

【专题：人机工程与产品创新设计】

人机系统可靠性设计研究进展

孙远波¹, 张磊^{1,2a,2b*}, 唐嘉薇¹, 辛悦铭¹, 赵烜东¹, 林可欣¹

(1. 北京理工大学 设计与艺术学院, 北京 100081; 2. 天津理工大学 a. 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 b. 天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384)

摘要: **目的** 研究人机系统可靠性设计理论。**方法** 通过对可靠性概念的描述, 进而对机械可靠性、人的可靠性、人机系统可靠性的研究现状、主要分析方法及应用等方面的文献进行梳理与综合分析。初步构建了人机系统可靠性设计研究框架。**结论** 指出人机系统可靠性设计的未来发展趋势, 为该领域进一步的研究提供参考。

关键词: 可靠性设计; 人的可靠性; 机械可靠性; 人机系统可靠性; 研究进展

中图分类号: U270.2; TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0011-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.002

Research Progress of Human-machine System Reliability Design

SUN Yuan-bo¹, ZHANG Lei^{1,2a,2b*}, TANG Jia-wei¹, XIN Yue-ming¹, ZHAO Xuan-dong¹, LIN Ke-xin¹

(1. School of Design & Art, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. a. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control b. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: The work aims to study the human-machine system reliability design. Through the description on the concept of reliability, the literature on research status of machine reliability, human reliability, human-machine system reliability, main analysis methods and applications were reviewed and comprehensively analyzed. The reliability design research framework of human-machine system was preliminarily constructed. The future development trend of human-machine system reliability design is pointed out, which provides reference for further research in this field.

KEY WORDS: reliability design; human reliability; machine reliability; human-machine system reliability; research progress

可靠性是指一事物在给定的条件下和规定的时间间隔内执行其要求功能的概率。依据评估对象的不同, 可靠性可分为硬件系统可靠性、结构可靠性、软件可靠性与人的可靠性。系统可靠性的研究对象主要指由串联系统组成的硬件系统, 机械可靠性与力学原理相关, 与部件的配置或关系无关, 人的可靠性则旨在识别和分析各种工业系统中人为故障的原因与后果。

相关学者关于系统可靠性的研究大多数围绕可靠性分析模型的评估与优化展开。胡晓义等^[1]对基于系统模型的可靠性分析方法进行总结, 从系统结构模型与系统行为模型两个方面展开, 介绍了基于架构分析与设计语言模型的故障树分析 (Fault Tree Analy-

sis, FTA) 系统可靠性研究方法, 以及基于模糊认知图 (Fuzzy Cognitive Map, FCM) 的失效模式和效应分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) 可靠性分析方法; 张进春等^[2]将混合冗余策略引入 k -out-of- n : G 系统的可靠性优化中, 提出基于混合冗余策略的系统可靠性优化新模型。Tu 等^[3]为建立冗余设计策略下的模块化多电平变换器 (Modular Multi-level Converter, MMC) 系统可靠性模型, 对不同冗余设计情况下的可靠性评估进行了量化研究, 基于组合模型和泊松过程模型对系统可靠性进行了评估。不同事物的可靠性可采用适当的统计推断技术进行评估, 例如: 硬件的可靠性分析可采用故障树分析、事件树分析、可靠性框图、Markov 模型及 Petri 网等方

收稿日期: 2023-04-14

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1303304); 教育部高等教育司“人因与工效学”产学研协同育人项目 (202002SJ13)

法进行。贝叶斯网络 (Bayesian Networks, BNs) 是一种重要的概率有向无环图模型, 可有效地表征和分析因素间依赖关系的不确定性。近年来, 关于 BNs 在可靠性评估领域应用广泛。Cai 等^[4]从可靠性评估对象的角度 (即硬件系统、结构、软件和人的角度) 研究了基于 BNs 的可靠性评估一般程序, 包括 BNs 结构建模、BNs 参数建模、BNs 推理, 以及模型的验证; 陈洁等^[5]为改善深水井控人机配合情况, 运用 DBN 分析了深水井控人机界面系统的可靠性问题, 辨识了人机界面系统薄弱风险点。

可靠性分析与评估一直是装备通用质量特性领域关注的核心。目前, 国内外大多数研究主要集中于机械可靠性和人的可靠性相关领域, 而对人机系统可靠性研究相对较少。文中旨在对可靠性理论、机械可靠性及人的可靠性研究中的相关文献进行分析, 梳理各领域可靠性研究对象及方法间的关系, 为人机系统可靠性设计的研究和发展提供参考。

1 机械可靠性

机械可靠性技术的发展与其他可靠性技术的发展相比相对成熟。机械可靠性的研究对象是机械零件和机械系统。由于机械可靠性问题的多样性和复杂性, 针对不同失效机理的不同零件、不同系统及不同的载荷工况, 需要采用不同的方法和模型, 甚至用不同的概念和定义来进行研究。如果不加区别地直接应用传统的方法和模型, 或者做出不合理的假设, 可靠性设计、分析和评估将失去应用价值, 甚至可能导致错误的结果^[6]。

文献[7-8]对采煤机械的可靠性进行了研究。例如: 赵丽娟等^[7]为实现采煤机螺旋滚筒在复杂煤层赋存条件下综合性能最优, 运用破煤理论, 将刚柔耦合虚拟样机技术与可靠性灵敏度设计理论、可靠性稳健设计理论、性能退化理论和改进粒子群算法相结合, 为采掘机械设备的可靠性分析与设计提供理论方法和数据支撑, 具有普适性; 此外, 为提高采煤机截割部行星架在复杂煤层赋存条件下的工作可靠性, 提出一种协同刚柔耦合虚拟样机动态可靠性设计方法, 并对机械设备传动机构的可靠性分析与设计具有重要工程应用价值。乔伟胜等^[8]为科学合理地对矿井通风系统进行可靠性评价, 建立了可靠性评价指标, 应用层次分析法对整个矿井的通风系统和通风状况进行多指标可靠性分析与评价, 提出通风系统优化方案, 对其他矿井通风系统的可靠性评价及优化具有一定的借鉴意义。

此外, 文献[9-13]对运载装备机械可靠性进行了研究。例如: 张文鑫等^[9]为优化民用飞机发动机中的涡轮盘, 提出了一种构建寿命函数 Kriging 模型的学习函数, 采用所搭建的疲劳寿命可靠性优化设计平

台, 完成了某型涡轮盘盘心、榫槽, 以及涡轮盘系统高低周复合疲劳寿命的可靠性优化设计; 司国雷等^[10]为研究柱塞泵中的关键元件配流阀可靠性, 基于概率统计理论与配流阀密封、弹簧抗疲劳的可靠度分析, 研究了高速高压微小型轴向柱塞泵的配流阀密封副的固有可靠度, 并分析了关键变量对配流阀固有可靠度的影响规律, 通过样机试验验证发现: 壳体材料、配流阀环形内外径、弹簧的材料特性、钢丝直径、弹簧中径, 以及弹簧预紧力对其固有可靠度影响显著; Zhao 等^[11]为推动无风险、资源节约型和环境友好型飞行器先进设计方法的发展, 建立了不确定性条件下可靠性约束下的鲁棒优化 (Robust Aerodynamic Design Optimization, RADO) 等完整的过程; Wu 等^[12]将可靠性优化设计方法、有限元分析、最优拉丁超立方体试验设计和响应面近似模型相结合, 对电动汽车结构进行优化设计, 提高了耐撞性; 贺朝霞等^[13]为缓解城市交通拥挤、港口运输不便的困境, 设计一种分体式飞行汽车, 建立改进 (Advanced Group Resource Allocation and Execution, AGREE) 的分配法, 实现了飞行汽车中系统各对接部分的可靠性分配, 并发现该方法能针对第 1 类潜在失效模式实现有效的可靠性设计。

综上所述, 目前常用的机械可靠性分析方法有: 基于强度退化的可靠性分析方法、非概率建模、模糊方法、贝叶斯方法、信息理论方法、数论方法、随机有限元法、区间估计及分析计算方法、基于遗传算法和神经网络的方法等。而也有文献基于其他学科的算法来优化机械可靠性。例如: 王倩蓉等^[14]基于 Copula 函数提出了一种基于可靠性的优化设计 (Reliability-Based Design Optimization, RBDO) 算法, 为求解存在复杂非线性相关性的结构可靠性优化设计问题提供了有效工具; Hao 等^[15]提出一种增广步长调整法 (Augmented Step Size Adjustment, ASSA), 以提高迭代过程的效率和鲁棒性; 孟欣佳等^[16]将多学科可靠性设计优化问题分解为几个并行的单学科优化问题, 利用一致性约束对各学科进行协调, 实现多学科可靠性设计优化的并行求解, 通过数值算例和复合缸设计优化方案验证所提方法的可行性和有效性; 冯毅雄等^[17]深入分析了产品结构设计过程中的各种不确定现象, 总结出多粒度模糊不确定条件下基于逻辑相似的产品质量特性精准提取技术。

2 人的可靠性

2.1 人的可靠性分析概念及方法

人的可靠性 (Human Reliability, HR) 是描述人的绩效的术语, 它可被定义为在系统运行的任何阶段, 在规定的最短时间内 (如果有时间限制), 人员

成功完成任务的概率^[18]。

人的可靠性分析（Human Reliability Analysis, HRA）关注的是人对系统绩效的影响，可以用来评估人为错误对系统的影响。HRA 的研究开始于 20 世纪 50 年代。20 世纪 60 年代初，已有人开始探讨人为差错对系统可靠性的影响。HRA 通常属于交叉学科，涉及可靠性、人机工程和心理学等方面。HRA 是一种具有预测性的工具，用于量化人的可靠性。其主要目标是通过预测人为差错的概率和评估这些差错对人机系统性能的退化，确定操作员对系统可靠性的影响，具有定性和定量两个部分^[19-20]。HRA 可识别、量化并减少人机系统的人为差错，是概率风险评估的一个重要组成部分，它考虑了所有可能的事故场景，以概率性来评估系统的整体安全性^[21]。人的可靠性被定义为成功完成任务的概率，而人为差错概率量化不仅是人机系统概率风险评估的重要组成部分，也是制

订人为差错规避措施的重要依据^[22]。

人的可靠性研究经历了 3 个发展阶段，在这 3 个阶段中，产出了诸多方法，较为重要的 10 种方法，见表 1。这些方法的分类方式繁多，例如：按动态特征进行分类、按是否含有认知模拟进行分类、按环境因素考虑程度进行分类，以及按是否与时间相关进行分类等。关于人的可靠性研究的第 1 个阶段是从 20 世纪 60 年代到 80 年代中后期，即第 1 代 HRA 方法，常用的分析方法有 30 余种，主要分为两类：人的可靠度由任务和环境共同决定，如 THERP；人的可靠度由任务时间决定，目的是得到无反应或错误反应的概率，如 HCR。该阶段 HRA 方法的弊端为：过多地依赖专家的判断，具有一定的主观随意性，缺乏充分的支撑数据；缺乏心理学等的客观认知因素；对人的失误发生的随机性和不确定性考虑较少；分析结果的验证存在一定的问题。

表 1 较重要的人的可靠性研究方法
Tab.1 More important human reliability research methods

阶段	方法	应用效果评价
第 1 代	人的失误率预测技术（Technique for Human Error Rate Prediction, THERP）	围绕着人为差错概率的量化展开，根据专家判断得出人的失误率，已经得到一定程度的验证，较为成熟，但很少涉及决策等方面的差错，且应用过程较为复杂，耗时多
	操作员动作树（Operator Action Tree, OAT）	首次考虑了人的认知过程，并将认知差错分为 3 种类型，给出了量化工具：时间可靠性曲线
	人的认知可靠性模型（Human Cognitive Reliability, HCR）	有较好的理论基础，是一种通过专家判断的方法
	事故序列评审程序（Accident Sequence Evaluation Procedure, ASEP）	用于处理事故后操作人员的人的可靠性的诊断方面
	人为错误评估和减少技术（Human Error Assessment and Reduction Technique, HEART）	THERP 方法的简化版，已广泛用于量化核电站操作人员的差错概率，虽结果保守，但节省分析时间
	认知可靠性和失误率分析方法（Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM）	由任务的类型决定
第 2 代	人为失误分析技术（A Technique for Human Error Analysis, ATHEANA）	基于认知模型和情景控制提出，具有翔实的情景控制模型和科学严谨的人的失误率量化计算模型，不依赖于人机数据的统计资料，已在民航、海事、地面交通、核电等领域得到了广泛应用
	标准化工厂分析风险人类可靠性分析（Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis, SPAR-H）	是一种基于运行经验改进的 HRA 方法，从定性的角度初步分析人的差错机制，为后续认知过程中的定量分析奠定了基础，但相较于 CREAM 较为复杂，主要应用于核电领域
	信息、决策和行为响应模型（Information, Decision, and Action in Crew Context, IDAC）	用于通过改进性能塑造因素、水平，以及标准化工厂分析风险人类可靠性分析方法的乘数标准，并应用贝叶斯网络来量化人类绩效的故障概率
第 3 代	人的认知可靠性模型（Human Cognitive Reliability, HCR）	该方法用于评估核电站控制室中决策者、操作员和咨询师安全处理某事件的能力。其动态特性主要体现在考虑系统操作人员与外界（例如系统本身、环境和其他班组成员）进行动态的交互

基于第1代HRA方法,学者们研究出第2代HRA方法,从20世纪80年代后沿用至今,如CREAM和HEART等,认为人为差错的决定因素是任务所处的环境条件,强调情绪环境对人的认知可靠性的影响。第2代HRA方法结合了心理学等学科,对人的可靠性分析更加具体和客观。但也存在一些问题:在分析人为差错时,需要专家判断,专家的判断可能会受到个人经验、知识和态度等因素的影响,导致分析结果不够客观和准确;对组织管理因素的影响及组织与人误二者关系的认知不足;缺乏试验验证结果。

随着计算机模拟仿真技术的发展,第3代HRA技术应运而生。与前两代相比,第3代HRA方法为动态建模系统,是以虚拟仿真技术为基础,通过在真实环境中使用虚拟场景、虚拟环境和虚拟人来模拟人的行为,如IDA和CES等。但第3代方法尚不成熟,目前仍存在一些问题,如:缺乏认知行为分析的普适性,难以处理技能型、知识型和规则型的行为;由人员认知行为的模糊性和随机性导致的仿真建模困难;在仿真计算和数据可用性方面存在一定的限制。

2.2 人的可靠性分析方法的主要应用

人的可靠性分析近年来主要应用于铁路运输、公路运输、民用航空、航海、能源化工和医疗等领域。针对不同应用领域,学者们对采用的方法进行了适当调整。

在航海领域,Islam等^[23]通过修改HEART,开发了一种新方法,对不同海洋环境和操作条件下潜在的人为错误进行量化评估,对错误产生条件(Engineering Procurement Construction, EPC)和错误影响因素表(Environmental Issues Forums, EIF)进行改进,反映海洋环境的特定条件,用于人为错误概率(Human Error Probability, HEP)的估计;张帅等^[24]针对潜水器两种坐底模式对潜航员认知可靠性影响问题,采用人的可靠性分析方法研究坐底过程中系统、任务及环境对潜航员的影响,分析了两种坐底模式潜航员任务过程和认知过程,利用CREAM预测潜航员作业认知失效概率;张帅等^[25]研究了动态热环境下潜航员人的可靠性的变化特征,对热环境下潜航员可靠性的影响进行了量化分析,为修正CREAM模型,引入环境补偿系数,通过在7000米海试任务中进行人的可靠性分析,证明修正后的CREAM模型在载人潜水器深海任务中评估人的可靠性具有适用性;王红红等^[26]通过搭建水下生产系统的人的风险因素体系,并建立贝叶斯网络,利用模糊理论对人的失误概率进行量化分析,实现了对水下生产系统中人的风险预测和评估。

在民用航空领域,刘嘉等^[27]结合CREAM和自适应飞机驾驶员最优控制模型(Adaptive Optimal Control Pilot Model, AOCPM)创建了一种能够模拟飞行安全,并反映飞行员认知行为和失误特点的舰载机飞行员操纵行为模型(Pilot Reliability Model for Safety

Simulation in Carrier Landin, PRMSSCL),为后续飞行安全仿真研究奠定了基础;郭云东等^[19]设计了一个基于模糊贝叶斯认知可靠性和失误差分析方法(Fuzzy Bayesian Cognitive Reliability and Error Analysis Method, FBCREAM)的飞机驾驶员可靠性评估模型,用于评估飞行任务执行过程中飞行员的可靠性,准确量化研究飞机故障情境下的飞机驾驶任务的可靠性,为民用航空安全评估提供了有效的工具和重要支持;Jiang^[28]等提出某座舱内人机界面不同认知阶段的人机可靠性影响因素体系、成功与失败对称的任务分析树、基于认知阶段的失败与成功对称的HRA模型,以及博弈论与模糊重心法,得到3个认知阶段的影响因素权重。其中,第1阶段为信息获取和执行;第2阶段为信息获取和状态响应(评估+决策)和执行;第3阶段为信息获取、信息分析、决策与规划,以及执行。通过模拟试验表明具有对称性的HRA模型为某座舱人机界面交互的认知可靠性提供了一种可行的分析过程和方法;蒋建军等^[29]以某座舱内人机界面为对象,构建了乘员舱内人机界面可靠性影响因子体系和可靠性分析框架,提出乘员舱人机界面人机可靠性的计算方法。

在铁路和公路运输领域,陈宇等^[30]针对城市轨道交通车站值班员岗位道岔失表故障处置作业,构建了THERP和HCR模型,细化了道岔失表作业流程,对轨道交通标准化作业下的人的失误进行了量化分析;Petruni等^[31]采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)比较了4种适用于汽车领域的HRA技术,认为危险与可操作性(Hazard and Operability, HAZOP)作为一种定性分析方法是HRA的最佳选择,因为其可以处理从设计意图到计划程序和人类行为的所有形式的偏差,CREAM因为经济成本较低,应用范围较广,排在第2位,THERP和SPAR-H两种方法适用性最低,前者由于对人为因素了解有限和经济成本高等,后者是为核电站设计的,只有经过修正才能应用于其他工业部门;李永锋等^[32]为提升老年人对汽车操控界面的满意度,设计了一种专为老年人使用的汽车界面,并提出基于人机工程原理的改进方法,以提升老年人对汽车操控界面的满意度,并成立了一个会议小组,进行了人类的系统误差减少和预测方法(Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach, SHERPA)分析,提出基于FMEA和FTA研究方法分析,绘制了汽车界面层次任务分析图(Hierarchical Task Analysis, HTA),对失效事件进行分析和验证,确定了改进设计的重点,提升了老年人对汽车界面的满意度。

在能源化工领域,文东山等^[33]基于对电力系统人机可靠性研究现状的综述,提出一个扩展的认知模型和行为影响因子(PIFs)分类体系,设计了一个专门针对电力系统领域的人机数据库系统,为发展新的人机可靠性分析方法提供思路;邹树梁等^[34]认为,采用

传统的 HCR 模型分析海上浮动核电站人的失误具有较大的局限性, 因此对海上微气候、噪声及船体运动等外部因素进行量化, 修正了 HCR 模型, 提高了海上浮动核电站的人的可靠性分析准确性。

在医疗领域, Zheng 等^[35]将 CREAM 模型与概率模型检查相结合, 开发出一种新的 HRA 方法, 称为正式药物人员可靠性系统分析 (Systems Analysis for Formal Pharmaceutical Human, SAFPH), 用来探索降低社区用药系统错误率的干预措施; 金海哲等^[36]针对 FMEA 在医疗器械人机可靠性评估中存在的两个缺陷 (即风险因素的评价与权重分配问题), 提出一种结构化的医疗器械人机可靠性评估方法。

3 人机系统可靠性

人机系统可靠性是指在一个由人 (系统的作业人员) 和机械 (系统中实现功能的机器) 组成的系统中, 人和机械相互配合, 相互作用, 以实现系统的稳定运行和任务目标的能力。人机系统可靠性是要确保人和机械在协同工作中达到预期的性能和目标, 以减小人发生失误和机械失效的概率, 从而保证系统的稳定性和可靠性。

人机系统的安全与可靠性取决于人的可靠性和机械的可靠性, 以及它们二者间的协调关系, 见图 1。机械的可靠性是评估人机系统安全性的重要指标, 而人的可靠性直接影响人机安全性, 起到主导作用。

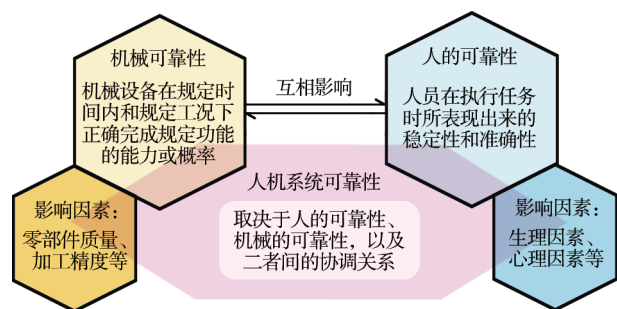


图 1 人机系统可靠性设计研究框架
Fig.1 Research framework of human-machine system reliability design

机械可靠性研究相对成熟, 因为机械的可靠性评估可依靠可靠性理论和可控的研究条件进行分析。而人的可靠性涉及的因素较多, 如认知能力、技能水平、经验, 以及在不同环境下的适应能力等^[37]。评估和提高人机系统可靠性是确保系统在运行过程中能持续正常运作, 减少故障和错误的发生, 并保证安全性和性能的关键目标之一。Havlikova 等^[38]介绍了人机系统中的人的可靠性评估, 并得出对人的可靠性的定量评价是基于对整个人机系统的总概率安全分析 (Probabilistic Safety Analysis, PSA)。因此, 为评估人机系统可靠性, 可通过人的失误分析方法与机械系统失效的分析方法, 对人机系统可靠性进行分析和预

测, 识别潜在问题和风险, 优化任务分配和责任划分。

在人机系统可靠性评估和指标分析方面, 学者们针对不同领域提出了各自适用的方法, 这些方法主要应用于航海、民用航空、智能网联汽车、机械制造及自动化等领域。目前, 人机系统可靠性分析已在各个领域得到广泛应用, 并正逐步向民用领域如高速列车、新能源和高端制造业等领域推广应用。

在航海领域, 陈炉云等^[39]采用故障树法分析了人机系统内人的可靠性, 将人的操作失误模式定义为底事件, 建立了人因操作失误树, 对某舱室操作台进行了人机可靠性计算; Hamizah 等^[40]以海上设施油气储罐为例, 提出将贝叶斯网络与人机系统结合的可靠性综合概率模型, 将油气释放概率由 1.21% 提高到 3.17%; Fan 等^[41]为评估适合航运自动化系统的海员能力, 开发了一种新的航运动态人机模型, 可用于分析闭环系统中的人的因素, 提出一种新的海员能力分析工具, 使海事闭环系统中的人的评估合理化, 反映出动态的人机协作过程; Lee 等^[42]基于船员网络提出了一种基于功能共振分析方法 (Functional Resonance Analysis Method, FRAM) 的人机交互事故分析新方法, 可用于分析人-机系统交互的海上事故; Elidolu^[43]等对原油油轮卸货作业进行了详细的人机可靠性分析, 使用证据推理 (Evidential Reasoning, ER) 方法来系统预测人为错误的概率。

在民用航空领域, Wang 等^[44]将机器状态和人的认知错误依赖关系映射到贝叶斯网络中, 基于所有节点的条件来评估人机的可靠性, 最后以某无人机多阶段侦查任务为例进行验证。

在机械制造及自动化领域, Che 等^[45]针对多个人机单元的负载共享人机系统进行了人机可靠性分析, 提出了考虑工作负荷影响的泊松型人为误差模型, 通过解析推导, 建立了基于全概率公式的系统可靠性模型; Che 等^[46]为评估人机系统可靠性, 建立了数学模型, 对疲劳恢复作用下人的失误率进行评估, 由半马尔可夫过程的多状态模型描述机器的失效, 同时, 采用蒙特卡罗仿真算法对可靠性进行了计算, 并以工人操作的车床转塔为例, 说明了可靠性模型的有效性; Atashfeshan 等^[47]提出动态功能分配 (Dynamic Function Allocation, DFA) 概念, 通过改变人的失误和机器的失效对系统功能的控制水平来解决这些缺点, 通过应用提出的 DFA 方法, 人的态势感知和系统可靠性提高了 30%。

在智能网联汽车领域, 李显生等^[48]基于可靠性理论和汽车寿命指标, 在可靠性数据库的基础上, 开发了可靠性数据分析处理软件; 师勇等^[49]构建了驾驶人应急操作行为模型, 有效评价道路安全事故中驾驶人的影响程度, 有助于提高道路可靠性; 侯明哲等^[50]通过选取影响安全驾驶的重要因素, 用驾驶员的视觉特性、反应能力、动态速度距离估计和集中注意力能

力等因素来衡量和评价驾驶员的安全可靠性;秦洪懋等^[51]通过多通道信息融合共同判定驾驶疲劳行为的方法,以有向无环支持向量机为融合算法,通过构建驾驶疲劳行为判定模型,提高机械系统对驾驶员疲劳状态检测的准确性和可靠性,以减少交通事故的发生率;刘志强等^[52]运用多层信息融合决策法建立了驾驶注视行为模式辨识体系,结合神经网络的模式分类技术与证据推理融合决策技术,解决了多元环境对驾驶员注视行为模式辨识能力影响的问题,实现了机械对不同驾驶员注视行为模式的判别,有效地避免疲劳驾驶所产生的危害。

综上所述,人机系统可靠性在不同领域中发挥着越来越重要的作用。随着科技的发展,先进的人工智能技术可通过智能化的方式,有效解决人机系统中存在的潜在问题和风险。人工智能可提供快速、高效的计算和决策能力,提升系统的性能和响应速度。然而,在面对不确定性、伦理抉择和非标准情况时,人的绝对主导地位仍然是不可或缺的。人的判断、经验和道德决策能力可以确保系统的可靠性与安全性,并避免任何可能损害人类利益的风险。未来还将采用更多适用范围广泛的研究方法,同时满足人机系统可靠性研究需要。

4 结语

关于人造物及其系统中的可靠性设计与分析是工程技术界经典的研究课题,前人在此领域进行过大量研究,研究成果为后续研究奠定了扎实的基础。

可靠性设计与分析一直是装备通用质量特性领域关注的核心。可靠性依据评估对象的不同,可分为硬件系统可靠性、结构可靠性、软件可靠性与人的可靠性,不同的可靠性问题可采用不同的统计推断技术进行评估,常用的技术包括:最大似然估计、贝叶斯推断、蒙特卡罗模拟等。近年来,由于贝叶斯网络模型能有效地表征和分析参数、模型、数据等各种类型的不确定性,被广泛应用于可靠性分析的各个领域。机械可靠性领域的热门主题主要集中在机械系统结构的可靠性设计,以及基于多学科的可靠性优化设计、分析与评价方面;而人的可靠性研究方法尚不完善,随着研究深入,人的可靠性的分析方法将不断完善。新的方法将具有较强的客观性、准确性和普适性。人的可靠性应用领域也将不断拓展。关于人机系统的可靠性设计,除要考虑人的各类问题外,还需将人与机械的问题纳入可靠性分析中,结合具体工况与功能分配,进行可靠性设计、分析与评估,才能保证人机系统的整体可靠性要求。

未来人造物及其系统中的可靠性设计与分析将快速发展,也将出现更多适用广泛的研究方法,如系统综合分析方法、不确定性处理技术、可靠性优化设计、智能可靠性分析等,这些研究方法将大力推动可

靠性设计与分析的发展,为各行各业提供更可靠、安全的人机系统和装备。

参考文献:

- [1] 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): 523436.
HU Xiao-yi, WANG Ru-ping, WANG Xin, et al. Recent Development of Safety and Reliability Analysis Technology for Model-Based Complex System[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 523436.
- [2] 张进春,吕航,侯锦秀. 基于混合冗余策略的 k -out-of- n : G 系统可靠性优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(3): 852-863.
ZHANG Jin-chun, LYU Hang, HOU Jin-xiu. Reliability Optimization Model for k -out-of- n : G Systems Based on Mixed Redundancy Strategy[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(3): 852-863.
- [3] TU Peng-fei, YANG Shun-feng, WANG Peng. Reliability and Cost-Based Redundancy Design for Modular Multilevel Converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2333-2342.
- [4] CAI Bao-ping, KONG Xiang-di, LIU Yong-hong, et al. Application of Bayesian Networks in Reliability Evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2146-2157.
- [5] 陈洁,陈国明,李新宏,等. 基于 DBN 的深水井控人机界面系统可靠性分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 124-129.
CHEN Jie, CHEN Guo-ming, LI Xin-hong, et al. Reliability Analysis of Deep-Water Drilling Man-Machine Interface System Based on DBN[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(1): 124-129.
- [6] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 27-35.
XIE Li-yang. Issues and Commentary on Mechanical Reliability Theories, Methods and Models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 27-35.
- [7] 赵丽娟,范佳艺,李明昊. 复杂煤层采煤机螺旋滚筒渐变可靠性设计[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 870-877.
ZHAO Li-juan, FAN Jia-yi, LI Ming-hao. Gradient Reliability Design of Shearer's Drum in Complicated Seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 870-877.
- [8] 乔伟胜,王峥,周钰博. 基于层次分析法的煤矿通风系统可靠性评价及优化[J]. 煤炭技术, 2022, 41(12): 172-175.
QIAO Wei-sheng, WANG Zheng, ZHOU Yu-bo. Reliability Evaluation and Optimization of Coal Mine Ventilation System Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Coal Technology, 2022, 41(12): 172-175.
- [9] 张文鑫,吕震宙. 涡轮盘疲劳寿命可靠性设计仿真及优化策略[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(1): 117-128.

- ZHANG Wen-xin, LYU Zhen-zhou. Simulation and Optimization Strategy of Turbine Disk Fatigue Life Reliability Design[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(1): 117-128.
- [10] 司国雷, 邓建辉, 陈君辉, 等. 配流阀可靠性设计技术研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(2): 212-216.
- SI Guo-lei, DENG Jian-hui, CHEN Jun-hui, et al. Research on Reliability Design Technology of Distribution Valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(2): 212-216.
- [11] ZHAO Huan, GAO Zheng-hong, XU Fang, et al. Review of Robust Aerodynamic Design Optimization for Air Vehicles[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2019, 26(3): 685-732.
- [12] WU He-quan, KUANG Shi-jie, HOU Hai-bin. Research on Application of Electric Vehicle Collision Based on Reliability Optimization Design Method[J]. International Journal of Computational Methods, 2019, 16(7): 1950034.
- [13] 贺朝霞, 邢增飞, 王星哲, 等. 基于 DFMEA 与改进 AGREE 法的分体式飞行汽车对接系统可靠性设计[J]. 机械设计, 2022, 39(12): 17-23.
- HE Chao-Xia, XING Zeng-fei, WANG Xing-zhe, et al. Reliability Design of Split Flying Car Docking System Based on DFMEA and Improved AGREE Method[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(12): 17-23.
- [14] 王倩蓉, 姜潮, 方腾. 一种考虑参数相关性的可靠性优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2312-2319.
- WANG Qian-rong, JIANG Chao, FANG Teng. Reliability-based Design Optimization Considering Correlated Random Variables[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(19): 2312-2319.
- [15] HAO Peng, MA Rui, WANG Yu-tian, et al. An Augmented Step Size Adjustment Method for the Performance Measure Approach: Toward General Structural Reliability-based Design Optimization[J]. Structural Safety, 2019, 80: 32-45.
- [16] 孟欣佳, 张立香, 王晓敏. 多学科可靠性设计优化的协同求解方法[J]. 机械设计与制造, 2022(12): 108-112.
- MENG Xin-jia, ZHANG Li-xiang, WANG Xiao-min. Collaborative Solution Method for Multidisciplinary Reliability Design Optimization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(12): 108-112.
- [17] 冯毅雄, 洪兆溪, 李中凯, 等. 不确定视角下产品结构性能优化设计综述与展望[J]. 包装工程, 2021, 42(24): 45-59.
- FENG Yi-xiong, HONG Zhao-xi, LI Zhong-kai, et al. Review and Prospect of Product Structural Performance Optimization Design from the Perspective of Uncertainty[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 45-59.
- [18] 李鹏程, 陈国华, 张力, 等. 人因可靠性分析技术的研究进展与发展趋势[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(3): 329-340.
- LI Peng-cheng, CHEN Guo-hua, ZHANG Li, et al. Research Review and Development Trends of Human Reliability Analysis Techniques[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(3): 329-340.
- [19] 郭云东, 孙有朝. 基于 FBCREAM 方法的飞机驾驶人因可靠性评估模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11843-11849.
- GUO Yun-dong, SUN You-chao. Human Reliability Assessment Model for Aircraft Operating Based on FBCREAM Method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11843-11849.
- [20] 张晶晶, 张礼敬, 陶刚. 人的可靠性分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(1): 76-81.
- ZHANG Jing-jing, ZHANG Li-jing, TAO Gang. Analysis and Study on Human Reliability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(1): 76-81.
- [21] HOU Lin-xiu, LIU Ran, LIU Hu-chen, et al. Two Decades on Human Reliability Analysis: A Bibliometric Analysis and Literature Review[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 151: 107969.
- [22] 蒋英杰, 孙志强, 谢红卫, 等. 人为差错概率量化方法综述[J]. 科技导报, 2011, 29(5): 74-79.
- JIANG Ying-jie, SUN Zhi-qiang, XIE Hong-wei, et al. Review on the Quantification Methods of Human Error Probability[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(5): 74-79.
- [23] ISLAM R, ABBASSI R, GARANIYA V, et al. Development of a Human Reliability Assessment Technique for the Maintenance Procedures of Marine and Offshore Operations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 50: 416-428.
- [24] 张帅, 叶聪, 何卫平, 等. 载人潜水器坐底过程人因失效预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 290-296.
- ZHANG Shuai, YE Cong, HE Wei-ping, et al. Research on Method of Human Failure Prediction in the Process of Landing Manned Submersibles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 290-296.
- [25] 张帅, 陈登凯, 叶聪, 等. 考虑动态热环境因素的潜航员人因可靠性评估[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 1071-1080.
- ZHANG Shuai, CHEN Deng-kai, YE Cong, et al. Human Reliability Assessment of Oceanauts Considering Dynamic Thermal Environment[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2021, 41(4): 1071-1080.
- [26] 王红红, 刘延波. 基于模糊贝叶斯网络的水下生产系统人因可靠性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3491-3496.
- WANG Hong-hong, LIU Yan-bo. Human Reliability of Subsea Production System Based on Fuzzy Bayesian Network[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3491-3496.
- [27] 刘嘉, 向锦武, 刘剑超, 等. 面向舰安全性仿真的飞行员人因可靠性模型[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10): 19-24.
- LIU Jia, XIANG Jin-wu, LIU Jian-chao, et al. Pilot Re-

- liability Model for Safety Simulation in Carrier Landing[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10): 19-24.
- [28] JIANG Jian-jun, XIAO Yi, ZHAN Wen-hao, et al. An HRA Model Based on the Cognitive Stages for a Human-Computer Interface in a Spacecraft Cabin[J]. Symmetry, 2022, 14(9): 1756.
- [29] 蒋建军, 肖毅, 胡鸿, 等. 航天器乘员舱人机界面人因可靠性模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 14072-14080.
- JIANG Jian-jun, XIAO Yi, HU Hong, et al. Human Reliability Model of Man-Machine Interface in Spacecraft Crew Cabin[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 14072-14080.
- [30] 陈宇, 朱海燕, 刘志钢, 等. 基于人因可靠性的道岔失表故障处置量化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 131-134.
- CHEN Yu, ZHU Hai-yan, LIU Zhi-gang, et al. Quantitative Analysis of Turnout Failure Disposal Based on Human Reliability[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 131-134.
- [31] PETRUNI A, GIAGLOGLOU E, DOUGLAS E, et al. Applying Analytic Hierarchy Process (AHP) to Choose a Human Factors Technique: Choosing the Suitable Human Reliability Analysis Technique for the Automotive Industry[J]. Safety Science, 2019, 119: 229-239.
- [32] 李永锋, 陈则言. 基于 FMEA 和 FTA 的老年人汽车人机界面交互设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(6): 98-105.
- LI Yong-feng, CHEN Ze-yan. Research on Automobile Human Machine Interface Interaction Design of the Elderly Based on FMEA and FTA[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(6): 98-105.
- [33] 文东山, 暴英凯, 章禹, 等. 电力系统操作人因可靠性分析及其数据库系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 35-42.
- WEN Dong-shan, BAO Ying-kai, ZHANG Yu, et al. Analysis of Human Reliability in Power System Operation and Research on Its Database System[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 35-42.
- [34] 邹树梁, 黄斌海, 李书帆. 海上浮动核电站人员认知可靠性模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 1-6.
- ZOU Shu-liang, HUANG Bin-hai, LI Shu-fan. Human Cognitive Reliability Model of Marine Floating Nuclear Power Plants[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 1-6.
- [35] ZHENG Xi, BOLTON M L, DALY C, et al. The Development of a Next-Generation Human Reliability Analysis: Systems Analysis for Formal Pharmaceutical Human Reliability (SAFPH)[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 106927.
- [36] 金海哲, 朱琳, 李怡, 等. 基于改进 FMEA 的医疗器械人因可靠性评估与应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2021, 42(9): 1360-1368.
- JIN Hai-zhe, ZHU Lin, LI Yi, et al. Human Factor Reliability Evaluation and Application of Medical Devices Based on Improved FMEA[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2021, 42(9): 1360-1368.
- [37] 崔铁军, 马云东. 系统因素可靠性分析与实现[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(2): 94-98.
- CUI Tie-jun, MA Yun-dong. System Reliability Factors Analysis and Realization[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016, 37(2): 94-98.
- [38] HAVLIKOVA M, JIRGL M, BRADAC Z. Human Reliability in Man-Machine Systems[J]. Procedia Engineering, 2015, 100: 1207-1214.
- [39] 陈炉云, 张裕芳. 基于故障树法的船舶舱室人因可靠性研究[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(1): 110-113.
- CHEN Lu-yun, ZHANG Yu-fang. Research on Human Reliability Analysis of Ship Chamber Based on Fault Tree[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(1): 110-113.
- [40] ROZUHAN H, MUHAMMAD M, NIAZI U M. Probabilistic Risk Assessment of Offshore Installation Hydrocarbon Releases Leading to Fire and Explosion, Incorporating System and Human Reliability Analysis[J]. Applied Ocean Research, 2020, 101: 102282.
- [41] FAN S, YANG Zai-li. Analysing Seafarer Competencies in a Dynamic Human-Machine System[J]. Ocean and Coastal Management, 2023, 240(6): 121-132.
- [42] LEE J, CHUNG H. A New Methodology for Accident Analysis with Human and System Interaction Based on FRAM: Case Studies in Maritime Domain[J]. Safety Science, 2018, 109: 57-66.
- [43] ELIDOLU G, AHN S I, ILKE SEZER S, et al. Applying Evidential Reasoning Extended SPAR-H Modelling to Analyse Human Reliability on Crude Oil Tanker Cargo Operation[J]. Safety Science, 2023, 164: 106169.
- [44] WANG Zeng-kai, ZENG Sheng-kui, GUO Jian-bin, et al. A Bayesian Network for Reliability Assessment of Man-Machine Phased-Mission System Considering the Phase Dependencies of Human Cognitive Error[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 207: 107385.
- [45] CHE Hai-yang, ZENG Sheng-kui, LI Ke-hui, et al. Reliability Analysis of Load-Sharing Man-Machine Systems Subject to Machine Degradation, Human Errors, and Random Shocks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: 108679.
- [46] CHE Hai-yang, ZENG Sheng-kui, GUO Jian-bin. Reliability Assessment of Man-Machine Systems Subject to Mutually Dependent Machine Degradation and Human Errors[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 190: 106504.
- [47] ATASHFESHAN N, SAIDI-MEHRABAD M, RAZAVI H. A Novel Dynamic Function Allocation Method in Human-Machine Systems Focusing on Trigger Mechanism and Allocation Strategy[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 207: 107337.

(下转第26页)