

[变电站]

基于建筑设计的非金属模块化预制舱式变电站节能

文/左涛^{1,5} 刘建涛² 李敏^{3,5} 朱西平^{4,5}

1. 乐山一拉得电网自动化有限公司; 2. 西南交通大学; 3. 乐山师范学院; 4. 西南石油大学;
5. 四川省预制舱式电力设备工程技术研究中心

以四川省乐山市龙口110 kV非金属模块化预制舱式智能变电站为研究对象, 依托现有的建筑设计标准, 借鉴建筑节能设计和使用经验, 对非金属预制舱式变电站的预制舱式建筑形态设计和预制舱围护结构节能设计等节能技术进行了研究分析, 提出了针对非金属模块化预制舱式变电站的节能综合设计策略。

模块化预制舱式变电站是运用“标准化设计、工厂化加工、装配式建设”的理念, 在工厂将变电站一次设备、二次设备和通信等电力设备集成在按功能划分的金属或非金属材质的预制舱体内, 检验试验合格后, 以整体或拼接单元形式运输至变电站建设现场, 通过干式工法组合而形成的变电站, 实现了新时代变电站建设系统集成化、装配模块化、建设工厂化、施工简单化, 已广泛应用于电力、煤矿、风电及光伏等领域变电站新建或改(扩)建工程项目中。

从根本上讲, 模块化预制舱式变电站是一组特殊的工业建筑群体, 具有工业建筑的多样性、功能的专一性以及特殊功能的使用性, 其功能和结构较为复杂, 我国尚未出台这类工业建筑的节能设计标准, 因此依托现有的建筑设计标准和节能措施, 开展模块化预制舱式变电站的节能技术研究, 对国家节能和环保战略具有重要意义。

本文以四川省乐山市龙口110 kV非金属模块化预制舱式智能变电站为研究对象, 借鉴建筑设计和应用经验, 对非金属预制舱式变电站的节能技术进行了分析研究, 以推动模块化预制舱式变电站的成

果应用与技术发展。

预制舱式变电站的建筑节能设计依据

目前我国尚无工业建筑的节能设计标准, 现阶段预制舱式变电站的节能设计只能参考GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》和GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》两个标准, 并借鉴成熟的建筑节能措施开展相关节能研究。

与建筑能耗类似, 模块化预制舱式变电站的能耗主要体现在两个方面: 一是变电站建设过程中的能耗; 二是变电站设备运行使用过程中的能耗。建设过程中的能耗主要包括预制舱体、电力设备和建(构)筑物的生产和运输, 以及现场组装和施工中资源能源消耗; 运行使用过程中的能耗主要包括预制舱采暖、通风、空调和照明中的资源能源消耗。因此, 针对模块化预制舱式变电站的特殊功能和结构, 将总平面布置和建筑设计作为建筑节能的切入点着手研究。

非金属模块化预制舱式变电站节能设计

龙口110 kV非金属模块化预制舱式智能变电站

基金项目: 2020年四川省科学技术厅第一批省级科技计划项目: 220 kV环保型模块化智能变电站 (2020ZHCP0024)

以具有非金属特性的玄武岩纤维复合材料预制舱为载体,由110 kV GIS组合电器预制舱、主变压器预制舱、10 kV开关设备预制舱、二次组合设备预制舱、电容器成套装置预制舱、接地变消弧线圈预制舱、生活预制舱等7个模块化功能预制舱组合而成,如图1所示。

1. 变电站总平面布置设计

对建筑节能而言,建筑的总平面布置是一切设计的前提,非常重要,对变电站这种工业建筑尤其如此,合理的变电站总平面规划设计,可以对气候因素进行改造和利用,形成良好的有利于预制舱设备节能的微气候环境,因此应综合考虑变电站站址、布局朝向、平面功能及站内绿化等因素。

(1) 变电站朝向

在决策变电站预制舱设备布局和朝向时,要充分利用有利因素,避免或者改造不利因素,选址合理的变电站方位朝向,使设备冬季最大限度地利用太阳的自然能源,降低采暖使用负荷;夏季最大限度地减少太阳辐射热的扰动影响,并利用自然通风或者风机降温冷却,降低空调制冷负荷。由于四川乐山气候夏热冬冷,南北朝向的建筑在夏季可以减少太阳辐射热,冬季可以增加太阳辐射热,因此乐山龙口变电站预制舱设备主体结构长度(较长的一面)方向设计为南北朝向,有效避免了东西向日晒,如图2所示。



图1 龙口110 kV非金属模块化预制舱式智能变电站鸟瞰图

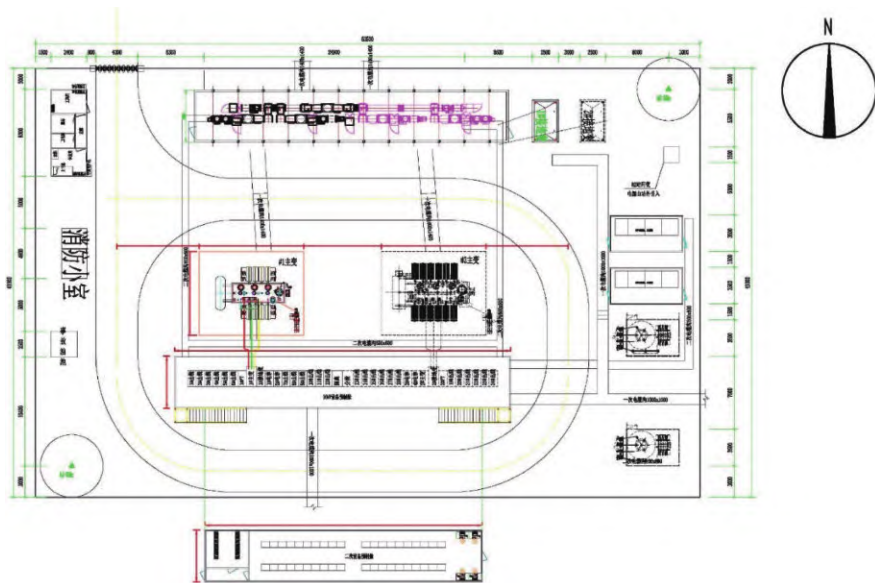


图2 四川乐山市龙口110 kV模块化非金属预制舱式智能变电站总平面布置图

(2) 优化平面功能

乐山龙口变电站在平面功能优化设计时,以变电站全寿命周期成本最优为原则,充分结合当地地形,尽量减少占地面积和土方挖填量,降低建筑高度。变电站各建筑物均按模块化预制舱形式设计,其中110 kV GIS采用户内布置,电缆出线,设置独立的GIS组合电器预制舱,舱内不设置起吊设备。为方便GIS设备运行检修可能涉及的吊装作业,舱顶做成可拆卸形式,并设置试验用“烟囱式”检修试验工艺口,便于安装试验时的工装及做耐压试验,将GIS组合电器预制舱高度由传统建筑的7 m左右降低至3.6 m左右;主变压器置于铝合金格栅结构的预制舱体内,舱顶不封顶,通过声屏障技术、电磁屏蔽技术降低变压器运行噪声和变电站电磁辐射,满足变电站绿色环保建设要求;变电站内设置环形消防车道,车道的净宽度和净空高度均大于4.0 m,满足消防车转弯半径要求,靠建筑外墙侧的消防车道边缘与预制舱体距离大于5 m,车道坡度小于8%;采用积木模块化双层立体布局设计,将二次组合设备预制舱放置于10 kV开关设备预制舱上方,形成上下立体结构,上下舱通过段焊和拼接螺栓紧固,高压电缆、低压电缆、光纤电缆经电缆竖井实现电气回路和通信回路连接贯通,配置上下楼梯通道,减少占地面积132 m²,全站建筑面积为1 067.34 m²,较传统变电站建设模式减少1 600 m²左右。节约土地资源,缩短建设周期和节省工程投资,降低了工程的建造能耗。

(3) 合理绿化

乐山龙口变电站绿化以节约资源、降低造价为设计原则,从站内总体上综合考虑,除满足变电站预制舱、建(构)筑物所必需的占地外,仅在建(构)筑物间隙、站内环形道路周围、电缆沟断面等土建的可操作空间布置简单易活的植草地坪,不铺设绿化管网。

2. 预制舱式变电站建筑节能设计

非金属模块化预制舱式变电站建筑节能设计包括合理的预制舱式建筑形态设计和预制舱围护结构节能设计。

(1) 预制舱式建筑形态设计

合理的建筑体型能够减少建筑物与外界的热量交换,在其他条件相同时,体型系数(建筑物与

室外大气接触的外表面积与其所包围的体积的比值)越大,单位建筑面积对应的外表面积越大,传热损失越大,对节能越不利。节能平面设计应尽量紧凑,设计时需要根据建筑的具体情况,争取最小的体型系数和优化的条件组合。乐山龙口变电站二次组合设备预制舱与10 kV开关设备预制舱形成的预制舱组合体是设备运行散热量最大的预制舱,控制好组合预制舱的体型系数,减少传热损失,有利于节能。经计算,组合预制舱的外表面积为626.3 m²,所包围的面积为1 270.6 m²,体型系数为0.49,参考GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》,建筑体型系数不大于0.5,故组合预制舱的形态设计满足要求。

此外,合理的屋面坡度既可以迅速排水和减小冬季屋面覆雪荷载,又使建筑造型不过于简单呆板,按照Q/GDW 11882—2018《预制舱式10 kV~35 kV一二次组合设备技术规范》的要求,本站预制舱均采用双坡屋顶结构,舱顶坡度不小于5%,以预防积水和积雪,同时做好舱顶防水,防水等级为I级。在预制舱内饰过程中,采用骨架式集成吊顶,可以形成良好的保温隔热层,美观大方,有助于舱内温度保持稳定,减少了空调器和通风系统的能耗。

(2) 预制舱围护结构节能设计

预制舱围护结构是隔离舱内外空间的屏障,通过设计合理的预制舱围护结构构造,优化调整围护结构的传热系数,充分考虑计及太阳辐射热的预制舱热工特性,可以有效控制热量在材料中的传递方向和速度,使预制舱充分散热或隔热,减少空调器、风机等环境控制设备的工作负荷,形成合理的舱内小气候,从而达到节能的目的。

变电站预制舱的围护结构包括舱体、舱顶、门窗和舱底等方面。由于本变电站为无人值守变电站,为达到良好的隔热保温效果,舱体不设窗户,因此本文重点研究舱体、舱顶和舱底的围护结构节能措施。

1) 预制舱体节能设计。目前预制舱体围护结构有金属与非金属两种。金属类型的预制舱存在耐腐蚀性差、低温脆断、高温传热快等缺陷,而以玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱,可以很好地克服金属预制舱的缺点,本变电站预制舱的舱体和舱顶全部采用玄武岩纤维复合预制件,这是一

种将玄武岩纤维作为混凝土改性掺料，以低碱快硬硫铝酸盐水泥作为胶凝材料，与高分子材料、砂、化合物等多种集料按特定比例混合搅拌后，高压喷射浇筑在用槽钢、钢筋制作成型的模具内，经24 h静置形成的纤维复合预制件产品，由于该预制件集中了高性能纤维、高分子材料和金属钢材的性能优势，使得以该预制件为预制舱体围护结构的非金属预制舱具有燃烧性能等级高、耐火性能长、防腐能力强和隔热性能好等良好物理性能^[8]。其层理结构如图3所示。通过优化调整各层厚度，可以将预制件综合传热系数控制在 $0.5\sim 5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 之间。

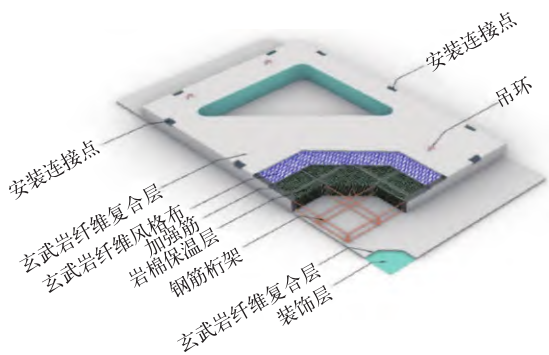


图3 预制舱玄武岩纤维复合预制件层理结构

预制舱式变电站舱内有大量电力设备，其与公共建筑和民用建筑以保温隔热为主要需求的热工特征不同，需要对不同功能的模块化预制舱区分对待，尤其是研究预制舱围护结构传热性能对预制舱能耗的影响效果，应充分考虑不同的预制舱内热源功率密度水平以及由此产生的热传递方向和环境控制设定温度等热工特征。

对110 kV GIS组合电器预制舱、电容器成套装置预制舱、接地变消弧线圈预制舱等具有较低功率密度水平的预制舱而言，围护结构传热以得热为主，传热方向为舱外向舱内传递，良好的保温隔热性能可减少舱外与舱内的热量交换，其节能效果随着围护结构的综合传热系数的减小而增强，且随舱内环境控制设定温度的降低而增强，因此预制件围护结构的综合传热系数应考虑低值，尽量控制在 $0.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 左右。对二次组合设备预制舱和10 kV开关设备预制舱等具有较高功率密度水平的预制舱而言，围护结构传热以散热为主，传热方向为舱内向舱外传递，隔热保温结构会阻碍舱内热量向舱外传递，其节能效果随着围护结构传热系数的增大而

增强，随舱内环境控制设定温度的升高而增强，因此预制件围护结构的综合传热系数应考虑高值，尽量控制在 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 左右。

2) 预制舱顶节能设计。虽然预制舱顶也采用与舱体一致的玄武岩纤维复合预制件作为围护结构，但是舱顶由于直接受太阳辐射面积大、时间长影响成为节能设计的关键部位，因此优化预制舱舱顶围护结构太阳辐射吸收系数，太阳辐射吸收系数越低，舱顶受太阳辐射热的影响就越小，预制舱的节能效果越明显。通过在舱顶受阳面涂刷高反射率隔热屋面涂料，可以将预制件太阳辐射吸收系数控制在0.1左右。

3) 预制舱底节能设计。由于预制舱底下方为混凝土基础电缆沟，空气对流速度较低，不论冬季还是夏季，舱底都无太阳辐照，因此舱底以保温隔热为主。龙口变电站舱底的结构为采用0.002 m厚度的钢板，中间为0.2 m高度的钢支架和空气夹层，其上铺设30 mm厚度的陶瓷防静电地板，综合传热系数为 $0.027\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 。此外，为了防止潮气从舱底缝隙进入舱体内，可采用喷涂发泡聚氨酯工艺，对预制舱底部进行整体防潮密封处理。

4) 预制舱节能综合设计策略。为提升节能效果，综合考虑玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的综合传热系数和太阳辐射吸收系数，通过同时优化综合传热系数和太阳辐射吸收系数，并按照预制舱内热源功率密度水平进行最优参数组合，详见表1。

表1 不同功率密度水平的预制舱围护结构最优节能参数组合

模块化预制舱名称	舱内功率密度水平	综合传热系数/ [W/(m ² ·k)]		太阳辐射吸收系数	
		舱体	舱顶	舱体	舱顶
110 kV GIS组合电器预制舱	低	0.5	0.5	0.1	0.1
电容器成套装置预制舱	低	0.5	0.5	0.1	0.1
接地变消弧线圈预制舱	低	0.5	0.5	0.1	0.1
二次组合设备预制舱	高	5	5	0.1	0.1
10 kV开关设备预制舱	高	5	5	0.1	0.1

可见，具有较低功率密度水平的预制舱应考虑增强围护结构的得热性能，具有较高功率密度水平的预制舱应考虑增强围护结构的散热性能，采用在舱顶受阳面涂刷高反射率隔热屋面涂料等技术，降低舱顶围护结构外表现太阳辐射吸收系数，可达到

最佳的节能效果。

结束语

对于模块化预制舱式变电站这种特殊的工业建筑群体，将建筑节能设计和使用经验应用到预制舱式变电站的设计中，可以达到较好的节能效果。此外，在满足预制舱内电力设备安全稳定运行的环境要求的前提下，调整优化空调冷量配置方案，提高舱体环境控制温度设定值，对舱内气流组织状态进行改善优化，并进行精确制冷控制，引入通风冷却技术，实现冷却风机与空调设备的联动控制，选用低损耗的主变压器和新型LED节能灯具等措施，也是有效的节能降耗手段，相关节能效果值得继续深入研究。[EA](#)

(收稿日期：2023-06-25)

参考文献

- [1] 蔡晶. 预制舱式变电站的设计与建造应用研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 407-413.
- [2] 孙建龙, 鲁东海. 基于预制舱的配送式智能变电站设计[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 43-47.
- [3] 盛晓云. 标准配送式智能变电站建设实践[J]. 通讯世界, 2014(1): 104-106.
- [4] 刘志斌, 姚建刚, 颜勇, 等. 变电工程全寿命

周期成本评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

- [5] 左涛, 张新太. 高性能纤维预制舱式智能变电站研究与应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(ZK1): 7-12.
- [6] 左涛, 朱西平, 蒋强, 等. 全模块化预制舱式变电站技术经济指标分析[J]. 电气时代, 2023(6): 98-102.
- [7] 朱涛, 毛建勤. 110 kV封周节能型变电站建筑设计[J]. 华东电力, 2009, 37(8): 1323-1326.
- [8] 李江成, 刘建戈, 张鹏宇, 等. 变电站数字孪生技术研究与应用[J]. 电气应用, 2022, 41(7): 29-36.
- [9] 张新太, 左涛. 高性能纤维复合材料预制舱的技术价值和发展举措[J]. 输配电观察, 2020(3): 83-84.
- [10] 张军. 预制舱类工业建筑节能技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [11] 左涛, 张新太. 智能变电站高性能纤维预制舱防凝露设计[J]. 宁夏电力, 2022(2): 24-30.
- [12] 燕飞飞, 何显江, 卢旭涛. 预装式户内GIS变电站预制舱设计探讨[J]. 机电信息, 2020(24): 1-3, 5.
- [13] 牛亮, 王沙沙, 李满春, 等. 智能变电站二次回路故障智能诊断技术研究[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 22-27.

