

# 飞机驾驶舱自适应功能分配方法

毕晨灿<sup>1</sup> 高飞<sup>2\*</sup>

(1. 太原理工大学, 太原 030600; 2. 山东交通学院, 济南 250357)

**摘要:** 对于诸如飞机驾驶舱等复杂人机系统, 自适应功能分配能实现动态变化下的人机协作方式, 使人、机更加协同完成功能, 提高系统整体的效能。提出了一种飞机驾驶舱自适应功能分配的方法, 该方法采用贝叶斯网络预测当前情境下各个可行的自动化等级的绩效指标, 然后基于多属性风险决策来综合所有绩效指标得到最合适的自动化等级。实例表明该方法具有很好的可操作性和灵活性, 能为飞机驾驶舱功能分配提供技术支持。

**关键词:** 自适应功能分配; 飞机驾驶舱; 贝叶斯网络; 多属性决策

中图分类号: TP27

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

飞机驾驶舱是飞行员执行飞行任务的主要活动场所。随着科学技术的发展, 飞机驾驶舱逐渐向智能化、自动化的方向发展, 人、机之间的关系也相应地发生变化——飞行员的决策与管理职能逐渐加强, 而操纵职能逐渐弱化<sup>[1]</sup>。虽然自动化系统在驾驶舱中的应用极大地降低了飞行员的工作负荷, 提高了飞行效率<sup>[2]</sup>, 但是如果在飞行过程中飞行员过分依赖自动化系统, 过度的自动化会导致驾驶舱的功能分配影响飞行员与自动化系统之间的协作方式<sup>[3]</sup>, 飞行员在驾驶舱中的任务会逐渐由手动控制转向监督控制, 飞行员的工作负荷也由体力负荷逐渐向认知负荷转变<sup>[4]</sup>。问题的根源在于自动化设计与飞行员能力及需求不匹配<sup>[5]</sup>, 要完全发挥自动化的作用, 就必须充分考虑人的因素, 确定合适的人机协作方式, 使自动化适合人的要求, 构成“以人为中心”的人—机—环境系统<sup>[6]</sup>。确定合适的人机协作方式, 这涉及如何正确进行功能分配。

飞机驾驶舱功能分配是指将驾驶舱系统的功能或任务分派给飞行员或者自动化系统的过程。对于一个具体的任务, 既可以由飞行员或自动化系

统独立完成, 也可以由人、机协作完成。功能分配存在两种形式, 即静态功能分配和自适应功能分配<sup>[7-8]</sup>。静态功能分配方式通过比较飞行员和自动化系统在完成特定功能的能力优势, 决定该功能分配给飞行员还是自动化系统来完成; 它在系统设计阶段就确定了飞行员和自动化系统各自的角色, 在系统运行时不允许任何再分配。虽然这种分配方式的应用十分成熟, 但是当系统出现意想不到的变化或者飞行员性能下降的情况, 它将会失去鲁棒性, 呈现出一些与飞行安全相关的问题, 例如飞行员“超负荷”现象和“人不在回路”现象<sup>[9]</sup>。究其根本原因, 是静态功能分配方式不能随着任务需求和飞行员状态的变化而改变飞行员和自动化系统的协作关系。大量的实验研究表明, 另外一种功能分配形式——自适应功能分配可以很好地解决这一问题<sup>[11]</sup>。自适应人机界面可以根据用户的行为习惯和认知负荷自动调整系统响应, 预测用户的行为, 简化操作步骤, 减少人的认知负荷<sup>[10]</sup>。相比静态功能分配, 自适应功能分配允许系统在运行阶段根据情况的变化, 将系统功能在人、机之间动态地重新分配, 从而使人、机工作更加协同, 提高系统整体的效能。

\* 通信作者. E-mail: gaofei1995@hotmail.com

基金信息: 山东自然科学基金(ZR2023QF148)

引用格式: 毕晨灿, 高飞. 飞机驾驶舱自适应功能分配方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(1): 73-78. BI C C, GAO F. Adaptive function allocation method for aircraft cockpit[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(1): 73-78 (in Chinese).

国内外学者从飞行任务分析、当前驾驶舱的 SPO 模拟、监控飞行员的表现及人因分析等方面展开研究<sup>[12]</sup>。在国内公开的文献中,关于自适应功能分配方面的研究主要集中在智能无人系统领域,关于飞机驾驶舱自适应功能分配还未见报道。文献[13]研究了人的情境意识在作战无人机的任务管理和操作环节中的地位,进行了基于操作员监视效率变化的自适应功能分配仿真和模拟实验。实验结果表明,具有自动调节功能的界面更有利于保持操作人员的情境意识水平。文献[14]系统地研究了多无人机监督控制系统的自适应功能分配问题,提出了基于模糊逻辑的自适应自动化等级调整方法。文献[15]通过态势评估算法实时估计水面无人艇自主完成威胁规避任务的能力,由此决定是否将该任务交由远程操作员或是水面舰艇自主完成。

本文以飞机驾驶舱系统为研究对象,讨论了飞机驾驶舱自适应功能分配流程<sup>[1]</sup>,提出了基于贝叶斯网络和多属性决策的飞机驾驶舱自适应功能分配算法,最后用一个实例来说明这种算法的有效性<sup>[16-17]</sup>。

## 1 飞机驾驶舱自适应功能分配流程

飞机驾驶舱自适应功能分配的基本思想是在自动化系统设计阶段,为其定义几种不同的自动化等级(level of automation, 简称 LOA),不同的等级对应不同的人机协作关系。在任务执行过程中,驾驶舱系统根据获得的实时情境信息推理出当前最合适的自动化等级。对于某项功能或任务,自适应功能分配的流程(如图 1 所示)包括以下步骤:

1) 情境评估。对当前与任务执行相关的情境变量进行评估。一般地,所要评估的情境变量包括飞行员状态变量、任务变量以及环境变量。任务变量和环境变量通常与完成的功能或任务本身相关,反映了功能或任务实现的复杂性和紧迫性,飞行员状态变量则反映了飞行员当前的生理和心理情况<sup>[17]</sup>。

2) 自动化等级集合确定。由当前自动化系统的工作状态和工作条件确定当前可行的自动化等级集合,它是该自动化系统所有自动化等级集合的一个子集。

3) 绩效预测。根据当前情境变量的评估值,预测各个自动化等级的绩效水平。绩效指标包括

任务绩效和飞行员绩效<sup>[18]</sup>。任务绩效包括任务执行的安全性和效率等,飞行员绩效包括飞行员的脑力负荷、情境意识水平以及技能下降程度等。

4) 评估决策。综合各绩效指标的预测值,对各个自动化等级进行优先级排序,优先级最大的自动化等级即为当前情境下的最合适自动化等级。

5) 功能分配建议。依据评估决策得到的最终自动化等级下的人机协作方式,完成此项功能或任务。不同自动化等级下的人机协作方式包括:(1)自动化系统不提供任何帮助,飞行员手动进行所有的操纵;(2)自动化系统向飞行员建议多种可行的操纵方案,飞行员从中选择一个方案进行执行;(3)自动化系统准备执行一个操纵方案,但是需要飞行员确认;(4)自动化系统直接计算出当前系统认为最佳的操纵方案,自动执行,不需要飞行员进行确认。

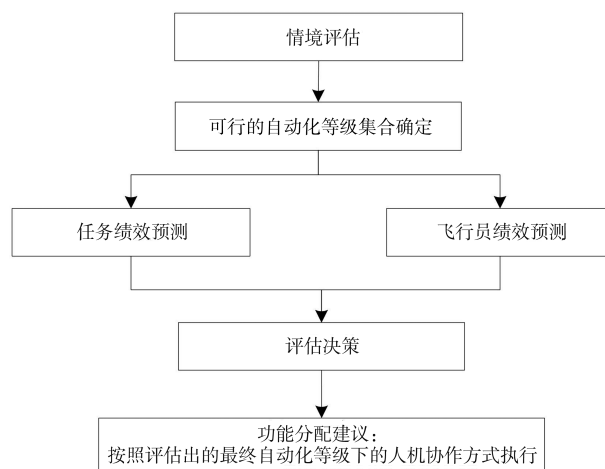


图 1 飞机驾驶舱自适应功能分配流程

为了实现飞机驾驶舱自适应功能分配,上述步骤中需要解决的两个核心问题是:1)如何根据当前情境变量的评估值来预测各个自动化等级的绩效值;2)如何根据各个自动化等级的绩效预测值来决定最终的自动化等级。

## 2 基于贝叶斯网络的自动化等级绩效预测方法

由于飞行任务环境的不确定性以及评估方法的可靠性等原因,情境变量的评估值为随机变量,通常以概率的形式给出。记情境变量集合为情境变量  $s_i$  共有  $k$  种状态,其评估值可以表示为:

$$\lambda(s_i) = [p_1(s_i), p_2(s_i), \dots, p_k(s_i)] \quad (1)$$

其中,  $\sum_{j=1}^k p_j(s_i) = 1, j = 1, 2, \dots, k$ ,  $p_j(s_i)$  表示情境变量  $s_i$  处于第  $j$  种状态的概率。自动化等级绩效预测就是在给定上述情境评估值的情况下, 预测不同自动化等级的绩效值的概率分布, 本文采用贝叶斯网络推理技术来解决此问题。

贝叶斯网络用有向无环图中的节点来表示随机变量, 用有向边来表示变量之间的相关关系, 用条件概率分布来表示相关程度, 是人类大脑中知识结构的自然表述, 有利于知识的表示和解释。同时, 图形表示方式便于维持概率分布的完整性和一致性。在基于贝叶斯网络的决策网推理过程中, 决策者只需考虑节点与其父节点之间的关系, 降低了决策推理的复杂度<sup>[16]</sup>, 具有对不精确数值的鲁棒性。

基于贝叶斯网络推理的自动化等级绩效预测方法的步骤如下:

1) 将自动化等级和情境变量作为证据节点, 自动化等级绩效指标作为观察节点, 构建贝叶斯网络的拓扑结构(如图 2 所示), 并进一步确定贝叶斯网络中的每个节点的条件概率表(CPT)。

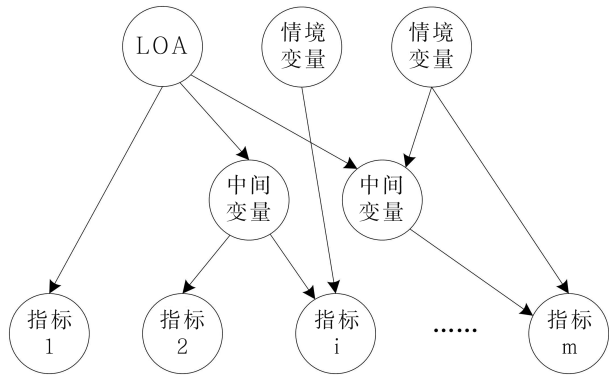


图 2 自动化等级绩效预测的贝叶斯网络拓扑结构

目前贝叶斯网络建模方法<sup>[16]</sup>主要有:a)领域专家建模。依靠航空工效学领域的专家建立网络结构准确性较高、速度较快,但通常专家知识偏重于定性分析,对于概率分布的定量分析不是很准确。b)从数据中学习。从数据中学习贝叶斯网络结构和节点概率分布能够解放人的劳动,学习数据通常通过工效学仿真实验获取。c)根据知识库创建。根据知识库创建贝叶斯模型可以在某种程度上以已有知识取代专家的劳动,但不适用于知识库尚未建立或知识不完备的情况。飞机驾驶舱任务环境

下的贝叶斯网络建模可以采用数据学习和专家知识结合的方法。

2) 将各个情境变量  $s_i$  的实时评估值  $\lambda(s_i)$  作为该情境变量节点的概率分布;改变自动化等级节点的概率分布,使该节点取某一自动化等级  $x_j$  的概率为 1,利用网络进行推理,得到在此条件( $p(x_j) = 1$ )下,各个绩效指标的条件概率分布。如第  $q$  个绩效指标  $u_q$  的分布,这是一个随机变量,其中第  $k$  种取值  $u_q^k$  的概率表示为:

$$p(u_q^k | p(x_j) = 1, \lambda(s_1), \lambda(s_2), \dots, \lambda(s_i), \dots) \quad (2)$$

3) 不断改变自动化等级节点的分布,重复步骤 2,直到获得所有自动化等级下各个绩效指标取值的概率分布。

### 3 基于多属性决策的自动化等级评估方法

获得各个自动化等级的绩效值后,需要对这些指标值进行综合,从可行的自动化等级集合中,选择出最适合当前情境下的方案,属于多属性决策问题。特别地,由于各个绩效指标由概率分布的形式给出,可以视为风险型多属性决策。

记自动化等级集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ , 表示共有  $M$  种可能的自动化等级。自动化等级绩效指标集为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ , 表示共有  $N$  个自动化等级绩效指标。假设所有的绩效指标采用定性测度,其语言评估标度  $S = \{s_\alpha | \alpha = -L, \dots, L\}$ ,  $S$  中的术语个数一般为奇数,如语言评估指标可取  $S = \{s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2\} = \{\text{很低, 低, 一般, 高, 很高}\}$ 、 $S = \{s_{-1}, s_0, s_1\} = \{\text{低, 中, 高}\}$  等。绩效指标的权重向量记作  $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ , 并满足单位化约束条件:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1, w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$A = (a_{ij})_{M \times N}$  表示决策矩阵,对于自动化等级  $x_i \in X$ ,应用第 2 章方法对第  $j$  个绩效指标  $u_j$  进行预测,得到  $x_i$  关于  $u_j$  的绩效值为随机变量  $a_{ij}$ 。则自动化等级为  $x_i$  时  $a_{ij}$  的概率分布列为:

$$[p_{-L}(a_{ij}), p_{-L+1}(a_{ij}), \dots, p_\alpha(a_{ij}), \dots], \quad \alpha = -L, \dots, L \quad (4)$$

其中,  $p_\alpha(a_{ij})$  表示评估值为  $s_\alpha$  的概率。

依据概率信息下风险多属性决策的 EMV 准则,自动化等级为  $x_i$  关于绩效  $u_j$  的期望值为:

$$a'_{ij} = \sum_{\alpha=-L}^L p_{\alpha}(a_{ij})b_{j\alpha} \quad (5)$$

其中,  $b_{j\alpha}$  表示关于绩效指标  $u_j$  取值为  $s_{\alpha}$  情况下的收益或效用。对于成本型绩效指标,如飞行员脑力负荷、技能下降程度等,  $b_{j\alpha} = -\sigma\alpha$ , 其中  $\sigma$  为常参数;对于效益型绩效指标,如安全性、效率、飞行员情境意识水平等,  $b_{j\alpha} = \sigma\alpha$ 。

记  $A' = (a'_{ij})_{M \times N}$  表示新的决策矩阵,由此风险型多属性决策问题转化为确定型多属性决策问题,可以根据各个自动化等级的综合评估值进行排序选择最佳的方案,自动化等级综合评估值的计算公式如下:

$$e_i = \sum_{j=1}^N w_j \sum_{\alpha=-L}^L p_{\alpha}(a_{ij})b_{j\alpha}, i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

## 4 实例

上文给出了基于贝叶斯网络和多属性决策的飞机驾驶舱自适应功能分配方法,下面将通过一个实例来演示该分配方法的实现过程。考虑自由飞行环境下飞行员执行空中冲突解决任务的例子。在飞行过程中,当自动化系统检测到飞机可能与其它飞机相碰撞时,飞行员或自动化系统必须执行某种操纵方案对飞机进行操纵,更改飞机当前的轨迹,避免碰撞的发生。对于该任务,可行的自动化等级为:1) 飞行员手动操纵飞机,自动化系统不提供任何帮助;2) 自动化系统向飞行员建议多种可行的操纵方案,飞行员从中选择一个方案进行执行;3) 自动化系统直接计算出当前自己认为最佳的操纵方案,自动执行,不需要飞行员进行确认。以上三种自动化等级的自动化程度按序依次增加。

该任务的情境变量包括飞机当前所处空域的交通复杂度 TC、距碰撞发生所剩的时间 TL 以及飞行员当前的工作量 WL。其中 TC 包括低、中、高三种状态,TL 包括 24 s 以下、25~40 s、41~60 s 三种状态,WL 包含低、中、高、非常高四种状态。中间变量 TD 包括低、中、高、非常高四种状态。

自动化等级绩效指标包括安全性 TS、飞行员脑力负荷 ML 以及飞行员的情境意识水平 SA。自动化等级绩效的语言评估标度为:  $S = \{s_{\alpha} | \alpha = -2, \dots, 2\} = \{\text{很低, 低, 一般, 高, 很高}\}$ , 绩效指标的权重向量为  $W = (0.5, 0.2, 0.3)^T$ 。

关于该任务的自动化等级预测的贝叶斯网络拓扑结构如图 3 所示。SA 直接受 LOA 影响,TS 直接受

LOA、TD、WL 影响,ML 直接受 LOA、TD、WL 影响,TD 直接受 TC、TL 影响。

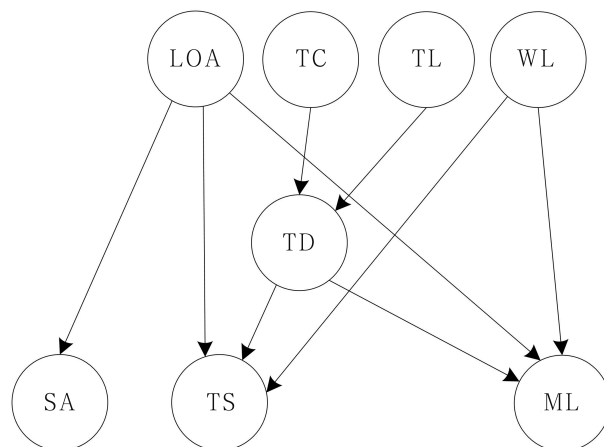


图 3 空中冲突解决任务的贝叶斯网络拓扑结构

网络中 TD、SA、TS、ML 等节点的 CPT 依据专家知识给定,例如当 LOA 增加时,SA 有减小的趋势。设在两种不同情境下,节点 TC、TL、WL 取值的概率分布如表 1 所示。

表 1 情境变量的概率分布

情境变量	情境 1	情境 2
TC	低 中 高 [0.9, 0.1, 0]	低 中 高 [0.1, 0.9, 0]
TL	≤24, 25~40, 41~60 [0, 0, 1]	≤24, 25~40, 41~60 [0, 1, 0]
WL	低 中 高 非常高 [0.5, 0.5, 0, 0]	低 中 高 非常高 [0, 0.5, 0.5, 0]

按照图 3 所示的网络拓扑结构,利用 matlab 下的贝叶斯网络工具箱来建立贝叶斯网络。通过贝叶斯网络推理得到各个自动化等级绩效指标的概率分布,并由公式(3)计算得到三种自动化等级的评估值,结果如表 2 所示。

对自动化等级评估值进行排序,情境 1 下的结果为  $LOA_2 > LOA_3 > LOA_1$ ,情境 2 下的结果为  $LOA_3 > LOA_2 > LOA_1$ 。在情境 1 下,飞机周围交通复杂度低,飞行员当前工作量适中并且有足够时间进行决策,此时最好的自动化等级为  $LOA_2$ ;而在情境 2 下,飞机周围交通复杂度增加,飞行员当前工作量较大并且决策时间紧迫,此时最好的自动化等级较情境 1 提高一个级别。



表2 推理结果和评价结果

		LOA1		LOA2		LOA3	
		情境1	情境2	情境1	情境2	情境1	情境2
SA	很低	0	0	0	0	0.2	0.2
	低	0	0	0.1	0.1	0.5	0.5
	一般	0	0	0.6	0.6	0.3	0.3
	高	0.2	0.2	0.3	0.3	0	0
	很高	0.8	0.8	0	0	0	0
TS	很低	0.373	0.906	0	0.19	0	0
	低	0.092 5	0.062 5	0	0	0	0
	一般	0.122	0.031 5	0.008	0.072	0.003	0.038
	高	0.188	0	0.034	0.251	0.036	0.274
	很高	0.224 5	0	0.958	0.487	0.961	0.688
ML	很低	0	0	0.946	0.498	0.961	0.688
	低	0.430 5	0	0.039	0.217	0.036	0.274
	一般	0.492 5	0.248 5	0.012	0.171	0.003	0.038
	高	0.068	0.405	0.003	0.095	0	0
	很高	0.009	0.346 5	0	0.019	0	0
自动评估值		0.266 3	-7.147	8.864	4.02	8.361	6.975

## 5 结论

根据飞机驾驶舱自适应功能分配的流程,提出了基于贝叶斯网络和多属性决策的自适应功能分配方法。对于某一功能或任务,根据可行的自动化等级、影响其完成的情境变量和任务完成的绩效指标之间的依赖关系构建贝叶斯网络,通过推理求解在各个可行的自动化等级下每个绩效指标的概率分布,从而把问题转化成多属性风险决策问题,得到当前情境下最合适的自动化等级。实例表明,所提方法具有很好的可操作性和灵活性,能为其它复杂人机系统的自适应功能分配的实现提供依据。

### 参考文献:

[ 1 ] 武俊兆,张安. 基于 D-S 证据理论的飞行员辅助系统自动化级别动态调整方法[J]. 计算机与现代化,2014(1):67-70,76.

[ 2 ] 卫宗敏,郝红勋,徐其志,等. 飞行员脑力负荷测量指标和评价方法研究进展[J]. 科学技术与工程,2019,19(24):1-8.

[ 3 ] 毛振权. 浅析飞机驾驶舱资源管理对飞行安全的重要

性[J]. 中国新通信,2019,21(5):214.

[ 4 ] 孙丽,孙有朝. 基于负荷均衡的飞机驾驶舱动态功能分配[J]. 测控技术,2022,41(1):11-15,27.

[ 5 ] 陈俊,李倩. 驾驶舱自动化与人的因素[J]. 中国民航飞行学院学报,2011,22(2):36-39.

[ 6 ] 许为. 七论以用户为中心的设计:从自动化到智能化飞机驾驶舱[J]. 应用心理学,2022,28(4):291-313.

[ 7 ] 张安,任卫,汤志荔. 基于 CTL 模型和任务绩效的驾驶舱动态功能分配方法[J]. 火力与指挥控制,2018,43(7):151-156.

[ 8 ] DE BRUNELIS T C, LE BLAYE P, BONNET P, et al. Distance mission management and dynamic allocation of function [ C ]//Humans Operating Unmanned Systems (HUMOUS) conference, Brest, France September 3-4, 2008. [ S. l. :s. n. ], 2008.

[ 9 ] PARASURAMAN R, BAHRI T, DEATON J E, et al. Theory and design of adaptive automation in aviation systems [ R ]. Warminster, PA: Naval Air Development Center,1992.

[ 10 ] INAGAKIT. Adaptive automation: sharing and trading of control [ M ]//The handbook of cognitive task design. [ S. l. ]:Erik Hollnagel Ed. ,2003:147-169.

- [11] 伯纳,李文进. 飞机驾驶舱自动化系统诱发的显性人为差错(英文)[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(4): 63-69.
- [12] 张同荣,时统宇,魏志强. 单人制机组运行自动化等级自适应调节方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 155-164.
- [13] 张炜,李道春,宋笔锋. 作战无人机系统的人、机功能动态分配模拟仿真[J]. 人类工效学, 2005, 11(1): 5-7.
- [14] 徐新丽,缪建成. 驶舱机组人员自动化系统项目综述[J]. 航空电子技术, 2020, 51(4): 32-37.
- [15] 王阔天. 多无人机监督控制系统的人机动态功能分配研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009.
- [16] 尹莉莉,张汝波,林忠会. 可变自主系统中态势推理方法研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(增刊2): 52-55, 59.
- [17] 祁瑞华,杨德礼,胡润波. 基于贝叶斯网络的移动环境推荐方法研究[J]. 信息技术, 2010, 34(5): 20-22.
- [18] 姚裕盛,徐开俊. 基于 BP 神经网络的飞行训练品质评估[J]. 航空学报, 2017, 38(增刊1): 24-32.
- [19] 李华. 机组资源管理与安全绩效关系研究[J]. 中国科技投资, 2017(5): 235, 318.

#### 作者简介

毕晨灿 女,本科。主要研究方向:复杂系统建模与仿真。

E-mail: 2310843310@qq.com

高飞 男,博士,副教授。主要研究方向:复杂系统建模、

仿真与项目评估。E-mail: gaofei1995@hotmail.com

## Adaptive function allocation method for aircraft cockpit

BI Chencan<sup>1</sup> GAO Fei<sup>2\*</sup>

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

**Abstract:** For the complex human-machine system such as aircraft cockpit, adaptive function allocation can achieve dynamically changing human-machine collaboration relations, making human and machine work more coordinated and improving the overall effectiveness of the system. A method for adaptive function allocation of aircraft cockpit was proposed, which used Bayesian network to predict performance indexes of every possible level of automation under certain situation, and then, based on multi-attribute risk decision-making, all performance indexes were integrated to obtain the most suitable automation level. The example shows that this method has good operability and flexibility, and can provide technical support for the allocation of aircraft cockpit functions.

**Keywords:** adaptive function allocation; aircraft cockpit; Bayesian network; multiple attribute decision making

\* Corresponding author. E-mail: gaofei1995@hotmail.com