

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.027

## GIS不同布置方式的经济性及选用策略研究

张丕沛, 汪鹏, 郭晨瑞, 王江伟, 李杰

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250003)

**摘要:** GIS户外布置会因环境腐蚀影响,增加设备检修成本,而GIS户内布置又会在前期投入大量的房屋建造成本,因此有必要对GIS不同布置方式的经济性进行评估。文中以某市在运变电站为统计对象,对不同地理位置户内和户外布置GIS整个使用周期内的运检成本进行了统计。结果显示,不同区域户内GIS的运检成本差别较小,且以定期检修成本为主,而沿海d级污秽区、内陆d级污秽区户外GIS的临时停电检修及带电补气次数远高于户内GIS,整个使用周期内的总运检成本也远高于户内GIS,并在此基础上提出了各个区域新建GIS的运检成本预测方法。之后综合考虑GIS设备及房屋的建设、运检和退役成本,对GIS不同布置方式的全寿命周期成本进行计算分析,可以得出,某市沿海d级污秽区的GIS采用混凝土房屋户内布置GIS、内陆d级污秽区的GIS采用钢结构房屋户内布置、内陆c级污秽区的GIS采用户外布置是最具经济性的选择,以上分析过程及结论可为其他地区GIS布置方式的选择提供借鉴。

**关键词:** GIS; 运行环境; 布置方式; 全寿命周期; 成本分析

### Study on Economic Efficiency and Selection Strategies of Different GIS Layout Configurations

ZHANG Pipei, WANG Peng, GUO Chenrui, WANG Jiangwei, LI Jie

(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

**Abstract:** The outdoor layout of GIS can increase the equipment maintenance cost due to the influence of environmental corrosion, while, the indoor layout of GIS will invest a lot of house construction cost in the early stage. It is therefore necessary to make economic efficiency assessment of different layout modes of GIS. In this paper one substation in operation in a certain city in China is taken as the statistical object, the statistical analysis of operation and maintenance cost of both indoor and outdoor GIS in its whole service cycle in different geographical locations is made. The result shows that the operation and maintenance costs of indoor GIS in different regions have little difference, and the main cost is in the regular maintenance. However, the number of temporary power outage for maintenance and gas replenishment at live condition for outdoor GIS in coastal and inland d-level contamination areas is much higher than that of indoor GIS. The total operation and maintenance costs throughout the entire usage cycle are also much higher than those of indoor GIS. On this basis, a method for predicting the operation and maintenance costs of newly built GIS in various regions are proposed. Afterthat, with comprehensive consideration of the construction, operation and inspection as well as out of service costs of GIS equipment and houses, the full service cycle costs of different GIS layout methods are calculated and analyzed. It can be concluded that for the GIS in the coastal d-level contamination area of a certain city, the concrete building and indoor layout are adopted, and for the GIS in the inland d-level contamination area, the steel structure building and indoor layout can be adopted. The outdoor layout for the GIS in the inland c-level contamination area is the most economical choice. The above analysis process and conclusions can provide reference for the selection of GIS layout modes in other regions.

**Key words:** GIS; operating environment; layout mode; service cycle; cost analysis

收稿日期:2025-08-11; 修回日期:2025-10-28

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520626220024)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520626220024).

## 0 引言

国内在运 GIS 大多为户外布置,目前尚无相关技术标准对 GIS 布置方式进行明确,国家电网公司仅要求日温差超过 25 K、e 级重污秽、城市中心等地区的 GIS 需设计为户内布置<sup>[1]</sup>。然而多年的运行情况表明,污秽等级较低(c 级和 d 级)污秽区的户外 GIS,仍会受运行环境影响导致漏气、锈蚀能缺陷率升高,耗费大量的成本进行检修。若大面积的设计为户内布置,又会在建设初期投入大量的房屋建造费用。因此有必要对不同地理位置的户内和户外布置 GIS 的运检成本进行统计分析,并综合考虑初期的房屋建造成本,结合全寿命周期成本理论,因地制宜的选择最为经济性的布置方式。

文[2-9]对不同运行年限的 GIS 常见缺陷进行了统计分析,分析认为 GIS 大多数缺陷是由于户外布置长期受环境影响而产生,但未对户内外 GIS 整个使用周期内的检修成本进行对比统计;文[10-14]讨论分析了变电站采用钢结构建筑和混凝土建筑的优缺点及经济性,认为钢结构建筑全寿命周期总成本较低,且更符合资源节约型、环境友好型的发展要求,但没有综合考虑 GIS 相关成本,其结论无法用来评估 GIS 各种布置方式的经济性。

文中以在运变电站为统计对象,首先对不同地理位置户内和户外布置 GIS 整个使用周期内的运检成本进行了统计,对比分析了不同地理位置、不同布置方式在 GIS 运检阶段投入成本的差异,并在此基础上提出了新建 GIS 运检成本的预测方法。之后综合考虑了户内布置的房屋建造和维护成本,对户外布置、钢结构房屋户内布置、混凝土房屋户内布置 3 种 GIS 布置方式的全寿命周期成本进行计算分析,针对不同地理位置提出了总成本最低的 GIS 布置方式选用策略。

## 1 GIS不同布置方式的特点

### 1.1 户外布置

GIS 户外布置具有空间大、检修方便的特点,可以使用吊车等大型设备,故障发生后的设备解体更换等更简单,工期短。但由于设计水平、元件材质、安装工艺等多方面原因,日益严重的污染环境会加速户外运行 GIS 设备的老化、锈蚀。户外运行的 GIS 受环境中水分盐分、温度变化的影响,铝、铁等金属因水分盐分发生锈蚀或原电池反应,防护漆、密封垫等长时间在日光水分的作用下老化,逐渐失去防

护作用,由此造成的设备功能缺陷是运行户外布置 GIS 设备的主要问题。

### 1.2 户内布置

与户外布置的 GIS 相反,GIS 户内布置受温差变化、水分盐分影响较小,由母线伸缩导致的支撑结构焊接处开裂、伸缩节变形损坏等造成的漏气、及元器件锈蚀等各类缺陷发生频次较少。但由于户内空间有限,在需要对 GIS 设备进行解体更换等大型检修时,受检修空间有限影响,无法使用吊车等大型设备,检修难度增大,工期更长。

目前用于 GIS 的房屋大多为传统钢筋混凝土房屋,近些年新兴的钢结构房屋也有部分应用。由于钢材工业化水平高、多为预制件、自身重量轻,因此钢结构房屋具有施工方便、人工费低、运输安装成本低的优点,且钢结构构件的连接一般采用焊接或者螺栓连接,精度较高,施工周期也较短<sup>[15-19]</sup>。而传统混凝土房屋虽然构件较重,吊装成本高,但具有工艺成熟、整体稳定性好、维护工作量小的优点。

## 2 户内外布置 GIS 运检成本统计与预测

文中以某市在运变电站为统计对象,对不同地理位置的户外 GIS 设备的运检成本进行统计分析,并与户内 GIS 进行对比。由于环境对 GIS 设备影响主要通过水气侵蚀和污秽腐蚀两种方式,因此对地理位置分类时需考虑污秽等级和是否沿海两个因素,从而将某市分为内陆 d 级污秽区、内陆 c 级污秽区和沿海 d 级污秽区 3 种区域,对不同区域内 GIS 设备的运检成本进行统计和对比。为避免技术差异带来的成本差异,统计对象主要为国内主流厂家相同技术路线的 220 kV GIS,同时考虑 GIS 的设计使用年限为 20 年,因此主要统计运行 20 年及以上的 GIS 在使用年限里产生的各项运检成本,从而在整个使用周期内观察环境因素对 GIS 运检成本的影响。

### 2.1 内陆 d 级污秽区

由于日常巡视、带电检测以及部分小型检修已经实现了运维班组自主开展,因此 GIS 设备的运检成本主要包括因 SF<sub>6</sub> 气体泄漏产生的带电补气成本和停电检修成本两部分。

以运行于内陆 d 级污秽区的 A 变电站 220 kV 户外 GIS 和 B 变电站 220 kV 户内 GIS 为例,投运 20 年内每年的带电补气成本见表 1(户外成本合计 8.9 万元,户内 8.4 万元)。

可以看出,户内 GIS 在 20 年内仅有 6 年产生了带电补气成本,总补气费用仅为 8.4 万元。而户外

表1 户内外GIS带电补气成本对比

Table 1 Cost comparison of live gas replenishment for GIS at indoor and outdoor

年份	成本/万元		年份	成本/万元	
	户外	户内		户外	户内
1	0.0	0.0	11	13.1	2.3
2	0.0	0.0	12	0.0	0.0
3	0.0	0.0	13	0.0	0.0
4	0.0	0.0	14	0.0	0.0
5	3.4	0.0	15	1.2	0.0
6	4.9	0.0	16	6.7	0.0
7	6.8	0.0	17	12.5	0.0
8	9.5	1.1	18	0.0	0.0
9	10.8	1.1	19	2.4	1.4
10	12.0	1.1	20	5.7	1.4

GIS从投运后第5年就开始出现漏气现象,虽然在第12、18年对漏气现象进行了集中停电消缺,但受环境腐蚀的影响,更多的漏气点开始出现,20年的总补气费用为89.0万,比户内GIS共高出80.6万元。

停电检修包括开关机构检修、二次元器件更换、气室故障后更换、发热和漏气消缺等。同样以A、B两座变电站为例,户内外运行GIS在20年内的停电检修成本分别见表2、3。

表2 户外GIS停电检修成本

Table 2 Outdoor GIS outage maintenance cost

年份	成本/万元	备注
1	0.0	无
2	0.0	无
3	0.0	无
4	0.0	无
5	0.0	无
6	10.5	定期检修(机构检查、润滑等)
7	0.0	无
8	2.4	更换损坏二次元器件等
9	32.2	刀闸机构锈蚀卡涩引起操作后放电故障
10	4.7	机构箱除锈小修
11	14.2	开关机构锈蚀导致拒动,更换机构
12	154.5	定期检修(漏气消缺、锈蚀部件批量更换)
13	47.8	检修后遗留异物导致放电故障
14	7.2	更换损坏的二次元器件等
15	0.0	无
16	6.5	机构漏油消缺等
17	15.3	局放消缺更换盆式绝缘子等
18	184.9	定期检修(漏气消缺、锈蚀部件批量更换)
19	4.1	跨接排发热消缺等
20	7.7	汇控柜空开等器件更换
合计	492.0	无

可以看出,户内GIS的停电检修成本大部分来

表3 户内GIS停电检修成本

Table 3 Indoor GIS outage maintenance cost

年份	成本/万元	备注
1	0.0	无
2	0.0	无
3	0.0	无
4	60.6	断路器气室放电故障
5	0.0	无
6	10.5	定期检修(开关机构检查、润滑等)
7	0.0	无
8	22.7	局放消缺等
9	0.0	无
10	0.0	无
11	0.0	无
12	44.3	定期检修(开关机构保养、液压油更换等)
13	0.0	无
14	0.0	无
15	0.0	无
16	0.0	无
17	0.0	无
18	79.9	定期检修(开关机构大修,更换老化元器件等)
19	0.0	无
20	0.0	无
合计	218.0	无

自于每6年开展一次的定期检修,且由于户内设备运行状况良好,定期检修仅需要对操动机构进行润滑处理或更换易老化的二次元器件(如微动开关、各类继电器),检修成本较低;而由于要对受环境影响而严重锈蚀的机构进行整体更换以及对漏气点进行处理,户外GIS 3次定期检修的费用比户内GIS超出1倍以上。

临时停电检修方面,户内GIS临时停电检修仅有2次,均为解体大修,主要用于处理制造装配过程遗留的缺陷导致的放电故障或局放异常,受户内空间影响单次检修成本较高;而由于户外GIS二次元器件损坏、机构锈蚀卡涩、机构漏油拒动等缺陷频发,其临时停电检修频率及总成本远高于户内GIS。综合定期检修和临时停电检修,户外GIS的20年的总停电检修费用比户内GIS高出274万元。

综合带电补气成本和停电检修成本,A变电站户外GIS在投运20年内产生总运检成本为581万元,比B变电站的户内GIS高出354.6万元。说明位于内陆d级污秽区的变电站,户外运行环境对GIS运行可靠性和运检成本投入的影响较为显著。

## 2.2 沿海d级污秽区

同样以运行于沿海d级污秽区的一套220 kV

户内GIS和一套220 kV户外GIS为例,统计各年度的运检成本见表4。

表4 沿海d级污秽区户内外GIS运检成本对比

Table 4 Comparison of GIS maintenance cost between indoor and outdoor in coastal d-level polluted area

年份	户外/万元		户内/万元	
	带电补气	停电检修	带电补气	停电检修
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.3	0.0	0.0	0.0
5	4.0	14.2	0.0	24.4
6	6.8	21.4	0.0	11.8
7	8.7	5.6	0.0	0.0
8	9.6	12.0	0.0	26.2
9	11.9	32.0	0.0	0.0
10	14.9	4.7	0.0	0.0
11	15.1	14.2	0.0	0.0
12	0.0	153.4	0.0	59.8
13	0.0	4.6	0.0	0.0
14	2.1	42.8	0.0	0.0
15	8.6	9.0	0.0	0.0
16	11.7	6.5	2.2	0.0
17	12.5	10.6	2.4	0.0
18	5.7	184.0	0.0	98.4
19	7.2	67.2	0.0	0.0
20	8.8	20.1	0.0	0.0
合计	732.2		225.2	

从表4可以看出,沿海d级污秽区的户外GIS由于受环境腐蚀更剧烈,产生了更高的带电补气成本和停电检修成本,投运20年内的总运检成本达到了732.2万元。而户内GIS的总运检成本与内陆d级污秽区的户内GIS差别不大,可见户内布置可以一定程度上控制GIS的运检成本。

2.3 内陆c级污秽区

运行于内陆c级污秽区的户内外GIS运检成本统计对比见表5。从表5可以看出户内GIS的总运检成本仍与另外两个区域保持在同一水平,而由于水气侵蚀和污秽腐蚀的程度较小,此区域内户外GIS的运检成本明显降低,与户内GIS总运检成本仅相差不到100万元。

2.4 运检成本预测方法

通过对不同区域不同布置方式的GIS整个使用周期内运检成本的统计,可以进一步通过数据拟合提出运检成本的预测方法,用于对新建GIS设备在

整个使用周期内可能产生的运检成本进行预测。

表5 内陆c级污秽区户内外GIS运检成本对比

Table 5 Comparison of GIS maintenance cost between indoor and outdoor in inland c-level polluted area

年份	户外/万元		户内/万元	
	带电补气	停电检修	带电补气	停电检修
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	18.4	0.0	10.6
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	7.6	0.0	0.0
10	1.2	32.7	0.0	24.7
11	1.2	9.2	1.6	0.0
12	1.2	36.7	1.6	72.4
13	2.9	0.0	0.0	0.0
14	2.9	0.0	0.0	0.0
15	2.9	0.0	0.0	0.0
16	2.9	19.2	0.0	0.0
17	6.4	16.0	0.0	0.0
18	0.0	116.5	0.0	77.5
19	0.0	16.5	0.0	0.0
20	0.0	10.7	0.0	19.4
合计	305.1		207.8	

2.4.1 户外布置GIS

以某市内陆d级污秽区户外布置GIS为例,对所有运行20年及以上的户外GIS为统计对象,将每年产生的运检成本数据进行汇总平均,得出运检成本随运行年份的变化情况见图1。

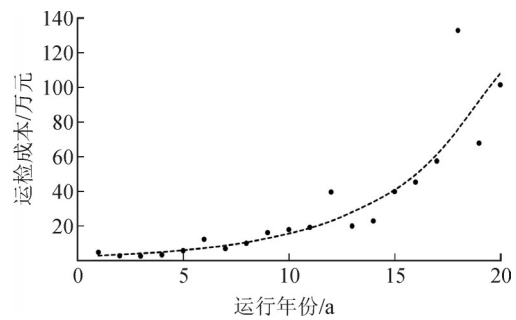


图1 内陆d级污秽区户外GIS运检成本变化情况

Fig. 1 Outdoor GIS maintenance cost in inland d-level polluted area

可以看出随着运行时间的增加,户外GIS运检成本数据近似于指数增长(第6、12、28年附近的数据波动是定期检修产生的成本),图1中虚线即为用指数函数的拟合结果,表达式为

$$\begin{cases} C_{2w1}(n) = 2.2128e^{0.1943n} \\ R^2 = 0.9284 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $n$ 为运行年份; $C_{2w1}(n)$ 为内陆d级污秽区户外GIS第 $n$ 年产生的运检成本; $R^2$ 为相关系数,越接近1表示拟合效果越好, $R^2>0.9$ ,说明式(1)对图1中运检成本数据具有较高的拟合度,从而某市内陆d级污秽区新建的户外布置GIS整个使用周期产生的运检成本,可以用式(1)进行预测计算。

采用同样的方法对沿海d级污秽区、内陆c级污秽区的户外GIS运检成本进行汇总并拟合,结果见图2、3。

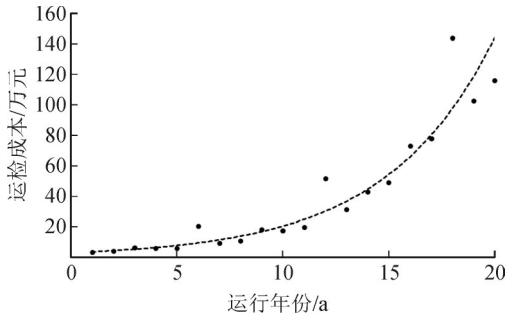


图2 沿海d级污秽区户外GIS运检成本变化情况

Fig. 2 Outdoor GIS maintenance cost in coastal d-level polluted area

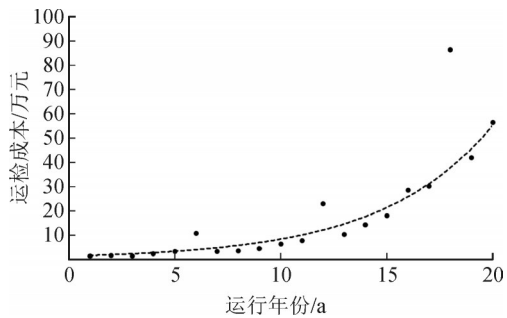


图3 内陆c级污秽区户外GIS运检成本变化情况

Fig. 3 Outdoor GIS maintenance cost in inland c-level polluted area

指数拟合的结果为:

$$\begin{cases} C_{2w2}(n) = 2.8805e^{0.1955n} \\ R^2 = 0.9198 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_{2w3}(n) = 1.2051e^{0.1909n} \\ R^2 = 0.9214 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $C_{2w2}(n)$ 、 $C_{2w3}(n)$ 分别为沿海d级污秽区和内陆c级污秽区户外GIS第 $n$ 年产生的运检成本;相关系数 $R^2$ 均大于0.9。说明式(2)、(3)的拟合效果较好。从而两个区域新建的户外布置GIS整个使用周期产生的运检成本可以用式(2)、(3)进行预测计算。

#### 2.4.2 户内布置GIS

根据前文的统计分析可知,户内GIS运检成本基本不受地理位置影响,故对其运检成本的进行预

测时不再区分各个区域。对某市所有运行20年及以上的户内GIS运检成本进行汇总平均,结果见图4。

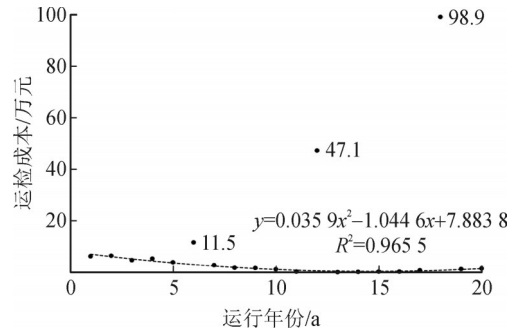


图4 户内GIS运检成本变化情况

Fig. 4 Indoor GIS maintenance cost

可见每6年开展一次的定期检修是整个运行周期内的主要运检成本。其余各年的运检成本则包括带电补气成本和临时停电成本,由于制造安装过程中遗留缺陷导致的故障或局放通常发生在GIS运行初期,故前10年的运检成本相对较高,用于GIS故障或局放的解体检修,且受户内空间影响,检修成本高于图1中户内GIS同一时期的成本数值(并不是每年都需要进行解体检修,图中数据是多个GIS运检成本的平均值);户内GIS运行中期较为稳定,运检成本基本为零;后期由于密封圈老化产生了零星的带电补气成本,故运检成本又有所上升。

由于户内GIS每次定期检修的项目相对固定(如表3中定期检修的内容),不同GIS的定期检修成本分散性不大,因此可直接使用图3中第6、12、18年的数据对新建GIS定期检修成本进行预测;其余年份的运检成本近似成U型分布,采用多项式拟合的拟合度最高( $R^2=0.9655$ ,如图3中虚线及上方表达式),则户内GIS运检成本 $C_{2N}(n)$ 的预测公式为

$$C_{2N}(n) = \begin{cases} 11.5 & n = 6 \\ 47.1 & n = 12 \\ 98.9 & n = 18 \\ 0.0359n^2 - 1.0446n + 7.8838 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

### 3 GIS不同布置方式的全寿命周期成本分析

从第2节的统计数据可以看出,将GIS设计为户内布置可以节省运检阶段的成本,但不同地理位置的户内外GIS运检阶段成本差异有大有小,且考虑到GIS房屋的搭建维护等费用,在某些地区将GIS设计为户内运行未必为最经济的选择,因此需要进一步结合全寿命周期成本理论,对不同地理位置、不同布置方式的GIS整个使用周期内的成本进行分析和对比,从而因地制宜的选择GIS整个使用周期

内最为经济性的布置方式。

### 3.1 全寿命周期成本模型

全寿命周期成本 $L_{CC}$ 分为初始阶段成本 $C_1$ 、运检阶段成本 $C_2$ 和退役阶段成本 $C_3$ ,其中运检阶段成本产生在整个20年的寿命周期内都有产生,考虑到资金的时间价值,需要转换成现值进行比较,故全寿命周期计算的表达式为

$$L_{CC} = C_1 + C_2 + C_3 = C_1 + \sum_{n=1}^{20} \frac{C_2(n)}{(1+r)^n} + C_3 \quad (5)$$

式(5)中: $C_2(n)$ 为第 $n$ 年产生的运检成本; $r$ 为资金折现率,对于0~30年的寿命周期一般取3.5%<sup>[20]</sup>。

对于户外GIS,各阶段成本均为GIS设备自身产生;对于户内GIS,则还需计及GIS房屋产生的费用,考虑到传统混凝土房屋和新型钢结构房屋在建设、维护等阶段的成本差异,文中在全寿命周期成本分析时,主要针对户外布置、钢结构房屋户内布置、混凝土房屋户内布置3种GIS布置方式,对某市内陆d级污秽区、沿海d级污秽区、内陆c级污秽区3种地理位置分别评估各种布置方式的经济性。

### 3.2 内陆d级污秽区

初始阶段成本 $C_1$ 主要包括GIS设备及房屋设计、采购、运输、安装等产生的成本。GIS设备的初始成本与GIS设备规模、型号等有关,由于GIS设备与房屋同时施工,GIS现场组装完成后才进行房屋封顶,且GIS安装结束后的耐压试验从伸出房屋的套管处即可进行加压,由此可见户内外布置方式并不会对GIS设备的初始阶段成本产生不同的影响,从而将GIS设备初始阶段成本均记做 $C_{1c}$ ,不做具体统计分析;GIS房屋的初始阶段成本通过调研本地区变电站内钢结构、混凝土建筑相关材料费、人工费、运输费,结合GIS设备规模面积(按12个间隔)类比估算得出。

运检阶段成本主要包括GIS设备及房屋在投运后因日常维护和停电检修等产生的费用。户内外GIS设备每年的运检阶段成本分别由式(1)、(4)进行计算,并代入式(5)计算得出代表本区域户内和户外GIS设备折现后的运检阶段成本值。

房屋的运检阶段成本通过调研该地区变电站内钢结构、混凝土建筑维护周期和相关费用计算得出。钢结构房屋的钢材、钢板通常会受到环境而锈蚀,一般需要每3年维护一次,主要进行门窗防腐除锈、防水密封等,单次维护费用约20.6万元,20年共需要维护6次;混凝土平均每10年维护一次,主要是抹灰涂料等外墙装饰费用,单次费用约24.7万,20年共维护2次。同样按照式(5)计算房屋的运检阶

段成本。

退役阶段成本包括拆除成本和残值。GIS的退役阶段成本同样只与GIS设备规模有关,不受布置方式的影响,因此记做 $C_{3c}$ ,不做具体统计分析。而房屋的设计使用年限通常为30~50年,大于GIS的20年,因此GIS全寿命周期结束时,房屋仍可继续使用(更换内部GIS设备后重新投运),因此房屋在退役阶段的成本以残值的形式体现,计算公式为

$$K_L = K_0(1-d)^{20} \quad (6)$$

式(6)中: $K_0$ 为房屋的建设成本; $K_L$ 为房屋使用20年后的残值; $d$ 为折旧率。结合行业调研,对于钢结构房屋折旧率为6.7%,对于混凝土房屋为5.3%<sup>[21-25]</sup>。

按照以上步骤统计和计算得到的3种布置方式的全生命周期成本数据见表6。

表6 内陆d级污秽区户内外GIS全寿命周期成本对比  
Table 6 Comparison of GIS life cycle cost between indoor and outdoor in inland d-level polluted area 万元

成本阶段	户外布置	钢结构房屋布置		混凝土房屋布置	
		GIS	房屋	GIS	房屋
$C_1$	$C_{1c}$	$C_{1c}$	137.0	$C_{1c}$	280.0
$C_2$	462.6	143.3	87.5	143.3	29.9
$C_3$	$C_{3c}$	$C_{3c}$	-27.9	$C_{3c}$	-68.5
$L_{CC}$	$462.6+C_{1c}+C_{3c}$	$339.9+C_{1c}+C_{3c}$		$384.7+C_{1c}+C_{3c}$	

3种布置方式的全寿命周期成本均含有未知量“ $C_{1c}+C_{3c}$ ”,因此仅对比数字部分大小便可对经济性进行优劣排序。不难看出,在某市内陆d级污秽区,GIS采用钢结构房屋户内布置是全寿命周期内最经济的选择。其原因是①在于户内布置可以大幅度减少运检阶段产生的带电补气和停电检修成本;②在于钢结构房屋的钢材工业化水平高,多为预制件,施工方便、人工费较低、自身重量轻等优点,初始阶段的运输安装成本远低于混凝土房屋。

### 3.3 内陆c级污秽区

此区域的全寿命周期成本仅户外布置GIS的运检阶段成本不同于内陆d级污秽区,需使用式(3)、(5)进行计算。内陆c级污秽区3种GIS布置方式的全寿命周期成本数据见表7。由于该区域环境因素对户外GIS运检成本影响较小,因此户外布置是全寿命周期内最经济的选择。

### 3.4 沿海d级污秽区

除户外布置GIS的运检阶段成本区别于其他两个区域外,由于水分对钢材的腐蚀作用,沿海d级污秽区钢结构房屋需要每两年维护一次,单次维护费用不变,钢结构房屋的运检阶段成本同样需要重新计算。该区域3种GIS布置方式的全寿命周期成本

表7 内陆c级污秽区户内外GIS全寿命周期成本对比

Table 7 Comparison of GIS life cycle cost between indoor and outdoor in inland c-level polluted area 万元

成本阶段	户外布置	钢结构房屋布置		混凝土房屋布置	
		GIS	房屋	GIS	房屋
$C_1$	$C_{1G}$	$C_{1G}$	137.0	$C_{1G}$	280.0
$C_2$	298.7	143.3	87.5	143.3	29.9
$C_3$	$C_{3G}$	$C_{3G}$	-27.9	$C_{3G}$	-68.5
$L_{cc}$	$298.7 + C_{1G} + C_{3G}$	$339.9 + C_{1G} + C_{3G}$		$384.7 + C_{1G} + C_{3G}$	

数据见表8,受钢结构房屋维护成本增加的影响,混凝土房屋成为全寿命周期内最经济的选择。

表8 沿海d级污秽区户内外GIS全寿命周期成本对比

Table 8 Comparison of GIS life cycle cost between indoor and outdoor in coastal d-level polluted area 万元

成本阶段	户外布置	钢结构房屋布置		混凝土房屋布置	
		GIS	房屋	GIS	房屋
$C_1$	$C_{1G}$	$C_{1G}$	137.0	$C_{1G}$	280.0
$C_2$	601.8	143.3	143.9	143.3	29.9
$C_3$	$C_{3G}$	$C_{3G}$	-27.9	$C_{3G}$	-68.5
$L_{cc}$	$601.8 + C_{1G} + C_{3G}$	$396.3 + C_{1G} + C_{3G}$		$384.7 + C_{1G} + C_{3G}$	

## 4 结语

文中以某市在运变电站为统计对象,首先对不同地理位置户内和户外布置GIS整个使用周期内的运检成本进行了统计,对比分析了不同地理位置、不同布置方式在GIS运检阶段投入成本的差异,并据此提出了新建GIS的运检成本预测方法。数据显示,将GIS设计为户内布置可以节省运检阶段的成本,但内陆c级污秽区的成本差异相对较小。

之后综合考虑了户内布置的房屋建造和维护成本,对3种GIS布置方式的全寿命周期成本进行计算分析,针对不同地理位置提出了总成本最低的GIS布置方式选用策略。结果表明,某市内陆d级污秽区、内陆c级污秽区和沿海d级污秽区最经济性的布置方式分别为钢结构房屋户内布置、户外布置和混凝土房屋户内布置。上述布置方式选用策略虽只适用于某市,但文中的统计分析全寿命周期计算方法可为其他地区所借鉴。

## 参考文献:

[1] 国家电网有限公司.十八项电网重大反事故措施及编制说明(2018年修订版)[M].北京:中国电力出版社,2018.  
State Grid Corporation of China. Eighteen major anti-accident measures for power grids and compilation notes(2018 Revised Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.

[2] 张丽娟,张天河,赵航.GIS设备漏气故障常见原因分析及防

范措施[J].山东电力技术,2018,45(1):71-74.

ZHANG Lijuan, ZHANG Tianhe, ZHAO Hang. Common causes analysis and preventive measures of GIS equipment leakage[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(1): 71-74.

- [3] 姚明伟,李玉峰,陈万.变电站室外GIS全封闭组合电器压力降低原因分析[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2014,10(1):50-52.  
YAO Mingwei, LI Yufeng, CHEN Wan. Cause analysis on pressure decrease of outdoor GIS in substation[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2014, 10(1): 50-52.
- [4] 高晋文,叶严军,于卓琦,等.含有裂纹缺陷的GIS盆式绝缘子的静力特性及其影响因素分析[J].高压电器,2020,56(12):251-256.  
GAO Jinwen, YE Yanjun, YU Zhuoqi, et al. Static force characteristics and influencing factors analysis of GIS basin-type insulator with cracks[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 251-256.
- [5] 张欣,李高扬,黄荣辉,等.不同运行年限的GIS缺陷率统计分析与运维建议[J].高压电器,2016,52(3):184-188.  
ZHANG Xin, LI Gaoyang, HUANG Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188.
- [6] 李永祥,王天正,李艳鹏,等.基于红外成像检漏技术的GIS设备气体泄漏异常分析[J].高压电器,2016,52(7):185-191.  
LI Yongxiang, WANG Tianzheng, LI Yanpeng, et al. Abnormal analysis of GIS electrical equipment gas leakage based on infrared imaging leakage detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 185-191.
- [7] 程志万,杨明昆,马宏明,等.一起GIS隔刀传动失效导致的绝缘故障及分析[J].高压电器,2019,55(7):248-252.  
CHENG Zhiwan, YANG Mingkun, MA Hongming, et al. Insulation failure caused by GIS disconnecter transmission failure and its analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 248-252.
- [8] 任敬国,彭飞,李杰,等.SF<sub>6</sub>气体绝缘金属封闭断路器气室的典型故障分析[J].山东电力技术,2017,44(3):38-41.  
REN Jingguo, PENG Fei, LI Jie, et al. Typical fault analysis method of SF<sub>6</sub> gas insulated switchgear breaker - chamber[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(3): 38-41.
- [9] 王政,杨少辉,杨洋,等.GIS断路器弹簧操作机构拒分闸故障的分析与处理[J].山东电力技术,2021,48(9):49-53.  
WANG Zheng, YANG Shaohui, YANG Yang, et al. Analysis and treatment of GIS circuit breaker spring operating mechanism refusing to open[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(9): 49-53.
- [10] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J].建筑结构学报,2002,23(1):2-8.  
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, CHEN Hong, et al. Contemporary lightweight steel structure and its application in China[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 2-8.
- [11] 谢桂祥.轻钢结构防护棚在户外式GIS开关站的应用[J].电工技术,2018(17):104-105.  
XIE Guixiang. Application of light steel structure protection shed in outdoor GIS switch station[J]. Electric Engineering, 2018(17): 104-105.
- [12] 沈蓓.华新(白鹤)换流站户内GIS室建筑结构设计[J].电力建

- 设, 2008, 29(4): 53-54.
- SHEN Bei. Indoor GIS - room structural design of huaxin(baihe) converter station[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4): 53-54.
- [13] 王英豪, 李建辉, 张元良, 等. 装配式变电站混凝土结构和钢结构的对比分析[J]. 江苏建筑, 2018(1): 63-65.
- WANG Yinghao, LI Jianhui, ZHANG Yuanliang, et al. The comparative analysis of concrete structure and steel structure prefabricated substation[J]. Jiangsu Construction, 2018(1): 63-65.
- [14] 王绵斌, 张妍, 耿鹏云, 等. 基于优化正交偏最小二乘法的变电站全寿命周期成本预测分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 119-124.
- WANG Mianbin, ZHANG Yan, GENG Pengyun, et al. Substation life cycle cost prediction model based on optimized orthogonal partial least squares[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 119-124.
- [15] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. 基于机—热—电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
- ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.
- [16] 黄彦璐, 胡旭东, 林振福, 等. 考虑峰荷特性的电力系统负荷侧碳排放责任核算方法[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 88-98.
- HUANG Yanlu, HU Xudong, LIN Zhenfu, et al. Accounting method for carbon emission obligation on load side of power system based on peak load characteristics[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 88-98.
- [17] 闫雷, 栾凌, 武小琳, 等. 基于区块链数据安全机制的输变电工程建设动态计算技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 7-12.
- YAN Lei, LUAN Ling, WU Xiaolin, et al. Research on dynamic calculation technology of power transmission and transformation project construction based on blockchain data security mechanism[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 7-12.
- [18] 王长伟, 高超, 牛凯, 等. 基于碳排放流的柔性配电网低碳规划方法[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 60-71.
- WANG Changwei, GAO Chao, NIU Kai, et al. Low-carbon planning of flexible distribution network based on carbon emission flow[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 60-71.
- [19] 潘晴宇. 考虑分布式电源接入的变电站规划关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 98-104.
- PAN Qingyu. Research on key technologies of substation planning considering distributed power access[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 98-104.
- [20] 马仲能, 钟立华, 卢锴, 等. 基于电力设备全寿命周期成本最优的检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 34-39.
- MA Zhongneng, ZHONG Lihua, LU Kai, et al. Study on the maintenance strategy of power equipment based on the optimal Life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 34-39.
- [21] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 13-15.
- GUO Jiwei, XIE Jingdong, TANG Guoqing. Life cycle cost analysis in electrical equipment management[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 13-15.
- [22] 梁唐杰, 谢庆, 柳春芳, 等. 基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 12-17.
- LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the Life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.
- [23] 徐玉琴, 任正, 詹翔灵, 等. 电力变压器全寿命周期成本建模及其综合敏感性分析[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(6): 80-87.
- XU Yuqin, REN Zheng, ZHAN Xiangling, et al. Life cycle cost model and comprehensive sensitivity analysis of power transformer[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(6): 80-87.
- [24] 吐松江·卡日, 逯浩坦, 高文胜, 等. 基于系统动力学的高压断路器全寿命成本评估[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 169-175.
- TUSONGJIANG Kari, LU Haotan, GAO Wensheng, et al. Life cycle cost assessment of high voltage circuit breaker based on system dynamics approach[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 169-175.
- [25] 游一民, 彭振搏, 戴冬云, 等. 40.5 kV C-GIS全生命周期内碳排放计算与分析[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 13-19.
- YOU Yimin, PENG Zhenbo, DAI Dongyun, et al. Calculation and analysis of carbon emission in the whole life cycle of 40.5 kV C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 13-19.

张丕沛(1996—), 男, 高级工程师, 主要从事高压设备状态评估与故障分析工作(通信作者)(E-mail: sddky\_zpp@163.com)。