

摘 要

在多无人机监督控制系统中，操作员在自动化系统的辅助下完成规划、问题求解、意外事件的处理。合理分配操作员和自动化系统的功能即人机功能分配对单个操作员有效控制多架无人机具有十分重要的意义。

人机功能分配存在两种方式：静态功能分配和动态功能分配。由于静态功能分配存在着一些问题，如可能产生“人不在回路”的现象，因此需要开展多无人机监督控制系统的人机动态功能分配的研究。本文针对该问题进行了研究，主要完成了以下几个方面的工作：

1. 在理解多无人机监督控制内涵的基础上，开发了多无人机监督控制仿真系统，为开展人机动态功能分配的研究提供了平台支撑。

2. 提出了基于模糊逻辑的人机功能动态分配方法。动态功能分配需要解决两个基本问题：系统自主等级的定义和系统自主等级的改变方法。对应地本文定义了多无人机监督控制系统自主等级，提出了基于模糊逻辑的自主等级改变方法。

3. 建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。分析了多无人机监督控制系统的人机交互属性和事件类型，描述了事件到达过程及服务过程，建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型；利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱，实现了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型，用以支撑动态功能分配对系统性能影响的研究。

4. 研究了动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。引入等待时间的概念，建立了系统性能的评价标准。分别采用人在回路实验和模型仿真两种方法，研究了动态功能分配对系统性能的影响。研究结果表明动态功能分配能够有效缩短系统等待时间，提高系统性能。

关键词：多无人机监督控制，动态功能分配，自主等级，离散事件仿真模型，等待时间

Abstract

In multiple unmanned aerial vehicle (Multi-UAV) supervisory control system, the operator participates in mission planning, problem solving, and contingency processing with the help of automation systems. It is full of importance to soundly allocate function between the operator and automation systems for a single operator controlling multi-UAV effectively.

There are two methods used to allocate function between the operator and automation systems: one is static, and the other is dynamic. Since the static one may generate some problems, e.g. "Out-of-the-Loop", it is significant to study dynamic function allocation for multi-UAV supervisory control system. This thesis researches on the problem of dynamic function allocation in Multi-UAV supervisory control system, and made some contributions, as follows:

1. A multi-UAV supervisory control simulation system was presented and developed, after the inherence of multi-UAV supervisory control was preliminarily studied. This developed simulation system provided a platform for research on multi-UAV supervisory control.

2. A fuzzy-logic-based dynamical function allocating method was proposed for multi-UAV supervisory control. Dynamic function allocation has two basic problems: how to define levels of automation (LOAs) and how to change LOAs dynamically. Correspondingly, LOAs in multi-UAV supervisory control system were defined, and meanwhile, the method using fuzzy logic was suggested to change LOAs dynamically.

3. A queuing-based multiple unmanned aerial vehicle discrete event simulation model (MUAV-DES) was established. With analysis on the attributes in human-UAV interaction and the event types, arrival processes and service processes are mathematically described, and finally MUAV-DES was theoretically set up. Afterwards, this theoretical model was implemented on the basis of SimEvent (a MATLAB toolbox). The implemented model has been applied into the impact of dynamic function allocation on system performance.

4. The impact of dynamic function allocation on multi-UAV supervisory control system performance was studied in this paper. By introducing the concept of wait times, the criterion was built to quantitatively evaluate system performance. The impact of dynamic function allocation on system performance was studied by human-in-the-loop experiment and simulation with MUAV-DES. Both human-in-the-loop experiment and MUAV-DES simulation validate that dynamic function allocation can effectively mitigate the wait times, and eventually enhance the system performance.

Key words: Multi-UAV supervisory control, Dynamic function allocation, Levels of automation, Discrete event simulation model, Wait times

表目录

表 3-1 控制等级分类与描述.....	15
表 3-2 不同自主等级的功能权限.....	19
表 3-3 系统自主等级定义.....	19
表 3-4 语言变量及其范围.....	24
表 4-1 操作员交互属性和与之相联系的设计变量.....	31
表 4-2 事件到达和服务过程的相关变量.....	38
表 4-3 设计变量与模型结构的映射关系.....	39
表 4-4 多无人机监督控制系统中的事件及其优先权.....	40
表 5-1 多无人机监督控制仿真系统的自主等级定义.....	49
表 5-2 在不同系统自主等级下目标打击事件的到达和服务过程服从的分布.....	54
表 5-3 仿真中事件（目标打击事件除外）到达过程和服务过程服从的分布.....	54

图目录

图 1-1 论文组织结构.....	6
图 2-1 监督控制原型.....	8
图 2-2 单无人机的分层控制回路.....	8
图 2-3 多无人机的分层控制体系结构.....	9
图 2-4 多无人机监督控制仿真系统功能结构框图.....	10
图 2-5 任务管理图形用户界面.....	11
图 2-6 决策支持图形用户界面.....	11
图 2-7 载荷管理工具.....	12
图 2-8 平台健康状态告警.....	13
图 2-9 辅助任务.....	13
图 2-10 空中任务时间进度的图形化表示.....	14
图 3-1 多无人机监督控制系统自主等级改变原理图.....	20
图 3-2 多无人机监督控制系统动态功能分配决策流程.....	21
图 3-3 操作员工作量模糊集.....	25
图 3-4 操作员平均反应时间模糊集.....	25
图 3-5 系统自主等级模糊集.....	25
图 3-6 模糊规则的 FAM 表示.....	25
图 3-7 推理框图.....	26
图 3-8 操作员工作量、平均反应时间与 LOA 的关系.....	26
图 4-1 多无人机监督控制离散事件仿真模型的高层表示.....	31
图 4-2 事件类型.....	32
图 4-3 三种事件到达过程.....	33
图 4-4 操作员利用率和 WTSA 之间的关系.....	36
图 4-5 一个简单的离散事件仿真模型.....	41
图 4-6 包含一架 UAV 的监督控制系统的离散事件仿真模型的实现.....	42
图 4-7 事件类型为 1 的实体在模型中的历程.....	43
图 4-8 事件类型为 2 的实体在模型中流动的历程.....	43
图 4-9 多无人机监督控制系统离散事件仿真模型的 SimEvent 实现.....	45
图 5-1 多无人系统 NT 和 IT 的关系.....	46
图 5-2 无人平台的性能随时间的变化.....	47
图 5-3 系统等待时间.....	51

图 5-4 辅助任务成绩.....	51
图 5-5 操作员平均反应时间.....	52
图 5-6 操作员反应时间变化趋势.....	52
图 5-7 动态功能分配对离散事件仿真模型的影响.....	53
图 5-8 仿真①中队列平均等待时间.....	55
图 5-9 仿真①操作员利用率.....	55
图 5-10 仿真②中队列平均等待时间.....	55
图 5-11 仿真②操作员利用率.....	55
图 5-12 仿真③中队列平均等待时间.....	55
图 5-13 仿真③操作员利用率.....	55

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目：多无人机监督控制系统的人机动态功能分配研究

学位论文作者签名：王阔天 日期：2009年11月9日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密学位论文在解密后适用本授权书。)

学位论文题目：多无人机监督控制系统的人机动态功能分配研究

学位论文作者签名：王阔天 日期：2009年11月9日

作者指导教师签名：王书 日期：2009年11月10日

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

1.1.1 单操作员多无人机监督控制技术的研究挑战

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 在现代战争中应用越来越普遍, 减少的雷达信号特征、增加的续航能力、使飞行员远离战场环境的威胁, 无人机已成为现代战争离不开的武器装备, 这可以从最近“影子”和“捕食者”无人机的实战得到验证。尽管无人机不需要驾驶员的存在, 仍然需要操作员的监督控制。

无人机需要操作员不同程度的指导, 而且经常需要多个操作员。例如, “捕食者”和“影子”无人机就需要两个操作员来控制。然而随着技术和计算机处理能力的提高, 无人机操作员的任务变得更加自动化。无人机系统日益增长的自动化程度对操作员的影响可以从无人机底层的自主控制中看出, 如执行器改变 UAV 副翼的角度对操作员是完全隐藏的。同样地, 研究表明借助好的航线规划算法和威胁发现^[1]、规避技术^[2], 把操作员从导航任务中解放出来是可能的。

随着无人机系统自动化程度的提高, 操作员的功能将从手动控制平台转变为监督控制平台。在监督控制层面, 操作员可以授权平台上的自动化设备完成一些高层任务^[3]。监督控制带来的操作员任务负担的减少必然导致操作员空闲时间的增加, 可以允许操作员同时管理多架无人机, 从而, 多操作员控制单架无人机的局面将转变为单操作员控制多架无人机^[4]。

单个操作员多架无人机的控制模式虽然在某些情况下是不合适的, 如在无人机需要集中持久的注意力或者说需要操作员作为一个幕后的飞行员时, 但是它却反映了未来无人机作战的一个趋势。一方面, 当完成任务需要的无人机数量超过了现有的操作员的数量时 (当前美军捕食者无人机就面临着这个问题), 颠倒操作员和无人机的比率可以减少对操作员的需求; 另一方面, 目前出现的网络中心战和未来作战系统也要求把无人机平台之间相互独立的结构转变为可以支持操作员整合从不同平台得到的信息的结构, 单个操作员控制多架无人机便于实现上面提到的作战结构^[5, 6]。

考虑到把操作员从底层任务中解放出来的技术可行性, 以及未来网络中心战的作战需求, 多操作员控制单架无人机到单操作员控制多架无人机的转变已经成为当前研究和发展的焦点。美国国防部《2005-2030 无人机系统路线图》也指出, 开展单操作员和多无人机交互的研究具有很迫切的需求^[7], 支持海军作战的自主无人机委员会也认为该项研究非常重要^[8]。

1.1.2 现有系统人机功能分配存在的问题

在无人机系统中，操作员是在一些自动系统的辅助下完成对无人机的监督控制的，这些自动系统包括自动任务分配系统、自动目标识别系统、自动航迹规划系统等，它们是操作员的有力助手，本文把这些自动系统统称为智能组件系统。所谓多无人机监督控制系统的人机功能分配问题是指，对于系统中的任务在操作员和智能组件系统之间确定由谁来完成的问题。对于一个具体的任务可以由操作员或智能组件系统独立完成，也可以由二者协作完成。功能分配存在两种方式：静态的和动态的。

目前，无人机系统采取的功能分配方式是静态的，即操作员和智能组件系统的功能一旦在设计阶段确定了之后在系统运行过程中就维持不变了。虽然这种分配方式的应用已经十分成熟，但是在实际应用过程中还是呈现出了一些问题，这些问题可以从两个常见的现象中得到说明，这两个现象是操作员“超负荷”现象和“人不在回路”现象（Out-of-the-Loop, OOTL），这两个现象的具体解释如下：

◆ “超负荷”现象^[9]

在系统设计初始，如果给操作员赋予过多的任务，那么在执行任务的过程中，一旦遇到复杂多变的任务环境，操作员任务负担会变得非常繁重，对一些任务可能“忙不过来”，这是对“超负荷”现象的通俗解释。当出现这种情况时操作员认知能力下降，使操作员工作效率下降，严重时会导致操作员不能继续工作。

◆ “OOTL”现象^[10]

在系统设计初始，如果给智能组件系统赋予过高的权限，那么操作员在任务执行过程中可能只起到监督的作用，如果操作员长时间处在这种状态下，操作员对任务激励的敏感性就会降低，导致操作员警惕性降低，致使操作员区分、识别和诊断紧急事件的能力大打折扣，这就是所谓的“OOTL”现象。当出现这种现象时，操作员态势感知能力下降，不能对紧急事件做出快速的反应，严重时可能会造成整个任务的失败。

这两种现象造成的后果是严重的，特别是对无人机而言。无人机面临的战场环境复杂多变，操作员的任务随着战场环境的变化不断发生改变，不仅如此，由于突发事件的时间限制，要求操作员必须保持较高的态势感知能力，一旦发生上面描述的现象，造成的后果是难以估计的。所以合理的人机功能分配对于实现单操作员有效控制多架无人机至关重要。

在系统设计初始阶段，确定一个最优的、静态的功能分配方案使操作员一直保持在最佳性能状态是不可行的。一方面，在系统未实现之前系统设计者无法确定设计方案中的分配方式会对操作员的性能产生什么影响；另一方面，即便是存

在这样一个最优的分配方案，也不能保证在执行任务的过程中操作员一直处于最佳性能状态，因为随着监督控制时间的延长，操作员的生理状态必定会发生变化，最常见的就是操作员疲劳，在疲劳状态下操作员态势感知能力下降，导致操作员性能下降。

从前面的分析可知，对于多无人机监督控制系统，试图找一个静态的、最优的人机功能分配方案是不明智的，也是不可行的。究其根本是因为静态的功能分配方式不能随着操作员状态和任务需求的变化而改变操作员和智能组件系统的功能。大量的实验研究表明动态功能分配方式的动态性可以很好地解决这一问题。

因此，研究多无人机监督控制系统的人机动态功能分配方法，对实现单操作员控制多架无人机具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 单操作员多无人机监督控制技术研究现状

近年来，多无人机监督控制技术受到了世界各国的高度重视。Dixon 等研究了操作员在控制多架影子无人机时减少其工作负担的问题，他们通过增加听觉和智能组件系统的能力来支持操作员，研究结果显示：操作员使用适当的策略，理论上完全能够控制一架无人机（包括导航和载荷控制），这是因为听觉告警提高了与告警相关的任务的实施性能；而且增加智能组件系统的自主水平对与自动化相关的任务（导航、航迹规划、目标识别）都有帮助^[1]。研究结果证明：操作员的精力主要用在控制需要导航和载荷控制的无人机上，特别是用在那些智能组件系统不可靠的无人机。这些结论与单通道理论一致，表明操作员不能同时管理对时间要求高的任务。

Dixon 提出：可靠的智能组件系统允许单操作员控制两架无人机，可靠性以及相应的信任度是单操作员控制多架无人机的重要保证^[1]。Ruff 提出：当操作员试图控制 4 架无人机时，高等级的自动化辅助实际上降低了系统性能。“同意管理模式”优先于“例外管理模式”，而且“同意管理模式”在控制四架无人机时提供了最好的态势感知率。

Dunlap 在其开发的用于控制多架无人作战飞机的分布式体系结构中也倾向于使用同意管理模式。在这个系统中，智能组件系统给出无人机的计划，操作员可以接受或拒绝这个计划，甚至可以提供另外一种可选择的计划。操作员的建议包括目标分配，航迹变更等等。随着环境复杂度的提高，它们分别尝试控制 2 架、4 架、6 架、8 架无人机，最后它们把无人机的数量限制在 4 架。在实验中，他们注意到“偏爱自动系统的输出结果”是一个普遍的问题。在高等级的自动化辅助下

直接导致了摧毁“非目标”的比率的提高^[12]。

对于单操作员能够控制多少架无人机这个问题，麻省理工学院的 Cummings 和 Guerlain 的研究结果说明：当导弹的自主性得到很大的提高时，操作员从实验的角度可以控制 12 枚战斧巡航导弹，此时操作员仅仅需要监控任务管理回路，而其它控制回路都是完全自主的^[4]。对于无人机，Cummings 论证了单操作员能够控制无人机的最大数量不仅仅取决于智能组件系统的自主级别，还取决于作战速度和作战需求。不管这些系统的自主级别如何，在较低的工作负担下操作员的表现都非常良好，但是在较高的工作负担下，操作员的监控性能就降低了。从作战速度和工作量上考虑，针对压制敌方防空任务，操作员的最大能力是控制 5 架无人机^[13]。

此外，相关的研究还包括美国国防部高级研究计划局主持的自治编队混合主动控制（Mixed Initiative Control of Automa-teams, MICA）工程^[14]。该工程的目标是通过提高无人机的自主控制和协同控制能力，实现较少操作人员对大规模无人机编队的控制。相对于目前操作员和无人作战平台 2: 1 或 3: 1 的比例，MICA 工程计划实现 30 倍于操作员数量的无人作战平台（主要是无人机）的控制。

1.2.2 人机功能分配研究现状

在研究人机功能分配问题时，研究人员的主要问题是决定哪个功能由自动系统完成，哪个功能由操作员完成。Kaber 和 Endsley 认为在动态多任务的环境中手动控制对整个系统的性能会很有用，而且认为人和自动系统共同控制通常比完全自主控制要好^[15]。Parasuraman 研究了在动态控制任务中信息处理过程的不同阶段采取的自动化辅助，以此决定哪种自动化辅助对操作员最有利^[16]。Kaber 和 Endsley 在研究动态控制任务中的人机功能分配方案时，从手动控制到完全自主控制定义了 10 种自动化等级（Level of Automation, LOA），研究表明低等级的自动化辅助会比完全自主控制产生更好的性能。

Hopkin 认为自动化辅助不能只静态的用于系统中的各种功能上，它也可以动态地用于在人机之间切换控制的功能中^[17]。Kaber 和 Endsley 将这一概念定义为动态功能分配（Dynamic Function Allocation, DFA）^[15]。动态功能分配在人和计算机之间利用以下五种策略来控制分配：（1）紧急事件——特殊的事件引发功能分配^[18]；（2）操作员性能测量——操作员的认知状态可以从主要的或次要的任务性能中推断出来，并作为改变自动化等级决策的基础^[19]；（3）操作员生理状态评估——利用被证实的、有效的生理检测手段如心率变化、脑电图信号、眼动等来评估操作员工作量和压力，并被用于触发动态功能分配^[20]；（4）系统性能建模——一个预先建立的系统性能模型被用于拟定一份操作员和自动化系统的分配计划^[18]；

(5) 合成方法——将前面提到的技术中的一个或多个综合起来^[21]。

动态功能分配的主要优点在于：它可以在需要的时候引入自动化系统来减少工作量，同时又保持操作员在控制回路中，从而降低发生“超负荷”现象和“OOTL”现象的可能性。Kaber 和 Endsley 在对空中交通控制的研究中发现，动态功能分配明显比完全手动控制或完全自主控制产生更为优良的性能^[15]。Hilburn 也发现了类似的结果^[22]。Kaber 和 Endsley 在研究中建立了三种不同的自动化等级，包括手动控制，完全自主控制，以及在空中交通密集时引入动态功能分配（紧急事件策略），研究发现，与完全手动控制和完全自主控制相比，动态功能分配引起的工作量增长最小^[15]。

在研究系统的动态功能分配时，一个需要重点考虑的问题是由谁决定什么时候引入自动化，或者谁有决策权限。通常有两种权限形式可被考虑：计算机授权控制和操作员授权控制。对于前者，由计算机决定什么时候需要自动化。然而，这种形式的权限可能将操作员完全地从系统的控制回路中移除，第二种形式的权限，即操作员授权控制，计算机给操作员提出功能分配的建议，是否切换自动化等级由操作员来决定。

美国空军研究实验室的 Christopher A. Russell 就无人机系统的动态功能分配问题进行了研究，研究中 Christopher A. Russell 设计了一个模拟实验，实验中单个操作员控制四架无人作战飞机执行对敌防空压制任务。在任务执行过程中实时测量操作员的生理数据，并用这些生理数据来评估操作员的认知状态，根据操作员的认知状态和任务需求动态调整操作员和智能组件系统对系统的控制权限。实验结果表明：在对无人作战飞机的监督控制中应用动态功能分配方法确实提高了系统的整体性能^[23]。

国内关于无人机系统动态功能分配的文献还比较少，文献[24,25]对无人系统的动态功能分配进行了探索性的研究。

1.3 论文的主要工作

论文以单个操作员控制多架无人机为背景，研究了多无人机监督控制系统的人机功能分配问题。首先开发了一个基本的多无人机监督控制仿真系统，然后结合人机动态功能分配理论，提出了多无人机监督控制系统人机功能动态分配的方法。为了研究动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响，建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型，最后分别用人在回路实验的方法和模型仿真的方法研究了系统的性能。论文的主要工作如下：

(1) 建立了一个基本的多无人机监督控制仿真系统

在初步研究了多无人机监督控制内涵的基础上，设计了多无人机监督控制仿

真系统的功能结构，并对结构中包含的各个模块进行了设计和开发，特别是在开发仿真系统图形用户界面时利用了决策支持可视化技术。

(2) 研究了多无人机监督控制系统人机功能动态分配方法

依据人机动态功能分配理论，实现多无人机监督控制系统的人机动态功能分配需要解决两个基本问题：系统自主等级的定义和自主等级分配方法。文中围绕这两个问题，定义了多无人机监督控制系统的自主等级，提出了基于模糊逻辑的自主等级分配方法。重点研究了在无人机通信正常的条件下，基于操作员状态的自主等级分配方法。

(3) 建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型

在分析了多无人机监督控制系统中人机交互属性和事件类型的基础上，对事件到达过程和服务过程进行了数学上的描述，建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。然后利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱实现了该仿真模型。

(4) 研究了动态功能分配对系统性能的影响

通过引入等待时间的概念，建立了系统性能评价标准。分别用人在回路实验的方法和模型仿真的方法研究了动态功能分配对系统性能的影响。在用离散事件仿真模型研究系统性能时，研究了动态功能分配对已建立的离散事件仿真模型的影响，开发了考虑动态功能分配的离散事件仿真模型。

1.4 论文的组织结构

本文共分六章，论文组织结构如下：

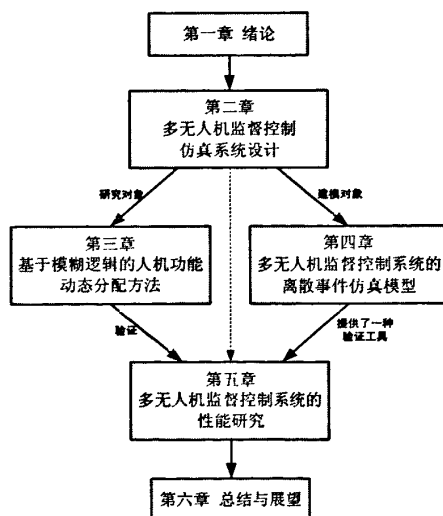


图 1-1 论文组织结构

第一章 绪论 介绍了课题的选题背景，通过分析对现有系统人机功能分配方式存在的问题，论述了研究多无人机监督系统人机动态功能分配的意义，详述了

国内外在多无人机监督控制和人机功能分配领域的研究现状，介绍了本文的主要研究工作，最后给出了本论文的组织结构。

第二章 多无人机监督控制仿真系统设计 初步研究了多无人机监督控制的内涵，在此基础上设计了多无人机监督控制仿真系统的功能结构，并开发了基本的多无人机监督控制仿真系统。本章建立的多无人机监督控制仿真系统是展开后续研究的基础。

第三章 基于模糊逻辑的人机功能动态分配方法 在介绍了人机动态功能分配的相关知识后，紧紧围绕实现多无人机监督控制系统人机动态功能分配需要解决的两个基本问题展开了研究，定义了多无人监督控制系统的自主等级，提出了基于模糊逻辑的自主等级分配方法。

第四章 多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型 在分析多无人机监督控制系统人机交互属性的基础上，通过引入离散事件仿真模型的结构，建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。该仿真模型为第五章研究动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响提供了一种验证工具。

第五章 多无人机监督控制系统的性能研究 建立了基于等待时间的系统性能评价标准，分别用人在回路实验的方法和模型仿真的方法研究了动态功能分配对系统性能的影响。

第六章 总结和展望 对全文工作进行总结，并对未来的工作进行展望。

第二章 多无人机监督控制仿真系统设计

2.1 引言

多无人机监督控制是指一种控制概念，它的表现形式是单操作员控制多架 UAV。在这个概念中，UAV 的飞行控制是自主的，操作员参与规划、问题求解、意外事件处理等。目前，多无人机监督控制还仅是一种控制概念，实际的多无人机监督控制系统还在研究中。为了研究多无人机监督控制的人机动态功能分配问题，本文设计并开发了多无人机监督控制仿真系统，作为后续项目研究和技术验证的基础。

2.2 多无人机监督控制的基本内涵

随着科学技术的发展，人在很多系统中的角色都由手动控制系统转变到了监督系统，也就是所熟知的监督控制（Human Supervisory Control, HSC）。HSC 是这么一个过程，操作员间断地与计算机交互，从与该计算机连接的控制过程或任务环境中接收反馈或者向其提供指令。图 2-1 描述了这一概念。监督控制包含五个一般的功能，通常按以下循环顺序完成：规划一个计算机控制的任务，通过各种不同输入告知计算机所控制的内容，操作员监督计算机的行为防止出现错误或失效，并在任务完成或计算机需要帮助时进行干预。因为 HSC 任务本质上主要是基于认知的，一般不需要持续的注意力和控制，使得操作员有可能同时监督多个 HSC 过程^[26]。

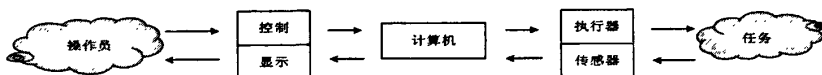


图 2-1 监督控制原型

随着平台中心战向网络中心战的转变，监督控制在无人机系统中的作用受到越来越大的重视。操作员对无人机的监督控制是分层实现的^[27]，如图 2-2 所示。

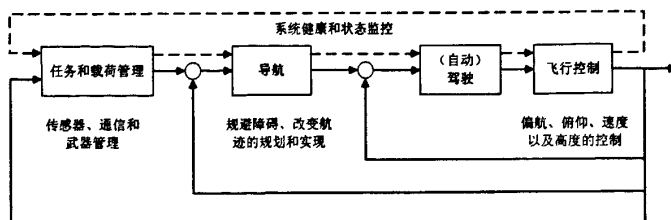


图 2-2 单无人机的分层控制回路

最里面的回路表示的是最基本的飞行和运动控制回路，必须遵守无人机的物理性能（空气动力学约束）。在这个回路中，操作员主要关注短期和局部的控制（保证飞行器稳定飞行），一般地说，这个回路的控制更依赖运动控制系统的自动性。第二个回路，即导航回路。表示为了满足任务约束而必须实现的智能体的动作，这些智能体是人或计算机驱动的。任务约束包括航迹必须经过导航点、及时到达目标、避免穿越威胁区和禁飞区等。最外层的回路代表了最高层的控制，即任务管理和载荷管理，在这个回路中，操作员必须监控传感器、同时根据输入信息做出决策以满足全部任务需求。决策需要基于知识的推理，该推理包括操作员的判断、经验，以及抽象推理，而这些是自动系统完成不了的。最后，系统健康和状态监控回路代表了必须实施的连续监控，该监控可能通过操作员、或者自动系统、或者两者一齐实施，以保证所有系统正确运行。该控制回路用虚线连接，表示从操作员方面来看，它是一个间断回路。例如，当操作员处理其他任务，将最里面的回路设置为高优先级，系统健康和状态监控就成了次要任务。

从人在回路的观点出发，如果里面的回路控制失败，外层回路控制也会失败。高层控制对底层控制的依赖性决定了操作员控制单架和多架无人机的限制。如果操作员必须处理导航和动作控制回路（手动控制无人机），其代价是非常高的，需要占用很大的认知资源，这样操作员就只有很少的认知能力来处理任务管理控制回路。违反图 2-2 所示的控制优先权往往导致严重的问题，许多捕食者的坠机事件就是很好的例证。当操作员认知饱和，不能根据优先权正确分配认知资源到合适的控制回路，他们就会违反控制回路的约束，导致灾难性故障。

图 2-2 表示了操作员对单架无人机的监督控制结构，图 2-3 表示了单操作员控制多架无人机的概念体系结构。为了实现这个未来的系统，操作员需要与所有的任务和载荷管理器进行交互，而要将常规的导航和控制任务的控制权移交给自动系统进行处理。

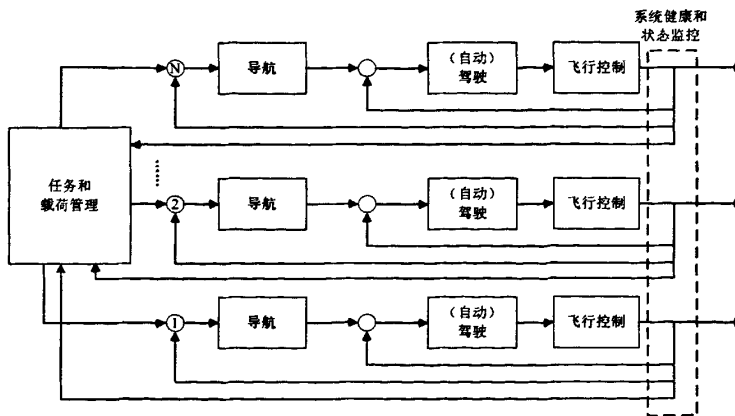


图 2-3 多无人机的分层控制体系结构

2.3 多无人机监督控制仿真系统的功能结构

目前, 真实的多无人机监督控制系统还不存在, 但是可以根据多无人机监督控制的内涵开发一个基本的仿真系统, 用于研究一些具体的问题, 如在本文中用于研究多无人机监督控制系统的人机动态功能分配问题。

根据多无人机监督控制的内涵以及实验需求, 设计了如图 2-4 所示的多无人机监督控制仿真系统的功能结构。

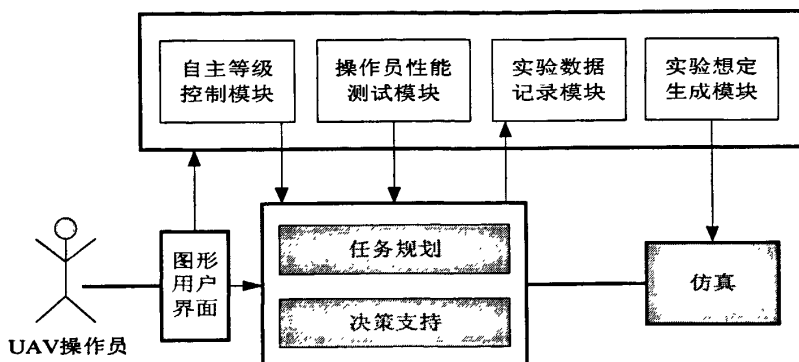


图 2-4 多无人机监督控制仿真系统功能结构框图

从图 2-4 中可以看出该仿真系统主要包含五大模块: 图形用户界面、自主等级控制模块、操作员性能测试模块、实验数据记录模块、实验想定生成模块。

◆ 图形用户界面

在多无人机监督控制系统中, 操作员跟平台的交互几乎全部是通过图形用户界面来完成的。图形用户界面上显示了所有需要操作员处理的任务, 此外, 还给操作员提供了用于完成任务的工具以及辅助操作员决策的工具。关于图形用户界面的细节将在下一节作更详细的说明。

◆ 自主等级控制模块

自主等级控制模块和操作员性能测试模块是跟动态功能分配密切相关的两个模块, 在这里只做功能上的描述, 对于具体的原理将在下一章作重点研究。

自主等级控制模块用于实现系统自主等级的管理, 如自主等级的改变。在仿真系统中设计了两种改变自主等级的模式, 一是操作员手动切换; 二是系统自动切换。在图形用户界面上设计了专门用于操作员手动切换系统自主等级的工具。系统自动切换自主等级的原理将在第三章作重点研究。

◆ 操作员性能测试模块

操作员性能测试模块用于测量操作员的性能。操作员性能在本文中是指操作员的反应时间。为了测量操作员的反应时间, 在开发图形用户界面时, 设计了辅助任务, 辅助任务的具体内容将在下一节做详细说明。该模块测量得到的操作员反应时间被用于触发功能重分配。

◆ 实验数据记录模块

实验数据记录模块用于记录在实验过程中各种事件发生的时刻，这些事件包括：点击按钮、界面模式切换、威胁出现等。实验结束后，仿真系统将这些数据按照一定的格式形成一个文本文件，用于具体的研究。

◆ 实验想定生成模块

实验想定生成模块的主要功能包括：在任务执行前设置初始任务；在任务执行过程中，随机产生突发事件来模拟真实环境的不确定性。这些突发事件的发生时刻服从一定的概率分布。

2.4 多无人机监督控制仿真系统的图形用户界面设计

为了研究多无人机监督控制系统的人机动态功能分配，按照图 2-4 设计的功能结构开发了一个基本的多无人机监督控制仿真系统，其中仿真系统的图形用户界面如图 2-5 和图 2-6 所示，它可以允许单个操作员同时管理四架无人机。

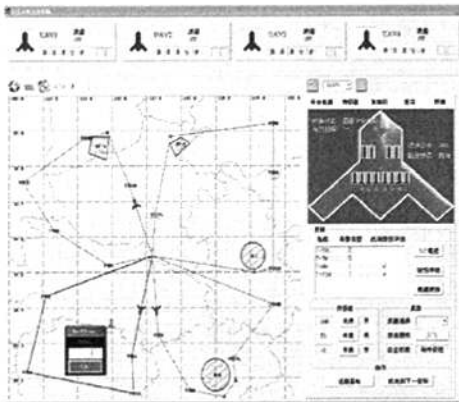


图 2-5 任务管理图形用户界面



图 2-6 决策支持图形用户界面

仿真系统的设计以单操作员控制四架 UAV 执行压制敌方防空任务 (Suppression Enemy Air Defenses, SEAD) 为背景，因此，将 SEAD 任务作为无人机操作员的主任务；另外，为了模拟真实环境中操作员较高的认知负担以及便于测量操作员的反应时间，仿真系统中还设计了辅助任务。

2.4.1 主任务设计

任务描述：整个任务以摧毁目标区域内所有敌防空设施为目标。综合各种情报信息，把目标区域内的目标分为高优先权、中优先权、低优先权三类目标，且已知这些目标具有严格的时间限制。任务执行前进行了详细的任务规划，确定了每架 UAV 的初始航迹，并对每个目标给出了严格的任务时间窗口。仿真任务开始后，需要操作员处理的任务包括：目标打击、响应突发威胁而进行的航迹重规划、

UAV 平台健康管理以及与上级指挥中心的通信任务。

1. 目标打击

当飞机到达目标上空后进入目标打击过程：首先打开传感器；待 UAV 准备好图像后获取图像；对图像进行分析，确认是否要对目标实施打击；对要实施打击的目标选择武器类型（这里假设每架 UAV 都带有两类武器：精确制导炸弹和普通炸弹，而且规定高价值目标只能用精确制导炸弹攻击）；在攻击授权窗口批准武器释放；目标打击完成后，按照任务计划对要进行毁伤评估的目标进行评估。

从上述过程可以看出目标打击过程包含两个主要子过程：目标识别过程和武器授权过程。

为了实现上述任务，开发了如图 2-7 所示的载荷管理工具，该工具主要实现传感器管理、武器的选择和授权、以及平台的健康管理。



图 2-7 载荷管理工具

2. 任务分配

在任务执行过程中，随着对战场环境侦察的深入，会发现一些新目标，操作人员可以借助仿真系统提供的工具进行添加或删除目标，完成任务分配。

3. 航迹重规划

由于战场环境的不确定性，UAV 在执行任务的过程中会遇到一些突发事件如威胁的出现、目标的出现或消失等，这些情况都需要操作员修改 UAV 的当前航迹。仿真系统中设计了航迹规划工具，操作人员可以通过添加、删除或拖动导航点来实

现航迹重规划。

4. UAV 健康管理

在任务执行过程中，UAV 平台可能会出现一些故障，如发动机出现异常。在仿真系统中，对常见的故障制定了各种处理方案。图 2-8 显示了第一架 UAV 的健康信息，当平台中的设备出现故障时，图中对应的标志就会由绿色变为黄色，此时点击图 2-7 中的显示的对应设备的按钮就可以选择处理方案，处理完毕后，图标的颜色恢复绿色。

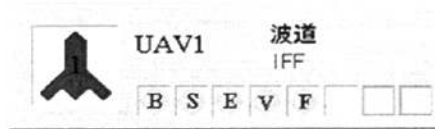


图 2-8 平台健康状态告警

5. 通信任务

在任务执行的过程中，操作员需要向上级指挥中心汇报 UAV 当前的情况以及回答上级指挥中心的提问。

上述任务构成了多无人机监督控制系统中需要操作员交互的事件集合。在仿真系统中，实验想定生成模块负责产生这些事件，对于每一类事件，其发生时刻服从一定的概率分布；这些事件可以由操作员独立完成，也可以由操作员在智能组件系统的辅助下完成，甚至可以由智能组件系统独立完成。

2.4.2 辅助任务设计

仿真开始后，在地图上会随机出现一个红色的小飞机图标，飞机图标出现的时刻也是服从一定概率分布的。当图标出现后，操作员必须在发现图标的第一时间点击图标，点击后会弹出如图 2-9 所示的对话框，操作员需要在编辑框中输入一串字符，若输入的字符串跟编辑框上方的字符串一致则表示操作员处理正确，点击确认按钮后图标消失。



图 2-9 辅助任务

实验中仿真平台数据记录模块会记录红色小飞机图标出现的时刻 t_1 和操作员点击图标的时刻 t_2 ，则操作员的辅助任务反应时间 $t_{reaction}$ 用式(2.1)计算。

$$t_{reaction} = t_2 - t_1 \quad (2.1)$$

2.4.3 决策支持可视化设计

空中任务命令序列 (Air Tasking Order, ATO) 对于单个操作员控制多架无人机是十分重要的。在任务执行过程中, 操作员需要经常性地监督 ATO, 确保任务的顺利执行。目前, 描述 ATO 的形式很多, 最常见的两种形式是文本或表格。对于这两种描述形式, 在任务执行中都需要操作员的计算和推理, 无疑增加了操作员的认知负担。为了减轻操作员在任务执行过程中的认知负担, 在设计图形用户界面时, 可以把 ATO 用图形化的方式表现出来, 如图 2-10 所示。

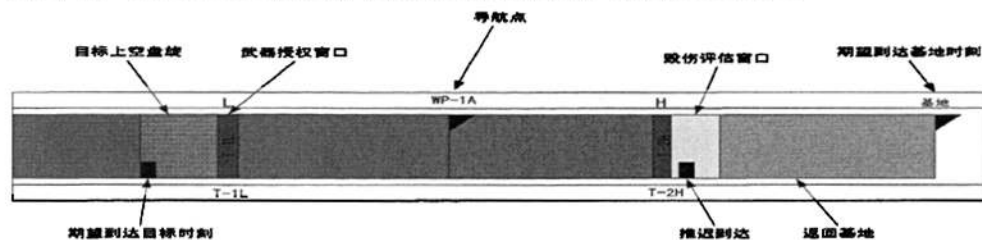


图 2-10 空中任务时间进度的图形化表示

通过图形化的表示, 操作员不需要计算、推理, 对 UAV 的任务进度就可以一目了然, 这对于监督控制多架无人机的操作员来说是十分重要的。因为它不仅减小了操作员的认知负担; 而且通过把到达目标上空的时刻 (Time-on-Target, TOT) 用图形化的方式表示出来后, 操作员可以很快了解到一些对任务来说比较关键的信息, 如: 推迟到达和 TOT 冲突。

所谓推迟到达是指无人机实际到达目标上空的时刻晚于预先计划的 TOT 时刻, 图 2-10 中给出了一个推迟到达的例子。当任务进度中存在推迟到达时意味着无人机要错过目标的打击, 这时需要操作员申请 TOT 延迟来消除推迟到达。

所谓 TOT 冲突是指两个或者两个以上的目标任务时间窗口发生重叠。通过纵向比较每架 UAV 的 ATO, 操作员可以很容易的发现 TOT 冲突。TOT 冲突意味着操作员需要在同一时间段内处理多个目标的打击过程。此时, 操作员可以通过申请 TOT 延迟来消除任务冲突; 也可以通过调整系统自主等级, 把不重要的任务授权智能组件系统来完成。

2.5 小结

本章初步研究了多无人机监督控制的内涵, 在此基础上, 提出了多无人机监督控制仿真系统的功能结构, 设计并开发了一个基本的多无人机监督控制仿真系统。重点对仿真系统的图形用户界面进行了说明。在设计图形用户界面时, 以 SEAD 任务为背景, 设计了仿真系统中的主辅任务, 并对 ATO 进行了图形化的描述。

第三章 基于模糊逻辑的人机功能动态分配方法

3.1 引言

第二章设计了一个基本的多无人机监督控制仿真系统，为研究多无人机监督控制系统的动态功能分配提供了基础，从本章开始，将主要从两个方面研究多无人机监督控制系统的动态功能分配问题，一是动态功能分配方法；二是动态功能分配对系统性能的影响。

本章将围绕第一个方面的内容展开研究。根据动态功能分配理论，实现系统动态功能分配需要解决两个基本问题：系统自主等级的定义和系统自主等级的改变方法。其中，自主等级的定义涉及到具体的操作员和智能组件系统之间的任务分配，而自主等级的改变方法则涉及到何时改变系统自主等级以及如何改变自主等级的问题。本章将对上述内容一一展开研究。

3.2 人机动态功能分配理论

3.2.1 人与自动化交互等级

人与自动化交互等级描述了人和计算机对系统控制权限的分配。先后有很多学者给出了不同的定义，其中被广泛应用的是由 Sheridan 和 Verplank 提出的分类法(SV-LOA)^[5, 6, 28]。Sheridan 把人与自动化交互等级从完全手动到完全自主分为十级^[29]，如表所示：

表 3-1 控制等级分类与描述

SV-LOA	LOA 描述
1	系统不提供任何帮助，操作员必须采取所有的决策和行动
2	系统提供所有可选的决策和行动集合
3	系统提供可选的决策/行动子集
4/5	系统提供一个决策/行动方案，如果操作员批准的话就实施
6	系统提供一个决策/行动方案，该输出方案在执行前只允许操作员在一段时间内否决
7/8/9/10	操作员不参与决策过程，系统自主地决策和实现。

在这种分类法中，对于第 7-10 级别操作员没有采取行动，可以把它们合并为一个级别。

3.2.2 动态功能分配触发机制

动态功能分配触发机制依据控制主体分为人触发和系统触发。人触发是指操作员根据自己对当前任务状态和自身状态的主观判断,手动切换系统的自主等级。系统触发是指系统按照一定的策略改变其自主等级,而不需要操作员介入的触发方式,常见的用于动态功能分配的策略有三种:第一,紧急事件策略;第二,基于测量的策略;第三,基于模型的策略。

(1) 紧急事件策略

这种触发策略假设操作员的工作量会在发生紧急事件时变得难以接受。系统运行过程中,如果发生紧急事件就改变现有的功能分配方式,没有发生紧急事件就不改变现有功能分配方式。

该策略包含三种类型的逻辑^[30]:

- ◆ 突发逻辑:无需操作员的启动或干涉引入自动化辅助。
- ◆ 执行逻辑:系统子任务提出功能重分配的建议,操作员最终决策。
- ◆ 自动显示逻辑:自动显示所有不重要的结果,为特殊事件做准备,使操作员能集中注意力在最重要的任务上。

这三种逻辑所对应的 LOA 是不同的,突发逻辑的 LOA 为 7 或更高,表明操作员不保持有最终权限;执行逻辑的 LOA 设置为 5;自动显示逻辑采取任务共享的方式。计算机区分出任务的“不重要”部分和“重要”部分,将前者分配给机器,以减少操作员工作量或将工作量保持在合理水平。自动显示逻辑的 LOA 为 7 或更高,因为是由计算机来判断一个任务是否重要,而操作员通常并不作此判断。采用高等级的自动化辅助,虽能减少操作员工作量或节省时间,但也会带来一些不利因素,如降低态势感知能力。

如果能正确定义紧急事件,则紧急事件策略是最容易实现的。它不需要研究人的认知或行为是怎样建模的,也不必测量那些用以推断操作员状态的参数,需要做的只是使用系统中的可用信息,开发探测紧急事件的技术。紧急事件策略的一个可能局限性是该策略只是部分地反应了操作员的工作量。

(2) 基于测量的策略

基于测量的策略依据操作员的工作量或生理状态来触发功能分配,这种触发方式使操作员的工作量可以被限制在某个合适的水平。在复杂系统中,操作员工作量水平在不同的任务阶段不断地变化。如果操作员长期保持高工作量,会导致操作员性能降低。

这种策略采取如下步骤^[31]:首先定义并构造子任务;其次,对比操作员能力和任务难度,确定触发规则,该规则可表述为工作量的测量,主要任务性能的测量,或者二者的结合,一旦定义了规则,系统就会按照规则触发功能分配,这可

以由专家系统来实现。

此外, 诸如用脑电图、心电图、呼吸, 眼动等生理心理学测试手段也被用于评估操作员状态, 作为触发功能分配的标准。

从配合动态变化环境的角度, 基于测量的策略可能是最合适的。可以通过准确评估在特殊环境中操作员的认知状态来改变功能分配, 没有必要提前预估操作员的认知状态如何变化。然而也存在一些局限性: 第一, 不是所有操作员都很欢迎这样的方式, 因为他们始终被传感设备监视。第二, 有的传感设备很昂贵, 或者对操作员生理状态的局部波动很敏感。第三, 性能测量总发生在“事实之后”, 调整具有滞后性。

(3) 基于模型的策略

操作员性能模型可用于估计当前和预知操作员的状况, 并推断其工作量是否过多。模型通常分为三类: 意图推理模型、最优模型、资源模型。

意图推理模型: 操作员行为被编码, 并与剧本比较^[32]。如果至少有一个剧本相匹配, 就分解该行为。如果没有匹配, 就分析未分解的行为来明确规划。如果一个或多个规划与已知的目标相一致, 就分解该行为, 并激活与这些规划相关联的剧本(如果存在)。如果没有匹配, 就将未分解的行为放入错误监视器中。

最优模型包括基于队列理论^[33]、模式识别^[34]、回归的模型^[35]。例如, Walden 和 Rouse 研究了飞行员的多任务性能, 他们将监督任务建模为一个队列系统, 该系统只有一个“单一服务器”以及被称为“消费者”的子系统事件, 控制任务将形成一个特殊的队列。一旦“消费者”到达队列中, 他们就可以控制对子系统事件的服务^[33]。

资源模型, 特别是多资源理论试图描述在信息处理过程中性能冲突是如何发生的^[36]。假设一个操作员试图执行两项不同任务。如果这两项任务需要不同的资源, 那么操作员有效执行这些任务并不困难; 然而, 如果两项任务需要相同的资源, 那么可能就会出现一些冲突, 任务的性能也会明显受到影响。多资源理论可用于评估功能分配的效率, 或者用于评估由于任务需要相同资源而引起的竞争带来的影响。

如果能获得很好的性能模型, 就可以对系统的性能做出预估, 并以此作为改变系统自主等级的标准。然而, 要开发一个完美的、能代替实际系统的性能模型并不总是容易的。

3.2.3 决策权限

谁应该对“何时以及如何改变功能分配”做出决策是动态功能分配研究中的一个重要问题。

动态功能分配的触发策略可以表示为产生式规则，例如：紧急事件策略可以表述为：“如果探测到紧急事件 E ，与此同时，操作员正在处理功能 F ，就必须将功能 F 移交给智能组件系统”。基于测量的策略可以表述为：“如果通过评估发现操作员工作量在一个特殊值之下，那么功能 F 必须从智能组件系统交给操作员”。一旦确定了产生式规则，系统可以在几乎没有任何操作员的帮助下实现动态功能分配。但是，出于一些原因，实际实现起来并不简单。

一个显然的原因是可靠性。假设计算机不会失效是不现实的，硬件故障、软件错误或错误数据等都可能导致失效。如果仍然把权限交给计算机来执行动态功能分配策略，那么操作员就得一直小心翼翼的监视着计算机，这可能会给操作员在原有的任务上又增加一些负担。

第二个原因与以人为中心的自动化原则相关，该原则认为操作员必须拥有最终权限，而且只有操作员可以决策如何改变以及何时改变功能分配^[37]。这一原则虽然是合理的，然而对操作员来说，自始至终对每种情况都承担最终的决策权不总是好的。Rouse 认为“如果操作员有资源、并可以借助辅助系统，但他/她可能会很少借助或根本不借助辅助系统来执行任务，那么当最需要辅助的时候，操作员可能没有资源来与辅助系统进行交互”^[37]。

3.3 多无人机监督控制系统自主等级定义

在建立多无人机监督控制的仿真系统时，设计了需要操作员交互的主任务，并把主任务分解为一系列子任务，这些子任务组成了参与功能分配的主体，这些子任务可以由操作员来完成，也可以由相应的辅助系统来完成，本文把这些辅助系统称其为智能组件系统。

按照表 3-1 所示的人与自动化交互等级，可以给每一个子任务从完全由操作员处理到完全由智能组件系统处理设置多个自主等级，每一等级具体地描述了操作员和智能组件系统对任务的分工。

本文中只对任务分配、航迹重规划、武器控制、目标识别任务进行分配。一方面，这些子任务构成了多无人机监督控制系统高层任务的主体；另一方面，目前已经存在一些可靠性比较高的自动算法支持建立相应的智能组件系统。

按照 Sheridan 和 Verplank 提出的分类法 (SV-LOA) 对上述任务各自定义四个自主等级：①完全手动；②同意管理；③例外管理；④自主控制。这四个等级分别对应于 SV-LOA 分类法的一个等级，如例外管理对应于 SV-LOA 分类法的第六级自动化水平。对于不同的任务，同一自主等级对应的具体内容是不同的，但是功能权限却是一致的，表 3-2 给出了这四个自主等级的功能权限。

表 3-2 不同自主等级的功能权限

级别	描述	操作员 规划行动	无人机 规划行动	超过时间限制 提议被间接接受	无人机向操作 人员发送提议	操作员拥有 否决权
1	手动控制	√				√
2	同意管理		√		√	√
3	例外管理		√	√	√	√
4	自主控制		√			

系统的自主等级由各个子任务的自主等级组合而成。当只考虑任务分配 (Allocation, AL)、航迹重规划 (Route Planning, RP)、武器控制 (Weapon Control, WC)、目标识别 (Image Analysis, IM) 任务时, 可以定义如表 3-3 所示的系统自主等级, 表格中数字代表每一个自主等级, 第一列表示系统的自主等级, 每一行描述了系统自主等级的组成。

表 3-3 系统自主等级定义

	LOA	AL	RP	WC	IM
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1
3	3	2	2	3	2
4	4	3	2	2	2
5	5	3	3	2	2
6	6	3	3	3	2
7	7	4	3	3	3
8	8	4	4	3	3
9	9	4	4	4	3
10	10	4	4	4	4

定义了多无人机监督控制系统的自主等级之后, 所谓动态功能分配实质上就是按照动态功能分配的触发策略调整系统的自主等级, 从而实现操作员和智能组件系统对系统功能的动态分配。

3.4 多无人机监督控制系统自主等级改变流程

多无人机监督控制系统自主等级的改变按照图 3-1 所示的原理图实现。

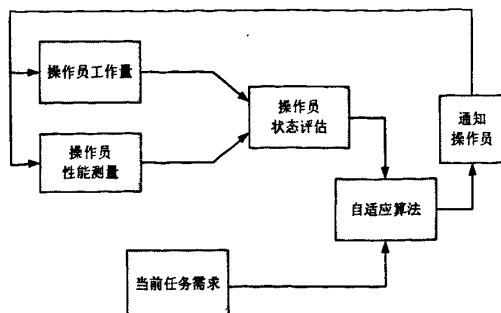


图 3-1 多无人机监督控制系统自主等级改变原理图

从图 3-1 中可以看出，由操作员状态和当前任务需求决定系统的自主等级，操作员状态由操作员的工作量和操作员的性能决定；何时改变自主等级以及如何改变系统的自主等级由自适应算法来确定。

3.4.1 自适应算法的输入

图 3-1 给出了自适应算法的三个输入：操作员工作量、操作员性能测量、当前任务需求。

(1) 操作员工作量

在建立多无人机监督控制仿真系统时，把主任务分解为一系列子任务。操作员独立完成这些子任务时付出的时间是不同的。对于每个子任务，可以根据操作员在处理该任务时付出的时间，赋予一个数字值表示该子任务的工作量。

设平台中包含个 N 任务，这些任务构成集合 I 。对于任务 $i, i \in I$ ，依据操作员完全手动处理该任务时付出的时间，赋予任务 i 的工作量数字值为 w_i 。设在 t 时刻需要操作员处理的子任务集合 $E = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \subseteq I$ ，其中 $m \leq N$ ，则 t 时刻操作员的工作量为：

$$w = \sum_{i \in E} w_i \quad (3.2)$$

利用式(3.2)每隔一段时间计算一次操作员的工作量，计算的结果作为这段时间的工作量。

(2) 操作员性能测量

在开发多无人机监督控制仿真平台时，设计了辅助任务用于测量操作员的性能。在本文中操作员的性能指操作员在辅助任务中的反应时间。操作员反应时间可以由式(2.1)来计算。

(3) 当前任务需求

在本文中把任务需求局限为任务的优先权。在建立多无人监督控制仿真系统时，对子任务进行了详细的描述，可以给每个子任务根据其轻重缓急程度赋予不

同的优先权。如：当出现突发威胁时，需要重规划无人机的航迹，如果规划不及时或者规划不准确，会造成比较严重的后果，因此，给航迹重规划赋予较高的优先权；相反，如果无人机在打击一个价值不高的目标时，即无论打击结果如何都不会对系统整体性能产生很大影响，可以给此任务赋予较低的优先权。

当前任务需求对自适应算法确定如何改变自主等级有很大的作用，特别是在发生任务冲突时，当前任务需求对决策起决定性作用。

3.4.2 自适应算法的流程

确定了自适应算法的输入后，自适应算法采用如图 3-2 所示的流程决策自主等级的改变。

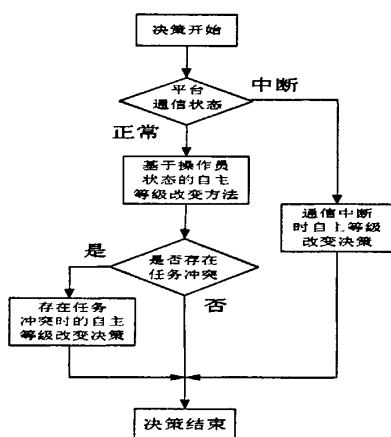


图 3-2 多无人机监督控制系统动态功能分配决策流程

从图 3-2 中可以看出自主等级的改变涉及到三种情况下的决策：（1）UAV 通信正常时改变自主等级的决策；（2）UAV 通信正常且存在任务冲突时改变自主等级的决策；（3）UAV 通信中断时改变自主等级的决策。

在 3.2.3 节中曾指出动态功能分配的触发策略可以用产生式规则来表示，因此，系统自主等级的改变策略也可以用产生式规则表示。下面针对上述三种情况，抽取其中用于自主等级改变的规则。

(1) UAV 通信正常时自主等级的改变

通信正常时，依据操作员状态改变系统自主等级。基于操作员状态的自主等级改变方法用到了有关模糊推理的知识，将在下节作重点研究。这里只给出依据操作员状态改变系统自主等级的原则：

1. 操作员工作量较大且平均反应时间较长时，系统采用较高的自主等级；
2. 操作员工作量较小且平均反应时间较长时，系统采用较低的自主等级；
3. 操作员工作量适中且平均反应时间适中，系统采用适中的自主等级。

(2) UAV 通信正常且存在任务冲突时自主等级的改变

操作员在执行任务的过程中,经常会遇到两个或者多个任务同时需要处理的情况。一方面是由于任务计划本身存在冲突;另一方面由于任务环境的不确定性使得操作员在处理某项任务的时候,经常会发生一些紧急事件需要操作员去处理。同时处理两件不同的任务对于认知能力有限的操作员来说困难是很大的,当发生任务冲突时,操作员需要把其中一些任务授权给智能组件系统完成,而自己只负责重要任务的处理。

当存在任务时间冲突时,改变系统自主等级需要考虑两个重要的因素:①任务的重要性;②智能组件系统独立完成任务的能力。

定义以下变量:

- P_i 任务 i 的优先权
- E_i 智能组件系统 i 独立完成任务的可信度
- E_T 允许智能组件系统独立完成任务的最低可信度

任务 i 的优先权 P_i 反映了任务的重要性,它是根据任务的轻重缓急程度赋予的一个值。

智能组件系统 i 独自完成任务的可信度 E_i 是操作员对智能组件系统独立完成任务能力的一个评价。智能组件系统的 E_i 值初始值都为 100%,每当智能组件系统独立完成一件任务时,操作员会根据任务的完成情况赋予智能组件系统一个评价价值,作为其当前的 E_i 值。一般情况下,当智能组件系统完成任务失败时,其 E_i 值会比较小,相反,如果任务完成情况很好, E_i 值会比较大。 E_T 给出了智能组件系统独自完成任务的最低可信度,如果 $E_i < E_T$,则不能把任务独自交给智能组件系统来完成。

为了形式化地表示规则,还需要定义如下符号:

- L_i 智能组件系统 i 的自主等级
- $L_{current}$ 智能组件系统当前的自主等级
- L_{max} 智能组件系统的最高自主等级

当存在任务冲突时,作以下假设是合理的:

- ① 操作员总是选择优先权高的任务进行处理;
- ② 对于 $E_i > E_T$ 的智能组件系统能够很好地独自完成任务。

对于任意任务 i, j ,用 t_i 和 t_j 表示其发生的时刻,根据以上假设可以得到如下规则:

1. If ($E_i > E_T, E_j < E_T$) then ($L_i = L_{max}, L_j = L_{current}$)
2. If ($t_i = t_j$) and ($E_i > E_T, E_j > E_T$) and ($P_i > P_j$) then ($L_i = L_{current}, L_j = L_{max}$)
3. If ($t_i > t_j$) and ($E_i > E_T, E_j > E_T$) then ($L_i = L_{current}, L_j = L_{max}$)
4. If ($E_i < E_T, E_j < E_T$) then (TOT Delay is requested)

在第四条规则中，用到了 TOT 延迟的概念，关于 TOT 的详细说明见 2.4.3 节。当用动态功能分配还不能解决任务时间冲突带来的困难时，可以向指挥控制中心申请推迟打击目标的时刻，一旦申请被批准，则提出申请的目标的 TOT 会在 ATO 计划中被延迟一段时间。

(3) UAV 通信中断时改变自主等级的决策

在通信中断的情况下，系统自主等级的改变很简单，或者放弃当前任务返回基地或者系统自主完成任务。由此得到如下规则：

1. If ($E_i > E_T$) then ($L_i = L_{max}$)
2. If ($E_i < E_T$) then (UAV_i return to base)

3.5 基于模糊逻辑的系统自主等级改变方法

上一节给出了动态改变系统自主等级的流程，并重点对流程中包含的后两种情况进行了说明。但是对 UAV 通信正常时自主等级的改变，只给出了自主等级改变的原则而没有深入展开。本节将应用模糊逻辑的知识，研究基于操作员状态的自主等级改变方法，主要从以下三个方面展开研究。

3.5.1 语言变量及模糊集的确定

这里涉及到三个语言变量：操作员工作量 w 、操作员在辅助任务中的平均反应时间 t 、系统的自主等级 LOA 。这里假设每隔 T 计算一次操作员工作量和平均反应时间。

利用式 (3.2) 可以计算出 t 时刻操作员的工作量，在 t 时刻可能出现的操作员工作量的最大值为 w_{max} ：

$$w_{max} = \sum_{i \in N} w_i \quad (3.3)$$

在 t 时刻，反映操作员忙闲程度用 ρ_w 表示，它的值为操作员当前的工作量 w 和当前可能出现的操作员工作量的最大值 w_{max} 的比值，即

$$\rho_w = \frac{w}{w_{max}} \quad (3.4)$$

把每段时间开始的时刻作为计算操作员工作量的时刻，计算的结果作为整段时间中操作员的工作量。可以把操作员忙闲程度划分为五个等级：“非常闲”、“闲”、“适中”、“忙”、“非常忙”。具体每个值对应的范围见表 3-4 所示。

平均反应时间 t 是指：实验过程中的一段时间内，操作员对辅助任务的反应时间的平均。这里假设时间间隔为 T 。在仿真系统中，辅助任务即为红色小飞机事件，每当该事件发生时就可以用公式 (2.1) 计算得到一个反应时间。

设在 T 内发生了 $n(n > 0)$ 次小飞机事件, 每次的反应时间为 t_i , 则在时间间隔 T 内操作员的平均反应时间为:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i / n \quad (3.5)$$

当 $n=0$ 时, t 用上一段时间的值代替。通过设定四个阈值 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$), 可以把操作员平均反应时间模糊为含有三个语言值的模糊变量, 其模糊值为: “一般”、“长”、“过长”。

系统的自主等级 LOA 在 3.4 节中给出了定义, 它是一个确定的量, 为了推理的方便, 也把系统自主等级模糊为含有三个语言值的模糊变量, 其模糊取值为: 低、中、高。接下来确定这三个语言变量的范围, 结果如下表所示。

表 3-4 语言变量及其范围

语言变量: 操作员工作量, w		
语言值	符号	值范围 (标准化)
“非常闲”	VS	$[0, 0.3]$
“闲”	S	$[0.2, 0.4]$
“适中”	M	$[0.35, 0.65]$
“忙”	L	$[0.55, 0.85]$
“非常忙”	VL	$[0.7, 1]$
语言变量: 操作员平均反应时间, t		
语言值	符号	值范围
“一般”	M	$[0, T_2]$
“长”	L	$[T_1, T_4]$
“过长”	VL	$[T_3, \infty]$
语言变量: 系统自主等级, LOA		
语言值	符号	值范围
低	L	$[1, 5]$
中	M	$[3, 6]$
高	H	$[5, 10]$

图 3-3、图 3-4、图 3-5 显示了上述语言变量的模糊集。其中在图 3-4 中取 $T_1=0.8s, T_2=1.5s, T_3=2s, T_4=2.5s$ 。

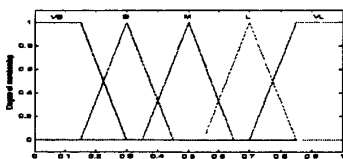


图 3-3 操作员工作量模糊集

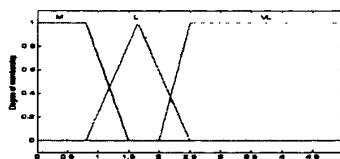


图 3-4 操作员平均反应时间模糊集

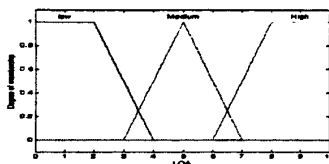


图 3-5 系统自主等级模糊集

3.5.2 抽取并构造模糊规则

这里包含两个输入变量和一个输出变量。用矩阵形式来表示模糊规则通常十分便利。对于一个二对一的系统可描述为输入变量的 $M \times N$ 矩阵。横轴为一个输入变量的语言值，纵轴为另一个输入变量的语言值，行和列的交集为输出变量的语言值。这种表现方法称为模糊关联记忆 (Fuzzy Associative Memory, FAM) [38]。

根据 3.4.2 节给出的原则，基于操作员状态改变系统自主等级的规则可以用图 3-6 的矩阵表示，其中 $M = 5$ ， $N = 3$ 。

		t				
VL	L	L	M	H	H	
L	L	M	M	M	H	
M	L	M	M	M	H	
	VS	S	M	L	VL	w

图 3-6 模糊规则的 FAM 表示

根据图 3-6 可以得到如下改变系统自主等级的规则：

1. If (workload is VS) and (reaction is M) then (LOA is Low)
2. If (workload is VS) and (reaction is L) then (LOA is Low)
3. If (workload is VS) and (reaction is VL) then (LOA is Low)
4. If (workload is S) and (reaction is M) then (LOA is Medium)
5. If (workload is S) and (reaction is L) then (LOA is Medium)
6. If (workload is S) and (reaction is VL) then (LOA is Low)
7. If (workload is M) and (reaction is M) then (LOA is Medium)
8. If (workload is M) and (reaction is L) then (LOA is Medium)
9. If (workload is M) and (reaction is VL) then (LOA is Medium)
10. If (workload is L) and (reaction is M) then (LOA is Medium)
11. If (workload is L) and (reaction is L) then (LOA is Medium)

12. If (workload is L) and (reaction is VL) then (LOA is High)
13. If (workload is VL) and (reaction is M) then (LOA is High)
14. If (workload is VL) and (reaction is L) then (LOA is High)
15. If (workload is VL) and (reaction is VL) then (LOA is High)

3.5.3 推理过程

模糊推理技术中最常用的方法是 Mamdani 方法。Mamdani-style 模糊推理过程按四个步骤执行^[38]：输入变量的模糊化、规则评估、聚合规则的输出以及最终的逆模糊化。由于篇幅限制，对每个步骤不做具体的说明。

本文使用了 MATLAB Fuzzy Logic ToolBox 完成推理。它提供了处理模糊规则和用户图形界面的系统架构，包含五个集成的图形编辑器：模糊推理系统编辑器、规则编辑器、隶属函数编辑器、模糊推理查看器和输出界面查看器。这些功能使得设计模糊系统变得更加容易。图 3-7 为推理框图。

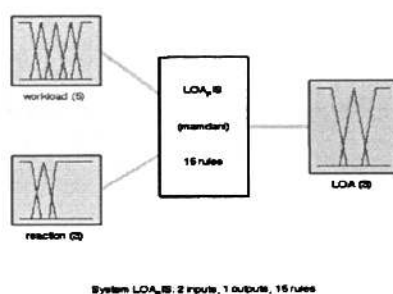


图 3-7 推理框图

利用 MATLAB Fuzzy Logic ToolBox 可以在不同输入下的推理，如：当 $\rho_w = 0.528$, $t = 1.7$ 秒时, $LOA = 5$; 当 $\rho_w = 0.647$, $t = 2.4$ 秒时, $LOA = 8$; 当 $\rho_w = 0.197$, $t = 2.0$ 秒时, $LOA = 3$ 。

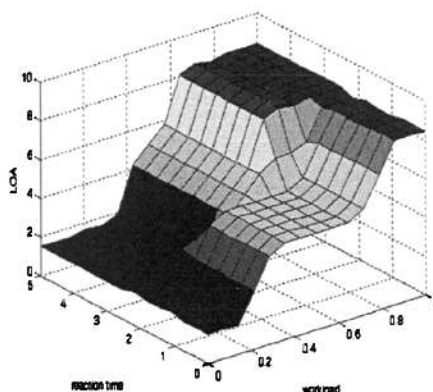


图 3-8 操作员工作量、平均反应时间与 LOA 的关系

利用 MATLAB Fuzzy Logic Toolbox 可以生成如图 3-8 所示的操作员工作量、平均反应时间与 LOA 的三维关系。从此图中可以明显观察到：在操作员工作量和平均反应时间较小时得到的系统的自主等级较低；相反，在操作员工作量和平均反应时间较大时得到的系统的自主等级较高，这是符合实际需求的。

3.6 小结

本章在人机动态功能分配理论后，着重围绕动态功能分配需要解决的两个基本问题，即系统自主等级定义和系统自主等级的改变进行了研究。在定义了多无人机监督控制系统的自主等级之后，重点对改变自主等级的自适应算法进行了研究。按照任务时间冲突和 UAV 的通信状态，把改变系统自主等级的决策流程划分为三个子过程，对每个子过程中用到的规则都进行了抽取，重点对通信正常时基于操作员状态的自主等级改变方法进行了研究，提出了基于模糊推理的自主等级改变方法。

第四章 多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型

4.1 引言

本章提出了一个基于队列的多无人机监督控制离散事件仿真模型，用于研究动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。为了使模型能够很好地反映多无人机监督控制系统的特性，首先分析了多无人机监督控制系统的人机交互属性，在此基础上，引入离散事件仿真模型的结构，建立了多无人机监督控制系统的离散事件模型，并给出了模型结构与系统属性的对应关系。最后，利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱实现了该仿真模型。

4.2 多无人机监督控制系统人机交互属性

Carl E. Nehme 在为包含不同种类平台的无人系统建模时，确定了无人系统中主要的人机交互属性如下^[41]：

- ◆ 平台编队结构
- ◆ 功能分配和平台自主等级
- ◆ 任务分配
- ◆ 操作员交互属性

这四个属性联合说明了单个操作员监督控制多个无人平台的交互内容，它们与系统的设计紧密相关。以前的研究认为，为每一个属性确定其影响系统主要性能参数的变量是很重要的，并为每一属性确定了相应的系统设计变量。本节就 Carl E. Nehme 提出的四个方面对多无人机监督控制系统的人机交互属性展开分析。

4.2.1 UAV 编队结构

在研究多无人机监督控制系统的人机交互问题时，需要考虑的一个重要属性是 UAV 的编队结构。跟 UAV 编队结构相关的一个关键变量是编队的大小。目前已有许多关于研究单个操作员监督多个无人平台能力的文章^[4, 13, 39]。最初的研究试图通过融合导航任务和载荷管理任务来减轻操作员工作负担。例如：Dixon 证明了在告警和一些自动化系统的辅助下，单个操作员可以成功控制一架无人机^[39]。但是另一方面，Ruff 用实验证明了在控制无人飞机时，随着系统自动化程度的提高，操作员的工作负担不总是减小^[40]。这是因为系统自动化程度的提高使操作员脱离了决策回路，从而导致操作员态势感知能力的下降。另外，也有很多学者对单个操作员所能监督的平台数量进行了研究。例如：为了真实地预测单个操作员能

够控制多少个相同的无人平台，Cummings 和 Guerlain 作了相关研究，研究表明如果给予很高的自主权限，操作员可以控制 12 枚导弹^[4]。

这些研究表明单个操作员控制多架无人机理论上是可行的，但是合适的自动化辅助是必需的。同时这些研究还指出，由于人的极限，操作员的工作量不会随着自动化程度的提高而一直减小。因此，UAV 编队的大小不仅依赖于自主等级属性，而且与操作员交互属性有关。

4.2.2 功能分配和自主等级

本文第三章就多无人机监督控制系统的功能分配和自主等级进行了专门研究，这里不再重复。需要补充的一个概念是忽视时间 (Neglect Time, NT)，它被用于说明无人机的自主程度。NT 是指从平台被忽视开始，到平台性能降至可接受的下限时的时间长度。

4.2.3 任务分配

多无人机任务分配问题可以表述为：对于给定的多个任务和多架无人机，确定由哪架无人机去完成哪个任务。任务分配策略一般来说，有集中式和分布式两种。

在集中式分配策略中，中央规划系统确定和分配任务给不同的平台。分布式任务分配要求每个平台都应具有规划能力，而且在分配任务时还需要考虑编队中其他平台的任务完成情况。分布式任务分配可以减少对中央规划系统的依赖，从而增加了无人机对突发事件的反应能力，也增加了系统的稳定性^[41]。然而，这种任务分配策略也面临一些挑战，主要是平台之间的通信。因为在这种分配方式中平台之间需要交换平台当前的状态，以及未来的计划。随着平台之间协同需求的增加，通信将会成为了一个重要的挑战。这里需要关注的变量是平台间的协同程度。

4.2.4 操作员交互性质

尽管前面三个属性对于描述交互等级很重要，但为了对人机交互建模仍然需要对操作员的交互性质建模，它在解释操作员如何处理任务方面扮演着很重要的角色。

4.2.4.1 串行和并行交互

在对执行监督控制任务的操作员建模时，主要有两种方法：一是把操作员建模为串行处理器^[42]；二是把操作员建模为能够同时处理多项任务的并行处理器^[43]，

它可以对多通道信息进行处理。这两种方法并不冲突，因为模型的合理性依赖于在特定条件下处理的等级，串行处理的模型适用于高层任务，而并行处理模型对大部分的底层感知处理是适用的^[44]。

在多无人机监督控制系统中，操作员负责处理高层任务，这些任务的处理需要操作员的决策和推理，这时可以把操作员建模为一个同一时间只能处理一个任务的串行处理器。串行建模方法已经成功地把处理有次序任务的操作员建模为队列网络中的服务器。本文对多无人机监督控制系统的建模也正是基于这种想法。

操作员在监督控制多架无人机时，需要间断性地处理事件，提供有限的注意力给每个事件。交互时间（Interaction Time, IT）指为确保任务的完成，操作员必须与平台交互的平均时间。

4.2.4.2 注意力分配策略

一般来说，串行的操作员行为与高层任务相关，操作员需要把他的注意力定量地分配给各任务，给每个任务提供有限的注意力。操作员用来分配注意力的方法对操作员交互的效率有很大的影响。在多无人机监督控制系统中只考虑一种分配策略：切换策略。

当监督控制系统中存在多个事件时，一个很重要的问题是对事件服务的顺序。切换策略是在串行服务器模型中用于选择下一个服务对象的程序。事件服务顺序影响总的等待时间。当操作员在不同任务间切换时，会伴随着一个认知模型的切换，从而带来切换代价。在复杂的认知任务间切换时，切换代价是很大的。

Tulga 和 Sheridan 研究了多任务注意力分配的问题，并对不同切换策略的影响作了研究，特别是把注意力分配给多个同时发生的任务，这些任务具有随机出现、持续时间不同、对服务回报不一样的特点。在这种背景下，他们开发了操作员决策模型，并与人在回路的实验数据作了比较。实验中研究了两种竞争策略：①重要任务先服务，这里的重要任务是指那些服务后能够给高回报的任务；②紧急任务优先，这里紧急任务是指那些要求处理有很短延迟的任务。Tulga 和 Sheridan 发现，当操作员处于高的任务环境下采用重要任务优先策略会导致最优的性能^[45]。

4.2.4.3 态势感知

态势感知就是在一定的时间和空间内对环境中的各组成成分的感知、理解、进而预知这些成分的随后的变化情况^[46]。注意力分配策略只考虑了分配注意力时的选择，操作员态势感知却表达了操作员有效处理信息并做出选择的能力，所以态势感知很大程度上影响了操作员的行为，以及系统的性能。

操作员态势感知能力影响操作员注意到事件的时间。Cumming 和 Mitchell 指出平台除了因操作员正忙于其他事件而不得不处于等待状态，还需要经历由于操作员缺少态势感知能力而导致的等待时间（Situation Awareness Wait Time, WTSA）

^[13]。WISA 发生在操作员没有意识到平台需要他的注意力的时候。Cumming 和 Mitchell 还指出 WISA 可能会导致平台最大的等待时间，很大程度上减少了操作员控制的平台数量^[13]。

总的来说，操作员态势感知能力对操作员注意力分配和总的系统性能都有很大的影响。

总结以前的研究成果可以得出如下结论：（1）操作员可以被建模为单服务器，用于对平台生成的离散事件做出处理；（2）IT 是联系操作员和无人机的主要性能变量；（3）操作员态势感知能力对多无人机监督控制是一个重要的限制性因素。

确定反映人机交互属性的变量对于建立多无人机监督控制系统的模型是很重要的。前面对人机交互属性以及与它们相对应的变量作了讨论，现总结如表 4-1。

表 4-1 操作员交互属性和与之相联系的设计变量

属性	变量
UAV 编队结构	UAV 编队的大小
功能分配 / 自主等级	自主等级 忽视时间 NT
任务分配	协同等级
操作员交互性质	交互时间 IT 态势感知 注意力分配策略

表 4-1 中的属性按照跟 UAV 和操作员的相关性可以分为两组，如图 4-1 所示，除此之外，该模型还包含了影响系统性能的环境不确定性。

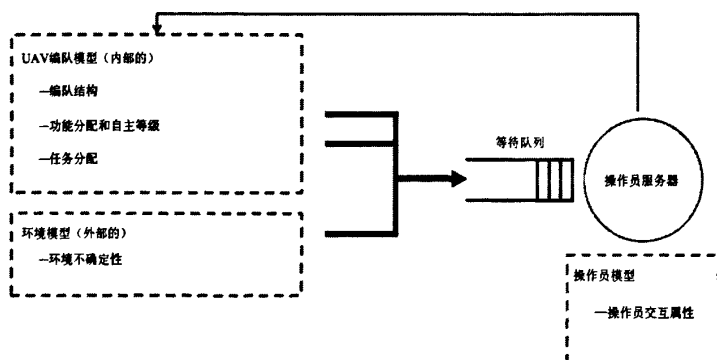


图 4-1 多无人机监督控制离散事件仿真模型的高层表示

4.3 多无人机监督控制系统的离散事件仿真建模

离散事件仿真模型包含四个关键的因素：事件、事件到达过程、事件服务过程、排队规则。

4.3.1 事件

在多无人机系统中，有三类事件：（1）平台引起事件；（2）操作员引起的事件；（3）由环境不确定性引起的事件。这些事件的分类如图 4-2 所示。

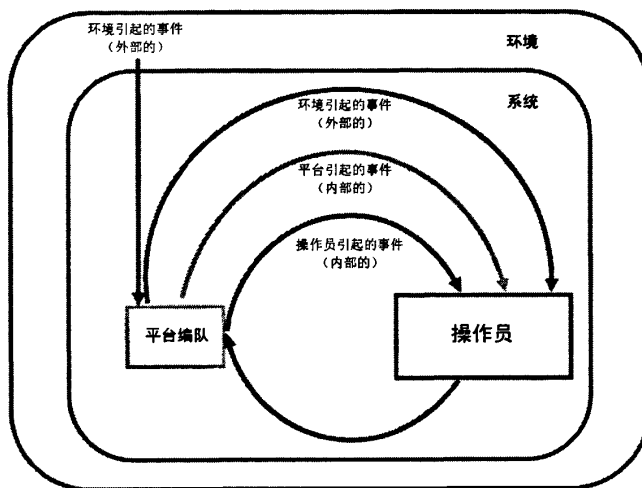


图 4-2 事件类型

4.3.1.1 平台引起的事件

平台引起的事件是内部事件，它是因任务需求所期望产生的事件。一个由平台引起的内部事件的例子：无人机传回获取的图像，导致操作员识别图像这一事件的发生。这是一个期望的事件，操作员需要用到决策和推理方面的知识来确定图像中包含的内容。这样的情景是无人系统期望的，因为自动系统不能分析图像，需要用到操作员的判断和推理。

4.3.1.2 操作员引起的事件

操作员导致的事件对整个系统而言仍然是内部事件，它表示了操作员在离散的时间点上触发重规划的能力，即使平台没有产生需要操作员推理和决策的任务需求。为了提高系统性能，操作员可能会对当前计划进行修改，这时就会导致这种事件发生。例如，在 UAV 向目标前进的过程中，操作员可以重规划由自动系统生成的初始航迹，以满足更好的 TOT 限制。虽然由平台引起的事件和由操作员引起的事件对于无人系统而言都是内部的，但前者是由系统强加给操作员的，而后者却是由操作员自己引起的。

4.3.1.3 环境引起的事件

对多无人机系统而言，环境引起的事件是外部事件，是由环境的不确定性引起的，对操作员而言是意想不到的。最常见的外部事件如：出现紧急的威胁区域或者气象条件发生变化，需要操作员重规划无人机的航迹。这些情况是操作员预先估计不到的，但是对无人机的任务需求来说却是期望的。

4.3.2 事件到达过程

与事件相联系的是事件到达过程，在对多无人监督控系统建模时，两种事件到达过程是很关键的：独立的和相关的。图 4-3 为多无人监督控制系统的离散事件仿真模型，该模型包含一个服务器（代表操作员）、一个独立的到达过程、两种不同的相关到达过程。真实的系统中包含任意数量的事件类型，每一类事件都对应一个合适的到达过程。

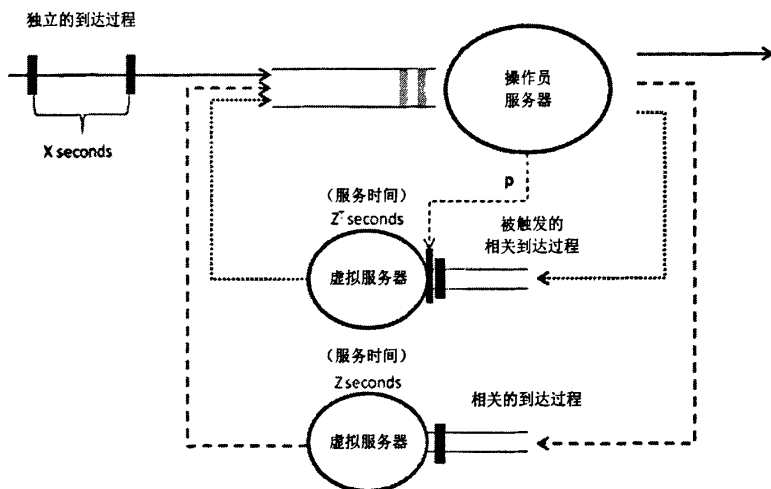


图 4-3 三种事件到达过程

4.3.2.1 独立的到达

外部事件源自于对任务来说是外部的资源，例如：天气、目标移动等，这类事件的产生与操作员正在处理的同类事件是独立的。例如：紧急威胁区域的出现，它与操作员是否处理过紧急威胁区域或正在服务是无关的。这里的依赖性或者说是相关性与服务在什么时刻开始服务有关，而与事件在什么时刻到达没有关系。因此，这里定义的独立到达过程仍然依赖于先前事件的到达时刻。如果一个事件的到达与先前产生事件的服务是独立的，用基本的排队系统的到达过程来对独立的到达过程建模是合适的。

对于独立的事件到达过程，定义随机变量， X ，表示前后两个事件到达之间的

时间间隔。可以用概率密度函数 $f_X(x)$ 来表示 X 的分布。对于具有 m 个外部事件的多无人机系统，独立的事件到达可以建模为：

对于每个外部事件类型 i , $1 \leq i \leq m$, 定义连续随机变量 X_i 的概率密度函数 $f_{X_i}(x)$, 其中 X_i 表示第 i 类事件的到达之间的时间间隔。

单位时间内第 i 类事件到达的平均数：

$$\lambda_i^{\text{independent}} = \frac{1}{E[x_i]}, E[x_i] \neq 0 \quad (4.1)$$

4.3.2.2 相关的到达过程

由平台引起的内部事件一般情况下是以其它事件为前提的，此类事件的到达过程与先前到达事件的服务相关。相关性体现在以下两种情况：①在此之前被服务的最后一个事件是同种类型的事件，这是指同一时刻只能存在一个同类型的事件；②在此之前被服务的最后一个事件是其它类型的事件，这是指事件的触发是以其它事件的服务完成为前提的。符合①这种情况的例子：操作员分析无人机传回的图片，一旦这样一个事件发生，操作员必须首先服务该事件，在获取第二张图片之前必须完成先前分析图片的任务，在此情况下，该类型的事件到达过程与在此之前到达的同类型事件的服务完成时刻是相关的。符合②这种情况的例子：给其中一架无人机分配一个新的目标。假定目标重分配事件发生在获取目标事件的服务完成之后，目标重分配事件的到达过程与在此之前的目标获取事件的服务相关，此种情况下，一旦目标获取事件的服务完成之后，目标重分配事件就被触发。

可以用一个闭环的排队网络来对相关事件的到达过程建模。在闭环排队网络中，事件的数量是有限的。在任何时刻，一个事件不是处在等待队列中就是正在被服务，一旦事件在其中一个服务中心的服务完成之后，就前进到网络中的下一个服务中心。

对①建模：在这种情况下，事件的到达与在此之前的服务的同种类型的事件相关。建模时用到了含有一个事件、两个服务中心的排队网络（图 4-3 中用虚线表示的子系统）。其中一个服务中心表示对多无人机进行监督控制的真实的操作员，另外一个服务器是虚构的，其作用是对一个内部事件的服务结束到下一个内部事件触发之前的发生的事件进行处理。例如：一旦打击目标事件完成后，在打击下一个目标之前，无人机需要会前进到下一个目标。

用含有两个服务器的排队网络对事件到达过程建模时，会导致这样的情况出现：当子系统的事件需要操作员交互时就会到达等待队列中。在子系统中，当一个事件处在等待或在服务状态时，其它事件不会发生，因为该子系统只包含一个事件。一旦事件完成之后，无人平台不需要再对该事件关注，这是通过把事件

放到虚拟服务器中实现的。虚拟服务器的服务时间是一个随机变量 Z ，它表示这个相关事件完成之后到下一个相同类型事件到达操作员队列中的时间。因为 Z 表示对于某个特定事件无人平台不需要操作员交互的时间，它表征了系统的自主程度。

对②建模：在这种情况下，事件的到达过程与在此之前服务的不同类型的事件（触发事件）相关。这里除了要用到前面的概念，还要用到阻塞的概念。在排队网络中，阻塞表示队列中事件流的临时停顿。在多无人机监督控制离散事件仿真模型中，阻塞发生在触发事件被服务之前，目的是阻止相关事件通过虚拟服务器。为了建模被触发的相关到达过程，必须首先定义触发事件的类型，确定了触发事件的类型后，被触发事件的到达过程被建模为触发事件的服务完成引起阻塞的消除，这里允许被触发事件在一段时间之后到达等待队列。因为被触发事件的发生是随机的，或者发生或者不发生，发生概率为 p 伯努利分布可以用于表示触发过程。在这种类型的相关事件到达进程中，关注的变量是在触发事件的服务完成到被触发事件到达等待队列的时间间隔，这用随机变量 Z^T 表示，它也表示假想服务器的服务时间。

对于上面分析的两种相关到达，事件到达过程可以用概率密度函数 $f_z(z)$ 和 $f_{z^T}(z^T)$ 表示，具体是哪个取决于到达过程的类型。在具有 n 个平台的多无人系统中，相关到达过程可以被建模为：

对于每个平台 i ， $1 \leq i \leq n$ ，每个内部事件 j ， $1 \leq j \leq g(i)$ ，其中 $g(i)$ 表示与平台 i 联系的相关事件的总数，定义概率密度函数 $f_{z_{ij}}(z)$ ，其中 Z_{ij} 表示事件 j 服务完成开始到下一事件 j 到达等待队列的时间间隔。当事件是被触发的事件类型时，概率密度函数用 $f_{z_{ij}^T}(z^T)$ ，这里 z_{ij}^T 表示触发事件 k 的服务完成开始到事件 j 到达等待队列的时间间隔。

4.3.2.3 修改的到达过程

在本章第二节中讨论过，态势感知严重影响了操作员的行为和系统的性能。缺少态势感知能力会增加等待时间，这是由于态势感知能力的不足增加了操作员注意到平台需要操作员交互的时间，从而导致系统等待时间的增加。Cumming 和 Mitchel 研究发现由于缺少态势感知能力导致的等待时间占了系统等待时间的大部分，严重减少了单个操作员控制无人机的数量^[13]。因此在离散事件仿真模型中，需要考虑缺少态势感知能力的影响，这可以通过修改前面定义的到达过程来实现。

为了表示缺少态势感知导致的等待时间，在模型中假定了操作员利用率和 WTSA 之间的关系，这个关系建立在以下两个关系的基础上。第一个关系以经典的 Yerkes-Dodson 倒置的 U 型函数为基础，Yerkes 和 Dodson 最初的工作跟激励的强度和学习的速度有关。然而，Hebb 于 1955 年就激励对操作员性能的影响也提

出了相似的关系，这个关系表明：过低和过高的激励都会导致低的操作员性能，前者是由于操作员的自满导致的，而后者是由于操作员不能完成过多的任务导致的。本节对模型的修改就建立在这个关系上，其中激励的等级表示为操作员利用率。

操作员的利用率定义为操作员处理任务的总时间占总的仿真时间的比率。第二个关系是态势感知能力和性能之间的。以前的研究表明操作员态势感知能力是任务性能的函数^[47]。现作如下符号假设：

- o 性能
- s 态势感知能力
- ρ 操作员利用率

可以用下面的形式描述上面的两种关系：

$$\rho \rightarrow o \quad \text{和} \quad o \rightarrow s$$

操作员的利用率和态势感知能力之间的关系满足传递性：

$$\gamma: \rho \rightarrow s$$

因此，模型中假设态势感知能力和操作员的利用率满足函数关系 γ ，且 $WTSA(\gamma(\rho))$ 和操作员利用率 ρ 的服从抛物线关系，如图 4-4 所示。

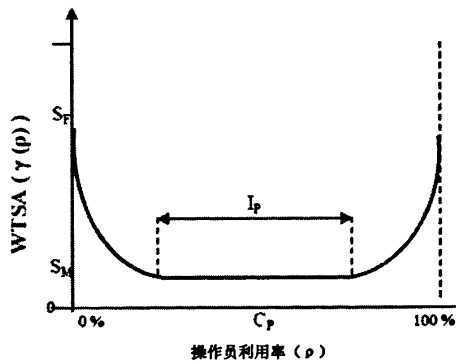


图 4-4 操作员利用率和 WTSA 之间的关系

从图 4-4 中可以看出，WTSA 在操作员利用率比较低和高时比较大，这是因为操作员利用率比较高时，因精力不足以至于不能积累用于态势感知的信息；当操作员利用率比较低时，操作员可能会忽略环境中的部分信息，同样也导致低的态势感知能力。这两种情况分别导致了操作员利用率在两端时大的 WTSA。

从图 4-4 中还可以看出：不同操作员利用率下产生的 WTSA 依赖于 γ 函数的形状，它由四个不同的变量描述。第一个变量， S_M ，表示由于缺少态势感知能力的产生的最小 WTSA；第二个变量是抛物线的中心 C_P ，它表示 WTSA 在最小时操作员的利用率；第三个变量， I_P 表示在 C_P 周围具有最小 WTSA 时的利用率区间的长度，如果 $I_P=0$ ，那么只有在 C_P 处具有最小的 WTSA，此时 γ 曲线就为抛物线

了；第四个变量， S_F ，表示 WTSA 的幅度。在曲线对称的情况下，当操作员利用率为 0% 和 100% 时， γ 取得 S_F 。

利用 WTSA 和操作员利用率之间的函数关系，当缺少态势感知能力时，相关事件的到达过程可以做一些修改。修改后的到达过程用随即变量 Z' 或 Z^T 的概率分布来表示，随即变量 Z' 或 Z^T 是两部分的函数：a) 与事件到达相关的随机变量；b) 由于缺少态势感知能力导致的惩罚项。这两种类型的相关事件到达过程可以用(4.2)和式(4.3)表示：

$$z' = z + \gamma(\rho) \quad (4.2)$$

$$z^T = z^T + \gamma(\rho) \quad (4.3)$$

(4.2)中的第一项是前面定义的随机变量 Z 的实现，它表示事件服务结束到下一事件到达等待队列的时间间隔。同样地，(4.3)中的第一项是以前定义的随机变量 Z^T 的实现，它描述了从触发事件的服务完成时刻起到被触发事件到达等待队列为止的时间间隔。因为事件的产生并不意味着操作员立即能够注意到该事件，(4.2)和(4.3)中的第二项 $\gamma(\rho)$ 就表示了由于缺少态势感知导致的惩罚。当操作员具有完整的态势感知能力时， $\gamma(\rho)$ 取得最小值，当操作员态势感知能力下降时， $\gamma(\rho)$ 取得比较大的值。

4.3.3 事件服务过程

与事件相关的除了事件到达过程之外，还有事件服务进程。操作员处理事件的时间长度，交互时间 (IT) 或者 Y' 是一个随机变量，可以用服务时间的分布来建模。这个随机变量是两个因素的函数：a) 随机变量 Y ，表示操作员必须与事件交互的时间；b) 随机变量 WTI ，表示交互等待时间。

$$y' = y + wti \quad (4.4)$$

式(4.4)中的第一项 y 是随机变量 Y 的实现，可以用概率密度函数 $f_Y(y)$ 来描述 Y ，它还需要考虑不同操作员之间的性能差异，以及操作员在性能方面的变化。方程中的第二项， wti ，是随机变量 WTI 的实现。交互等待时间造成的影响是增加了 Y' ，它发生在事件服务之前，可能是由决策支持和内容切换导致的，或者是操作员等待系统更多的信息导致的。

内部事件的服务进程可以被建模为：对于平台 i ， $1 \leq i \leq n$ ，对于事件 j ， $1 \leq j \leq g(i)$ ， $g(i)$ 表示与平台 i 相联系的相关事件类型的总数，定义概率密度函数 $f_{Y_j}(y)$ 和 $f_{WTI_j}(wti)$ ，这里 Y_j 和 WTI_j 是随机变量，它们分别表示与事件 j 相关的服务时间和交互等待时间。

外部事件的服务进程可以被相似的建模为：对于外部事件 i ， $1 \leq i \leq m$ ，定

义概率密度函数 $f_{Y_i}(y)$ 和 $f_{W_{T_i}}(wt_i)$ ，这里 Y_i 和 W_{T_i} 是随机变量，它们分别表示与事件 i 相关的服务时间和交互等待时间。

4.3.4 排队规则

基于队列的离散事件仿真模型中最后一个重要的要素是排队策略。排队策略决定了在队列中处于等待状态的事件的服务顺序。多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型运用排队策略的变化来表示操作员切换策略的不同。

切换策略在离散事件仿真模型中可以被建模，包括先进先出(First-in-First-Out, FIFO)的排队计划，具有最高性质的优先(Highest Attribute First, HAF)策略。HAF策略跟优先权策略相似，优先权策略是指具有优先权的事件优先服务，除非没有具有优先权的事件。因此，如果一个系统的等待队列中包含一个比系统中其它事件具有更高优先权的事件，该事件就要被移动到队列的最前面，但是不能排到具有较低优先权但正在被服务的事件之前，排队策略规定了队列被处理的方法。

综述以上内容，对系统建模需要首先确定事件，并把其对应到合适的事件类型中。事件到达过程依赖于事件的类型，不同的事件对应的参数是不同的，这些参数是可以被估计的。表 4-2 总结了这些变量。

表 4-2 事件到达和服务过程的相关变量

过程	变量	变量符号	分布
独立的到达	先后两事件发生的时间间隔	X	$f_X(x)$
相关的到达	先前事件服务完成起到下一个事件到达等待队列为止的时间间隔	Z	$f_Z(z)$
	或 触发事件服务完成起到被触发事件到达等待队列的时间间隔	or Z^T	or $f_{Z^T}(z^T)$
服务	服务事件的时间	Y	$f_Y(y)$

4.4 多无人机监督控制系统的仿真模型与设计变量的映射

这一部分主要说明：为了描述图 4-1 所显示的多无人机监督控制离散事件仿真模型所定义的属性，如何通过反映各属性的变量（表 4-1）映射到 4.3 节中建立的模型结构中去。映射关系总结在表 4-3 中。

4.4.1 平台编队结构

编队结构在模型中是用变量编队大小来反映的。在模型中编队大小表示了平

台的数量。

表 4-3 设计变量与模型结构的映射关系

属性	变量	离散事件仿真模型结构
编队结构	编队大小	平台的数量, n
功能分配 和自主等级	自主等级	内部事件类型
	被忽视时间 NT	$f_z(z)$ 或 $f_{z^T}(z^T)$
任务分配	协同等级	事件到达之间的相关性
操作员 交互性质	交互时间	服务分布, $f_Y(y)$
	注意力分配策略	排队策略
	态势感知	WTSA/UT 曲线, $\gamma(\rho)$, $0 \leq \rho \leq 100$
环境不 可预知性	不可控事件	事件类型以及与之相联系的概率分布函数, $f_X(x)$

4.4.2 功能分配和自主等级

在模型中功能分配和自主等级属性是用变量自主等级和忽视时间 (NT) 来反映的。自主等级变量是通过系统中内部事件类型反映的。因为当模型中的任何事件到达操作员服务器时, 都需要操作员输入。定义了模型中包含的事件本质上就是表示了操作员的角色和平台的角色。在模型中, NT 是用与每个内部事件相对应的概率密度函数 $f_z(z)$ 或 $f_{z^T}(z^T)$ 表示的。

4.4.3 任务分配

在模型中, 任务分配属性是用变量协同等级来反映的。因为表示事件服务完成到下一个相关事件到达为止的时间是一个依赖于平台状态的随机变量, 事件交互的不同程度可以通过改变相关性的类型和程度来表示。模型表示事件交互的能力使得模型能够表示不同类型事件之间的协同。

4.4.4 操作员交互性质

在模型中, 操作员的交互属性是用交互时间、注意力分配策略、态势感知变量建模的。在模型中, 交互时间是用与事件服务相关联的概率密度函数, $f_Y(y)$, 表示的。模型中包含的注意力分配策略为切换策略。为了对操作员切换策略进行建模, 可以通过改变队列的类型来表示不同的切换策略。例如: 基于优先权的切换策略可以用排队策略来体现。最后, 在模型中态势感知变量是用函数 $\gamma(\rho)$ 表示的,

$\gamma(\rho)$ 表示由于缺少态势感知导致的等待时间。

4.4.5 环境的不可预知性

最后，在模型中，环境的不可预知性是用那些不可控的对系统有影响的事件来表示的。这在模型中可通过确定外部事件类型，与描述到达的概率密度函数 $f_x(x)$ 来表示。为了表示环境的不可预知性，概率密度函数的类型、均值、方差可以不同。

4.5 多无人机监督控制系统仿真模型的 MATLAB 实现

4.5.1 仿真模型中的事件

在建立多无人机监督控制仿真系统时，定义了多无人机监督控制系统中需要操作员交互的子任务，这些子任务构成了多无人机监督控制系统离散事件仿真模型中的事件；4.3 节根据事件发生的特点，对事件进行了分类，并结合每一类事件的特点建立了事件到达过程和服务过程的模型。这里对模型中存在的事件总结如表 4-4 所示，在表 4-4 中事件类型是根据事件到达过程的特点做出的判别。属于类型 1 的事件到达过程是独立的，而属于类型 2 的事件到达过程是相关的，这两种事件的建模方法是不同的，图 4-3 说明了这一点。

表 4-4 多无人机监督控制系统中的事件及其优先权

事件名称	事件优先权	事件类型
目标分配	4	类型 1
目标打击	4	类型 2
突发威胁	7	类型 1
平台故障	6	类型 1
辅助任务	2	类型 1
通信事件	1	类型 1

从 4.3 节知道每类事件的到达过程和服务过程服从一定的概率分布，其概率分布参数可以通过对实验数据的统计得到。在第五章中，利用第二章开发的多无人机监督控制仿真系统，进行了人在回路的实验，在实验过程中记录相关的事件发生时刻可以得到这些事件到达过程和服务过程的概率分布参数。

4.5.2 仿真模型的 SimEvent 实现

4.5.2.1 SimEvent 介绍

SimEvent 是 MATLAB 提供的一个可用于开发离散事件仿真模型的工具箱。SimEvent 为离散事件仿真模型的开发提供了很多基本的模块，这些模块给离散事件仿真模型的开发提供了很大的便利。

下面以一个简单的模型为例来说明 SimEvent 提供的用于实现离散事件仿真模型的基本模块。图 4-5 显示了这个简单的离散事件仿真模型，该模型虽然简单，却包含了离散事件仿真模型的基本要素。

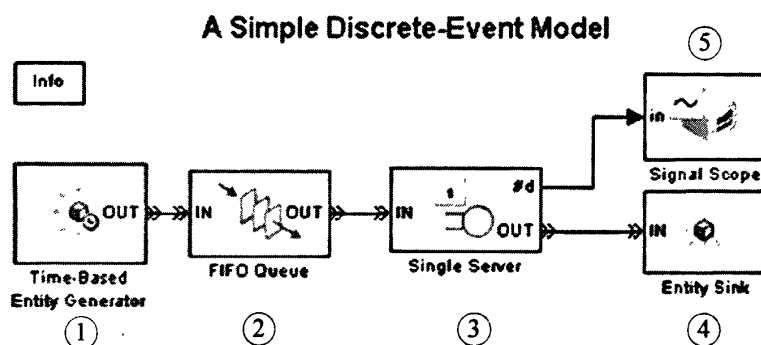


图 4-5 一个简单的离散事件仿真模型

对于一个基于队列的离散事件仿真模型来说，最基本的要素有三个：事件、等待队列、服务器。图 4-5 中显示的模型是一个典型的基于队列的模型，对于前面提到的三个基本要素图中都有其相应的实现模块，为了便于说明，对模型中的每个模块进行了编号。下面就与三个基本要素相关的模块进行详细说明。

◆ 实体生成模块

这里的实体即为建模过程中定义的需要操作员处理的各类事件。SimEvent 提供了两种实体生成模块，一种是基于时间的，如图 4-5 中①所示；另外一种是基于信号的。在 SimEvent 中可以对实体添加属性，如实体的服务时间、优先权以及实体在等待队列中的等待的最大时间等，这一特性对于复杂系统的建模是很有用的。在开发多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型时就用到这个特性。有实体的生成就有实体的消亡，图 4-5 中④所示的实体接受模块就起到了这个作用。

◆ 等待队列模块

图 4-5 中②所示的就是一个等待队列模块，它的用途是当服务器处于忙碌状态时，接受来自不同实体生成模块产生的实体。在等待队列模块中可以设置实体在队列中的排队顺序以实现不同的服务策略。如，在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中，就是依据实体的优先权来排序的，实体的优先权是通过为实体

增加一个属性值来实现的。

◆ 服务器模块

图 4-5 中③所示的就是服务器模块, 实体到达服务器后会在服务器中停留一段时间, 这段时间就是服务时间。服务时间可以通过设置实体的属性来设定, 也可以通过外接一个随机数生成器来设定, 这种方式的优点是可实现服从各种分布的服务时间, 在开发多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型时就采用了这种方式。

4.5.2.2 多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型的实现

本章建立的多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型是一个典型的基于队列的模型, 它的实现也必然包含上一节说明的三个基本模块。下面以包含一架无人机的监督控制系统的离散事件仿真模型为例, 从三个方面对多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型的实现进行说明。图 4-6 显示了包含一架无人机的监督控制系统的离散事件仿真模型的实现, 为了便于说明, 对一些模块进行了编号。

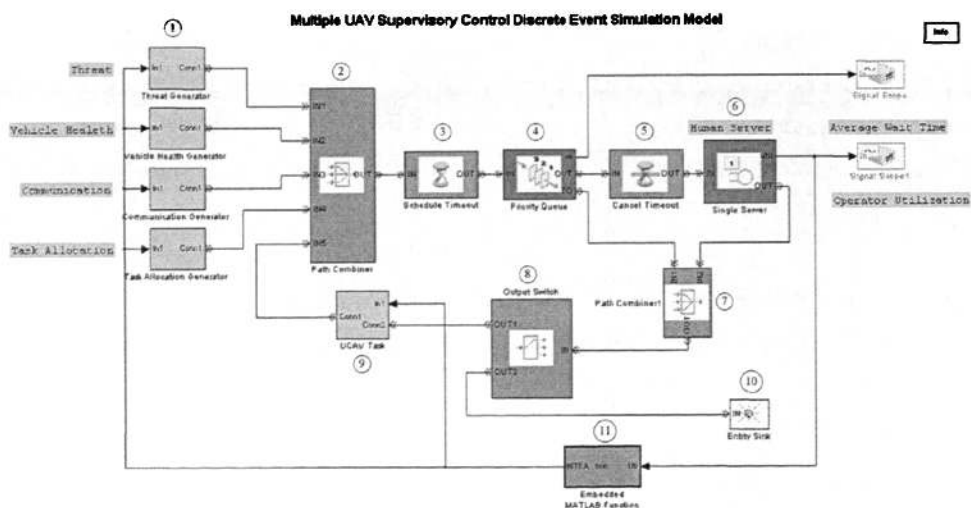


图 4-6 包含一架 UAV 的监督控制系统的离散事件仿真模型的实现

(1) 模型中各模块的功能说明

模块①: 该模块是由多个基本模块搭建而成的, 这些基本模块中一个最重要的模块就是前面提到的实体生成模块, 该模块的作用是产生事件类型为 1 的实体, 为实体添加了一些属性, 这些属性包括实体的服务时间、实体的优先权、实体在队列中的最大等待时间等。

模块②和⑦的是 SimEvent 提供的基本模块, 其作用是把多条路经合成一条路经。

模块④在前面已经作了说明, 其作用是当服务器忙碌时接受实体, 当有多个

实体同时需要服务时就会形成一个等待队列。此时可以根据实体的优先权属性对实体排序,使得具有最高优先权的实体能够在服务器空闲时第一个进入服务器。

模块⑤即为服务器模块,实体到达该模块后,在模块中停留一段时间,具体停留的时间长度由服务时间规定。在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中,服务时间是作为实体的一种属性给定的。

模块③和⑥在一般情况下是配对使用的,其中模块③给到达的实体添加了一个性质,即实体在指定路径上所能停留的时间限制,具体可以停留多长时间由实体的属性设置,当实体经过该模块时倒计时开始。模块⑥的作用跟模块③的作用正好相反,用于取消这种性质。在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中,这两个模块被用于实现部分实体在等待队列中只能停留一段规定的时间的功能。从图 4-6 中可以看出,模块③和⑥分别位于等待队列模块的两端,当实体在等待队列中等待的时间达到时间上限时,实体从等待队列模块的 TO 端口输出而不经等待队列模块的实体输出口。

模块⑧的作用跟模块②和⑦的作用相反,它是把到达的实体根据实体的属性分配到不同的路径上。

模块⑨是有许多基本的模块实现的,它用于产生事件类型为 2 的实体,在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中,该模块产生代表目标打击事件的实体。

(2) 模型中实体的流动历程

针对多无人机监督控制仿真系统建立的离散事件仿真模型中,包含有两种类型的事件,代表这两类事件的实体的产生以及它们在模型中的流动历程是不同的。

对于代表事件类型 1 的实体,在图 4-6 所示的模型框图中,它遵循图 4-7 所示的流动历程。

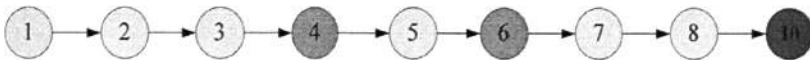


图 4-7 事件类型为 1 的实体在模型中的历程

对于代表事件类型 2 的实体,在图 4-6 所示的模型框图中,它遵循图 4-8 所示的流动历程。

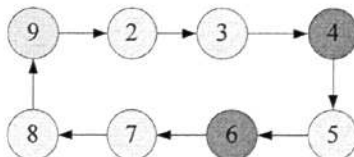


图 4-8 事件类型为 2 的实体在模型中流动的历程

对比图 4-7 和图 4-8,可以看出代表两种事件类型的实体的流动历程有着很大的不同,对于代表事件类型 2 的实体的流动历程是一个循环的过程,实体产生后不会消失,而代表事件类型 1 的实体有一个产生到消亡的过程。这些不同之处反

映了模型中两类事件到达过程的不同，事件类型为 1 的事件的到达过程是独立的，而事件类型为 2 的事件的到达过程是相关的。图 4-8 所示的实体流动历程也很好地说明了在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中相关事件的到达过程是用闭环的排队网络来建模的。

对于实体的流动历程需要补充说明的一点是：在代表事件类型 2 的实体的流动历程中，实体只在仿真开始的时候产生，实体产生之后，实体生成模块从循环回路中脱离，此后，模块⑨只起到在每个循环中改变实体的属性的作用。

(3) 修改的事件到达过程的实现

所谓修改的事件到达过程是指在原有的事件到达过程的基础上，考虑了态势感知等待时间对事件到达造成的影响而得到的到达过程，4.3.2.3 节中对修改的事件到达过程进行了详细的说明，式 (4.2) 和式 (4.3) 给出了修改后的事件到达过程，从这两个公式中可以看出修改后的到达过程实际上就是在原有的到达过程上加了一项 WTSA，而图 4-4 中显示的曲线又给出了操作员利用率与 WTSA 的关系。为了实现的方便，对图 4-4 中的 U 形曲线的两边都进行了线性化。在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中，模块⑩实现了 WTSA 的计算，这个模块是用 MATLAB 的 M 文件实现的。

4.6 小结

本章从三个方面研究了多无人机监督控制系统的建模问题：首先，分析了多无人机监督控制系统的人机交互属：UAV 编队结构、系统功能分配和自主等级、任务分配以及操作员交互性质；其次，对多无人机监督控制系统的离散事件仿真建模，主要从事件类型、事件到达过程、事件服务过程、排队规则、模型结构和系统设计变量的映射关系五个方面进行了研究；最后，利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱实现了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。

本章对多无人机监督控制系统建模的目的在于研究多无人机监督控制系统的性能，关于如何应用该模型进行系统性能研究将在第五章进行说明。

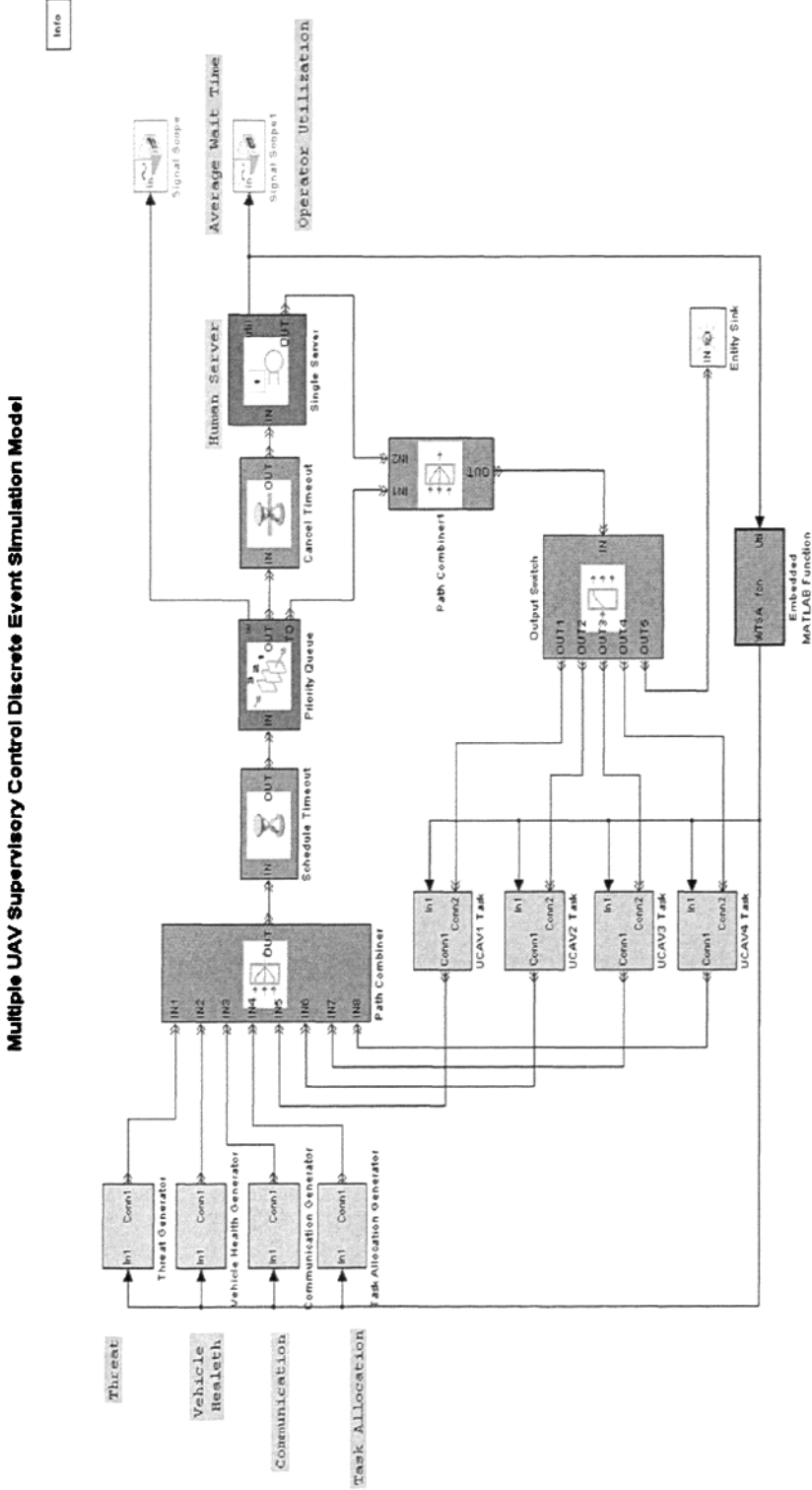


图 4-9 多无人机监督控制系统离散事件仿真模型的 SimEvent 实现

映了模型中两类事件到达过程的不同，事件类型为 1 的事件的到达过程是独立的，而事件类型为 2 的事件的到达过程是相关的。图 4-8 所示的实体流动历程也很好地说明了在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中相关事件的到达过程是用闭环的排队网络来建模的。

对于实体的流动历程需要补充说明的一点是：在代表事件类型 2 的实体的流动历程中，实体只在仿真开始的时候产生，实体产生之后，实体生成模块从循环回路中脱离，此后，模块⑨只起到在每个循环中改变实体的属性的作用。

(3) 修改的事件到达过程的实现

所谓修改的事件到达过程是指在原有的事件到达过程的基础上，考虑了态势感知等待时间对事件到达造成的影响而得到的到达过程，4.3.2.3 节中对修改的事件到达过程进行了详细的说明，式 (4.2) 和式 (4.3) 给出了修改后的事件到达过程，从这两个公式中可以看出修改后的到达过程实际上就是在原有的到达过程上加了一项 WTSA，而图 4-4 中显示的曲线又给出了操作员利用率与 WTSA 的关系。为了实现的方便，对图 4-4 中的 U 形曲线的两边都进行了线性化。在多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型中，模块⑪实现了 WTSA 的计算，这个模块是用 MATLAB 的 M 文件实现的。

4.6 小结

本章从三个方面研究了多无人机监督控制系统的建模问题：首先，分析了多无人机监督控制系统的人机交互属：UAV 编队结构、系统功能分配和自主等级、任务分配以及操作员交互性质；其次，对多无人机监督控制系统的离散事件仿真建模，主要从事件类型、事件到达过程、事件服务过程、排队规则、模型结构和系统设计变量的映射关系五个方面进行了研究；最后，利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱实现了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。

本章对多无人机监督控制系统建模的目的在于研究多无人机监督控制系统的性能，关于如何应用该模型进行系统性能研究将在第五章进行说明。

第五章 多无人机监督控制系统的性能研究

5.1 引言

第三章研究了多无人机监督控制系统人机功能动态分配方法,但动态功能分配是否真能改善系统的性能呢?本章针对这一问题展开研究。在定义了基于等待时间的系统性能指标之后,利用人在回路的实验和模型仿真两种手段研究了动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。

5.2 等待时间

Olsen 和 Goodrich 在对人机交互和操作员的监督控制能力建模时,提出了 NT 和 IT 的概念^[51],并用一个基于时间的模型来对人机交互建模,模型指出单个操作员能控制的无人机的数量由式(5.1)给出:

$$FO = \frac{NT + IT}{IT} = \frac{NT}{IT} + 1 \quad (5.1)$$

在式(5.1)中, FO (Fan Out) 表示单个操作员能有效控制的 UAV 的数量; NT 是 UAV 在其性能下降到某一可接受的阈值以下之前可以被忽视的时间; IT 是操作员与 UAV 交互的平均时间。图 5-1a 显示了控制单个 UAV 时 NT 和 IT 的关系,图 5-1b 表示了监督控制多个 UAV 时 NT 和 IT 的关系。从图中可以看出,操作员把其中一个无人平台被忽视的时间转变为其它平台的交互时间来实现对多平台的控制。

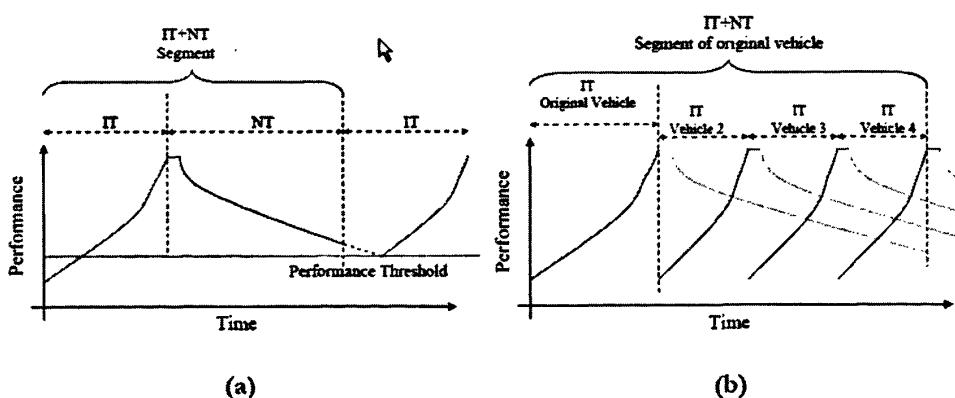


图 5-1 多无人系统 NT 和 IT 的关系

利用式(5.1)可以计算单个操作员同时控制无人机的数量,然而,由于它的简单性,使得在利用式(5.1)估计操作员能控制的无人平台的数量时,会做出过高的估计。

这是因为式(5.1)建立在以下假设之上^[4]:

- 平台申请交互时能立即得到处理, 不存在等待队列;
- 操作员能够把他的注意力合适地分配给正确的平台。

如果不考虑这两点假设, 在对多无人平台建模时, 必须得考虑一个附加的关键变量: 等待时间(Wait Time, WT)。

在 HSC 任务中, 操作员被认为是一个串行处理器, 一次只能解决一个问题或任务, 如果他们能在认知任务之间快速的切换, 那么需要复杂认知的任意任务序列将会形成一个队列, 导致出现等待时间。

在需要操作员同时给两架或多架无人飞机发出指令的无人机系统中, 等待时间很重要, 当等待时间增长时, 操作员能有效控制的 UAV 的实际数量就减少了。图 5-2 表明了等待时间是如何影响整个系统的。在多飞无人机监督控制中, 操作员通过与 UAV 的交互将系统性能保持在某个可接受的性能阈值上, 然后一直忽视该 UAV 直到它需要辅助的时候。系统性能将在一段时间后渐渐降低(图 5-2 中的 NT_2), 或者在出现突发事件时突然降低(图 5-2 中的 NT_1)。一旦 UAV 的性能水平降低到一个特定水平或阈值之下, 等待时间就开始累积。

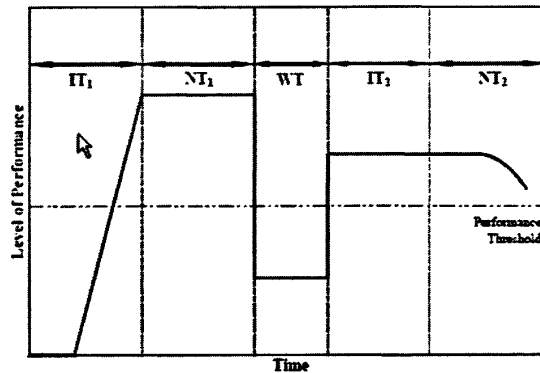


图 5-2 无人平台的性能随时间的变化

从无人平台的角度来看, 等待时间可分解为三个基本部分^[26]: 交互等待时间(Interaction wait time, WTI)、队列等待时间(wait time in the queue, WTQ)、WTSA。例如: 单个操作员控制两个机器人实现半自动航行任务时, 如果其基本的操作需要操作员与机器人的交互, 那么当两个机器人同时或几乎同时请求指令时, 就会出现等待时间。当这种情况发生时, 如果操作员很快的开始帮助第一个机器人, 第一个机器人就必须等待操作员解决问题, 然后给它命令(WTI_1)。对于第二个机器人, 它在序列中的等待时间(WTQ_2)就等于 WTI_1 。如果操作员没有意识到机器人需要指令, 那么从事件出现的时刻到操作员实际介入的时间可以是几秒到几分钟。由于没有感知到需要操作员干预而引起的等待时间就是 WTSA。

$$WT = \sum_{i=1}^X WTI_i + \sum_{j=1}^Y WTO_j + \sum_{k=1}^Z WTS A_k \quad (5.2)$$

$$FO = \frac{NT}{IT + WT - \sum_{i=1}^X WTI_i} + 1 \quad (5.3)$$

式(5.2)给出了等待时间的正式定义，其中：

- X 当平台需要操作员介入时，操作员与平台交互的次数
- Y 系统运行中建立的等待队列的个数
- Z 实验中态势感知等待时间出现的次数

它将整个系统的等待时间分为交互等待时间（IT 的一部分），队列等待时间，态势感知等待时间。式(5.3)给出了包含等待时间的 Fan Out 计算公式，式(5.3)的分母必须减去 WTI，因为 WTI 是 IT 的一个子集，等待时间公式中已经包含 WTI，如果不减意味着将会重复计算等待时间。将等待时间加入这一等式的分母中会明显减少单个操作员能控制的 UAV 的预期数量，总的等待时间可以是 IT 的很多倍。

5.3 基于人在回路实验的系统性能研究

为了研究动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响，设计了本实验。

5.3.1 实验内容说明

多无人机监督控制仿真系统为这里的实验提供了平台。在实验过程中，实验人员利用图 2-6 和图 2-7 所示的图形用户界面完成仿真系统中的主辅任务。2.4 节对多无人机监督控制仿真系统中包含的主辅任务进行了详细的说明，这里不再重复。现对开发的仿真系统的自主等级进行补充说明。

在开发多无人机监督控制仿真系统的过程中，由于条件限制，仅对目标识别和武器管理两类任务分别设计了两个自主等级，其具体内容如下：

1. 目标识别

- ◆ 完全手动：操作员顺序完成下列步骤：第一步，获取图像；第二步，识别图像中包含的目标类型；第三步，确认结果。
- ◆ 同意管理：获取图像和确认图像中目标类型由系统自动完成，操作员只对自动系统给出的识别结果批准或否决，这种模式下，系统给出的建议只有在操作员同意后才能生效。

2. 武器管理

- ◆ 完全手动：操作员顺序完成选择武器类型，在武器授权窗口批准授权。
- ◆ 例外管理：系统自动选择武器类型，在攻击授权窗口弹出对话框告知操作员选择的武器类型以及攻击时刻，并留给操作员 10 秒的时间用

于否决系统的输出方案,在倒计时为零时,自动实施系统给出的方案。

基于上述定义,多无人机监督控制仿真系统的自主等级定义如表 5-1 所示:

表 5-1 多无人机监督控制仿真系统的自主等级定义

系统等级	武器管理等级	目标识别等级
1	完全手动	完全手动
2	完全手动	同意管理
3	例外管理	完全手动
4	例外管理	同意管理

在多无人机监督控制仿真系统中,自主等级的改变方法采用了第三章中基于操作员状态的自主等级改变方法。

5.3.2 系统性能指标的计算

在执行任务的过程中,等待时间主要出现在打击目标的过程中,下面以打击第 j 个目标为例说明系统中等待时间的计算。

首先定义事件发生的时刻如下:

- t_{1j} — 任务窗口开始时刻
- t_{2j} — 打开传感器的时刻
- t_{3j} — 显示界面上出现可获取图像信息的时刻
- t_{4j} — 获取图像时刻
- t_{5j} — 目标识别结果确认的时刻
- t_{6j} — 武器授权时间窗口开始时刻
- t_{7j} — 批准武器授权时刻
- t_{8j} — 任务窗口结束时刻

则,定义等待时间如下:

- wt_{1j} — 操作员没有及时打开传感器产生的等待时间, $wt_{1j} = t_{2j} - t_{1j}$
- wt_{2j} — 操作员未能及时获取图像产生的等待时间, $wt_{2j} = t_{4j} - t_{3j}$
- wt_{3j} — 操作员用于识别目标的时间, $wt_{3j} = t_{5j} - t_{4j}$
- wt_{4j} — 操作员用于决定武器授权的时间, $wt_{4j} = t_{7j} - t_{6j}$

上面定义的等待时间中, wt_{1j} 、 wt_{2j} 产生的主要原因有:一是操作员缺少态势感知导致的等待时间;二是事件到达后,操作员正在处理其它事件,处于等待队列中产生的队列等待时间。 wt_{3j} 、 wt_{4j} 属于交互等待时间。

假设任务中需要打击 N 个目标,打击第 k 个目标时产生的等待时间为 wt_k ,则总的等待时间为:

$$wt = \sum_{k=1}^N wt_k \quad (5.4)$$

其中，打击第 k 个目标时产生的等待时间计算规则如下：

- (1) 打击第 k 个目标时产生的等待时间与之前打击 $k-1$ 个目标时产生的等待时间不存在冲突的情况下：

$$wt_k = \sum_{i=1}^4 wt_{ik} \quad (5.5)$$

- (2) 打击第 k 个目标时产生的等待时间与打击第 l 个目标时产生的等待时间存在冲突情况下：

设 $wt_{pk}, p \in (1, 2, 3, 4)$ ，与 $wt_{ql}, q \in (1, 2, 3, 4)$ 存在重叠，又 $wt_{pk} = t_{sk} - t_{rk}$ ， $wt_{ql} = t_{ml} - t_{nl}$ ，则

$$wt_k = \sum_{i=1}^4 wt_{ik} - wt_{pk} + (\max\{t_{rk}, t_{nl}\} - \min\{t_{sk}, t_{ml}\} - wt_{ql}) \quad (5.6)$$

- (3) 如果在武器授权窗口没有批准武器授权，那么整个任务时间窗口均为等待时间，则

$$wt_k = t_{gk} - t_{lk} \quad (5.7)$$

5.3.3 实验过程

实验由三个子实验组成。其中实验一和实验二中采取的功能分配方式是静态的，实验一中仿真系统的自主等级设置为 1，实验二中仿真系统的自主等级设置为 4。实验三中采取动态功能分配方式。

实验过程中，为了使测量的操作员反应时间较为准确，对操作员的注意力作了一条硬性规定，即当红色小飞机图标出现时，操作员必须在发现图标的第一时间点击图标。

8 名同学参加了本实验，每个人需要分别完成这三个子实验。实验过程中，仿真系统的数据记录模块对 5.3.2 节中定义各个时刻以及辅助任务中红色小飞机出现的时刻和操作员点击的时刻进行记录，实验结束后，所有数据形成一个文本文件。

5.3.4 实验结果与分析

5.3.4.1 等待时间

从图 5-3 中可以看出，实验三的等待时间明显低于实验一和实验二。这说明动态功能分配确实减小了系统的等待时间。分析如下：实验一中总的等待时间最大，其主要原因是在实验过程中当多个目标的任务时间窗口重叠时，操作员不能对所

有事件做出处理，导致部分目标错过打击，从而产生大的等待时间；实验二中采取的是高自主等级，但等待时间却不是最小的，其可能的原因是：在该实验过程中操作员主任务工作量比较小，操作员把大量的精力用于辅助任务；或者是出现了“人不在回路”的现象，当主任务事件出现时不能及时处理，导致大的 WTSA。

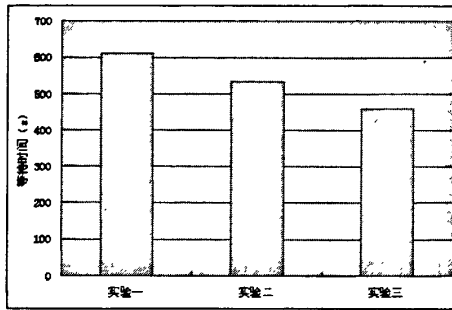


图 5-3 系统等待时间

5.3.4.2 辅助任务成绩

辅助任务成绩是指操作员处理辅助任务的正确率，它反应了操作员在实验过程中的任务负担，成绩越高说明操作员在实验中负担越轻。从图 5-4 中可以看出，辅助任务的成绩完全按照自动化程度的增加而增加。

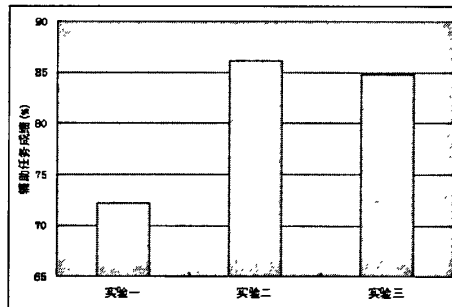


图 5-4 辅助任务成绩

5.3.4.3 辅助任务反应时间

图 5-5 反映的是操作员的平均等待时间，图 5-6 反映的是其中一个实验者在整个实验过程中反应时间的变化趋势。从图 5-5 可以看出，实验三中操作员的平均反应时间最短，而实验二中操作员的平均反应时间最长。造成实验一比实验三的平均反应时间长的主要原因是操作员工作负担较重，没有充裕的精力来处理辅助任务。实验二中操作员的平均反应时间最高说明在实验过程中出现了“人不在回路”现象，图 5-6 中实验 2 的操作员反应时间曲线的一些高峰说明了这一点。造成这一现象的主要原因是，在实验二中操作员的任务负担过轻，导致实验过程中操作员的注意力不能够一直集中于平台。

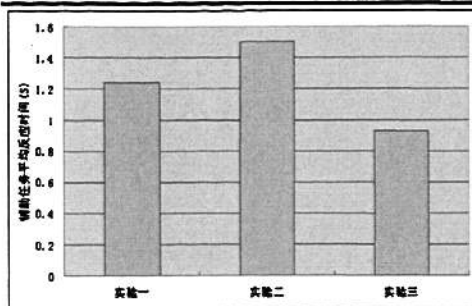


图 5-5 操作员平均反应时间

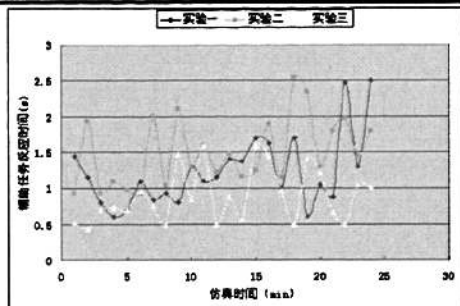


图 5-6 操作员反应时间变化趋势

5.4 基于仿真模型的系统性能研究

5.4.1 离散事件仿真模型的输出

离散事件仿真模型基于事件的性质，使其表现出一些基于时间的性能标准，如，事件队列等待时间和服务器利用率。当把操作员看作是一种有限的资源时，这些标准对于多无人机监督控制系统的性能来说是很关键的。

5.4.1.1 事件等待时间

在离散事件仿真模型中，事件等待时间也即队列等待时间，它表示事件在进入服务器之前必须等待的时间的长度。当与一架 UAV 相关的事件到达等待队列时，表示这架 UAV 需要操作员的交互才能继续保持性能。由图 5-2 可以看出，随着等待时间的增大，系统性能在迅速下降，所以减小等待时间对多无人机监督控制系统很重要。

从 5.2 节的定义知道，系统等待时间包含三部分：交互等待时间、队列等待时间、态势感知等待时间。在建模的过程中，交互等待时间已经包含在服务时间中，态势感知等待时间对系统造成的影响也通过对事件到达过程的修改考虑在其中，所以在离散事件仿真模型中，系统等待时间就局限为队列等待时间。

5.4.1.2 服务器利用率

4.3 节给出了服务器利用率的定义，即操作员处理任务的总时间占总的仿真时间的比率。从前面的分析知道，操作员利用率对系统的影响主要体现在态势感知等待时间上，当操作员利用率过低或者过高时，都会造成大的态势感知等待时间。

操作员利用率的另外一个重要的用途就是作为动态功能分配的触发标准。下一节将会对此做专门讨论。

5.4.2 考虑动态功能分配的离散事件仿真模型

本文第三章从系统自主等级、动态功能分配触发机制以及自主等级改变策略

三个方面对多无人机监督控制系统的动态功能分配问题展开了研究，这里主要从建模的角度，研究如何在模型中反映动态分配的影响。

动态功能分配通过在系统不同自主等级间切换，实现动态地改变操作员和智能组件系统的工作量，不同的工作量对应不同的交互时间，所以不同的自主等级对应的操作员和 UAV 交互时间是不同的。对动态功能分配的建模也正是基于这一点，即同一个事件在不同的自主等级下，所需要的服务时间是不同的，也即事件服务过程对应的概率分布参数是不同的。动态功能分配的另一个重要因素是触发机制，在第三章中讨论了三种触发策略，在这些策略中除了基于紧急事件的策略不需要评价操作员的状况之外，其它都需要评估操作员的状况，或者通过测量或者通过建模。

离散事件仿真模型的输出——操作员利用率 ρ 提供了一个对操作员状态的评价。在离散事件仿真模型中，给 ρ 定义一个阈值集合 $\rho_T = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}$ ， ρ_i 表示不同自主等级对应的操作员利用率阈值。仿真过程中，通过比较 ρ 和 ρ_i ，切换不同的服务过程来实现动态功能分配。图 5-7 显示了考虑了动态功能分配之后的离散事件仿真模型，其中红色曲线即为动态功能分配对原模型的修改。

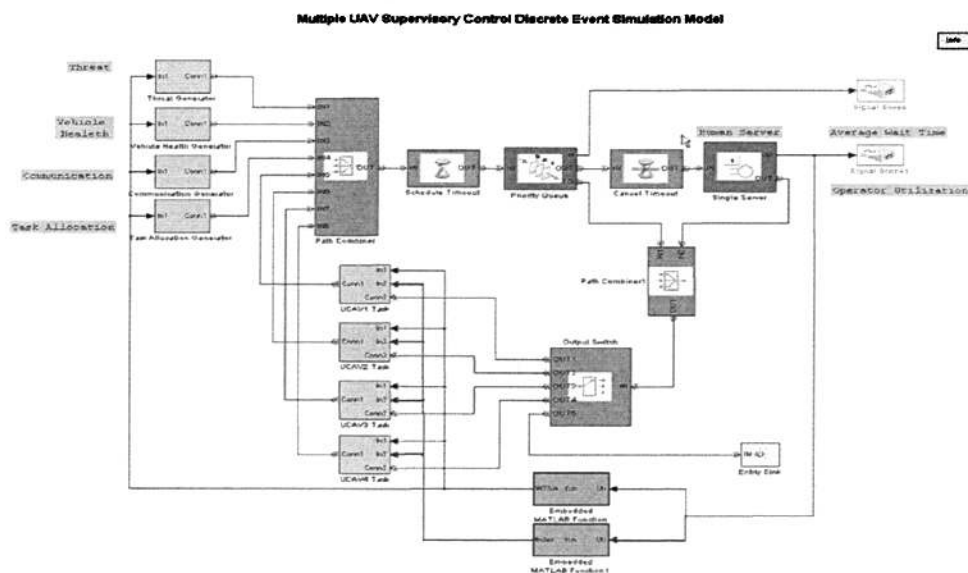


图 5-7 动态功能分配对离散事件仿真模型的影响

5.4.3 仿真过程

为了研究动态功能分配对系统性能的影响，这里设计了三个仿真过程：

- ① 中利用图 4-6 所示的模型进行仿真，其中系统的自主等级设置为 1；
- ② 中利用图 4-6 所示的模型进行仿真，其中系统的自主等级设置为 4；

③ 中采用图 5-7 所示的模型，即考虑了动态功能分配的模型。

仿真中用到的数据来源于仿真系统设计时的初始设定和人在回路的实验。表 4-4 总结了系统中的事件类型。在开发多无人机监督控制仿真系统时，设定了各类事件到达过程所服从的分布；在进行人在回路实验的时候，仿真系统数据记录模块自动记录操作员与事件交互的开始时刻和结束时刻，然后利用 EasyFit 可以得到每个事件的服务过程所服从的分布以及参数。表 5-2 和表 5-3 显示了仿真过程中事件到达过程和服务过程服从的分布。

表 5-2 在不同系统自主等级下目标打击事件的到达和服务过程服从的分布

事件名称	事件类型	系统自主等级	过程	分布	参数
目标打击	2	1	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 300$
			事件服务过程	指数分布	$\lambda = 36.7$
		2	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 300$
			事件服务过程	指数分布	$\lambda = 20.9$
		3	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 300$
			事件服务过程	指数分布	$\lambda = 8.4$
		4	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 300$
			事件服务过程	指数分布	$\lambda = 5.1$

表 5-3 仿真中事件（目标打击事件除外）到达过程和服务过程服从的分布

事件名称	事件类型	过程	分布	参数
突发威胁	1	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 120$
		事件服务过程	伽马分布	$\alpha = 2, \beta = 0.43$
平台故障	1	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 240$
		事件服务过程	伽马分布	$\alpha = 3, \beta = 2.1$
辅助任务	1	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 20$
		事件服务过程	指数分布	$\lambda = 2.3$
通信	1	事件到达过程	指数分布	$\lambda = 90$
		事件服务过程	伽马分布	$\alpha = 3, \beta = 0.24$

5.4.4 仿真结果与分析

利用表 5-2 和表 5-3 所示的模型输入参数，运行仿真模型可以得到①、②、③中仿真模型的输出如图 5-8~图 5-13 所示。

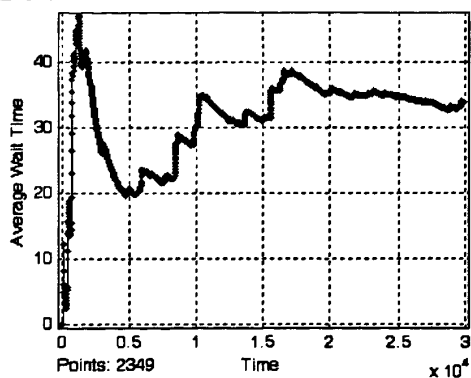


图 5-8 仿真①中队列平均等待时间

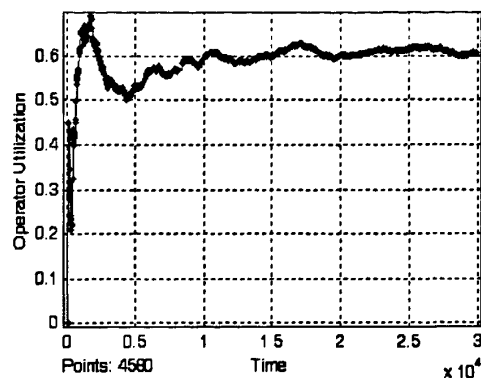


图 5-9 仿真①操作员利用率

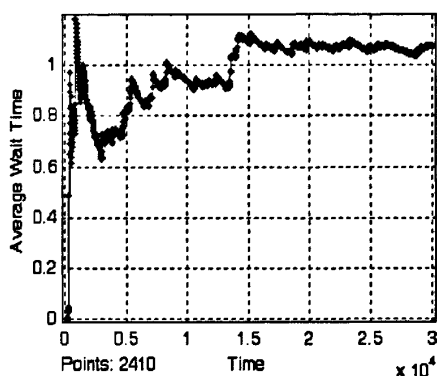


图 5-10 仿真②中队列平均等待时间

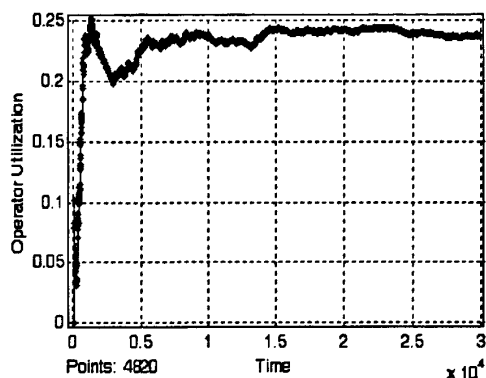


图 5-11 仿真②操作员利用率

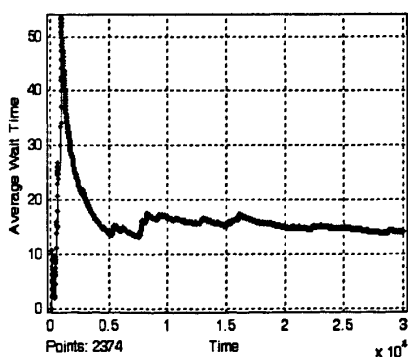


图 5-12 仿真③中队列平均等待时间

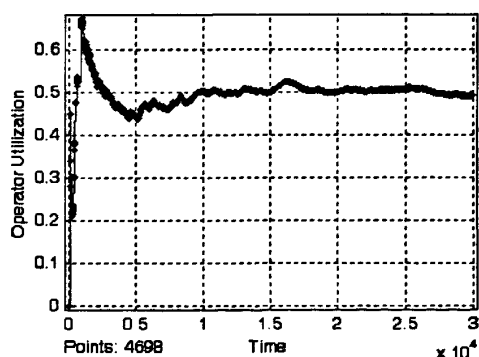


图 5-13 仿真③操作员利用率

图 5-8 和图 5-9 为仿真①中模型的输出,从图中可以看出在多无人机监督控制仿真系统中如采用静态功能分配方式,且系统自主等级设置为 1 时,队列平均等待时间为 35 秒,操作员利用率为 0.6,这组数据反映出系统在该功能分配方式下的特点是:操作员大部分时间处于忙碌状态,而且事件处在等待队列中的时间很长。

图 5-10 和图 5-11 为仿真②中模型的输出,从图中可以看出在多无人机监督控制仿真系统中如采用静态功能分配方式,且系统自主等级设为 4(最高等级)时,队列平均等待时间为 1.1 秒,操作员利用率为 0.23,这组数据反映出系统在该功能分配方式下的特点是:操作员大部分时间处于空闲状态,而且事件处在等待队列中的时间几乎为零。

图 5-12 和图 5-13 为仿真③中模型的输出,从图中可以看出在多无人机监督控制仿真系统中如采用动态功能分配方式时,队列平均等待时间为 13 秒,操作员利用率为 0.49,这组数据反映出系统在该功能分配方式下的特点是:操作员处于忙碌或空闲的时间几乎相等,而且事件在等待队列中的时间较①减小了很多。

通过上面的分析,初步得到的结论可能是仿真②的效果最好,因为其平均队列等待时间最小。但是进一步分析就会发现并非如此,因为忽视了两个重要事实:其一,系统等待时间是由交互等待时间、队列等待时间、态势感知等待时间三部分组成的;其二,当操作员利用率较低时,会导致大的态势感知等待时间,而且 Cummings 等人研究发现在操作员利用率较低时,态势感知等待时间在总的等待时间中占主导地位。在②中,操作员利用率偏低,由此可能会导致“人不在回路”的现象,从而导致大的 WTSA,由此会产生大的系统等待时间。相反,在③中,操作员利用率适中,不会导致大的态势感知等待时间,而且它本身的队列等待时间也较小。

综合以上横向和纵向的对比分析可以得如下结论:仿真③的效果最好,也即多无人机监督控制系统中采用动态功能分配方式能更好地提高系统的性能。

5.5 小结

本章研究了动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。在建立了基于等待时间的系统性能评价指标后,分别采用人在回路实验和模型仿真两种方法,研究了动态功能分配对系统性能的影响。研究结果表明动态功能分配能够有效缩短系统等待时间,提高系统性能。

第六章 总结与展望

6.1 论文工作总结

单操作员控制多架无人机反映了未来无人机发展的一个趋势，研究多无人机监督控制技术具有十分重要的意义。本文针对多无人机监督控制的人机功能分配问题进行了研究。由于静态功能分配存在着一些问题，如可能产生“人不在回路”的现象，因此需要开展多无人机监督控制系统的人机动态功能分配的研究。本文提出了多无人机监督控制系统人机功能动态分配的方法，并研究了动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。本文主要研究了以下内容：

1. 建立了一个基本的多无人机监督控制仿真系统。结合多无人机监督控制的内涵，设计并开发了一个基本的多无人机监督控制仿真系统。重点对仿真系统的图形用户界面进行了设计，在设计过程中进行了决策支持可视化设计。开发的仿真系统为开展多无人监督控制领域的相关研究提供了平台支撑。

2. 研究了多无人机监督控制系统人机功能动态分配的方法。动态功能分配需要解决两个基本问题，即系统自主等级的定义和系统自主等级的改变方法。针对多无人机监督控制系统，定义了系统的自主等级，提出了基于模糊逻辑的自主等级改变方法。重点针对无人机通信正常条件下的自主等级改变方法进行了研究。

3. 建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型。分析了多无人机监督控制系统的人机交互属性和事件类型，描述了事件到达过程及服务过程，建立了多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型；并利用 MATLAB 提供的 SimEvent 工具箱实现了该仿真模型。

4. 研究了动态功能分配对多无人机监督控制系统性能的影响。引入等待时间的概念，建立了系统性能的评价标准。分别采用人在回路实验和模型仿真两种方法，研究了动态功能分配对系统性能的影响。研究结果表明动态功能分配能够有效缩短系统等待时间，提高系统性能。

6.2 进一步工作展望

多无人机监督控制是一种新的控制概念，目前，所有这方面的研究还停留在实验室阶段。由于没有真实的系统，所以本文的研究工作都建立在仿真系统的基础之上。在建立多无人机监督控制的仿真系统和离散事件仿真模型时，做了一些适当的假设，这给论文的研究带来了很大便利，但是也降低了仿真系统和仿真模型准确反映实际系统的能力。在今后的工作中，将在以下几个方面展开进一步的

研究:

(1) 本文中对操作员状态的评估是通过计算操作员的工作量和测量操作员的性能实现的, 这样得到的结果虽然可以用于指导动态功能分配, 但是由于引入了辅助任务, 对原系统却造成了一定的影响。实际上操作员的状态还可以通过测量操作员的生理数据如血压、脑电图、心电图数据来评估操作员的状态, 这样得到的结果一方面准确性比较高, 另一方面也避免了对系统和操作员产生附加的影响。

(2) 在对多无人机监督控制系统建模时, 做了一些适当的简化, 如在实际系统中, 目标识别和武器授权是两个分开的事件, 二者之间有很强的相关性, 但是为了实现方便, 把这两个事件合成为一个事件。这些简化降低了模型反映真实系统的准确性。在今后的研究中, 需要对这些简化的因素作更深入的研究, 以便建立的模型能准确地反映原系统。

(3) 在建立多无人机监督控制的仿真系统和离散事件仿真模型时, 没有考虑 UAV 之间的协同性, 实际上 UAV 之间的协同程度对无人机系统的人机功能分配也具有一定的影响。在今后的工作中, 需要对这个问题进行更深入地研究。

(4) 在本文中只把多无人机监督控制系统的离散事件仿真模型作为研究动态功能分配对系统性能影响的工具, 实际上该模型的用途是比较广泛的, 如可以利用模型来指导人机功能动态分配。在讲述动态功能分配的触发策略时提到一种基于模型的策略, 本文建立的离散事件仿真模型也可以用于触发功能重分配, 但是需要对模型作更深入的研究。

致谢

经过一年多的忙碌，论文终于如期完成，标志着我的硕士学习生涯即将结束。在这段时间里，可以说取得了长足的成长和进步，是我人生历程中一笔宝贵的财富，在此谨借论文完成之际，对所有关心、帮助和鼓励过我的人们致以诚挚的谢意。

首先，衷心感谢我的导师沈林成教授，感谢他这一年多来给我提供了良好的科研条件和学习环境，感谢他对我学习和工作上的教诲和指导。

同时感谢朱华勇老师和陈璟老师，感谢两年多来他们在学习和生活方面给我的许多关心和帮助。

感谢张国忠老师，张老师对论文的选题和进展自始至终给予了密切的关怀、鼓励和指导，与他的讨论总能给我不少启发和建议，使我少走了很多弯路。张老师严谨的治学态度、渊博的知识、敏锐的洞察力、谦虚诚实的处事方式，给我留下了深刻印象，令我终生受益。谨在此表示衷心的感谢！

感谢潘亮老师、薛宏涛老师、张代兵老师、牛轶峰老师，在论文的开题和研究过程中，他们给了我很多的帮助。

感谢相晓嘉老师，在课题研究的过程中，每当遇到程序中的难题，相老师都热心地帮我解决，使我在编程方面有了很大的进步，谨在此表示衷心的感谢！

感谢胡天江师兄、彭辉师兄、彭双春师兄，在论文的研究过程中，他们对论文的研究工作提出了许多富有启发性的建议开拓了我的思路，并在撰写论文的过程中热心地给我修改，谨在此表示衷心的感谢！

感谢师兄李远博士、苏菲博士、王林博士、吴立珍博士、张庆杰博士，本论文的顺利完成离不开他们的指导、帮助和支持。

感谢我的同学黄丁才、周晗、张文斗、黄达，两年多来，我们互相学习、互相探讨、共同成长。感谢他们对我的工作、课题研究和论文写作提出的宝贵意见和建议。

感谢雷鑫师妹，谢谢你为我翻译了很多珍贵的资料，谨在此表示衷心的感谢！

感谢实验室的全体成员，感谢他们在学习、工作和生活方面给我的关心和帮助。

特别感谢我的父亲和母亲，感谢他们对我二十多年的培养和教育，他们是我这么多年来奋斗的动力。

最后，衷心感谢我的室友、同学、朋友和所有关心过我的人。

参考文献

- [1] Utt J, McCalmont J, Deschenes M. Development of a Sense and Avoid System[J]. 2005.
- [2] Harman W.H. TCAS: A System for Preventing Midair Collisions.[J]. MIT Lincoln Laboratory Journal, 1989,2(3).
- [3] Sheridan T.B. Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control Cambridge, MA: MIT Press. 1992.
- [4] Cummings ML, Guerlain S. Developing Operator Capacity Estimates for Supervisory Control of Autonomous Vehicles[J]. 2007.
- [5] Parasuraman R, Sheridan TB. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation[J]. Systems and Humans, 2000,30(3).
- [6] Endsley MR, Kaber DB. Level of automation effects on performance ,situation awareness and workload in a dynamic control task[J]. Ergonomic, 1999, 42(3), 462-492.
- [7] Office of the Secretary of Defense, Unmanned aircraft systems roadmap,2005-2030, DoD, Washington DC 2005.
- [8] Naval Studies Board. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operation. National Research Council, Washington DC 2005.
- [9] Veltman JA, Jansen C, The role of operator state assessment in adaptive automation, 2006.
- [10] Johnson R, Leen M, Goldberg D, Testing Adaptive Levels of Automation for UAV Supervisory Control, 2007.
- [11] Dixon S, Wickens C, Chang D. Mission Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles: A Workload Analysis [J]. Human Factors, 2005: 479-487.
- [12] Dunlap RD. The evolution of a distributed command and control architecture for semi-autonomous air vehicle operations[A]. Moving Autonomy Forward Conference[C], Grantham, UK, 2006.
- [13] Cummings M.L, Mitchell P.J. Predicting Controller Capacity in Remote Supervision of Multiple Unmanned Vehicles[J]. IEEE Systems, Man, and Cybernetics, Part A Systems and Humans. 2008, 38(2): 451-460.
- [14] Corman D, Herm T, Paunicka J. Mixed Initiative Control Of Automa-teams Open Experimentation Platform-Final Technical Report [J]. Boeing Report for AFRL/IF Boeing-STL 2004P0014, 2004.
- [15] Kaber D.B, Endsley M.R. The combined effect of level of automation and adaptive automation on human performance with complex,dynamic control system.[J]. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 41st Annual Meeting (pp. 205-209), 1997.
- [16] Parasuraman R, Byrne E.A. Automation and human performance in aviation.[J]. 2002.
- [17] Hopkin V.D. The impact of automation on air traffic control specialists[J]. 1998.
- [18] Scerbo M.W. Theoretical perspectives on adaptive automation[J]. 1996.
- [19] Karber D.B, Riley J. Adaptive automation of a dynamic control task based on secondary task workload measurement[J]. International Journal of Cognitive Ergonomics, 1999, 3(3), 169-187
- [20] Freeman F.G, Mikulka P.J, Prinzel L.J. Evaluation of an adaptive automation

-
- system using three EEG indices with a visual tracking task[J]. *Biological Psychology*, 2000, 50,61-76.
- [21] Parasuraman R, Byrne E.A. Automation and human performance in aviation[J]. 2002.
- [22] Hilburn B.G, Jorna P. The effect of adaptive air traffic control decision aiding on controller mental workload[J]. 1997.
- [23] A.Russell C. Operator State Estimation for Adaptive Aiding in Uninhabited Combat Air Vehicles[D], 2005.
- [24] 栾义春, 薛红军, 宋笔锋, et al. 无人作战飞机地面控制系统动态功能分配探讨[J]. *人类工效学*, 2007,13(1).
- [25] 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).
- [26] Mitchell P.J, Cummings M.L, Sheridan TB, Mitigation of Human Supervisory Control Wait Times through Automation Strategies, 2005.
- [27] Cummings M.L, Bruni S, Mercier S. Automation Architecture for Single Operator, Multiple UAV Command and Control[J]. *C2*, 2007,1(2).
- [28] Parasuraman R. Adaptive Automation : Sharing and Trading of Control[M]//HOLLNAGEL E. the Handbook of Cognitive Task Design. 2003.
- [29] Sheridan T.B, Verplank W.L. Human and computer control of undersea teleoperators[R]. Man-Machine System Laboratory, Development of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA, 1978.
- [30] Barnes M, Grossman J. The intelligent assistant concept for electronic warfare systems[J]. The intelligent assistant concept for electronic warfare systems. China Lake, CA: Naval Warfare Center, 1985.
- [31] Hancock P.A, Scallen S.F. Allocating functions in human-machine system.[J]. 1998.
- [32] Rouse W.B, Geddes N.D, Curry R.E. An architecture for intelligent interfaces: Outline of an approach to supporting operators of complex systems[J]. *Human-Computer Interaction*, 1987, 3, 87-122.
- [33] Walden R.S, Rouse W.B. A queueing model of pilot decisionmaking in amultutask flight management situation[J]. *IEEE Transactions on system, Man and Cybernetics*, 1978, 8(12), 867-875.
- [34] Revesman M.E, Greenstein J.S. Application of a mathematic model of human decision making for human-computer communication[J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 1986, 16(1), 142-147.
- [35] Morris N.M, Rouse W.B. Studies of dynamic task allocation in an aerial search environment[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1988, 18(3), 376-389.
- [36] Wickens C.D. Processing resources in attention[J]. In R. Parasuraman Varieties of attention (pp.63-101).Orland, FL: Academic Press,1984.
- [37] Billings C.E. Aviation automation-the search for a human-centered approach [J]. Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associate, 1997.
- [38] Negnevitsky M. 人工智能智能系统指南[M]. 机械工业出版社, 2007.
- [39] Dixon S. Mission Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles: A Workload Analysis.[J]. *Human Factors*, 2005: 47(3), 479-487.
- [40] Ruff H.A. Human Interaction with Levels of Automation and Decision-Aid Fidelity in the Supervisory Control of Multiple Simulated Unmanned Air Vehicles[J]. *Presence*, 2002: 11(4), 355-351.
-

- [41] Alighanbari M, How J.P. Cooperative Task Assignment of Unmanned Aerial Vehicles in Adversarial Environments[J]. IEEE American Control Conference, Portland, OR, 2005.
- [42] Schmidt D.K. A queuing analysis of the air traffic controller's workload.[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics,1978: 8(6), 492-498.
- [43] Wickens C.D, Hollands J.G. Engineering Psychology and Human Performance.[J]. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [44] Liu Y, Feyen R. Queuing Network-Model Human Processor:A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine System.[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2006: 13(1), 37-70.
- [45] Tulga M.K, Sheridan T.B. Dynamic Decisions and Work Load in Multitask Supervisory Control[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1980: 10(5), 217-232.
- [46] Endsley M.R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. Human Factors, 1995: 37(1), 65-84.
- [47] Pritchett A.R, Hansman R.J. Use of Testable Responses for Performance-based Measurement of Situation Awareness.[J]. 2000.

作者在攻读硕士期间撰写的学术论文

- [1] 第一作者. 多无人机监督控制的人机动态功能分配研究. 计算机工程与应用. 2009, 45(30):245-248.
- [2] 第四作者. 基于图像质量的无人侦察机航线规划. 微计算机信息. (2009.10 录用).