

基于数字孪生的单兵作战系统设计研究

窦金花¹, 覃京燕^{1,2}, 李瑞琦¹

(1.北京科技大学, 北京 100083; 2.海南大学, 海口 570228)

摘要: **目的** 当前国际形势日益复杂严峻, 大国之间军事竞争不断加剧, 各国加速进行国防装备研发。信息技术飞速发展催生未来战场的信息化、智能化转变, 亟需设计研发新型单兵作战系统以应对未来战场环境。为有效地提升单兵作战系统设计效率、解决传统单兵作战系统设计过程的问题, 提出数字孪生驱动的单兵作战系统设计方法。**方法** 基于文献研究和案例研究, 总结归纳单兵作战系统设计过程和存在问题, 提出数字孪生单兵作战系统设计模型, 分析数字孪生单兵作战系统设计模型的组成要素, 研究并呈现了几种数字孪生单兵作战系统设计关键技术。**结论** 随着数字孪生技术日益成熟并得以广泛应用, 将数字孪生技术应用于单兵作战系统设计过程具有可行性。数字孪生驱动的单兵作战系统设计过程丰富了国防装备设计研发的理论与方法, 为新型单兵作战系统创新设计提供了新的路径。

关键词: 国防装备; 单兵作战系统; 数字孪生; 创新设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0059-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.004

Individual Combat Systems Design Based on Digital Twin

DOU Jin-hua¹, QIN Jing-yan^{1,2}, LI Rui-qi¹

(1.University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.Hainan University, Haikou 570228, China)

ABSTRACT: The current international situation is becoming increasingly complex and severe, military competition among major powers is intensifying, and countries are accelerating the research and development of national defense military equipment. The rapid development of information technology has catalyzed the application of information and intelligence of the future battlefield, and it is urgent to design and develop new intelligent and humanized individual combat systems (ICS) to cope with the future battlefield environment. In order to effectively improve the design efficiency of the ICS and solve the problems in the traditional ICS design process, a digital twin-driven ICS design method is proposed. Based on literature research and case studies, the ICS design process and relevant problems are summarized, a digital twin ICS design model is proposed, the components of the digital twin ICS design model are analyzed, and several key technologies of digital twin ICS design are studied and presented. With the increasing maturity and wide use of digital twin technology, it is feasible to apply it to the ICS design process. The design process of individual combat systems driven by digital twin enriches the theories and methods of national defense equipment design and development, and provides a new path for the innovative design of new ICS.

KEY WORDS: national defense equipment; individual combat systems; digital twin; innovative design

收稿日期: 2021-05-21

基金项目: 长江学者奖励项目 (FRF-TP-18-010C1); 国家重大专项课题 (2018YFB0704301); 北科大顺德研究生项目 (BK19AE011)

作者简介: 窦金花 (1978—), 女, 黑龙江人, 博士, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为人机交互、人工智能与创新设计、产品服务系统设计、文化遗产的可持续发展与设计创新等。

通信作者: 覃京燕 (1976—), 女, 四川人, 博士, 北京科技大学教授, 主要研究方向为人工智能与创新设计、交互设计、信息设计以及大数据的信息可视化等。

当前,国际形势日益复杂严峻,科技迅猛发展和产业形态快速变革,国际军事竞争加剧,各国加紧进行国防装备设计研发以迅速抢占军事竞争制高点。信息技术发展使得未来战争模式发生变化,对单兵作战装备提出了新需求。党的十九大报告指出,要“加快军事智能化发展,提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力”。单兵作战系统是一种融合了信息化技术的人、装备、环境相互作用的复杂系统,通过数字化、智能化装备将士兵与数字化战场相连接。未来单兵装备呈现多功能、数字化、智能化发展趋势^[1],各军事强国纷纷投入大量人力和经费进行单兵作战系统设计研发,先进的单兵作战系统能够有效地提高士兵全域作战能力、生存能力以及防御能力,在未来信息化、智能化战场场景中单兵作战系统凸显其重要意义。然而,单兵作战系统在实际应用中仍然存在超重、信息冗余、人机工效不足,电池续航能力弱等诸多问题。单兵作战系统设计研发需要多学科专业技术人员协作完成,其设计研发周期长、投放费用高、设计决策难、迭代更新缓慢,传统串行式产品设计方式难以有效应对单兵作战系统的系统性、智能化、复杂性特征。单兵作战系统复杂人机交互情境对设计研发人员产生了极大的挑战,随着物联网、大数据、云计算、AI等技术的发展,使得数字孪生(Digital twin)技术更加成熟并已经在诸多领域进行应用,为单兵作战系统设计研发提供了新的方法和路径。

1 数字孪生驱动产品设计

2003年,Grievies教授在美国密歇根大学产品全生命周期管理课程中提出 Conceptual Ideal for PLM (Product Lifecycle Management) 的设想,体现了数字孪生思想,即在虚拟空间构建的数字模型与物理实体交互映射,忠实地描述了物理实体全生命周期的运动轨迹^[2]。2010年,NASA技术报告正式提出数字孪生概念:“集成了多物理量、多尺度、多概率的系统或飞行器仿真过程”。数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力。作为一种充分利用模型、数据、智能并集成多学科的技术,数字孪生面向产品全生命周期过程,发挥了连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带作用,提供了更加实时、高效、智能的服务^[3-4]。在智能制造、航空航天、健康医疗等多个领域,数字孪生技术均得到了广泛应用。陶飞针对传统数字孪生三维模型研究的瓶颈,提出数字孪生五维模型以适应现代应用新需求,并研究将数字孪生技术应用于产品设计过程的设计方法、基于数字孪生技术的产品设计框架以及具体应用^[5-8]。数字孪生五维模型包括物理实体(PE),虚拟实体(VE),服务(Ss),孪生数据(DD)和连接

(CN),数字孪生五维概念模型见图1。李雪瑞等人构建了数字孪生驱动的工业产品CMF设计服务模型框架,并研究该模型在产品CMF设计创新中的应用,以辅助设计师进行设计决策^[9]。李浩等人提出了基于数字孪生的复杂产品设计与制造协同开发框架,并研究关键技术、应用案例及应用场景^[10]。数字孪生在产品领域具有较高的应用价值,是促进产品设计创新的一种先进设计理念。

2 单兵作战系统研发现状

美国陆军最早提出单兵作战系统概念以适应未来高科技战争。单兵作战系统是供单兵使用的包括武器、多功能头盔、计算机、电台和防护服等在内的一体化信息装备^[11]。俄罗斯、美国、英国等军事强国均在大力发展智能单兵装备,例如美国的智能化单兵系统“陆地勇士”包括武器子系统、软件子系统、综合头盔子系统、计算机子系统、防护服等子系统。该系统装配有热成像仪、数字摄像机和激光测距瞄准器,并且具有超强的防护系统,具有隔热、阻燃、保温、防红外探测、防弹、防激光和防核生化等功能^[12-14],美国陆地勇士单兵作战系统见图2。英国国防部推出单兵装备和通用作战服(PECOC)计划,新型单兵装备采用模块化设计和承载系统,其装备包括弹道与传感器防护装置、承载系统、作战服、军靴、手套以及睡袋^[15]。俄罗斯的单兵作战系统——战士1系统和战士2系统已经研发应用,包括武器、防弹衣、光学阵列系统、通信与导航装置、生命支持系统和独立电源等。目前俄罗斯正在研发战士3系统,该系统在前代系统的基础上进行了改进和提升,例如头盔配备了防毒面具、先进瞄准系统、面罩和护目镜。战士3系统集成了微气候支持系统、健康监测系统、防生化装置以及外骨骼等新型系统^[16]。意大利陆军未来单兵作战系统“未来战士”融合了大量新科技,配备了ARX160/GLX160突击步枪武器子系统、单兵作战武器子系统、火控子系统、通信子系统、单兵指挥与控制子系统等多个子系统^[17]。在国庆70周年阅兵式上,我

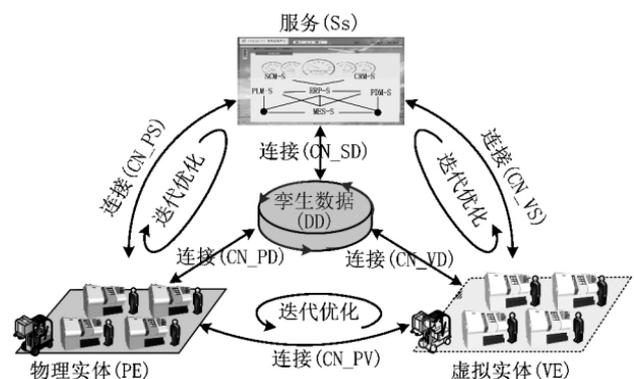


图1 数字孪生五维概念模型^[5]

Fig.1 Digital twin five-dimensional conceptual model

国新型单兵作战装备首次亮相，展示了全新的迷彩服、携行具、头盔和作战靴。我国新型单兵作战系统见图 3。新式单兵装备考虑了战士的使用体验和战

场复杂环境，在该装备研制过程中针对人机工效等多个方面开展研究，在装备的人性化设计上考虑得更加细致。



图 2 美国陆地勇士单兵作战系统
Fig.2 American land warrior individual combat system



图 3 我国新型单兵作战系统
Fig.3 China's new individual combat system

3 单兵作战系统设计研究

在单兵作战装备的设计研发过程中,相关研究主要集中在士兵状态评估以及人机工效分析、先进智能材料和技术在单兵作战系统设计研发中的应用。例如将虚拟现实技术应用于单兵作战系统的设计过程中,进行装备设计方案、使用效能评估^[18]。王海龙分析了不同类型的智能可穿戴设备在单兵作战系统中的应用,以服务于各种战场应用需求^[19]。近年来,我国单兵作战系统设计过程开始关注人机工效分析的相关研究。杨洋从人机工效角度对单兵作战系统开展研究,完成了单兵平衡能力测试试验、单兵行走步态试验等一系列单兵装备人机工效试验分析^[20]。马超研究了生理信息传输与融合技术,该技术可应用于单兵体征监测系统对士兵状态进行评估,实时监测士兵的健康、温度负荷、伤情及疲劳状态^[21]。陈蔡山林通过一系列实验对单兵系统的可达性和可视性进行研究,分析了相关影响因素^[22]。谌玉红等人建立了单兵肩部疲劳模型,研究了士兵不同负重下的疲劳感变化^[23]。王增刚等人研究了负重对行军士兵下肢步态影响,研究结果为单兵装备优化设计提供了指导^[24]。蔡镜等人采用 VC++和 Matlab 混合编程方法开发了单兵装备效能评估专家系统,可实现对单兵装备效能的准确评估^[25]。蒋毅等人研究了一种交互式单兵作战仿真系统,并呈现了系统框架和关键支持技术^[26]。

4 基于数字孪生的单兵作战系统设计过程

单兵作战系统是一种复杂的、综合性的人机系统,具有信息化、多功能、模块化的复杂性特征,有学者探索了单兵作战系统的人机工效、先进材料和技术,但较少从单兵作战系统设计过程中,以系统化的角度探索单兵作战系统设计理论和方法。面向单兵作战系统的设计过程,研究了数字孪生技术驱动下的单兵作战系统设计方法,分析了单兵作战系统设计过程和问题,建立了数字孪生单兵作战系统设计模型,分析了数字孪生单兵作战系统设计模型的组成要素和关键支持技术。

4.1 单兵作战系统设计过程

单兵作战系统能够增强士兵在战场上的感知、攻击、防护、生存等多方面的能力,目前已投入应用的单兵作战系统通常包括防护系统、武器系统、生命维持系统、计算机系统、微气候调节系统等多个子系统。单兵作战系统设计过程一般包括需求分析—功能分析—方案设计—验证评估等关键设计环节。

1) 单兵作战系统需求分析。在单兵作战系统设计过程中首先要开展需求分析工作,包括系统需求、用户需求、功能需求的确定。设计研发人员需要考虑复杂多样的作战场景(山地、沙漠、严寒地区等)、

不同利益相关者(士兵、军队、指挥部等)对单兵作战系统的需求,面向不同的作战场景,其具体需求需要进行细化。例如士兵是单兵作战系统最直接的利益相关者,士兵具有生理、心理、安全、自我实现等多层次的需求,士兵需要通过单兵作战系统提高其防御、攻击、指挥控制能力,增强其战场生存能力和战场态势感知能力,同时,单兵作战系统各模块在使用过程中需要具有良好的可用性和舒适性,以满足士兵的生理机能、心理特征以及战场活动的需求。

2) 单兵作战系统功能分析。基于单兵作战系统的需求分析,对系统功能进行分解,通过采用适当的功能建模方法,例如采用功能树法、功能结构法,建立单兵作战系统的功能模型,定义单兵作战系统功能,实现单兵作战系统设计过程需求域到功能域的映射。

3) 单兵作战系统方案设计。单兵作战系统方案设计阶段包括设计规范的制定、设计创意的产生、形态分析和结构分析、单兵装备产品的设计概念生成、概念评价和概念设计决策,概念具体化设计和细节设计,确定单兵作战系统的材料、尺寸、装配工艺等,并进行迭代优化,绘制单兵装备产品的设计模型,制作单兵装备产品的物理原型,最终产生系列具有创新性和应用价值的单兵作战系统设计方案。

4) 单兵作战系统验证评估。验证评估是单兵作战系统设计过程的关键阶段,例如可靠性、精度、安全性均是需要衡量的重要指标。在验证评估阶段需要开展一系列测试实验,包括材料测试、系统装配测试、极端环境系统可靠性测试、安全性测试、人因工程实验等。其中,人因工程实验主要围绕可用性、舒适性、士兵载荷、可达性和适应性等多个评估指标开展,单兵作战系统验证评估多基于数字化模型或物理模型开展相关研究。

4.2 单兵作战系统设计过程的问题分析

单兵作战系统设计研发是一项复杂的系统性工程,需要设计师、工程师、软件开发等多学科专业背景人员进行协同设计创新。传统产品的串行设计模式导致设计开发人员不能实时进行协同工作,影响了单兵作战系统设计研发效率。在单兵作战系统设计过程中,单兵作战系统的各个子系统、子系统的各个要素由不同部门分别进行设计,导致各子系统模块不能很好地兼容。单兵作战系统人机交互情境复杂多样,设计开发人员需要考虑单兵作战系统的开发需求,从系统的角度考虑士兵、装备及战场环境的人机耦合关系,寻找设计方案的最优解,减轻士兵在高强度训练和军事战争环境中的生理及心理压力,促进士兵—装备—环境的良好耦合。在不同的设计阶段,设计开发人员面临着不同的设计难题。在需求分析阶段,利益相关者的需求获取需要进行大量的调研分析工作,士兵人体测量数据、用户隐形需求等知识获取难度大。

在单兵作战系统方案设计阶段, 受限于设计人员的知识和能力, 从设计创意产生到方案原型制作需要较长的产品设计周期, 而基于设计知识的单兵作战系统设计与各利益相关者需求时常不能有效匹配。在方案验证评估阶段, 采用物理实体装备原型的单兵作战系统评估及迭代优化常需要投入大量的时间和资源。

4.3 数字孪生单兵作战系统设计模型

面向单兵作战系统的设计开发过程, 构建基于数字孪生单兵作战系统设计模型, 见图 4。该模型包括单兵作战系统物理空间设计过程和与之对应的虚拟空间设计过程、孪生数据和连接、单兵作战系统设计服务。虚拟空间设计过程是对物理空间设计过程的数字化模拟。物理空间的设计过程伴随着虚拟空间设计过程, 二者通过信息空间的孪生数据实时交互作用和自适应协同演化, 虚实融合共同支持单兵作战系统需求分析、功能分析、方案设计、验证评估和设计优化, 产生与利益相关者需求匹配的单兵作战系统原型, 实现了士兵—单兵装备—战场环境的良好耦合。

4.4 数字孪生单兵作战系统设计模型的组成要素

(1) 物理空间的单兵作战系统设计。设计师基于对系统需求、利益相关者需求分析、士兵生理特征、心理特征分析、人体尺寸测量数据, 进行单兵作战系统各模块功能、形态、色彩、材料、结构、尺寸、人机交互界面设计, 对设计方案进行优选, 建立单兵作战系统物理原型。通过士兵与单兵作战系统物理原型的交互实验, 对设计方案进行评估验证, 并不断迭代优化单兵作战系统设计方案。(2) 虚拟空间的单兵作战系统设计。虚拟空间的设计过程是物理空间设计过程的数字化模拟, 在孪生数据的驱动下分析单兵作战系统利益相关者需求, 进行单兵作战系统的功能分

析、方案设计和验证评估。(3) 孪生数据。孪生数据来自单兵作战系统的物理空间设计过程、虚拟空间设计过程和服务应用, 也包括知识数据以及融合衍生数据。例如士兵人体数据、士兵行为数据、士兵生理和心理数据、战场环境数据、功能模型数据、单兵装备的形态、尺寸、结构、试验载荷、仿真数据、评价数据等, 所产生的孪生数据驱动数字孪生单兵作战系统设计模型的运行。(4) 服务。数字孪生单兵作战系统设计模型中的服务包括支撑数字孪生单兵作战系统运行的功能性服务和面向不同利益相关者需求的业务型服务。服务通过一系列工具组件、中间件、模块引擎等形式以及应用软件、服务平台、移动端 APP 等形式支撑。(5) 连接。连接是物理空间的单兵作战系统设计过程、虚拟空间的单兵作战系统设计过程、孪生数据和服务之间连接交互和实时反馈的基础, 通过各类传感器、嵌入式系统、数据传输等技术实现。

4.5 数字孪生单兵作战系统设计的关键技术

4.5.1 数字孪生单兵作战系统设计的大数据技术

数据是数字孪生模型的核心要素, 驱动数字孪生模型的运行。单兵作战系统数字孪生数据来自多维空间的信息—物理融合数据, 包括设计知识数据、用户知识数据、交互反馈数据等, 数据来源和类型多样。大数据技术包括数据的采集、预处理、存储和分析技术, 通过数据感知和优化、多源异构数据集成、数据挖掘分析和可视化对单兵作战系统设计过程的多源感知数据进行采集、融合、分析, 通过数据智能传输技术对数据进行安全传输, 支持数字孪生体和物理实体的实时交互和协同演化。

4.5.2 数字孪生单兵作战系统设计的模型构建技术

数字孪生模型构建是在数字空间实现物理实体

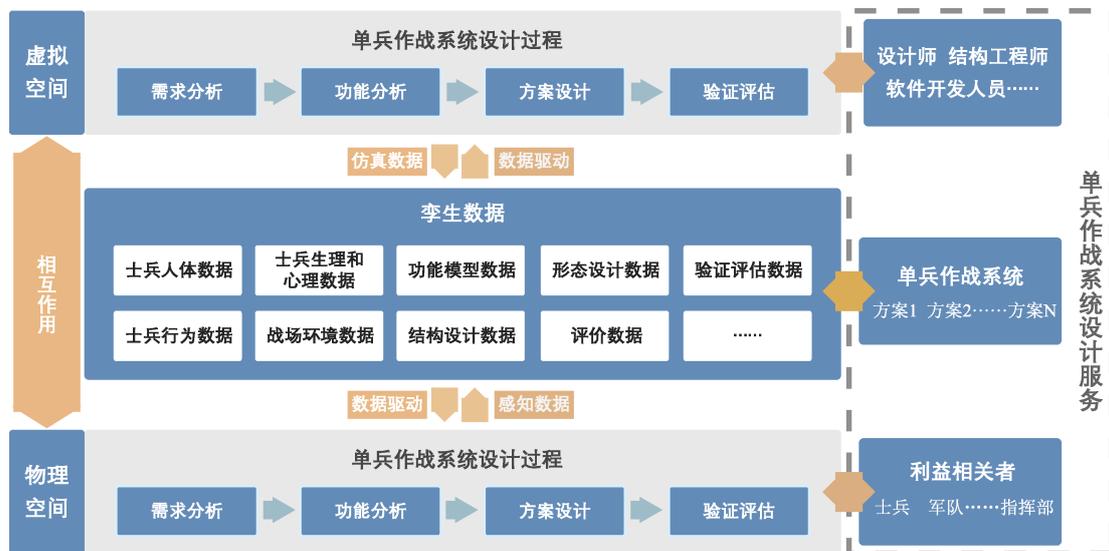


图 4 数字孪生单兵作战系统设计模型

Fig.4 Design model of digital twin individual combat system

及过程的属性、方法、行为等特性的数字化建模^[27]。建立与物理空间单兵作战系统设计过程对应的数字化模型,即单兵作战系统设计过程数字孪生体,面向物理空间设计过程的需求、用户、装备、环境元素以及对设计过程进行数字化模型构建,包括几何模型、物理模型、行为和规则模型构建。例如采用 CATIA、UG、SOLIDWORKS 等软件实现产品的三维建模,制作虚拟空间的单兵装备原型,可视化呈现单兵作战系统设计方案,使设计人员快速调整和修改装备产品设计方案。生成式设计(Generative design)技术是数字孪生单兵作战系统设计过程可应用的一种关键性建模技术,将设计目标、产品形态、材料、尺寸等参数输入生成式设计软件中,基于算法快速生成一系列设计方案,并自动学习迭代,产生最优化设计方案。通过生成式设计技术能够促进虚拟空间单兵装备设计方案的快速创新和迭代优化。计算机辅助工程 CAE 技术可实现士兵、装备的数字化仿真分析模型建构,用于分析单兵装备产品的结构力学性能,进一步优化了单兵装备的结构性能,提高了单兵作战系统设计的可靠性。

4.5.3 数字孪生单兵作战系统设计的 VR/AR/MR 技术

虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)技术是支持数字孪生单兵作战系统设计过程的关键性技术。例如可基于 VR 技术实现对战场环境模拟、单兵装备的虚拟展示,为设计师、士兵提供一种实时交互的三维可视化战场环境。设计师、士兵均可在虚拟环境中与单兵作战系统进行交互,或模拟极端战场环境对单兵作战系统可靠性、安全性等性能进行测试,实现对单兵作战系统的仿真验证。AR 技术可实现将虚拟空间的单兵作战装备带入现实环境中,使设计师和士兵能够在真实物理环境中进行装备操作或作战训练等活动。混合现实(MR)技术能够为用户带来超强感官体验,混合现实技术融合现实世界和虚拟世界的战场环境、单兵作战系统、训练信息等,例如通过在虚拟环境中对战场现实环境、场景的实时建模和计算分析,增强士兵单兵作战系统使用体验、士兵的军事训练体验和战场临境体验。

5 结语

随着未来战场的信息化、智能化发展,军事战争的复杂性和灵活性提升,战争节奏加快,亟需开展新型单兵作战系统设计研发以适应未来战争需求。目前单兵作战系统设计还存在许多待改进的地方,而传统单兵作战系统设计过程缺少系统性规划,具有设计研发周期长、投入费用高、迭代更新缓慢等诸多问题。随着物联网、大数据、云计算和人工智能等信息技术的发展成熟,使得数据孪生驱动的单兵作战系统设计过程具有可行性。本研究是针对国防装备领域的探索

性研究,面向单兵作战系统设计过程,研究基于数字孪生的单兵作战系统设计框架,提出数字孪生单兵作战系统设计模型、组成要素和关键支持技术,为新型单兵作战系统设计研发提供了参考。

参考文献:

- [1] 徐玉庄,胡贯蕾,慕欢.单兵信息化装备发展趋势分析[J].科技展望,2016,26(16):9.
XU Yu-zhuang, HU Guan-lei, QI Huan. Analysis on the Development Trend of Individual Information Equipment [J]. Science and Technology Outlook, 2016, 26(16): 9.
- [2] Michael Grieves. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [R]. (2015-03-01)[2021-02-10]. <https://www.researchgate.net/publication/275211047>.
- [3] 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.
TAO Fei, LIU Wei-ran, LIU Jian-hua, et al. Digital Twinning and Its Application[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(1): 1-18.
- [4] 耿建光,姚磊,闫红军.数字孪生概念、模型及其应用浅析[J].网信军民融合,2019(2):60-63.
GENG Jian-guang, YAO Lei, YAN Hong-jun. The Concept, Model and Application of Digital Twins[J]. Network Information, Military Civilian Integration, 2019(2): 60-63.
- [5] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):5-22.
TAO Fei, LIU Wei-ran, ZHANG Meng, et al. Digital Twin Five-dimensional Model and Its Application in Ten Fields[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(1): 5-22.
- [6] Tao F, Cheng J, Qi Q, et al. Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 3563-3576..
- [7] Tao F, Sui F, Liu A, et al. Digital Twin-driven Product Design Framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57: 3935-3953.
- [8] Zhang M, Sui F, Liu A, et al. Digital Twin Smart driven Product Design Framework[M]//Tao F, Liu A, Hu T, et al. Digital Twin Driven Smart Design. Pittsburgh: Academic Press, 2020.
- [9] 李雪瑞,侯幸刚,杨梅,等.数字孪生驱动的工业产品 CMF 设计服务模型构建与应用[J].计算机集成制造系统,2019,27(2):307-327.
LI Xue-rui, HOU Xing-gang, YANG Mei, et al. Construction and Application of CMF Design Service Model of Industrial Products Driven by Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 27(2): 307-327.
- [10] 李浩,陶飞,王昊琪,等.基于数字孪生的复杂产品

- 设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320-1336.
- LI Hao, TAO Fei, WANG Hao-qi, et al. Integrated Development Framework and Key Technologies of Complex Product Design and Manufacturing Based on Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(6): 1320-1336.
- [11] 董跃农. 轻武器装备第四次浪潮:士兵系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- DONG Yue-nong. Fourth Wave of Light Weapons and Equipment: Soldier System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [12] 王海涛, 刘力军, 向婷婷. 外军单兵作战系统概述[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(3): 54-58.
- WANG Hai-tao, LIU Li-jun, XIANG Ting-ting. Overview of Foreign Individual Combat System[J]. Electronic Information Countermeasure Technology, 2020, 35(3): 54-58.
- [13] 季自力, 王文华. 美军大力发展智能化单兵装备[J]. 军事文摘, 2020(3): 24-28.
- JI Zi-li, WANG Wen-hua. The US Military Vigorously Develops Intelligent Individual Equipment[J]. Military Abstracts, 2020(3): 24-28.
- [14] 马林, 樊向武. 图解美国“陆地勇士”单兵作战系统[J]. 科技与国力, 2012(3): 31-35.
- MA Lin, PAN Xiang-wu. Illustration of American “Land Warrior” Individual Combat System[J]. Science and Technology and National Strength, 2012(3): 31-35.
- [15] 刘婧. 英国国防部推出新型单兵装备[J]. 中国个体防护装备, 2016(6): 15.
- LIU JING. British Ministry of Defense Launches New Individual Equipment[J]. China Personal Protective Equipment, 2016(6): 15.
- [16] 严毅梅. 俄罗斯“未来战士”单兵作战系统: 战士—3 最新动向[J]. 轻兵器, 2019(7): 14-16.
- YAN Yi-mei. Russian “Future Soldier” Individual Combat System: Soldier-3 Latest Trend [J]. Light Weapons, 2019(7): 14-16.
- [17] 曹晓光. “未来战士”意大利陆军未来单兵作战系统构成解析[J]. 现代军事, 2010(5): 58-59.
- CAO Xiao-guang. Composition Analysis of “Future Soldier” Future Individual Combat System of Italian Army [J]. Modern Military, 2010(5): 58-59.
- [18] 原沙沙, 邵雨. 虚拟现实技术在未来模块化单兵装备中的应用[J]. 现代信息科技, 2018, 2(5): 89-90.
- YUAN Sha-sha, SHAO Yu. Application of Virtual Reality Technology in Future Modular Individual Equipment[J]. Modern Information Technology, 2018, 2(5): 89-90.
- [19] 王海龙. 军用智能可穿戴设备发展综述[J]. 电子技术, 2018(2): 5-7.
- WANG Hai-long. Overview of Military Intelligent Wearable Devices[J]. Electronic Technology, 2018(2): 5-7.
- [20] 杨洋. 单兵—装备人机工效试验与数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- YANG Yang. Research on Ergonomic Test and Numerical Simulation of Individual Soldier Equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2016.
- [21] 马超. 面向单兵状态评估的生理信息传输与融合技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- MA Chao. Physiological Information Transmission and Fusion Technology for Individual Soldier State Assessment[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [22] 陈蔡山林. 基于视觉和可达性的单兵系统人机工效研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- CHEN Cai-shanlin. Research on Ergonomics of Individual Soldier System Based on Vision and Accessibility [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2017.
- [23] 谌玉红, 李晨明, 郭亚飞. 士兵负重行军肩部疲劳研究[J]. 军事体育学报, 2015, 34(3): 1-4.
- CHEN Yu-hong, LI Chen-ming, GUO Ya-fei. Study on Shoulder Fatigue of Soldiers Marching with Load[J]. Journal of Military Sports, 2015, 34(3): 1-4.
- [24] 王增刚, 王金之, 冯茹, 等. 负重对行军士兵下肢步态特征的影响[J]. 医用生物力学, 2018, 33(4): 360-364.
- WANG Zeng-gang, WANG Jin-zhi, FENG Ru, et al. Effect of Weight Bearing on Lower Limb Gait Characteristics of Marching Soldiers[J]. Medical Biomechanics, 2018, 33(4): 360-364.
- [25] 蔡镜, 陈晓, 周宏. 结合 VC++和 Matlab 快速开发的单兵装备效能评估专家系统[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(10): 45-45.
- CAI Jing, CHEN Xiao, ZHOU Hong. Expert System for Effectiveness Evaluation of Individual Equipment Rapidly Developed by Combining VC ++ and MATLAB[J]. Automation Technology and Application, 2004, 23(10): 45-45.
- [26] 蒋毅, 陈晓, 周宏, 等. 交互式单兵作战仿真系统的研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1276-1278.
- JIANG Yi, CHEN Xiao, ZHOU Hong, et al. Research and Implementation of Interactive Individual Combat Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1276-1278.
- [27] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- TAO Fei, ZHANG He, QI Qing-lin, et al. Theory and Application of Digital Twin Model Construction[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(1): 1-15.