

文章编号:1674-8190(2013)04-474-07

# 无人机地面站人机工效综合评价研究

祁圣君,王婷,王锋

(中国飞行试验研究院 飞机所,西安 710089)

**摘要:** 无人机地面站发展日趋综合复杂,为了减轻地面站操作员工作负荷,避免飞行事故发生,保证高效、安全地完成飞行任务,开展无人机地面站人机工效评价方法研究十分重要。分析无人机地面站人机工效评价特点;借鉴有人驾驶飞机人机工效评价方法,利用德尔菲法,明确无人机地面站人机工效综合评价的评价指标,提出地面站人机工效评价专家调查表的构架及其内容;并探索无人机地面站人机工效评价方法。实例研究表明:本文提出的评价指标和方法可以满足无人机地面站人机工效评价需求,可为无人机地面站人机工效评价提供一定借鉴。

**关键词:** 无人机;地面站;人机工效;综合评价

**中图分类号:** V279;R857.1

**文献标识码:** A

## Research on Ergonomic Integrated Evaluations of UAV Ground Control Station

Qi Shengjun, Wang Ting, Wang Feng

(Aircraft Department, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** With the rapid development of technology in Unmanned Aerial Vehicles Ground Control Station (UAV GCS), the ergonomic assessment of UAV GCS becomes important and urgent, which could not only alleviate the workload of the UAV operator, but also avoid flight accident. The characteristics of ergonomic evaluations of UAV GCS are analyzed. Use the method of ergonomic assessment of piloted aircraft for reference, the Delphi method is used to build the evaluation indexes for UAV GCS, and the expert questionnaire for ergonomic evaluation of UAV GCS is established. The UAV ground station ergonomics assessment is explored. The research shows that evaluation indicators and methods proposed in this paper can meet the demand and be used as the guidance for ergonomic integration evaluations of UAV GCS.

**Key words:** UAV; ground control station; ergonomics; integrated evaluation

## 0 引言

近年来随着无人机技术的迅猛发展,对无人机地面站提出了更高的要求,要求其能够实现在线任务规划、虚拟视景显示、卫星数据链控制、数据图像处理等一系列功能,具备集控制、瞄准、通信、情报处理于一体的综合能力<sup>[1]</sup>。随着技术的进一步发展成熟,未来地面站不仅限于控制同型号的单架无

人机或无人机群,还将控制不同型号的无人机联合机群,及控制无人机协同有人驾驶飞机完成任务。虽然近年来无人机已具有较强的智能自主控制能力,但在执行任务过程中,地面站操作员仍然拥有操纵飞机的最终决定权,无人机系统仍属于“人在回路的系统”<sup>[2]</sup>,其作战使用离不开人的指挥控制。大量的显示信息及控制需求,使地面站操作员的工作负荷和操作难度增大,容易导致误判和误操作。因此,从人机工效学角度研究无人机地面站的设计和评价显得尤为重要。

在无人机没有完全达到全智能化自主控制前,人的因素在无人机系统中仍起着重要作用,从人机

收稿日期:2013-06-07; 修回日期:2013-09-03

通信作者:王婷,313653602@qq.com

工效的角度研究地面站的设计和评价已成为无人机发展关注的一个重点。国外在无人机人机工效评价方面的研究开展的较早,美国在1998年提出全球鹰先进技术概念的同时,就在加州爱德华空军基地的空军飞行试验中心对全球鹰无人机地面控制站进行了全面系统的评估<sup>[3]</sup>。意大利波隆那大学的Francesca等<sup>[4]</sup>对无人机地面站触屏界面和显示进行了系统的研究。加拿大多伦多大学的Jamieson<sup>[5]</sup>对自主无人机监控界面进行设计与评估。英国学者S. L. Howitt等<sup>[6]</sup>通过人在环仿真对人机界面、操作员控制水平、情景感知等进行评估。

本文主要参考有人驾驶飞机人机工效评价方法,根据无人机任务特点及评价特点,针对无人机地面站人机工效综合评价进行探讨,初步建立无人机地面站人机工效评价系统,明确评价内容并提出综合评价方法,给无人机地面站设计提供借鉴和参考。

## 1 无人机地面站人机工效评价特点

有人驾驶飞机驾驶员能从飞行环境中获得直接的感觉输入,而无人机地面站操作员只能通过数据链获得飞机的当前状态及环境信息,包括:有限视界范围的视频图像和机上传感器信息等。由于无人机操作员处于地面环境,无法直观体验飞机当前状态,这必将损失多项感觉信息,包括无人机周围环境的视觉信息、运动感觉、前庭输入和声音等。因此与有人驾驶飞机的驾驶员相比,无人机地面站操作员可以说是在“感觉隔离”环境下对无人机实施操纵的。

### 1.1 工作负荷与情景感知

随着地面站自动化和智能化水平的不断提高,操作系统中动态信息越来越多,而操作员的主要工作由操作向监控转移,即人的体力负荷下降、心理负荷增加的现象变得更加突出,因此,情景感知的研究成为人机工效研究的热点问题。相较于有人驾驶飞机驾驶员,无人机地面站操作员不能接收到与其相同质量和数量的信息和反馈。无人机操作员接收不到或者只能接收到很少的座椅上的操作信息,如驾驶舱外视景天气、气味或烟雾、油量或液

压流量及其他传感器信息。因此,必须全面评价无人机操作员的环境感知。同时确定显示及控制信息对操作员感知模型的影响,以及控制、显示及操作员的功能交互对操作员工作负荷的影响程度。鉴于情景感知对操作员工作负荷的影响,必须充分评价操作员工作负荷及其与情景感知两者之间的关系。

### 1.2 人机功能分配

研究表明,良好的人机功能动态分配是提高系统性能的关键。目前自动化和智能化技术大量应用到无人机地面站中,虽然减轻了人的工作负荷,但降低了人的情境感知能力,对“人在回路”中的短时决策能力要求更高,并且大部分是系统设计阶段静态人机功能分配,而任务执行中基于人特性的动态功能分配研究还比较少。因此要在整个系统的高度上合理规划人机功能分配,并进行动态分配,才能最大限度地减少人的失误,实现系统总体安全、可靠和高效的目标。

### 1.3 操作员控制水平

现代无人机系统多采用地面站远距离对无人机进行监控操作,这种操作方式存在着许多限制。首先,由于存在时间延迟及高宽带的需求,在无人机远距离攻击任务中对操作员的控制水平提出了很高要求;其次,由于涉及多任务监控时人的受限性很大,要求操作人员对无人机的反应极其迅速。这就要求在人机工效研究时考虑各种限制条件对无人机操作员完成任务所带来的影响。

未来无人机的发展将变为单一操作人员控制多架无人机或无人机与有人机协同执行任务。这样操作员可以有效地指挥整个战场,而不是仅仅成为单无人机的操作员。假使这种情况得以实现,操作员将无需对低层次任务频繁进行指挥,而是依赖于智能辅助决策系统来完成,这就需要在人机工效评价中针对不同任务需求设计评价项目,以检验人机工效的设计是否能够满足无人机任务需求。

### 1.4 无人机任务要求

由于无人机任务的特殊性,地面站可能被安置在任何环境,地面站在设计时应充分考虑人员的需

要,尤其是针对长航时无人机,需要指挥员和操作人员长时间地进行监控,需要考虑地面站设计的人机工效问题,如何高效、安全的工作,提高工作效率。操作员为了监控飞机的工作状态信息,必须与地面站内部各个系统之间有良好的适配性,为了保持操作员和无人机之间协调工作,人的运动器官和操作按键等控制器之间也要有良好的适配性关系,在设计时应充分考虑人机关系。

### 1.5 信息量大

无人机地面站显示系统包含来自无人机自身携带的传感器、加装的测量传感器和外部的测量数据、飞行状态、任务规划、武器载荷等无人机系统及所执行任务的全部信息。研究表明,有人驾驶飞机座舱内各个飞行阶段所需的显控信息达到 614 条<sup>[7]</sup>。而无人机地面站操作员必须对无人机系统的所有信息进行监控与处理,例如美国全球鹰无人机地面站共配备 6 名操作员操控 6 个工作站监控超过 13 个显示器来完成任务<sup>[2]</sup>,这一过程的信息流量非常大,信息处理复杂,尤其是在“感觉隔离”的环境中,无人机地面站操作员只能凭借界面信息进行判断,在人机界面设计时要充分考虑大量的信息对操作员的影响。

## 2 无人机地面站人机工效综合评价体系建立

设计周全的地面站不仅能够减少危险因素,而且能够提高地面站操作员的情景意识,降低工作负荷,从而提高操作员的工作效率和操作有效性。地面站人机工效评价的主要目的是确保地面站在设计上满足无人机任务需求,不存在太多影响操作功能、操作员健康和安全的缺陷。参考有人驾驶飞机座舱评价内容,并结合无人机地面站特点,确定无人机地面站人机工效评价指标的内容。

### 2.1 评价指标的确定

无人机人机工效评价涉及工效学的指标繁多,国内针对很多指标制定了标准和规范,但还未形成一套完整的指标体系。由于没有与无人机系统工效学评价指标有关的标准、规范和手册,在实际评价工作中,采用的评价方法主要是根据航空领域专

家、有经验的飞行员的经验指示和有人驾驶飞机的相关方法标准,并参考文献[8]中提出的有人座舱工效学评价因素,依据国内现有相关标准和规范,并结合无人机任务特点等进行主观评价。采用基于专家主观评定和比较判定法的典型方法——德尔菲法<sup>[9]</sup>(Delphi)来建立无人机系统人机工效学评价指标体系。

考虑到无人机地面站具备有人驾驶飞机座舱的特点,聘请飞过多种型号飞机的 15 名现役或退役飞行员作为咨询专家,其飞行时间至少在 2 000 h;同时考虑地面站内各个席位功能的不同,必须考虑无人机任务设置、任务载荷操作、数据链操作、情报分析等,聘请 10 名无人机操作员,他们应熟悉任务载荷、数据链、信息情报处理等方面的知识与操作;由于地面站在某种角度来讲可以看作是地面飞行模拟器,聘请 5 名具有设计模拟器经验的工程师。

确定专家后,以调查咨询的形式向所聘请的专家征求无人机地面站人机工效评价指标的意见,经过 2~4 轮的意见循环反馈<sup>[10]</sup>,专家的意见已基本趋于一致,对专家意见进行汇总统计,从而得出评价指标如图 1 所示。

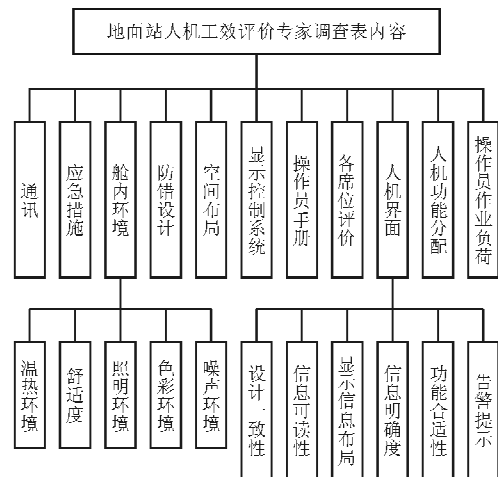


图 1 无人机地面站人机工效评价专家调查表指标  
Fig. 1 Expert questionnaire indexes of UAV ground control station ergonomic evaluation

### 2.2 专家调查表的设计内容

无人机地面站涉及多种不同类型的人类作业和人机交互活动,需要评价的工效问题非常多,如

舱内环境、应急情况、视觉和照明、作业负荷、显示器和控制器的设计和布局以及显示屏信息布局等。通过分析和研究,并根据无人机地面站工效评价指标(图1)进行细化,提出无人机地面站人机工效专家调查表的主要内容。

以下仅从通用性角度对专家调查表的八方面内容进行介绍:

#### (1) 总体评价

舱内总体布局是否合理,功能是否完善且满足任务需求,席位切换功能是否正常、流畅;应急备份功能是否完善;软件是否满足任务需求;告警提示是否清晰易懂;人工操纵是否满足任务需求。

#### (2) 地面站显示系统评价

在评价地面站显示系统时,主要评价指标为驾驶员视角。视距、布局合理性、一致性,显示对象的大小,显示装置排列等;同时由于飞机本体状态信息、任务载荷信息、数据链信息、情报信息都集中显示在各个席位的显示器上,需要结合各个席位的特点对其人机界面等因素进行单独评价。

人机界面主要涉及以下方面:界面设计一致性、信息可读性、界面布局设计、信息明确度、系统功能合适性、防错设计,各界面间切换是否流畅正常,显示信息是否完整,是否会使操作员产生视觉疲劳等。

#### (3) 地面站操纵机构评价

地面站操纵输入设备主要用于实现飞行器的控制和指令功能。主要包括操纵杆、专用开关、按钮、键盘等输入设备。操纵器的评价指标为:操纵器是否按照功能分组,是否考虑人的反应时间,位置是否符合人体尺寸要求和肢体用力范围、操作中是否方便;开关按钮便于操作员操作,符合生理习惯;键盘布置简洁,对应软件设置有防错输入设计;操纵设备灵敏度、操纵机构协调性等。

#### (4) 地面站座椅评价

由于操作员长时间监控操作,座椅的评价指标主要考虑舒适性。座椅的尺寸是否适合人体的测量值,是否能保证人体具有良好的作业姿势。

#### (5) 地面站作业环境评价

地面站是密闭方舱,空间狭小,空气流通性差,加之舱内任务设备众多,尤其是显示器计算机等设备发热量大,所以舱内通风性就成为评价指标之一。作业区的温热环境是决定人的作业效能和健

康的重要因素。另外舱内的主体是人而不是空气,因此必须考虑人所具有的特性,即还要考虑人体的代谢量和衣着量,在评价上主要是根据统计学原理,给出人感到舒适的温热环境指标,通过实际测量评价是否达到要求。同时还需要考虑照明、色彩、噪声对人的影响,只有这样才能保证无人机操作员长时间在舱内安全高效地作业。

#### (6) 地面站数据链系统评价

地面站与无人机之间利用数字数据链进行信息传输,数据链不能引起整个飞行器响应、稳定性或准确度的降级,也不能引起性能特性的降级。所以应该评价考核传输可靠性,通讯链路丢失或漏码下应急程序设置,操作员处置程序,重点评价链路延迟对监控及操作员完成任务的影响。

#### (7) 操作员负荷

根据不同飞行阶段特点,设置不同任务,评价操作员的工作负荷,评价任务后操作员的疲劳程度。由于地面站操作员一般都是分工协作完成任务,所以要评价地面站小组的能力,包括完成任务时间、每个人在报警状况下花费的时间、指令出错率、各席位操作员间的协调性、控制无人机群的难易程度、感觉负荷等。

#### (8) 告警信号

告警信号分为语音告警和视觉告警,不同于有人机驾驶员可以明确感知飞机状态,无人机特情状态必须通过传感器信号显示给监控人员,这就要求在告警信息设置上综合考虑。由于地面站设备众多,在告警音设置上必须能区别于环境噪声,容易引起操作员的警觉。另一方面,由于操作员长时间处于精神紧张状态,容易产生生理和心理疲劳,在报警信号颜色选择上也应该非常醒目,具有通用性,且满足国军标要求。

## 3 评价方法

对于无人机地面站来讲,人机工效评价范围与有人驾驶飞机座舱差别不是很大,只是评价重点不同,因此完全可以借鉴有人驾驶飞机座舱评价方法。由于无人机地面站涉及的工效因素较多、复杂程度较高,若要按照已有的人机工效评价方法进行精确全面地评价还有一定困难。鉴于无人机地面站具有多个操作监控席位、且无人机任务具有时效性、尤其是许多任务要求操作员必须长时间处于舱

内工作,在工效评价上主要依靠定性与定量结合、客观统计与主观评价并重的手段。对于专家评价调查表里的评价项目,在评价时应根据不同的项目选择不同的评价方法。

### 3.1 改进的库珀哈珀评定法

无人机地面站人机工效评价内容与一般的工效学评价过程相似,只是在部分评价指标上有所侧重,且必须结合无人机任务进行,本文参考库珀哈珀法<sup>[11-12]</sup>将评价等级设定为5级,即1、2、3、4、5。1表示很差,很模糊,不合适等;2表示稍好,但不适合接受;3表示一般,可以接受;4表示良好;5表示优秀。为了综合考虑某一因素或某一方面以及全局的侧重,以突出各因素之间的相对重要程度,需要给定该因素在当前领域相互重要程度比较后的权重系数,系数总和为1。无人机地面站工效学评价采用两级评价方式,一级评价指标中包含多个详细的二级评价指标,专家首先对每个评价指标进行详细分析比较后给定权重系数并给出分数,然后专家再对一级评价指标分析比较给定权重系数。评价过程中先由操作员按照典型任务对无人机地面站进行操作,询问并记录操作员执行任务过程中及完成任务后的生理和心理特征变化,并由操作员根据评价指标对地面站各项功能及任务界面针对某一具体任务执行情况进行打分,然后由专家对地面站人机工效各项指标进行打分,最后采用改进的库珀哈珀法进行综合评价,并对评价指标进行适当地补充和完善。改进的库珀哈珀法是一种主观评价方法,可用于诸如通讯、应急措施、防错设计、空间布局、显示控制系统、操作员手册、人机界面、人机功能分配等方面的定性评价。

### 3.2 情景感知综合评价技术

情景感知综合评价技术<sup>[11-12]</sup>(Situation Awareness Global Assessment Technique,简称SAGAT)要求操作员在地面站按照设定任务进行监控操作,当进行一段时间后暂停,并在重新开始前回答有关自己对情景的认识及评估。SAGAT提供了一个较简单的飞行员心理模型描述,设计有关情境认知的许多要素,并通过容易地记录和评估对操作员的情境认知进行评价,其优点在于可以获得有关特定情境认知综合水平的大量数据。典型的

SAGAT问题包括:环境因素如空速、高度等;当前情境,如当前飞行姿态、当前传感器(如CCD相机、雷达)状态、距离目标的距离、当前任务完成情况等;未来状态预测,如距离下一航路点的航程,下一航路点需要完成哪些功能等。情景感知综合评价技术主要用于操作员负荷和情景感知的评价。

### 3.3 客观测量评价方法

由于对驾驶员保护设备的需求和有限的座舱空间和资源,一些性能的试验方法不能在有人机上使用,使得获取客观的人机工效飞行试验数据具有一定难度,但是对无人机地面站而言却不存在这些问题。这包括客观测量、声频和视频记录以及眼睛/头部轨迹跟踪试验等。对于舱内环境主要采用客观测量的方式进行评价,如在试验过程中测量舱内的温度、湿度、环境噪声、空气中二氧化碳的浓度等,根据相应的国家或行业标准和地面站操作员的感受,对舱内环境做出综合评价。

声频和视频记录可通过无人机操作员完成操作员动作分析的特定操纵来实现,比如按键的按压数量或者完成特定任务的驾驶动作,这样可以评价人机界面中信息布局的合理性。眼睛/头部轨迹跟踪系统用来确定无人机操作员关注的显示、控制对象信息以及需要关注的时间长短,这些信息用来确定显示符号出现、消失的时间或者状态改变的刷新率,刷新率用来计算情景感知度。显示对象停留时间用来得出文本信息可读性的估计、对象可见度及信息的完整性,并且支持任务时间历程分析。眼睛专注度可用于确定操作员正在使用何种信息做出特定的决断以及驾驶员获得信息的速度和次序。通过分析跟踪记录数据对显示控制系统的布局合理性、人机界面布局、信息可读性、明确性等方面进行评价。

## 4 实例分析

在上述基础上,结合项目研究,利用改进的库珀哈珀法对某型无人机地面站人机显示界面人机工效进行评价,下文对评价试验及结果进行简要介绍。

无人机地面站人机界面人机工效评价指标主要涉及6项指标,即设计一致性、信息可读性、信息布局、信息明确度、功能合适性、告警提示。每一方

面包含若干子项目,以信息布局为例,其包括飞行状态信息布局、任务载荷信息布局、机上机电系统信息布局、视景信息布局、任务规划信息布局等诸多方面,在实际评价中需要对各个子项目内容的评分进行加权计算,得出此项目指标的综合评分。在试验前,6名无人机地面站操作员(由资深试飞员担任,飞行小时大于2 000 h)和10名具有模拟器飞行和人机界面设计经验的工程师(工作时间超过6年,设计过多种人机界面,熟悉飞行操作)经过2轮讨论形成统一意见,得出6项指标的权重系数,如表1所示。

表1 无人机地面站人机界面评价指标及权重系数

Table 1 Human-machine interface evaluation indexes and weight coefficient of UAV GCS

对于 $x$ 坐标数值	评价指标	权重系数
1	设计一致性	0.14
2	信息可读性	0.18
3	信息布局	0.20
4	信息明确度	0.21
5	功能合适性	0.14
6	告警提示	0.13

根据任务设计,在  $H=3\ 000\ \text{m}$ ,  $Ma=0.4$  状态下,无人机执行指定任务,6名地面站操作员分别利用改进的库珀哈珀法对地面站人机界面进行评价,6名操作员对各评价指标的评分值如图2所示,图中  $x$  轴表示评价指标,其数值所对应的具体评价指标如表1所示,  $y$  轴表示评价分值。经过加权计算,某型地面站人机界面的评价得分为4.178,表明地面站人机界面设计良好,布局合理,功能完整,能满足任务需求,地面站操作员评价非常满意。

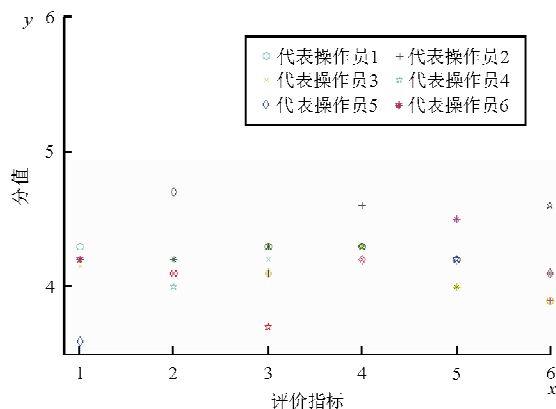


图2 地面站操作员人机界面评价评分分布

Fig. 2 Human-machine interface evaluation points by GCS operators

## 5 结论

工效评价作为无人机地面站设计过程决策的依据,其重要性毋庸置疑。依据无人机地面站与有人驾驶飞机座舱的区别分析了无人机地面站人机工效评价的特点,并参考有人驾驶飞机座舱人机工效评价方法和内容,利用德尔菲法提出无人机地面站人机工效综合评价的评价指标,并设计了专家调查表;同时探索了评价方法,最后通过实例分析,证明本文提出的评价指标和方法可以满足无人机地面站人机工效评价需求,具有一定的工程实用价值。

## 参考文献

- [1] 周焱. 无人机地面站发展综述[J]. 航空电子技术, 2010, 41(1): 1-6.  
Zhou Yan. A review of UAV GCS development[J]. Avionics Technology, 2010, 41(1): 1-6. (in Chinese).
- [2] 季晓光, 李屹东. 美国高空长航时无人机-RQ4“全球鹰”[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011: 112-122.  
Ji Xiaoguang, Li Yidong. American high altitude, long endurance unmanned aerial vehicle-RQ4 Global Hawk[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 112-122. (in Chinese).
- [3] Spravka J J. Global hawk ground control station human factors characterization[R]. AFFTC-TR-99-39. Air Force Flight Test Center, Edwards AFB, CA., 2000.
- [4] Francesca de Crescenzo, Giovanni Miranda, Franco Persiani, et al. Advanced interface for UAV(Unmanned Aerial Vehicles) ground control station[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, 2007: 1-9.
- [5] Greg A Jamieson. Developing human-machine interfaces to support monitoring of UAV automation[R]. Canada: University of Toronto, 2006.
- [6] Howitt S L, Richards D. The human machine interface for airborne control of UAVs[C]. 2nd AIAA Unmanned Systems, Technologies, and Operations-Aerospace, Land, and Sea Conference. San Diego, CA., 2003: 1-10.
- [7] 郭小朝, 刘宝善, 马雪松, 等. 歼击机座舱通用显示信息及其优先级的确定[J]. 中华航空航天医学杂志, 2006, 17(4): 260-263.  
Guo Xiaochao, Liu Baoshan, Ma Xuesong, et al. General information of display and its priority for advanced fighter cockpit[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2006, 17(4): 260-263. (in Chinese).
- [8] Craig I R, Burrett G L. The design of a human factors questionnaire for cockpit assessment[C]. Human Inter-

- faces in Control Rooms, Cockpits and Command Centers, 1999; 16-20.
- [9] Linstone H A, Turoff M. The Delphi method; techniques and applications[M]. Mass; Addison-Wesley Pub Co, Advanced Book Program, 1975; 3-10.
- [10] 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.  
Li Yinxia, Yuan Xiugan, Yang Chunxin, et al. Building of the index system for fighter cockpit ergonomics comprehensive evaluation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(2): 148-152. (in Chinese)
- [11] Newman R L. Rotary-wing flight display test and evaluation[J]. Journal of Aerospace, 1999, 108(1): 1298-1311.
- [12] Newman R L, Greeley K W. Cockpit displays: test and evaluation[M]. Aldershot, England; Ashgate Publishing, 2001.

#### 作者简介:

祁圣君(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行控制与人机工效。

王婷(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行控制与仿真。

王锋(1983—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行控制与飞行品质。

(编辑:马文静)

#### (上接第462页)

- Heat transfer and pressure loss in rectangular one-side-ribbed channels with different aspect ratios[C]. Orlando, Florida, USA; Proceedings of ASME Turbo Expo 2009; Power for Land, Sea and Air GT2009, 2009.
- [11] Krishna Guntur, Jose Martinez Lucci, Amano R S. Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer through blade cooling passage[C]. Reno, Nevada; 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008.
- [12] Eifel M, Caspary V, Honen H, et al. Experimental and numerical analysis of gas turbine blades with different internal cooling geometries[C]. Orlando, Florida, USA; Proceedings of ASME Turbo Expo 2009, 2009.
- [13] Amano R S, Krishna S Guntur, Kumar S, et al. Numerical comparison of heat transfer and pressure drop in gas turbine blade cooling channels with dimples and rib-turbulators[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011.
- [14] Gu X, Wu Hw, Shen S, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer in a duct with square ribs and bleed holes [C]. Reno, Nevada; 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [15] David Walker, Jack Zausner. Rans evaluations of internal cooling passage geometries; ribbed passages and a 180 degree bend[C]. Montreal, Canada; Proceedings of GT2007 ASME Turbo Expo 2007; Power for Land, Sea and Air, 2007.

#### 作者简介:

梁卫颖(1980—),男,博士研究生。主要研究方向:传热传质及热结构。

朱惠人(1958—),男,教授,博导。主要研究方向:航空发动机及燃气轮机热端部件的先进冷却技术。

赵曙(1984—),男,博士研究生。主要研究方向:传热传质与热端部件冷却技术。

(编辑:张杰)