

· 专题“交叉科学前沿与发展” ·

## 人因工程研究进展及发展建议

陈善广<sup>1,2,4\*</sup> 李志忠<sup>2</sup> 葛列众<sup>3</sup> 张宜静<sup>2</sup> 王春慧<sup>4</sup>

1. 中国载人航天工程办公室, 北京 100081
2. 清华大学 工业工程系, 北京 100084
3. 浙江大学 心理科学研究中心, 杭州 310058
4. 中国航天员科研训练中心 人因工程国家级重点实验室, 北京 100094

**[摘要]** 近年来一门综合性交叉学科——人因工程(Human Factors Engineering, HFE)越来越受到人们的关注。它运用多学科理论和方法, 研究人、机器及其工作环境之间相互关系, 使系统的设计满足人的生理心理特性并实现安全高效的目标。本文简要回顾了人因工程学科的发展历程, 探讨了人因工程的基本概念、学科特点以及价值意义, 分析了人因工程与军事和工业革命发展的关系, 指出了未来人因工程发展方向。论文重点对人因工程涉及的关键科学问题, 如人的作业能力、人因失误与安全性、人机(新技术)交互原理、人因设计与测评方法等进行了梳理和阐释。最后针对我国人因工程发展现状和存在的问题, 从国家战略、基础研究与学科建设等方面提出了发展建议。

**[关键词]** 人因工程; 工效学; 人因失误; 人因安全; 人机交互; 人因设计与测评

众所周知, 航空、航天、航海、能源、交通等复杂系统领域是安全风险较高的领域, 即使在科学技术高度发展的今天, 灾难性事故仍时有发生, 而究其因多与人的因素相关。如何构建安全、和谐、高效的人机关系不仅是复杂军事与工业领域高度关注的课题, 而且也与人们未来工作与生活的品质息息相关。这些问题的解决正是一门近年来兴起的交叉学科——人因工程所致力目标。

那么什么是人因工程? 它有什么特点和意义? 它的关键科学问题是什么? 如何发展人因工程? 本文重点围绕这些内容进行阐述。

### 1 人因工程学科概述

#### 1.1 人因工程的概念与学科特点

人因工程(Human Factors Engineering, HFE)是随着军事装备发展, 科技、社会进步, 特别是工业化水平提升而迅速发展起来的一门综合性交叉学科。早期的研究主要聚焦人的工作效率, 可追溯到 19 世纪末著名的泰勒(Frederick W. Taylor, 1856—1915, 美国人)铁锹实验, 研究人、工具与生产



陈善广 中国载人航天工程副总设计师, 人因工程国家级重点实验室主任, 国际宇航科学院院士, 国家 973 重大计划项目首席科学家, 中国宇航学会航天医学工程与空间生物学专委会主任委员, 中国人类工效学学会复杂系统人因与工效学分会主任委员。获国家科学技术进步奖特等奖 1 项、一等奖 1 项、二等奖 1 项, 省部级科技成果一等奖 7 项、二等奖 9 项; 出版学术专著 7 部, 科普作品 5 部, 译著 3 部, 发表论文 100 多篇, 获国家发明专利 15 项。

效率之间的关系<sup>[1]</sup>。但人因工程作为学科出现还是在 20 世纪 40 年代二战以后, 欧美国家着眼降低人员失误和武器性能提升开始进行较系统的人因研究, 理念从“人适应机”转向“机适应人”, 而应用领域从军事装备逐步扩展到工业系统。1946 年, 人的因素(Human Factors)作为专业术语第一次正式出现于 Ross McFarland 的专著《航空运输设计中的人因问题》<sup>[2]</sup>中, 同期美国贝尔实验室建立人因研究专业实验室。欧洲一般采用工效学(Ergonomics, 国内也译为人类工效学、人机工效学等)一词描述人机关系与工作效率问题。1949 年, 英国成立了工效学研究

学会。1957年美国因人学会(1992年改为人因与工效学学会, Human Factors & Ergonomics Society)、1959年国际工效学联合会(International Ergonomics Association, IEA)相继成立。与此同时,美苏太空竞赛拉开帷幕,人因问题在载人航天计划一开始便得到了美苏两国的高度关注(长期空间飞行的人因问题见图1)。20世纪60年代开始,人因与工效学在国际上得到迅速发展,尤其受到发达国家的高度重视,极大推进了工业化水平的提升<sup>[3, 4]</sup>。

人因工程与工效学两个名词有很长的并存历史。目前,国内外学者倾向于使用人因工程或人因学作为学科名称,相关学会或学术会议则多并称为人因与工效学(Human Factors and Ergonomics)。从历史上看,工效学早期关注体力劳动相关的因素多一些,后面的发展与人因工程基本趋同。人因工程研究范畴更宽泛并特别突出人的因素在系统中的主导和关键作用,除了考虑针对系统(产品)设计中的人机关系问题外,已经扩展到在系统研发制造、运行使用等全周期过程中所有涉及人的因素问题<sup>[5]</sup>。给人因工程下一个准确的定义不太容易,目前学界普遍认可的是IEA<sup>[6]</sup>在2000年给出的表述:工效学(人因工程)是研究系统中人与其他要素之间交互作用的学科,并运用相关原理、理论、数据与方法开展系统设计以确保系统实现安全、高效且宜人(Well-being)的目标。

人因工程具有以下明显特点<sup>[7]</sup>:

(1) 强调以人为中心的理念(Human-Centered Philosophy)。人因工程聚焦一切有人参与的系统、产品或过程,人是其中的核心;主要研究人与其他要

素的交互规律,人是设计的出发点和落脚点;人是最灵动最活跃的因素,设计必须充分认识并考虑人的特性(生理心理特点、能力与局限等),充分发挥人的积极作用。

(2) 遵循系统工程方法(Systems Engineering Approach)。一方面,人与其他系统要素交互构成整体,这里的其他要素是指系统中的所有的人造物(如工作场所、产品、工具、技术过程、服务、软件、人工环境、任务、组织设计等)和其他人;另一方面,人具有不同方面特性(生理、心理和社会)和不同层面的属性(从操作人员的个体层面到群体组织甚至民族、地区和国家的宏观层面)。人与系统所处的环境也包含物理、社会、信息等不同方面。这些典型的系统特征要求进行人因工程设计时必须遵循系统思维和系统工程方法。

(3) 设计驱动(Design Driven)。人因工程本质上是面向设计、面向系统实现的应用学科,涵盖策划、设计、实现、评估、维护、再设计和持续改进等阶段。其中设计最为关键,因为2/3以上的故障均可追溯到设计源头。人因工程强调与系统研制相关方面均应参与到策划、设计和研发中,且人因专家应发挥广泛而独特的作用,如可以作为系统中人的要素的总代表,从微观到宏观层面考虑个体或团队属性;作为用户代表,与管理层和工程师建立良好的沟通协调界面。

(4) 学科目标协调。一要确保系统具有高效能(System Performance),包括(系统的)安全性、生产力、效率、有效性、质量、创新、灵活性、可靠性、可持续性等;二要确保系统宜人(Well-being),即满足人的多层级需求包括安全与健康、满意度、愉悦(审

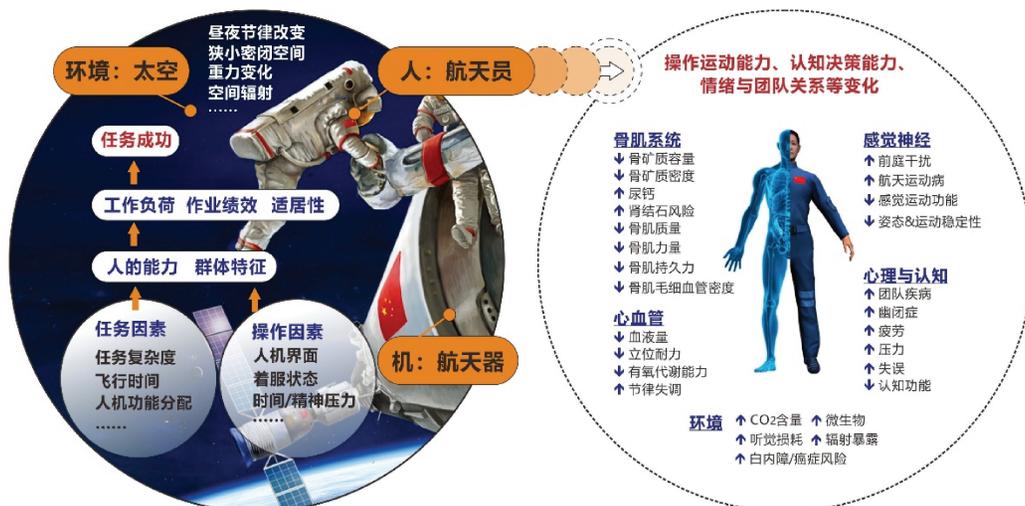


图1 长期空间飞行的人因问题

美)、价值实现与个性发展等。以往多将此目标表述为“人的安全、健康与舒适”,本文认为不够全面准确,特将 Well-being 译为“宜人”以达其意。因此,人因工程应确保系统实现安全、高效和宜人的目标。当然,同时确保所有目标要素实现是不容易的,往往存在矛盾和挑战,在某些情况下需要进行取舍和综合权衡。如,在速战速决的场合需要战斗员聚集力量发挥装备最大战力时,有可能要降低一些舒适性要求。

此外,人因工程涉及人的特性、机器设计、系统集成等多学科专业领域,在学科形成和发展过程中主要以心理学、生理学、生命科学、社会学、人类学和统计学为学科基础,并综合利用了控制科学、设计学、信息科学、系统科学等学科的理论和方法,因此多学科交叉融合也是人因工程学科的典型特征。

### 1.2 人因工程的价值与意义

人因工程的发展不仅着眼于系统绩效的提高,更把消除隐患确保安全置于首位,同时把满足人的多层次需求与系统功能及性能有机地统一起来。如果系统设计缺乏人因工程考虑,将会导致用户不满意甚至造成人员身体疾患或损伤,导致系统性能下降、效率低下,或者让人容易发生失误,并导致事故。人因工程考虑不周常常造成系统研发周期延长,研发费用增高。有人可能认为产品研制中考虑人因工程会增加额外成本,但事实上恰恰相反。数据统计与分析表明,如果在产品设计早期就考虑人因工程,费用仅占总投入的2%;而如果在产品交付使用时发生问题再引入人因工程改进,费用可占总投入的20%以上<sup>[4]</sup>。多年来,基于人因工程的人—系统整合(Human System Integration, HSI)方法得到美国国防部(DoD)、核电部门及美国国家航空航天局(NASA)等部门的高度重视和推广使用<sup>[8-10]</sup>。实践证明:HSI在提升系统性能的同时大大节省了系统研发成本,包括节省人力资源,降低操作人员的技能需求,缩短训练时间,提高保障和维护效率,减少因人机适配问题造成的安全风险等<sup>[9, 10]</sup>。

人一机关系本质上反映的是人—人关系,因为机是人的创造物,必然会打上人的烙印;处理好人机关系就必须处理好设计者与使用者之间的关系,它是对立统一的。实践中,一方面,设计者常错把自己当作使用者而不能考虑到真实用户的需求;另一方面,使用者则期望系统/产品完全了解并满足个人需求,而不能理解设计者或工程上的约束,因此抱怨系统/产品不好用。人因工程为系统/产品(设计者)和

使用者之间架起了一座科学合理的沟通和方法学桥梁。

人因工程秉承“以人为中心”的设计理念,就是让科技回归到以人为本的初衷,让我们创造的世界使人们获得安全感和高品质的生活。这一理念对促进人类社会与自然的绿色和谐发展也会有重要意义。

可见,人因工程追求的高安全性、高效率、高满意度、人机融合、缩短周期、降低成本等目标,无论对于决策管理者、工程师还是最终用户甚至大众都具有重要的价值和意义。

### 1.3 人因工程学科的发展趋势

二战的军事装备改进需求是人因工程学科的催生剂,但其发展壮大与工业革命紧密相连。随着工业革命1.0机械化时代,发展到2.0电气化时代,再到3.0自动化时代和未来4.0智能化时代,人因研究从早期关注劳动效率和职业病,深入到解决复杂的人与自动化、智能化的安全高效交互的问题,人的能力提升也经历从体力解放、效率提升到智能增强的发展过程。工业革命为人因工程发展提供了难得的舞台;反过来,人因工程推动了工业革命的进步,特别是提升了工业产品和系统的适人性水平<sup>[11]</sup>。

国际上,军事装备、航空航天及核电等复杂工业系统领域一直高度重视人因研究,并制定了相关标准规范。美国国防部和有关军兵种成立了人因工程相关研究机构,建立了“人因工程标准体系”并在装备研制中实施<sup>[12]</sup>。NASA在对大量飞行数据和经验总结的基础上,形成了《航天飞行人一系统标准》、《人机整合设计手册》以及针对各个工程项目的设计标准规范,成为各类航天器适人性设计的重要依据标准<sup>[13]</sup>。美国核管理委员会(NRC)对核电厂设计的人因工程审查做出了详细的规定<sup>[14]</sup>,还发布了《人因工程计划评审模型》(NUREG-0711)和《人一系统界面设计评审指南》(NUREG-0700)<sup>[15]</sup>及诸多与人的可靠性分析方法、人员效能等相关的标准和报告,构成了比较完整的核电领域人因工程法规与标准体系。美国联邦航空局(FAA)颁布了美国联邦航空条例(Federal Aviation Regulations, FAR),其中对驾驶舱安装的设备等做出了人因学规定,用以保障飞行安全<sup>[16]</sup>。

人因工程近年来发展迅速,总体看有以下趋势:一是研究领域不断扩大。从传统人机关系研究扩大到人与工程设施、生产制造、技术工艺、方法标准、生活服务、组织管理等要素的相互协调适应上。二是

应用范围越来越广泛。人因工程学的应用从航空航天、复杂工业系统扩展到各行各业,以及人类生活的各个领域,如衣、食、住、行、学习及工作等各种设施用具的科学化、宜人化。在新兴的信息与互联网技术和产品中,人机界面与人机交互设计对产品的用户体验尤为关键。人一技术共生、一环交互、道德和隐私安全、幸福和健康、普适可达性、学习和创造力、社会组织和民主等被列为现代人交互七大挑战<sup>[17]</sup>。三是与认知科学结合越来越紧密。人因工程研究的核心是人,而脑与认知科学对人的意识与思维的认识为人因工程提供了重要的理论基础和优化设计的科学基础。近年兴起的神经人因学(Neuro-ergonomics)得到了关注和发展。四是新技术涌现带来新的人因挑战和方向。大规模数字化、云计算、物联网、无人驾驶、虚拟现实、先进机器人技术、人工智能等领域兴起<sup>[18]</sup>,导致了人机关系的变化,也带来了新的人因方向。如美国国防高级研究计划局(DARPA)和美国国防研究所(NDRI)等研究机构在部署未来颠覆性技术研究计划中,高度关注了人员效能增强、先进人机交互技术、人一智能机器人协作等新方向<sup>[19-21]</sup>。

总体来看,人因工程学科发展势头良好,但也存在一些问题有待解决完善:一是人们(特别是管理层、工程师、用户)普遍对人因工程的潜在价值还缺乏足够认识。二是现有人因工程技术和方法不足以支撑应用需求,如市场上缺少工效学设计与验证的工具软件和产品,评价标准缺乏且不统一。三是与工程学、心理学等经典学科相比,人因工程还较羸弱,仍在发展中,特别需要形成自身的理论基础。四

是由于其多学科背景,其研究方向及应用范围过于宽泛,在学界交流时有时难以厘清。

#### 1.4 人因工程在中国的发展概况

人因学思想在中国萌芽较早,以陈立先生 20 世纪 30 年代出版的《工业心理学概观》一书以及所开展的工作选择和工作环境工效等研究为主要标志<sup>[22]</sup>。20 世纪 50 至 60 年代中期是人因学科的起步建设期,后经历了近 20 年的发展停滞期,90 年代起,随着我国科技和工业化水平提高以及重大工程牵引,人因学科进入快速成长期<sup>[23, 24]</sup>。

人因学在中国的研究涵盖界面显示、人机控制交互、人和环境界面、负荷与应激、安全与事故分析、人与计算机交互、产品可用性、神经工效学和人因可靠性等研究领域<sup>[25, 26]</sup>。人因工程的基础研究从早期的人体测量学等传统方向发展到了认知工效学、神经人因学、认知建模和智能系统交互等方面<sup>[27, 28]</sup>,应用领域也从劳动生产、机械或电子产品、汽车驾驶等拓展到空间站工效学测评、高铁人因工程分析<sup>[29]</sup>、大飞机与舰船人因设计<sup>[30, 31]</sup>、核电站人因学测评<sup>[32]</sup>和医疗人因<sup>[33]</sup>等重大复杂系统和民生应用领域。中国人因工程在航天领域的发展尤为引人注目,经过二十余年的研究和工程实践,开展了面向长期空间飞行的人的能力规律与机制研究<sup>[34]</sup>,研发了我国首个具有自主知识产权的航天员建模仿真系统(AMSS)(其中航天员交会对接操作的认知决策过程如图 2 所示)<sup>[35]</sup>,建立了一套较完善的工效学测评技术、方法、流程和规范,形成了具有中国特色的航天人因工程体系<sup>[36]</sup>。

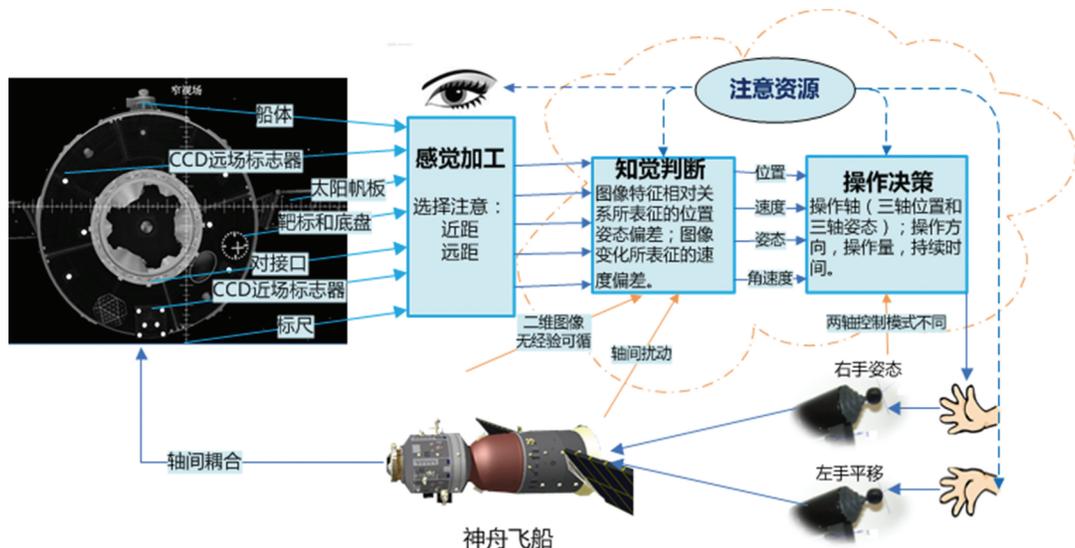


图 2 航天员交会对接操作的认知决策过程<sup>[36]</sup>

通过对国际 16 个人因工程领域期刊(见附录) 2010—2020 年所刊载的论文检索分析,中国学者共发表论文 2 291 篇,占全部文章数量(15 088)的 15.18%,表明中国学者正在成为人因工程研究领域的中坚力量。中国人类工效学学会成立于 1989 年,逐步发展到 11 个分会,会员 2 200 多人,成为国际第 2 大人因学会。随着人因理念在用户体验领域的渗透,国内组建有用户体验联盟、用户体验专家组、国际体验设计协会及工程心理学分会等人因相关学术组织。此外,自 2016 年起,由学界发起、政府支持的中国人因工程高峰论坛已连续成功举办 5 届,围绕人因设计与测评、人因工程与工业 4.0、人因工程与人工智能等主题以及面向推动行业应用等专题进行了研讨交流。

总体而言,目前国内人因工程学科发展势头良好,但在国际上处于整体跟随、部分应用领域(如载人航天)崭露头角的状况,基础研究更多是基于国外理论、模型进行本地化、改进或应用,在理论层次、研究技术手段以及结合应用领域验证等方面都存在不少差距。重大领域方向和重要行业管理部门未能深刻认识人因工程的价值和意义,在基础研究、实验室建设和标准规范制定上投入少,在重大工程应用上推动不力。此外,很多高校也没有设立人因工程学科方向。

## 2 人因工程的关键科学问题

本质上讲,人因工程是面向应用的学科,亟需发展自身的基础理论,不断回答在形成独特的技术方法体系以及解决实际问题中蕴含的基本科学问题,如,人的作业能力及其作用机制、人因失误与可靠性及安全性、人机(新技术)交互的基本原理、人因设计与测评方法、人机系统建模与仿真、未来社会发展的人因方案等。

### 2.1 人的作业能力特性及其作用机制

在人机系统中,人员的作业能力直接决定了系统的效能水平,这就需要探究人的作业能力特征、变化规律及其对系统效能的作用机制。具体研究包括系统中个体和团队的作业能力的定义、测量和评价;人的感知、认知和决策能力对作业绩效的影响机理;不同环境、机器及任务条件下人的作业能力的变化;人的作业能力的塑造目标及方法等。传统人因工程研究中,在信息加工理论框架下学者多采用刺激—反应范式开展研究,并通过生理、心理和行为反应等

多种指标来研究人的绩效<sup>[38, 39]</sup>。随着脑科学的兴起,学者开始探究人机交互过程中操作者的神经机制<sup>[40]</sup>。以往研究基于心理学、人类学或生理学的理论与方法,分别从生理和心理的不同层面认识人的作业能力,虽然涉及作业能力形成机理的各方面,但没有建立一个清晰完整的理论构架来理解认识人的作业能力及其变化规律。未来将有更多的新技术(如 VR 仿真)手段被引入,除了发展建立新的研究范式,从生理、心理和社会等多维度、多层次认识人的作业能力外,人的作业能力研究也可深入到神经元等细胞层面和血红蛋白等蛋白质层面。本科学问题的突破将深化对人的认识,为机器(系统)的设计和人机界面的设计提供有效依据,也有助于解决操作人员选拔及训练问题。

### 2.2 人因失误、人因可靠性与安全性

航空航天、航海、核电及交通领域事故分析报告表明,70% 以上的重大事故与人因失误(human error,简称为人误)密切相关<sup>[41-43]</sup>。在复杂系统特别是人机紧耦合系统(具有人在环、人机交互较频繁、人机相互影响较大等特征的系统)中,与人的因素相关的安全(简称人因安全)风险及其背后的基础理论问题受到了广泛关注<sup>[44]</sup>。相关的科学问题包括:不安全行为与人误的表现特征及规律,人机交互及任务环境因素对人误的作用途径及机理,人误与人因可靠性建模、分析与评估的理论与方法,人误预防、检测、预警与干预的一体化系统安全保障理论等。国内外在人误机理研究<sup>[45]</sup>(见图 3)以及人因可靠性分析与提高方面开展了广泛研究<sup>[46]</sup>。在人误

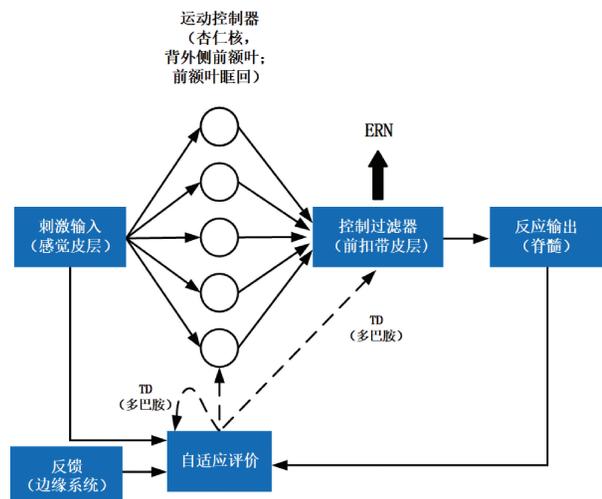


图 3 人误的生理模型,当负强化学习信号通过多巴胺传递到前扣带皮层时会产生 ERN,从而改变行为表现。

ERN=失误相关负波;TD=时差误差<sup>[46]</sup>

机理方面,现有研究表明任务、情境(环境)、人机界面和人员状态是导致人误的重要原因,但缺乏探讨多因素对人误的综合作用,缺乏探讨人误内在神经机制及其生物学机理的探讨,也缺乏探讨人误对系统的安全影响边界等问题。随着社会和技术的发展,人机交互逐渐变化为人机协同,多人团队的工作形式更为常见,但研究很少关注人机(尤其是智能体)团队的人误发生机理。人因可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA)目前已经发展了几十种方法,但所建立的模型比较简单化且不能有效反映人误发生过程和机理,在适用范围方面存在局限性<sup>[47]</sup>。美国 NASA、国防部致力于通过改善人机交互设计、人员选拔和训练、完善规则制度等提高人因可靠性。国内人因安全理论研究与应用也开始在一些应用领域兴起,如航空航天、核电和交通等领域。因此,需要通过多学科的交叉融合的人误及人因安全研究,丰富对人误的生理心理及社会机制的认识,并从人机交互设计、人员选拔与训练等多角度,构建针对性强的人误预防与人因可靠性提高的系统理论方案。

### 2.3 人机(新技术)交互的基本原理

人机交互指的是人与系统之间的交互,在不同的科技发展时代中系统是不断进化的,机械化时代是各种操作机器,计算机时代更多是软硬件系统,智能化时代则是各种智能组合形式的系统。近年来,新技术所导致的人机关系的变化引起了人们的关注。在自动化与智能化的背景下,人机关系的研究从人机匹配扩大到人机协同、人机互知、人机互信、人机互懂(团队)、人机融合等<sup>[49, 50]</sup>。人机关系的变化不仅带来了自适应界面设计、生态界面设计等新的研究命题<sup>[51]</sup>,也使得在人机形成团队的方向上,提出了许多需要研究的特殊问题,其中人机信任、伦理导向的人工智能设计等问题尤其突出<sup>[52, 53]</sup>。而新型人机交互则除了解决手势、眼动、脑机等交互的多模态交互理论与感知机制外<sup>[54]</sup>,还需要考虑未来人机交互界面将从实体交互到虚拟(现实)交互的发展<sup>[55]</sup>。未来新技术的发展,还将持续带来新的人因研究课题,包括人与这些新技术交互的特点、产生的新问题以及解决这些问题的新理论和设计方法。因此,关注并发展人机交互和界面设计的原理和优化方法,可以提升人机交互的绩效和安全性,也可以提升系统/产品的用户体验。此外相关人因学命题的解决也可将人工智能带入良性发展的轨道,从而避免可能给人类带来不可预知的风险。

### 2.4 人因设计与测评方法及人机系统建模与仿真

将人因设计与测评纳入工程系统的研制过程尤为重要,亟需开发适合设计师使用的人因设计的方法、工具和标准,建立多层次可量化的人因测试与评价方法与规范。基于人因学理论的人—系统整合(HSI)设计流程与方法以国际标准 ISO13407 以人(用户)为中心的设计(User Centered Design, UCD)方法为内核,已在美国 DoD 和 NASA 装备研制管理中形成标准并推广使用取得了良好效益<sup>[8]</sup>。人因工程学科为 HSI 设计提供理论支撑,主要研究内容包括基于人的能力特性的任务分析,人机功能分配原理与方法,可用性及人—系统综合评价方法等。此外,为了深化和拓展人因工程研究与应用,需要建立能够描述、解释和预测人的行为与决策的计算仿真模型,建立人机系统整合模型及仿真系统,以及开发相关的人因建模与仿真软件平台<sup>[56, 57]</sup>。具体研究可分解为:疲劳和负荷的生物学模型;人员作业能力的可计算模型;人机系统演化过程建模;不同任务及环境的人机系统仿真;人机系统建模与仿真工具平台等。人的现有模型都对人进行了不同程度的简化与抽象,未来可基于最新的人因研究成果和建模理论进行改进,力争能够预测人类行为和决策。在孪生技术和认知知识图谱技术的推动下,人因工程研究还将可能构建智能化人机系统仿真的理论与方法,以对系统的效能和安全性做出及时的评估和预测。

### 2.5 未来社会发展的人因方案

对于人类发展的以下诸多重要议题,通过提供相应的人因方案,可以极大地提高社会发展的可持续性。

#### (1) 特定人群的人因设计

各类设施和服务、工作环境、消费品的设计等都应该全面考虑到各类特殊人群(如老人、儿童和失能人士),让所有人都拥有安全舒适的工作和生活条件,而不因其年龄、体形和能力等受到影响<sup>[58]</sup>。普适性设计(Universal/inclusive Design)已成为国际人因工程的一个重要方向,正受到越来越多的关注。

#### (2) 应急管理 with 灾难应对

人类时常面临严重事故、突发公共卫生事件、重大自然灾害等的威胁,在应急管理中建立人因方案,可通过科学设计及预防与救护流程,建立人机协同方案,提高人员绩效和系统反应效率,减少无谓损耗和浪费等,在灾难预防、应急处置、灾难后恢复与重建等方面发挥作用<sup>[59]</sup>。

### (3) 全球化和可持续性发展

跨文化问题目前也是国际人因工程学术界研究的重要方向之一。国际交流与合作、企业的全球布局、产品的国际推广、参与国际工程建设等都需要考虑文化差异的问题<sup>[60, 61]</sup>。节能节水、减少粮食和资源浪费、减少交通拥堵等可持续性发展问题既要从技术发展的角度,也要从人类行为引导的角度寻求解决方案。人因研究和应用将通过认知协调和行为引导,降低跨文化的沟通成本,提高社会资源利用率<sup>[62]</sup>。

### (4) 网络化等特定领域的应用研究

网络化信息化时代除了带给人生活便利外,还带来了游戏成瘾、网络诈骗、隐私安全等众多问题,这些问题的形成机理及社会影响机制等都是人因研究的方向。此外,职业健康与安全、交通安全、医疗服务系统等诸多领域也都有赖于人因工程的研究。国际研究机构都有上述领域的人因工程专家,相关研究在人因工程学术界长期保持较高的热度<sup>[63]</sup>。

## 3 人因工程发展建议

### 3.1 面向国家(国防)重大战略,大力推广人因工程理念与方法

人因工程具有重要理论意义与应用价值,应将人因工程纳入国家质量强国战略,纳入到绿色制造技术、新一代信息技术、智慧城市和数字社会技术等国家创新驱动发展战略及相关产业技术体系部署,纳入到人工智能、脑与认知、人机融合等国家和国防发展战略和规划体系中,抢占装备制造的制高点,提升中国制造核心能力与工业化水平。不仅在

国家重大工程领域还要在更多行业和领域中开展人因工程应用,推广人因工程的理念与方法。

### 3.2 加强人因工程基础理论研究,推动学科和实验室建设

人因工程研究的技术方法跨越诸多学科,依赖于相关学科的技术发展,其自身基础理论和技术的研究深度不够,已有技术和方法的效度已不适应时代要求,基础数据、规律、技术方法的储备也无法满足应用需求。建议国家层面高度重视人因基础理论研究的规划布局,加大各相关部委的基础研究投入;大力加强基础教育,鼓励高校开设人因工程本科和研究生课程,增大相关专业硕士博士的培养规模;大力支持人因工程相关重点实验室建设,拓展人因工程共性科学与技术问题的研究,推动建立跨行业的人因工程国家实验室。

### 3.3 建设人因设计方法、测试技术及评测标准体系

鉴于人因设计对产品质量、安全性和竞争力的重要作用,建议制定产品全生命周期的人因设计法规和标准,建立人因设计的基础理论及方法体系,研制具有自主知识产权的人因设计软件,将人因工程的思想和方法论贯穿系统/产品设计研制的全过程。针对当前系统/产品人因工程评价中定性指标多定量指标少、主观评价多客观评价少、缺乏人因工程/工效学专业测评机构等问题,建议逐步建立覆盖重点应用行业和领域的人因/工效测评平台与技术,形成较完善的测评标准体系,成立一批具有资质的专业测评机构。

附录 国际 16 个人因工程领域期刊

序号	名称
1	Human Factors
2	Ergonomics
3	International Journal of Human Computer Interaction
4	International Journal of General Systems
5	International Journal of Occupational Safety and Ergonomics
6	Behaviour & Information Technology
7	Applied Ergonomics
8	International Journal of Industrial Ergonomics
9	International Journal of Human Computer Studies
10	Accident Analysis and Prevention
11	Journal of Safety Research
12	Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries
13	New Technology Work and Employment
14	Cognition Technology & Work
15	Universal Access in the Information Society
16	Interacting with Computers

## 参 考 文 献

- [1] Taylor FW. The principles of scientific management. New York: HarperCollins, 1919.
- [2] McFarland RA. Human factors in air transport design. New York: McGraw-Hill Book Company, 1946.
- [3] Proctor RW, Zandt TV. Human factors in simple and complex systems, Third Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [4] 威肯斯 CD, 李 JD, 刘乙力, 等. 人因工程学导论(第二版). 张侃, 等, 译. 上海: 华东师范大学出版社, 2007.
- [5] Gavriel S. Handbook of human factors and ergonomics (4th Ed). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2012.
- [6] IEA. What is ergonomics. (2020-12-08)/[2021-04-14]. <https://iea.cc/what-is-ergonomics>.
- [7] Jan D, Ralph B, Peter B, et al. A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. Ergonomics, 2012, 55(4): 377—395.
- [8] Zumbado JR. Human Systems Integration (HSI) practitioner's guide. (2015-11-01)/[2021-04-22]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150022283>.
- [9] Casey R, Kovesdi MS, Jeffrey CJ, et al. Exploring the use of cognitive models for nuclear power plant human-system interface evaluation. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2019, 63(1): 2190—2194.
- [10] Silva-Martinez J, Schoenstein N, Salazar G, et al. Implementation of Human System Integration workshop at NASA for human spaceflight. (2019-10-21)/[2021-04-22]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190032354>, 2019.
- [11] Avi H. System thinking begins with human factors: challenges for the 4th industrial revolution. In system engineering in the fourth industrial revolution: big data, novel technologies, and modern systems engineering. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [12] 布什 PM. 工效学基本原理、应用及技术. 陈善广, 周前祥, 柳忠起, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2016, 7—9.
- [13] 陈善广, 姜国华, 陈欣, 等. NASA 人一系统整合标准与指南译丛: 人整合设计手册. 北京: 中国宇航出版社, 2016.
- [14] United States Nuclear Regulatory Commission. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition—human factors engineering (NUREG-0800, Rev. 3, Chapter 18). (2021-03-25)/[2021-04-22]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/ch18/index.html>.
- [15] United States Nuclear Regulatory Commission. Human factors engineering program review model. (2012-12-01)/[2021-04-22]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1232/ML12324A013.pdf>.
- [16] FAA. CFR Part25. Airworthiness standards: Transport category airplanes. Washington, DC: FAA, 2002.
- [17] Constantine S, Gavriel S. Seven HCI grand challenges. International Journal of Human-Computer Interaction, 2019, 35(14): 1229—1269.
- [18] 许为, 葛列众. 人因学发展的新取向. 心理科学进展, 2018, 26(9): 1521—1534.
- [19] Gilmore CK, Chaykowsky M, Thomas B. Autonomous unmanned aerial vehicles for blood delivery: A UAV fleet design tool and case study. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2019.
- [20] Emanuel P, Walper S, DiEuliis D, et al. Cyborg soldier 2050: Human/Machine fusion and the implications for the future of the DOD. (2019-11-25)/[2021-04-22]. <https://community.apan.org/wg/tradoc-g2/mad-scientist/m/articles-of-interest/300458>.
- [21] Norton A, Ober W, Baraniecki L, et al. The DARPA robotics challenge finals: humanoid robots to the rescue. Perspectives on human-robot team performance from an evaluation of the DARPA robotics challenge, 2018: 631—666.
- [22] 陈立. 工业心理学概观. 北京: 商务印书馆, 1935.
- [23] 郭伏, 孙永丽, 叶秋红. 国内外人因工程学的比较分析. 工业工程与管理, 2007, 6: 118—122.
- [24] 许为, 葛列众. 智能时代的工程心理学. 心理科学进展, 2020, 28(9): 1409—1425.
- [25] She MR, Li ZZ, Ma L. User-defined information sharing for team situation awareness and teamwork. Ergonomics, 2019, 62(8): 1098—1112.
- [26] Liu P, Li ZZ. Quantitative relationship between time margin and human reliability. International Journal of Industrial Ergonomics, 2020, 78: 102977.
- [27] Wu CX, Liu YL. Queuing network modeling of psychological refractory period (PRP). Psychological Review, 2008, 115(4): 913—954.
- [28] Norton A, Ober W, Baraniecki L, et al. Analysis of human-robot interaction at the DARPA robotics challenge finals. The International Journal of Robotics Research, 2017, 36(5-7): 483—513.

- [29] 姜良奎. 最新人体数据在高铁人因工程分析中的应用研究. 智能制造, 2019(Z1): 83—87.
- [30] 傅山, 王黎静, 黄丹. 民用飞机驾驶舱人机工效综合评估理论与方法研究年度报告. 科技资讯, 2016, 14(13): 179—180.
- [31] 廖镇, 王鑫, 刘双. 人因工程在指挥控制信息系统中的应用研究// 第五届中国指挥控制大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2017: 5.
- [32] Wang DX, Gao Q, Tan HB, et al. Coordination breakdown in nuclear power plant control rooms: cause identification and behaviour-sequence analysis. *Ergonomics*, 2020, 63(6): 660—681.
- [33] 王秋惠, 姚景一. 下肢外骨骼康复机器人人因工程研究进展. 图学学报, 2021, 1—9.
- [34] 陈善广, 王春慧, 陈晓萍, 等. 长期空间飞行中人的作业能力变化特性研究. 航天医学与医学工程, 2015, 28(1): 1—10.
- [35] Chen S, Liu Y, Wang C, et al. Astronaut performance simulations: An integrated modeling and simulation platform. *Human Performance in Space: Advancing Astronautics Research in China (supplement to Science)*, 2014(S2): 57—60.
- [36] 陈善广, 姜国华, 王春慧. 航天人因工程研究进展. 载人航天, 2015, 21(2): 95—105.
- [37] Zhang YJ, Wang M, Li PJ, et al. Space flight operation skills: Effects of operation complexity and training method. *Human Performance in Space: Advancing Astronautics Research in China (supplement to Science)*, 2014(S2): 42—45.
- [38] Rasmussen J, Pejtersen AM, Goodstein LP. *Cognitive systems engineering*. New York: Wiley, 1994.
- [39] Charles RL, Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied ergonomics*, 2019, 74: 221—232.
- [40] Duan YP, Li Z, Tao XM, et al. EEG-Based maritime object detection for IoT-Driven surveillance systems in smart ocean. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9678—9687.
- [41] 张力, 匡原, 刘朝鹏, 等. 核电厂调试人员职业压力对人因失误的影响路径. 安全与环境学报, 2021: 1—9.
- [42] 姜菲菲, 黄明, 江福才. 基于 CREAM 的船舶引航员人因可靠性预测研究. 交通信息与安全, 2017, 35(3): 26—33.
- [43] Hansen FD. Human error: A concept analysis. *Journal of Air Transportation*, 2007, 11(3): 61—78.
- [44] Nian CT, Tee C, Thian SO, et al. Abnormal behavior recognition using CNN-LSTM with attention mechanism// In 2019 1st International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1—5.
- [45] Woods DD. *Behind human error*. Farnham, UK: Ashgate Publishing, Ltd., 2010.
- [46] Senders JW, Moray NP. *Human error: Cause, prediction, and reduction*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [47] Patriarca R, Ramos M, Paltrinieri N, et al. Human reliability analysis: Exploring the intellectual structure of a research field. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 107102.
- [48] Hollnagel E. *Cognitive reliability and error analysis method*. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 1998.
- [49] De Visser EJ, Peeters MM, Jung MF, et al. Towards a theory of longitudinal trust calibration in human-robot teams. *International journal of social robotics*, 2020, 12(2): 459—478.
- [50] Gervits F, Thurston D, Thielstrom R, et al. Toward genuine robot teammates: Improving human-robot team performance using robot shared mental models. In *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, 2020: 429—437.
- [51] Chen KJ, Li ZZ, Jamieson GA. Influence of information layout on diagnosis performance. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2018, 48(3): 316—323.
- [52] Lee JD, See KA. Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human factors*, 2004, 46(1): 50—80.
- [53] Kaplan J. *Artificial intelligence: Think again*. *Communications of the ACM*, 2016, 60(1): 36—38.
- [54] 吴朝晖, 俞一鹏, 潘钢, 等. 脑机融合系统综述. 生命科学, 2014, 26(6): 645—649.
- [55] Sutcliffe AG, Poullis C, Gregoriades A, et al. Reflecting on the design process for virtual reality applications. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2019, 35(2): 168—179.
- [56] Laughery KR, Plott B, Matessa M, et al. Modeling human performance in complex systems. In Salvendy (eds), *Handbook of human factors and ergonomics (4th Ed)*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2012: 931—961.

- [57] Zhao GZ, Wu CX. Effectiveness and acceptance of the intelligent speeding prediction system (ISPS). *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 52: 19—28.
- [58] Rouse WB, McBride D. A systems approach to assistive technologies for disabled and older adults. *The Bridge*, 2019, 49(1): 32—38.
- [59] Moore D, Barnard T. With eloquence and humanity? Human factors/ergonomics in sustainable human development. *Human factors*, 2012, 54(6): 940—951.
- [60] Thatcher A, Waterson P, Todd A, et al. State of Science: ergonomics and global issues. *Ergonomics*, 2018, 61(2): 197—213.
- [61] Bentley T, Green N, Tappin D, et al. State of science: the future of work-ergonomics and human factors contributions to the field. *Ergonomics*, 2020: 1—13.
- [62] Pinzone M, Albe F, Orlandelli D, et al. A framework for operative and social sustainability functionalities in Human-Centric Cyber-Physical Production Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 139: 105—132.
- [63] Persson H, Åhman H, Yngling AA, et al. Universal design, inclusive design, accessible design, design for all; different concepts—one goal? On the concept of accessibility—historical, methodological and philosophical aspects. *Universal Access in the Information Society*, 2015, 14(4): 505—526.

## Research Progress and Development Suggestions on Human Factors Engineering

Chen Shanguang<sup>1,2,4\*</sup> Li Zhizhong<sup>2</sup> Ge Liezhong<sup>3</sup> Zhang Yijing<sup>2</sup> Wang Chunhui<sup>4</sup>

1. *China Manned Space Agency, Beijing 100081*

2. *Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*

3. *Center for Psychological Sciences at Zhejiang University, Hangzhou 310058*

4. *National Key Laboratory of Human Factors Engineering,*

*China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094*

**Abstract** Recently, an interdisciplinary subject, Human Factors Engineering (HFE), has attracted more and more attention. HFE is the scientific discipline concerned with the understanding of humans, machines and the interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies multi-disciplinary theories and principles, and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance. This paper briefly summarizes the history of HFE, discusses the basic concepts, the characteristics of discipline and the value of HFE, analyzes the relationship between HFE and the development of military and industrial revolution, points out the future development trend of HFE. Critical scientific issues, such as human performance capability, human error and safety, human-machine (new technology) interaction theory, ergonomic design and evaluation methods, are elaborated. Finally, in view of the development status and problems of HFE in China, suggestions for development are put forward from the aspects of national strategy, basic research and discipline construction.

**Keywords** human factors engineering; ergonomics; human error; human related safety; Human-Machine Interaction; ergonomics design and evaluation

(责任编辑 刘敏)

\* Corresponding Author, Email: csg08@mail.tsinghua.edu.cn