

主变压器水喷雾系统正向设计

张磊¹ 姜洋彬¹ 徐志² 林磊²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 2. 北京筑信达工程咨询有限公司)

摘要: MT-Spray 主变压器水喷雾设计软件基于三维仿真技术实现变电站主变压器水喷雾正向设计。软件依据一次设计提供的 Revit 模型文件建立变电站主变压器三维实景, 识别主变压器主要部件, 根据保护面积及供给强度要求, 自动布置消防管线、选取水雾喷头。通过软件提供的人机交互功能, 可以在真实的工作场景中, 调整喷头及关系布置, 调节喷头参数, 实时显示调整结果; 软件自动完成喷头及连接件、管材及接头的统计工作, 自动生成材料统计表, 自动生成主变压器平面、立面布置图, 系统图, 支架安装图及水喷头安装图等施工图绘制。

关键词: 主变压器; 消防; 水喷雾; 三维仿真; 正向设计; 带电距离; 碰撞检查

2024.01.DQGY
52

0 引言

根据相关规范^[1]及国网消防安全^[2]的相关通知要求, 水喷雾已广泛应用于 220kV 及以上的变电站中。变电站主变压器水喷雾设计要求水雾喷头的布置在满足喷射强度的情况下, 实现对主变压器的全覆盖。由于主变压器的形状不规则, 带电点与管道、喷头之间有严格的安装距离要求, 传统的二维设计中, 喷头的布置往往耗费设计人员的很大精力, 工作量大, 且喷头的实际喷射情况无法在设计阶段得到有效验证。在施工过程中, 经常出现管道或支架与主变本体碰撞, 影响控制箱正常开启等问题, 造成返工量大。

因此, 亟需开发主变压器水喷雾三维设计软件, 在可视化的三维场景中进行管道、喷头、支架的布置, 实现水喷雾系统的三维正向设计。避免传统的二维设计带来的喷射覆盖范围疏漏, 管道碰撞等问题。

主变压器水喷雾三维设计软件 MT-Spray 针对传

统二维喷雾系统设计中设计人员最头痛的“盲布”问题, 通过三维可视化的真实场景全面、直观地展示管道、喷头及支架的走向、布置情况, 同时, 强大的空间分析功能突破了二维平面中的空间束缚, 可以更加准确地判断水喷雾管道与主变的相对位置和碰撞情况, 模拟水雾喷射的实际情况, 保证喷头设计的合理性, 消除了施工阶段的安全隐患, 大大提高设计人员的工作效率, 保证设计质量, 杜绝返工现象, 三维正向设计是主变压器水喷雾设计极佳的解决方案。

1 实现三维仿真场景的软件技术

1.1 三维场景建模

MT-Spray 软件采用 Visual. NET 平台, C# 语言开发, 采用 WPF 三维渲染技术建立主变压器喷雾系统的真实三维场景。

软件采用面向对象编程方法, 三维模型对象包

括水雾喷头 (Sprayer 类)、钢管 (Pipe 类)、管线 (PileLine 类)、弯头 (Link 类)、支架 (Support 类)、基础 (Foot 类) 等。所有创建的对象都有对应的三维渲染实体 3dModel, 并在三维场景中显示, 设计软件可以在三维场景中捕捉这些对象进行移动、修改、删除等操作。

1.2 变压器模型在 MT-Spray 软件中的展示

MT-Spray 引用了 Assimp 资源导入变压器的 Revit 模型。Assimp 全称为 Open Asset Import Library, 这是一个模型加载库, 可以导入几十种不同格式的模型文件 (同样也可以导出部分模型格式)。只要 Assimp 加载完了模型文件, 就可以从 Assimp 上获取所有需要的模型数据。Assimp 把不同的模型文件都转换为一个统一的数据结构, 所有无论导入何种格式的模型文件, 都可以用同一个方式去访问需要的模型数据。

首先在 Revit 软件中, 将主变压器模型导出为 Autodesk 三维渲染格式 fbx 文件。运行 MT-Spray 软件时通过“导入”按钮读取这个 fbx 文件并创建 WPF 三维模型在 MT-Spray 软件中展示。

1.3 喷头水流动画模拟

主变压器喷雾系统设计中最重要的是喷头的布置及型号选择, 既要满足喷出的水流覆盖整个被保护面, 还要考虑喷头及管线与带电设备的安全距离, 因此真实地模拟喷头的水流状态非常关键。

(1) 确定喷头水流轮廓线

根据喷头参数雾化角 θ 得到抛物线初始仰角 $A=\theta/2$, 喷头水平喷射距离 D 得到抛物线方程:

$$y = \frac{\tan A}{D} x^2 + \tan A \cdot x \quad (1)$$

同时抛物线方程和写为:

$$\begin{cases} y = \frac{1}{2} G t^2 + v_0 t \\ x = v_1 t = \frac{v_0 t}{\tan A} \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (1)、式 (2) 可以得到喷头水流的初始速度:

$$v = \frac{v_0}{\sin A} = \sqrt{\frac{GD \tan A}{2}} / \sin A \quad (3)$$

得到水流初始速度 v 后, 即可得到一个喷头各个方向延雾化角的水流曲线。

(2) 水流曲线的动画模拟

MT-Spray 软件计算出一圈的水流曲线后, 采用实时动画 (算法动画) 技术展示真实的喷雾状态 (见图 1), 让设计人员在真实的三维场景中调整喷嘴的位置、方向, 设置喷嘴的型号。

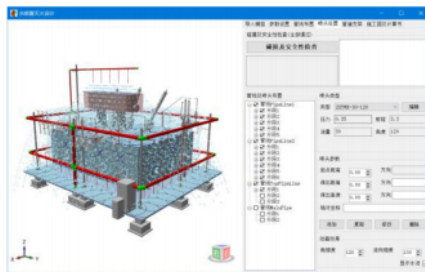


图 1 主变压器水喷雾系统三维仿真

2 主要参数设置

2.1 保护对象主变体、油枕、油坑确定

首先导入主变压器的模型文件 (见图 2), 选择主变压器实体, 然后通过人机交互调整, 主变体、油枕的面与变压器实体表面贴合 (见图 3)。

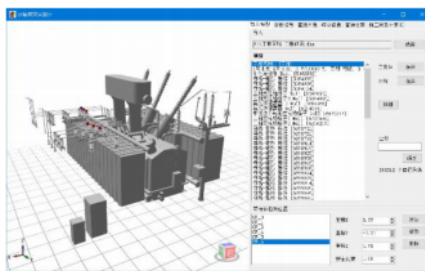


图 2 导入主变压器模型

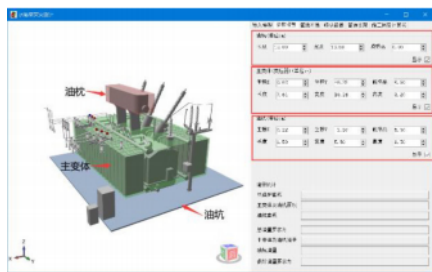


图3 确定主变体、油枕、油坑参数

2.2 流量需求计算

对变压器的防护需要考虑变压器整个外表面，包括变压器和附属设备的外壳、贮油箱和散热器等，对设备整体立体防护，具体包括：

- 1) 变压器及散热器本体保护面积按照其所形成的最小规则形体计算；
- 2) 集油坑面积（扣除主变本体底面积）；
- 3) 油枕表面积。

变压器保护面积的确定方法如图4所示。

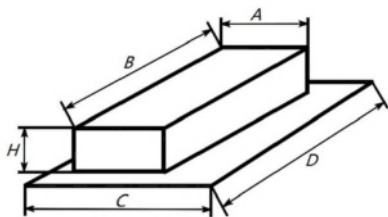


图4 变压器保护对象参数

A—变压器宽度 B—变压器长度 H—变压器高度
C—集油坑宽度 D—集油坑长度

2.3 供给强度确定

根据国家现行规范，变压器本体、散热器、油枕的喷雾强度标准为 $20\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$ ，油坑的喷雾强度标准为 $6\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$ 。则水喷雾灭火系统的总流量要求 $Q=S$ （主变本体+散热器） $\times 20+S$ （油坑） $\times 6+S$ （油枕） $\times 20$ 。

2.4 喷嘴参数、喷射范围的确定

水雾喷头的选择应能满足规范 3.2.3 要求“水雾

喷头与保护对象之间的距离不得大于水雾喷头的有效射程”，并能够覆盖整个变压器被保护的表面。主变压器水喷雾灭火系统采用 ZSTWB 型高速水雾喷头，可根据需要进行水平方向安装，也可下垂方向安装。

常见其有效射程均在 1.7~3.2m 范围之内，最远喷射距离约 6m。

3 自动布置水雾喷头及管线

3.1 水雾喷头的布置

水雾喷头的布置数量按保护对象的保护面积、设计供给强度和喷头的流量特性经计算确定，水雾喷头的位置根据喷头的雾化角、有效射程，按满足喷雾直接喷射并完全覆盖保护对象表面布置。当计算确定的布置数量不能满足上述要求时，应当增设喷头，直至喷雾能够满足直接喷射并完全覆盖被保护对象表面的要求。

水雾在主变体表面覆盖的半径为^[1]：

$$R=B \cdot \tan(\theta)$$

式中， B 为喷嘴到主变体表面的距离； θ 为水雾喷射雾化角。喷头按照矩形布置方案，喷嘴间距小于 $1.4R$ 。

自动布置喷头时，喷头距主变体表面的距离定为 0.8m，选取扩散角为 120° 的喷头，得喷射半径 R 为 1.38m。

常见的喷头布置形式如图5所示。

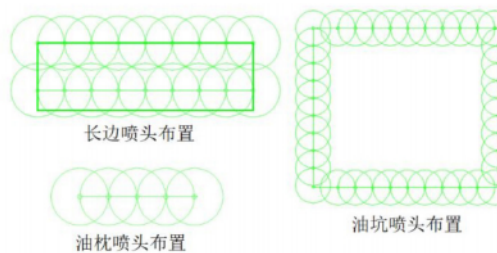


图5 常用水雾喷头布置形式

3.2 管线的布置

确定水雾喷头的布置方案后，根据水雾喷头的层

数设置主变体周边管线的层数。自动布置时，主管线距主变体表面 1.5m。第一层管线下布置向下的喷头，负责覆盖油坑表面；第一层管线上布置一排喷头负责主变体侧面喷淋，最上面一层管线的顶部布置一排喷头负责喷淋主变体的顶面；油枕的管线需要根据油枕的位置确定布置方案，油枕管线的布置方式可以为 L 形、T 形或者门形。

3.3 支架布置

支架是支撑消防管线的结构构件，支架为单根钢管柱，柱下设置独立基础。支架默认选用截面为 $\phi 150 \times 6$ 的单根钢管柱，用 C8 的槽钢固定喷淋管线。

支架布置在两个长边的两端靠近管线转角处，支架最大间距为 6m，竖向主管线两侧及油枕竖向管线处分别设置两个支架。

支架的受力分析、强度及稳定验算通过 SAP2000 有限元分析程序完成。MT-Spray 软件自动生成支架及管线的整体 SAP2000 有限元分析模型，完成分析计算并提取 SAP2000 有限元分析结果进行强度及稳定校核。

4 人工交互调整管线及喷头

MT-Spray 软件根据导入的主变压器模型自动布置喷头、管线及管线支架，搭接一个完整的喷淋消防三维仿真场景，让设计人员清楚地观察整个喷头及管线布置方案是否合理，流量大小，以及喷淋覆盖情况。

MT-Spray 软件提供了丰富的人工交互功能，设计人员可以在三维可视化的场景中完成管线、喷头及支架的编辑调整。

4.1 管线调整

当观察到管线与主变体周边绝缘子、避雷器、中性点设备、智能控制柜等设施距离过近或发生碰撞时，设计人员可以通过管线移动或者管线弯折功能调整管线的布置方案。

4.1.1 管线移动

设计人员可以在三维仿真场景中直接用鼠标双击需要移动的管线段，选中管线段后按鼠标右键，选中右键菜单中的“移动”功能，被选中的管线段在可移动的方向会出现箭头（见图 6），用鼠标拖动箭头即可移动管线段。移动管线段时，管线上的喷头会随之移动。

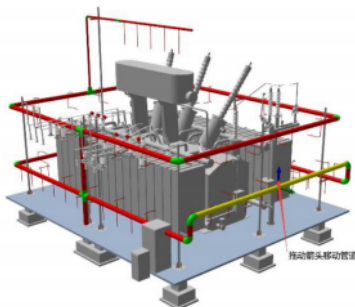


图 6 管线移动功能

4.1.2 管线弯折

选中管线段后按鼠标右键，选中右键菜单中的“弯折”功能，弹出管线弯折对话框。设计人员输入弯折的起始点距离，弯折深度，弯折长度后即可实现管道弯折（见图 7）。

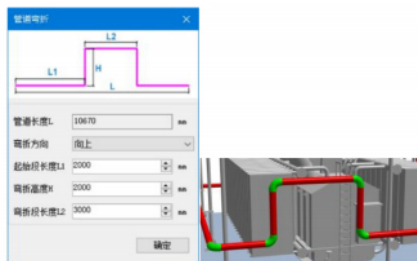


图 7 管线弯折

4.2 喷头调整

MT-Spray 软件提供了喷头水流显示、喷雾覆盖范围显示功能，设计人员可以观察喷头与周边设施是否有碰撞，被保护体表面是否全覆盖等状况。软件提供了交互布置喷头、喷头移动、喷头复制、删除等功能，实现最佳的喷头布置方案。

4.3 支架调整

MT-Spray 软件提供了支架移动的功能，设计人员通过双击鼠标左键选择需要移动的支架，在右键菜单中选择移动功能，然后拖动箭头即可移动选择的支架。

5 碰撞检查

M-Spray 软件可以检测喷头、管线与带电设施的距离是否满足安全距离要求。结合我国的实际情况，喷头、管线与高压电器设备带电（裸露）部分的最小安全净距带电安全距离根据国家现行标准《高压配电装置设计技术规程》DL/T5352^[3]的有关规定设置了最小距离，设计人员可以根据实际情况进行调整。设计人员在图形中选择带电的电气设备，然后通过点击“碰撞检查”按钮自动进行安全距离检查。

6 自动绘制二维施工图

M-Spray 软件让设计人员在三维仿真环境中完成主变压器喷雾系统的设计，完成输水管道、喷头、管道支架的布置方案。根据三维布置方案，软件自动生成主变压器水喷雾系统的二维施工图，包括水喷雾系统的轴侧图、平面布置图、立面图、支架布置图、支架详图及支架基础布置图等。

所有管道型号、喷头型号数量、支架材料等信息 M-Spray 软件都会自动统计并生成材料汇总表。

7 结束语

主变压器水喷雾三维设计软件针对传统二维喷雾系统设计中设计人员最头痛的“盲布”问题，通过三维可视化的真实场景全面、直观地展示管道、喷头及支架的走向、布置情况，同时，强大的空间分析功能突破了二维平面中的空间束缚，可以更加准确地判断水喷雾管道与主变的相对位置和碰撞情况，模拟水雾喷射的实际情况，保证喷头设计的合理性，消除了施工阶段的安全隐患，大大提高设计人员的工作效率，

保证设计质量，杜绝返工现象，三维设计是主变压器水喷雾设计极佳的解决方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部 .GB50219—2014 水喷雾灭火系统设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2005.
- [2] 中华人民共和国公安部 .GB50084—2017 自动喷水灭火系统设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2017.
- [3] 国家发展和改革委员会 .DL/T 5352—2006 高压配电装置设计技术规程 [S]. 北京：中国电力出版社，2007.
- [4] 苏锦明. 《水喷雾灭火系统设计规范》中变压器消防设计相关条文探讨 [J]. 给水排水，2006（5）：112-114.
- [5] 赵东. 变压器水喷雾灭火系统及其优化 [J]. 大众用电，2007（4）：21-22.
- [6] 刘长仕. 水喷雾灭火系统在变电站工程中的应用 [J]. 建筑监督检测与造价，2013（4）：55-57, 60.
- [7] 皮东海. 水喷雾灭火系统设计及其发展 [J]. 南昌航空工业学院学报（自然科学版），2005（4）：59-61.
- [8] 王清. 500kV 变电所变压器灭火系统 [J]. 湖北电力，2004（B09）：18-21.
- [9] 石峥嵘. 有关变压器水喷雾灭火系统的探讨 [J]. 消防科学与技术，2000（4）：34-36, 3.
- [10] 王景龙，肖雪，周义坪. 水喷雾灭火系统设计及安装应注意的几个问题 [J]. 消防技术与产品信息，2006（10）：6-9.
- [11] 徐春峰. 水喷雾灭火系统在变电站工程中的应用 [J]. 河南科技，2020，39（31）：93-96.

（收稿日期：2023-10-27）