

# 基于多目标规划的地震应急救援营救装备的 优化配置<sup>\*</sup>

尚佳宁<sup>1</sup>, 赵 京<sup>1</sup>, 司洪波<sup>2</sup>, 尚 红<sup>2</sup>, 王建平<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

**摘 要:** 针对地震救援这一社会活动, 以重型地震救援队中的营救装备为优化变量, 选取营救装备总成本最低及整体性能质量比最高为主要目标, 以满足重型救援队营救装备总和的上下限、每一类营救装备数量的下限以及各变量取值界限为约束条件, 构建了多目标优化模型, 同时运用 Matlab 优化工具箱中多目标规划解算函数 fgoalattain 对优化模型进行了求解, 并与以往的经验值进行比较, 优化效果满足救援实际应用。

**关键词:** 重型地震救援队; 营救装备; 多目标优化; Matlab; fgoalattain 求解器

**中图分类号:** X43; P315.9   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2013)04-0193-04

我国是地震灾害较为严重的国家之一, 据统计, 20 世纪全世界超过三分之一的 7 级以上大地震发生在中国, 20 世纪中后期, 我国在地震中的罹难人数占所有自然灾害遇难人数的一半以上<sup>[1]</sup>, 这些数字触目惊心。

为了提高我国应对大规模地震的能力, 2001 年成立了中国国家地震灾害紧急救援队<sup>[2]</sup>。在过去的 12 年里, 国家救援队积极参与了全球多项地震灾难的救援工作, 出色地完成了救援任务, 获得了国际社会的一致好评。

依据中国国际救援队承担地震救援工作的实际经验, 通过研究联合国《INSARAG》指南对救援队装备配置要求<sup>[3]</sup>, 并分析各类装备的救援功能及现场工作效果, 有关单位已提出了适合我国救援工作的轻、中、重型救援队的组建方案和装备配置系统标准。国家救援队现共有搜索、侦检、营救、通讯、动力照明、医疗急救、个人器具、后勤保障和救援车辆 9 类装备<sup>[4]</sup>, 其中营救装备主要包括破拆设备、顶升支撑设备、高空营救设备、堵漏设备等, 主要用于营救压在废墟下的幸存者。

各个地震救援装备数量的配置问题, 是一个亟待解决的关键问题, 这关系到能否及时高效地救出幸存者。本文以重型地震救援队的营救设备中的破拆装备和顶升装备为研究对象, 建立多目

标优化模型, 准确地描述了优化目标, 并应用 Matlab 优化工具箱中多目标规划工具进行求解, 实现了营救装备数量的优化配置, 模型结构简单, 求得数据可行合理, 具有现实应用意义。

## 1 营救装备多目标优化模型

### 1.1 多目标优化原理

多目标优化, 又称多标准优化问题<sup>[5]</sup>, 一个具有  $n$  个决策变量,  $m$  个目标变量的多目标优化可进行如下表述:

$$\begin{cases} \min y = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \\ \text{s. t. } t_a(x) \leq 0, a = 1, 2, \dots, g \\ k_b(x) = 0, b = 1, 2, \dots, f. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x = (x_1, \dots, x_n) \in X \subset R^n$  为  $n$  维决策矢量,  $X$  为  $n$  维决策空间,  $y = (y_1, \dots, y_m) \in Y \subset R^m$  为  $m$  维目标矢量,  $Y$  为  $m$  维目标空间;  $F(x)$  即为目标函数, 它设定了  $m$  个由决策空间向目标空间进行映射的函数;  $t_a(x) \leq 0$  定义了  $g$  个不等式约束;  $k_b(x) = 0$  定义了  $f$  个等式约束<sup>[6-7]</sup>。在此基础上又给出了 5 个比较重要的定义, 详见文献[6-7]。

多目标优化问题的各子目标之间是具有很强的冲突性的, 它们不可能同时达到最优, 这就意味

\* 收稿日期: 2013-05-13    修回日期: 2013-06-08

基金项目: 国家高技术研究发展“八六三”项目“面向地震应急救援机器人研究开发与应用”(2012AA041505)

作者简介: 尚佳宁(1988-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事地震应急救援装备性能评价方面的研究。

E-mail: jianing\_1988\_0330@126.com

着只能从中做协调和折中。在具体的实际问题中,还要考虑到可行性、操作性等现实因素从 Pareto 最优解集<sup>[6-7]</sup>中挑选出最符合实际条件的解。

1.2 营救装备多目标优化建模

(1) 设计变量

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $x_1$  到  $x_n$  均为各种营救设备,又根据各自不同的工作原理分为液压动力工具、内燃机动力工具、电动工具、手动工具和气动工具等类型。这所有的破拆顶升营救设备即是独立的优化设计变量。

(2) 目标函数

以整个重型救援队中的营救装备总成本最低、所有营救装备的性能质量之比最高为两个主要目标。其中,针对“性能”,通过专家打分,得到各个设备的机动性、专项能力、可操作性、可维护性、可组合程度、轻量化程度等六项能力的得分,并进行加权算术平均值得到其综合性能得分。

参照多目标规划一般形式,可对优化模型表示如下:

$$\min \sum_{i=1}^n A_i X_i, \tag{2}$$

$$\max \frac{\sum_{i=1}^n B_i X_i}{\sum_{i=1}^n C_i X_i} \tag{3}$$

式中: $X_i$  为决策变量; $A_i$  为各营救装备的成本(万元); $B_i$  为营救装备的综合性能得分; $C_i$  为营救装备的质量(kg); $n$  为决策变量的个数。

(3) 约束条件

以不小于重型救援队营救装备总和的下限、每一类营救装备数量的下限以及各变量取值界限为约束条件。其中的界限值,是赋予地震局提供的经验值一定的百分比得到的。

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^n X_i \geq M \\ & \sum_{a=1}^{n_1} U_a \geq l \\ & \sum_{b=1}^{n_2} V_b \geq m \\ & \sum_{c=1}^{n_3} W_c \geq p \\ & \sum_{d=1}^{n_4} Y_d \geq q \\ & \sum_{e=1}^{n_5} Z_e \geq r \\ & N_i \leq X_i \leq M_i. \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $N$  为决策变量总和的下限; $M$  为决策变量总和的上限; $M_i$ 、 $N_i$  为各决策变量的上下限;共有  $n_1$  类液压动力工具,  $n_2$  类内燃机动力工具,  $n_3$  类电动工具,  $n_4$  类手动工具,  $n_5$  类气动工具;  $m$ 、 $l$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $r$  为各类装备总和的数值下限,即满足重型救援队营救能力的各营救装备的最少个数。

2 多目标优化模型解算

传统的求解多目标规划问题的方法有:罚函数法、理想点法、层次分析法等<sup>[8]</sup>,近年来随着计算机的飞速发展,Matlab 工具箱作为一种实用性极强的计算软件已广泛应用在多目标规划问题的求解中。

2.1 基于 Matlab 多目标优化模型解算技术

Matlab 优化工具箱功能覆盖很广,包括线性规划、非线性规划、二次规划等。针对不同的问题 Matlab 可选用不同的函数来求解。例如,目标函数和约束条件均为线性时,可利用线性规划函数 linprog 求解;目标函数或约束条件为非线性时,可利用 fmincon 函数进行求解等等。

对于式(2)、式(3)所示的优化模型,成本及性质比均有一确定的目标值,可直接调用工具箱中的 fgoalattain 函数进行多目标规划求解<sup>[9]</sup>。

2.2 基于 fgoalattain 求解器的优化模型

(1) 目标函数  $F$

目标函数表达式包含装备成本求算函数和性能质量比求算函数。按 fgoalattain 求解器的格式,须把表达式都转化为求解最小值的函数,即变为质量性能之比。

(2) 期望目标  $GOAL$

在进行多目标优化时须给定对应目标函数的成本和质量性能之比,即目标函数的期望值。由于以往实际救援中,装备的成本和质量性能之比并没有一个合理的估算经验值,因此,采用计算的方法求得其理论最优值。

求成本的期望值,以式(2)作为目标函数,式(4)作为约束条件,因为都是线性的,所以用 linprog 进行线性规划,其一般调用格式如下:

$[x, fval, exitflag] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, Beq, lb, ub)$ 。  
式中: $x$ 、 $fval$  为函数返回的决策变量及目标函数向量值; $exitflag$  为退出条件; $f$  为各装备成本值向量;其它相关信息按其格式输入进行优化,即得到成本的理论最优值  $fval$ 。

求质量性能之比的期望值,以式(3)作为目标函数,式(4)作为约束条件,因为目标函数是非线性的分式,故用 fmincon 进行非线性优化,其调用格式如下:

$$[x,fval,exitflag] = \text{fmincon}(\text{fun},x_0,A,b,Aeq,Beq,lb,ub,nonlcon,options)。$$

式中:fun 为质量性能之比的函数表达式; $x_0$  为求解的初始值,这里设定其为地震局的经验值;其它所有约束条件均与成本优化相同,即得到比值的理论最优值  $fval$ 。将两次优化得到的  $fval$  作为多目标规划的理论期望值  $goal$ 。

(3) 权重系数 WEIGHT

用于表明目标函数与给定期望值的接近程度,一般取目标向量的绝对值向量。fgoalattain 函数一般调用格式如下:

$$[x,fval,exitflag] = \text{fgoalattain}(\text{fun},x_0,goal,weight,A,b,Aeq,Beq,lb,ub,nonlcon,options)。$$

式中:fun 为目标函数  $F$ ; $x_0$  为求解的初始值,即经验值;与前两次优化一样,以式(4)作为约束条件,进行优化求解,最终得到  $x$  向量和目标函数最优值  $fval$ 。

3 救援营救装备多目标优化配置实现

针对我国重型救援队提供的营救装备的种类、成本、质量、性能打分表等信息,应用 Matlab 优化工具箱中多目标优化函数进行求解实验。

该重型救援队提供了 21 种地震救援营救装备的信息,它们的数值优化待处理,其参数如表 1 所示。表 1 中,各种装备的“性能综合得分”是通过专家对救援装备的各项性能进行从 0 ~ 10 的打分,并求得其算术平均值而得来的。

液压动力工具包括:大型液压泵、小型液压泵、手动液压泵、重型液压剪切器、重 型液压扩张器 5 种装备;内燃机动力工具包括:链锯(内燃)、内燃无齿锯、水泥切割锯、破碎机 4 种装备;电动工具包括:链锯(电动)、常规凿岩机、钢筋切割器、双轮异向锯 4 种装备;手动工具包括:组合撬棍手动破拆工具、加力钳、SOS 个人组合工具 3 种装备;气动工具包括:11 t 高压起重支撑气垫、24 t 高压起重支撑气垫、40 t 高压起重支撑气垫、23 t 高压支撑气球、58 t 高压支撑气球 5 种装备。由式(4),各类装备总和的数

表 1 重型救援队营救装备参数表

装备名称	成本 / (万元)	质量 / kg	性能综 合得分
大型液压泵	7.5	40	5.5
小型液压泵	4.2	15.7	6.0
手动液压泵	1.2	8.5	6.6
重型液压剪切器	6.7	17.9	5.6
重型液压扩张器	8.5	24.6	5.6
链锯(内燃)	0.60	6.5	6.5
链锯(电动)	0.30	8	6.3
内燃无齿锯	1.00	8.7	6.1
水泥切割锯	6.00	8	6.5
常规凿岩机	1.60	6.5	6.0
组合撬棍手动 破拆工具	0.90	12.9	6.8
加力钳	0.08	6.6	6.3
破碎机	3.50	18	7.0
钢筋切割器	1.90	5.2	6.5
双轮异向锯	2.50	9.7	6.1
SOS 个人组合工具	0.40	15.1	8.8
11 t 高压起重支撑气垫	1.10	4	6.6
24 t 高压起重支撑气垫	1.70	9	6.8
40 t 高压起重支撑气垫	1.90	15	6.5
23 t 高压支撑气球	3.80	6	7.0
58 t 高压支撑气球	7.8	13	6.8

值下限分别为 18、9、6、40、25。每个装备数量的下限用向量表示为:

$$lb = [2;2;2;2;2;1;1;2;2;1;8;8;2;1;1;15;5;2;5;2;2]。$$

数量上限用向量表示为:

$$ub = [5;5;5;5;5;5;5;5;5;15;15;5;5;5;25;10;5;10;5;5]。$$

优化初值:

$$x_0 = [4;4;4;4;4;2;2;4;4;2;12;12;4;2;2;20;8;4;8;4;4]。$$

所有救援装备总和的下限为 110;这些数据均来自该重型救援队实际救援时的经验值。通过求解器 linprog 和 fmincon 求得目标函数的期望值为 189.8、1.570 5。按式(2)、式(3)、式(4)构建优化模型并用 fgoalattain 函数解算结果如下:

$$X = [2;5;5;4;2;5;5;4;2;1;8;15;2;3;1;21;10;5;5;3;2]。$$

对应目标函数结果为:195.9、1.628 7;明显优于使用经验值  $x_0$  时得到的结果:265.16、1.837 3;所得结果满足所有约束条件,经专家验证,符合重型救援队对营救装备数量的实际要求。

## 4 结语

(1)通过对重型救援队营救装备的配备需求进行分析,选取营救装备总成本最低及其性能质量比最高为目标,以不小于重型救援队营救装备总和的下限、每一类营救装备数量的下限以及各变量取值界限为约束,构建了营救装备数量最优配置多目标优化模型。

(2)营救装备多目标优化模型简单易解,很好地体现了营救装备的配备宗旨,优化结果符合重型救援队实际救援需求。

(3)选用 Matlab 优化工具箱中的相应函数,实现了重型救援队营救装备最优配置模型的有效求解,证明了 Matlab 工具箱对解决工程实际问题的数学模型具有现实可行性。

(4)由于优化模型所考虑到的主要目标以及约束条件有限,使得优化的结果只适用于模型考虑范畴之内的目标及约束。在实际救援过程中,将会存在模型以外的众多因素,本文并未考虑完全,不足之处还尚需继续研究和探讨。

## 参考文献:

- [1] 胡卫建,尚红,司洪波,等.我国应对大震巨灾应急救援装备的技术需求[J].北京大学学报:自然科学版,2010,46(5):844-850.
- [2] 侯远超.地震灾害搜救系统的搜索行动能力评价研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [3] The international Search and Rescue Advisory Group. Search and Rescue Guideline[EB/OL].(1991-05-03)[2013-02-06].<http://www.insarag.org/en/about/background.html>.
- [4] 贾群林,陈莉.地震灾害紧急救援队优化救援装备配备分析[J].中国个体防护装备,2012(2):9-12.
- [5] Deb K. Multi-optimiution using evolutionary algorithms chichester[M].Chichester: John Wiley&Sons, 2001.
- [6] TSAIS J, SUN T Y, LIU Chan-cheng, et al. An improved particle swarm optimizer for multi-objective problems. Expert Systems with Applications[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5872-5886.
- [7] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等.进化多目标优化算法研究[J].软件学报,2009,20(2):271-289.
- [8] 李明.详解 MATLAB 在最优化计算中的应用[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [9] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助优化计算与设计[M].北京:电子工业出版社,2003:49-50.

# The Optimal Allocation for Earthquake Emergency Rescue Equipment Based on Multi-objective Optimization

Shang Jianing<sup>1</sup>, Zhao Jing<sup>1</sup>, Si Hongbo<sup>2</sup>, Shang Hong<sup>2</sup> and Wang Jianping<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Chinese Earthquake Emergency Rescue Center, Beijing 100049, China)

**Abstract:** According to the earthquake rescues, taking rescue equipment of severe earthquake rescue team as optimization variable, selecting the rescue equipment with the lowest total cost and highest quality ratio to meet the upper limit and lower limit of heavy rescue team rescue equipment sum, lower limit of each type of rescue equipment, and constraint condition as value bound of each variable. A multi-objective optimization model is constructed. Toolbox of multi-objective optimization calculation function of fgoalattain is used to solve the optimization model of Matlab, and compared with the previous experiences, the optimization results meet the practical rescue.

**Key words:** heavy earthquake rescue team; rescue equipment; multi-objective optimization; Matlab; fgoalattain resolver