



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119373665 A

(43) 申请公布日 2025. 01. 28

(21) 申请号 202411366675.8

E04H 9/02 (2006.01)

(22) 申请日 2024.09.29

G06F 30/13 (2020.01)

(71) 申请人 同济大学

G06F 30/23 (2020.01)

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

G06F 119/14 (2020.01)

申请人 上海勘测设计研究院有限公司

G06F 111/04 (2020.01)

G06F 113/06 (2020.01)

(72) 发明人 尹文汉 乐治济 孙飞飞 林毅峰

赵家鸿 董飞 田会元 陈立

蔡小莹 陈校锋

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

专利代理师 廖程

(51) Int. Cl.

F03D 13/20 (2016.01)

E04H 12/00 (2006.01)

E04B 1/98 (2006.01)

权利要求书3页 说明书13页 附图12页

(54) 发明名称

一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构及其设计方法

(57) 摘要

本发明涉及一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构及其设计方法,其中,高强钢约束阻尼增效段包括高强材料层、阻尼层、约束层,高强材料层的上下端分别与塔身的非耗能段连接,阻尼层与约束层不与非耗能段直接连接,阻尼层一侧贴敷于高强材料层、另一侧贴敷有约束层;设计方法包括:首先进行风电塔及其基础的初步设计、确定高强钢约束阻尼增效段的布置位置;采用高强钢制作加工高强材料层;通过模态阻尼比计算,进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化,确定出相应的结构方案与附加阻尼。与现有技术相比,本发明能够克服当前基于惯性和基于材料的技术所存在的局限性,实现对附加阻尼的协同增效作用,在降低用钢量的同时提升阻尼效果。

S1、按照现有方法进行风电塔及其基础的初步设计

S2、按照现有约束阻尼的优化方法确定高强钢约束阻尼增效段的布置位置

S3、采用高强钢制作加工高强材料层,降低局部截面尺寸

S4、通过模态阻尼比计算,进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化,确定出高强钢约束阻尼增效段的结构方案与附加阻尼

1. 一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构,其特征在于,包括非耗能段和高强钢约束阻尼增效段,所述高强钢约束阻尼增效段包括高强材料层、阻尼层、约束层,其中高强材料层的上下端分别与塔身的非耗能段连接,阻尼层与约束层不与非耗能段直接连接,阻尼层一侧贴敷于高强材料层,阻尼层另一侧贴敷有约束层。

2. 根据权利要求1所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构,其特征在于,所述高强材料层采用钢材的强度和疲劳性能高于非耗能段采用钢材的强度和疲劳性能。

3. 根据权利要求1所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构,其特征在于,所述约束层的厚度小于风电塔原耗能段的厚度减去高强材料层的厚度,其中,原耗能段是指传统约束阻尼措施的耗能段;

所述高强材料层的厚度小于或等于其上下连接的非耗能段塔身厚度。

4. 根据权利要求3所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构,其特征在于,所述约束层的厚度为2~15mm。

5. 一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、按照现有方法进行风电塔及其基础的初步设计;

S2、按照现有约束阻尼的优化方法确定高强钢约束阻尼增效段的布置位置;

S3、采用高强钢制作加工高强材料层,降低局部截面尺寸;

S4、通过模态阻尼比计算,进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化,确定出高强钢约束阻尼增效段的结构方案与附加阻尼。

6. 根据权利要求5所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,所述步骤S4中模态阻尼比的计算过程包括:

忽略约束段范围塔筒弯矩的变化,取宽度为 b 的约束塔壁进行受力和变形分析;约束阻尼段塔壁的两端受到弯曲轴向力 F 的作用,并通过一半的约束段长度将部分轴向力通过阻尼层的切应力传递至约束层,结合塔壁、阻尼层和约束层的应力应变分布,分别根据平衡条件、几何条件、物理条件,并考虑边界条件,依次计算得到传递段阻尼层的剪切应变能、传递段阻尼层的总应变能、阻尼层的剪切应变能占比、塔顶水平荷载 P 作用下风电塔的总应变能、约束阻尼段的总应变能、约束阻尼段阻尼层的剪切应变能,再根据模态应变能法计算含约束阻尼段的风电塔的一阶模态阻尼比。

7. 根据权利要求5所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,所述步骤S4中进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化的过程具体是分析阻尼层厚度、约束层厚度、塔壁厚度对模态阻尼比的影响,以确定出高强钢约束阻尼增效段内各层的厚度。

8. 根据权利要求7所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,所述分析阻尼层厚度、约束层厚度、塔壁厚度对模态阻尼比的影响,包括有:

分析过程1、单独分析阻尼层厚度对模态阻尼比的影响;

分析过程2、单独分析阻尼层厚度取最优值时的模态阻尼比;

分析过程3、分析阻尼层厚度取最优值、且约束层与塔壁总厚度不变时的模态阻尼比;

分析过程4、分析阻尼层厚度取最优值、且约束层与塔壁厚度之比不变时的模态阻尼比；

分析过程5、分析阻尼层厚度取最优值时阻尼层的最大切应变。

9. 根据权利要求8所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,所述分析过程1中,阻尼层厚度 t_1 对模态阻尼比的影响为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = (\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 * \frac{2l(H-h)^2}{DEW_0} \frac{t_2}{(t_0+t_2)} \frac{-e^{6\Lambda} + (8\Lambda^2 + 4\Lambda - 1)e^{4\Lambda} + (-8\Lambda^2 + 4\Lambda + 1)e^{2\Lambda} + 1}{2\Lambda^2(1+e^{2\Lambda})^3}$$

当 $\Lambda = 1.639$ 时 $\frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = 0$, 阻尼比 ξ 取得最大值,即在其它参数给定的情况下,阻尼层厚度 t_1 存在最优值 $t_{1opt} = \frac{G(1+t_2/t_0)l^2}{2.6863Et_2}$,通过调节 l 的长度来调节 t_1 ,将 l 分成多段,以降低阻

尼层厚度;

其中, H 为塔顶高度, h 为约束阻尼段的高度,近似可取约束阻尼段顶部的高度, η_{dam} 为阻尼材料的损耗因子, η_s 为原结构的损耗因子, D 为约束阻尼段塔筒的直径, W_0 为约束阻尼段塔筒的抗弯截面模量, m 为塔顶集中质量, f 为风电塔的一阶频率, $\Lambda = l \sqrt{\frac{G(1+t_2/t_0)}{Et_1t_2}}$ 为无量纲参数, l 为过渡段长度、即为约束阻尼段长度的一半, G 为阻尼材料的剪切模量, E 为钢材的弹性模量, t_0 、 t_2 分别为约束阻尼段塔壁、约束层的厚度;

所述分析过程2中,模态阻尼比 ξ 为:

$$\xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{t_2} + 1\right)}$$

此时,阻尼比随 t_2 的增大而减速增大,当 t_2/t_0 大于3后继续增加 t_2 ,阻尼比提升将不明显,因此设计 t_2/t_0 取1~3;阻尼比随 t_0 的增大而加速减小;阻尼比随 l 的增加线性增加;阻尼比随 h 的增加加速减小;

所述分析过程3中,模态阻尼比 ξ 为:

$$\xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{T-t_0} + 1\right)}$$

此时,阻尼比随 t_0 的增大而快速减小, $T=t_0+t_2$ 、为约束层与塔壁总厚度;

所述分析过程4中,模态阻尼比 ξ 为:

$$\xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2\alpha T}{D}\right)^4\right) \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} + 1\right)}$$

此时,阻尼比随约束层与塔壁总厚度 T 的增加而降低, α 为约束层与塔壁厚度比;

所述分析过程5中,阻尼层的最大切应变:

$$\tau_{1max} = \tau_1(x = 0) = 1.51989 \frac{Mt_0t_2}{W_0l(t_0 + t_2)}$$

此时,最大切应力与1成反比,1过小将导致阻尼层的最大切应变 τ_{1max} 过大。

10. 根据权利要求5所述的一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,其特征在于,所述步骤S4在计算得到附加阻尼后,进一步按照附加阻尼进行风电塔的再次设计,以将附加阻尼的性能冗余转化为整体结构的用钢量节省。

一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构及其设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风电塔设计技术领域,尤其是涉及一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构及其设计方法。

背景技术

[0002] 近年来,海上风电的发展势头强劲,大型化趋势日益明显。随着风电支撑结构大型化,风电支撑结构演变为更高的塔筒和更长的叶片,单桩风电塔的设计在降本增效及抵御多重动力作用方面面临前所未有的挑战。当前,材料与结构形式创新,被动控制等振动控制技术是应对这些挑战的重要措施。

[0003] 比如,在材料与结构形式创新上,高强钢在实现海上风电支撑结构轻量化方面有较大潜力。这是因为高强钢具有更高的强度等同时,还具有更好的高周疲劳性能。公开信息显示中广核惠州港口风电项目采用了Q420M+Q355的组合方式,其采用Q420达7500吨,实现减重10%。宝武正式获颁“BWind500MD、BWind420MD高强钢对接接头疲劳性能评估”技术评估符合证书,这标志着宝武正式成为业内首家成功突破国际标准限制、能够应用高强钢进行基于疲劳设计的轻量化减重风电塔筒设计与制造的材料供应商。500Mpa的高强钢风电塔架也已完成吊装,在相同装机容量下可节约钢材20%、疲劳寿命提高25%。宝钢股份获得首个500Mpa风电钢批量订单,使得单塔重量从308吨降低至277吨,具有良好的减重与降本效果。

[0004] 在现有诸多被动控制技术中,TMD(Tuned Mass Damper,调谐质量阻尼器)和TLD(Tuned Liquid Damper,调液阻尼器)是两种关键的基于惯性的控制手段。它们通过在塔顶巧妙安装特定装置,利用反作用力原理,有效减轻风电结构的振动。TMD因原理简单明了且制造便捷,已在多种工程场景中广泛应用。为满足风电支撑结构的特殊需求,已发展出多种改进型TMD,如RID-TMD(旋转惯性双重调谐质量阻尼器)、PS-TMD(预应力调谐质量阻尼器)、PTMD(悬吊式调谐质量阻尼器)和TMDI(惯质调谐质量阻尼器)。同时,TLD作为另一种重要的被动控制装置,独具匠心地利用液体作为配重和耗能材料,实现多方向的减振效果,无需额外耗能设备。其成本效益高且维护成本低,展现出广阔的应用前景。然而,基于惯性的技术存在局限性,如对近场地震等特定作用的控制效果可能不理想,且计算分析需全面考虑各种复杂工况。

[0005] 此外,基于材料的被动耗能技术也受到一定关注。这类技术通常安装在结构下部,通过材料变形耗散能量,为结构提供附加阻尼,以减小振动。尽管相关研究尚显不足,但其在降本增效方面的巨大潜力已初见端倪。利用摩擦、粘滞、粘弹性等多种机制的耗能方案正在深入探索中,有望有效弥补基于惯性的方案在某些方面的不足,如修复和延长风电塔或基础寿命等。然而,技术成熟度和实际应用性成为制约基于材料的耗能技术应用的关键因素。风电塔作为高柔且薄壁的锥筒结构,难以为基于材料的耗能技术提供稳定的支撑环境。尽管一些耗能方案及其放大装置在计算分析上展现出一定的减振效果,但其安装方式可能

对塔筒筒壁的局部应力控制构成严峻挑战。同时,现有的少量缩尺试验与计算分析在考察薄壁结构与阻尼器连接的难度方面仍显不足。

[0006] 相较于其他基于材料的耗能方案,约束阻尼方案(如图1所示)在风电塔下部外围贴敷的实施方式更为便捷,且不会引发复杂的局部应力问题,因此在实际应用性方面具有显著优势。约束阻尼层由粘弹性材料作为被约束层,外层采用模量较大的材料(如钢材)作为约束层,可贴敷于圆柱壳结构表面提供阻尼性能。风电塔弯曲变形时,被约束层在基层与约束层之间产生相对变形,进而发生以剪切为主的变形来消耗能量,为结构提供附加阻尼。然而,由于风电塔筒自身的变形有限,如何通过特定措施放大阻尼层材料的变形,从而实现阻尼增效是难点。

[0007] 综上所述可知,通过材料与结构形式创新、振动控制措施进行降本增效仍然存在巨大挑战,主要包括如下三点。(1)陆地风电中常见的混合塔架等基于材料的风机结构形式受到运输安装条件等因素的制约;高强钢在轻量化方面有潜力但未见公开报道的研究报告;(2)基于被动控制的措施研究主要集中在TMD与TLD等基于惯性的措施,而基于材料阻尼的措施则因安装空间限制、阻尼效果等因素而研究较少,且技术成熟度低。(3)基于新材料的风机结构形式研究与被动控制的研究往往分别独立进行,而二者的协同增效作用未被关注。

发明内容

[0008] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构及其设计方法,能够克服当前基于惯性和基于材料的技术所存在的局限性,实现对附加阻尼的协同增效作用,在降低用钢量的同时提升阻尼效果。

[0009] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构,包括非耗能段和高强钢约束阻尼增效段,所述高强钢约束阻尼增效段包括高强材料层、阻尼层、约束层,其中高强材料层的上下端分别与塔身的非耗能段连接,阻尼层与约束层不与非耗能段直接连接,阻尼层一侧贴敷于高强材料层,阻尼层另一侧贴敷有约束层。

[0010] 进一步地,所述高强材料层采用钢材的强度和高周疲劳性能高于非耗能段采用钢材的强度和高周疲劳性能。

[0011] 进一步地,所述约束层的厚度小于风电塔原耗能段的厚度减去高强材料层的厚度,其中,原耗能段是指传统约束阻尼措施的耗能段;

[0012] 所述高强材料层的厚度小于或等于其上下连接的非耗能段塔身厚度。

[0013] 进一步地,所述约束层的厚度为2~15mm。

[0014] 一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,包括以下步骤:

[0015] S1、按照现有方法进行风电塔及其基础的初步设计;

[0016] S2、按照现有约束阻尼的优化方法确定高强钢约束阻尼增效段的布置位置;

[0017] S3、采用高强钢制作加工高强材料层,降低局部截面尺寸;

[0018] S4、通过模态阻尼比计算,进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化,确定出高强钢约束阻尼增效段的结构方案与附加阻尼。

[0019] 进一步地,所述步骤S4中模态阻尼比的计算过程包括:

[0020] 忽略约束段范围塔筒弯矩的变化,取宽度为b的约束塔壁进行受力和变形分析;约

束阻尼段塔壁的两端受到弯曲轴向力F的作用,并通过一半的约束段长度将部分轴向力通过阻尼层的切应力传递至约束层,结合塔壁、阻尼层和约束层的应力应变分布,分别根据平衡条件、几何条件、物理条件,并考虑边界条件,依次计算得到传递段阻尼层的剪切应变能、传递段阻尼层的总应变能、阻尼层的剪切应变能占比、塔顶水平荷载P作用下风电塔的总应变能、约束阻尼段的总应变能、约束阻尼段阻尼层的剪切应变能,再根据模态应变能法计算含约束阻尼段的风电塔的一阶模态阻尼比。

[0021] 进一步地,所述步骤S4中进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化的过程具体是分析阻尼层厚度、约束层厚度、塔壁厚度对模态阻尼比的影响,以确定出高强钢约束阻尼增效段内各层的厚度。

[0022] 进一步地,所述分析阻尼层厚度、约束层厚度、塔壁厚度对模态阻尼比的影响,包括有:

[0023] 分析过程1、单独分析阻尼层厚度对模态阻尼比的影响;

[0024] 分析过程2、单独分析阻尼层厚度取最优值时的模态阻尼比;

[0025] 分析过程3、分析阻尼层厚度取最优值、且约束层与塔壁总厚度不变时的模态阻尼比;

[0026] 分析过程4、分析阻尼层厚度取最优值、且约束层与塔壁厚度之比不变时的模态阻尼比;

[0027] 分析过程5、分析阻尼层厚度取最优值时阻尼层的最大切应变。

[0028] 进一步地,所述分析过程1中,阻尼层厚度 t_1 对模态阻尼比的影响为:

$$[0029] \quad \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = (\eta_{dam} - \eta_s) m (2\pi f)^2 * \frac{2l(H-h)^2}{DEW_0} \frac{t_2}{(t_0+t_2)} \frac{-e^{6\Lambda} + (8\Lambda^2 + 4\Lambda - 1)e^{4\Lambda} + (-8\Lambda^2 + 4\Lambda + 1)e^{2\Lambda} + 1}{2\Lambda^2(1+e^{2\Lambda})^3}$$

[0030] 当 $\Lambda = 1.639$ 时 $\frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = 0$,阻尼比 ξ 取得最大值,即在其它参数给定的情况下,阻尼

层厚度 t_1 存在最优值 $t_{1opt} = \frac{G(1+t_2/t_0)l^2}{2.6863Et_2}$,通过调节 l 的长度来调节 t_1 ,将 l 分成多段,以降

低阻尼层厚度;

[0031] 其中,H为塔顶高度,h为约束阻尼段的高度,近似可取约束阻尼段顶部的高度, η_{dam} 为阻尼材料的损耗因子, η_s 为原结构的损耗因子,D为约束阻尼段塔筒的直径, W_0 为约束阻尼

段塔筒的抗弯截面模量,m为塔顶集中质量,f为风电塔的一阶频率, $\Lambda = l \sqrt{\frac{G(1+t_2/t_0)}{Et_1t_2}}$ 为无

量纲参数, l 为过渡段长度、即为约束阻尼段长度的一半,G为阻尼材料的剪切模量,E为钢材的弹性模量, t_0 、 t_2 分别为约束阻尼段塔壁、约束层的厚度;

[0032] 所述分析过程2中,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0033] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s) m (2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{t_2} + 1\right)}$$

[0034] 此时,阻尼比随 t_2 的增大而减速增大,当 t_2/t_0 大于3后继续增加 t_2 ,阻尼比提升将不明显,因此设计 t_2/t_0 取1~3;阻尼比随 t_0 的增大而加速减小;阻尼比随1的增加线性增加;阻尼比随h的增加加速减小;

[0035] 所述分析过程3中,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0036] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{T-t_0} + 1\right)}$$

[0037] 此时,阻尼比随 t_0 的增大而快速减小, $T=t_0+t_2$ 、为约束层与塔壁总厚度;

[0038] 所述分析过程4中,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0039] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2\alpha T}{D}\right)^4\right) \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} + 1\right)}$$

[0040] 此时,阻尼比随约束层与塔壁总厚度T的增加而降低, α 为约束层与塔壁厚度比;

[0041] 所述分析过程5中,阻尼层的最大切应变:

$$[0042] \quad \tau_{1max} = \tau_1(x=0) = 1.51989 \frac{Mt_0t_2}{W_0l(t_0+t_2)}$$

[0043] 此时,最大切应力与1成反比,1过小将导致阻尼层的最大切应变 τ_{1max} 过大。

[0044] 进一步地,所述步骤S4在计算得到附加阻尼后,进一步按照附加阻尼进行风电塔的再次设计,以将附加阻尼的性能冗余转化为整体结构的用钢量节省。

[0045] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0046] 本发明提出一种融合高强钢与约束阻尼层的新型风电塔结构,在普通约束阻尼处理的基础上,将约束阻尼段的普通钢替换为高强度钢材,得到高强钢约束阻尼增效段,能够实现以下三种效应:效应1——由于高强钢兼具更高的强度与更好的高周疲劳性能,因此将约束阻尼段的材料替换为高强钢后,仅需要更小的截面就能够同时满足替换段的强度与疲劳性能要求,从而节省了替换段的钢材;

[0047] 效应2——与普通钢约束阻尼一样,在风电塔发生拉压变形时,约束阻尼处理中的阻尼层发生剪切变形,从而耗散振动能量;

[0048] 效应3——与普通钢约束阻尼不同的是,高强钢约束阻尼段的塔筒能够在满足强度与疲劳性能的需求的同时降低截面尺寸,而截面尺寸的降低会使得高强钢材料制作的塔壁比普通钢约束阻尼段的变形要大,并进而放大阻尼材料的应变,带来耗能能力的增效。

[0049] 由此实现高强钢约束阻尼协同增效的目的——高强钢在实现塔身轻量化的同时,能够放大约束阻尼措施的阻尼材料变形,从而实现对附加阻尼的协同增效作用,不仅实现了阻尼效果的显著提升,而且能够显著降低用钢量,通过高强钢与约束阻尼层的有机结合,实现了双重提升:材料轻量化与结构高性能化。

[0050] 本发明在进行高强钢约束阻尼增效段的设计时,通过设计的模态阻尼比的简化计算,以进行阻尼增强段的参数分析与优化,进而得到高强钢约束阻尼增效段的结构方案与附加阻尼,首先通过设计的简化模态应变能法计算含约束阻尼段的风电塔的一阶模态阻尼比,再分析阻尼层厚度、约束层厚度、塔壁厚度对模态阻尼比的影响,以确定出高强钢约束阻尼增效段内各层的厚度,能够保证高强钢约束阻尼增效段结构设计的准确性,能够准确

把握各个参数对性能的影响规律,并且可利用设计的简化公式直接计算阻尼比,避免FEM优化模态阻尼的反复试算。此外还可进一步根据附加阻尼进行风电塔的再次设计,从而将附加阻尼的性能冗余转化为整体结构的用钢量节省,即进一步节省用钢成本。

附图说明

- [0051] 图1为现有的约束阻尼方案示意图;
- [0052] 图2为本发明的结构原理示意图;
- [0053] 图3为本发明的设计方法流程示意图;
- [0054] 图4为模态阻尼比计算时约束阻尼段的受力与变形示意图;
- [0055] 图5为模态阻尼比计算时风电塔等效单自由度体系示意图;
- [0056] 图6a~6e为高强度约束阻尼增效段的参数分析示意图;
- [0057] 图7为实施例中阻尼布置区域示意图;
- [0058] 图8a为实施例中NERL 5MW单桩海上风电塔模型示意图;
- [0059] 图8b为实施例中风电塔简化FEM模型;
- [0060] 图9a和9b为实施例中网格尺寸对模态结果的影响示意图;
- [0061] 图10为实施例中数值分析示意图;
- [0062] 图11为实施例中各约束阻尼方案的模态频率示意图;
- [0063] 图12为实施例中各约束阻尼方案的模态阻尼比;
- [0064] 图13a~13d为实施例中各约束阻尼方案的应变能密度示意图;
- [0065] 图14a~14d为实施例中各约束阻尼方案的应变场示意图。

具体实施方式

[0066] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0067] 实施例

[0068] 如图2所示,一种设置有高强度约束阻尼增效段的风电塔架结构,包括非耗能段与轻量化阻尼增效段,其中,轻量化阻尼增效段包括高强度材料层、阻尼层、约束层,高强度材料层的上下端与塔身的非耗能段连接,而阻尼段与约束段不与非耗能段直接连接;阻尼层一侧贴敷于高强度材料层,另一侧贴敷有约束层。

[0069] 在实际应用中,高强度材料层可采用强度与高周疲劳性能均更高的高强度钢,而非阻尼耗能段的钢材则要低于高强度材料层。例如高强度材料层可以采用Q460, Q550, Q690, Q960钢。又例如,当高强度材料层采用Q550时,塔身其他部位采用Q355牌号钢材。此外,高强度材料层还可采用碳纤维等高强度材料制作。

[0070] 当高强度材料层为高强度钢时,阻尼层的厚度取为2~15mm更优,并且满足阻尼材料极限应变的情况下应当尽可能的薄(说明:这是优化的规律,阻尼层较薄而约束层较厚时的附加阻尼效果更好);特别地,当高强度材料层为高强度钢时,约束层的厚度小于初步设计后原风电塔厚度减去高强度材料层(说明:基于这个原则,可以使得增加附加阻尼的同时不增加用钢量,而附加阻尼必然使得结构的响应减小,可基于附加阻尼对结构进行优化,从而保障轻量化目标实现的必然性)。

[0071] 当采用高强度钢方案时,约束层与阻尼层的厚度比为5~20的范围内;并在满足其他

约束的情况下,宜取此范围内较大的厚度比值。

[0072] 本发明还提出一种设置有高强钢约束阻尼增效段的风电塔架结构设计方法,如图3所示,包括以下步骤:

[0073] S1、按照现有方法进行风电塔及其基础的初步设计;

[0074] S2、按照现有约束阻尼的优化方法确定高强钢约束阻尼增效段的布置位置;

[0075] S3、采用高强钢制作加工高强材料层,降低局部截面尺寸;

[0076] S4、通过模态阻尼比计算,进行高强钢约束阻尼增效段的参数分析与优化,确定出高强钢约束阻尼增效段的结构方案与附加阻尼。

[0077] 本发明提出的高强钢约束阻尼,是在普通约束阻尼处理的基础上,将约束阻尼段的普通钢替换为高强度钢材。高强钢约束阻尼具有以下的三种效应:(1)效应1——由于高强钢兼具更高的强度与更好的高周疲劳性能,因此在将约束阻尼段的材料替换为高强钢后,仅需要更小的截面就能够同时满足替换段的强度与疲劳性能要求,从而节省了替换段的钢材;(2)效应2——与普通钢约束阻尼一样,在风电塔发生拉压变形时,约束阻尼处理中的阻尼层发生剪切变形,从而耗散振动能量;(3)效应3——与普通钢约束阻尼不同的是,高强钢约束阻尼段的塔筒可以在满足强度与疲劳性能的需求的同时降低截面尺寸,而截面尺寸的降低会使高强钢材料制作的塔壁比普通钢约束阻尼段的变形要大,并进而放大阻尼材料的应变,带来耗能能力的增效。

[0078] 值得注意的是,在高强钢约束阻尼方案中,这种由于高强钢的强度与疲劳性能增强而带阻尼层的额外耗能现象,是一种约束阻尼与高强钢筒壁之间的协同效应。这种协同效应使得高强钢与约束阻尼的组合方案效果大于二者单独施加效果的叠加,便是高强钢约束阻尼协同增效的机制。高强钢约束阻尼的这一特征,有利于使用更低的成本实现附加阻尼,从而实现降本增效的目的。为综合评价三种效应综合导致的降本增效,本实施例应用上述技术方案,并采用简化方法定量评估高强钢约束阻尼风电塔相比于传统风电塔的成本与效益。

[0079] 首先介绍含约束阻尼段的风电塔的阻尼构成与附加阻尼,实际风电结构中的阻尼较为复杂,包括启动阻尼、结构阻尼、水动力阻尼、土阻尼以及阻尼器贡献的附加阻尼 ξ_{ad} 。总阻尼 ξ_{total} 的构成如下式所示。

$$[0080] \quad \xi_{total} = \xi_{aero} + \xi_{struc} + \xi_{hydro} + \xi_{soil} + \xi_{ad}$$

[0081] 对于约束阻尼风电塔,由于阻尼层中的粘弹性材料耗能所贡献的阻尼属于附加阻尼。而在后续的评价中,将除 ξ_{ad} 之外的阻尼简化为一个固定值 ξ_{non} ,如下式所示。

$$[0082] \quad \xi_{total} = \xi_{w/o} + \xi_{ad}$$

[0083] 并且,根据现有技术可知,无控结构的阻尼成本以及其取值是一个复杂的问题,一般认为在1%~5%之间的范围内。

[0084] 之后本发明提出含约束阻尼段的风电塔模态阻尼比简化计算理论,塔筒在水平荷载作用下主要发生弯曲变形,塔筒筒壁在弯曲正应力的作用下产生纵向拉(压)变形。在塔壁外贴敷约束阻尼后,塔壁的纵向拉(压)变形使阻尼层产生剪切变形,如图4所示。

[0085] 忽略约束段范围塔筒弯矩的变化,取宽度为b的约束塔壁进行受力和变形分析;约束阻尼段塔壁的两端受到弯曲轴向力F的作用,并通过一半的约束段长度将部分轴向力通过阻尼层的切应力传递至约束层,传递段的受力变形机制如图4所示,塔壁、阻尼层和约束

层的应力应变分布如图4所示。

[0086] 根据平衡条件可知：

$$[0087] \quad dF_2(x) = \tau_1(x) b dx \quad (1)$$

$$[0088] \quad F_1(x) + F_2(x) = F \quad (2)$$

[0089] 根据几何条件可知：

$$[0090] \quad \gamma_1(x) t_1 = \Delta_0(x) - \Delta_2(x) \quad (3)$$

[0091] 根据物理条件可知：

$$[0092] \quad \tau_1(x) = G \gamma_1(x) \quad (4)$$

$$\Delta_0(x) = \int_x^l \frac{F_0(x)}{E b t_0} dx \quad (5)$$

$$[0093] \quad \Delta_2(x) = \int_x^l \frac{F_2(x)}{E b t_2} dx \quad (6)$$

[0094] 联立方程(1) ~ (6)并考虑边界条件 $\tau_1(1) = 0$ 后可得：

$$\tau_1(x) = -\frac{F \Lambda t_2}{l b (1 + e^{2\Lambda})(t_0 + t_2)} \left(e^{\frac{\Lambda x}{l}} - e^{\Lambda(2 - \frac{x}{l})} \right) \quad (7)$$

$$[0095] \quad \Delta_0(0) = \frac{F l}{E b t_0} \left(1 - \frac{t_2}{(1 + e^{2\Lambda})(t_0 + t_2)} \left((1 + e^{2\Lambda}) + \frac{1}{\Lambda} (1 - e^{2\Lambda}) \right) \right) \quad (8)$$

[0096] 其中：无量纲参数 $\Lambda = l \sqrt{\frac{G(1 + t_2/t_0)}{E t_1 t_2}}$ ； l 为过渡段长度，为约束阻尼段长度的一半；

G 为阻尼材料的剪切模量； E 为钢材的弹性模量； t_0 、 t_1 、 t_2 分别为约束阻尼段塔壁、阻尼层和约束层的厚度。

[0097] 传递段阻尼层的剪切应变能：

$$[0098] \quad e_1 = \int_0^l \frac{\tau_1^2(x)}{2G} b t_1 dx = \frac{F^2 t_2 l}{2(1 + e^{2\Lambda})^2 E t_0 (t_0 + t_2) b} \left(\frac{1}{2\Lambda} (e^{4\Lambda} - 1) - 2e^{2\Lambda} \right) \quad (9)$$

[0099] 传递段阻尼层的总应变能：

$$[0100] \quad e_{total} = \frac{1}{2} F \Delta_0(0) = \frac{F^2 l}{2 E b t_0} \left(1 - \frac{t_2}{(1 + e^{2\Lambda})(t_0 + t_2)} \left((1 + e^{2\Lambda}) + \frac{1}{\Lambda} (1 - e^{2\Lambda}) \right) \right) \quad (10)$$

[0101] 阻尼层的剪切应变能占比：

$$[0102] \quad \frac{e_1}{e_{total}} = \frac{\frac{t_2}{(1 + e^{2\Lambda})^2 (t_0 + t_2)} \left(\frac{1}{2\Lambda} (e^{4\Lambda} - 1) - 2e^{2\Lambda} \right)}{\left(1 - \frac{t_2}{(1 + e^{2\Lambda})(t_0 + t_2)} \left((1 + e^{2\Lambda}) + \frac{1}{\Lambda} (1 - e^{2\Lambda}) \right) \right)} \quad (11)$$

[0103] 含约束阻尼段的风电塔的一阶模态阻尼比：(模态应变能法)

[0104] 风电塔的一阶模态可由质量集中于塔顶的单自由度体系近似计算(如图5所示)，

因此一阶模态应变能分布与塔顶水平力作用下的应变能分布相同。

[0105] 塔顶水平荷载P作用下风电塔的总应变能:

$$[0106] \quad E_{total} = \frac{1}{2} P^2 \delta = \frac{P^2}{2m(2\pi f)^2} \quad (12)$$

[0107] 其中: δ 为柔度系数, m 为塔顶集中质量 m_{RNA} , f 为风电塔的一阶频率。

[0108] 约束阻尼段的总应变能为作用在其两端的弯矩 M ($M=P(H-h)$)所做的功:

$$[0109] \quad E_{CLD} = 2 \cdot \frac{1}{2} M \theta = 2M \frac{\Delta_{0max}(0)}{D} \\ = \frac{2M^2 l}{DEW_0} \left(1 - \frac{t_2}{(1+e^{2\Lambda})(t_0+t_2)} \left((1+e^{2\Lambda}) + \frac{1}{\Lambda}(1-e^{2\Lambda}) \right) \right) \quad (13)$$

[0110] 其中: D 为约束阻尼段塔筒的直径; W_0 为约束阻尼段塔筒的抗弯截面模量,

$$W_0 = \frac{\pi}{32} D^3 \left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D} \right)^4 \right)$$

[0111] 约束阻尼段阻尼层的剪切应变能:

$$[0112] \quad E_{dam} = \frac{e_1}{e_{total}} E_{CLD} = \frac{2M^2 l}{DEW_0} \frac{t_2}{(1+e^{2\Lambda})^2 (t_0+t_2)} \left(\frac{1}{2\Lambda} (e^{4\Lambda} - 1) - 2e^{2\Lambda} \right) \quad (14)$$

[0113] 根据模态应变能法计算含约束阻尼段的风电塔的一阶模态阻尼比:

$$[0114] \quad \xi = \frac{\eta_{dam} E_{dam} + \eta_s (E_{total} - E_{dam})}{2E_{total}} \\ = \frac{\eta_s}{2} + (\eta_{dam} - \eta_s) m (2\pi f)^2 \frac{2l(H-h)^2}{DEW_0} \frac{t_2}{(1+e^{2\Lambda})^2 (t_0+t_2)} \left(\frac{1}{2\Lambda} (e^{4\Lambda} - 1) - 2e^{2\Lambda} \right) \quad (15)$$

[0115] 其中: H 为塔顶高度; h 为约束阻尼段的高度,近似可取约束阻尼段顶部的高度; η_{dam} 为阻尼材料的损耗因子; η_s 为原结构的损耗因子。

[0116] 通过以上简化的计算过程,能够直接快速地进行模态阻尼计算,相比于传统有限元分析计算的方式,能够大大提高计算效率,同时保证计算准确性。

[0117] 再针对含约束阻尼段的风电塔模态阻尼比参数进行分析,如图6a~6e所示,主要包括:

[0118] 1、阻尼层厚度 t_1 对模态阻尼比的影响

$$[0119] \quad \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = (\eta_{dam} - \eta_s) m (2\pi f)^2 \frac{2l(H-h)^2}{DEW_0} \frac{t_2}{(t_0+t_2)} \frac{-e^{6\Lambda} + (8\Lambda^2 + 4\Lambda - 1)e^{4\Lambda} + (-8\Lambda^2 + 4\Lambda + 1)e^{2\Lambda} + 1}{2\Lambda^2 (1+e^{2\Lambda})^3} \quad (16)$$

[0120] 当 $\Lambda = 1.639$ 时 $\frac{\partial \xi}{\partial \Lambda} = 0$,阻尼比 ξ 取得最大值。也即,在其它参数给定的情况下,阻

尼层厚度 t_1 存在最优值 $t_{1opt} = \frac{G(1+t_2/t_0)l^2}{2.6863Et_2}$ 。可通过调节1的长度来调节 t_1 ,将1分成多段,以

降低阻尼层厚度。

[0121] 2、当阻尼层厚度取最优值时,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0122] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{t_2} + 1\right)} \quad (17)$$

[0123] 此时,阻尼比随 t_2 的增大而减速增大,当 t_2/t_0 大于3后继续增加 t_2 阻尼比提升将不明显,建议 t_2/t_0 取1~3;阻尼比随 t_0 的增大而加速减小;阻尼比随1的增加线性增加;阻尼比随h的增加加速减小。

[0124] 3、当阻尼层厚度取最优值,约束层与塔壁总厚度不变($t_0+t_2=T$)时,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0125] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2t_0}{D}\right)^4\right) \left(\frac{t_0}{T-t_0} + 1\right)} \quad (18)$$

[0126] 此时,阻尼比随 t_0 的增大而快速减小。

[0127] 4、当阻尼层厚度取最优值,约束层与塔壁厚度比不变时 $t_0=\alpha T$,模态阻尼比 ξ 为:

$$[0128] \quad \xi = \frac{\eta_s}{2} + 0.212869(\eta_{dam} - \eta_s)m(2\pi f)^2 \frac{64l(H-h)^2}{\pi ED^4} \frac{1}{\left(1 - \left(1 - \frac{2\alpha T}{D}\right)^4\right) \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} + 1\right)} \quad (19)$$

[0129] 此时,阻尼比随约束层与塔壁总厚度T的增加而降低。

[0130] 5、当阻尼层厚度取最优值,阻尼层的最大切应变:

$$[0131] \quad \tau_{1max} = \tau_1(x=0) = 1.51989 \frac{Mt_0 t_2}{W_0 l(t_0 + t_2)} \quad (20)$$

[0132] 此时,最大切应力与1成反比,1不宜过小,避免阻尼层的最大切应变过大。

[0133] 由此可知,降低约束阻尼段的塔壁厚度是提升风电塔模态阻尼比的最有效措施。同时,塔壁厚度的减小将导致约束阻尼段底部截面的静力和疲劳承载能力降低。为了避免在约束阻尼段出现薄弱环节,可将约束阻尼段减薄的筒壁采用静力和疲劳承载力更高的高强钢制作,即高强钢约束阻尼段方案。

[0134] 为验证本方案的有效性,本实施例应用上述技术方案,采用美国可再生能源实验室设计并发布的被广泛用于海上风能技术的概念研究的NREL 5MW风电塔模型作为计算模型,同时参考OC3项目风电塔基础采用直径为6m的单桩基础,基础入土深度36m,平均海平面距泥线20m。模型的主要组成部分包括塔身、单桩、叶片、轮毂和机舱等,主要特性如表1~表3所示,约束阻尼方案阻尼层所采用的阻尼材料参数如表4所示。

[0135] 表1

部件	属性	数值
叶片	转子直径	126m
	轮毂高度	90m
	切入、额定和切出风速	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
	切入和额定转子转速	6.9rpm, 12.1 rpm
	长度	61.5 m
	单个叶片总质量	17740 kg
轮毂和机舱	轮毂和机舱尺寸	3m
	轮毂质量	56780 kg
	机舱质量	240000 kg
塔架	底部和顶部外径	6 m, 3.87 m
	底部和顶部壁厚	0.027 m, 0.019 m
	总质量	347460 kg
单桩	总长度	66m
	外径	6m
	壁厚	0.060m

[0137] 表2

部件	材料	杨氏模量	泊松比	密度
塔架	Steel	210GPa	0.3	8500kg/m ³
单桩	Steel	210GPa	0.3	7850kg/m ³

[0139] 表3

属性	数值
RNA的坐标位置 (x, y, z)	(-0.417, 0.00, 1.967)m
RNA的转动惯量	350000kg
RNA的惯性矩 (J _{xx} , J _{yy} , J _{zz})	(4.370, 2.353, 2.542) × 10 ⁷ kg · m ²

[0141] 表4

部件	材料	杨氏模量	泊松比	密度	损耗因子
粘弹性层	Z1	2.61MPa	0.49	1000kg/m ³	1.06

[0143] 以5MW标准风机模型为例,将平均海平面以上10m区域替换为高强钢约束阻尼段,得到如图7中 (b) 所示的高强钢约束阻尼段方案。作为对比在风电塔变形较大的塔底10m区域附加约束阻尼,得到如图7中 (a) 所示的传统约束阻尼方案。

[0144] 各约束阻尼方案的详细参数如表5所示,其中高强钢方案的塔壁厚度通过截面承载力替换确定,约束层厚度比塔壁厚度 t_2/t_0 取1,阻尼层厚度为最优厚度。

[0145] 表5

方案	t ₀	t ₁	t ₂	塔壁材料	0m 处高强度钢截面应力比/10m 处普通钢截面应力比	10m 处普通钢截面为控制截面
[0146] Q355	27mm	2.9mm	27mm	CSS-Q355	-	是
Q460	24mm	3.2mm	24mm	HSS-Q460	0.98	是
Q550	20mm	3.9mm	20mm	HSS-Q550	0.98	是
Q690	16mm	4.9mm	16mm	HSS-Q690	0.97	是
Q960	12mm	6.5mm	12mm	HSS-Q960	0.93	是

[0147] 当原塔阻尼比为1%时,根据式(15)计算得到各约束阻尼方案的模态阻尼比如表6所示。

[0148] 表6

方案	Q355	Q460	Q550	Q690	Q960
[0149] 一阶模态阻尼比	1.47	1.70	1.83	2.04	2.38

[0150] 之后进行模态阻尼比计算理论的数值验证:

[0151] (1) 结构模型与边界条件

[0152] 采用ABAQUS软件建立图8a所示的NERL 5MW单桩海上风电塔模型,简化有限元模型如图8b所示,其中:顶部机头(RNA)通过集中惯性模拟,其惯性参数如表3所示;塔身和桩身采用C3D8R实体单元模拟,网格尺寸不大于0.5m;桩-水相互作用对风电塔动力特性的影响通过附加质量法模拟;桩-土相互作用通过分布式土弹簧模拟,在Abaqus中通过接地弹簧实现。

[0153] 为确保模拟结果的准确性,本实施例对模型进行了验证。通过与现有技术中的模态分析结果对比(如表7所示),验证了有限元模型的有效性和准确性。

[0154] 表7

模态频率 (Hz)	固定土壤			柔性土壤		
	本文	参考文献	偏差	本文	参考文献	偏差
[0155] 1 阶前后	0.277	0.278	0.2%	0.245	0.248	1.2%
1 阶侧向	0.275	0.276	0.3%	0.244	0.245	0.6%
2 阶 Fore-aft	1.831	1.838	0.4%	1.407	1.423	1.1%
2 阶 Side-to-side	1.564	1.573	0.6%	1.283	1.304	1.6%

[0156] (2) 荷载与阻尼参数

[0157] 脉动风荷载是导致海平面以上部分桩塔疲劳的主要动荷载,脉动风荷载受环境状态参数的影响,为简化计算,在本实施例中,仅计算发生概率较大的正常运行工况,其中平均风速取为额定风速11.4m/s,湍流强度I取为0.1。根据正常运行工况下风环境参数,可计算得到作用与塔顶的脉动风荷载。由前述内容可知,风电塔运行工况下FA方向的模态阻尼比可能在1%~5%左右,为此本实施例在计算结构FA方向的动力响应时模态阻尼比分为取1%和5%两种情况。

[0158] (3) 变截面处理与网格划分

[0159] 风电塔不同壁厚段之间采用刚接连接,因模态分析主要研究的是塔筒整体特性,故可在建模时对变截面处做简化处理。本实施例采用壁厚线性过渡的方式处理筒壁变壁厚,过渡段坡度取1:5。

[0160] 为了确定有限元模型的网格尺寸,以Q550高强钢约束阻尼方案为例,研究了网格尺寸对模态频率的影响。首先沿厚度方向仅将阻尼层划分为三等分,环向网格尺寸取0.05m,然后将约束阻尼区段及其上下各1m的区段作为网格加密区段,其它区段为非网格加密区段,图9a和图9b展示了FA方向1阶模态频率随加密区和非加密区竖向网格尺寸的变化规律。可见当加密区和非加密区的竖向网格尺寸分别为0.1m和0.5m时分析结果具有足够的精度,因此在后续分析中将采用此网格尺寸。

[0161] (4) 数值分析结果

[0162] 如图10所示,公式计算结果与有限元分析结果偏差不超过10%,这充分表明采用本方案提出的简化计算公式能够较准确地计算约束阻尼风电塔的模式阻尼比。

[0163] 再分析高强钢约束阻尼方案对动力特性的影响:

[0164] (1) 对模态频率的影响

[0165] 各约束阻尼方案的模态频率如图11所示,因附加阻尼及约束层后的传统约束阻尼方案的基频相对原塔有约2%的提升,高强钢约束阻尼方案因筒壁壁厚减小导致基频相对原塔略有降低,减低幅度小于10%。综上,各约束阻尼方案对模态频率的影响可忽略不计,约束阻尼方案可视为阻尼减振方案。

[0166] (2) 模态阻尼与阻尼增效作用

[0167] 通过ABAQUS模态分析中的场变量输出结果获取各单元的模态弹性应变能(ELES)后可根据模态应变能法计算模态阻尼比。各约束阻尼方案的模态阻尼比计算结果如图12所示,结果表明,约束阻尼方案可有效提升风电塔的一阶模态阻尼比,并且高强钢约束阻尼方案的阻尼提升效果优于传统约束阻尼方案。

[0168] (3) 模态应变场与模态应变能场分布

[0169] ABAQUS模态分析结果为总应变能归一化结果,因此各方案的模态应变能结果可直接对比,阻尼层模态应变能的大小可直接反映约束阻尼方案的优劣。以此同时,通过模态应变场分析可洞悉约束阻尼变形机理及放大机制。

[0170] 为了便于各方案间模态结果云图的对比,以Q960高强钢约束阻尼方案结果的上下限作为统一的图例上下限。无控结构和约束阻尼结构的模态应变能密度和纵向应变场分别如图13a~13d、图14a~图14d所示,塔筒的应变场分布及应变能密度分布表明,壁厚减小的塔筒段为变形集中区,在变形集中区贴敷约束阻尼可使阻尼层获得更大的切应变及应变能密度。阻尼层的切应变场分布与前述的机理分析是一致的,随着约束阻尼段壁厚度的减小,阻尼层剪切变形增加,约束层约束作用增强。

[0171] 随着约束段壁厚的减薄,约束阻尼段的变形逐渐增加,阻尼层由于筒壁压缩变形导致的切应变加大,应变能增加,因此附加阻尼比增加。

[0172] 随着阻尼层厚度的减小,阻尼层抗剪刚度增加,复合截面作用越明显,约束层分担塔筒荷载越明显(塔筒中间应变与两端应变差异越显著)。

[0173] (4) 阻尼增效作用的机理

[0174] 对模态频率的影响:通过增加约束层和阻尼层在一定程度上降低了由塔筒壁厚减小带来的刚度降低,尤其是当阻尼层剪切刚度较大时,复合截面效应越明显。

[0175] 表8

[0176]

模态频率	Q355-0/A	Q960约束阻尼方案	Q960高强钢方案
------	----------	------------	-----------

1st FA	0.245	0.224(-9%)	0.219(-11%)
--------	-------	------------	-------------

[0177] 阻尼增效机理:塔筒弯曲模型,导致筒壁拉伸或压缩变形,当在筒壁表面贴敷约束阻尼时,筒壁拉伸或压缩变形将使阻尼层产生剪切变形,进而产生剪切耗能。当约束阻尼段的筒壁变薄时,约束阻尼段的拉伸或压缩变形增加,这将使得阻尼层的剪切变形增加,剪切耗能耗能增加,宏观表现为阻尼比增加。

[0178] 综上所述,本方案针对海上风电塔在大型化趋势下所面临的降本增效与抵御风荷载动力作用的双重挑战,创新性地提出了一种融合高强钢与约束阻尼层的新型风电塔结构,并系统地研究了该结构在提升阻尼性能与轻量化水平方面的潜力。通过理论分析与数值模拟,得出以下主要结论:

[0179] (1) (高强钢与约束阻尼层技术的协同增效) 高强钢约束阻尼通过三种机制实现降本增效,包括采用高强钢减小截面尺寸直接节省用钢量,约束阻尼层为结构提供附加阻尼从而间接实现降本增效,以及高强钢约束阻尼方案中存在协同增效机制。其中,由于比普通钢具有更高的强度以及高周疲劳性能,局部替换高强钢后可以用相对小的截面实现普通钢方案等同的承载力与疲劳性能,从而节省钢材;约束阻尼处理措施能够为结构提供附加阻尼,从而使得结构有了优化空间;因此可以高强钢的高强度与高周疲劳性能有效减少了用钢量,而约束阻尼层则通过能量耗散机制显著增强了结构的抗风振能力。两者的协同效应放大了阻尼材料的应变,实现了阻尼增效,为风电塔设计提供了新的思路。

[0180] (3) (附加阻尼性能与阻尼增效作用显著) 基于模态应变能法,本方案计算了普通钢约束阻尼与高强钢约束阻尼方案的附加阻尼比。结果表明,高强钢约束阻尼结构为结构提供附加方面更为出色。相比无控结构与普通约束阻尼方案取得更高的附加阻尼,高强钢约束阻尼方案可不增加用钢量甚至减小用钢量的情况下提供显著的附加阻尼。

[0181] 以往的研究仅单独关注振动控制措施提高结构阻尼,或者单独利用新材料降低用钢量,而本方案提出的风电塔结构通过材料创新与被动控制技术的结合,实现了结构承载材料与与阻尼耗能材料之间的协同机制,达到了一加一大于二的效应。这种协同效应具体包括:采用高强钢减小截面尺寸直接节省用钢量;约束阻尼层为结构提供附加阻尼从而间接实现降本增效;更重要的是,塔身局部采用厚度变薄的高强钢,其应变要大于原方案,从而带动阻尼材料的应变也被放大,从而放大了结构的阻尼。这种协同机制带来的阻尼放大作用随着高强钢强度的提高而提高。

[0182] 并且,本方案在显著增大阻尼的同时,并不增加结构用钢量。以往的减振设计往往在增大结构阻尼的同时也会带来用钢量成本的增加,并不容易评估附加措施的效益大小,甚至有成本大于收益的风险。但是采用本方案,能够在设计之初就非常容易地控制实现“不增加用钢量的同时增大附加阻尼”,其正向增益显著。

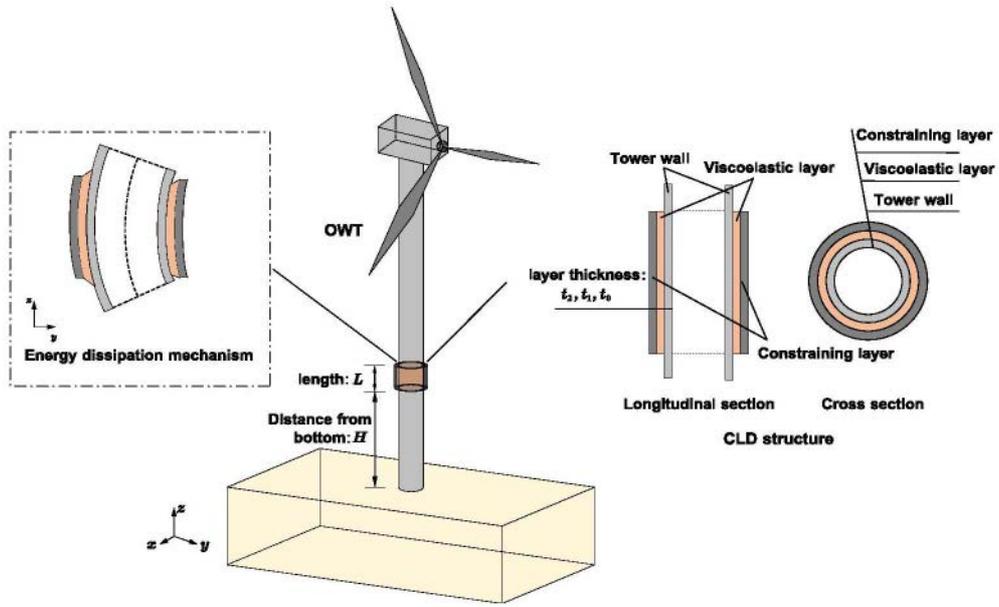


图1

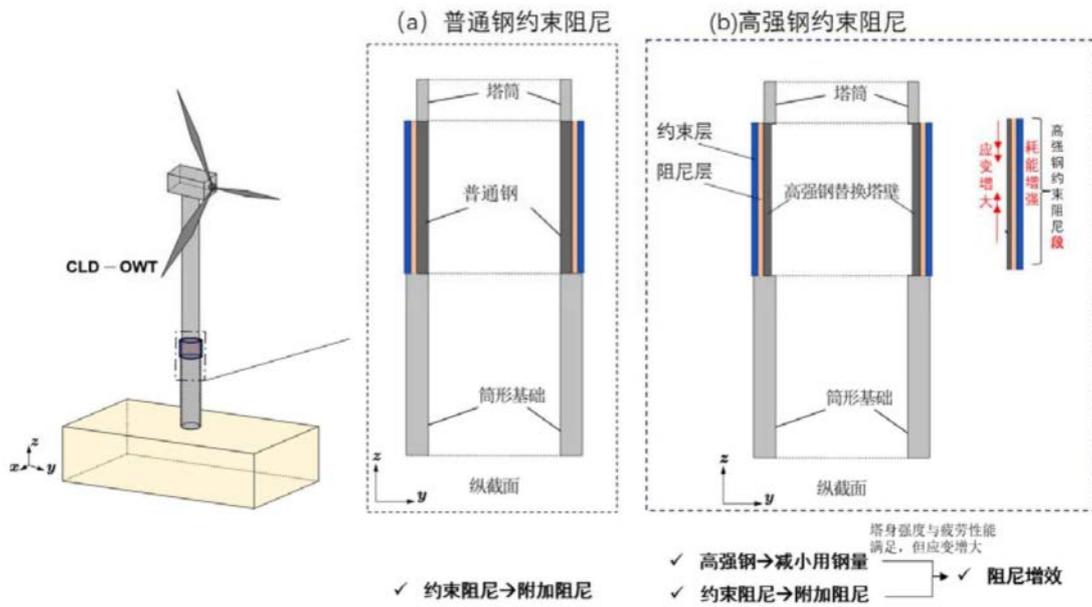


图2

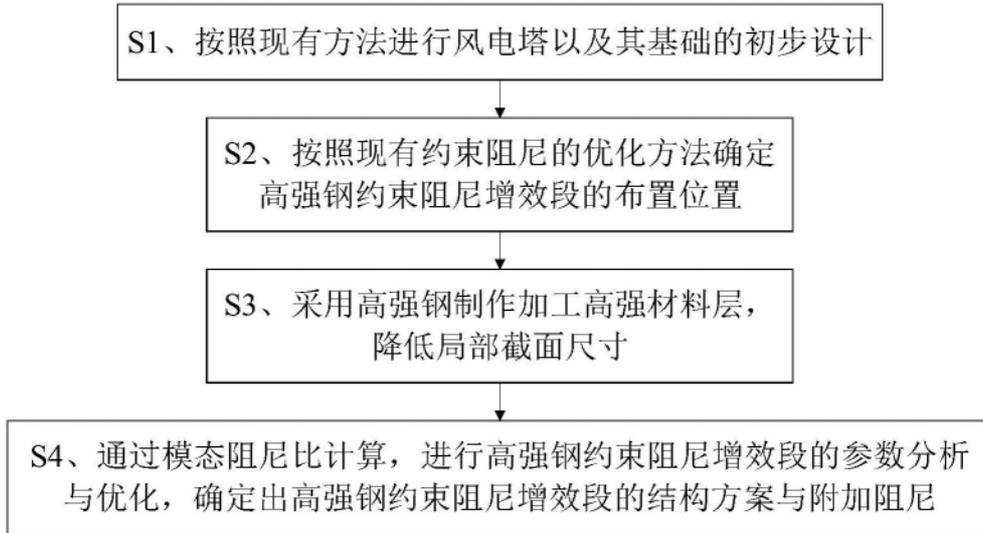


图3

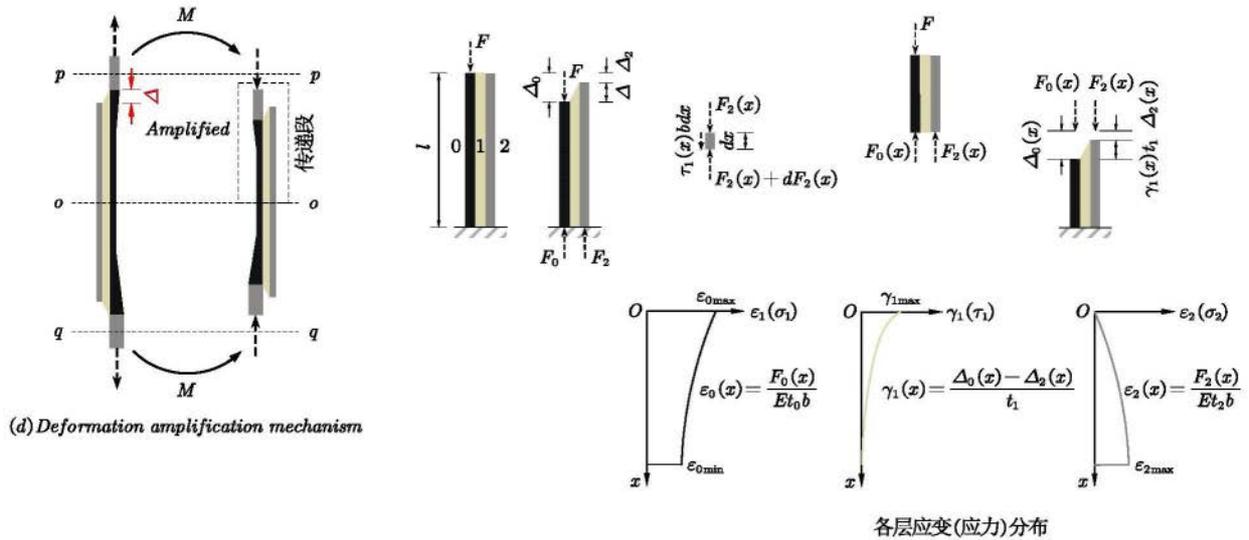


图4

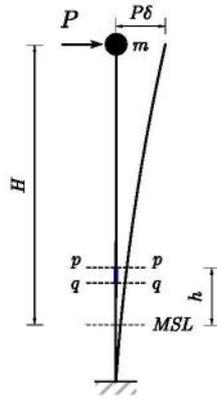


图5

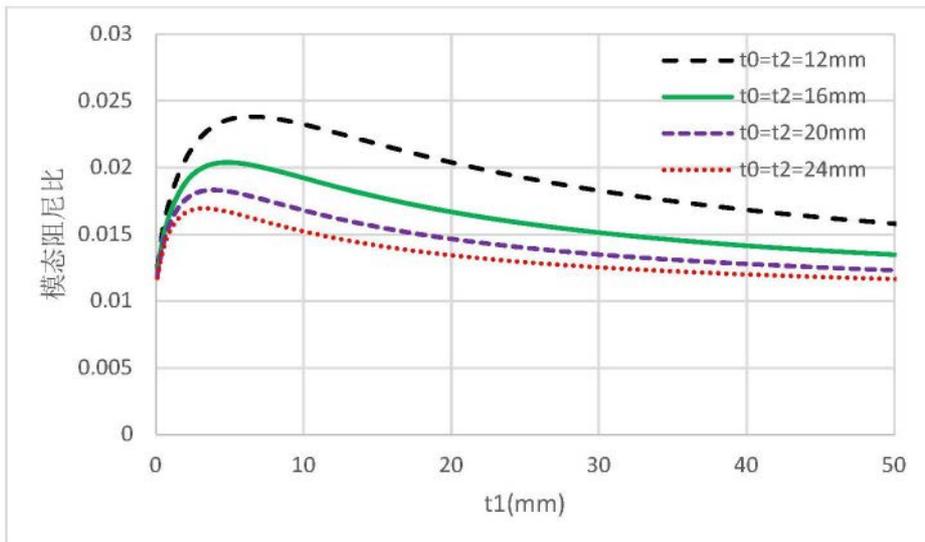


图6a

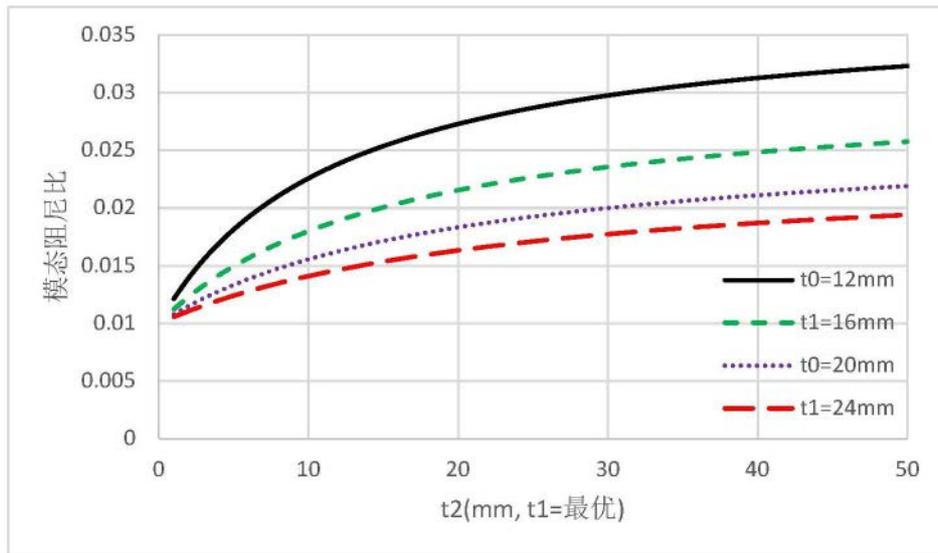


图6b

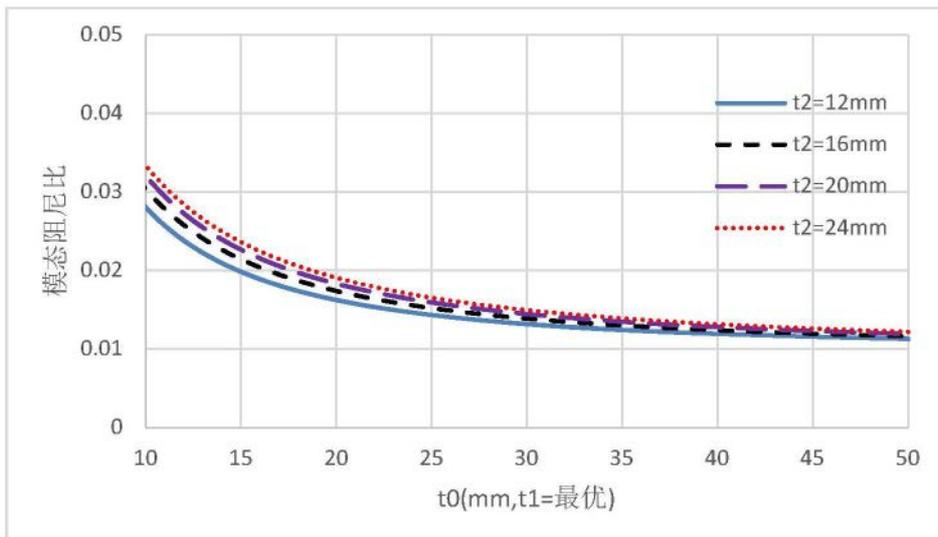


图6c

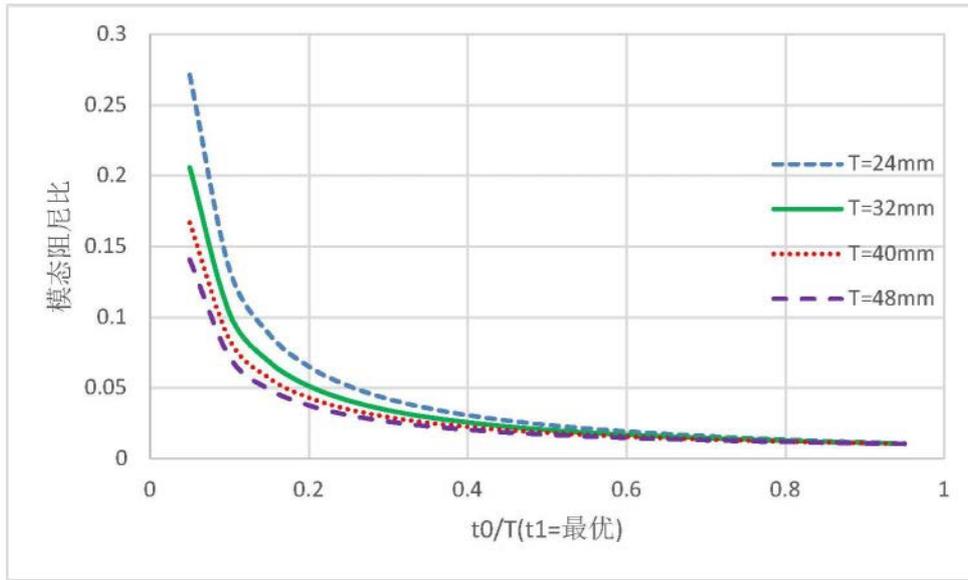


图6d

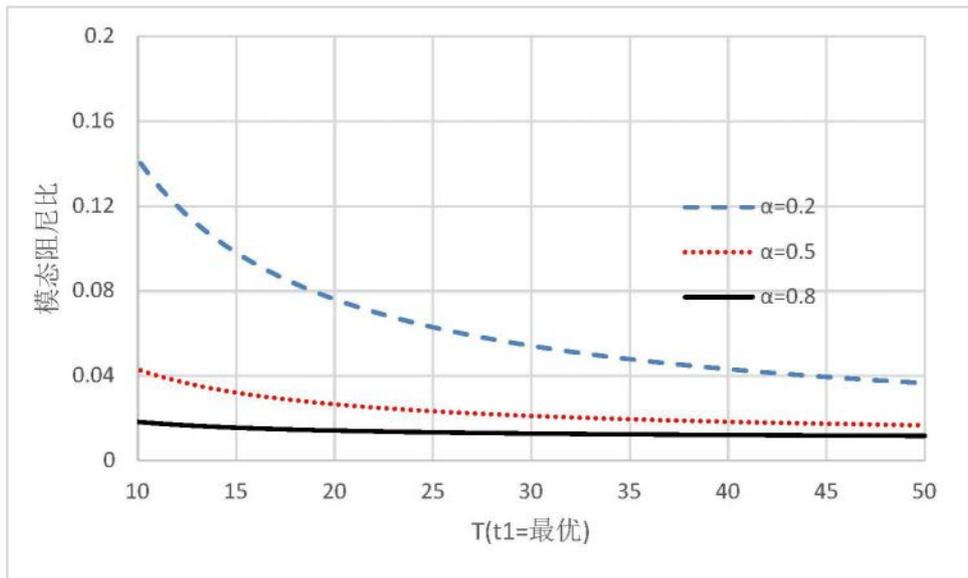


图6e

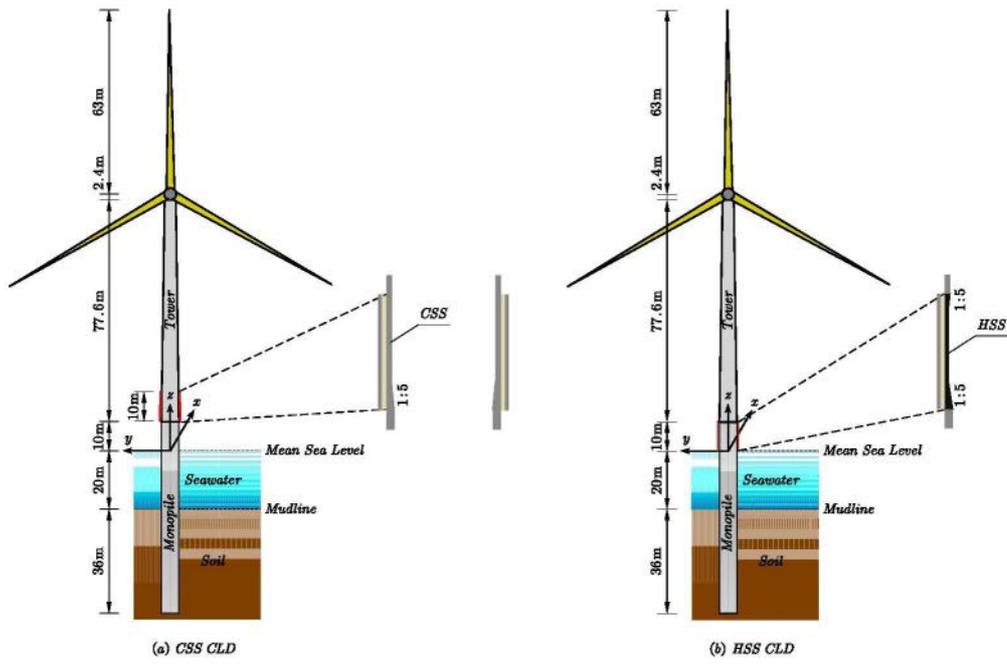


图7

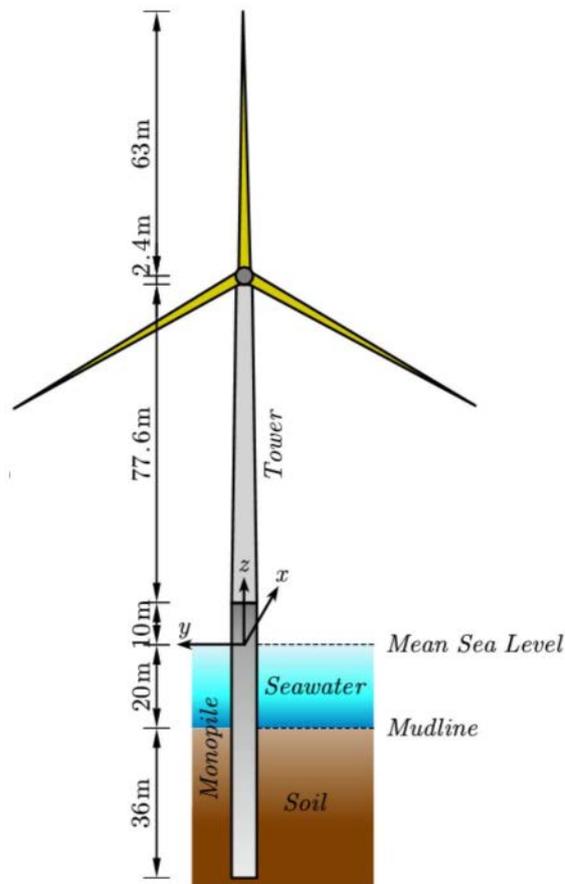


图8a

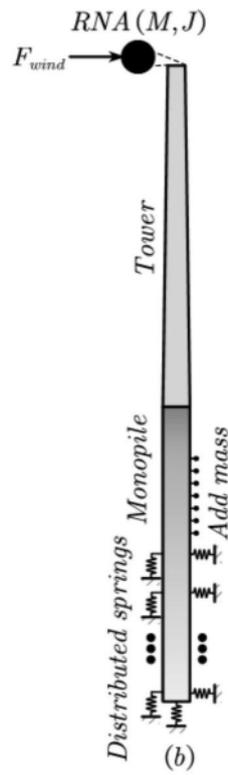


图8b

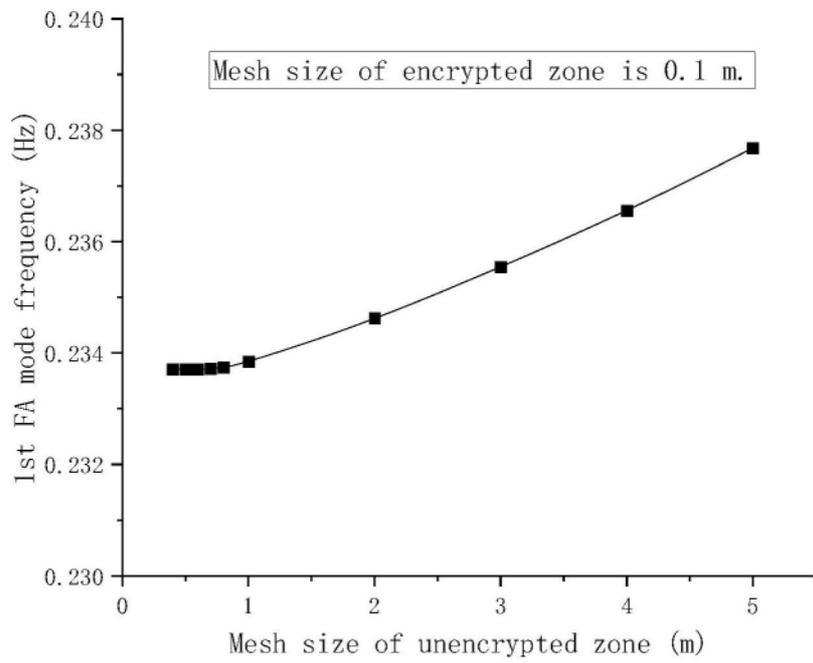


图9a

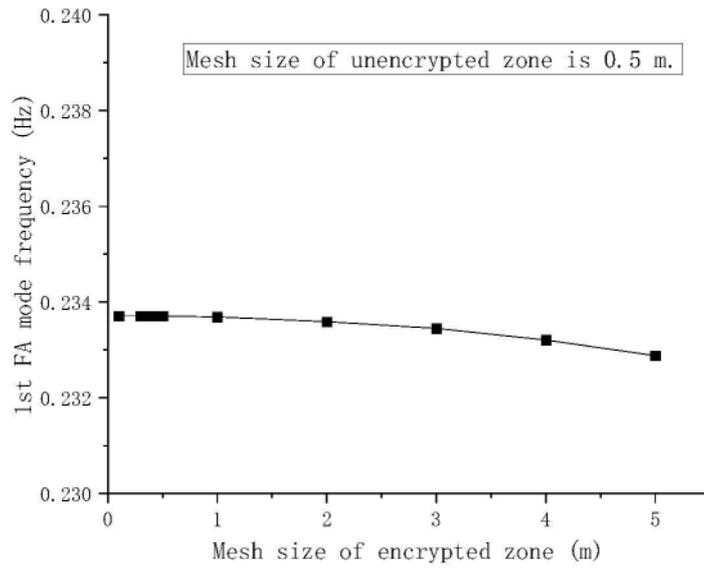


图9b

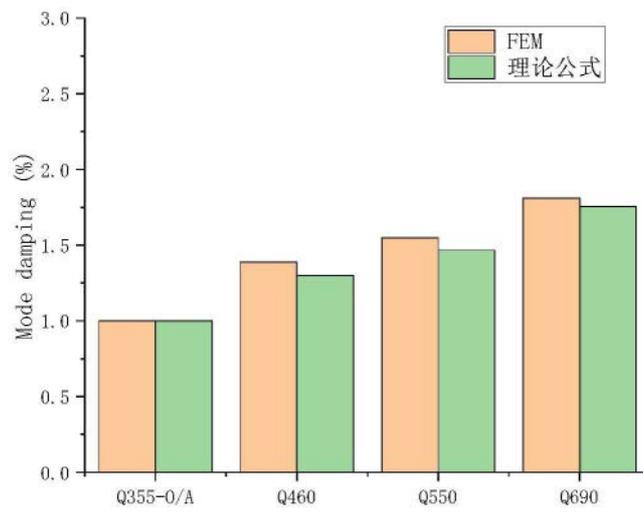


图10

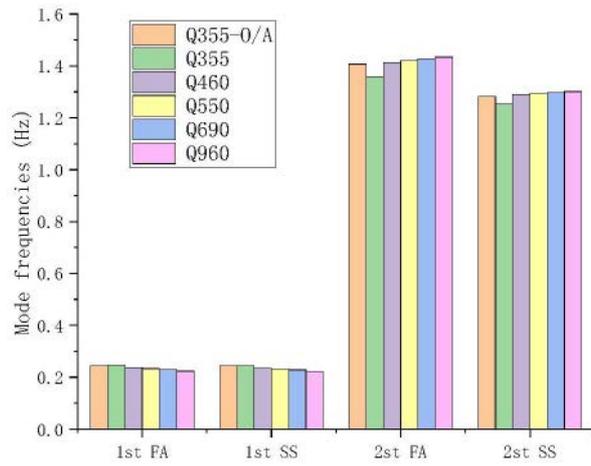


图11

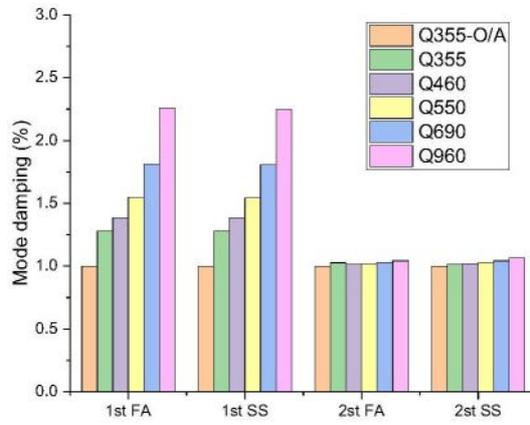


图12

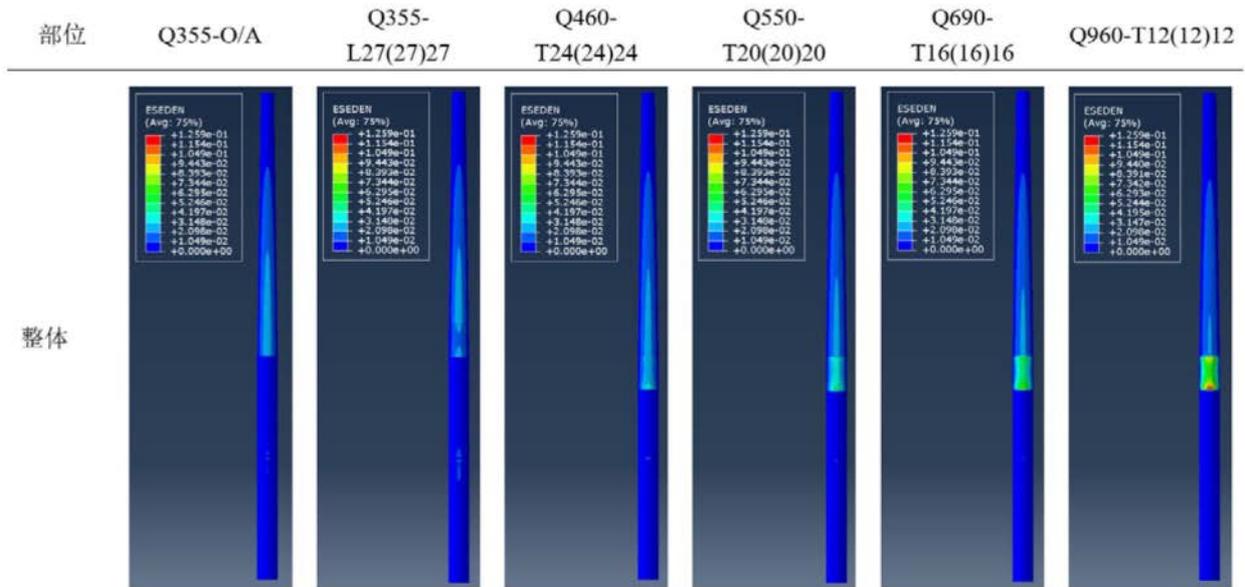


图13a

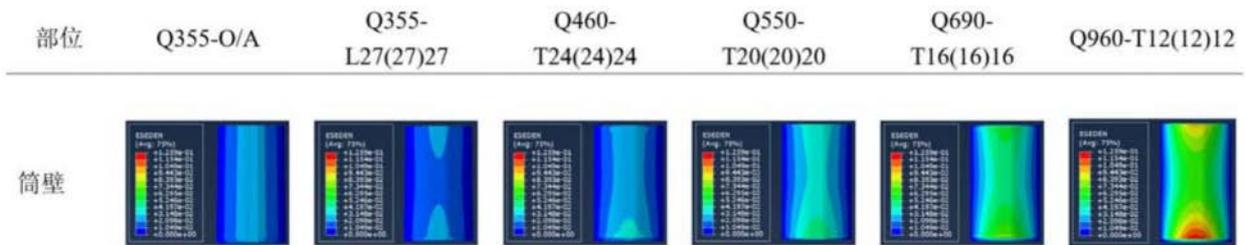


图13b

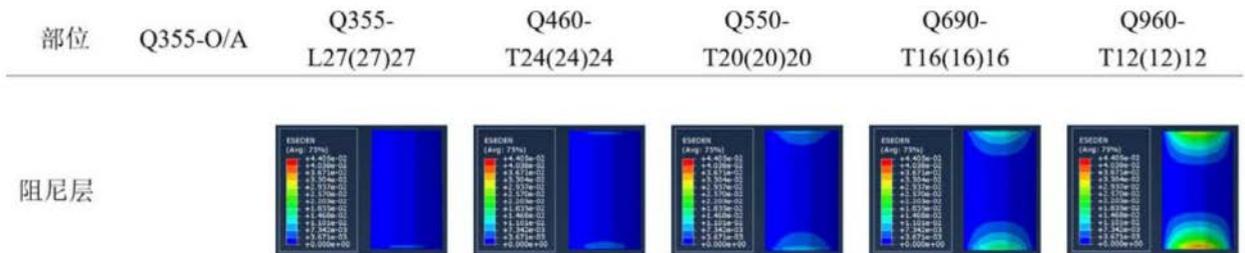


图13c

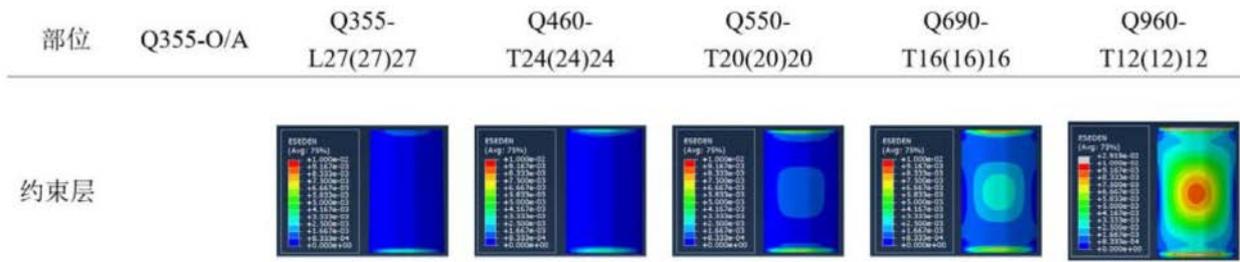


图13d

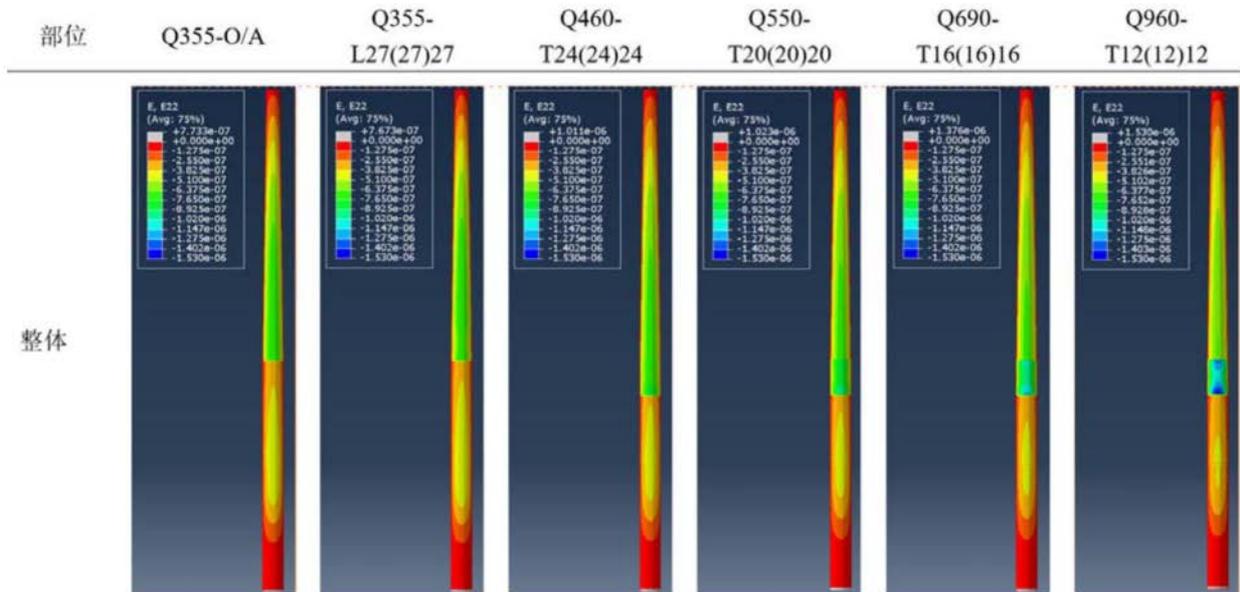


图14a

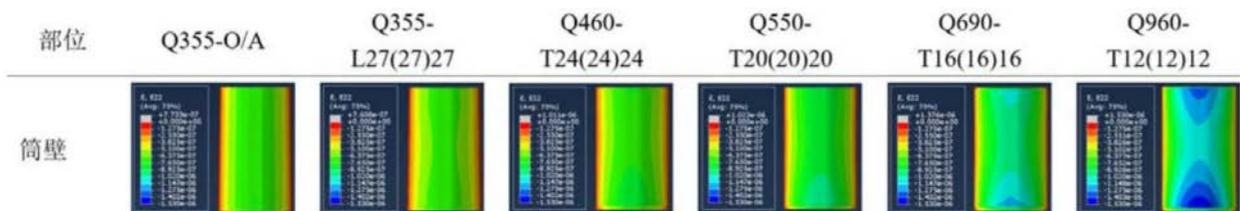


图14b

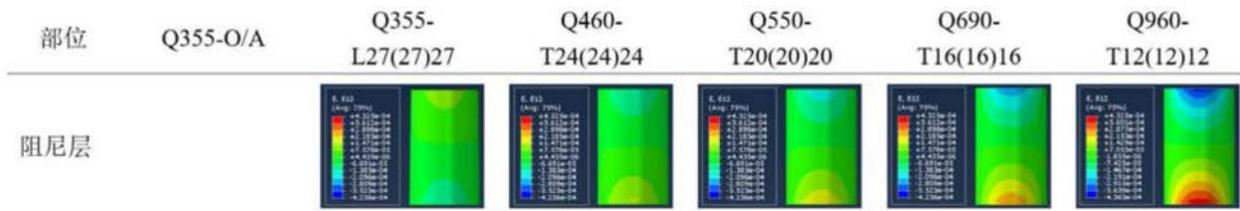


图14c

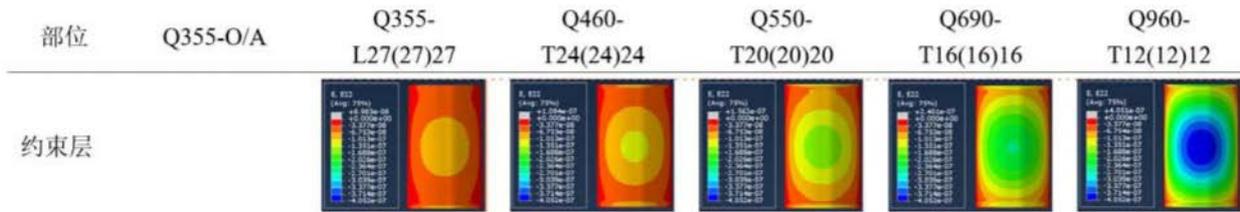


图14d