

中文引用格式:佟瑞鹏,王益艳,武琪,等. 安全科学范式运演机制:基于安全-I、安全-II、安全-III的思维辨析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 7-16.

英文引用格式:TONG Ruipeng, WANG Yiyang, WU Qi, et al. Research on operational mechanism of safety science paradigms: a conceptual analysis based on safety-I, safety-II, and safety-III[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 7-16.

安全科学范式运演机制: 基于安全-I、安全-II、安全-III的思维辨析*

佟瑞鹏¹教授, 王益艳¹, 武琪¹, 毛颖¹, 许素睿²副教授, 安宇^{**1}研究员

(1 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083;

2 中国劳动关系学院 安全工程学院, 北京 100048)

中图分类号:X913.1

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0564

基金项目:国家自然科学基金资助(52074302)。

【摘要】 为阐释安全-I、安全-II、安全-III的本质差异,明确安全科学范式的运演机制,推动安全科学作为一门科学学科持续发展,运用文献综述法与比较分析法,从认识论和方法论维度解析三者的理论差异,进而从科学哲学视角论述安全科学范式的构建与转换,澄清三者的范式定位。结果表明:安全-I代表着重视因果关系的传统事故致因理论或模型,安全-II是强调从正面视角研究安全问题的韧性理论方法,安全-III则是基于系统理论及控制论的系统型事故致因模型。安全科学范式由一体四面构成,包括无范式阶段、范式建立阶段、常规科学研究阶段、范式危机以及范式转换阶段,当前安全科学范式以事故致因理论为主导,处于常规科学研究阶段,虽然存在范式危机现象,但尚未进入范式转换时期。安全-I和安全-III是事故致因理论范式中的研究内容,安全-II的信念和研究视角发生了转变,可视为安全科学新的研究方向,但尚未成为新范式。未来安全科学范式的发展有3种形式,需在新技术的引领下持续实践和探索。

【关键词】 安全科学范式; 运演机制; 安全-I; 安全-II; 安全-III; 范式转换

Research on operational mechanism of safety science paradigms: a conceptual analysis based on safety-I, safety-II, and safety-III

TONG Ruipeng¹, WANG Yiyang¹, WU Qi¹, MAO Ying¹, XU Surui², AN Yu¹

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2 College of Safety Engineering, China University of Labor Relations, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to elucidate the essential differences among safety-I, safety-II, and safety-III, to clarify the operational mechanisms of safety science paradigms, and to promote the sustained development of safety science as a scientific discipline, this study adopted literature review and comparative analysis methods. The theoretical distinctions among the three from epistemological and methodological dimensions were analyzed. Then the construction and transformation of the safety science paradigm from the

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0007-10; 收稿日期:2025-08-11; 修稿日期:2025-11-18

** 通信作者:安宇(1976—),男,黑龙江海伦人,博士,研究员,主要从事行为安全、安全教育等方面的研究。E-mail: anyu@cumtb.edu.cn。

perspective of philosophy of science were discussed, and their paradigm positions were clarified. The results indicate that: Safety-I represents traditional accident causation theories or models that emphasize causality. Safety-II is a resilience theory that studies safety issues from a positive perspective. Safety-III is a systemic accident model grounded in systems theory and cybernetics. The safety science paradigm comprises one entity with four aspects. These aspects include the paradigm-free stage, paradigm establishment stage, normal science research stage, paradigm crisis stage, and paradigm shift stage. Currently, the safety science paradigm is dominated by accident causation theory and remains in the normal science research stage. Although there are signs of a paradigm crisis, it has not yet entered the paradigm shift period. Safety-I and Safety-III are research contents within the accident causation theory paradigm. However, Safety-II reflects changes in both beliefs and research perspectives. It can be seen as a new research direction in safety science, but it has not yet become a new paradigm. The future development of the safety science paradigm has three possible forms. It requires continuous practice and exploration led by new technologies.

Keywords: safety science paradigm; operational mechanism; safety-I; safety-II; safety-III; paradigm shift

0 引言

安全科学作为交叉性学科,受到管理学、工程学、心理学等学科的影响,因而不同视角的众多理论、方法被引入安全科学领域。自 HOLLNAGEL^[1]提出安全-I与安全-II的二分法以来,国际学界围绕安全科学范式展开多维度的讨论^[2]。HOLLNAGEL主张安全科学应转换视角,研究如何确保成功地工作,而不是广泛关注如何减少出错;HALE^[3]认为,从事故和灾难的本质出发,正向成功并不能解决所有的安全问题,如果忽视安全-I,就无法定义安全-II。KARANIK等^[4]将韧性工程、安全-II、高可靠性组织理论、SD(Safety Differently,安全变革/安全新思维)等统称为新安全范式,强调应重视它们在实际中的可靠性分析。2020年,LEVESON^[5]在批判HOLLNAGEL观点的基础上提出安全-III,并倡导在安全研究领域内实施安全-III。

目前,国内尚未从科学哲学层面全面分析安全科学范式的内涵,安全-II的学术思想在国内传播也不如国外广泛^[6],但我国学者对安全科学研究方式的探讨亦颇为丰富。傅贵^[7]梳理了安全科学的学科内涵,认为安全科学的基础理论主体是线性、非线性事故致因理论。吴超^[8]将安全研究的主要途径概括为从事故预防、风险管理和本源安全出发的3视角研究。佟瑞鹏等^[9]建议,统筹发展与安全应推进本质安全、行为安全、过程安全与功能安全的综合实施策略,充分释放四者在安全治理中的协同效应。罗通元^[10]认为,长久以来安全科学的发展始终

停留在以还原论为主要思想的阶段,无论是理论模型还是方法工具都难以实现根本性突破,因而需转向整体论的研究思维。李杰^[11]基于HOLLNAGEL的研究,指出在安全科学发展的数十年中,主要以事故科学为主,未来需进一步实现向安全科学范式的转移。

综上所述,针对当前广泛探讨的安全-I、安全-II以及安全-III,多数学者在探讨时忽视了三者之间的哲学分野。此外,国内外对安全科学范式的研究主要通过比较多种理论或模型的异同点及优缺点,试图挖掘能够代表未来研究方向的理论,但鲜有从科学哲学的角度全面阐释安全科学范式的形成与转换。在安全领域,许多被应用于与安全相关议题的概念发轫于其他科学,如果没有广泛认可的范式,那么安全科学的地位在文献中会被贴上伪科学的标签^[12]。

鉴于此,笔者拟采用对比分析方法,以安全科学的哲学思辨为核心思想^[13],从认识论、方法论维度分析安全-I、安全-II、安全-III之间的哲学关联与理论差异,再从科学哲学层面揭示安全科学范式的运演机制,厘清三者的范式定位,并探讨安全科学未来发展的可能路径,以期安全科学在理论层面的发展提供参考。

1 3种安全科学的思维辨析

HAAVIK^[14]基于科学哲学与行动者网络理论区分安全本体论与认识论的差异,结果表明:两者之间的界限并不显著。此外,在建构主义的科学理论框架中,本体论与认识论的概念呈现出相互渗透的特

征。对于安全科学领域而言,学术界普遍从认识论展开研究。因此,笔者主要从认识论和方法论维度辨析 3 种安全科学思维的哲学基础。

认识论是揭示人类认识世界和追求真理本质与规律的哲学概念。安全科学是综合性学科,研究其认

识论问题就是要明确一切以安全科学为逻辑起点的科学活动的本质、范围、来源及其发展特征等。方法论是分析问题、解决问题的总体理论架构,并非具体工具的简单集合,更强调其所蕴含的哲学基础。分别从认识论和方法论维度对比分析 3 种理论,见表 1。

表 1 3 种安全科学理论的认识论及方法论差异

Table 1 Epistemological and methodological differences among three theories of safety science				
维度		安全-I	安全-II	安全-III
认识论	对安全的定义	尽可能少出错	尽可能多做正确的事情	由系统利益相关者确定的不可接受的损失
	认识本质	不良事件	系统在动态交互中持续成功运行的功能状态	安全作为控制问题而不仅是可靠性问题
	知识来源	历史数据与事故案例的经验归纳	成功实践的生成性知识	事故的经验归纳与信息挖掘
	认知范围	可以被明确识别、定义和量化的风险领域	以安全为中心的成功行为和条件	以系统控制为中心的工程技术范畴
	风险识别	已知-已知、已知-未知	未知-未知	已知-未知、未知-未知
	人因观	人类是风险来源	人类是系统韧性的核心资源	系统设计需支持人类的灵活性,确保其行为在安全边界内
方法论	指导原则	逻辑实证主义	实用主义	逻辑实证主义、实用主义
	分析基础	线性因果关系	韧性工程	系统论因果关系
	实践工具	链式事故致因模型 ①单因素:事故倾向性理论 ②简单链式:多米诺骨牌模型 ③复杂链式:瑞士奶酪模型、瑟利模型	①韧性评估网格 (Resilience Assessment Grid, RAG) ^[22] ②功能共振模型 (Functional Resonance Analysis Method, FRAM) ^[23] ③FRAM 模型可视化软件 (FRAM Model Visualiser, FMV) ^[24]	①系统理论事故模型与过程 (Systems-Theoretic Accident Modeland Processes, STAMP) ②系统理论过程分析 (Systems-Theoretic Process Analysis, STPA) ③基于 STAMP 的因果分析 (Causal Analysis based on STAMP, CAST)

1.1 安全-I:经典科学的安全实践

根据 HOLLNAGEL 的观点,安全-I 将安全定义为尽可能地少出错,重点是因果关系的分析,认为不良事件的发生基于一系列可识别的原因,包括技术故障、程序违规、人员操作失误或系统组件失效等因素。因而,安全-I 关注如何解释或理解不良事件的表现形式^[15],其认识论根植于还原论,本质是对不良事件的认识,通过分析事故原因来构建知识体系。安全-I 的范围以不良事件为中心,涵盖可以被明确识别、定义和量化的风险领域,其知识的形成依赖于历史数据与事故案例的经验归纳。

安全-I 的方法论以事故分析为基础,实践过程展现了因果关系的逻辑必然性,即认为事故的发生必然有其原因,而事故原因必然导致相应的事故结果^[16],体现了逻辑实证主义的思维。因此,安全-I 的方法论工具包括单因素事故致因理论、简单链式事故致因理论以及复杂链式事故致因理论的分析模

型,需要依赖先验经验。事故因果链式模型的作用在于揭示事故发生的连续性和关联性,进而修补事故链中薄弱环节或缺陷以预防事故再次发生,对于安全工程设计以及事故调查具有重要意义^[17]。

由以上分析可知:安全-I 属于经典科学在安全领域的实践。经典科学是指建立在经典力学和机械唯物主义自然观上的知识体系。经典科学认为,复杂性是现实的表面现象,追求结果的简单性和统一性^[18]。其还原论思维、因果决定论、实体中心主义等深刻影响了安全-I 的认识论和方法论。

1.2 安全-II:韧性工程的发展应用

HOLLNAGEL 在分析学界既往工作的基础上提出安全-II,将安全重新定义为尽可能多做正确的事情,从正面阐释了对安全的认知和理解,注重系统日常成功运行的实践积累,建议组织从成功实践中学习并创新。安全-II 的认识论基于整体论,认为应当将不良事件视为日常性能变化的表现,从广度上

探索频繁发生事情的规律性,而不是仅关注基数较小的不良事件^[15]。本质上是对系统在动态交互中持续成功运行功能状态的认识,能够进一步思考未知-未知类风险。安全-II 的范围以安全为核心,研究成功的行为和条件,关注系统韧性能力的开发,并将人类视为系统灵活性和韧性的必要资源。因此,其知识的构成不仅包含不良事件的致因分析结果,还引入了生成性知识,即安全知识是主体在日常工作情境中创造的产物。

基于安全-II 的认识论,安全的内涵不仅包括消除风险和预防故障,还考虑最大化地开发组织潜力并实现韧性绩效,故其方法论倾向于实用主义^[19]。HOLLNAGEL 是最早将韧性工程引入安全科学领域的学者之一^[20],安全-II 的方法论工具也在韧性理论的框架下构建^[21],包括 RAG 和 FRAM,还开发了 FRAM 模型可视化软件 FMV。RAG 提供系统韧性的结构化评估框架,旨在评估系统在面对预期和意外干扰时的韧性潜力,认为系统本身不具备韧性,但可以通过开发响应、监控、学习、预测 4 个关键维度来实现韧性表现。RAG 并非直接使用的现成工具,而是作为定制化问题集的基础,实践中需要更进一步发展出更具体的问题集,通过雷达图量化系统在 4 个维度上的潜力。FRAM 基于 4 个原则:失败和成功的等效性、近似调整、涌现、功能共振,根据功能如何耦合以及日常性能变化如何产生共振来解释事故或安全结果。因此,RAG 是诊断性工具,解决系统是否具备韧性潜力的问题,而 FRAM 是分析工具,解决韧性如何通过功能互动实现或失效的问题。

1.3 安全-III:系统理论的拓展深化

LEVESON 对 HOLLNAGEL 的观点进行了针对性反驳,并提出安全-III,将安全定义为由系统利益相关者确定的不可接受的损失,认为损失是系统控制失效的结果,而非个体行为或设备故障的简单叠加,将简单的线性因果关系扩展至基于系统理论的因果关系,强调系统组件,即人、技术、组织、环境等之间的非线性交互与涌现行为。由系统论、控制论^[25]提供理论框架,解释系统层级间的信息流动与约束。其本质是对安全作为控制问题,而不仅是可靠性问题的认识,将系统安全的关注焦点从预防故障转变为强制实施行为安全约束^[26],并不强调人类的作用。在对风险的认识上,关注已知-未知、未知-未知类风险。此外,安全-III 将安全视为贯穿系统设计、运行、迭代的持续过程,知识的形成同样依赖

事故的经验归纳及信息挖掘。其认知范围以系统控制为中心,聚焦复杂安全管理体系的设计。

安全-III 并不否定事故致因理论的因果假设,既接受逻辑实证主义的指导,又将实用主义应用于其方法论中。安全-III 的方法论工具主要是 LEVESON 基于系统理论开发的分析方法和模型。包括 STAMP、STPA 以及 CAST^[27]。STAMP 本身是分层的安全控制结构,通过反馈控制回路对系统的建模来精确捕捉系统功能关系及交互作用。安全控制结构由作用于受控过程的控制器、实施控制动作的执行器、感应受控过程反馈的传感器以及受控过程本身组成。STPA 是先验性的分析方法,分析系统开发过程中的潜在风险。CAST 是追溯性分析技术,审查事故或事故征候,并识别其中涉及的因果要素。因此,STAMP 提供安全-III 的理论基础,而 STPA、CAST 分别是基于 STAMP 的前瞻性风险分析工具及事故致因分析工具。

综上所述,安全-I、安全-II 及安全-III 的认识论阐述和方法论体系各不相同,但安全-I 与安全-III 之间通过因果关系的根本假设实现理论互通。虽然安全-II 与安全-III 均强调系统的复杂属性,也都分析了实现系统韧性的关键方法,但安全-II 不承认因果关系的适用性,并且 HOLLNAGEL 更重视人因工程的研究,而 LEVESON 倾向于通过软硬件的工程设计来实现系统韧性。因此,安全-II 与安全-III 在人因观及系统韧性方面体现出截然不同的观点,二者仅在批驳简化的线性致因分析上达成一致。

LEVESON 坚信,通过系统理论的深化与拓展,安全-III 能够提供更为全面且深入的视角,主张安全科学应当追求更加精细化的系统分析和建模设计,实现对安全风险的精准防控。而 HOLLNAGEL 则强调安全-II 所倡导的韧性工程思维,能够为安全科学提供全新的研究视角,促进安全科学范式的变革和转换。那么,安全科学将如何在安全-I、安全-II 与安全-III 之间找到平衡点,亦或是实现辩证统一,需要通过科学哲学及系统科学层面的思辨过程来论证分析,进而揭示安全科学范式在理论碰撞与实践检验中动态调整的运演机制。

学界在探讨安全科学范式时,不可避免地参考了科学哲学的概念和观点^[27-30]。当前,安全科学范式的研究存在 3 方面的问题:①安全科学是否已经形成科学范式;②安全科学范式转换的驱动因素是什么;③现阶段安全科学领域是否需要范式转换。为避免学界对安全科学范式及范式转换存在

理解上的偏颇,将在科学哲学的视域下探讨以上问题及安全科学范式的运演机制。

2 安全科学范式的运演机制

1962 年, KUHN 在《科学革命的结构》一书中提出范式理论,论述新旧科学范式转换与科学发展之间的内在联系,引发广泛的学术讨论和多种解读。传统科学观主张,科学的进步源于公认真实和理论的累积发展。而 KUHN 的观点是,在旧范式尚未被新范式所取代时,累积效应确实存在,但当新范式确立之后,它与旧范式之间呈现出不可通约性^[31]。安全科学兼有自然科学和社会科学的属性,从科学哲学层面探讨其发展规律是深入理解安全科学是一门科学^[32]的有效途径,重点是要理解安全科学范式的运演机制,可理解为系统或组织为实现特定目标而进行的动态运作过程和内在规律,包含各要素的结构、功能及其相互作用方式。

2.1 构成要素

考察 KUHN 的文本论述^[33],体会范式的内涵及外延,综合不同领域学者对其概念的延伸及解读,可明晰范式的构成要素^[34-35]。概言之,范式是指科学共同体的共同纲领,由特定领域的公认成就,即最优理论发展而来,包含对本体论、认识论、方法论的基本承诺,通过经典范例和符号定律引导研究活动,并随科学革命的发生实现范式转换。因此,范式可由一体四面构成,一体指实践主体,即科学共同体,接受并遵循同一范式的科学家群体;四面指范式形成的 4 个关键方面,即理论体系、科学成就、成功范例、共同信念。

范式与科学共同体密不可分,科学共同体是范式的社会载体,范式通过共同体的实践得以维持和发展。安全科学要确立起科学范式,也需明确其核心构成要素和确立过程。安全科学范式的构成要素见表 2,其中,理论体系指包含安全科学基础假设、模型原理、应用方法及技术工具等在内的整体性框架;重大研究成果是指在安全科学领域具有开创性和里程碑意义的科学研究,已经通过严格的科学验证并得到广泛认可,能够推动整个安全学科的发展;安全科学的共同信念是学界普遍认同的核心价值和观念,体现研究者的精神特质和学术追求,是维系科学共同体凝聚力的重要精神力量。此外,4 个关键方面在科学共同体的研究实践中相互作用、协

同演化,为安全科学范式的运演机制提供逻辑支撑。其中,科学成就为运演积累实践依据,共同信念为运演明确了实践方向。

表 2 安全科学范式的构成要素

Table 2 Elements of the safety science paradigm		
构成要素		具体内涵
一体	安全科学共同体	安全科学共同体是指围绕安全科学相关议题展开科学研究及实践的群体,由来自不同学科背景的学者、专家、从业者以及政策制定者等组成,通过学术交流、合作研究、教育培训等方式,共同推动安全科学的发展
	安全科学的理论体系	安全科学的理论体系是由符号概括、基础假设、定律、原理、模型、应用、研究方法以及技术工具等组成的整体性研究架构。通常来说,理论体系是科学范式的显性表达
四面	科学成就	安全科学共同体普遍认可的重大研究成果,是最具解释力和竞争力的理论体系,也是范式形成的起点
	成功范例	能够被反复引用的经典问题的解决方案,通过模仿范例可掌握范式的应用方法。范例是范式在实践中的具体体现,指导安全科学共同体成员按规则解决问题
	安全科学的共同信念	安全科学的共同信念是解决安全问题的世界观选择,包括科学共同体的本体论承诺、认识论预设以及价值论取向,也是安全科学共同体一致遵守的研究纲领

2.2 形成路径

根据科学哲学的思想,安全科学范式的建立发展过程可分为无范式阶段、范式建立阶段、常规科学研究阶段、范式危机阶段以及范式转换阶段^[36]。其中,范式转换阶段又包含科学革命、新范式建立、新的常规科学研究阶段,进而迈向新范式时期。

安全科学范式的形成路径如图 1 所示。在主导的安全科学范式建立之前,对安全现象的认识和理解处于多元竞争的状态,属于无范式阶段,此时的研究与实践以经验性、局部性为主,安全知识呈现碎片化特点,缺乏系统性解释模型。关于现象解释的理论体系要发展成为科学范式时,必须是在理论竞争中最具解释力和吸引力的观点或成就,并且被安全科学界普遍接受,进而成为科学范式的起点。

从安全科学发展的历史纵深来看,自 GREENWOOD 和 WOODS 提出事故频发倾向理论以来,围绕事故的发生发展及其传播机制已形成诸多致因模型,通常可分为基于因果关系的传统型模型

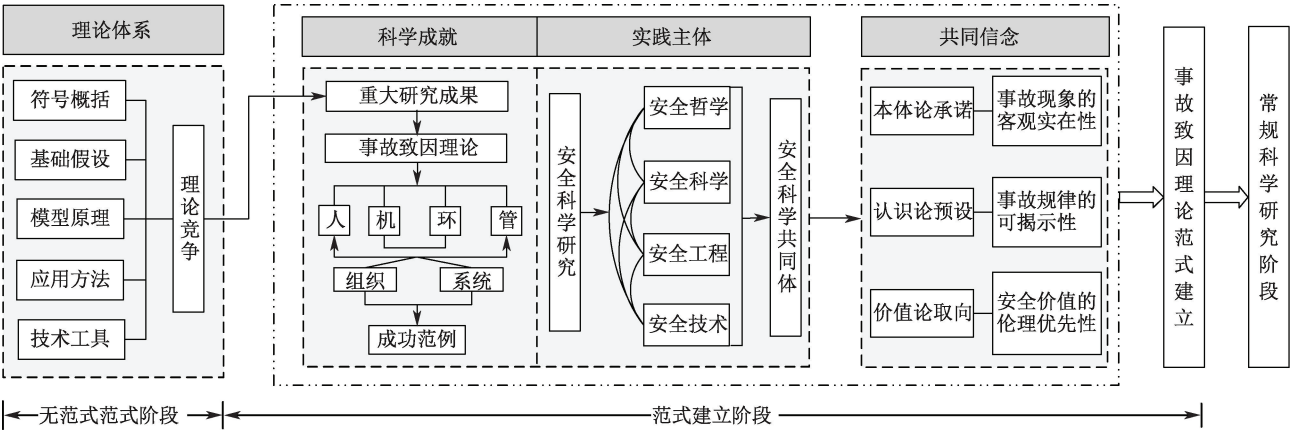


图1 安全科学范式的形成路径

Fig. 1 Formation path of safety science paradigm

和基于系统理论的系统型模型。传统模型如多米诺骨牌模型、能量意外释放模型、流行病学模型、轨迹交叉模型以及瑞士奶酪模型等；系统模型如STAMP、“2-4”模型、风险管理框架模型、正常事故理论和高可靠性组织理论等。以上理论或模型从人机工程逐步发展到围绕人、机、环、管、组织及系统的全方位、多角度交叉性扩展研究，其理论基础皆是事故致因理论^[37]。一方面，事故致因理论是安全科学的重要理论主线^[38]，更是安全科学界普遍承认的重大研究成果，为安全领域的研究者提供发现、认识和解决事故问题的指导性方案，供安全科学共同体成员在各历史阶段下不断实践、修正和完善，在新的时代背景下强化事故致因理论的内涵是顺应科学发展规律的选择。另一方面，科学范式必须保持灵活性和开放性，才有范式转换和科学发展的可能。从以上2个方面来看，事故致因理论能够在理论竞争中兼收并蓄，持续发展，高度概括安全科学的内涵，并且具备可供参考的成功范例，形成以事故现象的客观性为本体论承诺，事故规律的可揭示性为认识论预设，安全价值的伦理优先性为价值论取向的共同信念，吸引了一批围绕安全技术、工程、科学、哲学及其相互关系等进行研究的实践主体，因而确立起一种安全科学范式，即事故致因理论范式。学界围绕事故致因理论范式拓展的新模型新方法，既是对现有范式的丰富，也是对安全科学发展趋势的探索。

3 安全科学范式的危机阶段与转换过程

安全科学范式确立后并不意味着能够在任何情况下精准预防事故，实现安全目标，同样存在现有范式的理论体系无法解决的异常情况，引起范式危机

和范式转换。

3.1 范式危机

当现有范式无法解释的异常现象积累到一定程度时，会导致科学共同体成员对当前范式的质疑，进入范式危机时期，开始新的理论竞争，并确定是否需要范式转换。在此期间，若新理论更适合解释旧范式中异常现象的积累时，将被研究成员所支持和接受。范式转换后说明科学革命已完成，进化过程再次开始，通过常规科学阶段的研究来支持新范式。共同信念和研究视角是范式转换中的重要驱动因素^[39]；共同信念代表了共同体进行学科研究的世界观；而研究视角则是观察、理解和解释问题的方式，研究视角的转变伴随着对旧范式的批判和新范式的探索。

社会技术系统正不断地向高精度、高密度的方向演变^[40]。安全风险表现出高度复杂性和不确定性。主要源于技术要素的精密耦合、人类行为的动态适应性以及环境与社会变量的非线性叠加等。现有范式无法及时解决的安全问题逐渐凸显，其中，未知-未知类风险的挑战尤为突出。例如：航空系统空气动力学模型在极端条件下的简化假设失效，以及传感器因罕见电磁干扰导致的异常输入，均属于意外软件行为^[41]。现有研究范式中缺乏能够有效捕捉此类风险蝴蝶效应的模型或方法。换言之，社会技术系统的非线性交互作用使得微小扰动可能引发系统性崩溃，但当前安全科学的理论模型及应用方法却难以准确预测和防范这类现象。

3.2 范式转换

相较而言，HOLLNAGEL认为，从安全视角挖掘导致事故发生的信息对解决当前异常现象更有启发

性和解释力。事实上,自韧性理论引入安全科学领域以来,HOLLNAGEL 极力倡导转换研究视角。因此,他提出的安全-II 信念和研究视角都发生了转变,其本体论承诺转向安全现象的客观实在性,认识论预设强调安全规律的可揭示性,研究视角从事故如何发生转向安全如何实现。简言之,从事故导向转为安全导向。但若推动安全-II 发展成新的安全科学范式,还需克服一系列理论与实践难题。

首先,安全-II 理论尚未形成完整且被广泛接受的体系框架,其核心概念、假设和模型仍需在实践中不断验证和完善。其次,安全-II 的推广和应用受到现有安全科学理论体系和文化的制约,如何在现有体系下融合并推动变革是安全-II 面临的巨大挑战。再者,安全-II 强调的韧性思维和系统方法在实际操作层面存在诸多不确定性,如 COOPER^[42]提出安全-II 缺乏支撑其在实际操作中改善安全性能的同行人评审经验证据,如何有效实施并量化其效果也是亟待解决的问题。此外,韧性理论的发展与实践尚处于初级阶段,安全-II 在与事故致因理论的竞争中并未占据优势,有学者将 FRAM 归为系统型事故致因模型^[43],甚至由于无法脱离对事故的分析,安全-II 有融入事故致因理论范式的趋势,如 STOOP 等^[44]提出的全面信息模型,能够较好地认识论维度整合两者的信息认知视角,厘清安全科学的信息来源,如图 2 所示。因此,安全-II 虽然代表着安全科学研究视角的转变,但目前未能完成理论的颠覆或替代。

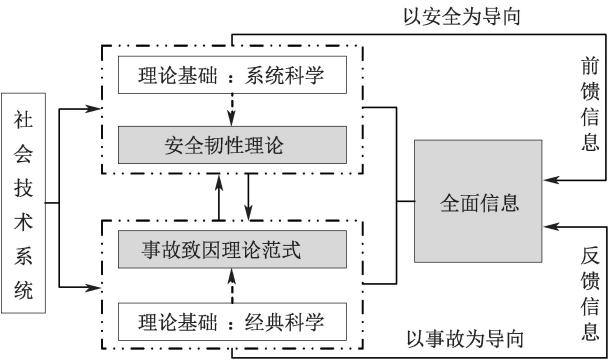


图 2 安全知识的双视角信息来源

Fig. 2 Dual-perspective information sources of safety knowledge

综上,安全-I 仅能代表事故致因理论范式初期研究中存在的缺陷和不足,而安全-III 补充了事故致因理论范式下需要完善和追随技术发展以实现对异常现象解释的部分,它们是事故致因理论范式下逐步丰富起来的理论模型。因此,可明确安全-I 和

安全-III 是隶属于事故致因理论范式的研究内容,故不存在范式转换之说。当前,许多学者将安全-II 作为新的范式^[45-46],并倡导转向安全-II,从科学哲学维度审视,安全-II 尚不足以确立为全新范式,应作为安全科学研究的崭新视角。

未来安全科学范式的发展结果可能以 3 种形式出现:①事故致因理论范式最终通过理论体系的强化攻破异常积累难题,常规科学阶段的研究持续开展。②安全韧性理论解决安全问题的能力最终优于现有范式,吸引越来越多的研究者和实践者,通过科学革命取代旧范式。③2 种理论最终处于并存状态,交流和融合更加频繁,直到出现能够全面解释和解决安全问题的新理论,推动安全科学范式进入新的发展阶段。无论哪种形式,都要加强跨学科、跨领域合作,研究者的差异化学术背景带来的新思维碰撞或许对推动安全科学范式的转换有脱胎换骨的效果。此外,在大数据、人工智能等新技术的发展热潮下,不仅需关注由此带来的新风险,更应该强化其在安全科学中的应用,推动安全科学由客体优位向实践优位发展,以全面提升安全科学范式解决实际问题的能力。

4 结 论

1) 安全-I 基于还原论,代表重视因果关系的事事故致因理论或模型,方法论依赖逻辑实证主义;安全-II 强调整体论,倡导从成功实践学习并创新,方法论倾向于实用主义;安全-III 是系统型事故致因模型,认识论融合了控制论和系统理论,方法论则结合了逻辑实证主义与实用主义。

2) 安全科学范式由一体四面构成,一体指科学共同体,四面包括理论体系、科学成就、成功范例和共同信念。其发展需经历无范式阶段、范式建立阶段、常规科学研究阶段、异常积累和范式危机阶段以及范式转换阶段。目前,安全科学范式已历经无范式及范式建立阶段,进入常规科学研究时期,以事故致因理论为主导,尽管面临范式危机,但未进入范式转换阶段。

3) 安全-I 和安全-III 属于事故致因理论范式框架下的研究范畴,不宜作为范式转换的标志性概念。安全-II 在信念和研究视角上均发生了转变,然而在理论体系构建与实践研究层面,仍存在诸多亟待解决的问题,尚未达到确立新范式的标准,仅能作为安全科学研究的全新视角。

4) 未来安全科学范式可能呈现 3 种形态:①强

化现有理论体系处理异常问题;②安全韧性理论超越并取代旧范式;③2种理论并存融合,直至新理论解决所有问题。未来需加强跨学科合作,探索新技术应用,提升解决实际问题的能力。

参考文献

- [1] HOLLNAGEL E. Safety-I and safety-II: the past and future of safety management[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018: 171-172.
- [2] GE Ji, XU Kaili, ZHENG Xin, et al. The main challenges of safety science[J]. Safety Science, 2019, 118:119-125.
- [3] HALE A. Foundations of safety science: a postscript[J]. Safety Science, 2014, 67:64-69.
- [4] KARANIKAS N, ZERGUINE H. Are the new safety paradigms (only) about safety and sufficient to ensure it? an overview and critical commentary[J]. Safety Science, 2024, 170:DOI:10.1016/j.ssci.2023.106367.
- [5] LEVESON N. Safety III: a systems approach to safety and resilience[J]. MIT Laboratory of Engineering Systems, 2020, 16:2021.
- [6] 李杰. Safety II 学术思想的科学传播研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022,18(11):223-228.
- LI Jie. The diffusion of the safety II thought [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022,18(11):223-228.
- [7] 傅贵. 安全科学学及其应用探讨[J]. 安全, 2019,40(2):1-10.
- FU Gui. The science of safety science and its practical implications [J]. Safety & Security, 2019,40(2):1-10.
- [8] 吴超. 安全研究的预设和途径及新观点[J]. 安全, 2019,40(8):32-37,42.
- WU Chao. Presupposition, pathes and new thought of safety research [J]. Safety & Security, 2019,40(8):32-37,42.
- [9] 佟瑞鹏, 王露露, 许素睿, 等. 本质安全、行为安全、过程安全与功能安全的比较研究:基于安全管理范式转换[J]. 中国安全科学学报, 2025,35(1):7-15.
- TONG Ruipeng, WANG Lulu, XU Surui, et al. Comparative study of inherent safety, behavior-based safety, process safety and functional safety based on safety management paradigm shift [J] China Safety Science Journal, 2025,35(1):7-15.
- [10] 罗通元. 安全科学研究对象的认识困境与探赜[J]. 现代职业安全, 2021(5):68-71.
- LUO Tongyuan. The cognitive dilemma and exploration of safety science research objects [J]. Modern Occupational Safety, 2021(5):68-71.
- [11] 李杰. 关于安全科学三个方面的思考[J]. 技术与创新管理, 2020,41(6):536,573.
- LI Jie. Reflections on three aspects of safety science [J]. Technology and Innovation Management, 2020,41(6):536, 573.
- [12] SWUSTE P, ZWAARD W, GROENEWEG J, et al. Safety professionals in the Netherlands[J]. Safety Science, 2019, 114:79-88.
- [13] 佟瑞鹏, 王露露, 胡向阳, 等. 安全软科学研究追溯与展望:内涵、外延与挑战[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4):1-8.
- TONG Ruipeng, WANG Lulu, HU Xiangyang, et al. Review and prospect of safety soft science research: connotation, extension and challenge [J]. China Safety Science Journal, 2023,33(4):1-8.
- [14] HAAVIK T K. On the ontology of safety[J]. Safety Science, 2014,67:37-43.
- [15] HOLLNAGEL E, LEONHARDT J, LICU T, et al. From safety-I to safety-II: a white paper [M]. Bruxelles: Eurocontrol, 2013:1-32.
- [16] 刘祖德, 刘永泰, 王清清. 相关关系和因果关系在事故分析中的应用:研究综述与启示[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):169-177.
- LIU Zude, LIU Yongtai, WANG Qingqing. Applications of the relevant and cause-result relationship to the analysis of the production safety accidents: summary and enlightenment [J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):169-177.
- [17] 伍星光, 侯磊, 刘芳媛, 等. 安全思维和事故模型研究分析与展望[J]. 石油科学通报, 2020,5(2):254-268.

- WU Xingguang, HOU Lei, LIU Fangyuan, et al. The analysis and prospects of safety thinking and accident models [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(2): 254–268.
- [18] 刘敏, 董华. 简单范式与复杂范式:论经典科学与系统科学的不同认识论模式[J]. *科学技术与辩证法*, 2006, 5(2): 21–24.
- LIU Ming, DONG Hua. Seeing science in multidimension [J]. *Studies in Philosophy of Science and Technology*, 2006, 5(2): 21–24.
- [19] HOLLNAGEL E. Understanding accidents-from root causes to performance variability[C]. *Proceedings of the 2002 IEEE 7th Conference on. IEEE*, 2002; DOI: 10. 1109/HFPP. 2002. 1042821.
- [20] WEARS R L. Resilience engineering: concepts and precepts[J]. *Quality and Safety in Health Care*, 2006, 15(6): DOI: 10. 1136/qshc. 2006. 018390.
- [21] HOLLNAGEL E. Safety-II in practice: developing the resilience potentials[M]. New York: Routledge, 2017: 74–75.
- [22] HOLLNAGEL E. How resilient is your organisation? an introduction to the resilience analysis grid (RAG) [C]. *Sustainable Transformation: Building a Resilient Organization*. 2010: 1–6.
- [23] HOLLNAGEL E. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems[M]. Boca Raton: Crc Press, 2017: 127–134.
- [24] PATRIARCA R, DI GRAVIO G, WOLTJER R, et al. Framing the FRAM: a literature review on the functional resonance analysis method[J]. *Safety Science*, 2020, 129; DOI: 10. 1016/j. ssci. 2020. 104827.
- [25] HOLLNAGEL E, SLATER D. The metamorphosis from safety-II to an incremental safety cultur [C]. *7th Safety II Workshop*, 2025, 25: 1–12.
- [26] LEVESON N G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. Cambridge: the MIT Press, 2016: 10–15.
- [27] PATRIARCA R, CHATZIMICHAILIDOU M, KARANIKAS N, et al. The past and present of system-theoretic accident model and processes (STAMP) and its associated techniques: a scoping review[J]. *Safety Science*, 2022, 146; DOI: 10. 1016/j. ssci. 2021. 105566.
- [28] LR COZE J C, PETTERSEN K, REIMAN T. The foundations of safety science[J]. *Safety Science*, 2014, 67: 1–5.
- [29] GIERSEWSKI J. Paradygmaticzne punkty widzenia nauk o bezpieczeństwie[J]. *Historia I Polityka*, 2019, 36(29): 9–25.
- [30] 王秉, 史志勇, 王渊洁. 复杂性时代的国家安全学新范式:构建国家安全复杂学[J]. *国际安全研究*, 2023, 41(4): 57–81, 157–158.
- WANG Bing, SHI Zhiyong, WANG Yuanjie. Research on the disciplinary establishment of national security and safety complexity science [J]. *Journal of International Security Studies*, 2023, 41(4): 57–81, 157–158.
- [31] 方芳. 是谁动了库恩的“范式”? “范式”变异之译介促因分析[J]. *上海翻译*, 2025(2): 78–84.
- FANG fang. Who changed Kuhn's "paradigm": exploring the factors leading to variations of "paradigm" [J]. *Shanghai Journal of Translators*, 2025(2): 78–84.
- [32] HOLLNAGEL E. Is safety a subject for science? [J]. *Safety Science*, 2014, 67: 21–24.
- [33] KUHN T S. The structure of scientific revolutions[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1997: 10–22.
- [34] 郑杭生, 李霞. 关于库恩的“范式”:一种科学哲学与社会学交叉的视角[J]. *广东社会科学*, 2004(2): 119–126.
- ZHENG Hangsheng, LI Xia. On Kuhn's "paradigm": an interdisciplinary perspective bridging philosophy of science and sociology [J]. *Social Sciences in Guangdong*, 2004(2): 119–126.
- [35] 宋超, 杨瑶. 库恩范式结构特点的系统哲学解读[J]. *系统科学学报*, 2023, 31(3): 16–22.
- SONG Chao, YANG Yao. Interpretation of Kuhn's paradigm structure based on system philosophy [J]. *Chinese Journal of Systems Science*, 2023, 31(3): 16–22.
- [36] 张勇. 原始语境与具体运用:社会科学研究中运用范式概念的再认识[J]. *黑龙江社会科学*, 2024(4): 68–73.
- ZHANG Yong. Primitive Context and specific application: a furtherunder standing of the application of paradigm concepts

insocial science research [J]. Social Sciences in Heilongjiang, 2024(4):68-73.

[37] 隋鹏程. 回顾与展望:从业安全 48 年的体会[J]. 劳动保护科学技术, 1999, 20(5): 7-8.
SUI Pengcheng. Review and outlook: reflections on 48 years of occupational safety experience [J]. Labor Protection Science and Technology, 1999,20(5):7-8.

[38] 傅贵, 郭孝臣. 事故致因理论的研究与应用简评[J]. 安全, 2019,40(9):1-5.
FU Gui, GUO Xiaochen. A brief review on the study and application of accident causation theory [J]. Safety & Security, 2019,40(9):1-5.

[39] WHETSTONE D. Tracing paradigm shifts in information literacy: a progressive knowledge domain visualization approach[D]. Columbia: University of Missouri-Columbia, 2022.

[40] RAYMOND R, HECHT M. A SysML profile for MIL-STD-882E (system safety)[J]. INCOSE International Symposium, 2022, 32;DOI:10.1002/iis2.13004.

[41] PROKOP L E. Software error incident categorizations in aerospace[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2024, 21(10): 775-789.

[42] COOPER M D. The emperor has no clothes: a critique of safety-II[J]. Safety Science, 2022, 152;DOI:10.1016/j.ssci.2020.105047.

[43] FU Gui, XIE Xuecai, JIA Qingsong, et al. The development history of accident causation models in the past 100 years: 24Model, a more modern accident causation model[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 134: 47-82.

[44] STOOP J, DE KROES J, HALE A. Safety science, a founding fathers' retrospection[J]. Safety Science, 2017, 94: 103-115.

[45] HEGDE S, HETTINGER A Z, FAIRBANKS R J, et al. Qualitative findings from a pilot stage implementation of a novel organizational learning tool toward operationalizing the safety-II paradigm in health care [J]. Applied Ergonomics, 2020, 82;DOI:10.1016/j.apergo.2019.102913.

[46] CHOI J J. What is diagnostic safety? a review of safety science paradigms and rethinking paths to improving diagnosis[J]. Diagnosis, 2024, 11(4): 369-373.

作者简介： 佟瑞鹏 （1977—）,男,黑龙江穆棱人,博士,教授,主要从事行为安全管理、职业心理健康、环境风险评估等方面的研究。E-mail:tongrp@cumtb.edu.cn。