

民机驾驶舱场面引导功能分析与人机界面设计

王舒宁¹, 赵彦锒², 朱充植¹, 王黎静², 朱 珣²

(1. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200241;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

[摘 要] 未来空域密度日趋增大, 需要先进的场面移动目标引导和控制系统技术来提高机场运行效率, 降低事故率。文章瞄准航空系统组块升级机场场面运行下的民机驾驶舱场面引导功能, 首先描述机场场面运行的总体概念, 对场面引导的数据交互和机载功能架构进行分析; 然后基于所梳理的显示控制功能清单, 设计场面引导的人机界面, 完成从顶至下的民机驾驶舱场面引导功能的初步设计过程; 最后经过 CSUQ、QUIS、界面综合评价量表 3 份问卷的评估及焦点小组讨论, 证明该界面设计合理, 具备实用性。

[关键词] 民机; 驾驶舱; 场面引导; A-SMGCS;

[中图分类号] V223.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2022)04-0001-09

Function Analysis and Human-Machine Interface Design of Surface Guidance in Civil Aircraft Cockpit

WANG Shu-ning¹, ZHAO Yan-zeng², ZHU Yan-zhi¹, WANG Li-jing², ZHU Yu²

(1.China Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China;

2.School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing density of airspace in the future, Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems technology is needed to improve airport operation efficiency and reduce accident rates. The Aviation System Block Upgrades surface guidance function of civil aircraft cockpit during airport surface operation is discussed. First, the overall concept of airport surface operation is described. And the data interaction and airborne functional architecture for cockpit surface guidance are analyzed. Then the human-machine interface for cockpit surface guidance has been preliminary designed based on the list of display and control functions. And finally, through the evaluation of CSUQ, QUIS, the interface comprehensive evaluation scale and focus group discussion, the interface design was proved to be reasonable and practical.

Key words: civil aircraft; cockpit; surface guidance; A-SMGCS

随着我国国民经济的快速增长, 航空业也得到了飞速发展。航空运输量的增长导致机场规模扩大,

运行繁忙, 不可避免地出现飞机与飞机、飞机与车辆之间的冲突, 给空管员和驾驶员带来繁重的工作

收稿日期: 2022-02-17

引用格式: 王舒宁, 赵彦锒, 朱充植, 王黎静, 朱珣. 民机驾驶舱场面引导功能分析与人机界面设计[J]. 航空电子技术, 2022, 53(4): 01-09.

负荷。因此, 如何提升机场场面运行效率是未来航空运输发展规划的重要组成部分。

为了积极应对航空运输发展面临的机遇和挑战, 中国民用航空局 2015 年发布了信息通告《中国民航航空系统组块升级 (ASBU: Aviation System Block Upgrades) 发展与实施策略》^[1], 其中以场面运行行为引线的升级计划包含以下三个模块:

(1) 模块 B0-SURF: 1-2 级先进的场面移动目标引导和控制系统 A-SMGCS^[2];

(2) 模块 B1-SURF: 场面监视 SURF^[3]、场面指示告警 SURF-IA^[4];

(3) 模块 B2-SURF: 3-4 级场面移动目标引导和控制系统技术 (A-SMGCS: Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems)。

模块 B2 预计 2023 年准备就绪。为了配合中国 ASBU 发展与实施策略的开展, 飞机需要先进的驾驶舱场面引导技术, 为驾驶员提供交通态势、告警和路径引导信息, 保证驾驶员在任何能见度下都能够严格按照指派路径安全滑行。

目前, 国外对民机驾驶舱场面引导的研究多集中在 4D 滑行路径引导功能中, Young S D 等^[5]探索了驾驶员在利用场面 4D 航迹引导进行滑行时的决策过程; Bakowski D L 等^[6]针对连续路口放行的概念进行了场面 4D 航迹引导功能的设计和评估。国内对民机驾驶舱场面引导功能分析与设计多集中在机载移动地图的设计中, 丁汀^[7]提出了 A-SMGCS 地面系统和机上系统的初步架构; 毛卉佳^[8]探讨了 A-SMGCS 对机载移动地图开发与使用的影响; 王宝红^[9]探讨了民航机场的机载移动地图的开发实例; 王欢等人^[10]设计了以移动电子设备为载体的模块化场面引导软件。目前尚无相关研究面向 ASBU 的长期规划, 将机载移动地图、SURF、SURF IA 和 4D 滑行路径引导功能进行综合设计。

本文瞄准 2023 年 B2 模块就绪后民机驾驶舱的场面引导功能, 首先描述了 ASBU 机场场面运行的总体概念; 然后对场面引导的数据交互和机载功能架构进行分析; 基于所梳理的显示控制功能清单, 设计了驾驶舱内场面引导显示器的人机界面; 最后通过人机工效评估, 证明本界面设计的合理性。

1 民机驾驶舱场面引导设计难点

民机驾驶舱场面引导设计的难点包括:

(1) 场面引导设计应面向 ASBU 规划, 结合 A-SMGCS 整体运行要求, 研究现有的适用于场面引导的行业标准, 对其中的所有要求进行梳理整合, 结合现有民机航电系统功能架构, 形成综合化的机载场面引导功能架构。

本文针对该难点, 以 ASBU 规划作为顶层输入, 首先对标 A-SMGCS 场面运行的要求, 定义地面系统与飞机的数据交互以及驾驶员的职责, 然后依据以下标准中的要求开展设计:

a) 机场移动地图绘制功能划分和边界是依据 DO-257A^[11]中对机场移动地图的绘制要求所定义, 同时与 DO-272B^[12]中对地图数据元素的划分保持一致, 以提升基于地图数据库的机载绘图可实现性;

b) 机场交通监视和显示功能架构、接口和人机界面是依据 DO-289^[13]中对广播式自动相关监视 (ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 和驾驶舱交通信息显示 (CDTI: Cockpit Display of Traffic Information) 功能的通用要求, 以及 DO-322 中对机场交通监视的特定要求所进行的综合设计, 并结合现有民机交通监视功能架构进行模块划分, 以降低机载场面引导功能的增加对已有架构的更改影响;

c) 机场交通告警相关功能架构、接口和人机界面是依据 DO-323 中对机场交通告警的特定要求所进行的设计, 并与已有的空中防撞系统 (TCAS: Traffic Collision Avoidance System) 告警功能进行了综合。

对以上标准中的场面引导相关要求捕获、分析和综合, 并考虑了机载软件可实现性以及对现有功能架构的更改影响后, 确定了机载场面引导功能模块的界限划分和数据流, 最终形成了场面引导功能架构和显示控制功能清单。

(2) 基于地图的场面引导人机界面设计, 需要向驾驶员呈现包括机场地图、飞机和车辆、冲突告警、本机信息等多方面的内容, 考虑到显示器面积有限, 内容过多不利于驾驶员聚焦辨识, 需要对所有场面引导内容进行综合化显示设计, 让驾驶员能够对机场情况一目了然。

针对该难点,基于场面引导显示控制清单,对场面引导的显示内容进行了如下设计:

a) 界面布局设计: 将界面划分为地图区域、控制区域、交通信息区域等,对显示内容进行分类并放入各区域中,同时保证关键内容布局在驾驶员最易注意的区域中;

b) 显示元素设计: 包括机场移动地图、本机信息、交通信息、告警信息的显示元素设计和优先级设计等。对于内容量较大的交通信息,采用符号、列表、数据块和数据标签共四种显示方式,将信息有序展示出来,并使驾驶员可以根据需求进行选择;

c) 控制功能设计: 包括地图显示模式切换、地图元素防拥选择、交通显示高度带选择、辅助信息显示选择等。提供多种控制手段使驾驶员可以对不必要的信息进行过滤。

基于以上内容对布局、元素和控制进行了充分设计,使最终的综合显示画面简洁且易认知,保证驾驶员能够基于场面引导所呈现的多源信息在大脑中形成对外部情景的清晰感知。

2 机场场面运行概述

2.1 ASBU 场面运行规划

根据中国 ASBU 发展与实施策略,以模块就绪时间为基线,机场场面运行将实现以下能力:

2015 年: 实现 A-SMGCS 监视和控制功能,主要包括地面系统向空管员提供机场交通的直观画面和提示;

2017 年: 实现机载 SURF 和 SURF-IA 功能。SURF: 将本机接收到的来自地面系统和其他飞机的 ADS-B 数据综合显示在驾驶舱内。SURF-IA: 根据场面交通运行趋势判断是否有发生跑道冲突的可能性,为驾驶员提供不同类型的指示 (Indications) 和告警 (Alerts);

2023 年: 实现 A-SMGCS 路由和引导功能。路由: 地面系统实时生成出港航班和进港航班的 4D 滑行路径。引导: 包括目视助航引导 (地面灯光和指引牌的自动控制) 和机载显示引导。

2.2 A-SMGCS 数据交互

A-SMGCS 地面系统与飞机的数据交互如图 1 所示。飞机从地面系统接收的数据有: (1) 自动

相关监视 - 再广播 (ADS-R: Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast), 包括机场区域内装备 ADS-B 设备的飞机 / 车辆的 ID、高度、航向、速度和位置等; (2) 广播式交通情报服务 (TIS-B: Traffic Information Services-Broadcast), 包括机场区域内飞机 / 车辆的高度、速度和位置等,可以对没有装备 ADS-B 设备的飞机 / 车辆进行监视; (3) 空管员驾驶员数据链通信 (CPDLC: Controller Pilot data Link Communications) 消息: 空管员通过数据链发送来的文本信息,包括各类许可、限制要求和自由文本等。滑行许可中包含 4D 滑行路径的描述。

飞机从他机接收的数据有: ADS-B 报文,包括他机的 ID、高度、航向、速度和位置等。

驾驶员的职责: (1) 观察驾驶舱综合化显示信息,与空管员进行 CPDLC 文本通讯,操控飞机按照预定的 4D 路径滑行; (2) 通过目视助航设备,观察地面灯光和信号牌的引导,操控飞机按照引导的路径滑行; (3) 在非正常或紧急时刻,通过语音与空管员进行通讯。

3 民机驾驶舱场面引导功能架构

在 A-SMGCS 数据交互分析中,把飞机当作黑盒,捕获飞机和外部利益相关方的交互,现在需要打开黑盒,关注飞机内部航电系统各功能之间的数据交互。

架构中各模块的功能定义如下:

机载监视和间隔保证处理 (ASSAP: Airborne Surveillance and Separation Assurance Processing): 接收 ADS-B/TIS-B/ADS-R 接收功能发送的交通信息,同时接收来自 TCAS 的交通信息,并将这些交通信息融合关联,处理成为可用的交通数据。同时,ASSAP 还针对场面引导应用进行数据可用性验证,数据计算和告警逻辑计算;

本机导航数据监视传输处理 (STP): 从机载传感器和飞行管理功能获取导航数据进行品质测定和源选择,提供 ASSAP 要求的本机导航数据及其品质参数;

机场地图数据库: 提供显示范围内的地图数据至显示功能,以实现地图绘制;提供所需的机场地图数据元素至飞行管理功能和 ASSAP 功能,以实现

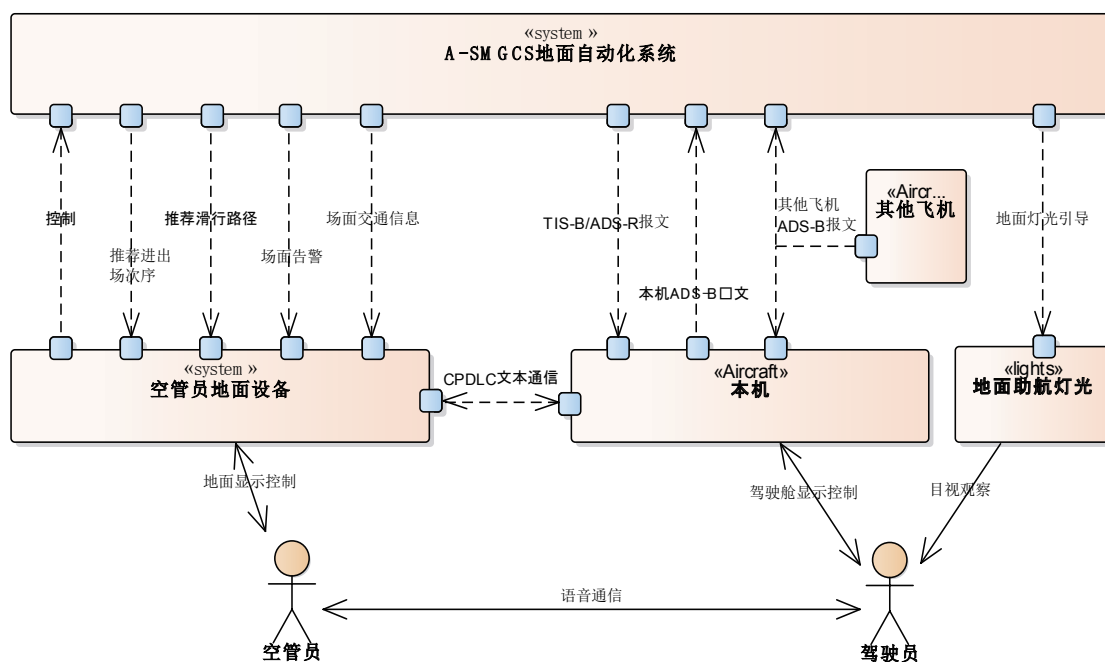


图1 A-SMGCS 地面系统与飞机的数据交互

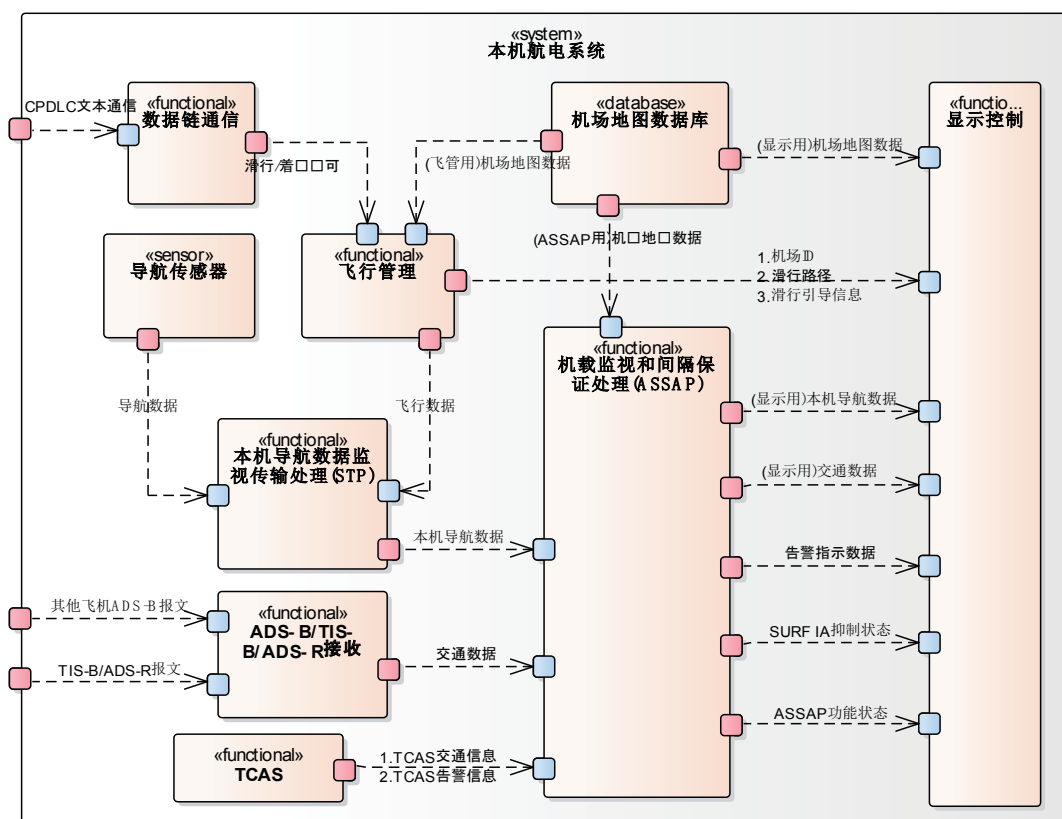


图2 机载场面引导航电功能架构

引导计算和告警计算。机场地图数据元素的具体内容和品质需符合 DO-272B 的要求；

数据链通信：接收来自地面系统的滑行 / 着陆许可并发送给飞行管理功能，许可包含所用跑道、滑行路径和停机坪的信息，其中滑行路径的信息是支持 4DT 的，包含交叉口的要求到达时间 RTA；

飞行管理功能：接收来自数据链通信的包含 RTA 的滑行许可，提供滑行速度算法计算出预计到达时间 ETA 和满足 RTA 所需的直线滑行速度，提供给驾驶员实时的滑行速度指示，帮助驾驶员遵循 4D 滑行路径精准滑行。同时飞管提供飞行计划和滑行路径给显示系统，以使显示系统能够判断需要显示的机场并在地图上绘制滑行路径；

显示控制功能：当飞机距离机场 5 海里之内时，驾驶员可以手动切换至场面引导界面。如表 1 所示，是将显示控制功能进行细化并列出的功能清单，作为人机界面的设计输入。

4 场面引导人机界面设计

4.1 场面引导显示界面

场面引导显示界面如图 3 所示。其中，机场移动地图包含跑道、跑道标识、滑行道、滑行道标识、建筑物、飞机可进入区域、飞机不可进入区域的显示；预定滑行路径显示在地图和下侧信息栏中，信息栏中标注了进入下一路口的 RTA 时间，地图滑行路径中的白色圆圈代表进入下一路口的位置；地图右上方是飞机的 ETA、RTA 和两者的时间差 ETA-RTA。

交通符号叠加在地图上显示，以指示其相对于机场的位置。当此交通在空中时显示为青色，并在周围显示相对高度和垂直运动趋势；当此交通在地面时显示为绿色。当此交通被选择时，在符号周围显示选择框，被选择交通的详细信息将会显示在界面右下角的区域中，在界面右侧的交通列表栏中也可以选择交通。

表 1 场面引导显示控制功能清单

序号	功能名称
1	显示机场移动地图
1.1	显示跑道
1.2	显示滑行道
1.3	显示滑行路径
1.4	显示等待线
1.5	显示跑道和滑行道标识
1.6	显示飞机不可进入区域
1.7	管理机场地图数据库
2	显示本机信息
2.1	显示本机符号
2.2	显示本机地速
2.3	显示本机航向
2.4	显示罗盘
2.5	显示本机距离环
2.6	显示本机水平速度矢量
3	显示机场交通信息
3.1	显示交通符号
3.2	显示交通高度和垂直运动趋势
3.3	显示交通航班号
3.4	显示交通速度矢量
3.5	显示交通信息列表
3.6	显示被选择交通详细信息
4	显示告警指示信息
4.1	显示交通指示
4.2	显示跑道状态指示
4.3	显示戒备级告警
4.4	显示警告级告警
4.5	显示 SURF IA 抑制状态
5	显示 4D 滑行路径引导
5.1	显示 4D 滑行路径文本
5.2	显示 ETA
5.3	显示 RTA
5.4	显示 RTA 滑行速度
6	控制场面引导显示
6.1	调节地图量程
6.2	切换半罗盘和全罗盘显示
6.3	切换地图显示方向
6.4	控制航班号显示
6.5	控制距离环显示
6.6	控制交通显示高度带
6.7	控制速度矢量显示
6.8	控制地图元素防拥显示
6.9	选择交通

4.2 场面引导冲突告警显示

SURF IA 冲突告警显示如图 4 所示，包括：

交通指示 TI：当本机与他机不会立刻发生碰撞，但是一个潜在的碰撞风险将可能在跑道上发生。在交通符号周围显示虚线圆形，并在左侧显示其航班号和地速；

跑道状态指示 RSI：当本机进入跑道并试图在跑道上起飞或降落时，有一个潜在的与他机相撞的风险。在交通符号周围显示实线圆形，并在左侧显示其航班



图3 场面引导显示界面

号和地速，与RSI相关的跑道显示蓝色边框线；

戒备级告警：当存在碰撞风险且需要驾驶员严格监视时显示。若此告警由TI发展而成，则显示为琥珀色虚线圆形；若由RSI发展而成，则显示为琥珀色实线圆形，相关跑道显示琥珀色边框线。相关航班号和地速也显示为琥珀色；

警告级告警：当存在碰撞风险且需要驾驶员立刻进行规避时显示。若此告警由TI发展而成，则显示为红色虚线圆形；若由RSI发展而成，则显示为红色实线圆形，相关跑道显示红色边框线。相关航班号和地速也显示为红色。

4.3 场面引导显示控制

场面引导界面右侧控制栏的控制按钮包括：

COMP/ARC：全罗盘 / 半罗盘切换；

Flight ID：开 / 关交通航班号显示，激活后如图

5所示在交通符号左侧显示航班号；

Range Ring：开 / 关距离环显示，激活后如图5所示显示当前量程一半的距离环；

Declutter：开 / 关显示元素防拥功能，激活后如图5所示隐藏和当前滑行路径无关的滑行道路标识，地图区域左上角会显示防拥功能已开启的提示；

VEL VEC：开 / 关速度矢量，激活时可用“+”和“-”调节其显示单位大小，地图区域左上角会显示如图5所示的速度矢量显示单位大小；

ALT FLT：开 / 关高度带过滤，激活时可用“+”和“-”调节高度带上限和下限的大小，以100ft的格式显示，相对高度超过上下限的交通将不显示。地图区域左上角会显示如图5所示的当前高度带范围。

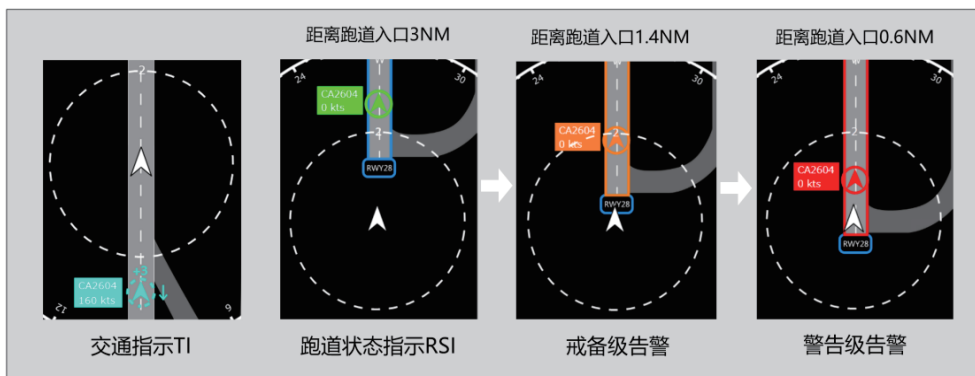


图4 场面引导冲突告警显示



图5 显示控制开启时的场面引导界面

4.4 PFD 滑行速度和时间显示

RTA 速度指示包括洋红色指针和标签“R”，在地面时，RTA 速度指示飞管计算出的推荐滑行速度。RTA 时间包括洋红色时、分、秒和标签“Z”；ETA-RTA 包括白色时、分，ETA-RTA 显示在 RTA 时间的下方。

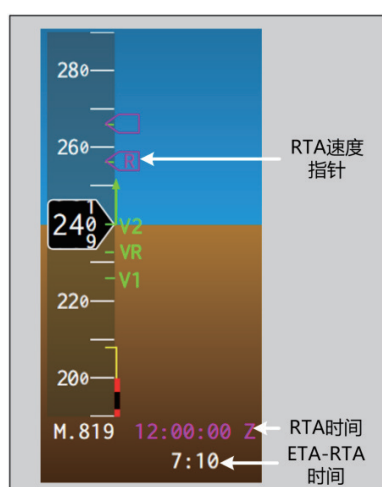


图6 PFD 滑行速度和时间显示

5 场面引导人机界面评估

基于上述场面引导功能分析与人机界面设计，搭建桌面式仿真平台，实现场面引导人机界面和操作逻辑仿真。本研究中邀请六名已取得商照的飞行学员参与人在环评估，评估场景为起飞与降落，包含大型机场（禄口机场和浦东国际机场）的机场地图绘制显示，繁忙终端（周边飞机大于30架）的交通信息显示，起飞时冲突告警显示，以及基于场面引导和 PFD 提供的时间偏差和滑行速度显示，能够

反映出场面引导设计的着重考虑因素。在主试的教学演示后，每位学员依照演示步骤进行操作并完成评估工作。评估采用了量表评估及焦点小组讨论两种形式进行，以获得整体评价及具体的改进建议。

5.1 量表评估

在量表评估中，分别采用计算机系统可用性量表（CSUQ: Computer System Usability Questionnaire）、用户交互界面满意度量表（QUIS: Questionnaire for User Interaction Satisfaction）、场面引导界面综合评价量表来获得界面设计的整体可用性水平、整体满意度水平及整体评价^[14-15]。

5.1.1 CSUQ 量表评估

CSUQ 评价结果如图7所示，4个一级维度的分数均位于2-3之间，揭示所有维度得分都介于“很不同意”到“同意”之间，说明该设计的可用性程度较高。

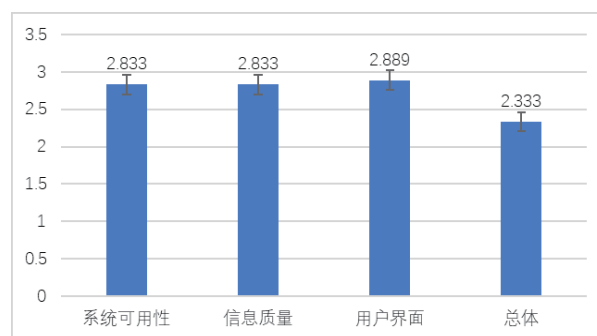


图7 CSUQ 各维度评分结果

5.1.2 QUIS 量表评估

QUIS 问卷的结果如图8所示，各个维度的得分均超过6分，显示整体的满意度较高。其中学习性的得分最高，为7.250分，说明界面操作的学习相对轻松，控制性的得分最低，为6.467分。对得分较低的“控制性”中的项目进行可视化，可以发现“系统速度”与“系统纠正您的错误”存在改进区间。

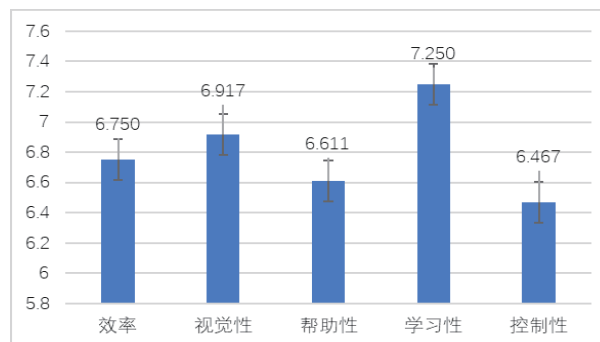


图8 QUIS 各维度评分结果

5.1.3 界面综合评价问卷

场面引导界面综合评价量表的评价结果如图9所示,其中信息布局方式最优,接着依次是:信息量、信息频率、信息显示格式、信息显示方式、信息亮度;评价超过3分的有字符大小设计、信息颜色设计、信息显示对比度3个指标,说明界面设计在以上元素中存在改进区间。

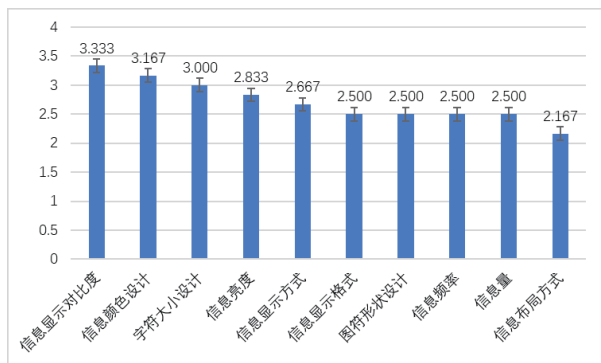


图9 场面引导界面综合评价量表各指标评分结果

5.2 焦点小组讨论

可用性问卷与满意度问卷得到界面的整体评价水平,综合评价量表反馈出界面于各设计要素的表现情况。为了更深入地发现评价量表中低分项相关的设计问题,主试与被试人员基于量表评价结果及界面回溯开展焦点小组讨论,讨论结果总结如下:

(1) 可以考虑显示一些操作指令,例如 turn right;

(2) 最好显示风向、风速,风向的显示应使用箭头,更加直观;

(3) 进近时应自动切换至场面引导界面。

此外,针对满意度问卷中的控制性得分较低,探讨了主要原因在于仿真平台的硬件交互特性较差,与界面设计本身无关。

总的来说,基于该仿真平台进行的评估反映出界面设计具有较高的可用性与满意度、界面整体评价较好,并存在一些可改进的细节,在未来设计中可进一步综合衡量。

6 结束语

在民机驾驶舱场面引导功能的设计过程中,从机场场面引导运行概念出发,分析了 A-SMGCS 数据交互和机载场面引导功能架构,然后完成场面引导人机界面的设计,最后将人机界面放入应用场景

中进行评估,完成了显示系统场面引导功能的初步设计。

基于该初步设计,未来尚待完成的工作有物理架构定义、软件开发等,最终实现机载场面引导功能,帮助驾驶员监控场面交通状态,引导驾驶员遵循预定的 4D 路径滑行,提高机场流量,满足未来空域运行的密度要求。

参考文献

- [1] 中国民航局. 中国民航航空系统组块升级 (ASBU) 发展与实施策略, IB-TM-2015-002 [M]. 中国民航局, 2015.
- [2] ICA Organization. Advances surface movement guidance and control systems (A-SMGCS) manual[M]. International Civil Aviation Organization, 2004.
- [3] RTCA. Safety, performance and interoperability requirements document for ATSA-SURF application, DO-322 [S]. RTCA.
- [4] RTCA. Safety, performance and interoperability requirements document for enhanced traffic situational awareness on the airport surface with indications and alerts (SURF IA), DO-323[S]. RTCA.
- [5] Young S D, Daniels T S, Evans E, et al. Understanding crew decision-making in the presence of complexity - a flight simulation experiment[C]// AIAA Infotech at Aerospace Conference. 2013.
- [6] Bakowski D L, Hooley B L, Foyle D C, et al. NextGen surface trajectory-based operations: contingency-hold clearances[C]// IEEE AIAA Digital Avionics Systems Conference. IEEE, 2013.
- [7] 丁汀. 先进机场场面导向和控制系统:(A-SMGCS) 分析与实现 [J]. 科技创新导报, 2011(33): 95-98+100.
- [8] 毛卉佳. 先进的机场场面活动引导与控制系统 (ASMGCS) 研究 [J]. 科技展望, 2014(10): 148-149.
- [9] 王宝红. 机载移动地图研究探索及开发实例 [J]. 科技风, 2020(16): 15-16.
- [10] 王欢, 杨小会. 机载移动端场面引导软件设计与仿真研究 [J]. 航空电子技术, 2020, 51(2): 21-26.
- [11] RTCA. Minimum operational performance standards for the depiction of navigational information on electronic maps, DO-257A[S]. RTCA.
- [12] RTCA. User requirements for aerodrome mapping infor-

mation, DO-272B[S]. RTCA.

[13]RTCA. Minimum aviation system performance standards for aircraft surveillance applications (ASA MASPS), DO-289[S]. RTCA.

[14]Lewis, James, R. IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 1995, 7(1):57-57.

[15]Burmester M . Usability-Engineering[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008.