

DOI : 10.3901/JME.2017.04.198

生产作业可操作性评价理论方法框架模型研究

孔繁森 叶正梗

(吉林大学机械科学与工程学院 长春 130022)

摘要：通过文献研究并结合生产实际，从作业的执行过程及其相应的认知心理过程两个方面对作业的可操作性进行了描述，同时考虑时间压力建立了生产任务可操作性评价的理论方法框架模型。在操作行为分析的基础上，建立了作业复杂度与作业容易度评价体系，从作业空间评价、作业姿态评价、动作特征评价、信息获取过程评价、信息加工过程评价和信息反馈过程评价六个方面制定了作业可操作性评价指标及其计算方法。案例研究证明了本文所提出的作业可操作性分析理论框架模型的合理性与测度指标计算方法的可行性。

关键词：生产作业；可操作性；评价；框架模型

中图分类号： TG156

Research on Evaluation Method Framework Model of Production Job Operability

KONG Fansen YE Zhenggeng

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract : The operability of production job is described from two aspects of operation process and cognitive psychological process through combining literature research with production practice. Based on the analysis of operation behavior, the evaluation method framework model of production job operability is established by considering time pressure. And the operational evaluation index and its calculation method are developed from six aspects: job space evaluation, job pose evaluation, action feature evaluation, information acquisition process evaluation, information processing evaluation and information output. The case study shows that the method is feasible and can be applied to many different fields when we select different weights.

Key words : production job ; operability ; evaluation ; framework model

0 前言

任务是人们在生活和工作中必须进行的活动。正如 HACKMAN^[1]所说，任务在对人类行为的研究中扮演着重要的角色，并且任务和任务特征的差异已被证明具有调解个人和社会行为差异的功能。任务可以分为两大类：物理和心理(或认知)任务。最著名的分解和描述物理任务的方法是运动研究，它起源于二十世纪早期 BENJAMIN 等^[2]的研究。另一种任务分析方法是认知任务分析。认知任务分析是传统的任务分析技术的延伸，旨在产生信息知识，思维过程和目标结构，并将它们作为观测任务绩效的基础。它捕捉到的信息，无论是明显的可观察行为还是背后隐蔽的认知功能，都可形成一个完整的整体^[3]。与其他仅关注可视行为观察的任务分析方法不同，认知任务分析关注的是可观察行为背后的

认知过程。正如 COOKE^[4]所指出的那样，现有 100 多种任务分析方法，可被分为三类：观察与访谈、过程追溯和概念技术。WEI 等^[5]补充给出了第四种：形式化模型。

目前，在人因工程学领域有各种任务分析方法用于人机或人机交互行为的描述和评价。这些任务分析方法主要集中在任务特征和性能分析。其中，出现大量的研究是关于任务的复杂性的，任务复杂性是一个重要的任务特征。一些早期的研究都集中在确定任务的复杂性因素，这些因素对某些任务情境具有特别意义^[6]。例如，PARK 等^[7]发现五个复杂性因素对处理核电厂操控室中的紧急情况是非常重要的。这五个因素分别是：步骤信息的复杂性，代表了操作者为实施一个任务步骤应该处理多少信息；步骤大小复杂性，说明了人类的操作人员应该进行多少操作来完成任务；步骤逻辑复杂性用于评价任务步骤之间的逻辑关系复杂性；抽象层次复杂性，说明了操作员应该处理工作领域中的多少知识

20160419 收到初稿，20161115 收到修改稿

才能完成任务；工程决策复杂性，代表了在做工程决策时应使用多少认知资源来完成任务。在这五个因素的基础上，他们开发了TACOM(TASK COMplexity)，TACOM是评估核电厂操控室紧急情况下任务复杂性的一个测度。早期的研究有助于理解哪些因素可以构造任务的复杂性和他们是如何增加任务复杂度水平的。然而，从这些研究是难于理解任务复杂性因素是如何被确认的，以及它们是在什么基础上产生相互关联的。这是因为大多数早期的研究主要是以经验为基础来确认任务的复杂性因子的，缺少坚实的理论模型或框架做支撑。到目前为止，还很少有研究尝试开发这类模型或框架。可是，正如CAMPBELL^[8]所指出的那样基于坚实的理论模型或框架来分析确认任务的复杂性对系统地评估和管理任务复杂性因素是非常有必要的。此外，识别和组织复杂因素的分析方法为了解和使用这些复杂性因素提供了一个有用的理论基础。一般这些方法对任何工作领域，任何任务内容以及任何使用者都适用。因此，有必要制定一个分析方法，用于识别和组织各种复杂因素。LIU等^[9-10]综述了任务复杂性与任务性能之间的关系，初步探索了任务复杂性的影响机制，然后，提出了一个概念框架，以表达任务复杂度，任务难度，自我效能感，任务特征，任务执行特性以及任务性能之间的关系，以共享和概括不同领域的科学发现。HAM等^[11]提出了一个模型，用于以分析的方法识别和组织任务复杂性因素，并解释了来自于模型的二十一个复杂性因素。他们也给出了使用模型的流程，这一流程强调的是系统的任务分析。

本文的研究是面向制造业生产现场的。制造业生产现场的任务通常需要物理负荷与心理负荷，而且在传统制造业现场的生产任务往往以物理负荷为主，因此，现场技术人员也常称之为作业。不可否认的是随着技术的进步，制造业现场工程技术人员所面临的任务性质正发生显著的变化，可以预期：在未来工业4.0时代，网络与信息技术的快速发展使工人完成现场作业所承受的认知负荷大量提升，而随着大量自动化、柔性化设备的启用，工人所承受的物理负荷在下降，因此，生产作业所包含的这两类负荷的比重在发生显著的变化，为了应对这种变化，本文作者提出了作业的可操作性这一研究命题。作业的可操作性涉及完成生产任务所承受的时间压力、作业容易度以及作业复杂度。值得说明的是：作业容易度并不是任务难度的反义词，任务难度是任务复杂性的次级概念和子元素^[12]。在文献[12]的研究中，任务复杂性包含两个维度：任务难

度(如，信息量)和任务的结构(如，信息的清晰度)，因此，任务难度的概念属于心理学范畴。但是，本文所述的作业容易度的概念属于物理学范畴。此外，本文的研究内容与NASA的任务负荷指数相似^[13]，但是NASA指数是一个主观任务负荷评价指标，而本研究则试图从作业复杂性与作业容易度的角度考虑时间压力因素给出作业可操作性的客观表达，而且本研究是基于制造业现场的研究，所提出的生产作业可操作性概念与生产环境、布局以及生产组织模式等有关。

1 生产作业可操作性评价框架模型

人的行为是一个复杂的过程。在过去的半个世纪中，对人的行为的研究不断取得新的进展，这主要体现在两大方面：一方面是从心理层面进行的人的认知行为研究；另一方面是从工效学角度对人的行为动作进行的研究。认知心理学重点从认知活动的结构特点来分析人的内部心理机制，主张从信息的感知、处理和输出视角研究人的认知行为，并提出了经典的S-O-R模型。WICKENS提出的信息处理模型就是一个经典的S-O-R模型，他将人的行为过程描述为一个信息的传递和反馈过程，人从环境中感知刺激并获得有效信息，通过大脑的记忆功能、决策和响应对信息进行处理，从而指导人的行为。这类行为研究侧重于人的心理过程，而忽视了人的具体动作的实施。而工效学分析主要是从人体生理结构的角度的行为进行分析和评价，旨在提高人的动作效率，减少人误和疲劳，并提高人体在行为过程中的舒适度体验。工效学研究主要从作业姿势、动作特性、作业空间、作业环境等方面对人的行为进行分析，是人的行为研究的重要组成部分。基于上述分析可知，一个完善的操作行为模型应该能够准确而全面地反映人在操作过程中的全部行为特征，任何一项单独反应人的心理过程或人的操作动作特征的行为模型都无法实现这一需求。因而，为了准确而全面地分析生产任务的可操作性，本文建立一个新的人的操作行为模型，如图1所示。

该模型所描述的操作行为过程如下：在一定的任务预期下，首先操作者通过感受器感知外界刺激，这些刺激的数量、呈现形式与强度以及对注意资源的依赖程度共同构成了感知复杂性；其次，这些刺激按照性质分别进入视觉空间、听觉回路情景缓存，并形成抽象的概念、形象的图像和清晰与模糊的逻辑信息，然后人脑的工作记忆会安排这些概念、图像和逻辑信息与长时记忆中存储的知识进行匹配

并加工(自动加工和控制加工),这些加工构成了认知复杂性。这种复杂性与信息中各个元素间的交互作用形式和加工属性有关。经加工后的信息在经过有限能力通道进行传递和反馈时会受到操作者情景意识能力、操作者个体的知识结构和任务的时间压力的影响,进而对信息进行取舍(这种取舍分有意识和无意识的),并交付执行完成一个任务循环。任务的执行过程是一个物理过程。根据工效学原理可知:这一过程由两大要素组成:作业姿态和作业动作,它们都受到作业空间特性的约束,也会受到作业环境的影响,这些因素将直接影响操作者完成操作任务的质量和效率。

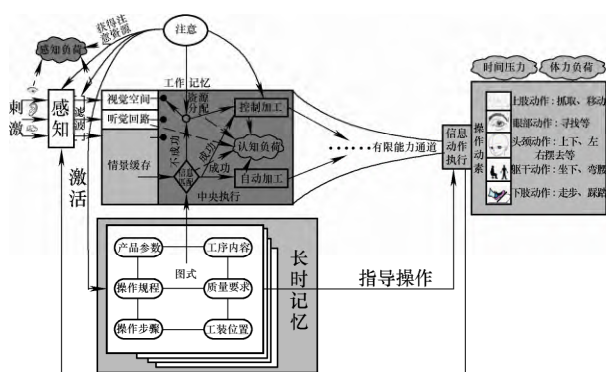


图 1 人的操作行为模型

基于上述人的操作行为模型,本文给出生产作业可操作性评价模型框架如表 1 所示。

由表 1 可以看出,在整个作业任务执行循环中,作业可操作性影响因素众多,不仅包括作业过程中与操作动作相关的作业特征因素,还包括为完成作业所需要的认知行为影响因素。为此,本文将从作业容易度、作业的时间压力和作业复杂度三个方面对生产作业的可操作性进行评价。作业容易度是指在生产作业过程中操作者姿态和动作实现的容易程度,受到任务特性、作业现场布置、工夹具与机器以及人体结构特征的综合影响,属于客观复杂度,且不受操作者主观意识的影响。作业的时间压力与操作时间及操作时间定额有关。因而,本文将从作业空间特性、作业姿态以及作业的运动特性三方面建立结构件生产作业容易度的评价体系。另一方面,人的操作行为是受大脑支配的,操作行为伴随大脑的认知加工过程,从信息加工的角度看,作业复杂度是指操作者对作业中各类信息进行认知加工的困难程度,由作业所含信息的特征决定。由图 1 可知,操作者的认知行为过程主要经历三个阶段:信息获取、信息加工和信息的反馈和输出,本文将从上述三个认知阶段中信息的特征出发来评价作业复杂度。

表 1 生产作业可操作性评价模型框架

影响因素	作业的复杂度		作业的时间	作业的容易度
	作业的信息感知	作业的信息加工	压力/s	与体力负荷相关因素
影响因素	信息元素个数 (客观量)	信息中各个元素间交互作用形式	注意资源的分配(感知到的信息并非都是有效信息)	作业姿态 (头部、身体动作)
	信息的呈现形式 与呈现强度	加工属性(由信息的呈现形式,强度与信息匹配情况决定) (1) 控制加工 (2) 自动加工	人的知识结构 差异与情境意识 能力	作业环境 作业动作 (眼部、上下肢部等)
			任务的操 作时间 T	
			任务的操 作时间定 额 CT	

2 生产作业可操作性评价指标

2.1 作业容易度评价指标

2.1.1 作业空间评价

对于任何一个作业空间不同的布局方式会对操作者的行为产生不同的影响。通常在进行作业空间设计阶段就要从重要性、使用频率、功能和使用顺序等多方面进行分析,以使操作者的作业更加简单舒适。在进行作业空间设计时,通常将指定空间里的物理实体称之为元件。在生产作业空间中,元件包括工位器具、产品、加工设备。理想的作业空间就是每一个元件都处于最优的位置上,以提高员

工的操作容易度。作业空间布局是一项复杂而重要的任务,是影响员工操作容易度的重要因素。本节根据作业空间布置的基本原则建立三种评价指标,即工位器具伸手可达率 R 、固定顺序使用率以及定置放置率,对影响生产作业任务操作容易度的空间布局因素进行评价。工位器具伸手可达率 R 是指在某种作业姿势下处于操作员正常作业空间范围内的工具数量 r 占工位器具总数 N 的比例,即 $R = r/N$ 。工位器具伸手可达率体现了作业空间布局的合理性,描述了操作员获取工具的难易程度,是影响作业者操作容易度和舒适性的关键因素之一。通常,进行工位器具伸手可达率分析需要建立特定人体姿态作业空间模型,分析处于正常作业空间内的工具

的数量。人体模型尺寸的选择通常需要保证 90% 以上的操作者都能符合该模型的特征。图 2 为站姿下人体作业空间模型，位于空间 1、2、3 和 4 内的分别为最有利作业范围、适宜作业范围、最大操作范围和最大可达范围。其中，位于操作员正常作业空间内的工位器具数 r ，即指位于适宜作业空间范围 2 内的工位器具数量。

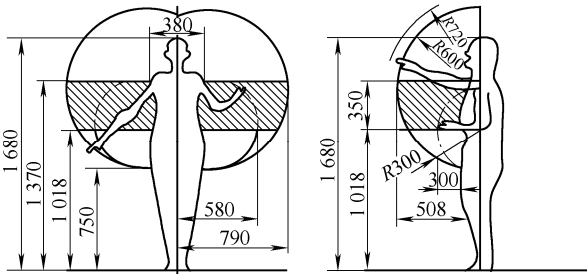


图 2 人体站姿作业空间模型

在生产过程中，若能够按照使用顺序进行工位器具的布置，则会大大提高操作者的操作容易度。本文采用固定顺序使用率 S_1 来衡量这一指标，该指标是指在操作过程中具有固定使用顺序的工位器具或设备所占比例，描述了操作员在作业过程中工位器具的选择难易程度。若 n 指具有固定使用顺序的工位器具的数量， N 指工位器具、设备的总数，则 $S_1 = n/N$ 。定置管理就是将工位器具的摆放固定化的一种管理方法，能够提高现作业管理的有序性，降低操作员作业过程中不必要的寻找，提高操作员作业的舒适性和容易度。定置放置率 S_2 是指具有固定放置位置的工具、设备占工具设备总数的比例，描述了操作者在作业过程中的寻找难易程度。若 m 表示具有固定位置的工位器具、设备的数量，则 $S_2 = m/N$ 。

2.1.2 作业姿态评价

在生产过程中，针对不同的作业模式，操作员需要以不同的作业姿态来完成操作行为。在工效学领域，作业姿态是影响人疲劳度和舒适度的重要因素，因而分析人的操作容易度就必须对人的行为姿态进行研究。人体常见作业姿态有坐姿、蹲姿(跪姿)、立姿(弯腰)三种，而通常在机械制造业的生产过程中，以立姿作业为多，因而本文将通过 CATIA 三维仿真软件的人机工程学模块对生产中的立姿作业过程进行分析。

(1) 人体测量模型的确定，由于人体尺寸的差异，在相同的作业空间中操作者感受到的舒适性也存在差异性。为了能最大限度地提高作业姿态评价的准确性和通用性，本文采用第 50 百分位的人体数据建立人体模型。因为第 50 百分位的人体数据能反

映大部分操作者人体的特征，用该数据对作业空间下的姿态进行评价，能避免人体模型尺寸太大或太小造成的作业姿态的不准确。具体数据详见 CATIA 姿态评价立姿人体模型。

(2) 作业空间的设定与人体模型姿态编辑，根据不同工序的实际作业情况，建立作业空间模型以及人体作业姿态模型，设定首选角度，并进行仿真评价。

(3) 评分处理，对于上述作业姿态评价，假设对人体的 n 项部位和器官进行姿态评价，每项得分为 G_i 。在实际生产作业中，不同作业会使人体不同部位的姿态评分产生差异，而且单独进行特定部位的评价和对比无法准确反映操作者作业过程中作业姿态的整体难易程度。所以为了表现整个作业的姿态特性，本文以所有评价部位评分的均值作为该作业的姿态评分，即

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i \quad (1)$$

2.1.3 运动特性评价

运动是人进行生产操作最显著的特征，人体的生理结构，运动特性与人的相容性对其完成作业的难易程度具有重大的影响。在工效学领域，将人类的动作类型划分为四类。

(1) 离散动作，包含到达某一固定目标的单一动作，例如伸手去拿天车控制器或者指出计算机屏幕上的一字等。

(2) 重复动作，包含对单个或多个特定目标的单一动作的重复，例如用锤子敲击结构件臂体、焊接预处理中刷助焊剂的动作等。

(3) 顺序动作，包含对若干特定目标的一系列离散动作，此处对其目标的摆放规则没有要求，如操作数控机床控制面板的按键动作等。

(4) 持续动作，是指在作业过程中需要肌肉控制以调整角度的动作，如焊接作业时手腕随焊缝的移动、钻孔作业时，手持操作柄完成进刀钻削的动作等。

在生产过程中，操作作业过程是由一系列连贯的动作组成，因而进行作业复杂度的分析必须对作业中的动作进行评价。本节将从 CATIA 运动特性评价和双手作业平衡率两个方面对结构件生产作业的动作复杂度进行评价。

对于作业动作的评价，采用姿态评价中所建立的人体模型和作业空间，对操作者进行快速上肢评估方法(Rapid-upper-limb-assessment, RULA)进行评价。假设在操作过程中，人的左手和右手的 RULA

评价值分别为 A_1 和 A_2 , 为了表现双臂动作的整体特性, 本文用上肢评价的均值衡量人体作业的运动特性

$$A = (A_1 + A_2) / 2 \quad (2)$$

根据动作经济原则, 在进行双手作业时, 应尽可能实现双手同时开始和结束动作, 以及实现两臂的对称性动作。独臂式的操作容易使操作者身体更早进入疲劳期, 增加了作业难度, 而实现双手作业的对称和平衡, 可以降低操作者疲劳程度, 减少动作上的浪费。双手作业平衡率 B 是指在完成某一作业的动作中, 双手作业动作的数量 d 占作业动作总数 D 的比例, 即

$$B = \frac{d}{D} \quad (3)$$

该指标描述了操作者双手作业的平衡性。

2.1.4 作业容易度整合

基于上述作业容易度评价体系, 影响操作容易度的指标有工具伸手可达率 R 、固定顺序使用率 S_1 、定置放置率 S_2 、作业姿态评分 G 、RULA 评分 A 、双手作业平衡率 B 六种, 其中, 只有 RULA 评分与作业容易度负相关, 即 RULA 值越高, 动作越困难, 作业容易度越低。本文假设三类作业容易度指标的影响权重相同, 且每类指标内部子指标影响权重也相同, 则作业容易度可整合为 $[0, 1]$ 区间上的值

$$E = W_1 \times (R + S_1 + S_2) / 3 + W_2 \times \frac{G}{100} + W_3 \times \frac{1 + B - \frac{A}{7}}{2} \quad (4)$$

式中, A 是运动特性的 catia 评分, 7 是运动特性满分时候的值, A 除以 7 是去单位化变成 0 到 1 之间无量纲的小数; 运动特性与平衡率成正比, 与 catia 评分成反比, 所以是 $B - A/7$, 这个值变化区间为 $(-1, 1)$, 为了把它变为 $(0, 1)$ 之间的量纲一变量, 进行 $(1 + B - A/7) / 2$ 处理即得; W_i 为各部分的权值, 依据实际情况在 $(0, 1)$ 之间选取, 且满足 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

2.2 生产作业复杂度评价指标的建立

由前述可知, 人的认知过程是一个信息接收、处理与指导行为的过程, 因而信息是影响人认知过程复杂度的关键因素。进行认知心理分析, 就是为了降低人在认知过程中的不确定性, 提高作业信息与人认知过程的相容性。在生产过程中, 随着操作者需要处理的信息量和信息间关系复杂度的增加, 操作者获取准确有用信息的不确定性也在增加。因

而进行作业复杂度的评价就是对操作者生产过程中需要接收、处理和输出的信息的不确定性进行评价。

2.2.1 作业信息获取过程评价

由前述可知: 信息获取是人进行认知操作的第一步, 该过程的效果将决定后续工作的生产性。信息的获取过程, 即人对外界信息的感知过程, 人对信息的感知效果会受到多方面因素的影响, 如信息的数量、信息的清晰程度、信息的多样性等。生产过程中的信息主要有四类: 产品信息 X_1 、工艺信息 X_2 、工装信息 X_3 和场地信息 X_4 。产品信息是指任务所需加工的产品及其配件的数量, 例如, 对于机加或焊接工序则是指加工或焊接产品的数量; 对于装焊工序则指所需装配的配件数量。工艺信息是指完成任务所需要加工工艺的种类和数量; 工装信息是指完成产品加工所需要工位器具或设备的种类、数量和使用次数; 场地信息则是指完成任务所需加工场地的种类和数量。本文以信息关系之间的复杂程度来度量信息获取的复杂度。对于任意作业信息变量 X 具有 n 个可能的取值 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 假设作业信息变量之间具有特定调用或被调用的关系, 若两信息变量之间的关系有 $r = (\text{自身关系}, \text{调用关系}, \text{被调用关系}, \text{无关系}) = (1, 1, 1, 0)$ 。记 L_i 为第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个信息变量与其他信息变量的关系和, L 为所有信息变量的关系之和。则作业信息变量 X 的复杂度可表示为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

式中, $p_i = \frac{L_i}{L}$ 为信息 i 的关系和占该类信息关系总

量的比例, 且 $L = \sum_{i=1}^n L_i$ 。

根据上述对生产作业复杂度的定义, 可知信息获取复杂度的具体计算方法如下。

对于任务 P 含有 n_1 个产品变量 $X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_1})$, 产品变量的关系总和为 L_1 , 每个产品变量 x_{1i} 的关系之和为 L_{1i} , 由此可计算得到 $p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n_1})$, 则基于产品的信息获取复杂度为

$$H(X_1) = - \sum_{i=1}^{n_1} p_{1i} \log_2 p_{1i}$$

式中, $\sum_{i=1}^{n_1} p_{1i} = 1$; $p_{1i} = \frac{L_{1i}}{L_1}$ 。

以此类推, 可以获得对于任务 P 含有 n_2 个工艺类型变量 $X_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n_2})$ 、 n_3 个工装变量 $X_3 = (x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n_3})$ 、 n_4 个场地变量 $X_4 = (x_{41}, x_{42}, \dots, x_{4n_4})$ 的信息获取复杂度。

$$H(X_2) = -\sum_{i=1}^{n_2} p_{2i} \log_2 p_{2i}$$

式中, $\sum_{i=1}^{n_2} p_{2i} = 1$; $p_{2i} = \frac{L_{2i}}{L_2}$ 。

$$H(X_3) = -\sum_{i=1}^{n_3} p_{3i} \log_2 p_{3i}$$

式中, $\sum_{i=1}^{n_3} p_{3i} = 1$; $p_{3i} = \frac{L_{3i}}{L_3}$ 。

$$H(X_4) = -\sum_{i=1}^{n_4} p_{4i} \log_2 p_{4i}$$

式中, $\sum_{i=1}^{n_4} p_{4i} = 1$; $p_{4i} = \frac{L_{4i}}{L_4}$ 。

用于描述信息获取复杂度的信息熵为

$$H(X) = -\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_j} p_{ji} \log_2 p_{ji} \quad (6)$$

式中 n_j ——第 j 类信息的信息数量;

p_{ij} ——第 j 类的第 i 个信息关系和占 j 类信息关系总量的比例。

该信息熵反映了四类生产信息关系的不确定性,即在信息获取阶段信息关系的复杂度,信息关系越复杂,操作者的信息获取复杂度也越大。

2.2.2 作业信息加工过程评价

信息加工过程是人通过感知获得信息后的大脑活动,是人的认知过程的核心内容。信息加工是人们对获得的外界信息进行整理和权衡、并确定有效信息的复杂过程。本文研究的作业信息加工过程,并不包含人的记忆形成过程,人获得外界刺激后所获得的信息都是已经存在于人的大脑中的经验信息,通过整理既有信息从而获得新的有效信息。

为了有效度量信息加工过程的复杂程度,本文引入有效信息链的概念。有效信息链是指经过人的大脑对生产过程中的各类信息进行处理而获得的信息组合,这种信息组合在生产活动中是实际存在的,人进行信息加工就是从繁杂的信息中获取有效信息链。在结构件生产中,有效信息链必须能够包含四类生产信息,即场地、产品、工位器具和工艺,从而实现对生产过程有效信息的真实描述,即在什么地方、对什么产品、使用何种工装设备、做出何种操作。

假设信息加工过程中的信息种类数为 $I = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$,且所有有效信息链涉及的有效信息总量为 F 。对于任意一种生产信息 i ,在有效信息链中出现的次数为 f_i ,则定义为生产信息 i 的信息处理率,即信息 i 在大脑进行信息处理过程中出现的频率。基于该理论,可以获得信息加工的信

息熵为

$$H(I) = -\sum_{i=1}^I p_i \log_2 p_i = -\sum_{i=1}^I \frac{f_i}{F} \times \log_2 \frac{f_i}{F} \quad (7)$$

2.2.3 作业信息输出过程评价

信息输出过程是人认知过程的最后一个阶段,是记忆信息指导操作行为的过程。所谓信息输出过程,输出的是经过大脑加工、权衡和确定的有效信息,并将这些有效信息不断输送给效应器,从而实现指导身体运动的行为过程。操作员在对加工获得的有效信息链进行输出的过程中,需要注意力的参与,并且对于越复杂的有效信息链,需要的注意力强度越高。为了完成有效信息的输出进而指导操作行为,操作员需要对有效信息链中的每一种信息进行关注,因而信息在有效信息链中出现的频率越高,则该信息需要操作员的注意力程度就越高。据此,本文给出信息输出过程的复杂度评价方法如下。

假设经过信息加工确定该任务具有 m 条有效信息链,对于第 i 条有效信息链包含信息量为 m_i ,则信息加工过程需要处理的信息总量为

$$M = \sum_{i=1}^m m_i$$

则任意一条有效信息链在进行信息输出时所包含的信息率为 $p_i = m_i / M$,由此可知信息输出过程的信息熵为

$$H(M) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i = -\sum_{i=1}^m \frac{m_i}{M} \times \log_2 \frac{m_i}{M} \quad (8)$$

在信息输出过程中,操作员的注意力是有限的,对不同生产信息的关注将操作员的注意力进行了分散,分散的越平均,说明对不同加工信息的关注同等重要,信息输出也就越复杂。

2.2.4 生产作业复杂度整合

基于上述对生产作业复杂度的分析可知,认知复杂度受到信息获取过程、信息加工过程和信息输出过程的影响,且以信息熵的形式表现为三个过程的复杂度,本文假设三个过程对作业复杂度的影响权重分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 依据实际情况在 $(0, 1)$ 之间选取,且满足 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$,则使用这三个过程复杂度表达的生产作业复杂度的值可表示如下

$$C = w_1 H(X) + w_2 H(I) + w_3 H(M) \quad (9)$$

式中 $H(X)$ ——作业信息获取复杂度;

$H(I)$ ——作业信息加工复杂度;

$H(M)$ ——作业信息输出复杂度。

2.3 生产作业的时间压力

这一部分内容与作业所在的生产组织模式有

关,就流水生产而言,作业的时间压力与流水线的节奏特性有关,操作者所承受的时间压力会随着生产节奏性由强到弱而发生相应的变化。为此,本文定义时间压力为:完成作业所需时间与作业时间定额的比,即

$$T_p = \frac{T}{CT} \quad (10)$$

式中 T_p ——时间压力指标值;

T ——任务时间(s);

CT ——任务时间定额(s)。

2.4 生产作业的可操作性评价

如前所述,生产作业的可操作性(Operability of production job, OPJ)是生产作业容易度、作业复杂度和时间压力的函数,即有

$$OPJ = f(E, C, T_p) \quad (11)$$

显然,生产作业的可操作性将随着生产作业容易度的增加而增加,随着作业复杂度的增加而减小,随着时间压力的增加而减小,因此,我们定义生产作业的可操作性(OPJ)定量评价指标如下

$$OPJ = \alpha \times E + \frac{\beta}{C} + \frac{\gamma}{T_p} \quad (12)$$

式中 α, β, γ ——权系数。

这些权系数视生产任务所在领域或生产组织模式的不同而不同。例如,在核能发电站主控室,汽车飞机的驾驶室中,人们对任务复杂度的关注程度要远大于对任务操作容易度的关注程度;而在结构件生产现场,人们对两者的关注程度可能是相同的,或者更关注作业容易度;对自由节拍流水生产,人们可以不关心时间压力问题;而在强制节拍流水生产中,时间压力是导致产品质量问题及工人疲劳的重要因素。

3 结构件生产作业可操作性案例分析

本文将以随车起重机一伸臂成品拼焊作业为例使用本文提出的分析评价方法对结构件生产作业的可操作性进行评价,其他类型作业的分析过程与之相同。此外,在本案例中,由于生产现场是按计件制下的自由节拍生产,因此,工人感觉到的时间压力不大,因此,本案例忽略对时间压力的探讨。

3.1 拼焊作业容易度评价

由前述可知,作业容易度评价体系包括三个方面的内容:作业空间评价、作业姿势评价和动作特性评价。一伸臂成品拼焊作业属性如表 2 所示。

表 2 一伸臂拼焊作业属性描述

生产特征				所需资源			
系统	部件	过程	步骤	原料	人	设备	场地
变幅机构	伸缩臂	配件装配	安装、测量、点焊	一伸臂臂体(1件) 外协组件(3件)	铆工 (1名)	同轴度定位器、锤子、焊枪、焊床、 支撑定位器、扳手、尺子(各1件)	焊床、 配件区

(1) 作业空间指标计算,从一伸臂配件焊装作业任务特征属性可知,该作业任务共需 7 种工装器具。图 3 为该作业任务的立体空间与平面解析图,其中,焊枪和焊床上焊接点的位置处于人体模型正常作业空间内;锤子、支撑定位器和扳手在水平面区域上的正常人体作业区间内,但在竖直方向上却不在正常人体作业空间内,即作业过程中需要弯腰拿取;同轴度定位器和尺子摆放位置较远,不在正常人体作业空间内。即 $r=2$,所以该作业的工具伸手可达率 $R=2/7=0.286$ 。

操作员根据作业习惯和特征对焊床、焊枪、定位支撑器和扳手四种工具的摆放位置较固定,即在使用过程中不需要注意力去寻找,其余 3 种器具均需要操作员去寻找,所以定置率 $S_2=4/7=0.571$ 。

(2) 作业姿势指标计算,一伸臂臂尾外协组件焊装作业包的作业姿态属于立姿作业,通过 CATIA 建立的作业姿态模型如图 4 所示。

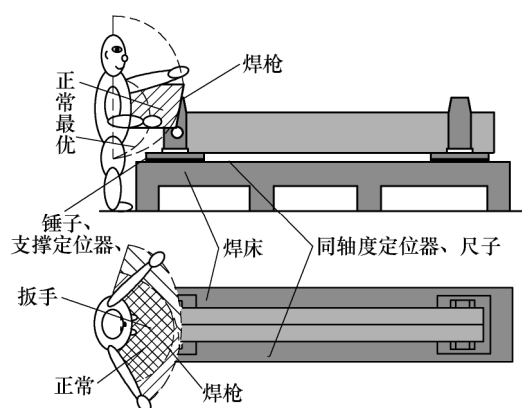


图 3 一伸臂配件装焊作业立体空间与平面解析图

在一伸臂臂尾外协组件装焊的过程中,按工艺要求,需要按固定顺序使用的工装器具有焊床、同轴度定位器、支撑定位器、扳手和焊枪 5 个;其余的锤子和尺子的使用没有固定顺序,可能出现在任何步骤之中,所以固定顺序率 $S_1=5/7=0.714$ 。另外,在 7 件工装器具中,虽然没有划定定置管理区域,

但是设置作业姿态首选角度，通过作业姿态评价模块对操作者的腰部、胸部、颈部、肩部、手臂、前臂和手掌 7 个主要作业部位进行姿态分析，得到该作业的操作者操作姿态评分如图 5 所示，据此，可以得到该作业的综合评分为

$$G = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 G_i = (31.8 + 40.4 + 87.3 + 55 + 69.4 + 69.6 + 76.9 + 44.3 + 59.9 + 73.1 + 69.1) / 7 = 61.5$$

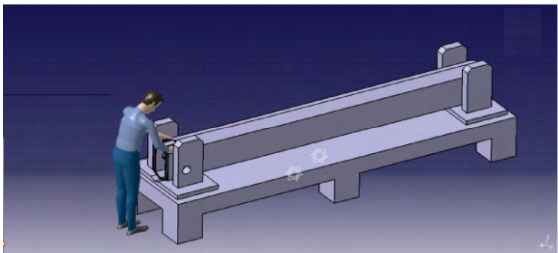


图 4 一伸臂臂尾组件装焊作业人体数字模型

(3) 运动特性指标计算，通过建立的 CATIA 人体作业姿态分析模型，对一伸臂臂尾外协组件安装

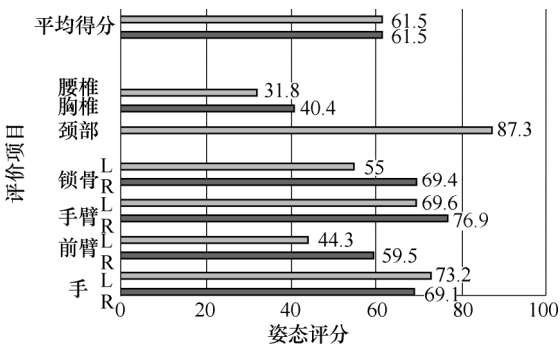


图 5 一伸臂臂尾组件装焊作业人体姿态评分

任务进行 RULA 快速上肢评价，该任务属于间歇作业任务，其中，操作者的操作频率为每分钟小于四次，评价结果如表 3 所示。则一伸臂臂尾外协组件焊装任务的 RULA 快速上肢评价指标得分为

$$A = (A_1 + A_2) / 2 = (3 + 4) / 2 = 3.5$$

从表 3 中还可以看出双手作业的动作数 d 为 8，动作总数量 D 为 30，则双手作业平衡率 $B = 8 / 30 = 26.67\%$ 。

表 3 一伸臂臂尾装焊任务双手作业分析与 RULA 评价

编号	作业描述	左手				右手				作业描述
		操作	检查	搬运	等待	操作	检查	搬运	等待	
1	抓取外协组件1	●	□	→	D	●	□	→	D	抓取外协组件2
2	将外协组件带到焊床	○	□	→	D	○	□	→	D	将外协组件带到焊床
3	放下外协组件1	●	□	→	D	●	□	→	D	放下外协组件1
4	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	抓取同轴度定位器
5	安装同轴度定位器	●	□	→	D	●	□	→	D	安装同轴度定位器
6	抓取锤子	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
7	锤子交给右手	●	□	→	D	●	□	→	D	锤子交给右手
8	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	敲击同轴度定位器
9	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	放下锤子
10	抓取支撑定位器	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
11	调整支撑定位器	●	□	→	D	●	□	→	D	调整支撑定位器
12	拿着支撑定位器	○	□	→	D	●	□	→	D	抓取安装扳手
13	拿着支撑定位器	○	□	→	D	●	□	→	D	拧紧支撑定位器
14	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	放下扳手
15	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	抓取尺子
16	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	测量
17	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	放下尺子
18	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	拿起锤子
19	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	敲击调整
20	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	放下锤子
21	抓取外协组件3	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
22	将外协组件带到焊床	○	□	→	D	○	□	→	D	空闲
23	放下外协组件3	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
24	安装外协组件3	●	□	→	D	●	□	→	D	安装外协组件3
25	抓取锤子	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
26	敲击调整外协组件3	●	□	→	D	●	□	→	D	敲击调整外协组件3
27	放下锤子	●	□	→	D	○	□	→	D	空闲
28	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	抓取焊枪
29	防护	○	□	→	D	●	□	→	D	焊接
30	空闲	○	□	→	D	●	□	→	D	放下焊枪
统计		13	0	2	15	21	1	1	7	
		RULA:3 空闲率: 50%				RULA:4 空闲率: 23%				

(4) 作业容易度整合，按照式(3)，这里视各指标权值相等，均取为 1/3，则一伸臂臂尾外协组件拼焊作业任务的作业容易度评价指标取为

$$E = \frac{1}{3} \times \left(\frac{R + S_1 + S_2}{3} \right) + \frac{1}{3} \times \frac{G}{100} + \frac{1}{3} \times \frac{1 + B - \frac{A}{7}}{2} = 0.507$$

3.2 拼焊作业复杂度评价

依据前述任务操作信息的定义方法，一伸臂的臂尾外协组件成品拼焊作业的四种产品信息变量如下。

具有 $n_1 = 4$ 个产品变量， $X_1 =$ (一伸臂臂体，外协组件 1，外协组件 2，外协组件 3)。

具有 $n_2 = 3$ 个工艺变量, $X_2 = (\text{安装}, \text{测量}, \text{点焊})$ 。

具有 $n_3 = 7$ 个工装变量, $X_3 = (\text{同轴度定位器}, \text{支撑定位器}, \text{扳手}, \text{焊枪}, \text{焊床}, \text{锤子}, \text{尺子})$ 。

具有 $n_4 = 2$ 个场地变量, $X_4 = (\text{焊床工作台}, \text{外协件暂存区})$ 。

(1) 信息获取复杂度指标, 在信息获取阶段, 存在以下四种信息关系: 产品加工顺序关系、工艺先后顺序关系、工装器具使用关系和场地使用关系, 如图 6 所示。

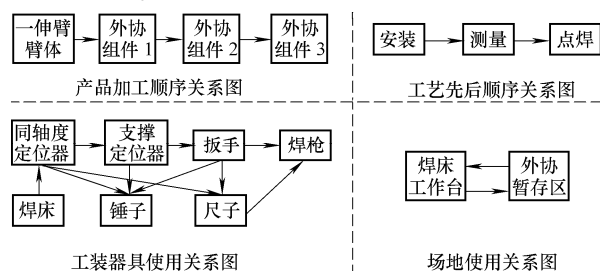


图 6 一伸臂臂尾外协组件拼焊作业信息关系图

根据产品、工艺、工装和场地四类信息的关系

图, 可以获得各信息之间的关系矩阵, 并计算得到每个信息变量的关系之和以及每一类信息变量的关系总和, 从而得到每类信息变量的复杂度, 如表 4~7 所示。基于上述计算, 依据式(5)可获得一伸臂臂尾外协组件拼焊作业信息获得复杂度为

$$H(X) = -\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_j} p_{ji} \log_2 p_{ji} = 1.97 + 1.556 + 2.756 + 1 = 7.282$$

(2) 信息加工复杂度指标, 对于一伸臂臂尾外协组件拼焊作业, 具有以下 5 条有效信息链, 如图 8 所示。即可计算获得在执行该任务中所需的有效信息总量为

$$M = \sum_{i=1}^m m_i = 4 + 9 + 7 + 7 + 7 = 34$$

已知一伸臂臂尾外协组件拼焊作业含有信息种类 I 为 16 种, 每一类信息在输出过程中需要的注意力分别为(以四类信息列出的顺序标记) $p_1 = 0.118$, $p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 0.088$, $p_6 = p_7 = 0.029$ 。

表 4 产品信息变量关系矩阵

变量	关系 $r=(1,0)$				关系和	p_{2i}	$-p_{2i} \log_2 p_{2i}$
	一伸臂臂体	外协组件 1	外协组件 2	外协组件 3			
一伸臂臂体	1	1	0	0	2	0.2	0.464
外协组件 1	1	1	1	0	3	0.3	0.521
外协组件 2	0	1	1	1	3	0.3	0.464
外协组件 3	0	0	1	1	2	0.2	0.521
总计	—	—	—	—	10	1	1.97

表 5 工艺信息变量关系矩阵

变量	关系 $r=(1,0)$			关系和	p_{2i}	$-p_{2i} \log_2 p_{2i}$
	安装	测量	点焊			
安装	1	1	0	2	0.286	0.516
测量	1	1	1	3	0.428	0.524
点焊	0	1	1	2	0.286	0.516
总计	—	—	—	7	1	1.556

由此, 按照式(6)计算可得到执行该任务所需信息加工的复杂度为

$$H(I) = -\sum_{i=1}^I p_i \log_2 p_i = 3.753$$

(3) 信息输出复杂度指标, 根据图 7 中实际生产过程的有效信息链可知, 信息输出总量为 $M = 34$ 。每条有效信息链 i 包含的信息量分别为 $m_1 = 4$, $m_2 = 9$, $m_3 = m_4 = m_5 = 7$ 则每条有效信息链包含的信息率为: $p_1 = 4/34$, $p_2 = 9/34$, $p_3 = p_4 = p_5 = 7/34$ 。按式(7)可得信息输出过程的复杂度为

表 6 工装器具信息变量关系矩阵

变量	关系 $r=(1,0)$							关系和	p_{4i}	$-p_{4i} \log_2 p_{4i}$
	同轴	支撑	扳手	焊枪	焊床	锤子	尺子			
同轴	1	1	0	0	1	1	1	5	0.185	0.450
支撑	1	1	1	0	0	1	0	4	0.148	0.408
扳手	0	1	1	1	0	1	1	5	0.185	0.450
焊枪	0	0	1	1	0	0	1	3	0.112	0.354
焊床	1	0	0	0	1	0	0	2	0.074	0.278
锤子	1	1	1	0	0	1	0	4	0.148	0.408
尺子	1	0	1	1	0	0	1	4	0.148	0.408
总计	—	—	—	—	—	—	—	27	1	2.756

$$H(M) = -\sum_{i=1}^5 p_i \log_2 p_i = 2.278$$

表 7 场地信息变量关系矩阵

变量	关系 $r=(1,0)$		关系和	p_{2i}	$-p_{2i} \log_2 p_{2i}$
	焊床工 作台	外协暂 存区			
焊床工作台	1	1	2	0.5	0.5
外协暂存区	1	1	2	0.5	0.5
总计	—	—	4	1	1

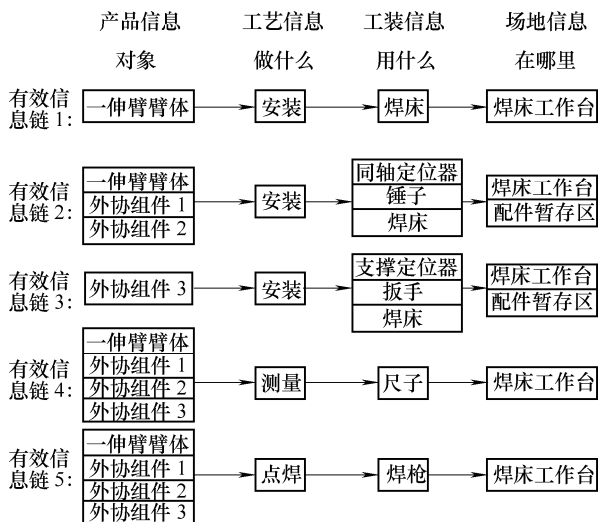


图 7 一伸臂臂尾外协组件拼焊作业有效信息链

(4) 拼焊作业复杂度，根据前述计算，并视在该任务执行过程中信息获取、加工与输出同等重要，取权值均为 1，则按照式(8)可得一伸臂臂尾外协组件拼焊作业复杂度评价价值如下

$$C = w_1 H(X) + w_2 H(I) + w_3 H(M) = 7.282 + 3.753 + 2.278 = 13.31$$

3.3 拼焊作业的可操作性评价

在本例中，作者假设操作容易度和操作复杂度对该作业可操作性的贡献是均等的，不考虑时间压力的影响，即在式(11)中， α, β 分别均取为 1， γ 取为零，则拼焊作业的可操作度值为

$$OPJ = 1 \times 0.507 + \frac{1}{13.313} = 0.5821$$

由上述计算可知：作业复杂度越大对该任务的可操作性影响就越小，为了提高复杂度的权重，我们可以赋予 β 一个较大的值；而操作容易度与任务的可操作性是成正比的，容易度值越大，该作业的可操作性就越强。

4 结论

(1) 本文所建立的人的操作行为模型是为生产

作业可操作性分析模型框架服务的，旨在使生产作业的可操作性分析建立在逻辑合理的认知心理学基础上，是实用可操作层面上的，追求宏观逻辑合理，而不纠结于心理学研究上的微观正确。

(2) 本文所建立的作业可操作性分析理论框架模型综合考虑了完成作业所需要的作业容易度、作业复杂度以及时间限制因素，并建立起完备的作业复杂度与作业容易度评价体系及其相应的各种评价指标的测度方法。

(3) 案例研究证明了本文所提出的作业可操作性分析理论框架模型的合理性，及作业复杂度与作业容易度评价体系及其相应的各种评价指标测度方法的可行性。尽管本文的研究是以结构件生产作业的分析为背景开展的研究，但分析框架具有普适性，测度方法结合具体应用背景进行修改完全可以推广应用于许多不同的领域。本文提出的作业可操作性框架模型可为任务分配、操作者选择和训练、工作组织以及绩效预测提供有用的信息。

尽管本文仅给出一个结构件焊接生产案例，但是本文提出的生产任务可操作性评价模型、框架和方法具有普适性。例如，在以认知操作为主的场合，如核电站电控室的操作，那么仅考虑操作的复杂性即可，应急状态可考虑时间压力；如果针对分工很细，且已标准化的装配操作，可忽略操作的复杂性，仅考虑操作的容易度即可，如为固定强制节拍情况，可考虑时间压力；对于未来宇航器中的操作及未来工业 4.0 时代含有大量信息需要处理的智能制造系统中的操作，由于需要操作者在进行大量的信息加工基础上，尚需要完成具有一定工效学要求的操作，本文提出的方法是一种非常适用的方法，可以说本文提出的方法适用于所有任务类型，具有普适性。

但是本文的研究依然处于初级阶段，还有很多问题有待进一步的研究，尽管依据本文的理论研究成果可以计算出作业复杂性的定量评价指标值，并可依据这一值对不同作业的可操作性进行对比评价，但我们尚不知一个作业的可操作性指标值在多大时这个作业就不可操作了？另一个问题是在可操作性评价指标计算中如何取作业容易度与作业复杂度的权值呢？应该考虑那些因素来选择这两个权值，这些问题是本文有待进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] HACKMAN R. Toward understanding the role of tasks in behavioral research [J]. Acta Psychologica, 1996, 31: 97-128.
- [2] BENJAMIN W, FREIVALDS A. Methods, standards and work design 10thed[D]. New York: McGraw Hill

- Company, 1999.
- [3] CHIPMAN S, SCHRAAGEN, J, SHALIN, V. Introduction to cognitive task analysis [M]. NJ :Lawrence Erlbaum Associates, 2000.
- [4] COOKE N. Varieties of knowledge elicitation techniques [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1994 , 41 : 801-849.
- [5] WEI J , SALVENDY G. The cognitive task analysis methods for job and task design : Review and reappraisal [J]. Behaviour and Information Technology, 2004, 23 : 273-299.
- [6] ROTHROCK L, HARVEY C, BURNS J. A theoretical framework and quantitative architecture to assess team task complexity in dynamic environments [J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2005, 6(2) : 157-71.
- [7] PARK J, JEONG K, JUNG W. Identifying cognitive complexity factors affecting the complexity of proceduralized steps in emergency operating procedures of a nuclear power plant [J]. Reliability Engineering and System Safety , 2005, 89(2) : 121-136.
- [8] CAMPBELL D. Task complexity : A review and analysis [J]. Academy of Management Review, 1988, 13(1) : 40-52.
- [9] LIU P, LI Z. Task complexity : A review and conceptualization framework [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(6) : 553-568.
- [10] LIU P, LI Z. Comparison between conventional and digital nuclear power plant main control rooms : A task complexity perspective, Part II: Detailed results and analysis [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2014, 44(3) : 3-11.
- [11] HAM D H, PARK J, JUNG W. Model-based identification and use of task complexity factors of human integrated systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 100 : 33-47.
- [12] BONNER S. A model of the effects of audit task complexity [J]. Accounting Organizations and Society, 1994, 19 (3) : 213-234.
- [13] HART S, STAVELAND L. Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research[M]. Amsterdam : North Holland Press, 1988.

作者简介：孔繁森(通信作者)，男，1965 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为工厂设计与规划，制造系统建模仿真与优化，以人为核心的生产工程问题。
E-mail : kongfs@jlu.edu.cn