

基于 WordCloud 技术的 MBSE 发展态势研究

董梦如¹, 王国新¹, 鲁金直^{2,*}, 马君达¹, 阎 艳¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京航空航天大学航空科学及工程学院, 北京 102206)

摘要: 基于 IEEE 及国际系统工程协会(International Council on Systems Engineering, INCOSE)社区会刊, 提取与基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)领域相关的 167 篇顶刊的关键词和摘要。采用 Python 及其第三方库 WordCloud 技术, 以可视化形式展示 MBSE 领域研究内容并对 MBSE 发展态势进行研究。研究表明, MBSE 在产品研发生命周期, 应用建模技术来支持系统需求、设计、分析、验证与确认等活动, 在系统架构设计方面具有重要作用, 将 MBSE 与安全性分析、可靠性分析方法结合也是 MBSE 的重要研究内容; 系统建模语言(system modeling language, SysML)和对象过程方法(object process method, OPM)分别是目前 MBSE 研究领域中最受欢迎的建模语言和建模方法; 将 MBSE 方法与本体进行结合是规范 MBSE 模型表达的重要手段, 将 MBSE 与信息物理系统、数字孪生、并行工程领域进行融合研究是 MBSE 的重要发展方向。所提研究为使用 WordCloud 文本分析技术来探索当前的 MBSE 研究提供了技术路线参考, 有助于对 MBSE 的未来发展态势进行预测。

关键词: 基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE); MBSE 顶刊; WordCloud; MBSE 发展态势

中图分类号: N 945

文献标志码: A

DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.02.18

Research on the development trend of MBSE based on WordCloud technology

DONG Mengru¹, WANG Guoxin¹, LU Jinzhi^{2,*}, MA Junda¹, YAN Yan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the IEEE and International Council on Systems Engineering (INCOSE) community journals, the key words and abstracts of 167 top journals related to the field of model based systems engineering (MBSE) are extracted. Using Python and its third-party library WordCloud technology, the research contents in the field of MBSE are displayed visually and the development trend of MBSE is studied. The research results show that MBSE applies modeling technology to support system requirements, design, analysis, verification and validation in the whole life cycle of product research and development. MBSE plays an important role in system architecture design. Combining MBSE with safety analysis and reliability analysis methods is also an important research content of MBSE. System modeling language (SysML) and object process method (OPM) are currently the most popular modeling language and method in the research field of MBSE respectively. The combination of MBSE method and ontology is an important mean to standardize the expression of MBSE model, and the fusion research between MBSE and cyber-physical systems, digital twin and concurrent engineering is an important development direction of MBSE. It provides a technical route reference for using WordCloud text analysis technology to explore the current research field of MBSE, and is helpful for predicting the future development trend of MBSE.

Keywords: model-based systems engineering (MBSE); MBSE top journals; WordCloud; development trend of MBSE

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2023-02-01; 网络优先出版日期: 2023-02-20。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230220.1056.008.html>

* 通讯作者。

引用格式: 董梦如, 王国新, 鲁金直, 等. 基于 WordCloud 技术的 MBSE 发展态势研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(2): 534-548.

Reference format: DONG M R, WANG G X, LU J Z, et al. Research on the development trend of MBSE based on WordCloud technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(2): 534-548.

0 引言

在系统工程实施的早期阶段,系统产生的信息均以文档形式来记录^[1]。随着系统复杂度的显著提升,基于文档的系统工程难以保证产品数据的一致性需求^[2],并且无法进行早期验证。因此,为了更好地实现早期系统设计验证,提升系统研制效率,国际系统工程协会(International Council on Systems Engineering, INCOSE)提出了基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)的概念:“MBSE 是建模的正式应用,以支持系统需求、设计、分析、验证和确认活动,从概念设计阶段开始,一直持续到整个开发阶段和以后的生命周期阶段^[3]。”

随着数字化建模仿真技术的发展^[4-9],MBSE 将在系统工程实践中发挥越来越大的作用^[10-19],在 INCOSE 的远景 2025 报告中,MBSE 方法和工具已经被确定为执行系统工程项目的标准。这导致 MBSE 的研究在新兴的标准、科学期刊和论文^[20-30]、国际会议和该领域的学术项目中显而易见^[30-33]。

Akundi 等^[34]通过使用文本挖掘技术,从 IEEE Explore、Science Direct、Wiley Publishers、Web of Science 中收集了 1995 年到 2020 年间与 MBSE 研究相关的 2 380 篇文献,对 MBSE 领域的研究进行了概述。其通过对收集文献的摘要及其出版日期进行分析,主要强调了 MBSE 中关键技术频率随时间的变化,从频率和上下文的角度总结了 MBSE 的研究者和实践者最常提到的工具、语言和图表,将文献按照建模语言、建模工具、建模方法类别进行分类,并描述了 MBSE 文献归入的 6 个主题。

目前,多种技术可对文献进行分析,词云方法是文献分析的技术之一。词云又称文字云,是对文本数据进行处理,在视觉上突出呈现文本数据中多次出现的“关键词”,形成关键词的渲染,形成类似云一样的彩色图片^[35]。利用词云方法对文章进行分析,可以过滤掉大量无用信息,使得文章阅读者只要扫一眼“词云”就可以领略文章的主旨^[36],可以在阅读之前帮助理解研究,方便非专业人士读取有效的信息,为领域研究人员提供高质量的信息。

词云在文本数据分析中有着广泛的应用。Abazi 等^[37]采用词云技术对半个世纪以来计算机科学研究出版物的标题进行分析,更快、更容易地追踪并展示了计算机科学研究主题随时间变化的规律。Jo 等^[38]提出了一种针对研究论文和报告的可视化方法,应用词云使得用户可以快速掌握文章的关键内容。

关于词云的生成技术,目前网络上有许多词云在线生成的软件,例如“微词云”“文字云”“WordArt”等。虽然这些技术可以快速地制作词云,但存在很多限制,例如:导出的词云图片具有水印;不支持直接导入文件或只支持导入指定格式的文件进行词云渲染;渲染的内容非常有限,如导入的文件

大小不能超过 2 M;词云乱码现象的产生等;这些限制给用户使用带来了极大的不便,尤其是针对数据量较大的文本,往往无法实现词云的正确生成。WordCloud 库是 Python 专门用来制作词云图的第三方库^[39],利用 WordCloud 库可以快速地进行词云绘制,并且 WordCloud 库好学易懂、使用较为简单、绘图相对灵活、可自行设置背景图片和指定使用字体^[40],既能够带领初学者迅速入门、又能满足技术人员较高的使用要求^[41]。相对于在线软件,WordCloud 库没有上述限制,可以针对大量文本数据进行友好分析。在词云分析中,使用 Python 的第三方库 WordCloud 生成词云的技术已经被广泛使用。汪言^[41]采用 Python 的 WordCloud 技术生成了《“十四五”规划》的词云,清晰、直观地展现了其中的内容,帮助阅读者迅速、便捷地获取重要信息。唐婷^[42]分别以中英文文章为例验证了基于 Python 生成的词云图片具有良好的效果,能体现词云的优点和价值。

基于此,本文采用 WordCloud 文本分析法,以 IEEE 及 INCOSE 社区的 MBSE 相关顶刊为基础,对国际 MBSE 领域的高质量文章进行数据梳理与分析,采用词云图的方式直观地展示该研究领域文章的主要内容,并对 MBSE 的发展态势进行分析探索。对 MBSE 的概念进行了阐述,对 MBSE 的研究内容进行了探索,以及对 MBSE 常用建模方法、建模语言、建模工具进行了分析归纳,对 MBSE 的发展态势进行了研究。本文为 MBSE 的进一步探索和未来研究方向奠定了基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究的数据源于 IEEE 及 INCOSE 社区中与 MBSE 相关的核心会刊,检索时间截止至 2022 年 10 月 31 日。首先,借助 Google Scholar 平台,以“Source:“IEEE Transactions”,MBSE”字段为检索条件,共计得到 59 篇检索结果;以“Source:“IEEE Systems Journal”,MBSE”字段为检索条件,共计得到 42 篇检索结果;以“Systems Engineering Journal INCOSE”字段为检索条件,进入 Systems Engineering INCOSE 社区官网,再以“MBSE”字段为检索条件,共计得到 99 篇检索结果。其次,对检索得到的共计 200 篇顶刊的 PDF 格式文档进行下载。之后,对所下载文章与 MBSE 的相关性进行检验,发现在 IEEE Transactions 中的 59 篇文章中有 15 篇与 MBSE 相关性较低;IEEE Systems Journal 中的 42 篇检索结果中有 1 篇与 MBSE 相关性较低;Systems Engineering Journal INCOSE 中的 99 篇检索结果中有 17 篇主要是对系统工程期刊的介绍,与 MBSE 相关性较低。将这些与 MBSE 相关性较低的 33 篇文章进行删除,最终保留与 MBSE 相关度较高的 167 篇文献,并将其作为研究对象。

综上,会刊名称及其对应 MBSE 文献数量如表 1 所示。

表 1 会刊名称与对应 MBSE 文献数量

Table 1 Name of the journal and the corresponding number of MBSE literatures

会刊名称	文献数量
《IEEE Systems Journal》	41
《IEEE Transactions》	44
《Systems Engineering Journal INCOSE》	82

其中,《IEEE Transactions》下存在多个类别,如《IEEE Transactions on Engineering Management》、《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems》等。对《IEEE Transactions》中的文献按照类别进行细分,得到不同类别《IEEE Transactions》对应的 MBSE 文献数量如表 2 所示。

表 2 《IEEE Transactions》会刊分类与对应的 MBSE 文献数量

Table 2 Classification of IEEE Transactions journal and number of corresponding MBSE literatures

会刊名称	文献数量
《IEEE Transactions on Antennas and Propagation》	1
《IEEE Transactions on Automation Science and Engineering》	2
《IEEE Transactions on Computational Social Systems》	1
《IEEE Transactions on Computers》	1
《IEEE Transactions on Education》	2
《IEEE Transactions on Engineering Management》	10
《IEEE Transactions on Industrial Informatics》	3
《IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems》	1
《IEEE Transactions on Network Science and Engineering》	1
《IEEE Transactions on Plasma Science》	3
《IEEE Transactions on Professional Communication》	1
《IEEE Transactions on Reliability》	2
《IEEE Transactions on Software Engineering》	4
《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems》	7
《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)》	2
《IEEE Transactions on Transportation Electrification》	1
《IEEE Transactions on Vehicular Technology》	1
《IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics》	1

由表 2 可知,《IEEE Transactions》下的多个类别均有 MBSE 的相关研究,体现了 MBSE 研究范围的广泛性。

1.2 研究方法

本文采用 Python 的第三方库 WordCloud 方法进行 MBSE 文献的词云可视化分析。

使用 Python 及其第三方库 WordCloud 技术进行文本分析的主要研究方法过程如图 1 所示。

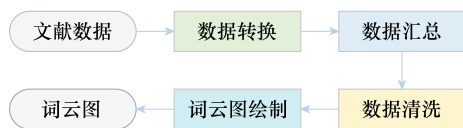


图 1 主要研究方法

Fig. 1 Main research methods

1.2.1 数据转换

数据转换是将数据从一种格式转换为另一种格式的过程。数据转换为数据汇总、分析等活动奠定了重要的基础。本研究中,由于检索所得文献均为 PDF 格式,为了便于进行分析,使用 PDF 转 TXT 在线转换工具将检索最终保留的 167 篇 PDF 格式的文献转换为 TXT 格式的文档。

1.2.2 数据汇总

在数据处理过程中经常需要对大量数据进行汇总,数据汇总是指根据需求将分散的数据汇总到一起。在数据汇总前,一般按照某一标准或要求对所需数据进行分类,之后对所得各类数据按要求进行汇总。本研究中,在将检索最终保留的 167 篇文献 TXT 格式化后,首先按照会刊分类标准将其进行分类汇总,之后根据研究内容,分别从文献中的关键词及文献的摘要两个模块进行分类汇总。

1.2.3 数据清洗

数据清洗是对脏数据进行检测和纠正的过程,是进行数据分析和管理的基石^[43]。数据清洗包括删除重复的数据信息、纠正数据中存在的错误及缺失值,从而保证数据的准确性和一致性,便于后续的研究。本研究主要对文章中存在的重复值删除其重复信息,如缩略词 MBSE 后的括号注释(model based systems engineering),并对转换过程中存在的缺失值进行修正,以及对无意义的词进行删除,以保证研究的准确性。

1.2.4 词云图绘制

“词云图”绘制的基本原理为:基于单词库将整个文本切分为不同单词片段,同时对同一单词在文本中出现的次数进行统计;之后根据词频大小,将单词按不同字体大小和颜色以图像的形式呈现,词频越高,单词的呈现方式越凸显^[41]。

本研究基于 Python 环境,引入第三方库 WordCloud 进行词云图的绘制。Python 不仅具有功能强大的标准库,同时还支持近 15 万的第三方生态库^[44],在 WordCloud 库中,词云被视为一个 WordCloud 对象,wordcloud.WordCloud() 代表一个文本对应的词云。词云的形状、大小、颜色等性质可通过参数配置实现。利用 WordCloud 绘制词云图的步骤如图 2 所示。

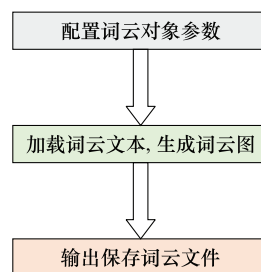


图 2 词云图绘制步骤

Fig. 2 WordCloud chart's drawing steps

首先,通过 wordcloud.WordCloud 函数设置词云对象参数;之后通过 wordcloud.generate(text) 函数生成词云;

总到一起,之后将汇总的各类摘要 TXT 文档合并为一个总的摘要 TXT 文档,为下一步处理奠定数据基础。

2.2.2 数据清洗

摘要研究与关键词研究中的数据清洗步骤类似。首先,通过 Python 编程将汇总的摘要中的单词全部转换为小写字母格式。随后,将常见专有名词改用缩写形式表示,并将缩写保留大写形式,如表 6 所示。然后,将这些单词后可能存在的重复注释删除。

之后,对上一步清洗后的摘要中的单词及其出现频次进行统计排序,考虑摘要总词数、单词出现频次以及单词与 MBSE 的相关度 3 方面因素,取频次由高到低排序的前 400 个单词进行清理和分析,对清理后的单词进行降序排序,根据清理排序结果,选取频次最高的前 100 个单词作为分析的基础。具体步骤为:首先,删除前 400 个单词中如“the”“and”等没有实际意义的冠词、连词,以及“system”“MBSE”

等重复主题的词,以及其他对 MBSE 分析无关的词汇,如表 7 所示;然后,将剩下的单词按频次由高到低进行排序,合并语义相同或相近的单词,如表 8 所示;最后,取前 100 个单词及其出现频次作为词云图分析的参考数据,如表 9 所示。

表 6 单词对应缩写转换(摘要)

Table 6 Corresponding abbreviation conversion of words (abstract)

单词	缩写
model-based systems engineering	MBSE
systems engineering	SE
systems modeling language	SysML
system of systems	SoS
object process method	OPM
cyber-physical systems	CPS
model-driven development	MDD
set-based design	SBD

表 7 对 MBSE 分析没有实际意义的词汇(摘要研究)

Table 7 Words that have no practical significance for MBSE analysis (abstract research)

单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次
the	2 039	article	53	across	27	over	17	reduce	14
and	1 249	was	51	there	27	proposes	17	called	14
of	1 197	s	51	program	27	focus	17	introduced	14
to	945	have	51	both	27	making	17	identified	14
a	799	use	50	within	27	objective	17	increasingly	14
in	598	through	49	problem	27	large	17	assess	14
system	440	their	49	then	26	adoption	17	must	13
is	388	support	46	but	26	1	17	adopted	13
systems	361	also	46	them	25	i	17	against	13
for	360	results	45	many	25	solution	16	chain	13
this	323	were	44	developed	25	changes	16	should	13
that	239	each	42	demonstrate	25	enables	16	applications	13
as	225	into	42	improve	24	several	16	gaps	13
are	225	not	41	propose	24	review	16	3	13
with	212	approaches	41	literature	24	enable	16	same	13
an	204	benefits	39	define	24	developing	16	provided	13
engineering	203	two	38	present	24	found	16	fundamental	13
MBSE	195	presents	36	may	23	number	16	help	13
on	184	work	35	first	23	community	16	base	13
based	175	project	35	high	23	requires	16	traditional	13
by	174	however	34	key	23	control	16	common	13
we	160	well	34	example	22	including	16	recent	13
approach	148	current	33	they	22	practitioners	16	up	13
be	147	product	33	practices	22	supported	16	associated	13
from	114	during	33	finally	22	overall	16	defined	13
can	110	practice	33	effort	22	will	16	configurations	13
paper	109	our	33	theory	22	therefore	15	relevant	13
research	105	human	32	implementation	21	network	15	necessary	13
analysis	99	when	32	way	21	increasing	15	implemented	12
used	96	critical	32	provides	21	designers	15	given	12
which	91	most	32	activities	21	specifically	15	selected	12
using	85	application	32	better	20	being	15	make	12

续表 7

Continued Table 7

单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次
case	80	order	31	technology	20	real	15	useful	12
has	77	applied	31	existing	20	aspects	15	than	12
SE	77	challenges	31	behavior	19	further	15	any	12
these	72	set	31	three	19	describes	15	characteristics	12
study	70	engineers	31	address	19	some	15	those	12
between	69	other	31	only	19	include	15	goal	12
how	68	one	30	important	19	planning	15	defense	12
proposed	68	future	30	conducted	19	ability	15	nfrs	12
such	68	early	30	thus	19	capabilities	15	out	12
at	62	presented	30	about	19	types	14	facilitate	12
new	61	concepts	29	centric	18	best	14	means	12
it	61	techniques	29	change	18	properties	14	attributes	12
or	57	show	29	2	18	often	14	survey	12
method	57	while	29	among	18	performed	14	difficult	12
been	56	concept	28	required	18	designed	14	demonstrates	12
different	56	studies	28	trade	18	still	14	although	12
more	55	all	28	projects	18	e	14	analyses	12
its	55	provide	27	related	18	experience	14	—	—

表 8 合并语义相似的单词(摘要研究)

Table 8 Merging words with similar semantics (abstract research)

合并前	合并后	合并前	合并后
design, designs	design	needs, need	need
model, models, modeling	model	industry, industrial	industry
development, develop	development	stakeholders, stakeholder	stakeholder
process, processes	process	assessment, assess	assessment
architecture, architectures, architectural, architects	architecture	effective, effectively, effectiveness	effective
requirements, requirements	requirement	cost, costs	cost
methodology, methodologies, methods	methodology	patterns, pattern	pattern
complex complexity	complex	evaluation, evaluate	evaluation
level, levels	level	scenarios, scenario	scenario
integration, integrated, integrating	integration	standards, standard	standard
language, languages	language	efficient, efficiency	efficiency
tools, tool	tool	stage, stages	stage
domain, domains	domain	operation, operations	operation
decision, decisions	decision	—	—

表 9 摘要前 100 单词及其频次

Table 9 Top 100 words of abstract and their frequency

单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次
model	504	lifecycle	41	functional	27	infrastructure	18
design	308	management	40	potential	26	thinking	18
development	167	knowledge	40	metrics	25	communication	18
methodology	145	components	39	phase	25	generation	18
architecture	140	verification	39	digital	25	constraints	18
process	139	specific	38	validation	25	document	17
complex	132	industry	37	environment	24	CPS	17
requirement	116	safety	35	context	24	traceability	17
framework	84	assessment	34	state	24	utility	17
integration	76	definition	34	value	24	function	17
SysML	73	quality	34	operation	23	enterprise	16

续表 9

Continued Table 9

单词	频次	单词	频次	单词	频次	单词	频次
tool	69	efficiency	33	multiple	23	mission	16
level	68	stakeholder	33	test	23	capability	16
language	67	pattern	33	structure	23	heterogeneous	16
simulation	67	software	33	identify	21	interoperability	16
effective	51	scenario	30	physical	21	metamodels	15
cost	51	evaluation	30	failure	20	optimization	15
performance	50	stage	29	reliability	20	dynamic	14
information	50	standard	29	field	20	relationships	14
SoS	49	specification	29	technical	20	MDD	14
domain	44	various	29	uncertainty	19	object	14
decision	43	formal	29	OPM	19	ontology	14
need	42	time	28	space	19	automated	14
conceptual	41	elements	28	transformation	19	quantitative	13
data	41	operational	28	service	18	SBD	13

2.2.3 词云图绘制

导入 Python 的第三方库 WordCloud,以数据清洗环节中删除无意义单词后的总摘要的 TXT 文档为词云对象,对词云参数进行配置,并依据表 7 添加除 WordCloud 默认停止词之外的停止词,设置词云图显示的最大单词数量为 100,绘制摘要词云图如图 4 所示。

2.3 词云图结果分析

2.3.1 关键词词云图分析

通过 167 篇 MBSE 领域文献的关键词词云图图 3 可发现,单词“model-based”在图中最为显眼,体现了模型在 MBSE 中的核心地位,模型是 MBSE 与传统系统工程的重要区分点。在 MBSE 中,“模型”是唯一的真相源,反映了系统开发的状态^[45]。模型需要体现多个互补的、相互兼容的视角,从多个角度来回答利益相关者的问题。单词“design”在图中的显眼程度仅次于“model-based”,体现了 MBSE 方法在系统设计中的广泛应用,如何应用 MBSE 方法提高系统设计的效率是 MBSE 领域一直关注的研究话题。

建模语言、建模方法和建模工具是 MBSE 的三大支柱。从关键词词云图中可以清晰地观察到“SysML”“UML”和“OPM”。SysML 是 INCOSE 和对象管理组织(object management group,OMG)推出的一种标准化建模语言,统一建模语言(unified modeling language,UML)是软件工程的主流语言,SysML 通过对 UML 进行重用和扩展,形成了面向系统工程的统一建模语言。对象处理方法(object process method,OPM)是一种领先的整体概念建模方法,用于复杂系统、产品、服务和流程的架构、设计和分析^[46],是复杂系统建模的推荐方法。观察结果表明 SysML 是当前 MBSE 领域最受欢迎的建模语言,与 Li 等^[47]采用计量分析的方法对 1993 年至 2022 年与 MBSE 相关的出版物文献进行分析所得的结果一致;OPM 是当前 MBSE 领域常用的建模方法。同时,单词“tools”和“methodology”的出现也体现了 MBSE 工具和方法论是当前 MBSE 领域研究的关键内容。

在图 4 中,尚未观察到建模工具的具体内容,针对不同的建模语言和建模方法论,建模工具种类多样,开发统一的建模工具是建模工具发展的最终趋势。此外,当前正式的 MBSE 建模工具多为国外工具,开发具有自主知识产权的国内 MBSE 建模工具具有必要性和紧迫性。

从图 4 中可观察到“architecture”一词,架构是系统工程的重要概念,设计良好的系统架构以及构建完整的系统架构模型是应用 MBSE 方法的首要任务。设计的系统架构是否能够满足系统的需求也是检验应用 MBSE 方法有效性的关键手段。INCOSE 指出:MBSE 的有效开展,必须建立在对架构的形式化描述基础上。

此外,从图 4 中可观察到“process”和“management”,MBSE 的应用涉及系统的多个过程,反映了 MBSE 的整体性,系统工程包括技术过程和管理过程两个层面^[48]。技术过程层面主要是系统模型的构建、分析、优化、验证工作,在管理过程层面,包括对系统建模工作的计划、组织、领导和控制^[48]。在应用 MBSE 方法时需要注重对建模过程和管理过程的管理,以便更好地应对复杂系统的挑战。

“requirement”在图 4 中的位置显著,突出了其在应用 MBSE 方法的过程中正确识别系统需求、利益相关者需求、业务需求的重要性,需求是系统设计的基础,贯穿着系统开发的全生命周期。

“software”的出现,体现了软件领域与 MBSE 的紧密联系,MBSE 方法可以应用于软件、硬件、机械等不同领域的设计,改善系统工程师、硬件/软件开发人员和各种专业工程师之间的沟通。AKUNDI 等^[49]通过对 MBSE 的使用和认知的调查,得到如下结论:在软件工程领域,MBSE 仅被视为过程支持和改进工具,使用 MBSE 的好处有提高生产力、系统质量、设计和性能等。因此,在软件工程领域进一步扩大 MBSE 的使用范围,凸显在软件领域应用 MBSE 方法的优势,是将 MBSE 应用于软件领域的发展方向。

图 4 中还出现了专有名词“SoS”,体系或系统的系统(system of systems, SoS)是面向任务或专用系统的集合,

从图 4 中观察到单词“analytical models”,金长林等^[56]提出把系统模型分为描述模型和分析模型两大类,其中系统描述模型用于对系统的架构和行为进行描述,系统的分析模型用于对系统的行为进行分析。DUNCAN 等^[11]也指出将描述性模型和分析性模型链接在一起,使系统设计者能够快速运行大范围的系统配置,从而可以可视化、分析和优化结果,以满足系统要求。

“complex”出现在图 4 中,体现了系统的发展趋势。随着系统需求的不断提高以及大规模系统的集成,系统复杂程度不断增加。而 MBSE 的出现恰恰是为了解决复杂系统工程的问题,随着系统复杂化程度的提高,MBSE 的应用范围也将不断扩大。

“ontology”的出现意味着本体在 MBSE 领域中的应用。本体是共享概念模型的明确形式化规范说明^[57],通过本体语言,可以明确定义系统设计的语义及其之间的关系。在 MBSE 中应用本体,可以对模型进行规范化的表达,加强模型之间的信息交流。

“integration”体现了 MBSE 的应用需求。MBSE 的实现过程涉及许多不同的建模工具,不同的建模工具支持的建模语言不同,这导致了模型异构现象的产生,实现不同工具、不同模型之间的语义集成和数据集成是 MBSE 的重要研究方向。此外,将 MBSE 方法与其他方法,如安全性分析、可靠性分析等进行集成^[58],也是不断优化 MBSE 方法的重要途径。

从图 4 中观察到了单词“object-oriented”,MBSE 的本质是面向对象的系统工程,MBSE 的工作流程,应以面向对象为指导原则来探索和实践^[59]。

词云中“safety”和“security”的出现,强调了模型驱动的分析方法正在成为复杂系统安全性、可靠性设计所依赖的重要技术手段^[60]。同时,将安全性分析应用于系统架构模型,可以在系统设计早期发现潜在的风险。安全性分析与 MBSE 的集成研究,是未来 MBSE 的发展方向之一^[61-63]。

此外,从图 4 中观察到单词“knowledge”,采用 MBSE 方法可以实现知识的无二义性表达,提高知识的可重用性,并且 MBSE 方法比非 MBSE 方法更全面地掌握了架构知识^[64]。MBSE 被确定为利益相关方之间知识创造、知识共享和知识利用的促进者^[65]。

单词“digital”的出现体现了数字化的趋势,随着数字化技术的发展,应用 MBSE 方法促进数字化转型已经成为当前的研究热点^[66-67]。

2.3.2 摘要词云图分析

从摘要词云图图 4 中,发现,“model”“design”“requirements”“SysML”“architecture”“complex”等单词较为显眼,与关键词词云图观察结果一致,进一步验证了关键词词云图分析的代表性。除了与关键词词云中观察到的单词一致的结果外,单词“development”在图 4 中占据了显著的位置,随着系统复杂度的增加,在复杂系统开发中引入 MBSE

方法已经成为系统开发的趋势。从 INCOSE 对 MBSE 的定义中可知,MBSE 关注系统开发的全过程。在开发过程中应用 MBSE 方法,可以管理整个开发生命周期过程,有效降低研制成本,加快开发速度^[68-70]。

除关键词词云图观察到的“methodology”“tool”外,摘要词云图中还出现了单词“language”“modeling language”,进一步强调了建模语言、方法、工具在 MBSE 研究中的重要性。

此外,在图 4 中观察到了“framework”,体现了对 MBSE 建模框架以及方法框架的探索和研究,MBSE 为解决系统问题提供了一个基于模型的框架。例如,CHONG^[71]等基于 MBSE 方法提出了一种复杂航天器系统综合可靠性设计框架。BOGGERO^[72]等提出了一种复杂系统架构敏捷定义的 MBSE 架构框架,通过 MBSE 方法简化、改进和加速其架构定义和建模。基于 MBSE 方法的框架研究已经成为解决复杂系统问题的重要手段,框架也体现了 MBSE 方法的整体性。

单词“efficiency”“effective”的出现,表明了 MBSE 方法可以有效提升系统研制效率,提升系统研制效率也是在系统开发过程中应用 MBSE 方法的最终目的。

单词“lifecycle”的出现,强调了在产品研发生命周期中应用 MBSE 方法的重要性。鲁金直等^[73]通过对 MBSE 的应用调查发现,仅有 47% 的反馈人在产品研发生命周期中应用 MBSE。因此,在 MBSE 研究中,将 MBSE 方法应用到产品研发生命周期十分重要。

“domain”体现了 MBSE 应用的多领域的特点。引入特定领域模型可以增强 MBSE 的适用性,并提高其严谨性^[74]。但如何解决不同领域模型集成的问题是 MBSE 亟待解决的问题。

“stakeholders”利益相关者在 MBSE 方法的实施过程中占据重要的地位。MBSE 主要用于系统利益相关者需求和要求的定义和建模,应用 MBSE 方法的第一步就是要识别系统的利益相关者,收集其需求和开发系统需求,为后面的需求建模、架构设计奠定基础^[75]。

在图 4 中观察到了单词“definition”“decision”,定义和决策是应用 MBSE 方法解决系统设计问题的两个方面。如何应用 MBSE 方法进行更好的问题定义、架构定义,支持系统设计决策,是系统设计开发关注的问题。

除了“requirement”,在图 4 中还观察到了单词“need”,在实施 MBSE 方法的过程中,需求的正确定义是 MBSE 用于系统设计开发的基础。由 INCOSE Guide for Writing Requirements 2019 V3 可知,需求是由概念转化成要求再转化而来的。概念是一种书面或图形表示,简明地表达了一个系统或产品需要解决的问题。要求是将一个或多个概念形式转换为对系统功能执行的一致期望的结果。需求是将一个或多个要求或需求形式转化为系统履行某种功能必须满足的结果。在产品开发的过程中,概念被提出,通过分析转化为要求,被记录下来,再通过分析转换为需求。需求

和要求在系统设计开发中具有重要地位。

“functional”和“physical”的出现体现了系统架构建模的主要流程和内容,系统架构建模主要包括功能架构、逻辑架构和物理架构定义。

单词“mission”“scenario”“operation”“function”“structure”“component”“phase”“level”的出现,体现了 MBSE 方法实践的层级化,MBSE 涵盖对使命、场景、运行、功能、结构、组件的定义和描述。

从图 4 中观察到了“conceptual”“conceptual design”,概念设计是系统设计的初始阶段。概念设计阶段是系统架构评估物理架构概念的关键阶段^[76]。目前,概念设计阶段主要存在需求不明确、缺乏仿真验证等问题,如何有效解决这些问题是 MBSE 方法应用的重要内容。

此外,图 4 中还出现了单词“assessment”和“evaluation”。由于信息在多个文档之间传播,当出现设计变更时,传统基于文本的系统工程很难对变更影响进行准确评估,这使理解系统的一个特定方面来执行必要的可追溯性和评估变更的影响变得非常困难。采用 MBSE 方法对系统设计中的要素以及系统特性进行正确评估和优化,是提升系统研制效率的重要途径。同时,将评估方法引入系统建模,应用 MBSE 方法进行系统性能评估及系统架构模型评估能够显著提高设计优化结果和开发决策效率,降低设计和评估成本^[14]。

“cost”“quality”和“time”“constraint”的出现体现了在应用 MBSE 的过程中,成本、质量和时间的约束对 MBSE 的重要性、成本的降低与否以及时间的减少与否都是 MBSE 方法应用的有效性检验标准。降低系统设计开发成本以及减少开发时间也是 MBSE 的重要优点。而与系统高度相关的质量特性通常依赖于系统架构的设计,系统工程师已经开始通过考虑质量和时间约束来定义最相关的系统架构^[76]。此外,在图 4 中观察到单词“performance”,系统性能是系统设计过程中的重要指标。在系统设计过程中,必须平衡几个相互竞争的目标,如确保设计的可行性、最小化成本、进度和性能风险,同时实现利益相关者的价值,使得设计的系统满足需求^[77]。

“formal”是 MBSE 定义中的核心概念之一。MBSE 提供了一个形式化的建模方法来支持系统需求、设计、分析、验证和确认等活动^[48]。通过形式化表达,有助于减轻以文档为中心的方法所带来的一些挑战^[78]。同时,形式化的建模还为项目利益相关方之间的交流提供了统一的、无二义性的产品,为后续项目的重用和快速改进提供了模块化的模型支持^[79]。但形式化建模的背后需要用到建模工具、建模语言和建模方法论来支撑,存在一定的技术门槛。如何更好地采用 MBSE 方法进行形式化建模,需要关注建模语言、方法论和工具。

“information”和“data”的出现,说明了 MBSE 模型信息数据之间的交互、共享、重用的重要性。目前,由于 MBSE 建模语言的异构,如何使 MBSE 模型信息更好地传递,实现

互联互通也是 MBSE 方法不断优化重点。

此外,“specification”和“standard”的出现,意味着规范、标准在 MBSE 研究中的必要性,缺乏正式的规范和标准,很难支持 MBSE 模型的统一表达和信息交流。满足系统规范也是 MBSE 的研究内容之一。

从图 4 中观察到单词“thinking”,结合汇总的摘要进行分析,“thinking”为“systems thinking”系统思维,是早期问题定义阶段的重要内容,MBSE 的使用有可能降低在系统思维向系统工程活动转变过程中可能发生的信息失真或丢失。同时,MBSE 方法的实践过程也与系统思维密不可分。

“communication”和“understanding”的出现体现了在系统工程活动中,沟通与理解的重要性。沟通是工程系统成功的基础,其使系统的利益相关者之间能够进行互动^[80]。应用 MBSE 方法可以有效改善利益相关者之间的沟通,提高沟通的有效性^[49]。

从图 4 中观察到“failure”和“reliability”,系统可靠性和故障分析是系统维护的关键组成部分,实现系统早期可靠性评估,可以有效降低系统开发成本,提高系统的设计效率。模型驱动的分析方法正在成为复杂系统可靠性设计所依赖的重要技术手段^[61]。如何将 MBSE 与可靠性分析方法有效结合以提高分析的效率和准确性,是可靠性分析的发展方向。

“industry”和“aircraft”的出现,体现了 MBSE 的具体应用领域,MBSE 已经被逐步应用于工业领域,尤其是飞机制造领域。

“comprehensive”“specific”“dynamic”“automated”等体现了 MBSE 的全面性、明确性、动态性等特点,以及 MBSE 趋向自动化发展的特点。

单词“heterogeneous”“interoperability”“uncertainty”“traceability”和“transformation”的出现,体现了 MBSE 应用所面临的挑战。建模语言和技术的异构,导致数据互操作性困难,难以实现需求、模型之间的追溯。在 MBSE 中,模型转换是解决模型无缝集成问题的关键组成部分^[81]。

在图 4 中观察到了术语“CPS”,信息物理系统(cyber physical system, CPS)的特征是由软件系统和物理系统的交互产生行为^[82]。与文献[34]对过去 20 年的 MBSE 文章进行研究所获得的结果一致,CPS 是 MBSE 领域的常用术语,CPS 领域对使用 MBSE 支持制造和生产工程活动的兴趣日益增加。

在图 4 中还观察到了单词组“digital twin”,数字孪生用其在数字世界中的数据、功能和通信能力来表示真实的对象或主题^[83]。数字孪生作为一种新兴的连接物理和虚拟世界的技术手段,在实现各行业数字化和智能化转型方面表现日益突出^[84]。MBSE 和数字孪生之间有着密切的联系。MBSE 的三大支柱的使用可以作为数字孪生的起点,通过使用 MBSE 技术可以简化流程^[4]。工程师可以使用适当的 MBSE 工具和语言创建事件驱动或基于代理的仿

真,以研究数字孪生的行为和交互^[85]。进一步探索 MBSE 和数字孪生的融合是当前数字化潮流下 MBSE 发展的趋势。

图 4 中还出现了术语“MDD”,模型驱动开发(model-driven development, MDD)被越来越多地用于许多领域的系统开发,MDD 为通过模型和模型转换建立可追溯性链接提供了新的机会^[27]。MDD 可视作 MBSE 的基础,将模型驱动的方法和系统工程结合形成 MBSE,可更好地应对复杂系统的挑战。

词云图中的“SBD”,基于集合的设计(set-based design, SBD)是一种并行设计方法,非常适用于具有显著不确定性的复杂系统^[86]。文献[86]通过调查 122 篇相关的期刊文章和会议论文,对 SBD 的实践状态进行评估并确定了 SBD 在需求开发、MBSE 方面的研究价值。

3 结束语

3.1 讨论

本文对截止至 2022 年 10 月 31 日的 IEEE 及 INCOSE 社区中与 MBSE 相关的 167 篇核心期刊文献,运用 Python 及其第三方库 WordCloud 技术进行关键词和摘要的词云图分析,总结其与当前存在的国内外 MBSE 相关综述文章的一致性与时歧性如下。

(1) 一致性

在词云图所得结果中,MBSE 与 SoS 的融合研究,MBSE 工具协同、统一的发展方向,在系统全生命周期应用 MBSE,与关锋等^[87]对各国对 MBSE 流程、方法、工具和应用的研究的综述所得结果一致。鲁金直等^[73]在 MBSE 应用调查中发现,当前 MBSE 并没有被应用于系统全生命周期,推断 MBSE 需要涵盖整个项目的生命周期,与本文通过词云图分析得到需要扩大 MBSE 在系统全生命周期中的应用的结果一致;通过调查可获知当前 MBSE 的工业实践在航空领域比较突出,符合在词云图中观察到的“aircraft”的情况。此外,词云图中出现的“reliability”“safety”等与可靠性、安全性分析相关的结果,与胡晓义等^[61]对基于模型的复杂系统安全性和可靠性分析技术的发展综述所得到的结果一致。词云图分析中,SysML 作为当前 MBSE 主要建模语言的出现与 Li 等^[47]对 1993 至 2021 年与 MBSE 相关的文献分析以及 Dong 等^[88]对 MBSE 相关文章的分析所得结果一致。此外,词云图所得 MBSE 与安全性分析、可靠性分析,CPS、SoS、本体的相关研究也与 Li 等^[47]对 MBSE 文献的综述所得结果一致。词云图中的 SysML 与 CPS 也与 Akundi 等^[34]对过去 20 年 MBSE 相关文献的分析所得结果一致。本文与当前存在的国内外 MBSE 相关综述文章的一致性体现了 MBSE 发展的特征、运用 WordCloud 文本分析技术对 MBSE 顶刊进行可视化分析所得结果的高度代表性,以及对 MBSE 未来发展方向预测的准确性。

(2) 分歧性

Li 等^[47]在对 MBSE 文献的综述中提到了并行工程,但并没有涉及到具体的并行设计方法,本文通过对词云图进

行分析,虽然没有观察到并行工程相关单词,但发现并行设计方法 SBD,说明 SBD 与当前 MBSE 研究具有一定的相关性,而 Shallcross 等^[86]在对与 SBD 相关的 122 篇期刊文章和会议论文的调查中,也确定了 SBD 在 MBSE 方面的研究价值。Li 等^[47]强调了 MBSE 文献中的 ISO 标准和规范,本文通过词云图也观察到了标准和规范,但不局限于 ISO 标准和规范,针对 MBSE 制定正式标准和规范具有必要性。此外,相比于其他 MBSE 综述文章,本文强调了时间、成本、质量约束对 MBSE 的重要性,以及运用 MBSE 方法进行评估的内容,采用 MBSE 方法对系统进行评估优化可以有效提高系统设计效率,同时强调了效率的重要性,提高系统设计效率是应用 MBSE 方法的主要目的。本文与当前存在的国内外 MBSE 相关综述文章的分歧性将有利于丰富 MBSE 的研究内容,体现 MBSE 领域研究的发展趋势以及 MBSE 的关注点的变化。

此外,通过研究发现,目前国内外针对 MBSE 的综述文章较少,体现了本文存在的必要性。

3.2 结论

本文对 167 篇 MBSE 顶刊采用 WordCloud 技术进行词云可视化分析,旨在深入了解 MBSE 领域的研究内容、MBSE 建模三大支柱的情况以及 MBSE 的发展态势。研究发现:

(1) 关于 MBSE 领域当前研究内容

模型是 MBSE 的核心,MBSE 通过模型的不同视角来满足利益相关者的需求,实现系统的形式化表达。设计良好的系统架构以及构建完整的系统架构模型是应用 MBSE 方法的首要任务。应用 MBSE 进行系统架构建模的主要内容包功能架构、逻辑架构、物理架构的定义与模型构建。

系统设计是 MBSE 的主要研究内容。需求是系统设计的基础,贯穿着系统开发的全生命周期。一个完整的 MBSE 过程包括了需求、设计、并行、验证与确认等几大工程,但是通过对关键词和摘要的词云图分析,涉及到并行工程的内容较少,只发现了并行设计方法 SBD,因此在 MBSE 的研究内容中,需进一步加强对 MBSE 并行工程的研究。此外,基于模型的仿真、对系统设计中的要素以及系统特性进行正确评估和优化、支持系统决策也是当前 MBSE 的研究内容。质量、成本、性能和时间的约束也成为在应用 MBSE 进行系统设计的过程中需要考虑到因素。

MBSE 的实现过程涉及许多不同的建模工具,不同的建模工具支持的建模语言不同,这导致模型异构现象的产生,实现不同模型之间的语义集成和数据集成是 MBSE 当前以及未来的重要研究内容。

(2) 关于 MBSE 建模的三大支柱

MBSE 建模的三大支柱是 MBSE 领域研究的重点。SysML 是目前 MBSE 领域研究人员使用最多的建模语言,OPM 是 MBSE 顶刊研究中出现频率最高的建模方法,在词云图分析中没有出现具体的建模工具。由于建模语言和建模方法的多样性,导致建模工具种类多样,而不同建模工具

构建的架构模型之间存在异构的问题,因此开发统一的、支持多种建模语言的建模工具是建模工具发展的重要方向。

(3) 关于 MBSE 的未来发展态势

MBSE 的未来发展态势可分为如下几个方面:

(1) 随着系统复杂度的不断提高,MBSE 的应用领域和范围将不断扩大。建立与 MBSE 相关的正式的规范和标准具有重要意义。将 MBSE 方法应用于产品研发全生命周期是 MBSE 的定位,也是未来 MBSE 对应用的要求。

(2) 将 MBSE 与安全性分析、可靠性分析方法结合是优化 MBSE 方法的重要手段。

(3) 在软件工程领域应用 MBSE 方法可以提高系统设计效率和质量,但通过分析发现,目前 MBSE 在软件领域主要作为过程支持和改进工具,未来需进一步扩大 MBSE 在软件工程领域的应用范围。

(4) 将 MBSE 的思想扩展到体系,MBSE 与 SoS 结合形成 MBSOSE,以 MBSE 方法为指导,结合体系工程的特点,开展 MBSOSE 研究,是 MBSE 的重要扩展方向,也是未来体系工程发展的方向。

(5) 随着数字化技术的发展,应用 MBSE 方法促进数字化转型已经成为当前的研究热点。MBSE 和数字孪生的融合是当前数字化潮流下 MBSE 发展的趋势。

(6) MBSE 已广泛应用于信息物理系统,实现 MBSE 与 CPS 的结合,以更好地应用 MBSE 方法支持信息物理系统的构建是 MBSE 在 CPS 应用中的重要发展方向。

(7) 并行工程是 MBSE 的研究内容之一,扩大 SBD 方法在 MBSE 中的应用是提高 MBSE 应用效率的手段。

(8) 将 MBSE 方法与本体进行结合是规范 MBSE 模型表达、提高模型互操作性、提高 MBSE 知识重用的重要手段,未来 MBSE 与本体领域的结合研究将成为 MBSE 研究的重点之一。

本文采用 WordCloud 技术对 MBSE 领域的 167 篇顶刊的关键词和摘要进行分析,从分析的数据来看,当前分析局限于 MBSE 领域顶刊,仅通过关键词和摘要进行分析,分析范围相对较小。采用 WordCloud 技术生成词云图的方法可以直观地展示 MBSE 文献的关键内容,但词云图表达的信息有限。在未来工作中,将在本文的基础上进一步扩大 MBSE 文献分析的范围,探索更加丰富的技术和工具,对 MBSE 发展态势进行进一步探索。

参考文献

- [1] 丁健. 多目标监控的大型无人机综合测控站系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
DING J, Design of large integrated UAV ground control station for multi-target surveillance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [2] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16.
ZHU J, YANG H, GAO Y H, et al. Summary of model based system engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16.
- [3] BJORKMAN E A, SARKANI S, MAZZUCHI T A. Using model-based systems engineering as a framework for improving test and evaluation activities[J]. Systems Engineering, 2013, 16(3): 346-362.
- [4] LOPEZ V, AKUNDI A. A conceptual model-based systems engineering (MBSE) approach to develop digital twins[C]//Proc. of the IEEE International Systems Conference, 2022. DOI:10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
- [5] LAUKOTKA F, HANNA M, KRAUSE D. Digital twins of product families in aviation based on an MBSE-assisted approach[J]. Procedia CIRP, 2021, 100: 684-689.
- [6] MADNI A M, PUROHIT S. Augmenting MBSE with digital twin technology: implementation, analysis, preliminary results, and findings[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2021: 2340-2346.
- [7] MADNI A M, ERWIN D, MADNI C C. Digital twin-enabled MBSE testbed for prototyping and evaluating aerospace systems: lessons learned[C]//Proc. of the IEEE Aerospace Conference, 2021. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438439.
- [8] BICKFORD J, VAN-BOSSUYT D L, BEERY P, et al. Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods[J]. Systems Engineering, 2020, 23(6): 724-750.
- [9] 刘荣荣, 杨敏, 田伟, 等. 数字化协同研制体系在固体动力系统领域的研究及应用[J]. 航天工业管理, 2021(7): 13-18.
LIU R R, YANG M, TIAN W, et al. Research and application of digital cooperative development system in the field of solid power system[J]. Aerospace Industry Management, 2021(7): 13-18.
- [10] BHADA S V, KRISHNAN R. A model centric framework and approach for complex systems policy[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(1): 215-225.
- [11] DUNCAN K R, ETIENNE-CUMMINGS R. A model-based systems engineering approach to trade space exploration of implanted wireless biotelemetry communication systems[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 13(2): 1669-1677.
- [12] TARAILA W, ASUNDI S. Model-based systems engineering for a small-lift launch facility[J]. Systems Engineering, 2022, 25(6): 537-550.
- [13] CALL D R, HERBER D R. Applicability of the diffusion of innovation theory to accelerate model-based systems engineering adoption[J]. Systems Engineering, 2022, 25(6): 574-583.
- [14] KHARRAT K, PENAS O, PLTEAUXR, et al. Integration of electromagnetic constraints as of the conceptual design through an MBSE approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(1): 747-758.
- [15] GREGORY J, BERTHOUD L, TRYFONAS T, et al. Investigating the flexibility of the MBSE approach to the biomass mission[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 51(11): 6946-6961.
- [16] CUI Z Y, LUO M Q, ZHANG C, et al. MBSE for civil aircraft scaled demonstrator requirement analysis and architecting[J]. IEEE Access, 2022, 10: 43112-43128.
- [17] YOUNSE P J, CAMERON J E, BRADLEY T H. Comparative analysis of model-based and traditional systems engineering approaches[J]. Systems Engineering, 2013, 16(3): 346-362.

- aches for architecting a robotic space system through automatic information transfer[J]. IEEE Access, 2021, 9: 107476–107492.
- [18] ANYANHUN A I, AMANOR D N, EDMONSON W W. Architecting an MBSE black-box system model for the physical layer of a visible light intersatellite communication system[J]. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, 2021, 2(4): 168–178.
- [19] WEI J F, GAO G H, DING T, et al. An improved method to requirement analysis of automated cuttings equipment based on MBSE[C]//Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2022, 12261: 829–834.
- [20] ALBERS A, BURSAC N, SCHERER H, et al. Model-based systems engineering in modular design[J]. Design Science, 2019, 5: e17.
- [21] LISCOUET-HANKE S, JAHANARA H, BAUDUIN J L. A model-based systems engineering approach for the efficient specification of test rig architectures for flight control computers[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 5441–5450.
- [22] LU J Z, WEN Y J, LIU Q, et al. MBSE applicability analysis in Chinese industry[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 1037–1051.
- [23] JENKINS Z I. A project-oriented model-based systems engineering (MBSE) approach for naval decision support[J]. Defense AR Journal, 2021, 28(4): 486–487.
- [24] LU J Z, MA J, ZHENG X, et al. Design ontology supporting model-based systems engineering formalisms[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(4): 5465–5476.
- [25] EVIN E, ULUDAG Y. Bioanalytical device design with model-based systems engineering tools[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 3139–3149.
- [26] DICKERSON C E, ROSMIRA R, JI S. A formal transformation method for automated fault tree generation from a UML activity model[J]. IEEE Trans. on Reliability, 2018, 67(3): 1219–1236.
- [27] WANG F, YANG Z B, HUANG Z Q, et al. An approach to generate the traceability between restricted natural language requirements and AADL models[J]. IEEE Trans. on Reliability, 2019, 69(1): 154–173.
- [28] GILLESPIE A, HAILES S. Assignment of legal responsibilities for decisions by autonomous cars using system architectures[J]. IEEE Trans. on Technology and Society, 2020, 1(3): 148–160.
- [29] 王芳, 叶玲, 彭彪. 基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(5): 23–29.
- WANG F, YE L, PENG B. Architectural design and simulation verification platform based on MBSE[J]. Automation & Information Engineering, 2022, 43(5): 23–29.
- [30] 董晓明, 韩研, 王质松, 等. 基于 MBSE 的装备作战概念模型化设计[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 314–322.
- DONG X M, HAN Y, WANG Z S, et al. Modeling design of military equipment operational concepts by MBSE[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 314–322.
- [31] HU Z C, LU J Z, CHEN J W, et al. A complexity analysis approach for model-based system engineering[C]//Proc. of the IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering, 2020: 501–506.
- [32] LU J, CHEN D J, WANG J, et al. Towards a service-oriented framework for MBSE tool-chain development[C]//Proc. of the 13th Annual Conference on System of Systems Engineering, 2018: 568–575.
- [33] LI Z H, LU J Z, WANG G X, et al. A bibliometric analysis on model-based systems engineering[C]//Proc. of the IEEE International Symposium on Systems Engineering, 2021. DOI:10.1109/ISSE51541.2021.9582526.
- [34] AKUNDI A, MONDRAGON O. Model based systems engineering—a text mining based structured comprehensive overview[J]. Systems Engineering, 2022, 25(1): 51–67.
- [35] 武帅, 刘锡峰, 张苗, 等. 基于时间序列及 K-Means 聚类的大学生就业形式分析[J]. 信息技术与信息化, 2021(1): 5–10.
- WU S, LIU X F, ZHANG M, et al. Analysis of student employment forms based on time series and K-Means clustering[J]. Information Technology and Informatization, 2021(1): 5–10.
- [36] 冯与诒. 词云生成系统的构建[J]. 通讯世界, 2019, 26(3): 190–192.
- FENG Y J. Construction of word cloud generation system[J]. Telecom World, 2019, 26(3): 190–192.
- [37] ABAZI B L, KADRIU A, APOSTOLOVA M. WordCloud analytics of the computer science research publications' titles over the past half century[C]//Proc. of the 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, 2020: 887–892.
- [38] JO Y J, KIM E G, SHIN Y J. Graphical keyword service for research papers with text-mining method[C]//Proc. of the International Conference on Compute and Data Analysis, 2017: 185–190.
- [39] 张若琪, 王涵, 闫凌云, 等. 基于 Python 的词云生成研究[J]. 信息与电脑, 2021(5): 201–203.
- ZHANG R Q, WANG H, YAN L Y, et al. Research on word cloud generation based on Python[J]. China Computer & Communication, 2021(5): 201–203.
- [40] 姜华林. 基于 PyQt5 界面的词云制作软件设计[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(13): 74–76.
- JIANG H L. Design of wordcloud production software based on PyQt5 interface[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(13): 74–76.
- [41] 汪言. 基于 Python 的词云生成及优化研究——以“十四五”规划为例[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(19): 23–28.
- WANG Y. Research on generation and optimization of word cloud based on Python—take the text of the 14th Five-year Plan as an example[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(19): 23–28.
- [42] 唐婷. 基于 Python 的词云生成技术分析[J]. 科学技术创新, 2021(23): 77–78.
- TANG T. Analysis of word cloud generation technology based on Python[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(23): 77–78.
- [43] 郝爽, 李国良, 冯建华, 等. 结构化数据清洗技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(12): 1037–1050.

- HAO S, LI G L, FENG J H, et al. Survey of structured data cleaning methods[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(12): 1037–1050.
- [44] 徐博龙. 应用 Jieba 和 WordCloud 库的词云设计与优化[J]. 福建电脑, 2019, 35(6): 25–28.
- XU B L. WordCloud design based on Jieba library and WordCloud library[J]. Journal of Fujian Computer, 2019, 35(6): 25–28.
- [45] MADNI A M, SIEVERS M. Model-based systems engineering: motivation, current status, and research opportunities[J]. Systems Engineering, 2018, 21(3): 172–190.
- [46] DOV D. Handbook of conceptual modeling: theory, practice, and research challenges[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 209–258.
- [47] LI Z H, WANG G X, LU J Z, et al. Bibliometric analysis of model-based systems engineering: past, current, and future[J]. IEEE Trans. on Engineering Management, 2022, 71: 2475–2492.
- [48] 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(3): 18–23.
- CHEN H T, DENG Y C, YUAN J H, et al. Basic principles of model-based system engineering[J]. Aerospace China, 2016(3): 18–23.
- [49] AKUNDI A, ANKOBI AH W, MONDRAGON O, et al. Perceptions and the extent of model-based systems engineering (MBSE) use—an industry survey[C]//Proc. of the IEEE International Systems Conference, 2022. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773894.
- [50] Wikipedia. System of systems[EB/OL]. [2022-08-15]. https://en.wikipedia.org/wiki/System_of_systems.
- [51] 刘影梅, 李亚雯, 张连恰, 等. 基于模型的体系设计与仿真方法研究[C]//第三十三届中国仿真大会论文集, 2021: 649–658.
- LIU Y M, LI Y W, ZHANG L Y, et al. Research on system of systems design and simulation method based on model[C]//Proc. of the 33rd China Simulation Conference, 2021: 649–658.
- [52] 王维平, 朱一凡, 王涛, 等. 体系视野下的 MBSE[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 12–21.
- WANG W P, ZHU Y F, WANG T, et al. MBSE from a system of systems point of view[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 12–21.
- [53] BAEK Y M, MIHRET Z, SHIN Y J, et al. A modeling method for model-based analysis and design of a system-of-systems[C]//Proc. of the 27th Asia-Pacific Software Engineering Conference, 2020: 336–345.
- [54] DI MAIO M, KAPOS G D, KLUSMANN N. Challenges in the modelling of SoS design alternatives with MBSE[C]//Proc. of the 11th System of Systems Engineering Conference, 2016. DOI:10.1109/SYBOSE.2016.7542937.
- [55] 李文屏, 白鹤峰, 赵毅, 等. 基于 MBSE 的卫星通信系统建模与仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 69–74.
- LI W P, BAI H F, ZHAO Y, et al. Modeling and simulation of satellite communication system base on MBSE[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 69–74.
- [56] 金长林, 郝继山, 罗海坤. 系统工程方法论在微系统设计中的应用探索[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(4): 199–202.
- JIN C L, HAO J S, LUO H K. Exploration of system engineering methodology in micro-system design[J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(4): 199–202.
- [57] KATSUMI M, GYINGER M. Choosing ontologies for reuse[J]. Applied Ontology, 2017, 12(3/4): 195–221.
- [58] HUANG Z, HANSEN R, HUANG Z F. Toward FMEA and MBSE integration[C]//Proc. of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2018. DOI:10.1109/RAM.2018.8463084.
- [59] 陈红涛. 从面向对象视角认识基于模型的系统工程[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 36–43.
- CHEN H T. Understanding model-based systems engineering from an object-oriented point of view[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 36–43.
- [60] 李娇, 隆金波, 彭文胜, 等. MBSE 模式下可靠性安全性测试性一体化建模与评估技术方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 247–253.
- LI J, LONG J B, PENG W S, et al. Integration of modeling and evaluation techniques of reliability, safety, testability in MBSE mode[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(7): 247–253.
- [61] 胡晓义, 王如平, 王鑫, 等. 基于模型的复杂系统安全性和可靠性分析技术发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 147–158.
- HU X Y, WANG R P, WANG X, et al. Recent development of safety and reliability analysis technology for model-based complex system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 147–158.
- [62] AHLBRECHT A, BERTRAM O. Evaluating system architecture safety in early phases of development with MBSE and STPA[C]//Proc. of the IEEE International Symposium on Systems Engineering, 2021. DOI:10.1109/ISSE51541.2021.9582542.
- [63] AHLBRECHT A, DURAK U. Integrating safety into MBSE processes with formal methods[C]//Proc. of the IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference, 2021. DOI: 10.1109/DASC52595.2021.9594315.
- [64] BORKY J M, BRADLEY T H. Effective model-based systems engineering[M]. Switzerland: Springer, 2019.
- [65] RIEDEL R, JACOBS G, KONRAD C, et al. Managing knowledge and parameter dependencies with MBSE in textile product development processes[J]. Procedia CIRP, 2020, 91: 170–175.
- [66] 李晓红, 常家辉, 徐可. MBSE 深化应用加速武器系统研制数字化转型[J]. 国防科技, 2022, 43(4): 59–64.
- LI X H, CHANG J H, XU K. Deepening the application of model-based systems engineering to accelerate the digital transformation of the research and development of weapon systems[J]. National Defense Technology, 2022, 43(4): 59–64.
- [67] SUNDARAM V, BROWNLOW L. MBSE based digital thread and digital system model for AF DCGS[C]//Proc. of the AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018: 1217.
- [68] 赵俊钦, 李艳军. 基于 MBSE 的民机推力管理架构设计与仿真方法[J]. 航空计算技术, 2021, 51(5): 105–108.
- ZHAO J Q, LI Y J. Design and simulation method of thrust

- management architecture for civil aircraft based on MBSE[J]. Aeronautical Computing Technique, 2021, 51(5): 105–108.
- [69] 李德林, 毕文豪, 张安, 等. 基于 MBSE 的民机研制过程管理[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2209–2220.
- LI D L, BI W H, ZHANG A, et al. MBSE-based process management in the development of civil aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(8): 2209–2220.
- [70] CIAMPA P D, NAGEL B. Accelerating the development of complex systems in aeronautics via MBSE and MDAO: a roadmap to agility[C]//Proc. of the AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition, 2021: 3056.
- [71] CHONG J Y, ZHOU H C, WANG M, et al. A design framework for complex spacecraft systems with integrated reliability using MBSE methodology[C]//Proc. of the 8th International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers, 2022: 165–173.
- [72] BOGGERO L, CIAMPA P D, NAGEL B. The application of the AGILE 4.0 MBSE architectural framework for the modeling of system stakeholders, needs and requirements [C] // Proc. of the 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2021. DOI:10.5281/zenodo.5735416.
- [73] 鲁金直, 王国新, 郑新华, 等. 基于模型系统工程中国应用调查[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 57–66.
- LU J Z, WANG G X, ZHENG X H, et al. Model-based systems engineering application investigation in China[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(20): 57–66.
- [74] SHAKED A, REICH Y. Using domain-specific models to facilitate model-based systems-engineering: development process design modeling with OPM and PROVE[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(4): 1532.
- [75] BOGGERO L, CIAMPA P D, NAGEL B. An MBSE architectural framework for the agile definition of system stakeholders, needs and requirements[C]//Proc. of the AIAA Aviation Forum, 2021.
- [76] SIRIN G, PAREDIS C, YANNOU B, et al. A model identity card to support simulation model development process in a collaborative multidisciplinary design environment[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1151–1162.
- [77] SHALLCROSS N J, PARNELL G S, POHL E A. Informing program management decisions using quantitative set-based Design[J]. IEEE Trans. on Engineering Management, 2021, 70(9): 3213–3228.
- [78] KANNAN H. Formal reasoning of knowledge in systems engineering through epistemic modal logic[J]. Systems Engineering, 2021, 24(1): 3–16.
- [79] 张鹏翼, 黄百乔, 鞠鸿彬. MBSE: 系统工程的发展方向[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 21–26.
- ZHANG P Y, HUANG B Q, JU H B. MBSE: future direction of system engineering [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(21): 21–26.
- [80] PALMA G, MESMER B, GUERIN A, et al. Identifying multidisciplinary metrics to analyze NASA case studies[J]. IEEE Trans. on Professional Communication, 2021, 64(2): 170–184.
- [81] KAPOS G D, TSADIMAS A, KOTRONIS C, et al. A declarative approach for transforming SysML models to executable simulation models[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(6): 3330–3345.
- [82] SHANGGUAN L, GOPALSWAMY S. Health monitoring for cyber physical systems [J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(1): 1457–1467.
- [83] SCHLUSE M, PRIGGEMEYER M, ATORF L, et al. Experimentable digital twins—streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0[J]. IEEE Trans. on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1722–1731.
- [84] LI X, SHEN Y F, CHENG H L, et al. Identifying the development trends and technological competition situations for digital twin: a bibliometric overview and patent landscape analysis[J]. IEEE Trans. on Engineering Management, 2022, 71: 1998–2021.
- [85] MADNI A M, MADNI C C, LUCEO S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering[J]. Systems, 2019, 7(1): 7.
- [86] SHALLCROSS N, PARNELL G S, POHL E, et al. Set-based design: the state-of-practice and research opportunities [J]. Systems Engineering, 2020, 23(5): 557–578.
- [87] 关锋, 葛平, 周国栋, 等. MBSE 发展趋势与中国探月工程并行协同论证[J]. 空间科学学报, 2022, 42(2): 183–190.
- GUAN F, GE P, ZHOU G D, et al. Development trend of MBSE and investigation of concurrent collaborative demonstration for Chinese lunar exploration program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2022, 42(2): 183–190.
- [88] DONG M R, LU J Z, WANG G X, et al. Model-based systems engineering papers analysis based on word cloud visualization[C]//Proc. of the IEEE International Systems Conference, 2022. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773795.

作者简介

董梦如(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为基于模型的系统工程。

王国新(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为系统工程、体系工程、数字孪生、可重构设计。

鲁金直(1988—),男,研究员,博士,主要研究方向为系统工程、基于模型的系统工程、认知孪生、数字孪生、面向服务的工具链技术。

马君达(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为基于模型的系统工程、架构设计与特定域建模。

阎 艳(1967—),女,教授,博士,主要研究方向为知识工程、系统工程、数字孪生。