基于脑力负荷飞机座舱视觉显示界面优化设计

康卫勇 袁修干 柳忠起

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在飞机座舱视觉显示界面设计阶段,利用脑力负荷的综合评价,确定最佳设计方案. 综合3种脑力负荷评价方法(主任务评价法、生理测量法、主观评价法),建立了飞机座舱视觉显示界面脑力负荷综合评价模型,对设计方案进行优化选择,并进行实验例证. 在某型号歼击机视觉界面的不同设计方案中,利用这套评价模型,在降落任务下,得到了不同视觉界面的脑力负荷综合评价值,其中最佳脑力负荷值的设计方案也符合国军标中关于视觉界面的设计原则. 在飞机座舱视觉界面脑力负荷的设计阶段,这套评价系统在设计阶段能够给出一个满意的评价结果,对于最终设计方案的确定很有帮助.

关 键 词: 负荷; 座舱; 视觉; 显示器; 优化; 眼动

中图分类号: TP 3-05

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)07-0782-04

Optimization design of vision display interface in plane cockpit based on mental workload

Kang Weiyong Yuan Xiugan Liu Zhongqi

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To confirm the optimization design for vision display interface of a plane cockpit in the design phase, the comprehensive evaluation of mental workload has been used. Colligating the three mental workload evaluation methods, which are main task evaluation method, physiology measure method and subjective evaluation method, the model of plane cockpit vision display interface mental workload comprehensive evaluation has been founded, the most optimized design has been selected and has been testified by an experiment. In some type plane vision interface different designs, their mental workload evaluation values were gained using the model on the landing task. The design of the mental workload value was the best one, also tallied with the design theory of vision interface in nation military criterion. During the phases of plane cockpit vision interface design, this comprehensive evaluation system could get a satisfying evaluation result. It could be helpful for the final determination of the designing scheme.

Key words: loads; cockpits; vision; display devices; optimization; eye movements

随着科技的进步,飞行员的工作已经不单单是一项体力任务,越来越趋近于脑力和体力相结合,而脑力所占的比例越来越大. 近年来,飞机座舱人机界面的设计在不断变化,飞行自动化程度也越来越高,使得脑力负荷越来越大. 脑力负荷的测量也就显得越来越重要[1].

脑力负荷的测量法主要有主观评价法、主任务测量法、辅助任务测量法和生理测量法[2]. 这些方法虽然对于脑力负荷的测量有了一定成果,但是远远不能满足系统设计对于脑力负荷测量的要求. 特别是在系统设计中,往往希望在系统设计出来之前对系统给操作人员的脑力负荷有一个大概的了解,这就要求对脑力负荷进行预测[2]. 今后脑力负荷的测量方法将趋向于针对脑力工作的

收稿日期: 2007-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30400137); 国家自然基金委与民航总局联合基金资助项目(60672182)

作者简介: 康卫勇(1974-),男,山西介休人,博士生, kangwei5652@sina.com.

形势采取多种方法综合测量,这样使各种方法之间相互补充,避免了各自的缺点[3].

本文研究的目的就是综合几种主要的测量方法,使得脑力负荷的测量结果更加准确直观.

1　脑力负荷综合评价系统的建立

1.1　脑力负荷综合评价基本模型

主任务测量法中,将一次巡航路线分为不同的飞行任务(如降落、起飞、爬升、平飞等),逐个分析,飞行员在模拟器中执行某个任务作为主任务,飞行操作绩效作为评价值,首先计算出每个飞行参数的绩效值,然后把所有的飞行参数绩效值加权平均,得出完成某一任务的操作绩效值.

主观评价法采用 NASA-TLX量表,其考虑了6个因素:脑力要求、体力要求、时间要求、行为表现、努力程度和困惑程度. 6个因素的重要性是通过 15个两两对比决定的. 对每一个因素的评价都在 0～1之间,评价值是 6个因素的加权平均值[4].

将每种方法得到的评价值进行加权平均后,得到每种方法的某个设计方案的脑力负荷评价值,最后将 3种方法加权平均,得到每个设计方案的脑力负荷评价值,给出飞机座舱视觉显示界面的最佳设计方案. 模型框架见图 1.

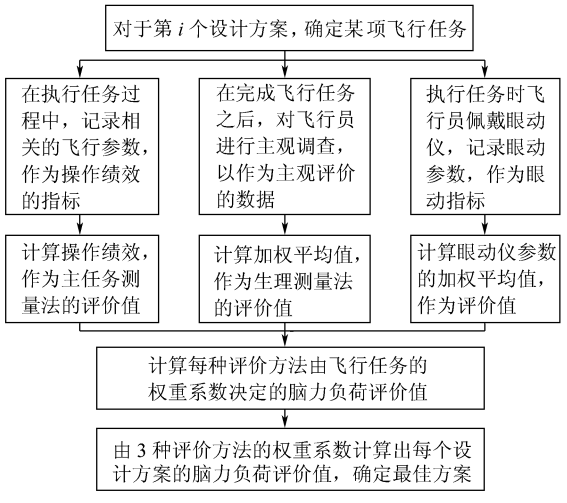


图 1　飞机座舱视觉显示界面综合评价模型

1.2　评价指标的确定

评价指标的确定关系到整个评价系统的敏感性,本文通过专家评定和实验研究,确定了操作绩效的评价指标和眼动参数的评价指标.

1) 主任务测量法的评价指标

主任务测量法采用的是操作绩效作为评价值,最主要的飞行参数有:飞行高度、飞行时间、航向角度、横滚角度、俯仰角度、X, Y, Z方向的飞行速度,飞行参数在不同的飞行阶段,各自的重要程度有所差别,因此,在不同的飞行任务中,它们的权重系数不同.

2) 生理测量法的评价指标

生理测量法采用眼动参数作为评价指标,在眼动参数中,眨眼率和眨眼时间被公认为与人的脑力负荷有关,瞳孔大小通过实验,它的变化与脑力负荷也存在相关性,因此这 3个指标作为评价脑力负荷眼动参数.

1.3　数学模型

假设:有 M个设计方案, N个飞行任务. 在主任务测量法评价中:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^{K} \omega_k P_k \qquad (1)$$

$$i = 1, \cdots, M;\ j = 1, \cdots, N;\ k = 1, \cdots, K$$

式中, X_{ij}为第 i个设计方案在第 j个飞行任务下的操作绩效; K为飞行参数的总量; ω_k为第 k个飞行参数的权重系数, $\omega_k = [0, 1]$, $\sum \omega_k = 1$; P_k为第 k个飞行参数的绩效值,由飞行参数在飞行过程中的误差值决定的.

$$P_k = \sigma_k + \frac{\sum_{l=1}^{L_k} | A_{kl} - \bar{A}_k |}{L_k | A_{k0} - \bar{A}_k |} \qquad (2)$$

式中, σ_k为第 k个飞行参数的标准误差; L_k为记录的第 k个飞行参数数据的总量; A_{kl}为第 k个飞行参数中第 l个记录点的数据; $\bar{A}_k$为第 k个飞行参数的平均值; A_{k0}为第 k个飞行参数的期望值.

在生理测量法中:

$$Y_{ij} = \sum_{g=1}^{G} \alpha_g Q_g \qquad g = 1, \cdots, G \qquad (3)$$

式中, Y_{ij}为第 i个设计方案在第 j个飞行任务下的眼动测量评价值; G为眼动参数的总量; α_g为第 g个眼动参数的权重系数, $\alpha_g = [0, 1]$, $\sum \alpha_g = 1$; Q_g为第 g个眼动参数的评价值,由眼动参数在飞行过程中的变化值决定的.

$$Q_g = \beta_g + \frac{\max | B_{gh} - B_{g0} |}{B_{g0}} \qquad (4)$$

式中, β_g为第 g个眼动参数的标准误差; B_{gh}为第 g个眼动参数在第 h个点的数据, $h \in [1, H_g]$, H_g为第 g个眼动参数的数据总量; B_{g0}为是飞行员在执行任务最初的第 g个眼动参数的值.

在主观评价法中:

$$Z_{ij} = \sum_{f=1}^{F} \eta_f S_f \qquad f = 1, \cdots, F \qquad (5)$$

式中, Z_{ij}为第 i个设计方案在第 j个飞行任务下的

主观评价值；F为调查因素的总量；η_f为第 f个调查因素的权重系数，$\eta_f = [0, 1]$，$\sum \eta_f = 1$；S_f为第 f个调查因素的评价值，由主观调查得出.

式(1)、式(3)和式(5)得到了每个评价方法的评价值，X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}分别组成 $M \times N$ 阶矩阵.

关于 N 个飞行任务，由飞行专家作出它们的评分，计算出权重系数集合 $\{\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_N\}$，与 X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}分别相乘，得出每个评价方法第 i个设计方案的评价值：

$$X_i = \sum_{j=1}^{N} X_{ij}\mu_j \quad Y_i = \sum_{j=1}^{N} Y_{ij}\mu_j \quad Z_i = \sum_{j=1}^{N} Z_{ij}\mu_j$$

根据确定的 3种评价方法的权重系数 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$，计算第 i个设计方案脑力负荷评价值 E_i：

$$E_i = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} \tag{6}$$

最后，在 M 中设计方案中，选择脑力负荷评价值最小的作为优先设计方案，即：$E = \min(E_1, E_2, \cdots, E_M)$.

1.4 权重系数确定方法

采用功能驱动原理赋权法中可靠性高、误差小且操作性强的 G_1 法确定飞机座舱视觉显示界面脑力负荷综合评价方法中评价指标的权重系数.

记专家个数为 L $(L > 1)$，分下述 2种情况对多位专家判断结果的综合方法进行讨论[5].

1) L 个序关系一致的情况

当 L 位专家关于指标 $u_1, u_2, \cdots, u_n$ 之间序关系的给出完全一致时，为书写方便，在此仍记为

$$u_1 \succ u_2 \succ \cdots \succ u_n \tag{7}$$

设专家 k 关于 r_j $(j = n, n-1, n-2, \cdots, 3, 2)$的赋值依次记为 $r_{k2}, \cdots, r_{kn}$, $k = 1, 2, \cdots, L$. 则取

$$w_n = \left(1 + \sum_{k=2}^{n}\prod_{i=k}^{n} r_i^*\right)^{-1} \tag{8}$$

而

$$w_{j-1} = r_j^* w_j \tag{9}$$

式中

$$r_j^* = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L} r_{kj} \qquad j = 2, 3, \cdots, n$$

2) L 个序关系不一致的情况

不失一般性，假设有 L_0 $(1 \le L_0 < L)$位专家给出指标 $u_1, u_2, \cdots, u_n$ 间的序关系是一致的，仍如式(7)所示. 此时，由式(8)、式(9)可求出与指标 u_j 相应的权重系数分别为 $w_1^*, w_2^*, \cdots, w_n^*$.

设序关系不一致的 $L - L_0$ 位专家所给出的序关系分别为：$u_k \succ u_{k2} \succ \cdots \succ_{kn}$, $k = 1, 2, \cdots, L - L_0$. 其中 u_{k1}表示专家 k按“$\succ$”排列的集 $\{u_i\}$中的第 i 个元素.

设专家 k关于 $u_{k,j-1}$与 u_{kj}间重要性程度之比的理性赋值分别记为 r_{kj} $(k = 1, 2, \cdots, L - L_0)$，由 $w_n = \left(1 + \sum_{k=2}^{n}\prod_{i=k}^{n} r_i\right)^{-1}$ 和 $w_{k-1} = r_k w_k$ 可求出指标 u_{kj}的权重系数 w_{kj}.

对于每一个 k $(1 \le k \le L - L_0)$，集 $\{u_{kj}\}$与集 $\{u_j\}$都是严格一对一的. 这样，针对每一位专家 k $(1 \le k \le L - L_0)$所提供的判断信息，都可等价地求出指标 u_{kj}的权重系数并记为 w_{kj}^{**}. 对于每一个 j $(1 \le j \le n)$，将 $L - L_0$ 个 w_{kj}^{**} 的算术平均值作为综合的结果并记为：$w_j^{**} = \frac{1}{L - L_0}\sum_{k=1}^{L-L_0} w_{kj}^{**}$，并将 w_j^{**} 归一化，最后称 $w_j = k_1 w_j^* + k_2 w_j^{**}$ $(j = 1, 2, \cdots, n)$ 为指标 u_j 相对于某评价准则的权重系数. 其中，$k_1 > 0$, $k_2 > 0$ 且 $k_1 + k_2 = 1$. 在本文中，取 $k_1 = L_0/L$, $k_2 = (L - L_0)/L$.

2 实验例证

选取某型号歼击机座舱显示布局 3种设计方案，在降落飞行任务下，运用本研究建立的综合评价系统分别计算 3种设计方案的脑力负荷预测值，从而选出最优方案.

2.1 权重系数的确定

聘请 6名工效专家和 6名高级飞行员来确定评价系统涉及到的权重系数，得到的结果如下：

3种脑力负荷评价方法的权重系数为

$$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0.312, 0.287, 0.401) \tag{10}$$

降落任务下飞行参数的权重系数为

$$(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7, \omega_8) = (0.216, 0.056, 0.189, 0.076, 0.064, 0.112, 0.108, 0.179) \tag{11}$$

眼动参数的权重系数为：

$$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0.428, 0.344, 0.0228) \tag{12}$$

主观评价法中评价指标的权重系数为

$$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6) = (0.279, 0.088, 0.258, 0.062, 0.138, 0.175) \tag{13}$$

2.2 实验过程

聘请 6名飞行员在某型号歼击机模拟器上完成降落任务，飞行员在完成任务的过程中佩戴眼动仪头盔，记录他们的眼动数据，执行任务之后完成主观调查，并且保存他们每次飞行的飞行参数.

2.3 主任务操作法的评价结果

由式(2)得到设计方案 1的 8个飞行参数的失误值分别为

$$(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8) = (0.855, 0.818, 0.566, 0.425, 0.595, 0.695, 0.487, 0.724) \quad (14)$$

同样的方法得到设计方案 2、方案 3的飞行参数失误值,将他们与式 (11)结合,由式 (1)最后得到 3种设计方案的主任务操作法的评价值为

$$(X_1, X_2, X_3) = (0.664, 0.413, 0.594) \quad (15)$$

2.4 生理测量法的评价结果

由式 (4)得到设计方案 1的 3个眼动参数的变化值为

$$(Q_1, Q_2, Q_3) = (0.584, 0.312, 0.493) \quad (16)$$

同样的方法得到设计方案 2、方案 3的结果,结合式 (12)由式 (3)得到 3种设计方案的生理测量评价值为

$$(Y_1, Y_2, Y_3) = (0.470, 0.316, 0.523) \quad (17)$$

2.5 主观评价法的评价结果

6名被试的主观调查结果平均后得到每个设计方案的 6个调查因素值,第 1种设计方案的为

$$(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6) = (0.48, 0.23, 0.56, 0.19, 0.38, 0.26) \quad (18)$$

将 3种设计方案的结果结合式 (13)由式 (5)得到 3种设计方案的主观评价法的评价值为

$$(Z_1, Z_2, Z_3) = (0.408, 0.215, 0.453) \quad (19)$$

2.6 综合评价结果

式 (15)、式 (17)、式 (19)的结果与式 (10)结合代入式 (6)得到 3种设计方案的综合评价结果:$(E_1, E_2, E_3) = (0.506, 0.306, 0.517)$. 其中,$E_{min} = E_2$,所以设计方案 2的脑力负荷最小.

3 讨　论

本研究结合了目前主要的脑力负荷评价方法,将它们综合应用发挥了各自的优点,使得结果更加全面. ①在主任务测量法中,根据记录的飞行参数,能够得出在完成任务过程中,飞行参数的误差值,了解操作绩效并反映出由于视觉界面不同导致的脑力负荷的不同. 计算得到的误差值越大表明脑力负荷越大. ②在生理测量法中,由于眼睛容易受外界干扰,所以测量时,保持外界照明环境一致,并且每次测量的时候,都把实验最初的数值作为初始值,记录的数据与其比较,这样保证了眼动数据不受不同实验时间时被试情绪的影响. ③在主观评价法中,被试在执行完任务后,进行主观调查,对 NASA-TLX中的 6个评价因素进行打分,主观感受越困难分值越高,最后的评价结果是,脑力负荷越大,评价值越大.

由于不同的飞行任务中,视觉界面显示的飞行参数的重要程度不同,决定了不同的飞行任务在整个评价系统中的重要程度的不同,通过专家评定打分给出了每个飞行任务的权重系数,得出每个设计方案的对应于 3种评价方法的评价值.

通过 3种评价方法得到了 3个评价值,根据每种方法在整个评价系统中体现的优缺点,确定它们的权重系数,最后得到一个每个设计方案的一个脑力负荷评价值,数值越大脑力负荷越大.

在整个评价系统中,评价指标权重系数的确定是综合评价中的核心问题[5]. 指标的权重系数是以数量形式表示被评价对象中各项指标的相对重要程度,它相当程度上决定了多指标综合评价的精度. 因此,合理的分配指标权重系数是定量化综合评价的关键.

4 结 束 语

本文综合主任务测量法、生理测量法和主观评价法 3种脑力负荷的评价方法,建立了飞机座舱视觉显示界面脑力负荷综合评价系统,并把结果量化,得出整个系统对于飞机座舱视觉界面脑力负荷的评价结果. 结果更加直观明了,而且能够在飞机座舱视觉界面的设计阶段做出预测评价,做到了前瞻性,对于确定最佳设计方案具有很好的应用价值.

参考文献 (References)

[1] Terese A D. An investigation on subjective assessment of workload and postural stability under conditions of joint mental and physical demands[D]. America: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003

[2] Stark J M. Pilot performance and eye movement activity with varying levels of display integration in a synthetic vision cockpit [D]. America: Old Dominion University, 2004

[3] 李文选. 脑力劳动负荷的评价 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 1997, 15(1): 55 - 57
Li Wenxuan. Evaluation of mental workload[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 1997, 15(1): 55 - 57 (in Chinese)

[4] 柳忠起,袁修干,刘伟,等. 飞行员注意力分配的定量测量方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(5): 518 - 521
Liu Zhongqi, Yuan Xiugan, Liu Wei, et al. Quantitative measuring method of pilots' attention allocation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 518 - 521 (in Chinese)

[5] 郭亚军. 综合评价理论与方法 [M]. 北京:科学出版社, 2002
Guo Yajun. Theories and methods of integration evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)

[6] Terence Y Kudo. Using statistical process control methods to classify pilot mental workload[D]. America: Department of the Air Force, Air University, 2001

(责任编辑:赵海容)