车辆容错鲁棒输电线路巡检规划

František Nekovář, Jan Faigl, Martin Saska

arXiv:2302.01163v1 [cs.RO] 2 Feb 2023

摘要——本文探讨将输电线路容错巡检规划作为多旅行商问题的一种推广。所研究的巡检规划问题被建模为单基地、多飞行器场景，其中巡检飞行器受电池预算限制，进而限制其巡检时间。假设巡检飞行器为自主多旋翼飞行器，其飞行速度范围较广，会影响电池消耗。巡检计划由多条飞行器路线构成，以全面覆盖巡检目标输电线路。若巡检飞行器在执行巡检计划期间的任意时刻发生任务中断，则使用其余飞行器及其剩余电池预算重新规划巡检任务。通过为初始规划选择合适的代价函数来提高鲁棒性，从而最大限度地延长成功重新规划的时间窗口。这使其余飞行器能够利用各自剩余的电池预算，成功完成所有巡检目标。本文采用具有多种代价函数的组合元启发式算法进行规划，并在巡检过程中快速重新规划。

I. 引言

本文所研究的问题是针对输电线路（PTL）巡检的飞行器故障容错与鲁棒巡检规划，并将其表述为组合旅行商问题（TSP） [1]的一般化形式。在下文中，前述一般化问题将称为多集合旅行商问题（MS-TSP）。当所使用的任一无人机（UAV）发生故障的概率（如图 1 所示）不可忽略时，单架飞行器发生故障或飞行中断的总体概率会随飞行器数量的增加而上升。因此，有必要进行故障感知规划，以最大限度地提高巡检任务的成功率。尽管希望使用尽可能少的飞行器，但在规划时仍应考虑有限的冗余。电动无人机平台中最容易发生故障的部件是电池。由于电池在其生命周期和充电过程中表现出电流与电压的非线性变化，因此难以测量电池的剩余寿命。电池故障可能在飞行开始时发生，也可能在任何时刻发生。因此，我们的目标是为多架多旋翼飞行器制定鲁棒巡检计划，使其能够在某架飞行器必须在完成巡检前中断任务时进行重新规划方案。所研究的问题

本研究得到捷克科学基金会（GA˘CR）研究项目（编号：22-05762S 和 22-24425S ）的资助，并获得欧盟地平线 2020 研究与创新计划 AERIAL-CORE 项目（资助协议编号：871479）的支持。作者就职于捷克技术大学电气工程学院，地址：Technicka 2, 166 27, 布拉格，捷克共和国，电子邮件：{nekovfra|faiglj|saskaml}@fel.cvut.cz。



图 1. 我们的多机器人系统研究平台 [2] 能够对输电线路进行视觉巡检。来源：Neugebauer，布拉格捷克理工大学。

被视为欧盟资助的 AERIAL-CORE 项目目标中的一个重要方面。

输电线路巡检是在飞行器飞行期间，沿输电线路附近进行的。在由输电塔 [3]界定的输电线路区段之间执行此类巡检飞行更为有利。因此，该问题可定义为对输电线路区段进行访问的覆盖路径规划问题，其中每个区段都是一个需要访问的目标点。在巡检过程中，这些区段被组织成一个序列；因此，我们将排序问题表述为旅行商问题的一种变体。

旅行商问题的一个解是按顺序访问给定目标点，并可进一步推广到将目标点分组为若干集合的情形：每个集合只需访问其中的某一个目标点，但所有集合都必须被访问。此外，使用电池预算有限的单架小型无人机巡检所有集合可能无法实现。因此，我们将常规旅行商问题的形式化定义推广为考虑由无人机电池给定的有限最大飞行预算 C_{max}，并采用多飞行器覆盖所有区段，使各自巡回路线的起点和终点均位于共同基地。由于无人机在巡检飞行期间可能发生故障，因此，规划时应确保能够利用其他飞行器完成巡检目标，从而实现恢复，因为任何飞行器都可能在任意时刻发生故障。这种旅行商问题的推广形式用于描述所研究的具有飞行器故障容错和恢复能力的输电线路巡检规划问题，其中要求飞行器恰好访问输电线路的每个区段一次，但访问方向可以任意。前往相应区段巡检起点的行驶成本同样十分重要，因为它属于电池预算 C_{max} 的一部分。重新规划的示例见图 2。本文的主要贡献

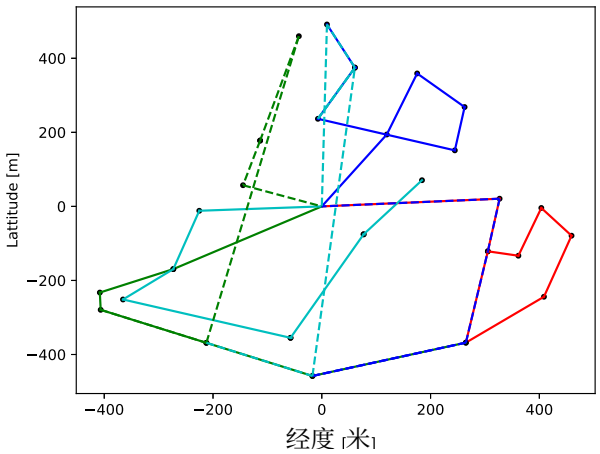

图2. Nechranice 输电线路变电站附近巡检计划规划与重新规划的示例。该变电站位于 50°20’44.7"N 13°19’30.9"W，车辆在达到最大路线时间的 50 % 时发生故障。

这份简短报告在于评估三种成本函数以及所得巡检计划的鲁棒性，其中一种成本函数为创新方法。比较的两种成本函数是标准的最小最大和最小和，第三种则是二者的加权和。评估结果表明，我们提出的新成本函数能够在所要求的评价标准方面提供更优的巡检计划。

本文其余部分安排如下。下一节将简要概述输电线路巡检相关工作及现有的旅行商问题相关建模。第三节定义所研究的鲁棒规划问题。第四节讨论采用不同成本函数的多集合旅行商问题组合元启发式算法的评估方法。第五节介绍评估结果。第六节详述结论和未来工作展望。

II. 相关工作

巡检规划问题已被建模为旅行商问题的变体 [4]。针对具有最大飞行距离限制的输电线路巡检，已有研究采用基于旅行商问题的建模方法 [5]。在我们先前的工作 [1]，中，我们提出了一种基于旅行商问题的输电线路巡检规划模型，称为多集合旅行商问题（MS-TSP）。多车辆巡检可建模为多旅行商问题（M-TSP）的一种变体 [6] ，并可通过整数线性规划（ILP）求解 [7], ，但其计算开销很大。因此，有研究采用一种称为贪婪随机自适应搜索过程（GRASP）的组合元启发式算法，提出了计算负担较小的方法 [8], [9]。文献 [10]综述了多旅行商问题的启发式算法。然而，我们先前的方法 [1]在集合泛化和受限行程预算方面不同于现有的多旅行商问题变体。

针对无人机的容错无人机控制已有多种研究方法 [11] ，并且文献 [12]，讨论了编队飞行中针对无人机故障的（重新）规划；作者通过修改编队的轨迹，使受损无人机能够跟踪参考轨迹。文献 [13],提出了基于深度学习的机载无人机故障检测与诊断方法，从而能够实时修改计划并防止无人机坠毁。在文献 [14]，中，作者针对外部扰动或执行器故障情况下的无人机，提出了一种滑模控制方法，使系统在发生故障时仍能保持一定的控制性能，并在无故障条件下抑制故障或扰动。文献 [15]讨论了无人机群在使用分布式解决方案执行地形监测任务并采集数据期间的自组织。通过重新规划和重新侦察地形，可以实现对单架或多架无人机故障的容错性，从而避免因故障造成的数据丢失。在这份进行中的工作报告中，我们针对基于多集合旅行商问题（MS-TSP）建模的容错巡检规划展开研究。

III. 问题陈述

在所研究的输电线路巡检中，目标是遍历给定的所有 PTL 区段，同时最大限度地延长故障恢复操作中最终重新规划方案的可用时间范围。区段定义为两座输电塔之间的输电线路，每个区段都必须在一次飞行中完成遍历，才能完成巡检。不过，遍历方向可以任意选择。对每个区段的访问可建模为对一组可能遍历方向中的一个顶点进行访问，并且每组都必须恰好访问一次。因此，该问题可表述为广义旅行商问题（或集合旅行商问题） [1]。

采用 [16] 提出的适用于 DJI Mavic 2 平台的纸笔 模型来估算规划过程中无人机行为的实际约束。利用无人机在巡检目标区段端点之间飞行时的速度 v_{max} 以及巡检期间的速度 v^{insp} 估算飞行时间，再将二者结合该模型，估算飞行期间的电池预算消耗。

此外，我们假设初始巡检计划在无人机数量方面不存在冗余，使用更少的飞行器无法完成所有区段的巡检。由于无人机故障可能随时发生，故障无人机将无法完成其巡检计划，因此未完成的区段需要由其他飞行器巡检。发生飞行器故障时，假设故障飞行器当前正在巡检的目标点尚未巡检，而其余飞行器会先完成各自当前目标点的巡检，再按照重新规划的飞行路线继续飞行。我们的目标是在飞行过程中实时成功地重新规划巡检计划，使剩余未故障的无人机能够访问所有区段。由于每次巡检飞行开始至结束期间，已巡检区段的数量不断增加，无人机的剩余电池预算也随之减少。因此，我们面临一个耦合问题：既要尽可能延长能够进行重新规划的时间范围，又要尽量缩短巡检所有区段所需的时间。不过，即使在一次巡检飞行结束时，仍会剩余一定的总体电池预算；因此，问题归结为：从飞行中的某个时间点到飞行结束，尽可能扩大可进行重新规划的时间范围。

所讨论的容错规划及巡检计划固有鲁棒性的目标，是寻找一个初始巡检计划，使其在任意一架无人机发生故障后，都能最大限度地利用可用于恢复的时间范围，从而完成所有区段的巡检。我们建议采用现有的基于GRASP的求解器，初步评估若干成本函数，以获得容错规划所需的理想且具有挑战性的解。理论上应存在一种合适的成本函数，它能够利用GRASP固有的随机性，提高找到此类计划的概率。

IV. 成本函数

为对所提出的方法进行初步评估，我们选取了三个成本函数，并采用以下符号。T 表示所有巡回路线集合 $\mathcal{T}$ 中的一条巡回路线。巡回路线 T 的无约束电池成本记作函数 $c(T)$。这三种成本如下。

1) 最小-最大 (MinMax)成本(1)表示的函数c_{minmax}，用于最小化耗电量最高的巡回路线的最大电池预算成本。

$$c_{minmax} = \max(c(T)) \tag{1}$$

2) 受约束的最小和 (c-MinSum)成本(2)函数 c_{minsum} 在电池预算成本上增加了最大电池预算成本的软约束，使我们能够在遵守电池预算约束的同时，最小化所有巡回路线的电池总消耗量。如果巡回路线成本 $c(T)$超过最大允许成本$\mathrm{C_{max}}$，则违反该软约束，如(3)所示。c-MinSum成本 c_{minsum}将单条巡回路线 T 的成本约束为 $c_{con}(T)$,

$$c_{minsum} = \sum_{T \in \mathcal{T}} c_{con}(T) \tag{2}$$

$$c_{con}(T) = \begin{cases} c(T) & \text{if } c(T) \le \mathrm{C_{max}}, \\ c(T) + (c(T) - \mathrm{C_{max}})k_c & \text{if } c(T) > \mathrm{C_{max}}, \end{cases} \tag{3}$$

其中，$k_c = 10^3$ 取为一个相对于巡回路线成本足够大的数。

3) c-MinSum 成本与加权 MinMax 成本的组合成本 (4)，再除以巡回路线数量n_t。

$$c_{mincomb} = c_{minsum} + \frac{1}{n_t} c_{minmax} \tag{4}$$

采用组合成本的原因是，受约束的 c-MinSum 成本函数虽然能实现最低的组合电池消耗，因此在巡检结束时留下最多的预算，但它在平衡无人机之间的消耗方面表现不佳。另一方面，MinMax 成本函数则恰恰相反：它通过平衡各项成本来尽量降低最大巡回路线成本，这是理想的，因为任何一架无人机都可能中断任务。第三种成本函数是原始成本函数的加权和。通过提高 c-MinSum 成本部分的权重，同时加入 MinMax 的平衡因素，组合成本函数应能在两者之间实现权衡。

V. 结果

所提出成本函数的评估是在真实场景 [17]下进行的，场景涉及从 Nechranice变电站 出发的输电线路，数据由 CEPS, a.s.（捷克电力输送基础设施机构，也是 AERIAL-CORE 顾问委员会成员）提供。单架无人机的电池预算为 $\mathrm{C_{max}}$。区段之间的飞行速度受最大飞行速度 $\mathrm{v_{max}} = 5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ 限制，巡检飞行则受最大巡检速度 $\mathrm{v_{insp}} = 1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$限制。由于飞行距离在数十米至数百米的量级，额外的飞行动力学影响被认为可以忽略，因此未纳入电池估算模型。对于笔算模型 [16], 电池预算为 100 %, 我们为四架无人机规划的最大行进距离 $\mathrm{D_{max}}$ 为 700m。因此，在使用真实场景进行初步计算评估时，我们放宽了电池预算。无人机数量$n_t = 4$ 固定，电池预算则有所变化，以确保所有成本函数都能给出有效的初始解。图3展示了找到的规划方案及后续重新规划方案示例；竖直红线表示从巡检开始算起，无人机最早可能发生故障的时间，此后可利用剩余无人机进行重新规划。图中以实线表示所有无人机规划方案的电池预算消耗，以青色虚线表示后续重新规划方案的消耗，以便清晰区分。计算结果见表 I。数值 n_{seg}表示该区域内的巡检目标数量。每个评估场景的最佳重新规划窗口大小以粗体标示。该值是从末尾开始计算的规划中最大巡回路线时间的百分比，如图3所示

表 I 计算结果

$\mathrm{D_{max}}$ [m]	n_{seg}	$\mathrm{C_{max}}$ [%]	n_t	MinMax [%]	c-MinSum [%]	最小组合 [%]
500	15	1 00	4	20	58	**66**
700	28	2 00	4	17	86	**96**
1 000	43	2 50	4	14	63	**65**
1 200	51	3 00	4	23	56	**59**
2 000	76	5 00	4	28	51	**70**

所提出的方法已使用 C++ 实现，并在配备 32GB RAM 的 Ryzen 7 4750U CPU 上运行。对于所有实例，规划和重新规划方案所需的时间均为秒级。GRASP MS-TSP 求解器分别针对初始规划和重新规划方案运行了 50 次。对于每个实例，整个规划和重新规划过程均重复执行十次，并给出其中的最佳结果。

组合成本函数在最大化重新规划时间窗口方面表现最佳。在图 4 中，原始规划覆盖的目标检查路段以绿色线条表示，重新规划方案覆盖的路段以红色线条表示。MinSum 成本函数比 MinMax 成本函数更适合我们的目的。组合成本函数提升了性能，并支持了我们关于成本函数影响的初步假设，这一点可从表 I 中看出。

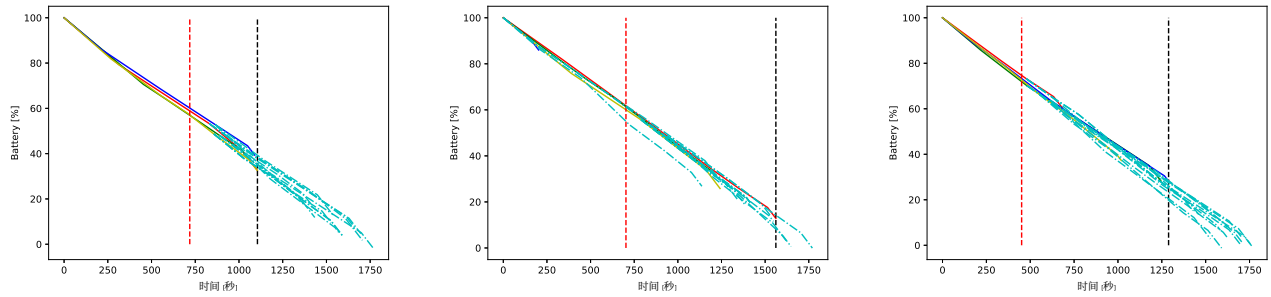

图3. 使用 MinMax、c-MinSum 和组合成本函数，在 $D_{max} = 500$ 处获得的电池消耗随时间的变化。重新规划窗口分别为：20%、58% 和 66%。红色竖线表示最早可进行重新规划的时间，黑色竖线表示最大航线时间。方案的电池预算消耗以实线表示，重新规划方案的电池预算消耗以青色虚线表示。

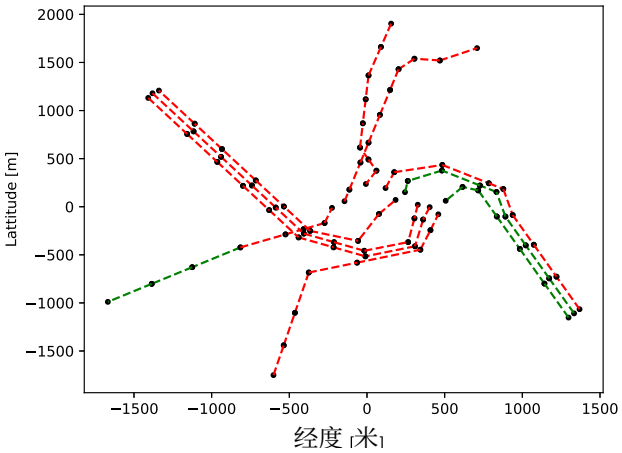

图4. 使用组合成本函数在 $D_{max} = 2\,000$ 处进行规划和重新规划的示例。飞行器中断发生在最大航线时间的 70% 处。

VI. 结论

本文这篇进行中的论文提出并评估了基于GRASP的容错输电线路巡检规划问题。所提出的组合成本函数的主要优点，是最大化可用时间窗口，使我们能够在巡检飞行期间发生任意一次无人机故障时成功恢复。虽然本文没有考虑初始规划的其他特性，例如经过时间与已消耗电池预算的比率，或飞行期间的无人机位置，但我们证明，采用合适的代价函数可以影响鲁棒性。我们还提出，基于GRASP的求解器固有的随机性，在多次重新运行后，可能得到一个在相关标准上优于真正最优方案的规划；而真正最优方案可通过整数线性规划（ILP）建模求得。未来研究将着眼于利用上述规划特性，并制定合适的求解器。

参考文献

[1] F. Nekovář, J. Faigl 和 M. Saska，《输电线路巡检规划中的多巡回集合旅行商问题》，*IEEE*机器人与自动化快报，第 6 卷，第 4 期，第 6196–6203 页，2021 年。[2] D. Hert、T. Baca、P. Petracek 等，《用于支持真实世界室外和室内环境研究的MRS模块化无人机硬件平台》，2022 年国际无人驾驶航空器系统会议（ICUAS），2022 年。[3] O. Menendez、M. Perez 和 F. Auat Cheein，《使用无人机对输电线路进行基于视觉的巡检》，载于 IEEE MFI，2016 年，第 412–417 页。[4] E. Galceran 和 M. Carreras，《机器人覆盖路径规划综述》，《机器人与自主系统》，第 61 卷，第 12 期，第 1258–1276 页，2013 年。[5] J. Cui、Y. Zhang、S. Ma 等，《使用无人机进行输电线路巡检的路径规划算法》，载于中国控制与决策会议（CCDC），2017 年，第 2304–2309 页。[6] T. Bektas，《多旅行商问题：模型形式与求解程序概述》，《Omega》，第 34 卷，219，2006 年，第 209 页。[7] C. Miller、A. Tucker 和 R. Zemlin，《旅行商问题的整数规划形式》，《计算机协会期刊》，第 7 卷，第 326–329 页，1960 年。[8] O. Guemri、A. Bekrar、B. Beldjilali 等，《用于多产品多车辆库存路径问题的基于GRASP的启发式算法》，《运筹学季刊》，第 14 卷，第 377–404 页，2016 年。[9] P. Kitjacharoenchai、M. Ventresca、Moshref-Javadi 等，《含无人机的多旅行商问题：数学模型与启发式方法》，《计算机与工业工程》，第 129 卷，2019 年。[10] O. Cheikhrouhou 和 I. Khoufi，《多旅行商问题综合综述：应用、方法与分类体系》，《计算机科学评论》，第 40 卷，文章编号 100369，2021 年。[11] I. Sadeghzadeh 和 Y. Zhang，《无人机（UAV）的容错控制综述》，载于 2011 年 AIAA航空航天信息技术会议暨展览，2011 年 3 月。[12] A. Chamseddine、Y. Zhang 和 C. A. Rabbath，《四旋翼无人机容错编队飞行控制的轨迹规划与重新规划》，载于 2012 年美国控制会议（ACC），2012 年，第 3291–3296 页。[13] V. Sadhu、S. Zonouz 和 D. Pompili，《基于机载深度学习的无人机故障原因检测与识别》，载于 2020 年 IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA），2020 年，第 5255–5261 页。[14] F. Sharifi、M. Mirzaei、B. W. Gordon 等，《使用滑模控制的四旋翼无人机容错控制》，载于 2010 年控制与容错系统会议（SysTol），2010 年，第 239–244 页。[15] M. De Benedetti、F. D'Urso、G. Fortino 等，《一种用于无人机航空测绘的容错自组织集群方法》，《网络与计算机应用期刊》，第 96 卷，第 14–30 页，2017 年。[16] L. Bauersfeld 和 D. Scaramuzza，《多旋翼无人机的航程、续航时间和最佳速度估算》，IEEE机器人与自动化快报，第 7 卷，第 2 期，第 2953–2960 页，2022 年。[17] 《输电线路巡检规划中的多巡回集合旅行商问题补充材料》， 2021，[访问日期：3 月 1 日 2021]。[在线]。网址：http://mrs.felk.cvut.cz/mstsp-ptl-ral