

基于液体阻尼器的格构式塔架减振分析研究

宋力兵¹ 周敏² 吕中界¹ 李哲² 侯冬慧²

1. 中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部 湖南株洲 412000

2. 华电河南新能源发电有限公司 河南郑州 450000

摘要: 针对陆上大兆瓦格构式塔架在激振风速下二阶涡激振动问题, 从理论与工程应用方面研究了液体阻尼器在塔架结构减振上的可行性。首先, 基于现有格构式塔架结构模型进行频率计算, 分析涡激风速以及可能存在的风险; 随后, 基于涡激频率进行阻尼器设计, 并进行阻尼器等效模型计算; 最后, 针对增加液体阻尼器的格构式塔架结构, 施加周期性涡激风速下的动态响应载荷, 计算分析各节点的加速度和位移; 结果表明: 在涡流激振力的情况下, 各节点加速度减少 48% 左右, 位移减少 25% 左右。

关键词: 格构式塔架; 涡激振动; 液体阻尼器; 等效模型

引言

目前, 陆上风机机组塔架以钢性圆锥形塔架为主, 在低风速地区则以 140m 以上柔性钢塔架为主, 随着行业发展, 最近几年, 160m 左右格构式塔架应用逐年增加。塔架增高带来频率的影响, 塔架二阶频率大幅下降, 涡激振动风速下降, 停机状态下, 涡流共振风险加大。

涡激共振风险将导致塔架疲劳破坏, 为此, 龙凯^[1]等提出了疲劳损伤分析方法。解决结构共振的方法主要有两种, 一种是增加结构刚度, 另外一种是在塔架内部增加阻尼器; 增加结构刚度的方法成本高, 工程量大, 因此, 增加阻尼器是一种有效的解决方法。根据是否需要外界能源输入, 结构振动控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制^[2], 风电行业主要应用被动控制阻尼器, 如调谐液体阻尼器 (Tuned Liquid Damper, TLD), 调谐质量阻尼器 (Turned Mass Damper, TMD), 液体粘滞阻尼器 (Fluid Viscous Dampers FVD)。

TMD 在早期高耸建筑中有广泛的应用, 且减振效果经过验证。但是, TMD 存在弹簧装置损坏无法回复, 造成装置失效等问题。陈永祁等提出 FVD 在高层结构上抗震抗风设计, 并且进行了相关的应用。FVD 对于超高层建筑减振有较好的效果, 但是结构复杂, 安装空间需求大。TLD 具有结构简单、安装方便、成本低、频率调整适应范围较宽等优点, 对风载荷和地震载荷有很好的抑制减振效果, 因此, 在建筑行业高耸结构领域有广泛的应用, 比较典型的应用有日本 Nagasaki 机场指挥塔等, 珠海金山大厦以及大连国贸大厦等国内建筑。张友林等提出浅水调谐液体阻尼器与风电机组塔筒相互作用

的 CFD-FEM 耦合数值分析方法, 将液体阻尼器放置塔顶机舱内, 多层水箱叠加, 用于解决风机塔架一阶振动问题。

由于风电机组结构空间限制, 以及风电机组应用工况的差异, 现有文献中提到的方法难以进行工程移植和评估, 本文提出一种基于液体阻尼器 TLD 的塔架二阶减振方法, 该方法将液体阻尼器进行等效模型分析, 等效参数与有限元模型 FEM 进行耦合动态分析, 提高计算效率; 同时设计深水调谐阻尼器, 阻尼器结构简单, 体积小, 安装方便, 多种配置方案进行对比分析, 兼顾经济性和减振性能, 具有较好的工程应用价值。

一、格构式塔架频率和涡激风速计算分析

格构式塔架相对现有的钢塔架频率较高, 随着风力发电机组叶轮直径增大以及塔架高度增加, 频率逐渐降低, 涡激风险增大, 本文针对现有的大兆瓦超高格构式塔架进行分析。

(一) 频率计算

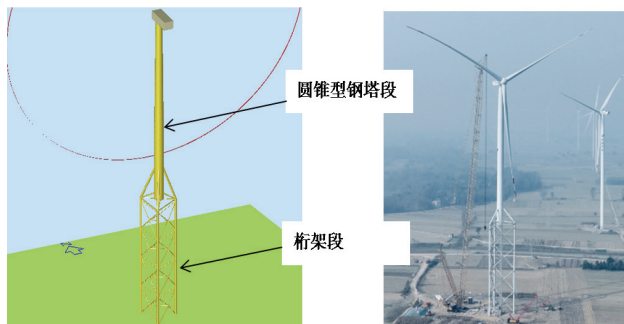


图 1 钢混塔架结构以及风机

格构式塔架结构如图1所示，下部为桁架结构，上部为圆锥段钢结构，桁架部分高度根据机型设计，圆锥型钢结构采用普通钢塔结构，桁架结构与圆锥段之间采用钢转换段连接，风力发电机组相关参数如下表1所示。

表1 风力发电机组相关参数

序号	名称	单位	值
1	功率等级	MW	4.5
2	叶片长度	m	97.5
3	风轮重量	kg	120000
4	风轮重心位置 (x, y, z)	m	(0, -0.51, 2.72)
5	机舱重量	kg	135000
6	机舱重心位置 (x, y, z)	m	(2.35, 0, 2.13)
7	塔架高度	m	157.3
8	桁架段材料	/	Q345
9	圆锥型钢塔架段塔架材料	/	Q345

本文采用有限元方法计算风机安装完成后塔架固有特征频率，其中风轮、叶片采用简化的质量点，质量点附加在相应质心位置，依据塔架详细图纸，对塔架筒节高度、筒节直径、壁厚等进行详细参数建模。频率计算结果如下表2所示。

表2 塔架频率计算

频率阶数	频率值 HZ	特征
1阶	0.22575	塔架前后
1阶	0.22585	塔架左右
2阶	1.2742	塔架前后
2阶	1.2747	塔架左右

(二) 涡激风速分析

当风吹过塔筒时，会在塔架背面形成脱落旋涡，一旦脱离涡的频率和塔架特征频率接近，便会一起风机共振，涡激共振危害较大，会造成塔架疲劳损伤或者倒塌等事故发生，因此需要特别关注。

本文依据标准GL2010和DIN 4133进行涡激振动分析，根据经验公式(1)，可计算风机塔架的二阶涡激临界风速。

$$V_{cri} = \frac{f * D}{S} \quad (1)$$

式中： V_{cri} 为二阶涡激临界风速， f 为塔架二阶固有特征频率， D 为塔架振型位移最大处直径， S 为斯特劳哈数，斯特劳哈数一般取值0.18 ~ 0.2。由上式可以确定塔架二阶涡激风速。根据涡激风速进行涡激力的计算，涡激力的计算按照下式进行。

$$F = m_i (2\pi f)^2 \max y_f \quad (2)$$

式中： m_i 是第*i*段塔筒上惯性力在截面上产生的附

加载荷，该值由第*i*段以上部分所有惯性力合成，其表达式如下所示， y_f 为塔架涡激振动后最大振幅。

$$m_i = m_i (F_i + F_{i+1} + \dots) h_i + m_{i+1} \quad (3)$$

二、液体阻尼器设计以及等效模型分析

由于涡激振动对格构式塔架结构产生影响和破坏，需要采取相应的措施，本文主要研究采用液体阻尼器进行减振设计，受塔架结构空间限制，阻尼器需采用较小的设计体积。

(一) 液体阻尼器设计

根据贾影等提出的矩形TLD计算动水压 F_m 的简化模拟公式，利用VOF法可计算谐波激励下的容器的动力水压。因它在水的晃动方程中考虑了水的粘滞性且可以用来计算水晃动时的波高，并且可计算水箱上部预留的空间，因此，该理论简单方便、模型准确性较高、适用于部分水深。可用于格构式塔架液体阻尼器选型设计。

由模拟公式可以推导出矩形水箱的振荡频率为公式(4)，式中： A 为阻尼器水箱激励方向长度， h 为水深。

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2A} \tanh\left(\frac{\pi h}{2A}\right)} \quad (4)$$

当该 f_i 接近结构的振荡频率时，TLD的减振效果才明显。本文以塔架固有频率的0.95倍为设计频率，设计参数为 $A=760\text{mm}$ ， $h=200\text{mm}$ 。

(二) 液体阻尼器等效模型

为简化计算分析，提高计算效率，本文将液体阻尼器模型进行简化和等效。将等效后的阻尼和刚度等参数与格构式塔架结构动力学模型进行耦合。

本文采用集中质量法对液体阻尼器TLD进行等效，Housner将脉冲压力和振荡压力分别用两个与容器联接形式不同的等效质量的振动效应模拟。如图2所示， m_1 为脉冲质量，与箱体固接； m_2 为振荡质量，与箱体弹性联接。

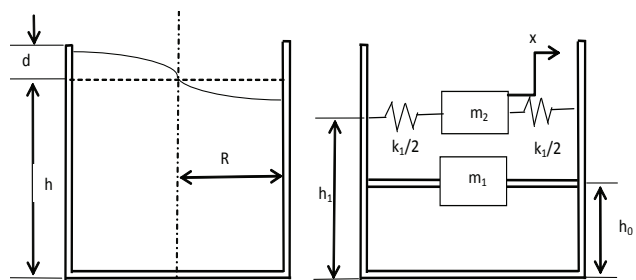


图2 Housner模型

等效模型公式如下(5) ~ (9)。

$$m_2 = 0.83m \frac{\tanh(3.2h/D)}{3.2h/D} \quad (5)$$

$$m_1 = m \frac{\tanh(0.85D/h)}{0.85D/h} \quad (6)$$

$$k_1 = 12m_2^2gh / mD^2 \quad (7)$$

$$h_0 = \frac{3}{8}h\{1 + \alpha[\frac{m}{m_2}(\frac{D}{2h})^2 - 1]\} \quad (8)$$

$$h_1 = h[1 - \frac{1}{3}\frac{m}{m_2}(\frac{D}{2h})^2 - 0.315\beta\frac{D}{h}\sqrt{0.07(\frac{mD}{m_2h})^2}] \quad (9)$$

依据上述模型和公式可计算等效质量 m_1 、 m_2 、以及等效刚度 k_1 。

三、基于液体阻尼器等效模型的动态响应分析

本文基于液体阻尼器等效模型TLD开展结构动力学分析，阻尼器安装位置在塔架中上部圆锥型钢塔部分，受结构空间和成本限制，一般液体阻尼器质量配比小于模态质量的0.5%，因此，应综合衡量液体阻尼器水箱数量和减振效果之间的差异，确定最终的数量配比，形成具有经济性、可行性的减振方案。

根据阻尼器质量和数量配比，分析多种工况下格构式塔架动态响应状态，工况1水箱液体质量占比为0.1%，其它工况水箱液体质量占比分别为0.15%、0.25%、0.375%和0.5%，具体工况见下表。

表3 液体阻尼器TLD工况配比

工况	激励方向 长度A	水深h	液体净重 m	质量比 μ	TLD数量 n
Case1	800mm	220mm	0.5t	0.03%	5
Case2	800mm	220mm	1.5t	0.1%	14
Case3	800mm	220mm	2.25t	0.15%	20
Case4	800mm	220mm	3.75t	0.25%	34
Case5	800mm	220mm	5.625t	0.375%	50
Case6	850mm	260mm	0.5t	0.03%	4
Case7	850mm	260mm	1.5t	0.1%	10
Case8	850mm	260mm	2.25t	0.15%	15
Case9	850mm	260mm	3.75t	0.25%	25
Case10	850mm	260mm	5.625t	0.375%	38

对工况1至工况8进行计算分析，获取各相关工况下相应节点的加速度和位移时程曲线。各工况下的减振率如下表4，由表4可见，case3、case4、case8和case9经济性比较好，且能满足性能减振率48%以上。

表4 液体阻尼器TLD各工况下减振率

工况	位移mm	加速度mm/s ²	减振率%	
无TLD	37	2150	/	/
Case1	31.67	1788	14.41	16.84
Case2	26.55	1206	28.24	43.91
Case3	25.89	1103	30.03	48.70
Case4	25.35	1098	31.49	49.03
Case5	24.59	1056	33.54	50.88
Case6	32.00	1802	13.50	16.19
Case7	27.20	1212	26.48	43.63
Case8	26.60	1112	28.10	48.28
Case9	26.01	1100	29.71	48.89
Case10	24.28	1068	34.38	50.33

结论

(1) 格构式塔架二阶特征频率在交底的情况下，会产生结构涡激振动影响，产生结构疲劳，甚至造成破坏，在风机钢-混设计过程中应引起足够重视。

(2) 格构式塔架内部阻尼器设计选型受安装空间影响，阻尼器尺寸应作为设计选型的约束条件，采用经验公式进行设计选型具有可行性；houner等效模型对于阻尼器简化和后续动态响应分析计算具有一定工程应用价值。

(3) 应用不同的阻尼器数量、尺寸，形成不同的阻尼配置方案，计算格构式塔架在二阶涡激力作用下的加速度和位移，采用TLD液体阻尼器可有效降低加速度和位移48%和25%左右。

参考文献

- [1] 吕中界, 侯冬慧. 深水液体阻尼器在钢结构减振中的设计实践[J]. 工程技术应用, 2022, 18(3): 112-115.
- [2] 张友林, 王振华. 调谐液体阻尼器等效模型的简化计算方法[J]. 现代机械, 2024, 41(1): 23-26.
- [3] 陈永祁, 吴启明. 风电塔架二阶振动控制的工程经济性研究[J]. 新能源技术经济, 2023, 15(2): 77-80.
- [4] 贾影, 赵欣. 液体阻尼器在160米风电塔架中的安装调试[J]. 电力设备管理, 2022, 39(12): 88-91.