

基于静态系数法的抗震仿真分析研究

文/张志明¹ 李 静²

1. 上海西门子高压开关有限公司; 2. 特灵空调系统(中国)有限公司上海研发分公司

抗震性能是高压开关设备、控制设备以及相关支撑构架等的重要性能。以某风电项目塔筒内的高压开关控制设备的支撑构架的抗震性能为研究对象,建立三维实体模型,采用静态系数法进行抗震仿真的有限元分析。基于有限元法得出在IEEE 1.0 g抗震设计水平下的结构的动力响应,为该结构在相应的抗震设计水平下安全设计提供指导。

结构的抗震性能分析方法主要有震害资料法、实验法、有限元模拟法,以及这些方法相结合、互相补充的研究方法。抗震性能的研究方法在建筑结构中的发展相对成熟,而在电气开关设备中还处于萌芽阶段,这主要是由于电气开关设备的抗震研究属于新兴的学科拓展领域,在这方面研究投入的人员、物质和财力还比较少,而且整个电气开关设备的结构形式没有形成一个完整、共性且有规律可循的体系,对于其研究还处于分散的研究阶段。

电气开关设备是国家实现智能化的关键,在设计寿命期限内,不同的应用环境对电气开关设备的抗震有相应要求。比如在GB 13450规范中明确提到了电气开关设备和控制设备的抗震要求,并明确了采用分析法、试验法或者两者组合的验证抗震性能的原则。

目前抗震分析方法主要分为静态系数法、加速度时程数值法和响应频谱(RRS)法。静态系数法适用于刚性设备(设备最低的共振频率大于35 Hz)。作为一种替代的分析方法,它也适用于柔性设备。这种方法采用了一种更加保守、更加简单的计算技术。不需确定设备的固有频率,但是,把开关设备和控制设备的响应频谱假设为阻尼比取值趋于保守且恰当的基础上要求的响应频谱的峰值。然

后,该响应频率应乘以静态系数1.5,该静态系数是在考虑了多频励磁和多方式响应的影响后根据经验确定的。作用于开关设备和控制设备每一部件的地震力,由该部件重心处集中质量和加速度的乘积求得。得出的地震力分布应与质量分布成正比例。

文中以某风电塔筒内的高压控制设备的支撑构架为研究对象,在相应的抗震设计水平下,研究分析控制设备支撑构架和高强度紧固件的可靠性。高强度螺栓通常受到两个力:一是安装时施加在螺栓上的预紧力,对于一定规格的高强度螺栓,预紧力基本为定值;二是地震工作载荷传递到螺栓上的负载。通过ANSYS有限元软件对结构进行模拟分析研究,分析基于IEEE 1.0 g的设计抗震工况下支撑构架的应力和螺栓受力特性,为该结构在相应的抗震设计水平下的安全设计提供指导。

高压开关控制设备支撑构架的抗震分析

1. 建立有限元模型

有限元法是通过建立用于计算的离散元模型实现的。首先使用PROE 3D设计软件建立用于分析的三维实体几何模型,将三维实体几何模型导入有限元软件ANSYS WORKBENCH,然后对三维实体几何模型进行模型简化处理,建立相应的螺栓

和支撑构架等的实体网格模型。有限元计算模型的螺栓采用Solid186六面体单元建模，支撑构架等采用Solid185单元建模，分析所用的材料为各项同性材料。接触单元和目标单元分别采用CONTA174和TARGE170，螺栓预紧单元为PRESTS179。高压开关控制设备与其支撑构架、螺栓与控制设备以及螺栓与支撑构架间均采用标准接触建模。且有限元模型考虑自身重量的影响，重力加速度 $g=9\,810\text{ mm/s}^2$ 。

不同于以往对复杂系统中主要部件采用等效质量简化的方法，本文保留了原始设计模型，在连接处进行处理，合理划分网格以减少计算体量，既可对支撑构架进行分析，又能计算出结构中主要部件的变形和应力情况，对整个结构抗震性能的评估与后续优化有重要意义。

网格的结构和疏密程度直接影响计算结果的精度，此次采用有限元软件的Tetrahedrons和Sweep的网格划分方法并进行合理且有效的网格划分。有限元计算模型如图1所示。



图1 有限元计算模型

为了实现有限元计算，需要对简化后的零部件添加相应的材料属性。用于有限元计算模型的材料属性见表1。

表1 计算模型的材料属性

零部件	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
控制设备 支撑构架	S235J2	200 000	0.3	7850	235	360
控制设备	S235JR	200 000	0.3	7850	235	360
螺栓（8.8级）	Steel	200 000	0.3	7850	640	800

2. 地震工况

根据某风电项目的抗震要求，高压开关控制设备的支撑构架一般需要考虑的载荷组合与工况见表2。常规工况为自重工况，地震工况是结构在运行安全地震动下的响应，在空间上主要考虑三个正交方向，即水平横向（X）、垂直方向（Y）、水平纵向

（Z）。组合工况为自重工况和地震工况的组合。按照IEEE 693地震设计规范IEEE1g_2% 阻尼要求，三个地震载荷大小和方向存在正负性与互换性，所以三个方向的地震加速度共有24种组合情况。

表2 载荷工况

序号	载荷工况	载荷说明
1	常规工况	螺栓预紧力+重力加速度
2	组合工况1	螺栓预紧力+重力加速度+地震加速度工况1
3	组合工况2	螺栓预紧力+重力加速度+地震加速度工况2
⋮	⋮	⋮
25	组合工况24	螺栓预紧力+重力加速度+地震加速度工况24

按照IEEE 693地震设计规范，IEEE 1g_2% 阻尼对应的设计计算载荷为规范地震载荷谱的50%，IEEE 693地震规范IEEE 1g_2% 阻尼地震载荷谱如图2所示。

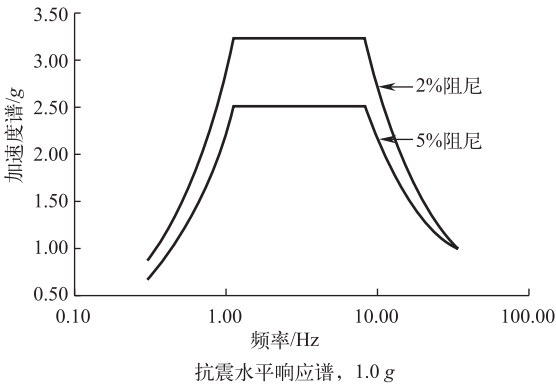


图2 地震载荷频谱图

由上述可知，有限元计算的第1个载荷步为螺栓预紧力，并在后续载荷步中锁定，第2个载荷步为重力加速度载荷步，第3~26个载荷步为重力加速度与不同地震方向和大小的叠加，用于计算的载荷步见表3。

表3 计算载荷步（单位： mm/s^2 ）

载荷步	加速度X	加速度Y	加速度Z
1	0	0	0
2	0	9 810	0
3	23 811	17 430	9 524.4
4	23 811	17 430	-9 524.4
5	23 811	2 190.5	9 524.4
6	23 811	2 190.5	-9 524.4
7	-23 811	17 430	9 524.4
8	-23 811	1 7430	-9 524.4

(续)

载荷步	加速度X	加速度Y	加速度Z
9	-23 811	2 190.5	9 524.4
10	-23 811	2 190.5	-9 524.4
11	9 524.4	17 430	23 811
12	-9 524.4	17 430	23 811
13	9 524.4	2 190.5	23 811
14	-9 524.4	2 190.5	23 811
15	9 524.4	17 430	-23 811
16	-9 524.4	17 430	-23 811
17	9 524.4	2 190.5	-23 811
18	-9 524.4	2 190.5	-23 811
19	9 524.4	28 859	9 524.4
20	9 524.4	28 859	-9 524.4
21	-9 524.4	28 859	9 524.4
22	-9 524.4	28 859	-9 524.4
23	9 524.4	-9 238.8	9 524.4
24	9 524.4	-9 238.8	-9 524.4
25	-9 524.4	-9 238.8	9 524.4
26	-9 524.4	-9 238.8	-9 524.4

结果分析

1. 高压开关控制设备的支撑构架应力结果分析

经过计算，常规重力载荷工况下支撑构架的等效应力云图如图3所示，组合工况下最大等效应力云图如图4所示。

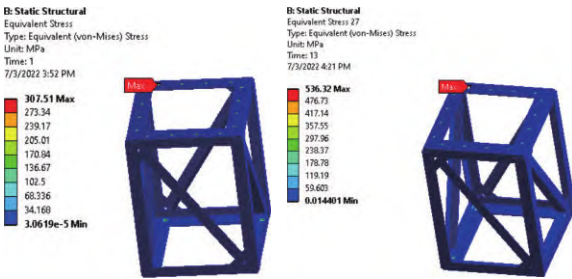


图3 常规工况等效应力云图 图4 组合工况最大等效应力云图

由图3和图4可知，最大等效应力均发生在螺栓孔周围，是因螺栓预紧力引起的，关于螺栓孔处的应力可依据VDI 2230给出的标准进行计算，常规工况和组合工况下支撑架构安全系数见表4。

表4 支撑架构安全系数

载荷工况	应力最大位置	载荷步	计算应力/MPa	许用应力/MPa	安全系数
正常工况	螺栓孔位置	2	130	156.7	1.2
	其他位置	2	17		9.2
组合工况	螺栓孔位置	13	133		1.17
	其他位置	13	151		1.04

2. 螺栓应力分析

经过计算，常规重力载荷工况下螺栓的工作载荷如图5所示，组合工况下最大螺栓工作载荷如图6所示。

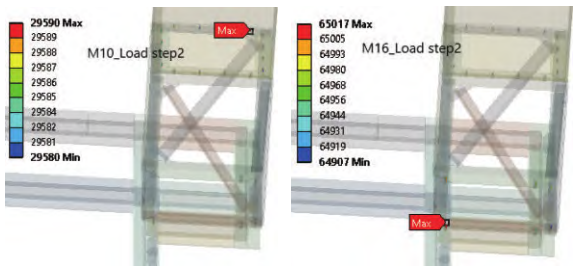


图5 常规工况螺栓工作载荷 图6 组合工况螺栓最大工作载荷

按照规范VDI 2230关于螺栓连接的理论指导，VDI 2230关于螺栓等效应力的计算采用如下公式

$$\sigma_{red,B} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_s^2} < R_{p0.2min}$$

式中， $\sigma_z=F_z/A_0$ ； $\tau_s=F_{xy}/A_0$ ； A_0 为螺栓的应力截面积； F_z 为螺栓总的轴向力； F_{xy} 为螺栓剪切力。因此结构 F_{xy} 相对于 F_z 非常小，可忽略不计。螺栓的计算应力以及安全系数见表5。

表5 螺栓安全系数

载荷工况	螺栓型号	载荷步	工作载荷/N	应力横截面积/mm ²	计算应力/MPa	许用应力/MPa	安全系数
正常工况	M10 8.8	2	29 590	58	510	582	1.14
	M16 8.8	2	65 017	157	414	535	1.29
组合工况	M10 8.8	6	35 513	58	612	640	1.04
	M16 8.8	10	67 102	157	428		1.49

结束语

根据IEEE 693标准的IEEE1g_2%阻尼地震载荷谱，并基于静态系数法的抗震有限元计算得出如下结论。

1) 支撑构架在所有载荷工况作用下，许用应力安全系数均大于1，满足规定的IEEE1g_2%阻尼地震载荷谱设计要求。

2) 按照各种载荷工况计算得到的螺栓工作载荷，可以对螺栓的整体数量进行优化。

3) 基于静态系数法计算的抗震结果，支撑构架在螺栓孔之外的位置整体应力水平相对较低，因此，在后期优化设计时对安全系数比较大的地方可适当进行减重优化设计。EA

(收稿日期：2022-07-04)