

基于多色集合理论的机场道面多弹坑多工艺 抢修资源配置模型

董伟明, 许巍, 张俊*

空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月25日; 录用日期: 2025年8月17日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

抢修资源是机场道面弹坑抢修过程中的核心要素, 如何形式化、结构化描述抢修资源, 快速实现多弹坑多工艺抢修资源配置是道面抢修的前提与关键。针对机场道面抢修过程中多弹坑、多工艺、多抢修资源配置问题, 本文提出了一种基于多色集合理论的机场道面多弹坑多工艺抢修资源配置模型。分析多弹坑多工艺抢修过程, 明确弹坑与抢修工艺、抢修资源之间的关联关系。建立双层多色集合的道面抢修资源配置模型, I层级多色集合抢修资源模型用于描述抢修工艺与抢修工序、抢修资源之间的关联关系; II层级多色集合抢修资源模型用于描述多弹坑与多抢修工艺的关联关系, 从而实现了多弹坑多工艺抢修资源的配置; 以某机场抢修资源配置为例, 设计开发原型系统验证了所提方法的有效与可行性。

关键词

多弹坑多工艺, 抢修资源, 多色集合理论, 抢修资源配置

A Multi-Process Resource Allocation Model for Rapid Repair of Multiple Bomb Craters on Airport Pavements Based on Polychromatic Set Theory

Weiming Dong, Wei Xu, Jun Zhang*

College of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 25th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

*通讯作者。

Abstract

Emergency repair resources are the core element in the rapid restoration of bomb craters on airport pavements. The formalized and structured description of these resources, along with efficient allocation for multi-crater and multi-process repairs, serves as the prerequisite and key to successful pavement restoration. To address the challenges of multi-crater scenarios, multi-process workflows, and resource allocation in airport pavement repair, this paper proposes a resource allocation model based on Polychromatic Set Theory for rapid multi-crater and multi-process repairs. The study analyzes the repair process involving multiple craters and processes, clarifying the relationships among craters, repair techniques, and resources. A two-layer polychromatic set model is established: Layer I models the relationships between repair techniques, repair procedures, and resources. Layer II captures the associations between multiple craters and repair processes, enabling systematic resource allocation. A prototype system is developed and tested using a case study of resource allocation at an airport, demonstrating the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Keywords

Multi-Crater Multi-Process, Emergency Repair Resources, Polychromatic Set Theory, Repair Resource Allocation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机场道面作为机场的核心功能部位, 遭敌破坏后需要以最短时间完成道面修复以保障飞机能够正常起降。机场道面抢修通常以最小应急起降带(Minimum Operating Strip, MOS)作为抢修对象[1][2], 然后对应急起降带内的道面弹坑实施抢修。应急起降带内的弹坑存在多样性, 且各弹坑抢修可选择选的抢修工艺各不相同[3]。抢修工艺则由一系列按照一定顺序执行的抢修工序组成; 每道抢修工序则由一套/组抢修资源(人、装备、材料)完成。不同的抢修资源的性能与功能有所差异, 进而影响着其完成每道抢修工序的时间。多弹坑多工艺道面抢修作业调度则是对应急起降带内的多个弹坑进行抢修工艺及抢修资源安排及抢修顺序进行优化, 从而获取最佳的多弹坑多工艺的抢修作业组织实施方案, 实现以最短的时间完成道面抢修。多弹坑多工艺抢修作业调度优化有利于帮助抢修决策人员快速制定道面抢修方案, 组织优化抢修资源调度, 提升机场道面抢修效能。多弹坑多工艺抢修资源配置则是抢修作业调度的前提与关键, 如何将多弹坑多工艺的抢修资源配置关系进行形式化、结构化与公式化描述, 是多弹坑多工艺抢修作业调度优化的基础。

目前, 国内外学者围绕资源配置方面进行了一系列研究工作[4]。针对 workflow 资源管理, 高新勤等[5]提出了的基于多色集合离析运算的 workflow 资源管理与配置方法, 可以对资源配置进行优化。郝真鸣等[6]基于 Petri 网进行了离散事件系统初始资源优化配置问题, 该方法将资源配置抽象为整数规划问题, 方法简单易用。刘明周等[7]利用本体与面向对象等技术对物联网环境下制造资源进行配置, 构建了物联网环境下的制造资源感知与信息集成框架。王时龙等[8]构建了云制造资源服务链模型, 考虑物料流和信息流对资源配置成本和时间影响, 利用最大继承法(Max Inherit Optimization, MIO)求解云制造资源优化配置的

数学模型。在此基础上,陈友玲等[9]提出了一种基于双层规划的资源优化配置模型,以前景理论结合多约束多属性评价体系求解多目标制造资源配置问题。

已有研究主要集中在制造领域中制造资源配置优化方面,有效解决了制造领域中资源配置问题。道面抢修过程中抢修资源具有多层次、多对多的特点,建立合理高效的多弹坑多工艺抢修资源模型可以有效解决弹坑与抢修工艺、抢修工艺与抢修工序、抢修资源之间的多层次多对多关联问题,实现抢修资源的形式化与结构化表达,便于资源结构化存储及资源管理,为多弹坑多工艺抢修作业资源调度提供基础与依据。

2. 道面抢修资源配置过程分析

机场道面弹坑抢修过程中,弹坑可以采用多种抢修工艺来完成,而抢修工艺则由多个抢修工序组成;每道工序则由多个或不同人员、装备组合共同完成,即弹坑与抢修工艺、抢修工艺与工序、工序与抢修资源之间存在多层的一对多、多对多关系。为了便于后续抢修资源调度优化,需要将以上关系进行形式化与结构化描述,方便计算机编程实现。

机场遭敌打击后,道面毁伤中弹坑存在不同的类型规格,不同类型规格的弹坑抢修可对应着不同的抢修工艺。通过对弹坑不同类型规格进行分析,可以根据弹坑规格及所处环境可以选择不同抢修工艺,有助于提高弹坑-抢修工艺之间的快速选配。以明坑为例,弹坑规格如表1所示。通过对机场道面不同类型弹坑抢修工艺流程分析,弹坑-抢修工艺配置如表2所示。

Table 1. Crater specification information

表 1. 弹坑规格信息

弹坑类型	弹坑规格	直径 d (m)	深度 h (m)
明坑	小弹坑	$4 > d \geq 1.5$	$h < 1.5$
	中弹坑	$8 > d \geq 4$	$h < 3$
	大弹坑	$15 > d \geq 8$	$h \geq 3$
	超大弹坑	$d \geq 15$	$h > 5$

Table 2. Crater-repair process configuration information

表 2. 弹坑-抢修工艺配置信息

抢修工艺	条件	大弹坑	中弹坑	小弹坑	坑槽
玻璃钢道面板工艺	通常	√	√	√	×
	雨天	√	√	√	×
	气温 $<5^{\circ}\text{C}$	√	√	√	×
快硬水泥砂浆工艺	通常	√	√	√	√
	雨天	×	×	×	×
	气温 $<5^{\circ}\text{C}$	×	√	√	√
快硬水泥混凝土工艺	通常	√	√	√	√
	雨天	×	×	×	×
	气温 $<5^{\circ}\text{C}$	×	√	√	√

抢修工艺由一系列的抢修工序构成,在抢修过程中每道抢修工序可以由一套或组抢修装备资源独立

或共同完成，由于不同装备性能与工效存在差异，采用每种规格的装备完成工序的时间定额存在差异，导致抢修作业调度优化结果。因此，有必要明确抢修工艺与抢修工序及其抢修装备之间的配置关系。

表 3 为某抢修工艺、抢修工序与抢修装备的配置示例，其中，抢修工艺 R_1 由 $p_1 \sim p_8$ 共 8 道工序组成，每道工序可以从 $M_1 \sim M_{14}$ 抢修装备中选择合适装备来完成；如抢修工序 p_1 可以分别由抢修装备 M_1 和 M_2 来执行完成。

Table 3. Example of repair process, procedure, and equipment configuration

表 3. 某抢修工艺、抢修工序与抢修装备的配置示例

抢修工艺	R_1															
抢修工序	p_1		p_2		p_3		p_4		p_5		p_6		p_7		p_8	
抢修装备	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}		

通过以上弹坑与抢修工艺、抢修工艺与抢修装备之间的配置分析，多弹坑多工艺抢修资源配置存在多层次、多对多特点，为了清晰描述每个弹坑与抢修资源之间的配置关系，需要按照弹坑→抢修工艺→抢修工序→抢修装备(抢修资源)层级进行依次形式化、结构化描述，建立从抢修任务到抢修资源之间的配置关系模型。

3. 基于多色集合的道面抢修资源配置模型

3.1. 多色集合理论

多色集合理论作为一种信息处理数学工具，已广泛应用于产品设计、工艺规划、生产调度、产品质量等[10][11]多个方面，其特点是能够表示集合本身及其组成元素的性质和集合本身性质及其组成元素、性质间的相互关系。多色集合的经典数学表达为：

$$PS = (A, F(a), F(A), A \times F(a), A \times F(A), A \times A(F)) \quad (1)$$

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\} \quad (2)$$

$$F(A) = (F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_p) \quad (3)$$

其中， F_j 称为统一着色，当用多色集合描述复杂系统时对应系统 A 的第 j 个性能、指标、功能、特征或参数等属性信息， A 为元素 $a_i (a_i \in A)$ 的集合，所有元素对应个人着色和统一着色为 $F(a)$ 和 $F(A)$ 。

当集合 A 中一个或多个元素 $a_i \in A$ 同时存在情况下，统一着色 F_j 才存在，则由这些元素构成的集合叫做统一着色 F_j 的第 k 个“体”，标记为 $A_k(F_j)$ ，其组成为：

$$A_k(F_j) = \{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_s}, \dots, a_{i_t}\} \quad (4)$$

统一着色 F_j 所有的“体”标记为：

$$A(F_j) = \{A_k(F_j) | 1 \leq k \leq m_j\} = \{A_1(F_j), A_2(F_j), \dots, A_k(F_j), \dots, A_{m_j}(F_j)\} \quad (5)$$

所有统一着色的“体”构成的集合称为集合 A 的“体”，标记为 $A(F)$ ，其组成为：

$$\begin{aligned} A(F) &= \{A_k(F_j) | 1 \leq k \leq m_j, 1 \leq j \leq p\} \\ &= \{A_1(F_1), \dots, A_k(F_1), \dots, A_{m_1}(F_1), \dots, A_1(F_2), \dots, A_k(F_2), \dots, A_{m_2}(F_2), \dots, A_1(F_p), \dots, A_k(F_p), \dots, A_{m_p}(F_p)\} \end{aligned} \quad (6)$$

集合 A 与统一着色的体 $A(F)$ 构成的布尔矩阵可表示为：

$$A_1(F_1) \cdots A_k(F_j) \cdots A_{m_p}(F_p)$$

$$[A \times A(F)] = \begin{bmatrix} c_{11}^1 & \cdots & c_{1j}^k & \cdots & c_{1p}^{m_p} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{i1}^1 & \cdots & c_{ij}^k & \cdots & c_{ip}^{m_p} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{n1}^1 & \cdots & c_{nj}^k & \cdots & c_{np}^{m_p} \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} \quad (7)$$

$A \times F(a)$ ——元素的个人着色布尔矩阵;

$A \times F(A)$ ——元素和统一着色之间的相关关系布尔矩阵;

$A \times A(F)$ ——体元素与统一颜色之间的相关关系布尔矩阵。

3.2. 基于多色集合的抢修资源配置模型

通过弹坑抢修过程中资源使用特点可知,弹坑可以选择不同的抢修工艺(面层材料)进行抢修;而抢修工艺的各个工序所使用的抢修资源(设备、人员、材料)存在多种组合,不同设抢修资源组合将会影响抢修效率,从而不同的工序具有不同的抢修工时。为了描述抢修工艺与抢修工序、抢修工序与抢修资源之间的多层多对多关联关系,可以利用多色集合理论,建立基于多色集合的抢修工艺的抢修资源配置模型,实现弹坑抢修过程中抢修工艺及其抢修资源的配置。

基于上述情况可以将抢修工序看作多色集合元素集合,抢修工序所需要的抢修资源看作个体着色,抢修工艺看作元素的统一着色,可建立基于两层多色集合的抢修工艺与抢修任务(抢修弹坑)、抢修资源之间配置关系模型,实现抢修工艺与抢修任务、抢修资源关系的形式化、显式化描述。其中,I层多色集合抢修资源模型用于描述抢修工艺对应的抢修工序组成及各个工序的抢修资源(人、设备)之间的关联关系;II层多色集合抢修资源模型用于描述抢修任务中各个弹坑可配置的抢修工艺之间的关联关系;通过该双层多色集合抢修资源模型能够较好地描述抢修弹坑与抢修工艺、抢修工艺及其各工序的抢修资源配置关系。

3.2.1. I层多色集合模型

该层多色集合模型主要实现抢修工序、抢修工艺、抢修资源之间的关联关系,能够实现抢修工艺各工序的资源配置,具体的多色集合关系模型的构建过程具体如下。

多色集合的元素集合 A 可表达为

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\} \quad (8)$$

式中:

a_i ——抢修工序 i ;

m ——抢修工序总数量。

元素的个人着色用来表示工序可配置的抢修资源,则个人着色集合 $F(a)$ 可表示为

$$F(a) = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\} \quad (9)$$

式中:

f_i ——抢修资源,本文中每个抢修资源为可以完成每个工序所配套的抢修设备、人员与材料;

n ——抢修资源总数量。

元素的统一着色表示抢修工序共同存在所能实现的抢修工艺,统一着色集合 $F(A)$ 可表示为

$$F(A) = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_k\} \quad (10)$$

式中：

F_j ——抢修工艺 j ；

k ——抢修工艺总数量。

根据抢修过程中抢修工序与抢修工艺、抢修资源之间的关联关系，可以建立元素与个人着色、统一着色之间的关系布尔矩阵 $A \times F(a)$ 、 $A \times F(A)$ ，可表示如下：

$$A \times F(a) = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_m \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (11)$$

$$A \times F(A) = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & \cdots & F_k \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1k} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nk} \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (12)$$

式(11)中，若元素 a_i 中具有个人颜色 f_j ，则 $c_{ij} = 1$ ，意味着抢修工序 a_i 可以由抢修资源 f_j 完成；

式(12)中，若元素 a_i 中具有统一颜色 F_j ，则 $d_{ij} = 1$ ，意味着抢修工序 a_i 所属抢修工艺 F_j 。

某道面抢修资源配置模型示例如图 1 所示。

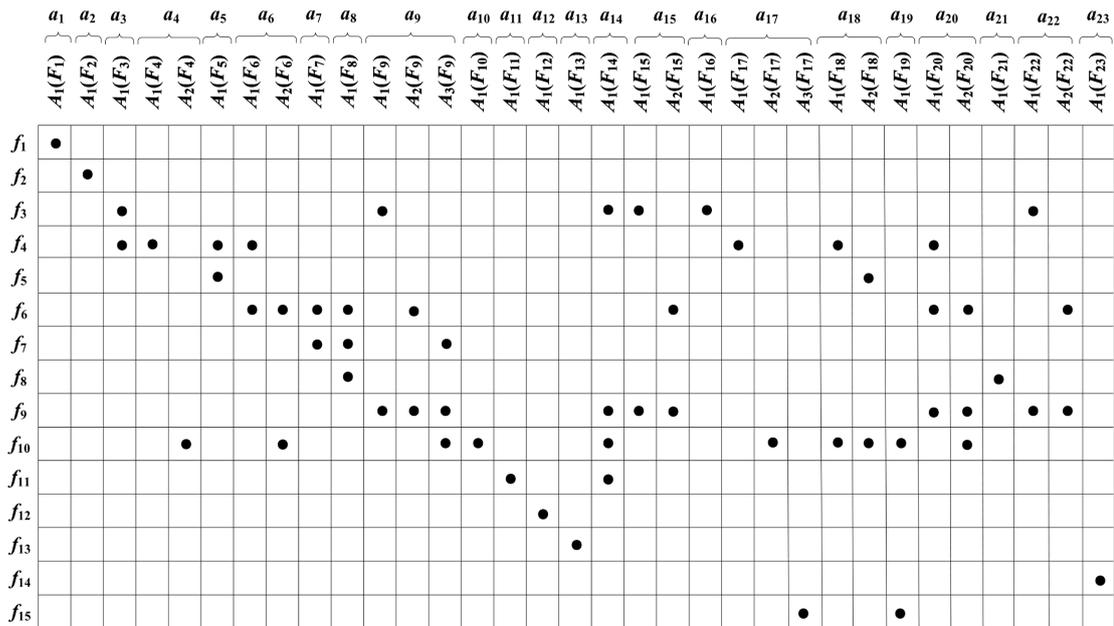


Figure 1. Pavement emergency repair resource allocation model (Tier I Polychromatic Set Model)

图 1. 道面抢修资源配置模型示例(I 层多色集模型)

3.2.2. II 层多色集合模型

II 层多色集合模型用于描述抢修任务中各个弹坑可配置的抢修工艺之间的关联关系，具体表达过程为：

$$C = \{c_1, c_2, c_i, \dots, c_k\} \quad (13)$$

$$F(c_i) = \{F_1, F_2, F_j, \dots, F_r\} \quad (14)$$

式中, C 为抢修任务, c_i 为抢修任务中的第 i 个弹坑; k 为弹坑数量; $F(c_i)$ 为抢修任务 c_i 中弹坑 i 可配置的抢修工艺集合, F_j 为抢修弹坑 i 配置的抢修工艺 j , r 为可配置的抢修工艺总数。

4. 实例分析

4.1. 实例描述

以某机场道面毁伤为例, 某跑道弹坑分布如图 2 所示, 依据应急起降带规格要求(1500 m × 25 m), 确定了应急起降带区域, 共要抢修弹坑 7 个, 抢修弹坑信息如表 4 所示; 抢修工艺信息如表 5 所示, 抢修工艺路线 2 条, 共有 12 条不同的工序; 抢修装备共 18 台/套, 弹坑的抢修资源配置及定额如表 6 所示。

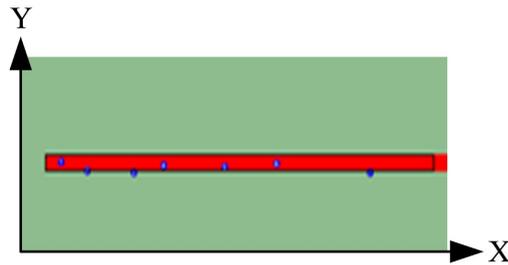


Figure 2. Crater repair locations
图 2. 抢修弹坑分布信息

Table 4. Crater repair specifications (Unit: meters)

表 4. 抢修弹坑信息(单位: m)

弹坑编号	弹坑类型	规格	弹坑中心位置(X, Y)	弹坑尺寸		
				上部/m	底部/m	深度/m
1	明坑	中弹坑	(50, 10)	4	2	1
2	明坑	中弹坑	(150, 35)	5	2	1.5
3	明坑	中弹坑	(330, 40)	7	4	2
4	明坑	中弹坑	(445, 20)	4.5	3.3	2
5	明坑	大弹坑	(680, 10)	8.5	3	1.8
6	明坑	大弹坑	(880, 15)	8	5	1.8
7	明坑	超大弹坑	(1240, 40)	16	3.5	3.5

Table 5. Emergency repair techniques and specifications

表 5. 抢修工艺信息

工艺路线	名称	工序及编码	工艺路线	名称	工序
R ₁	玻璃钢道面板 工艺	开辟作业通道/p ₁	R ₂	快硬混凝土 工艺	开辟作业通道/p ₁
		飞散物清理/p ₂			飞散物清理/p ₂
		测量/p ₃			测量/p ₃
		切割破碎/p ₄			切割破碎/p ₄
		弹坑回填/p ₅			弹坑回填/p ₅

续表

R ₁	玻璃钢道面板 工艺	整平/p ₆	R ₂	快硬混凝土 工艺	整平/p ₆
		碾压/p ₇			搅拌混凝土/p ₁₂
		展板/p ₈			清理/p ₁₁
		拉板/p ₉			
		钻孔锚固/p ₁₀			
		清理/p ₁₁			

Table 6. Repair resource allocation and time standards for craters (Unit: min)

表 6. 弹坑的抢修资源配置及定额(单位: 分钟)

弹坑编号	C ₁																					
抢修工艺	R ₂																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₁₂		p ₁₁							
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₅	M ₁₆	M ₁₇								
抢修时间	5	6	6	5	6	4	15	20	10	12	5	15	5	2								
弹坑编号	C ₂																					
抢修工艺	R ₂																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₁₂		p ₁₁							
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₅	M ₁₆	M ₁₇								
抢修时间	6	8	8	6	8	7	17	22	15	18	8	20	5	3								
弹坑编号	C ₃																					
抢修工艺	R ₁																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₇		p ₈		p ₉		p ₁₀		p ₁₁	
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₈	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₆	M ₁₇					
抢修时间	7	12	13	8	12	10	19	25	20	25	15	5	25	10	10	7	5					
弹坑编号	C ₄																					
抢修工艺	R ₁																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₇		p ₈		p ₉		p ₁₀		p ₁₁	
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₈	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₆	M ₁₇					
抢修时间	6	9	10	6	9	7	18	23	18	20	9	3	20	6	5	5	3					
弹坑编号	C ₄																					
抢修工艺	R ₂																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₁₂		p ₁₁							
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₅	M ₁₆	M ₁₇								
抢修时间	6	9	10	6	9	7	18	23	18	20	9	22	5	3								
弹坑编号	C ₅																					
抢修工艺	R ₁																					
抢修工序	p ₁		p ₂		p ₃		p ₄		p ₅		p ₆		p ₇		p ₈		p ₉		p ₁₀		p ₁₁	
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₈	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₆	M ₁₇					
抢修时间	7	10	11	7	11	9	18	24	19	24	13	5	20	6	8	7	5					

续表

弹坑编号	C ₆																
抢修工艺	R ₁																
抢修工序	p ₁	p ₂		p ₃		p ₄		p ₅	p ₆	p ₇	p ₈	p ₉	p ₁₀	p ₁₁			
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₈	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₆	M ₁₇
抢修时间	8	13	15	9	13	12	20	26	22	26	18	7	28	13	12	7	5
弹坑编号	C ₇																
抢修工艺	R ₁																
抢修工序	p ₁	p ₂		p ₃		p ₄		p ₅	p ₆	p ₇	p ₈	p ₉	p ₁₀	p ₁₁			
抢修装备	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₈	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₆	M ₁₇
抢修时间	10	15	18	12	17	15	25	28	25	28	19	8	30	17	15	5	3

4.2. 基于多色集合的道面抢修资源配置模型

通过以上抢修弹坑与抢修工艺、抢修工艺与抢修工序、抢修装备之间的配置信息，可以构建基于该抢修任务的多色集合的抢修资源配置模型；假定抢修弹坑集合为 C ；抢修工艺路线集合为 F ，即 (R_1, R_2) ；抢修工序集合 A ，即 $(p_1 \sim p_{12})$ ；抢修资源主要为抢修装备 $f_1 \sim f_{17}$ ，即 $(M_1 \sim M_{17})$ 。建立的双层多色集合抢修资源配置模型如图 3 所示。

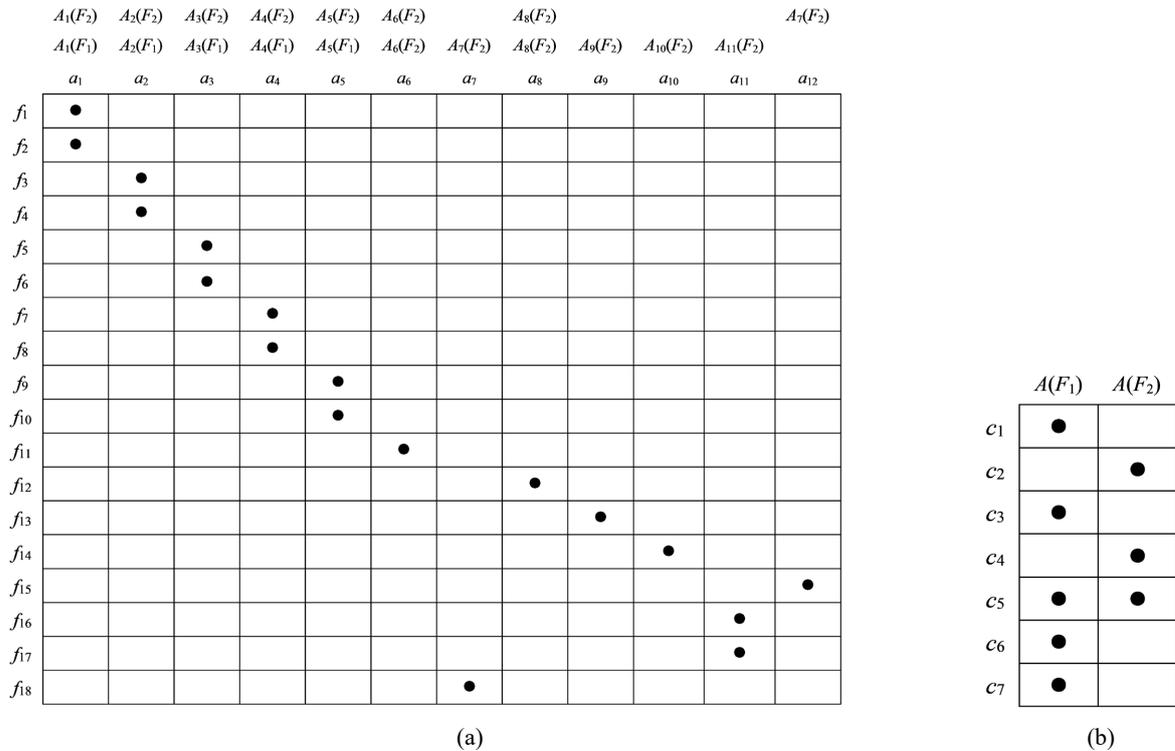


Figure 3. Pavement emergency repair resource allocation model using polychromatic sets. (a) Tier-I polychromatic set model of emergency repair: process/procedure/equipment configuration; (b) Polychromatic set model for crater-repair process configuration (Tier II Polychromatic Sets)

图 3. 基于多色集合的道面抢修资源配置模型。(a) 抢修工艺 - 工序 - 装备配置的多色集合模型(I 层多色集合); (b) 弹坑 - 抢修工艺配置的多色集合模型(II 层多色集合)

4.3. 系统验证

以 Visual Studio 为开发环境，SQL Server 为数据库管理后台，利用 Visual C#编程语言开发了道面抢修资源配置原型系统，实现多弹坑多工艺抢修资源配置与资源配置模型。系统主界面如图 4 所示，多弹坑多工艺抢修资源配置界面如图 5 所示，多弹坑多工艺抢修资源配置模型如图 6 所示。



Figure 4. Main system interface
图 4. 系统主界面



Figure 5. Multi-crater multi-process emergency repair resource allocation
图 5. 多弹坑多工艺抢修资源配置

抢修资源配置模型
✕

应急起降带名称:
 所属道面名称:
 弹坑数量:
 要求时长/h:
 抢修要求时间:

弹坑	玻璃钢道面板工艺 (普通)	快硬混凝土工艺 (普通)
弹坑1	0	1
弹坑2	0	1
弹坑3	1	0
弹坑4	1	1

双击弹坑4#行, 弹出弹坑的抢修工艺配置

弹坑类型	弹坑规格	弹坑特征	直径(m)	深度(m)	X坐标(m)	Y坐标(m)	形成时间
明坑	中弹坑	无积水	4.5	2	445	20	2024-12-25 09:25

抢修工序	玻璃钢道面板工艺 (普通)	快硬混凝土工艺 (普通)															
玻璃钢道面板工艺 (普通) (开辟作业通道)	1	0															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #0056b3; color: white;"> <th>序号</th> <th>工序名称</th> <th>设备名称</th> <th>设备编码</th> <th>定额时间(分)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>开辟作业通道</td> <td>M1</td> <td>test1</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>开辟作业通道</td> <td>M2</td> <td>test2</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	序号	工序名称	设备名称	设备编码	定额时间(分)	1	开辟作业通道	M1	test1	6	2	开辟作业通道	M2	test2	9		
序号	工序名称	设备名称	设备编码	定额时间(分)													
1	开辟作业通道	M1	test1	6													
2	开辟作业通道	M2	test2	9													
玻璃钢道面板工艺 (普通) (碾压)	1	0															
玻璃钢道面板工艺 (普通) (展板)	1	0															

双击行, 弹出抢修工序的设备配置
抢修工序的设备配置

Figure 6. Optimization model for multi-crater/multi-process emergency repair resource allocation
图 6. 多弹坑多工艺抢修资源配置模型

5. 结论

当前国内机场道面抢修活动的组织实施多依靠指挥员现场临机调度, 指挥决策高度依赖个人经验, 为解决这一问题, 本文通过建立数学模型的方式将人、装备、材料看作一个抢修资源单元(装备资源), 针对多弹坑多工艺抢修资源配置过程具有多层次多对多特点, 提出一种基于多色集合理论的机场道面多弹坑多工艺抢修资源配置模型, 实现了从多弹坑→多工艺→多抢修资源之间关联关系表达与配置。设计开发原型系统并验证了所提方法的有效与可行性, 本文所提方法简单易于计算机实现, 能够较直观地形式化、结构化描述多弹坑多工艺抢修资源及配置关系; 在此基础上, 后续将进一步围绕多弹坑多工艺抢修资源调度优化开展研究。

参考文献

- [1] 张韬, 李赞成, 徐芸芸. 基于 TOPSIS 法的机场应急起降带选择[J]. 国防交通工程与技术, 2012, 10(4): 28-30.
- [2] 何苗, 董玉杰, 王强, 等. 基于累积前景理论的机场最小起降带方案决策[J]. 山西建筑, 2017, 43(10): 143-145.
- [3] 张舵, 宋歌, 陈琨, 等. 基于功能恢复时间的机场跑道目标毁伤评估方法[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(3): 94-98.
- [4] Abid, A., Manzoor, M.F., Farooq, M.S., *et al.* (2020) Challenges and Issues of Resource Allocation Techniques in Cloud Computing. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, **14**, 2815-2839. <https://doi.org/10.3837/tiis.2020.07.005>
- [5] 高新勤, 李言, 杨明顺, 等. 基于多色集合离析运算的工作流资源管理与配置方法[J]. 计算机集成制造系统,

- 2011, 17(9): 1905-1912.
- [6] 郝真鸣, 孙丹丹, 郝晋渊, 等. 基于 Petri 网的离散事件系统初始资源优化配置[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40(2): 212-217.
- [7] 刘明周, 马靖, 王强, 等. 一种物联网环境下的制造资源配置及信息集成技术研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(3): 339-347.
- [8] 王时龙, 宋文艳, 康玲, 等. 云制造环境下的制造资源优化配置研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1396-1405.
- [9] 陈友玲, 段克华, 刘舰, 等. 云制造环境下基于双层规划的资源优化配置模型[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3713-3717, 3724.
- [10] Han, Z., Mo, R., Yang, H. and Hao, L. (2019) Structure-Function Correlations Analysis and Functional Semantic Annotation of Mechanical CAD Assembly Model. *Assembly Automation*, **39**, 636-647. <https://doi.org/10.1108/aa-09-2017-109>
- [11] Zhang, J., Zhou, Y., Zhang, Q. and Wei, X. (2016) Product Conceptual Design Based on Polychromatic Sets Theory and Axiomatic Design. In: Huang, B. and Yao, Y., Eds., *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control*, Springer, 1061-1069. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48768-6_118