

附建式变电站楼板振动分析

戴志勇¹, 涂昊曦¹, 张雪峰¹, 黄有为¹, 王灵芝²

(1. 深圳市供电规划设计院有限公司, 深圳市, 518054; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆, 400045)

摘要:为解决城市用地紧张及用电量要求这一实际相互矛盾的问题,越来越多的地区将独立占地变电站的主控楼当作一个模块附建到其他综合建筑中去,这种附建式变电站中的振动设备会引发多层楼板的结构振动,不仅降低了设备的动态精度和使用性能,而且降低了楼面的振动舒适性。在分析各国建筑规范中关于振动舒适度指标基本规定的基础上,建立了附建式变电站整体结构在设备激振作用下有隔振垫和无隔振垫情况下的动力响应分析有限元计算模型。通过对各模型进行振动时程分析,将计算结果和规范规定的限值进行比较,判定了附建式变电站的舒适度及隔振垫的隔振效果。

关键词:附建式变电站;楼板振动;舒适度;隔振

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0139-05

The floor vibration analysis of the building with an attached substation

Dai Zhiyong¹, Tu Haoxi¹, Zhang Xuefeng¹, Huang Youwei¹, Wang Lingzhi²

(1. Shenzhen Power Planning and Design Limited Institute, Shenzhen 518054;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: In order to solve the practical problem of the conflicting between the shortage of land and the power consumption requirements, the substations used to be set in a separate area are built as a module attached to or put into the other comprehensive buildings in more and more area. This attached build substation equipment will cause vibrations in the structure of multi-floor, not only reduces the device's dynamic accuracy and performance, but also the reduces the floor vibration comfort. Based on the analysis of national building codes of the basic provisions on the vibration comfort index, the finite element models of the whole structure with an attached substation equipment with and without the vibration isolator were established to obtain the dynamic responses in the exciting of the machines. Through the vibration analysis of the each model, the calculated results and the specification limits are compared to determine the comfort of the building with the attached substations and isolation effect.

Key words: Attached build substations; floor vibration; comfort; vibration isolation

随着经济的高速发展,变电站建设与土地资源日益珍贵的矛盾越来越尖锐。附建式变电站这种新的形式将独立占地变电站的主控楼当作一个模块附建到其他综合建筑(如:办公楼、酒店、公寓、住宅等)中去,一方面将高压输电线路上的电力进行降压,一

方面向城市附近区县居民、工业企业供电,担负着城市正常供电、日常生产、生活的重要责任。附建式变电站又可以分为贴临式变电站和嵌入式变电站。嵌入式变电站是指将变电站建设于大型建筑的主体内部,而贴临式变电站则指变电站紧贴着主体建筑建

设。不论是嵌入式还是贴临式,附建式变电站中的振动设备都会引发多层楼板的结构振动,这不仅降低了设备的动态精度和使用性能,还会降低楼面的振动舒适性,使处在其中的工作人员及居住者有不舒适感,甚至影响居住者和工作人员的身体健康。以往对建筑物楼板的设计主要是从安全性能的角度去考虑,而对舒适度的考虑有所欠缺。

对于楼板的振动问题,许多学者进行了研究。法国数学家 Sophie 于 1811 年最早得到薄板的振动微分方程^[1]。后来 Navier^[2]利用傅里叶三角级数将微分方程转换为代数式,从而求解出某些特定边界条件下结构的振动精确解。1933 年, Gershgorin^[3]求解了带有集中质量的四周简支的标准矩形板的一种封闭形式解。1964 年, Amba-Rao^[4]给出了四边简支矩形薄板另外一种形式的封闭解。最近 Amabili 等^[5]描述分析了考虑附加集中质量的转动惯量和薄板几何缺陷的矩形薄板的自由振动问题,并进一步讨论了附加集中质量的矩形薄板的几何非线性振动问题^[6]。

然而,上述研究都是仅仅针对单块板或集中重量,没有考虑整个结构以及分布质量的变压器的振动传递和隔震等措施。下面在将总结各国规范对楼板振动舒适度的相关要求,对附建式变电站整体结构进行时程分析,并将计算结果和规范限值进行比较,得到的结论可为未来附建式变电站楼板振动舒适度设计提供参考。

1 楼板振动限值

无论是钢结构还是钢筋混凝土结构,一旦在建成后才发现其使用性能存在问题,后期的修复费用高昂且效果也未必理想^[7]。建立楼板振动对居住性能的评价方法和评价标准,并在设计阶段就对此进行考虑,可以有助于设计出更经济、舒适的建筑。当前,国际上广泛采用的评价指标有振动频率、加速度等限值。

1.1 频率限值

当前,已有一些规范规程对楼盖结构的自振频率提出了明确的要求。比如,韩国的《组合楼板设计标准》规定楼板的自振频率不得小于 15 Hz;欧洲规范,如 Bachman 等^[8](1987)规定楼板自振频率不得小于 9 Hz;加拿大国家建筑法规规定楼板的自振频率要大于 5 Hz^[3];中国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)第 3.7.7 节规定楼盖结构的竖向振动频率不宜小于 3 Hz^[9];《混凝土结构设计规

范》(GB50010—2010)第 3.4.6 节规定楼盖结构的竖向自振频率验算住宅和公寓不宜低于 5 Hz,办公楼和旅馆不宜低于 4 Hz,大跨度公共建筑不宜低于 3 Hz^[10];《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)规定组合楼板的自振频率不得小于 15 Hz;另外,学者 Ellingwood 等^[11]认为,当楼板的跨度 L 和楼板的振动基频 f 满足 $f \geq \frac{24}{\sqrt{L}}$ 的要求时,就能保证

楼板的振动舒适度要求。可见,各国规范和学者对于振动舒适度问题给出的楼盖结构自振频率要求还存在较大的差异,但对于附建式变电站,由于变压器的振动频率高达 100 Hz 及以上,因此能满足所有规范的要求。

1.2 加速度限值

当采用加速度指标评价结构竖向振动舒适度时,要根据不同的性质,给出相对应的峰值加速度限值。对此,世界标准组织 ISO 10137:2007^[12]、ISO2631-2^[13]标准、美国国家标准局 ANSIS3.29、AISC/CISC 11^[14]、中国标准^[15]以及日本标准分别给出了不同建筑结构竖向振动加速度的容许值公式。本文将统一为加速度限制,如表 1 所示。显然,加速度限值标准是作为影响楼板舒适度评价的重要指标,附建式变电站的振动加速度可能超出规范限制,本文后续分析将分别参考对照中国标准和要求最严格的日本标准。

表 1 统一为加速度标准的限值

各国标准	振动级/dB	均方根加速度/(m·s ⁻²)	峰值加速度/(m·s ⁻²)
世界标准组(ISO 10137:2007)		0.046	0.065
美国、加拿大(AISC/CISC 11)			0.330
世界标准组(ISO2631/2-2003)	77	0.090	0.126
中国(GB/T 50355-2005) ^[10]	89	0.350	0.500
中国(GB 10070-88)	67	0.028	0.040
中国(JGJ3-2010)			0.050
美国 ANSI S3.29	74	0.063	0.090
日本标准 ^[11]	60	0.010	0.014

注:对于简谐振动,加速度幅值是加速度有效值(均方根加速度)的 1.414 倍。

2 典型附建式变电站整体结构振动分析

为了定量分析附建式变电站整体结构在机器设备激励下的动力响应数值,建立了包括机器设备在内的设备—结构三维整体有限元模型,其中梁、柱采用梁单元,楼板采用壳单元,机器设备采用实体单元进行模拟。不考虑机器设备对刚度的影响,耦合机

器设备和楼板板面之间节点的竖向位移,同时视整体结构的基础为刚性约束,整个变电站结构体系的 ANSYS 三维有限元模型如图 1~4 所示。其中,图 1 为 110 kV 贴临式变电站整体有限元模型,图 2 为 110 kV 嵌入式变电站整体有限元模型,图 3 为 220 kV 贴临式变电站整体有限元模型,图 4 为 220 kV 嵌入式变电站整体有限元模型。

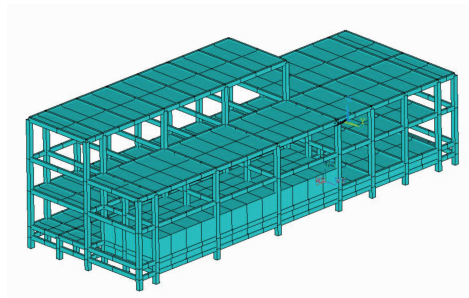


图 1 110 kV 贴临式变电站整体模型

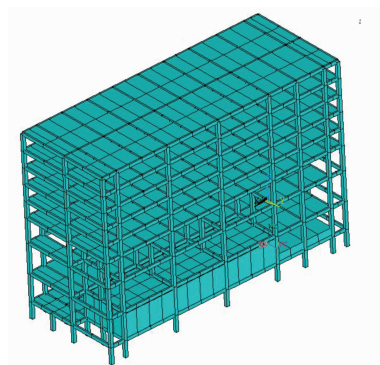


图 2 110 kV 嵌入式变电站整体模型

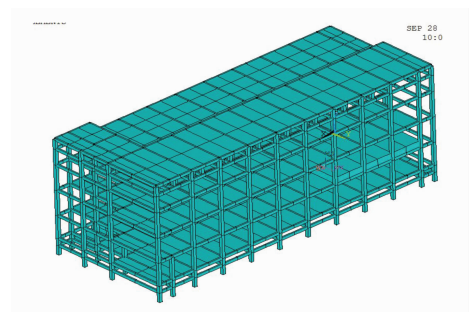


图 3 220 kV 贴临式变电站整体模型

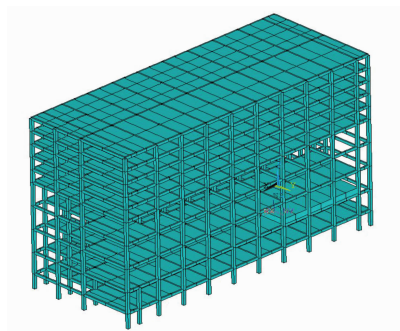


图 4 220 kV 嵌入式变电站整体模型

分别考虑加隔震垫和不加隔震垫两种工况,进行变压器荷载作用下整体结构的谐振分析,可得到不同类型的附建式变电站整体结构加隔震垫和不加隔震垫的振动加速度响应随高度变化的时程图,如图 5 与图 6,图中表明了贴临式变电站不同高度处的加速度响应值。

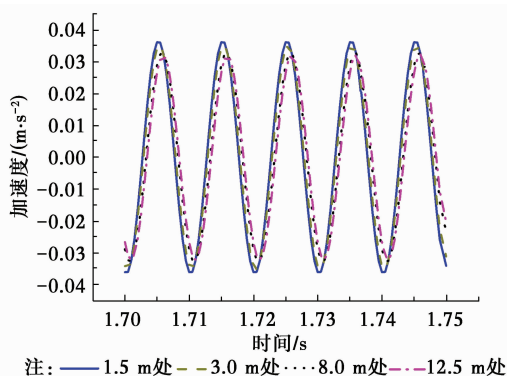


图 5 110 kV 贴临式无隔震垫加速度时程

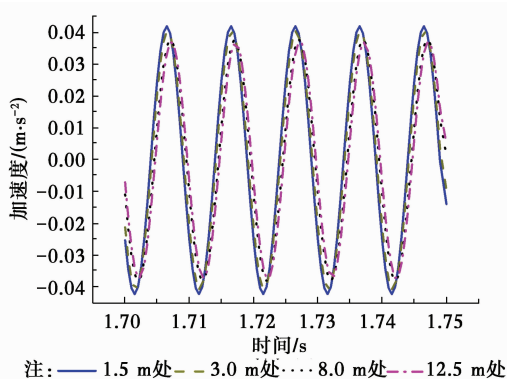


图 6 110 kV 贴临式加隔震垫加速度时程

从上图可知,对于 110 kV 贴临式变电站,在未加隔震垫时,整体结构的加速度峰值均在 0.05 m/s^2 以下(图 5),虽基本满足中国规范规定,但超过了日本规范的 0.014 m/s^2 规定的限值。在机器设备和结构楼板之间加上隔震垫后,整体结构各点的加速度峰值可降到 0.004 m/s^2 以下(图 6)。

从上图可知,由于质量和刚度的变化,贴临式变电站对楼板振动的加速度响应普遍超过嵌入式变电站。远离振源的高度,其楼板加速度响应变小,但其衰减幅度随高度成反比。对于 110 kV 嵌入式变电站,在未加隔震垫时,整体结构的加速度峰值均在 0.02 m/s^2 以下(图 7),均满足中国规范规定,底部两层稍有超过了日本规范的 0.014 m/s^2 规定的限值。在机器设备和结构楼板之间加上隔震垫后,整体结构各点的加速度峰值略有减小,但减小幅度不大(图 8)。

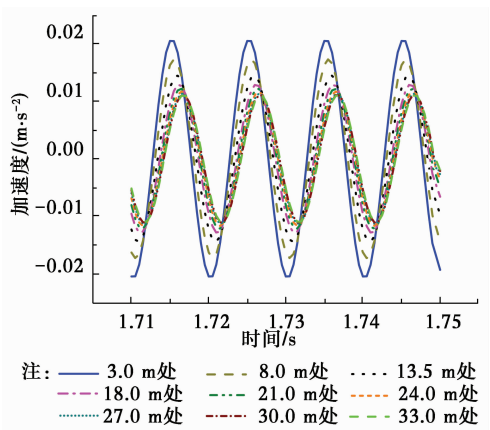


图 7 110 kV 嵌入式无隔震垫加速度时程

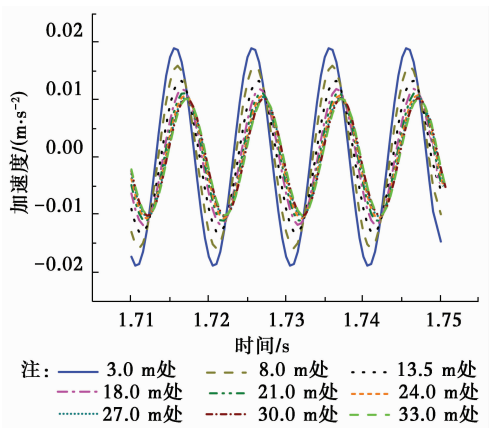


图 8 110 kV 嵌入式加隔震垫加速度时程

从上图可知,对于 220 kV 贴临式变电站,在未加隔震垫时,整体结构的加速度峰值均在 0.01 m/s^2 以上,有些楼层甚至高于 0.08 m/s^2 (图 9),远超日本规范的 0.014 m/s^2 规定的限值。在机器设备和结构楼板之间加上隔震垫后,整体结构各点的加速度峰值变小了,可满足中国规范的要求,但仍不能满足日本规范限制(0.014 m/s^2)的要求(图 10)。

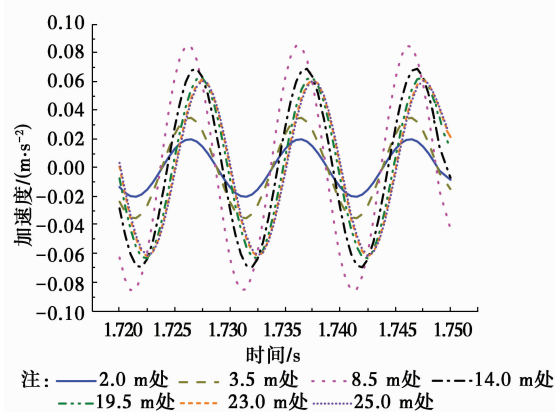


图 9 220 kV 贴临式无隔震垫加速度时程

从上图可知,对于 220 kV 嵌入式变电站,在未

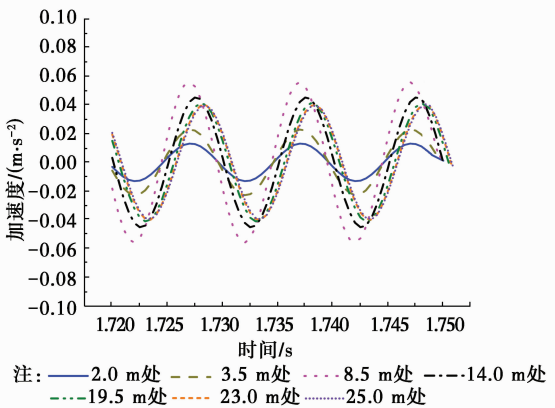


图 10 220 kV 贴临式加隔震垫加速度时程

加隔震垫时,整体结构的加速度峰值均在 0.04 m/s^2 以下(图 11),均满足中国规范规定,但都超过了日本规范的 0.014 m/s^2 规定的限值。在机器设备和结构楼板之间加上隔震垫后,整体结构各点的加速度峰值略有减小(图 12)。

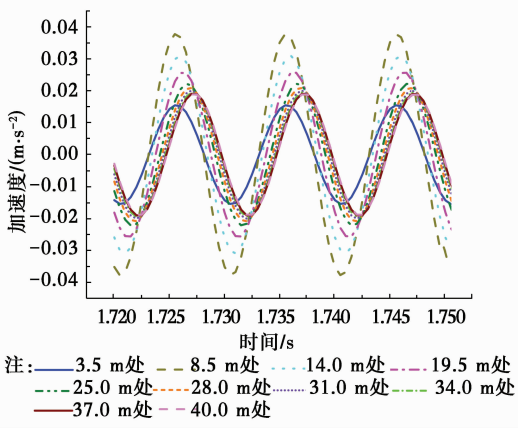


图 11 220 kV 嵌入式无隔震垫加速度时程

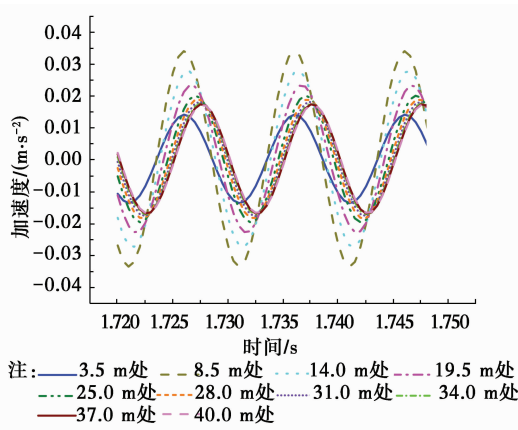


图 12 220 kV 嵌入式加隔震垫加速度时程

从上面内容可知,加了隔震垫后,不同的结构模型其整体结构的振动响应会有不同程度的减弱,为研究隔振垫的减振效果,以 220 kV 嵌入式变电站为例,分析计算不同隔振垫刚度的减振效果。

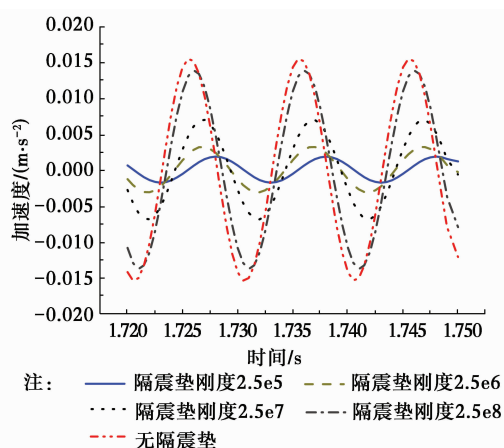


图 13 整体结构 3.5 m 高度处加速度对比

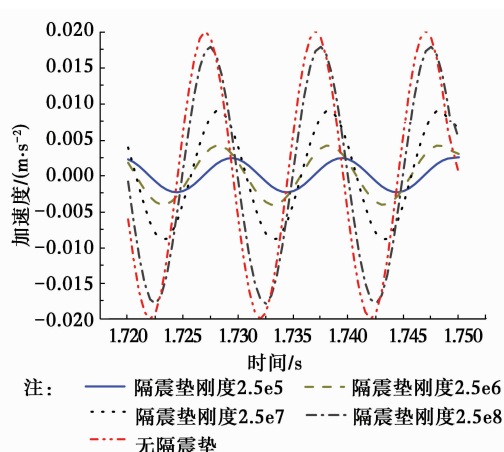


图 14 整体结构 31.0 m 高度处加速度对比

从上图可知,改变隔振垫的刚度后,减振效果变化明显,隔振垫刚度越小,减振效果越好,因此,在选择隔振垫刚度时,为使整体结构上部楼层的振动响应明显减弱,应尽量选择刚度小的隔震垫。

3 结 论

对于附建式变电站,由于变压器的振动频率高达 100 Hz 及以上,能满足现行所有规范的要求,但是其加速响应可能影响楼板的舒适性。在舒适度规定方面,日本规范限制最低。通过建立附建式变电站结构-设备整体有限元模型,分析计算了其在有隔振垫和无隔振垫作用下的振动响应。结果表明,附建式变电站在机器设备 100 Hz 高频简谐荷载激励下,楼板振动加速度峰值在未加隔振垫时,许多楼层已明显超出中国和日本规范规定的限值要求。在机器设备和楼板间加隔振垫后,能减弱传递到楼板上的振动,使其满足中国规范要求。由于质量和刚度的变化,贴临式变电站对楼板振动的加速度响应普遍超过嵌入式变电站。远离振源的高度,其响应变

小,但其衰减幅度随高度成反比。在选择隔振垫时,应尽量选择刚度小的隔振垫。

参考文献:

- [1] 何福保,沈亚鹏. 板壳理论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1993.
- [2] 汉斯. 实用薄板理论[M]. 吴肇之. 译. 北京:人民交通出版社,1982.
- [3] Gershforin S. Vibrations of plates loaded by concentrated masses in Russian [J]. Prikl. Mat. Mekh, 1933,1:25-37.
- [4] Amba-Rao C L. On the vibration of a rectangular plate carrying a concentrated mass [J]. Journal of Applied Mechanics, 1964,31:550-551.
- [5] Amabili M, Pellegrini M, Righi F, et al. Effect of concentrated masses with rotary inertia on vibrations of rectangular plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,295:1-12.
- [6] Amabili M. Geometrically nonlinear vibrations of rectangular plates carrying a concentrated mass [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010,329:4501-4514.
- [7] 折雄雄,陈隽. 大跨度楼盖振动舒适度研究综述. 结构工程师, 2009,25(6).
- [8] Bachmann H, Ammann W. Vibrations in structures induced by the machines [J]. IABSE Structural Engineering Document, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987.
- [9] 高层建筑混凝土结构技术规程. JGJ3—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 混凝土结构设计规范. GB50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] Ellingwood B R, Tallin A. Structural serviceability: Floor vibrations [J]. Journal of Structural Engineering, 1984,110(2): 401-418.
- [12] International Standard 10137: Bases for Design of Structures-Serviceability of Buildings and Walkways against Vibrations[S]. 2007.
- [13] ISO 2631-2: Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration-Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz) [S]. 2003.
- [14] American Institute of Steel Construction: Steel Design Guides Series 11-Floor Vibrations Due to Human Activity [S]. 1997.
- [15] 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准 (GB/T50355—2005) [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.