

DOI: 10.3901/JME.2015.03.018

# 基于多目标优化的矿用救援机器人动力匹配\*

刘 建 葛世荣 朱 华 唐超权  
(中国矿业大学机电学院 徐州 221116)

**摘要:** 目前, 矿用救援机器人只有通过动力系统参数的合理匹配解决其在复杂恶劣的井下环境中无法随时补充能源及防爆电池组对机器人动力性能影响严重的问题。为此, 提出基于多目标粒子群优化算法的动力匹配设计方法。该方法根据矿用救援机器人动力性能要求, 确定了其动力系统参数匹配的优化目标和约束条件; 基于履带行驶动力学, 并考虑防爆电池组对机器人动力性能的影响, 建立矿用救援机器人动力匹配模型, 确定动力系统参数匹配多目标优化的决策变量; 通过多目标粒子群优化算法确定了矿用救援机器人动力系统参数匹配的合理取值范围。通过试验与优化前的设计相比, 机器人的总质量降低了 24.36%, 续航时间增加了 1 倍, 进而验证了该方法能够有效、快速地解决矿用救援机器人动力系统参数的合理匹配问题。

**关键词:** 矿用救援机器人; 动力匹配; 粒子群算法; 多目标优化

**中图分类号:** TP242

## Mine Rescue Robot Power Matching Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization

LIU Jian GE Shirong ZHU Hua TANG Chaoquan

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

**Abstract:** At present, the coal mine rescue robot is without the power supply in the hazard and complex coal mine and the explosive-proof batteries unit influences dynamic performance very seriously. It is the only method to solve the two problems above by power matching and optimization. Therefore, the power matching design method based on multi-objective particle swarm optimization (PSO) is proposed. The optimization goal and constraint condition for power matching are confirmed by the analysis of the robot dynamic performance requirement. And the model of the robot power matching is established and the decision variables of multi-objective optimization are ensured, which are based on the tracked vehicle dynamic and the influence for the dynamic performance by explosive-proof batteries unit. Finally, it is calculated which the reasonable value range of the parameters of power matching. The test indicates that the mass of the coal mine rescue robot has reduced by 24.36% and the time of endurance is double. As well as, it is supported the multi-objective particle swarm optimization could effectively and rapidly solve the power matching of the coal mine rescue robot.

**Key words:** mine rescue robot; power matching; particle swarm optimization; multi-objective optimization

## 0 前言

矿用救援机器人是代替或协助救护队员进入危险复杂的井下灾区, 执行环境探测、搜索和救援任务的危险作业机器人<sup>[1]</sup>。我国是世界上煤矿灾害事故最严重的国家, 我国的矿难死亡人数占到全世界的 80% 左右, 百万吨死亡率居世界之首, 因此对矿用救援机器人的需求非常迫切。自 20 世纪 90 年代, 为了支援发生灾害后矿山救护队的救援工作,

澳大利亚、美国等开始研制针对不同用途的煤矿搜救机器人系统, 并研制出多款形式的机器人<sup>[2]</sup>。但是, 由于矿用救援机器人必须满足爆炸性环境防爆强制要求, 且各国的防爆标准不同, 不能直接引进国外的矿用救援机器人。从 2004 年起, 中国矿业大学、北京理工大学、哈尔滨工业大学、中国科学院沈阳自动化所等科研院所和企业相继研制了矿用救援机器人<sup>[3-5]</sup>。目前, 矿用救援机器人已进入产业化阶段。

灾害后的矿井环境极其恶劣, 对矿用救援机器人动力性能要求很高。为尽快进入救援工作, 矿用救援机器人要求重量轻, 体积小, 续航时间长。为

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2012AA041504)。20140308 收到初稿, 20141114 收到修改稿

适应矿井下环境, 矿用救援机器人采用蓄电池电驱动方式, 所以需要解决纯电驱动系统因电池能量密度低而使续航时间短的问题。其次, 因便携性的要求, 矿用救援机器人自重有严格限制, 致使电池组的容量受限。矿用蓄电池组为满足防爆要求必须采用隔爆结构, 防爆电池组重量和体积对机器人动力性能影响很大, 使矿用救援机器人动力系统设计中遇到两个难题: ① 因电池能量密度比燃油的低, 需要使用大量的电池和电池本身就是最大负载的矛盾; ② 需要最大续航能力和电池有限容量的矛盾<sup>[6]</sup>。因此, 这两个问题成为矿用救援机器人动力系统的设计中尤为突出, 成为矿用救援机器人实现产业化迫切需要解决的问题。在动力电池及其他技术没有突破前, 优化矿用救援机器人的动力系统参数匹配, 减小防爆电池组对动力性能的影响, 是提高矿用救援机器人续航能力、减小自重的重要手段。

目前, 纯电驱动的动力系统参数匹配是按照改装传统内燃机车辆的思路<sup>[7-8]</sup>, 匹配动力系统参数。姬芬竹等<sup>[9]</sup>使用区间优化法确定动力系统参数匹配的合理区间。动力系统参数匹配优化是典型的多目标优化问题。相对传统多目标优化算法, 智能优化算法因其不需将多目标问题化为单一目标而在多目标优化中表现出很大的优势。尹安东等<sup>[10]</sup>采用遗传算法对动力系统参数进行优化, 降低了电动车的能耗, 表明智能优化算法能够有效地解决动力参数匹配问题。但是, 这些方法都忽略防爆电池组对动力系统的影响, 不适用于解决矿用救援机器人动力系统参数匹配问题。本文针对矿用救援机器人动力系统参数匹配多目标优化问题, 提出了基于多目标粒子群优化算法的矿用救援机器人动力匹配设计方法, 解决了其动力系统参数合理匹配问题。

本文首先研究了矿用救援机器人动力性能要求, 确定了机器人的动力系统参数匹配的优化目标。根据履带行驶动力学, 并且考虑防爆结构对机器人动力性能的影响, 建立了矿用救援机器人动力系统数学模型, 确定了动力系统参数匹配多目标优化的决策变量。应用多目标粒子群优化算法确定矿用救援机器人动力系统参数匹配参数的合理取值范围, 并通过试验对比验证了该方法的有效性。为矿用救援机器人动力系统参数匹配及整机设计参数的确定提供了参考, 从而加快矿用救援机器人产业化。

## 1 矿用救援机器人动力性能要求

煤矿灾害事故具有灾害性、突发性、继发性和

破坏性等特点, 救援时效性很强。为尽快进入救援工作, 矿用救援机器人要求重量轻, 体积小, 续航时间长。

煤矿发生瓦斯和煤尘爆炸后, 矿井环境对机器人来说是一种复杂的、多样的非结构环境, 因此矿用救援机器人要具有很强的机动性和地形适应能力。

事故后的矿井环境存在大量的爆炸性气体和煤尘, 机器人工作环境比较恶劣, 搜寻范围较广, 必须具有较长续航能力和能源供给能力。事故后的灾区往往充满爆炸性气体和粉尘, 因此要求机器人要具有防爆性能, 不能引发次生灾害。所以, 机器人的防爆型式主要采用隔爆型。而煤矿井下对隔爆壳的材质有所限制, 目前只有低碳钢和不锈钢材质允许用于隔爆壳。隔爆壳的尺寸与壳内部的电气设备的尺寸相关。

目前, 矿用地下车辆的动力系统主要有两种形式, 防爆柴油机和蓄电池-电动机。但由于柴油机会污染井下空气, 对通风要求较高, 不适宜在灾后井下使用。因此只能使用蓄电池-电动机驱动方式。为了满足防爆要求, 电池组必须采用隔爆结构。隔爆后电池组的重量和体积都增大了很多, 尤其是重量增加了一倍, 严重影响了机器人的行驶里程, 增加了行驶阻力。同时, 电池隔爆后, 形状也被固定, 需要最大的空间布置电池, 使其他设备布置困难。

矿用救援机器人的行驶阻力随其自重的增大而增大, 为了达到规定的行驶里程, 就需要更多的能源, 也就是需要更大容量的电池。由于防爆标准规定, 电池组在隔爆壳内只能串联, 因此只能使用大容量的单体电池, 其电池组的体积也会变大。而隔爆壳包裹着电池组, 其外形尺寸随电池组的增大而增大, 并且隔爆壳材料密度要远远大于电池组的密度, 所以整个防爆电池组的重量增加的幅度很大。

因此在设计矿用蓄电池电驱动系统必须解决两个矛盾: ① 因电池能量密度比燃油的低, 需要使用大量的电池和电池本身就是最大负载的矛盾; ② 需要最长里程和电池有限容量的矛盾。为了达到矿用救援机器人行驶距离长、总重量轻的动力性能目标, 必须对电池容量、整机质量、行驶距离等关系进行优化, 从而确定矿用救援机器人动力系统参数合理的匹配。

目前, 矿用救援机器人的动力性能的基本要求为: 速度 $\geq 3.6$  km/h; 爬坡度 60%; 能够原地转向; 自重轻, 便于携带; 能够通过碎石、沙、煤泥构成特殊路面。

## 2 矿用救援机器人动力系统模型

矿用救援机器人动力系统主要由防爆电池组、控制器、驱动器、驱动电动机、减速器和行走机构等部分组成。分别对各部分的性能进行研究,建立矿用救援机器人动力系统模型,从而确定影响动力性能的参数,即确定矿用救援机器人动力系统参数匹配多目标优化中的决策变量。

### 2.1 矿用救援机器人动力系统结构

动力系统采用双电动机独立驱动两侧主动轮的形式,该配置形式结构最为简洁,在驱动、转向和制动时便于对两侧的履带分开控制,并且两侧的电动机及控制器结构和性能完全相同<sup>[11]</sup>。动力系统的结构形式如图 1 所示。

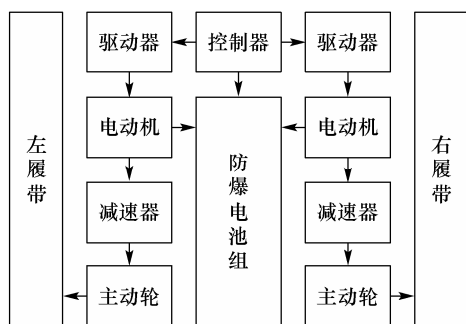


图 1 矿用救援机器人动力系统结构图

### 2.2 驱动电动机

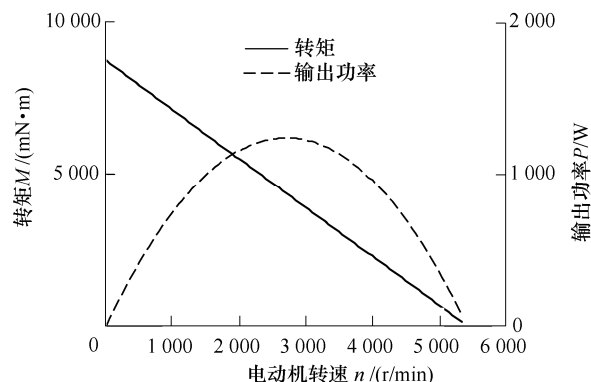
驱动电动机是经由减速器直接驱动两侧主动轮的动力部件,它的动力输出特性直接决定了机器人的动力性能。机器人的直线和转向行驶全部要依赖电动机驱动器以及控制器对驱动电动机转矩或转速的控制实现,所以系统参数合理的匹配非常重要。

机器人的驱动电动机通常要求能频繁地起动-停车、加速-减速,因而要求驱动电动机调速范围宽、转速高、起动扭矩大、体积小、重量轻、效率高<sup>[12]</sup>。目前,机器人使用的电动机主要有直流单机、感应电动机、永磁无刷电动机和开关磁阻电动机四类<sup>[13]</sup>。直流电动机结构简单、技术成熟、具有交流电动机所不可比拟的优良电磁转矩控制特性,其可控性、可靠性、成熟性较高,成本较低。

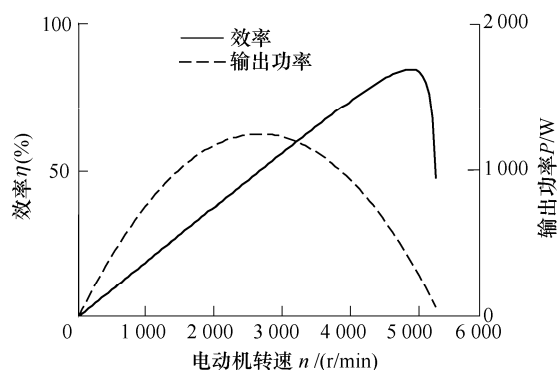
#### 2.2.1 电动机的机械特性

矿用救援机器人选用无刷直流电动机作为驱动电动机。无刷直流电动机利用电子开关线路和位置传感器来代替电刷和换向器,所以这种电动机既有直流电动机的特性,又具有交流电动机结构简单、运行可靠、维护方便等优点;它的转速不再受机械换向的限制。瑞士 Maxon 公司生产的 EC 系列无刷

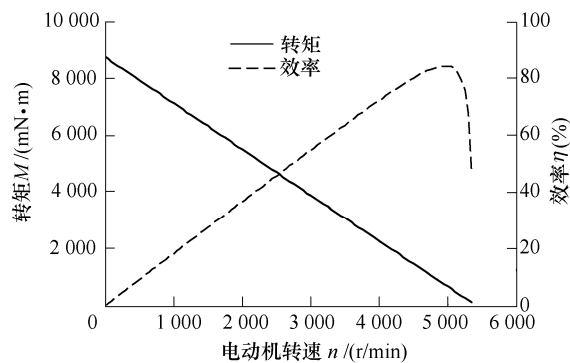
直流电动机的机械特性线性度好、效率高、可调速范围非常宽、控制性能极佳、体积小,因此非常适合机器人的驱动。其电动机性能曲线如图 2 所示。



(a) 转矩、输出功率与转速关系



(b) 效率、输出功率与转速关系



(c) 转矩、效率与转速关系

图 2 Maxon EC 无刷直流电动机性能曲线

Maxon EC 系列无刷直流电动机的转速  $n$ -转矩  $T$  特性为

$$T = \frac{\pi k_m^2 (k_n U - n)}{30\,000R} \quad (1)$$

式中  $U$  ——电动机驱动电压;  
 $R$  ——电动机绕组中的电阻;  
 $k_n$  ——速度常数;  
 $k_m$  ——转矩常数;  
 $n$  ——转速。

电动机的输出功率

$$P = \frac{\pi T n}{30} \quad (2)$$

式中  $T$  ——转矩。

电动机效率  $\eta_m$  与转矩的关系

$$\eta_m = \frac{\pi k_m k_n}{30\,000} \left( 1 - \frac{I_0}{I} \right) \quad (3)$$

式中  $I_0$  ——电动机的空载电流;

$I$  ——电动机的电流。

在给定电压下, 因为电流和转矩之间的比例关系, 当转速增加(相应的, 转矩降低)时效率也在增加。但在低扭矩区域, 摩擦转矩的作用越明显, 效率急剧降至零。电动机的最大效率点和最大输出功率点不在同一转矩点。根据经验电动机的最大效率点大概在堵转转矩的七分之一处。

### 2.2.2 电动机额定功率 $P_e$

电动机额定功率的确定要综合考虑机器人各项动力性能指标。如果功率选择过大, 会出现“大马拉小车”低效率、高能耗的情况; 如果选择过小, 则会出现正常行走时, 电动机过载运行, 导致电动机温度偏高, 寿命剧减等问题<sup>[14]</sup>。

根据机器人预期的最高车速来确定单个电动机的额定功率(即持续功率)  $P_e$ , 使其功率大于或等于最高车速行驶时的阻力功率之和, 即式(4)。因为, 机器人消耗的功率随速度的增大而增加, 另一方面机器人行驶速度一般低于最高车速, 可有适当的后备功率用于加速和爬坡

$$P_e = P_{v_{\max}} \approx \frac{1}{2} \times \frac{f G v_{\max}}{3\,600 \eta_{ch} \eta_x} \quad (4)$$

式中  $\eta_{ch}$  ——牵引电动机输出端到主动轮的传动效率;

$\eta_x$  ——行走装置效率, 可根据  $\eta_x = 0.95 - 0.001\,7v_{\max}$  计算,  $\eta_x = 0.944$ <sup>[15]</sup>;

$f$  ——地面变形阻力系数, 对煤底板取值为 0.08~0.10<sup>[16]</sup>, 本文取值 0.10;

$G$  ——车重力;

$v_{\max}$  ——机器人最大行驶速度。

对机器人来说式(4)可改写为

$$P_e = \frac{G v_{\max}}{67\,968 \eta_{ch}} \quad (5)$$

机器人最大行驶速度  $v_{\max}$  为

$$v_{\max} = 0.377 \frac{n_{\max} r}{i} \quad (6)$$

式中  $r$  ——驱动轮半径;

$i$  ——侧传动传动比;

$n_{\max}$  ——对应机器人最大行驶速度的电动机转速。

### 2.2.3 电动机额定转矩 $T_e$ 、最大转矩 $T_e$

额定转矩  $T_e$  由式(7)确定

$$T_e = \frac{9\,549 P_e}{n_e} \quad (7)$$

式中  $P_e$  ——电动机额定功率;

$n_e$  ——电动机额定转速, 即式(6)中的  $n_{\max}$ 。

机器人在以下两种工况时, 两侧履带所需的牵引力/制动力最大: 60%上坡行驶; 原地起动, 开始中心转向。对上述工况下一侧履带所需的牵引力及动力因数进行分析, 可以确定电动机最大转矩。

在 60%度坡上行驶时, 一侧履带所需的牵引力

$F_{1\max}$  为

$$F_{1\max} = \frac{1}{2} [G \sin(\arctan 0.6) + f G \cos(\arctan 0.6)] = 0.3G \quad (8)$$

机器人由静止状态开始原地中心转向时, 一侧履带所需的牵引力  $F_{2\max}$  为

$$F_{2\max} = \frac{fG}{2} + \frac{\mu_0 GL}{4B} \quad (9)$$

式中  $\mu_0$  ——中心转向时的转向阻力系数, 根据

$$\mu_0 = \frac{\mu_{\max}}{0.925 + 0.15\rho} \text{ 确定;}$$

$L$  ——履带接地长度;

$B$  ——履带中心距;

$\mu_{\max}$  ——机器绕一条制动履带转向时的平均最大转向阻力系数。对褐煤泥质土,  $\mu_{\max}$  为 0.58<sup>[17]</sup>;

$\rho$  ——转向半径。由于机器人采用原地转向方式, 所以  $\rho = 0$ 。

因此,  $\mu_0 = 1.08\mu_{\max}$ , 所以  $\mu_0 = 0.626\,4$ 。将其代入式(9)得

$$F_{2\max} = 0.363\,2G \quad (10)$$

考虑机器人起动时的牵引力需求, 引入起动系数  $s_q \approx 1.1 \sim 1.3$ , 本文取值 1.3。因此单侧履带的最大动力  $F_{\max}$  为

$$F_{\max} = s_q \max(F_{1\max}, F_{2\max}) = 1.3 \times 0.363\,2G = 0.472\,16G \quad (11)$$

设计的驱动轮半径  $r = 0.06\,m$ 。最大转矩  $T_{\max}$  为

$$T_{\max} = \frac{F_{\max} r}{i \eta_{ch} \eta_x} = 0.03 \frac{G}{i \eta_{ch}} \quad (12)$$

### 2.2.4 侧传动传动比 $i$

侧传动传动比的确定与电动机的最大输出转矩和最大输出转速相关。在相同传动比下, 如果电动机低速区最大转矩输出越大, 则电动机最大转速降低; 如果电动机最大转速增加, 则电动机最低速区最大输出扭矩降低。为了简化传动系的结构, 采

用定传动比。

按照设计要求,最大爬坡度要求为 60%以及能够实现原地转向,则要求电动机允许的过载扭矩,即最大输出扭矩  $T_{\max}$ ,可由式(12)求得。此时的传动比要求

$$i \geq \frac{0.03G}{T_{\max} \eta_{ch}} \quad (13)$$

同时,传动比还与最大行驶速度有关,计算如下

$$i \leq \frac{0.377n_{\max} r}{v_{\max}} = \frac{0.022 \ 62n_{\max}}{v_{\max}} \quad (14)$$

综合式(13)和式(14)确定传动比  $i$ 。

## 2.2.5 电动机的转矩过载系数

根据机器人的行驶路面、技术指标、牵引电动机和机械传动系统的参数可以确定牵引电动机的转矩过载系数  $k_T$

$$k_T = \frac{T_{\max}}{T_e} = \frac{0.03G / i \eta_{ch}}{9 \ 549 P_e / n_e} \quad (15)$$

式中  $T_{\max}$  ——机器人所需最大转矩;

$i$  ——侧传动传动比。

由式(7)、(12)可得

$$k_T = \frac{F_{\max}}{fG} = 9.375 \quad (16)$$

## 2.2.6 电动机最大功率 $P_{\max}$

电动机的最大功率  $P_{\max}$  主要满足机器人爬坡和原地转向时的需要,其定义如下

$$P_{\max} \geq \frac{\pi}{30} T_{\max} n_{T \max} \quad (17)$$

$$n_{T \max} = k_n U - \frac{30 \ 000}{\pi} \frac{R}{k_m^2} T_{\max} \quad (18)$$

式中  $n_{T \max}$  ——电动机输出最大转矩时的转速。

电动机的功率-转速曲线为抛物线,因此,电动机最大输出功率  $P_{\max}$  为

$$P_{\max} = \frac{\pi^2 k_m^2 k_n^2 U^2}{36R} \times 10^{-8} \quad (19)$$

## 2.3 动力源系统确定

动力源系统由蓄电池和电源管理系统组成。机器人所选用动力蓄电池种类对机器人一次充电续航时间有较大的影响。其主要性能指标包括能量密度、功率密度、循环充电次数及成本,另外对动力电池的安全性、可靠性、充电方便性和维护性都有一定的要求。可用于电动汽车的蓄电池有铅酸、镍镉、镍氢、锂离子及飞轮电池和燃料电池等。蓄电池的能量密度决定机器人一次充电续航时间,功率密度决定机器人的加速性能和最大行驶速度。

由于磷酸铁锂电池工作电压高、比能量大、循

环寿命长、自放电小、安全性好、无记忆效应、无污染等优点,逐渐地被应用于煤矿设备上<sup>[18]</sup>。根据防爆要求,隔爆腔里的电池只能串联不能并联,因此需要选择大容量的单体电池。目前,高功率型的磷酸铁锂电池的比功率可以达到 1 000 W/kg。因此,单体磷酸铁锂电池的输出功率可以满足机器人的使用。

蓄电池组的电压根据电动机的驱动电压确定。蓄电池组由单体电池串联而成,因此蓄电池组单体电池的个数  $N$  为

$$N = \frac{U}{U_0} \quad (20)$$

式中  $U$  ——蓄电池组电压。不小于电动机的驱动电压;

$U_0$  ——单体电池电压。单体磷酸铁锂电池的电压为 3.2 V。

机器人的运行时间  $h$  根据蓄电池组的能量和机器人的功率确定,即

$$h = \frac{C_B U}{P_R} \quad (21)$$

$$P_R = (2 \times P_e \times 1 \ 000) / \eta_m + 100 \quad (22)$$

式中  $C_B$  ——蓄电池组中单个电池额定容量;

$P_R$  ——机器人运行时的总额定功率,由式(22)确定。其中 100 W 为机器人除电动机外所需的功率。

## 2.4 机器人总质量

在矿用蓄电池电驱车辆上,蓄电池组的质量和隔爆壳体的质量占机器人总质量很大比例,并且隔爆壳体的质量与蓄电池组的体积有关,蓄电池组的容量和电压与驱动功率有关,而驱动功率的确定与机器人的总质量有关。因此,蓄电池组的质量和隔爆壳体的质量不容易确定。而行走机构、控制系统、传感系统等部件的质量基本不发生变化,是固定的质量。因此,将机器人的总质量分为三部分,即固定的质量  $m_1$ 、蓄电池组质量  $m_B$ 、隔爆壳体质量  $m_f$ 。机器人总质量  $m$  为

$$m = m_1 + m_B + m_f \quad (23)$$

固定的质量  $m_1$  包括行走机构的质量,电气设备的质量及电气设备隔爆箱体的质量。这些质量是不会随着功率改变而改变的。根据设计经验,固定质量约为 80 kg。

按照 GB3836.1-2010《爆炸性环境 第 1 部分 设备通用要求》要求,隔爆壳体内部的电池必须串联<sup>[19]</sup>。所以蓄电池组质量  $m_B$  为

$$m_B = N m_0 \quad (24)$$

式中  $m_0$  ——蓄电池组中单体电池的质量, 根据

$$m_0 = C_B U_0 / k_B \text{ 确定};$$

$k_B$  ——单体电池的比能量,  $k_B = 110 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 。

蓄电池的能量密度决定了机器人一次充电后行驶的时间, 用质量比能量表示蓄电池单位质量所获得的电能, 用体积比能量表示蓄电池单位体积所获得的电能。

按照要求, 隔爆壳体的材料使用 Q235 钢, 其密度  $\rho_i$  为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ 。根据设计经验, 壁厚  $t$  一般为  $10 \text{ mm}$ 。隔爆壳的质量  $m_f$  为

$$m_f = S_B t \rho_i \times 10^{-6} \quad (25)$$

$$S_B = 2(Hl + NWl + NWH) \quad (26)$$

式中  $S_B$  ——蓄电池组的表面积;

$H$  ——单体电池的高度;

$l$  ——单体电池的长度;

$W$  ——单体电池的宽度。

单体锂电池的体积

$$V = HLW = \frac{U_0 C_B}{k_v} = \frac{3.2 C_B}{140} \times 10^6 \quad (27)$$

式中  $k_v$  ——单体磷酸铁锂电池的体积比能量, 一般为  $140 \sim 160 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ , 本文选择  $140 \text{ W} \cdot \text{h/L}$ 。

由式(23)~(25)可以得到整机的质量为

$$m = m_1 + m_B + m_f = 80 + Nk_B C_B U_0 + 157 \times$$

$$\left[ Hl + 22.86 \frac{U}{3.2} C_B \left( \frac{1}{H} + \frac{1}{l} \right) \right] \times 10^{-6} = 80 + Nk_B C_B + 157 \times \left[ Hl + \frac{1\ 000\ 000}{140} U C_B \left( \frac{1}{H} + \frac{1}{l} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (28)$$

### 3 多目标粒子群优化算法的应用

#### 3.1 多目标粒子群优化算法的基本思想

带有约束条件的极值问题一般描述如下

$$\min_{X \in S} F(X), \quad X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad X \in S \subset \mathbf{R}^n$$

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X))^T$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} g_s(X) \leq 0 & s=1, 2, \dots, p \\ h_t(X) \leq 0 & t=1, 2, \dots, q \\ L_i \leq x_i \leq R_i & i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $g_s(X)$  和  $h_t(X)$  分别表示问题的不等式约束条件和等式约束条件。

求解多目标优化问题可以看成每个目标函数在满足约束条件下都尽量靠近最小点, 其构造函数形式可以表示如下

$$\varphi_j(X) = f_j(X) - r^{(k)} \sum_{s=1}^p \ln g_s(X) \quad j=1, 2, \dots, k$$

采用基于 Pareto 集的带约束条件的多目标粒子群优化算法。该算法对更新方程进行了调整, 避免了 Pareto 最优解获取的随机性, 加强了粒子飞行方向的引导性。采用内点罚函数法处理约束条件, 一旦有不符合条件的粒子, 可以重新初始化或者更新粒子的位置和速度; 同时, 运用罚函数法计算粒子的适应度值<sup>[20-21]</sup>。具体计算步骤如图 3 所示。

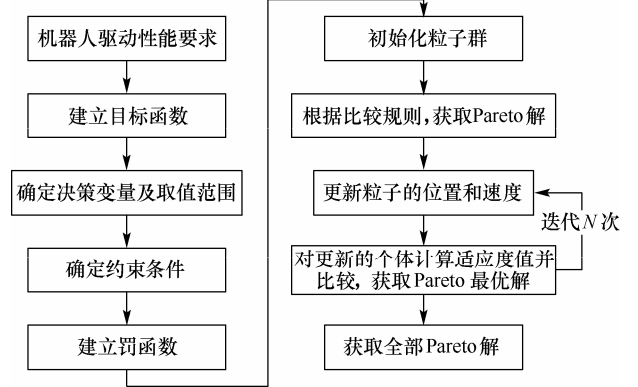


图3 多目标粒子群优化的计算步骤

#### 3.2 目标函数的确定

根据对矿用救援机器人动力系统的分析, 其主要影响因素有电动机的额定功率  $P_e$ , 电动机的电压  $U$ , 电动机的额定转速  $n_e$ , 电动机的额定转矩  $T_e$ , 电动机的绕组电阻  $R$ , 电动机的转矩常数  $k_m$ , 电动机的速度常数  $k_n$ , 减速器的传动比  $i$ , 传动效率  $\eta_{ch}$ , 单体电池容量  $C_B$ , 单体电池高度  $H$ , 单体电池长度  $l$ 。因此将以上参数作为机器人动力系统参数匹配优化的决策变量, 总计有 12 个变量, 记为  $X$ 。

机器人动力系统的目标续航时间长、整机重量小。因此, 动力系统参数匹配优化的目标函数为

$$\min F(X) = (f_1(X), f_2(X))^T$$

$$f_1(X) = -h = -\frac{C_B U}{P_R}$$

$$f_2(X) = m = m_1 + m_B + m_f =$$

$$80 + Nk_B C_B U_0 + 157 \times \left[ Hl + \right.$$

$$\left. 7\ 143.8 \times U C_B \left( \frac{1}{H} + \frac{1}{l} \right) \right] \times 10^{-6}$$

$$X = \{P_e, U, n_e, T_e, R, k_m, k_n, i, \eta_{ch}, C_B, H, l\} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\}$$

#### 3.3 约束条件的确定

根据矿用救援机器人动力系统模型及动力性能要求确定优化问题的约束条件。

(1) 电动的额定功率满足最大行驶速度的需求。根据式(5)得

$$P_e \geq \frac{G v_{\max}}{67\ 968 \eta_{ch}}$$

(2) 电动机最大输出功率满足最大输出转矩的需要。根据式(17)、式(19)可得

$$P_{\max} = \frac{\pi^2 k_m^2 k_n^2 U^2}{36R \times 10^8} \geq \frac{\pi}{30} T_{\max} n_{T\max}$$

(3) 传动比。由式(13)、式(14)可得

$$0.027 \frac{7G}{T_{\max} \eta_{ch}} \leq i \leq 0.022 \frac{62}{3.6} \frac{n_{\max}}{3.6}$$

其中, 根据式(15)、(16)得  $T_{\max} = 9.375T_e$ ,

$n_{\max} = n_e$ , 则

$$\frac{0.027 \frac{7G}{9.375T_e \eta_{ch}}}{9.375T_e \eta_{ch}} \leq i$$

(4) 单体电池的外形尺寸

$$W = \frac{UC_B}{140HL} \times 10^3 \leq 36$$

### 3.4 动力系统决策变量的取值范围

与电动机相关的决策变量为电动机的额定功率  $x_1$ , 电动机的电压  $x_2$ , 电动机的额定转速  $x_3$ , 电动机的额定转矩  $x_4$ , 电动机的绕组电阻  $x_5$ , 电动机的转矩常数  $x_6$ , 电动机的速度常数  $x_7$ 。与减速器相关的决策变量为减速器的传动比  $x_8$ , 传动效率  $x_9$ 。与电池有关的决策变量为单体电池的容量  $x_{10}$ , 单体电池的高度  $x_{11}$ , 单体电池的长度  $x_{12}$ 。由于 Maxon 电动机型号很多, 其额定功率不同, 相关参数的取值范围相差很大。所以与电动机相关的决策变量的取值范围根据电动机的额定功率进行分段。其他决策变量为连续区间。根据 Maxon 电动机选型手册数据, 电动机的额定功率  $x_1$  的范围为 80~400 W, 其他参数的取值范围列于表 1 中。

## 4 仿真试验

### 4.1 约束条件的计算判断

通过对约束条件的分析, 约束条件归纳如下 5 条

$$\begin{aligned} g[1] &= \frac{Gv_{\max}}{67 \ 968 \eta_{ch}} - P_e \\ g[2] &= \frac{9.375\pi}{30} T_e \left( k_n U - \frac{30 \ 000 \ 000}{\pi} \frac{R}{k_m^2} 9.375T_e \right) - \\ &\quad \frac{\pi^2 k_m^2 k_n^2 U^2}{36R \times 10^8} \\ g[3] &= \frac{0.027 \ 7G}{9.375T_e \eta_{ch}} - i \\ g[4] &= i - 0.022 \frac{62}{3.6} \frac{n_e}{3.6} \\ g[5] &= 36 - \frac{UC_B}{140HL} \times 10^3 \end{aligned}$$

表 1 动力系统决策变量取值范围

决策变量	电动机的电压 $x_2$ / V				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	18	12	12	24	48
最大值	48	48	48	48	48
决策变量	电动机的额定转速 $x_3$ /(r/min)				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	27 900	4 290	4 200	4 520	2 680
最大值	30 900	10 900	9 360	10 500	4 960
决策变量	电动机的额定转矩 $x_4$ /(N · m)				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	0.037 5	0.107	0.163	0.283	0.747
最大值	0.044	0.130	0.188	0.323	0.830
决策变量	电动机的绕组电阻 $x_5$ /Ω				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	0.155	0.134	0.087	0.143	0.345
最大值	0.839	6.280	3.830	1.010	1.030
决策变量	电动机的转矩常数 $x_6$ /(mN · m/A)				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 450$
最小值	5.4	11.0	11.5	25.0	84.9
最大值	13.9	83.5	83.5	70.4	147.0
决策变量	电动机的速度常数 $x_7$ /(r/min)/V]				
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	685	114	124	136	65
最大值	1 760	865	827	382	113
决策变量	减速器的 传动比 $x_8$	传动效率 $x_9$	单体电池 容量 $x_{10}$ /(A · h)	单体电池 高度 $x_{11}$ /mm	单体电 池长度 $x_{12}$ /mm
	$x_1 \leq 100$	$x_1 \leq 120$	$x_1 \leq 150$	$x_1 \leq 250$	$x_1 \leq 400$
最小值	3.7	0.68	20	112	93
最大值	546	0.91	100	212	130

### 4.2 罚函数计算

对于本文多目标优化问题, 采用内点惩罚法构建适应度计算函数, 并且约束条件均为不等式约束, 所以罚函数表达为

$$\phi_1(X) = f_1(X) - r(\ln g[1] + \ln g[2] + \ln g[3] + \ln g[4] + \ln g[5])$$

$$\phi_2(X) = f_2(X) - r(\ln g[1] + \ln g[2] + \ln g[3] + \ln g[4] + \ln g[5])$$

惩罚因子  $r$  与迭代次数有关, 取其初值为 1, 迭代系数比为 0.2 的递减数列, 即  $r = 0.2r$ 。

### 4.3 更新后的判断

无约束的粒子群优化算法中, 如果粒子不满足收敛准则, 就要通过更新方程更新粒子。在带约束的粒子群算法中, 一旦收敛精度不满足, 同样也需要进行粒子位置和速度的更新。但是不同于无约束问题, 更新后的粒子仍然要进行约束条件的判断。

### 4.4 仿真及结果分析

取粒子群规模为 100, 最大迭代数  $M_{\max} = 500$  次, 粒子最大搜索速度 3.0, 初始最大惯性权重为  $w_{\max} = 1.0$ , 最小惯性权重  $w_{\min} = 0.1$ , 惯性权重  $w$  按

照线性递减取值, 即

$$w = w_{\max} - \frac{Mw_{\max} - w_{\min}}{M_{\max}}$$

式中,  $M$  为迭代数。

设定参数后, 初始化数据, 计算 10 次得目标函数的分布如图 4 所示。

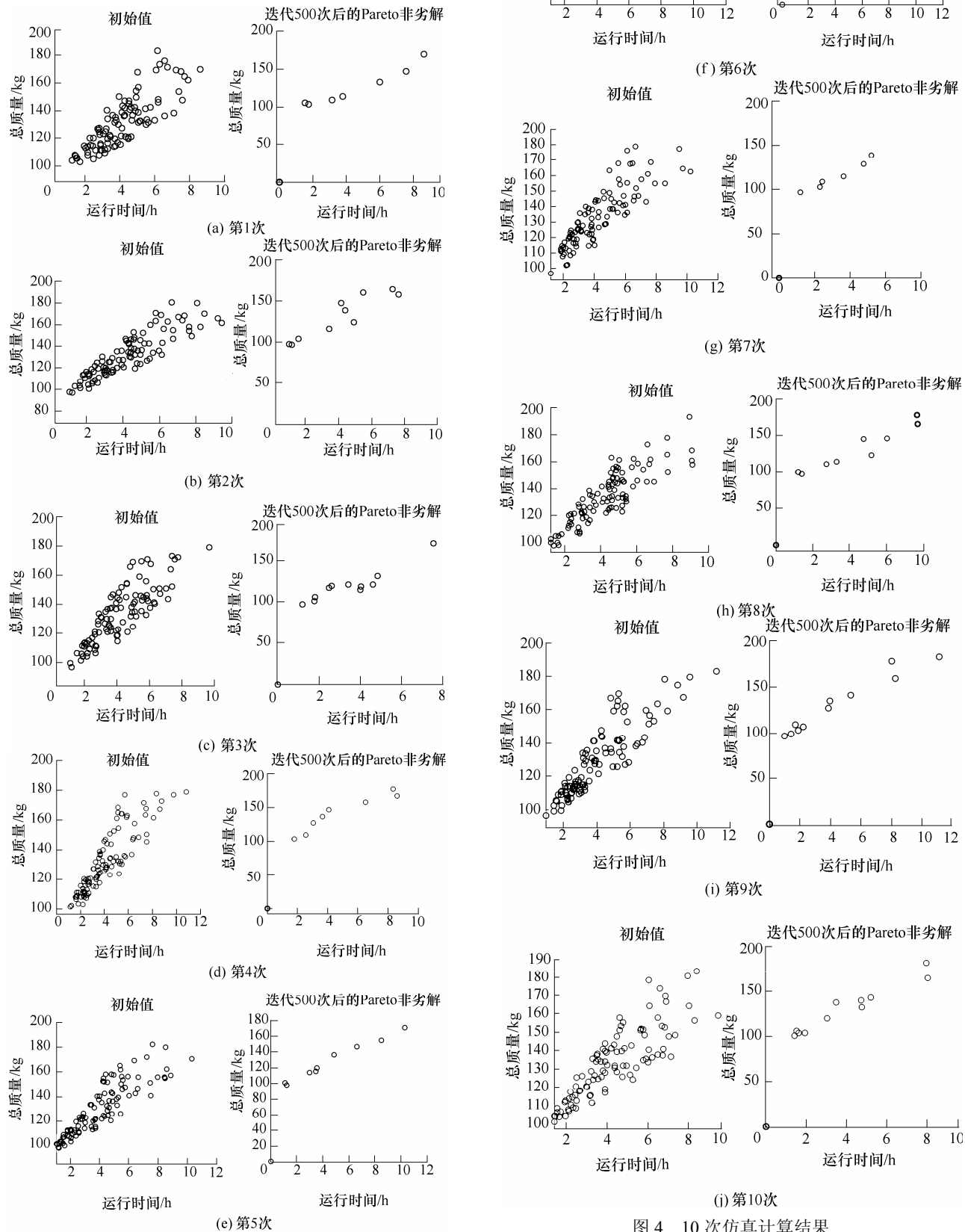


图 4 10 次仿真计算结果



计算机的配置为 CPU: i5-2300, 2.8 GHz; 内存: 4 GB。平均计算时间为 18.699 57 s。10 次计算总共获得最优解 95 个, 其中运行时间大于 3 h 的有 61 个。对 10 次计算结果中运行时间大于 3 h 的解进行汇总, 从而得到目标函数的范围和 12 个决策变量的取值范围。运行时间的范围为 3.03~11.12 h, 平均值 5.69 h; 机器人总质量范围为 110~183 kg, 平均值为 143 kg。如表 2 所示。

表 2 动力系统决策变量范围

决策变量	电动机的额定功率 $P_e$ / W	电动机的电压 $U$ / V	电动机的额定转速 $n_e$ / (r/min)	电动机的额定转矩 $T_e$ / Nm	电动机的绕组电阻 $R$ / $\Omega$	电动机的转矩常数 $k_m$ / [(mN·m)/A]
平均值	150.80	34.44	8 475	0.208	2.201	26.170
最小值	100.70	14.86	4 476	0.110	0.107	11.270
最大值	236.30	47.67	10 854	0.323	6.236	51.754
决策变量	电动机的速度常数 $k_v$ / [(r/min)/V]	减速器的传动比 $i$	传动效率 $\eta_{ch}$	单体电池容量 $C_B$ / Ah	单体电池高度 $H$ / mm	单体电池长度 $l$ / mm
平均值	424.70	53.25	0.80	65	168	113
最小值	184.51	28.13	0.69	42	113	93
最大值	847.34	68.20	0.91	80	211	130

#### 4.5 设计验证

对按照传统设计方法的矿用救援机器人的驱动性能进行测试。测试结果如图 5 和图 6 所示。

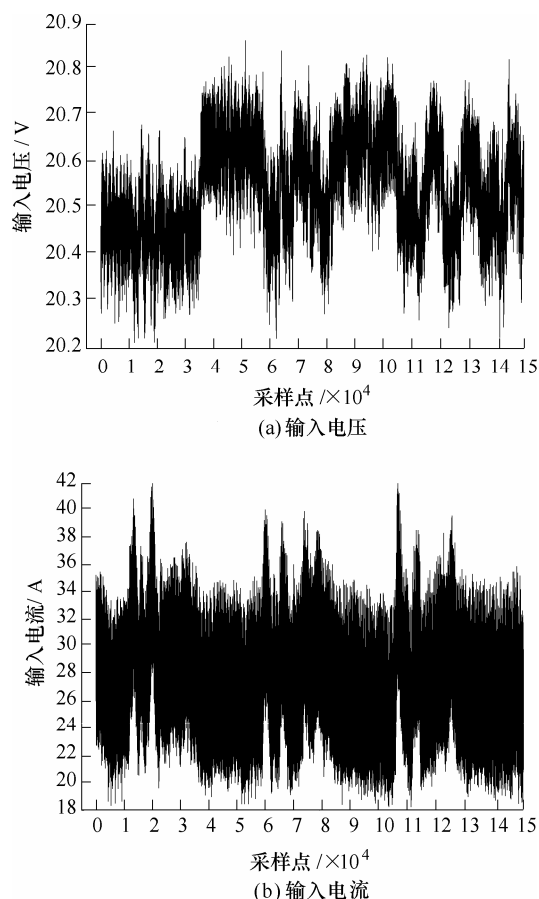


图 5 机器人左驱动电动机测试数据

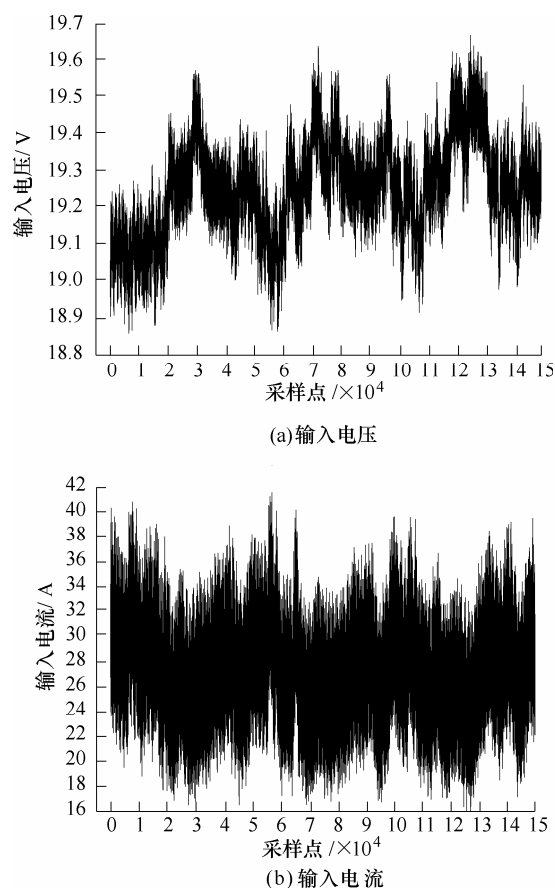


图 6 机器人右驱动电动机测试数据

该机器人按照传统设计方法设计, 使用的电动机为普通直流电动机, 其额定输出功率为 500 W, 电动机效率为 67%。左电动机输入电压的平均值为 20.54 V, 输入电流的平均值为 25.96 A, 其平均输出功率为 357 W。右电动机输入电压的平均值为 19.26 V, 输入电流的平均值为 25.03 A, 其平均输出功率为 323 W。实际消耗的功率远远小于额定功率, 造成电动机的效率降低, 耗能变大, 续航时间变短。

根据优化计算结果, 机器人总质量按照 180 kg 计算。选用 150 W 的电动机作为驱动器, 驱动电压 48 V, 额定转速 8 980 r/min, 额定转矩 0.168 N·m, 转矩常数 44.5 N·m, 速度常数 214 (r/min)/V, 绕组电阻 1.28  $\Omega$ , 电动机效率 0.79。减速器的减速比为 53, 效率 75%。电池的容量为 60 A·h, 单体电池 16 块, 单体电池的外形尺寸为 212 mm×130 mm×36 mm(高×长×宽)。与目前机器人的性能指标对比如表 3 所示。

表 3 优化前后性能指标对比

	传统设计结果	优化结果
总质量/kg	238	180
电动机功率/W	500	150
电动机效率	0.67	0.79
电压/V	24	48
电池容量/(A·h)	80	60
续航时间/h	3	6

通过表 3 的对比, 可以看出优化后的机器人质量减小约 60 kg, 续航时间增加了 4 h 左右。并且, 电动机可以工作在额定功率附近, 保持很高的工作效率。

## 5 结论

(1) 在分析矿用救援机器人行驶动力学的基础上, 将防爆电池组的重量和体积对动力系统的影响考虑进去, 建立了机器人动力系统模型。

(2) 根据该模型, 确定了续航时间长、整机重量小目标函数和 12 个决策变量, 根据机器人的动力性能要求确定了 5 个约束条件, 从而建立了矿用救援机器人动力系统参数匹配多目标优化模型。

(3) 使用了多目标粒子群优化算法, 确定了其动力系统参数匹配合理的区间。根据其取值区间, 进行了实例计算, 确定一种续航时间长、整机重量轻的动力参数匹配方案, 总重量降低了 24.36%, 续航时间增大了 1 倍, 从而验证了所提出的基于多目标粒子群优化的矿用救援机器人动力系统参数匹配设计方法的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] 钱善华, 葛世荣, 王永胜, 等. 救灾机器人的研究现状与煤矿救灾的应用[J]. 机器人, 2006, 28(3): 350-354.  
QIAN Shanhua, GE Shirong, WANG Yongsheng, et al. Research status of the its applications disaster rescue robot and to the mine rescue[J]. Robot, 2006, 28(3): 350-354.
- [2] MURPHY R R, KRAVITZ J, STOVER S, et al. Mobile robots in mine rescue and recovery[J]. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 2009, 16(2): 91-103.
- [3] GAO Junyao, GAO Xueshan, ZHU Jianguo, et al. Coal mine detect and rescue robot technique research[C]// Information and Automation, 2009. ICIA '09. International Conference on. Macau, 2009: 1068-1073.
- [4] 李允旺, 葛世荣, 朱华. 摇杆式履带悬架的构型推衍及其在煤矿救灾机器人上的应用[J]. 机器人, 2010, 32(1): 25-33.  
LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua. Deduction of the rocker-type track suspension configurations and their applications to coal mine rescue robots[J]. Robot, 2010, 32(1): 25-33.
- [5] 刘罡, 刘玉斌, 赵杰, 等. 新型煤矿救援机器人的特殊运动逆运动学[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(9): 42-46.  
LIU Gang, LIU Yubin, ZHAO Jie, et al. Inverse kinematics for special motion of a new mine rescue robot[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(9): 42-46.
- [6] 袁晓明. 煤矿蓄电池无轨运输车辆电控系统的关键技术研究[J]. 电气开关, 2011, 49(1): 18-19.  
YUAN Xiaoming. Key technology of electric control systems for mining battery trackless haulagert vehicle[J]. Electric Switchgear, 2011, 49(1): 18-19.
- [7] 叶敏, 安强, 曹秉刚. 电动汽车动力匹配研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(10): 1654-1659.  
YE Min, AN Qiang, CAO Binggang. Power matching on battery electric vehicle[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(10): 1654-1659.
- [8] 查鸿山, 宗志坚, 刘忠途, 等. 纯电动汽车动力匹配计算与仿真[J]. 中山大学学报, 2010, 49(5): 47-51.  
ZHA Hongshan, ZONG Zhijian, LIU Zhongtu, et al. Matching design and simulation of power train parameters for electrical vehicle[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(5): 47-51.
- [9] 姬芬竹, 高峰, 吴志新. 纯电动汽车传动系参数的区间优化方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 5-7.  
JI Fenzhu, GAO Feng, WU Zhixin. Interval optimization method of power train parameters in pure electric vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 5-7.
- [10] 尹安东, 杨峰, 江昊. 基于 iSIGHT 的纯电动汽车动力系统匹配优化[J]. 合肥工业大学学报, 2013, 36(1): 1-4.  
YIN Andong, YANG Feng, JIANG Hao. Matching and optimization of pure electric vehicle drivetrain with iSIGHT[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2013, 36(1): 1-4.
- [11] 颜南明, 马晓军, 臧克茂. 履带装甲车辆电传动技术初探[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 619-623.  
YAN Nanming, MA Xiaojun, ZANG Kemao. Electric drive systems in armored tracklayer vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(5): 619-623.
- [12] 孙逢春, 陈树勇. 履带车辆感应电动机驱动系统匹配理论[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 260-266.  
SUN Fengchun, CHEN Shuyong. Matching theory of tracked vehicle induction motor drive system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 260-266.
- [13] 郑金凤, 胡冰乐, 张翔. 纯电动汽车驱动电动机应用概述[J]. 机电技术, 2009(增 1): 5-8.

- ZHENG Jinfeng, HU Bingle, ZHANG Xiang. Driving motor for electric vehicles application overview[J]. Mechanical and Electrical Technology, 2009(Suppl.1): 5-8.
- [14] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1997, 12(3): 528-536.
- [15] 马彪, 万耀青, 钱士文. 履带车辆最小滚动阻力系数  $f_{\min}$  和行动部分效率  $\eta_x$  分析[J]. 兵工学报, 1999(1): 44-48.
- MA Biao, WANG Yaoqing, QIAN Shiwen. Tracked vehicle minimum rolling resistance coefficient  $f_{\min}$  analysis and action efficiency  $\eta_x$ [J]. Acta Armamentarii, 1999(1): 44-48.
- [16] 常琰. 悬臂式部分断面掘进机履带行走机构功率的确定[J]. 煤炭学报, 1982(4): 63-73.
- CHANG Lian. Boom type road header machine crawler power determination[J]. Journal of China Coal Society, 1982(4): 63-73.
- [17] 侯宝革, 李洪亮, 蒋佩岩, 等. 掘进机履带链与地面间的相关参数解析[J]. 煤矿机械, 2012, 33(9): 29-31.
- HOU Baoge, LI Hongliang, JIANG Peiyan, et al. Analysis of parameter between pedrail used in boom roadheader and ground[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(9): 29-31.
- [18] 王先友, 魏思伟, 舒洪波, 等. 矿山机车用中等功率型锂离子电池制备技术[J]. 湘潭大学学报, 2011, 33(1): 53-58.
- WANG Xianyou, WEI Siwei, SHU Hongbo, et al. The preparation technology of the medium-power lithium-iron battery for the mine tractor[J]. Journal of Xiangtan University, 2011, 33(1): 53-58.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 3836.1-2010 爆炸性环境第 1 部分: 设备 通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 3836.1-2010 explosive atmospheres part 1: Equipment-general requirements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [20] 张学良, 温淑花, 李海楠, 等. PSO 算法在多目标优化问题中的仿真应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 112-115.
- ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, LI Hainan, et al. Applications of particle swarm optimization in multi-objective problems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 112-115.
- [21] 李楠, 王明辉, 马书根, 等. 基于多目标遗传算法的水陆两栖可变形机器人结构参数设计方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 10-20.
- LI Nan, WANG Minghui, MA Shugen, et al. Mechanism-parameters design method of an amphibious transformable robot based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 10-20.

作者简介: 刘建(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为矿用救援机器人。

E-mail: cumtliujian@cumt.edu.cn

葛世荣, 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为矿山机械智能化, 矿用救援机器人, 摩擦学。

E-mail: gesr@cumt.edu.cn

朱华, 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为煤矿救援设备, 矿用救援机器人, 摩擦学。

E-mail: zhuhua@cumt.edu.cn

唐超权, 男, 1982 年出生, 讲师。主要研究方向为机器人智能控制, 救援机器人技术。

E-mail: tangchaoquan@cumt.edu.cn