复杂人机系统设计中认知工作分析理论、技术与应用研究进展

牛可, 方卫宁*, 郭北苑, 李翔

北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044

* E-mail: wnfang@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-07-09; 接受日期: 2018-02-07; 网络版发表日期: 2018-05-17

国家自然科学基金(批准号: 51575037)和轨道交通控制与安全国家重点实验室自主研究课题(编号: RCS2018ZT009)资助项目

摘要 认知工作分析是人机系统设计中的一种重要研究方法. 目前在航空、军事、交通运输、能源、石化和医疗等复杂人机系统领域开始得到了推广应用, 它对于提高复杂人机系统的安全、扩展系统功能、提高人机交互的适应性、降低系统全生命周期的成本有着十分重要的意义. 首先通过对国内外相关文献的总结, 论述了认知工作分析理论体系中约束、生态内涵两个核心内容并阐述了两者之间的内在联系; 随后详细分析了认知工作分析构建过程中的关键技术及其各维度建模工具的内涵和使用方法; 最后针对复杂人机系统设计的发展, 采用范围综述的方法对6个复杂人机系统领域内的223篇文献进行了研究, 分析了认知工作分析在这些领域中的研究现状、应用中的优势以及在未来的发展趋势.

关键词 复杂人机系统, 系统设计, 认知工作分析, 范围综述

1 引言

复杂人机系统是一个开放、动态、包含了人类组织与技术系统共同构成的整体, 随着信息、网络和自动化等技术的发展, 如何有效提高系统的总体效能, 优化系统中的资源配置是系统设计中面临的主要问题. 现代工业系统不仅仅要考虑设备性能的最大化, 还需要考虑数量众多的人机要素. 如飞行座舱系统中的人机功能分配、大规模军事指挥与控制系统的信息显示设计以及安全苛求系统对于突发情况的适应性等. 传统的系统设计方法偏重于对于硬件的开发和实现,

往往较少考虑系统的社会层面. 而复杂人机系统的社会因素往往是导致一些重大事故的直接来源, 例如, 三里岛事故^[1]. 人机系统的复杂性来自于物理、技术、组织、管理、社会和文化等多个层面, Vicente^[2]将人机系统复杂性来源归结为大问题空间、社会性、异构性观点、分布式、动态性、潜在的高风险、大量耦合的子系统、自动化、不确定性数据、计算机进行交互和扰动11个方面. 因而以复杂系统人机交互过程中的认知机理为核心, 获得针对复杂性的系统关键设计需求, 是解决设计中潜在安全风险的有效途径.

认知工作分析(cognitive work analysis, CWA)将认

引用格式: 牛可, 方卫宁, 郭北苑, 等. 复杂人机系统设计中认知工作分析理论、技术与应用研究进展. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 596–615
Niu K, Fang W N, Guo B Y, et al. Cognitive work analysis in design of complex man-machine system: A review of theory, technology and research development (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 596–615, doi: [10.1360/N092017-00087](https://doi.org/10.1360/N092017-00087)

知心理学理论成果与系统设计相结合, 在系统设计初期针对复杂人机系统所呈现的特点, 通过构建系统中行为主体(包括人、机器、计算机)的约束来获得人机系统的工作需求, 是系统地对社会层面和技术层面进行联合分析和优化的理论^[3]. 随着我国航天、舰船、武器系统以及高端装备等领域自动化和智能化的快速发展, 人机系统设计的复杂性问题日渐突出, 如何在复杂技术装备中采用人机环系统工程的研究方法, 提高系统可靠性, 优化系统资源是目前不少工业系统领域面临的主要问题. 本文详细介绍了CWA方法的理论体系和发展过程, 阐述了CWA构建的关键技术, 并利用范围综述的文献研究方法对CWA的研究进展进行了分析.

2 CWA的理论体系

CWA理论体系由丹麦瑞索国家实验室的学者Jens Rasmussen提出, 最初用于核电控制界面的适应性设计以处理工业事故分析中出现的“未知情况”. 该研究方法来自于Rasmussen对工业事故分析的总结, 目的是设计处理人机交互过程中的策略. Rasmussen分别于1986年和1994年出版了*Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*^[4]和*Cognitive Systems Engineering*^[5], 1999年与Kim Vicente合作出版了*Cognitive Work Analysis:*

Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work^[2], 这3本专著被学术界视为CWA方法的奠基之作.

由于CWA较早地使用认知心理学和系统设计相结合的研究手段, 迅速在复杂系统设计领域受到关注. 在随后30年的时间, CWA理论不断发展, 如图1所示, 从20世纪80年代理论框架提出以来, CWA理论体系伴随着复杂人机系统设计的应用自身也不断发展和完善. 20世纪90年代开始, 在以核电、航空为主的应用中逐渐形成了以工作域分析、控制任务分析、策略分析、社会组织和合作分析以及工作者能力分析5个维度为核心的研究范式^[3], 同时随着CWA在大量复杂人机系统的应用和实践, 到2000年以后逐步在每个维度发展出了新的工具和方法, 例如控制任务分析维度中关联的活动模板^[6]、策略分析维度中策略分析图^[7]以及工作者能力分析维度中SRK详细目录^[8]等; 在各维度工具丰富以后, 21世纪初开始, 针对新出现的大型复杂社会技术系统, CWA理论自身也不断发展, 出现了改进的CWA^[9]、团队CWA^[10]以及比较的CWA^[11]等新的发展方向; 近年来, 研究人员也发现CWA与传统系统设计方法^[12]、计算机建模与仿真^[13]等技术相结合能够对复杂系统定量化设计提出更好的解释.

2.1 基于约束的人机设计思想

在CWA中, 约束的目的是对行为的限制, 被用来

图1 (网络版彩图)CWA理论体系的发展过程

区别“可能的、可接受的行为”与“不可能的、无法接受的行为”, CWA关注的是行为形成的约束. 在所分析的系统或环境对象中, 这些约束是常量, 必须被系统或环境中的行为主体在任何情景下遵守^[14]. 然而, 虽然对主体的行为进行限制, 但是行为主体仍然被赋予很大的自由度, 这种自由度被称作行为主体可选择的策略或方案. 因此, 约束对行为的限制是一种在系统目的和物理资源均明确条件下的所有可能性, 并非唯一限定.

约束的本质与系统的类型直接相关, CWA中的约束被划分为两个类型: 因果约束(causal constraints)和有意约束(intentional constraints). 复杂人机系统也因而被分为因果和有意两类, 在CWA分析建模的同时, 判别系统的约束类型是首要解决的问题. 其中因果约束具有基本的物理或自然规律(例如, 万有引力定律), 该约束可以被看作“硬约束”, 即它们不能够违反; 有意约束来自于社会法律、道德或价值标准(例如, 公司章程), 这些约束可以被看作“软约束”, 理论上它们可以被违反, 但从社会的角度来讲是不允许的. 许多复杂人机系统同时具有因果约束和有意约束, 例如, 高速列车控制系统的设计既要考虑车辆、信号系统对于列车控制和安全的硬约束, 还需要从人能力的角度考虑司机在驾驶过程中对于正常和突发状况处理时的软约束. 分类取决于两种约束对行为主体行为的相对影响程度, 在因果系统中, 因果约束影响更大, 反之亦然.

2.2 人机系统设计的生态心理学内涵

生态心理学是CWA的重要理论来源, 基于此形成的生态界面设计(ecological interface design, EID)分析方法受到了世界范围内系统设计领域广泛关注. 国内对于EID的研究兴趣始于20世纪90年代末期^[15], 不少学者对EID的研究方法和建模过程进行了相关探讨^[16-21], 然而对于该方法的心理学解释涉及甚少.

EID中的“生态”一词来源于一种哲学思想^[22], 其理论基础最早可以追溯到Brunswik^[23]的概率性机能主义心理学(probabilistic functionalism), 他提倡心理学应关注有机体和其所在环境之间的相互关系, 并使用“远端变量”(有机体所处环境状态的客观描述)和“近端变量”(有机体从环境中接收的感觉输入)来描述这种相互关系. Brunswik认为有机体不能够直接感知远端变量, 而必须使用远端变量提供的线索(即概率)来推断

环境中发生了什么. 按照该观点, 界面设计目标即是为操作者提供经生态验证的线索, 也就是EID隐含的目的: 将符号绘制到信号上, 即将远端变量映射到近端变量.

Gibson^[24]进一步发展了该理论, 他认为有机体的感知是直接的, 即直接感知到环境为他们提供的高阶变量而不需要任何中间信息处理, 这就否定了Brunswik线索概率性的观点^[16]. Gibson^[24]引入“可供性”(affordance)来解释面向目标的行为, 表示与有机体目的相关的环境属性. 可供性被定义为一种与环境相关的行为可能, 它描述的是环境属性和个体发生连接的过程. 可供性认为有机体知觉到的内容是事物提供的行为可能而不是事物的性质. 可供性是独立于有机体的物体的属性, 但与每个有机体的能力又密切相关. 该观点与复杂系统中信息表征的机理一致, 例如在核电系统中, “生态”是一个被控制的过程, 该过程中的不变量被一系列数学方程所描述, 但这些过程是不可见的, 因此这些不变量中内在信息通常无法被操作者直接获得, 需要通过可视化将这些过程中的不变量映射到界面中的不变量.

按照Gibson的理论, 这些界面中的不变量应该由操作者直接感知, 并同时获得系统的可供性. 因此, EID可以被视为将操作者有效控制系统的可供性植入界面的分析过程. 由于操作者对系统的理解更倾向于抽象的层面即对高阶变量的理解, 因此该过程由不同层次抽象水平的高阶不变量进行描述. 这一过程与CWA关键技术中的工作域分析采用抽象分层结构相对应.

2.3 约束与生态心理学的内在联系

CWA不同于传统的系统分析方法, 其并非系统中的具体活动或过程的模型, 而是对“可能性空间”的描述^[25]. 该“可能性空间”通过抽象分层框架构建的约束嵌套集对复杂人机系统功能和因果的关系进行建模. 在最高级, 约束来自于系统设计的目标和价值; 在中间级, 考虑物理和信息逻辑的约束; 在接下来的较低级, 约束来自于具体的功能组织(从具体系统组件选取到它们的分布). 该抽象分层约束的框架非常符合Gibson生态心理学中可供性的概念, 即“打通了主观和客观的二分性, 并且帮助我们理解了该二分性是不正确的. 它将环境和行为建立联系, 因而既是物理的也是心理

的”^[26]。然而Gibson并没有对可供性的结构提出清晰的解释,更多的是一种对人们感知世界的普适性分析,这对于复杂系统领域的工程化应用显然是不足的。抽象分层的约束嵌套结构意味着构建了层次化的可供性模型,从而实现了生态心理学视角下哲学世界观与方法论的统一。

无论是人工系统还是生态系统,我们所面临的关键问题是自由度问题^[27,28]。对于技术系统来说该问题可以看作:如果系统由大量组件构成而组件之间又存在着大量交互,那么操作人员如何在有限的资源条件下决定满足系统目标的行为。层次化的可供性模型解决了这一问题,例如,操作人员可以从不同层获得满足系统目标的最合理的自由度,换句话说约束使得操作人员将注意力逐渐集中在最佳的系统组件上。由于系统的复杂性,让操作人员展现出精湛的目标行为往往是困难的,因此,通过将可供性内嵌于约束当中,并使用多个维度的分析形成直接感知的系统设计输入,实现了系统目标与系统内活动的统一。这也是CWA方法约束和生态心理学的内在有机联系。

3 CWA构建的关键技术及建模方法

CWA的建模过程包括5个相对独立又紧密联系维度,表1第1列列出了这5个维度的命名,本列的维度命名是由Vicente提出的,表中第2列还对应列出了Rasmussen提出的另一种命名方式,同时表的第3和第4列列出了各维度对应的系统约束的类型和各维度相应的建模工具。

图2显示了CWA 5个维度之间建模工具的相互关系,其中工作域分析维度中“抽象分解空间、抽象层次”中的与目的相关功能层对应的是控制任务分析维

度中“关联的活动模板”中纵轴的工作功能分类;策略分析维度中的“策略分析图”是对控制任务分析维度中“决策梯”的简化;社会组织和合作分析维度综合了“抽象分解空间”、“决策梯”和“策略分析图”的结果;而工作者能力分析维度中的“SRK详细目录”又可以反映“决策梯”的过程。

3.1 工作域分析维度

工作域分析的对象是约束,这种约束的来源是行为主体工作的领域或环境通过其功能结构对行为主体的施加。工作域分析构建了人机系统如何进行工作的模型,并且使用这些模型启发界面设计。工作域分析首先将人机系统划分为不同的抽象层次,这些层次分别解释了该系统存在的目的、遵循的规则、具备的功能、功能的过程和实现功能的硬件,然后通过回答WHY? WHAT? HOW? 获得系统不同层次间的“手段-目的”连接。

(1) 抽象分解空间和抽象层次

可利用抽象分解空间来对工作域进行抽象和分解。抽象分解空间由分别表示抽象层次的纵向维度和表示分解层次的横向维度组成,对应图3中的列和行。沿着纵向的抽象维度,系统一般被划分为5个不同的层次,采用两种形式命名:第一种是按照文献[4,5]中描述的方式,即:功能目的、价值和优先考虑、与目的的相关功能、与对象相关过程和物理对象。由于该描述被大量引用,被看作“标准形式”;第二种是分析人员根据分析对象的特点,自己构建纵向抽象层次的命名,该方法多用在在工作域分析发展的初期。沿着横向维度,系统依据分析者的需求按照系统分解的方向进行划分(例如,总系统-子系统-组件等)。通常情况下,虽然横向层次分解能够为工作域分析模型提供更加精

表1 CWA构建过程的不同维度命名、约束类型及建模工具总结

维度	Rasmussen对应维度	约束类型	建模工具
工作域分析维度	工作域分析维度	物理的、社会的或文化的环境	抽象分解空间、抽象层次
控制任务分析维度	与工作域和决策制定相关的活动分析维度	工作情景、工作功能或控制任务	关联的活动模板 ^[6] 、决策梯模板 ^[29]
策略分析维度	与心理策略相关的活动分析维度	策略	信息流图 ^[2,30] 、策略分析图 ^[7]
社会组织和合作分析维度	工作组织的分析维度	工作的分配、分布或协调	前3个维度建模工具的总和
工作者能力分析维度	系统使用者的分析维度	工作者能力	技能、规则和知识分类 ^[31] SRK详细目录 ^[8]

图 2 (网络版彩图)CWA各维度相互关系图

细的表达,但是在满足需求的情况下学者们往往采用抽象层次来降低模型的规模复杂性^[32~34].

(2) “手段-目的”关联

在进行了抽象分解建模之后,需要了解模型中各个元素之间的相互关联关系,工作域采用手段-目的的关联来构建这种关系.该关联可以看作“How-What-Why”三元组.如图3所示,假设与目的相关的功能A是正在分析的对象,即是什么(WHAT?),与目的相关的功能A与与对象相关的过程B和C之间的关系表明了手段或者A如何被(HOW?)工程化或实现,与目的相关的功能A与价值和优先考虑D之间的关系说明了目的或者为什么(WHY?)A出现在工作系统中.

通过工作域分析,人机系统的设计边界和所有约束条件可以被确定,这就为实现这些约束条件下的所有功能的设计奠定了基础.

3.2 控制任务分析维度

控制任务分析的目的在于识别在工作域中人机系统需要做什么.控制任务分析可以对人机系统的常发性任务进行建模,该模型结合了行为主体的信息处理和人机系统的任务目标.决策梯模型是最常用的一种控制任务分析工具^[2],如图4所示.其中矩形表示信息处理活动、圆表示信息处理之后获得的知识状态.决策梯的左半部分表示当前的系统状态,决策梯的右半部分表示为达到系统目标状态所需的任务和流程的计划

	总系统	子系统	组件
功能目的			
价值和优先考虑	价值和优先考虑D		
与目的相关的功能	与目的相关功能A		
与对象相关的过程	与对象相关过程B 与对象相关过程C		
物理对象			

图 3 抽象分解空间中手段-目的的连接说明

和执行.操作者信息处理过程的基本路径用加粗箭头表示,该过程常用于启发式或规则下捷径不可行的情况,例如处理不熟悉的任务或新手执行具体操作的情况.而有经验的操作者在执行熟悉的任务时很少按照决策梯提供的线性序列进行,他们会采用捷径以跳过大部分决策过程.Lamoureux和Chalmers^[32]总结了4种捷径:即分流(信息处理活动与知识状态连接,图4中“观察”与“任务”直接相连)、跳跃(两个知识状态的连接,图4中如“最终目标”与“任务”直接相连)、活动到活动(图4中“激活”与“执行”的直接相连,表示预设反

图 4 决策梯模型

应的释放,例如听到告警的瞬间执行动作)和知识状态到活动(如根据系统状态直接执行)。利用决策梯模型可以分析人机系统中专家和新手针对脑力任务的不同处理特征,用于人机系统中的任务设计分析和辅助设计分析。

随后,基于Rasmussen^[5]提出的工作活动可被理解为工作情景和工作功能的组合的原理,Naikar等人^[6]在2006年提出了关联的活动模板,改进了控制任务分析的建模工具。如图5所示,横轴表示人机系统的工作情景,纵轴表示人机系统所有的工作功能。圆代表当前的工作功能,其外面的方框表示当前工作功能所有可能发生的工作情景,方框中的横条表示当前工作功能典型发生的工作情景。通过关联的活动模板,可以进一步地详细描述系统中每一个工作情景和功能的关联。该模型不仅可以分析实际工作系统的功能与情景的关系,还可以用于分析人的行为约束下系统提供的功能设计,这种方法在澳大利亚道路交通十字路口设计中

得到应用和验证^[35]。

3.3 策略分析维度

策略分析维度用于研究在人机系统约束的条件下,有哪些潜在策略可用于执行工作活动。行为主体在面对一个具体的情景时采用的策略可能会不同,不同的行为主体可能执行不同的任务,同一个行为主体在执行同一任务时也会有变化。策略分析常用的工具是信息流图^[2],该工具往往依靠经验数据进行绘制,并且其与工作域分析维度和控制任务分析维度的连接不够紧密。因此Cornelissen等人^[7]对信息流图进行了改进,提出了一种新的策略分析图方法,采用了结构化和构成性的方式来识别策略。该方法使用操作性动作层来描述物理对象的使用,如图6中的Level 0,将这些物理对象看作策略定义的单元,并采用if-then对策略进行陈述,并将这些if-then陈述看作影响策略的标准层,如图6中的Level 4。在使用操作性动作层和标准层的基础

图 5 关联的活动模板

图 6 策略分析图构建流程

上, 结合工作域分析、控制任务分析获得的抽象层次, 构建新的策略分析图。策略分析图不同层次的内容和含义如表2所示。

可以看出策略分析图在形式上是抽象层次的扩充, 但是策略分析图的目的是在系统的约束下产生可行的策略。通过动词连接了所有相关的物理对象, 明确物理对象如何被潜在地操控以完成相应的功能, 同时在控制任务分析阶段的决策梯分析能够帮助从策略分析图中识别潜在的策略。图7说明了策略分析图构建的流程, 图6说明了策略分析图和抽象层次之间的关系以及如何获得潜在的策略。该工具紧密的连接了前两个维度的建模结果, 并且在实际的系统中得到应用和验证^[36,37]。

3.4 社会组织和合作分析维度

社会组织和合作分析用于系统资源(包括人和计算机)之间的任务划分, 该维度关注团队如何交流与合作。在该阶段, 由于团队之间的合作与交流在CWA的前3个阶段已有充分体现, 所以通常使用前面3个阶段的工具进行综合分析。社会组织和合作的分析并不关注不同情境下的组织结构的性质, 而是关注工作分配、分布。该阶段的建模并没有统一的方法和标准, 多数学者采用不同的颜色标记来区别具体情境中的行为主体参与程度^[38,39]。以两个行为主体为例, 图8是分别采用工作域分析和决策梯得到的分析结果。

3.5 工作者能力分析维度

工作者能力分析维度用于分析系统工作需求下的人员能力需求。工作者能力分析可以帮助我们确定CWA前4个阶段获得的需求是否超过作业者的能力极限, 并与作业者的能力相匹配^[2]。Kilgore和St-Cyr^[8]认为该维度用于确定作业团队成员有效完成工作域内控制任务的能力需求, 识别可用于人机系统设计的心理约束。基于Rasmussen^[40]的工作者能力分类框架SRK (skill rule knowledge)分类: 基于技能的行为(skill-based behavior)、基于规则的行为(rule-based behavior)以及基于知识的行为(knowledge-based behavior), 如图9所示, Kilgore和St-Cyr^[8]使用SRK详细目录来确定3种能力分类下的设计需求。

SRK详细目录由一系列描述分析作业者行为的表格组成, 这些行为被作业者用来完成信息处理活动。每一栏独立的SRK详细目录表格对应于工作域中的每一个控制任务, 每一行描述具体控制任务的一个信息处理步骤以及合成的认知状态, 3个独立的列描述作业

表 2 策略分析图的内容和含义

水平	约束	解释
5	活动的目的	明确活动的目的
4	标准	确定决策有效的选择并且哪些因素影响策略选择的可能性
3	与功能相关的目的	实现活动所需功能
2	过程相关的对象	物理对象提供的过程
1	物理对象	系统的物理对象
0	操作性动词	操纵物理对象可能的方式

图 7 策略分析图和抽象层次之间的关系

者如何使用基于技能，规则或知识的行为执行这些信息处理步骤。图10是一个使用SRK详细目录分析得到

的针对空中交通管制中“路径控制任务”设计需求的例子。

工作者能力分析			SRK 2.7		
SRK 详细目录					
路径重选任务 (控制任务2.7)					
相关文档					
抽象层次: AH0, AH0.2, AH2.1					
决策梯: DL2.7.1, DL2.7.2, DL2.7.3, DLSUM2.7.1, DLSUM2.7.2, DLSUM2.7.3					
信息流图: IF2.7.1, IF2.7.1.1, IF2.7.2.1, IF2.7.3, IF2.7.3.1					
	信息处理步骤	合成的认知状态	基于技能的行为	基于规则的行为	基于知识的行为
1.在管辖的空域内扫描到飞机	2.是否有多架飞机在管辖的空域	监控管辖空域内飞机基于时间的空间表征	感知有多架飞机处于负责的空域内的准确指示	基于建议的飞行路径推断是否有多架飞机在相近时间出现在管辖的空域内
3.确定每架飞机接下来的飞行航线	4.在管辖的空域是否有多架飞机有交叉的路径	感知相关飞机的航向, 交叉, 分离或平行	使用试探法决定飞行路径是否有交叉 (例如, 飞行路径A→B和C→D是交叉路径; 而路径A→C和B→D是不干扰的)	基于对每架飞机飞行路径的空间认知推理判断飞机是否汇聚
5.预测在交叉路径上飞机的未来, 基于时间的位置状态	6.判断路径有交叉的飞机是否会在相同的时间到达交叉点	基于航向和速度的空间表征, 感知在汇聚点飞机可能的碰撞时间	使用试探法决定飞机是否在相同时间到达汇聚点 (例如, 考虑距离A距离B和速度A速度B, 飞机可能同时到达)	使用飞行速度, 航向和每架飞机的位置计算每架飞机到达汇聚点的时间
7.判断即将发生的汇聚的危机程度	8.判断飞机离交叉点的距离是否会构成碰撞	感知每架飞机的安全航行区域是否在它们最接近的点有重叠或迫近	使用试探法决定大于或小于最小的分离轨迹	计算飞机之间未来未来最接近时刻的距离并与分离所需的最小安全值进行比较。
9.选择需要修正飞机路径的方法处理未来的问题	10.哪架飞机的飞行路径必须调整来消除潜在的碰撞可能。	直接感知一架或多架飞机必须更改方向	应用原则: (例如, 如果碰撞可能发生, 必须改变一架或多架飞机路径)	从建议路径, 当前位置和执行路径重选飞机的期望行为进行推理分析。
11.选择具体的策略来完成飞机的路径重选任务。	12.期望的飞机路径重选策略。	通过飞机飞行路径界面的直接操作自动地反应感知到碰撞	在一系列一般化场景中分离失败进行分类并且选择合适的模式化控制规则	基于包括紧迫性, 飞行优先级, 乘客便利, 有效性等的权重标准, 形成新的优化的飞行路径
13.向飞机传达航线调整执行命令	14.飞机对新航线的意识	同时直接通过输入路径重选信息控制界面与通信设备交互	使用模式化的控制规则来选择方法/程序提供建议的飞行路径: (例如, 如果涉及一架飞机联系那一架; 如果有两架, 两架都联系)	分析使用飞机系统, 优先权紧迫性等知识, 与每架飞机联络的最佳方式和顺序来传达建议的飞行路径

图 10 SRK详细目录举例

工类的研究. 研究问题确定为: (1) CWA在各领域应用现状、使用的维度和主要的研究团体? (2) CWA在复杂人机系统设计应用中的优势如何体现? (3) CWA在发展和应用的趋势有哪些?

2) 确定相关研究: 由于CWA正处于一个快速发展的阶段, 因此难以限定成果的研究深度, 为了对CWA应用有较为广泛的认知, 在数据收集时同时考虑经同行评议和非经同行评议的文献。

3) 文献筛选: 数据选择截止到2016年8月的互联网数据库英文文献, 使用包括Science Direct, Web of

Science, Engineering Village, Google Scholar在内的一般数据库、工程类数据库以及医疗相关的Pubmed和Embase数据库. 检索的关键词包括: “cognitive work analysis”, “work domain analysis”和“ecological interface design”. 除去重复文献和不相关的研究, 将与复杂人机系统相关的文献以及文献中的引文补充也纳入了其中。

4) 绘制图表: 统计表格包括文章题目、文献类型和来源、研究领域、使用的CWA维度、主要研究结果和评价, 该阶段按照所定义的复杂人机系统的6个领

图 11 文献搜索结果

域分别构建表格。

5) 整理、总结和报告结果: 该阶段在对CWA文献进行统计分析的基础上, 回答第一阶段所提出的3个研究问题。

4.2 文献分析讨论

用文献[42]中提供的筛选指导, 将数据库检索获得的2152篇文献进行筛选, 最终获得223篇研究对象, 在本次研究范围内包括期刊论文107篇, 会议论文104篇, 研究报告4篇、博士论文4篇、书目章节4篇, 如图11所示。

4.2.1 CWA在各领域应用现状、使用的维度和主要的研究团体

(1) CWA在复杂人机系统的应用现状

对CWA在不同系统研究领域的223篇文献频次进行统计分析, 其中有3篇同时包含两个领域^[52-54], 因此总的统计篇数为226篇。其中各领域文献篇数按照由多到少的顺序分别为军事领域53篇、航空领域44篇、交通运输领域43篇、医疗领域38篇、能源领域33篇以及石化领域15篇, 如图12所示。该数据表明尽管CWA起

图 12 (网络版彩图)CWA不同行业应用的文献频次

源于核电研究, 但是已经在军事、航空、交通运输和医疗领域有了更加广泛的应用, 体现了其较强的行业适应性以及在多个复杂系统领域不断发展的趋势。

按照不同的研究侧重将CWA的应用划分主6个不同的方面, 其中“系统设计”指的是针对复杂人机系统及其交互界面的设计, 该类文献着重研究具体的系统或生态界面如何实现; “复杂问题分析”指的是系统复杂性所带来的影响分析, 该类文献着重研究主体行为和绩效变化以及问题的解决途径; “设计需求分析”指的是为了达到某一目的所需进行的分析研究, 该类文

献着重研究系统或界面设计之初的决策支持、系统配置或显示设计需求等;“系统评价”指的是使用CWA作为一种评价手段来判断既有人机系统的好坏;“能力分析”指的是使用CWA研究行为主体所应该具备的能力的文献;“事故分析”指的是复杂系统事故致因模型构建的文献. 如图13所示,“系统设计”方面应用最为广泛, 占到所有文献的43.36%, 这体现了CWA在系统和生态界面设计方面的优势;而复杂问题分析方面的文献占到了33.63%, 排在第二位, 该数据说明随着CWA自身理论方法体系的不断发展, 它在“复杂问题分析”方面应用不断增加. 例如使用CWA分析铁路平交道口的行人行为和风险^[35]、潜艇下潜时机分析^[39]、手术团队合作^[55]、人因风险分析^[56]等复杂人机问题. 该趋势的出现可以从文献发表的时间分布进行解释, 如图14所示,“复杂问题分析”的发文量从2005年开始, 相较于2005年之前数量上增长了2.4倍, 这与2005年之后的多篇基础理论文章的发表有直接关系^[6,30,29,52,55], 这些文章构成了目前CWA研究较为稳定的理论基础.

(2) CWA 5个维度的使用

由于CWA是一个灵活的框架, 所以其关键技术5个不同维度使用也是相对灵活的, 可以根据具体的研究需求对维度进行选择和组合. 文章对5个维度的使用以及维度所对应的研究侧重应用进行了统计分析, 如图15所示, 单独使用“工作域分析维度”是最常使用的分析方法, 占到文献检索总数的41.6%, 这是CWA理论的发展历史所决定的, 在CWA发展的早期, 通常以一个维度和两个维度为主要研究手段, 并且这其中复杂问题分析占到26篇, 系统评价占到6篇, 系统设计占到45篇, 设计需求分析占到17篇, 说明了该维度的主要应

图13 (网络版彩图)CWA在不同研究侧重的应用比重

图14 (网络版彩图)“复杂问题分析”文献量的时间分布

用集中在系统设计、复杂问题分析、设计需求以及系统评价4个方面, 而在事故分析和能力分析方面并未使用. 通过图15可以看到不同研究侧重的应用在不同维度组合中的分布. 随着CWA理论的发展, 大于两个维度分析应用的文献逐渐增加占到总数的17.3%, 同时总结其出现年代, 87.5%的文章出现在2005年以后, 如图16所示, 这与上面讨论的2005年之后的多篇基础理论文章的发表是一致的.

(3) 世界范围内CWA主要的研究团体

通过对文献作者进行统计分析, 可以发现目前世界范围内较为活跃的CWA研究团体以及他们的主要研究领域和研究兴趣, 如表3所示.

4.2.2 CWA在复杂人机系统设计中的优势

CWA在复杂人机系统应用中的优势主要体现在两个方面.

首先, 相对于传统界面和系统, 基于生态心理思想的设计更好地支持了作业者的情景意识, 例如基于EID的机载垂直情景显示^[71]、共面机载分离显示^[73]、核电先进主控室叠加生态界面的最小信息显示^[89]、石油生产过程控制先进智能报警系统生态界面显示^[90]等都表明了相对于传统显示方法具有更好的情景意识. 良好的情景意识使得行为主体在具体的作业时获得良好的可供性, 从而能够适应各种不同的场景, 同时由于基于约束的设计思想, 在系统设计的初期考虑所有工作可能性, 因此在某种程度上, 基于生态的设计是一种自适应设计.

其次, 基于CWA理论的复杂问题分析揭示了传统方法难以分析的多因素耦合的影响: 在设计需求分析

图 15 (网络版彩图)CWA使用的不同维度文章频数分布

图 16 (网络版彩图)大于两个阶段使用的文章频数年代分布

方面, CWA以系统已有功能为基础, 兼顾活动工作域、决策和策略, 形成对系统不同精细度的“快照”, 对设计人员提供多层次的解释, 例如明确未来综合交通运输中直升机动态操作过程中不同功能所需信息的显示内容^[91]、多类型行为主体参与的未来铁路平交道口系统设计需求^[36]、对决策过程、工作组织、病情和策略进行提取和合成的老年人心脏病病情决策辅助需求识别^[92]等均体现了这一特点; 在活动分配方面, 自动化引起的行为主体功能动态变化可以通过系统决策过程中的需求进行分配, 有效地解决人与自动化之间的分配问题, 例如直升机任务计划行为主体角色分配^[82]、军事活动中无人机的人-计算机功能分配^[84]、

飞机班组操作控制的活动分配^[93]等。

4.2.3 CWA发展和应用的趋势分析

通过对文献进行总结和归纳, CWA研究呈现出3个主要的趋势。

第一, CWA构建方法进一步完善。CWA是一个非常自由和开放性的框架, 尤其是随着自动化和计算机技术的发展而不断更新。以各维度使用的工具为例, CWA的“控制任务分析”维度在经历了决策梯到关联的活动模板发展之后有了更丰富的应用, 而且出现了两个新的变化: 一方面考虑到优先级的影响, 有学者开始对控制任务中的活动进行权重赋值^[94], 目的是在设计时有量化的优先选择, 但这也引发了争论^[95,96], 因为将活动等级化有可能违背CWA本身应对无法预测事件具备的自适应功能; 另一方面, 由于对团队之间交互分析的需求, 提出了决策梯改进的决策链和决策轮两种新的分析工具^[10,55,97], 可用于分析团队的决策过程。在“策略分析”维度, 综合了工作域模型和简化的信息流图的优点, 提出了更加适用于工程的策略分析图的方法^[7,98,99]。在“社会组织和合作分析”维度, 近年来很多学者尝试使用社会网络模型对该阶段建模方法进行完善, 取得了许多有益的结果^[100-102], 同时随着复杂人机系统团队设计需求的不断增加, 该维度将引起更多的研究兴趣。“工作者能力分析”维度的研究工具一直是CWA框架中较为薄弱的环节, 尽管SRK详细目

表 3 CWA主要的研究团体和单位

序号	代表人物及研究单位	国别	研究领域	代表性研究方向	文献量 (篇)
研究团体1	多伦多大学Kim J. Vicente和Greg A. Jamieson领导的认知系统工程实验室	加拿大	能源、石化领域	EID设计和系统设计, 是CWA研究和EID的先导 ^[57-63]	25
研究团体2	滑铁卢大学系统设计与工程学院的Catherine M. Burns	加拿大	医疗领域	团队认知分析 ^[10,55] 和便携式生理监控设备EID ^[64]	22
研究团体3	荷代夫特理工大学航空工程学院的M. Mulder和M. M. Van Paassen	荷兰	航空飞行器、辅助驾驶设计	机载安全驾驶辅助设备的EID基于能量概念的飞行控制模型 ^[65] 对着陆 ^[66] 、冲突 ^[67] 、路径规划 ^[68] 、地形意识 ^[69,70] 、辅助分离 ^[71-73] 等	24
研究团体4	Penelope M. Sanderson领导的认知工程研究课题组和Nee-lam Naika领导的澳大利亚国防科学技术组的认知工作和安全分析中心	澳大利亚	医疗和军事领域	控制任务分析、培训需求分析和系统评价 ^[54,74,75-79] , 对CWA方法建模工具的改进做出很大贡献 ^[6,80,81]	30
研究团体5	南安普顿大学Neville A. Stan-ton和莫纳什大学Paul M. Sal-mon	英国、澳大利亚	军事、交通运输	军事计划 ^[82,83] 、活动分配 ^[38,84] 、交通行为分析 ^[35,85,86] 、公共设施设计 ^[87,88] 等	42

录的方法^[8]被提出用于该环节的建模, 但是从其本质来讲仍是对于之前维度分析结果的结构化组织, 通过该维度研究在人机系统设计时的人员能力需求是对CWA理论框架的有益补充.

第二, 更加关注团队设计的CWA研究和应用. 尽管CWA适用于复杂工作域的控制任务分析, 然而面向团队任务尤其是团队成员之间、团队与团队之间交流和合作机制的分析是CWA将是今后重要研究方向. 在早期团队设计中, 一般利用工作域模型得到不同层次的约束, 使之与团队中各个角色的控制任务需求进行对应, 直接用于界面设计^[54,95]和组织分析^[103,104]. 然而该过程无法对团队之间的交互进行建模, 因此有学者提出了团队-CWA分析^[10,55,105]的模型, 并使用决策轮和链式决策梯模型对团队成员之间以及团队与团队之间的交互进行解释. 利用团队模型可以更好地解析团队之间的交互类型、团队间的边界、团队内外部交互的过程、团队情景意识的支持、动态环境下的人力资源需求. 另外, 利用社会网络模型研究团队成员之间沟通的强度^[100], 实现团队设计的量化分析也是团队研究的一个重要发展趋势.

第三, CWA与其他方法的融合. 主要有两个趋势: 一方面是CWA与传统任务分析方法的结合. 有文献^[63,106-110]表明CWA与传统任务分析方法各有优势,

在应用时可以互相补充. 例如有学者将CWA与事故树相结合建立了以“工作域评价-活动评价-故障评价-约束评价-事故树”为过程的航空人因事故分析模型^[111]; 也有学者采用目标驱动的任务分析与修正的认知工作分析相结合的方法, 通过分析系统信息流^[112,113]来判断信息如何被各种系统功能和用户产生、消耗和转换. 另一方面是CWA与计算机仿真技术相结合. 有文献利用CWA分析结果与Petri网技术进行结合, 对机场控制过程进行仿真分析^[114-116]; 在样机开发过程中, 有人使用UML与CWA相结合, 构建了规范的软件开发模型^[13]; 也有学者结合系统动力学模型对于指挥控制系统进行仿真分析^[117], 建立了动态的情景意识描述模型. 上述两方面的研究趋势表明, CWA作为人机系统设计的始端为很多方法提供有效的输入, 使得设计有更强的量化手段.

5 总结

在对认知工作分析理论和关键技术详细阐述的基础上, 使用范围综述阐明了认知工作分析在复杂人机系统设计的应用现状, 并通过文献总结对其在复杂人机系统设计领域的研究进行了展望, 获得了3个主要的研究结论: CWA构建方法进一步完善, 基于团队设

计的发展以及与其他设计方法不断融合。经历了近30年的发展, CWA已经在军事、航空、交通运输、医疗、能源、石化等与国民经济发展休戚相关的人机系

统设计领域获得越来越多的关注和应用。其基于约束和生态的设计理念以灵活开放的方法内涵为复杂人机系统的分析、设计和评价提供了新的思路。

参考文献

- 1 Le Bot P. Human reliability data, human error and accident models—Illustration through the Three Mile Island accident analysis. [Reliab Eng Syst Saf](#), 2004, 83: 153–167
- 2 Vicente K J. Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work. Boca Raton: CRC Press, 1999
- 3 Jenkins D P, Stanton N A, Salmon P M, et al. Cognitive Work Analysis: Coping with Complexity. Farnham: Ashgate Publishing, Ltd., 2009
- 4 Rasmussen J. Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering. New York: North-Holland, 1986
- 5 Rasmussen J, Pejtersen A M, Goodstein L P. Cognitive Systems Engineering. New York: John Wiley & Son, Inc, 1994
- 6 Naikar N, Moylan A, Pearce B. Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis: Concepts, guidelines and case study for control task analysis. [Theor Issues Ergonom Sci](#), 2006, 7: 371–394
- 7 Cornelissen M, Salmon P M, McClure R, et al. Using cognitive work analysis and the strategies analysis diagram to understand variability in road user behaviour at intersections. [Ergonomics](#), 2013, 56: 764–780
- 8 Kilgore R, St-Cyr O. The SRK inventory: A tool for structuring and capturing a worker competencies analysis. [Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting](#), 2006, 50: 506–509
- 9 Cummings M L. Designing decision support systems for revolutionary command and control domains. Dissertation for Doctoral Degree. Virginia: University of Virginia, 2004. 206–207
- 10 Ashoori M, Burns C. Team cognitive work analysis. [J Cognit Eng Decis Making](#), 2013, 7: 123–140
- 11 St-Maurice J, Burns C M. Using comparative cognitive work analysis to identify design priorities in complex socio-technical systems. In: Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care. New Delhi: SAGE Publications, 2015. 118–123
- 12 Salmon P, Jenkins D, Stanton N, et al. Hierarchical task analysis vs. cognitive work analysis: Comparison of theory, methodology and contribution to system design. [Theor Issues Ergonom Sci](#), 2010, 11: 504–531
- 13 Dhukaram A V, Baber C. A systematic approach for developing decision aids: From cognitive work analysis to prototype design and development. [Syst Eng](#), 2016, 19: 79–100
- 14 Naikar N. Work Domain Analysis Concepts, Guidelines, and Cases. Boca Raton: CRC Press, 2013
- 15 兰哲, 戴明森. 人机界面信息显示最新研究评述. 北京交通大学学报, 1998, 22: 87–91
- 16 石庆馨, 张侃. 生态学界面设计研究综述. 人类工效学, 2004, 10: 65–68
- 17 酃骏, 朱旭程, 宋贵宝, 等. 生态界面设计与人-机-环境系统生态相容性的评估. 见: 全国人的可靠性和人机环境系统可靠性专题研讨会, 2004
- 18 李玲, 李游, 解洪成, 等. 生态界面在船舶进水监控系统中的应用研究. 人类工效学, 2008, 14: 24–28
- 19 仇岑, 薛澄岐. 飞机驾驶舱显控系统生态界面设计研究. 人类工效学, 2009, 15: 39–43
- 20 卞婷, 薛澄岐, 仇岑, 等. 涡轮喷气发动机状态显示生态界面设计. 机械设计与制造, 2010, 12: 9–11
- 21 赵嫚, 方卫宁, 穆建成. 地铁调度员工作站人机交互界面设计研究. 铁路计算机应用, 2014, 23: 49–54
- 22 Rasmussen J, Vicente K J. Coping with human errors through system design: Implications for ecological interface design. [Int J Man-Mach Stud](#), 1989, 31: 517–534
- 23 Brunswik E. Scope and aspects of the cognitive problem. In: Gruber H, Jessor R, Hammond K R, eds. Contemporary Approaches to Cognition. Cambridge: Harvard University Press, 1957
- 24 Gibson J J. The Ecological Approach to Visual Perception. Boston: Houghton-Mifflin, 1979
- 25 Rasmussen J. Ecological interface design for reliable human-machine systems. [Int J Aviat Psychol](#), 1999, 9: 203–223
- 26 Vicente K J, Rasmussen J. The ecology of human-machine systems II: Mediating ‘direct perception’ in complex work domains. [Ecol Psychol](#), 1990, 2: 207–249

- 27 Turvey M T, Kugler P N. A comment on equating information with symbol strings. *Am J Physiol-Reg I*, 1984, 246: R925–R927
- 28 Gibson J J. The Theory of Affordances. In: Shaw R, Bransford J, eds. *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1977
- 29 Jenkins D P, Stanton N A, Salmon P M, et al. Using the decision-ladder to add a formative element to naturalistic decision-making research. *Int J Human-Comput Interact*, 2010, 26: 132–146
- 30 Ahlstrom U. Work domain analysis for air traffic controller weather displays. *J Saf Res*, 2005, 36: 159–169
- 31 Rasmussen J. The human data processor as a system component. Bits and pieces of a model. Technical Report. 1974, Risø-M-1722
- 32 Lamoureux T M, Chalmers B A. Control task analysis: Methodologies for eliciting and applying decision ladder models for command and control. In: Bisantz A M, Burns C M, eds. *Applications of Cognitive Work Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- 33 Naikar N, Hopcroft R, Moylan A. Work domain analysis: Theoretical concepts and methodology. Technical Report. Defence Science and Technology Organization Victoria (Australia) Air Operations DIV, 2005
- 34 Naikar N. An examination of the key concepts of the five phases of cognitive work analysis with examples from a familiar system. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2006, 50: 447–451
- 35 Cornelissen M, Salmon P M, Young K L. Same but different? Understanding road user behaviour at intersections using cognitive work analysis. *Theor Issues Ergonom Sci*, 2013, 14: 592–615
- 36 Salmon P M, Lenné M G, Read G J M, et al. More than meets the eye: Using cognitive work analysis to identify design requirements for future rail level crossing systems. *Appl Ergonom*, 2016, 53: 312–322
- 37 Read G J M, Salmon P M, Lenné M G, et al. Walking the line: Understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis. *Appl Ergonom*, 2015, 53: 209–227
- 38 Jenkins D P, Stanton N A, Salmon P M, et al. Using cognitive work analysis to explore activity allocation within military domains. *Ergonomics*, 2008, 51: 798–815
- 39 Stanton N A, Bessell K. How a submarine returns to periscope depth: Analysing complex socio-technical systems using Cognitive Work Analysis. *Appl Ergonom*, 2014, 45: 110–125
- 40 Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1983, SMC-13: 257–266
- 41 邱璇. 系统综述——一种更科学和客观的综述方法. *图书情报知识*, 2010, 1: 15–19
- 42 Peters M D J, Godfrey C M, Khalil H, et al. Guidance for conducting systematic scoping reviews. *Int J Evidence-Based Healthcare*, 2015, 13: 141–146
- 43 Tricco A C, Lillie E, Zarin W, et al. A scoping review on the conduct and reporting of scoping reviews. *BMC Med Res Methodol*, 2016, 16: 15
- 44 Samaan Z, Mbuagbaw L, Kosa D, et al. A systematic scoping review of adherence to reporting guidelines in health care literature. *J Multidiscipl Heal*, 2013, 6: 169
- 45 O’Flaherty J, Phillips C. The use of flipped classrooms in higher education: A scoping review. *Int Higher Educ*, 2015, 25: 85–95
- 46 F C Marta, A M R Correia, F T Neves. Supporting KMS through Cloud Computing: A scoping review. In: *Proceedings of the Information Systems and Technologies*, 2011
- 47 Anderson S, Allen P, Peckham S, et al. Asking the right questions: Scoping studies in the commissioning of research on the organisation and delivery of health services. *Health Res Policy Syst*, 2008, 6: 7
- 48 Crilly T, Jashapara A, Ferlie E. Research utilisation and knowledge mobilisation: A scoping review of the literature. Technical Report. National Institute for Health Research Service Delivery and Organisation Programm, 2010
- 49 de Chavez A C, Backett-Milburn K, Parry O, et al. Understanding and researching wellbeing: Its usage in different disciplines and potential for health research and health promotion. *Health Educ J*, 2005, 64: 70–87
- 50 Decaria J E, Sharp C, Petrella R J. Scoping review report: Obesity in older adults. *Int J Obes*, 2012, 36: 1141–1150
- 51 Arksey H, O’Malley L. Scoping studies: Towards a methodological framework. *Int J Soc Res Methodol*, 2005, 8: 19–32
- 52 Millen L, Edwards T, Golightly D, et al. Systems change in transport control: Applications of cognitive work analysis. *Int J Aviat Psychol*, 2011, 21: 62–84
- 53 Hajdukiewicz J R, Burns C M, Vicente K J, et al. Work domain analysis for intentional systems. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 1999, 43: 333–337

- 54 Watson M, Sanderson P, Anderson J. Designing auditory displays for team environments. In: *Proceedings of the 5th Australian Aviation Psychology Symposium (AAvPA)*. Sydney: Australian Aviation Psychology Association, 2000
- 55 Ashoori M, Burns C M, d'Entremont B, et al. Using team cognitive work analysis to reveal healthcare team interactions in a birthing unit. *Ergonomics*, 2014, 57: 973–986
- 56 Hassall M E, Sanderson P M, Cameron I T. Using cognitive work analysis techniques to identify human factor hazards. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2010, 54: 269–273
- 57 Jamieson G A, Ho W H. A prototype ecological interface for a simulated petrochemical process. Cognitive Engineering Laboratory, Technical Report, 2001, CEL 01–02
- 58 Bisantz A M, Vicente K J. Making the abstraction hierarchy concrete. *Int J Human-Comput Studies*, 1994, 40: 83–117
- 59 Vicente K J, Christoffersen K, Pereklita A. Supporting operator problem solving through ecological interface design. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1995, 25: 529–545
- 60 Lau N, Jamieson G A, Skraaning Jr. G, et al. Ecological interface design in the nuclear domain: An empirical evaluation of ecological displays for the secondary subsystems of a boiling water reactor plant simulator. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2008, 55: 3597–3610
- 61 Jamieson G A. Empirical evaluation of an industrial application of ecological interface design. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2002, 46: 536–540
- 62 Jamieson G A. Bridging the gap between cognitive work analysis and ecological interface design. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2003, 47: 273–277
- 63 Jamieson G A, Miller C A, Ho W H, et al. Integrating task-and work domain-based work analyses in ecological interface design: A process control case study. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2007, 37: 887–905
- 64 Davies T C, Burns C M, Pinder S D. Using ecological interface design to develop an auditory interface for visually impaired travellers. In: *Australia Conference on Computer-Human Interaction: Design: Activities, Artefacts and Environments*. Sydney, 2006. 309–312
- 65 Amelink M H J, Mulder M, van Paassen M M R, et al. Theoretical foundations for a total energy-based perspective flight-path display. *Int J Aviat Psychol*, 2005, 15: 205–231
- 66 Flach J M, Jacques P F, Patrick D L, et al. A search for meaning: A case study of the approach-to-landing. In: Hollnagel E, ed. *Handbook of Cognitive Task Design*. Boca Raton: CRC Press, 2003
- 67 van Dam S B J, Abeloos A L M, Mulder M, et al. Functional presentation of travel opportunities in flexible use airspace: An EID of an airborne conflict support tool. In: *Proceedings of the Systems, Man and Cybernetics*. 2004
- 68 Amelink M H J, Paassen M M, Mulder M, et al. Total energy-based perspective flight path display for aircraft guidance along complex approach trajectories. In: *Proceedings of the International Symposium on Aviation Psychology*. Dayton, 2003
- 69 Borst C, Suijkerbuijk H C H, Mulder M, et al. Ecological interface design for terrain awareness. *Int J Aviat Psychol*, 2006, 16: 375–400
- 70 Borst C, Sjer F A, Mulder M, et al. Ecological approach to support pilot terrain awareness after total engine failure. *J Aircraft*, 2008, 45: 159–171
- 71 van Dam S B J, Steens C L A, Mulder M, et al. Evaluation of two pilot self-separation displays using conflict situation measurements. In: *Proceedings of the Systems, Man and Cybernetics*. Singapore, 2008
- 72 van Dam S B J, Mulder M, van Paassen M M. Ecological interface design of a tactical airborne separation assistance tool. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2008, 38: 1221–1233
- 73 Ellerbroek J, Brantegem K C R, van Paassen M M, et al. Experimental evaluation of a coplanar airborne separation display. *IEEE Trans Human-Mach Syst*, 2013, 43: 290–301
- 74 Naikar N, Sanderson P M, Lintern G. Work domain analysis for identification of training needs and training-system design. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 1999, 43: 1128–1132
- 75 Benda P J, Sanderson P M. Representation of changes to anesthesia work domain and activity structures. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 1999, 43: 563–567
- 76 Sanderson P M, Watson M O. From information content to auditory display with ecological interface design: Prospects and challenges. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2005, 49: 259–263
- 77 Watson M O, Sanderson P M. Designing for attention with sound: Challenges and extensions to ecological interface design. *Hum Factors*, 2007, 49: 331–346

- 78 Naikar N, Sanderson P M. Evaluating design proposals for complex systems with work domain analysis. *Hum Factors*, 2001, 43: 529–542
- 79 Naikar N, Pearce B, Drumm D, et al. Designing teams for first-of-a-kind, complex systems using the initial phases of cognitive work analysis: Case study. *Hum Factors*, 2003, 45: 202–217
- 80 Naikar N. Cognitive work analysis: An influential legacy extending beyond human factors and engineering. *Appl Ergonom*, 2017, 59: 528–540
- 81 Naikar N. Beyond interface design: Further applications of cognitive work analysis. *Int J Indust Ergonom*, 2006, 36: 423–438
- 82 Stanton N A, McIlroy R C. Designing mission communication planning: The role of Rich Pictures and Cognitive Work Analysis. *Theor Issues Ergonom Sci*, 2012, 13: 146–168
- 83 Jenkins D P, Stanton N A, Walker G H, et al. Applying cognitive work analysis to the design of rapidly reconfigurable interfaces in complex networks. *Theor Issues Ergonom Sci*, 2008, 9: 273–295
- 84 Jenkins D P. Using cognitive work analysis to describe the role of UAVs in military operations. *Theor Issues Ergonom Sci*, 2012, 13: 335–357
- 85 Cornelissen M, Salmon P M, McClure R, et al. What are they doing: testing a structured cognitive work analysis-based approach for identifying different road user strategies. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2012, 56: 363–367
- 86 Mulvihill C M, Salmon P M, Beanland V, et al. Using the decision ladder to understand road user decision making at actively controlled rail level crossings. *Appl Ergonom*, 2016, 56: 1–10
- 87 Cornelissen M, Salmon P M, Stanton N A, et al. Assessing the ‘system’ in safe systems-based road designs: Using cognitive work analysis to evaluate intersection designs. *Accident Anal Prevention*, 2015, 74: 324–338
- 88 Read G J M, Salmon P M, Lenné M G, et al. Applying the prompt questions from the Cognitive Work Analysis Design Toolkit: A demonstration in rail level crossing design. *Theor Issues Ergonomics Sci*, 2016, 17: 354–375
- 89 Kim S K, Suh S M, Jang G S, et al. Empirical research on an ecological interface design for improving situation awareness of operators in an advanced control room. *Nucl Eng Des*, 2012, 253: 226–237
- 90 Satuf E N, Kaszkurewicz E, Schirru R, et al. Situation awareness measurement of an ecological interface designed to operator support during alarm floods. *Int J Indust Ergonom*, 2016, 53: 179–192
- 91 Stanton N A, Plant K L, Roberts A P, et al. Extending helicopter operations to meet future integrated transportation needs. *Appl Ergonom*, 2015, 53: 364–373
- 92 Dhukaram A V, Baber C. Modelling elderly cardiac patients decision making using Cognitive Work Analysis: Identifying requirements for patient decision aids. *Int J Med Inf*, 2015, 84: 430–443
- 93 Stanton N A, Harris D, Starr A. The future flight deck: Modelling dual, single and distributed crewing options. *Appl Ergonom*, 2016, 53: 331–342
- 94 Bodin I, Krupenia S S. Activity prioritization to focus the control task analysis. *J Cognit Eng Decision Making*, 2016, 10: 91–104
- 95 Bodin I, Krupenia S. Rebuttal to Burns and Naikar. *J Cognit Eng Decision Making*, 2016, 10: 109–110
- 96 Burns C M, Naikar N. Prioritization. *J Cognit Eng Decision Making*, 2016, 10: 105–108
- 97 Ashoori M, Burns C. Reinventing the wheel: Control task analysis for collaboration. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2010, 54: 274–278
- 98 Cornelissen M, McClure R, Salmon P M, et al. Validating the Strategies Analysis Diagram: Assessing the reliability and validity of a formative method. *Appl Ergonom*, 2014, 45: 1484–1494
- 99 Cornelissen M, Salmon P M, Jenkins D P, et al. How can they do it? A structured approach to the strategies analysis phase of Cognitive Work Analysis. *Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting*, 2011, 55: 340–344
- 100 Houghton R J, Baber C, Stanton N A, et al. Combining network analysis with Cognitive Work Analysis: insights into social organisational and cooperation analysis. *Ergonomics*, 2015, 58: 434–449
- 101 Baber C, Stanton N A, Atkinson J, et al. Using social network analysis and agent-based modelling to explore information flow using common operational pictures for maritime search and rescue operations. *Ergonomics*, 2013, 56: 889–905
- 102 Euerby A, Burns C M. Designing for social engagement in online social networks using communities-of-practice theory and cognitive work analysis. *J Cognit Eng Decision Making*, 2012, 6: 194–213
- 103 Jamieson G A, Vicente K J. Ecological interface design for petrochemical applications: supporting operator adaptation, continuous learning, and distributed, collaborative work. *Comput Chem Eng*, 2001, 25: 1055–1074
- 104 Stanton N A, Salmon P M, Walker G H, et al. The role of the abstraction hierarchy in team performance. *Proc Human Factors Ergonom Soc*

- [Annu Meeting](#), 2004, 48: 2421–2425
- 105 Ashoori M, Burns C, Momtahan K, et al. Control task analysis in action: Collaboration in the operating room. [Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting](#), 2011, 55: 272–276
- 106 Vicente K J. Task analysis, cognitive task analysis, cognitive work analysis: What's the difference? [Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting](#), 1995, 39: 534–537
- 107 Vicente K J. Wanted: Psychologically relevant, device-and event-independent work analysis techniques. [Interact Comput](#), 1999, 11: 237–254
- 108 Miller C A, Vicente K J. Comparison of display requirements generated via hierarchical task and abstraction-decomposition space analysis techniques. [Int J Cognit Ergonom](#), 2001, 5: 335–355
- 109 Hajdukiewicz J R, Vicente K J. A theoretical note on the relationship between work domain analysis and task analysis. [Theor Issues Ergonom Sci](#), 2004, 5: 527–538
- 110 van Westrenen F. Cognitive work analysis and the design of user interfaces. [Cogn Tech Work](#), 2011, 13: 31–42
- 111 Coury B G, Schulze D. Using fault trees and cognitive work analysis to assess human actions in aviation accidents. [Proc Human Factors Ergonom Soc Annu Meeting](#), 2004, 48: 1978–1982
- 112 Humphrey C M, Adams J A. Cognitive information flow analysis. [Cogn Tech Work](#), 2013, 15: 133–152
- 113 Humphrey C M, Adams J A. Analysis of complex team-based systems: Augmentations to goal-directed task analysis and cognitive work analysis. [Theor Issues Ergonom Sci](#), 2011, 12: 149–175
- 114 Werther B. Colored petri net based modeling of airport control processes. In: Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2006 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce. Sydney, 2006
- 115 Werther B, Moehlenbrink C, Rudolph M. Colored Petri Net Based Formal Airport Control Model for Simulation and Analysis of Airport Control Processes. In: Duffy V G, ed. Digital Human Modeling. ICDHM 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4561. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007
- 116 Schmidt M, Rudolph M, Werther B, et al. Remote airport tower operation with augmented vision video panorama HMI. In: Proceedings of the 2nd Int Conf on Research in Air Traffic Management (ICRAT 2006). Belgrade, 2006
- 117 Oosthuizen R, Pretorius L. System dynamics modelling of situation awareness. In: Proceedings of the Military Communications and Information Systems Conference. Canberra, 2015

Cognitive work analysis in design of complex man-machine system: A review of theory, technology and research development

NIU Ke, FANG WeiNing, GUO BeiYuan & LI Xiang

State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Cognitive work analysis (CWA) is one of most important means in the design of man-machine system, which has already been widely used in the area of aviation, military, transportation, energy and medical. This method contributes to the safety of complex man-machine system, extensibility of system functions, adaptation of human interaction as well as economy of life circle cost. Firstly, the two notions of constraint and ecology in CWA along with the relationship between them were expounded through an extensive literature summary. Then, the key technologies to CWA were analyzed in detail as well as the principle and application method of modeling tools in each CWA's dimension. Finally, for the development of complex man-machine system design, 223 collected articles were studied through the method of scoping review. And the research status, application advantages and trends of CWA in the aforementioned six areas were eventually obtained.

complex man-machine system, system design, cognitive work analysis, scoping review

doi: [10.1360/N092017-00087](https://doi.org/10.1360/N092017-00087)