

复杂系统人机交互中的多任务调度策略综述

方卫宁, 王健新, 陈悦源

(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: **目的** 随着自动化技术的不断发展, 系统的复杂性导致多任务成为人机系统交互中常见的场景, 多任务呈现出信息模态的复杂化、任务类型多样化、任务中断普遍化等特点, 其中多任务的调度策略对系统的运营安全和绩效起着十分重要作用。通过梳理和总结复杂系统人机交互中的多任务调度策略, 旨在解决复杂人机系统在设计、建造、维护过程中的问题。**方法** 通过对国内外相关文献的回顾, 以认知心理学的双任务转换生理机制实验研究为起点, 从任务调度策略研究逐步分析延展到中断管理和多任务调度决策的发展过程, 着重围绕人机交互过程中的多任务调度行为和任务突显性、优先级、参与感、难度、执行时间等不同属性对任务调度决策的影响, 进行了详细梳理和总结。**结论** 在研究综述和相关文献的基础上指出了既有任务调度策略研究中存在的局限性, 并从系统交互设计的角度对将来的人机交互多任务管理研究提出了建议。

关键词: 人机交互; 复杂环境; 任务切换; 多任务管理; 多属性决策

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)18-0073-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.18.009

Multi-Task Scheduling Strategy in Human-Computer Interaction of Complex Systems

FANG Wei-ning, WANG Jian-xin, CHEN Yue-yuan

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: With the continuous development of automation technology, the complexity of the system has caused multitasking to become a common scenario in human-computer system interaction. Multitasking presents the characteristics of the complexity of information modalities, the diversification of task types, and the generalization of task interruptions. The multi-task scheduling strategy plays a significant role in the operational safety and performance of the system. By analyzing and summarizing the multi-task scheduling strategy in human-computer interaction of complex systems, this paper aims to solve the problems in the process of design, construction and maintenance of complex human-computer systems. Through the review of relevant literature both of China and abroad, and starting from experimental research on the physiological mechanism of dual-task switching in cognitive psychology, the research on task scheduling strategy is gradually extended to interruption management and multi-task scheduling decision-making. It focuses on the multi-task scheduling behavior in the human-computer interaction process and the impact of different attributes such as task saliency, priority, interest, difficulty, and execution time on task. Based on research review and related literature, the limitations of existing task scheduling strategy research are discussed. Furthermore, suggestions are made for future research on human-computer interaction multi-task management from the perspective of system interaction design.

KEY WORDS: human-computer interaction; complex environment; task switching; multi-task management; multi-attribute decision-making

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 北京市自然科学基金 (L191018)

作者简介: 方卫宁 (1968—), 男, 浙江人, 博士, 北京交通大学教授, 主要研究方向为人因工程、轨道交通安全模拟与仿真。

随着半导体技术的快速发展,计算机问世之后半个世纪自动化系统已经被广泛应用于人类生产生活的各个领域,其在执行高运算量^[1]、多通道监控^[2]、信息筛选^[3]等方面具有显著的优势,能有效地提高各系统的经济性、安全性和运行效率。Parasuraman R 从人和自动化的相互关系出发,将自动化定义为过去一段时间内因技术的发展,人类操作者执行的工作交予机器单元执行的过程^[4]。随着自动化系统的迭代,人在系统中的作用、行为也随着技术发展在不断变化,从重体力作业的操作者转变至以监视系统状态为主、应急多任务处置为辅的监控者。

在角色职责的转变过程中,很容易出现人机失配问题。如对异常现象的检测率远低于低自动化水平的系统^[5],是由于作业者对自动化系统的过度信任引发操作者自满,不再对系统、环境进行监控。另外自动化系统在消弭操作者人为失误的同时也增加了由机械系统故障导致风险的可能性,随着自动化程度的提高,作业者逐渐缺少对系统行为的理解,故障纠偏的难度也随之上升^[6],如1979年三里岛核电站事故即是由机械故障和一系列在故障处置中的操作失误导致的^[7]。作业人员没有充分的情景意识,导致系统处于人不在环状态^[8],这时如果自动化系统缺少对人员作业行为的有效反馈,操作者对自动化系统的行为与预期将变得非常不可控^[9],例如2018年和2019年连续发生的由于机动特性增强系统频繁介入,飞行员和自动驾驶系统争夺飞机控制权而导致的系列空难^[10]。

这些并发多任务的人机交互问题,通常出现在信息模态的复杂化^[11]、任务类型多样化^[12]、任务中断普遍化^[13]的监控任务场景中。在此交互过程中,作业者往往面临着众多任务的选择执行决策问题,他们在什么时刻、依靠什么线索、如何做出保持当前任务的继续执行或切换至其他任务的决策,这对系统的运营安全和绩效起着十分重要作用。

1 多任务管理策略研究的溯源

1.1 复杂系统中人机交互任务调度策略

核电、化工、航空、铁路、国防和医疗卫生等系统是一个“复杂社会技术系统”^[14],这种系统往往具有技术密集、安全时效性要求高的特点。复杂社会技术系统是以人为系统主体,兼具由人制造出来具有一定智能行为的各种机器作为配套子系统的大型系统。钱学森等人将其系统的复杂性概括为子系统间通信方式、子系统类型、子系统知识表达与整体结构的易变性^[15]。其中的系统复杂性尚没有一个完全统一的定义或度量方法,Mitchell M 指出区分系统复杂性的不同方式包括系统的元素数量、整体熵、算法信息量、逻辑或热力学深度、统计复杂性、分形维数和层次结构等^[16]。Simon H A 将复杂系统定义为由大量以非简单方式相互作用的部分组成,在这样的系统中整体大

于部分的简单加和^[17]。人作为系统中最复杂的一个环节,其应对并发多任务时的任务选择执行策略会受到人、机、环各子系统的综合影响。

策略一词的含义在不同的人机交互研究领域略有区别。Siegler R S 将策略定义为非强制性的目标导向程序^[18];Hassall M E 等人对策略的定义则更为宽泛,将策略描述为完成任务的方法^[19];Loft S 等人则将策略概括为付出时间与精力以完成某一目标的过程^[20]。总体而言,可将既有研究对任务策略的外延概括为一种付出一定时间、体力、脑力资源的作业者主观目标导向行为,其外在表现可能为一系列的简单动作、复杂操作程序或是不采取任何动作的“无作为”选择。

多任务协调研究的内容主要包括任务完成策略、中断管理策略和任务调度策略。任务完成策略主要探究确定执行某一具体任务后,在多个备选路径中权衡时效、准确率、风险等不同因素带来的影响;中断策略着重研究主任务被意外打断之后,对完成时间、准确率、作业行为的影响;任务调度策略研究则更着重于对多任务间任务选择、转换过程的探究,是选择任务的决策过程,作为任务完成策略的先导和前提,其可视为主动计划和实施的中断策略,是多任务管理的关键。

1.2 基于认知心理学的任务调度研究

对多任务认知过程的基础理论研究早于在工业领域中的探索。传统的认知心理学学者将其统称为任务转换研究,多采用任务线索范式(Task-Cuing Paradigm)^[21]来探究被试在2个或多个如奇偶判断、元辅音判断等简单规则的任务间转换过程中的转换代价^[22]、任务设置重构^[23]、任务设置惯性^[24]、反应抑制^[25]等现象。这种范式的实验环境、刺激、被试响应规则等要素被严格控制,因而其生态效度较低(导致实验结果可移植性较低)、外源性刺激依赖性强(导致任务转换过程并非被试主动行为,而是自下而上的刺激驱动行为)^[26]。针对以上不足,Arrington C M 等人开发了以外源刺激为主的自主任务转换(Voluntary Task Switching, VTS)范式^[27],要求被试在2个任务间自主随机选择其中一个执行,而不是完全在主试控制实验任务序列下被动响应。相应的研究内容也延展到任务选择比例和转换比例^[28]及任务难度^[29]、奖励回报^[30]等任务属性的影响效应上,不同任务间的调度情形也从被动响应渐转向主动调整,但这种改善的相关研究的生态效度依然不高,被试更倾向于对简单刺激规则(Rules)的响应,而非应对复杂作业任务(Tasks)的执行。认知心理学领域内的任务转换范式研究见图1。

1.3 基于中断管理的多任务调度研究

在实际工程场景中,由于作业者需要在不同任务间来回切换,多任务调度涉及任务间交叉推进,所以

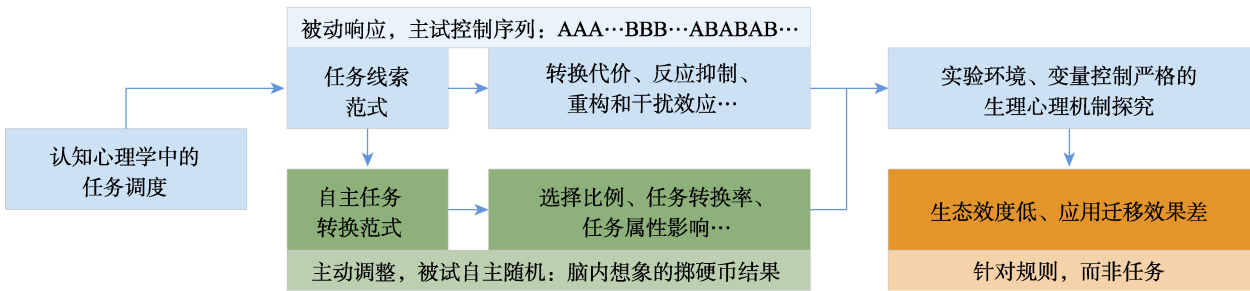


图 1 认知心理学领域内的任务转换范式研究
Fig.1 Research on task switching paradigm in the field of basic psychology

表 1 中断管理阶段模型的主要阶段与行为
Tab.1 The main phases and behaviors in Interruption Management Stage Model

信号处理阶段	信号觉察		信号解读	任务整合		任务恢复
IMSM 管理行为	未注意摒除（中断信号未被觉察）	无意摒除	有意摒除	优先整合	有意整合	重启主任务
应对中断表现	无中断应对外在表现			立即切换	延迟切换	切换后恢复

早期的研究者则将关注点集中于对中断概念的研究。

外部中断是指突然出现的作业者不易控制的外部感官或事件刺激，这一过程将会使作业者部分或全部注意力资源从当前任务上转移出去，经过作业者对中断事件的感知、理解、分析最终决策产生执行中断任务、返回主任务、计划执行中断任务、计划执行主任务甚至完全停滞等多种不同的结果^[31]。在复杂社会技术系统中，中断是一个多层次展开事件的过程，作业者被迫暂停一项任务以处理另一项任务，中断过程主要受环境、系统因素的影响，可能会对主任务、中断任务产生即时或延迟的正向或负向影响^[32]。随着中断研究的生态效度逐渐提高，实验内容从简单反应时转移到汽车仿真驾驶^[33]、飞行模拟^[34]及实际的医疗卫生场景^[35]，通过对实验室结果与实际绩效的比较^[36]，发现自主任务转换下的决策成本^[37]、个体差异^[38]会对绩效、任务执行决策带来显著影响，这在一定程度上验证了基础理论研究的正确性。

有学者根据各种不同认知理论及相关模型创建了中断模型，以探索各类中断因素和绩效、作业行为之间的关系。研究者也尝试用认知心理学的相关理论描述作业者如何协调中断任务并预测其作业行为，在一定程度上弥补了现场和认知心理学实验结果之间的差距。主要围绕选择性注意、注意广度等注意力分配过程进行描述，采用了包括目标记忆^[39]、问题状态记忆^[40]、线程认知^[41]、统一认知理论^[42]等理论工具，是多任务管理研究的一个重要阶段。研究者通过观察任务选择的结果探究不同任务间的转换协调策略，定性描述中断行为过程及其影响因素。

Latorella K A 在 1998 年将中断行为概括为中断阶段管理模型（Interruption Management Stage Model, IMSM）^[43]，围绕对中断任务的评价及其后续行为，提出人员应对中断可能有以下 5 种情形：（1）中断信号未被觉察时的未注意摒除；（2）中断信号被觉察后

的无意摒除；（3）对信号进行加工解读之后的有意摒除；（4）根据中断任务的外在表征、优先级差异等导致的优先整合中断任务行为；（5）根据实际情况综合判断后决策出的有意整合中断任务行为^[44-45]。中断管理阶段模型的主要阶段与行为见表 1。

虽然任务中断研究对作业者在复杂环境中，多任务转换过程里的思考决策过程解释能力存在不足，但直观描述了中断前后的任务绩效差异或生理心理指标变化规律，为多任务管理研究的框架构建奠定了基础。中断研究中发现的环境属性^[46]、主任务与中断任务属性^[47-48]、中断特征^[49-50]、人员属性^[51]等对绩效、行为的影响效应也为多任务管理模型的影响因素探查提供了基础数据支持。Freed M 在 2000 年提出了任务管理反应优先级模型，指出任务调度过程受到转换和中断代价、任务间相对紧迫度、重要度、耗时等因素的影响，但是当时提出的理论模型假设尚未得到实验数据验证^[52]。为解决 Freed M 模型的缺陷，Wickens C D 等人在 2013 年采用元分析方法整理了 46 项中断管理和生态效度较高的任务切换研究^[53]，总结出转换抑制现象和备选任务难度、任务优先级、任务参与感、备选任务突显性等影响因素^[54]，并于 2015 年正式在模型中描述执行任务持续时长带来的影响，形成策略任务超负荷模型（Strategic Task Overload Model, STOM），由于 STOM 模型能较好地概括性描述多任务转换过程中不同因素的影响效应，所以逐渐成为了人机交互多任务调度研究中被广泛使用的研究框架。多任务调度策略研究发展进程见图 2。

2 任务管理模型的主要框架和研究内容

2.1 STOM 模型的框架

Wickens C D 等人在尝试干预认知隧道现象时^[55-56]，对被试的注视行为进行量化预测。在其突显一期望—

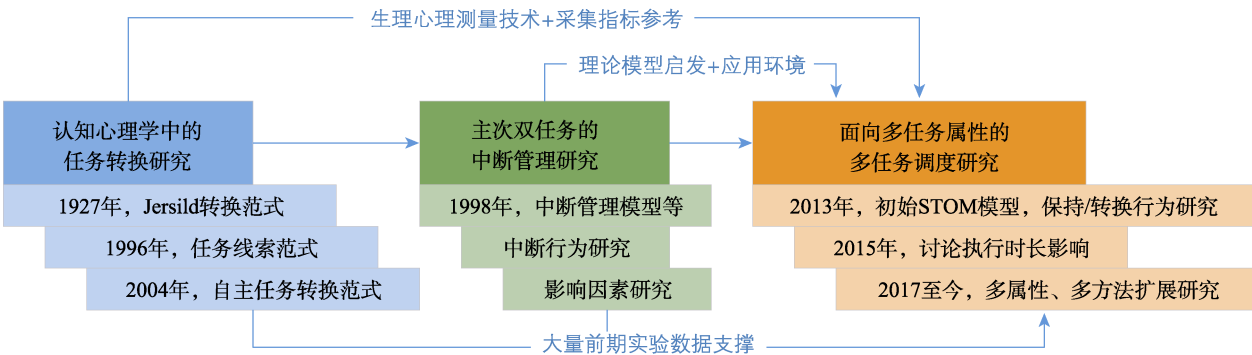


图 2 多任务调度策略研究发展进程
Fig.2 Development process of multi-task scheduling strategy research

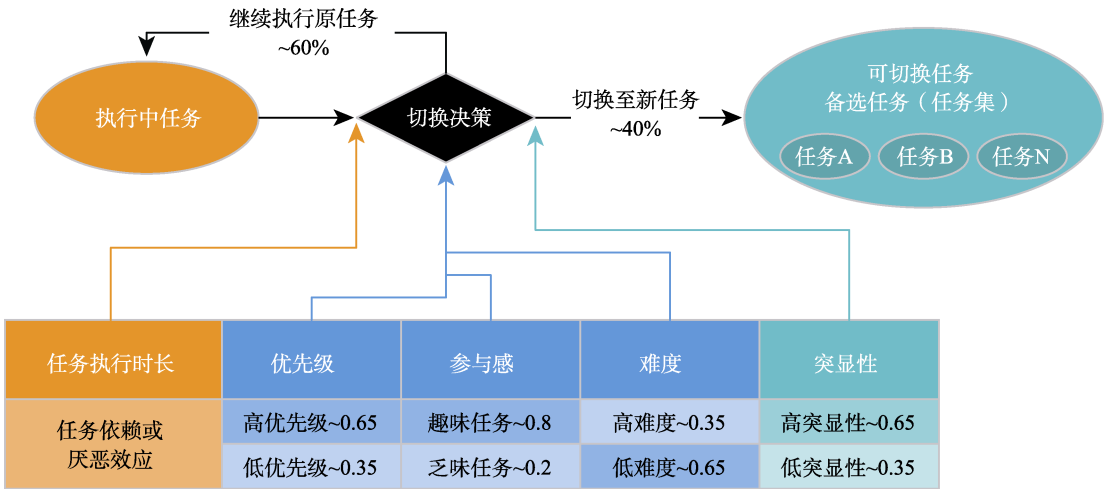


图 3 策略任务管理模型的结构与主要研究属性
Fig.3 The structure and main research attributes of the strategic task overload management (STOM) model

努力—价值模型（Salience-Expectancy-Effort-Value, SEEV）中，眼球更有可能扫描到更显著（面积更大、亮度更高、具有闪烁属性等）、对信息有更高的期望概率、需要付出更少努力却具有更大的价值或相关性的显示区域^[57]，在 SEEV 模型中视线兴趣区的吸引力可以通过线性加和计算得到，并通过实验获得了验证^[58]。在视觉注意力切换研究的思路启发下，他们进一步推测该方法也有望对控制任务切换进行预测，STOM 模型因此应运而生^[53-54]，其中 STOM 模型的优先级和突显属性与 SEEV 模型中的价值和突显属性形成对应关系。

STOM 模型是一种多属性决策模型，最初旨在预测作业者的注意隧道现象^[59]，决定是在当前情境下继续推进执行中的任务，还是切换到备选任务，如果切换到备选任务，更倾向于哪一个备选任务，策略任务管理模型的结构与主要研究属性见图 3。模型的主要框架包括作业者当前执行中任务（Ongoing Task, OT，见图 3 中橙色椭圆）、备选任务集（Alternative Tasks, AT，见图 3 中青色椭圆）、决策过程（见图 3 中黑色菱形）及影响决策的任务属性（见图 3 中矩形），其中任务优先级、参与感和难度属于所有任务均具备的通用属性，而执行中任务和备选任务分别具备任务执

行时长和突显性 2 种专有属性，分别用来表征当前执行任务导致的厌恶效应，或对备选任务的外源性影响进行描述。通常状况下，由于作业者存在执行当前任务的惯性而出现任务切换抑制现象，更倾向于继续执行当前任务，在进行任务转换时将会受到任务难度、优先级、突显性、任务参与感等因素的影响^[60]。

2.2 任务的通用属性

执行中任务和备选任务同时具备优先级、参与感及难度等通用属性，在进行任务转换决策时可能形成竞争关系。

1) 任务优先级。作为相对直观的任务属性，优先级在早期的模型研究中就受到关注^[52]。Raby M 等人在对飞行员模拟着陆的实验研究中发现，随着工作负荷的提高任务的优先级属性会影响到作业者切换到不同任务之后的任务执行时长，相关任务的执行时长随着优先级的提高而延长，但对任务切换的概率没有直接影响^[34]；Janssen C P 等人在模拟车辆驾驶的实验研究中采用电话拨号作为中断任务，在不同任务间的自然中断点等特殊的时间点上，发现优先级属性显著影响了任务转换比率^[33]。虽然在模拟飞行着陆^[61]或汽车驾驶的紧急避险^[62]等较为特殊的环境中，优先

级属性展现出显著的影响效应,但在更为普适的任务环境下,优先级仍不是任务调度的绝对影响因素,比如 Gutzwiller R S 等人在多属性任务系列 (Multi-Attribute Task Battery, MATB) 范式中采用 3 任务设计,相比于前人的双任务切换实验设计具有更好生态效度的同时,发现优先级属性需要与突显性、难度、参与感等其他任务属性共同作用才能影响任务选择的决策^[63]。

2) 任务参与感。虽然参与感兴趣 (Interest) 在 SEEV 模型中没有直接的对应属性,但具有较高参与感的任务更可以增加作业者的执行期望^[64],或直接影响不同任务的优先级,例如地铁行车调度员更倾向于扫视站场图大屏或与现地工作人员、司机通话,而不是对更无趣乏味的告警列表进行数据筛查。在此过程中,作业者的个人偏好可能会对任务的分配比率产生影响^[65],例如在关系到个人安危的汽车驾驶情境下,手机的吸引力也还是大于本应关注的避险行为^[62]。

3) 任务难度。在 STOM 的通用属性中,优先级和参与感对任务作业者的任务转换行为起到促进作用,而任务的难度属性可能从不同方向影响任务调度策略:(1) 在没有执行任何任务前,或中断后选择下一执行任务时,影响作业者对初始任务的选择,使作业者更倾向于从简单的任务入手^[54];(2) 在任务执行过程中,在感知到执行中任务和备选任务的难度差异时,影响作业者的主动转换过程,困难的任务将阻滞作业者主动进行任务转换的意愿^[66]。

2.3 执行任务和备选任务的专有属性

1) 备选任务突显性。与执行中的任务相比,备选任务需要外源性抢夺作业者的注意力资源,因而突显性是其专有属性。这一部分的影响效应在任务中断研究中取得了一些研究成果,如外源性刺激比记忆具备更强的突显性^[67],听觉系统的刺激可以捕捉更多的注意力资源等^[68],既有研究普遍支持其可以正向提高备选任务转换概率。

2) 任务执行时长。该属性是执行中任务的专有属性,由于其非线性特征,在初期由 SEEV 模型推演至 STOM 模型的过程中并没有将其概括在内^[53-69],主要原因在于任务执行时长的属性较为复杂。一方面

由于作业者在某一任务上持续执行的时间增加,相关的认知资源消耗直至较低水平,存在主动转移出该任务进行休息、补充认知资源的主观意愿^[70-71];同时,由于存在边际效益递减的情形,随着绩效水平接近理论峰值,任务绩效的回报率会随着任务执行时长的增加而降低^[70,72-74]。另一方面,在某些对工作记忆需求较高的任务情境中,可能会表现出上述效应的相反结果,若作业者判断任务转换后工作记忆中关于当前任务的暂存信息大概率被其他信息覆盖,重启任务后需要再次进行大量信息的补充获取,可能导致认知消耗过大时,将会抵制任务转换,因而执行记忆资源要求较高的复杂任务时,任务转换概率将随着任务执行时长的增加而降低^[75]。STOM 模型框架内研究发现的^{不同任务属性影响效应见表 2。}

3 多任务调度策略模型的缺陷与发展趋势

随着 STOM 理论、中断管理、认知心理学任务切换研究的推进,多任务调度策略模型的不足被新的实验数据和其他理论模型不断完善,当前尚存在的缺陷及可能的发展趋势主要包括对任务属性影响效应的深化、任务属性间的相互作用^[76]、任务属性的差异化利用及应对新技术的机遇和挑战等^[77]。人机交互多任务切换研究的拓展框架见图 4。

3.1 任务属性自身影响效应深化

1) 任务难度的拐点效应。Wickens R K 等人的元分析^[54]表明,难度普遍对转向执行备选任务具有负向影响,作业者倾向于抑制转向更困难的备选任务。然而,另有研究发现了拐点现象,在转向更困难的任务前会有强大阻力,而一旦开始困难任务,相对困难的任务却可能使作业者在该任务上驻留更长时间^[66-78]。在通过任务难度指导人机交互任务设计的时候,需考虑拐点效应导致的任务选择、切换概率及任务执行时长预测偏差。

2) 任务优先级的两极分化现象。在一些实验研究中,作业者的任务选择可能会完全忽视优先级带来的影响^[34];在 Wickens R K 等人的研究中发现,在明确告知被试不同任务的优先级差异时,将影响其任务

表 2 STOM 模型框架内研究发现的^{不同任务属性影响效应}
Tab.2 Effects of different task attributes discovered in the framework of the STOM

任务属性	影响效应
任务优先级	正向提高任务执行时长;可能影响任务转换概率;调节其他属性的影响效应
任务参与感	调节效应:影响不同任务间其他任务属性的表达强度
任务难度	负向影响备选任务转换概率,正向提高执行中任务的持续执行概率
备选任务突显性	正向提高备选任务转换概率
任务执行时长	相对复杂;可能随时间累积,增加的沉没成本和降低的预期收益形成拮抗作用; 或依任务类型,随着任务执行阶段的不同出现转换概率的突变; 或随着时间推进,由于绩效或脑力负荷的边际效益递减形成非对称的倒 U 形曲线

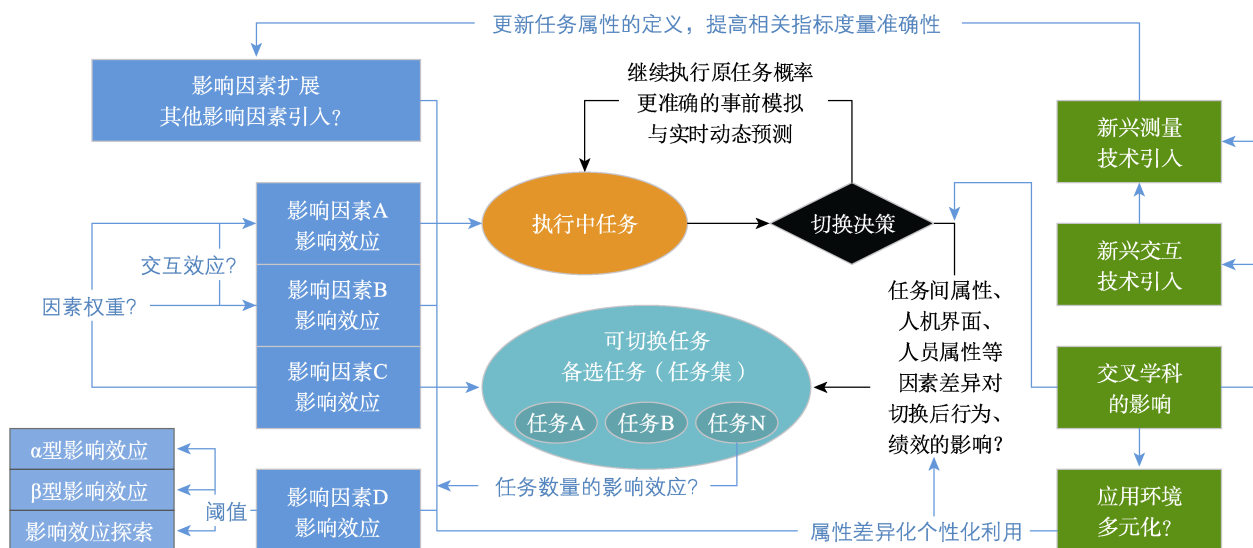


图4 人机交互多任务切换研究的拓展框架

Fig.4 Expanded research framework of multi-task switching in human-computer interaction

执行时长，但完全没有影响被试在 MATB 的 4 个子任务中进行切换的概率^[66]，后期出现了完全摒弃优先级属性的无优先级策略任务超负荷模型（STOM-no priority）来提高模型对任务转换行为的预测效力的情况^[79]；Gilbert K M 等人的研究表明当作业者自主判断并锚定不同任务的优先级差异时，优先级产生了对任务执行概率的显著影响^[80]。在 SEEV 注意力模型研究中已发现，任务的价值属性还可能在作业过程中出现动态变化，重要度作为在 STOM 模型中与之对应的任务属性及其他任务属性，也可能具有类似的时变规律^[81]。优先级属性的两极分化现象需要在后续研究中进一步得到解释，在进行系统设计、人员培训过程中，诱导作业者产生对不同任务的主观优先级差异认知可能是一种切实可行的交互设计方向，而其他任务属性的影响效应也同样有待进一步深化。

3.2 任务属性相对权重和相互影响的研究

1) 不同任务属性的权重量化。STOM 模型作为多属性决策模型，同样需要面对该类模型的主要挑战，即建立属性之间的相对权重。在实际的安全苛求系统中，权重的影响是不应回避的，在不同的作业环境下，属性相对权重可能成为系统设计的关键变量。有研究者尝试用任务的信息量等指标打通不同任务之间的属性量化壁垒^[82]，而更准确或更具普适性的量化方法还有待进一步研究。

2) 任务属性的中介调节作用。在前期 STOM 模型研究中，发现优先级属性会影响被试对其他属性的感知，近期又有研究探讨难度属性对优先级的调节作用^[83]，后续研究会向双因素、多因素之间的调节作用、中介作用、相互作用等复杂化方向发展。

3.3 影响因素的扩展

1) 其他影响因素的引入。在经典 STOM 模型中

除包含的任务属性外是否还有其他影响因素，及其在多任务调度策略中的作用也将会是研究者关注的重点。Gutzwiller R S 等人深化研究任务“回报率”属性和作业者自身“努力”的影响效应，奖励与努力之差是“回报率”，表示奖励或努力随着执行任务的时长而变化的过程，在其研究中各子任务具备不同的回报机制，需要被试不断调整付出来提高绩效。结果发现对于执行中任务而言，减少奖励和增加所需的努力付出都提高了转换至备选任务的概率^[84]。Vogelpohl T 等人发现，作业者状态（如疲劳）将会影响司机监控任务转移至主动介入的概率^[85]。除此上述人和系统因素外^[86]，环境风险因素的影响效应研究尚未见诸报道。

2) 任务数量相对受限。当前的多任务研究绝大部分局限于“单任务占据所有认知资源”的情境中，子任务数量在 4 个之内时，暂缺占用不同资源的并发任务研究。然而在实际作业环境下，“重监视/监听、轻操作”的多任务情境是非常常见的，如在地铁行车调度员的监视任务中，耳听目视的感受器均时刻进行着信息获取与加工，在进行简单的手动操作以切换系统状态、查看所需信息时，仍对操作外的系统状态保持着较高的感知^[87]，类似的多并发监视类任务研究有待进一步补充。

3) 任务属性的不易测特性。当任务绩效是离散测量而非连续测量时，任务执行时长也将成为一个不易度量的变量。在 MATB 范式中，追踪任务在特定时间段内连续运行，因此对其的响应绩效可以平滑地测量；而监控任务需要作业者持续保持警惕，但唯一的绩效指标是对异常信号的响应反应时，此时的任务执行时长无法用简单的响应按键时长进行表达^[88]，有研究者考虑通过眼动仪记录被试的注视情况从而进行度量^[89]。除任务执行时长可能具备不可测属性

外,监视类作业的大部分任务也是不易观察、不易测量的^[90]。随着交互技术的发展,在同时监控多个任务或采用如触觉显示器等非传统技术传递信息的场景下,各任务属性的含义与测量手段也需要创新。

3.4 影响因素的个性化利用

1) 个体能力差异带来的影响。Gutzwiller R S 等人发现,作业者认知能力的差异将极大影响作业者选择切换任务的策略,有可能降低模型的预测效力^[91]。作业者的个性化差异如认知闭合倾向可能使同一群体内不同个体的多任务管理策略具有很大的不同^[92],这一部分研究成果已被应用在指导军事飞行员的选拔上^[93]。能力出众的作业者有可能更好利用任务序列中的自然中断点进行任务的转换,如何平衡个体和群体的差异是一个必须关注的问题,如果仅依据平均水平设计系统任务切换策略,对于个体能力超常者来说可能将会适得其反。

2) 针对不同作业者的个性化策略优化。每个作业者对不同任务的各个属性都有各自的理解或偏向,多任务调度模型对备选任务转换的预测概率可以通过群体平均值或个体评价来计算,在作业者没有长时间完全理解、熟悉系统之前,基于群体平均的预测将会更准确科学,而随着作业者经验增加,个体分值的预测效力将显著增强^[80]。如果可以有效采集作业者对不同任务属性的评价及作业者状态,将有可能动态调整群体/个人分值的采信比率,开发随时间优化的任务调度预测模块。

3.5 交叉学科对多任务管理的促进

1) 基础科学的应用实践研究。时至今日,仍有针对自主任务转换过程的基础理论研究,通过调整实验设计,研究不同刺激的预览效应对任务转换成本、任务绩效、转换决策等的影响^[94]。随着脑科学、认知神经科学等研究的进步,一部分认知心理学研究者尝试对更为复杂的任务转换决策过程进行生理心理学机制的探寻,而有一部分认知架构理论本就适合对包括任务切换在内的并发多任务进行研究,如 Oh H 等人已经开始对双任务情境下不同难度任务的切换百分比、切换次数进行模拟预测^[95]。我国的梁立等人早在 20 世纪 90 年代就利用多任务和任务速率的变化研究了信息处理的速率和多任务作业成绩的关系,认为大脑运行的时钟速率是资源的一种形式,大脑对该资源的分配采用多道分时的机制,某个任务获得的时间越多,对应的该任务的工作绩效就越好^[96],可惜后续研究鲜见推进的报告。对模型的构建方法也存在进一步完善的空间,如通过形式化建模进行更快速有效的实际任务建模^[97]。在仿真工具和基础研究进一步发展的过程中,有望在大于 2 个子任务的多任务情境、更接近实际的任务内容、更多样的任务属性等方面有所突破。

2) 在非安全苛求领域的探索。并发多任务不一定在安全苛求领域或复杂人机中出现,也可能在日常生活中存在,如 Ophir E 等人关注在网络应用情境下的不同任务对认知资源的争夺情况^[98]。多任务调度策略也可能在对身体素质要求更高的情境(如攀岩)中出现^[99],可通过对不同经验选手的任务参与感、优先级和难度评分,预测他们在部署安全装置和向上攀爬的时间分配比率。开拓视野关注其他领域进展,或将有利于启发多任务管理在安全苛求领域的探索。

3) 新兴技术的应用。随着语音交互、隔空手势交互、眼控技术、智能感知技术、脑机接口等新兴交互技术的发展,在可展望的将来人机交互的相互关系也会不断调整。人员状态的可采集指标日渐增加,如功能近红外 fNIRS、眼动、语音、动作识别等数据随着采集与处理技术的进步也将更多应用于任务调度研究中。自动化系统将更高效准确识别自身和环境风险,综合判断系统和人员状态动态,调整系统的任务属性,对人员任务调度策略进行干预。随着人机关系朝着智能协同方向发展,自动化信任可能也将在任务调度策略中起到协调作用^[100-101]。

4 结语

在半导体、人工智能技术快速发展的背景下,复杂系统中的人机交互行为呈现多任务并发、信息模式复杂、任务类型多样、任务间转换频繁等特点。多任务调度的决策机制、不同任务属性的影响效应和属性间的相互作用将对任务调度决策产生直接影响,作业者在交互过程中采用的多任务调度策略对系统的运营安全和绩效保障起到了十分关键的作用。积极面对新兴交互技术和任务情境、探索更精确的任务属性度量方法、利用高算力计算系统构建更加准确的预测模型,是将来人机交互设计师、系统工程师在进行复杂人机系统设计、建造、维护过程中需要解决的问题。

参考文献:

- [1] FU H, LIAO J, YANG J, et al. The Sunway Taihu Light Supercomputer: System and Applications[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(7): 113-128.
- [2] GOEL P, DATTA A, MANNAN M S. Industrial Alarm Systems: Challenges and Opportunities[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 50: 23-36.
- [3] WANG J, YANG F, CHEN T, et al. An Overview of Industrial Alarm Systems: Main Causes for Alarm Overloading, Research Status, and Open Problems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 1045-1061.
- [4] PARASURAMAN R, RILEY V. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse[J]. Human Factors,

- 1997, 39(2): 230-253.
- [5] MANZEY D, REICHENBACH J, ONNASCH L. Human Performance Consequences of Automated Decision Aids: The Impact of Degree of Automation and System Experience[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2012, 6(1): 57-87.
 - [6] SARTER N. Investigating Mode Errors on Automated Flight Decks: Illustrating the Problem-Driven, Cumulative, and Interdisciplinary Nature of Human Factors Research[J]. *Human Factors*, 2008, 50(3): 506-510.
 - [7] KEMENY J G, BABBITT B, HAGGERTY P E, et al. Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: The Need for Change: the Legacy of TMI[M]. Washington D C: Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, 1979.
 - [8] ENDSLEY M R, KIRIS E O. The Out-of-the-loop Performance Problem and Level of Control in Automation[J]. *Human Factors*, 1995, 37(2): 381-394.
 - [9] SARTER N B, MUMAW R J, WICKENS C D. Pilots' Monitoring Strategies and Performance on Automated Flight Decks: An Empirical Study Combining Behavioral and Eye-Tracking Data[J]. *Human Factors*, 2007, 49(3): 347-357.
 - [10] Komite Nasional Keselamatan Transportasi. Aircraft Accident Investigation Report PT. Lion Mentari Airlines Boeing 737-8 (MAX); PK-LQP Tanjung Karawang, West Java Republic of Indonesia 29 October 2018: KNKT.18.10.35.04[R]. Jakarta: KNKT, 2019.
 - [11] KUN A L. Human-Machine Interaction for Vehicles: Review and Outlook[J]. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 2018, 11(4): 201-293.
 - [12] NAVARRE D, PALANQUE P, MARTINIE C, et al. Formal Description Techniques for Human-Machine Interfaces: Model-Based Approaches for the Design and Evaluation of Dependable Usable Interactive Systems [M].// BOY G A. the Handbook of Human-Machine Interaction. Burlington: CRC Press, 2017.
 - [13] LI S Y, MAGRABI F, COIERA E. A Systematic Review of the Psychological Literature on Interruption and its Patient Safety Implications[J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2011, 19(1): 6-12.
 - [14] SALEHI V, VEITCH B, SMITH D. Modeling Complex Socio - Technical Systems Using the FRAM: A Literature Review[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2021, 31(1): 118-142.
 - [15] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. *自然杂志*, 1990(1): 3-10. QIAN Xue-sen, YU Jing-yuan, DAI Ru-wei. A New Discipline of Science: The Study of Open Complex Giant System and its Methodology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1990(1): 3-10.
 - [16] MITCHELL M. Complexity: A Guided Tour[M]. New York: Oxford University Press, 2009.
 - [17] SIMON H A. The Architecture of Complexity[M]. // KLIR G. Facets of Systems Science. New York: Springer, 1991.
 - [18] SIEGLER R S. Strategy Choice Procedures and the Development of Multiplication Skill[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1988, 117(3): 258-275.
 - [19] HASSALL M E, SANDERSON P M. A Formative Approach to the Strategies Analysis Phase of Cognitive Work Analysis[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2014, 15(3): 215-261.
 - [20] LOFT S, SANDERSON P, NEAL A, et al. Modeling and Predicting Mental Workload in an Air Traffic Control: Critical Review and Broader Implications[J]. *Human Factors*, 2007, 49(3): 376-399.
 - [21] MEIRAN N. Reconfiguration of Processing Mode Prior to Task Performance[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1996, 22(6): 1423-1442.
 - [22] MONSELL S. Task Switching[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2003, 7(3): 134-140.
 - [23] MONSELL S, MIZON G A. Can the Task-cuing Paradigm Measure an Endogenous Task-set Reconfiguration Process?[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2006, 32(3): 493-516.
 - [24] TRAFTON J G, ALTMANN E M, BROCK D P, et al. Preparing to Resume an Interrupted Task: Effects of Prospective Goal Encoding and Retrospective Rehearsal [J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2003, 58(5): 583-603.
 - [25] HÜBNER R, DRUEY M D. Response Execution, Selection, or Activation: What is Sufficient for Response-Related Repetition Effects under Task Shifting?[J]. *Psychological Research*, 2006, 70(4): 245-261.
 - [26] 蒋浩. 自主任务转换中的重构和干扰[J]. *心理科学进展*, 2018, 26(9): 1624-1631. JIANG Hao. Reconfiguration and Interference in Voluntary Task Switching[J]. *Advances in Psychological Science*, 2018, 26(9): 1624-1631.
 - [27] ARRINGTON C M, LOGAN G D. The Cost of a Voluntary Task Switch[J]. *Psychological Science*, 2004, 15(9): 610-615.
 - [28] DEMANET J, VERBRUGGEN F, LIEFOOGHE B, et al. Voluntary Task Switching under Load: Contribution of Top-Down and Bottom-Up Factors in Goal-Directed Behavior[J]. *Psychonomic Bulletin & review*, 2010, 17(3): 387-393.
 - [29] DUNN T L, LUTES D J, RISKO E F. Metacognitive Evaluation in the Avoidance of Demand[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2016, 42(9): 1372-1387.

- [30] BRAUN D A, ARRINGTON C M. Assessing the Role of Reward in Task Selection Using a Reward-Based Voluntary Task Switching Paradigm[J]. *Psychological Research*, 2018, 82(1): 54-64.
- [31] BARG-WALKOW L H, ROGERS W A. Modeling Task Scheduling in Complex Healthcare Environments: Identifying Relevant Factors[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2017.
- [32] WERNER N E, HOLDEN R J. Interruptions in the Wild: Development of a Sociotechnical Systems Model of Interruptions in the Emergency Department through a Systematic Review[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 51: 244-254.
- [33] JANSSEN C P, BRUMBY D P. Strategic Adaptation to Performance Objectives in a Dual-Task Setting[J]. *Cognitive Science*, 2010, 34(8): 1548-1560.
- [34] RABY M, WICKENS C D. Strategic Workload Management and Decision Biases in Aviation[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1994, 4(3): 211-240.
- [35] KOH R Y, PARK T, WICKENS C D, et al. Differences in Attentional Strategies by Novice and Experienced Operating Theatre Scrub Nurses[J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2011, 17(3): 233-246.
- [36] EYROLLE H, CELLIER J M. the Effects of Interruptions in Work Activity: Field and Laboratory Results[J]. *Applied Ergonomics*, 2000, 31(5): 537-543.
- [37] KATIDIOTI I, BORST J P, TAATGEN N A. What Happens When We Switch Tasks: Pupil Dilation in Multitasking[J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2014, 20(4): 380.
- [38] NIJBOER M, TAATGEN N A, BRANDS A, et al. Decision Making in Concurrent Multitasking: Do People Adapt to Task Interference?[J]. *PloS One*, 2013, 8(11): e79583.
- [39] ALTMANN E M, TRAFTON J G. Memory for Goals: An Activation-Based Model[J]. *Cognitive Science*, 2002, 26(1): 39-83.
- [40] BORST J P, TAATGEN N A, VAN RIJN H. The Problem State: A Cognitive Bottleneck in Multitasking[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2010, 36(2): 363-382.
- [41] SALVUCCI D D, TAATGEN N A. Threaded Cognition: An Integrated Theory of Concurrent multitasking[J]. *Psychological Review*, 2008, 115(1): 101-130.
- [42] SALVUCCI D D, TAATGEN N A. The Multitasking mind[M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [43] LATORELLA K A. Effects of Modality on Interrupted Flight Deck Performance: Implications for Data Link[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1998, 42(1): 87-91.
- [44] MCFARLANE D C, LATORELLA K A. The Scope and Importance of Human Interruption In Human-Computer Interaction Design[J]. *Human-Computer Interaction*, 2002, 17(1): 1-61.
- [45] 王水珍, 马红宇, 刘腾飞, 等. 基于人机互动的任务中断管理研究述评[J]. *心理科学*, 2014, 37(6): 1467-1472.
- WANG Shui-zhen, MA Hong-yu, LIU Teng-fei, et al. Review of Task Interruption Management: Based on Human-computer Interaction Research[J]. *Journal of Psychological Science*, 2014, 37(6): 1467-1472.
- [46] MANSI G, LEVY Y. do Instant Messaging Interruptions Help or Hinder Knowledge Workers' Task Performance?[J]. *International Journal of Information Management*, 2013, 33(3): 591-596.
- [47] MAYR U, KUHN D, HUBBARD J. Long-Term Memory and the Control of Attentional Control[J]. *Cognitive Psychology*, 2014, 72: 1-26.
- [48] BASOGLU K A, FULLER M A, SWEENEY J T. Investigating the Effects of Computer Mediated Interruptions: An Analysis of Task Characteristics and Interruption Frequency on Financial Performance[J]. *International Journal of Accounting Information Systems*, 2009, 10(4): 177-189.
- [49] ALTMANN E M, TRAFTON J G. Timecourse of Recovery from Task Interruption: Data and a Model[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2007, 14(6): 1079-1084.
- [50] BERGMANN H C, KIEMENEIJ A, FERNÁNDEZ G, et al. Early and Late Stages of Working-Memory Maintenance Contribute Differentially to Long-Term Memory Formation[J]. *Acta Psychologica*, 2013, 143(2): 181-190.
- [51] WESTBROOK J I, RABAN M Z, WALTER S R, et al. Task Errors by Emergency Physicians are Associated With Interruptions, Multitasking, Fatigue and Working Memory Capacity: A Prospective, Direct Observation Study[J]. *BMJ Quality & Safety*, 2018, 27(8): 655-663.
- [52] FREED M. Reactive Prioritization[C]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 2000.
- [53] WICKENS C D, SANTAMARIA A, SEBOK A. A Computational Model of Task Overload Management and Task Switching[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2013.
- [54] WICKENS C D, GUTZWILLER R S, SANTAMARIA A. Discrete Task Switching in Overload: A Meta-Analyses and a Model[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2015, 79: 79-84.
- [55] WICKENS C D, GOH J, HELLEBERG J, et al. Attentional Models of Multitask Pilot Performance Using Advanced Display Technology[J]. *Human Factors*, 2003, 45(3): 360-380.
- [56] WICKENS C D, HELLEBERG J, GOH J, et al. Pilot Task Management: Testing an Attentional Expected

- Value Model of Visual Scanning: ARL-01-14/NASA-01-7 [R]. Champaign: Aviation Research Lab, University of Illinois, 2001.
- [57] WICKENS C D, MCCARLEY J S, ALEXANDER A L, et al. Attention-Situation Awareness (A-SA) Model of Pilot Error[M]// FOYLE D C, HOOEY B L. Human Performance Modeling in Aviation. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [58] WICKENS C D. Noticing Events in the Visual Workplace: The SEEV and NSEEV Models[M]// HOFFMAN R, PARASURAMAN R. Handbook of Applied Perception. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [59] WICKENS C D, ALEXANDER A L. Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2009, 19(2): 182-199.
- [60] WICKENS C D, GUTZWILLER R S. The Status of the Strategic Task Overload Model (STOM) for Predicting Multi-Task Management[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2017.
- [61] IANI C, WICKENS C D. Factors Affecting Task Management in Aviation[J]. Human Factors, 2007, 49(1): 16-24.
- [62] HORREY W J, WICKENS C D. Driving and Side Task Performance: The Effects of Display Clutter, Separation, and Modality[J]. Human Factors, 2004, 46(4): 611-624.
- [63] GUTZWILLER R S, WICKENS C D, CLEGG B A. Workload Overload Modeling: An Experiment with MATB II to Inform a Computational Model of Task Management[C]. California: SAGE Publications, 2014.
- [64] JIN J, DABBISH L A. Self-interruption on the Computer: A Typology of Discretionary Task Interleaving [C]. New York: Association for Computing Machinery, 2009.
- [65] SPINK A, PARK M, KOSHMAN S. Factors Affecting Assigned Information Problem Ordering during Web Search: An Exploratory Study[J]. Information Processing & Management, 2006, 42(5): 1366-1378.
- [66] WICKENS C D, GUTZWILLER R S, VIEANE A, et al. Time Sharing between Robotics and Process Control: Validating a Model of Attention Switching[J]. Human Factors, 2016, 58(2): 322-343.
- [67] DISMUKES R K. Remembrance of Things Future: Prospective Memory in Laboratory, Workplace, and Everyday Settings[J]. Reviews of Human Factors and Ergonomics, 2010, 6(1): 79-122.
- [68] LU S A, WICKENS C D, PRINET J C, et al. Supporting Interruption Management and Multimodal Interface Design: Three Meta-Analyses of Task Performance as a Function of Interrupting Task Modality[J]. Human Factors, 2013, 55(4): 697-724.
- [69] SEBOK A, WICKENS C, SARGENT R. Using Meta-Analyses Results and Data Gathering to Support Human Performance Model Development[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2013.
- [70] GUTZWILLER R S, WICKENS C D, CLEGG B A. The Role of Time on Task in Multi-Task Management[J]. Journal of Applied Research in Memory and Cognition, 2016, 5(2): 176-184.
- [71] KURZBAN R, DUCKWORTH A, KABLE J W, et al. An Opportunity Cost Model of Subjective Effort and Task Performance[J]. Behavioral and Brain Sciences, 2013, 36(6): 661-679.
- [72] DUGGAN G B, JOHNSON H, SØRLI P. Interleaving Tasks to Improve Performance: Users Maximise the Marginal Rate of Return[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2013, 71(5): 533-550.
- [73] PAYNE S J, DUGGAN G B, NETH H. Discretionary Task Interleaving: Heuristics for Time Allocation in Cognitive Foraging[J]. Journal of Experimental Psychology: General, 2007, 136(3): 370-388.
- [74] WANG D D, PROCTOR R W, PICK D F. Allocation of Effort as a Function of Payoffs for Individual Tasks in a Multitasking Environment[J]. Behavior Research Methods, 2009, 41(3): 705-716.
- [75] GUTZWILLER R. Switch Choice in Applied Multi-Task Management[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2014.
- [76] REISSLAND J, MANZEY D. Serial or Overlapping Processing in Multitasking as Individual Preference: Effects of Stimulus Preview on Task Switching and Concurrent Dual-Task Performance[J]. Acta Psychologica, 2016, 168: 27-40.
- [77] KATIDIOTI I. Understanding and Managing Interruptions: How to Avoid Watching Cat Videos All Day long [D]. Groningen: University of Groningen, 2016.
- [78] WICKENS C, VIEANNE A, CLEGG B, et al. Visual Attention Allocation between Robotic Arm and Environmental Process Control: Validating the STOM Task Switching Model[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2015.
- [79] BARG-WALKOW L H, THOMAS R P, WICKENS C D, et al. Modeling Task Scheduling Decisions of Emergency Department Physicians[J]. Human Factors, 2021, 63(3): 450-461.
- [80] GILBERT K M, WICKENS C D. Experimental Evaluation of STOM in a Business Setting[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2017.
- [81] WRIGHT E, PINYAN E C, WICKENS C D, et al. Assessing Dynamic Value for Safety Gear During a Rock Climbing Task[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2018.
- [82] LIU S, NAM C S, FITTS E P. Quantitative Modeling of User Performance in Multitasking Environments[J].

- Computers in Human Behavior, 2018, 84: 130-140.
- [83] VALÉRY B, MATTON N, SCANNELLA S, et al. Global Difficulty Modulates the Prioritization Strategy in Multitasking Situations[J]. *Applied Ergonomics*, 2019, 80: 1-8.
- [84] GUTZWILLER R S, WICKENS C D, CLEGG B A. The Role of Reward and Effort over Time in Task Switching[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2019, 20(2): 196-214.
- [85] VOGELPOHL T, KÜHN M, HUMMEL T, et al. Asleep at the Automated Wheel: Sleepiness and Fatigue during Highly Automated Driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 126: 70-84.
- [86] BARG-WALKOW L H. Understanding Multiple Task Coordination in a Complex Healthcare Environment[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2017.
- [87] WANG J, FANG W. A Structured Method for the Traffic Dispatcher Error Behavior Analysis in Metro Accident Investigation[J]. *Safety Science*, 2014, 70: 339-347.
- [88] GUTZWILLER R S, SITZMAN D M. Examining Task Priority Effects in Multi-Task Management[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2017.
- [89] ZABALA G. Validating the STOM Model Using MATB II and Eye-tracking[D]. Tempe: Arizona State University, 2020.
- [90] SATO T. Exploring the Effects of Task Priority on Attention Allocation and Trust towards Imperfect Automation: A Flight Simulator Study[D]. Norfolk: Old Dominion University, 2020.
- [91] GUTZWILLER R S, WICKENS C D, CLEGG B A. The Role of Individual Differences in Executive Attentional Networks and Switching Choices in Multi-Task Management[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2015: 632-636.
- [92] SZUMOWSKA E, POPLAWSKA-BORUC A, KOSSOWSKA M. How Many Things Do You (Like to) Do at Once? The Relationship between Need for Closure and Multitasking Preference and Behavior[J]. *Personality and Individual Differences*, 2018, 134: 222-231.
- [93] DAMOS D. Individual Differences in Multiple-Task Performance: Status and Issues: ITSS ID10180037[R]. Universal: Air Force Personnel Center, Strategic Research and Assessment Branch, 2019.
- [94] MITTELSTÄDT V, DIGNATH D, SCHMIDT-OTT M, et al. Exploring the Repetition Bias in Voluntary Task Switching[J]. *Psychological Research*, 2018, 82(1): 78-91.
- [95] OH H, YUN Y, MYUNG R. Cognitive Modeling of Task Switching in Discretionary Multitasking Based on the ACT-R Cognitive Architecture[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(9): 3967-3986.
- [96] 梁立, 王重鸣, 白延强, 等. 多任务信息加工中的多道分时机制[J]. *心理学报*, 1997(4): 370-376.
- LIANG Li, WANG Zhong-ming, BAI Yan-qiang, et al. Multichannel Time: Sharing Mechanism under Multiple Task Conditions[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1997(4): 370-376.
- [97] BROCCIA G, MILAZZO P, ÖLVECKZY P C. Formal Modeling and Analysis of Safety-Critical Human Multitasking[J]. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 2019, 15(3): 169-190.
- [98] OPHIR E, NASS C, WAGNER A D. Cognitive Control in Media Multitaskers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(37): 15583-15587.
- [99] WICKENS C D, MCLAUGHLIN A C, KELLER J, et al. Task Switching in Rock Climbing: Validation of a Computational Model for Different Skill Levels[C]. Los Angeles: SAGE Publications, 2018.
- [100] KARPINSKY N D, CHANCEY E T, PALMER D B, et al. Automation Trust and Attention Allocation in Multitasking Workspace[J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 70: 194-201.
- [101] 董文莉, 方卫宁. 自动化信任的研究综述与展望[J]. *自动化学报*, 2021, 47(6): 1183-1200.
- DONG Wen-li, FANG Wei-ning. Trust in Automation: Research Review and Future Perspectives[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(6): 1183-1200.