

变电站工程土方平衡优化设计与施工策略研究

张玉国

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 为了提升变电站施工中的土方利用效率, 本研究采用地形建模、分区计算与三维差异分析等方法, 对土方平衡进行系统研究, 并提出就地回用、中间料场布置与地下结构弃土调配等策略。研究结果表明, 通过优化设计标高、引入轻质回填材料及实施分阶段土方管理, 有效减少了不平衡挖填量, 降低了运输成本和施工干扰, 提升了施工组织效率与地基稳定性。

关键词 变电站; 土方平衡; 基础地形建模; 就地利用; 二次分配

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.027

0 引言

变电站是电力系统中承接输变电任务的重要设施, 其建设对周期控制、成本管理和工程质量提出严格要求。土方工程作为场区施工的基础环节, 占总工程量较大比重, 尤其在施工初期更加突出。对于地形起伏较大或地质条件复杂的站址, 土方挖填的组织与调配直接影响施工流程与运输效率。若设计不合理, 可能导致弃土和借土数量增加, 引发机械运转频繁、运输路线混乱、场内堆放不当等问题, 进一步干扰基础施工安排和施工进度。因此, 有必要对变电站土方工程中的平衡设计进行系统研究与优化。

1 变电站工程土方平衡计算方法

1.1 基础地形建模

基础地形建模是土方平衡计算的首要步骤, 目的是获取原始地貌高程信息。常用数字高程模型和无人机航测, 通过地面控制点、高精度 GPS 采集数据, 构建 5×5 m 或 10×10 m 栅格模型, 垂向精度 ± 0.05 m。无人机航测结合差分 GNSS, 可建三维模型, 高程误差 < 0.03 m。经三角不规则网格拟合, 在 AutoCAD 等平台使用, 需保证覆盖完整及地形变化区采样密度, 为土方计算提供基础数据。

1.2 分区计算法

分区计算法基于功能区域划分, 对各区的土方量进行独立计算, 从而提高计算效率与管理精度。变电站通常划分为主变压器区、开关设备区、控制楼区、道路区与绿化区等, 各区域的标高控制要求不同, 因此需要分别核算其挖方与填方量。该方法以“方格网法”最为常见, 适用于规则地块的土方计算。通过将场地划分为等间距方格如 5×5 m, 并提取每个方格四角的设计高程与现状高程之差, 即高差 h_i (单位: m), 正

值为填方, 负值为挖方。方格网法的体积计算公式如下:

$$V = \frac{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}{4} \cdot A \quad (1)$$

式(1)中, V 表示单个网格的土方量 (单位: m^3), $h_1 \sim h_4$ 为四个角点的高差值 (单位: m), A 为该网格的面积 (单位: m^2), 例如边长为 5 m 的方格, $A=25 \text{ m}^2$ 。通过逐一计算并汇总每个网格的体积, 即可得出对应区域的挖填总量。对于边坡、不规则地带或设计高程连续变化区域, 可采用“等高线法”作为补充。该方法以等高线之间的面积变化为基础, 计算公式为:

$$V = \frac{(S_1 + S_2)}{2} \cdot H \quad (2)$$

式(2)中, S_1 、 S_2 表示相邻等高线之间的面积 (单位: m^2), H 表示等高距 (单位: m)。等高线法适用于地形起伏大、断面变化复杂区域, 能提高边界及坡地部分的体积计算精度。结合方格网法和等高线法可实现对各分区土方需求的全面分析, 便于施工组织安排与分阶段平衡计划制定。

1.3 三维差异分析法

三维差异分析法依托 BIM 或 GIS 平台, 通过三维叠加现状地形与设计地坪, 直观输出各位置高差值及挖填体积^[1]。操作时将原始地形模型 (如 TIN、DSM) 与设计标高目标表面导入系统, 软件自动比对高程差, 生成挖填分布图 (红为挖方、蓝为填方、绿为平衡), 统计总挖方、总填方及净差值, 用于指导土方调配与弃土利用。还可生成动态报告, 结合进度模拟土方变化, 辅助机械调度与路径优化。

2 变电站工程土方平衡策略

2.1 就地利用与二次分配

在场地平整与基础施工中, 优先考虑原状土的就地回用, 不仅可降低土方运输成本, 还可提高施工效

率。原状土中含水率在12%至18%、颗粒级配连续性较好、无明显有机物污染的土体应优先用于基坑回填、站区基础下垫层和路面结构层压实。根据《建筑地基处理技术规范》规定,填方区压实度应不低于0.93,主变区及承重基础下宜达到0.95以上。对于含水率超过25%、粒径构成不稳定或液限高于50%的土体,如软粘土、膨胀土、淤泥质土等,应采用石灰粉稳定法或掺加粉煤灰进行预处理,经混合均匀、静置熟化后可用于绿化带、非承重区域或边角区域回填。工程现场建议配备1台25 kN落锤夯实仪,对各类处理土进行现场取样检验,确保回填质量符合设计要求。

2.2 设置中间料场与周转场

变电站施工因工序时序错配,需设中间料场与周转场实现土方阶段性存放与二次调配。选址优先站区边缘或备用区域,避免占用主作业面,保证总布置紧凑。按日土方作业量1 000 m³,周转场容量需满足三天高峰需求,场地面积1 500~1 800 m²。场内设排水沟及围挡防雨季积水与边坡冲刷,临时运输道路宽≥4.5 m、转弯半径≥12 m,满足20 t自卸车通行,且避开基础区与构筑物集中区,减少扰动。安排专人调度,优化倒运顺序与时间,减少车辆待命与重复堆卸,提升效率。

2.3 地下工程与填挖耦合优化

站区土方变化含地下结构开挖,这类构筑物虽分散,但挖方量占总土方20%~30%。通过合理调配,可将其弃土用于基础回填、主变区垫层、场坪整平,实现内部土方自循环。如110 kV变电站电缆沟,长260 m、宽1.2 m、深1.5 m,挖方468 m³,加排水沟等弃土共1 200 m³,就近转运至控制楼基坑、绿化区等回填,节省运输成本,避免弃土堆存干扰施工。另外,还需通过土方调度计划统筹挖填时间,确保挖方及时消纳;BIM模型预设区域编码,结合进度模拟调整施工时序,使土方流转路径与进度匹配。利用地面高差设自流路径或合理布临时转运机械,减少装卸与远距离回运。

3 变电站工程土方平衡优化措施

3.1 调整地坪高程方案

变电站场地往往存在一定的自然高差,若设计标高设置不当,容易造成大规模挖填不平衡,既增加土方量,又影响施工便捷性与后期沉降稳定性。在满足变电站接线高差、防洪控制和排水坡度的基础上,应充分利用现状地形进行高程优化。以某110 kV变电站为例,原设计地坪标高为5.00 m,现状平均地面高程为5.60 m,若维持原设计需整体挖方超过3 800 m³。经调整后地坪标高升高0.5 m,挖方量下降至2 200 m³,减少幅度达42%,同时填方量基本保持平衡,工程机械运行周期也明显缩短^[2]。

高程调整必须配合边坡设计与排水坡度进行协同优化,常见做法包括设置局部缓坡区、抬高非承载区域标高、增加雨水引流沟槽等。控制坡度宜在1%至3%之间,既保证地表径流顺畅排出,又避免高差突变影响基础稳定。

3.2 引入轻质回填材料

在土方工程中,对于大量填方但结构承载要求不高的区域,可采用轻质材料代替传统回填土,从而降低回填荷载、控制沉降量并减少原土挖取和远距离调运的需求。常用的轻质材料包括泡沫混凝土、膨胀珍珠岩、陶粒混凝土以及再生泡沫塑料颗粒等。以泡沫混凝土为例,其干密度一般为400 kg/m³至1 000 kg/m³,相比传统土壤密度约为1 600 kg/m³至2 000 kg/m³,可减轻回填自重达50%以上,尤其适合绿化区、电缆沟盖板上部、边坡回填等部位使用。

在实际工程中,膨胀珍珠岩因其粒径可控、无毒环保且导热系数低,广泛用于配电站房周边、站内道路边角区域的轻质填筑。材料干密度为300~500 kg/m³,压实系数为0.90左右,铺设厚度建议控制在0.3~1.0 m范围内,并分层夯实。选用轻质材料除节约土方量外,还可减缓因地基沉降或回填不均引起的构筑物裂缝风险。对于软弱地基区域,还可结合土工格栅或土工布进行复合支护,进一步提高整体稳定性。选材过程中需结合项目所在地气候条件、材料来源、施工便捷性与耐久性进行综合评估,并在图纸设计阶段进行技术比选。

3.3 考虑施工便捷与能耗

在土方施工的组织阶段,通过优化运输路线与设备调度,降低施工能耗、缩短工期,并有效控制碳排放。土方调运一般以装载机与自卸车为主,传统模式下因运输路径未规划清晰,常出现车辆绕行、堆土点临时变更等问题,造成能源浪费与作业效率下降。因此,在施工总平图中提前设定运输主线与支线网络,主运输道路宽度不小于4.5 m,路面应进行碎石压实处理,坡度控制在8%以内,以满足自卸车正常运行条件^[3]。

同时,采用新能源设备或节能机械可进一步提升作业效能。目前,部分大型土建单位已投入使用电驱动装载机和LNG动力自卸车,其单位运行成本下降约15%,碳排放降低20%以上。对于场地边角或短距离倒运区域,也可引入履带式小型运输车或电动铲车,减少燃油使用。为提升作业效率,应采用智能调度系统或手持终端进行运输车辆调度,合理安排施工顺序与土源调配路径,避免“无效运输”。

此外,合理安排施工时间也是降低能耗的重要手段。在高温季节,应将高强度土方作业安排在清晨和傍晚,降低设备油耗和人员疲劳风险。综合实践数据

显示,通过路径优化、设备改进与调度集成,土方调运效率平均可提升 20% 以上,整体能耗下降约 10%^[4]。

4 变电站工程土方施工管理要点

4.1 施工测量与放样

施工测量与放样是变电站土方工程施工的基础环节,其精度对后续土方开挖、填筑的准确性及整体工程质量有着直接影响。正式开展测量工作前,需做好充分准备,包括深入研读设计图纸,明确各功能区域的边界线、高程控制点及关键构筑物的定位参数,确保准确把握工程设计意图。同时,要对全站仪、水准仪等测量仪器进行严格校验与调试,保障设备精度符合工程标准,防止因仪器误差引发测量偏差。

测量放样时,应先构建统一的场区平面控制网和高程控制网。平面控制网需结合站区地形与工程规模,合理布设控制点,保证各控制点间通视良好且点位稳定,为后续分区测量提供基准。高程控制网则要与国家高程基准或指定水准点联测,形成闭合或附合水准路线,确保全场区高程系统一致。具体放样操作需遵循“由整体到局部、由高级到低级”的原则,先确定场区主要轴线和边界线,再逐步细化到各功能分区的具体轮廓和高程控制点。对于挖填方边界、边坡坡顶线与坡脚线等关键部位,需多次复核以保证放样精度,避免因边界偏差导致土方量计算错误或边坡成型不符合设计要求。

4.2 土质分类与分层填筑

为确保填方区域结构稳定与承载力满足要求,必须严格执行土质分类管理与分层填筑制度。施工现场根据土壤物理性质进行筛选分类,常见分类包括粘性土、砂类土、碎石混合土与不良土质如淤泥、膨胀土等。各类土体应分堆堆放并作标识,不得混杂使用。优质粘性土与砂类土可用于基础下垫层与主变区回填,碎石类材料适用于道路结构层回填,而不良土质须经过稳定处理或外运弃置。

填方作业需要分层进行,每层松铺厚度控制在 200~300 mm,压实后厚度控制在 150~200 mm。压实机械根据填土类型与回填面积合理配置,如使用 10 t 以上振动压路机、6 t 碾压轮式夯实机或夯板振动器等。每一层填土完成后进行压实度检测,主变区、设备基础区压实度不低于 0.95,绿化区、道路侧边区不低于 0.90。压实度检测可采用环刀法或灌砂法进行,每 1 000 m² 取样点不少于 3 点,重点区增加至每 500 m² 4 点布置^[5]。

4.3 排水与边坡控制

变电站场地在施工期间设置完善的临时排水沟、截水带和集水井系统,引导地表径流及时外排,防止因积水引发边坡冲刷、基坑浸泡与设备基础沉陷。排

水沟宽度不小于 0.5 m,纵坡控制在 1%~3%,集水井间距根据地形与集水面积控制在 30~50 m 范围内,井深 1.0~1.5 m。井底铺设碎石过滤层,防止淤泥堵塞。

边坡开挖与填筑需结合地质勘察数据实施分级管控,根据土层性质差异动态调整坡率参数。填方区域优先选用级配良好的砂卵石或粉质黏土,分层碾压厚度不超过 30 cm,压实度达到 0.93 以上,边坡坡度按填方高度梯度控制:高度≤3 m 时采用 1:1.5,3~5 m 时放缓至 1:1.75,超过 5 m 时设置 1:2 的坡率并每 3 m 设置一道 2 m 宽平台。挖方边坡根据岩土体完整性确定坡比,中风化岩层采用 1:1,强风化岩层或碎石土层采用 1:1.25,纯黏性土层控制在 1:1.5 以内。对软弱夹层分布区域或边坡高差超过 3.0 m 的路段,必须配套强化防护措施:土工格栅加筋处理时,格栅铺设应深入坡顶 1.5 m、坡脚 2.0 m,搭接长度不小于 30 cm;挂网喷浆采用 $\phi 8$ mm 钢筋网(网格 20×20 cm)配合 C20 喷射混凝土(厚度 8~10 cm);砌块挡墙选用 MU 30 混凝土实心砌块,墙后设置 10 cm 厚级配砂石反滤层。所有边坡坡面均做台阶状修整,每级台阶高度 1.2~1.5 m、宽度 0.8~1.0 m,台阶边缘设置 5 cm 高混凝土拦水埂,埂内预留泄水孔(间距 2 m),既有利于坡面排水分流,也为后期植被恢复创造了种植平台。

5 结束语

本文全面探讨了变电站土方平衡设计与研究,从计算方法、平衡策略、优化措施到施工管理要点均进行了详细分析。通过精细化建模与计算、合理调配土方资源、优化设计标高及材料应用等举措,有效提升了土方工程的经济性与可行性。未来,需进一步融合数字化与智能化技术,如大数据分析、智能调度系统等,以实现土方平衡设计的动态优化与施工过程的精准管控,推动变电站工程向更高效、绿色、可持续的方向发展。

参考文献:

- [1] 杨晨.浅析钢铁厂中 110kV 变电站的结构设计要点[J].中国设备工程,2025(04):213-215.
- [2] 张涵宁,李春良.变电站土建工程设计优化策略分析[J].中国电力企业管理,2025(09):46-47.
- [3] 巨文亮.变电站土建施工中基础开挖分层支护技术的标准化应用[J].大众标准化,2025(06):80-81,84.
- [4] 周林虎,张秉来,祁兆鑫,等.基于 ArcGIS 地统计的同仁 330kV 变电站土方量计算[J].电力勘测设计,2022(10):70-76.
- [5] 华坤,姜波,陈轩,等.群基坑中地下变电站周边土方非对称回填的影响研究[J].建筑结构,2022,52(S2):2322-2326.