

# 飞行员助手项目综述

吴文海<sup>1,\*</sup>, 张源原<sup>1,2</sup>, 周思羽<sup>1</sup>, 刘锦涛<sup>1</sup>, 梅丹<sup>1</sup>

1. 海军航空工程学院青岛校区 控制系, 青岛 266041

2. 海军航空兵学院 空中领航系, 葫芦岛 125000

**摘要:**当前人工智能技术于航空领域的应用存在研究分散、总体设计思想落后的问题,导致无法将各种技术融合以形成一个完整的智能辅助系统来提升飞行员的决策能力。本文首先总结了飞行员的能力限制及座舱功能存在的问题,分析了座舱智能辅助系统的设计需求,在此基础上,重点综述了飞行员助手项目的总体结构及其设计,给出了各分系统的实现方式。最后,梳理了相关内容,指出项目中尚可完善之处,为今后的研究指明方向。

**关键词:**智能座舱; 辅助系统; 总体结构; 辅助飞行; 设计需求

中图分类号: V223.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2016)12-3563-15

飞行员助手项目<sup>[1-13]</sup>(Pilot's Associate Program, PA)属于 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)战略计算机运作项目之一,目的是验证评估人工智能技术于航空系统中的应用,以增强未来有人战斗机的任务完成能力。飞行员助手项目的开发共分为 3 个阶段。准备阶段:启动项目论证工作,确定飞行员需求,评估满足需求的相关技术。发展阶段:开发各分系统,着重验证辅助飞行员操纵飞机、执行作战任务的相关功能。成熟阶段:融合各分系统,最终满足实时性要求。

随着 PA 系统的成功应用,美国又先后启动了旋翼机飞行员助手项目(Rotorcraft Pilot's Associate, RPA)<sup>[14-19]</sup>、自动伙伴项目(AUTO-CREW)<sup>[20-22]</sup>,并最终运用于 F-22 等最先进的战机座舱设计中<sup>[6]</sup>。俄、英、法等国也就新一代智能座舱辅助技术进行了研究:

1) 俄罗斯在苏-27 上开展的机载专家咨询系

统(БОСЭС)。

2) 英国的任务管理辅助系统(Mission Manager Aid, MMA)<sup>[23]</sup>以及由英国防务科学和研究机构(DERA)主持的认知座舱项目(Cognitive Cockpit Project, COGPIT)<sup>[24]</sup>。

3) 法国的电子座舱项目(Copilote Electronique)<sup>[25]</sup>。

这些项目虽然在部分结构、功能、应用领域稍有不同,但是设计思想都继承于飞行员助手项目。本文着重综述飞行员助手项目开发过程中的重要成果,为中国座舱智能辅助技术的设计提供参考。

## 1 飞行员能力限制分析

在飞行员执行任务过程中,诸如精力、性格、身体条件等主观因素,环境、武器装备等客观因素,都会对任务的完成产生影响。本节从飞行员的主要工作,即态势评估、规划和行动 3 个角度分析飞行员能力限制及其影响。

收稿日期: 2015-12-29; 退修日期: 2016-01-05; 录用日期: 2016-02-19; 网络出版时间: 2016-03-09 14:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20160309.1447.010.html

\* 通讯作者. Tel.: 0532-51833632 E-mail: sophia\_wxc@126.com

引用格式: 吴文海, 张源原, 周思羽, 等. 飞行员助手项目综述[J]. 航空学报, 2016, 37(12): 3563-3577. WU W H, ZHANG Y Y, ZHOU S Y, et al. Overview of pilot's associate program[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(12): 3563-3577.

### 1.1 态势感知

态势感知是飞行员对当前态势的解释,目的是确定完成任务的风险和时机,其限制主要体现在以下几方面。

#### 1) 信息的获取能力。

飞行员并行处理不同种类信息的能力是有限的,而机载传感器获取的信息及其显示方式超出飞行员承受范围。

#### 2) 信息源到知识的转换限制。

知识<sup>[26-27]</sup>是飞行员将信息源的信息结合所处的环境以及对环境的理解,分析处理得到的结果。诸多学者将知识表述为语义记忆(Semantic Memory)或智力模型(Mental Model)。由于心理及生理等因素,飞行员不能有效地将信息转换为知识。例如,飞行员检查飞行高度时,关注的不是高度信息本身,而是在该高度上飞行是否安全。

#### 3) 环境更新意识。

信息到知识的转变是依赖于信息源所处的环境。例如,当飞机着陆时,剩余燃油对飞行安全的影响较小,而如果在返程途中,剩余燃油直接影响到飞行安全及飞行员的行动选择。所以,在执行任务过程中,飞行员不仅要监控从信息源获取信息的变化,还要注意环境的变更。不同时间、空间上,存在关联的环境,限制了飞行员对态势的评估。

#### 4) 心理因素。

动机、信念和性格等心理因素也影响着飞行员的判断,其中最为重要的是压力。压力主要来源于行动的收益或代价、环境及信息的不确定性,持续增加的压力会对飞行员的记忆能力产生影响<sup>[28]</sup>,从而限制飞行员能力的发挥。

### 1.2 规划

规划主要包括备选方案的制定及评估、方案的选择及行动执行顺序的确定等任务。飞行员于规划中的限制主要体现在以下几方面。

#### 1) 问题空间的搜索。

Newell 和 Simon<sup>[29]</sup>将寻求问题解决途径的过程定义为搜索问题特征空间,寻找通往目标的合理途径。在搜索过程中,飞行员需要面对庞大的问题空间,并从中找到所有可行解,合理安排行

动顺序。由于飞行员掌握的知识有限,导致问题空间不完备,限制了最优解的获取。

#### 2) 知识的适应程度。

由于飞行员面对的是复杂多变的环境,随着时间的推移,环境的变化,可能出现飞行员没有经历过的态势,此时飞行员的知识不足以作出正确的规划。

### 1.3 行动

作出决策之后,飞行员按照计划执行方案,在此过程中,存在以下几个方面的问题。

#### 1) 差错的意识能力。

文献<sup>[26,30-31]</sup>指出,差错探测需要飞行员评估自己的行动,如果差错是由于掌握的知识存在偏差产生的,飞行员很大程度上不能及时发现问题。

#### 2) 输出的限制。

生理等因素限制飞行员的输出能力。例如,视力范围的限制、一次只能执行一个动作。然而,在紧急情况下,可能需要并行执行多项操作。

#### 3) 协同。

任务命令从上级传达到飞行员,存在理解偏差的风险。

## 2 座舱功能存在的问题

随着武器装备的日益先进,单位时间内其对战场的影响越来越大,对于飞行员而言,环境、态势、任务的变化更趋剧烈。为了解决这些问题,使飞行员从枯燥的控制任务中解脱出来,更好地从事富有创造性的规划工作,将各种自动化技术引入到座舱之中。但是,随之而来的是系统复杂度的提升,导致飞行员的潜在任务增多、系统控制更加复杂、限制了飞行员于态势感知、规划、行动、协同能力的发挥。

### 2.1 态势感知

为了安全经济地操控飞机,飞行员需要通过各种机载传感器获取信息,信息的来源包括飞机气动数据、位置数据、空中交通数据、天气数据和机载系统状态数据等。这些信息要求以正确的格式、有效的方式提供给飞行员并正确理解。而随着可获取的数据类型越来越多,其复杂度及数据间的关联度也在提升,亟需改进信息显示技术以

辅助飞行员理解信息。即使所有数据能有效地提供给飞行员,但是仍然面临着数据爆炸的问题,需要更多的信息显示满足这一需求,然而座舱空间有限,飞行员处理问题的时间也有限,而且随着任务的变化,飞行员所需的信息类型也在变化。即使加入多功能屏显,飞行员依然需要根据信息出现的位置操控系统去显示需要的数据,从而增加了飞行员的操控时间、降低了信息获取效率。

其次,虽然执行任务前能够预载任务、地形、天气等数据,但是,随着时间的推移,部分数据会发生变化,飞行员必须定期更新预载信息以保证系统正确运行,限制了飞行员将更多的精力投入到规划中。

## 2.2 规划

规划可以分为两类:任务规划及战术规划。

任务规划的目的是确定飞行的目标及完成目标所需的大致行动。例如,任务规划可能包括确定飞行路径、确定行动任务(如侦察某一地区)。任务规划通常在飞行前就已经确定好。

战术规划的目的是实时地根据态势,例如飞机出现故障、发现来袭导弹或行动偏离原计划时作出相应决策。战术规划较任务规划具有时间紧迫性,迫使飞行员根据偏好、习惯针对某些备选方案作出评估,从而导致最佳方案的遗漏。战术规划中,最严重的情形是原计划不再有效。例如:着陆机场受到攻击不能着陆、关键系统出现故障。此时,需要飞行员重新参考地图数据、规划飞行路径并将着陆机场数据输入至飞行管理计算机。

任务规划由于时间充分、确定性强,座舱及相应的地面辅助设备可以完成相应工作。但是,战术规划由于时间紧迫,机载计算机功能有限,不能有效完成上述任务,座舱智能辅助系统应强化战术规划功能。

## 2.3 行动

飞行员的主要任务之一是控制飞行轨迹。虽然自动驾驶仪能够辅助飞行员完成该任务,但是在某些紧急态势下,如自动驾驶仪失灵,飞行员存在从自动控制到手动操纵的转换障碍,容易导致飞行事故。同时,由于机载设备存在交联,飞行员对某一设备操纵的同时会对其他设备产生影响。

例如,利用发动机的热空气对挡风玻璃除冰,当减小发动机功率时,除冰的效率也会降低。而且,部分行动存在延时,例如起飞时,起落架和襟翼的收回存在速度限制,如果此时飞机接近地面,会对飞机产生较大影响,要求飞行员在这个过程中注意力高度集中。

为了能够正确操纵飞机,飞行员需要了解飞机的飞行包线,这要求其具有飞机气动知识及各分系统运作的详细知识。如果将错误指令输入至某一系统,一旦飞机失控,该系统即会阻碍飞行员重新获得控制。

所以,当前座舱的设计提高了飞行员的理论知识要求、并将飞行员隔离在控制回路之外。

## 2.4 协同

与副驾驶、任务组其他成员、上级指挥机构保持高效的协同能力是成功执行任务的保障,而这要求有效的通信能力。飞行员主要使用语音方式与相关人员联系。但是,由于语音通信信道的缺乏及非共享性,飞行员必须多次向不同的人员重复汇报任务目标及计划。当行动的过程难以表述时,飞行员可能简化汇报内容或放弃汇报,从而导致战术优势的丧失。

当飞行员意识到相关人员的意图存在不同时,需要判断是否需要重新规划,目前机载任务及规划系统的能力依然是提升协同能力的短板所在。

基于以上4点因素,座舱目前的功能尚不能完全满足飞行员在信息获取、理解,任务规划,行动及协同上的需求。

## 3 设计需求分析

传统座舱的设计思想是引入各种自动化技术代替飞行员执行任务,但却使系统的复杂度提高,对飞行员的操控带来一系列影响。为了解决这一问题,可以引入智能辅助技术,从以下几个方面,寻求弥补飞行员的能力限制,而不是取而代之,从而保证“人在回路”的要求。

### 1) 态势评估。

选择与任务相关的态势进行评估(包括载机状态和外部态势),汇报其影响。

### 2) 规划及应对。

根据当前态势及未来预期作出应对及决策。

### 3) 任务管理。

确定计划的具体行动实施步骤并执行;对比任务要求及态势找到冲突,修改计划,解决冲突;控制各系统协同工作;监控飞行员行为,判断可能存在的差错。

### 4) 信息显示控制。

根据任务及态势,将相关信息提供给飞行员。

要完成以上这些任务,除了飞机的性能模型外,还需要建立其他众多模型作为基础,详细分析如下。

## 3.1 任务模型

任务模型不仅能够辅助飞行员获取相关信息、理解知识、评估态势,还能够引导智能辅助系统结合态势给出建议、监控飞行员行为、理解其意图。基于符号的表示方法能够通过语义网络及产生式推理方式完成任务模型及任务推理。建模过程中需要设计一种机制区分目标及采取的行动,

同时表征不同抽象层次的领域内容。

## 3.2 差错模型

差错模型能够使智能辅助系统检测出飞行员的差错。差错模型建立的关键是如何界定差错。文献[26,31]指出,由于掌握的知识有限,在有限的、正确的知识下,做出非最优化行为、产生非预期结果、或未按程序执行任务等都不一定产生差错,甚至有些结果是在所难免的。但是,不正确的知识必然导致差错的发生,而且这部分差错很难被监测到。

## 3.3 行为模型

在众多行为模型的研究中,总结比较全面的是 Rasmussen 的成果<sup>[32]</sup>。文献[32]在分析了人类行为模型中不同元素之间区别及联系的基础上,总结出行为的 3 个层级,如图 1 所示。

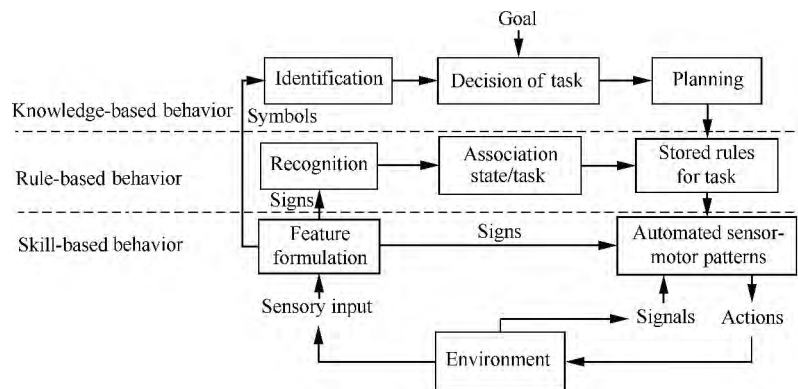


图 1 人的行为模型<sup>[32]</sup>

Fig. 1 Behavior model of human<sup>[32]</sup>

1) 基于本能层级。该层级,人是基于本能对外界作出反应,是未经思考的。例如:开车时,车前突然出现一只动物,没有经验的驾驶员通常会立即打方向盘以趋避(结果非常危险)。

2) 基于规则层级。人通过感知器官获取外界信息,部分信息能够直接转换成可以识别的符号,被识别之后,结合当前任务或状态,将之与记忆中类似问题相关联,确定是否有明确的行动规则,最后寻找到相应的反应行为。

3) 基于知识层级。人在面对未知事物时,外界信息只是具有象征意义的符号,记忆中不包含相应规则,此时需要利用已有知识结合所要达到

的目标进行推理并找到正确的答案。这一层级是人类行为的最高层级。

行为模型的建立,有利于智能辅助系统于飞行员行动的每一过程中起到辅助作用。

## 3.4 工作负荷模型

工作负荷模型的建立有利于智能辅助系统分析飞行员的工作状态,判断其承受能力,自适应地调整辅助等级。目前工作负荷模型的建立共有以下 3 种方法。

### 1) 时间节点法。

通过估计每一项任务完成所需时间,判断飞

行员是否有足够时间完成任务。

## 2) 定量分析法。

建立数学模型描述任务的增加对认知需求的影响。

例如:根据席克定律  $t = a + b \log_2^n$ ,  $t$  为反应时间,  $a$  为前期认知和观察时间,  $b$  为对备选方案认知的处理时间。人在某一态势下对方案的反应时间取决于前期的认知和观察时间;认知后处理的时间;备选方案的数量。

## 3) 基于认知过程的定性分析法。

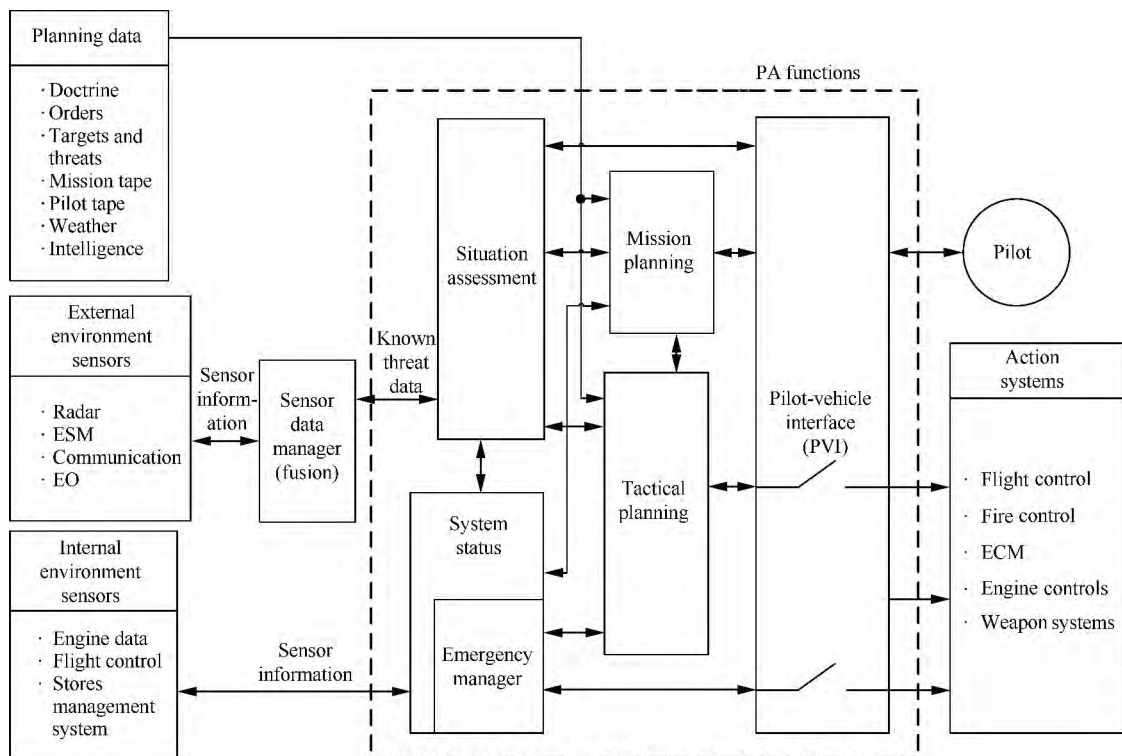
建立人的认知过程模型,在此基础上定性分析任务于每一过程中占用的资源。例如, Wickens 等的多资源模型及效能预测理论<sup>[33-35]</sup>。

以上分析了智能辅助系统所需的各种模型,

模型的建立为人工智能技术于态势评估、规划及应对、任务管理、信息显示控制提供了基础。

## 4 PA 总体结构及其设计

为了实现上述目的,PA 项目将整个系统划分为 5 个分系统,分别为系统状态分系统、态势评估分系统、战术规划分系统、任务规划分系统、人机接口分系统(如图 2 所示<sup>[12]</sup>),并邀请飞行员及指挥员研讨相关领域知识,采用知识库编辑工具 KBET(Knowledge Base Editor Tool)<sup>[36]</sup> 设计专家系统,最后在任务管理系统的协同下共同完成工作。5 个分系统中,具有规划能力的分系统为战术规划分系统、任务规划分系统、人机接口分系统,统称为规划器。



Notes: ESM—Electronic support measure; ECM—Electronic counter measure; EO—Electro-optical.

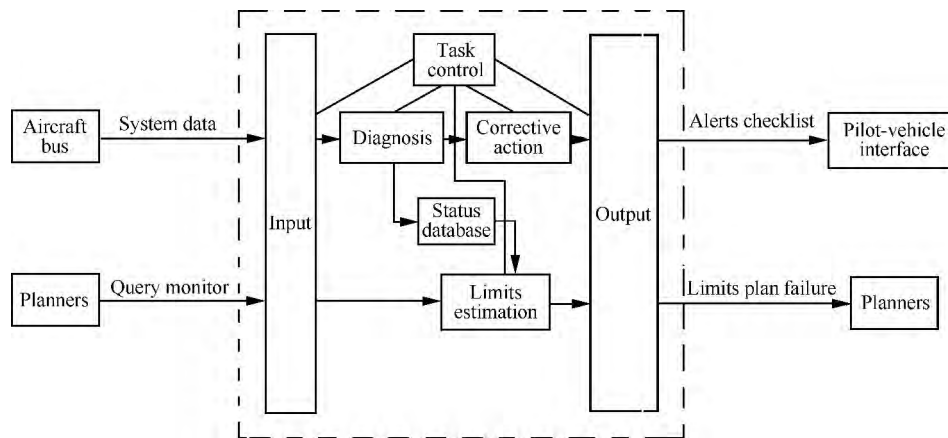
图 2 PA 项目总体结构<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Overall architecture of PA program<sup>[12]</sup>

### 4.1 系统状态分系统

系统状态分系统(如图 3 所示<sup>[1]</sup>)的核心功能是对故障进行诊断,并判断故障对飞机的影响程度。由于当时技术限制,该分系统仅实现了对发

动机的故障辨识。除了完成故障诊断功能,该分系统还负责监控对任务完成有影响的飞机状态参数,例如,最大飞行高度、最快转弯速率、剩余燃油等信息,并提示给飞行员,同时给出系统故障或战斗损伤情况下的处理方案,通过人机接口分系统

图 3 系统状态分系统结构图<sup>[1]</sup>Fig. 3 Architecture of system status subsystem<sup>[1]</sup>

提供给飞行员。随着人工智能技术的发展,该系统的设计应能够在复合故障发生的情况下,提供足够的解决方案或是建议。

输入/输出(Input/Output):解码编码数据。

诊断(Diagnosis):监控航空总线数据以探测设备的故障并隔离,并将故障数据传送至状态数据库进行比对,判断影响。

状态数据库(Status Database):存储飞机性能模型数据。

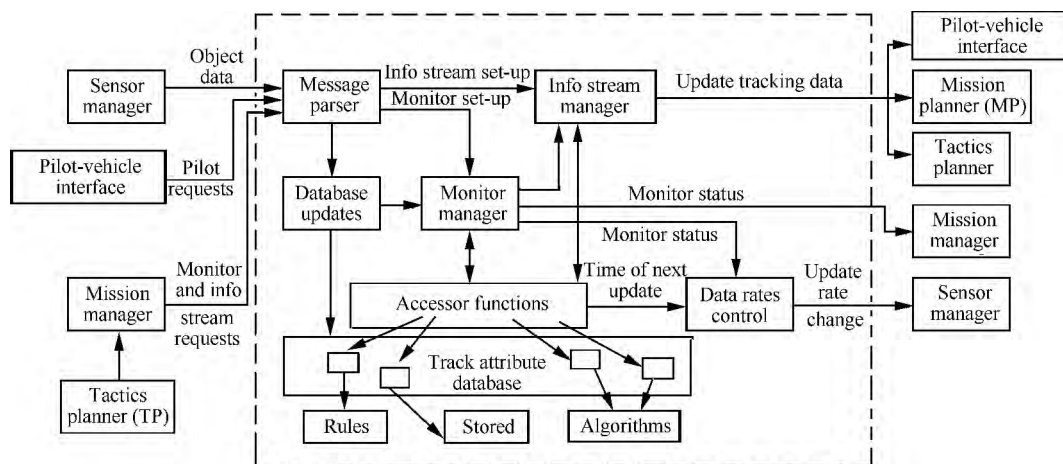
限制估计(Limits Estimation):接收状态数据库传来的飞机性能数据,及故障对飞机性能的影响数据,判断这些数据于任务的限制,监控执行过程中的机动动作及计划,如果故障影响到任务的完成,发送命令至规划器,启动规划功能。

纠正操作(Corrective Action):针对系统故障,给出纠正操作。

任务控制(Task Control):采用黑板系统,控制数据在系统状态分系统的各项功能中的流动,并对其优先度排序,确保最紧急的事件优先处理。

#### 4.2 态势评估分系统

态势评估分系统(如图4所示<sup>[1]</sup>)通过传感器获取外部信息,结合其他分系统的数据,例如人机接口分系统推理得到的飞行员意图、规划分系统规划得到的计划信息,使用 General Electric 开发的不确定环境下的推理系统(Reasoning with Uncertainty Module, RUM)判断当前态势对任务的影响及其可能的演变,并持续跟踪评估。

图 4 态势评估分系统结构图<sup>[1]</sup>Fig. 4 Architecture of situation assessment subsystem<sup>[1]</sup>

### 4.3 战术规划、任务规划分系统

规划分为主动规划(长期)及响应规划(短期),详见表1。PA项目中的任务规划分系统属于主动规划,战术规划分系统属于响应规划。

表1 规划的分类

Table 1 Classification of planning		
区别	主动规划	响应规划
输入	1. 用户的计划 2. 用户的目标 3. 世界状态模型 4. 用户的偏好	1. 主动规划输出的计划及目标 2. 世界状态模型 3. 事件信息 4. 用户的授权及偏好 5. 用户的差错信息
	1. 通过前提条件及用户偏好确定可行方案 2. 预测可行方案对未来的影响 3. 细化可行解 4. 确定可行计划及其子目标,并解决存在冲突	1. 比对计划的前提条件,确定计划的起止、更新、转换时间 2. 更新计划的状态 3. 提醒用户计划的变更 4. 解决冲突 5. 根据计划的风险值重启主动规划 6. 在用户授权内执行计划
功能		
输出	详细的计划及目标	1. 当前的计划及目标 2. 控制指令(授权范围内)
规划深度	具体行为层级依赖于动态环境,主动规划产生的计划及目标更抽象	
时间	响应规划通常需要在有限的时间内对态势作出应对,规划时间较少	

#### 4.3.1 任务规划分系统

任务规划分系统在空间的3个维度对路径进

行规划,针对不同任务(空对空任务,包括扫荡、截击、巡逻、护航;空对地任务,包括投弹、梯队渗透、战斗域前沿空中掩护)引入不同控制参数,并完成以下功能:

1) 基于战术准则、飞机性能、载荷种类、任务目的、地形、已知地面威胁分布、可能威胁地域、可能空中威胁、任务时间窗、目标及可能目标位置(燃油、武器、电子设备)选择飞行走廊。全局路径在起飞前根据先验知识规划完毕,在执行任务中根据态势实时调整。

2) 帮助飞行员控制局部飞行路径及速度。该过程中,专家系统评估地形、威胁和飞机状况,优化局部路径以改善生存能力,并管理时间、能源、飞行员工作负荷及其他约束(约束随任务发生变化)。

当外部态势有所变化,例如环境改变、系统探测到新的威胁、飞机因为设备故障等原因导致的性能变化,任务规划器启动规划并产生符合任务需要的备选方案,对方案进行评估,将评估结果提供给飞行员辅助决策。该分系统设计的主要难度在于需要能够在实时的、复杂的动态环境下对路径进行规划。

任务规划分系统结构如图5所示<sup>[1]</sup>,路径规划流程如图6所示<sup>[4]</sup>。

为了能够满足实时性要求,路径规划器首先根据地形、威胁等因素对地图进行概略的全局划分,找到能够到达目标的概略路径,如图7所示<sup>[4]</sup>。

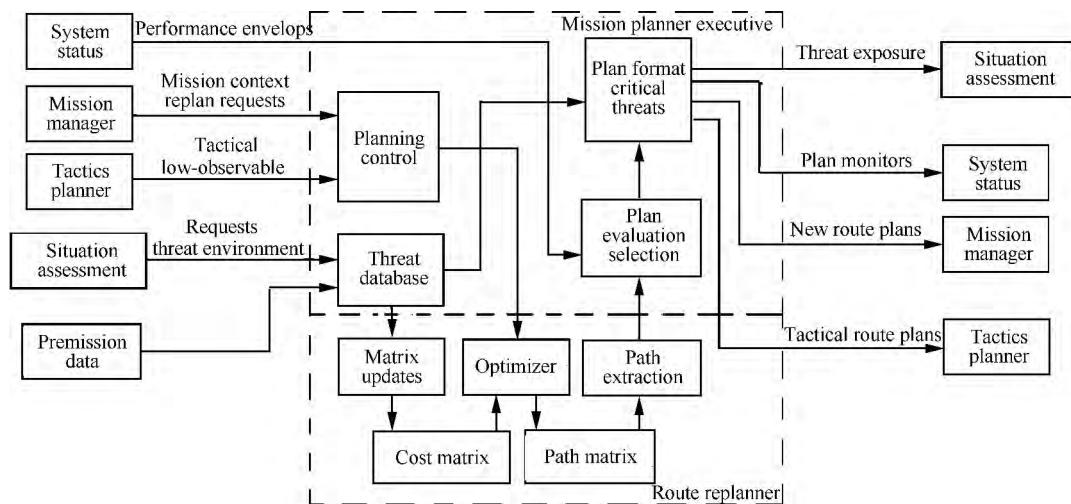
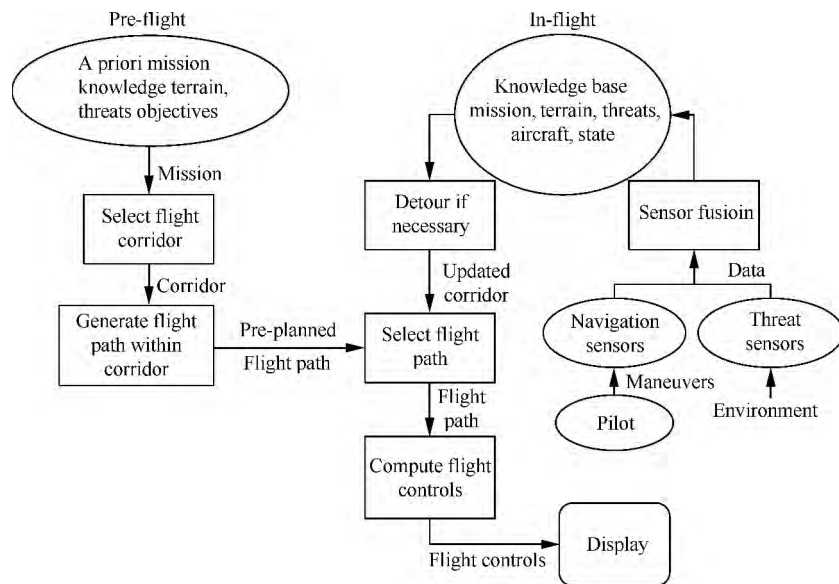
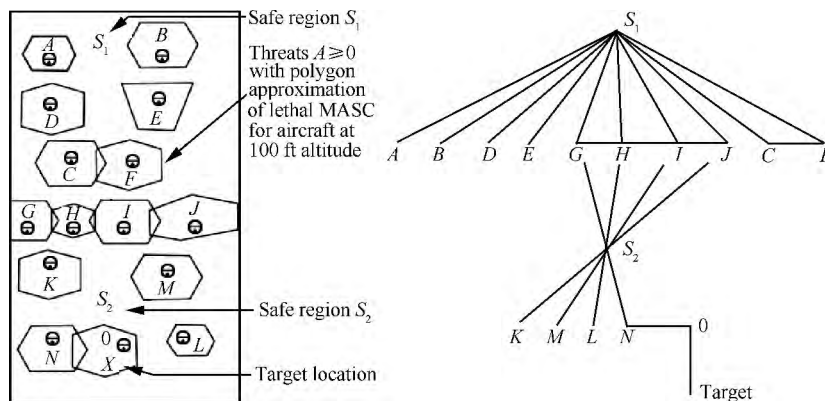


图5 任务规划分系统结构图<sup>[1]</sup>

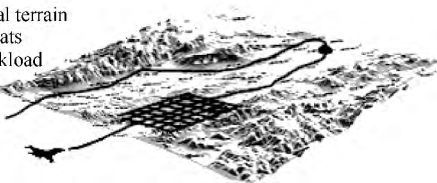
Fig. 5 Architecture of mission planning subsystem<sup>[1]</sup>

图 6 路径规划流程<sup>[4]</sup>Fig. 6 Process of route planning<sup>[4]</sup>图 7 概略路径规划<sup>[4]</sup>Fig. 7 General route planning<sup>[4]</sup>

在概略路径基础上,再启动局部优化算法以适应局地地形、威胁及工作负荷,如图 8 所示<sup>[4]</sup>。

Run local area dynamic programming algorithm over global path to optimize for

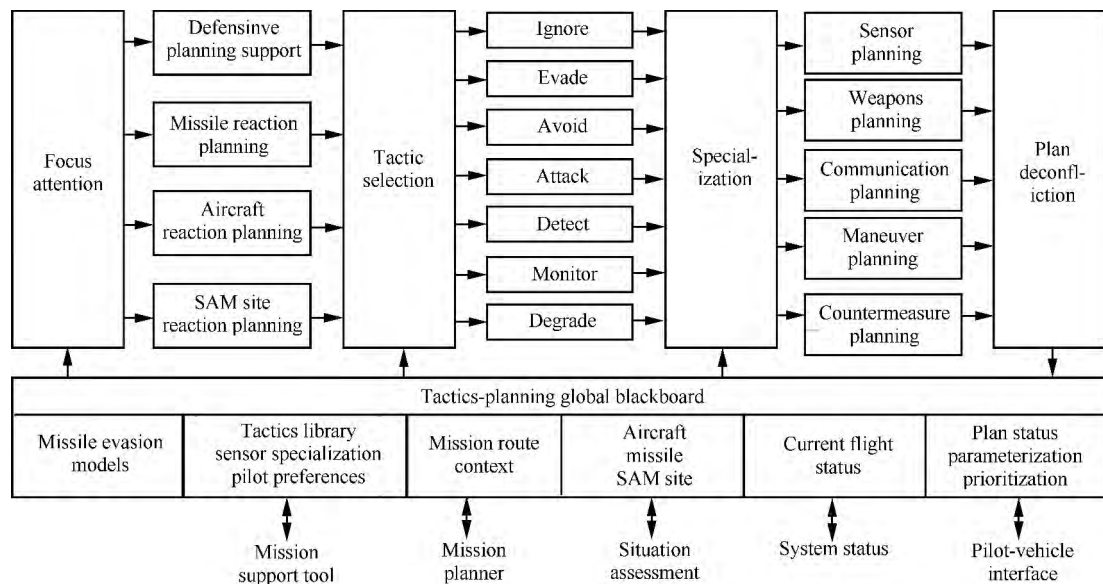
- Local terrain
- Threats
- Workload

图 8 局部路径规划<sup>[4]</sup>Fig. 8 Local route planning<sup>[4]</sup>

#### 4.3.2 战术规划分系统

战术规划分系统(结构图如图 9 所示<sup>[1]</sup>)综合任务目标、任务规划分系统规划的路径信息、态势评估分系统推理得到的外部态势信息、系统状态分系统监控到的飞行状态信息,在人机接口分系统辅助下,与飞行员共同完成战术的规划。除此之外,该分系统预先设置需要关注的重点态势,将可利用资源分配到核心区域。一旦选中某一方案,行动细化功能开始将战术分解到行为层级(飞行员的基础操作),同时对机载武器、设备进行评估,找到与目



图9 战术规划分系统结构图<sup>[1]</sup>Fig. 9 Architecture of tactical planning subsystem<sup>[1]</sup>

标存在冲突的地方,启动冲突消解功能,将信息提供给飞行员以应对态势,例如防御威胁措施、反制措施、武器使用、与僚机的协同等。能够在预规划的任务信息、约束、威胁源特点、飞行包线、反制措施、可用燃油及武器基础上给出攻击及防御计划。该系统的设计难点同样是对高实时性要求的满足。

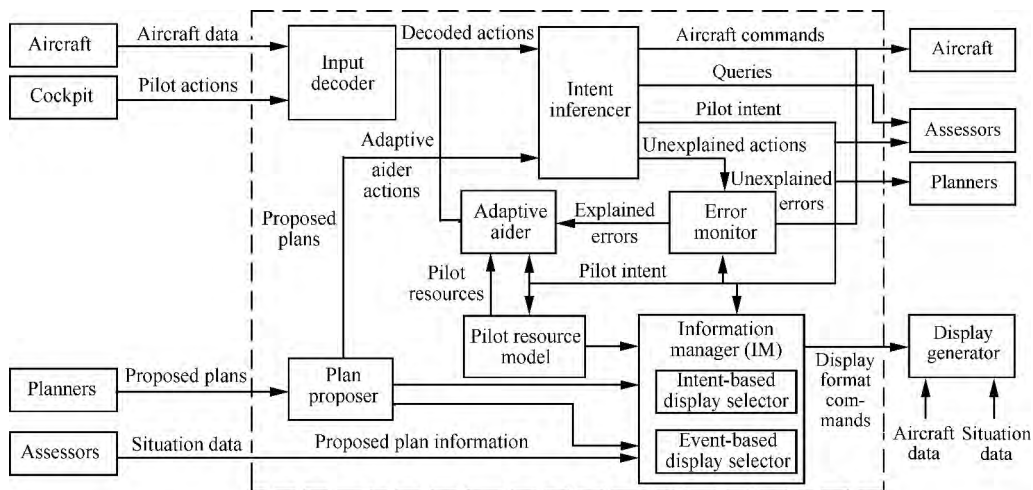
#### 4.4 人机接口分系统

人机接口分系统(如图10所示<sup>[1]</sup>)是PA项目中最复杂的分系统,为了更好地确定飞行员的

需求,DARPA于设计之初启动了大范围的调研,需求主要集中在以下几方面:

- 1) 高效地显示飞行员所需的信息。
- 2) 警示飞行员突发事件。
- 3) 提供飞行员需要完成的任务信息。
- 4) 自动规划并将方案显示给飞行员。
- 5) 配置控制及显示以减小飞行员负荷。
- 6) 根据当前飞行员负荷自动控制显示内容。

从飞行员的需求可以分析出,人机接口分系统显示信息的方式及内容具有以下几个特点:

图10 人机接口分系统结构图<sup>[1]</sup>Fig. 10 Architecture of pilot-vehicle interface subsystem<sup>[1]</sup>

### 1) 时间性和相关性。

要求人机接口分系统能够在有限时间内过滤并给出关键信息。

### 2) 灵活性和响应性。

由于不同飞行员的习惯不同,显示功能应具有适当的灵活性。为了保证人在回路,要求系统能够及时响应飞行员的信息需求。

### 3) 易理解性。

飞行员通过控制显示设备获取需要的信息,要求系统的输入及输出关系易于理解,否则会阻碍飞行员与系统的交互。同时,显示设备显示的信息要求易于理解,从而加快飞行员对外界态势的把握,文献[25]指出,人机交互设备不应该成为飞行员行为操作的客体,应使飞行员直接感受真实环境。

为了满足上述需求,PA项目的人机接口分系统在传统设计基础上,引入人工智能方法,重点提升了座舱的辅助决策能力,降低飞行员工作负荷。人机接口分系统主要由以下4个功能模块构成。

#### 1) 意图推理器(Intent Inferencer)。

通过各种外部态势信息、任务要求及飞行员的操作推理飞行员意图,确定飞行员当前决策,判断是否能够完成飞行任务,并将推理的结果传送到其他模块。

#### 2) 差错监控(Error Monitor)。

通过飞行员的差错模型,判断飞行员的行为

存在风险,并将可能出现的问题显示给飞行员。

#### 3) 自适应辅助决策(Adaptive Aider)。

根据预载任务信息(计划、目标数据),通过传感器获取的当前飞行参数,探测飞行员可能存在的偏差,判断偏差原因,给出修正方案。

#### 4) 信息管理器(Information Manager)。

信息管理器(如图11所示<sup>[2]</sup>)是人机接口最为重要的功能部件,采用面向对象技术设计,负责判断何时、如何显示何种信息,它的设计直接影响了时间性、相关性等要求的实现。

信息管理器的输入包括:

① 飞行员操作指令。

② 态势评估分系统、系统状态分系统传来的基于事件的信息。

③ 任务规划分系统、战术规划分系统传来的基于计划的信息。

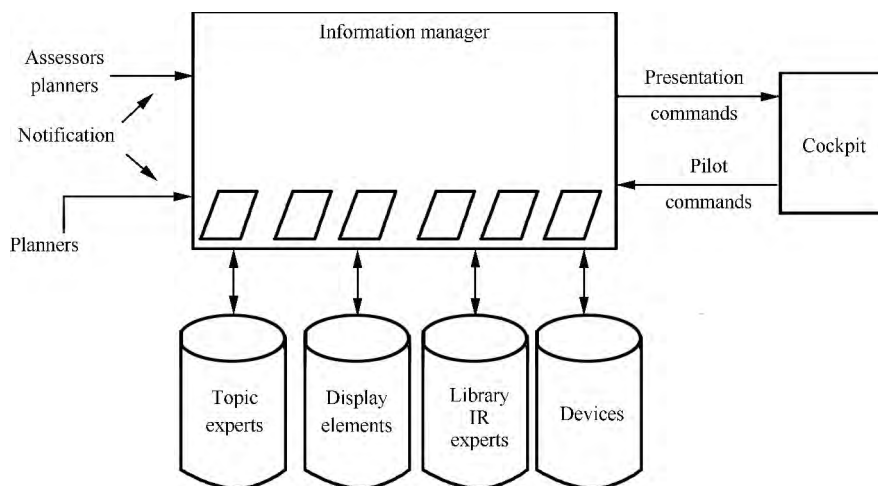
信息管理器的功能主要由三大专家系统实现:

#### ① 主题专家系统(Topic Experts)。

负责将同类信息合并。例如,4架战斗机组成的机群向我机飞来,主题专家系统通过分析,4架战斗机属于同一性质,从而只提供该机群的信息,而不是分别预警4架战斗机。

② 信息需求专家系统(Information Requirement Experts)。

综合态势信息以及当前执行的计划信息(意



Note: IR—Information requirement

图 11 信息管理器结构图<sup>[2]</sup>

Fig. 11 Architecture of information manager<sup>[2]</sup>

图推理器分析得到),确定显示给飞行员的信息、是否需要重复显示;确定信息显示的方式、具体显示位置。

### ③ 设备及显示部件专家系统。

包含了各显示部件的模型,例如语音合成器、CRTs (Cathode-ray Tube Screen)、HUD

(Heed Up Display)等设备。根据模型持续监控这些设备的显示或提示内容,满足飞行员信息需求。

经过上述三大专家系统,信息管理器将指令传递到座舱,重新配置各种显示及提示设备。

信息管理器工作流程如图 12 所示<sup>[2]</sup>。

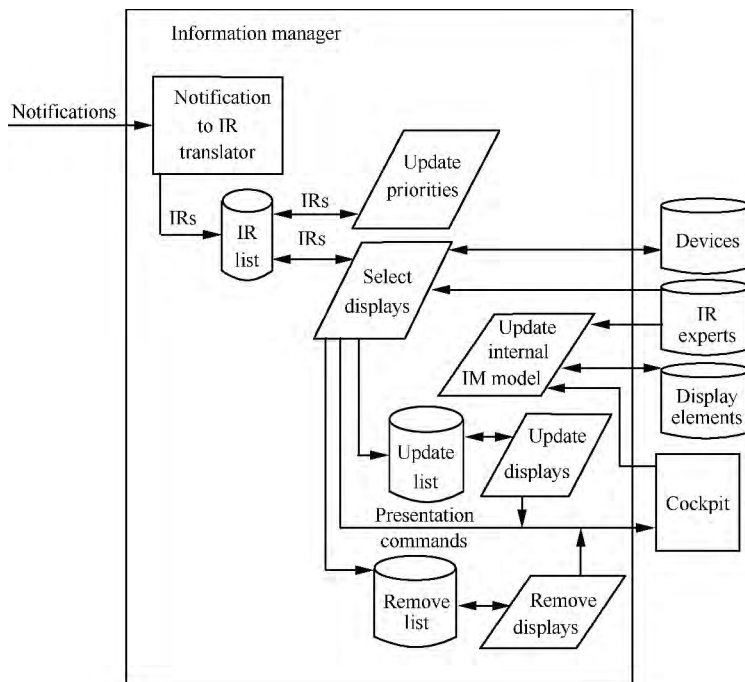


图 12 信息管理器工作流程<sup>[2]</sup>

Fig. 12 Working process of information manager<sup>[2]</sup>

## 5 计划-目标图

PA 项目共包含了 3 个具有规划能力的分系统:任务规划分系统、战术规划分系统、人机接口分系统。为了使这 3 个系统能够协同工作,同时满足第 1 节中提到,建模过程中需要设计一种机制区分目标及采取的行动,表征不同抽象层次的领域内容的目的,PA 项目设计了一种计划-目标图(Plan-Goal Graph, PGG)。

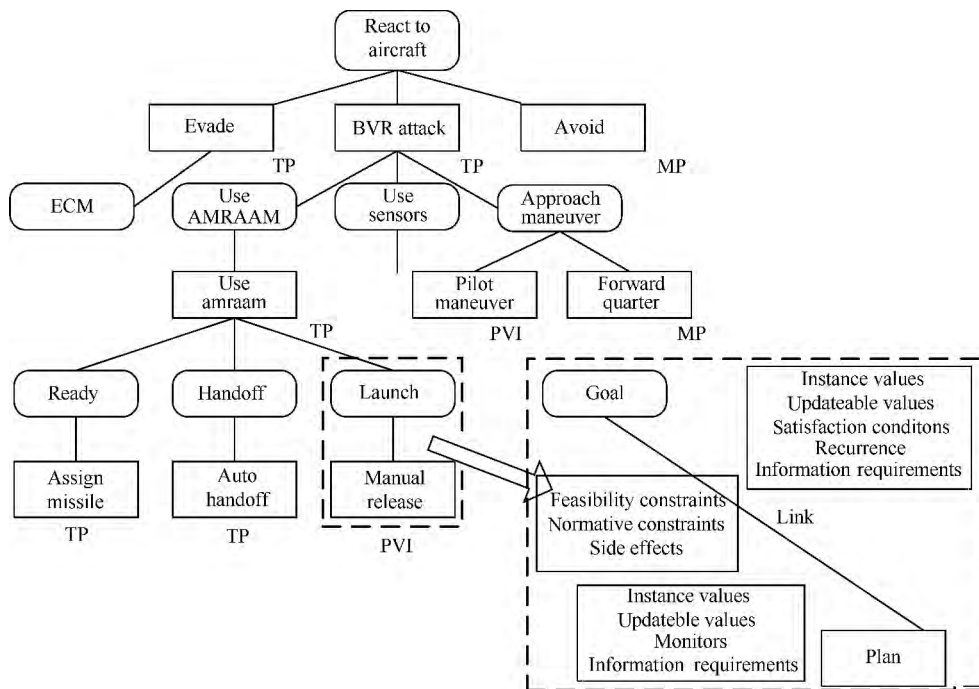
PGG 是具有一定抽象及聚合特点的图表,以不同形状的节点表示计划及目标,计划和目标之间通过具有约束值的线段交替连接。PGG 图中,最顶层节点代表系统最抽象的目标节点,与之连接的是高度聚合的计划节点,由一系列抽象行为组成。随着 PGG 的逐层向下,节点代表的内容越来越具体,最底层节点代表飞行员或者 Agent

可以执行的动作。

PGG 图中的节点包含两组数据,第 1 组是定义该节点的属性值,第 2 组是随态势更新的属性值。节点之间的约束值决定了计划节点的选择,控制着规划的方向。除此之外,约束值还包含了需要使用的资源及适用条件,该属性的引入有效地解决了行为的竞争关系。图 13 给出了应对敌机的 PGG 图<sup>[6]</sup>。

## 6 总结与展望

PA 项目集成了路径规划、意图推理、飞行员差错监控、故障诊断等多种功能,是人工智能技术于航空领域的综合应用。项目负责人 Geddes 教授及其团队在项目完成之后,继续对实时智能辅助系统进行研究,并将 PA 项目的经验成功地运用于 RPA 项目、波音 X-45 无人机以及陆军未来



Notes: BVR—Beyond visual range; AMRAAM—Advanced medium-range air-to-air missile

图 13 应对战机的计划-目标图<sup>[6]</sup>

Fig. 13 Plan-goal graph of reacting to aircraft<sup>[6]</sup>

作战系统的人机接口设计中(Army Future Combat Systems Warfighter Machine Interface System)<sup>[37-39]</sup>。

PA 项目能够以任务要求为核心、充分利用机载设备提供的信息,辅助飞行员应对各种态势,从而将信息优势转化为决策优势。其结构和具体实现手段对中国新一代座舱智能辅助系统的设计起着重大的借鉴作用。

### 6.1 当前研究的不足

对比中国目前研究重点,尚存在以下 3 点不足。

#### 1) 任务模型建立不充分。

座舱智能辅助系统的主要功能是辅助飞行员作出决策,决策的依据是任务模型。PA 项目中,任务模型的综合体现是 PGG 图的设计。PGG 图不仅使领域专家能够针对不同规划内容设计领域知识,还能够使飞行员直观地理解智能辅助系统的规划原理、规划进程及规划依据。从中国目前的研究来看,任务要求多以文字内容体现,缺乏有效的建模手段。

#### 2) 针对飞行员的研究不充分。

飞行员、载机、外部环境是影响任务执行的 3

个要素。当前,中国针对载机、外部环境的研究成果丰富,例如路径规划、故障诊断、态势评估等,在满足实时性要求的前提下,可以直接应用于智能座舱的设计当中。但是,针对飞行员的差错监控、意图推理、工作负荷评估方面的研究较少,而这些功能是人机接口分系统实现的核心。

#### 3) 系统需求及总体结构设计研究不充分。

从 PA 项目的研究过程可以看出,在其准备阶段,DARPA 首先对飞行员及相关领域专家进行了大规模的调研以确定需求,然后分析需求的特点,总结 PA 系统应具有的功能,最后确定技术细节。从公开的文献来看,中国在飞行员及系统需求方面的研究成果较少。

其次,PA 项目的竞争对象包括洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin, LHM)及麦克唐纳-道格拉斯公司(McDonnell-Douglas Corporation, MDCC),两家公司于准备阶段的设计思路稍有不同,但是,大部分精力都投入在 PA 系统功能模块的划分及模块间交互方式的选择,LHM 的设计方案采用全局黑板技术作为各功能模块的数据存储并对其进行控制,MDCC 的设计则是各独立功能模块具有单独的数据存储功能,通过消息传

递控制数据流动。最终,LHM 公司首先取得突破性进展。由于中国尚未对座舱智能辅助系统开展研究,所以缺乏总体结构设计。

## 6.2 未来研究方向

PA 项目中一项关键技术是 PGG 图的设计,它不仅体现了任务需求,强化了飞行员及设计人员对规划过程的理解,还控制着任务规划分系统、战术规划分系统、人机接口分系统之间的交互。虽然 PGG 图具有上述优势,但是 PGG 图不能有效处理规划当中的模糊问题,不能从历史经验中学习并更新节点与节点之间的约束值,最重要的是,缺乏足够的数学工具对 PGG 图进行分析,无法在 PGG 图的基础上,结合计划对飞行员的工作负荷进行分析,无法实现自适应辅助决策等级的调整。

在未来的研究中,可以结合 PA 项目的经验,选择合适的建模工具实现上述功能,从而解决任务模型建立不充分这一问题。同时在模型基础上引入模糊推理、强化学习等技术,使任务模型具有一定的学习能力。最后,可以在任务模型基础上,引入数学工具对飞行员的工作负荷进行分析,判断飞行员意图、监控飞行员行为,实现辅助等级的在线调整。

## 参 考 文 献

- [1] BANKS S B, LIZZA C S. Pilot's associate: A cooperative, knowledge-based system application[J]. IEEE Expert, 1991, 6(3): 18-29.
- [2] SMALL R L, HOWARD C W. A real-time approach to information management in a pilot's associate[C]//10th IEEE/AIAA Proceedings of Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991: 440-445.
- [3] POMEROY B, IRVING R. A blackboard approach for diagnosis in pilot's associate[J]. IEEE Expert, 1990, 5(4): 39-46.
- [4] FRANKOVICH K, PEDERSEN K, BERNSTEEN S. Expert system applications to the cockpit of the '90s[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 1986, 1(1): 13-19.
- [5] LEAVITT C A, SMITH D M. Integrated dynamic planning in the pilot's associate[C]//Proceedings of AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Reston, AIAA, 1989: 327-331.
- [6] LAPUMA A A, MARLIN C A. Pilot's associate: A synergistic system reaches maturity[C]//AIAA Computing in Aerospace Conference. Reston: AIAA, 1993: 1131-1141.
- [7] BROADWELL M, SMITH D M. Pilot's associate: The generation of real-time performance [C]//AIAA/AHS/ASEE Aircraft Design, Systems and Operations Conference. Reston: AIAA, 1989: 26-32.
- [8] KELLER K J, STANLEY K C. Pilot's associate—An integration architecture for decision aiding [C]//AIAA, Guidance, Navigation and Control Conference. Reston: AIAA, 1991: 1-11.
- [9] GEDDES N D, LIZZA C S. Practical applications of a real time, dynamic model of intentions[J]. AAAI Fall Symposium, 2001, 1(1): 2-12.
- [10] LEAVITT C A. Real-time in-flight planning [C]//Proceedings of the IEEE 1996 National. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996: 83-89.
- [11] PERSCHBACHER D L, LEVI K R, HOFFMAN M. The importance of implicit and explicit knowledge in a pilot's associate system[C]//Proceedings of the IEEE 1991 National. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991: 1158-1163.
- [12] LIZZA C, FRIEDLANDER C. The pilot's associate: A forum for the integration of knowledge-based systems and avionics[C]//Proceedings of the IEEE 1988 National. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1988: 1252-1258.
- [13] GEDDES N D. Verification and validation testing of the pilot's associate[C]//10th IEEE/AIAA Proceedings of Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1991: 426-431.
- [14] MCBRYAN B, JOY M. Rotorcraft pilot's associate shared memory task network architecture[C]//Proceedings of American Helicopter Society 55th Annual Forum. Fairfax, VA: American Helicopter Society, 1999: 1364-1378.
- [15] MCBRYAN B, JOY M. Rotorcraft pilot's associate hierarchical planning[C]//Proceedings of American Helicopter Society 55th Annual Forum. Fairfax, VA: American Helicopter Society, 1999: 282-292.
- [16] BAKER B. Rotorcraft pilot's associate attack mission planner[C]//Proceedings of American Helicopter Society 55th Annual Forum. Fairfax, VA: American Helicopter Society, 1999: 844-853.
- [17] MILLER C A, GUERLAIN S, HANNEN M D. The rotorcraft pilot's associate cockpit information manager: Acceptable behavior from a new crew member[C]//Proceedings of American Helicopter Society 55th Annual Forum. Fairfax, VA: American Helicopter Society, 1999: 1321-1332.
- [18] MCBRYAN B, HALI J. Engineering approach for rotorcraft pilot's associate cognitive decision aiding systems de-

- velopment[C]//13th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994: 76-81.
- [19] MILLER C A, HANNEN M D. User acceptance of an intelligent user interface: A rotorcraft pilot's associate example[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent User Interfaces. New York: ACM, 1998: 109-116.
- [20] BELKIN B L, STENGEL R F. Cooperative rule-based systems for aircraft control[C]//26th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1987, 26: 1934-1940
- [21] BELKIN B L, STENGEL R F. Systematic methods for knowledge acquisition and expert system development (for combat aircraft)[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 1991, 6(6): 3-11.
- [22] STENGEL R F. Toward intelligent flight control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(6): 1699-1717.
- [23] PIPE H J. The UK management AID project[J]. IFAC Automatic Control in Aerospace, 1992, 1(1): 263-268.
- [24] BONNER M, TAYLOR R, FLETCHER K, et al. Adaptive automation and decision aiding in the military fast jet domain[C]//Proceedings of the Conference on Human Performance, Situation Awareness and Automation: User Centered Design for the New Millenium. Landon: Psychology Press, 2000: 154-159.
- [25] SCHULTE A, KLÖCKNER W. Electronic crew assistance for tactical flight missions[J]. The Human-Electronic Crew: The Right Stuff, 1997, 26(1): 103-108.
- [26] MCCLOSKEY M. Naive theories of motion[J]. Mental Models, 1983, 1(1): 299-324.
- [27] KIERAS D E, BOVAIR S. The role of a mental model in learning to operate a device[J]. Cognitive Science, 1984, 8(3): 255-273.
- [28] KEINAN G, FRIEDLAND N, ARAD L. Chunking and integration: Effects of stress on the structuring of information[J]. Cognition & Emotion, 1991, 5(2): 133-145.
- [29] NEWELL A, SIMON H A. Human problem solving[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972: 23-56.
- [30] FELTOVICH P J, SPIRE R J, COULSON R L, et al. Conceptual understanding and stability, and knowledge shields for fending off conceptual change[R]. Springfield, IL: School of Medicine Springfield, Southern Illinois University, 1994:10-64.
- [31] DISESSA A A. Unlearning aristotelian physics: A study of knowledge-based learning[J]. Cognitive Science, 1982, 6(1): 37-75.
- [32] RASMUSSEN J. Skills, rules and knowledge, signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1983, 13(3): 257-266.
- [33] WICKENS C D, LIU Y. Codes and modalities in multiple resources: A success and a qualification[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1988, 30(5): 599-616.
- [34] BELLENKES A H, WICKENS C D, KRAMER A F. Visual scanning and pilot expertise: The role of attentional flexibility and mental model development[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1997, 68(7): 569-579.
- [35] WICKENS C D. Multiple resources and performance prediction[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2002, 3(2): 159-177.
- [36] KOLBE R, FRIEDLANDER C. Structuring knowledge representation for the rotorcraft pilot's associate program [C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Humans, Information and Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994, 3: 2097-2101.
- [37] BUCHLER N, MARUSICH L R, SOKOLOFF S. The warfighter associate: Decision-support software agent for the management of intelligence, surveillance, and reconnaissance (ISR) assets[C]//Proceedings of SPIE, Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISRV. Bellingham, WA: SPIE, 2014, 9079: 2-14.
- [38] MERRIHEW J, LAFFERTY L, SHEPARD C M. Adaptive distributed aviation asset optimization for operational effectiveness[EB/OL]. (2013-12-09)[2016-01-15]. <http://www.veloxiti.com>.
- [39] BUCHLER N, MARUSICH L, BAKDASH J Z, et al. The warfighter associate: Objective and automated metrics for mission command[R]. Aberdeen Proving Ground, MD: U. S. Army Research Laboratory, 2013: 2-15.

#### 作者简介:

吴文海 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 精确制导与飞行控制。

Tel.: 0532-51833632

E-mail: sophia\_wxc@126.com

张源原 男, 博士, 助教。主要研究方向: 智能控制、任务建模。

E-mail: 109889354@qq.com

## Overview of pilot's associate program

WU Wenhai<sup>1,\*</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Siyu<sup>1</sup>, LIU Jintao<sup>1</sup>, MEI Dan<sup>1</sup>

1. *Department of Aviation Control, Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China*

2. *Department of Navigation, Navy Flight Academy, Huludao 125000, China*

**Abstract:** The research of applying artificial intelligence to aviation domain is decentralized and the overall design concept is outdated which result in the problem that researchers are incapable of integrating various technologies to form an intelligent support system to improve pilot's decision-making ability. Based on summarizing the limits of pilot's ability and the existing problems of cockpit and analyzing the design requirements of intelligent support system of cockpit, the overall architecture and design methods of pilot's associate program is overviewed, and the realization of each subsystem is showed. In conclusion, based on pilot's associate program, the deficiency of domestic research is given to point out the direction of future research.

**Key words:** intelligent cockpit; support system; overall architecture; support flight; design requirement

---

Received: 2015-12-29; Revised: 2016-01-05; Accepted: 2016-02-19; Published online: 2016-03-09 14:47

URL: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20160309.1447.010.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20160309.1447.010.html)

\* Corresponding author. Tel.: 0532-51833632 E-mail: [sophia\\_wxc@126.com](mailto:sophia_wxc@126.com)