

面向电力巡检场景的多无人机任务分配与路径规划方法

陈博帆¹, 潘可达¹, 陈静川¹, 黄楚茵¹, 代洲²

(1. 南方电网通用航空服务有限公司, 广州 510500; 2. 贵州财经大学管理科学与工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对电力巡检场景的多无人机任务分配与路径规划问题, 提出了一种最大航程约束的多无人机任务分配与路径规划算法。首先基于市场拍卖的方法引入了跳点搜索算法(jump point search, JPS)算法预估无人机到巡检任务以及巡检任务到巡检任务之间的最短避障路径长度, 有效解决了任务分配和路径规划的耦合问题; 其次, 在优化目标函数中融合了无人机的最大航程约束, 确保无人机可以在其最大续航能力内完成所分配到的巡检任务; 最后, 提出了一种懒惰的拍卖策略, 在保证任务分配求解质量不变的情况下进一步提高了算法求解的收敛速度。实验结果表明, 提出的方法相比于现有方法更符合续航能力有限的旋翼无人机作业需求, 同时求解任务分配的时间最大减少了近 40%。实验结果证明了所提方法的实用性和有效性。

关键词: 无人机电力巡检; 任务分配; 路径规划; 最大续航约束

Multi-UAV Task Assignment and Path Planning Method for Power Inspection Scenarios

CHEN Bofan¹, PAN Keda¹, CHEN Jingchuan¹, HUANG Chuyin¹, DAI Zhou²

(1. China Southern Power Grid General Aviation Services Co., Ltd., Guangzhou 510500, China; 2. School of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

Abstract: A novel task allocation and path planning algorithm with maximum endurance constraints is proposed for the problem of multi-UAV task allocation and path planning in electric power inspection. Firstly, the jump point search (JPS) algorithm is introduced based on the auction mechanism to estimate the shortest obstacle avoidance path lengths between UAVs and tasks and between tasks and tasks, effectively addressing the coupling problem of task allocation and path planning. Secondly, the maximum endurance constraint of UAVs is integrated into the optimization objective function to ensure that UAVs can complete the assigned inspection tasks within their maximum endurance capacities. Finally, a lazy auction strategy is proposed to speed up the algorithm's convergence without compromising the solution quality of task allocation. The simulations show that the proposed method is more suitable for the operational requirements of multirotor UAVs with limited endurance than existing methods. Moreover, the time needed to solve the task allocation is reduced by nearly 40%. The experiments demonstrate the practicality and effectiveness of the proposed method.

Key words: UAVs power inspection; task assignment; path planning; maximum endurance constraints

基金项目: 贵州省高等学校电力装备制造质量智能化评价与预警创新团队项目(黔教技[2023]064号); 中国南方电网有限责任公司科技项目(CTYFXM2023008)。

Foundation item: Supported by the Guizhou Province Higher Education Electric Power Equipment Manufacturing Quality Intelligent Evaluation and Early Warning Innovation Team Project(QianJiaoJi [2023] No. 064), the Science and Technology Program of China Southern Power Grid Co., Ltd. (CTYFXM2023008).

0 引言

电力巡检是确保电力系统稳定运行的重要手段之一^[1-3]。其中,在电力杆塔、输电线路或其他电力设备使用旋翼无人机巡检替代人工巡检具备安全性高、成本低、可操作性强、准确度高等优势。然而,由于单个无人机的续航能力受限,无法高效地完成大范围的电力巡检任务。而多无人机协同作业往往能更高效地完成大范围场景的电力巡检任务。其中,多无人机的任务分配与路径规划是至关重要的技术挑战^[4-5]。首先,无人机群体需要进行合理的巡检任务分配,使得机群完成巡检任务的时间或总飞行的路程最短。其次,无人机在飞行过程中必须避开环境中的障碍物,确保无人机能够安全执行巡检任务。

现有的相关研究大多偏向于将多无人机的任务分配与路径规划分开考虑。其中经典的任务分配方法如匈牙利算法^[6],该方法在大多数情况下可以提供最优分配方案;此外,基于生物智能方法^[7]也被广泛用于任务分配问题的求解。然而,上述方法均属于集中式的设置,尽管逻辑简单,但不适用于大规模的任务分配。与集中式的方法不同,分布式的任务分配方法通常能提供高效的计算效率和可接受的分配方案。其中,基于市场拍卖的方法^[8-10]因能很好地平衡计算复杂度以及求解质量而备受关注。这类方法通过使无人机接收所有邻居的出价来完成分配。最近的研究中,Shorinwa 等人^[11]通过引入交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM),提出了一种分布式的任务分配算法,并通过实验证明了提出的方法能在大多数情况下收敛到最优。尽管上述市场拍卖的方法能快速提供可接受的任务分配方案,但它们都没有考虑路径规划问题,因此还需要在得到任务分配方案之后使用路径规划算法^[12-14]求解无人机的避障路径。此外,也有一些方法同时考虑了多无人机的任务分配与路径规划:文献[15]针对物流配送场景将无人机的碰撞约束加入目标函数中求解多无人机任务分配与路径规划问题。文献[16]考虑了障碍物密集场景下的多机任务分配与运动规划的问题。文献[17]引入三维 Dubins 曲线离散无人机的航向角,并将任务分配与路径规划整合为一体进行求

解。文献[18]提出了均衡资源的任务分配与路径规划联合优化方法。然而,上述方法要么没有考虑任务分配与路径规划之间的耦合问题^[15-16],要么没有考虑环境中的障碍物避障^[17-18]。

实际上,多无人机的任务分配与路径规划是一个相互耦合的问题,因此必须将二者整合考虑。文献[19]引入 Dubins 曲线考虑无人机的航向角,通过结合蚁群算法(ant colony optimization, ACO)和自组织映射算法(self-organizing map, SOM)来求解任务分配与路径规划问题;文献[20]通过使用改进的 A* 算法预估无人机的避障路径长度,解决了任务分配与路径规划的耦合问题。文献[21]引入矢量方向法来修改机器人的运动方向角实现机器人的自动避障,并结合 SOM 方法完成任务分配。文献[22]通过改进混合整数线性规划方法(mixed integer linear programming, MILP)和遗传算法解决了空地协同的任务分配与路径规划问题。然而,上述方法均面临求解速度慢的瓶颈,在大规模的多无人机巡检场景中难以保证系统的实时性。此外,电力巡检场景中的任务分配与路径规划问题往往需要考虑大范围的开放环境。此时由于旋翼无人机续航能力限制,进行任务分配时必须考虑无人机的最大航程约束。然而,现有的方法鲜有直接考虑电力巡检场景下的任务分配与路径规划问题。尽管一些方法考虑了无人机的最大航程约束^[19, 23-24],但是它们要么求解时间较慢,要么没有考虑环境中的障碍物。

为此,本文提出了一种面向电力巡检场景的任务分配与路径规划方法,在考虑无人机最大航程约束的同时解决了路径规划与任务分配的耦合问题。实验结果表明提出的方法在小规模的场景下能够实现实时的任务分配求解。通过和现有的先进方法对比,提出的方法在保证求解质量不变的情况下求解时间减少了近 40%。相比解耦的任务分配与路径规划方法,提出的方法得到的总飞行路程最优。

1 多无人机任务分配与路径规划问题建模

1.1 问题描述

在电力巡检场景中,假设一个机巢(无人机停泊平台的车辆,可容纳多架旋翼无人机)负责一片巡检区域。无人机在机巢内完成巡检任务分配之后

开始飞往维护区域并按分配的任务逐个访问巡检任务,并在完成巡检任务后自主飞回机巢。无人机飞行过程中需要避开环境中的建筑物、树林、电磁场干扰等禁飞区域并保证飞行路程尽可能短。需要注意的是,由于巡检任务都是在地面上,本文假设无人机在航行过程中按恒定的高度飞行,因此任务分配与路径规划是在二维空间上进行。

1.2 数学模型

设 $U = \{1, 2, \dots, i, \dots, m\}$ 为机巢中无人机的索引集合,其中 m 为无人机数量。设 $T = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ 为巡检区域内的 n 个巡检任务的索引集合。不失一般性,定义 v_j 为任务 j 的重要性因子(importance factor)。由于本文中每个巡检任务具有相同的优先级,因此 $v_j = 1$ 。定义 λ_i 表示为距离折扣因子,为保证优化的目标函数单调递减,需满足 $\lambda_i < 1$,本文经验上取 $\lambda_i = 0.95$ 能得到更好的求解质量。根据文献[8],无人机 i 访问巡检任务集 T_i 中所有任务的总奖励值 $f_i(T_i)$ 可以表示为式(1)。

$$f_i(T_i) = \sum_{j=1}^{|T_i|} v_j \lambda_i^{d(P_i^j)} \quad (1)$$

式中: $|\cdot|$ 为集合中元素的数量; $T_i (T_i \subseteq T)$ 为按访问顺序分配给无人机 i 的巡检任务集; P_i 为无人机访问 T_i 中所有任务的最短避障路径; P_i^j 为 P_i 的子路径,表示无人机 i 访问到任务 $j (\forall j \in T_i)$ 的路径; $d(P_i^j)$ 为子路径 P_i^j 的长度。

在任务分配的过程中将未分配的任务 k 添加到集合 T_i 中得到无人机 i 的边际奖励回报值 $\omega_i(k)$,如式(2)所示。

$$\omega_i(k) = f_i(T_i \cup \{k\}) - f_i(T_i), \forall k \in T, k \notin T_i \quad (2)$$

于是结合式(1)和式(2)可以得到 $\omega_i(k)$ 的表达式如(3)所示。

$$\omega_i(k) = \sum_{j=1}^{|T_i \cup \{k\}|} v_j \lambda_i^{d(P_i^j)} - \sum_{j=1}^{|T_i|} v_j \lambda_i^{d(P_i^j)}, \forall k \in T, k \notin T_i \quad (3)$$

式中 $\omega_i(k)$ 保证了目标函数是一个次模函数,它具有边际增益递减的重要属性,即无人机 i 分配到的任务越多,其选择巡检任务 k 所得到的边际增益 $\omega_i(k)$ 越小。边际增益递减的属性确保了算法的收敛性^[8]。

综上,所有无人机完成任务分配的总回报函数

如式(4)所示。

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^{|U|} \left(\sum_{j=1}^{|T_i|} x_{ij} \cdot v_j \cdot \lambda_i^{d(P_i^j)} \right) \\ \text{s.t. } |T_i| \leq L_i, \forall i \in U \\ \sum_{i=1}^{|U|} (x_{ij}) = 1, \forall j \in T \\ d(P_i) \leq D_{\max}^i, \forall i \in U \end{cases} \quad (4)$$

式中:如果任务 j 被分配给无人机 i ,则 $x_{ij} = 1$,否则 $x_{ij} = 0$ 。约束条件表示:分配给每个无人机的任务不能超过其最大任务访问数量 L_i ;每个任务只分配给一架无人机,一架无人机可分配多个任务;每架无人机执行巡检任务的避障路径长度不能超过其最大续航里程 $D_{\max}^i$ 。

2 整合的任务分配与路径规划问题求解

基于拍卖的任务分配方法的求解过程可以总结为拍卖阶段和一致性阶段。然而传统的基于拍卖的方法在每次迭代时都需要重新计算无人机对所有任务的出价。针对该问题,文献[10]提出了一种基于懒惰采样的任务分配方法(lazy sample based task allocation, LSTA),成为了当前求解任务分配的先进算法之一。然而,该方法中,无人机 i 每次迭代时仍需计算其当前回报值 $f_i(T_i)$,这导致大量重复计算。本文针对这一问题对 LSTA 算法进行了改进,使得无人机 i 只在分配到新任务时才重新计算其当前回报值 $f_i(T_i)$,显著提升了算法的收敛速度。此外,考虑到任务分配与路径规划之间的耦合问题:即任务分配方案将直接影响无人机的飞行路程,而无人机在飞行过程中因避障等行为产生的额外飞行路程也会反过来影响任务分配方案的质量。在拍卖阶段计算的路径长度应是无人机的最短避障路径长度而不是直线路径长度。本文通过引入 JPS 算法^[13] 计算无人机的最短避障路径长度,从而解决了无人机任务分配与路径规划的耦合问题。同时,如果待分配的巡检任务超出无人机的最大航程,即使无人机出价最高,也不将该任务分配给无人机,从而实现无人机的最大航程约束。

综合上述,提出了一种面向电力巡检场景的多无人机任务分配与路径规划算法(electronic power inspection task assignment and path planning, EPInsTAP)。

2.1 任务分配与路径规划的整合

相比当前基于市场拍卖的方法,本文提出的方法增加了初始化处理阶段,即在初始化阶段首先计算无人机-巡检任务以及巡检任务-巡检任务之间的距离矩阵 $D_{1 \times n}^{i2i}$ 、 $D_{n \times n}^{i2i}$ 和对应的路径矩阵 $P_{1 \times n}^{i2i}$ 、 $P_{n \times n}^{i2i}$ 。无人机-巡检任务之间的距离矩阵 $D_{1 \times n}^{i2i}$ 和路径矩阵 $P_{1 \times n}^{i2i}$ 可通过式(5)计算得到。

$$D_{1 \times n}^{i2i} = \begin{bmatrix} d(P_i^1) \\ d(P_i^2) \\ \vdots \\ d(P_i^n) \end{bmatrix}_{1 \times n}, P_{1 \times n}^{i2i} = \begin{bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \\ \vdots \\ P_i^n \end{bmatrix}_{1 \times n} \quad (5)$$

式中: $d(P_i^j)$ 为无人机 i 到任务 j 的最短避障距离; P_i^j 为无人机 i 到任务 j 的避障路径。

巡检任务-巡检任务之间的距离矩阵 $D_{n \times n}^{i2i}$ 和路径矩阵 $P_{n \times n}^{i2i}$ 可分别通过式(6)和式(7)计算得到。

$$D_{n \times n}^{i2i} = \begin{bmatrix} 0 & d(P_{12}) & \dots & d(P_{1n}) \\ d(P_{21}) & 0 & \dots & d(P_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d(P_{n1}) & d(P_{n2}) & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6)$$

$$P_{n \times n}^{i2i} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (7)$$

式中: $d(P_{jk})$ 为无人机从任务 j 到任务 k 的最短避障路径长度; P_{jk} 为对应的避障路径。需要注意的是上述的距离矩阵及对应的路径可以在初始化阶段使用 JPS 算法求解得到。由于篇幅原因, JPS 算法的细节本文将不重复赘述,可参考文献[13]和文献[25]了解 JPS 算法的实现细节。

为了获得平滑路径,本文对 JPS 算法得到的避障路径进行了优化处理。其关键在于依次检查相邻的路径节点,若相邻节点之间与障碍物不相交则剔除冗余的路径节点。图 1 所示的流程图总结了使用 JPS 算法求解距离矩阵和路径矩阵的具体步骤。于是得到的距离矩阵 $D_{1 \times n}^{i2i}$ 、 $D_{n \times n}^{i2i}$ 和路径矩阵 $P_{1 \times n}^{i2i}$ 、 $P_{n \times n}^{i2i}$ 已经考虑了无人机的避障行为,从而克服了任务分配与路径规划的耦合问题,并完成了算法的初始化阶段。

2.2 提出的任务分配与路径规划方法

首先介绍接下来使用的符号。设 N_i 为无人机 i 的未分配任务集合; 设 Ω_i 表示 N_i 中对应任务的边

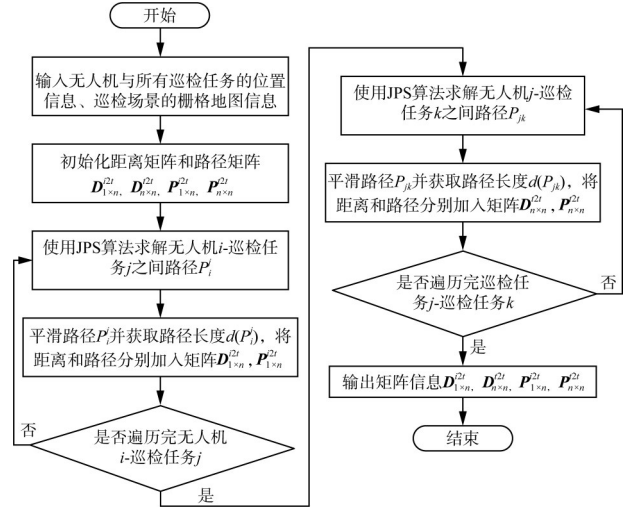


图 1 JPS 求解最短避障路径和其长度

Fig. 1 JPS solves for the shortest obstacle-free path and distance

际奖励集合, Ω_i 中第 k 个位置的元素记为 ω_i^k ; 设 T_i 表示已分配给无人机 i 的巡检任务有序集合。在每次迭代中, 将 Ω_i 中最大边际回报 ω_i^* 对应的任务记为无人机 i 的最佳任务 j_i^* , $j_i^* \in N_i$ 。此外, 设 W_i^* 为哈希字典表, 其中无人机的索引 u 为键, (j_u^*, ω_u^*) 为值, 注意 j_u^* , ω_u^* 分别表示无人机 u 的最佳任务和对应的最大边际回报, 其中 $u \in U$ 。

如图 2 所示, 概括了本文提出的任务分配与路径规划算法流程图, 具体实现过程如下。

在拍卖阶段, 本文在 LSTA 算法^[10]的基础上进行了优化, 避免了每次迭代时不必要的重复计算。首先设 ω_i^c 为无人机 i 当前任务分配的回报值, 可通过式(1)计算得到, 即 $\omega_i^c = f(T_i)$; 设 d_i^c 为对应的最短避障路径长度, 即 $d_i^c = d(P_i)$ 。在改进的方法中, 当且仅当无人机 i 分配到新任务时才更新当前回报值 ω_i^c 和对应的路径长度 d_i^c 。于是结合式(3), 迭代过程中添加任务 k 的边际回报值可推导为通过式(8)计算得到。这样可以提高任务分配的求解速度, 且不影响任务分配的求解质量。

$$\omega_i(k) = \sum_{j=1}^{|T_i \cup \{k\}|} v_j \lambda_l^{d(P_i^j)} - \omega_i^c, \forall k \in N_i, k \notin T_i \quad (8)$$

此外, 为了确保无人机 i 能够在其最大续航范围内完成分配到的巡检任务, 在计算任务 k 的边际回报时, 如果无人机 i 不能在其最大航程 $D_{i \max}^i$ 内完成其所有任务并返回机巢, 则将任务 k 的边际回报值 $\omega_i(k)$ 设为尽可能小且大于 0。无人机 i 完成未分

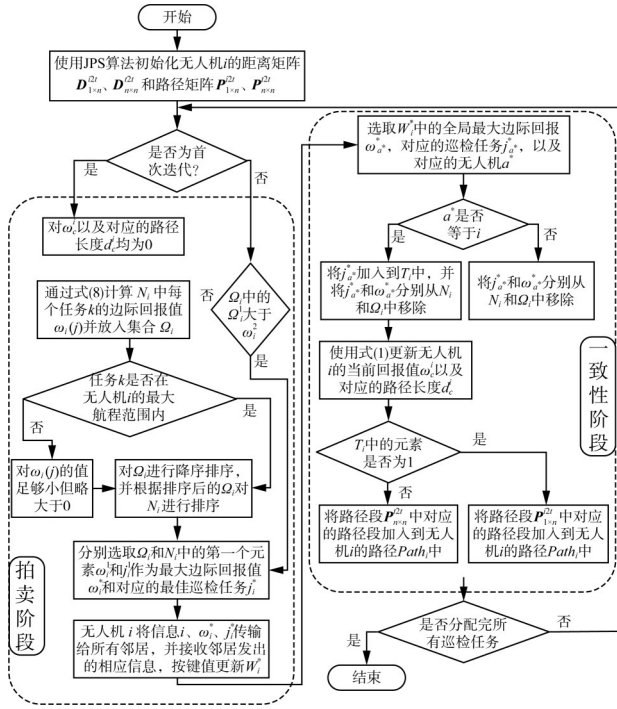


图2 提出的EPInsTAP算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed EPInsTAP

配任务的出价之后, 对 Ω_i 中的元素进行降序排序, 并根据 Ω_i 的排序结果对 N_i 进行排序。最后无人机 i 将其索引信息 i 、得到的最大边际回报 $\omega_i^* = \omega_i^1$ 、以及最大边际回报对应的最佳任务 $j_i^* = j_i^1$ 传输给周围的邻居, 同时接收周围邻居分享的拍卖信息以完成 W_i^* 的更新并进入一致性阶段。

在一致性阶段, 无人机 i 与它的所有邻居进行协商, 确定谁将获得当前的全局最佳任务, 其中全局最佳任务和分配到该任务的无人机分别记为 j_a^* 和 a^* 。由于所提方法在一致性阶段与LSTA算法^[10]一致, 因此本文不再详细描述。两种方法都是使用最大一致性算法解决任务冲突, 即每次迭代都将最佳巡检任务 j_a^* 分配给边际回报最大的无人机。可参考文献[10]了解一致性阶段的实现细节。确定全局最佳任务 j_a^* 和分配到该任务的无人机 a^* 之后, 无人机 i 需要判断 a^* 是否与自身的索引一致, 即是否满足 $a^* = i$ 。如果一致, 则将 j_a^* 添加到集合 T_i 中, 并将 j_a^* 及 ω_a^* 分别从集合 N_i 和 Ω_i 中移除, 同时将增加任务对应的路径加入到无人机 i 的路径 $Path_i$ 中; 如果不一致, 则直接将 j_a^* 和 ω_a^* 分别从集合 N_i 和 Ω_i 中移除。

通过上述即可完成多无人机任务分配与路径规划算法的实现。需要注意的是尽管本文引入了JPS

算法实现路径规划, 但JPS算法只在初始化阶段占用无人机的计算资源, 在迭代过程中不再占用无人机的计算资源。因此本文提出的EPInsTAP算法在求解任务分配时的最优近似保证和计算复杂度与LSTA算法^[10]表现出相同的性能。即对于单调的次模目标函数, EPInsTAP算法在最坏的情况下具有50%的最优近似保证, 算法总的计算时间复杂度为 $O(mn)$ 。对于单个无人机, 其计算复杂度为 $O(n^2)$, 其中 $n = |T|$ 表示任务数量, $m = |U| \times |T|$ 表示无人机-巡检任务对的数量。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

本文中所有的数值仿真实验均在华硕台式电脑 (Intel (R) Core (TM) i7-8700 CPU with 16 GB memory) 上完成, 所有代码均使用Python实现。为了更全面地评估本文提出的EPInsTAP算法的性能优势, 本文还将EPInsTAP算法与CBBA^[8]、DSTA^[9]、以及LSTA^[10]等先进算法进行对比。需要注意的是, 为了保证对比的公平性, 本文在上述对比的算法中都结合了JPS算法^[13]进行后端的路径规划, 且在JPS+CBBA、JPS+DSTA, 以及JPS+LSTA 3种方法中都考虑了无人机的最大续航约束。

无人机巡检区域的场景如图3所示, 运维区域为6 km×4 km的矩形区域, 其中灰色区域为禁飞区域, 红色虚线圆形所包围的区域为巡检任务区域。

为了验证所提方法的泛化性能, 仿真实验中巡检任务的位置通过随机产生。巡检任务区域与障碍物区域不重叠, 巡检任务在实际场景中可能包括电力杆塔、某一段输电线路或环境中其他电力设备等。无人机的最大续航里程可能因其剩余电量的原因而不一致。假设每个机巢最多可容纳15架无人机。为了增加无人机巡检的难度, 也假设无人机巡检过程中存在建筑物、树林、电磁干扰等障碍物区域, 无人机在飞行过程中必须绕开上述障碍物区域。

需要注意的是, 由于实验重点验证的是无人机在巡检过程中避障行为对巡检任务分配方案的影响以及所提算法求解任务分配的效率, 因此实验中不包括巡检任务与巡检任务之间的输电线路巡检。在实际部署中, 往往巡检任务与巡检任务之间的输电

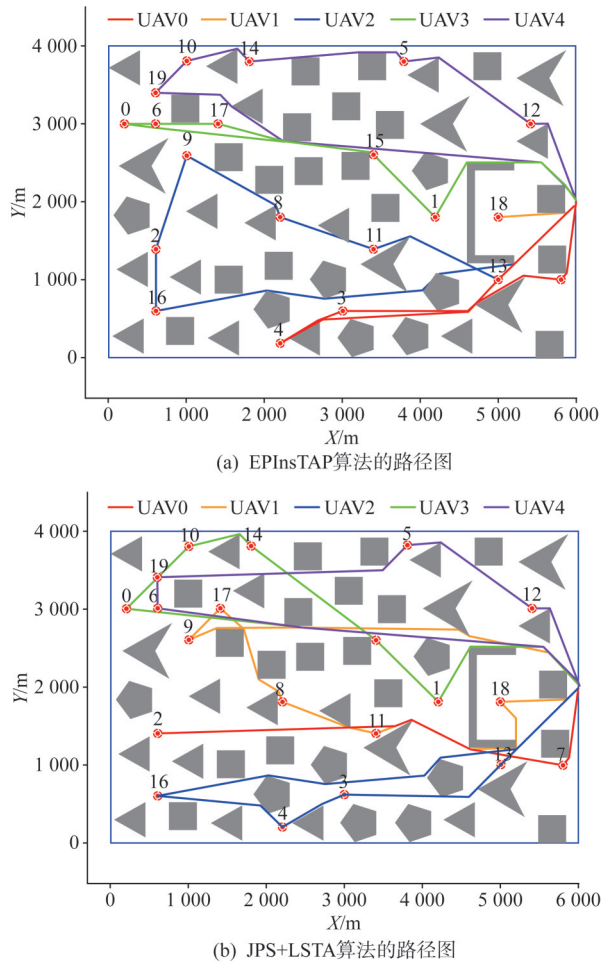


图3 EPInsTAP和JPS+LSTA算法的求解结果

Fig. 3 Results of EPInsTAP and JPS+LSTA algorithms

线路也需要巡检,此时只需将输电线路与其连接的电力设备(如电力杆塔)视为一个巡检任务。而其中输电线路的巡检路径一般没有障碍物,因此只需在所提算法的初始化阶段增加执行该巡检任务所需的巡检路径和路径长度到对应的路径矩阵和距离矩阵中即可。

3.2 算例分析

首先进行5架无人机,20个巡检任务的算例分析,无人机在起飞之前位于机巢区域。表1列出了无人机初始的全局位置和其最大续航里程 $D_{\max}$,表2列出了巡检任务的中心位置。

在此基础上,分别使用提出的EPInsTAP算法和JPS+LSTA算法进行对比实验。得到实验结果如图3以及表3所示。在表3中,如果无人机的最短避障路径长度超过其最大续航里程,则标注为“×”,否则为“√”。观察图3可以发现不考虑无人机最

表1 无人机的位置信息

Tab. 1 Positions of UAVs

无人机编号	位置坐标		最大续航/km
0	6 000.0	1 990.0	12
1	6 000.0	1 995.0	12
2	6 000.0	2 000.0	20
3	6 000.0	2 005.0	20
4	6 000.0	2 010.0	20

表2 巡检任务的位置信息

Tab. 2 Positions of tasks

任务编号	位置坐标		任务编号	位置坐标	
0	200.0	3 000.0	10	1 000.0	3 800.0
1	4 200.0	1 800.0	11	3 400.0	1 400.0
2	600.0	1 400.0	12	5 400.0	3 000.0
3	3 000.0	600.0	13	5 000.0	1 000.0
4	2 200.0	200.0	14	1 800.0	3 800.0
5	3 800.0	3 800.0	15	3 400.0	2 600.0
6	600.0	3 000.0	16	600.0	600.0
7	5 800.0	1 000.0	17	1 400.0	3 000.0
8	2 200.0	1 800.0	18	5 000.0	1 800.0
9	1 000.0	2 600.0	19	600.0	3 400.0

表3 EPInsTAP算法和LSTA算法的求解细节指标

Tab. 3 Comparison for the EPInsTAP and the LSTA

方法	UAV编号	分配结果	航程/m	总航程/m	求解时间/ms
EPInsTAP	0	7→3→4	9 322.7(√)	50 653.4	2.996
	1	18	2 123.1(√)		
	2	13→11→8→9→2→16	13 843.4(√)		
	3	1→15→17→6→0	12 873.0(√)		
	4	12→5→14→10→19	12 491.2(√)		
JPS+LSTA	0	7→2	12 197.7(×)	62 719.1	4.986
	1	18→11→8→17→9	12 303.5(×)		
	2	13→3→4→16	12 064.9(√)		
	3	1→15→14→10→0	13 633.1(√)		
	4	12→5→19→6	12 537.8(√)		

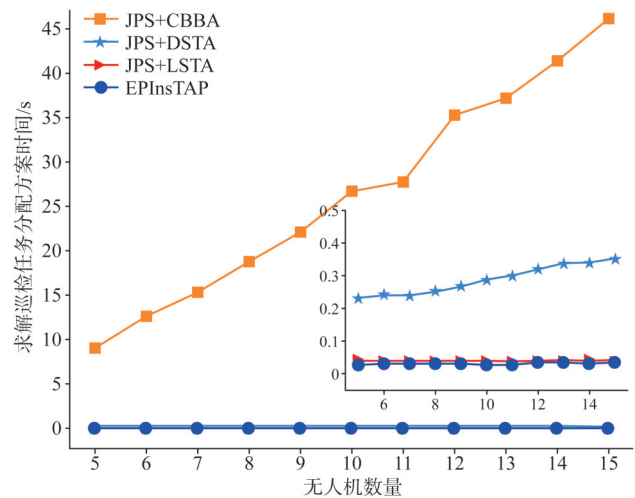
大可飞行航程的情况下,无人机可以绕开环境中的障碍物航行到其分配到的巡检任务区域。

观察表3可以发现,由于JPS+LSTA算法在任务分配过程中没有考虑无人机的避障路径,导致UAV 0和UAV 1两架无人机因避障路径的额外路程消耗无法在其最大续航内完成巡检任务并返回机巢。相比之下,本文提出的EPIInsTAP算法则保证了每架无人机的实际飞行航程都不超过其最大续航里程。此外,通过表3还可以发现EPIInsTAP算法在求解时间上优于JPS+LSTA算法。相比JPS+LSTA算法,EPIInsTAP算法的求解时间减少了近40%,只需3 ms左右即可完成求解,这对于实时的任务重分配来说是可行的。同时,EPIInsTAP算法得到的任务分配方案所需的总路径长度相比JPS+LSTA算法减少了12.06 km,这在很大程度上节约了无人机群体的整体续航里程。通过算例分析可见,本文提出的EPIInsTAP在无人机所需的总航程以及求解任务分配的时间上都展现了最优的性能,且分配给无人机的任务均在其最大续航范围内。

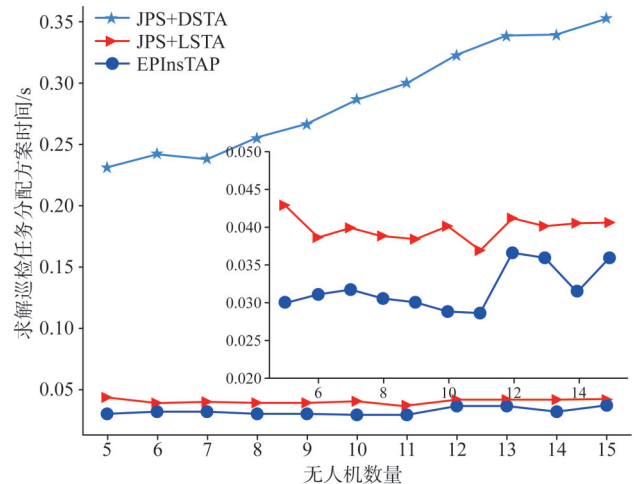
3.3 性能对比分析

假定巡检区域内有60个巡检任务需要无人机完成;无人机的数量从5架增加到15架,每组实验增加1架无人机,每组实验重复10次以计算每个指标的平均值,且每次实验的无人机起始位置和巡检任务位置都随机产生;无人机的最大航程随机在12 km和20 km中选择。评价指标为:所有无人机求解巡检任务分配的时间成本以及所有无人机完成巡检任务所需的总航程。需要注意的是在本文中,统计任务分配的求解时间时不考虑初始化的时间,这是因为初始化阶段可以在无人机起飞前完成,不影响无人机的实时性能。实验结果如图4和图5所示。

由图4(a)可知4种算法中JPS+CBBA算法求解任务分配的计算时间代价最大。为了更直观看到其他3种算法计算时间对比的细节,将其他3种算法的求解时间放大为图4(b)所示,可以看到本文提出的EPIInsTAP算法求解任务分配的计算时间代价最小,且都在0.04 s内完成任务分配的求解,计算时间相比于JPS+LSTA算法在大多数情况下减少了30%以上。需要注意的是本文所统计的求解时间是所有机器人求解任务分配的总时间,因此在分布式系统中,每个无人机都将能在8 ms以内完成任务分配的求解,当需要进行任务重分配的时候不会影响到多机系统的实时性。



(a) 4种算法求解巡检任务分配的计算时间



(b) 3种算法求解巡检任务分配的计算时间

图4 60个巡检任务的计算时间

Fig. 4 Computing times of 60 inspection tasks

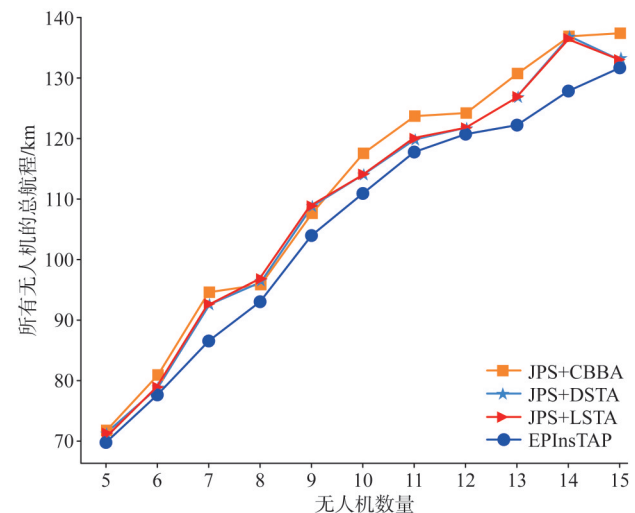


图5 60个巡检任务的总航程

Fig. 5 Total distance of 60 inspection tasks

通过观察图 5 可以发现相比于其他先进方法, EPIInsTAP 算法下无人机的总航行路程最短, 其总航行路程最大节约了 8 km 左右, 这对于节省整体的无人机能耗来说同样具备很大的优势。此外, JPS+CBBA 在大多数情况下总航行路程最长, 而 JPS+LSTA 算法的总航程与 JPS+DSTA 算法的总航程基本保持一致。本文提出的 EPIInsTAP 之所以能够在总航程上保持最优, 是因为在任务分配的时候考虑了无人机的避障路径长度, 使得无人机完成巡检任务的飞行路程往往更短, 从而总的航行路程也最短。可见, 考虑了任务分配与路径规划耦合得到的任务分配方案通常优于不考虑耦合的分配方案。

综上所述, 通过大量的数值仿真实验证明了本文提出的 EPIInsTAP 算法的高效性和实用性。

4 结语

本文首先总结了电力巡检场景中的任务分配问题与一般任务分配问题的区别。并对现有的相关工作进行了总结回顾。针对电力巡检场景的任务分配与路径规划问题, 本文提出了一种分布式的任务分配和路径规划算法。该方法在任务分配的时候充分考虑了任务分配与路径规划之间的耦合, 从而确保分配给无人机的巡检任务更符合现实考量, 且考虑了无人机的最大续航约束。实验表明本文提出的 EPIInsTAP 算法在无人机执行巡检任务时的总航程比当前的先进算法减少 8 km 左右。且相比于当前的先进算法, 提出的算法在求解任务分配的时间上最大减少了近 40 %。总之, 实验验证了算法的有效性和实用性。在将来, 将考虑融入更快速的全局路径规划算法, 并进一步将提出的算法部署到真实应用场景中进行验证。

参考文献

- [1] 庄雪澄, 邵洁. 基于逐像素自适应对抗网络的电力巡检图像增强方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 138 - 147.
ZHUANG Xuecheng, SHAO Jie. Electric power patrol inspection image enhancement method with per-pixel self-paced adversarial network[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 138 - 147.
- [2] 毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 等. 电力巡检机器人路径规划技术及应用综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3009 - 3024.
MAO Jianxu, HE Zhenyu, WANG Yaonan, et al. Review of research and applications on path planning technology for power inspection robots[J]. Control and Decision, 2023, 38(11): 3009 - 3024.
- [3] 朱长荣, 吕文超, 单超, 等. 基于 IMU-GNSS-VO 的输电线无人机巡检定位和目标跟踪自适应方法[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 61 - 70.
ZHU Changrong, LÜ Wenchao, SHAN Chao, et al. Adaptive method for transmission-line UAV inspection location and target tracking based on IMU-GNSS-VO[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8): 61 - 70.
- [4] 翟政, 何明, 徐鹏, 等. 基于市场机制的无人集群任务分配研究综述[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(7): 1921 - 1928.
ZHAI Zheng, HE Ming, XU Peng, et al. Research review of task allocation for unmanned swarm based on market mechanism[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(7): 1921 - 1928.
- [5] 张振国, 毛建旭, 谭浩然, 等. 重大装备制造多机器人任务分配与运动规划技术研究综述[J]. 自动化学报, 2024, 50(1): 21 - 41.
ZHANG Zhenguo, MAO Jianxu, TAN Haoran, et al. A review of task allocation and motion planning for multi-robot in major equipment manufacturing[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(1): 21 - 41.
- [6] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1 - 2): 83 - 97.
- [7] BAI X, YAN W, GE S S, et al. An integrated multi-population genetic algorithm for multi-vehicle task assignment in a drift field[J]. Information Sciences, 2018(453): 227 - 238.
- [8] CHOI H L, BRUNET L, HOW J P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(4): 912 - 926.
- [9] SHIN H S, LI T, LEE H I, et al. Sample greedy based task allocation for multiple robot systems[J]. Swarm Intelligence, 2022, 16(3): 233 - 260.
- [10] LI T, SHIN H S, TSOURDOS A. Efficient decentralized task allocation for UAV swarms in multi-target surveillance missions[C]//2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), June 11 - 14, 2019, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 2019: 61 - 68.
- [11] SHORINWA O, HAKSAR R N, WASHINGTON P, et al. Distributed multirobot task assignment via consensus ADMM[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023, 39(3): 1781 - 1800.
- [12] 刘胜, 张豪, 晏齐忠, 等. 基于 ACO-SA 算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 75 - 82.
LIU Sheng, ZHANG Hao, YAN Qizhong, et al. Path planning of inspection robot in substation based on ACO-SA algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 75 - 82.
- [13] HARABOR D, GRASSTIEN A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, August 7 - 11, 2011, San Francisco, California, USA, 2011, 25(1): 1114 - 1119.
- [14] 梁华尘, 周稳, 倪旭东, 等. 面向多目标联合电力巡检的车载无人机协同巡检路径规划方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 138 - 147.
LIANG Huachen, ZHOU Wen, NI Xudong, et al. Cooperative inspection path planning method for multi-objective joint power inspection by vehicle-mounted UAV[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 138 - 147.

- [15] 郭兴海, 计明军, 温都苏, 等. “最后一公里”配送的分布式无人机的任务分配和路径规划[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 946 – 961.
GUO Xinghai, JI Mingjun, WEN Dusu, et al. Task assignment and path planning for distributed multiple unmanned vehicles in the “last mile”[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2021, 41(4): 946 – 961.
- [16] XU G, KANG X, YANG H, et al. Distributed multi-vehicle task assignment and motion planning in dense environments [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(4): 7027 – 7039.
- [17] 徐杰, 吴蔚楠, 龚春林. 多无人机任务分配/航迹规划的一体化求解方法[J]. 宇航学报, 2023, 44(12): 1860 – 1870.
XU Jie, WU Weinan, GONG Chunlin, et al. Integrated solution method for Multi-UAV task assignment and trajectory planning[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(12): 1860 – 1870.
- [18] 孙鉴, 马宝全, 吴佳伟, 等. 地震场景下无人机群路径规划与任务分配均衡联合优化[J]. 计算机应用, 2024, 44(10): 3232 – 3239.
SUN Jian, MA Baoquan, WU Zhuwei, et al. Joint optimization of UAV swarm path planning and task allocation balance in earthquake scenarios[J]. Journal of Computer Applications, 2024, 44(10): 3232 – 3239.
- [19] 郭家赫, 高岳林, 柳迎春. 多固定翼无人机的任务分配和路径规划算法[J]. 太原理工大学学报, 2025, 56(2): 348 – 355.
GUO Jiahe, GAO Yuelin, LIU Yingchun. Task allocation and path planning algorithms for multi-fixed-wing UAV[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2025, 56(2): 348 – 355.
- [20] 郑锴, 尹栋, 殷少锋, 等. 基于改进A*算法的多基地多无人机分阶段任务规划方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(2): 248 – 256.
ZHENG Kai, YIN Dong, YIN Shaofeng, et al. Multi-stage mission plan method of multi-UAVs deployed in different bases based on improved A* algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(2): 248 – 256.
- [21] 张子迎, 宫思远, 徐东, 等. 多机器人任务分配与路径规划算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(10): 1753 – 1759.
ZHANG Ziyang, GONG Siyuan, XU Dong, et al. Research on multi-robot task assignment and path planning algorithm [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(10): 1753 – 1759.
- [22] MA T, LU P, DENG F, et al. Air – ground collaborative multi-target detection task assignment and path planning optimization[J]. Drones, 2024, 8(3): 110.
- [23] ZHU T, XIAO Y, ZHANG H. Maritime patrol tasks assignment optimization of multiple USVs under endurance constraint [J]. Ocean Engineering, 2023(285): 115445.
- [24] 肖鹏, 谢锋, 倪海鸿, 等. 多机任务分配与路径规划协同优化方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(5): 1141 – 1151.
XIAO Peng, XIE Feng, NI Haihong, et al. Research on collaborative optimization method of Multi-UAV task allocation and path planning[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1141 – 1151.
- [25] LIU S, WATTERSON M, MOHTA K, et al. Planning dynamically feasible trajectories for quadrotors using safe flight corridors in 3-D complex environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(3): 1688 – 1695.

收稿日期: 2024-04-07; 网络首发日期: 2024-07-24

作者简介:

陈博帆(1991), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为无人机智能技术研究及应用, 614980720@qq.com;

潘可达(1992), 男, 通信作者, 工程师, 博士, 研究方向为大数据在智能电网中的应用, pankedal23@163.com;

陈静川(1996), 女, 助理工程师, 硕士, 研究方向为机巡作业技术, 2322582934@qq.com。

征稿启事

《南方电网技术》是由中国南方电网有限责任公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1)文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2)学术论文请按GB/T 7713.2—2022《学术论文编写规则》书写,篇幅以版面不超过9 000字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下a,b,c,d,e五项:

a)作者署名(不宜超过7位)、作者单位、地址、电话、email信箱和邮政编码;

b)论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c)作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d)350字左右的中文摘要,3~8个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e)若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,需提供项目名称及编号。

2 书写格式

1)要求文稿正文字号为5号,汉字字体为宋体,英数字体为Times New Roman,希腊字体为Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2)计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3)文中和公式中容易混淆的字符请注清文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4)文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1)表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入1个汉字以“注:”起头排版。

2)插图的下放应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用AutoCAD、

Adobe Illustrator或Corel DRAW软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备200万总像素以上。

3)图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4)参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1)请登录《南方电网技术》编辑部网站<https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电020-36625646咨询。

2)投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3)编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电020-36625642、36625643或发送电子邮件到nfdwjs@csg.cn向编辑部了解审稿情况。

4)文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部