学号 20179100022 总结报告

姓名：郭杰

数字孪生作为实现虚实之间双向映射、动态交互、实时连接的关键技术，可将物理实体和系统的属性、结构、状态、性能、功能和行为映射到虚拟世界，形成高保真的动态多维/多尺度/多物理量模型，为观察物理世界、认识物理世界、理解物理世界、控制物理世界、改造物理世界提供了一种有效手段，从而备受学术界、工业界、金融界、政府部门关注。[1]科学文献计量方法可以从各个层面来揭示一个领域或学科发展的概貌，进而能够从各个角度全面地审视一个学科的结构和研究热点、重点等信息。[2]本文采用文献计量方法，通过发文量探究数字孪生领域研究的趋势变化。本文选择Scopus数据库进行文献的搜索与筛选，搜索方式利用Scopus的高级搜索功能，检索式字符串为“TITLE-ABS-KEY({digital twin}OR{digital twins})”，即搜索摘要、论文标题或关键字字段中有“digital twin”或“digital twins”的文献。搜索结果显示1973年和1993年各有一篇文献，但这两篇文章所提及的“digital twin”并非本文所指的数字孪生。此外，2004年和2005年分别由2篇和4篇论文发表，而2006—2009年无相关论文发表。根据搜索结果数量分布情况，本章选取2010年到2020年12月31日期间发表收录的论文进行统计分析，以阐明近些年数字孪生的国际研究现状情况。[3]

「 1. 发表论文时间分布统计分析 」

2010年至2020年12月31日，10多年间发表的数字孪生论文累计2897篇，如图1所示（数据来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日）。图2（数据来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日）统计了这段期间各类型文献的年度发表情况，包括期刊论文、会议论文和其他类型文献（如书的章节、社论、short survey等）。从发表的文献数量分析，整体上呈增长趋势。2010—2015年发表的数字孪生文献较少，单年论文发表量少于10篇。2016—2019年数字孪生文献发表数量进入快速增长期，2016年发表24篇，2017年发表112篇，2018年发表321篇，2019年发表数量超过了900篇，2020年发表数量达到了1441篇。2017年以后每年发文量都呈指数级增长。预计在未来几年，数字孪生论文发表数量还将呈迅猛增长趋势。

此外，根据发表文章的类型分布统计可知，当前发表的论文主要以会议论文为主，但期刊论文近年呈明显增长趋势。期刊论文数量从2016年的5篇增长到2017年的40篇，到2018年的70篇，再到2020年的614篇，这种变化从侧面表明了当前对数字孪生的研究越来越深入，越来越系统。

「 2. 发表论文国家分布统计分析 」

统计结果显示，当前已有50多个国家开展了数字孪生研究并有相关研究成果发表。如表1所示（按国家发文量排序，来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日），其中研究成果主要来自美国、德国、英国、法国、意大利、加拿大、日本等G7发达国家，以及中国、俄罗斯、印度、巴西、南非等发展迅速的国家。这些国家具有较高的科技水平和一定的信息化基础，能为数字孪生的研究、发展与应用提供支撑环

表1中排名前10国家的数字孪生发文量如图3所示（来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日）。德国、美国和中国3个国家发表的数字孪生论文总数位列前三。其中：2010—2016年期间论文发表数量美国领先，2017—2020年德国后来居上，单年论文发表数量位居世界第一；2018年后中国迎头赶上，单年论文发表数量位居世界第二。相关统计数据表明，数字孪生的国际研究竞争十分激烈。此外，在统计的所有数字孪生文献中，智能制造相关的文献数量占50%以上，说明世界各国在智能制造领域的竞争十分激烈，都将数字孪生作为落地智能制造的重要技术手段。

当前数字孪生在国内非常热，各相关会议几乎都有数字孪生的交流和报道，如图2.3所示，德国、美国和中国在数字孪生论文发表数量上，近3年均处于前3名。从时间维度分析，中、美、德的数字孪生研究可以分为以下3个阶段：[3]

1. 2016年前，美国引领 数字孪生的概念诞生于美国，美国也是最早开展数字孪生研究与应用的国家，2011—2016年美国单年论文发表总数位居第一，2016年以前累计发表总数位居世界第一。早期，以NASA、美国空军研究实验室等为代表的研究机构主要将数字孪生应用于航空航天的健康监测[4]、运行维护[5]、寿命预测[6]等方面。近年佐治亚理工学院、国家标准技术研究所、宾夕法尼亚州立大学等研究机构在智能工厂[7]、智慧城市[8]、3D打印[9]等方面开展了应用探索。截止到2020年12月31日，美国累计发表数字孪生文章总数位居世界第二。
2. 2017~2018年，德国反超 工业4.0是一个发展方向或战略，德国提出工业4.0后，一直在论证和寻求能让工业4.0落地的使能技术。数字孪生相对其他概念更易落地工程实施，正好契合德国工业4.0 需求。工业4.0主要提出单位之一德国弗劳恩霍夫研究院的Sauer指出数字孪生是工业4.0的关键技术。[10]以西门子、亚琛工业大学为代表的工业4.0主推和实施机构，开展了大量数字孪生研究与实践，发表了大量数字孪生文章, 其中，亚琛工业大学发文数量位列世界第一，西门子位列第三。2017—2020年德国单年发表的数字孪生文章总量位居世界第一，截止到2020年12月31日累计发文总数德国位居世界第一。
3. 2019年，中国迎头赶上 与美国、德国相比，数字孪生在中国的研究和受关注相对较晚。2017年1月《计算机集成制造系统》期刊上发表的“数字孪生车间：一种未来车间运行新模式”论文[11]，得到国内学术界尤其是青年学者对数字孪生的关注，国内12家高校于2017年7月共同发起并在北航召开“第一届数字孪生与智能制造服务学术会议”，大量高校学者开始关注数字孪生在制造中的研究与应用。会后来自15个单位的22位作者于2018年1月共同在《计算机集成制造系统》期刊上发表了“数字孪生及其应用探索”的论文，[12]更多高校学者开始关注数字孪生。另一方面，随着工信部“智能制造综合标准化与新模式应用”和“工业互联网创新发展工程”专项，科技部“网络化协同制造与智能工厂”等国家层面的专项实施，有力促进了数字孪生的发展。此外，中国信息通信研究院[13]、中国电子技术标准化研究院[14]、赛迪信息产业（集团）有限公司[15]、e-works数字化企业网[16]、走向智能研究院[17]、安世亚太科技股份有限公司[18]、上海优也信息科技有限公司[19]、工业4.0研究院[20]等单位及其专家在数字孪生的概念、技术、标准、应用实践等方面开展了大量工作，为数字孪生在中国的推广与发展起到了重要作用。各方因素促使了数字孪生在中国的快速发展，使2020年中国单年发表的数字孪生文章总量高达222篇位居世界第二。并且中国在数字孪生领域的发文总量已与美国基本持平，仅相差不到10篇。

「 3. 文献类型及期刊分布统计分析 」

从发表数字孪生文章的出版物来分析，出版数字孪生文章最多的10个刊物如表2所示（来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日）。国际生产工程学会（CIRP）是制造领域的国际重要学术组织，在制造学科享誉盛名，其下属刊物《Procedia CIRP》发表的数字孪生文章最多，且内容与智能制造密切相关，作者主要为国际作者。发表数字孪生文章数量排名第5的刊物是《Procedia Manufacturing》，也是一个制造密切相关的刊物。《计算机集成制造系统》是面向先进制造技术研究与应用的期刊，该刊物发表的数字孪生文章目前排名第6《Journal of Manufacturing Systems》是先进制造领域的影响力非常大的国际期刊，为制造业信息化的研究发展起到重要推动作用，该刊物发表的数字孪生文章目前排名第7。由出版数字孪生论文的刊物分析可知，当前数字孪生的研究与应用主要集中在制造领域。

「 4. 发表论文研究机构和学者统计分析 」

统计结果显示，截止2020年12月31日，全球已有超过1000个高校、企业和科研院所开展了数字孪生研究且有相关研究成果在学术刊物公开发表。如图4所示（来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日），其中高校672所，占50.68%，包括德国亚琛工业大学、英国剑桥大学和牛津大学、美国斯坦福大学等世界一流高校正在开展数字孪生理论研究，且这一数量呈现逐年增长趋势，足见学术界高度关注和重视数字孪生理论研究。

从在学术刊物上发表论文角度分析，一般是高校学术界占主体，而企业发表学术论文的积极性和比例往往不高。但在数字孪生领域，近10年共有416所企业（占31.37%）开展数字孪生研究并在学术刊物上有学术成果公开发表，包括西门子、GE、空客、ABB等世界知名企业。如将在非学术刊物上有数字孪生相关成果（如网络技术报告、网络技术博文等）发表的企业也统计上，相关数据将更大，占比也将更多。充分说明企业当前也高度关注数字孪生技术，正在开展数字孪生应用实践，表明数字孪生具有很强的工程化应用价值和潜力。

此外，还有包括美国空军、NASA，德国航空航天中心、德国弗劳霍夫研究院等各国重要军事和科研机构也高度关注数字孪生研究，且在学术刊物上有研究成果发表。

在学术刊物上发表论文的数量在一定程度上能反映一个机构在相应领域的研究实力和影响力。图5（来源于Scopus数据库，截止2020年10月31日）为在学术刊物上近10年发表数字孪生研究成果前20的研究机构分布情况。论文数量高于10篇的高校包括北京航空航天大学、德国亚琛工业大学、俄罗斯圣彼得堡彼得大帝理工大学、俄罗斯南乌拉尔大学、英国剑桥大学、德国慕尼黑大学和瑞典查尔姆斯理工大学，企业有西门子。研究学者与研究机构往往是密不可分的，据统计当前全球已有上千名专家或学者参与了数字孪生研究且有相关成果在学术刊物上发表。

「 5. 发表论文研究方向和高频关键词统计分析 」

论文关键词能够反映研究的关注点，高频关键词能够体现一个领域的热门研究话题，因此本文统计了2017—2020 数字孪生文章高频关键词，如表3所示（来源于Scopus数据库，截止2020年12月31日）。统计结果显示，当前全球对数字孪生的研究集中在制造领域，近三年关键词“制造（Manufacture）”出现频次增长迅速，2017年出现26次，2018年出现46次，2019年增至93次和2020年的124次。此外，高频关键词还揭露出数字孪生与新一代信息技术（New IT）联系紧密，近三年高频关键词覆盖“大数据”“物联网”“人工智能”“虚拟现实”“增强现实”等New IT概念，可预测数字孪生未来将进一步与New IT深度集成和融合，并促进相关领域发

参考文献

[1]Tao F, Qi Q. Make more digital twins[J]. 2019, 573: 490-491.

[2]管文玉, 凌卫青. 基于文献计量的数字孪生研究可视化知识图谱分析[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 18-27.

[3]陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 26(1): 1-17.

[4]GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]// Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA. 2012: 1818.

[5]TUEGEL E. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012: 1812.

[6]GOCKEL B, TUDOR A, BRANDYBERRY M, et al. Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles[C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012: 1813.

[7]SHAO G, JIBIRA D. Digital manufacturing: requirements and challenges for implementing digital surrogates[C]//Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference. Washington,D.C., USA:IEEE Press, 2018: 1226-1237.

[8]MOHAMMADI N, TAYLOR J. Smart city digital twins[C]//Proceedings of 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Washington,D.C.,USA:IEEE, 2017: 1-5.

[9]MUKHERJEE T, DEBROY T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components[J]. Applied Materials Today, 2019, 14: 59-65.

[10]SAUER O. The digital twin – a key technology for Industrie 4.0. [EB/OL].( 2019-11-20) [2019-12-12].https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81726/.

[11]陶 飞，张 萌，程江峰，等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.

[12]陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.

[13]中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告（2019 年）[EB/OL].http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201910/t20191011\_219155.htm, 2019-10.

[14]中国电子技术标准化研究院物联网研究中心. ISO/IEC JTC 1 AG 11数字孪生咨询组第一次面对面会议在印度新德里召开[EB/OL]. <http://www.cesi.cn/201911/5812.html>, 2019-11-18.

[15]赛迪研究院：《数字孪生白皮书（2019）》[EB/OL]. <http://news.ccidnet.com/2019/1219/10505019.shtml>, 2019-12-19.

[16]e-works. 数字孪生与工业智能论坛. [EB/OL]. <http://www.e-works.net.cn/report/2019shuziluans/2019shuziluans.html>, 2019.

[17]赵敏, 宁振波. 四谈“数字孪生”——研究/应用新进展[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Q3F_3jBVzFziRRyXT25ZKQ,2019-11.17>.

[18]安世亚太科技股份公司数字孪生体实验室. 数字孪生体技术白皮书[EB/OL]. <http://www.peraglobal.com/upload/contents/2019/12/20191230095610_31637.pdf>, 2019.12.

[19]林诗万：数字孪生体在工业互联网的作用与意义（附 PPT）[EB/OL].