

舱外活动航天员工作负荷评价方法的研究进展

周前祥

(中国航天员科研训练中心)

摘要 确定合理的工作负荷是进行载人航天器人机功能分配、人机界面设计和制定飞行程序的重要依据。根据国内外相关文献,综述工作负荷的概念、影响因素、工作负荷的特点与评价方法以及预测模型。

关键词 航天员 载人航天器 工效学要求 工作负荷 预测模型

1 引言

根据我国载人航天工程发展的“三步走”战略,在突破航天员出舱活动技术和航天器的交会对接技术后,建设空间实验室或空间站就成为今后我国载人航天面临的重要任务。由于受到运载火箭发射能力的限制,大型航天器必须以较小的组件发射,然后在轨进行组装与在轨维修,这些任务均离不开航天员的在轨操作,因此,为了保证任务的成功率,应根据空间环境因素的约束明确航天员自身的工作能力,制定空间组装任务的飞行程序并提出空间组装任务相关人机界面设计的工效学要求,欲实现这一目标,必须在地面开展航天员操作工效的评价工作,亦即对航天员执行实际操作任务的工作负荷进行较为客观的评估。所以,研究航天员工作负荷的评价方法和预测模型对未来空间组装等操作任务工效学要求和评价具有迫切的现实意义。

从空间操作任务的特征来看,一方面,长时间舱外作业时舱外航天服本身的性能可能导致航天员体力负荷的增加;另一方面,他又面临着大量与舱外工作相关的信息加工要求,必须保持注意力的高度集中、较高的反应速度和应对突发事件的心理准备。这种特征使航天员的工作负荷具有体力负荷和脑力负荷都很大的双重特点^[1-2]。目前,美国 NASA 及国内外其他研究机构均已投入大量人力与物力用于此方面的研究工作,并将结果用于系统的工程设计。例如,美国 NASA 要求航天飞机的设计符合工作负荷标准。可以说,工作负荷的评估与预测方法已成为提出载人航天器设计的工效学要求并进行工效学评价必须考虑的一个重要课题。

2 工作负荷的定义及其影响因素

工作负荷的英文术语是 workload,包括脑力负荷、体力负荷,目前国内外还没有一个统一的定义,一般认为它是指单位时间内人体能够承受活动的工作量,用来形容人在工作中的心理压力、生理压力或信息处理能力。其中脑力负荷是指人体能够处理的信息量,它与人闲置未用的信息处理能力成反比,总体来说,这是一个多维概念,它涉及到工作要求、时间压力、操作者的能力和努力程度、行为表现和其他许多因素,这个结论被广泛接受^[3-5]。而体力负荷则是指人体能够施加出力量的强度和次数的能力,一般与人体身体的疲劳程度有关。由于身体最终是由大脑控制的,研究人体体力负荷时,身体的疲劳信号由大脑发出,因此有人认为这也是脑力负荷的一种体现方式,是狭义的脑力负荷。所以,具体区分时,工作负荷一般可只指脑力负荷。这样可以认为,工作负荷是人在工作中感受到工作压力或繁忙程度的大小,如果人体感受到压力或繁忙程度越大,则其工作负荷越高,反之,则越低,两者是一种非线性关系。

一般来说,影响工作负荷的因素很多,例如工作内容、操作者的能力及工作动机、系统对操作者绩效的要求、系统错误的后果等等,但工作内容、人的能力与绩效的影响最大。

(1) 工作内容,工作内容直接影响操作者的工作负荷,在其他因素不变的情况下,工作内容越多、越复杂,操作者所承受的工作负荷就越高。在这里,工作内容是一个外延很大的概念,为了方便研究,它

又可细化为时间压力、困难程度、工作强度等。显然,这些因素均与工作负荷相关。

(2) 操作者的能力,在工作负荷中,个体之间的能力存在差异,干同样的工作,能力越大的人工作负荷越低,能力越小的人工作负荷越高。另外,操作者的能力并非一成不变,它可以随训练后熟悉的程度增加而提高。特别是在某一技能的学习阶段更是如此。同时,操作者的努力程度对工作负荷的影响趋势是不确定的,大体呈现一种能力增加,可使工作负荷降低的趋势。

(3) 人的绩效,工作负荷的适当与否对人-系统的绩效、操作者的满意程度以及安全和健康均有很大的影响。研究发现,工作绩效与工作负荷强度存在明显关系。例如,当人机系统呈现的信息量较大时,操作者由于“工作超负荷”而处于应急状态。此时他往往难以同时完成对全部信息感知、加工并进行相关控制,会出现感知信息的遗漏或错误感知、控制或决策失误。相反,工作负荷低时,操作者由于久久得不到目标信息的强化而处于一种单调枯燥、注意力容易分散的状况,属于“工作低负荷”状态,同样会出现反应时延长、反应敏感性较差,即使真的出现目标信息也很可能发生漏报。对于工作绩效同工作负荷的这种关系,可以用著名的“浴盆曲线”来形容。

3 舱外活动航天员工作负荷的特点

从 1965 年 3 月 18 日前苏联航天员列昂诺夫首次出舱到现在,人类航天的舱外活动已近 300 多人次。舱外活动(Extravehicular Activity, EVA)就是航天员走出母船外完成舱外操作的过程^[1,2],其主要任务包括:舱外维修,如对舱外天线和太阳能电池等进行故障排除及修理;舱外空间科学实验,如辐射测量、空间平台上的高真空试验等;释放或回收卫星,如 1997 年美国航天员从“哥伦比亚”号航天飞机走出,回收失控的太阳观测卫星;空间组装,如将空间某些设施组装一起,目前的国际空间站就是通过航天员舱外组装来建成的;空间救援,一旦某航天器出现故障,可使人员转移到另一个航天器内。所以,舱外活动对于载人航天事业有着十分重要的意义,是人类不可缺少的空间探索手段。

航天器是在真空环境中飞行,航天员要到舱外执行任务,脱离了航天器的保护,必须穿戴具有生命保障功能的舱外航天服和配备舱外机动装置。基于

这种约束条件,在进行舱外活动时,航天员的工作负荷就具有以下特点:

(1) 服装在灵活性和力学特性上会加重航天员的体力负荷,如上所述,舱外航天服是航天员在执行空间操作时的生保系统,虽然目前美国已发展到第三代,但其工作性能不可能与地面上工作服相比拟,所以其有限的灵活性和本身具有的阻力会增加航天员操作时的体力负荷。

(2) 空间作业的环境会引起航天员的心理应激,使其工作绩效发生降低,在真空及失重环境下工作,同时只有一条安全脐绳同母船相连,会使航天员心理产生恐惧的因素,特别是第一次执行出舱任务的航天员更是如此,因此导致脑力负荷加大。

(3) 舱外操作本身内容所涵盖的工作负荷强度就很高,一般来说,对上述舱外活动任务的本质进行归纳,可以认为航天员的舱外活动操作的主要特点是施力及移动,同时又需监视航天服本身所显示的信息以及对施力对象的准确性。由于空间失重环境的特点,对于相同的操作力,航天员在空间所承受的工作负荷要比地面大好几倍。

根据以上分析,航天员舱外活动的工作负荷主要由空间作业环境及舱外操作的内容所决定。相同的工作内容,其工作负荷强度要比地面上高。

4 评价方法

舱外活动工作负荷的评价属于通用性的方法体系,与地面操作的工作负荷评价方法相同。但目前还没有一种通用性的、直接进行工作负荷测量的方法,只能用间接的方法对其进行评价,因此评价的方法也多种多样。按照 O'Donnell 和 Eggmeier 的观点,根据工作负荷评价本身的特点和适用范围可分为 4 类即主观评价方法、主任务评价法、辅助任务评价法和生理指标评价方法。

4.1 主观评价法

这是最流行也是最简单的工作负荷评价方法,该方法要求操作者陈述操作过程中对所承受工作负荷的体验,或根据其体验对操作活动进行难度顺序的排列。由于该方法是从操作者角度出发,所以它被认为是最可接受的测评方法之一,最常见的类型有以下几种。

(1) 库克-哈柏评价法(Cooper-Harpper),它是 1969 年由 Cooper 和 Harpper 教授提出的,评价飞机驾驶的难易程度(工作负荷),用于飞机操纵特性的

评定。该方法基于飞行员的工作负荷与操纵质量有直接相关的假设,并将飞机驾驶的难易程度分为 10 个等级(如表 1),飞机驾驶员在驾驶飞机之后,根据自己的感觉,对照各种困难程度的定义,给出自己对所操纵飞机的评价。在 20 世纪 60 年代后期,美国空军用 Cooper-Harper 方法评价新式飞机操作的难易程度取得了很大成功。后来,人们对它又进行了改进,使之具有更好的通用性。

(2) 主观负荷评价法 (Subjective Workload Assessment Technique, SWAT),该方法也是美国空军开发,由 Reid 等人建立。在开发 SWAT 时,Reid 等人对工作负荷因素进行了系统的调查,经过必要的归纳和整理,认为工作负荷可以看作为时间负荷、压力负荷和努力程度等 3 个要素的结合,每个因素又分为 1、2、3 三级。相对于其他的主观评价法,SWAT 优点

是运用了数学分析方法对操作人员给出的各种情况的排序数据进行数学处理,但其最大的缺点在于除了费时外,其排序的准确性也很难保证,目前已应用不多。

(3) NASA-TLX 主观评价法(National Aeronautics and Space Administration -Task Load Index, NASA-TLX),这是美国 NASA 下属的 AMES 空间中心 Hart 等人研究提出。如上所述,Cooper-Harper 方法是一维主观评价方法,而工作负荷是一个多维概念,用一维的方法来评价就只可能知道结果,而不能知道真正的原因。于是 Hart 等人对飞行员进行调查,从中找出工作负荷的影响因素,经过大量调查研究后,确定了 6 个影响工作负荷的因素,分别为脑力需求、体力需求、时间要求、操作成绩、努力程度和挫折水平,如表 2 所示。

表 1 Cooper-Harper 方法的分级

飞机的特性	对驾驶员要求	评价等级
优良,人们所希望的	工作负荷不是在驾驶中应考虑的问题	1
很好,有可以忽略的缺点	工作负荷不是在驾驶中应考虑的问题	2
不错,只有轻度的不足	为了驾驶飞机需要飞行员作少量的努力	3
小的,但令人不愉快的不足	需要驾驶员一定的努力	4
中度的、客观的不足	为了达到要求需要相当的努力	5
非常明显的但可以忍受的不足	为了达到合格的驾驶需要非常大的努力	6
严重的缺陷	要达到合格的驾驶,需要驾驶员最大的努力,飞机是否可控不是问题。	7
严重的缺陷	为了控制飞机需要非常大的努力	8
严重的缺陷	为了控制飞机需要非常大的努力	9
严重的缺陷	如不改进,飞机在驾驶时就可能失去控制	10

表 2 NASA-TLX 工作负荷因素

影响因素	各因素的概念
脑力需求	需要多少脑力或知觉方面的活动(即思考、决策、计算、记忆、寻找),这项工作简单还是复杂,容易还是要求很高,明确还是容易忘记。
体力需求	需要多少体力类型的活动(拉、推、转身、控制活动等);这项工作是容易还是要求很高,肌肉感到松弛还是紧张,动作轻松还是费力。
时间需求	指工作运行速度或节奏,其节奏是缓慢并使人感到从容不迫,还是快速而令人感到慌乱。
操作业绩	指对完成目标所取得的成绩怎样,操作者对自己业绩的满意度如何。
努力程度	指完成操作所需付出的努力(脑力及体力)是大还是小。
困惑程度	在完成操作时,操作者感到是没有保障还是有保障,很泄气还是劲头很足。是否感到沮丧,烦恼的程度有多大。

使用 NASA-TLX 进行工作负荷的评价包括两个过程,首先,要求操作者在明确各因素的含义后,可按百分制,对各个因素进行打分。其次采用两两比较的方式,将 6 个因素两两配对,共可组成 15 个对,要求操作者选出每对中对工作负荷贡献更大的那一个因素,根据每个因素被选中的次数确定其对总工作负荷的影响权重,最后计算总的工作负荷的得分,分值越大,表示工作负荷越大。

4.2 主任务评价法

这种方法是通过评价操作者在工作时的业绩指标来判断这项工作给操作时带来的工作负荷,根据资源理论,随着作业难度的增加,操作者投入的脑力资源会越来越多,剩余资源会越来越少的,工作负荷也随之上升。当操作所需的资源量超过一定的限度时,将由于资源供需脱节造成操作绩效下降。因此,就可以从人的操作绩效指标来反推脑力负荷,主任务评价法包括单指标法和多指标评价法两大类。

4.3 辅助任务评价法

在工作负荷强度不大时,主任务绩效并不随工作负荷的变异而发生变化,但操作者的剩余资源量却受此影响,也就是说剩余资源量能反映工作负荷的状况。应用该方法进行评价时,操作者被要求同时做两件工作,但他把主要精力放在主任务上,当他有多余的能力时,尽量做辅助任务。这样,主任务的工作负荷是通过辅助任务的表现来进行的,主任务工作负荷越大,剩余资源越少,操作者从事辅助任务的能力就越弱。因此,可以通过辅助任务的绩效分析操作者的工作负荷状况。一般来说,辅助任务应根据主任务的特点来进行设计,通常有选择性反应、追踪、监视、记忆、复述、简单反应和脑力计算等。

4.4 生理指标评价法

当操作者的工作负荷过大时,与此相关的生理指标也将发生变化,这种变化可以作为工作负荷的指示器,目前主要有心率变异、脑电、呼吸、血压、体温等。如果有比较合适的分析方法,这些指标用来评价工作负荷时更为客观。

(1) 心率变异,在正常情况下,人的心率是不规则的。这种不规则造成的心率变异有时可达 10~15 次/min。研究发现,当人承受工作负荷时(如用每分钟 40 个信号和 70 个信号进行试验),两种情况的心率平均值没有很大的提高,但心率变异性明显下降,

且随工作负荷的强度(所处理的信号数)增加,心率变异越来越小,曲线趋于平直。

(2) 脑电(事件关联电位),脑电的变化对工作负荷的某些成分(知觉/认知负荷)较为敏感。特别是脑中的一些成分,如 P300 被认为是反映信息加工活动的敏感而有意义的指标。脑电是指人脑对某种离散事件进行信息加工时,在头皮中可记录到的一连串的瞬时脑电位变化,P300 就是刺激事件出现后约 300ms 所记录到的一个正电位。由于舱外活动操作时航天员对空间观察、信息判读等离散事件所进行的认知活动,实际上是一种副作业。由此引起的脑电变化则反映此种副作业对信息加工资源的利用程度,或潜在的工作能力,因此根据 P300 的变化就有可能对主作业的工作负荷进行定量地评价。

(3) 心率、体温与呼吸,根据前述舱外活动工作负荷的特点,舱外活动操作也是一个高强度的体力负荷。有文献指出,体力劳动时,心率与体力疲劳程度之间有着密切的联系,对此早已有报导,但时至今日尚未有学者提出用结合心率、体温和呼吸等指标来划分体力疲劳的方法。因此研究通过测定这些指标来评价航天员在舱外过程中的工作负荷承受限度(疲劳程度)的方法,使之在操作过程中的体力疲劳控制在一定的限度内,对工程设计具有重要的理论意义和实用价值。

总体来说,航天员工作负荷的评价方法虽然取得了一定的进展,但还不能满足工程设计对工作负荷评价的要求。特别是在载人航天器的方案设计阶段,十分迫切地需要了解未来航天员在执行空间作业任务时的工作负荷强度。一般而言,解决的方法是研究提出工作负荷的多指标、多因素的综合评价。

5 工作负荷预测模型

目前,舱外活动工作负荷预测模型的研究尚处于起步阶段,仍然借鉴航空领域内飞行员工作负荷预测模型,主要有时间压力模型、工作任务时间分析模型以及 Aldrich 模型^[6,10-11]等。

(1) 时间压力模型,该模型由美国教授 Siegel 和 Wolf 于 20 世纪 60 年代提出,所谓时间压力指为完成任务所需要的时间与给定的完成任务时间之比。它的基本假设为人对还剩有多少时间可以用来完成

任务的判断,该判断结果就是时间压力,时间压力影响到操作者的操作速度。根据心理学研究成果,在时间压力超过某一定值之前,它对人的操作或反应速度有帮助作用,此时起到积极作用,使操作者的资源利用更加合理。因此,这个值被定义为时间压力的临界值。当时间压力超过临界值之后,时间压力就起到了相反作用,使操作者无所适从,他的操作速度或反应时间反而降低,甚至低于正常值。所以时间压力的临界点也是操作者行为的转折点。超过临界点,操作者操作或反应和精度将会很快下降。通过试验发现,对正常人而言,其时间压力的临界值在 2.3 左右,即当完成任务所需要的时间超出给定时间一半以上以后,操作者的行为才受到破坏性干扰。

(2) 工作任务时间分析模型,从波音 737 开始,飞机上开始安装基于计算机的信息显示与控制系统,因此如何预测此种约束条件下飞行员的工作负荷就成为一个非常现实的问题。为此,波音公司的研究和设计人员探讨了主观评价法、生理指标评价工作任务的时间分析法等不同的预测模型。经过试验对比,最终确立工作任务时间分析模型作为飞行员的工作负荷预测方法。该模型认为,可以用时间占有率作为某项操作任务工作负荷的预测基础。时间占有率是完成任务所需要的时间与给出的完成任务时间之比,为了避免时间过长所产生的平均效应,给定的时间被分成许多很短的时段(一般 6~10s),允许操作者的某些部位同时工作,例如左手和右手同时工作、眼睛运动时人也可以作出反应等。此外,在该模型中也考虑了认知性任务。该模型的应用结果表明,当根据时间计算出的负荷比例达到 80% 以上时,飞行员会忽略比较次要的工作,因此该数据可以为设计飞行程序和人机功能分配提供基础。

(3) Aldrich 模型,这种预测模型是在上述模型的基础上的增加了一些新内容,它分为 4 个阶段:工作分解,在这个阶段将操作者在系统中应该完成的任务逐级进行分解;估计每项子任务的时间,一般把子任务分为连续性任务和间断性任务两大类,据此计算各子任务的时间;计算操作者在执行每项子任务时其各部位的占用情况;最后,运用某种算法,确定总的工作负荷。这种模型最大的缺陷在于工作负

荷值为专家的主观给定,在一定程度上影响了预测结果的客观性。

6 结束语

为了保证航天员可靠地完成舱外活动任务,应对其工作负荷进行评估以了解其工作能力状态,以确认航天员能否完成舱外活动的任务。此外,对航天员工作负荷进行评价也是制定与舱外活动相关的工效学要求和评价方法、飞行程序设计等方面工作的基础,所以,基于我国载人航天技术的发展战略,开展未来舱外空间组装任务中航天员工作负荷的评价预研工作具有十分重要的意义。

由于工作负荷的评价比较复杂,牵涉许多因素,即有主观的,也有客观的,目前监测飞行过程中航天员的生理信号指标(心率、呼吸、体温、血压),研究基于航天员生理信号的舱外活动工作负荷综合评价方法是一个解决问题的可行技术方向。◇

参考文献

- [1] 周前祥、魏哲浩,出舱活动飞船人机界面工效学设计及其研究进展,中国航天,2005(10):29-33。
- [2] 杨锋、丁立,舱外活动中航天员利用扶手移动的路径规划,北京航空航天大学学报,2005,31(3):326-330。
- [3] 赵旭、姜淇远,事件关联脑电位(ERP)与手控工作负荷关系的研究,航天医学与医学工程,1990,3(4):267-271。
- [4] 姜淇远、赵旭、陈善广,监视作业工效的评定与提高工效的措施,航天医学与医学工程,1995,8(2):146-153。
- [5] 杨渝书、姚振强,心电图时频域指标在驾驶疲劳评价中的有效性研究,机械设计与制造,2002(5):94-95。
- [6] 郭伏、钱省三主编,人因工程学,机械工业出版社,2006.1:221-235。
- [7] 蔡启明,以动态心率为指标的体力疲劳的评价方法研究,人类工效学,1999,5(1):27-29。
- [8] Marcia Kuskin Shamo and Ravit Dror Avionitek, A MULTI-DIMENSIONAL EVALUATION METHODOLOGY FOR NEW COCKPIT SYSTEMS, Proceedings of the 10th International Aviation Psychology Symposium. Columbus, OH, 1999:1-5。
- [9] 刘宝善,"库柏-哈柏"方法在脑力负荷评价中的应用,1997,3(3):40-41。
- [10] 姜红英、林贵平、赵竟全,飞机座舱显示/控制系统的综合评价方法,中华航空航天医学杂志,2005,16(2):101-106。
- [11] UP40 Orbital Space Program, Human Rating Plan, Volume I, NASA-OSP-PLAN-022,2003.10:2-50。