

单兵系统工效学指标体系的建立及权重分配

陈蔡山林¹, 王亚平¹, 杨洋¹, 李新俊², 何龙²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国兵器工业第二〇八研究所, 北京 102202)

摘要:为了更好地开展单兵系统人机工效评价与设计研究,分别建立了单兵系统人机工效评价指标体系和人机工效设计指标体系。在建立指标体系的过程中,研究了指标体系的优化和建立方法,通过分析传统指标权重分配方法的不足后,提出了采用 G_1 法分配指标权重方法。依据指标对士兵操作工效影响程度大小的原则,进行了专家调查,得到稳定可靠的指标及其权重系数。该指标体系的建立为单兵系统的人机工效评价和设计具有重要的指导、参考作用。

关键词:单兵系统;指标体系;改进德尔菲法; G_1 法;专家咨询

本文引用格式:陈蔡山林,王亚平,杨洋,等.单兵系统工效学指标体系的建立及权重分配[J].兵器装备工程学报,2017(3):51-56.

Citation format: CHEN Cai-shan-lin, WANG Ya-ping, YANG Yang, et al. Building of Ergonomics Index System and Weight Coefficient of the Soldier System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(3): 51-56.

中图分类号:TB18

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)03-0051-06

Building of Ergonomics Index System and Weight Coefficient of the Soldier System

CHEN Cai-shan-lin¹, WANG Ya-ping¹, YANG Yang¹, LI Xin-jun², HE Long²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: In order to effectively carry out the soldier system ergonomic evaluation and design, ergonomic evaluation index system and design index system were established respectively. The method of the optimization of index system was studied in the course of establishing the index system. Then the G_1 method was used to assign weights through the analysis of the shortcomings of traditional index weight distribution methods. The optimizations of index system and index weight allocation method were studied based on the preliminary establishment of index system for individual system ergonomics. Ten professors/senior engineers, professors/senior engineers, familiar with the soldier system, are recruited for indicator surveys. The experts consulting obtain the reliable index system and weight coefficient, based on the principle of the influence of an index on ergonomic. The establishment of the index system has significant guidance and reference effect to ergonomic evaluation design of the soldier system.

Key words: soldier system; index system; modified Delphi method; G_1 method; expert consulting

收稿日期:2016-10-29;修回日期:2016-11-15

基金项目:国防基础科研项目(A1020133013)

作者简介:陈蔡山林(1990—),男,硕士研究生,主要从事单兵系统人机工效研究。

通讯作者:王亚平(1975—),女,博士,副研究员,主要从事单兵系统人机工效,涉及人枪相互作用机理与分析,人机工效仿真分析方法与试验评价方法,人机工效评价体系等研究。

单兵系统是较为复杂、典型的“人(士兵)—机(单兵装备)—环境(战术任务与环境)”轻武器系统,由士兵手持、头戴和身背来承载携行,同时,结合典型战术任务,实现士兵—武器+瞄具、士兵—信息分系统、士兵—防护携行分系统之间的人机交互,涉及装备在士兵人体上的布局、负载分配、结构匹配、可视性、可达性等人机工效因素,且这些因素相互交叉和复合。单兵系统的人机工效的好坏直接影响到单兵系统的实际作战效能。

目前,国内外相关研究机构对单兵系统的人机工效积累了不少技术数据,Krausman等^[1]从装备的兼容性出发,对Land Warrior单兵系统进行人机工效分析,并提出建议;杨洋等^[2]从士兵佩戴的舒适性角度出发研究了影响头盔舒适性的人机工效因素;Attwells^[3],Schiffman^[4]等提出士兵平衡评价指标,采用试验方法研究了负载对士兵的影响。Rosen等^[5]从火力杀伤、机动性等5个方面对Nett Warrior单兵系统的人机工效进行研究,并提出改进建议。陈晓等^[6]曾对我国现有的单兵系统进行研究,提出了与单兵工效学相关的标准、规范。单兵系统人机工效评估要素多,层次结构复杂,评估活动规模大,仅从单一或部分要素对其进行评估不能获得全面、合理的评估结果,因此,需要构建具有逻辑层次结构合理并能够准确描述单兵系统人机工效基本特征的指标体系。

为了便于单兵系统人机工效的设计及综合评估,本文分别建立了单兵系统人机工效综合评估指标体系和单兵系统人机工效设计指标体系。单兵系统人机工效综合评估指标体系主要用于单兵系统综合评估,辅助整体决策;单兵系统人机工效设计指标体系主要用于单兵系统的工程设计,起到具体的指导、参考作用。在此基础上,对如何确定指标体系中各项指标的权重系数进行研究,最后得到相应的指标权重系数。

1 指标体系的初步建立

在建立指标体系的过程中,采用自上而下的分解方式将指标体系分解成有序的阶梯层次结构。单兵系统人机工效综合评估指标体系划分为总目标、目标层和指标层。总体评估指标主要用于人机工效的评估与半实物仿真建模,该指标体系不具体到要素层。单兵系统人机工效设计指标结构分为系统、分系统、目标层、指标层、要素层。要素层作为直接影响指标层工效优劣的底层指标,主要从部件的设计角度进行分解。针对不同用途,将评估指标体系 and 设计指标体系分开建立,提高了指标体系的针对性。

通过征求相关领域专家意见,参考相关资料^[7-11],依据指标体系建立的简明性和全面性原则,初步确定出比较全面的人机工效评价指标体系 and 设计指标体系。篇幅有限,本文主要以单兵系统人机工效评价指标体系为示例进行说明,表1为初步建立的评价指标体系框架。

表2为单兵系统人机工效设计指标体系的分解框架,为了具体指导人机工效设计,将单兵系统的人机工效分为3个分系统。目标层为具体部件的人机工效,指标层按照影响士

兵操作的具体因素进行宏观分解,要素层针对人机工效指标层,从部件的设计角度进行分解,所分解的指标尽可能详细具体,可以具体指导单兵系统人机工效设计。指标层、要素层指标过多,本文不具体展开。

表1 单兵系统人机工效综合评估指标体系框架

总目标	目标层	指标层
单兵系统人机工效评价	U_1 操作便捷性	$\{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{16}\}$
	U_2 战术动作适应性	$\{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}\}$
	U_3 生理耐受性	$\{U_{31}, U_{32}, U_{33}\}$
	U_4 夜间适应性	$\{U_{41}, U_{42}\}$
	U_5 操作防误性	$\{U_{51}\}$
	U_6 士兵心理感受	$\{U_{61}, U_{62}, U_{63}, U_{64}\}$

表2 单兵系统人机工效设计指标体系框架

系统	分系统	目标层	指标层	要素层	
单兵系统人机工效设计	O_1 火力分系统	O_{11} 扳机人机性			
		O_{12} 握把人机性			
		⋮	⋮	⋮	
	O_{18} 弹匣分系统	O_{18} 弹匣人机性		⋮	
		O_{19} 操作按键人机性			
	O_2 信息分系统	O_{21} 操作控制部分人机性			⋮
		O_{22} 视觉显示器人机性		⋮	
		O_{23} 听觉显示器人机性		⋮	
		O_{24} 软件界面人机性			
	O_3 防护携行分系统	O_{31} 头盔上装备人机性			
O_{32} 防毒面具人机性			⋮		
O_{33} 防护携行人机性					

2 指标体系的优化

初步建立的指标体系,追求指标体系的全面性,企图使指标体系包含所有的因素。由于指标过多,导致评价者判断上的错觉和混乱,同时也削弱了其他指标的权重,造成评价结果失真,因此需要对指标体系进行合理优化^[12],指标优化流程如图1所示。

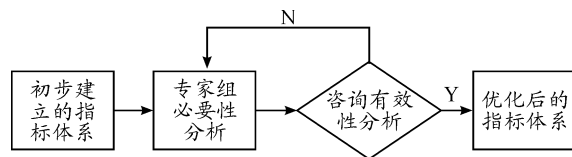


图1 指标体系优化流程

2.1 确定专家咨询人员

要获取专家对初步建立指标的意见,首先应该确定相应的专家。应该选择具有一定的专业知识和丰富实践经验而

又愿意参加的专家。专家人数的选择决定了指标体系优化的合理性,研究发现专家人数越多,评估信息程度丰富,但由于各种原因评估结果分歧的可能性也就增加,很难达到专家的统一意见。通常对于人机工效评估问题,4或5人能发现80%~85%的问题,当群组人数为5~11人时,最易得到相对正确的评估结果^[13]。

本研究考虑到结果的准确性和专家意见的收敛难易程度,聘请了10位具有高级职称并在单兵系统研究领域较有影响的专家作为专家咨询人员。

2.2 指标存在必要性分析

针对评价指标体系来说,保留相对重要指标,对不重要的指标予以剔除,可在保证评价指标体系基本作用的前提下进一步简化体系结构,便于对系统进行分析。设指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, L 名专家对指标 i 存在必要性评判的结果可以表示为

$$\bar{\mu}_i = \sum_{l=1}^L \omega_{il} \cdot u_{il} \quad (1)$$

式中 $\bar{\mu}_i$ 为专家群对指标 i 存在必要性的综合评估; u_{il} 为专家 l 对指标 i 存在必要性的评估意见,为反映指标存在的必要程度,将评判等级划分为5级,即评判集 $V = \{\text{不必要、稍不必要、必要、较必要、非常必要}\}$ 。对应 V 的取值论域可表示为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$; ω_{il} 为专家 l 在对指标 i 判断的权重,由每位专家判断各指标存在必要性程度时的自信度等级得出, $\omega_{il} = N_{il} / \sum_{l=1}^L N_{il}$, N_{il} 为专家 l 对指标 i 的自信度, $l = 1, 2, \dots, L$ 。自信度等级的划分采用5级标度,自信度等级为“很高5”、“高4”、“一般3”、“低2”、“很低1”。

2.3 咨询结果有效性分析

在对指标的优化过程中,需要对咨询结果的有效性进行分析。当专家组对同一评价指标评价得出的差异较小时,表明该评价指标体系能够真实地反映评价对象的本质。采用专家意见一致性程度表征咨询结果的有效性,该参数反映专家意见差异程度,针对某个指标,该值越小,表明专家群的意见越一致。

对于指标存在必要性分析,咨询有效性可表示为

$$V_i = \frac{\sigma_i}{u_i} \quad (2)$$

式中 \bar{u}_i 为专家群对指标 i 的综合意见,由式(1)得出; σ_i 为专家群对指标 i 存在必要性程度评价的离散程度, $\sigma_i = \left[\sum_{l=1}^L (u_{il} - \bar{u}_i)^2 / (L - 1) \right]^{1/2}$, 其中 u_{il} 为专家 l 对指标 i 存在必要性程度评判意见。

3 指标权重分配

对于指标权重分配,一般采用AHP法,但是考虑到AHP法工作量大(仅建立判断矩阵就要进行 $n(n-1)/2$ 次的指标两两对比),同时在实际应用中所建立的判断矩阵的一致性较难通过^[14]。为了减轻专家工作量,提高咨询效率,本文提出基于德尔菲法的反馈群组权重分配方法。具体专家权

重分配采用 G_1 法^[15],该方法克服了AHP法的缺陷。群组权重通过增加独立样本量,提高权数意见的广泛性和多样性,能够比较有效地协调评估主体单一化的矛盾,由群组形成统一权数分配方案有利于人的主观权重客观化。具体流程如图2所示。

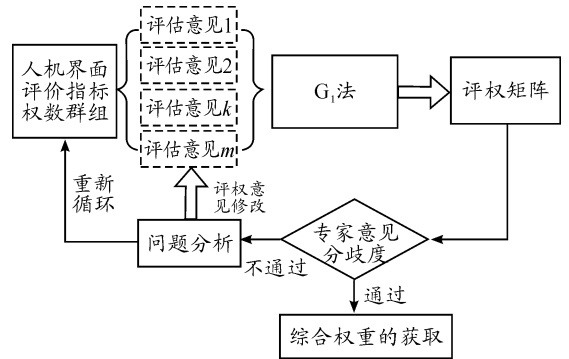


图2 群组权重分析流程

3.1 G_1 法实施步骤

该方法的思想是先对各评价指标按某种评价准则进行定性排序,然后进行定量赋值,并对评断结果进行数学处理,最终得到各个评价指标的权重系数。记评价指标集为 $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$, 具体采用3个步骤:

1) 确定序关系。若评价指标 μ_i 相对于某评价准则的重要性程度大于 μ_j 时,记为 $\mu_i > \mu_j$ 。评价指标 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$ 相对于某种评价准则具有关系式

$$\mu_1^* > \dots > \mu_k^* > \dots > \mu_m^* \quad (3)$$

则称评价指标 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$ 按照某评价准则的重要性程度确定了序关系。为了书写方便将式(3)记为 $\mu_1 > \dots > \mu_k > \dots > \mu_m$ 。

2) 给出 μ_k 和 μ_{k-1} 的重要性程度之比

$$\omega_{k-1} / \omega_k = \gamma_k, \quad k = 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

γ_k 的赋值可参考表3。

表3 γ_k 的赋值

γ_k	说明
1.0	指标 μ_{k-1} 与指标 μ_k 具有同样重要性
1.2	指标 μ_{k-1} 比指标 μ_k 稍微重要
1.4	指标 μ_{k-1} 比指标 μ_k 明显重要
1.6	指标 μ_{k-1} 比指标 μ_k 强烈重要
1.8	指标 μ_{k-1} 比指标 μ_k 极端重要

3) 计算权重系数。根据确定出的 γ_k , 利用式(5)可计算出指标 μ_k 的权重 ω_k

$$\omega_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m \gamma_i \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\omega_{k-1} = \gamma_k \omega_k, \quad k = m, m-1, \dots, 3, 2 \quad (6)$$

3.2 综合权重获得

采用 G_1 法获取每位专家对指标集的权重值,然后将不

同专家对指标 i 的权重进行聚合,获得综合权重。采用加权算术法计算指标 i 的综合权重为

$$\bar{\omega}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \omega_{li} \quad (7)$$

其中为 ω_{li} 专家 l 采用 G_1 法获得的指标 i 权重值。

3.3 专家意见分歧分析

采用统计学方法对不同专家判断出的权重差异进行分析,差异越小说明专家意见一致。对于指标 i 的权重, L 个专家得出的权重结果 $W_i = \{\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{iL}\}$, 专家群对指标 i 的权重分配意见一致性 V_i 可以表示为

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\omega_i} \quad (8)$$

式中: $\sigma_i = \left[\sum_{l=1}^L (\omega_{il} - \bar{\omega}_i)^2 / (L-1) \right]^{\frac{1}{2}}$, 该参数反映专家 l 对指标 i 存在必要性程度评价的分散程度; $\bar{\omega}_i$ 为专家群对指标 i 的综合意见。

4 咨询会议及其结果分析

4.1 会议流程

会议开始,首先利用 15 min 简单介绍初步建立的指标体系和指标体系优化方法及其权重系数确定方法。专家需要在接下来的 1 h 完成指标存在必要性咨询,经过指标必要性咨询后,然后进入指标权重系数确定环节。

为了能够快速反馈专家意见,充分利用专家时间,在咨询会议前,协调小组采用 C# 编制了相应的计算程序,调用了相应的电子表格,保证从专家咨询结果录入到电子表格到计算出统计结果的时间在 1 h 以内。在数据统计阶段,安排专家休息,尽量降低专家的疲劳和对指标评价的抵触心理。

4.2 指标体系的确定

通过对两轮专家咨询结果进行统计分析,综合评价指标的统计结果如表 4 所示。

表 4 指标统计参数的对比情况

指标层	第 1 轮			第 2 轮			咨询结果的稳定性
	指标存在必要性度	专家意见离散度	咨询结果有效度	专家意见集中度	专家意见离散度	咨询结果有效度	
U_{11} 瞄准效率	4.74	2.02	0.43	4.85	0.40	0.08	0.11
U_{12} 携行模块取放便捷性	4.11	0.95	0.23	4.17	0.89	0.21	0.06
U_{13} 装备勤务性	4.20	1.90	0.45	4.01	1.11	0.28	0.19
U_{14} 信息操作便捷性	4.53	1.58	0.35	4.52	1.00	0.22	0.01
U_{15} 穿脱装备便捷性	4.36	2.02	0.47	4.44	1.02	0.23	0.08
U_{16} 操作可视	3.71	2.53	0.70	3.84	1.48	0.39	0.13
U_{21} 装备携行干涉影响	4.74	1.45	0.31	4.76	0.87	0.18	0.02
U_{22} 卧倒起立的影响	4.17	2.63	0.64	4.12	1.44	0.35	0.05
U_{23} 长途行军能力影响	4.83	1.26	0.26	4.90	0.26	0.05	0.07
U_{24} 奔跑跳跃的影响	4.70	1.45	0.31	4.61	1.05	0.23	0.09
U_{25} 对通过障碍的影响	4.32	2.02	0.47	4.30	0.87	0.20	0.02
U_{31} 辐射效应	4.11	3.59	0.88	3.96	3.33	0.84	0.15
U_{32} 热效应	3.93	2.21	0.57	4.16	1.33	0.32	0.23
U_{33} 声效应	2.75	2.02	0.73	2.65	1.07	0.40	0.10
U_{41} 夜间射击能力	4.74	1.45	0.31	4.85	0.40	0.08	0.11
U_{42} 间信息交互能力	4.60	1.55	0.34	4.76	0.62	0.13	0.16
U_{51} 操作防误能力	4.59	1.55	0.34	4.75	0.64	0.13	0.16
U_{61} 装备对士兵安全感的提升效果	2.32	1.05	0.44	2.39	0.54	0.23	0.07
U_{62} 装备对士兵勇气的提升效果	3.32	1.45	0.44	3.38	1.04	0.31	0.06
U_{63} 士兵对装备的认同感	3.81	1.90	0.50	3.78	1.66	0.44	0.03
U_{64} 外观造型美观性	3.70	2.02	0.55	3.39	1.05	0.31	0.11

表4中指标存在必要度是判断指标是否有必要存在,按照定义其值小于3,认为该指标非必要。咨询结果有效度表示专家组对指标的意见的可接受度,通常认为其值小于0.5可以接受^[16]。当两轮的咨询统计结果相差不小于1/3,认为咨询结果可靠,具有稳定性^[13]。通过对21个指标进行两轮咨询,筛选出19必须存在的指标。

从表4可以看出,第2轮咨询得出的统计结果中,所有指标的专家意见离散度和有效度都比第1轮的小,表明第2轮咨询中专家判断结果更加一致,对指标的认识更加深刻。

通过两轮专家意见咨询,不仅筛选出对士兵操作工效影响程度大的指标,而且从各指标的专家评价意见,可以得到各指标对士兵操作工效影响程度的大小。如在综合评价指标体系中,对人机工效影响程度等级为极大、很大、大、一般和不大的指标个数分别为8、9、2、2、0。其分布情况如图3所示,可以为单兵人机工效设计和评价提供重要参考依据。

4.3 指标体系权重系统的确定

通过采用德尔菲法反馈群组权重分配方法对聘请的

10位专家进行调查,得出各指标的序关系和相邻指标之间的重要程度之比。鉴于文章篇幅有限,仅以综合评价指标中目标层1中的指标为示例,进行结果分析。10位专家得出指标集的序关系和相邻指标之间的重要程度如表5所示。采用式(7)将专家的意见汇总,得出指标的权重如表6所示。

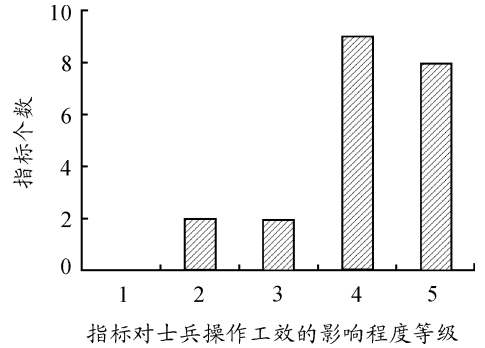


图3 不同影响程度等级指标个数分布情况

表5 子目标1的指标集的序关系及相邻两目标间的重要程度之比

专家代号	序关系	重要程度之比					指标权重值					
		r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{14}	w_{15}	w_{16}
L_1	$U_{15} > U_{13} > U_{14} > U_{11} > U_{12} > U_{16}$	1.2	1.0	1.4	1.0	1.2	0.23	0.19	0.19	0.14	0.14	0.11
L_2	$U_{11} > U_{14} > U_{12} > U_{13} > U_{15} > U_{16}$	1.4	1.4	1.0	1.0	1.0	0.27	0.19	0.14	0.14	0.14	0.14
L_3	$U_{11} > U_{14} > U_{15} > U_{13} > U_{12} > U_{16}$	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	0.22	0.18	0.15	0.15	0.15	0.15
L_4	$U_{11} > U_{14} > U_{15} > U_{13} > U_{12} > U_{16}$	1.2	1.4	1.0	1.0	1.2	0.24	0.20	0.14	0.14	0.14	0.14
L_5	$U_{11} > U_{14} > U_{13} > U_{12} > U_{15} > U_{16}$	1.0	1.2	1.0	1.0	1.2	0.19	0.19	0.16	0.16	0.16	0.13
L_6	$U_{14} > U_{12} > U_{13} > U_{15} > U_{11} > U_{16}$	1.4	1.0	1.0	1.2	1.4	0.24	0.17	0.17	0.17	0.14	0.10
L_7	$U_{11} > U_{14} > U_{15} > U_{13} > U_{12} > U_{16}$	1.4	1.2	1.0	1.2	1.2	0.26	0.19	0.16	0.16	0.13	0.11
L_8	$U_{11} > U_{14} > U_{15} > U_{12} > U_{16} > U_{13}$	1.2	1.4	1.2	1.4	1.4	0.28	0.24	0.17	0.14	0.10	0.07
L_9	$U_{13} > U_{11} > U_{15} > U_{14} > U_{12} > U_{16}$	1.4	1.4	1.0	1.4	1.0	0.29	0.21	0.15	0.15	0.11	0.11
L_{10}	$U_{11} > U_{14} > U_{15} > U_{12} > U_{13} > U_{16}$	1.6	1.6	1.2	1.0	1.0	0.33	0.21	0.13	0.11	0.11	0.11

表6 指标综合权重值

指标	指标权重	专家意见分歧
瞄准效率	0.26	0.040
信息操作便捷性	0.20	0.018
穿脱装备便捷性	0.16	0.018
装备勤务性	0.15	0.017
携行模块取放便捷性	0.13	0.020
操作可视	0.12	0.022

5 结束语

本文针对我国单兵系统人机工效设计和人机工效综合评价工作中存在的实际问题,分别建立了单兵系统人机工效评价指标体系和人机工效设计指标体系。所提出的指标体系的建立方法及权重分配方法,经过实践验证,能够充分发挥专家的智慧、知识和经验,有效地降低专家的工作量,具有一定的科学性和可操作性。本文的研究结果可为相关设计部门和军方的评价工作提供一定的指导作用,也可为其他领域的相关研究工作提供参考。

参考文献:

- [1] KRAUSMAN A, BOYNTON A, HARPER W, et al. Human Factors Evaluation of Land Warrior, Version 1.0[Z]. Rep. No. ARL-TR-3205. Aberdeen Proving Ground, MD: U. S. Army Research Laboratory, 2004.
- [2] 杨洋, 徐诚, 管小荣, 等. 基于逆向动力学的步兵头盔舒适性数值分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 321-326.
- [3] ATTWELLS R L, BIRRELL S A, HOOPER R H, et al. Influence of carrying heavy loads on soldiers' posture, movements and gait [J]. Ergonomics, 2007, 49(14): 1527-1537.
- [4] SCHIFFMAN J M, BENSEL C K, HASSELQUIST L, et al. Effects of carried weight on random motion and traditional measures of postural sway [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(5): 607-614.
- [5] ROSEN L, WALSH M. The Nett Warrior System: A Case Study for the Acquisition of Soldier Systems [D]. Naval Postgraduate School, 2011.
- [6] 陈晓, 钮建伟, 蒋毅. 单兵装备人机工程建模仿真与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] GJB2873—97, 军事装备和设施的人机设计准则[S].
- [8] GJB/Z 131—2002, 军事装备和设施的人机工程设计手册[S].
- [9] GJB 3207—98, 军事装备和设施的人机工程要求[S].
- [10] GJB/Z 134—2002, 人机工程实施指南[S].
- [11] GJB 1062—91, 军用视觉显示器的人体工程设计通用要求[S].
- [12] 李随成, 陈敬东, 赵海刚. 定性决策指标体系评价研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(9): 22-28.
- [13] OSBORNE, JONATHAN, COLLINS, et al. What “ideas-about-science” should be taught in school science? A Delphi study of the expert community [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2003(40): 692-720.
- [14] ISHIZAKA A, LABIB A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 14336-14345.
- [15] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 李银霞, 袁修干, 杨春信, 等. 歼击机座舱工效学综合评价指标体系的建立 [J]. 航空学报, 2005, 26(2): 148-152.

(责任编辑 周江川)

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] HILKERT J M, DAVID L A. Structures Effects and Techniques in Precision Pointing and Tracking Systems-A Tutorial Overview [J]. SPIE, 2010, 76961C: 1-12.
- [2] 吴晗平, 易新建, 杨坤涛. 机械结构因素对光电跟踪伺服系统性能的影响 [J]. 应用光学, 2004, 25(3): 11-14.
- [3] 甘至宏, 张葆, 撒梵梵. 机载光电稳定平台框架结构工程分析 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2441-2446.
- [4] 徐飞飞, 纪明, 解静, 等. FSM 在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究 [J]. 应用光学, 2012, 33(1): 9-13.
- [5] 张璟玥, 纪明, 王惠林. 机载稳瞄控制系统模型及仿真分析 [J]. 应用光学, 2006, 27(6): 491-496.
- [6] 白钊, 贺峻峰, 迟圣威, 等. 小型化多视场电视摄像系统光机设计研究 [J]. 应用光学, 2016, 37(2): 157-161.
- [7] 迟圣威, 纪明, 韩周鹏, 等. 基于两阶段法的机载光电吊舱气动力矩的工程计算方法 [J]. 电光与控制, 2016, 23(4): 74-80.
- [8] 迟圣威, 朱镭, 杨光, 等. 某机载光电吊舱热环境下光轴平行性建模与分析 [J]. 机械与电子, 2014, 34(4): 46-49.
- [9] 王明超, 杨光, 张卫国, 等. 基于动力学模型修正的螺纹连接结构建模 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 161-165.
- [10] 张力, 刘斌. 机械振动实验与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 140-186.
- [11] 刘耀, 黄玉美. 树脂矿物床身模态参数辨识 [J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(2): 133-137.

(责任编辑 周江川)