

无人机群重要度建模及可靠性分析

王鹏飞 兰建义*

河南理工大学工商管理学院, 中国·河南 焦作 454000

摘要: 论文主要讨论了无人机群建模及可靠性分析的问题, 使多阶段任务无人机群的任务可靠度达到最优的同时保证了无人机群的成本(包括无人机成本及维修成本)最低。对于像无人机群这样的冗余系统, 有必要对其成本进行控制, 通过成本和可靠性之间的权衡博弈, 深入讨论总代价与相应参数之间的关系, 从而追求成本效益最佳的设计模型, 并基于重要度以及任务可靠度对电力巡检无人机群进行建模, 使得电力巡检无人机群在指定任务时间和指定任务环境下完成指定任务的能力得到保证。在任务可靠性模型的基础上, 给出了无人机群的可靠性重要度, 对群体中不同位置的无人机的重要度进行分析, 找出群体中具有较高重要度的无人机, 然后确定无人机群的关键无人机和薄弱环节。另外, 结合任务可靠性和重要性测度, 可以预测基于任务可靠性的无人机群剩余使用寿命, 在两个任务之间的阶段, 有限的资源用于维护关键无人机, 以最大限度地提高总体可靠性和平均剩余使用寿命。当无人机在任务中发生故障或损坏时, 实现无人机之间的相互更换和重新定位。该机制是为了保证关键位置无人机的正常运行, 最大限度地提高整体任务可靠性, 延长无人机群平均剩余寿命。

关键词: 无人机群; 重要性测度; 可靠度

Modeling of Importance and Reliability Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Swarms

Pengfei Wang Jianyi Lan*

School of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454000, China

Abstract: This paper mainly discusses the modeling and reliability analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms, aiming to optimize the mission reliability of multi-stage task UAV swarms while ensuring the lowest cost of the swarm (including UAV cost and maintenance cost). For redundant systems like UAV swarms, it is necessary to control their costs. Through the trade-off between cost and reliability, the relationship between the total cost and corresponding parameters is deeply explored to pursue the design model with the best cost-effectiveness. Based on the importance and mission reliability, the power inspection UAV swarm is modeled to ensure the ability of the power inspection UAV swarm to complete the designated tasks within the designated task time and under the designated task environment. Based on the mission reliability model, the reliability importance of the UAV swarm is given, and the importance of UAVs in different positions within the group is analyzed to identify UAVs with higher importance in the group. Then, the key UAVs and weak links of the UAV swarm are determined. On the other hand, by combining mission reliability and importance measures, the remaining useful life of the UAV swarm based on mission reliability can be predicted. During the stage between two tasks, limited resources are used to maintain key UAVs to maximize overall reliability and average remaining useful life. When a UAV fails or is damaged during a mission, it can be replaced and repositioned by other UAVs. This mechanism is designed to ensure the normal operation of UAVs in key positions, maximize overall mission reliability, and extend the average remaining life of the UAV swarm.

Keywords: unmanned aerial vehicle swarm; importance measure; reliability

1 绪论

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种不载人飞机, 其运行是通过操作者使用远程遥控终端来进行控制的, 另外还可以通过为无人机赋予预先设定好的程序, 令无人机自主飞行。从通俗意义上来讲, 无人机即无人驾驶飞行器, 它具有体积小、造价低、使用便捷、适应多种复杂飞行环境等优点。无人机发展至今已具备远距离、高空、快速以及自主作业的能力, 可以不受地形限制自由穿越河流、高山

等复杂地形。无人机的低成本为电力巡检提供了一种具有成本效益的策略, 这是人力巡检作业所不具备的优势。无人机在执行任务时往往以群体的方式工作, 而无人机群作为一个冗余系统, 有必要对其进行成本控制, 无人机群中各无人机应该能实现彼此互相通信, 当某些无人机无法通信时, 则整个无人机群无法实现其功能, 因此对无人机群进行可靠性分析, 识别其薄弱环节并采取相应措施提升其可靠度来保证无人机群的可靠度达到一定水平, 可以最大程度上避免非预期失效带来的成本损失。

2 无人机群可靠度及重要度评价

以某电力巡检无人机群为例，4 个线性无人机编队首尾相接，构成一个 4 边无人机群，每架无人机都配备有摄像头，可以执行勘测地形、检查线路、观测杆塔基本状况和细微缺陷等任务，无人机彼此之间可以实现信号传输和信息共享等活动，但由于通信范围有限，其信号传输范围最远可实现跨一架无人机进行通信，也就是说当无人机群中出现连续两架及以上无人机发生故障时，无人机群将失去无人机彼此信息互换的功能，此时视为无人机群失效，电力巡检任务中止，该无人机群等价于以四个连续的 2-out-of-5:F 系统所构成的 4 边形无人机群。整个无人机群执行覆盖式电力巡检任务。

2.1 无人机群可靠度计算

如图 1 所示无人机都是同一类型的无人机，其可靠性遵循相同的寿命分布，本例中为两参数威布尔分布，其累计失效函数为： $F = 1 - \exp(-(t/\eta)^\beta)$ ，其中 η 是尺度参数， β 是形状参数。四个线性连续的 2-5:F 系统无人机序列构成了四边形无人机群。在四边形无人机群中有 4 个共享节点。因此，对于四边形无人机群有 16 种组合状态，大致可分为 6 种：
 ① 4 个节点都正常工作；
 ② 只有一个节点故障；
 ③ 只有 2 个相邻节点故障；
 ④ 只有 2 个非相邻节点故障；
 ⑤ 只有三个节点故障；
 ⑥ 4 个节点故障。

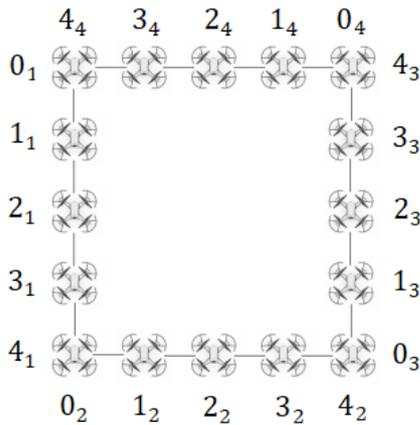


图 1 四边电力巡检无人机群模型

无人机群可看作为一个线性连续 n 中取 k 系统，计算该系统的可靠度时，首先针对连续 k -out-of- n :F 系统建立状态空间，设 $X(t)$ 的状态空间为 $S = (0, 1, \dots, k)$ ，其中 0 表示所有无处于正常工作状态， j 表示无人机 $(i-j+1), (i-j+2), \dots, (i)$ 失效， k 表示至少有连续的 k 架无人机失效，此时整个系统失效。建立第 i 架无人机的状态转移概率矩阵，定义 p_i 为第 i 架无人机正常工作的概率。然后，利用有限马尔可夫链嵌入方法将系统中各无人机逐个嵌入。得到连续 k -out-of- n :F 系统的可靠性方程：

$$R = \pi_0 \prod_{i=1}^n \wedge_i U^T$$

其中， $\pi_0 = (1, 0, \dots, 0)_{1 \times |k+1|}$ 为系统初始状态的概率分布， $\pi_1 = (0, 1, \dots, 0)_{1 \times |k+1|}$ ，以此类推。矩阵 $U = (1, 1, \dots, 1, 0)_{1 \times |k+1|}$ 为系统处于工作状态的概率之和。

现在结合四边无人机群节点状态种类分别计算四边无人机群在不同节点状态下的可靠度。

① 4 个节点都正常工作。

节点无人机正常工作，可靠度为 p ，其他位置无人机状态未知，利用马尔科夫链嵌入的方法计算，此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{A1}R_{A2}R_{A3}R_{A4} = (p_4 \pi_0 \wedge_1 \wedge_2 \wedge_3 \wedge_4 U^T)^4 = [(p^2 - p^3 + p)(p)]^4$$

② 只有一个节点故障（假设节点故障）。

因为一个节点同时连接了两个无人机序列，共同影响着两个无人机序列的可靠度，此时分为两种情况：第一，包含故障节点的无人机序列；第二，不包含故障节点的无人机序列。

包含故障节点无人机的无人机序列的可靠度为：

$$R_{C1} = p_3 \pi_0 \wedge_1 \wedge_1 U^T = p(2p - p^2)$$

不包含故障节点无人机的无人机序列的可靠度为：

$$R_{B2} = p_4 \pi_1 \wedge_1 \wedge_1 \wedge_2 \wedge_3 U^T = (2p^2 - p^3)p$$

此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{C1}R_{B2}R_{A3}R_{A4} = (p(2p - p^2))(2p^2 - p^3)p((p^2 - p^3 + p)p)^2$$

③ 只有两个相邻节点故障（假设节点故障）。

两节点无人机都发生故障时，该无人机序列的可靠度为：

$$R_{D2} = p_3 \pi_1 \wedge_1 \wedge_2 U^T = p * p = p^2$$

此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{C1}R_{D2}R_{B3}R_{A4} = (p(2p - p^2))(p^2)(2p^2 - p^3)p((p^2 - p^3 + p)p)$$

④ 只有两个非相邻节点故障（假设节点故障）。

此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{C1}R_{B2}R_{D3}R_{B4} = (p(2p - p^2))^2((2p^2 - p^3)p)^2$$

⑤ 只有三个节点故障（假设节点故障）。

此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{B1}R_{C2}R_{D3}R_{D4} = ((2p^2 - p^3)p)(p(2p - p^2))(p^2)^2$$

⑥ 四个节点都故障。

此时无人机群可靠度为：

$$R(T) = R_{D1}R_{D2}R_{D3}R_{D4} = (p^2)^4$$

将以上六种情况下无人机群可靠度公式输入到 matlab 中并绘制二维图如图 2 所示。

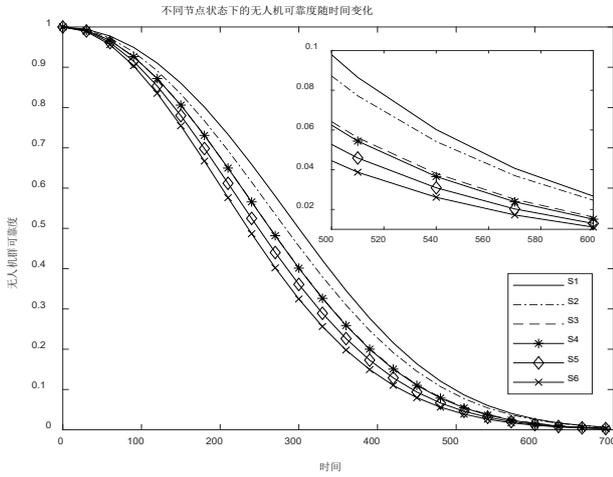


图 2 不同节点状态下无人机可靠度随时间变化图

2.2 无人机群重要度模型

论文研究的重要度类型为 B- 可靠性重要度，其数值随着时间也就是元件可靠度的改变而发生变化，结合上文给出的无人机群可靠度计算公式，进一步量化计算各位置无人机的 B- 可靠性重要度。

由于四边无人机群具有高度对称性，所以只需要研究一边无人机就可以确定无人机群各个位置的无人机的重要度，在同一边中选择 1 个节点位置 0_2 和 2 个非节点位置 1_2 、 2_2 无人机进行分析。通过之前的介绍，对于整个无人机群，每个无人机序列中的第 i 架非节点无人机的 B- 可靠性重要度定义为：

$$I(BM)_m^n = \prod_{l=1 \& l \neq r}^m R^l \frac{R_{k/l-1} R_{k/l+n} - R'_{k/l}}{1 - p_l(t)}$$

每个无人机序列中的两节点无人机的 B- 可靠性重要度定义为：

$$I(BM)_n^n = \frac{1}{2} \left(\prod_{l=1 \& l \neq r}^m R^l \frac{R_{k/n-1} - R'_{k/n}}{1 - p_n(t)} + \prod_{l=1 \& l \neq r+1}^m R^l \frac{R_{k/n-1} - R^{(r+1)l}}{1 - p_0(t)} \right)$$

计算非节点无人机 1_2 的 B- 可靠性重要度：

$$I(BM)_2^n = R^l R^3 R^{4l} \frac{R_{k/l-1} R_{k/l+n} - R'_{k/l}}{1 - p_l(t)} = (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(2p^2 - p^3) - (p^3 - p^4 + p^2)}{1 - p}$$

计算非节点无人机 2_2 的 B- 可靠性重要度：

$$I(BM)_2^n = R^l R^3 R^{4l} \frac{R_{k/l-1} R_{k/l+n} - R'_{k/l}}{1 - p_l(t)} = (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(p) - (p^3 - p^4 + p^2)}{1 - p}$$

计算节点无人机 0_2 的 B- 可靠性重要度：

无人机在其作为终点无人机时所在的无人机序列的 B- 可靠性重要度为：

$$\prod_{l=1 \& l \neq r}^m R^l \frac{R_{k/l-1} - R'_{k/l}}{1 - p_n(t)} = R^l R^3 R^{4l} \frac{R_{k/l-1} - R'_{k/l}}{1 - p_n(t)} = (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(p^2 - p^3 + p) - (3p^2 - 2p^3)}{1 - p}$$

无人机在其作为起始无人机时所在的无人机序列的 B- 可靠性重要度为：

$$\prod_{l=1 \& l \neq r}^m R^l \frac{R_{k/l-1} - R'_{k/l}}{1 - p_n(t)} = R^l R^3 R^{4l} \frac{R_{k/l-1} - R'_{k/l}}{1 - p_n(t)} = (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(p^2 - p^3 + p) - (3p^2 - 2p^4)}{1 - p}$$

综上，节点无人机 0_2 对于其连接的两序列无人机的 B- 可靠性重要度为：

$$I(BM)_2^n = \frac{1}{2} \left\{ \prod_{l=1 \& l \neq r}^m R^l \frac{R_{k/l-1} - R'_{k/l}}{1 - p_n(t)} + \prod_{l=1 \& l \neq r+1}^m R^l \frac{R_{k/l-1} - R^{(r+1)l}}{1 - p_0(t)} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(p^2 - p^3 + p) - (3p^2 - 2p^3)}{1 - p} + (p^3 - p^4 + p^2)^3 \frac{(p^2 - p^3 + p) - (3p^3 - 2p^4)}{1 - p} \right\}$$

将三位置无人机重要度公式输入到 matlab 中并绘制二维图，得到三位置无人机重要度随时间变化的曲线图如图 3 所示。

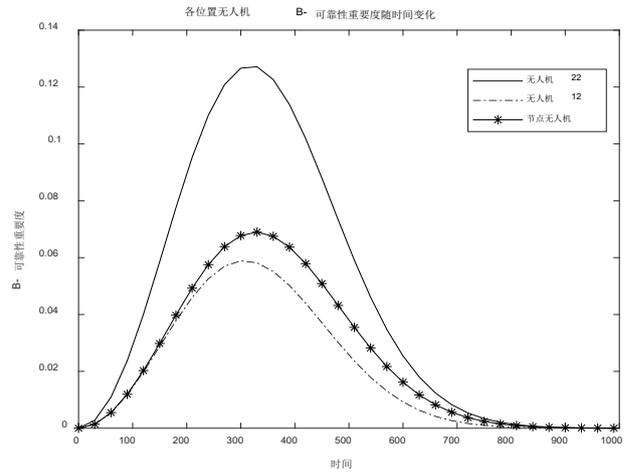


图 3 各位置无人机的 B- 可靠性重要度随时间变化图

一般来说，当元件的可靠性由增加到，系统可靠性的增加量可以表示为：

$$\Delta R_i = R(g_i, p) - R(p) = (g_i - p_i) I_B(i; p)$$

可以看出：各元件增加相同的可靠性时，重要度高的元件的可靠性提升对于整个系统的可靠性提升影响最为显著，因此，按照重要度排序对无人机进行可靠度提升是使无人机群可靠度提升的最速上升方向，具有较高重要度的元件应该优先被改进，以实现系统可靠性的最大提升。

2.3 无人机群可靠性分析

系统可靠性分析的目的之一是找出系统中的薄弱环节和（或）关键部件，量化部件失效的影响并找出规律，给出改进措施和改进后对系统可靠性的影响。所谓的“可靠性重要性”便是为了确定系统中的薄弱环节或关键部件而提出的，这一指标提供了一个数字等级，以确定哪些部件对提高系统可靠性更为重要，或对系统故障更为重要。从之前的推断中不难看出，对于具有较高重要度的无人机，其发生故障会在很大程度上影响整个无人机群系统的工作状态，这些无人机是无人机群的薄弱环节。相应的，保证其正常工作能力对于提升无人机群系统的任务可靠度大有裨益，因此在资源有限的情况下就需要用有限的资源对具有较高重要度的无人机进行优先维护。利用下面这些可靠性指标对关键无人机

的状态进行观测和估计，以最大程度上避免因关键无人机失效导致的整个无人机群系统失效的可能性。

提升系统可靠性或系统关于时间的可靠性函数的核心要义在于应该针对哪些元件开展研究和改进，从而通过元件可靠性的提高使得系统可靠性获得最大程度的提升，在上节中讨论了无人机群中各位置无人机的重要度排序，确定了关键无人机为 $0_1、0_2、0_3、0_4、2_1、2_2、2_3、2_4$ 。本节主要讨论针对这些关键无人机给定可靠性提升措施，并与无人机群其余 8 架非关键无人机施加相同可靠性优化措施进行比较，给出量化计算指标更加直观的展现对关键无人机针对性优化所带来的系统可靠度提升效果。

假定某时刻为无人机施加一次不完全修复，此时不完全修复的 β 值为对应为 0.6，则修复过后的无人机的可靠度为 $R(t)^{0.6}$ ，结合无人机可靠度函数，可以得出对无人机群采取不同 PM 策略带来的影响效果，见图 4。

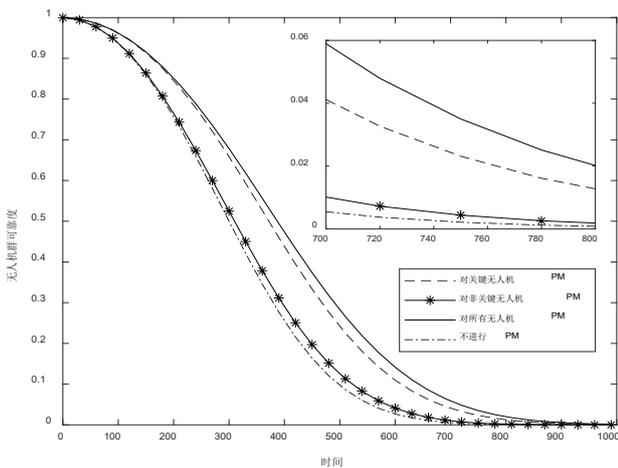


图 4 不同 PM 策略下无人机群的可靠度随时间变化图

接上，进一步计算预防性维修下无人机群任务可靠性指标的变化程度。假定无人机群已经工作了 t 个小时，每阶段任务需要执行 50 小时。在进行下阶段任务之前，对无人机进行 PM，修复过后的无人机的可靠度为 $R(t)$ ，则修复过后的无人机执行下阶段任务的任务可靠度可以表示为： $R(t+50)^\beta/R(t)$ ，为方便研究，以下用 $R(t+50|t)_1^\beta$ 、 $R(t+50|t)_2^\beta$ 、 $R(t+50|t)_3^\beta$ ，分别表示无人机群已经工作 t 小时，对非关键无人机、关键无人机以及所有无人机进行 PM 后成功执行下阶段任务的任务可靠度，见表 1。

表 1 不同工作时间时三种预防性维修策略下的无人机群下阶段任务可靠度

t	β	$R(t+50 t)_1^\beta$	$R(t+50 t)_2^\beta$	$R(t+50 t)_3^\beta$
100	0.7	0.9205	0.9602	0.9620
200	0.75	0.9201	0.9530	0.9546
300	0.78	0.9198	0.9487	0.9502

由图和表可以看出：针对关键无人机进行 PM 策略在很大程度上提升了无人机群的任务可靠度，且这种策略的经

济性是最好的，提升程度与对所有无人机进行 PM 的效果相当，在资源有限的情况下，我们应该考虑分配更多的资源来进行关键无人机 PM。

3 总结与展望

论文以四边形无人机群为例，首先对无人机群进行可靠度建模，通过马尔可夫过程理论推导讨论了无人机群的可靠度公式，给出了节点无人机在不同工作状态下的无人机群可靠度公式。然后基于 B- 可靠性重要度公式计算得出了无人机群中的关键无人机，包括节点无人机和非节点无人机中 B- 可靠性重要度较高的无人机，为之后的系统可靠性优化工作提供了理论支撑以及参考依据。通过无人机重要度、无人机可靠度以及无人机群可靠度之间的关系得出重要度较高的元件的可靠度变化对于整个系统的可靠度变化影响尤为显著这一结论，因此之后的可靠度提升都围绕关键无人机展开。为了在有限条件下实现无人机群性能的最大化，以重要度指标指导无人机群的可靠度提升。

通过计算无人机群的实际剩余使用寿命和任务可靠度，对四边形无人机群进行预测分析，得到了四边形无人机群的平均 RUL 和已经工作 t 时间后继续执行下阶段任务的任务可靠度。对比对不同位置的无人机采取可靠度提升策略后无人机群可靠度随时间变化的趋势可以验证之前所讨论的重要度较高的元件的可靠度变化对于整个系统的可靠度变化影响尤为显著这一结论。

在该模型中，一般预防性维修将所有无人机的性能提高到一定水平，而有针对性的预防性维修将关键无人机的性能提升到最佳水平。对于不同位置的无人机，它们都是同样的产品，对它们进行维护所消耗的成本、时间都是一样的，但对不同位置的无人机进行维护后对于无人机群可靠度提升的效果是不一样的。针对性的预防性维护显著提高了无人机的可靠度，在可靠度方面，针对关键无人机的 PM 比对非关键无人机的 PM 更能减缓群体可靠性的下降，提高无人机群在不同时间点的可靠度。

4 致谢

欲买桂花同载酒，终不似，少年游。时间犹白驹过隙，匆匆而逝，不觉间，我的研究生生涯即将落下帷幕，我也即将与培育了我三年的大学作最后的告别。心有万般不舍，但仍不曾遗憾，因为我知道，短暂的离别只是为了更好的重逢，成长之路永远不缺告别，告别并不意味着结束，而是新的开始，在这里我留下了青春的烙印，这段经历将永远定格在命运的轮盘上，终究不会磨灭，只因我们曾经相遇过，一起度过了最美好的三年。三年很短，短到滚滚长江东逝水，恰是风华正茂正当时；三年又很长，长在从青涩懵懂到洗尽铅华，我历尽千帆，终不负韶华荣光一场。今借此文，直抒胸臆，纸短情更长。谨以此篇献给这一路走来帮助我、鼓励我以及陪伴我的人，虽词不达意，但皆有感而发，以聊表谢忱。

师者，故传道授业解惑是以为师。首先我要感谢我的学业导师，在论文撰写过程中给我提供了莫大的帮助，没有他的不吝赐教，也许我会走更多的弯路。在学术研究中遇到的困惑和不解，他都细致且有耐心地对我进行指导，将他所学倾囊相授，对待问题一丝不苟。带着我一点点剖析问题，发现根因，并给了我很多建议，同时也给我传授了很多撰写论文的经验。天涯海角尚有尽，唯有师恩无穷期。今后定当铭记师恩，不忘老师的谆谆教诲。其次我还要感谢大学期间教过我的所有授课老师，你们的潜心教导让我明大德、辨是非，通真理、晓古今，没有你们的悉心教诲就没有我的满腹经纶。桃李不言，下自成蹊。我将不负众师所望，砥砺前行，在新阶段的征程中不断奋进，继续发光发热。感恩吾师，你们的呕心沥血和辛勤付出，此生莫不敢忘。

参考文献：

- [1] 王瑞群,欧阳权,段朝伟,等.基于强化学习的无人机全自主电力巡检[J].机械与电子,2021,39(12):34-38+43.
- [2] 王伟.持续在线的电力巡检无人机的研究与设计[D].太原:太原科技大学,2021.
- [3] 王翼虎.电力巡检旋翼无人机航迹规划研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [4] 蔡宗琦.220kV电力线路巡检无人机路径规划研究[D].太原:太原科技大学,2020.
- [5] 陈文浩.基于四旋翼无人机的电力巡检研究[D].郑州:郑州大学,2019.
- [6] 李博.面向任务的无人机集群可靠性建模与评估[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [7] 刘青龙.应用马尔科夫理论评估多状态连续- k -out-of- n :F系统的可靠性[D].兰州:兰州大学,2012.
- [8] 温静楠.一维和二维 n 中取连续 k 系统的可靠性分析[D].北京:北京交通大学,2019.
- [9] Wei Wang.Optimization of Linear Consecutive- k -Out-of- n Systems with Birnbaum Importance Based Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science),2020,25(4):253-260.