

多机种油料加注系统设计的探索性分析与仿真

熊彪¹, 周庆忠¹, 樊荣^{1,2}, 何定养¹

(1. 后勤工程学院军事油料应用与管理工程系, 重庆 401311;

2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 多机种综合保障基地油料加注系统设计, 必须考虑战时复杂多变环境条件下不确定性因素的影响。采用探索性分析方法对具有涌现特点的多机种油料加注系统问题进行分析, 对油料加注系统解析模型采用聚合抽象的方法建立探索性元模型, 运用探索性分析平台 *analytica optimizer* 对多机种综合保障基地油料加注系统进行探索性元模型仿真分析与实例求解, 取得既能满足各项需求约束要求, 又能适应各种不确定性因素影响的设计方案。解决了复杂环境条件下, 多机种综合保障基地油料加注系统设计难题。为设计复杂多变环境下的多机种综合保障基地油料加注系统提供了参考。

关键词: 多机种综合保障基地; 油料加注系统; 探索性分析; 复杂环境

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.07.17

Analysis and simulation for the design of multi-aircraft oil refilling system based on exploratory analysis method

XIONG Biao¹, ZHOU Qing-zhong¹, FAN Rong^{1,2}, HE Ding-yang¹

(1. Department of POL Application & Management Engineering, Logistics Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The design of oil refilling system in multi-aircraft integrative support base (MISB) should take varies of uncertain factors in the complex and uncertain wartime into consideration. Aiming at the problem which contains the characteristic of emergence, an exploratory analysis method for the oil refilling system of multi-aircraft is presented. Following the concept of the exploratory analysis, this method constitutes the exploratory metamodel by gathering and abstracting the analytical model. The *analytica optimizer* is used to analyze the metamodel and solve the example of the oil refilling system in MISB, and it receives the most adaptable solution which satisfies not only the basic demand constraint, but also the uncertainty characteristics of wartime environment. The problem of designing an oil refilling system in the complex and uncertain environment is solved, and references are provided to design an oil refilling system in MISB.

Keywords: multi-aircraft integrative support base (MISB); oil refilling system; exploratory analysis; complex environment

0 引言

信息化条件下, 以三代机为骨干, 由电子干扰机、预警指挥机、空中加油机等组成的空中多机种混合编队联合打击作战成为航空兵作战的主要作战样式。

油料保障是多机种综合保障基地后勤保障的重要组成部分, 设计适应战时复杂多变环境条件下的多机种油料加

注系统是基地油料保障效能充分发挥的根本保证。多机种综合保障基地油料加注系统的设计受保障时间、保障任务、保障力量、保障成本以及自然环境等因素的影响。其中, 战时条件下不确定性因素对保障任务完成的影响则是油料加注系统设计必须考虑的问题。然而, 传统的分析方法无法处理战时条件不确定性因素的影响问题^[1]。并且多机种综合保障基地油料加注系统设计优化问题是一个典型的非线性

性决策难题，一般的求解方法可能因引入不确定性因素而产生运算维度灾难或陷入局部最优解的困境^[2]。更无法预测油料加注系统的油料保障能力对战时多变环境的适应性^[3]。

基于战时复杂多变环境条件下保障能力视角出发，采用自顶而下的探索性分析方法，对多机种综合保障基地油料加注系统进行探索性优化建模与仿真，运用探索性分析平台 analytica optimizer 对油料加注系统在不确定条件下保障效能进行分析以及实例进行求解，为多机种综合保障基地油料加注系统的合理设计问题提供了一种解决方法。

1 探索性原理分析

探索性分析方法是美国 Rand 公司于 20 世纪 90 年代在对战略评估系统和联合一体化应急模型分析求解中逐步总结出来的一种系统分析方法^[4-6]。Rand 公司随后将其运用到武器资源配置和恐怖的海峡等复杂战略问题分析和评估中，取得了很好的效果^[7-8]。随着探索性分析方法研究的深入，该方法在很多复杂性问题分析领域得到了应用和推广^[9-10]。

探索性分析基于现代计算机高速运算技术，对问题中不确定性要素所产生的结果进行全面整体性的搜索分析和研究。它与灵敏度分析类似，但分析问题的角度不同。探索性分析通过对模型的影响参数进行抽象和聚合，采用由外至内的分析方式，对具有高度不确定性、层次性和复杂特性的问题，利用先验知识、基本型原理等给出想定变量、决策变量和期望结果的取值区间，再通过大规模并行计算来分析求解问题^[11-12]。

2 多机种综合保障基地油料加注系统探索性框架设计

多机种综合保障基地油料加注系统设计探索性分析从流程上可以分为探索性建模与探索性分析 2 个阶段。

探索性建模是进行探索性分析的基础。多机种油料加注系统设计探索性建模为实现对系统设计的探索性分析提供 3 方面的支持：第 1 方面，探索性分析模型能够对多机种油料保障基地油料加注系统设计要素进行结构化描述；第 2 方面，探索性分析模型能够对系统设计中不确定性进行描述，从而实现探索空间的结构化描述；第 3 方面，探索性分析模型能够对系统设计问题进行求解，获得问题可行解空间，为探索性分析提供数据等支撑^[13]。

在探索性建模的基础上，对多机种综合保障基地油料加注系统设计问题进行探索性求解，获得可行解空间。再对系统不确定问题在解空间中实现探索性遍历，从而对探索性解空间压缩。最后运用综合分析技术，对探索性解空间进行验证分析，获得适应复杂多变环境条件下的最优可行解。探索性流程如图 1 所示^[14]。

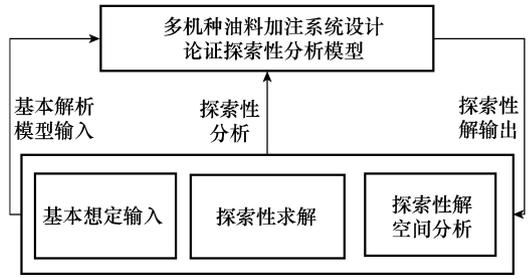


图 1 探索性分析框架流程图

3 多机种综合保障基地油料加注系统探索性模型建立

探索性模型建立是进行探索性分析的基础。多机种油料加注系统设计探索性模型建立必须以对多机种油料加注系统输入/输出关系树进行分析为前提，并建立反映系统实际关系的低层高分辨率基本解析模型，再通过对关系树与解析模型进行分析与聚合抽象，形成适应探索性分析需要的油料加注系统设计探索性元模型^[15]。

3.1 多机种油料加注系统关系树分析

关系树反映系统输入与输出变量之间的因果联系。根据多机种油料加注系统设计实际，建立多机种综合保障基地油料加注系统关系树如图 2 所示。

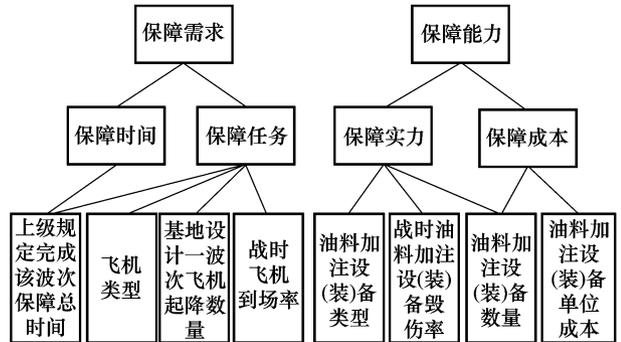


图 2 多机种油料加注系统关系树

多机种油料加注系统关系树是探索性元模型建立的基础。通过对多机种油料加注系统进行分析，得出战时飞机到场率和战时油料加注(装)备毁伤率 2 个主要不确定影响因素为多机种油料加注系统探索性元模型不确定性输入变量，需要对其进行探索性分析。

3.2 基本解析模型建立

多机种综合保障基地油料加注系统设计数学模型可形式化表示为

$$OS = \langle D, N, Z, F \rangle \tag{1}$$

式中， D 为变量集，变量集通常包括已知变量集和不确定性变量集； N 为约束集； Z 为目标集； F 为关系集。

3.2.1 变量集 D

在多机种综合保障基地油料加注系统设计问题中，变量集 D 即包括飞机类型，油料加注(装)备种类，各型飞

机的油箱容量,油料加注设(装)备的流量等确定性已知变量,同时也包括在战时条件下,临时变化的上级规定允许加油时间,战时每波次飞机到场率以及油料加注设(装)备的战损率等不确定性变量,可表示为

$$D = \{i, j, a_{ij}, t_{ij}, T, c_j, d_j, v_j, Q_j, ty_j, k_j\} \quad (2)$$

式中, $i(i \in (1, n))$ 为飞机类型; $j(j = (1, \dots, \theta, \dots, m))$ 为油料加注设(装)备类型; a_{ij} 为基地一个波次接受*i*型飞机起降的数量; t_{ij} 为采用*j*型加油设(装)备为*i*型飞机加油所需的时间(由加油设备与飞机油箱换算得出); T 为上级规定基地战时完成一个波次飞机加油任务的总时间; d_j 为*j*型设(装)备完成分配加油任务所需总时间; c_j 为*j*型设(装)备的成本; $v_j(j \in (\theta, m))$ 为*j*型加油装备(机动加油车)的加油速度; $Q_j(j \in (\theta, m))$ 为*j*型加油装备(机动加油车)的容量; $ty_j(j \in (\theta, m))$ 表示*j*型加油装备(机动加油车)的容量; $k_j(j \in (\theta, m))$ 为*j*型加油装备(机动加油车)完成分配加油任务的运油与加油时间总和。

3.2.2 约束集 *N*

约束集 *N* 是模型求解的约束条件,包括时间约束和成本约束 2 类。常规的油料加注系统设计中,一般以其中之一作为约束目标进行优化分析。探索性分析则同时考虑 2 种约束条件,其数学表示为

$$N = \{Tr, W\} \quad (3)$$

式中, Tr 为实际完成加油任务的时间; W 为该基地设(装)备的总成本。

3.2.3 目标集 *Z*

目标集 *Z* 是探索性分析的结果集,在油料加注系统设计中,目标集通常由油料加注设(装)备的设计配置方案集,以及飞机油料加注设(装)备分配方案集组成,其数学表示为

$$Z = \{b_j, p_{ij}\} \quad (4)$$

式中, b_j 为基地设计配置的*j*型设(装)备的套数; p_{ij} 为*j*型设(装)备完成加油任务中为*i*型飞机加油的数量。

3.2.4 关系集 *F*

多机种综合保障基地油料加注系统设计关系集 *F* 可由数学公式表述如下:

$$a_i = \sum_{j=1}^m p_{ij}, i \in (1, n) \quad (5)$$

$$d_j = \sum_{i=1}^n (p_{ij} \cdot t_{ij}), j \in (1, m) \quad (6)$$

$$k_j = \left\| \frac{v_j \cdot d_j}{Q_j} - 1 \right\| \cdot ty_j + d_j, j \in (\theta, m) \quad (7)$$

$$\left| \frac{d_j}{b_j} \right| \leq T, j \in (1, m) \quad (8)$$

其中,式(6)~(8)中涉及的向量乘除运算均为向量的对项乘除运算。式(7)是对飞机加油装备(机动加油车)的运油和加油时间综合的表述。式(8)为上级规定的加油任务总时间限制。

3.3 基于 analytica optimizer 的油料加注系统探索性仿真元模型建立

analytica optimizer 平台是美国 Lumina 公司开发的决策支持分析系统平台的一部分,是目前探索性分析领域应用最广泛的建模仿真平台。本文通过对系统关系树和基本解析模型进行分析与聚合抽象,应用该平台建立多机种油料加注系统设计探索性元模型结构图如图 3 所示。

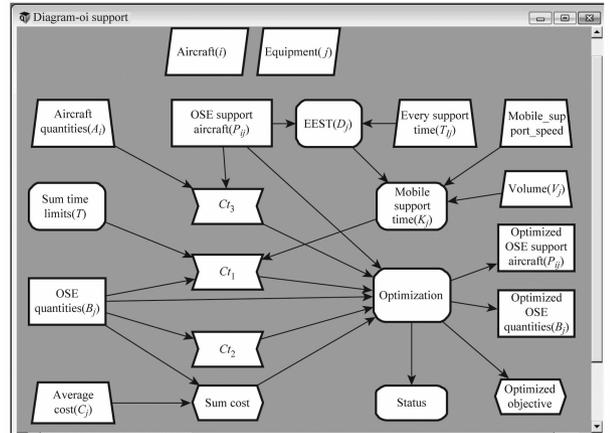


图 3 基于 analytica optimizer 的油料加注系统探索性元模型结构图

由于多机种综合保障基地油料加注系统设计问题是一个复杂的系统问题,其必须满足时间限定的要求,尽量节省成本。同时还必须适应动态复杂环境下不确定性因素的影响,从而才能促进体系作战油料保障效能的充分发挥。

4 多机种综合保障基地油料加注系统设计仿真实例分析

4.1 实例概述

某筹备建设的多机种综合保障基地设计起降多机型综合打击编队飞机,容量为一个波次 70 架次,上级规定一个波次飞机加油时间为 30 min。其他各项参数信息如下:

飞机类型及数量: $i=[A, B, C, D, E], a_i=[20 \ 20 \ 15 \ 10 \ 5]$ 。

机场油料加注方式分为管道压力加油、管道重力加油、加油车压力加油和加油车重力加油 4 种,可表示为: $j=[G_y \ G_z \ C_y \ C_z]$;机场各加油设(装)备的单位成本为 $c_j=[100 \ 80 \ 60 \ 50]$ 。

各型飞机利用不同加油设(装)备加油所需时间为

$$t_{ij} = \begin{bmatrix} 6 & 12 & 10 & 15 \\ 8 & 10 & 10 & 13 \\ 7 & 11 & 10 & 11 \\ 8 & 12 & 11 & 15 \\ 20 & 30 & 25 & 35 \end{bmatrix}$$

战时条件下,多机种综合保障基地油料加注系统可能会受到敌火力打击、设(装)备自身稳定性以及保障任务波动变化等不确定性因素的影响。因此,对多机种综合保障基地油料加注系统在不确定性条件下完成保障任务的能力进行分析是系统设计的必然要求。

4.2 基于 analytica optimizer 的油料加注系统探索性仿真分析与求解

4.2.1 实例分析

对实例利用多机种油料加注系统关系树进行分析可知:系统的设计保障时间、保障任务和保障成本等已知。系统设计的目标是在满足保障任务的条件下,设计出一种成本低,并针对战时飞机到场率和战时油料加注设(装)备毁伤率两个主要不确定影响因素适应性最强的油料加注设(装)备配备方案。

因此,基于 analytica optimizer 的油料加注系统探索性仿真分析和求解,就是利用探索性分析方法的优点,对满足油料加注系统设计约束条件的所有油料加注设(装)备配套方案的可行解空间进行探索性分析,从其中找出一组对不确定性因素适应性最强的方案解。

4.2.2 解空间生成

利用 analytica optimizer 平台在时间约束 $T=30\text{ min}$ 内,将实例数据输入探索性仿真元模型进行仿真运算。基于成本最低原理,利用探索性数据分析方法,形成了包括 51 组局部最优解的解空间^[16]。

图 4 与图 5 分别表示在实际完成加油任务时间 T_r 下,多机种油料加注系统的最优成本以及最优装备配置。如当实际完成加油任务时间为 $T_r=29\text{ min}$ 时,多机种油料加注系统的最优成本为 2 472,装备最优配置方案为[11, 4, 10, 9]。

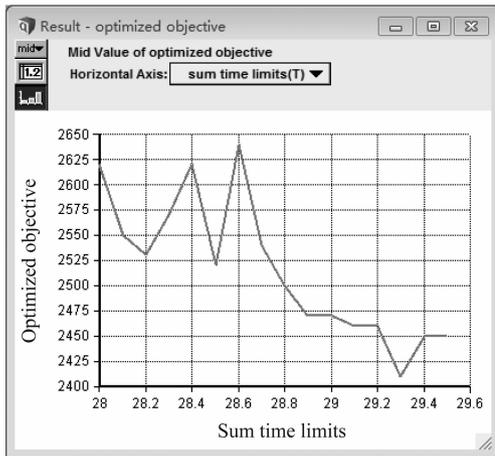


图 4 部分解空间成本图

4.2.3 解空间探索寻优

解空间生成完成了对多机种油料加注系统可行解的构建,然而却无法反映该解空间对不确定影响因素的鲁棒性

和适应性。因此,利用探索性分析方法对实例中求得的解空间进行不确定性条件下解的鲁棒性和适应性分析,对战时到场飞机率(arrive rate, AR)和油料加注系统完好率(oil refilling system availability, OFSA) 2 个主要不确定因素进行了分析。

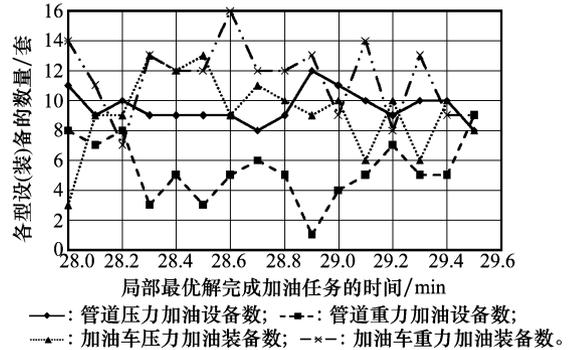


图 5 部分解空间装备配置优化图

利用探索性分析方法,对原有 51 个解在 2 个不确定因素的影响下,对其进行探索性分析寻优。如图 6 所示为 4 种典型情况下,原有 51 个解空间变化趋势图。当 AR 提高 10%(AR=110%)时,在时间约束 $T=30\text{ min}$ 内,原解空间的 51 个解中仍有 24 个解符合保障时间约束要求。在遭敌打击情况下,基地原有 OFSA 下降至 90%(OFSA=90%)时,原解空间仍有 18 个解符合规定约束时间要求。但当油料加注系统完好率下降至 80%时,解空间已经无可行解满足要求。

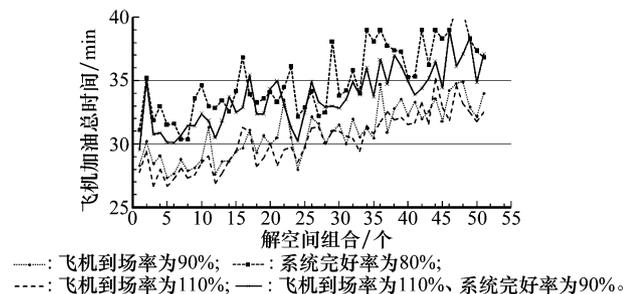


图 6 解空间不确定性分析

当 AR=110%, OFSA=90%时,原解空间有一个可行解,即 $b_1=[12, 10, 2, 14]$,其保障时间 $T_1=29.54\text{ min}$,成本为 $W_1=2\ 820$ 。但同时还有 3 个解虽然严格意义上无法满足时间约束,但却与约束时间很接近,可作为近似解分析。分别为 $b_5=[10, 8, 12, 10]$, $T_5=30.14$, $W_5=2\ 860$; $b_6=[10, 9, 11, 10]$, $T_6=30.11$, $W_6=2\ 880$; $b_{24}=[14, 4, 6, 12]$, $T_{24}=30.25$, $W_{24}=2\ 680$ 。近似可行解 b_{24} 比 b_1 成本减少 140 个单位情况下,时间却只增加 0.71 个单位。由此,在不非常严格限制时间的条件下,近似解 b_{24} 更为合理。

由此,该筹备建设的多机种综合保障基地设计采取可行解 b_{24} 的设计方案将在满足设计起降要求以及兼顾经济

性的前提下,在遭受敌方打击以及飞机到场率增加的情况下,该方案具有良好的鲁棒性和适应性。

5 结 论

基于多机种综合保障基地油料加注系统设计对于复杂多变环境下不确定性因素分析的需要,提出了利用探索性分析方法进行油料加注系统设计的思路和框架。并通过仿真案例对油料加注系统探索性分析设计过程进行了论证,得到了一种既满足设计时间和成本约束限制要求,又具有对不确定性因素适应性最强的设计方案。探索性方法得到的解空间是其他传统优化分析方法无法求得的,更能反映不确定条件下油料加注系统适应作战需要的能力,使得油料保障模拟分析更贴近体系作战实际,从而可以有效促进体系作战油料保障效能涌现跃升效果的充分发挥。

参考文献:

- [1] Hu X F, Li Z Q, Yang J Y, et al. Some key issues of war gaming & simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(3): 549 - 553. (胡晓峰,李志强,杨镜宇,等.战争模拟研究值得关注的几个问题[J].系统仿真学报,2010,22(3):549-553.)
- [2] Davis P K, Hillested R. Exploratory analysis for strategy problems with massive uncertainty [R]. Santa Monica: RAND, 2001.
- [3] Helbing D, Balmelli S. How to do agent-based simulations in the future: from modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design[R]. New Mexico: Santa Fe Institute, 2011.
- [4] Bankes S. Exploratory modeling for policy analysis[J]. *Operations Research*, 1993, 41(3): 435 - 449.
- [5] Young B. Total life cycle management assessment tool: an exploratory analysis[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [6] Davis P K, Carrillo M J. Exploratory analysis of "the halt problem"[R]. Santa Monica: RAND, 1997.
- [7] Brooks A, Bankes S, Bennett B. Weapon mix and exploratory analysis[R]. Santa Monica: RAND, 1994.
- [8] Shlapak D A, Orletsky D T, Wilson B A. Dire strait military aspects of the china-taiwan confrontation and options for U. S. policy[R]. Santa Monica: RAND, 2000.
- [9] Pitombo C S, Kawamoto E, Sousa A J. An exploratory analysis of relationships between socioeconomic, land use, activity participation variables and travel patterns[J]. *Transport Policy*, 2011, 18(2): 347 - 357.
- [10] Ngan S C, Tsang A S. Elucidating the conceptual structure of a business domain via exploratory network analysis of business survey data[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(7): 6359 - 6369.
- [11] Davis P K, Kulick J, Egner M. Implications of modern decision science for military decision-support system[R]. Santa Monica: RAND, 2005.
- [12] Terres F, Castejon E, Mondelo P R. Corporate motivation to risk prevention: applied exploratory analysis in construction sector in catalonia [J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2011, 19(6): 1 - 13.
- [13] Chen J K, Ren Y G, Sha J C. Overview of research of exploratory analysis [J]. *Advanced Manufacture and Management*, 2007, 26(11): 32 - 34. (陈进科,任义广,沙基昌.探索性分析方法研究[J].先进制造与管理,2007,26(11):32-34.)
- [14] Liu Z Y, Xiu B X, Zhang W M, et al. Design of the exploratory analysis framework for C₂ organizations[J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(1): 9 - 12. (刘振亚,修保新,张维明,等. C₂组织探索性分析框架设计探究[J].火力与指挥控制,2010,35(1):9-12.)
- [15] He H Y, Wang Z X, Dong Q C, et al. Behavioral modeling and verification of C⁴ISR system capability requirements[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(6): 1153 - 1160. (何红悦,王智学,董庆超,等. C⁴ISR系统能力需求行为建模及验证[J].系统工程与电子技术,2012,34(6):1153-1160.)
- [16] Palocsay S W, Markham I S, Markham S E. Utilizing and teaching data tools in excel for exploratory analysis[J]. *Journal of Business Research*, 2010, 63(2): 191 - 206.

作者简介:

熊 彪(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为作战油料保障、装备工程管理。

E-mail:xiogb001@126.com

周庆忠(1961-),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为油料勤务、计算机网络与自动化工程和装备工程管理。

E-mail:zhouqz@126.com

樊 荣(1976-),男,讲师,博士,主要研究方向为油料勤务、装备工程管理。

E-mail:frfr1002@126.com

何定养(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为军事物流。

E-mail:hdy110@126.com