

Study on the Methodology of Safety Human-Machine-Environment System Engineering

Fuqiang Yang, Chao Wu

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, China

Email: ouyangfq@163.com, wuchao@mail.csu.edu.cn

Abstract: The study content of safety human-machine-environment system engineering were set forth and its corresponding theory frame was given; the methodology basis of safety human-machine-environment system engineering was summarized; based on Hall methodology, a four-dimensional morphology chart of safety human-machine-environment system engineering methodology was put forward; the concrete method system of safety human-machine-environment system engineering was presented, including the system safety analysis methods, experimentation methods, modeling and simulating methods, etc. These are of significance for directing the theory of safety human-machine-environment system engineering.

Keywords: safety human-machine-environment system engineering; system engineering; methodology; four dimensional morphology

安全人-机-环境系统工程的方法论研究

阳富强, 吴超

中南大学, 资源与安全工程学院, 长沙, 中国 410083

Email: ouyangfq@163.com, wuchao@mail.csu.edu.cn

摘要: 阐述了安全人-机-环境系统工程的研究内容, 并给出其学科理论框架; 概述安全人-机-环境系统工程的方法论基础; 基于霍尔方法论, 建立以环境为第四维的安全人-机-环境系统工程方法论的四维结构体系; 提出包含系统安全分析方法、实验方法、建模及模拟法等安全人-机-环境系统工程的具体方法体系, 这对安全人-机-环境系统工程学科的发展具有重要的指导意义。

关键词: 安全人-机-环境系统工程; 系统工程; 方法论; 四维结构体系

1 引言

人-机-环境系统工程是研究人、机、环境之间相互作用的学科, 通过揭示三者之间相互作用的规律, 来实现人-机-环境系统总体性能的最优化。该学科是1981年在著名科学家钱学森的亲自指导下在我国诞生。与之相关的学科有工效学、人因工程学、人的因素、与之相关的学科有工效学、人因工程学、人的因素、宜人学、人体工程学等^[1]。

为了比较世界各国在该领域内的研究现状, 以Ergonomics为主题词, 利用EI Compendex数据库检索了自2000年以来, 各国发表与人-机-环境系统工程相关的学术论文, 如图1所示。可知论文发表数量居前十位的国家绝大多数来自欧美等一些发达地区; 而

中国、日本、韩国、马来西亚、以及新加坡等亚洲国家在该领域内的研究也越来越多^[2-4]。

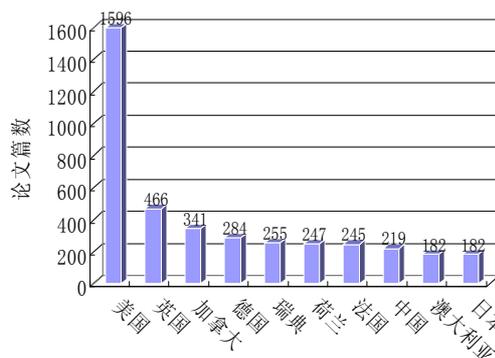


图1. EI数据库中不同国家发表与人-机-环境系统工程相关的学术论文

资助信息: 《科技导报》博士生创新研究资助计划(kjdb200902-7); 中南大学研究生学位论文创新基金资助 (1960-71131100023)

依据研究目标的不同, 人-机-环境系统工程可以

划分为安全人-机-环境系统工程以及工效人-机-环境系统工程两大学科分支；安全人-机-环境系统工程^[5]是从安全的角度出发，综合运用安全科学理论、生理学、心理学、人体测量学、系统工程、生物力学和有关工程技术知识，研究安全系统中人、机、环境之间的相互作用，以达到安全、舒适、高效生产的目的。作为安全科学技术的一个分支学科，安全人-机-环境系统工程是一门新兴的学科，具有高度综合、跨学科和横断、交叉以及复杂的系统性^[6]。任何一门科学或技术都会根据自身特点，形成相应的一系列方法，方法论就是最具特色的根本方法^[7]；安全人-机-环境系统工程的方法论就是分析和解决人-机-环境系统中的安全问题而采用的一般途径及路线。目前尚未发现有关安全人-机-环境系统工程本身的方法论研究，也没有建立具有系统性和可操作性的安全人-机-环境系统工程的理论框架，对其方法论进行分析思考有助于探索其研究方法的统一体系。因此，笔者试从方法论的角度论述安全人-机-环境系统工程的方法体系，进而探讨其方法论的基本内容。

2 安全人-机-环境系统工程的研究内容

安全人-机-环境系统工程的研究对象和研究范畴是其能否独立存在和发展的内因基础。作为一门学科，其研究对象的分析有两种方式^[8]：以研究客观存在的事或物的类别和以研究事物中的特殊矛盾来划分。因此，可以从实体和本质两类研究对象方面对安全人-机-环境系统工程进行定义。从实体研究对象看，安全人-机-环境系统工程是关于其实践的一般规律和技术方法的知识体系；从本质研究对象看，安全人-机-环境系统工程是关于人-机-环境系统工程实践中安全、舒适目标的需求与安全条件保证的矛盾关系的一般规律及其安全问题解决方法的知识体系。依据钱学森教授提出的现代科学技术结构，安全人-机-环境系统工程在安全科学技术体系中属于技术科学的范畴，它是安全基础科学结合不同工程学分支而形成的具体技术原理与方法，通过不断地实践与改进，形成工程学科分支所特有的安全技术^[9]。安全人-机-环境系统工程的主要研究内容包括人的安全特性、机的安全特性、环境的安全特性，以及人-机-环境系统结合面的安全特性研究，如表1^[5,10-11]所述。

3 安全人-机-环境系统工程的方法论基础

安全人-机-环境系统工程的研究对象为人-机-环

境系统中的安全问题。因此，系统工程学的各种

表1. 安全人-机-环境系统工程的主要研究内容

人的安全特性	人的不安全行为；人的可靠性研究；人体生理、心理、人体测量及生物力学在实现安全目标中的影响；人的体力、脑力、心理负荷研究等
机的安全特性	显示器和控制器等物的设计，被控对象动力学的建模技术，机的可操作性、可维护性、可靠性研究，机的本质安全性（冗余设计）研究等
环境条件	采光、照明、尘毒、噪声、振动、辐射等对人的工作效率及安全目标所造成的影响，人机安全防护措施的研究
人-机-环境系统的安全特性	人-机-环境系统安全的整体设计；人-机-环境系统的优化、建模、模拟、评价（安全、高效、经济）、决策分析；作业域的布局与设计；人-机-环境系统界面设计及评价技术研究；人、机功能比较及分配研究

方法论也是安全人-机-环境系统工程的方法论基础。安全人-机-环境系统工程不仅有软工程的特性，还有硬工程的特点，即解决人-机-环境系统的安全问题既需要硬的方法论，又需要软的方法论。现有典型的系统工程方法论见表2^[12-14]，都有其自身特点，可以综合运用到安全人-机-环境系统工程的研究中。

表2. 安全人-机-环境系统工程的方法论基础

霍尔方法论	强调明确目标，认为对任何现实问题都必须而且可能弄清其需求，其核心内容是最优化，其三维分别对应时间维、逻辑维、知识维(专业维)
物理-事理-人理(WSR)系统方法论	将物理、事理和人理三者如何巧妙配置，有效利用以解决管理问题的一种新型系统方法论；把科学技术知识、社会科学知识、决策管理知识和系统内有关人员，以计算机和专家系统为中介有机结合起来，实现系统科学的总体分析、总体规划、总体设计和总体协调，以求硬、软问题的圆满解决
从定性到定量的综合集成法	将专家群体、数据和多种信息与计算机技术有机地结合起来，把各种学科的理论与人人的经验知识结合起来，发挥它们的整体优势和综合优势；其是定性分析与定量分析结合，而后上升到定量认识；自然科学与社会科学相结合；宏观与微观相结合；各类人员相结合；人与计算机相结合
以Checkland为代表的软系统方法论	提供一套系统方法，使得在系统内的成员间开展自由、开放的辩论，从而使各种世界观得到表现，并在此基础上达成对系统进行改进的方案，其核心是比较或学习，即从模型和现状的比较中来改善现状的途径，通常只能用半定量、半定性甚至只能用定性的方法来处理，主要是吸取人们的判断和直觉，在解决问题时更多地考虑了环境因素与人的因素

4 安全人-机-环境系统工程的学科理论

鉴于人-机-环境系统本身的复杂性，为安全人-机-环境系统工程提供理论和方法的基础理论知识主

要有运筹学、控制论和信息论、耗散结构论、协同论、突变论以及数学和计算机技术、系统理论等，如图 2 所示。

由于人是安全人-机-环境系统的核心，安全问题的研究必须吸收和借鉴一些行为科学的理论和方法^[15]，用科学的方法去研究人与安全的问题，揭示人在生产环境中的行为规律，从安全角度分析、预测和控制人的行为，从而提高安全管理的效能，实现系统安全的目的。

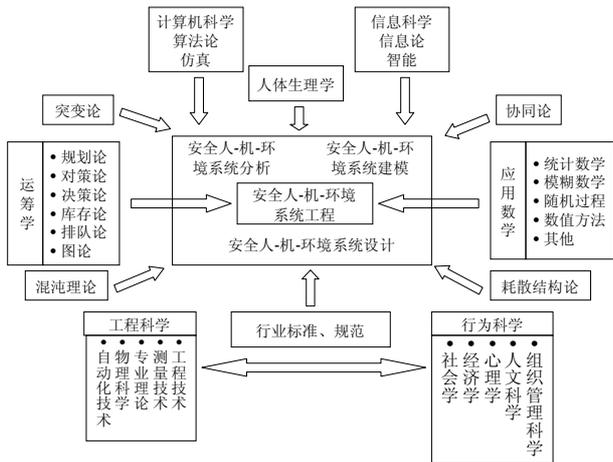


图 2. 安全人-机-环境系统工程的理论框架

5 安全人-机-环境系统工程方法论的四维结构体系

安全人-机-环境系统工程的方法论是在解决人-机-环境系统实践中的安全问题时所必须遵循的一般方法，是进行系统分析、设计、制造和使用时的基本思想和工作方法。随着技术更新的加快，环境对安全系统的生存及发展至关重要，参照霍尔的三维方法论，增加环境维，可以用四维结构体系^[16]来表示安全人-机-环境系统工程的方法论，如图3所示。

时间维：针对一个具体人-机-环境系统工程项目的安全问题，从系统的安全规划起一直到安全更新可分成四个阶段：人-机-环境系统的安全规划阶段、安全设计阶段、安全运行阶段、安全更新阶段，该四个阶段按照时间先后次序进行。

逻辑维：开展安全人-机-环境系统工程的思维过程可以划分为七个逻辑步骤，包括查找人-机-环境系统中的安全问题，确定安全目标、安全综合、安全分析、安全评价、安全决策、安全措施的实施。

专业维：不同的人-机-环境系统工程项目，涉及

到不同的安全专业知识，安全人-机-环境系统工程涉及到安全工程学、人-机-环境系统工程，以及系统工程等专业学科。安全科学本身就是一门综合学科，安全人-机-环境系统工程的应用可以渗入到社会文化、公共管理、建筑、土木、矿业、交通、运输、机电、林业、食品、生物、农业、医药、能源、航空等行业乃至人类生产、生活和生存各个领域。

环境维：安全系统存在于一定的物质环境中，其与外界环境之间进行物质、能量和信息交换，外界环境的变化也会引起安全系统内部的变化，环境是安全系统的重要影响因素。

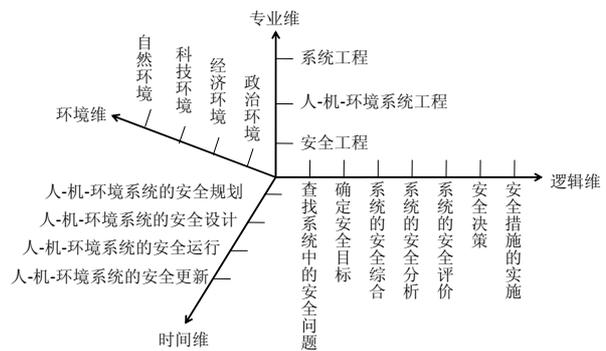


图 3. 安全人-机-环境系统工程方法论的四维结构体系

6 安全人-机-环境系统工程的具体研究方法

安全人-机-环境系统工程是为实现人-机-环境系统的安全目标而对系统进行分析、设计、评价的学科。安全人-机-环境系统工程的具体研究方法有：实测法(如人体尺寸、生物力学测量、心理测试等)、实验法、调查法(观察、采访、问卷式)、系统安全分析法、计算机仿真、建模及模拟等。

其中，系统安全分析是为了揭示人-机-环境系统中存在的危险性程度以及事故发生的可能性，查找其中存在的隐患，进而为控制事故的发生而采取相应措施。实验法主要是综合运用安全工程涉及到的设备和技术，支持安全人-机-环境系统工程、虚拟现实应用、数字化安全等方面的安全工程课程实验，同时支持在虚拟矿井、劳动作业安全、人-机-环境系统设计等方面的科研和交流^[17]。安全人-机-环境系统的建模需要理论方法和经验知识，还需要真实的统计数据及有关信息资料。一些复杂人-机-环境系统，必须从对系统的理解及经验知识出发，再借助于大量的实际统计数据，去提炼出系统内部的定量联系，然后借助于数学或计算机手段，将人-机-环境系统描述出来。安全人-

机-环境系统的模拟是对于系统的描述、模仿和抽象，它反映安全系统的物理本质与主要特征，模型就是实际系统的代替物。安全人-机-环境系统模型分类如图4^[18]，主要模拟方法见表3^[19]。

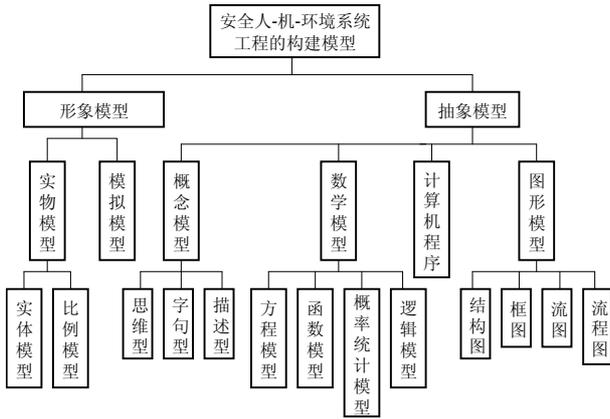


图4. 安全人-机-环境系统工程的建模

表3. 安全人-机-环境系统工程的模拟方法

方法名称	主要特点
直观模拟	模仿实体的外形以及由内、外形产生的某些功能，以便把原型的功能移植到所设计的工具或仪器上。
模型模拟	用物理模型、数学模型等来模仿和研究安全系统，以便设计和建立与原型系统相似的安全系统。
功能模拟	以不同系统的功能相似和行为相似为基础进行模拟，如利用人工神经网络系统模拟人脑神经系统、用遗传算法模拟生物进化过程等。
计算机模拟	用计算机技术实现上述3类模拟，既可以模拟人体机能，又可以模拟人脑思维功能，为当前安全系统模拟的研究前沿和主要形式。

7 结论

安全人-机-环境系统工程是通过综合分析系统中人、机、环境三者之间的相互关系研究而为人创造最佳的作业条件，保证人的作业安全可靠，减少失误及疲劳，从而提高作业效率，保证系统安全，同时也为事故的系统分析、事故预防以及安全决策提供理论依据，真正实现系统的本质安全。科学技术的进步促使出现新的工业设备、作业环境、工艺流程，生产实践中的安全问题已变得更加复杂，安全人-机-环境系统工程的方法论可以为系统中各种安全问题的发现及解决提供一套科学的工作方法和步骤；其方法论的建立，要求掌握系统科学、人-机-工环境系统工程，以及安全科学等基本知识。

1) 安全人-机-环境系统工程的研究对象是安全系统中的人、机、环境因素及相互作用规律，在进行

安全人-机-环境系统的设计过程中，可以将系统工程学中的各种基本方法论应用到安全人-机-环境系统工程当中，包括以霍尔方法论为代表的硬系统方法论及切克兰德软方法论等。

2) 将霍耳提出的系统工程三维结构模型推广应用到安全人-机-环境系统工程的方法论当中，并进行了改进，建立了以环境为第四维的安全人-机-环境系统工程方法论的四维结构体系。

3) 安全人-机-环境系统工程的具体方法体系，包括系统安全分析法、实验法、建模与模拟法、实测法等，各种研究方法相互联系，可以综合运用到该学科。

References (参考文献)

- [1] DING Yulan. Human factors engineering[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004. 丁玉兰. 人因工程学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [2] John R. Wilson, Fundamentals of ergonomics in theory and practice[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31: 557-567.
- [3] Suebsak Nanthavanij. Developing national ergonomics standards for Thai industry[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2000, 25: 699-707.
- [4] Neville A. Stanton, Mark S. Young. Giving ergonomics away? The application of ergonomics methods by novices[J]. Applied Ergonomics, 2003, 34: 479-490.
- [5] OUYANG Wenzhao, LIAO Kebing. Safety ergonomics[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2002. 欧阳文昭, 廖可兵. 安全人机工程学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [6] Zhang jinglin, Wang Guiji. Natural property and social property of safety[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(5): 6-10. 张景林, 王桂吉. 安全的自然属性和社会属性[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(5): 6-10.
- [7] WANG Huanchen. A kind of systems methodology-the SPIPRO principle[J]. Systems Engineering, 1994, 12(5): 9-12. 王浣尘. 一种系统方法论—螺旋原则[J]. 系统工程, 1994, 12(5): 9-12.
- [8] YUAN Xumei, LIU Xinjian, WAN Jie. System engineering introduction[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 袁旭梅, 刘新建, 万杰. 系统工程学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Yu Jingyuan, Qian Xuesen's contemporary system of science and technology and meta-synthesis[J]. Engineering Science, 2001, 3(11): 10-18. 于景元. 钱学森的现代科学技术体系与综合集成方法论[J]. 中国工程科学, 2001, 3(11): 10-18.
- [10] HE Xueqiu. Safety engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000. 何学秋. 安全工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [11] Wang ziyuan. Study object of human-machine engineering[J]. Journal of Donghua University, 2001, 27(5): 82-86. 王熙元. 人机工程学的研究对象[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2001, 27(5): 82-86.
- [12] YU Jingyuan, ZHOU Xiaoji. The realization and application of meta-synthesis[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 10: 26-32. 于景元, 周晓纪. 从定性到定量综合集成方法的实现和应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 10: 26-32.
- [13] GU Jifa, TANG Xijin, ZHU Zhengxiang. Survey on Wuli-Shili-Renli system approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(6):

- 51-60.
顾基发, 唐锡晋, 朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.
- [14] WANG Yingluo. System engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
汪应洛. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] Hu Shuangqi, Methodology of safety science research[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(9): 1-5.
胡双启. 安全科学研究方法论[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(9): 1-5.
- [16] LEI Zhanbo, XI Youmin. On the four dimensional morphology of system engineering methodology[J]. System Engineering Theory Methodology Applications, 2001, 10(2): 116-120.
雷战波, 席酉民. 系统工程方法论的四维结构体系[J]. 系统工程理论方法应用, 2001, 10(2): 116-120.
- [17] JING Guoxun, LI Hui. Research and implementation of the safety ergonomics construction[J]. Experimental Technology and Management, 2006, 23(11): 18-20.
景国勋, 李辉. 安全人机工程实验室建设的研究与实施[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(11): 18-20.
- [18] CHEN Hongmin. System engineering introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
陈宏民. 系统工程导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing, et al. A study on the theoretic frame of water resources systems engineering[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2004, 2: 130-137.
金菊良, 魏一鸣, 丁晶等. 水资源系统工程的理论框架探讨[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 2: 130-137.