

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.015

变电站避雷针杆模态及谐响应分析*

陈 洋, 陈国达*, 计时鸣, 杨华锋

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要:针对避雷针杆人工检测与维护的耗时耗力及其结构损伤难以探测的问题,开展变电站避雷针杆的动力学特性研究。通过Solidworks软件建立了变电站避雷针杆的实体模型,并基于ANSYS Workbench对避雷针杆进行了模态分析和谐响应分析,通过模态分析得出了避雷针杆的前10阶固有频率及振型,为了解避雷针杆的动态性能及初步确定避雷针杆的薄弱部位起到了指导作用,并为谐响应分析提供了激振频率范围。通过谐响应分析,得出避雷针杆位移频率响应曲线,分析得到了避雷针杆最易产生共振的频率。研究结果表明,第一、二阶模态对避雷针杆的动态性能影响最大,同时其第7节和第6节为应力最为集中的部位,法兰连接结构处为薄弱环节。该研究成果对提高避雷针杆的可靠性具有积极意义,并为后续提出基于动力学特性分析的避雷针杆探损方法奠定了基础。

关键词:ANSYS Workbench; 变电站避雷针杆; 模态分析; 谐响应分析

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0178-06

Modal and harmonic response analysis of substation lightning rod

CHEN Yang, CHEN Guo-da, JI Shi-ming, YANG Hua-feng

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Aiming at the problems of time-consuming, labor loss and difficult structural damage detection in the manual inspection and maintenance process, the dynamics characteristics of SLR was studied. The entity model of SLR was established by Solidworks, and the modal and harmonic response analysis of SLR was carried out based on ANSYS Workbench. By the modal analysis, the first ten natural frequencies and the corresponding mode shapes were obtained, which can be used to understand the dynamic performance of lightning rod and preliminarily determine the weak parts of the lightning rod, and provide the frequency range for the harmonic response analysis. Through the harmonic response analysis, the displacement frequency response curve was gained, and the frequencies that most easily cause the resonance were found. The results indicate that the first and second modes have the greatest influence on the dynamic performance of the lightning rod, and the seventh and sixth sections are the most stress concentrated parts. Besides, the flange connection structure is the weak part. This study is meaningful to improve the reliability of the lightning rods and lays a foundation for proposing the dynamic characteristics analysis based damage detection method of the lightning rods.

Key words: ANSYS Workbench; substation lightning rod; modal analysis; harmonic response analysis

0 引 言

近年来,钢管杆广泛用于各种电压等级的线路中,

用以替代传统的角钢铁塔、混凝土水泥杆。变电站中避雷针同样采用钢管杆连接,为了确保变电站避雷针的正常安全运行,需要对避雷针杆进行定期检测维护,

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575494)

作者简介:陈洋(1991-),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事机械动力学及检测技术方面的研究. E-mail:735835101@qq.com

通信联系人:陈国达,男,博士,讲师. E-mail:gchen@zjut.edu.cn

对于避雷针杆人工检测与维护的耗时耗力及其结构损伤难以探测的问题,动力学分析可以预估易损伤部位,且为基于动力学特性分析的探损新方法的研究奠定必要的基础。避雷针杆由各节不同圆截面钢管连接而成,仅有的对于钢管杆的研究多集中在结构的静力分析上,对钢管杆动力学性能的研究较少。Wang 等^[1]建立了钢管杆的有限元模型,并进行了静力分析;Qin 等^[2]建立了输电钢管杆的数学模型,并进行了优化设计;伍斯等^[3]对避雷针杆进行有限元分析,优化了避雷针的结构设计。Li 等^[4]研究了结构塔线体系并建立动力简化模型,并用实验验证了该模型的合理性;Rao 等^[5]综合实际测量和数值方法对钢管杆进行应力和变形研究,根据分析出的两种结果进行比较研究;Chen 等^[6]对钢管杆的杆线体系实验和数值结果对比分析,得出杆线体系与单杆的低阶频率相差约有 1 000。在动力学性能分析方面,传统的计算方法难以满足计算要求,但采用较为成熟的有限元方法可以有效解决此问题。

静力分析只能在设计时进行校核,而动力学特性分析可以更好地模拟实际中各种动态响应,模态分析用于确定设计结构的振动特性,即结构的固有频率和振型。对避雷针杆进行模态分析,可以为结构系统的振动分析、振动故障和预报以及结构动力学特性的优化设计提供依据。谐响应分析是机械结构在承受随时间按正弦规律变化的动载荷时在特定频率下的响应,可以帮助设计人员克服由于受迫振动带来的共振,疲劳和其他不良影响^[7]。

本研究针对避雷针人工检测结构损伤等问题,开展了变电站避雷针的动力学特性研究。

1 避雷针杆模型建立

根据避雷针杆的结构设计参数,避雷针安装在变电站外,避雷针杆的底端固定,顶端自由,整体高度约为 56 m。考虑到该避雷针具有整体高度比较高,但顶端避雷针尖负载不算重的特点,故而忽略顶端的圆钢针尖及与其连接的较短钢管,剩下避雷针杆件将由 6 节不同横截面的钢管组成,其中包括 4 节长度为 9 m 的圆形钢管,2 节长度为 8 m 的圆形钢管,各节钢管外部形状从底部至顶部均为圆形且外径逐渐变小。根据避雷针杆的强度和刚度要求,管壁厚度从底端钢管的 12 mm 逐渐变小。避雷针杆轴向尺寸示意图 1 所示。

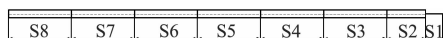


图1 避雷针杆轴向尺寸示意

避雷针杆从下到上依次编号为 S8, S7, S6, S5, S4, S3, S2, S1, 忽略顶端针尖和较短钢管,其余各段的具体参数如表 1 所示。

表 1 避雷针参数表

编号	长度/(m)	外径/(m)	壁厚/(m)
S3	8	0.3 - 0.2	0.006
S4	9	0.4 - 0.3	0.008
S5	9	0.48 - 0.4	0.008
S6	9	0.55 - 0.48	0.01
S7	9	0.7 - 0.55	0.01
S8	8	0.75 - 0.7	0.012

模态分析是求解模型自身的振动特性,为了提高建模效率,所以在建模时需要简化模型。整体模型中建立法兰,但不考虑两法兰之间的接触影响使之成为一体;建立螺栓螺母连接,但是选择粘连法将所有螺栓螺母固结,同时忽略了连接结构的焊缝;忽略部件中质量较小,对结构刚性无明显作用的部件,这些部件会使模型产生大量的形状失效单元,划分网格困难,且对结果影响较小。

本研究假设材料均匀连续,认为各个部件之间的连接均为刚性连接。本研究中避雷针钢管杆材料为 Q235B,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 200 Gpa,泊松比是 0.3。用 Solidworks 建立实体的三维模型后准备进行模态分析。

2 模态分析

2.1 理论基础

模态分析是动力分析中的基础内容,是用来确定结构的振动特性的一种技术,包括自然频率、振型、振型参数与系数^[8]。模态分析的核心内容是确定描述结构系统动态特性的参数。根据 Alembert D 原理,引入相应的惯性力,可将弹性体的动力问题简化为相应的静力问题,对于一个 N 自由度线性系统,其动力有限元的基本方程^[9]为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: M —质量矩阵; C —阻尼矩阵; K —刚度矩阵; u —位移向量; $F(t)$ —作用力向量; t —时间。

进行模态分析时,假定为自由振动并忽略阻尼时,方程变为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

当发生谐振动时,即当 $u = U\sin(\omega t)$ 时,方程为:

$$[K] - \omega_i^2[M]\{\phi_i\} = 0 \quad (3)$$

对于一个结构的模态分析,其固有圆周频率 ω_i 和振型 ϕ_i 都能从上面的矩阵方程式中得到,这个方程的根是 ω_i^2 ,即特征值; i 的范围从 1 到自由度的数目,相应

的向量是 $\{u\}_i$, 即是特征向量^[10]。

2.2 网格划分及施加约束

模态分析的主要步骤和流程为:前处理,求解和后处理。即零件三维建模—模型处理—定义材料特性—划分网格—施加约束—指定分析类型—模态分析和计算—结果显示和输出。本研究采用自动划分网格的方式,设置总体最小尺寸为 0.05 mm,由于按照实体模型建模,整体避雷针杆模型较大,网格划分得到总节点数目为 2 271 132 个,单元数为 1 414 378 个。

求解时避雷针杆固定在地面上,对避雷针底部施加 Fixed Support 约束。在 ANSYS 后处理之前,为了得到多阶振型,必须进行模态扩展。根据分析要求,将模态数目和模态扩展数目设置为 10 阶,点击 solve 进行求解。

2.3 模态结果分析

笔者通过对避雷针杆进行模态分析,得到了其结构前 10 阶模态的固有频率及振型。因为分析的模型为圆柱对称图形,每两阶的固有频率是一样的,它们对应同样的弯曲振型。第 1、3、5、7、9 阶模态振型如图 2 ~ 6 所示。

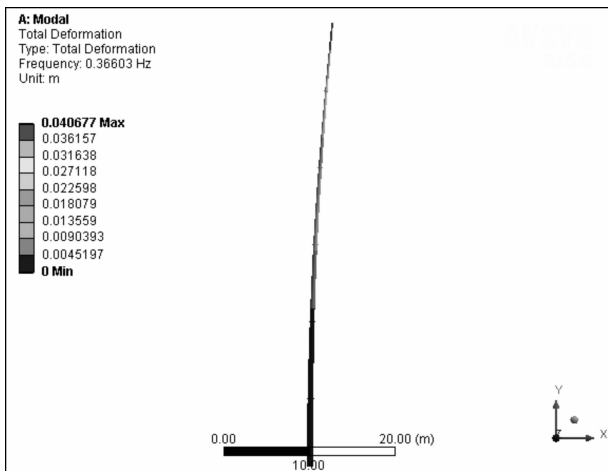


图 2 第一阶模态振型

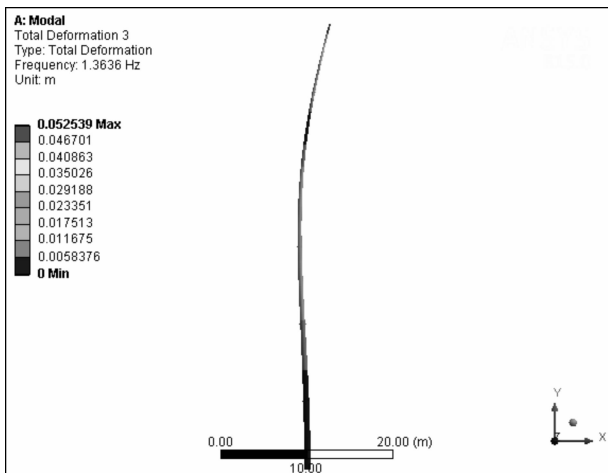


图 3 第三阶模态振型

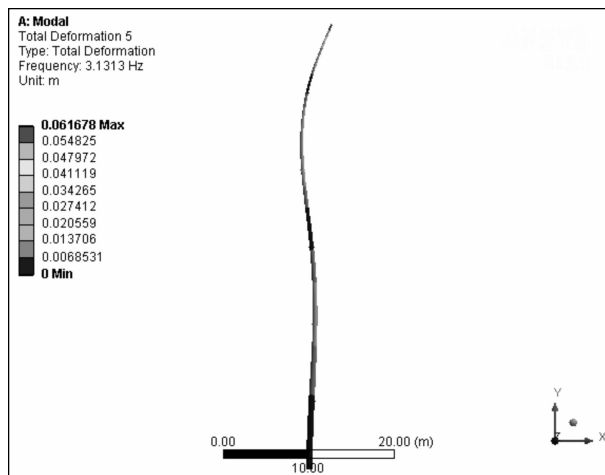


图 4 第五阶模态振型

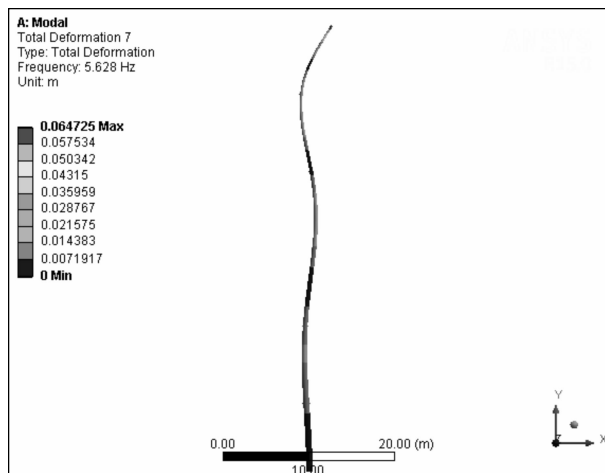


图 5 第七阶模态振型

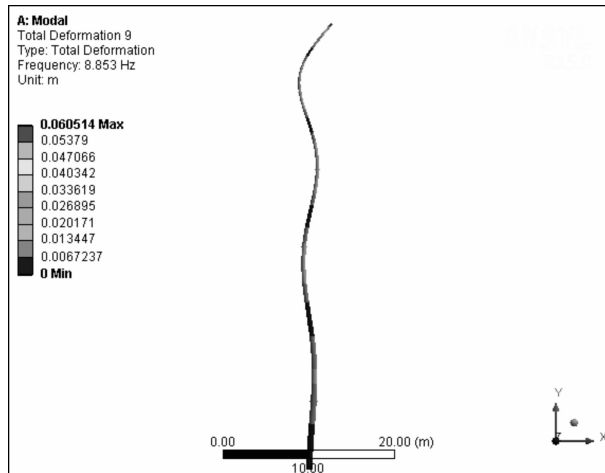


图 6 第九阶模态振型

前十阶模态的振型特点和频率如表 2 所示。

由于结构的振动可以表示为各阶固有振型的线性组合,随着模态阶次的提高,振型越来越复杂。由上面的模态图分析得到,在避雷针的整体振动中,第 1 和 2 阶振型是避雷针杆顶部摆动,第 3 和 4 阶阵型是避雷针

杆顶部和中部反向摆动,第5阶和6阶避雷针杆顶部和下部同向摆动,第7阶和8阶避雷针杆顶部和中部同向摆动,第9阶和10阶避雷针杆顶部、中部及尾部同向摆动。

表2 避雷针杆前10阶的振型及频率

模态阶数	振型特点	固有频率/(Hz)
1	绕Z轴摆动	0.366 03
2	绕X轴摆动	0.366 03
3	绕Z轴的1阶弯曲振动	1.363 6
4	绕X轴的1阶弯曲振动	1.363 6
5	绕Z轴的2阶弯曲振动	3.131 3
6	绕X轴的2阶弯曲振动	3.131 3
7	绕Z轴的3阶弯曲振动	5.628
8	绕X轴的3阶弯曲振动	5.628
9	绕Z轴的4阶弯曲振动	8.853
10	绕X轴的4阶弯曲振动	8.853 1

通过对前10阶振型的分析看来,在避雷针钢管杆节与节之间的连接处和最顶端的变形是最大的,根据振动理论,在结构振动中,高阶模态能量占比太低,对整个结构振动影响不大,低阶模态占主导地位,从前两阶模态振型图可以看出,在0~1 Hz频率范围内,最先发生变形的部位主要在第7节和第6节钢管连接处,从此处至其上方变形会逐渐变大,但是应力集中在7节和6节上,第一阶模态应力分布如图7所示。每节钢管之间是通过焊接法兰加螺栓连接而成,由于振型变形较大,易产生较大的交变应力,容易造成疲劳裂纹和断裂现象,这些部位是变电站避雷针杆的薄弱部位,为之后进一步研究模态参数的变化和预报结构的故障及研究整体的振动情况提供了重要依据。

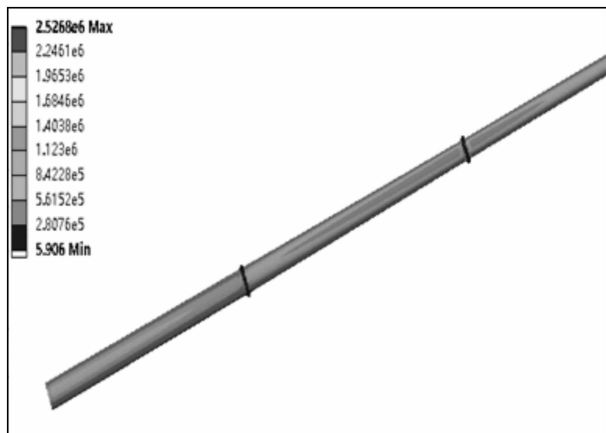


图7 第一阶模态应力分布

3 谐响应分析

所谓谐响应,是指结构在载荷的周期作用下其自身所发生周期响应。通过分析得到结构变化(例如位移)对于频率变化的响应情况,是谐响应分析的目的。幅频特性曲线代表着结构的响应情况,其“峰值”表示响应最为强烈。同时进一步观察该曲线,可以确定结构在承受变化载荷时的稳态响应。谐响应分析同样需要忽略掉任何非线性特性^[11-14]。

3.1 载荷施加

在给避雷针杆施加所受的载荷时,要考虑两个方面问题。第一,载荷的大小计算;第二,载荷的施加方式,根据避雷针杆有限元模型的划分单元情况进行施加,以实际情况模拟出载荷效果。

空气流动形成的风遇到建筑物时,会使建筑物表面产生压力或吸力,这种作用称为建筑物所受到的风荷载。实际上,风荷载是随时间波动的动力载荷,但设计时一般把它视为静载荷。长周期的风压使建筑物产生侧移,短周期的脉动风压使建筑物在平均侧移附近摇摆。对于高度较大且较柔的高层建筑,要考虑动力效应,适当加大风荷载数值。确定高层建筑风荷载:大多数情况(高度300 m以下)可按照《建筑结构荷载规范》规定的方法^[15-16]。

垂直于建筑物表面上的风荷载标准值,按下述公式计算,当计算主要承重结构时:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (4)$$

式中: w_k —风荷载标准值,kN/m²; β_z —高度 z 处的风振系数; μ_s —风荷载体型系数; μ_z —风压高度变化系数; w_0 —基本风压,kN/m²。

笔者对S8段进行分析,风载并不是垂直作用在避雷针杆上,但是由于角度很小,为了便于其结构受力分析,将风载施加的影响简化到垂直作用在避雷针上。根据风载与迎风面积成正比的关系,避雷针杆锥形部分的最大迎风面形状为等腰梯形但保守计算时风载实际作用点在梯形的中点上,即S8段等效集中力在中点上。对S8段各参数有:

基本风压 $w_0 = 0.65$ kN/m²; 风振系数 $\beta_z = 1.01$; 风荷载体型系数 $\mu_s = 1.0$; 风压高度变化系数 $\mu_z = 0.8$ 。

故S8段风荷载最终计算得3 046 N,其余各段与S8段计算方法类似。本研究由所划分的6个部分计算各段的等效集中力,将计算出来的力施加在每段避雷针杆上,各段所受风荷载大小如表3所示。

表 3 避雷针杆风载大小

编号	受风层高度 /m	各层风载 /N
S8	4	3 046
S7	12.5	4 343
S6	21.5	4 859
S5	30.5	5 289
S4	39.5	5 119
S3	48	3 899

3.2 谐响应分析及结果

用模态叠加法进行谐响应分析的步骤是建立模型—获取模态分析解—获取模态叠加法谐响应分析解—扩展模态叠加法—观察结果。在简谐分析设置时,通过输入最大值和最小值就能确定激振频率域,并且可以确定求解的步长 $\Delta\Omega$ 。ANSYS Workbench 从 $\Omega + \Delta\Omega$ 开始,求解 n 个频率; $\Delta\Omega = 2\pi(f_{\max} - f_{\min})/n$ 。

由表 2 可知,所求避雷针杆的固有频率范围是 0.366 Hz—8.85 Hz。模态分析中可以确定所施加载荷的频率范围,这里激振频率范围设置为 0~10 Hz,求解间隔为 100,将得到 0.1 Hz、0.2 Hz 至 10 Hz 的结果。

通过 ANSYS Workbench 的 Harmonic Response 模块,对各段杆件施加激振力,且频率范围设定为 0 至 10 Hz,进行谐响应分析后查看结果得 X、Y、Z 方向的位移频率响应图,如图 8 所示。

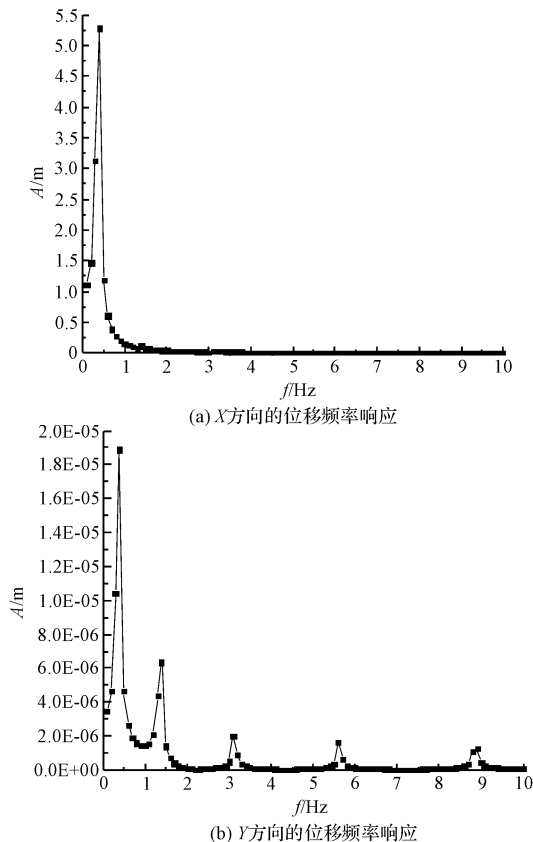


图 8 位移频率响应图

从图 8 中可以看出,在避雷针杆的各阶振动频率响应曲线中,沿着 X 方向,激振力作用下,在第二阶固有频率处出现明显峰值;沿着 Y 方向,第二阶和第四阶固有频率附近处出现明显峰值;沿着 Z 方向,第二阶和第六阶固有频率附近处出现明显峰值。分析得出避雷针杆在第二阶固有频率附近 X、Y、Z 方向峰值明显,且 X 方向位移值最大,此时避雷针杆对应的频率值为 0.4 Hz。X 向位移量最大,对结构动态性能影响较大,Y 向和 Z 向位移量最小,对结构动态性能影响较小。

本研究为了计算简便,求出当响应频率为 0.4 Hz 时,即响应最为强烈时候的应力和变形云图,如图 9~10 所示。

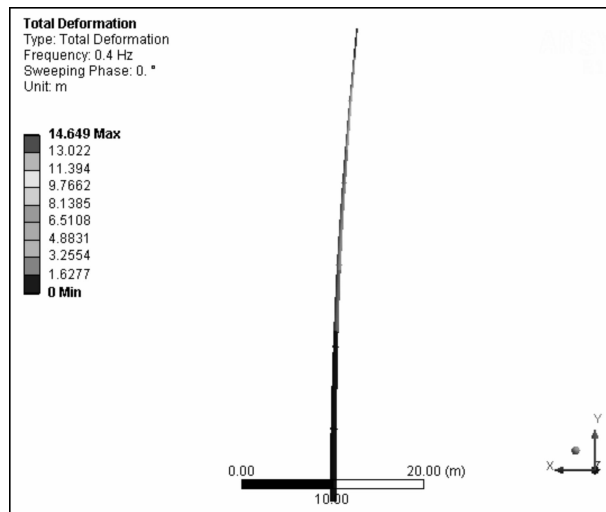


图 9 变形分析结果

本研究通过观察应力分析结果可以得知:在第 7 节和第 6 节应力较大,同时共振产生较大的应力而发生疲劳裂纹,并且通过观察变形分析结果得知最大变形发生避雷针杆的顶端。

变电站避雷针杆所处环境特殊,偏远且较恶劣,风雨都很频繁,风频时有变化,只有通过统计得出大部分

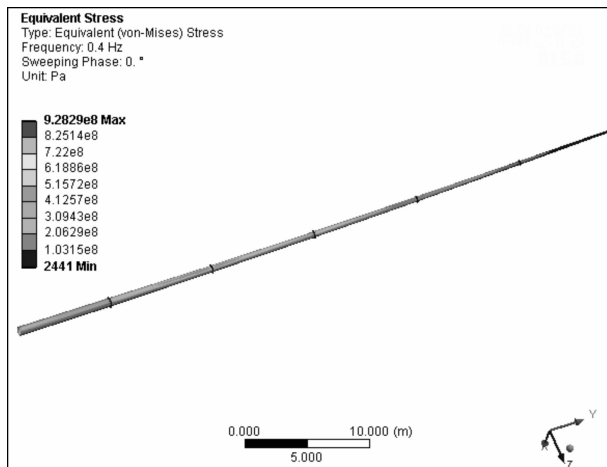


图10 应力分析结果

时段的风频,设计时尽可能避开这段频率以免避雷针杆发生共振,从而提高使用寿命。

4 结束语

(1)本研究运用 Solidworks 对变电站避雷针杆建模,对避雷针杆进行模态分析,由模态分析得出其前10阶模态,并从对低阶模态振型的分析中找到了较为薄弱的部位,在第7节和第6节可能出现损伤,而且模态分析为后续的谐响应分析提供了激振频率范围。

(2)本研究对变电站避雷针杆进行了谐响应分析,得出第一阶、第二阶模态对避雷针杆的动态性能影响最大,同时分析出应力最为集中的部位及薄弱环节,即第7节和第6节应力较为集中,进一步验证了模态分析的结果,法兰连接结构处为薄弱环节。

(3)避雷针杆的动力学特性研究对提高避雷针杆的可靠性具有积极意义,并为后续提出基于动力学特性分析的避雷针杆探损方法奠定了基础。

参考文献 (References):

[1] WANG YH, JIANG W, WANG H. Finite Element Analysis on the Steel Transmission Pole[J]. **China Offshore Platform**, 2012(594-597): 808-811.

- [2] QIN L, LUO YN, HUANG P. Structural Optimization of Transmission Line of Steel Poles[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2012(166-169): 48-51.
- [3] 伍 斯, 吴斌方. 基于 ANSYS 的六棱锥避雷针结构设计[J]. **软件导刊**, 2011, 10(4): 51-52.
- [4] LI H N, SHI W L, WANG G X, et al. Simplified models and experimental verification for coupled transmission tower-line system to seismic excitations[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2005, 286(3): 569-585.
- [5] RAO N P, GOPAL R B, ROKADE R P, et al. Analytical and experimental studies on 400 and 132kV steel transmission poles[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2011, 18(3): 1018-1029.
- [6] CHEN S E, DAI K. Modal Characteristics of Two Operating Power Transmission Poles[J]. **Shock & Vibration**, 2010, 17(4-5): 551-561.
- [7] 张 岩. ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [8] 曹树谦. 振动结构模态分析[M]. 天津:天津大学出版社, 2001.
- [9] 潘继生, 梁锡昌, 阎秋生, 等. 基于 ANSYS Workbench 的新型滤波减速器模态分析[J]. **机床与液压**, 2009, 37(7): 183-185.
- [10] 董向前, 宋建农, 李永磊. ANSYS-Workbench 机架振动的模态分析[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 北京:中国农业工程学会, 2011.
- [11] 张洪信, 赵清海. ANSYS 有限元分析完全自学手册(附光盘)[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [12] 郑启明, 钱 静, 杨世宸. 缝纫式订标机机架的有限元分析及试验验证[J]. **包装与食品机械**, 2016(3): 51-55.
- [13] 李 坤, 丁美锋, 张建中. 粉丝切断刀的结构设计与有限元分析[J]. **包装与食品机械**, 2014(6): 40-43.
- [14] 李海生, 吴开波, 王建松, 等. 无油涡旋压缩机密封条的有限元分析[J]. **流体机械**, 2015, 43(5): 19-23.
- [15] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海:同济大学出版社, 1985.
- [16] 2001GB. 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

陈 洋, 陈国达, 计鸣, 等. 变电站避雷针杆模态及谐响应分析[J]. **机电工程**, 2017, 34(2): 178-183.

CHEN Yang, CHEN Guo-da, JI Shi-ming, et al. Modal and harmonic response analysis of substation lightning rod[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(2): 178-183.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>