流计算系统的潜力,因而对此类计算系统进行研究具有一定价值和意义。

1 基于建模需求的计算系统分类研究

对于基于冯诺依曼架构的计算系统 S ,构成 S 的实体可用 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 表示,如果 E 中的每一个成员 e_i 都至少对应一家企业 f_i 对其具有完全的知识产权,则可建立集合 $F=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。

本文中将计算系统 S 分为两类:非自主计算系统、自主计算系统。

若 \exists 集合 F_1 为集合 F 的真子集,即 $F_1 \subset F$,且 F_1 的所有者为 C ,则对于 C 来说, S 是 C 的非完全自主知识产权的计算系统,简称非自主计算系统。

其中,若集合 $F_1=\emptyset$,则 S 是 C 的完全非自主知识产权的计算系统,很显然完全非自主知识产权的计算系统是非自主计算系统的一种。

若集合 $F_1=F$,且 F_1 的所有者为 C ,则对于 C 来说, S 是属于 C 的具有完全自主知识产权的计算系统,简称自主计算系统。

其中,在自主计算系统中,若集合 $F=\{f_1\}$,则称 f_1 是属于 C 的全产业链企业,本文中将这类计算系统 S 称为完全自主计算系统。

由非自主计算系统 S 的定义可知其对于 C 来说具有如下特点:

特点 1: \exists 集合 $F_2=F-F_1$,且 $F_2=\emptyset$ 。同时, \exists 集合 $E_2 \subseteq E$,集合 F_2 对集合 E_2 具有完全的知识产权,这种二元关系可用 $R \subseteq F_2 \times E_2$ 描述。

特点 2: 构成非自主计算系统 S 的实体可用集合 E 表示,由特点 1 可知,集合 $E=\{E_1, E_2\}$, $E_1=E-E_2$,则实体 e_i 之间存在如下四类关系: $R_{12} \subseteq E_1 \times E_2$; $R_{21} \subseteq E_2 \times E_1$; $R_{11} \subseteq E_1 \times E_1$; $R_{22} \subseteq E_2 \times E_2$ 。

由上述特点可得出如下结论:

由特点 1 可知,对于 C 来说,由于其对集合 F_2 无所有权,而集合 F_2 对集合 E_2 具有完全的知识产权,因此 C 不能确认集合 E_2 在非自主计算系统 S 中是否安全,也无法通过优化 E_2 提升非自主计算系统 S 的整体性能。

由特点 2 可知,在三类关系中, R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} 由于都与集合 E_2 有关,因此对于 C 来说,既不能确认这三类关系

的安全性,也难以确保这三类关系的有效性,因此难以通过优化非自主计算系统 S 中实体之间的关系,在系统层面涌现出最优的性能。

对于 C 来说,虽然其对 F_1 具有所有权,而 F_1 对 E_1 具有完全的知识产权,但如果 $|F_1|>1$,由于企业之间的差异性,对于 C 来说,也难以实现 R_{11} 的最优化设置。

综上所述,对于 C 来说,只有当 $|F_1|=1$,且 S 为自主计算系统时, C 才能确认 S 是安全的,同时也才有可能通过优化 E 和 R 在系统层面涌现出最优性能。因此本文主要对这类自主计算系统也就是完全自主计算系统的建模方法进行研究。

2 完全自主计算系统建模框架

系统所涌现出的功能,依赖于系统中各实体的功能以及实体之间的功能交互^[10]。因而,为确保复杂系统投入使用后能涌现出预期的功能,即系统能力,需要通过建模的方法建立系统模型。系统模型描述了构成复杂系统的实体及其交互关系,可以更好地指导系统实现。

完全自主计算系统属于复杂系统,很难从单一角度对其进行建模,也很难直接将完全自主计算系统直接映射为系统模型。因此,根据复杂系统建模理论,完全自主计算系统模型主要包括存在于物理域的形式模型和存在于功能域的能力模型。

为了建立完全自主计算系统模型,本文提出从物理域到功能域的建模框架,即首先在物理域通过形式建模的方法建立完全自主计算系统的形式模型,然后在此基础上,在功能域建立完全自主计算系统的能力模型。建模框架如图 1 所示。

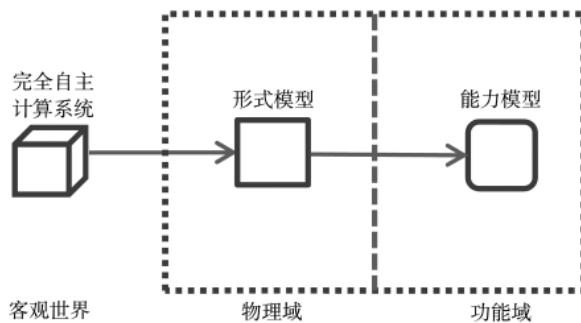


图 1 完全自主计算系统建模框架

图 1 中的形式模型是根据研究需要,运用系统工程的方法对完全自主计算系统进行第一次形式化建模得到的模型。形式模型主要描述了在物理域中构成完全自主计算系统的实体以及实体之间的关系。该模型为最终将建模对象在功能域映射为能力模型奠定了基础。

图 1 中的能力模型是根据研究需要运用系统工程的方法对形式模型进行二次建模得到的模型。能力模型主要描述了构成系统的功能实体以及功能实体之间的关系。同一建模对象可以根据研究需要在功能域建立不

同的能力模型。

由图 1 可知, 建模过程可分为三个阶段:

(1)需求分析建模阶段:根据建模需求构建模型需求视图。

(2)完全自主计算系统形式模型建模阶段:首先根据研究需要获得进行形式建模所需的关于建模对象的信息,其次在物理域建立以物理世界客观存在实体为基本单元的形式模型。

(3)完全自主计算系统能力模型建模阶段:首先根据研究需要将构成形式模型的基本单元—实体映射为能力模型的基本单元—功能实体,然后描述功能实体之间的关系,最终得到完全自主计算系统的能力模型。

3 完全自主计算系统模型

基于完全自主计算系统的建模框架可根据研究需要建立完全自主计算系统模型。模型由形式模型、能力模型构成,形式模型和能力模型由多视图构成。

3.1 完全自主计算系统形式模型

形式模型包括:组织视图、结构视图、关系视图。

建模流程如下:

(1)确定形式模型由哪些模型视图构成,建立基于 SysML 形式模型的组织视图。

(2)确定构成完全自主计算系统的实体,基于需求视图建立基于 SysML 的形式模型的结构视图。

(3)确定实体之间的信息交互关系,基于需求视图建立基于 SysML 的形式模型的关系视图。

3.2 完全自主计算系统能力模型

模型包括:组织视图、实体与功能实体映射关系视图、结构视图、活动视图。

建模流程如下:

(1)确定能力模型由哪些模型视图构成,建立基于 SysML 的能力模型的组织视图。

(2)确定形式模型中的实体与功能模型中的功能实体之间的对应关系,建立实体与功能实体映射关系视图。

(3)确定构成完全自主计算系统功能模型的功能实体,基于需求视图建立基于 SysML 的能力模型的结构视图。

(4)确定实体之间的信息交互关系,基于需求视图建立基于 SysML 的能力模型的活动视图。

4 实例

某国产化计算系统由国内某集团多家下属企业联合设计、制造、生产、销售。若该集团对于下属企业具有完全所有权,且这些下属企业对于该国产化计算系统具有完全的自主知识产权,则由文中对于完全自主计算系统的定义可知,该国产化计算系统为完全自主计算系统。下面以在此完全自主计算系统如何实现可信计算中的可信启动能力为例,说明如何根据研究需要对此计算系统进行建模。

由已经建立的完全自主计算系统建模框架可知,建模分为三个阶段,首先需要进行需求分析并构建系统需求视图。

4.1 完全自主计算系统需求视图

通过对完全自主计算系统如何实现可信启动能力进行需求分析可知,系统能力需求可被分解为:度量能力需求、加载能力需求、初始化能力需求、执行能力需求、授权能力需求、启动能力需求,如图 2 所示。

4.2 完全自主计算系统形式模型

由已经建立的完全自主计算系统建模框架可知,形式建模分为三个阶段,需要分别建立形式模型组织视图、形式模型结构视图、形式模型关系视图。

4.2.1 形式模型的组织视图

形式模型的组织视图主要描述形式模型的结构组成,包括:结构视图、关系视图,如图 3 所示。

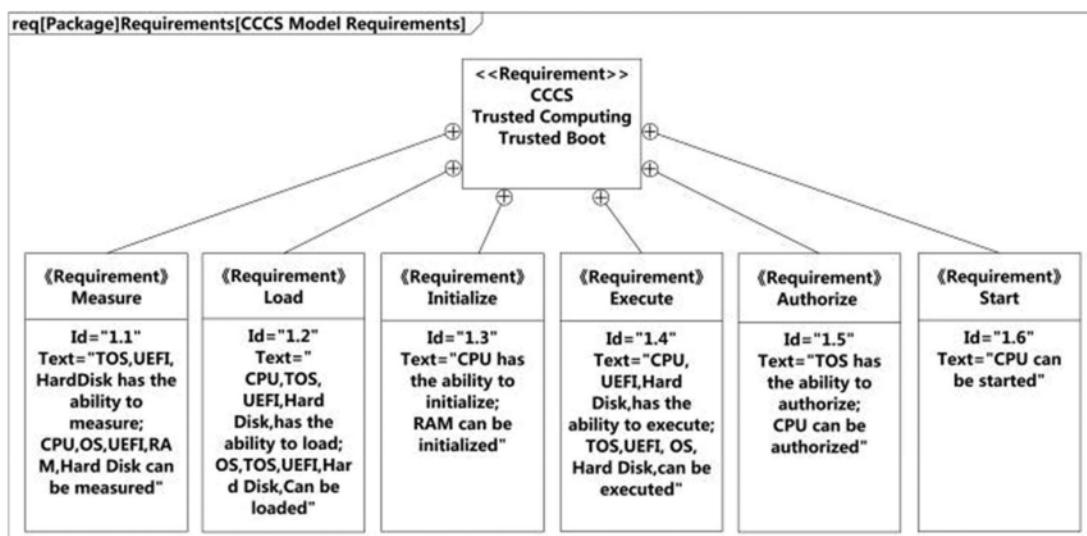


图 2 完全自主计算系统需求视图

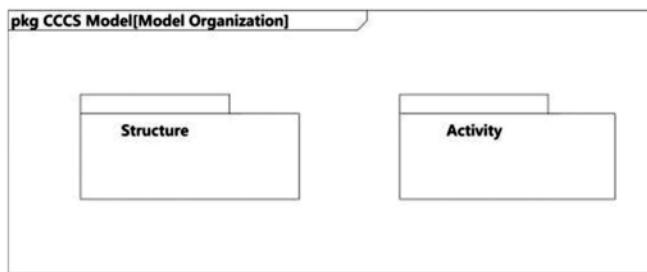


图 3 完全自主计算系统形式模型组织视图

4.2.2 形式模型的结构视图

形式模型的结构视图用于描述构成系统的实体，包括：可信操作系统、操作系统、中央处理器、固件、内存、硬盘，如图 4 所示。

4.2.3 形式模型的关系视图

关系视图用于描述系统在可信启动的过程中构成系统的实体间的交互关系，如图 5 所示。

4.3 完全自主计算系统能力模型

4.3.1 能力模型的组织视图

能力模型的组织视图主要描述能力模型的结构组成。如图 6 所示，能力模型包括实体与功能实体映射关系视图、结构视图和活动视图。

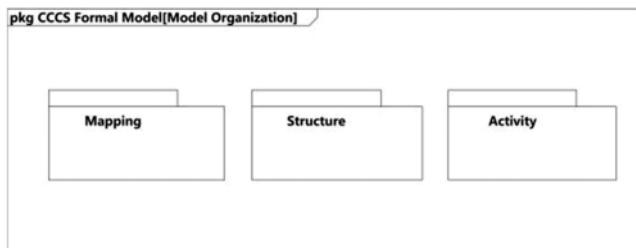


图 6 完全自主计算系统能力模型组织视图

4.3.2 实体与功能实体映射关系视图

映射关系视图主要描述的是根据研究需要将构成

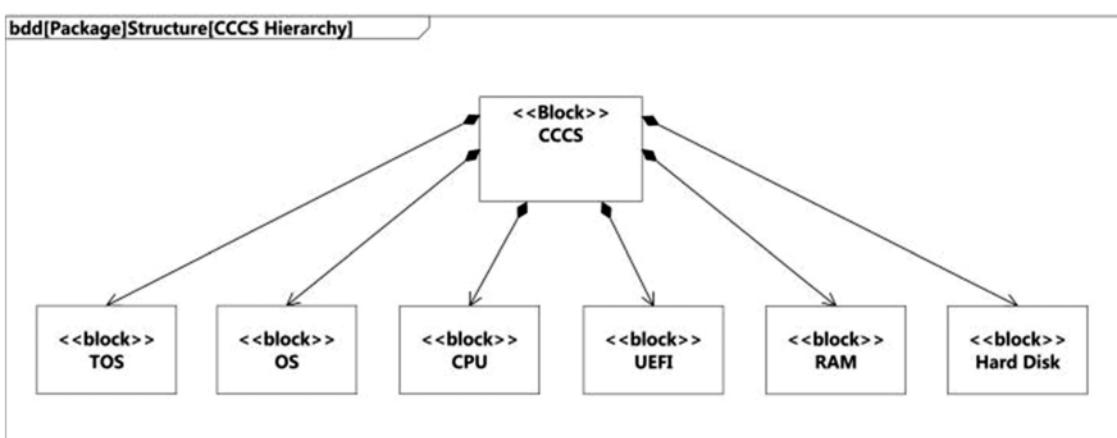


图 4 完全自主计算系统形式模型结构视图

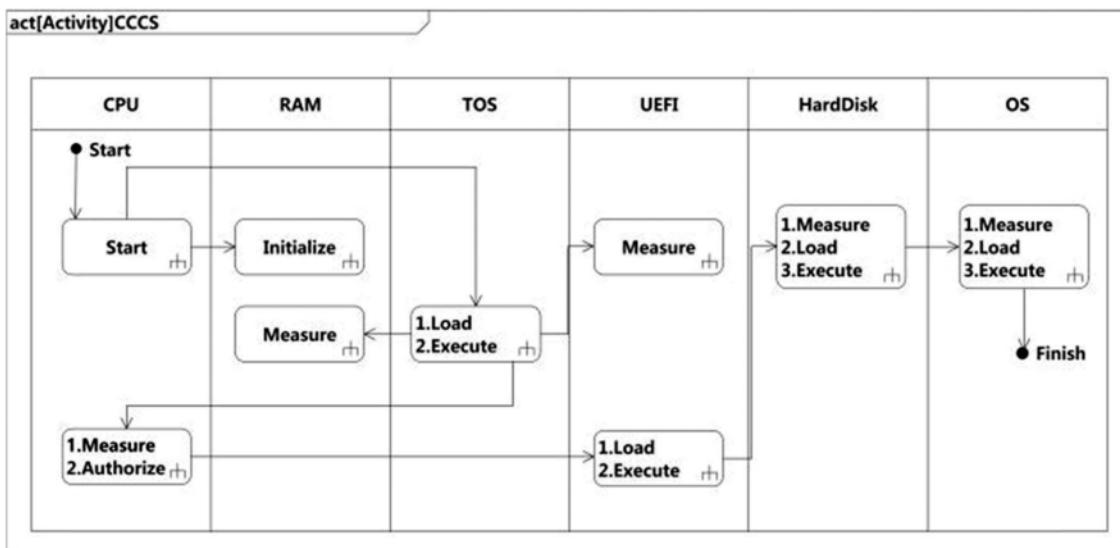


图 5 完全自主计算系统形式模型关系视图

形式模型的基本单元(实体)映射为能力模型的基本单元(功能实体)后两者之间的映射关系,如图 7 所示。

4.3.3 能力模型的结构视图

能力模型的结构视图主要描述的是构成能力模型的功能实体,如图 8 所示。

4.3.4 能力模型的活动视图

能力模型活动视图主要描述功能实体在计算系统进行可信启动的过程中,如何通过有序的信息交互涌现出计算系统的可信启动能力,如图 9 所示。

5 结论

本文将基于模型的系统工程方法应用于计算系统建模研究,提出了一种面向完全自主计算系统的建模方法。该方法将系统工程方法论与完全自主计算系统的特性和优势相结合,提出了完全自主计算系统的建模框架并建立了基于多视图的完全自主计算系统模型。运用该方法对一种可被认为是完全自主计算系统的国产化计算系统进行了基于研究需求的建模研究,结果表明:

(1) 基于模型的系统工程方法建立的系统模型,与传

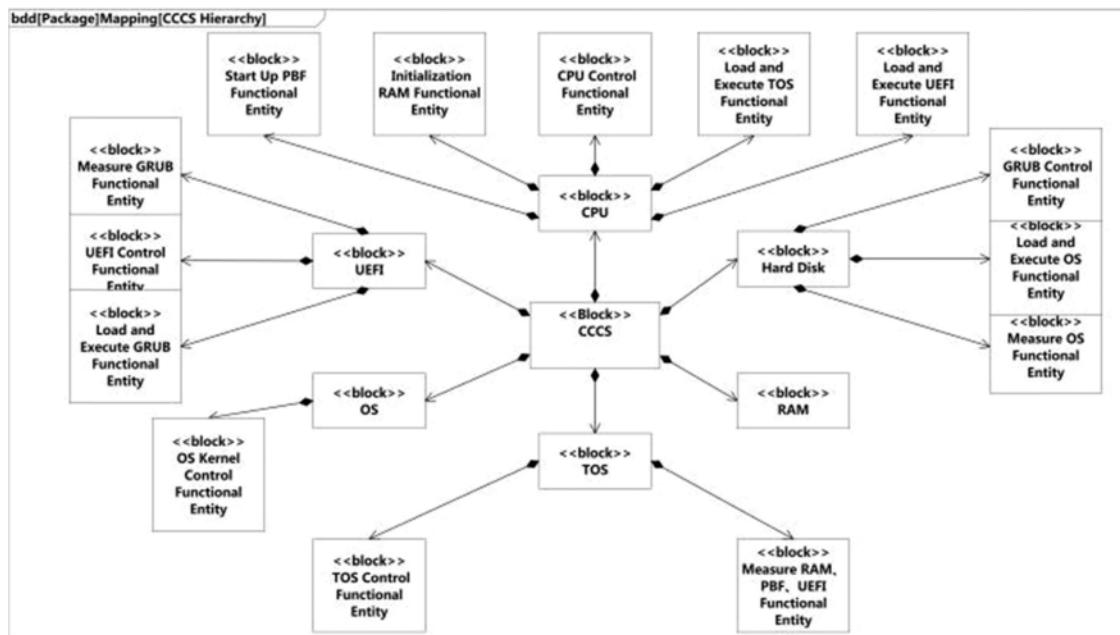


图 7 实体与功能实体映射关系视图

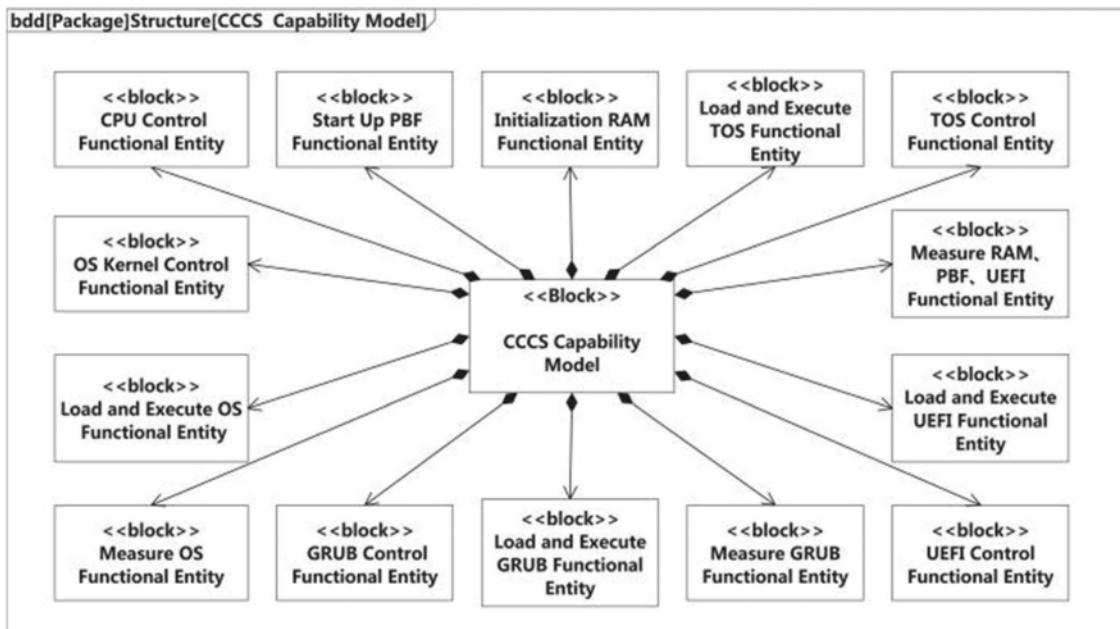


图 8 能力模型结构视图

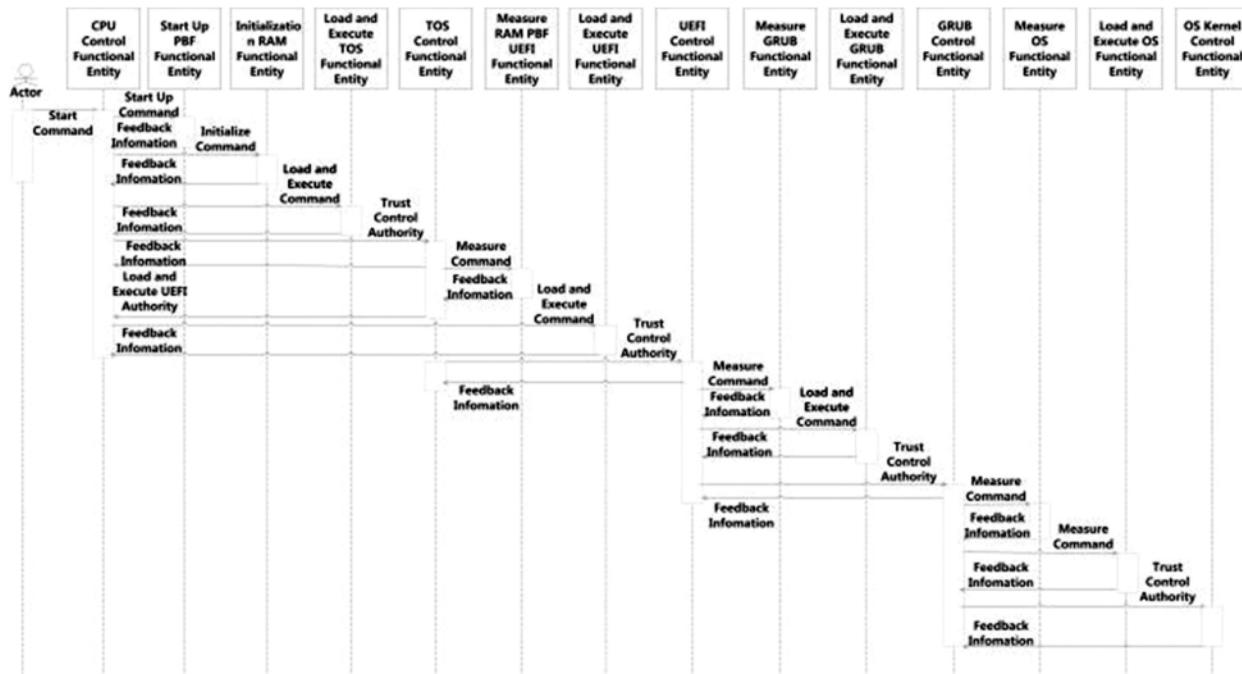


图 9 能力模型可信启动活动视图

统的基于文档的系统工程方法建立的系统文档相比，具有集成度高、结构清晰、一致性好、可复用性高的优点，可以极大地提升科研工作效率。

(2) 该建模方法对于完全自主计算系统建模具有有效性，为下一步研究如何通过计算机仿真的方法研制完全自主计算系统，如何进行系统能力提升和性能优化奠定了基础。

参考文献

- [1] BOHR M A 30 year retrospective on Dennard's MOSFET scaling paper[J]. IEEE Solid-State Circ News, 2007, 12: 11–13.
- [2] 呂平, 刘勤让, 鄢江兴, 等.新一代软件定义体系架构[J]. 中国科学:信息科学, 2018, 48: 315–328.
- [3] SANFORD F, REGINA G, THEO T, et al. INCOSE model based systems engineering(MBSE) initiative[C]//Proceeding of the INCOSE Symposium, 2007.
- [4] CHANG S L, WANG Y. Civil aircraft IVHM system analysis using model based system engineering[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Reliability Systems Engineering, 2017.
- [5] 薛芳芳, 王亮亮, 缪炜涛, 等.基于 MBSE 的民机飞行管理软件设计[J].航空计算技术, 2019, 49(5): 111–116.
- [6] 王扬.基于模型的系统工程在航电系统设计中的研究与

仿真[J].数字技术与应用, 2020, 38(2): 128–130.

- [7] 卢志昂, 刘霞, 毛寅轩, 等.基于模型的系统工程方法在卫星总体设计中的应用实践[J].航天器工程, 2018, 27(3): 7–16.
- [8] 陈红涛, 邓昱晨, 袁建华, 等.基于模型的系统工程的基本原理[J].中国航天, 2016, 32(3): 18–23.
- [9] KERRY M, GOUG H, NIPA P. Employing model-based systems engineering(MBSE)on a NASA aeronautics research project a case study[C]//Proceeding of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018.
- [10] 爱德华·克劳利, 布鲁斯·卡梅隆, 丹尼尔·塞尔瓦.系统架构—复杂系统的产品设计与开发[M].北京:机械工业出版社, 2021.

(收稿日期: 2022-04-23)

作者简介:

姜虯峰(1980-),男,博士,讲师,主要研究方向:计算架构、系统工程。

王长帅(1984-),男,本科,助理工程师,主要研究方向:应用系统架构、数据安全、PKS 架构体系。

罗清林(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:计算机软件。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所