

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180783

面向变电站安全监控的视频智能终端布点优化

林孝斌¹, 江浩侠², 胡金磊¹, 周俊煌², 李存海¹

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511500; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 人工智能视频监控技术在变电站安全监控与管理方面具有广阔应用前景。为提高智能变电站的视频监控系统中摄像头终端的利用效率, 研究了智能摄像头终端的优化布点模型和算法。首先, 基于栅格化思想对变电站平面图进行区域划分, 提出采用监控区域重要度矩阵来描述区域和设备的重要程度。然后, 建立了摄像头终端监控范围的清晰度离散模型。据此引入监控乘子函数建立以平均监控距离最小为目标, 考虑摄像头选型选址和购置成本约束的变电站监控摄像头终端布点优化模型。并采用遗传算法求解该模型得到其优化布点方案。最后, 通过仿真算例验证了模型在减少监控盲区数量的有效性和实用性, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 人工智能; 变电站; 视频监控终端; 布点优化

Layout optimization of video intelligent terminal for substation safety monitoring

LIN Xiaobin¹, JIANG Haoxia², HU Jinlei¹, ZHOU Junhuang², LI Cunhai¹

(1. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Inc, Qingyuan 511500, China;
2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd, Guangzhou 510670, China)

Abstract: Artificial intelligence video surveillance technology has broad application prospects in substation safety monitoring and management. In order to improve the utilization efficiency of the camera terminal in the video surveillance system of smart substation, the optimization layout model and algorithm of the smart camera terminal are studied. Firstly, based on the idea of rasterization, the plan of the substation is divided into regions. And the importance matrix of monitoring area is proposed to describe the importance of regions and equipment. Then, a definition discrete model of camera monitoring range is established. Based on this, the monitoring multiplier function is introduced to establish the layout optimization model for substation surveillance cameras terminals. This model takes the minimum average monitoring distance as the optimization goal, taking into account the constraints of camera selection and site selection and acquisition cost. And then the genetic algorithm is used to solve the model to get the optimal layout of the cameras. Finally, the validity and practicability of the model in reducing the number of monitoring blind spots are verified by simulation example, which has high engineering application value.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Ltd. (No. 031800KK52160013) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2017A030313304).

Key words: artificial intelligence; substation; video monitoring terminal; layout optimization

0 引言

随着人工智能技术的飞速发展,“无人值班”已成为变电站自动化发展的必然趋势,也是智能变电站发展的最终目标^[1-2]。目前 220 kV 及以下电压等级的变电站已基本实现无人值守,500 kV 变电站正

在进入少人值守的阶段^[3],其中的智能视频监控系统^[4]及其摄像头终端优化布局发挥着重要作用,并成为人工智能在变电站安全监控应用中的物理基础。智能视频监控系统可通过现有的电力通信网对所属的变电站实现远程设备巡检^[5]、作业安全监控^[6]、现场故障和意外情况的告警提示^[7]以及环境监测^[8]等。摄像头终端优化布局则决定了视频监控系统对变电站人员和设备安全监控^[9]的覆盖率,尽可能实现变电站无死角监控,有利于实现智能视频监控系

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目资助(031800KK52160013); 广东省自然科学基金项目资助(2017A030313304)

统对变电站运行检修操作人员的人身安全^[10-11]监控和设备运行状态的安全监控,从而大大降低变电站巡检人员的工作量以及发生事故的风险,逐步实现变电站无人值班的安全可靠运行。

现阶段,针对变电站中智能视频监控系统的研究多集中在智能视觉系统的开发^[12]、目标定位和图像识别算法^[13-14]以及视频监控与 SCADA 系统的深度集成^[15-16]等方面,已取得了较好的研究成果,但作为以上研究工作的基础,若要实现变电站全方位的安全监控,智能监控终端摄像头布点模型的相关研究显得尤为必要。然而,当前这方面的研究相对较少,且终端摄像头的布点与视频拍摄的清晰度和智能识别的准确率息息相关^[17],当监控摄像头的分布过于密集时,将造成成本过高、资源浪费,并加大数据处理的难度;当监控终端摄像头的分布过于稀疏时,将导致部分区域无法有效覆盖,出现大量监控盲区,从而无法保证智能视频监控系统对变电站的多主体安全监控,甚至不能满足对变电站区域的最低监控需求^[18]。文献[19]提出了基于三维地理信息系统的大范围区域监控中多摄像机空间优化布局的方法,但是该方法过分依赖地理信息系统,工程实用性不强,对变电站进行 3D 建模复杂。文献[20]基于最大覆盖位置问题提出了三种满足实践要求的森林火灾监测摄像头终端优化布点模型。文献[21]基于位置集模型建立了全面监控稀有物种的监控终端位置优化模型,通过提出两个评估指标来消除次优布点方案。但以上模型均未考虑监控盲区问题,故优化布点方案不能有效减少监控盲区,从而增加了欠监控带来的风险。

鉴于此,本文采用网格单元对变电站监控区域平面图进行离散化拟合,以避免复杂的 3D 建模过程,并提出区域重要度矩阵去量化变电站不同区域和不同设备的监控重要程度,同时基于终端摄像头监控范围的清晰度离散模型,首次引入监控乘子函数建立了以变电站实际监控需求与期望监控需求差异最小为目标的智能终端摄像头优化布点模型,最后采用三个监控效果评估指标,验证了在布点模型中引入监控乘子函数,不仅能有效减少监控盲区数量,还能保证布点结果尽可能满足最低的监控需求。

1 变电站监控区域离散化分析

1.1 基于栅格化思想的区域划分方法

相对而言,变电站的面积要远大于单个摄像头的监控范围,且变电站的平面图一般为矩形,同时各职能区域也多为矩形,因此基于变电站的以上平面特性及监控摄像头布点工程问题,可采用栅格化

的思想^[22]对变电站平面图进行区域划分,简化布点工程的应用研究。

考虑到监控对象为区域或者站内的重要设备,而设备占地面积相对较小,因此选取需要被监控的设备中占地面积最小者作为栅格化最小单元,最小单元用一个边长为 a 的正方形小方格表示。据此可将变电站的矩形平面图划分为 $m \times n$ 个边长为 a 的正方形小网格,并定义第 i 行第 j 个小网格为变电站小区域 v_{ij} ,且将每一个小网格对角线的交点定义为该小网格的中心,将小区域 v_{ij} 的中心记为 O_{vij} ,区域栅格化示意图如图 1 所示。

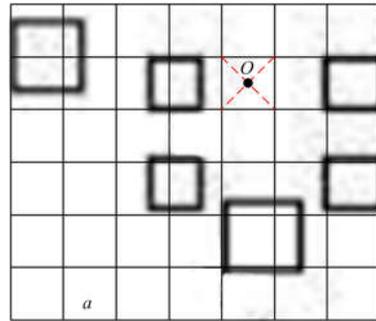


图 1 区域栅格化示意图

Fig. 1 A diagram of area rasterization

1.2 监控区域重要度矩阵

由于变电站中的各种设备大小不一,高度也不同,将变电站的立体图简化为平面图进行监控摄像头的布点应用时,需要考虑设备与设备之间的遮挡问题^[23],若被监控对象周围布置越多的摄像头,则其监控死角越少,能有效缓解遮挡问题。据此,提出监控重要度指标 W_{vij} 来描述每一个小区域在考虑设备之间的遮挡和设备重要程度后需要达到的监控清晰度级别,当某小区域的设备越重要或该区域附近的设备相互遮挡问题越突出时,则该小区域要求的监控清晰度级别越高,即监控重要度指标的值越大。为此,定义变电站监控区域重要度矩阵 W 为

$$W = \begin{bmatrix} W_{v11} & \cdots & W_{v1j} & \cdots & W_{v1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{vi1} & \cdots & W_{vij} & \cdots & W_{vin} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{vm1} & \cdots & W_{vmj} & \cdots & W_{vmm} \end{bmatrix}$$

其中, W_{vij} 表示为小区域 v_{ij} 的监控重要度指标值,本文取 0 到 6 之间的非负整数,即共分为 7 种监控级别, W_{vij} 取值越大,表示该小区域 v_{ij} 的区域重要程度越大,所要求的监控清晰度越高,因此 W 矩阵也被称为期望监控清晰度矩阵。

2 摄像头监控范围的清晰度离散模型

鉴于变电站内安装的监控终端摄像头一般为球机或枪机，各自监控范围的平面分别为一个圆或者扇形，两者均可采用多个正方形单元去拟合近似，且正方形单元的边长越小，其拟合精度越高。

2.1 单个摄像头监控范围清晰度分析

固定在某高度的摄像头对地面的监控范围可近似为一个圆形或者扇形区域，且相同大小的电气设备距离摄像头越近，则该设备所占监控画面的像素点越多，其被监控的清晰度越高，反之被监控的清晰度越低。为了描述单个摄像头对远近不同区域监控清晰度的差异，定义单个摄像头的监控范围清晰度矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} C_{v11} & \cdots & C_{v1j} & \cdots & C_{v1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{vi1} & \cdots & C_{vij} & \cdots & C_{vin} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{vm1} & \cdots & C_{vmj} & \cdots & C_{vmm} \end{bmatrix}$$

其中， C_{vij} 表示单个摄像头对变电站内各小区域 v_{ij} 的监控清晰度，本文取 0 到 3 之间的非负整数，将其离散为 4 种监控清晰度，当小区域 v_{ij} 离该摄像头越近时， C_{vij} 的取值越大，当其取值为 0 时，表示该小区域 v_{ij} 超出了该摄像头的监控范围。

假设安装在小区域 v_{ab} 处的单个球机的监控距离为直径 L ， $D(O_{vij}, O_{vab})$ 为小区域 v_{ij} 中心 O_{vij} 与小区域 v_{ab} 中心 O_{vab} 的二维欧式距离函数， k_1 、 k_2 、 k_3 分别为监控清晰度边界系数，且满足 $0 < k_1 < k_2 < k_3 \leq 1$ ，其物理含义为根据摄像机对不同区域的监控清晰度级别所划分的区域边界系数，因此安装在 v_{ab} 处的单个球机对变电站内所有小区域 v_{ij} 的监控清晰度 C_{vij} 的取值具体如式(1)所示。

$$C_{vij} = \begin{cases} 3 & D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_1 \frac{L}{2} \\ 2 & k_1 \frac{L}{2} < D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_2 \frac{L}{2} \\ 1 & k_2 \frac{L}{2} < D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_3 \frac{L}{2} \\ 0 & D(O_{vij}, O_{vab}) > k_3 \frac{L}{2} \end{cases} \quad (1)$$

同理安装在 v_{ab} 处的单个枪机对变电站内所有小区域 v_{ij} 的监控清晰度 C_{vij} 的取值如式(2)所示，差别在于球机监控区域为圆形，而枪机监控区域为扇形。因此增加一个监控视角参数 α 和枪机朝向参数 O_{Tow} 来构建一个圆心角约束 $R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) \leq \alpha$ ，

其中当 O_{Tow} 为朝东向时， R 函数如式(3)所示，其他朝向表达式的计算方法类似。

$$C_{vij} = \begin{cases} 3 & D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_1 \frac{L}{2} \wedge R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) \leq \alpha \\ 2 & k_1 \frac{L}{2} < D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_2 \frac{L}{2} \wedge R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) \leq \alpha \\ 1 & k_2 \frac{L}{2} < D(O_{vij}, O_{vab}) \leq k_3 \frac{L}{2} \wedge R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) \leq \alpha \\ 0 & D(O_{vij}, O_{vab}) > k_3 \frac{L}{2} \wedge R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) \leq \alpha \end{cases} \quad (2)$$

$$R(O_{vij}, O_{vab}, O_{Tow}) = 2\arctan\left(\frac{|y_{vij}^o - y_{vab}^o|}{|x_{vij}^o - x_{vab}^o|}\right) \quad (3)$$

其中： x_{vij}^o 和 y_{vij}^o 分别为 O_{vij} 的横、纵坐标； x_{vab}^o 和 y_{vab}^o 分别为 O_{vab} 的横、纵坐标。

综上所述， \mathbf{P} 矩阵非零元素的分布与摄像头的种类选择相关，图 2 分别给出了单个球机和单个枪机对 7×7 网格区域的监控范围清晰度矩阵。

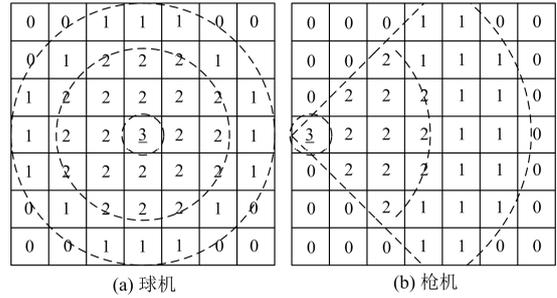


图 2 单个摄像机的监控范围清晰度矩阵

Fig. 2 Definition matrix of monitoring range for a single camera

由图 2 可知，摄像机安装处(即圆心处)的监控清晰度最高为 3，超过监控范围的清晰度最低为 0，单个球机 \mathbf{P} 矩阵的非零元素组成的方格区域近似为一个圆，而单个枪机 \mathbf{P} 矩阵的非零元素组成的方格区域近似为一个扇形区域。

2.2 多个摄像头监控范围清晰度分析

当两个或两个以上的监控摄像头距离较近时，部分区域会同时进入多个摄像头的监控范围，此时假设重叠监控区域的监控清晰度可线性离散叠加^[24]，即当某小区域 v_{cd} 在 q 个监控摄像头的监控范围内时，则该小区域的监控清晰度 C_{vcd} 等于 q 个监控摄像头对该区域监控清晰度之和，具体如式(4)所示。

$$C_{vcd} = \sum_{k=1}^q C_{vcd}^k \quad (4)$$

式中， C_{vcd}^k 为第 k 个监控摄像头对小区域 v_{cd} 的监控清晰度的贡献，采用式(1)方法计算其取值。

图3给出了两个球机对11×7网格区域的监控范围清晰度矩阵, 两个摄像头分布在两圆心处, 两圆重叠区域的监控清晰度为两摄像头监控范围清晰度矩阵之和, 而多个枪机的监控范围清晰度矩阵求取方法类似。

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

图3 两个球机监控范围清晰度矩阵

Fig. 3 Definition matrix of monitoring range for two dome cameras

3 模型与求解

3.1 布点优化模型

(1) 目标函数

考虑到变电站内不同区域的监控重要程度不同, 要求的监控清晰度也不同。据此以平均监控距离 d_{AVE} 最小作为目标函数建立布点优化模型, 而平均监控距离 d_{AVE} 的定义为变电站内实际的监控清晰度矩阵 \mathbf{T} 与期望的监控清晰度矩阵 \mathbf{W} 之间的平均差异, 其数学表达式为

$$d_{AVE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |T_{ij} - W_{ij}| \quad (5)$$

$$\mathbf{T} = \sum_{t=1}^N \sum_{r=1}^C s_{t,r} \mathbf{P}_{t,r} \quad (6)$$

式中: \mathbf{T} 矩阵的物理含义为实际的监控摄像头对变电站区域的监控清晰度情况, 即为实际安装的摄像头对变电站各小区域监控清晰度之和, 其计算方法如式(6)所示; N 为变电站中可安装摄像头的小区域数量(即摄像头候选安装点的数量); C 为监控摄像头的种类数量; $\mathbf{P}_{t,r}$ 为安装在第 t 个小区域中第 r 种摄像头的监控范围清晰度矩阵; $s_{t,r}$ 的取值为逻辑变量, 若第 t 个小区域安装第 r 种摄像头, $s_{t,r}$ 取值为1, 否则取值为0。 \mathbf{W} 矩阵的物理含义为根据变电站区域重要程度所确定的区域期望监控清晰度情况, 根据1.2节所述方法给定。

总体而言, 区域越重要则期望和要求的监控清晰度越高, 但是在有限购置成本条件下, 摄像头布点越密集, 将造成监控资源的浪费。另一方面由于监控安装候选点是由变电站的空余间隔所决定, 难免使得部分区域成为监控盲区, 不能达到最低的监

控期望要求, 为此在目标函数 d_{AVE} 中首次引入监控乘子函数 $f(\mathbf{T}, \mathbf{W})$ 来引导监控资源的有效配置, 监控乘子函数的数学表达式为

$$f(\mathbf{T}, \mathbf{W}) = \begin{cases} M & T_{ij} < W_{ij} \\ 0 & W_{ij} \leq T_{ij} \leq W_{ij} + 2 \\ k_0 M & T_{ij} > W_{ij} + 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为惩罚常数, 一般取数值较大的正数; k_0 为过欠比系数, 取值为 $0 < k_0 \leq 1$, 其物理含义为过监控与欠监控乘子之间的比值。而监控乘子函数的物理含义为当实际监控清晰度达不到期望监控清晰度时, 对监控清晰度矩阵的差异给予“大 M ”惩罚, 当实际监控清晰度远大于期望监控清晰度时, 对监控清晰度矩阵的差异给予“ $k_0 \times M$ ”的惩罚, 当实际监控清晰度基本满足期望监控清晰度时, 对监控清晰度矩阵的差异给予0惩罚, 进而引导监控资源尽可能地满足期望监控清晰度的要求。

因此, 目标函数由最小化 d_{AVE} 改进为最小化 \hat{d}_{AVE} , 如式(8)所示。

$$\min \hat{d}_{AVE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(\mathbf{T}, \mathbf{W}) |T_{ij} - W_{ij}| \quad (8)$$

约束条件

$$\sum_{t=1}^N \sum_{r=1}^C s_{t,r} d_r \leq S_p \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^C s_{t,r} = 1, \forall t \in \varphi_N \quad (10)$$

$$s_{t,r} \in \{0, 1\}, \forall t \in \varphi_N \quad \forall r \in \varphi_C \quad (11)$$

其中: 式(9)为摄像头购置成本约束, d_r 为第 r 种监控摄像头的单价, S_p 为摄像头最大购置成本; 式(10)为摄像头安装种类约束, 物理含义为第 t 个小区域只能安装一种类型的摄像头; 式(11)为摄像头选型选址逻辑变量的取值约束, $\varphi_N = \{1, 2, \dots, N\}$ 为变电站中可安装摄像头的小区域集合, $\varphi_C = \{1, 2, \dots, C\}$ 为所采购的监控摄像头种类集合。

3.2 求解算法

上述监控终端摄像头布点优化模型是个典型的集合覆盖问题, 也是一个混合整数规划的 NP-hard 数学问题, 且变电站需布点摄像头的区域越大, 则该问题的求解规模越大, 但是问题求解时间对变电站中监控摄像头的选址安装影响并不大, 因此本文采用遗传算法进行求解, 得到摄像头优化布点安装方案。遗传算法^[25](Genetic Algorithms, GA)是根据达尔文进化理论以及孟德尔遗传学说所创立的一种进化算法(Evolutionary Algorithms, EAS), 最先由美国的 J.Holland 教授于 1975 年提出, 其在求解该大规模组合优化问题具有适应性广、抗干扰性和鲁棒

性强以及不受搜索空间限制性条件约束、适应于并行处理、全局搜索等显著特点。

4 算例应用

4.1 算例平面图

图 4 为某 220 kV 变电站的平面图,其占地面积约为 200 m×150 m,本算例根据第 1 节所述方法将其离散为 40×30 个边长为 5 m 的正方形小区域,图 5 给出了区域离散化示意图以及监控区域重要度矩阵,即为期望的监控清晰度矩阵 W ,同时也标示出了可安装摄像头的小区域集合。

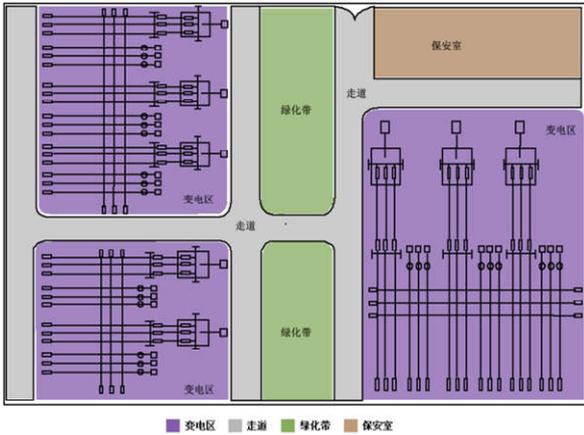


图 4 某 220 kV 变电站平面图
Fig. 4 Plan of a 220 kV substation

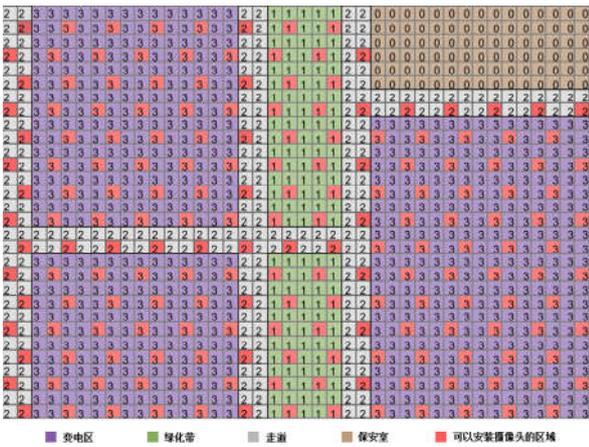


图 5 区域离散化及监控区域重要度矩阵
Fig. 5 Regional discretization and the importance matrix of monitoring area

该变电站拟投资不超过 20 万元购买监控终端摄像头,购买的监控摄像头有球机和枪机两大类,其中 k_1 、 k_2 和 k_3 分别取 0.2、0.7 和 1,枪机的监控视角参数 α 取 40°,根据可监控范围的不同,具体有 6 小类,如表 1 所示。

表 1 摄像头类型及基本参数

Table 1 Types and basic parameters of camera

| 类型 | 摄像头朝向 | 监控距离/m | 单价/(元/个) |
|----|-------|--------|----------|
| 1 | 球机 | 直径 25 | 3 000 |
| 2 | 球机 | 直径 35 | 3 400 |
| 3 | 朝西枪机 | 35 | 850 |
| 4 | 朝北枪机 | 35 | 850 |
| 5 | 朝东枪机 | 35 | 850 |
| 6 | 朝南枪机 | 35 | 850 |

4.2 评估指标

为了评估不同的摄像头安装布点方案的优劣,本文提出盲区率(BAR)、欠监控率(UMR)和过监控率(OMR)三个指标来统计评估不同布点方案的优势和劣势,以供规划设计人员参考选择。三个指标的定义如式(12)所示。

$$\begin{cases} BAR = \frac{BAN}{TN} \times 100\% \\ UMR = \frac{UDS}{TES} \times 100\% \\ OMR = \frac{ODS}{TES} \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中: BAN 表示期望被监控但实际并没有分配监控资源的小区域个数; TN 表示总的监控小区域的个数; UDS 表示所有欠监控小区域中期望监控清晰度与实际监控清晰度之间的差值之和; TES 表示所有小区域期望监控清晰度的总和; ODS 表示所有过监控小区域中实际监控清晰度与期望监控清晰度之间的差值之和。

4.3 布点方案

本文采用 Matlab 中的遗传算法工具箱求解监控终端摄像头布点优化模型,得到基于监控乘子函数的变电站监控摄像头优化布点方案。

当未引入监控乘子函数(即 f 函数恒等于 1)时,模型等效于基于最小化 d_{AVE} 做优化,其优化结果所对应的监控摄像头布点方案的评价指标如表 2 所示。

为了进一步分析本文所提的监控乘子函数 f 对变电站监控摄像头布点优化结果的影响和作用,下面取不同参数条件下的监控乘子函数进行算例布点研究,并统计对比所得到不同布点方案的效果差异,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,当引入监控乘子函数 f 时,不管 k_0 和 M 如何取值,优化结果的盲区率 BAR 均小于未引入监控乘子函数(即 f 恒等于 1)时的结果,且多数情况下会以增加购置成本和提高过监控率 OMR 作为“去盲区”的代价,少数情况如 (k_0, M) 取 $(1.0, 6)$

表 2 不同参数条件下不同布点方案的指标对比

Table 2 Indices comparison of different layout schemes

| under different parameters | | | | | |
|----------------------------|-----|------|------|------|---------|
| k_0 | M | BAR% | UMR% | OMR% | 购置成本/万元 |
| f 恒等于 1 | | 5.4 | 13 | 10 | 15.9 |
| 1.0 | 2 | 5.1 | 14 | 12 | 16.6 |
| | 4 | 3.5 | 12 | 14 | 16.1 |
| | 6 | 4.6 | 14 | 13 | 15.4 |
| 0.5 | 2 | 5.2 | 14 | 12 | 17.3 |
| | 4 | 5.0 | 13 | 12 | 15.3 |
| | 6 | 2.6 | 12 | 14 | 16.7 |
| 0.2 | 2 | 3.6 | 14 | 11 | 16.7 |
| | 4 | 3.7 | 13 | 13 | 16.5 |
| | 6 | 4.5 | 13 | 11 | 16.3 |

和(0.5, 4)时反而降低了购置成本, 这是因为在这两组参数条件下, 优化方案趋向于配置相对价格更低的枪机, 而非价格高昂的球机。引入监控乘子函数 f 会普遍提高过监控率 OMR , 这是因为要实现消除小部分监控盲区的数量, 需要单独增设新的摄像头, 从而使得大面积增加其他“非盲区”区域的监控水平, 进而导致 OMR 相对于未引入监控乘子函数时要高。另一方面, 引入监控乘子函数多数情况下会使得欠监控率 UMR 指标稳定在 12%到 14%之间, 与未引入监控乘子函数效果相当。

综上, 根据盲区率 BAR 由小到大对布点方案排序, 当参数(k_0, M)取(0.5, 6)时, 其优化结果所对应的摄像头优化布点方案如图 6 所示, 该方案的盲区率仅为 2.6%, 相对于其他方案能有效消除监控盲区, 且其欠监控率较低为 12%, 购置成本也满足给定约束, 较好地反映了监控乘子函数在消除监控盲区和尽可能达到最低期望监控要求两方面的作用, 在有限投资成本的条件下, 实现监控摄像头的高效配置及优化布点。

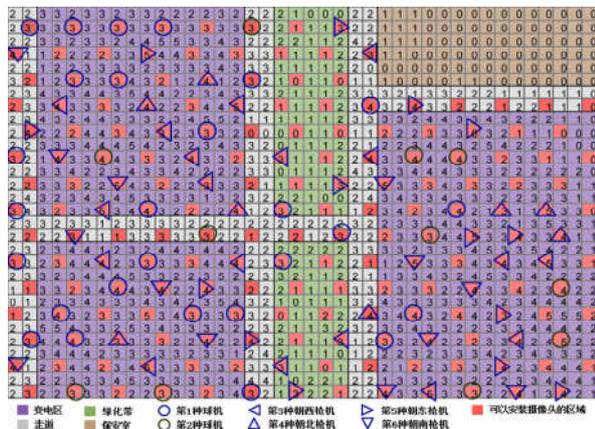


图 6 监控摄像头优化布点方案

Fig. 6 Optimization layout scheme of monitoring cameras

5 结语

本文对变电站平面图进行区域栅格化划分后, 结合所定义的监控区域重要度矩阵和摄像头监控范围清晰度矩阵, 建立了以平均监控距离最小为目标函数的摄像头优化布点模型, 最后采用遗传算法求出监控终端摄像头的优化布点方案。由实际算例的布点结果表明, 本文布点模型在引入监控乘子函数后能有效消除监控盲区, 尽最大可能实现有限监控资源的差异化优化配置, 模型相比于基于 3D 建模的方法更简单, 在指导智能终端的科学布点工作方面具有较高工程实用价值, 同时基于智能终端的优化布局 and 日趋成熟的智能监控技术, 将进一步提高对变电站人身和设备的实时监控水平, 从而大大降低人身伤亡和设备故障停电风险。因此, 智能监测和智能分析技术在智能变电站中的应用将作为下一阶段研究的重点。

参考文献

- [1] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [2] 彭海平, 高昌培, 熊学海, 等. 智能变电站间隔层设备智能定检作业系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 99-104.
PENG Haiping, GAO Changpei, XIONG Xuehai, et al. Research on intelligent periodic test operating system for bay level equipment of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 99-104.
- [3] 陈晓捷. 500 kV 智能变电站无人值班技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 149-152.
CHEN Xiaojie. Techniques of 500 kV smart unattended substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 149-152.
- [4] 王聪, 刘明光, 齐飞. 智能视频监控系统动态目标检测与识别算法综述[J]. 电气技术, 2018, 19(9): 6-11.
WANG Cong, LIU Mingguang, QI Fei. Summary of dynamic target detection and recognition algorithm in intelligent video surveillance system[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(9): 6-11.
- [5] 鲁守银, 张营, 李建祥, 等. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 276-284.
LU Shouyin, ZHANG Ying, LI Jianxiang, et al. Application of mobile robot in high voltage substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 276-284.
- [6] 周刚. 基于 UWB 定位的变电站作业安全监控技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 125-129.
ZHOU Gang. Study on power substation operation safety monitoring technology based on UWB location[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 125-129.

- [7] 孟晓, 胡炎, 邵能灵, 等. 变电站无线测温告警算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 81-86.
MENG Xiao, HU Yan, TAI Nengling, et al. Algorithm of wireless temperature measurement and alarm in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 81-86.
- [8] FINOGEEV A, FINOGEEV A, FIONOVA L, et al. Intelligent monitoring system for smart road environment[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2019[2019-05-21]. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.003>.
- [9] 杨臻, 赵燕茹. EPON 技术在智能变电站状态监测和视频监控中的应用[J]. 电力建设, 2014, 35(11): 107-111.
YANG Zhen, ZHAO Yanru. Application of EPON technology in smart substation condition monitoring and video surveillance systems[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 107-111.
- [10] 凌毅, 张勇军, 李哲, 等. 基于事故因果继承原则的变电站电气误操作事故分析[J]. 继电器, 2007, 35(16): 55-58.
LING Yi, ZHANG Yongjun, LI Zhe, et al. Analysis of electric operation error accident in substation based on the principle of causal relation of accident[J]. Relay, 2007, 35(16): 55-58.
- [11] 梁广, 张勇军, 黎浩, 等. 变电运行人因事故分析的拟 REASON 模型[J]. 继电器, 2008, 36(3): 23-26.
LIANG Guang, ZHANG Yongjun, LI Hao, et al. Quasi-reason model for human errors analysis in substation operation[J]. Relay, 2008, 36(3): 23-26.
- [12] 李宏伟. 应用于智能变电站的智能视觉系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 141-147.
LI Hongwei. Intelligent vision system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 141-147.
- [13] 陈旭, 韩文花. 变电站智能监控系统[J]. 广东电力, 2015, 28(6): 34-40.
CHEN Xu, HAN Wenhua. Intelligent monitoring system of substation[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(6): 34-40.
- [14] 苏尚流, 缪希仁. 基于微型摄像头的轨道式变电站巡检机器人[J]. 电器与能效管理技术, 2015(13): 19-23.
SU Shangliu, MIAO Xiren. A rail robot based on micro camera for substation inspection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(13): 19-23.
- [15] 滕井玉, 蒋正威, 杜奇伟, 等. 基于视频集成及智能分析的一键式程序化控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 72-76.
TENG Jingyu, JIANG Zhengwei, DU Qiwei, et al. Research on sequential control technique based on video integration and intelligent analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 72-76.
- [16] 肖东晖, 林立. 电力系统统一视频监控平台解决方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 74-80.
XIAO Donghui, LIN Li. Solution scheme of integrated video surveillance platform of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 74-80.
- [17] 姚毅, 李莺, 常政威, 等. 变电站智能布点系统中摄像机安装方案[J]. 压电与声光, 2015, 37(6): 1074-1077.
YAO Yi, LI Ying, CHANG Zhengwei, et al. The cameras installation of substation intelligent stationing system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(6): 1074-1077.
- [18] CHEN Hao, HU Yaping, YAN Jinyi, et al. Research on the substation 3D real scene surveillance[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1008-1009: 742-747.
- [19] CHANG Z, XIE X. Intelligent three-dimensional layout design of video cameras in substations[C] // International Conference on Electronic, Mechanical, Information and Management Society, 2016[2016-04]. <https://doi.org/10.2991/emim-16.2016.228>.
- [20] BAO S, XIAO N, LAI Z, et al. Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models[J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 100-109.
- [21] ZHANG K, HUANG Z, ZHANG S. Using an optimization algorithm to establish a network of video surveillance for the protection of Golden Camellia[J]. Ecological Informatics, 2017, 42: 32-37.
- [22] 舒隽, 韩冰, 陈学姣. 计及线路路径优化的空间电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 570-577.
SHU Jun, HAN Bing, CHEN Xuejiao. Spatial power network planning considering electric line route optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 570-577.
- [23] 钟正, 张玲, 柳军燕. 3D GIS 环境下监控摄像头空间布局设计[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(13): 211-215.
ZHONG Zheng, ZHANG Ling, LIU Junyan. Spatial layout design of surveillance cameras based on 3D GIS[J]. Computer Engineering & Applications, 2012, 48(13): 211-215.
- [24] 杜往泽, 宋执环, 闫文博, 等. 单摄像头旋转监控下的快速图像拼接[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(2): 245-254.
DU Wangze, SONG Zhihuan, YAN Wenbo, et al. Fast image stitching under single camera rotate monitoring[J]. Journal of Image & Graphics, 2016, 21(2): 245-254.
- [25] 余乐, 张茜, 刘燕, 等. 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 58-64.
YU Le, ZHANG Xi, LIU Yan, et al. An adjustment method of distribution network reactive power compensation partition balance with distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 58-64.

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-09-30

作者简介:

林孝斌(1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为变电运行和安全监管等; E-mail: 83198624@qq.com

周俊煌(1993—), 男, 通信作者, 研究方向为配电网电压控制与节能规划。E-mail: 272757783@qq.com

(编辑 许威)