

一种基于三维模型的输电线路塔基设计方法

李美峰,冯运超,骆俊林,黄兴,梁明,李力

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:输电线路塔基设计方案一般是在二维图纸上标绘的,这种方式没有充分考虑地形起伏和周边环境对方案的影响,且工程量计算也存在偏差。三维设计技术在输电线路中的应用,为塔基设计提供了新的手段。文中分析了塔基设计的工作内容,提出了一种基于三维模型的塔基设计方法。首先,对比二、三维设计的优缺点后,确定了通过建立塔位三维虚拟小场景和大场景可更直观地评估和优化塔基设计方案;然后,基于参数化建模的思想,确定了塔基设计包含的模型类型并分析其建模规则;最后,利用塔基三维建模程序及GIS平台,以工程中实际塔位为例建立三维数字化模型,直观评估塔基设计方案的合理性并采取优化措施,其准确性较二维设计有明显提高。

关键词:塔基设计;三维数字化模型;小场景;大场景;参数化建模

中图分类号:TM 752 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0032-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220407

A Design Method of Tower Foundation Based on Three-dimensional Model for Transmission Line

LI Meifeng, FENG Yunchao, LUO Junlin, HUANG Xing, LIANG Ming, LI Li

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: At present, the design of tower foundation for transmission line is plotted on two-dimensional (2D) drawings, but this method does not fully consider the impact of topography and surrounding environment on the scheme, and there also exists deviations in the calculation of quantities. The application of three-dimensional (3D) design technology in transmission line provides a new method for tower foundation design. The work contents of tower foundation design are analyzed, and a new tower foundation design method based on 3D model is proposed. Firstly, after comparing the advantages and disadvantages of 2D and 3D design, it is confirmed that through the establishment of virtual 3D small scene and 3D large scene of tower location, the evaluation and optimization of tower foundation design scheme can be more intuitive. And then based on the idea of parametric modeling, the model types included in tower foundation design are defined and its modeling rules are analyzed. Finally, an actual tower location in the project is chosen to build a 3D digital model by using 3D modeling program of tower foundation and GIS platform. The rationality of tower foundation design scheme is intuitively evaluated. Compared with the 2D design, the proposed method can improve the accuracy obviously.

Key words: tower foundation design; 3D digital model; virtual 3D small scenes; virtual 3D large scenes; parametric modeling

0 引言

目前输电线路塔基设计方案一般是在塔基断面图和塔基地形图上标绘的,塔位范围为宽30~50 m的方形区域。设计单位对塔基区的塔腿、基础、防护

设施、水保措施进行设计和计算后,将图纸交付施工单位。由于线路工程大多位于野外,塔位范围内存在地形起伏且与周边环境关系密切,尤其是在设计水土保持方案时需要考虑塔基对周边100~200 m内外部环境的影响。因此,在塔位地形图和断面图上标绘的方式不能充分体现设计意图。在工程实施

的过程中,常常发生施工人员对塔基设计图纸理解偏差、设计统计工程量考虑不全面等问题。

近年来,三维数字化设计技术在输电工程中逐步推广应用。采用三维数字化的设计手段建立三维模型,可更直观地表达设计意图;通过数据库技术来管理和分析各种设计数据,可更快捷地查询各种信息,使数据统计更加精确从而提高设计效率和质量。因此,塔基设计也可利用三维数字化技术进一步提高设计质量。

国内对塔基设计及优化工作做了大量研究。文献[1]提出了一种塔基数字地面建立的方法。文献[2]研究了基于地理信息系统平台 ArcGIS 和可视化类库 VTK (visualization toolkit) 的等高线地形图三维可视化技术。文献[3]提出了一种基于 ObjectARX 应用程序的塔腿基础接腿自动配置以及塔基地形和断面自动绘制技术。文献[4]提出了基于软件开发包 Teigha 的塔基断面图自动绘制及长短腿自动配置技术。文献[5-9]分析和研究了塔基设计中的水土保持措施、环境保护措施和基础选型等内容。文献[10]研究了铁塔长短腿和高低基础配置的优化方法。文献[11]研究和应用了输电线路三维基础设计场景构建技术。上述文献虽然从不同层面研究了塔基设计的相关技术,但是没有涉及对整个塔基设计方案的综合评价,因而无法从根本上提升塔基设计的精细化水平。

目前输电工程塔基设计和施工所依据的文件仍是二维图纸。但是,基于三维数字化技术对二维成果进行验证并辅助完成方案优化是可行的。下面从二维设计的薄弱点入手提出一种基于三维模型的塔基设计方法。该方法从建模规则和软件架构两个方面出发,首先借鉴参数化建模的思路,建立塔基设计主要元素的三维数字化模型体系。然后,基于开源的三维平台,开发了一款塔基设计三维建模软件。最后,针对工程中实际塔位进行建模,验证并分析了三维数字化技术应用于塔基设计的准确性与合理性。

1 塔基设计主要内容

结合工作过程分析,塔基设计主要的工作内容如表 1 所示。

表 1 塔基设计工作内容

步骤	项目	工作内容
1	提资整理	勘测提资和电气提资
2	基础数据组织	制作基础模板、铁塔模板、材料模板
3	塔腿组合设计	铁塔长短腿配置
4	基础设计	基础计算与配置
5	水土保持设计	确定水土保持措施及工程量
6	施工方案设计	确定施工技术方案和要点

输电线路塔基设计的最终成果主要是以图纸的形式体现,其常规格式如图 1 所示,其中包含铁塔使用条件、塔腿配置、基础配置、地形地貌描述、施工说明、水土保持设计等模块。

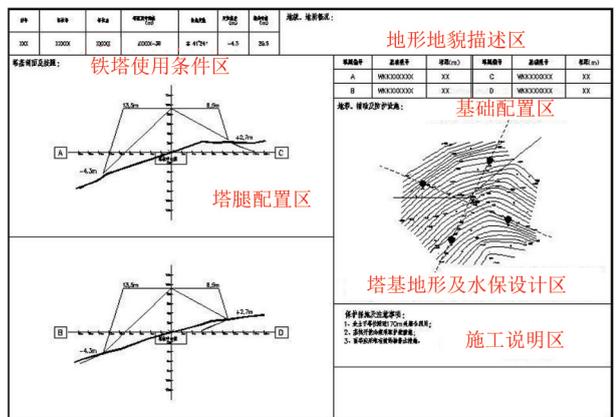


图 1 塔基设计二维成果

2 塔基设计优化的技术方案

2.1 二维设计的缺点及对策分析

从图 1 可以看出,用二维图纸描述塔基设计方案存在以下缺点:

1) 空间位置关系表达不直观

二维图纸只能表达塔腿方向剖面 and 地形平面中地物模型的相对位置关系,当地形起伏较大时,平面表达方式不够直观明确。另外,当塔基范围内修筑防护措施时,断面图上只能反映塔腿方向的相对位置关系,超出断面则无法准确测量。

2) 工程量计算与实际存在差异

由于塔基设计过程中的基面土石方、基础外露、防护措施工程量均需计入地形影响,而二维图纸只能从平断面上进行简化计算,容易造成工程量与实际发生量存在差异。

3) 塔位与环境的关系表达不全面

从宏观来看,塔基是线路工程的一连串节点。

当需要对线路工程进行总体评价时,这种一塔一图的表达方式不能体现出线路工程在整个通道范围内对周边环境的影响。

针对二维设计的缺点,三维数字化技术可以利用二维设计的数据建立三维模型,从而直观表达模型之间的位置关系,还可进行距离测算;而地理信息系统(geographic information system, GIS)平台可在更大范围内体现整个工程在现实世界中的位置。因此,提出基于当前广泛应用的三维数字化技术和 GIS 平台,根据塔基设计二维成果数据建立塔基范围内三维小场景和三维 GIS 平台中大场景的优化方案,如图 2 所示。

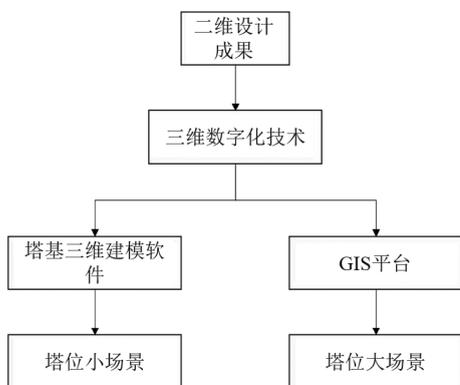


图 2 塔基三维设计优化方案

2.2 塔位小场景优化方案

塔位小场景方案指通过三维建模软件将塔基区工程实地测量范围内的主要设施进行建模,通过三维模型表达塔位地形、塔腿、基础、防护措施、地质条件等信息,如图 3 所示。这种方式可直观体现出各种设施的空间位置关系,同时还能进行距离测算,当方案不合理时,重新修改二维设计方案,从而综合评价塔基设计方案的合理性。

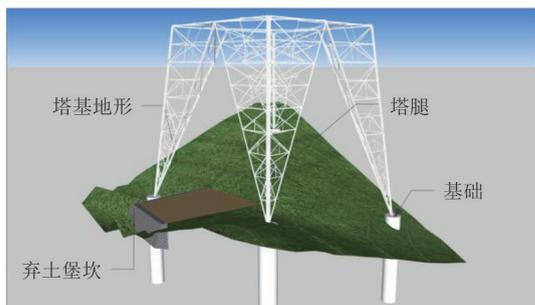


图 3 塔位小场景构建

2.3 塔位大场景优化方案

由于塔基工程测量范围一般不超过 50 m,因此在考虑 100~200 m 更大范围的场地因素时,必须借

助 GIS 平台进行建模分析。塔位大场景方案即通过 GIS 系统可视化技术将塔基三维模型与 GIS 平台相结合,在输电线路全景模型中仿真模拟塔基设计方案,从而综合评价方案的合理性,如图 4 所示。



图 4 塔位大场景构建

3 塔基设计三维建模流程

结合图 2 的技术路线,对塔基设计三维建模流程如下:

- 1) 完成塔基二维设计,形成基础配置成果。
- 2) 构建铁塔塔腿、基础、防护设施的参数表。
- 3) 输入基础配置成果(包含排位信息、塔腿配置、基础配置等)。
- 4) 输入勘测提资的塔位地形数据和岩土信息。
- 5) 调用参数表,通过基础配置成果和勘测数据生成塔位小场景。
- 6) 在塔位小场景中,根据设计要求添加防护措施模型,通过空间距离分析确定防护措施合理性。随后确定其他水土保持措施和施工措施,统计工程量。
- 7) 当方案不合理时,返回步骤 1 重新设计。
- 8) 进入 GIS 平台,将塔基设计三维模型经坐标变换后加载到大场景中,随后完成方案评价。不合理的方案重新返回步骤 1 进行调整。

工作流程如图 5 所示。

4 塔基设计建模规则

塔基三维设计的主要元素包括地形、地质、塔腿、基础和防护设施。参照国家电网公司《输变电工程三维设计建模规范》^[12]的规定,三维模型应描述类型、空间位置、几何尺寸信息和材料属性,尽量采用参数化建模。下面分别分析各种要素的建模规则。

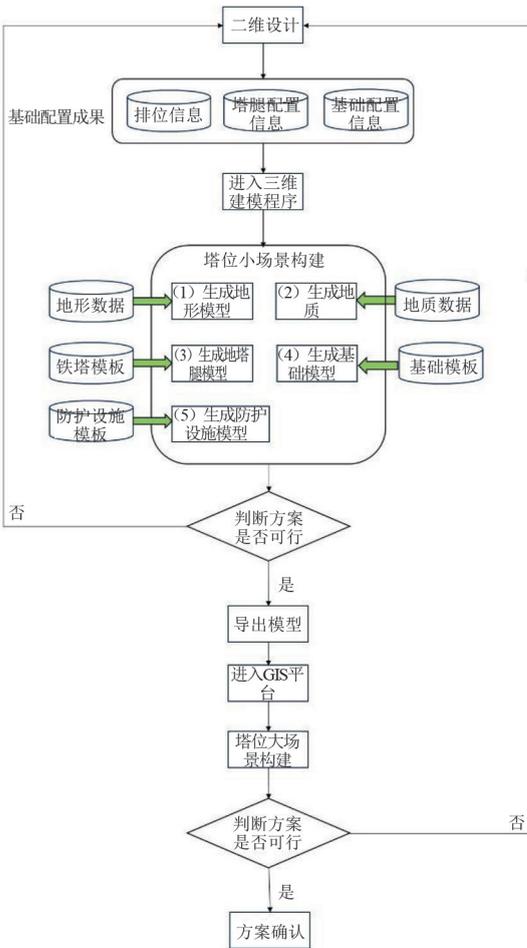


图 5 塔基三维设计工作流程

4.1 塔基地形模型

由于塔基地形图是由一系列离散高程点和等高线组成的测绘数据,不含绝对坐标,因此不属于涉密资料。塔基地形图的文件格式一般为 *.dwg 或 *.dxf,通过格式转换可将其转换为数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据文件,利用程序生成三维地形模型。图 6 为通过等高线拉伸形成的地形曲面模型。

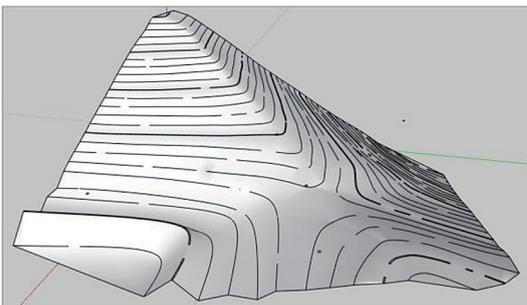


图 6 塔基地形图三维建模示例

4.2 地质模型

塔基地质模型主要用于体现 A、B、C、D 4 个接

腿下的岩土分层信息,主要参数为塔腿序号、岩土类型、岩层厚度,其中地质的岩土类型和岩层厚度根据岩土专业提资来确定。表 2 展示了某个常规塔位各塔腿的岩土分层信息。

表 2 某塔位各接腿岩土分层信息

A 腿		B 腿		C 腿		D 腿	
岩土类型	岩层厚度/m	岩土类型	岩层厚度/m	岩土类型	岩层厚度/m	岩土类型	岩层厚度/m
普土	1	普土	2	普土	3	普土	4
坚土	4	松砂	6	松砂	6	坚土	1
松砂	1	岩石	3	岩石	4	松砂	2
岩石	2					岩石	1

由于现场勘测时,地质专业一般只提供 4 个塔腿位置的地质分层信息,而构建三维模型需要反映整个塔基范围内的地质分层情况,因此接腿之间的区域通过插值计算,从而形成分层的地质三维模型,如图 7 所示。

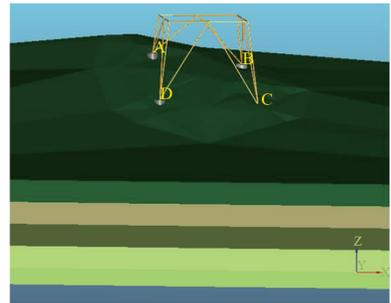


图 7 塔基地质模型三维建模示例

4.3 基础模型

输电线路常用的桩基、大板、承台桩等基础形式,均可通过参数化构建。以桩基础为例,其参数包括桩基全高 H 、直段高度 H_1 、扩底斜段高度 H_2 、扩底直段高度 H_3 、基础立柱直径 d 、扩底直径 D ,三维模

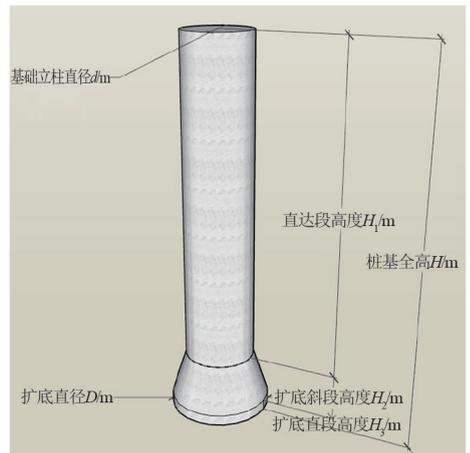


图 8 桩基础三维模型参数

型及参数如图 8 所示。另外,直接读取基础 *.mod 文件也可获取基础尺寸信息。

4.4 塔腿模型

通过输入塔腿的三维模型参数包括塔型、单面坡度、变坡口宽、变坡上折减高度、呼高、接身高、接腿高等,即可构建塔腿模型,其参数如图 9 所示。另外,直接读取铁塔 *.mod 文件也可获取接腿信息。

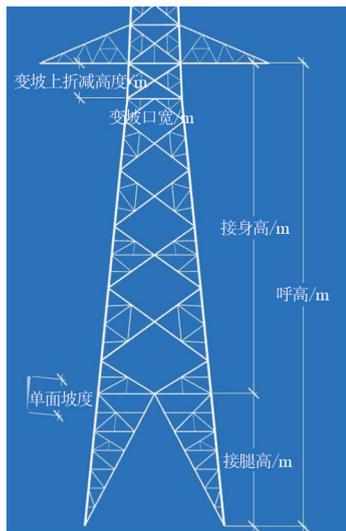


图 9 塔腿三维模型参数

4.5 防护措施模型

4.5.1 参数构建

防护措施主要包括堡坎、护坡、排水沟、防撞桩、挡土墙等,都可通过参数构建。

1) 排水沟建模参数如图 10 所示,包括上口宽度、下口宽度、锁口宽度、深度、壁厚等。

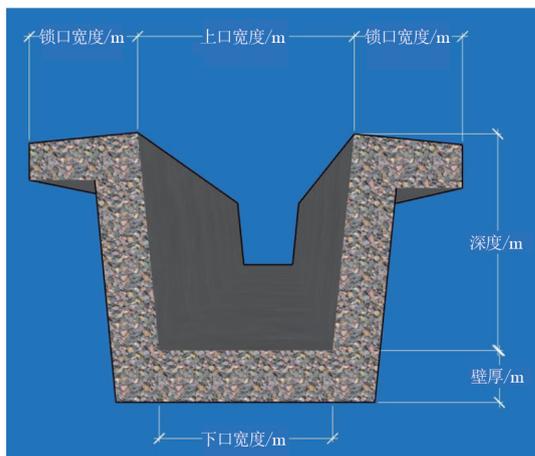


图 10 排水沟建模参数

2) 护坡、堡坎、挡土墙建模参数如图 11 所示,包括型号、外露高度、基脚埋深、基底逆坡高度、基底

宽度、墙顶宽度等。

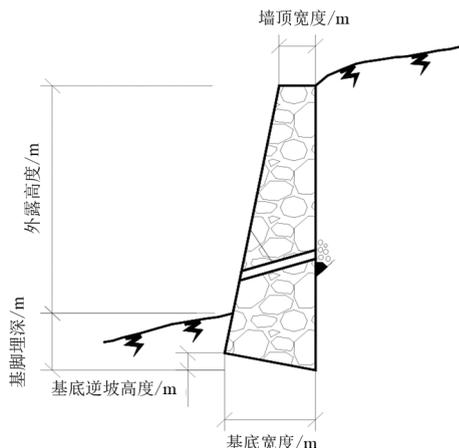


图 11 护坡、堡坎、挡土墙建模参数

3) 防撞桩建模参数如图 12 所示,包括外露高度、基脚埋深、截面宽度、截面长度、间距等。

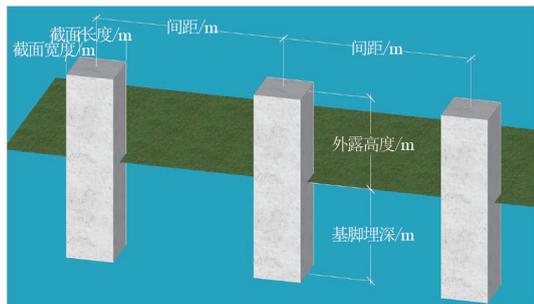


图 12 防撞桩建模参数

4.5.2 建模方法

防护措施按模型的组成要素和表现形态可分为节点类和路径类。模型的建模参数对应设施类型,空间位置控制参数按节点和路径分别对应设置节点和开放多线段。在三维建模软件中以模型参数为基元,以空间位置控制参数为设计表达,即可实现防护措施的参数化建模。

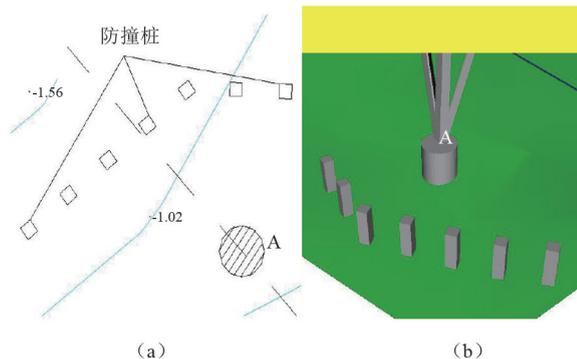


图 13 防撞桩建模方法

防撞桩三维建模采用节点类绘制法,按照节点布置单个防撞柱的位置,如图 13(a)所示;程序根据

尺寸参数自动完成建模,如图 13(b)所示。

护坡、堡坎、排水沟、挡水墙三维建模采用路径类绘制法,按照拐点绘制路径,如图 14(a)所示;程序根据截面尺寸参数自动完成建模,如图 14(b)所示。

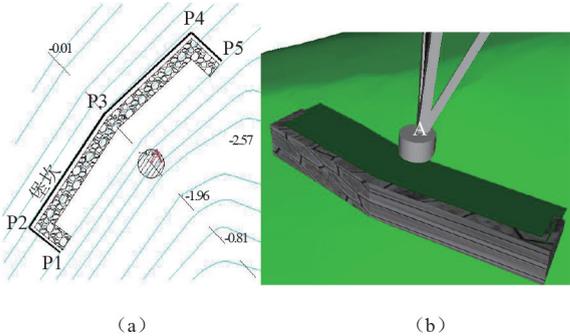


图 14 护坡、堡坎、排水沟、挡水墙建模方法

4.6 塔位大场景地理信息模型

通过在 GIS 平台加载 DEM 数据和数字正向影像图(digital orthophoto map, DOM)数据,可构建包含整个线路工程和塔位的三维地理信息模型。GIS 平台选择易智瑞(北京)软件研发中心有限公司发布的 ArcGIS 10.7 系统^[13],该系统具有突出的数据处理能力和兼容性。由于所提研究的目的是完成塔基设计方案的综合评估,仅使用网络公开的高程和影像数据即可满足要求,而不需要高精度的 DEM 和 DOM 数据等涉密资料,因此该系统不存在涉密问题。

5 软件实现方案

5.1 程序架构

行业内尚没有专门用于输电线路塔基设计三维建模的通用软件,因此在开源平台的基础上,自主开发了一款输电线路塔基设计三维建模软件。该软件可实现塔位小场景的构建,同时还可导出铁塔、基础、防护设施的三维模型。由于塔位小场景采用局部坐标系,因此需经坐标变换才可将模型加载到 GIS 平台构建的塔位大场景中。三维建模软件的程序架构主要分为功能组件、平台组件和基础技术组件 3 部分,如图 15 所示。

图 15 中的基础技术组件提供软件的必要技术支撑。其中,Open Cascade 是一个专业的几何构型软件,适用于各类参数化零部件的建模,这里使用

Open Cascade 构建塔腿、基础和防护设施等。VTK 是一个网格操作库,用于将地形图 *.dwg 文件进行格式转换,实现地形的三维建模以及挖填方操作。SQLITE 是用于管理模型的数据库平台。BCGControl 是一个控件库。

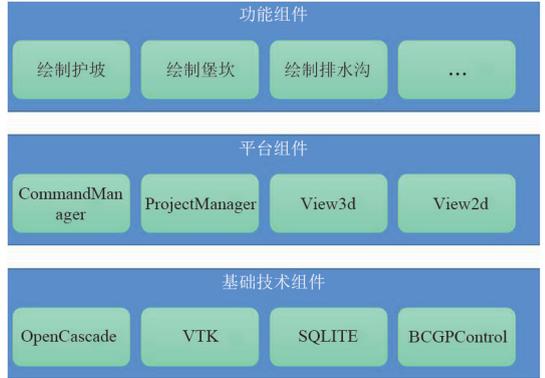


图 15 塔基设计三维建模软件架构

平台组件为软件提供基础功能,比如命令管理、工程管理之类。主要服务于交互操作,可满足二三维联动、多窗口应用的操作需求。

功能组件即软件功能模块,所有基于界面的设计交互均通过功能组件封装和实现,并提供建模、导出模型和测距等功能。

通过分析与塔基设计相关的要素,构建全过程的塔基设计数字化模型。模型通过参数驱动,数据分布存储在底层数据库中。塔基设计的数据结构是通过输入数据的解析,逐步形成分层级的塔基设计数字化模型。主要层级包括工程级、塔位级、方案级,如图 16 所示。

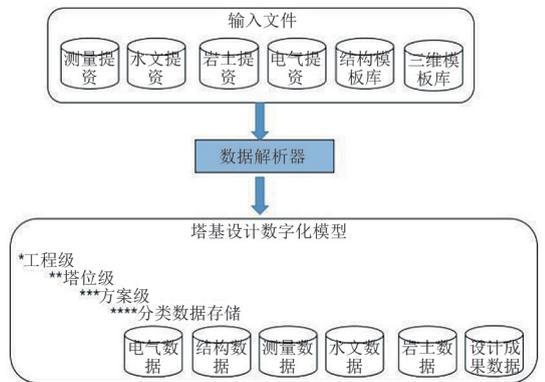


图 16 塔基设计数据结构

5.2 程序界面

该软件采用一档多视的界面布局,可以同时查看一个塔基的俯视二维图、剖面图以及三维视图。

软件功能遵循二三维实时联动的原则进行功能开发,以俯视二维图作为操作核心,以三维及剖面图作为辅助设计视图,帮助设计人员实时检查自己的设计效果。图 17 为程序界面。

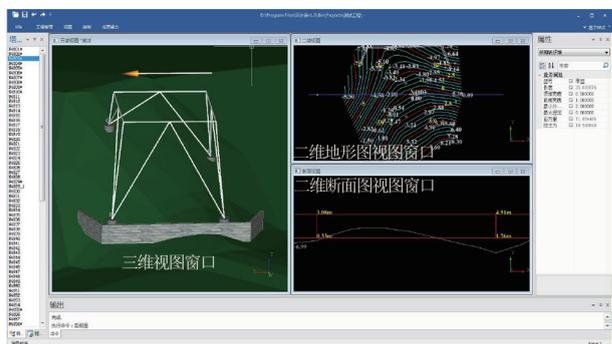


图 17 软件二三维联动界面示例

5.3 操作方法

塔基地形、地质、塔腿和基础模型可直接通过导入勘测提资和配置成果表批量生成。防护设施建模可通过设计人员在软件的二维地形图视口中绘制路径并修改截面参数完成。

6 工程应用实例

下面以某山区线路工程为例,对三维建模方法进行验证。某塔位位于山脊顶部,A腿位于山脊后侧斜坡,坡度为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$;C腿位于山脊前侧斜坡,坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$;B、D腿位于脊顶,坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。设计采用人工挖孔桩基础,配置成果如表 3 所示。

表 3 某塔位塔基设计成果

腿号	腿长/m	基础型号	防护措施
A	20	WKZ16090	
B	17	WKZ16080	弃土堡坎
C	18	WKZ16080	
D	12	WKZ16090	

由于余土外运困难,设计方案经评估后采取在 C 腿左侧约 4 m 外修筑弃土堡坎的措施,堡坎外露 1.2 m,埋深 0.8 m,长 20 m,二维设计地形如图 18 所示。

将二维设计的成果数据导入三维建模软件中,然后根据二维设计图在程序中绘制堡坎模型。点击堡坎模型,软件自动生成剖切断面和属性信息,如图 19 所示。从图中可以看出,堡坎右侧(黄色方

框内)已埋入土体中,因此需要对方案进一步优化。

重新调整堡坎的路径和露高,使其断面更加合理,如图 20 所示。堡坎长度从 20 m 减小到 15 m,露高从 1.2 m 调整为 1.5 m。

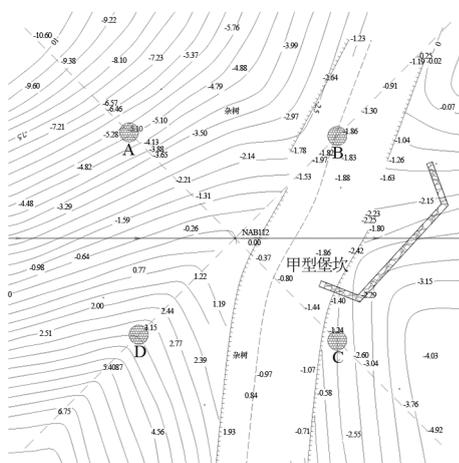
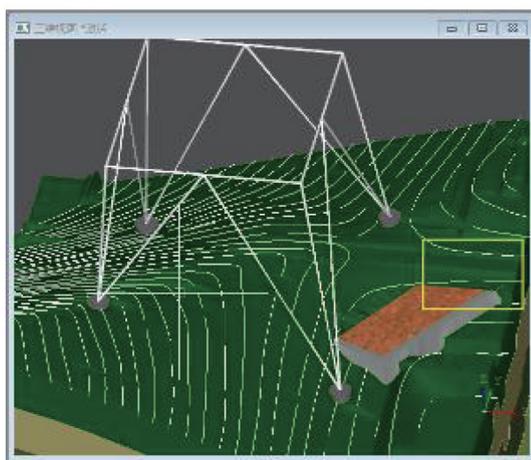
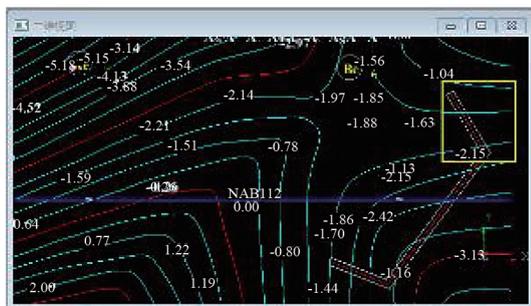


图 18 二维设计地形



(a) 三维视图窗口



(b) 三维视图窗口

图 19 根据二维设计三维建模成果

塔位小场景建模完成后,将模型导出,加载到 ArcGIS 平台中。从三维地图视口可以看出,塔位处于山脊,两侧不适合堆积弃土,修筑堡坎的位置具有合理性和唯一性,如图 21 所示。

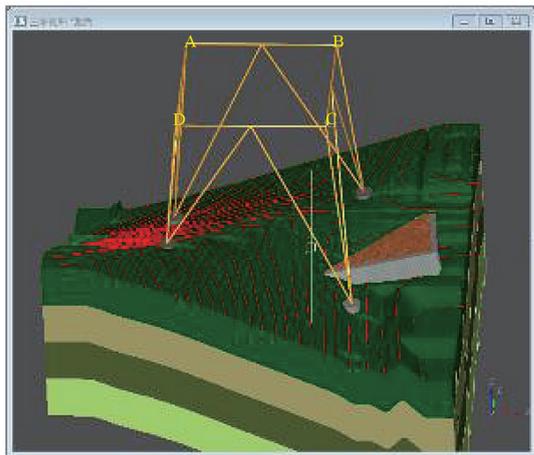


图20 三维建模成果调整

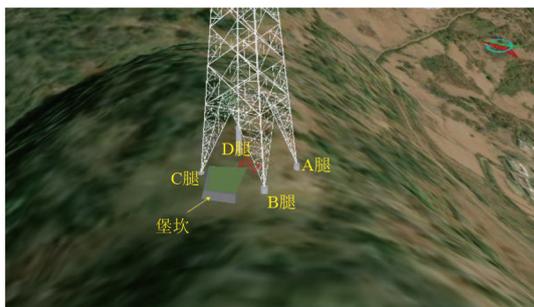


图21 模型加载到GIS平台

综上所述,经过塔位小场景调整和大场景综合评估,优化后的方案更加合理准确。

7 结论

上面基于三维数字化技术,将塔基设计成果转化为三维模型,实现从“二维图纸绘制”到“三维优化设计”的转变。采用二三维联动设计和三维场景仿真模拟的技术,基于二维设计数据自动建立三维模型,辅助设计人员全面分析塔基设计的合理性和可行性,从而提高设计质量。

但在GIS平台中批量加载模型时,考虑到模型精度和GIS平台的高程数据的精度可能相差较大,这时需在每基塔附近(约100 m范围)地形进行修正和平滑处理。这一地形修正技术还在研究中。

另外,目前塔基设计三维模型仅能作为方案优化和展示,后期还需研究将塔基设计数字化成果的信息传递至建设管理领域的技术以及数据交互方式^[14-15],实现塔基设计三维模型的导出,并需要提供给相关单位进一步应用。

参考文献

- [1] 杨景胜. 输电线路塔基数字地面建立的研究与实现[J]. 科技创新导报, 2012(5): 112.
- [2] 苏智剑, 王瑞, 朱高杰. 基于 ArcGIS 和 VTK 的等高线地形图三维可视化研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(3): 42-45.
- [3] 侯晓燕, 崔强, 鲁先龙, 等. 输电线路高低腿杆塔基础配置策略及软件研发[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1917-1921.
- [4] 王轶, 房正刚, 金欢, 等. 基于 Teigha 的塔基断面图自动绘制及长短腿自动配置技术[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 1013-1017.
- [5] 刘旭, 范宇, 王星, 等. 输电线路塔基工程中水土保持措施的研究[J]. 资源节约与环保, 2017(8): 100-103.
- [6] 郭晓俊. 输电线路工程山区塔基水保措施经验总结[J]. 机电工程技术, 2019, 48(4): 193-196.
- [7] 王卫. 输电线路杆塔及基础设计中的环境保护措施[J]. 西北水力发电, 2005, 21(S1): 25-26.
- [8] 王高益. 输电线路的环保设计[J]. 四川电力技术, 2007, 30(5): 52-54.
- [9] 程智余. 浅析山区输电线路塔位选择及基础选型设计[J]. 工程与建设, 2015, 29(4): 511-521.
- [10] 薛乐. 输电线路铁塔长短腿与高低基础配置的优化研究[D]. 吉林: 吉林建筑大学, 2015.
- [11] 王轶, 马潇, 金欢, 等. 输电线路三维基础设计场景构建[C]//第三届智能电网会议论文集. 北京: 中国电力科学研究院有限公司, 国网电投(北京)科技中心, 《电信科学》杂志社, 2018: 419-422.
- [12] 国家电网有限公司. 输变电工程三维设计建模规范第2部分: 架空输电线路: Q/GDW 11810.2—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [13] 易智瑞(中国)信息技术有限公司. 易智瑞地理信息系统 10.7 产品白皮书[EB/OL]. 北京: 易智瑞(中国)信息技术有限公司, 2020.
- [14] 国家电网有限公司. 输变电工程三维设计模型交互规范: Q/GDW 11809—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [15] 国家电网有限公司. 输变电工程数字化移交技术导则第2部分: 架空输电线路: Q/GDW 11812.2—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

作者简介:

李美峰(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计及数字化设计研究。

(收稿日期:2021-12-02)