

# 战斗机追踪任务中听觉告警信息呈现对注意力的影响研究



牛亚峰<sup>1</sup>, 吴梦丽<sup>1</sup>, 屈梦原<sup>1</sup>, 杨文骏<sup>2</sup>

1. 东南大学, 江苏 南京 211189

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710000

**摘要:**合理的听觉告警信息呈现对飞行安全至关重要。本文聚焦于战斗机追踪任务下听觉通道告警信息对注意力表现的影响,并探讨信息呈现方式、注意力理论机制及其关系,基于认知特性、注意力分配转移理论以及现有的信息显示标准规范和编码进行了工效学试验。通过绩效分析和主观评价,获得了追踪任务执行精度、告警任务的反应速度以及用户负荷情况等研究结果。研究表明,在特定声音强度和预警间隔水平下,听觉信息对视觉任务的注意力有干扰作用;在300ms的预警间隔下,注意力反应较快;而在600ms的预警间隔下,追踪任务表现较优;此外,针对正确率和负荷体验结果,推荐采用60dB的听觉信息编码参数设置。本文为后续告警信息界面的开发提供了设计参考,可帮助优化听觉信息分配和战斗机告警信息编码设计。

**关键词:**听觉告警; 注意力; 认知负荷; 战斗机; 追踪任务

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.017

随着现代空中战场信息化水平的提高,战斗机飞行员面临着瞬息万变的空中态势和多样化的战斗飞行任务<sup>[1-2]</sup>。其中,追踪任务是常见的战斗机作战模式任务,要求飞行员持续追踪和监测移动目标,并及时准确地修正飞机姿态和轨迹,任务完成质量直接影响战斗机的作战能力<sup>[3]</sup>。然而在任务中大量信息的处理对飞行员的认知负荷和操控能力提出了极高要求,其在注意力方面的研究意义越发成为战斗机人机交互领域的重要课题之一。

听觉通道是战斗机追踪任务中信息呈现方式之一,主要涉及领域包括听觉信息编码与认知、战斗机飞行员注意力分配与转移、听觉认知特性与注意力等。目前,国内外学者针对以上方面进行了大量深入研究。

## (1) 战斗机听觉信息编码与认知

在听觉通道方面,研究者们主要致力于听觉信息表征形式与参数的研究。Lucas等<sup>[4]</sup>发现听标和耳标在不同场合下适用性不同。Brewster<sup>[5]</sup>研究发现耳标有助于提高操作者的任务绩效并降低交互过程的心理负荷。Boop等<sup>[6]</sup>发

现,告警语速越快,飞行员的关注程度越高。Causse等<sup>[7]</sup>指出在战斗机驾驶舱等多听觉告警的复杂环境下,由目标音调数量与整体音调数量组成的听觉负荷会对告警识别注意产生负面影响。Kim等<sup>[8]</sup>指出,立体声音频显示可以在空间上将关键信息与非关键信息分离,多音频显示的空间属性能够有效地减少对音频信息的注意和主观负荷。

## (2) 战斗机飞行员注意力分配与转移

目前,学者们已经提出多种飞行员注意力分配模型。Senders<sup>[9]</sup>引入了带宽(BW)的概念,建立了第一个仪表监视行为的量化模型。Wickens等<sup>[10]</sup>探讨了影响飞行员注意力分配行为的因素,如信息突显性、努力、期望、价值、习惯和关联,并建立了SEEV模型。在注意力分配方法方面,学者们也进行了多项研究。郭志等<sup>[11]</sup>针对飞行学员进近着陆阶段的注意力分配和操作行为展开了分析,并提出了注意力分配和操纵行为的风险识别与控制建议。Tsang等<sup>[12]</sup>开展了离散听觉响应与视觉追踪双任务试验,分析了空间兼容性对双任务注意力分配的影响。

收稿日期: 2023-06-21; 退修日期: 2023-08-07; 录用日期: 2023-09-21

基金项目: 航空科学基金(20200058069002); 国家自然科学基金(72171044, 71801037)

引用格式: Niu Yafeng, Wu Mengli, Qu Mengyuan, et al. Research on the influence of audible warning information presentation on attention in fighter tracking tasks[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 125-134. 牛亚峰, 吴梦丽, 屈梦原, 等. 战斗机追踪任务中听觉告警信息呈现对注意力的影响研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 125-134.

### (3) 听觉认知特性与注意力

听觉感知是对声音存在及其基本特征的反应,听觉感知与刺激量的变化呈对数关系<sup>[13]</sup>。在复杂的听觉环境中,通过集中注意力,被试者能够忽略干扰信息和背景环境,专注于感兴趣的信息,这种效应被称为“鸡尾酒效应”<sup>[14]</sup>。听觉注意力受声学显著性特征以及空间和时间属性的影响<sup>[15]</sup>,显著性特征包括音频、音调和强度,它们相互作用并引导注意力分配;空间属性如一致性和方位也影响注意力选择,听觉注意力通过处理来自感觉皮层的预期目标刺激来运作<sup>[16]</sup>。此外,时间间隔在多刺激呈现时影响刺激识别和注意力分配,较短的间隔时间易受时间掩蔽效应影响,较长的间隔时间可能导致时间错误。时间错误取决于间隔时间、刺激持续时间和属性特征<sup>[17]</sup>。

目前,听觉通道信息呈现和认知机制已具备相对完善的系统性研究,可有效地应用于战斗机人机界面系统研究中。在执行飞行任务时,听觉告警信息因其迫听性和全方位性在其中发挥重要作用,但由于信息内容和任务要求的差异,听觉信息呈现方式与有限认知资源之间存在矛盾<sup>[18]</sup>,在驾驶舱内有效获取听觉信息很大程度上取决于合理分配有限的注意力资源<sup>[19]</sup>,如果无法合理做好听觉信息编码和注意力分配可能导致不稳定的态势感知能力表现,飞行员将无法及时准确地应对各种状况,导致军事航空事故。因此,基于战斗机追踪任务的听觉告警信息呈现与注意力的相关性研究对提升飞行员的态势感知能力、提高听觉通道信息处理效率,以及保障飞行任务的顺利和安全具有重要意义。

本文旨在研究听觉告警信息呈现与注意力分配转移之间的关系,并探讨其在提高飞行员注意力表现和减轻认知和操作负担方面的潜力。研究选取了战斗机飞行任务中常见而重要的追踪任务和告警反应任务以进行试验研究。试验中主要考虑了听觉告警信息中的声音强度和预警间隔因素。声音强度作为重要的声学参数,已被证明会影响感知紧迫性,进而影响反应与注意力<sup>[20-22]</sup>。而预警间隔会直接影响到人接收和响应紧急信息的能力,既能作用于对刺激本身的识别,也能调节刺激带来的影响,引导注意力<sup>[17,23]</sup>。本文基于双任务试验范式,通过操作绩效在工效学试验中的评估,对战斗机追踪-告警双任务场景下的认知资源分配进行了定量和定性探讨。本文旨在探索并提出优化注意力分配转移和提升注意力表现的听觉告警信息呈现设计建议,以有效提高听觉告警交互的效率和可靠性,对于增强飞行员在执行战斗机飞行任务时的态势感知能力和飞行安全

具有重要意义。

## 1 试验设计

### 1.1 试验方法与目的

本文选取了战斗机飞行任务中常见而重要的追踪任务和告警反应任务,并采用双任务试验范式,通过基于模拟飞行平台的工效学试验和主观评价,比较不同预警间隔和不同声音强度组合试验条件下的任务绩效与任务负荷。本文综合分析追踪任务与告警反应任务的注意力表现,评估听觉告警信息呈现对双任务注意力表现的影响,并提出优化听觉注意力表现、提升飞行安全性的听觉告警信息参数设置建议。

### 1.2 被试者

本试验邀请了20位被试者,右利手,年龄介于22~26岁,平均年龄为24.6岁,标准差为0.74。受试者具备矫正后正常视力(矫正度数在800°以下),无色盲色弱等易引起信息识别障碍的身体因素。受试者对战斗机语音告警内容有一定了解。根据G\*Power进行样本量预估,本试验采用双因素被试内设计,受试者数量达到并超过了统计检验力为0.8的数量要求下限。

### 1.3 试验环境与试验平台搭建

#### 1.3.1 试验环境

本试验在一个约15m<sup>2</sup>的人因工程实验室进行,实验室环境光线充足、明暗适中、安静舒适,为受试者提供了良好的试验条件。受试者被指示坐在模拟飞行座舱座椅上,显示屏中心设置在受试者正常水平视线范围内,高度设置为920mm。屏幕中心与受试者眼点距离为890~950mm。受试者右手处设置飞行摇杆控制手动追踪任务,左手处设置键盘按键进行告警反应任务。试验场景的配置如图1所示。

#### 1.3.2 软硬件环境

本文的试验平台基于MATB-II模拟飞行软件系统进行



图1 试验场景

Fig.1 Experimental scenario

搭建,并根据实际试验需要改良优化,主要包括追踪任务模块和告警反应任务模块。试验开发软件环境见表1。

表1 试验开发的软件环境

Table 1 Software used in experimental development

功能	软件名称
编程语言	C#
开发平台	Unity 2019
集成开发环境	Visual Studio 2019
试验界面绘制	Figma
音频素材编辑	Adobe Audition

本文所构建的模拟飞行系统的硬件环境主要包括驾驶舱物理仿真环境座椅支架、高清显示屏、有线降噪耳机、控制输入飞行摇杆和控制输入按键键盘。(1)驾驶舱物理仿真环境座椅支架为WEFLY模拟飞行座椅支架套装,操作台与座椅融为一体,显示支架与飞行操作台分开,方便进行视景距离和位置的调整。(2)高清显示屏的屏幕尺寸27in(1in $\approx$ 25.4mm);最大物理分辨率为2560 $\times$ 1600;刷新率为60Hz;色域为100%DCI-P3;亮度级别设置并固定为450nit,以确保素材呈现灵敏无拖影,屏幕显示效果清晰生动、亮度适中。屏幕安装在模拟飞行座舱支架上,根据飞行员正常视野范围和驾驶舱内信息布局。(3)本文选用Logitech X52pro作为试验任务的控制输入飞行摇杆。该摇杆配备了中置双弹簧全金属中轴杆,具有较高的仿真模拟度。XY轴采用无接触式霍尔磁感应电位器,操作精度高,可以精确捕捉飞行员的控制输入信息。(4)本文采用Sennheiser HD660S立体声耳机作为有线降噪耳机。该耳机的传感器可以实现精确匹配公差在1dB左右,确保试验听觉刺激的显示精度;可降低噪,隔离被试者的听觉环境,防止噪声干扰。

## 1.4 试验变量与试验参数设计

### 1.4.1 试验变量

#### (1) 自变量

本文采用的双自变量分别为告警任务中的预警间隔(共两种)和告警音声音强度(共两种)。具体的自变量设置见表2。

#### (2) 因变量

本试验的因变量包括追踪任务的均方根追踪误差、听

表2 自变量设置

Table 2 Independent variable setting

自变量	水平	
预警间隔/ms	300	600
声音强度/dB	60	90

觉告警反应任务的反应时和正确率,以及被试者对任务负荷的主观评价。

### 1.4.2 参数设置

#### (1) 听觉告警信息表征形式

为排除视觉告警信息对试验结果的干扰,本文仅采用听觉通道进行告警信息呈现,呈现形式为“预警音频+文字语音”。语音告警信息包括燃油不足、发现敌机、引擎故障和导弹发射4种。具体的音频设计如图2所示。

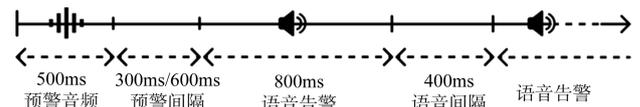


图2 听觉告警组成

Fig.2 Composition of auditory alarm

#### (2) 预警音频设置

预警音频设置在听觉告警刺激中对于引导注意力捕获起到关键作用。研究表明,预警音的长度应在0.35~0.55s范围内,美国空军制定的标准要求预警音的时长至少为0.5s<sup>[24]</sup>。因此,本试验中预警音的时长设为0.5s。预警间隔是指预警音结束到告警语音开始之间的时间长度,研究指出,预警间隔的取值范围为0.3~0.65s<sup>[25]</sup>。本文选择了600ms和300ms两个水平进行预警音间隔时长研究。

#### (3) 语音告警设置

根据研究建议,语音告警选用普通话女中音进行录制,句间隔时间为4~6字/s,语速为0.3~0.65s,每句语音的字数不超过7个字<sup>[26]</sup>。

#### (4) 声音强度

听觉告警的声音强度应满足在高噪声环境下能够正确感知,同时不能过大,否则会干扰飞行员的注意力,建议最大声音强度为110dB,最小声音强度为50dB,且相邻告警信息之间的声音强度相差不超过30dB<sup>[24]</sup>。故本文选择60dB和90dB两个水平对声音强度进行研究。

## 1.5 试验任务设置

本文采用双任务试验范式,主任务为追踪任务,次任务为告警反应任务,以下是两项任务的详细设置。

#### (1) 追踪任务

要求被试者利用飞行摇杆控制一个不断向外偏移的圆形目标物保持在虚线正方形内,尽力使其与正中心光标重合,当目标物离开虚线框时显示为红色,否则为蓝色。系统以20次/s的频率对记录试验中目标物的坐标(x,y),并计算追踪任务的均方根追踪误差(RMSTE)。每个试验条件下,

追踪任务的平均RMSTE用于评估追踪任务的注意力表现。

## (2) 告警反应任务

在告警反应任务中,被试者被告知优先保证主任务完成(即追踪任务),其需注意可能呈现的4种告警信息,并根据语音内容按下相应的响应按键(Z、X、C、V)。被试者需要在4000ms内快速注意到告警信息并做出按键反应,且要保证一定的正确率。如果被试者在4000ms内未能对出现的告警信息做出反应,本次告警响应被判定为失败,并跳转至下一试次;如果被试者在4000ms内做出了反应,本次告警响应被判定为成功,并跳转至下一试次。

## 1.6 试验程序

完成听觉试验素材和界面开发工作后,进行模拟飞行追踪-告警任务试验研究。为避免试验结果受顺序效应影响,每次试验中场景和整个试验次序的安排经过拉丁方平衡。每位被试者需要完成 $2(\text{预警间隔}) \times 2(\text{声音强度}) \times 12(\text{试次}) = 48$ 次告警任务。告警信号之间存在6~12s的随机间隔时间,每个试次包括告警响应和间隔时间,总计约18s,完成所有试次大约需要15min。一个单独试次的完整流程如图3所示。

在正式试验前,进行模拟飞行场景的介绍和练习,向被试者说明追踪和听觉告警两个任务场景,要求被试者学习理解听觉告警信号的内容以及相应的按键操作,引导被试者正确地操作摇杆。根据被试者的熟练程度,重复进行2~3次练习,以确保被试者掌握试验操作和流程。观察练习过程并查看练习的试验数据,当有60%的追踪误差小于设定值100px(即光标位于虚线区域的最大误差值)且告警响应正确率达到60%以上时,进入正式试验。

试验程序包括以下步骤:(1)屏幕中心显示试验指导语,指示被试者追踪任务和告警反应任务的目标和要求;(2)屏幕中心显示十字标志,被试者需要将注意力集中在十字标志上,保持视线在屏幕中心位置;(3)追踪任务界面开始呈现,按下“Enter”键启动追踪任务;(4)进行追踪任务过程中,耳机中随机播放4种听觉告警信息之一,被试者需要根据告警信息完成告警反应任务;(5)告警信息消失后,计时器归零,完成一个试验试次。在600~1500ms的随机停留间隔后,进入下一试次的告警反应任务。

## 2 数据分析

### 2.1 正确率

本试验共收集到20位被试者的960个试次的反应时数据,对反应时数据进行了异常值筛选后共收集到949条有

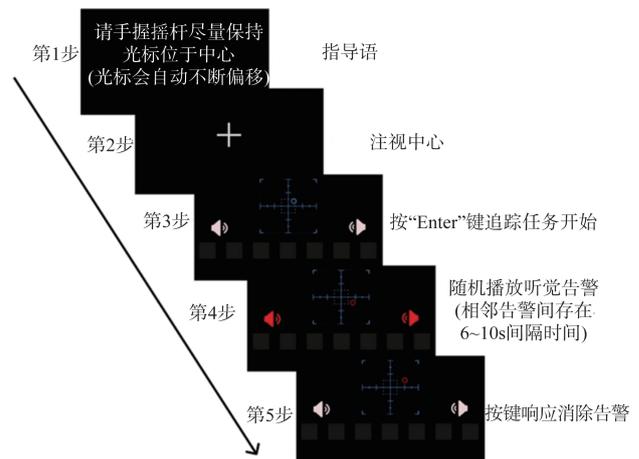


图3 单试次试验流程

Fig.3 Single trial experimental process

效数据,其中成功试次848次,失败试次100次(错误试次33次、遗漏试次67次)。表3展示了不同听觉信息编码下的告警反应任务正确率情况。

表3 不同听觉信息编码条件下的正确率

Table 3 Accuracy under different auditory information encoding conditions

预警间隔/ms	声音强度/dB	平均值/%	标准偏差/%
300	60	87.64	5.70
	90	85.46	4.78
600	60	90.23	4.01
	90d	88.97	5.87

对不同预警间隔和声音强度条件下的正确率数据进行S-W正态性检验,结果显示在各条件下,正确率数据均呈现显著性( $p < 0.05$ ),不符合正态分布,因此,我们采用了非参数的弗里德曼(Friedman)检验进行进一步分析,结果表明,听觉参数组合条件对正确率有显著影响( $p = 0.008 < 0.05$ )。

在4种听觉参数组合条件中,300ms间隔和90dB声音强度组合条件下的平均正确率最低(85.46%±4.78%),而600ms间隔和60dB声音强度组合条件下的正确率最高(90.23%±4.01%),具体的正确率统计情况如图4所示。

### 2.2 反应时

本文将反应时定义为从听觉语音信息开始呈现到按键响应的时长,排除了预警音时长和间隔时长。对数据进行预处理,剔除11条异常数据,共收集到949条有效数据。表4展示了被试者在每种听觉信息呈现条件下的反应时数据统计结果,箱线图如图5所示。结果显示,在300ms间隔和60dB声音强度条件下的告警任务反应时最短,表现出最

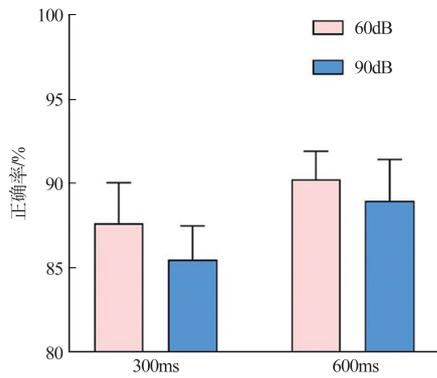


图4 不同听觉信息编码正确率

Fig.4 Accuracy of encoding different auditory information

表4 不同听觉信息编码下反应时数据统计

Table 4 Response time data statistics under different auditory information encoding

预警间隔/ms	声音强度/dB	
	60	90
300	1.4168±0.513	1.526±0.545
600	1.729±0.460	1.712±0.443

好的听觉告警反应任务绩效。

对反应时数据进行了正态性检验和方差齐性检验,各因素水平下的S-W统计值均满足 $p>0.05$ ,Levene齐性检验的 $p$ 值也大于0.05,表明数据具有正态分布且符合方差齐性。开展重复测量方差分析,结果见表5。声音强度因素的主效应不显著( $F=2.012, p=0.156>0.05$ ),而预警间隔因素的主效应显著( $F=1295.781, p<0.001$ ),并且声音强度和间隔时间之间存在显著的交互效应( $F=6.706, p=0.010<0.05$ )。

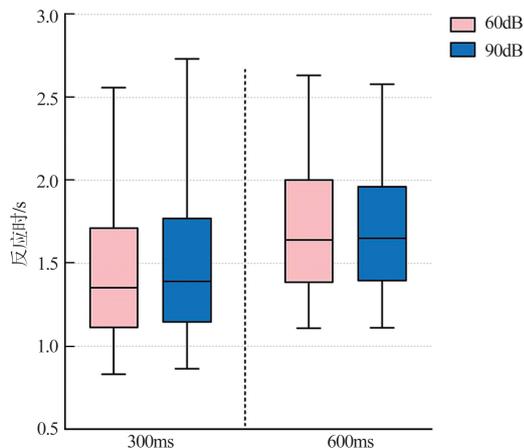


图5 不同听觉告警信息呈现下反应时数据

Fig.5 Response time data presented under different auditory warning information

表5 告警反应任务反应时数据方差分析

Table 5 Analysis on variance of response time data for alarm response tasks

因素	平方和	均方	F	p
声音强度	0.487	0.487	2.012	0.156
间隔时间	313.853	313.853	1295.781	<0.001
声音强度×间隔时间	1.624	1.624	6.706	0.01

通过声音强度和预警间隔的反应时均值对比折线图可以看出,随着声音强度的增加,预警间隔的效应降低,如图6所示。

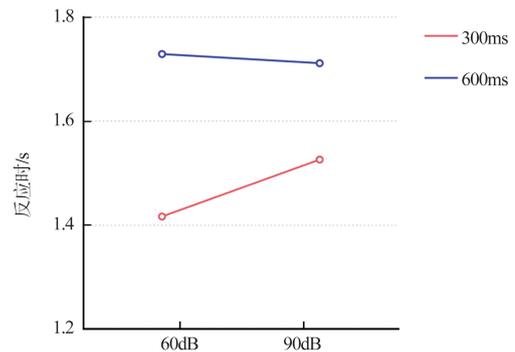


图6 声音强度与预警间隔交互效应轮廓图

Fig.6 Outline of the interaction effect between sound intensity and warning interval

### 2.3 均方根追踪误差

本文共收集到960个均方根追踪误差数据,剔除超过均值±3个标准差的异常值,4种听觉告警条件下的均方根追踪误差情况见表6,均方根追踪误差箱线图如图7所示。

表6 追踪绩效数据统计

Table 6 Tracking performance data statistics

预警间隔/ms	声音强度	平均值/px	标准偏差
300	60dB	44.09	9.43
	80dB	48.55	9.18
600	60dB	39.25	8.1
	80dB	41.26	7.44

对均方根追踪误差数据进行正态性检验和方差齐性检验,各组数据均通过了S-W检验, $p$ 值均大于0.05,表明数据符合正态分布。方差齐性检验的结果显示 $p$ 值为0.772,大于0.05,进一步证明了均方根误差数据满足正态分布且方差齐性。

表7展示了主任务视觉手动追踪任务的均方根误差数据方差分析的结果。预警间隔时间的主效应非常显著( $F=12.013, p<0.001$ ),声音强度的主效应不显著( $F=3.415, p=$

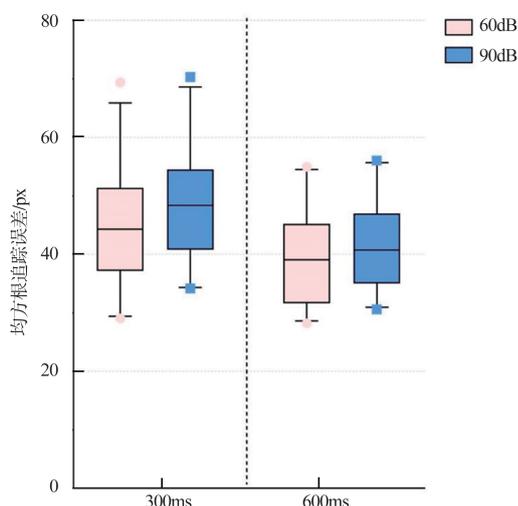


图7 听觉告警信息呈现下均方根追踪误差

Fig.7 Root mean square tracking error under auditory alarm information presentation

0.068>0.05)。此外,听觉告警信息编码设计中预警间隔时间与声音强度之间没有显著的二阶效应( $F=0.488, p=0.486>0.05$ )。这些结果表明,预警间隔时间对主任务追踪任务产生了显著影响,而声音强度对任务的干扰效应不显著。

表7 RMSTE数据方差分析

Table 7 Analysis on variance for RMSTE data

变异源	平方和	df	均方	F	p
预警间隔	883.731	1	883.731	12.013	<0.001
声音强度	251.262	1	251.262	3.415	0.068
预警间隔×声音强度	35.929	1	35.929	0.488	0.486

### 3 结果讨论

本文旨在探究不同预警音间隔时长(300ms、600ms)和不同听觉告警声音强度(60dB、90dB)对主任务追踪任务的均方根追踪误差以及告警反应任务的反应时和正确率的影响。在讨论试验结果时,从追踪任务绩效和告警任务绩效两个维度进行了分析,以推导关于听觉通道告警信号呈现的设计建议。

首先,关于告警反应任务的正确率,存在两种类型的反应失败情况:错误反应和反应缺失(即遗漏)。符合预期的是,在90dB条件下相比60dB条件下更不容易出现反应遗漏,而在短预警间隔300ms条件下更容易出现错误按键反应。根据听觉先占理论,在多种信息通道同时接收任务信息时,由于听觉的特殊性,人类更倾向于关注听觉信息而忽略其他通道的信息,因此听觉信息能够更快地引起人类的

注意力反应<sup>[27]</sup>。增大告警音频声音强度能够增强听觉突显性<sup>[21]</sup>,可能导致更强烈的听觉先占效应,占用更多的注意资源,更容易注意到听觉信息,并迅速准确地对其做出反应。然而,试验结果显示,高分贝告警的正确率较低,这与多资源理论相符,飞行员在处理双任务时的认知资源有限,视觉追踪任务和听觉告警反应任务相互干扰。高分贝短预警间隔(90dB、300ms)的告警信号产生更大的时间压力和任务负荷,导致任务难度增加,影响了注意力资源的分配,从而降低了告警正确率。

其次,关于告警反应任务的反应时,听觉告警信号的预警间隔时长对任务反应时具有显著影响。先前的研究表明,听觉刺激的感知处理时间受到来自告警声音特征的感知紧迫性的影响<sup>[28]</sup>,在本试验中,较短预警间隔时间表现出更大的紧迫性,这与先前的研究理论一致。此外,听觉刺激间的间隔时间能够引导对多刺激的时间注意<sup>[17]</sup>,本试验结果显示,不同预警音水平下反应时差异显著,长间隔对告警信息注意产生负面影响,预警音间隔300ms的告警信号的反应时短于600ms,相差0.224s(12.99%),这表明,告警任务占用了更多的注意力资源,被试者可更快地注意到和反应告警信号。

声音强度因素被证实是引起紧迫性变化的听觉参数设置<sup>[22]</sup>,然而,在本试验的数据结果中,声音强度对反应时的影响并不显著,可能是由于音量被看作是引起用户厌恶和愤怒的主观听觉信号因素<sup>[29]</sup>,分贝作为衡量主观声音强度的对数单位,与音量之间存在非线性正比关系,声强增大可能导致用户的主观负荷感增加,进而分散注意力并转移到其他任务场景中<sup>[30]</sup>,这种负面影响可能抵消了紧迫性的正面影响,此观点可在主观评价部分进行进一步分析,但需要通过声音强度和预警间隔对反应时的交互作用进一步验证。

试验结果显示,预警音间隔缩短对反应时产生的效应随着声音强度增大而减少。低分贝短预警的告警信号反应时最短,对告警的注意和反应最快,而声音强度产生的负面影响明显高于正面影响,预计当预警间隔缩短至一定值时,反应时间会增加,并在进一步缩短后趋于稳定,甚至出现下降。由于战斗机告警信息的特殊性,预警间隔的设置范围有限,进一步扩展间隔范围的实际价值也可能有限。

最后,在追踪任务的表现方面,试验结果显示听觉信息编码中的预警间隔时长对追踪任务的绩效有显著影响。长预警间隔下的追踪误差更小,长预警间隔下的反应时更长,要求的反应速度较慢,因此对主任务影响相对较小,此结果

验证了多资源理论,即预警间隔影响了听觉告警任务与追踪任务间的注意力资源竞争,短预警间隔会加剧对追踪任务的干扰。在告警信号预警音设计中,一方面,适度延长预警音间隔时间能够有助于减轻听觉先占的特性,有效改善告警对追踪任务的干扰,减少对追踪任务的注意力分散,提升注意表现,特别适用于对追踪任务精度要求较高、优先级较高的场景任务;另一方面,适度缩短预警间隔能够提升对告警信息的注意,并加快对告警的反应,300ms 预警间隔与600ms 预警间隔之间的追踪误差相差6.07px(13.09%)。

声音强度对追踪任务的绩效表现无显著影响,与声音强度在告警反应方面的影响表现一致。声音强度已经被证实能够增加突显性并增强对听觉信息的紧迫性<sup>[22]</sup>,然而,在本试验的研究结果中并没有验证这一观点。我们推测,在试验环境中,高分贝声音的突显性并不能引起注意力的变化,模拟试验可能覆盖了对告警信号“危险”的感知,但在实际飞行应用时也许会存在差异。

#### 4 主观评价

前文行为试验得到了关于追踪-告警反应双任务试验范式下追踪任务的均方根追踪误差、听觉告警反应任务的反应时和正确率的结果,为了进一步验证结果的有效性,在试验结束后,让每一个被试者对试验任务进行了脑力负荷的主观评价,主要运用NASA-TLX量表开展。

##### 4.1 NASA-TLX任务负荷量表

NASA-TLX量表是由美国国家航空航天局(NASA)的人类工效学专家开发,用于评估航天员在执行任务时的认知和情感负荷,该量表包含6个维度的评价:心理需求、体力需求、绩效表现、时间需求、努力程度和受挫程度<sup>[31]</sup>。NASA-TLX量表在人因研究中具有重要影响,其对各种试验操作水平上的工作负荷评估相对敏感,且具有良好的信效度<sup>[32]</sup>,已成为航空航天等领域中应用最广泛的评价方法之一。

应用NASA-TLX量表进行主观评价主要分为两步:(1)被试者完成每个阶段试验任务后,针对每个维度选择与自身主观感受最相符的评分值;(2)被试者对各个维度进行两两比对,从中选择与工作负荷更相关的维度,得到各维度的排序。

##### 4.2 主观评价结果

基于被试者对6个指标选项与总负荷相关的程度的排序,获得NASA-TLX各维度的权重,结合每个选项的评分值,计算出每个被试者的总体任务负荷指数,结果见表8。

表8 NASA-TLX样本数据统计

Table 8 NASA-TLX sample data statistics

预警间隔/ms	声音强度/dB	平均值	标准偏差
300	60	49.62	8.85
	80	57.29	9.95
600	60	49.89	10.34
	80	57.28	10.49

对主观负荷数据进行正态性检验和方差齐性检验,统计结果显示 $p=0.353>0.05$ , $p=0.826>0.05$ ,说明NASA-TLX主观负荷数据符合正态分布并满足方差齐性。基于这些数据检验结果进行方差分析,研究不同听觉信息编码设计对主观负荷的影响情况。采用LSD分析方法研究两个自变量对主观负荷值的主效应和交互效应,方差分析结果见表9。听觉告警中预警音间隔时长未呈现出显著差异( $F=0.311$ , $p=0.955>0.05$ );听觉告警声音强度的主效应显著( $F=1357.510$ , $p<0.001$ ),表明声音强度设置对被试者的主观负荷体验有显著影响;预警音间隔时长与声音强度间不存在二阶效应,因为其未出现显著差异( $F=0.006$ , $p=0.940>0.05$ )。

表9 NASA-TLX数据方差分析结果

Table 9 NASA-TLX data variance analysis results

变异源	平方和	df	均方	F	p
预警间隔	0.311	1	0.311	0.003	0.955
声音强度	1357.51	1	1357.51	13.725	<0.001
预警间隔×声音强度	0.555	1	0.555	0.006	0.94

通过对两种声音强度和两种预警音间隔时长的评分数据绘制箱线图,如图8所示,可发现主观负荷值在声音强度较高的听觉告警任务下更高。

##### 4.3 主观评价结果讨论

任务负荷主观评价结果显示,90dB条件下的负荷分值显著高于60dB条件下的分值(7.53分),这与绩效试验结果中的预测分析一致。声音强度增大可能会提升紧迫感,从而极大地增加了主观负荷,但紧迫感提升同时也会带来对声音的快速注意;另外高分贝产生的厌恶感可能会增加用户主观负荷体验<sup>[33]</sup>,也许会使注意力分散转移到其他任务场景,可见紧迫感和厌恶感这两个因素可能对注意力产生相互抵消效应。

预警间隔时长(300ms和600ms)对主观任务负荷的影响不显著,但在绩效方面,预警间隔时间对追踪任务和告警任务的绩效有影响,这与相关研究中负荷量水平对注意力表现的影响有所不同<sup>[33]</sup>,可以推测,预警间隔对注意力的影

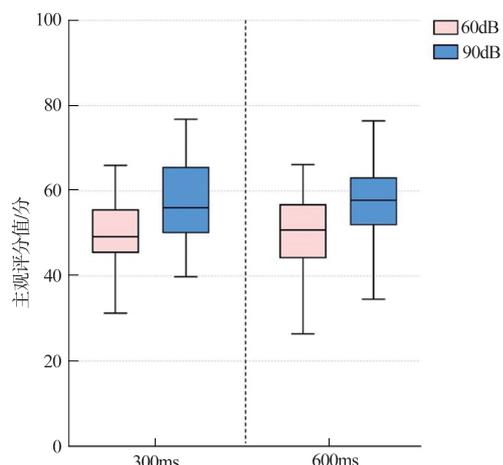


图8 不同听觉告警呈现下主观评价分值

Fig.8 Subjective evaluation scores under different auditory alarm presentations

响主要基于时间方面的引导,并没有产生负荷差异。

主观评价结果表明,在预警间隔时间较长(600ms)条件下,产生的任务负荷略小于预警间隔时间较短(300ms)条件下的任务负荷;90dB声音强度和预警间隔为300ms的听觉信息编码组合带来最大的任务负荷体验,并且显著高于其他三种信息编码组合条件下的任务负荷评分,这些结果对于不同告警场景下的信息编码设计具有一定的借鉴意义。

## 5 总结与展望

### 5.1 研究结论

本文综合分析了声音强度和预警间隔这两个因素对追踪任务和告警反应任务的绩效数据和主观评价结果,并结合注意力相关理论进行了深入分析。得出以下关于声音强度和预警间隔的结论和设计参考:(1)在特定声音强度和预警间隔水平下,听觉告警信息对视觉任务的注意有干扰作用;(2)在300ms的预警间隔下,注意力反应较快;而在600ms的预警间隔下,追踪任务表现较优;(3)基于正确率和主观负荷评价结果,推荐采用60dB的听觉信息编码参数设置。

本文通过工效学试验和主观评价等方法,探究了声音强度和预警间隔对告警反应任务和追踪任务的注意力表现和资源分配的影响,并提出了设计建议,然而,本文还存在以下不足之处:选择的听觉告警任务的难度相对较低,仅涉及简单的按键响应消除。而实际飞行任务中的告警情况更为复杂,对响应操作的要求更高。因此,需要进一步研究,

将在简单任务告警场景下的研究成果推广应用到复杂任务的告警。

### 5.2 研究展望

在未来的研究中,可以从以下几个方面进行考虑:

(1)战斗机任务场景中的告警干扰在不同的告警级别和实际飞行情况下会有较大差异,不同的告警级别可能需要使用不同的信息呈现通道,如视觉、听觉和触觉,需要进一步研究在这些不同通道之间的认知资源分配竞争情况。

(2)注意力研究目前主要集中在信息呈现方式上,注意力分配研究在新型交互方式上有更多的应用可能性,需要进一步探讨使用听觉作为控制输入是否会影响其他任务的注意力资源分配。

(3)战斗机任务场景和信息呈现方式多样,本文中使用了追踪任务和告警任务的场景信息,但实际飞行任务涉及的场景众多,如起飞、降落、爬升、空-空攻击等,不同场景接收的信息内容也不相同,信息编码可能会对注意力分配策略产生一定影响。

AST

### 参考文献

- [1] 艾凤明,梁兴壮,董润,等.军用飞机供配电系统故障预测与健康管理的核心技术[J].航空科学技术,2023,34(2):86-95.  
Ai Fengming, Liang Xingzhuang, Dong Run, et al. Key technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023,34 (2): 86-95. (in Chinese)
- [2] 张益凡,王宇超,张琴喻,等.基于眼动指标的飞行员注意状态识别可行性研究[J].航空科学技术,2022,33(4):39-46.  
Zhang Yifan, Wang Yuchao, Zhang Qinyu, et al. Feasibility research on pilot attention state recognition based on eye metrics [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33 (4): 39-46. (in Chinese)
- [3] 曹建彪,王业光,王世鹏,等.基于飞行任务的飞行品质评估方法[J].飞机设计,2021,41(2):3741.  
Cao Jianbiao, Wang Yeguang, Wang Shipeng, et al. Mission-oriented flying qualities evaluating method [J]. Aircraft Design, 2021,41 (2): 37-41.(in Chinese)
- [4] Lucas P A. An evaluation of the communicative ability of auditory icons and earcons[C]. Accepted for publication in the proceedings of ICAD, 1994.
- [5] Brewster S A. Using non-speech sound to overcome information overload [J]. Displays, 1997, 17(3-4): 179-189.

- [6] Boop B, Garcia-Rill E, Dykman R, et al. The P1: insights into attention and arousal [J]. *Pediatric Neurosurgery*, 1994, 20(1): 57-62.
- [7] Causse M, Parmentier F B, Mouratille D, et al. Busy and confused? High risk of missed alerts in the cockpit: an electrophysiological study [J]. *Brain Research*, 2022, 1793: 148035.
- [8] Kim S, Miller M E, Rusnock C F, et al. Spatialized audio improves call sign recognition during multi-aircraft control [J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 70: 51-58.
- [9] Senders J W. The human operator as a monitor and controller of multidegree of freedom systems [J]. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1964 (1): 2-5.
- [10] Wickens C D, Hollands J G, Banbury S, et al. *Engineering psychology and human performance* [M]. London: Psychology Press, 2015.
- [11] 郭志, 陈农田, 高朗, 等. 飞行学员进近着陆注意力分配与操作行为分析 [J]. *中国科技信息*, 2018(19): 49-52.  
Guo Zhi, Chen Nongtian, Gao Lang, et al. Analysis of Attention Allocation and Operational Behavior of Flight Students in Approach and Landing [J]. *China Science and Technology Information*, 2018 (19): 49-52.(in Chinese)
- [12] Tsang S N H, Chan A H S, Pan X, et al. Auditory versus visual spatial stimulus-response mappings in tracking and discrete dual task performance: implications for human-machine interface design [J]. *Ergonomics*, 2021, 64(4): 485-501.
- [13] Emanuel D C, Letowski T. *Hearing science* [M]. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams and Wilkins, 2009.
- [14] Cherry E C. Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1953, 25(5): 975-979.
- [15] Kaya E M, Elhilali M. Investigating bottom-up auditory attention [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8: 327.
- [16] Wu C T, Weissman D H, Roberts K C, et al. The neural circuitry underlying the executive control of auditory spatial attention [J]. *Brain Research*, 2007, 1134: 187-98.
- [17] Barne L C, Sato J R, De Camargo R Y, et al. A common representation of time across visual and auditory modalities [J]. *Neuropsychologia*, 2018, 119: 223-232.
- [18] Fort A, Delpuech C, Pernier J, et al. Early auditory visual interactions in human cortex during nonredundant target identification [J]. *Cognitive Brain Research*, 2002, 14(1): 20-30.
- [19] 吴新良, 张滋, 汪鹏, 等. 面向体系作战的战斗机信息融合技术研究 [J]. *航空电子技术*, 2020, 51 (4): 1-5.  
Wu Xinliang, Zhang Zi, Wang Peng, et al. Research on airborne information fusion technology in system combat [J]. *Avionics Technology*, 2020, 51 (4): 1-5.(in Chinese)
- [20] Postman L. The time-error in auditory perception [J]. *The American Journal of Psychology*, 1946, 59(2): 193-219.
- [21] Haas E C, Casali J G. Perceived urgency of and response time to multi-tone and frequency-modulated warning signals in broadband noise [J]. *Ergonomics*, 1995, 38(11): 2313-2326.
- [22] Baldwin C L, May J F. Loudness interacts with semantics in auditory warnings to impact rear-end collisions [J]. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 2011, 14(1): 36-42.
- [23] Rammesayer T H, Borter N, Troche S J. Visual-auditory differences in duration discrimination of intervals in the subsecond and second range [J]. *Frontiers in Psychology*, 2015, 6: 1626.
- [24] Department of Defense. *Human engineering design criteria for military systems, equipment and facilities*[S]. Department of Defense, 1981.
- [25] 韩东旭, 周传岱, 刘月红, 等. 汉语语音报警参数选择的心理学研究 [J]. *航天医学与医学工程*, 1998, 11(3): 185-188.  
Han Dongxu, Zhou Chuandai, Liu Yuehong, et al. Psychological study of parameter selection for chinese speech warning[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1998, 11 (3): 185-188. (in Chinese)
- [26] 张彤, 郑锡宁, 朱祖祥, 等. 语音告警信号语速研究 [J]. *应用心理学*, 1997 (1): 34-39.  
Zhang Tong, Zheng Xining, Zhu Zuxiang, et al. A study on speech rate of voice warnings [J]. *Chinese Journal of Applied Psychology*, 1997 (1): 34-39.(in Chinese)
- [27] Wickens C D, Dixon S R, Seppel T B. Auditory preemption versus multiple resources: Who wins in interruption management? [C]//*Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2005.
- [28] Friedrich M, Vollrath M. Urgency-Based color coding to

- support visual search in displays for supervisory control of multiple unmanned aircraft systems [J]. *Displays*, 2022, 74: 102185.
- [29] Arnal L H, Kleinschmidt A, Spinelli L, et al. The rough sound of salience enhances aversion through neural synchronisation [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3671.
- [30] Fetterman A K, Bresin K, Robinson M D. Emotion repair and the direction of attention in aversive contexts: Evidence from an attention-demanding task [J]. *Journal of Research in Personality*, 2013, 47(1): 107-110.
- [31] Hart S G. NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later [C]//*Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2006.
- [32] Mansikka H, Virtanen K, Harris D. Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks [J]. *Ergonomics*, 2019, 62(2): 246-254.
- [33] Patten C J, Kircher A, Östlund J, et al. Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2004, 36(3): 341-350.

## Research on the Influence of Audible Warning Information Presentation on Attention in Fighter Tracking Tasks

Niu Yafeng<sup>1</sup>, Wu Mengli<sup>1</sup>, Qu Mengyuan<sup>1</sup>, Yang Wenjun<sup>2</sup>

1. Southeast University, Nanjing 211189, China

2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710000, China

**Abstract:** Effective presentation of audible warning information is of paramount importance for ensuring flight safety. This paper delves into the impact of auditory alerts on attention performance during fighter jet tracking tasks. It comprehensively examines methods for conveying such information, delves into attention theory mechanisms, and their intricate relationships. This investigation is rooted in cognitive characteristics, attention distribution theory, and established information display standards. The research employs ergonomic experiments and coding analyses, coupled with performance assessment and subjective evaluations. Notably, the study yields insights into execution accuracy for tracking tasks, speed of response to alarm assignments, and user cognitive load. The findings underscore that auditory cues, operating within specific sound intensity and warning interval parameters, can disrupt the concentration on visual tasks. Importantly, a 300ms warning interval triggers quicker attention responses, whereas a 600ms interval enhances tracking task performance. Furthermore, based on accuracy rates and user experience feedback, a recommended auditory information encoding parameter of 60dB emerges. This paper serves as a foundational resource for designing future warning information interfaces. It offers valuable guidance for optimizing auditory information dissemination and refining the coding of fighter warning signals.

**Key Words:** audible alarm; attention; cognitive load; fighter; tracking tasks

Received: 2023-06-21; Revised: 2023-08-07; Accepted: 2023-09-12

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200058069002);National Science Foundation of China(72171044, 71801037)