



面向洪涝灾害的航空应急救援 调度策略研究报告

北京航空航天大学

2020 年 8 月 7 日

目 录

一、	概述.....	1
1.	研究目的.....	1
2.	研究思路.....	1
二、	实施方案.....	3
1.	基于 Anylogic 的仿真推演系统.....	3
2.	任务想定.....	3
2.1	航空应急力量想定要素	3
2.2	洪涝灾害险情想定要素.....	5
3.	部署设置.....	8
4.	任务调度.....	9
4.1	调度规则.....	9
4.2	航空器逻辑设定与实现.....	21
5.	方案评估.....	23
5.1	评估指标	23
5.2	方案评估方法.....	24
5.3	评估指标计算.....	25
5.4	评估结果形式.....	25
6.	具体案例.....	26
6.1	洪涝灾害案例想定	26
6.2	推演结果评估和分析	29

一、 概述

1. 研究目的

针对我国洪涝灾害险情下的国家航空应急力量调度指挥策略需求，围绕现有航空应急力量的救援规划与指挥调度问题，通过洪涝灾害险情态势的快速构建、航空应急力量能力建模、任务推演仿真、综合效能评估等研究，开发面向洪涝灾害的航空应急力量调度指挥仿真推演系统，实现洪涝灾害突发险情的航空应急力量精准调度与指挥提供一定的参考。

2. 研究思路

面对相关洪涝灾害险情和实际救援需求，通过查阅相关资料和历史背景，制定了如下的研究思路，其中图左侧为逻辑流，右侧为仿真对应的数据流。

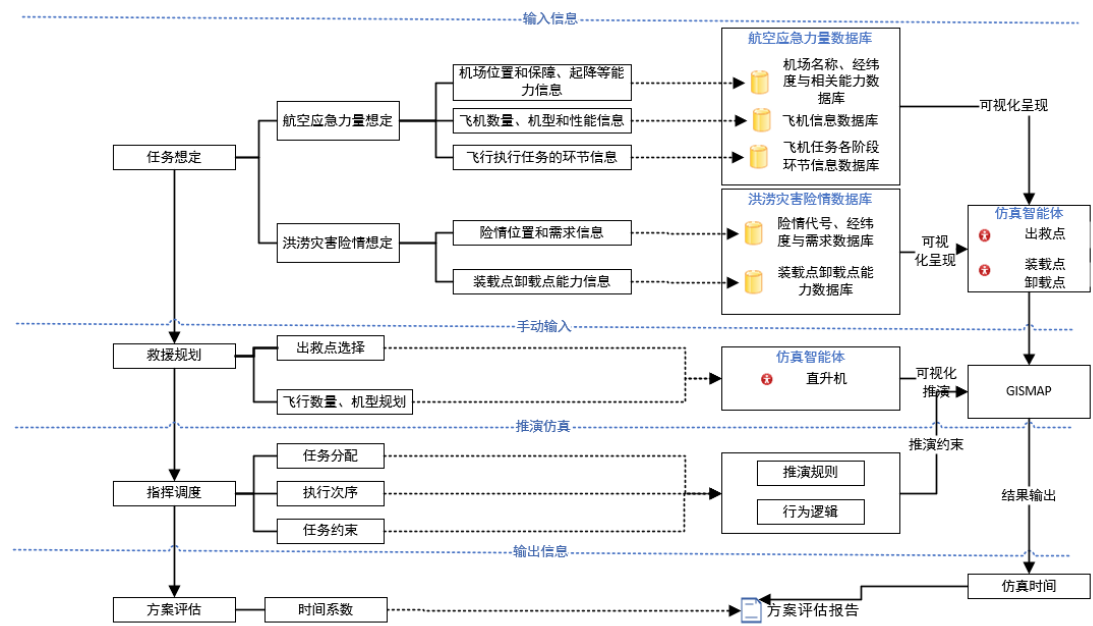


图 1 逻辑流和数据流示意图

逻辑流方面分为四大部分，分别为任务想定，救援规划，指挥调度和方案评估。任务想定为整个任务的输入信息，救援规划为用户手动输入界面，指挥调度是任务的仿真推演环节，方案评估是对仿真推演后的数据进行处理的信息。

具体介绍如下：

- 1) 任务想定为输入信息，包括航空应急力量想定和洪涝灾害险情想定，通过 Excel 等外部文件进行设定，AnyLogic 程序（系统开发平台）运行时读取作为初始信息，其需要通过量化的想定要素的形式进行使用。

其中航空应急力量想定包括：

- a) 机场位置和保障能力信息：各个机场的名称，经纬度坐标位置和以及对应的保障能力，保障能力作为约束条件限制机场同时起降数量和容量。
- b) 飞机数量、机型和性能信息：各个机场飞机的型号以及对应的数量，飞机性能应包括但不局限于巡航速度，最高升限，有效载荷，载油量，油耗，可降机场等级，设备类型等，飞机性能作为约束条件限制飞机的任务执行能力。
- c) 飞机执行任务的环节信息：飞机在执行任务的各个环节（对应到飞行剖面）所需的油耗和时间信息。

洪涝灾害险情想定包括：

- a) 险情位置和需求信息：一个或多个险情的代号以及对应的经纬度坐标，需求信息对应每个险情的救援需求，包括但不局限于人员转移，物资投放，物资转运等，对应包括人员数量，物资数量与重量，转送方式等。
 - b) 装载点和卸载点能力信息：对应转运任务的需提供装载点和卸载点的相关信息，对应的任务执行能力，任务执行能力作为约束条件限制场地同时起降数量和容量。
- 2) 为降低任务复杂度（可将救援调度拆分为需要多少架飞机，飞机对应的型号，保障站点怎么规划，任务分配和执行次序等问题），将指挥调度问题拆分为部署设置与任务调度。对应这两部分，指挥调度为人工设置。在用户完成部署方案设置后，在任务调度的规则约束下进行系统仿真。
 - 3) 通过 AnyLogic 实时推演后得到方案结果，进行数据处理后提供评估结果供用户进行方案评估。

二、 实施方案

1. 基于 Anylogic 的仿真推演系统

系统界面如图所示，分为五个部分，分别为任务想定界面，部署设置界面，推演仿真界面，方案评估界面和 GIS 地图界面。对应研究思路四个部分，任务想定界面是想定信息与 AnyLogic 的对接界面，部署设置界面支持用户手动设置部署方案，推演仿真界面是按照任务调度的规则进行的仿真，方案评估界面具备进行方案评估功能，用户可以比较不同部署方案的优劣。GIS 地图界面会呈现推演仿真过程。



图 2 系统界面

2. 任务想定

2.1 航空应急力量想定要素

对应航空应急力量数据库的设想，进行如下的想定要素设计，航空应急力量想定要素写入航空应急力量数据库中，以 Excel 文件形式储存，便于 AnyLogic

读取后进行可视化呈现和救援规划调度。

1) 航空应急力量分布

出救点：险情周边具备有一定保障能力的机场和临时起降地点，是飞行器从较远机场进行救灾的中转站和补给站。救援航空器会在这些坐标点集结，并在该处装载、加油、接受保障以及等待调度。

装载点和卸载点：对于运入和运出人员、物资和设备类型的任务，救援航空器装载人员、物资和设备的地点为装载点，卸载人员、物资和设备的地点为卸载点。任务的装载点和卸载点均有可能与需求点或出救点重合，比如运入物资类型的任务，装载点从出救点中选择，卸载点为需求点，救援航空器在出救点装载物资，将物资运送到需求点；运出人员类型的任务，装载点为需求点，救援航空器将人员从需求点转运至他处。

2) 各出救点机场的保障能力

通航机场规模一般不大，保障能力有限，出救点机场的保障能力是调度中需要考虑的重要因素之一。出救点机场的保障能力主要包括：

- (1) 停机位数量和机库大小：决定出救点机场能容纳的航空器数量。
- (2) 跑道和起飞区情况：跑道数量（针对固定翼飞机）、接地离地区数量（针对直升机），跑道和/或起飞区尺寸，以及最大允许起降载荷（或最大允许起降尺寸）。这些因素决定了出救点机场允许何种救援航空器的起降，以及同时能起降的最大架数。
- (3) 保障服务：有无塔台、能否提供加油（包括航空煤油和航空汽油）和充电服务，能否提供夜航支持，以及再出动保障流程所需时间。

除此之外，安置人员的安全地点能够同时起降的最大架数也是影响调度的因素之一。

3) 可用航空应急救援装备

各机场可以用于航空应急救援的机型、数量。

4) 各型号可用航空应急救援装备的性能等数据

- (1) 巡航速度：救援航空器的巡航速度和出救点位置、需求点位置共同决定从出救点到需求点的飞行时间。

- (2) 实用升限：救援航空器的升限限制了其能够执行的任务类型。
- (3) 油箱容量：救援航空器的油箱容量影响到航空器参与救援工作的活动半径。
- (4) 油耗：救援航空器的油耗受到载重等因素的影响，油耗影响航空器参与救援工作的活动半径。
- (5) 最大起飞重量：救援航空器的最大起飞重量是出救点机场能否承载该型航空器起降的判断依据。
- (6) 最大载重/座位数量：救援航空器的运输能力决定了出动一个架次能够满足的任务需求量大小。
- (7) 起降的滑跑距离：救援航空器的起降距离决定了其能否在出救点机场的跑道条件下起降。
- (8) 能否吊挂：救援航空器能否执行吊挂、索降等类型的任务，关系到航空应急救援的调度。
- (9) 需要的保障服务：包括救援航空器需要的燃料类型、在地面是否需要充电服务等。这些因素影响到该机型能否在出救点机场得到保障，从而再起飞执行任务。

5) 应急救援人员、物资与设备

为将问题聚焦在航空应急救援的调度上，假设在所有出救点机场，需求点所需的各类救援人员、应急救援物资与大型设备均已集结完毕，可以随时满足向需求点输送人员和物资的要求。

2.2 洪涝灾害险情想定要素

对应洪涝灾害险情数据库的设想，进行如下的想定要素设计，洪涝灾害险情想定要素写入洪涝灾害险情数据库中，以 Excel 文件形式储存，便于 AnyLogic 读取后进行可视化呈现和救援规划调度。

1) 险情任务位置

需要航空应急救援的地点坐标。

2) 当前降水强度

小雨/中雨/大雨/暴雨/大暴雨/特大暴雨。需求点地区当前的降水强度影响

应急救援工作的展开，也影响完成一架次救援任务所需的时间长度。

3) 任务需求

需要进行的救援任务类型、各任务类型对应的需求量以及完成单位需求量的该类型任务的预期时长。洪涝灾害应急救援任务主要有以下类型。

- (1) 吊挂运出人员；
- (2) 机降运出人员；
- (3) 机降运入救援人员；
- (4) 空降运入救援人员；
- (5) 转移伤员，进行空中转运；
- (6) 途中救治与人员抢救；
- (7) 空投物资；
- (8) 封堵圩堤（包括抛投防汛沙袋、砂石）；
- (9) 机降运输救灾物资；
- (10) 吊挂运输大型设备；
- (11) 航空摄影，影像记录与勘查记录；
- (12) 空中巡逻与监控，无人区受灾情况巡视；
- (13) 视察灾情，情报收集；
- (14) 通信中继与联络；
- (15) 现场指挥；
- (16) 卫生防疫。

不同型号航空器完成单位需求量的各类型任务的预期时长不同，在下表中详细说明。预期时长为救援航空器在特定位置执行任务花费的时间，不包括在出救点和需求点之间的飞行时间。

不同任务类型对应需求量的计量单位可能不同，如（1）~（6）类型任务的需求量以人员数量计算，（7）~（10）类型任务的需求量以物资重量计算，（11）~（16）任务的需求量以出动架次计算。

表 1 各机型耗时信息

环节 \ 机型	AC313	EC-135	恩斯特龙 480	九江红鹰 SW-4	罗宾逊 R22	罗宾逊 R44	米-26	小松鼠 AS350
---------	-------	--------	----------	-----------	---------	---------	------	-----------

起飞准备时间	2	2	2	2	2	2	2	2
起飞准备油耗	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞后爬升至巡航高度时间	3	3	2	2	2	2	4	2
起飞后爬升至巡航高度油耗	110	80	80	80	80	80	3000	60
从巡航高度降落到地面停机时间	3	3	2	2	2	2	2	2
从巡航高度降落到地面停机油耗	110	80	80	80	80	80	3000	60
从巡航高度降落到吊运高度时间	3	3	2	2	2	2	2	2
从巡航高度降落到吊运高度油耗	110	80	80	80	80	80	3000	60
从吊运高度提升到巡航高度时间	3	3	2	2	2	2	2	2
从吊运高度提升到巡航高度油耗	110	80	80	80	80	80	3000	60
保障时间	20	20	20	20	20	20	20	20
加油时间	10	10	15	10	10	10	80	10
着陆装载单位人员时间	1	1	1	1	1	1	1	1
吊运装载单位人员时间	2	2	2	2	2	2	2	2
着陆卸载单位人员时间	1	1	1	1	1	1	1	1
吊运卸载单位人员时间	2	2	2	2	2	2	2	2
着陆装载单位物资时间	1	1	1	1	1	1	1	1
吊运装载单位物资时间	2	2	2	2	2	2	2	2
着陆卸载单位物资时间	1	1	1	1	1	1	1	1
吊运卸载单位物资时间	2	2	2	2	2	2	2	2
吊运装载重型设备时间	0	0	0	0	0	0	20	0

4) 需求点起降场地

有无符合要求的广场、操场和宽阔的楼顶等可供直升机起降的场地，有无符合要求的公路等可供固定翼飞机起降的场地，场地能够同时起降的最大数量以及可以停放航空器的最大数量。该要素影响到救援任务的类型以及救援航空器的机型选择，如有相应场地和机型，则可以进行机降运输人员和物资，否则要选择其他机型或选择吊挂和空投等方式开展任务。

5) 次生灾害、衍生事件发生可能性

洪涝灾害可能发生的次生灾害主要是滑坡和泥石流，衍生事件包括等待医疗转运的伤患健康状况恶化、圩堤未封堵完毕导致洪水继续泛滥等。

如果不及时进行救援，需求点地区可能发生次生灾害和衍生事件，使得受灾程度更加严重，需求点增加，需求量增大，救援难度进一步上升。需求点的次生

灾害、衍生事件发生可能性影响到对该需求点展开应急救援任务的紧迫程度，在对多个需求点进行航空应急救援的调度时，这一因素影响到出动架次的分配以及调度的优先等级。

6) 应急响应级别

IV级/III级/ II级/ I级， I级严重程度最高。应急响应级别代表突发事件发生的紧急程度、发展态势和可能造成的危害程度，影响到对该需求点展开应急救援任务的紧迫程度，影响到险情任务的优先级。

3. 部署设置

部署设置为用户手动设置，其界面如下：

部署设置

纬度： 经度：

选择进行部署设定的出救点

选择对应型号的飞机并设置部署数量

确认当前出救点的当前型号飞机数量

重置当前出救点的当前型号飞机数量

全部重置

显示当前出救点的当前型号飞机数量

全部显示

确认部署并锁定

图 3 部署设置界面

部署设置需要用户确定出救点与其相对应的飞行数量与型号。用户需要在任务想定中设定的出救点中进行选择并设置相应的飞行数量与型号。若不在该出救点进行飞机部署，则该出救点下对应的飞机型号的数量均为 0。

如图所示：用户先进行出救点的选择，然后对应该出救点，依次选择飞机型号并进行数量设定。每次数量输入后点击“确认当前出救点的当前型号飞机数量”按钮完成数据输入。点击“重置当前出救点的当前型号飞机数量”按钮删除当前已输入的数据，点击“显示当前出救点的当前型号飞机数量”按钮会将当前输入

数据展示在监视器中。点击“全部重置”按键会删除所有输入的数据。点击“全部显示”按键会在监视器中显示所有输入的数据。点击“确认部署并锁定”按键完成部署设置，可以进行下一步的相关仿真。

4. 任务调度

任务调度是利用 AnyLogic 在设定的调度规则下对确定的任务想定和部署方案的仿真。用户完成任务想定输入与部署设置操作后，点击“开始仿真”按键便可进行方案仿真。



图 4 推演仿真界面

4.1 调度规则

- (1) 根据任务想定和手动部署方案，可能有多个险情任务和多个出救点。每个险情任务的转入地与转出地确定且转运需求确定。推演开始时，推演开始时，所有救援航空器根据部署方案从各个机场飞向出救点。在出救点接受保障后待命。需求点的需求发生变化，或某架救援航空器的状态发生变化，视为一次态势更新。每次出现态势更新时，指挥中心按照各险情任务的优先级依次发布求助，并在全部可用航空器的范围中，为各任务选择最优救援航空器进行救援，直到所有可用航空器均被派出。
- (2) 机场、需求点以及人员安置地点能够同时起飞的架次有限，若需要从同一场地起飞的航空器数量大于机场能够同时起飞的数量，则所有航空器按照最大起飞重量排队起飞，最大起飞重量最大的航空器先起飞。
- (3) 态势更新的出现包括两种情况，第一种为有救援航空器进入空闲状态，第二种为险情任务需求量变化。
- (4) 险情任务发布的优先级与当地应急响应级别、次生灾害及衍生事件发生可能性、总的需求量有关。响应级别越高、次生灾害及衍生事件发生可能性越大、总的需求量越大，该需求点的优先级越高。优先级高的险情任务将优先发布求助信息。

- (5) 为某一险情任务的发布选择救援航空器时，在所有处于空闲状态的救援航空器中选择救援能力最大的航空器，救援能力由适合任务类型、若立即同时起飞能够最早到达装载点、能够满足需求量最大几个因素加权得到。若有多架空闲状态的航空器救援能力相同，则从中随机选择一架航空器。若无合适航空器，则进行等待，待下一次出现态势更新时再进行选择，以此类推。
- (6) 出救点的停机位（包括机库和机坪）数量有限，一架航空器降落则占用一个停机位，停机位全部占满时，其他航空器无法在此出救点降落，需要选择其他地点降落。出救点能够同时保障的航空器数量有限，如果某出救点处等待保障的航空器数量大于出救点的保障能力，则航空器排队接受保障。
- (7) 救援航空器状态分为空闲或占用。接到任务后至完成任务前、在出救点等待保障或进行保障时、返航加油过程对应的状态为占用。救援航空器在出救点接受保障后待命与救援航空器在完成当前险情任务的时刻为空闲时刻。
- (8) 在接到任务后，救援航空器需要根据任务需求装载人员、物资或设备。装载完毕后，救援航空器起飞执行任务，直到任务完成，期间可能在空中盘旋或在地面等待，但不会中断该任务。
- (9) 配有吊挂设备的救援航空器可以以吊挂、索降等方式执行任务，也可以通过降落执行任务。无吊挂设备的救援航空器不能以吊挂方式执行任务，只能通过降落执行任务。
- (10) 对于吊运大型设备的任务，需求量不可拆分，必须选择运载能力大于单台设备重量的航空器，将单台设备一次性运入需求点。对于其他运送人员和物资的任务，需求量可以拆分，由多架次任务完成，最小的拆分单元为 1 人或 100kg。
- (11) 各类任务详情如下，执行任务过程的逻辑框图见图 5，任务剖面图与各阶段耗时、耗油和飞行高度见表 2~表 7。
- a) 对于吊挂运出人员类任务，装载点为该架次任务的需求点，航空器在装载点悬停，以吊挂的方式完成对人员的救援任务；卸载点为事先在想定中确定的安全地点，航空器在卸载点完成人员的卸载并取消悬停进入巡航高度，视为该架次任务完成。
- b) 对于机降运出人员类任务，装载点为该架次任务的需求点，航空器在装载

点降落，人员登机后起飞，完成对人员的救援任务；卸载点为事先在想定中确定的安全地点，航空器在卸载点完成人员的卸载，视为该架次任务完成。

- c) 对于空降运入人员类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点搭载救援人员，如果航空器正在出救点，则选择当前所在出救点作为装载点；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点悬停，以吊挂方式完成人员的卸载并取消悬停进入巡航高度，视为该架次任务完成。
- d) 对于机降运入人员类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点搭载救援人员，如果航空器正在出救点，则选择当前所在出救点作为装载点；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点降落，完成人员的卸载，视为该架次任务完成。
- e) 转移伤员类任务按照需求点能否起降分为吊挂运出或机降运出，具体情况与吊挂运出人员类任务或机降运出人员类任务一致。
- f) 途中救治与人员抢救类任务的进行时间与转移伤员类任务有重合，在伤患上机后、航空器到达卸载点前完成，不需要花费额外时间。
- g) 对于空投物资类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点装载物资；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点悬停，空投物资，并取消悬停重新起飞进入巡航高度，视为该架次任务完成。
- h) 对于机降运输救灾物资类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点装载物资；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点降落，完成物资的卸载，视为该架次任务完成。
- i) 对于封堵圩堤类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点装载防汛沙袋和砂石；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点悬停，空投沙袋和砂石，并取消悬停进入巡航高度，视为该架次任务完成。
- j) 对于吊挂运输大型设备类任务，装载点为就近选择的可降落的出救点，航空器在装载点吊装大型设备；卸载点为该架次任务的需求点，航空器在卸载点悬停，将吊挂的大型设备卸载到地面，并取消悬停进入巡航高度，视为该架次任务完成。

k) 对于非转运类任务，即航拍、指挥、巡逻、防疫等类型的任务，装载点与卸载点均为该架次任务的需求点，航空器执行该架次任务时，不需要实际的装载和卸载流程，不计入在该需求点开展任务的航空器数量，也不需要在此需求点处排队执行任务。抵达需求点坐标并在空中停留所需时间后，视为该架次任务完成。

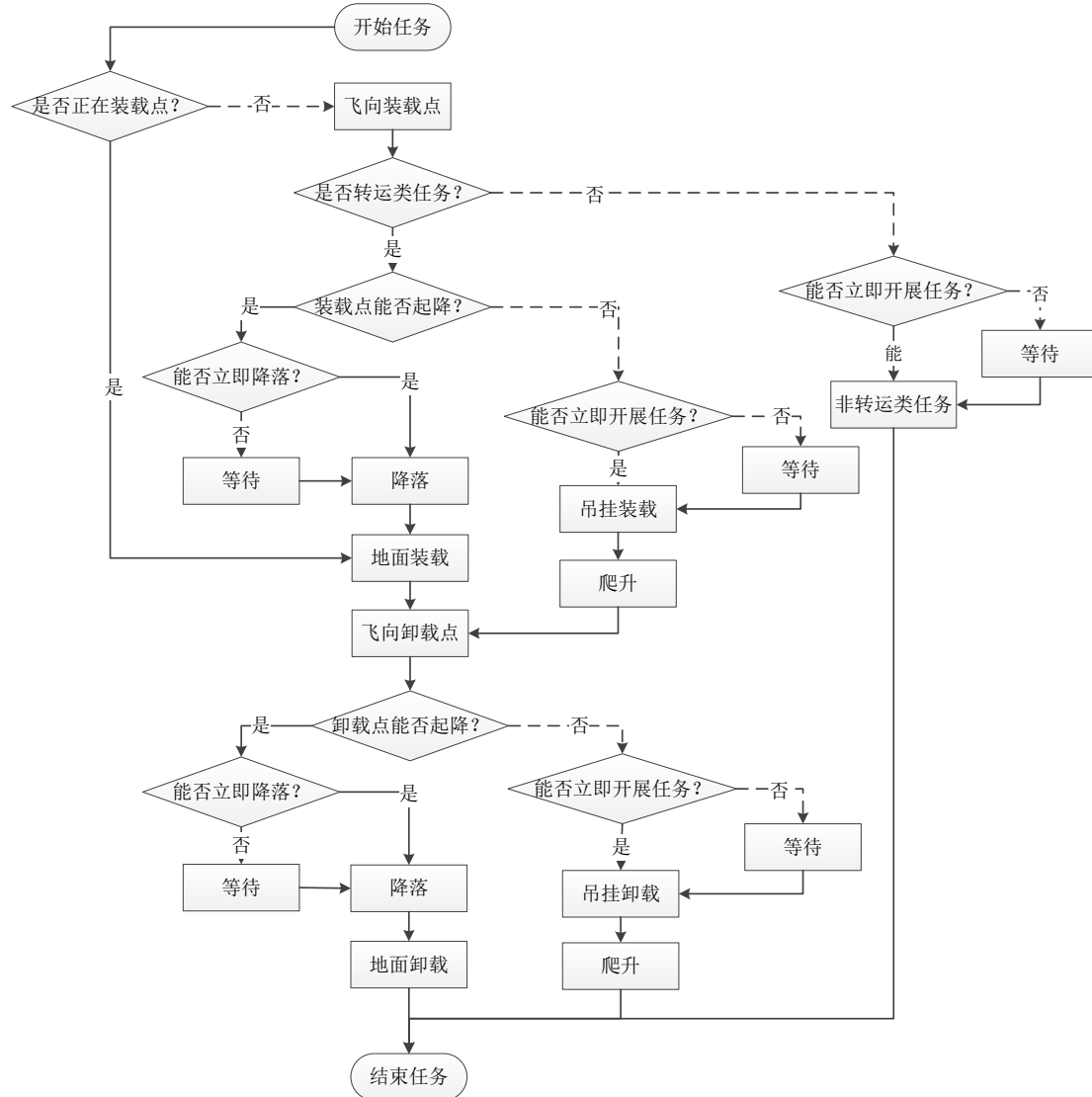


图 5 执行任务流程图

(12) 每一架次救援航空器到达装载点完成装载时，对应险情任务的需求量减去该架次可以满足的需求量，态势更新；若无救援航空器响应，则等待下一次态势更新，以此类推。

(13) 对于需要在需求点或安置人员地点降落的救援任务，救援航空器到达该地点准备降落时，如果该地点停放航空器的数量未达到上限则可以降落，若

达到上限则无法立即降落，航空器在空中盘旋等待。若有多架航空器等待降落，按照剩余油量百分比排队降落，剩余油量百分比低的先降落。

- (14) 对于需要在需求点上空悬停开展的救援任务，不允许多架航空器同时在同一需求点开展任务。救援航空器到达该地点准备开展任务时，如果该位置有航空器正在执行同类任务，则航空器在空中盘旋等待，按照剩余油量百分比排队开展任务，剩余油量百分比低的先开展。

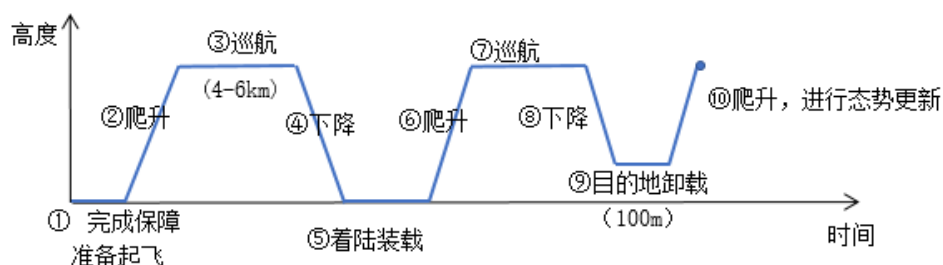
《中国民用航空飞行规则》第 151 条：凡两架以上直升机，使用一个作业基地往返作业点进行机外载荷飞行时，必须保持通信联络，采取统一制定的同方向运行圆圈航线。两机同航向时，必须保持 500 米以上的间隔。

- (15) 救援航空器在态势更新时选择是否执行新险情任务时，如果剩余油量低于油箱容量的 30%，则立刻选择返航加油行动，返回原出救点降落接受保障。随后进入空闲状态。如果剩余油量高于油箱容量的 30%，则在满足规则的情况下可以继续执行新任务。如果本次态势更新没有选择执行新险情任务，则返回原出救点降落接受保障，之后进入空闲状态，可以接受调度。

《中国民用航空飞行规则》第 28 条：航行备用油量，应当根据天气情况、航空器性能、航程和备降机场远近等情况确定，国内飞行的航行备用油量，应当保证航空器到达着陆机场不能着陆而飞抵最远的备降机场上空，还有不少于四十五分钟的油量。……直升机的航行备用油量，通常不得少于三十分钟。

- (16) 全部任务的需求量为 0 后即为救援任务完成，所有任务完成且所有航空器回到出救点后，视为推演完成。

表 2 吊挂运送物资任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度

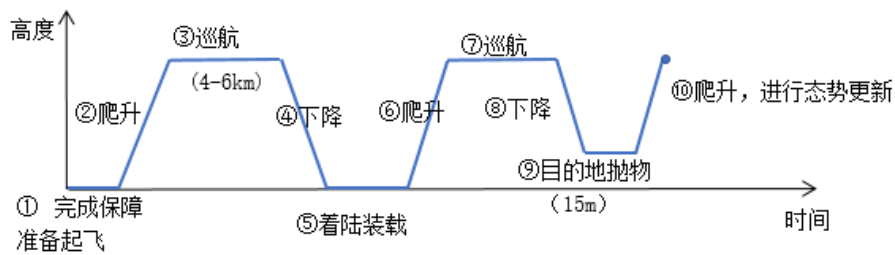


阶段	时间 (min)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	20	20	20	20	20	20	20	20
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
物资装载	装载单位质量物资所需时间*装载量							
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
目的地卸载	卸载单位质量物资所需时间*卸载量							
爬升并进行态势更新	5	5	5	5	5	5	5	5

阶段	耗油率 (L/h)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
目的地卸载	32	32	320	60	60	3000	48	48
爬升并进行态势更新	32	32	320	60	60	3000	48	48

阶段	高度 (m)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-800	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	800	800
下降	800-0	800-0	900-0	900-0	800-0	800-0	800-0	800-0
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-800	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	800	800
下降	800--100	800--100	900--100	900--100	800--100	800--100	800--100	800--100
目的地卸载	100	100	100	100	100	100	100	100
爬升并进行态势更新	100-800	100-800	100-900	100-900	100-800	100-800	100-800	100-800

表 3 抛投物资任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度

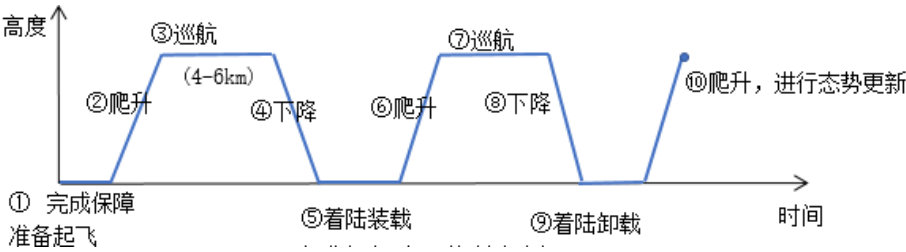


阶段	时间 (min)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	20	20	20	20	20	20	20	20
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
物资装载	装载单位质量物资所需时间*装载量							
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
目的地抛物	卸载单位质量物资所需时间*卸载量							
爬升并进行态势更新	5	5	5	5	5	5	5	5

阶段	耗油率 (L/h)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
目的地抛物	32	32	320	60	60	3000	48	48
爬升并进行态势更新	32	32	320	60	60	3000	48	48

阶段	高度 (m)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-700	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	700	800
下降	800-0	800-0	900-0	900-0	800-0	800-0	700-0	800-0
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-700	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	700	800
下降	800--15	800--15	900--15	900--15	800--15	800--15	700--15	800--15
目的地抛物	15	15	15	15	15	15	15	15
爬升并进行态势更新	15-800	15-800	15-900	15-900	15-800	15-800	15-700	15-800

表 4 直升机机降运送物资任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度

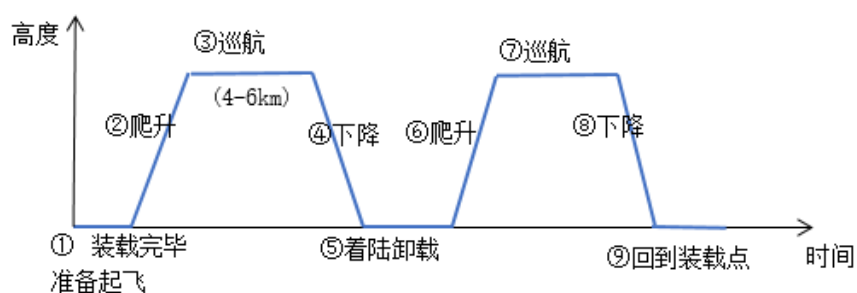


阶段	时间 (min)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	20	20	20	20	20	20	20	20
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
物资装载	装载单位质量物资所需时间*装载量							
起飞爬升	3	3	2	2	2	2	2	2
巡航	飞行距离/实际飞行速度							
下降	3	3	2	2	2	2	2	2
着陆并卸载	卸载单位质量物资所需时间*卸载量							
爬升并进行态势更新	5	5	5	5	5	5	5	5

阶段	耗油率 (L/h)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	32	32	320	60	60	3000	48	48
巡航	22.4	22.4	224	42	42	2100	33.6	33.6
下降	32	32	320	60	60	3000	48	48
着陆并卸载	32	32	320	60	60	3000	48	48
爬升并进行态势更新	32	32	320	60	60	3000	48	48

阶段	高度 (m)							
	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-800	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	800	800
下降	800-0	800-0	900-0	900-0	800-0	800-0	800-0	800-0
物资装载	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-800	0-800
巡航	800	800	900	900	800	800	800	800
下降	800-0	800-0	900-0	900-0	800-0	800-0	800-0	800-0
着陆并卸载	0	0	0	0	0	0	0	0
爬升并进行态势更新	0-800	0-800	0-900	0-900	0-800	0-800	0-800	0-800

表 5 固定翼飞机机降运送物资任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度

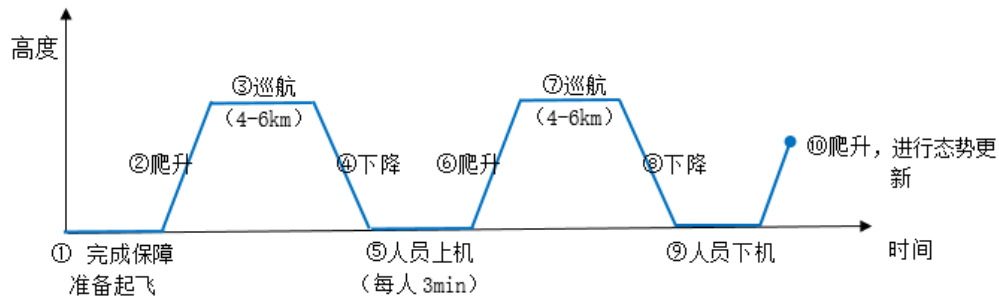


阶段	时间 (min)						
	钻石DA42	西锐SR-20	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	小鹰500
完成装载并准备起飞	30	30	30	30	30	30	30
起飞爬升	巡航高度/爬升率						
巡航	飞行距离/实际飞行速度						
下降	巡航高度/下降率						
着陆并卸载	装载单位质量物资所需时间*装载量						
起飞爬升	巡航高度/爬升率						
巡航	飞行距离/实际飞行速度						
下降	巡航高度/下降率						
降落回到装载点	卸载单位质量物资所需时间*卸载量						

阶段	耗油率(L/h)						
	钻石DA42	西锐SR-20	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	小鹰500
完成装载并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	48	48	16	96	96	144	48
巡航	33.6	33.6	11.2	67.2	67.2	100.8	33.6
下降	48	48	16	96	96	144	48
着陆并卸载	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	48	48	16	96	96	144	48
巡航	33.6	33.6	11.2	67.2	67.2	100.8	33.6
下降	48	48	16	96	96	144	48
降落回到装载点	0	0	0	0	0	0	0

阶段	高度 (m)						
	钻石DA42	西锐SR-20	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	小鹰500
完成装载并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-800	0-700	0-900	0-700	0-700
巡航	800	800	800	700	900	700	700
下降	800-0	800-0	800-0	700-0	900-0	700-0	700-0
着陆并卸载	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0-800	0-800	0-800	0-700	0-900	0-700	0-700
巡航	800	800	800	700	900	700	700
下降	800-0	800-0	800-0	700-0	900-0	700-0	700-0
降落回到装载点	0	0	0	0	0	0	0

表 6 机降运送人员任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度

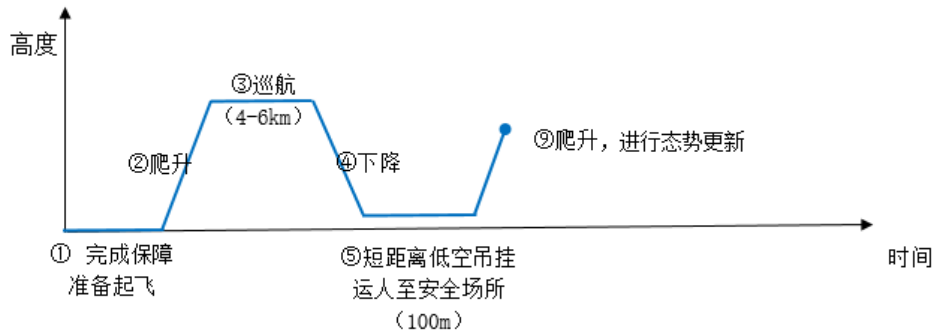


阶段	时间 (min)														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
起飞爬升	10	25	15	15	15	25	25	巡航高度/爬升率	40	15	15	10	10	巡航高度/爬升率	10
巡航	飞行距离/实际飞行速度														
到达装载点并降落	15	30	20	20	20	30	30	巡航高度/爬升率	40	20	20	15	15	巡航高度/爬升率	15
人员上机	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人
起飞爬升	10	25	15	15	15	25	25	巡航高度/爬升率	40	15	15	15	10	巡航高度/爬升率	10
巡航	飞行距离/实际飞行速度														
降低高度	15	30	20	20	20	30	30	巡航高度/爬升率	40	20	20	15	15	巡航高度/爬升率	15
人员下机	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人
爬升并进行态势更新															

阶段	油耗/L														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	8	耗油率*爬升时间	15	10	150	6	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	60	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	20	耗油率*爬升时间	20
巡航	系数(≈0.7)*耗油率*仿真飞行时间														
到达装载点并降落	12	耗油率*降落时间	20	12	200	8	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	80	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	25	耗油率*降落时间	30
人员上机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	8	耗油率*爬升时间	15	10	150	6	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	60	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	20	耗油率*爬升时间	20
巡航	系数(≈0.7)*耗油率*仿真飞行时间														
降低高度	12	耗油率*降落时间	20	12	200	8	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	80	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	25	耗油率*降落时间	30
人员下机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
爬升并进行态势更新															

阶段	高度 (m)														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0→800m	0→800m	0→700m	0→700m	0→900m	0→800m	0→900m	0→800m	0→700m	0→800m	0→700m	0→700m	0→500m	0→700m	0→700m
巡航	800m	800m	700m	700m	900m	800m	900m	800m	700m	800m	700m	700m	500m	700m	700m
到达装载点并降落	800m→0m	800m→0m	700m→0m	700m→0m	900m→0m	800m→0m	900m→0m	800m→0m	700m→0m	800m→0m	700m→0m	700m→0m	500m→0m	700m→0m	700m→0m
人员上机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0→800m	0→800m	0→700m	0→700m	0→900m	0→800m	0→900m	0→800m	0→700m	0→800m	0→700m	0→700m	0→500m	0→700m	0→700m
巡航	800m	800m	700m	700m	900m	800m	900m	800m	700m	800m	700m	700m	500m	700m	700m
降低高度	800m→0	800m→0	700m→0m	700m→0m	900m→0	800m→0	900m→0	800m→0	700m→0m	800m→0	700m→0m	700m→0m	500m→0m	700m→0m	700m→0m
人员下机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
爬升并进行态势更新															

表 7 吊挂运送人员任务剖面图及详细耗时、耗油、飞行高度



阶段	时间 (min)														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
起飞爬升	10	25	15	15	15	25	25	巡航高度/爬升率	40	15	15	10	10	巡航高度/爬升率	10
巡航	飞行距离/实际飞行速度														
到达装载点并降低高度	15	30	20	20	20	30	30	巡航高度/爬升率	40	20	20	15	15	巡航高度/爬升率	15
吊挂人员上机	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人
起飞爬升	10	25	15	15	15	25	25	巡航高度/爬升率	40	15	15	15	10	巡航高度/爬升率	10
巡航	飞行距离/实际飞行速度														
降低高度	15	30	20	20	20	30	30	巡航高度/爬升率	40	20	20	15	15	巡航高度/爬升率	15
吊挂人员转移	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人	3min/人
爬升并进行态势更新															

阶段	油耗/L														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	8	耗油率*爬升时间	15	10	150	6	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	60	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	20	耗油率*爬升时间	20
巡航	系数(≈0.7)*耗油率*仿真飞行时间														
到达装载点并降低高度	12	耗油率*降落时间	20	12	200	8	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	80	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	25	耗油率*降落时间	30
吊挂人员上机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	8	耗油率*爬升时间	15	10	150	6	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	60	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	20	耗油率*降落时间	20
巡航	系数(≈0.7)*耗油率*仿真飞行时间														
降低高度	12	耗油率*降落时间	20	12	200	8	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	耗油率*降落时间	80	耗油率*爬升时间	耗油率*爬升时间	25	耗油率*爬升时间	30
吊挂人员转移	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
爬升并进行态势更新															

阶段	高度 (m)														
	钻石DA42	西锐SR-20	罗宾逊R44	罗宾逊R22	AC313	海王Searey	赛斯纳208	P750	运-5	EC-135	小松鼠AS350	米-26	九江红鹰SW-4	小鹰500	恩斯特龙480
完成保障并准备起飞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0→800m	0→800m	0→700m	0→600m	0→900m	0→800m	0→900m	0→900m	0→700m	0→900m	0→800m	0→800m	0→600m	0→700m	0→700m
巡航	800m	800m	700m	600m	900m	800m	900m	900m	700m	900m	800m	800m	600m	700m	700m
到达装载点并降低高度	800m→0m	800m→0m	700m→0m	600m→0m	900m→0m	800m→0m	900m→0m	900m→0m	700m→0m	900m→0m	800m→0m	800m→0m	600m→0m	700m→0m	700m→0m
吊挂人员上机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
起飞爬升	0→150m	0→150m	0→700m	0→600m	0→900m	0→150m	0→900m	0→900m	0→700m	0→900m	0→150m	0→150m	0→600m	0→700m	0→700m
巡航	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m	150m
降低高度	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m	150m→100m
吊挂人员转移	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m
爬升并进行态势更新															

4.2 航空器逻辑设定与实现

根据以上规则，可以进行救援航空器行为逻辑的整理。首先，救援航空器根据部署设置的方案向出救点进行部署。救援航空器部署到出救点后进行保障作业随即进入空闲状态（进行态势更新），进而根据任务需求与救援航空器能力进行决策判断是否满足任务需求，若满足进入油量判断，不满足进入空闲状态判断。油量判断根据规则进行剩余油量是否大于 30%，若大于则认为该救援航空器有能力完成该次任务，进行险情任务执行。若小于表示救援航空器需返回出救点进行保障补给。险情任务执行分为装载点人员物资装载（险情任务执行需求量改变，进行态势更新），卸载点人员物资卸载两部分，完成卸载后当前险情任务执行完毕，随机进入空闲状态（进行态势更新）进行下次决策。在空闲状态判断中，若空闲状态在非出救点，则当前救援航空器返回出救点进行保障补给。若在出救点，则直接进行保障补给（救援航空器为最大值则跳过保障补给），随后进入空闲状态（进行态势更新）。所有任务完成且当前救援航空器回到出救点后，该救援航空器行为结束。

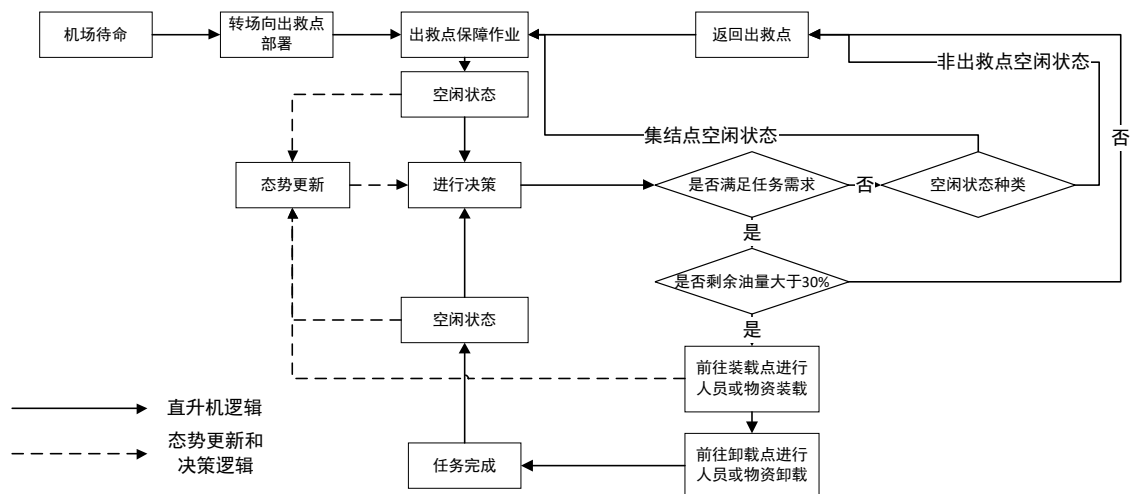


图 6 飞行器总体逻辑图

其中，相关逻辑具体实现如下：

转场向出救点部署：

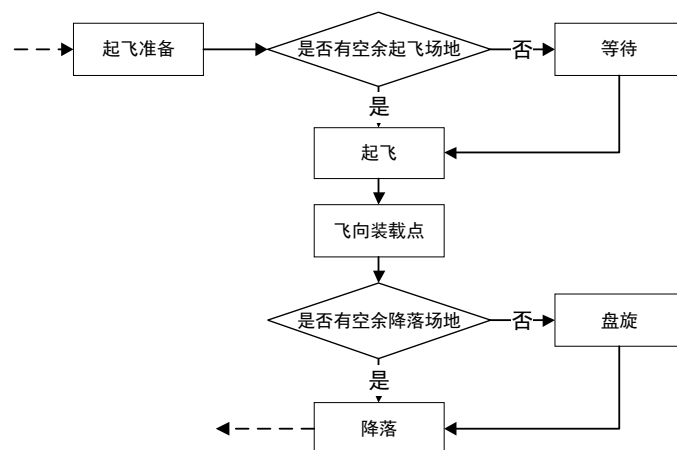


图 7 转场向出救点部署逻辑图

前往装载点进行人员或物资装载:

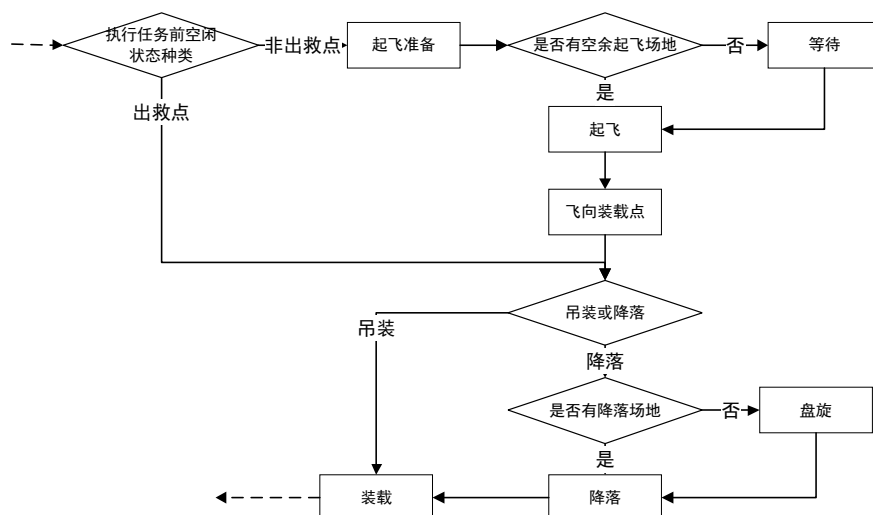


图 8 前往装载点进行人员或物资装载逻辑图

前往卸载点进行人员或物资卸载:

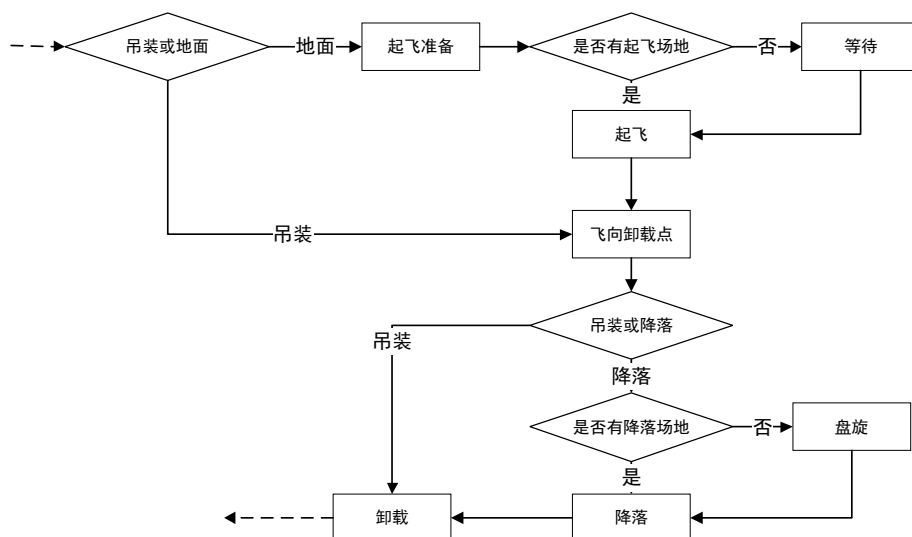


图 9 前往卸载点进行人员或物资卸载逻辑图

以上逻辑在 AnyLogic 中对应飞机智能体的状态图如下所示：

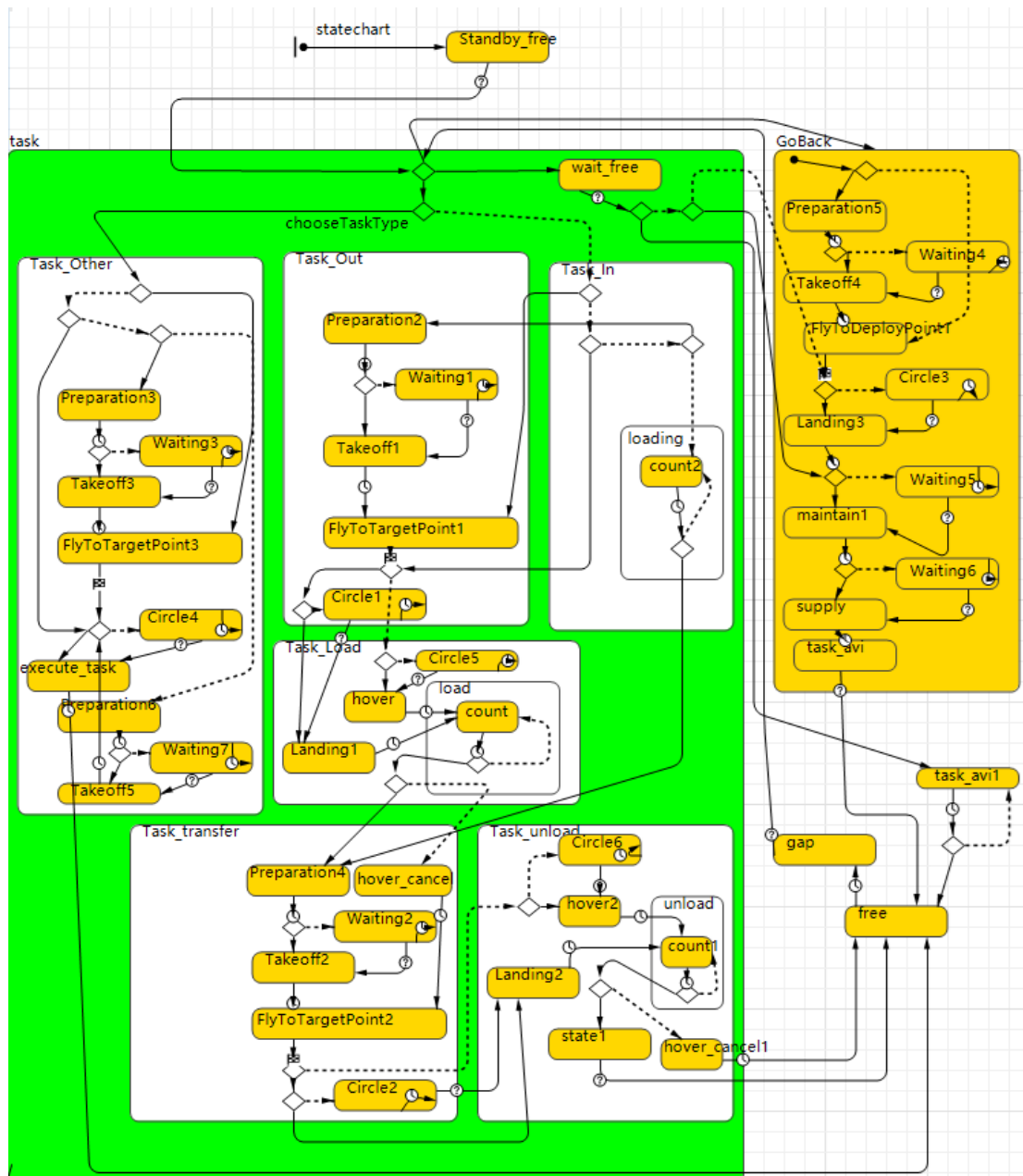


图 10 飞行器智能体状态迁移图

5. 方案评估

5.1 评估指标

从任务耗时和获救人数两个角度建立评估指标，说明如下：

1) 任务耗时分为两类：人员转移任务耗时和物资转运任务耗时。人员转移任务

总耗时为完成人员转移任务的各个阶段耗时总和，物资转运任务总耗时为完成物资转运任务的各个阶段耗时总和。

表 8 人员转移任务阶段界定说明表

阶段说明 阶段耗时	起始时间	结束时间
救援等待时间	下达转移被困人员命令	航空器到达装载点
救援交接耗时	航空器到达装载点	被困群众被运送至装载点降落并完成交接
人员转移耗时	航空器开始转移被困人员	被困人员运送至卸载点并完成交接
救人总耗时（单人）	下达转移被困人员命令	该被困人员被运送至卸载点并完成交接
任务总耗时	下达人员转移任务	完成最后一批被困人员转移

表 9 物资转运任务阶段界定说明表

阶段说明 阶段耗时	起始时间	结束时间
转运等待时间	下达转运物资命令	航空器到达装载点
转运交接耗时	航空器到达装载点	完成物资装载并完成交接
物资转运耗时	航空器开始转运物资	航空器到达卸载点 完成机降运物/吊挂运物/吊挂抛物
任务总耗时	下达物资转运任务	完成最后一批物资转运

2) 获救人数：以仿真推演完成情况为准。

5.2 方案评估方法

以人均转运耗时、单位重量物资转运耗时和获救人数为评价指标，耗时越少，获救人数越多则方案越优。人越多或物资数量越多，救援越困难，方案越难实施。增设耗时系数 μ 和难度系数 $1/\omega$ ，对应值如下表：

表 10 被困人数与耗时系数对应说明

被困人数	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

耗时系数 $1/\mu$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
--------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

表 11 转运物资重量与难度系数对应说明

转运物资重量 (kg)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
难度系数 $1/\omega$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0

5.3 评估指标计算

1) 人员转移任务人均耗时

若该次方案调度进行 n 次人员转移，其中 t_i 是第 i 次转移受困群众的阶段总耗时， $1/\mu_i$ 是该次转移受困群众对应的耗时系数，则此任务中人均耗时为：

$$T_{人} = \frac{\sum_i^n t_i * \mu_i}{n}$$

2) 物资转运任务单位重量物资耗时

若该次方案调度进行 m 次物资转运，其中 t_j 是完成第 j 次准运物资的阶段总耗时， $1/\omega_j$ 是该次物资转运对应的难度系数，则此任务中转运单位重量物资耗时为：

$$T_{物} = \frac{\sum_j^m t_j * \omega_j}{m}$$

5.4 评估结果形式

对仿真结果的评估形式如下：

任务想定情况下，进行 x 次调度安排和仿真推演。其中第 1 次仿真推演中，完成人员转移任务的人均耗时为： ；完成物资转运任务的单位重量物资耗时为： ；其中第 x 次仿真推演中，完成人员转移任务的人均耗时为： ；完成物资转运任务的单位重量物资耗时为： 。

进行比较可得，第 x 次仿真推演人均耗时/转运单位重量物资耗时较少，对应调度安排较优，具体计算过程见下表。

表 12 方案评估表

仿真推演过程		仿真推演结果								仿真评估指标		
时间	仿真推演阶段	人员转移				物资转运				人均耗时	单位物资重量耗时	方案总均耗时
0:00:00		方案1	任务名称	人员转移人数	耗时系数1/μ	任务耗时	任务名称	物资转运数量	难度系数1/ω	任务耗时		
xxxxxxx						t1				t1		
						t2				t2		
						t3				t3		
							
		方案2				t1				t1		
						t2				t2		
						t3				t3		
							

6. 具体案例

按照本研究报告中的想定要素和规则进行了洪涝险情案例想定、仿真推演和方案评估，详细内容如下。

6.1 洪涝灾害案例想定

2020 年 8 月 X 日白天，由于长江中游地区发生特大暴雨，武汉市多处河流湖泊水位上涨，防汛应急响应级别为Ⅱ级。武汉市及周边多地区被淹，需要航空救援。收到援助请求时的降水强度为暴雨。

武汉市 A 地，坐标为 30.39°N,114.33 °E。需要运入物资 8000kg，运出被困群众共 200 人，其中包括一名需要医疗转运的重病患者，若继续等待，病情可能发生恶化。人员安置点坐标为 30.52°N,114.23°E，条件可供 1 架直升机起降和停放。A 地有一 150m*50m 操场，条件可供 1 架直升机起降和停放。

武汉市 B 地，坐标为 30.58°N,114.51°E，附近湖泊发生圩堤溃堤险情，24 小时内发生滑坡泥石流灾害的风险较高，由于圩堤溃堤险情危害较大，任务优先级最高。需要抛投防汛砂石共 10000kg，运入重量为 8 吨的大型设备 1 台。

武汉市 C 地，坐标为 30.6°N, 114.03°E，需要运入物资 5000kg，运出被困群众 198 人至坐标 30.14°N, 114.64°E 的临时安置点。

此外，临时安置点 30.14°N, 114.64°E 有 80 人需转移至安置点 30.52°N, 114.23°E，并从临时安置点运送 2600kg 物资至安置点。

根据险情想定建立险情想定数据库，如图 11 所示。

需求点 要素	任务1	任务2	任务3	任务4	任务5	任务6	任务7	任务8
人员转运需求量	200	0	0	0	198	0	80	0
物资转运需求量	0	80	100	1	0	50	0	26
转运单位量（人对应人数，物对应千克）	1	100	100	8000	1	100	1	100
装载地经度	114.33	114.06	114.06	114.06	114.03	114.06	114.64	114.64
装载地纬度	30.39	30.25	30.25	30.25	30.6	30.25	30.14	30.14
装载地允许同时飞机数量	1	28	28	28	1	28	1	1
卸载地经度	114.23	114.33	114.51	114.51	114.64	114.64	114.23	114.23
卸载地纬度	30.52	30.39	30.58	30.58	30.14	30.14	30.52	30.52
卸载地允许同时飞机数量	1	1	1	1	1	1	1	1
优先级	1.6	1.5	2	0.94	0.94	0.46	0.36	0.36
转入类（1）或转出类（2）或其他类（3）	1	1	2	2	2	1	2	2
装载地可否降落	1	1	1	1	1	1	1	1
卸载地可否降落	1	1	1	1	1	1	1	1
装载地允许同时起飞数量	1	25	25	25	1	25	1	1
装载地允许同时降落数量	1	3	3	3	1	3	1	1
卸载地允许同时起飞数量	1	1	1	1	1	1	1	1
卸载地允许同时降落数量	1	1	1	1	1	1	1	1
当前降水强度	4	4	4	4	0	4	4	4
应急响应级别	2	2	2	2	0	2	2	2
滑坡泥石流发生可能性	0	0	0.3	0.3	0	0	0	0
被困人员健康状况恶化发生可能性	0.5	0	0	0	0	0	0	0
堤未封堵完毕导致洪水继续泛滥发生可能性	0	0	0	0	0	0	0	0

图 11 险情想定数据库

周边可用机场包括武汉汉南通用机场、仙桃长埡口机场、随州厉山机场、荆门漳河机场、景德镇吕蒙机场、株洲芦淞机场。各机场保障能力以及当前可用的航空应急救援装备情况如表 13 和表 14 所示。

表 13 周边机场信息

可用机场 要素	武汉汉南 通用机场	仙桃长埡 口机场	随州厉山 机场	荆门漳河 机场	景德镇 吕蒙机场	莱芜雪野 通用机场	株洲芦淞 机场
经度	114.06	113.6	113.33	112.05	117.08	117.57	113.21
纬度	30.25	30.41	31.89	30.98	29.14	36.44	27.77
停机位(个)	28	10	16	28	4	8	10
允许最大起飞数量	3	3	3	3	1	2	3
允许最大降落数量	3	3	3	3	1	2	3
允许同时保障数量	15	5	8	14	14	4	5
允许同时加油数量	15	5	8	14	14	4	5

表 14 可用机型信息

机型	最大可用 载重（kg）	载油量 （L）	巡航速度 （km/h）	乘员（人）	能否索降
AC313	5000	4750	255	27	1
EC-135	1500	710	230	7	1
恩斯特龙 480	500	363	185	5	1
九江红鹰 SW-4	600	471	182	5	1
罗宾逊 R22	200	135	177	2	1
罗宾逊 R44	370	140	216	4	1
米-26	20000	120000	255	82	1

小松鼠 AS350	1026	540	226	6	1
-----------	------	-----	-----	---	---

针对该想定，提出了 6 种航空救援力量调度方案，各方案主要区别如下。具体布置见表 15。

- 武汉当地机场有 2 架米-26 直升机，武汉附近地区中小型直升机较充足；
- 武汉当地机场有 1 架米-26 直升机，武汉附近地区中小型直升机较充足；
- 湖北省内有 1 架米-26 直升机可供调度，武汉附近地区中小型直升机较少；
- 湖北省内有 1 架米-26 直升机可供调度，武汉附近地区中小型直升机充足；
- 湖北省外有 1 架米-26 直升机可供调度，武汉附近地区中小型直升机较充足；
- 无米-26 直升机可供调度，武汉附近地区中小型直升机较充足。

表 15 航空救援力量调度方案

机场	机型	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
武汉汉南通用机场	AC313	2	2	1	2	2	2
	EC-135	1	1		1	1	1
	恩斯特龙 480	1	1		1	1	1
	九江红鹰 SW-4	2	2	1	2	2	2
	罗宾逊 R44	2	2	2	2	2	2
	米-26	2	1				
仙桃长埡口机场	AC313	1			1	1	
	EC-135	1	1		1	1	2
	罗宾逊 R44			1			
	小松鼠 AS350	1	1		1	1	1
随州厉山机场	EC-135			1			
荆门漳河机场	AC313		1				1
	EC-135				1		
	米-26			1	1		
景德镇吕蒙机场	九江红鹰 SW-4	1	1	1	1	1	1
株洲芦淞机场	EC-135	1	1			1	
莱芜雪野通用机场	米-26					1	

根据想定案例和各力量调度方案，在 AnyLogic 仿真推演系统中生成想定智能体，如图 12 所示。其中蓝色智能体代表出救点，在本想定中设定为武汉汉南通用机场；红色智能体代表各任务的装载点，绿色智能体代表各任务的卸载点，与各点相关的任务序号标示在智能体图标旁。



图 12 想定智能体

6.2 推演结果评估和分析

针对 2.3 中提出的洪涝灾害险情想定，进行了 6 种不同力量调度方案的仿真推移推演。各力量调度方案下人员转移和物资转运的耗时如下表所示。

表 16 各力量调度方案仿真耗时

调度方案 任务耗时	力量调度方 案 1	力量调度方 案 2	力量调度方 案 3	力量调度方 案 4	力量调度方 案 5	力量调度方 案 6
人员转移耗时 (min/人)	30.89666718	24.45881934	24.65237036	23.04194124	24.10385622	25.05677065
物资转运耗时 (min/100kg)	14.9190185	5.3297193	13.9442625	8.556435	8.6960893	17.4237788

六种调度方案中，方案四对应的仿真结果单人转移耗时最短，约 23 分钟/人，方案二、方案三、方案五和方案六对应的单人转移耗时接近且都在 25 分钟左右，方案一对应的单人转移耗时时间最长，约 31 分钟/人；物资转运任务中，方案二耗时最短，约为 5 分钟/百千克，方案四和方案五耗时较短，约 9 分钟/百千克，剩余方案最短耗时约 14 分钟/百千克，最长耗时约 17 分钟/百千克。综上所述，

在当前灾情想定共需要转移 478 人、33.6 吨物资的情况下，力量调度方案二和力量调度方案四较优。

力量调度方案中，第一种方案直升机力量最为充足（15 架航空器，包括 2 架米-26），第三种方案直升机力量较少（8 架航空器，包括 1 架米-26）。由于本研究报告的 4.1 调度规则（1）设置为，“每次出现态势更新时，指挥中心按照各险情任务的优先级依次发布求助，并在全部可用航空器的范围中，为各任务选择最优救援航空器进行救援，直到所有可用航空器均被派出”，第一种方案会派出更多的航空器。在装载地和卸载地所能容纳的飞机数量有限的情况下，多余的航空器只能在空中排队等待。因此，个别任务地点下的吞吐能力达到了上限时，直升机数量充足反而导致等待时间较长，从而影响第一种力量分配方案的任务效率。