

# 基于废墟结构特征的灾后救援机器人设计研究

孟凯宁<sup>1</sup>, 舒昀澍<sup>1</sup>, 杜成群<sup>2</sup>

(1.西华大学, 成都 610039; 2.蒲江县中德中小企业合作区, 成都 611633)

**摘要:** **目的** 针对地震灾后废墟结构特征进行调研和分析, 提出一种能够在复杂废墟结构中高效工作的救援机器人设计方案。**方法** 首先通过对废墟的类型、结构特征、受力情况、内部空间等因素进行调研分析, 提出对应的救援策略与废墟结构安全评估法则, 总结现有设备在复杂废墟结构中存在的问题, 以此构建灾后救援机器人创新设计要素; 再通过 TRIZ 理论建立救援设备功能模型图并确定技术矛盾; 最后结合阿奇舒勒矩阵得出数条发明原理, 利用创新设计要素对其依次进行评估并筛选出需要利用的创新原理, 以指导救援机器人创新设计。**结论** 针对灾后废墟结构特征进行研究分析, 能够有效指导救援类产品进行创新设计, 并为相关研究提供参考。

**关键词:** 工业设计; 废墟结构特征; 救援策略; TRIZ-阿奇舒勒矩阵; 弹跳跨障; 结构设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)24-0180-09

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.24.020

## Design and Research of Post-disaster Rescue Robot Based on Structural Features of Ruins

MENG Kai-ning<sup>1</sup>, SHU Yun-wei<sup>1</sup>, DU Cheng-qun<sup>2</sup>

(1.Xihua University, Chengdu 610039, China; 2.Pujiang Sino-German SME Cooperation Zone, Chengdu 611633, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to investigate and analyze the structural characteristics of the ruins after the earthquake, and propose a design scheme for rescue robots that can work efficiently in complex ruin structures. First, by investigating and analyzing factors such as the type of ruins, structural characteristics, stress conditions, internal space, etc., the corresponding rescue strategy and ruin structure safety assessment rules are proposed, and the problems existing in the work of the existing equipment in the complex ruin structure are summarized to construct innovative design elements for post-disaster rescue robots; then TRIZ theory was used to establish a functional model diagram of rescue equipment and determine technical contradictions; finally, through combining the Altshuller matrix, several invention principles were derived, and innovative design elements were used to evaluate them in turn and filter out the essentials to guide the innovative design of rescue robots. In conclusion, the systematic research and analysis of structural characteristics of the ruins after disasters can effectively guide the innovative design of rescue products and improve the efficiency of innovative design.

**KEY WORDS:** industrial design; structural characteristics of the ruins; rescue strategy; TRIZ-Achshuler matrix; bounce over obstacles; structural design

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 四川省社会科学重点研究基地民族文化研究中心项目(YZWH2203); 四川省社会科学重点研究基地四川旅游发展研究中心项目(LY22-36); 西华大学研究生创新基金项目(YCJJ2021019); 四川省哲学社会科学重点研究基地数字文化与传媒研究中心项目(CDCM202208); 四川省社会科学重点研究基地羌学研究中心项目(2022QXYB003); 四川省哲学社会科学重点研究基地四川张大千研究中心项目(ZDQ2022-16)

作者简介: 孟凯宁(1977—), 男, 教授, 主要研究方向为工业设计、生态设计、产品设计创新方法与应用等。

通信作者: 舒昀澍(1998—), 男, 硕士生, 主攻工业设计。

地震、泥石流、塌方等自然灾害长期以来在我国频频发生, 根据国际救援组织在近年救援行动中得到的相关数据统计, 死亡的受害者中有七成是灾害直接导致的, 其余三成是由于没有及时救援而导致的<sup>[1]</sup>。由于灾后地区内部的坍塌物结构复杂, 在灾后救援中, 存在许多风险因素, 例如坍塌物的再度坍塌、辐射、核泄漏等, 对于救援人员的心理、体力都存在极大干扰<sup>[2]</sup>。人们逐渐意识到灾后救援的重要性, 纷纷对灾后救援进行研究, 并试着追求地震救援设备的突破与创新<sup>[3-4]</sup>。已有学者通过学习灾后救援知识并运用机械设计进行创新设计, 比如贺娜<sup>[5]</sup>利用运动仿真和静态学模拟中的螺旋与转动装置, 提出的一款顶撑式救援机器人设计; 卢孔宝等<sup>[6]</sup>运用机械臂的多关节精准设计, 对救援机器人进行优化; 顾鹏<sup>[7]</sup>利用机器人自适应变形履带, 设计了一款地震信息采集机器人。此类研究均取得了良好的效果, 但大部分救援设备体积较大且采用轮动式, 无法切实适用于灾后复杂的废墟环境。本研究从灾后废墟复杂的结构特征出发, 对其进行调研分析与评估, 以此优化现有设备, 提高救援效率。

## 1 研究背景

### 1.1 灾后救援的重要性

地震灾害的发生不仅对居民生活环境造成破坏, 同时也带来巨大的经济损失与人员伤亡, 灾后抢救至关重要, 受困者的生存率会随着救援时间的增加而降低; 而面对复杂的废墟结构, 如何使用智能救援设备快速且安全地进入震区内部进行生命探索, 防止对伤员造成二次伤害, 在增加救援效率的同时保证救援人员的安全性, 成为了解决问题的关键。

### 1.2 现有智能救援产品分析

智能救援设备在现有市场中主要被划分为进行生命痕迹探索的手持仪器和轮动式小型装备、进行医疗运输和灾区解剖的大型装备、用于勘测地形的飞行设备或地貌勘测设备, 以及一些特殊设备, 例如辅助进行生命探测的仿生机器人、测距与图像感知设备、二氧化碳浓度检测设备、探测呼吸与体温的机器。从功能、优点、不足等方面对现有灾后救援产品展开分析, 具体见表 1。

表 1 现有智能救援产品分析  
Tab.1 Analysis of existing smart rescue products

名称	仿生探测机器人	呼吸探测机器人	地形勘测机器人	飞行机器人	履带式救援机器人	运输机器人	灾区解剖设备
图示							
功能	深入灾区内部探索救援	探测呼吸和体温	地形勘测与图像传输	运输物资与地形勘测	灾区内部搜索或运输伤员	伤员, 医疗物资的运输	分解灾区, 解剖巨石
优点	体积小, 灵活性高	有效掌握灾区内部情况	有效掌握灾区地形情况	增加物资运输数量	降低救援人员受伤风险	增加运输方式, 提高救援数量	高效率对大型建筑部件进行解剖
不足	无法应对高度错落的地形	技术不稳定, 成本高	图像传输速度缓慢	运输空间小, 运输成本高	结构繁杂, 造价昂贵, 易损坏	运输效率低, 成本高	组装时间长, 对地形要求高

## 2 废墟结构特征调研分析

### 2.1 典型废墟的结构与生存空间特点

在地震灾害中, 大量建筑物的坍塌是造成人员伤亡的主要因素, 而灾后废墟时常伴随着二次灾害与二次坍塌, 例如供电系统、排水系统、天然气系统的破坏会导致触电、爆炸、火灾、水灾、放射性气体泛滥等灾害发生; 因此, 废墟结构状态会对设备工作、人员安全状态产生极大影响, 不同的废墟结构特征需要采取不同的救援方案, 利用智能救援设备提高救援效率, 离不开对地震废墟结构特征进行系统性的调研分析。

通过实地考察青川地震遗址公园、映秀地震遗址和文献资料收集<sup>[8-10]</sup>, 可利用建筑物整体坍塌程度将废墟类型划分为局部坍塌、薄弱层坍塌、完全坍塌、

倾斜型四类:

- 1) 局部坍塌。建筑物横向或纵向的部分结构单元受到破坏, 与其余物件形成部分支撑关系, 容易对其余单元造成变形和破坏, 稳定性较差, 容易二次坍塌, 但内部生存空间较多。
- 2) 薄弱层坍塌。建筑物底层、中间层或顶层的核心结构受到破坏, 坍塌不彻底易造成二次坍塌, 稳定较高且生存空间较多。
- 3) 完全坍塌。建筑物纵向构件几乎全部受到破坏, 各层横向部件叠合, 生存空间少, 但稳定性高, 二次坍塌的可能性较低。
- 4) 倾斜型。建筑物部分横向、纵向的部分结构单元受到拉扯或破坏而变形, 导致地基受重不均, 结构较稳定且生存空间较多。

从物件坍塌方式、结构特征、受力方式、生存空间特点等方面进行研究分析后,可对建筑物的坍塌类

型继续细分,例如A字坍塌、V字坍塌等,并绘制出每种坍塌类型特征图,具体见表2。

表2 废墟结构特征分析  
Tab.2 Analysis of the structural characteristics of the ruins

废墟类型	坍塌方式	结构特征与受力分析	生存空间特点	图示
局部坍塌	V字坍塌	建筑物部分横向结构中部断裂,呈现中间低两边高的V字形态与内部空间,结构较不稳定	塌落物件底部和两侧纵向物件之间形成夹角与多个生存空间,具有一定存活率	
	悬臂坍塌	建筑物部分纵向墙面脱落,地板或天花板某一端悬吊于半空中,结构极不稳定	非悬臂处,悬臂物上方、悬臂下方局部或封闭的多个生存空间,具有一定存活率	
	夹层坍塌	建筑物部分填充墙、梁、柱断裂,导致中间层受到严重破坏,形成夹层,结构较稳定	生存空间过于窄小,存活率低	
	支撑坍塌	建筑物部分天花板、地板、支撑墙断裂或脱落,形成部分支撑结构,结构较不稳定	坍塌物件与物件之间互相支撑形成多个生存空间,具有一定存活率	
	复合坍塌	建筑物在不完全坍塌的情况下,存在各种局部坍塌类型,结构较不稳定	各种物件支撑出多个生存空间,具有一定存活率	
薄弱层坍塌	底层坍塌	建筑物底层核心受力的填充墙、梁、柱变形程度大、受破坏程度高,易再次坍塌,结构较不稳定	底层上方形成生存空间,存活率较高	
	中间层坍塌	建筑物与局部夹层坍塌相似,中间某层结构受到严重破坏,结构较不稳定	中间层上方,下方形成生存空间,存活率较高	
	顶层坍塌	建筑物顶层支撑结构变形,受力过载,受到严重破坏发生坍塌,结构较稳定	顶层下方形成生存空间,存活率较高	
完全坍塌	V字坍塌	建筑物结构几乎完全受到破坏,整体坍塌形状呈V字结构,结构较不稳定	建筑内部坍塌物件之间形成多个支撑空间,外部坍塌物件与底面之间形成V字结构,具有一定存活率	
	A字坍塌	建筑物底层支撑结构失效,上层结构因重力下落坍塌,整体形成A字结构,结构较不稳定	建筑内部坍塌物件之间形成多个支撑空间,具有一定存活率	
	饼状坍塌	建筑物的填充墙、梁、柱,几乎完全受到破坏,整体坍塌形状呈饼状,结构较稳定	内部支撑空间较少,存活率较低	
倾斜型	前后倾斜	建筑物部分横向、纵向的填充墙、梁、柱受重力过载而断裂或破损引发倾斜,造成下方地基应力受重不均衡出现倾斜,结构较稳定	受困人员主要被门窗或楼道变形所困,生存率较高	
	左右倾斜			

## 2.2 不同废墟结构的救援策略

通过对各类典型废墟结构的特征与生存空间的分析,总结得出不同废墟类型对应的救援策略,具体见表3。

## 2.3 废墟结构安全评估法则

应急救援的安全评估工作尤其重要,目前大多是依靠专家经验,但这种方式主观性较强;通过上述分析,并从《GB18208.2-2001地震现场工作第二部分:

建筑物安全鉴定》中提取相关知识,可对救援安全有影响的因素进行总结,利用影响因子数值建立废墟结构安全状态的评估准则,具体见表4。

通过对废墟结构状态进行评估,计算影响因子总和得出安全指数,将救援安全性分为三个等级,各等级对应的废墟结构安全状态见表5;安全指数越大,废墟结构越危险。通过该评估方法有效衡量废墟状态,有利于迅速采取相对应的应急救援措施与防范措施,提高救援效率。

表 3 不同废墟结构下的救援策略  
Tab.3 Rescue strategies under different ruin structures

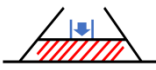
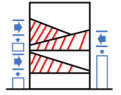

废墟类型	特征	救援策略	救援通道图示
完全坍塌	各部件较松散, 挖掘较容易, 但生存空间较小	可从废墟上部建立救援通道, 从上向下进行搜救, 避免上部构件发生二次塌落。	
局部坍塌	结构稳定性差, 但生存空间较高	可选择背离坍塌侧的门窗或洞口向内建立救援通道, 并在救援通道洞口处做有效支撑, 以保证设备和人员的安全。	
薄弱层坍塌	结构稳定性与薄弱层松散程度成正比	首先搜救并撤出其余楼层人员, 针对坍塌层进行救援。例如底层坍塌, 搜救时应从上一层进入至废墟结构, 从上向下通过破拆建立救援通道。	

表 4 废墟结构安全等级评估表  
Tab.4 Ruin structure safety rating form

影响因素	具体情况	影响因子
地势情况	无山体滑坡、崩塌、垮岸、水患等影响	0.4
	有山体滑坡、崩塌、垮岸、水患等影响	0.6
地基情况	稳定, 没有产生滑移	0.4
	不稳定, 产生滑移, 水平位移距离 > 10 mm, 对上部废墟结构产生影响, 且有继续滑动趋势	0.6
柱、梁情况	结构稳固, 承载力强, 足以支撑废墟结构	0.4
	结构老化、酥碎, 难以支撑废墟结构	0.6
周围建筑情况	结构完好	0.3
	结构出现倾斜, 但倾斜量 ≤ 高度的百分之一	0.5
	结构受到严重破坏, 倾斜量 > 高度的百分之一	0.7
墙体连接情况	墙体本身与墙体连接结构均无裂缝	0.4
	墙体本身或墙体连接结构出现裂缝	0.6
楼盖与墙体连接情况	连接良好, 无滑移现象	0.4
	连接不良, 出现裂痕、移动现象	0.6
女儿墙、烟囱等非结构部件情况	部件完好, 无破碎、脱落等现象	0.4
	部件出现破碎、脱落等现象	0.6
砂浆强度情况	≥ M7.5	0.3
	M5	0.5
	≤ M2.5	0.7
部件之间的接触点情况	两部件之间接触点数量 ≥ 4 且接触面大	0.3
	两部件之间接触点数量 = 3 且接触面较小	0.5
	两部件之间接触点数量 < 3 且接触面小	0.7
生存空间情况	至少一人通畅进入	0.3
	简单清障可进入	0.5
	大面积清障可进入	0.7

表 5 废墟结构安全等级判定表  
Tab.5 Ruin structure safety level judgment table

废墟安全等级	废墟结构状态	安全指数区间
等级 1	结构安全稳定, 可直接进入	[3.6,4.3]
等级 2	结构较稳定, 但有潜在危险因素	(4.3,5.7]
等级 3	结构不稳定, 二次坍塌风险高	(5.7,6.4)

## 2.4 现有救援设备在复杂废墟中工作面临的问题

基于上述废墟结构特征的调研分析, 当废墟结构安全等级 ≥ 2 且安全指数 > 4.3 时, 面临废墟内部的 A 形坍塌、V 形坍塌, 悬臂坍塌、支撑坍塌等复杂结构时, 利用智能设备进行灾后应急救援中主要存在以下问题:

1) 大型设备机动性差。废墟内各受损物件受力不均衡、内部环境参差不齐; 例如在悬臂、支撑坍塌

的废墟结构下,如地形勘测设备、生命探测设备、医疗运输设备、灾区解剖设备等无法快速、安全地进入废墟内部进行工作,且在复杂废墟中工作范围小,部分大型智能设备易损坏且只能依靠飞机协助进入现场,因此降低了救援效率。

2) 小型设备功能单一。如手持类生命探测仪、液压钳、毒气探测仪等小型设备人工配合需求性高、功能单一,人无法进入的狭小空间设备也无法工作,这会给救援人员造成负担,降低救援效率。

3) 搜救人员可携带重量有限。高低错落的废墟结构需要大量的救援设备投入工作,但人体可承受的重量有限,为防止被建筑物件的二次坍塌所困,救援人员会尽量轻装上阵,只携带一些必要工具,减少自身体力消耗,增加自由移动速率,但携带少量的救援设备会造成无法准确定位受困人员、建筑物件解剖缓慢等后果,从而降低救援效率。

4) 无法保证搜救安全性。当救援人员在废墟缝隙、内部进行救援时,灾区受到突发性余震影响及物件损坏会二次坍塌,而现有针对此情况的防护类设备较少,无法保证救援人员和受困人员的安全性。

## 2.5 救援机器人创新设计要素构建

针对以上四个主要问题构建出废墟结构特征下的救援机器人创新设计要素:

1) 全地形适应性。针对大型设备在复杂废墟结构中机动性差的问题,设备能否迅速进入废墟内部、适应并通过全地形极其重要,其中设备的体积大小与行进装置是关键。行进装置主要分为履带装置和轮胎装置两种,前者通过能力、负重性、爬坡能力强,但行驶速度慢、重量大、减震性差、对地面稳定程度要求高;后者速度快、机动性强、减震性好,但负重性差;装置的具体选择需要根据具体用途和场地确定。

2) 功能多样性。针对小型设备在复杂废墟结构中功能单一的问题,救援机器人应具备多功能,但并非简单地进行功能叠加,而是工具、结构、功能的分析整合与创新。

3) 机身轻量化。针对救援人员在复杂废墟结构中可携带重量有限的问题,提出设备轻量化设计原则。质量较大的救援机器人无法适应复杂的废墟环境,同时容易引发二次坍塌,轻量化设计的主要优势在于消耗低、续航强、能给救援人员减轻负担;其中材料是关键,例如高强度钢铁、铝合金、碳纤维、玻璃纤维、橡胶等新材料可以满足设备的轻量化设计,同时保证设备的坚固性。

4) 结构稳定性。针对救援人员的安全性问题,设备稳定的结构及工作状态是避免二次坍塌的重要因素。稳定且轻巧的设备结构可以使产品在正常工作的过程中尽量不对周围环境产生影响,保证废墟内部的人员安全。

## 3 利用 TRIZ 理论确定救援机器人创新原理

### 3.1 TRIZ 创新设计模型与功能组件分析

本研究通过整合上述创新设计要素,并结合 TRIZ 理论来确定产品创新设计原理。大概过程为:首先针对上述复杂废墟中存在的问题,选用生命探测类智能救援机器人作为设计对象,利用功能模型图对救援设备中各组件的交互关系进行分析,确定技术矛盾并得出数条发明原理<sup>[11]</sup>,再利用创新设计要素对发明原理进行评估与筛选,最后得出创新设计方案。TRIZ 创新设计模型见图 1。

现有生命探测类智能救援设备的主要问题是:能够应用红外探测、雷达探测技术有效检测生命痕迹,但复杂的废墟内部结构、较大程度的人工辅助、功能单一且机动性差、在废墟内部高度错落的环境下易损坏,这一系列的问题会阻碍救援工作,降低救援效率。功能组件分析是针对产品功能组件进行的一种系统性分析过程,该方法原理为将产品的功能组件拆分为独立单元,分析组件之间的交互作用<sup>[12]</sup>,并从中找到技术矛盾与解决问题的切入点。生命探测救援设备的功能组件被分为超系统组件、系统组件等元素,其功能模型图见图 2。

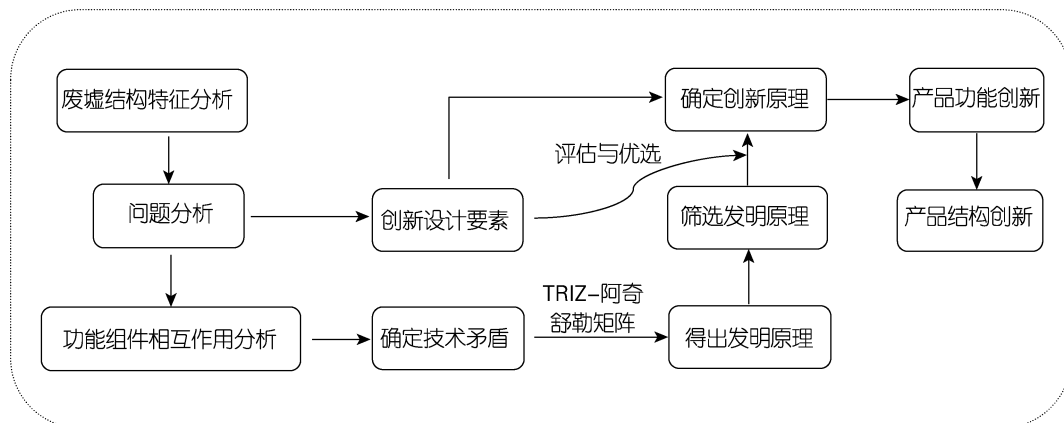


图 1 TRIZ 创新设计模型

Fig.1 TRIZ theoretical innovation design model

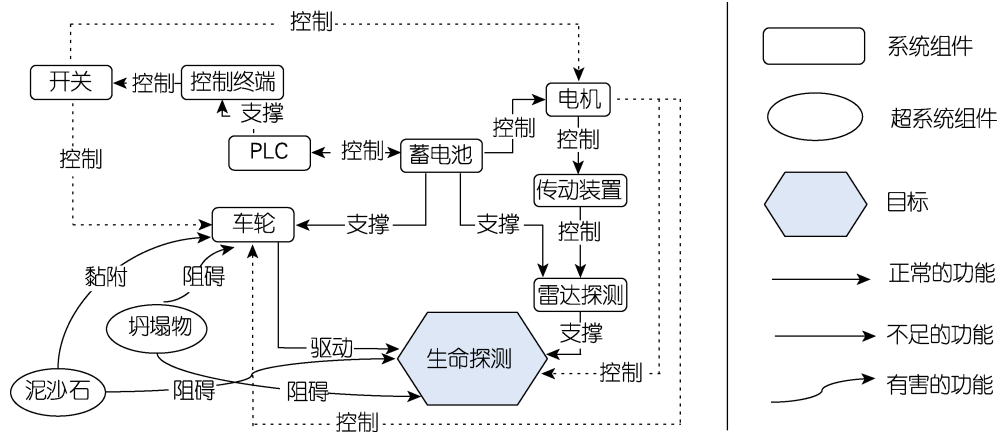


图 2 救援设备的功能模型图  
Fig.2 Functional model of rescue equipment

3.2 确定创新原理

根据功能组件分析的结果确定技术矛盾, 并利用 39 个通用工程参数寻找出最贴合救援设备研究的参数<sup>[13]</sup>: 灾后救援设备需要提高在复杂废墟结构中的工作能力, 并且尽可能降低成本或者保持较简单的结构工艺; 而现有设备的优化需求最接近通用工程参数中的“结构的稳定性”和“适用性及多用性”, 分别位于通用工程参数中的 13 行和 35 行, 属于要改善的参数; 同时, 由于增加的结构设计使产品复杂化, 因而产品制造工艺、成本和重量属于恶化参数, 最接近通用工程参数中的“运动物体的重量”和“可制造性”, 分别位于矩阵中的 01 列和 32 列。

根据 TRIZ-阿奇舒勒矩阵确定这两列与彼此对应两行所交叉对应的单元 (见表 6), 得到各组发明原理。利用创新设计要素将各条发明原理依次进行评

估 (见表 7), 优选出 1 号 (分离法)、15 号 (动态法) 和 35 号 (性能转换法) 为创新原理; 最后选择以结构设计为基础, 提出一种以弹跳跨障为工作原理的救援机器人创新设计方案。

表 6 各参数在矩阵中交叉对应的单元  
Tab.6 Cross corresponding units of each parameter in the matrix

改善参数对应的通用工程参数	恶化参数对应的通用工程参数	交叉对应的发明原理
13 行-结构稳定性	01 列-运动物体的重量	2、21、39、35 号发明原理
	32 列-可制造性	19、35 号发明原理
35 行-适用性和多用性	01 列-运动物体的重量	1、6、8、15 号发明原理
	32 列-可制造性	1、13、31 号发明原理

表 7 对各发明原理进行评估与优选  
Tab.7 Evaluation and optimization of the principles of each invention

发明原理	设计思路	全地形适应性	功能多样性	机身轻量性	结构稳定性
1 号原理	分割原则——增加产品功能模块结构的独立程度与可拆卸程度		✓	✓	✓
2 号原理	拆出原则——增强结构之间的分离性				
6 号原理	多功能原则——能够执行不同功能		✓		
8 号原理	反重量原则——产品与具有反方向力的部件结合, 抵消产品重量			✓	
13 号原理	相反原则——实现相反的目标				
15 号原理	动态原则——使产品结构或功能在工作中产生动态变化	✓	✓		
19 号原理	周期原则——产品工作周期及其之间的间隙能够搭配起来工作		✓		
21 号原理	跃过原则——跳过某个有危害的工作阶段				
31 号原理	多孔材料原则——使用多孔材料, 利于散热				✓
35 号原理	性能转化原则——改变产品部件、结构的物理特性	✓			✓
39 号原理	惰性介质原则——真空进行工作				

## 4 灾后救援机器人创新设计方案

### 4.1 创新设计要素在产品创新中的应用

生命探测类的救援机器人创新设计应符合基于废墟结构特征的创新设计要素,以及由 TRIZ 理论所构建出的发明原理,因此根据上述研究结果,对弹跳式救援机器人的功能、材料、尺寸、外观进行定义与阐述:

1) 全地形适应性。救援机器人的形状应圆润,尺寸应较小,具有平滑的曲线,救援机器人的外观造型见图 3。面对复杂的废墟坍塌结构,为提高设备在废墟内部的机动性,本研究提出以“弹跳”的方式跨越障碍物;当面对局部坍塌中的悬挂部件、破碎的支撑物件、高低错落的砌体结构与钢筋进行生命探测,而常规设备和救援人员无法直接通过时,此设备能够利用其小巧的体积通过救援通道迅速进入废墟内部的狭小空间进行生命探测,通过“弹跳”的方式跨越障碍,解决了现有大型设备机动性差、无法迅速进入废墟内部的问题。

2) 功能多样性。救援机器人可进行生命探测与定位、实时勘测地形并反馈数据,以及携带少量急救药品,同时设备的人工配合需求程度低,可独立进行高效救援。

3) 机身轻量化。为防止设备在高度错落的地形中损坏或引发二次坍塌,救援机器人需要使用耐用且轻便的材料来降低救援人员在工作中的重量负担,减少设备工作中的机械振动,降低二次坍塌和人员二次伤亡的风险,因此,选用铝合金和塑料用作救援机器人的主要材料。铝合金密度低、强度高,具有良好的可塑性;塑料具有很强的耐腐蚀性和易加工性,以及耐用、防水、轻便等优点。由于铝合金不易形成曲率过大的形态,因此设备主体的材料为塑料,主体两侧的连杆为铝合金,轮胎为橡胶制成,弹跳机构内的各零部件由塑料、钢、硅胶等材料制成。

4) 结构稳定性。设备的内部结构主要分为三个模块:驱动模块、生命探测模块、弹跳装置模块,三个模块独立程度较高且在工作中互不影响,稳定性高且方便拆卸,符合 TRIZ—分割原则特征;弹跳装置结构在工作中的动态变化符合 TRIZ—动态变化原则与性能转换原则。

5) 基本尺寸。根据从青川地震遗址公园、映秀地震遗址收集的数据得知,在 500 mm 以下的范围内,障碍物最低面与地面形成的高度差平均值约为 220 mm,因此,救援机器人的整体高度应控制在 220 mm 以下。同时,机身采用双蓄电池模式,设备采用 12 伏 LC-R124.5 的蓄电池,电池尺寸为 90 mm×70 mm×98 mm,考虑到应急药品内部存放的空间问题,救援机器人的尺寸拟定为 300 mm×210 mm×210 mm。



图 3 弹跳式救援小车的外观造型设计  
Fig.3 The appearance design of the bounce rescue car

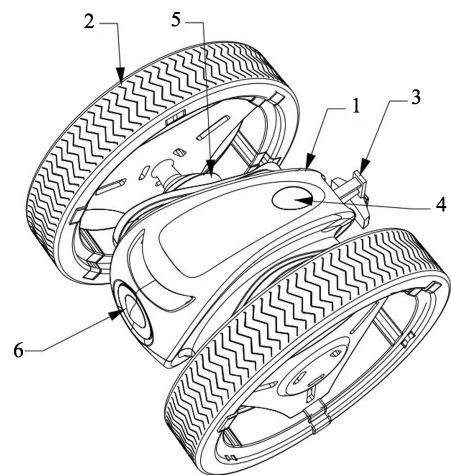


图 4 救援机器人的结构示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the rescue robot

### 4.2 设备内部结构与工作原理

为更清楚地说明设备结构、功能原理、使用流程,下面对产品结构进行附图并作简单介绍说明,产品外壳与内部功能组件具体见图 4—5。图中标记分别为:1-外壳、2-行进轮、3-弹跳装置、4-内部储存结构、5-传动杆、6-生命探测仪;31-主连接板、32-横杆、33-主气缸、34-弹簧、35-次连接板、36-次气缸、37-凹槽、38-挡板、51-电池、52-传动结构。壳体前的生命探测仪用于探索受困者的位置信息,并实时传送给救援人员;壳体内设有存储空间,可携带少量急救药品;构成弹力机构的组件包括气缸、弹簧、横杆等结构,弹力机构的结构组件具体见图 5b。

在设备工作时,壳体前端的生命探测仪进行探测与数据反馈,当遇到障碍物或无法正常通过的地形时,次气缸活塞杆向外推出,将连接板推至外侧挡板,主气缸随之启动并收缩带动横杆回伸,压缩弹簧后释放,弹簧与地面碰撞反作用于小车,小车弹起( $G \text{ 车} < F \text{ 弹} \leq 3G \text{ 车}$ ,  $G \text{ 车} \approx 15 \text{ N}$ ,弹跳冲击力较小且与地面

接触面小, 但需避免在脆弱零散的部件上工作)。下落过程中次气缸活塞杆收回, 连接板被拉至内侧挡板处, 设备下落至与地面接触时只有车轮接触地面, 壳体和弹力机构都不会与地面碰撞(车轮尺寸 > 机体尺寸), 从而保护设备内部核心结构。该设备机动性强, 采用轮动及弹跳的方式进行工作, 可用于多种废墟环境。根据产品各部分结构与功能之间的联系将其图像化, 便于理解救援机器人的使用流程和内部原理, 具体见图 6。

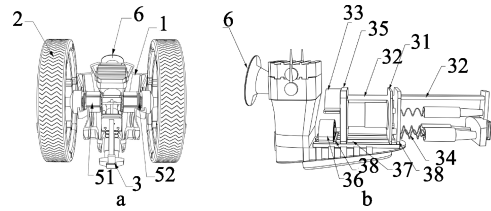


图 5 救援机器人去掉上半壳体的俯视结构与弹力机构结构示意图

Fig.5 The structure of the rescue robot and the top view structure with the upper half shell removed

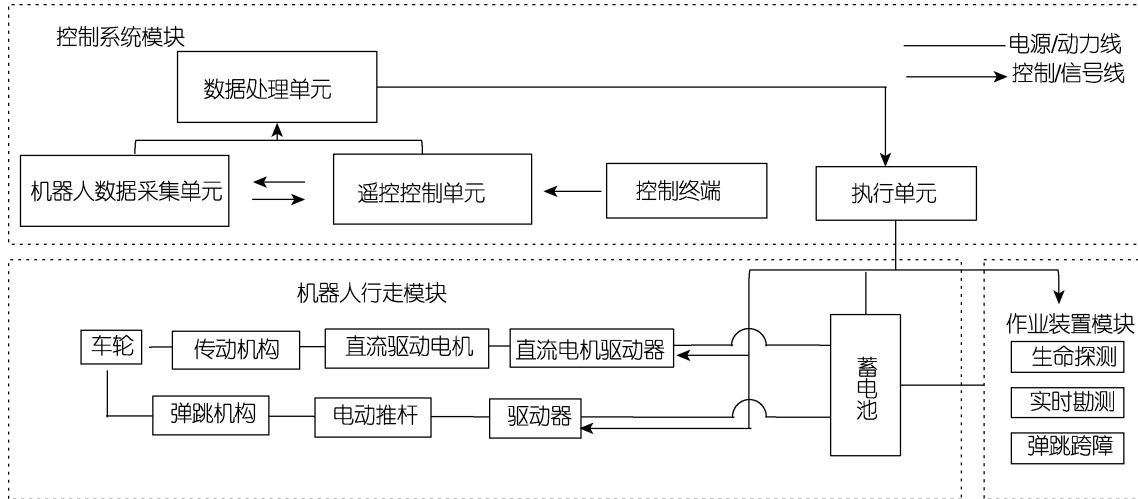


图 6 弹跳式救援机器人的模块组成

Fig.6 Modular composition of the bounce rescue robot

### 4.3 救援机器人在不同废墟结构特征中的应用

根据废墟结构特征对设备的工作方式进行简述, 具体见表 8。

表 8 设备在不同废墟结构中的工作方式  
Tab.8 How the equipment works in different ruin structures

废墟结构特征	稳定性	安全指数	工作方式
少部分建筑构件出现 A 形、V 形、悬臂、支撑坍塌	较稳定	[3.6,4.3]	设备与救援人员直接进入废墟内部进行生命探测
部分建筑构件出现 A 形、V 形、悬臂、支撑坍塌	较不稳定	(4.3,5.7]	设备进入、救援人员根据情况考虑是否进入到废墟深处
大部分建筑构件出现 A 形、V 形、悬臂、支撑坍塌	极不稳定	(5.7,6.4]	救援人员操纵设备进入废墟内部狭小空间进行生命探测

综上所述, 在废墟安全等级  $\geq 2$  且安全指数  $> 4.3$  时, 该设备可以通过救援通道迅速进入废墟内部, 在不破坏废墟结构的前提下进入大型设备与人无法进入的狭小空间, 克服复杂地形进行生命探测, 其轻便耐用的材料、稳定的结构在保证自身工作效率的同时, 降低二次坍塌和伤害的概率, 以此提高救援效率。

## 5 结语

随着科技与社会的进步, 救援设备的研发也越来越具有挑战性, 其在国内外将持续具有广阔的发展前景。本文通过对废墟结构特征的系统性调研分析, 提出创新设计要素, 利用 TRIZ 理论, 指导地震救援设备进行创新设计; 结合灾区特征、用户需求、机械结构, 对产品进行准确定义, 设计实践结果表明, 该研究方法能够有效指导地震灾害救援设备进行功能创新和结构创新, 为相关产品甚至其他种类产品的创新设计提供了有效参考。

### 参考文献:

- [1] FANG Zhi-ming, HUANG Jia-hao, HUANG Zhong-yi, et al. An Earthquake Casualty Prediction Method Considering Burial and Rescue[J]. Safety Science, 2020, 126: 104670.
- [2] PAN Shen-run, LI Man-zhi. Construction of Earthquake Rescue Model Based on Hierarchical Voronoi Diagram[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 4576093.
- [3] 徐若涵. 中国地震救援机器人技术发展现状及趋势[J]. 机器人产业, 2018(5): 86-93.

XU Ruo-han. Development Status and Trend of Earth-



- quake Rescue Robot Technology in China[J]. Robot Industry, 2018(5): 86-93.
- [4] 孙晓普, 杨国强. 危险环境下救援机器人技术发展现状与趋势[J]. 科技与创新, 2019(11): 59-60.  
SUN Xiao-pu, YANG Guo-qiang. Development Status and Trend of Rescue Robot Technology in Dangerous Environment[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(11): 59-60.
- [5] 贺娜. 新型顶撑救援机器人的设计与研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.  
HE Na. The Design and Research of the New Jack Rescue Robot[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016.
- [6] 卢孔宝, 陈华勇. 灾后救援机器人的机械结构设计[J]. 浙江水利水电学院学报, 2018, 30(2): 54-58.  
LU Kong-bao, CHEN Hua-yong. Mechanical Structure Design of Rescue Robot after Disaster[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2018, 30(2): 54-58.
- [7] 顾鹏. 被动自适应机器人移动机构研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.  
GU Peng. Study on the Mechanism of a Passive Self-Adaptive Mobilerobot[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [8] 陆晨熙. 多功能穿戴式地震救援机械外骨骼设计研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.  
LU Chen-xi. Research on Exoskeleton Design of Multi-Function Wearable Earthquake Rescue Aids[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.
- [9] 单若宸. 典型底框砌体结构地震倒塌模式及其废墟结构特征研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.  
SHAN Ruo-chen. Study on the Seismic Collapse Pattern and the Ruin's Structural Characteristics of Typical RC Frame Supported Masonry Structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2015.
- [10] 翁旭然. 建筑结构地震倒塌及存活空间分布规律研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.  
WENG Xu-ran. Study on Collapse Patterns of Building Structures and the Distribution of Survival Room in Collapsed Building Ruins[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2015.
- [11] 白仲航, 孙慧慧, 张俊磊. 基于TRIZ和类比设计的服务接触点优化应用研究[J]. 包装工程, 2020, 41(16): 91-97.  
BAI Zhong-hang, SUN Hui-hui, ZHANG Jun-lei. Service Contact Point Optimization Based on TRIZ and Analog Design[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(16): 91-97.
- [12] 罗寅, 王子懿, 王智慧. 基于TRIZ理论的煤矿井下巡检机器人导向轮设计及分析[J]. 科学技术创新, 2020(34): 10-11.  
LUO Yin, WANG Zi-yi, WANG Zhi-hui. Design and Analysis of Guide Wheel of Coal Mine Inspection Robot Based on TRIZ Theory[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(34): 10-11.
- [13] 张建敏, 王建伟, 杨勤, 等. 基于TRIZ理论的手扶式旋耕机造型设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(4): 133-139.  
ZHANG Jian-min, WANG Jian-wei, YANG Qin, et al. The Modeling Design of Hand-Held Tillers Based on TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(4): 133-139.

责任编辑: 马梦遥

(上接第179页)

- [12] 谈莉斌, 唐敦兵, 朱海华. 用户参与产品设计过程动态特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 404-410.  
TAN Li-bin, TANG Dun-bing, ZHU Hai-hua. Dynamic Characteristics of User's Participation in Product Design Process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 404-410.
- [13] 杨勤, 李炜烙, 周艾, 等. 基于TRIZ理论的行李箱创新设计[J]. 图学学报, 2021, 42(1): 158-164.  
YANG Qin, LI Wei-lao, ZHOU Ai, et al. Innovative Design of Luggage Case Based on TRIZ Theory[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(1): 158-164.
- [14] 白仲航, 许彤, 丁满. 集成价值工程与TRIZ求解工具的产品创新设计研究[J]. 机械设计, 2018, 35(3): 114-118.  
BAI Zhong-hang, XU Tong, DING Man. Product Innovation Design Integrated with Value Engineering and TRIZ Solving Tool[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(3): 114-118.
- [15] 谭浩, 李薇, 韩丽红. 用户参与式工业设计生成思维研究[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 146-151.  
TAN Hao, LI Wei, HAN Li-hong. User Participatory Industrial Design Generative Thinking[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 146-151.
- [16] 潘飞, 姜可, 王东琦. 基于眼动追踪技术的购票网站可用性设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 243-247.  
PAN Fei, JIANG Ke, WANG Dong-qi. Usability Design of Ticket Purchase Website Based on Eye Tracking[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 243-247.

责任编辑: 马梦遥