

基于有限元平台的主变压器水喷雾系统支架的结构分析与设计

李洪旺¹ 刘勇¹ 张志国² 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 主变压器水喷雾系统设计软件基于三维仿真技术，可以实现变电站主变压器水喷雾系统的正向设计。在以往的水喷雾系统设计中，支承管道的支架多采用经验布置，但缺少合理有效的结构计算。针对实际运行测试中发现的管道支架晃动问题，MT-Spray 利用 SAP2000 API 接口自动创建管道支架的三维有限元计算模型，借助 SAP2000 完成结构分析与结构设计。

关键词：管道支架；结构分析；结构设计；水喷雾系统；时程分析；动力荷载

2024.02.DQGY
61

0 引言

MT-Spray 软件是北京筑信达工程咨询有限公司与山东电力工程咨询院有限公司共同研发的基于三维仿真技术可以实现变电站主变压器水喷雾系统的正向设计软件。在以往的水喷雾系统设计中，支承管道的支架通常都是根据经验布置，缺少严格的结构分析与结构设计。针对在喷雾系统实际运行测试中发现的管道支架剧烈晃动的问题，本文通过 SAP2000 有限元软件对管道支架在静荷载作用下的强度和稳定性以及水流冲击荷载作用的振动位移、加速度进行量化计算，希望对管道支架的设计和优化提供一定的参考价值 and 借鉴意义。

1 SAP2000 有限元分析平台

SAP2000 是由美国 CSI 公司研发的有限元分析软

件，作为通用的建筑结构分析与设计软件，SAP2000 广泛应用于结构工程、岩土工程、水利水电工程、道路与桥梁工程以及机械工程等各个行业领域。SAP2000 高度集成化的工作环境使用户在同一个界面中即可完成建模、加载、计算以及后处理等各种操作。

基于国际领先且高效稳定的求解器，SAP2000 可采用多种单元类型完成各种类型的结构分析：从线性分析到非线性分析，从静力分析到动力分析，从移动荷载分析到阶段施工分析，等等。除此之外，SAP2000 还可用于混凝土结构设计、钢结构设计、冷弯薄壁型钢结构设计、铝合金结构设计。

作为一款有限元分析平台级的软件，SAP2000 API 提供的二次开发接口可以帮助用户创建参数化模型、自动施加荷载、批量化提取计算结果，也可以定制开发特种结构的分析与设计软件。

2 管道支架的三维有限元计算模型

M-Spray 主变压器水喷雾系统设计软件通过导入 Revit 变压器模型，利用软件的三维交互以及智能化管道布置功能，可以快速生成水喷雾系统的输水管道、喷头、管道支架的布置方案，如图 1 所示。

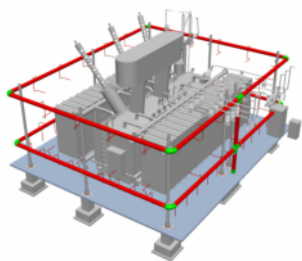


图 1 变压器水喷雾系统

变压器外轮廓尺寸 10.2m×7.6m，管道支架布置满足角点和最大间距不超过 6m，布置完成后的支架最大间距 5.8m，支架高度 4.85m。布置两层管道，第一层管道标高 1.7m，第二层管道标高 4.65m，喷头间距 1m。

针对支架和输水管道，M-Spray 借助 SAP2000API 二次开发接口，在 SAP2000 中自动生成管道支架的三维有限元计算模型，如图 2 所示。

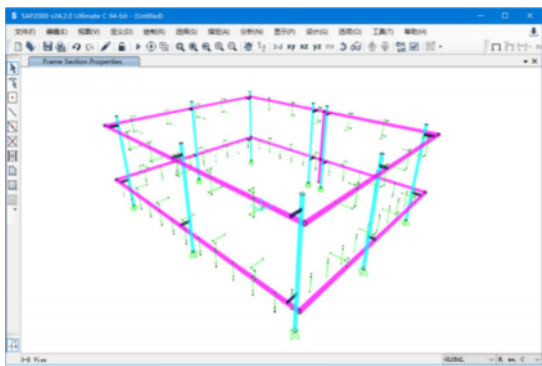


图 2 管道支架计算模型

支架采用 150×6 的环形钢管，输水管道采用 219×6 的内外热镀锌钢管，二者采用槽钢连接，柱底为固定支座。喷嘴主要用于确定喷水产生的冲击荷

载在管道上的作用位置，忽略对管道以及立柱的刚度贡献。

3 管道支架的强度和稳定性验算

除管道和立柱的自重外，管道中的水可作为均布荷载作用于管道上，荷载值 $q=\rho g \pi D^2/4=336.5\text{N/m}$ 。水雾喷头采用高速水雾喷头 ZSTWB67/120，工作压力 $p=0.35\text{MPa}$ ，计算流量 $q=125\text{L/min}$ ，高压水射流后座力 $F=0.745q \sqrt{P}=55.1\text{N}$ 。据此在 SAP2000 中施加管道均布线荷载 336.5N/m 和喷头位置处施加集中力 55.1N，管道和支架自重由 SAP2000 程序自动计算。

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》规定，结构自重和管道介质重量作为永久荷载，分项系数取 1.35；高压水射流后坐力作为可变荷载，分项系数取 1.5；以此验算立柱在静力荷载作用下的强度和稳定性。通过模型整体分析计算，管道支架（立柱）的最大承载比为 0.342，满足强度和稳定性要求。

4 管道支架在动力荷载作用的振动计算

4.1 管道支架振动原因分析

管道支架可以简化为悬臂柱杆件，属于细长杆件，水平刚度相对较弱，当杆件顶部受到突发的水平推力时会产生类似单质点弹簧发生的简谐振动，其振幅与杆件刚度和后坐力大小及加载到最大值所用的时间即动力响应相关。因此需要量化研究水的后坐力加载时间与支架振动响应之间的关系。

4.2 冲击荷载加载方法

在 SAP2000 中，可以通过动力时程荷载模拟水的后坐力加载过程。

1) 在 SAP2000 中增加可变荷载模式命名为 PL，荷载类型选择 Live。

2) 添加时程函数 RAMP TH（斜波函数），函数类型选择“渐进”，然后修改斜波函数中到达最大值的

时间，这个时间就是模拟水流荷载达到最大值所用的时间。

3) 添加 PL 荷载工况，荷载类型为 LoadPattern，荷载模式选择 PL，函数选择 RAMPTH，比例系数为 1，工况类型为“时程分析”，分析类型选择“线性”，时程类型选择“瞬态荷载”，时间步长设置为 0.05s，计算 20 个步长，模态阻尼设为 0.02。

4.3 水流后座力加载时间变化与支架变形情况的量化分析

由于高压水射流后座力在短时间内作用于管道并传递至立柱，结构质量产生的惯性力对管道支架的动力响应无法忽略，这也是造成管道支架晃动的重要原因。为了能深入研究管道支架的动力响应，本文将上述后座力作为动力荷载并逐步改变加载时间，采用动力时程分析（结构阻尼比取 0.02）对比不同加载时间对立柱位移的影响。

如图 3 和图 4 所示，当喷嘴后座力在 1s 内达到最大值时，柱顶节点的最大动位移为 1.132mm，对比静力荷载作用下的 0.936mm，动力放大系数约为 1.21。

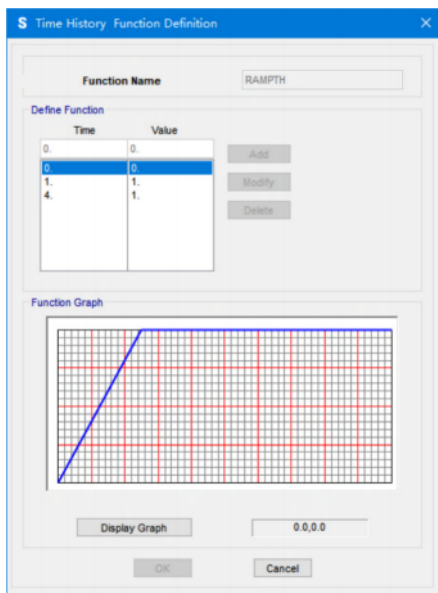


图 3 加载时间为 1s 的时程函数

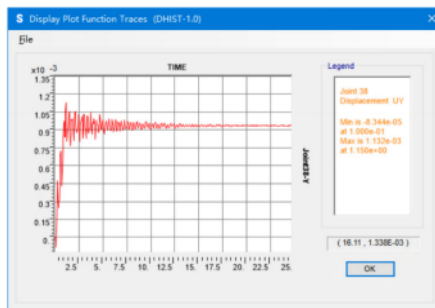


图 4 节点位移时程曲线

如果将加载时间进一步缩短至 0.5s 和 0.1s，柱顶节点的最大动位移显著增加。如图 5 所示，加载时间为 0.5s 的最大动位移为 1.718mm，动力放大系数约为 1.83；如图 6 所示，加载时间为 0.1s 的最大动位移为 4.598mm，动力放大系数约为 4.91。因此，适当延长喷嘴阀门的开启时间，可以有效避免冲击荷载造成更大的支架晃动问题。

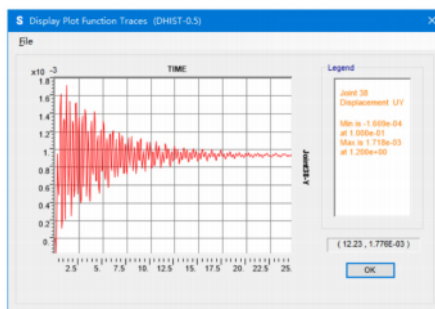


图 5 加载时间为 0.5s 节点位移时程曲线

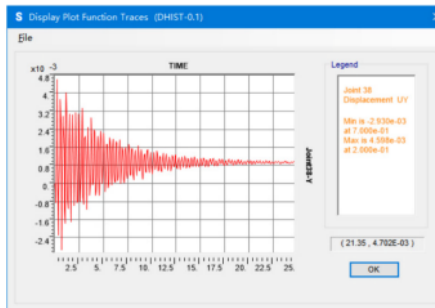


图 6 加载时间为 0.1s 节点位移时程曲线

5 支架优化研究

除了水流后座力加载时间控制之外，加强支架的刚度，增大立柱的截面尺寸或在立柱之间添加支撑构件，也可以显著提高支架刚度，降低动力荷载作用下的振动幅度。

减小支架晃动问题，主要是要减小支架顶点位移（振幅）。常规做法有增大界面、改变截面形状、增加支撑等方式。针对这几种形式，分别建立支架分析模型，如图7所示。

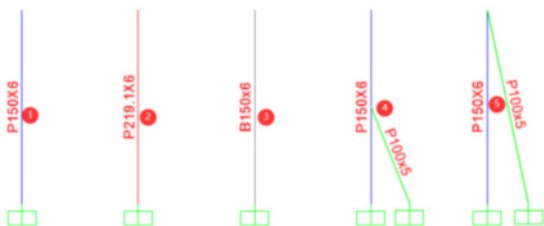


图7 支架分析对比模型

考虑自重和水雾喷头启动时的冲击荷载，计算得到支架顶部位移数据如下表所示。

表 各模型结算结果

模型	说明	位移 mm
模型 1	参考模型 150×6	55.3
模型 2	增大截面 219×6	15.8
模型 3	采用方形截面 150×6	27.4
模型 4	增加中部支撑	10.8
模型 5	增加顶部支撑	0.1

从表中可以看出，增加支撑对支架的稳定效果显著，尤其在顶部加支撑后，支架基本不会出现晃动问题。

6 结束语

利用 SAP2000 验算管道支架在静荷载作用下的强度和稳定性，重点分析喷嘴后座力的动荷载对支架的动力效应。动荷载的加载时间会显著增大结构的动力响应，提高结构刚度（包括增大构件截面或添加支

撑构件）或控制喷嘴阀门的开启时间都可以有效降低管道支架的剧烈晃动问题。

参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部. GB 50219—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. GB 50084—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] 赵东. 变压器水喷雾灭火系统及其优化 [J]. 大众用电, 2007 (4): 19-20.
- [4] 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.
- [5] 廖振鹏. 工程波动理论导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] M. 帕兹. 结构动力学—理论与计算 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [7] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [8] 克拉夫. 结构动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [9] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] GB 50017—2017 钢结构设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [11] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(收稿日期: 2023-11-08)