

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0896

基于时间-多资源占用的工作负荷评估模型

田书婕^{1,2}, 王波^{1,*}, 王丽¹, 续丹²

(1. 中国航天员科研训练中心 人因工程重点实验室, 北京 100094; 2. 西安交通大学 工业设计系, 西安 710049)

摘 要: 为了测量和评估航天员在轨维修的工作负荷, 在时间线分析法和多资源占用理论的基础上, 确定了用间接获取的资源需求占用率、直接测量的占用时间 2 个维度来进行工作负荷主客观综合评估, 并提出基于动态时间窗口的时间-多资源占用的工作负荷评估模型。为了验证模型的有效性, 搭建典型在轨维修任务——液体回路子系统的维修试验环境, 招募被试, 获取主观工作负荷数据, 进行维修视频采集和动素时间测定。结果表明, 本文模型的工作负荷值与主观工作负荷评估值显著相关且吻合较好, 验证了其有效性。

关键词: 在轨维修; 多资源理论; 时间线分析法; 工作负荷; 评估模型

中图分类号: R857.1; B842.1

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2017)12-2497-08

随着航天技术的发展, 空间站结构、组成日趋复杂, 性能、技术水平不断提高^[1]。空间站在轨运行时, 不可避免发生故障^[2]。为保障空间站在轨持续、稳定工作, 合理的空间站在轨维修成了主要途径和必要手段^[3]。空间站的安全、可靠、持续和稳定运行离不开在轨维修^[2]。由于人的信息处理能力、记忆和注意力等资源有限^[4], 而航天员的在轨任务繁重, 且时间非常宝贵, 不平衡的工作负荷可能导致航天员绩效降低甚至出现失误^[4]。因此, 极有必要针对典型在轨维修任务进行工作负荷评估, 这对于维修任务的规划、确定合理的维修作业量和整个飞行程序的设计及优化具有十分重要的意义。

在轨维修任务具有作业环境复杂、作业程序多样、高强度、长期性、航天员心理应激程度较高等特点^[5]。典型工作负荷评估方法包括辅助任务评价法、生理指标评价法、主任务评价法、主观评价法。辅助任务评价法对实验设计控制要求较高, 生理指标评价法的生理信号采集程序较繁琐,

采集环境要求较高, 指标应激因素复杂, 均离在轨维修工作负荷测量和评估的实际应用还有一定距离^[6]。目前, 针对在轨维修的工作负荷评估主要使用主任务评价法和主观评价法。考虑到便于在轨测量、实施及未来空间站任务的规划和设计, 主任务评价法成为了国内外学者研究的重点。主任务评价法最初是将完成任务花费的时间长短作为衡量工作负荷多少的指标^[7]。但是后来发现, 完成任务时间长短跟个人能力和任务复杂程度有很大关系, 并不能准确评估工作负荷, 进而提出了时间占用率的概念^[8]。Miller^[9]在时间占用率的基础上提出了针对串行任务的动态评估时间线分析法, 定义了9个资源通道并提出了动态时间窗口的概念, 将动作分解到各个资源通道, 将各个通道的时间占用率之和作为工作负荷的评估指标。但是, 当各个通道时间占用率相同时, 任务的复杂度不同, 也会造成工作负荷的不同, 将通道的时间占用率作为评估指标存在不足。McCracken 和 Aldrich^[10]在 Wickens 和 Yeh^[11]的多资源理论基

收稿日期: 2016-11-28; 录用日期: 2017-03-06; 网络出版时间: 2017-03-23 18:22

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170323.1822.005.html

基金项目: 人因工程重点实验室基金 (SYFD130061813, 160051812); “十三五”装备预研共用技术基金 (41402060101); 载人航天四批预研基金 (030602)

* 通讯作者: E-mail: wowbob@139.com

引用格式: 田书婕, 王波, 王丽, 等. 基于时间-多资源占用的工作负荷评估模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2497-2504. TIAN S J, WANG B, WANG L, et al. Workload evaluation model based on occupation of time and multi-resource[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2497-2504 (in Chinese).

础上,提出了适用于串行任务的视觉-听觉-认知-运动 (Visual Auditory Cognitive Psychomotor, VACP) 的多资源理论评估模型,将任务的多通道资源占用程度作为评估工作负荷的指标,该方法虽很好地解释了不同任务对人的资源的需求,但却忽略了时间积累的影响作用。而 Hamilton 和 Bierbaum^[12] 提出了适用于并行多任务的工作负荷任务分析 (Task Analysis Workload, TAWL) 评估模型,实际上是综合了时间线分析和 VACP 多资源理论分析,借鉴时间线分析法的形式,基于多资源理论来计算时间窗内的所有任务各个通道的资源占用程度,以此作为评估指标。上述评估模型都是基于单维度指标进行评估,而单维度的工作负荷评估指标不能精确评估工作负荷和描述工作负荷特性^[13]。此外,现有的工作负荷评估模型也不能很好地同时处理串并行任务。

为此,本文在时间线分析法的基础上,从多资源占用理论和时间占用角度出发,剖析工作负荷构成,提出资源需求占用率和占用时间 2 个维度主客观结合的工作负荷评估指标,建立适用于串并行任务、基于动态时间窗口的时间-多资源占用的工作负荷评估模型。

为验证本文方法的有效性,以液体回路子系统这一典型在轨维修任务为研究对象,开展地基维修试验,采集主观评估结果及操作视频,并将主观评估值、目前现有评估模型计算值与本文提出的模型计算值相比较,验证模型的准确性和有效性。

1 模型

为了便于实施和测量、简化工作负荷的评估过程及保证评估结果的准确性,使空间站在轨维修任务的工作负荷评估更加便捷和高效,本文基于时间线分析法和多资源占用理论,确定了间接获取的资源需求占用率和直接测量的占用时间 2 个维度主客观综合的工作负荷评估指标,提出了基于动态时间窗口的时间-多资源占用的工作负荷评估模型 (workload evaluation model based on time and multi-resource),简称 TMR 模型,并对其进行了描述。

1.1 评估指标的确定

从工作负荷的构成出发,本文提出了资源需求占用率及占用时间 2 个指标。工作负荷由脑力和体力负荷组成^[14],从多资源占用理论和信息加工角度出发,脑力负荷与人的感知和认知活动有关,也就是与多资源占用理论中视觉 (Visual, V)、听觉 (Auditory, A) 及认知 (Cognitive, C) 相关,主

要集中在信息获取和信息加工阶段^[15];体力负荷与人操作或运动有关,与多资源占用理论中的运动 (Psychomotor, P) 相关,集中在操作反应阶段^[11, 15]。通过 V 和 A 的信息获取、C 的信息加工和反应的运动 P 描述了任务执行的整个过程^[15],因此,可以通过信息加工模型来解释任务执行时人从信息加工到反应的整个过程,并用多资源占用理论表示工作负荷的构成。因此选取基于多资源占用理论的资源需求占用率作为评估指标,加上客观的、具有积累效应的占用时间指标,能够更加全面地反映工作负荷的本质。此外,相比于传统的单维度工作负荷评估模型中仅认为时间占用或资源占用对工作负荷造成影响,本文提出的模型考虑了两者的相互关系,将可直接观测的客观占用时间、间接获取的资源需求占用率融合,使形成的主客观综合的工作负荷评估模型具有实际应用意义。

1.2 评估模型的建立

以占用时间及资源需求占用率作为工作负荷的评估指标,基于动态时间窗口,建立 TMR 模型。其中资源需求占用率是指在单位时间内 VACP 每个通道上资源占用程度,其含义在国内外学者的研究中均有所体现。王庄^[16]将 VACP 资源占用程度作为衡量任务复杂度和工作负荷的指标,并验证了方法的有效性; Wickens^[15]也在研究中提到了在一定时间内,各个通道资源占用程度对工作负荷的影响。本文在上述研究的基础上,提出了资源需求占用率的概念。

占用时间指的是每个动素 (任务被分解成最小的动作单元) 在 VACP 通道上的占用时间^[17]。

工作负荷表示如下:

$$W = t\xi = t \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

式中: W 为工作负荷; t 为占用时间; ξ 为资源需求占用率; λ 为资源占用程度; T 为动态时间窗口的时长。分别求导,有

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \xi = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \xi} = t \quad (3)$$

对于该模型的解释如下:

1) 工作负荷受到任务持续时间长短、对资源的占用程度的综合影响,如式 (1) 所示。

2) 若任务持续时间一致,则资源需求占用率越高,工作负荷越大,如式 (2) 所示。

3) 若资源需求占用率一致,则持续时间越长,工作负荷越大,如式 (3) 所示。

从式(1)~式(3)可以看出直接观测到的客观占用时间与间接获取的资源需求占用率之间的关系,两者的融合更加全面和符合实际。更进一步,模型中引入时间窗口,借助时间窗口的弹性、动态,可根据需要获取工作负荷的瞬时值、阶段值^[18],从而为更细致的动态评估及预测提供输入。总之,较现有工作负荷评估模型,本文方法描述和建模能力更客观、全面。

1.3 评估模型描述

操作者的每一个动作,都可以分配给人的多资源占用理论中的 VACP 4 个通道。操作的执行是 4 个通道综合运用,并分别产生相应通道的工作负荷。每个动素的资源占用情况由任务分析专家结合 VACP 标准量表^[19](见表 1)评定。本文中,依据资源需求占用率高,进一步将评定值映射为无(赋值 0)、低(赋值 0.42)、中(赋值 0.83)、高(赋值 1.25) 4 个等级。映射关系如表 2 所示。

表 1 VACP 标准量表^[19]

Table 1 Standard values of VACP scale^[19]

通道	评分	描述
视觉 (Visual)	0	不存在视觉
	1	视觉检测
	3.7	视觉辨别
	4.0	视觉检查、核对
	5.0	视觉对齐、定位
	5.4	视觉追踪、跟随
	5.9	视觉阅读
听觉 (Auditory)	7	视觉扫描、搜索、监控
	0	不存在听觉
	1	听觉检测
	2	确定声音的方向
	4.2	确定声音的方位
	4.3	验证听觉的反馈
	4.9	解释语义的内容
认知 (Cognitive)	6.6	分辨声音的特点
	7	解释声音的模式
	0	不存在认知
	1	没有意识的行为
	1.2	选择
	3.7	符号、信号的识别
	4.6	评估与判断(只考虑单方面)
运动 (Psychomotor)	5.3	编码、解码、回忆
	6.8	评估与判断(综合考虑多方面)
	7	评估、计算、换算
	0	不存在运动
	1	说话
	2.2	离散的行为(按按钮、开关等)
	2.6	连续调整
运动 (Psychomotor)	4.6	手动操纵
	5.8	离散的调节(转动旋钮、调整等)
	6.5	符号产生(书写)
	7	序列离散的手动操纵(键盘输入)

表 2 VACP 评定值与等级的映射关系

Table 2 Mapping relationship between VACP evaluation values and ranks

等级	无	低	中	高
赋值	0	0.42	0.83	1.25
评定值	0	1~3	3~5	5~7

表 2 中,等级的赋值是通过工作负荷中的“红线”理论得出,即当计算所得的工作负荷达到 80% 时,人的工作绩效开始下降,实际工作负荷已到达最高值 100%^[18,20]。经推导可知,等级赋值最高取值为 1.25,等分后,从低到高 4 个等级取值分别为 0、0.42、0.83、1.25。

假设操作者在某一时间片段内花费 100% 的有效时间操作某些可测量的任务,则其在该时间片段内承受了 100% 的工作负荷^[21]。这样,通过为不同的动素画出不同的线段,使线段的长度与这些动素的持续时间成正比,而动素是由 4 个通道资源组成的,根据实际情况,画出每个通道的持续时间,并与相应通道的资源需求占用率相乘,就可计算出某一通道的工作负荷,再将 4 个通道的工作负荷综合,得到该动素的工作负荷,如图 1 所示。

具体方法描述如下:

设动素序列为 $\{ \langle S_1, S_2, \dots, S_N \rangle \}$, 区间数 $[TO_{S_i}, TE_{S_i}] (i \in \{1, 2, \dots\})$ 中 TO_{S_i}, TE_{S_i} 代表动素 S_i 的起止时刻, 区间长度 $L_i [TO_{S_i}, TE_{S_i}] = TE_{S_i} - TO_{S_i}$ 代表动素 S_i 的持续时间, $\lambda_{V_i}, \lambda_{A_i}, \lambda_{C_i}, \lambda_{P_i} \in \{0, 0.42, 0.83, 1.25\}$ 分别为动素 S_i 的 VACP 等级值。

任取时间片长度为 TC , 则在 $[jTC, (j+1)TC]$ ($j \in \{0, 1, \dots\}$) 的时间片内, 根据时间-资源占用定义和区间数运算性质, 定义 V、A、C、P 4 个通道的时间-资源占用计算式 WL_V, WL_A, WL_C, WL_P 分别为

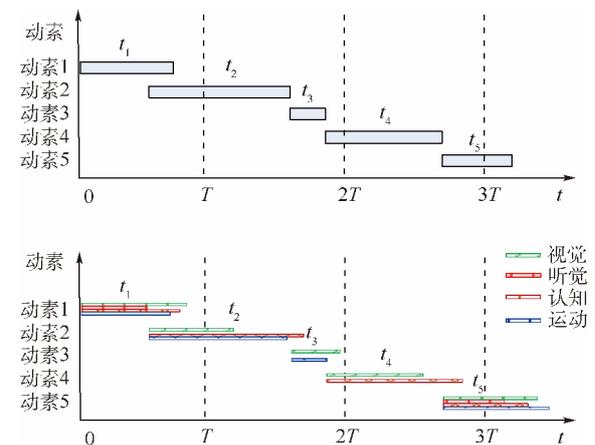


图 1 动素-时间窗分解

Fig. 1 Decomposition of the bligs-time-window

$$WL_V = \frac{U [jTC (j+1) TC] \cap \{ \cup_{i=1, \dots, N} [TO_{S_i} \mu v_{S_i} TE_{S_i}] \}}{T} \quad (4)$$

$$WL_A = \frac{U [jTC (j+1) TC] \cup \{ \cap_{i=1, \dots, N} [TO_{S_i} \mu a_{S_i} TE_{S_i}] \}}{T} \quad (5)$$

$$WL_C = \frac{U [jTC (j+1) TC] \cap \{ \cup_{i=1, \dots, N} [TO_{S_i} \mu c_{S_i} TE_{S_i}] \}}{T} \quad (6)$$

$$WL_P = \frac{U [jTC (j+1) TC] \cup \{ \cap_{i=1, \dots, N} [TO_{S_i} \mu p_{S_i} TE_{S_i}] \}}{T} \quad (7)$$

$$\mu v_{S_i} = TE_{S_i}^{-1} [\lambda_{V_i} (TE_{S_i} - TO_{S_i}) + TO_{S_i}] \quad (8)$$

$$\mu a_{S_i} = TE_{S_i}^{-1} [\lambda_{A_i} (TE_{S_i} - TO_{S_i}) + TO_{S_i}] \quad (9)$$

$$\mu c_{S_i} = TE_{S_i}^{-1} [\lambda_{C_i} (TE_{S_i} - TO_{S_i}) + TO_{S_i}] \quad (10)$$

$$\mu p_{S_i} = TE_{S_i}^{-1} [\lambda_{P_i} (TE_{S_i} - TO_{S_i}) + TO_{S_i}] \quad (11)$$

根据 Wickens^[15]资源占用理论,综合工作负荷 WL 为

$$WL = (WL_V + WL_A + WL_C + WL_P) / 4 \quad (12)$$

式(4)~式(12)即为本文提出的基于时间-多资源占用的工作负荷评估模型。

2 试验

2.1 试验设计

负荷是一种主观感受^[22],因此,基于液体回路子系统地基维修试验,利用被试对工作负荷的主观评估值来验证本文方法的有效性。此外,也通过与现有评估模型计算值比较进一步验证本文方法的有效性。通过综合工作负荷(Overall Workload, OWL)量表采集被试的主观评估值;通过 VACP 量表和视频采集,分别获取资源占用程度和动素时间,计算 TAWL、时间线分析法以及本文提出的 TMR 模型的工作负荷值。主观评估值、现有模型计算值分别与 TMR 模型计算值进行相关性分析,验证 MTR 模型的准确性、有效性。

2.2 被试

本次试验中被试一共 6 名,为中国航天员科研训练中心科研人员,均为男性,年龄在 35~38 岁之间(均值为 36.5,标准差为 1.05),右利手,视力听力正常。试验前对被试进行统一训练,使被试对液体回路子系统的维修任务操作达到熟

练程度。每次实验 2 人一组 6 人分为 3 组,每组进行 4 次试验,共进行 12 次试验。一组中包括主操作人员和辅助操作人员,主操作人员主要负责任务执行,辅助操作人员负责协助,如递取维修工具等。每组 2 人交替作为主操作人员和辅助操作人员。

2.3 仪器和测试工具

头戴摄像机、全局摄像机用来记录被试人员任务执行时的情况。头戴摄像机采集第 1 视角的数据,记录主操作人员的维修动作和细节;全局摄像机采集第 3 视角的数据,如双人交互过程,以确保维修动作数据的完整性。试验操作时调整好全局摄像机的位置,被试人员中的主操作人员佩戴头戴摄像机,记录操作动作用于动素的分析 and 统计。

考虑多维工作负荷评价量表的条目较多,一定程度对任务执行造成干扰^[23],本次试验选择执行简单、可以测量出时间窗内的整体工作负荷的单维度 OWL 量表^[18]。在主操作人员进行液体回路子系统的维修任务的过程中,每间隔 5 min(不打扰关键操作的节点),主操作人员报告自己当时的工作负荷情况,从 0 至 100 值越大表示工作负荷越大。量表如图 2 所示^[18]。

VACP 量表用来评估任务操作中资源占用情况,样式如图 3 所示。资源分为 V、A、C、P 4 个通道,每个操作时,对每个通道的主观工作负荷感受不同。各通道占用工作负荷可用 0~7 的值表示,

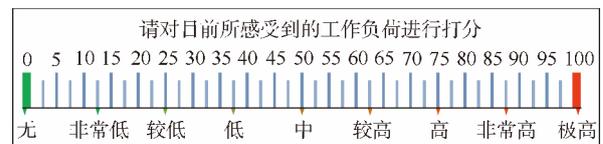


图 2 OWL 量表^[18]

Fig. 2 OWL scale^[18]

VACP量表				
负荷单元	解释	视觉V (0~7)	听觉A (0~7)	运动P (0~7)
视觉定位	用眼睛寻找指定的连接器			
手指拉	用手指拉连接器的安装销			
接	从辅助操作人员手里接物品			
递	将物品递给辅助操作人员			

图 3 VACP 量表示意图

Fig. 3 Schematic of VACP scale

评判标准根据 VACP 标准量表,如表 1 所示^[19]。VCAP 量表打分由人因专家和熟练的被试共同完成。

2.4 试验流程

试验分为试验前准备、液体回路子系统的维修任务操作以及填写量表等环节,试验流程如图 4 所示。本次维修共分为 18 个步骤、313 个动素。

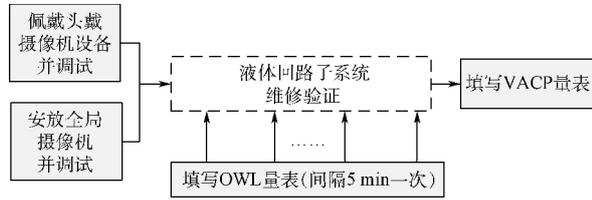


图 4 试验流程
Fig. 4 Steps of test

3 结果分析

3.1 OWL/TMR/TAWL/时间线分析结果

1) OWL 主观评估值

在进行液体回路子系统的维修试验中(约 30 min),每 5 min(时间窗为 5 min)进行 OWL 量表测量,每次试验进行 7 次统计,记录主操作人员的工作负荷值,并求出平均值,如表 3 所示。

2) TMR 模型计算值

首先根据对液体回路子系统的分析中得到的动素,以及采集的视频数据,进行动素时间的测定。其次根据 VACP 量表,对每个动素的 V、A、C、P 4 个通道占用程度进行统计取均值,本次打分包括专家 4 人,被试 6 人。最后根据模型公式计算各个通道的工作负荷,再求和,如表 3 所示。

3) TAWL 模型、时间线分析模型计算值

根据 V、A、C、P 4 个通道的占用程度值以及动素时间,由 TAWL 模型和时间线分析模型的计算公式分别求值,结果如表 3 所示。

表 3 OWL/TMR/TAWL/时间线分析结果

Table 3 Results of OWL/TMR/TAWL/timeline-analysis

时间/s	工作负荷			
	OWL	TMR 模型	TAWL 模型	时间线分析模型
0	24.17	7.65	9.60	10.07
300	62.50	109.36	141.13	97.98
600	85.83	117.45	109.67	106.35
900	82.92	111.11	185.00	101.62
1200	81.25	124.39	98.47	95.95
1500	59.58	36.84	69.07	86.48
1730	92.50	80.14	118.43	65.51

3.2 有效性验证

3.2.1 TMR 模型计算值与 OWL 主观评估值比较

在工作负荷研究中,验证模型的有效性,通常通过相关性分析来检验^[18, 24-25]。鉴于 OWL 量表和工作负荷模型得到的评估结果量纲不统一,首先利用 Z-score 标准化方法对 2 种方法的计算结果进行标准化处理;然后利用数据分析软件进行相关性分析,两者相关系数为 0.79 ($p < 0.05$) 属于显著相关。图 5 直观显示了应用 2 种方法得到的工作负荷值,2 条辅助线的走势基本同步且较为吻合,说明负荷模型具有一定的有效性和可信度。

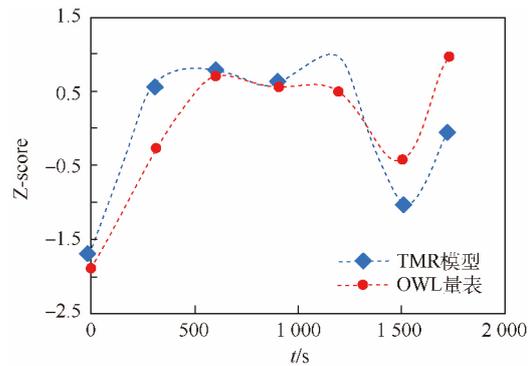


图 5 TMR 模型与 OWL 量表的对比

Fig. 5 Comparison between TMR model and OWL scale

3.2.2 TAWL 模型、时间线分析模型、TMR 模型计算值与 OWL 主观评估值比较

为了验证本文方法较之于其他方法更为有效,分别对 TAWL 模型、时间线分析模型、本文 TMR 模型、OWL 量表进行 Z-score 标准化,然后计算每种方法与 OWL 量表的相关性。TAWL 模型、时间线分析模型、本文 TMR 模型的相关性分别为 0.75 ($p < 0.05$)、0.74 ($p < 0.05$)、0.79 ($p < 0.05$) 相比之下本文提出的 TMR 模型相关性更高,与 OWL 吻合程度更高。图 6 反映了 4 种方法测得工作负荷结果。

3.3 各通道之间、各通道与整体工作负荷之间的相关性分析

通过对各个通道工作负荷与本文方法计算得到的整体工作负荷值进行相关性分析,发现 V 通道工作负荷、C 通道工作负荷及 P 通道工作负荷与整体工作负荷值相关性较高,分别为 0.89 ($p < 0.05$)、0.98 ($p < 0.05$)、0.91 ($p < 0.05$),体现了各个通道在整体工作负荷的贡献。具体相关性值如表 4 所示。

通过对各个通道工作负荷之间的相关性分析,发现 V 通道工作负荷与 C 通道工作负荷及 C 通道工作负荷与 P 通道工作负荷相关性较高,

分别为 0.93 ($p < 0.05$)、0.85 ($p < 0.05$)，如表 5 所示。表明了 V 与 C、C 与 P 存在关联性。而 V 和 C 存在关联性已被多篇论文证明，对各个通道之间关系的研究，有助于进一步对多资源进行分析。

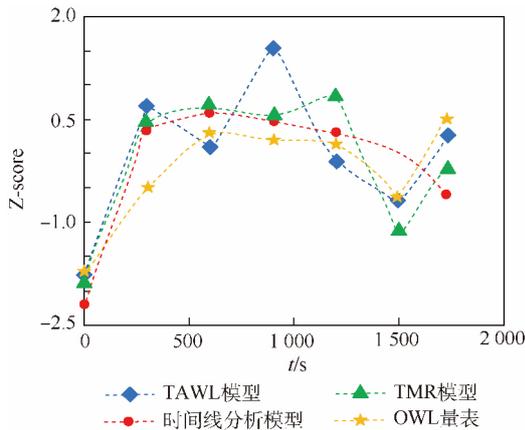


图 6 TAWL 模型、时间线分析模型、TMR 模型与 OWL 量表的对比

Fig. 6 Comparison among TAWL, timeline analysis, TMR model and OWL scale

表 4 整体工作负荷与各个通道工作负荷的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between total workload and workload of each channel

多通道	W 与 V	W 与 A	W 与 C	W 与 P
相关性	0.89	0.179	0.98	0.91

表 5 各个通道工作负荷之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between workload of each channel

多通道	V 与 A	V 与 C	V 与 P	A 与 C	A 与 P	C 与 P
相关性	0.24	0.93	0.63	0.07	0.08	0.85

4 讨论

本文在时间线分析法的基础上，基于工作负荷的构成及多资源占用理论，提出资源需求占用率和占用时间 2 个主客观指标，建立了基于动态时间窗口的多资源占用的工作负荷评估模型。通过开展液体回路子系统试验，收集操作视频数据和主观评估结果，将主观评估值与模型计算值相比较，验证了模型的有效性。同时较之于其他现有工作负荷评估模型，验证了本文模型的精确性实用性。

1) 模型具有完备性。检验工作负荷评估模型是否完备，主要在于是否能测量出工作负荷的特性^[18]。通过时间窗口的动态弹性变化，本文模型可以计算得出瞬时负荷、平均负荷、整体负荷。

当时间窗口间距为 0.5 s 时，模型计算结果可以作为瞬时负荷值；当时间窗口的间距大于 0.5 s 小于等于任务执行时间时，模型计算的是每段时间窗口内的整体负荷^[18-25]，且与 OWL 主观量表在每段时间窗口内的整体负荷值显著相关，证明了本文模型计算值的有效性和准确性。而其他 2 种特性——峰值负荷和累积负荷，可通过公式推导得到^[18]。本文模型可以对工作负荷特性进行相对精确的描述，体现了其全面性和有效性。

2) 模型体现了收缩效应。研究指出：人在接受刺激时，会产生累积效应，会有一个叠加、衰减、慢慢趋于平和的状态变化过程^[26]。而相关研究进一步表明刺激强度与感觉强度服从韦伯定律，感觉强度越强，刺激强度越大。而工作负荷是操作者的主观感受，也是一种刺激，同样也存在着累积效应^[26]。工作负荷的累积效应可以看作是一个连续变化并且前后相关的过程，过去的工作负荷状态对当前任务执行产生影响，这种影响体现为过去的工作负荷对当前工作负荷的影响，过去的工作负荷越大对当前的工作负荷影响越大。这种影响是从叠加开始，进而衰减，再到影响消失。

同时 Miller^[9] 也认为在任务执行的整段时间内，各个资源通道的时间占用，并不是占了任务执行时间的整段时间，这与资源占用需求程度有关。而模型通过对资源需求情况的等级划分，当资源需求程度低时，展现出时间占用上的收缩；当资源需求程度高时，体现了工作负荷的积累效应。

对应于本文模型，这种积累效应体现在各个通道占用时间的延长，进而影响下一时间窗口的工作负荷。这种收缩体现在某些通道占用时间的收缩，表明在该段时间内通道资源的剩余。

3) 模型具有更好的适用性。相比于以往的单维度工作负荷评估模型，本文模型从工作负荷的构成出发，从主客观 2 个角度提出了资源需求占用率和占用时间 2 个评估指标，反映了工作负荷的本质；只需收集操作者执行各个动素的时间以及专家评定的 VACP 占用程度，不影响正常操作，便于测量和实施，更具有实际应用价值。更进一步，通过数据的积累，可以形成标准规范的动素编码（包含动素占用时间以及动素对应的 VACP 占用程度），通过本文模型直接计算工作负荷值，为维修任务的规划、维修作业量的合理确定和整个在轨维修流程的设计及优化提供参考。

4) 模型的不足。①特殊环境因素（在轨失重等）可能会对工作负荷产生影响，需要进一步试验进行验证。②本文假设 4 个通道的权重一致。

需进一步开展试验,收集大量数据进行验证,优化模型中各个通道的权重,使其更符合实际。

5 结 论

1) 基于在轨维修任务,开展了液体回路子系统试验,本文建立的时间-多资源占用的工作负荷评估模型计算值与试验获得的 OWL 主观评估值显著相关,且与目前现有评估模型相比,本文提出的模型更精确和有效。

2) 解决了目前评估模型单维度准确性不高和不能同时处理串并行任务的问题,从工作负荷构成出发,提出了资源需求占用率和占用时间 2 个指标,更加全面地反映了工作负荷的本质。此外考虑了两者的相互关系,将可直接观测的客观占用时间、间接获取的资源需求占用率融合,形成主客观综合的工作负荷评估模型,更具有实际意义。

3) 从数据分析可以看出,在轨维修任务中,视觉通道和认知通道与整体工作负荷的相关性较高,是在轨维修工作负荷的主要贡献者。

参考文献 (References)

- [1] 陈善广,陈金盾,姜国华,等.我国载人航天成就与空间站建设[J].航天医学与医学工程,2012,25(6):391-396.
CHEN S G, CHEN J D, JIANG G H, et al. Achievements of manned space program and construction of space station in China[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2012, 25(6): 391-396 (in Chinese).
- [2] 陈善广,姜国华,王春慧.航天人因工程研究进展[J].载人航天,2015,21(2):95-105.
CHEN S G, JIANG G H, WANG C H. Advancement in space human factors engineering [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(2): 95-105 (in Chinese).
- [3] 陈善广,王春慧,陈晓萍,等.长期空间飞行中人的作业能力变化特性研究[J].航天医学与医学工程,2015,28(1):1-10.
CHEN S G, WANG C H, CHEN X P, et al. Study on changes of human performance capabilities in long-duration spaceflight [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2015, 28(1): 1-10 (in Chinese).
- [4] 周前祥.舱外活动航天员工作负荷评价方法的研究进展[J].载人航天,2007(1):8-12.
ZHOU Q X. Research progress on evaluation method of aerial worker's workload [J]. Manned Spaceflight, 2007(1): 8-12 (in Chinese).
- [5] 王雅,吴瑞林,周荣刚.从个体心理到人际互动——航天任务中的心理学问题[J].心理科学进展,2014,22(8):1338-1349.
WANG Y, WU R L, ZHOU R H. Psychological issues in human spaceflight: From individual psychology to human interactions [J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(8): 1338-1349 (in Chinese).
- [6] 王大鹏,谭春林,张柏楠.载人航天器在轨维修性系统设计[J].中国空间科学技术,2010,30(5):16-21.
WANG D P, TAN C L, ZHANG B N. On-orbit maintainability system design for manned spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology, 2010, 30(5): 16-21 (in Chinese).
- [7] 赵志群.典型工作任务分析与学习任务设计[J].职教论坛,2008(12):1.
ZHAO Z Q. Typical task assignment and learning task design [J]. Vocational & Technical Education Forum, 2008(12): 1 (in Chinese).
- [8] HACKOS J A T, REDISH J C. User and task analysis for interface design [J]. IEEE Transactions on Professional Communication, 1999, 42(3): 188-189.
- [9] MILLER K M. Timeline analysis program (TLA-1), final report: NASA-CR-4 44942 [R]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1976.
- [10] MCCracken J H, ALDRICH T B. Analysis of selected LHX mission functions: Implications for operator workload and system automation goals: TNAASI 479-24-84 [R]. Fort Rucker: Anacapa Sciences, 1984: 10.
- [11] WICKENS C D, YEY Y Y. The dissociation between subjective workload and performance: A multiple resource approach [C]// Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting. Los Angeles: SAGE Publications, 1983, 27(3): 244-248.
- [12] HAMILTON D B, BIERBAUM C R. Task analysis/workload (TAWL): A methodology for predicting operator workload [C]// Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting. Los Angeles: SAGE Publications, 1990, 34(16): 1117-1121.
- [13] MORAY N. Mental workload: Its theory and measurement [M]. New York: Plenum Press, 1979: 4.
- [14] KOHLMORGEN J, DORNHEGE G, BRAUN M, et al. Improving human performance in a real operating environment through real-time mental workload detection [J]. Toward Brain-Computer Interfacing, 2007: 409-422.
- [15] WICKENS C D. Multiple resources and mental workload [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2008, 50(3): 449-455.
- [16] 王庄.任务复杂度和时间压力对计算机化规程操作绩效的影响[D].北京:清华大学,2012.
WANG Z. Effects of task complexity and time pressure on operation performance of computerized procedures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012 (in Chinese).
- [17] YEE S, NGUYEN L, GREEN P, et al. Visual, auditory, cognitive and psychomotor demands of real in-vehicle tasks: UMTRI-2006-20 [R]. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute, 2006: 40-45.
- [18] XIE B, SALVENDY G. Review and reappraisal of modelling and predicting mental workload in single- and multi-task environments [J]. Work & Stress, 2000, 14(1): 74-99.
- [19] HANKINS T C, WILSON G F. A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight [J]. Aviation, Space, and Environmental Medi-

- cine, 1998, 69(4): 360-367.
- [20] RECARTE M A, NUNES L M. Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making [J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2003, 9(2): 119-137.
- [21] SOBELL L C, SOBELL M B, LEO G I, et al. Reliability of a timeline method: Assessing normal drinkers' reports of recent drinking and a comparative evaluation across several populations [J]. British Journal of Addiction, 1988, 83(4): 393-402.
- [22] JUNG H S, JUNG H S. Establishment of overall workload assessment technique for various tasks and workplaces [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2001, 28(6): 341-353.
- [23] 孙林岩. 人因工程 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. SUN L Y. Human factors engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001 (in Chinese).
- [24] 张熾. 基于任务分析的地铁行车调度工作负荷研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010. ZHANG Y. Research on subway dispatcher's workload based on task analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese).
- [25] 李金波, 许百华, 田学红. 人机交互中认知负荷变化预测模型的构建 [J]. 心理学报, 2010, 42(5): 559-568. LI J B, XU B H, TIAN X H. Construction of prediction models of cognitive load in human-machine interaction process [J]. Acta Psychologica Sinica, 2010, 42(5): 559-568 (in Chinese).
- [26] 袁科伟. 情感计算在可用性测试中应用的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2009. YUAN K W. Research of affective computing used in usability testing [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009 (in Chinese).

作者简介:

田书婕 女, 硕士研究生。主要研究方向: 维修工效、先进人机交互。

王波 男, 硕士, 助理研究员。主要研究方向: 航天人因、智能计算、体系研究。

Workload evaluation model based on occupation of time and multi-resource

TIAN Shujie^{1,2}, WANG Bo^{1*}, WANG Li¹, XU Dan²

(1. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;

2. Department of Industrial Design, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To measure and evaluate the astronauts' workload of on-orbit maintenance, based on timeline analysis and multi-resource theory, the subjective and objective comprehensive evaluation of the workload was carried out by using two dimensions of "indirect acquisition value of the resource demand occupancy rate" and "direct measurement value of the occupied time". A workload evaluation model based on dynamic time scene and time resource occupancy was put forward. In order to verify the effectiveness of the proposed model, the maintenance experiment of the liquid circuit subsystem, as a typical on-orbit maintenance task, was established. Testees were recruited to obtain the subjective workload questionnaires, maintenance videos were acquired, and the occupation time of therbligs was measured. The results reveal that the workload values of the proposed model have good agreement and significant correlation with subjective workload evaluation values. Hence the effectiveness of the workload evaluation model is validated.

Keywords: on-orbit maintenance; multi-resource theory; timeline analysis; workload; evaluation model

Received: 2016-11-28; **Accepted:** 2017-03-06; **Published online:** 2017-03-23 18:22

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170323.1822.005.html

Foundation items: Foundation of National Key Laboratory of Human Factors Engineering (SYFD130061813, 160051812); The "13th Five-Year" Equipment Pre-research Foundation on Common Technology (41402060101); Manned Space Pre-research Foundation (030602)

* **Corresponding author.** E-mail: wowbob@139.com