基于三维设计的输电线路工程造价优化

孙梦云，夏淦健

（湖北省华网电力工程有限公司重庆分公司，重庆 401147）

摘要：三维设计利用高性能计算机三维建模软件进行输变电工程整体规划设计，以三维直观模型、传统二维设计图纸等多种方式输出设计成果，满足各种工程成品输出要求，响应后续电网建设与运行管理的需求，有利于提升电网工程的全寿命周期内安全水平，是建设智能电网的重要手段。以某水电厂送出220 kV 线路工程为背景，分析了三维设计在架空输电线路勘察设计中的作用，并在三维模型中用数据量化了交叉跨越的距离，通过对比可行性研究及初步设计阶段二维设计与三维设计在路径优化、工程量统计及造价控制方面的差异，总结三维技术的具体优化效果，实现路径及工程造价的优化。

关键词：三维设计；输电线路工程；造价优化

Cost optimization of transmission line design based on Three-dimensional design

SUN Mengyun, XIA Ganjian

(Hubei Huawang Electric Power Engineering Co., Ltd., Chongqing Branch, Chongqing 401147, China)

Abstract: Three-dimensional design using high-performance computer 3D modeling software to design the overall design of power transmission and transformation engineering, output design results in various ways such as 3D visual model and traditional 2D design drawings, meet the output requirements of various engineering products, and respond to subsequent power grid construction. The need for operational management is conducive to improving the intrinsic safety level of the grid project throughout its life cycle and is an important means of building a smart grid. Based on the 220 kV transmission line project of a hydropower plant, the achievable role of 3D design in the survey and design of overhead transmission lines is analyzed . The crossing distances are quantified in the 3D model. By comparing the differences between 2D and 3D designs in the feasibility study and preliminary design stages in terms of path optimization, quantity statistics, and cost control, the specific optimization effects of 3D technology to achieve the goal of optimizing the path and project cost is summarvized.

Keywords: three-dimensional design; transmission line; cost optimization

0 引言

随着计算机技术在各个领域中的应用[1-2]，一大批新型技术不断涌现[3-5]，三维设计技术在这些新型技术中脱颖而出。借助计算机中的三维设计软件，三维设计技术能够将设计者所想象出的元件模型生动逼真地呈现出来，使产品生产以三维模型为指导基础，大大提高了产品的自身性能。如今，三维设计技术已经在工程设计领域中得到了广泛应用[6]，并发挥着不可替代的作用。基于三维设计技术开展输电线路规划设计，既是电力系统发展的趋势，也是时代进步的必然。

三维设计利用高性能计算机三维建模软件

进行输变电工程整体规划设计，以三维直观模型、传统二维设计图纸等多种方式输出设计成果，满足各种工程成品输出要求，响应后续电网建设与运行管理的需求，有利于提升电网工程的全寿命周期内安全水平，是建设智能电网的重要手段[7-8]。

本文以某水电厂送出220 kV线路工程为背景，分析了三维设计在架空输电线路勘察设计中的作用，并在三维模型中用数据量化了交叉跨越的距离，实现了路径及工程造价的优化。

1 三维设计在线路工程中应用的现状

目前，在电厂和变电站工程中，三维设计手段已经被广泛采用和接受，但输电线路的三维设计因工程跨度大、基础地理信息数据获取手段有限等因素制约，起步相对较晚。在路径规划设计中，虽然部分采用三维GIS系统辅助，但仍有很多工程使用矢量地形图等平面数据进行设计；杆塔定位基本上采用二维平断面方式，设计成果以二维图形式呈现，力学数学模型也基于该模式简化，通过设置裕度控制计算准确度；绝缘子串等金具部件设计主要采用二维组装图等方式提交设计成果；在结构设计方面，杆塔的钢结构设计需要采用有限元分析，一般采用三维空间模型，但设计成果仍以二维形式呈现；基础部分的设计工作主要以二维施工图作为最终的设计成果进行提交。综合看来，输电线路设计工作绝大部分仍停留在二维设计阶段，基于二维的计算机辅助设计技术（CAD）仍是目前输电线路设计的主要手段。

我公司自2015年开始应用北京道亨公司开发的三维设计平台，同时结合自主开发的输电线路优化选线平台，该平台包含金具三维组装系统、耐张塔跳线计算程序、孤立档及进出线档计算程序、塔头间隙计算程序、脱冰断线不平衡张力计算程序、电磁环境计算程序和进出线档三维校验程序等，在可行性研究、初步设计及施工图设计阶段均取得良好的应用效果。以统一的数据模型与开放的平台架构为基础，以工程数据库为核心，以三维技术为手段，具备从各阶段到施工图的二维-三维一体化设计功能，包含路径规划、金具串组装、纵断面设计等；与选线平台和GIS系统实时联动，符合国网数字化移交要求。主要体现为：

（1）提供直观的设计场景和三维设计成果

输电线路三维设计能够为设计人员提供逼真的现场环境，与平断面图隐晦的表现方式不同。设计人员在三维场景下能够直观地感受到所设计工程的实际情况。因采用三维设计技术，设计成果由二维图纸转化为三维模型数据，对确定输电线路后期的施工组织方案、线路运维及发生灾害后的抢险工作具有深远的影响。

（2）建立更加精确的空间数学模型

三维设计视图能够准确地描述导地线、金具的空间位置关系。以此为基础建立的力学数学模型能够提供更为准确的计算结果。相较于以投影近似方式计算的二维设计，大幅提升了设计准确度。能够在可行性研究、初步设计阶段更精确地进行方案比选，使工程量估算与概预算编制更为准确。

（3）提高空间电气间隙校核准确度

以三维空间数学模型计算结果为基础，能够得到带电设备更为准确的空间姿态。同时，利用三维空间量测技术检验电气间隙，能够最大程度上控制电气间隙的准确度，如在排列方式变换时各相导线相间距离、不同气象条件下跳线线长及电气间隙校验等情况。尤其是现在线路走廊愈发紧张时，通过准确的空间距离校核，既能提高设计准确度，又能降低工程造价，对提升工程设计能力具有重要的意义。

三维设计平台的开发与应用，将为国家电网公司输变电工程三维设计的顺利开展铺平道路，有力促进输变电工程设计手段的更新，实现输变电工程三维设计成果的标准化和规范化，推

广三维设计技术的应用，进一步提升设计质量和效率。

2 工程造价管理存在的问题

2.1 工程造价数据的准确性

在传统的二维设计图纸中，设计数据属于基础数据，工程量统计依赖人工计算二维图纸的投影数据，需要依据计算规则进行工程量计算。造价人员的工作量较大，中间过程容易出现漏算、多算等问题，会直接影响工程造价数据的准确性。

2.2 缺乏精细化的管理手段

传统造价管理模式中，精细化技术手段较为匮乏，容易导致工程各阶段造价差异较大，难以控制。此外，工程造价随着建设阶段的不同，存在正常的动态变化，二维设计难以动态关联设计变更与造价数据。因此，需有更精细化的技术管理手段优化线路工程造价。

3 在电网建设中三维设计的前景及成果应用

3.1 三维设计在全寿命周期管理方面的应用

三维数字化设计平台融合了标准规范、智能辅助、海量图库、专家分析、协同工作、自动出图、历史继承等一系列专业特点，大幅提升了输电线路工程全寿命周期管理的精益化水平。

1）标准规范。根据实际工程需求，对于新建线路，不同电压等级可选择相对应的最新规范；对于老旧线路，校验时也可以选择相对应的旧版设计规范。

2）智能辅助。根据线路实际情况，可对线路进行校验。包括对房屋的交叉跨越距离（见图1）、对上跨或者下穿的线路电气距离进行校验。排列方式改变后，线间距离校验如图2所示，均可在第一时间模拟实际场景，并得到计算结果。

回路	相	危险	累距(m)	偏距(m)	校核类型	距离类型
回路1	A相		3.99	14.10	对居民地	垂距
回路2	C相		4.02	-13.98	对居民地	垂距
回路1	C相		41.15	6.08	对居民地	垂距
回路2	C相		48.50	-2.95	对居民地	垂距
			207.33	3.86	房屋净空	净空
			207.33	3.86	房屋垂直	垂距
			213.16	-86.47	房屋净空	净空
			213.16	-86.47	房屋垂直	垂距
回路1	C相		224.16	4.04	对居民地	垂距
			235.36	-48.57	房屋净空	净空
			235.36	-48.57	房屋垂直	垂距
			255.05	-31.45	房屋净空	净空
			255.05	-31.45	房屋垂直	垂距

图 1 交叉跨越距离校验

Fig. 1 Cross-span distance verification

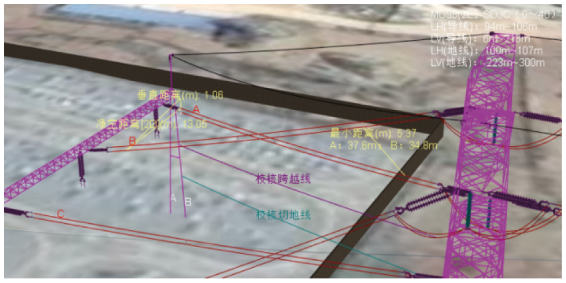

图 2 线间距离校验

Fig. 2 Line distance verification

3.2 三维设计在线路选址、施工及运行方面的应用

三维数字化设计系统可应用于工程前期的电力设施布局规划和输变电工程的选址选线论证，直观开展沿线居民区、风景旅游区等敏感区域的空间影响分析和路径优化。尤其是对多方案必选的站址选择、路径方案确定等，能够直观系统地展现各方案的优缺点，同时可结合未来市政、铁路、旅游规划区等三维成果进行协同设计，最大程度减少可行性研究、初步设计阶段出现的收资不全等情况。

同时，三维数字化形成的三维场景、仿真模型与材料统计等为后续工程建设的工程管理和施工组织提供了科学的依据。建成后移交的三维工程数据为输电线路精益化运检管理，尤其是无人机的飞行巡检技术，提供了强有力的数据支撑。应用示例如图3、图4所示。

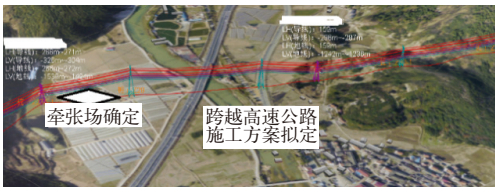

图 3　牵张场确定及施工方案拟定

Fig. 3 Determination of tensioning site and construction plan

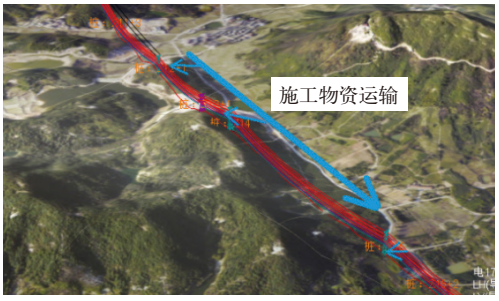

图 4　施工物资运输方案拟定

Fig. 4 Construction material transportation plan

3.3　三维设计在灾情预测、防御以及抢险方面的应用

三维数字化仿真场景可用于山地气流运动分析、线路雷击评估、覆冰预测评估等，有利于开展输电线路的微地形微气象分析，使输电线路的灾害规避和灾情预警成为可能。在遭受台风、冰雪等灾害后，还可结合在线监测第一时间进行三维场景灾情分析，精确统计受灾设备，启动救灾物资供应，快速制定涵盖人员、物资、交通、后勤和安全防护措施的抢修方案，有效辅助抗灾、减灾工作。

3.4　三维设计在造价管理中的应用

三维设计在全过程造价管理中都可以得到很好的利用。与传统二维设计相比，三维设计在可行性研究、初步设计及施工图阶段的优化效果差异明显。

在可行性研究阶段，二维设计依赖平面地形图估算工程量，误差率普遍高于15%，导致概算虚增；三维设计通过空间模型精准提取地形数据，工程量误差率可控制在5%以内，为限额设计提供可靠依据。

在初步设计阶段，二维设计需通过多次人工校核交叉跨越距离，耗时长且易遗漏冲突点；依据国网公司2020—2022年24个三维设计项目的统计数据，三维设计通过自动碰撞检测与间隙校验，优化路径长度10%～15%，并减少耐张塔数量20%～30%。运用三维设计技术可以对数据进行限额设计，保证项目实施过程中的经济合理性和可行性。使用三维设计可以关联模型的数据，准确快速地获取造价中需要的基础数据。

在施工图阶段，二维设计出图后变更率高达25%，返工成本较高；三维设计通过施工模拟预判冲突，变更率降至8%以下，缩短工期并减少材料损耗。此外，三维设计技术的自动计算程序和智能优化，在工程量计算、工程变更等方面有显著优势。依托三维设计模型的参数化特性，可以在施工过程中快速准确地提取工程量进行计算，实现施工阶段造价控制；借助三维技术可以提前进行施工模拟，通过工程技术变更避免成本增加。

在竣工验收阶段，传统的竣工结算需要在图纸上再次计算工程量，过程烦琐，计算量较大。三维设计将模型与数据相结合，同时和设计变更、造价数据等进行关联，可减少竣工结算中双方分歧，提高结算效率。

4　应用案例

本工程为某水电厂220 kV送出线路工程，新建单回段需下穿500 kV XX段I线路，如图5所示。在初步设计阶段，进行现场交叉跨越测量后，将测量成果导入三维设计平台，对平台内已有航测数据进行修正后，得到较为精确的线路通道测绘数据，如图6所示。为三维设计交叉跨越校核提供了输入条件。

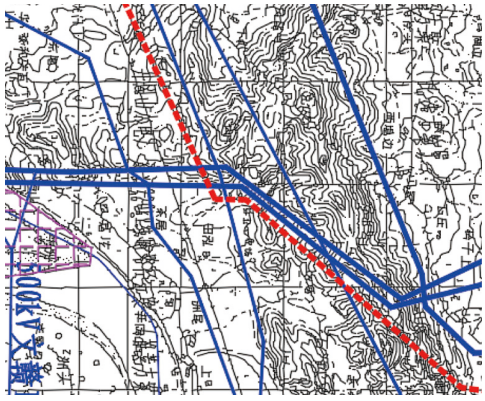

图 5　下穿 500 kV XX 段 I 线路平面关系图（红色为拟建线路）

Fig. 5 Plane relationship diagram of 500 kV section I line underpass (red is the proposed line)

图 6　下穿 500 kV XX 段 I 线三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of 500 kV XX segment I line

通过铁塔选型优化及线路排塔定位形成三维线路模型，选取部分视图如图7所示。

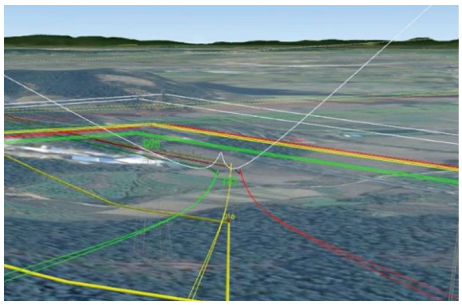

图 7　220 kV XX 线下穿 500 kV XX 段 I 线三维视图

Fig. 7 Three-dimensional view of 220 kV XX line passing under 500 kV XX section I line

如图8所示，新建220 kV XX线在最小弧垂工况下与500 kV XX段I线最大弧垂工况下，导线距离为6.8 m；新建220 kV XX线地线在最小弧垂工况下与500 kV XX段II线最大弧垂工况下，导线距离为7.5 m，可满足规程规范要求。

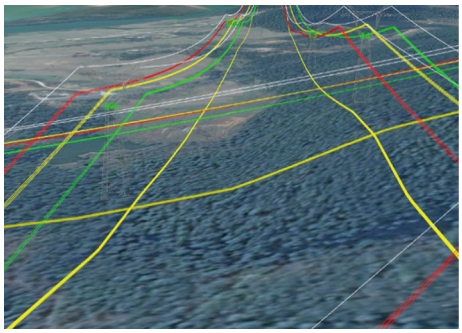

图 8　220 kV XX 线与 500 kV XX 段 I、II 线最大弧垂工况下导线距离校核

Fig. 8 Verification of conductor distance between 220 kV XX line and 500 kV XX section I and II lines under maximum sag conditions

此外，由于新建220 kV XX线距500 kV XX段II线铁塔距离较近，通过软件结果显示，新建220 kV XX线边导线在大风工况下，与500 kV XX段II线铁塔塔身距离为9.2 m，可满足规程规范要求。

5　对比分析

为明确三维设计相较于传统二维设计的优势，本节从可行性研究、初步设计两个阶段，结合此水电厂220 kV送出线路工程实例，对比两种设计模式对工程造价的影响，结果见下表。

表　二维与三维设计在工程不同阶段的优化效果对比

Tab. Comparison of optimization effects between 2D and 3D design at different stages of engineering

项目	可研阶段（二维）	初步设计（三维）	优化效果	优化归因
路径长度/km	28.5	26.7	减少 1.8 km (−6.3%)	避让 3 处冲突，路径平顺化
塔基数	105	83	减少 22 基 (−20.9%)	档距扩大至 322 m，减少立塔
耐张塔数	23	15	减少 8 基 (−34.8%)	路径转角减少 8 处
单公里投资/万元	194.91	189.85	减少 5.06 万元	塔材优化、基础工程量减少
总造价/万元	5 554.94	5 069.00	减少 485.94 万元	综合路径、塔基、材料优化

工程因全程数字化设计的应用，初步设计阶段优化了路径，优化后路径较可行性研究减少1.8 km，其中跨江段缩短0.35 km，双回段缩短0.6 km，铁塔数量83基（较可行性研究减少22基，同比下降20.9%），耐张比例18.1%（耐张塔数量15基，较可行性研究减少8基，同比下降34.8%），最终单公里投资减少5.06万元，工程总造价减少了485.94万元。

6　结束语

三维设计通过构建“空间建模-动态校验-数据联动”的技术闭环，系统性解决了二维设计在

数据割裂、预判不足等方面的固有缺陷问题，不仅提升了工程造价控制的精细化水平，还推动了电力行业从经验驱动向数据驱动的转型。其技术路径的标准化应用，将为新型电力系统建设提供全周期、多维度的优化支撑，具有显著的工程实践价值与行业推广意义。

此外，输电线路三维数字化设计技术的应用，有效避开了政策处理的敏感点，降低了工程建设的难度，减少了房屋拆迁、树木砍伐、土石方开挖、水土流失和生态破坏等对社会环境和自然环境的影响，社会效益和环境效益非常显著。

参考文献

[1] 刘宜灼．SkyLine支持下的电力选线三维系统的设计与实现[J]．地理空间信息，2010，8(5)：24-26．

[2] 吴成舟，叶国平．数字化地图在架空送电线路初步设计中的应用[J]．电网技术，2007(S2)：79-82．

[3] 陆小艺．输电线路选线三维GIS技术及工程应用[J]．广西电力，2012，35(2)：40-42．

[4] 李云强，杨彩霞，刘克成．基于NET的电力企业信息系统一体化设计及实现[J]．电网技术，2007(24)：86-90．

[5] 赵波，边馥苓．面向移动GIS的动态四叉树空间索引算法[J]．计算机工程，2007(15)：86-87，93．

[6] 魏祖宽，蒋楠，金在弘．电力信息系统中三维GIS关键技术的应用研究[J]．计算机与现代化，2010(5)：83-88．

[7] 汤扬华．三维GIS中海量空间数据可视化研究[D]．西安：长安大学，2009．

[8] 朱庆，钟正，周艳，等．线路勘测设计中的三维可视化协同环境[J]．系统仿真学报，2006，18(1)：128-131，161．

作者简介

孙梦云（1988—），女，硕士，工程师，主要从事电力系统电气设计相关工作和研究。

夏淦健（1985—），男，工程师，主要从事电力系统电气设计相关工作和管理。

（收稿日期：2025-03-07）