**文章编号:**1000-8608(2018)06-0551-08

# 高柔风电塔残余振动控制优化设计

鲁一南1, 程耿东\*1, 刘晓峰2

(1.大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁大连 116024;2.北京金风科创风电设备有限公司,北京 100176)

**摘要:**高柔风电塔在紧急停机后因共振往往会发生长时间且激烈的残余振动,严重影响风 电塔的运行安全.为了确保风电塔的安全运行,提出基于残余振动控制的多约束单管型风电 塔的优化方法.由于降低风电塔建造成本的重要性,以最小化材料体积为目标函数,按照将塔 架设计成柔性塔的要求设定塔架的固有频率约束,将停机激励下的残余振动降低比例作为约 束.为了避免计算残余振动及其灵敏度所需的耗时瞬态动力学分析,采用二次型积分形式的 性能指标衡量结构的残余振动.基于李雅普诺夫第二方法实现了对上述性能指标及其灵敏度 计算的大幅简化.同时,考虑到风电塔设计中也需考虑塔顶位移约束,为了计算塔顶位移,采 用专业软件 Bladed 得到紧急停机工况下的风荷载.比较了采用塔顶位移约束和残余振动约 束的优化结果,同时对阻尼器的分布进行拓扑优化,为高柔风电塔的设计研究提供了一定的 参考.

关键词:风电塔;柔性塔;优化设计;残余振动;紧急停机 中图分类号:TU359 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb201806001

## 0 引 言

高柔风电塔的突出问题之一是在紧急停机后 结构往往会发生激烈而持时很长的振动,本文称 为残余振动,严重影响风电塔的安全,极易造成结 构的疲劳和损伤,这是工业界非常关心的问题.在 紧急停机时减小残余振动重要措施包括调整桨叶 倾斜角(pitch angle)的收桨控制策略<sup>[1]</sup>,调整桨 叶的同时对转轴采取机械制动.本文将探讨通过 设置阻尼系统、优化塔结构设计以减小残余振动.

Muskulus 等<sup>[2]</sup>指出了风力发电支撑结构优 化面临的诸多困难,如复杂的风荷载环境、非线性 的流固耦合和专业分析软件的缺乏,介绍了基于 演化的优化及减小荷载工况等解决方法,特别强 调了近年来计算机数值模拟技术飞速发展,可以 极大地帮助风电塔优化设计的实现.对于高柔风 电塔,Goudarzi等<sup>[3]</sup>提出了采用类似香蕉茎、纵向 加肋的飞机机身等轻型结构概念设计单管型风电 塔塔身,可以在相同塔架刚度下减轻重量,有可能 优化高柔塔的设计. Hu 等<sup>[4]</sup>研究了不同高度的 3 类塔,分析了当塔壁厚度及塔壁内侧加强肋减少 时,水平摆动和 Mises 应力的变化比值,以确定这 两种措施中哪个可以更有效地降低材料用量,发 现对于 150 m 的高塔,减小塔壳厚度对降低材料 用量更有效. 程耿东等<sup>[5]</sup>提出了基于频率的多约 束单管型风电塔架优化设计方法. 按照将塔架设 计成刚-刚、刚-柔、柔-柔不同类型的要求设定塔架 的固有频率约束,采用专业软件 Bladed 计算风荷 载,按照风电塔规范考虑强度、稳定性和疲劳等约 束.

相较于其他结构的性能计算,残余振动的计 算需要瞬态动力学分析,通常采用逐步积分法求 解,计算规模比结构静力分析大得多,而优化问题 求解则需要迭代,计算十分昂贵.另一方面,迭代 计算还导致灵敏度的解析推导十分复杂,计算难 度增加.这些困难都使得残余振动控制的优化方 法不容易实现.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(13332004).

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-09-18.

作者简介: 鲁一南(1992-),女,硕士生,E-mail:luyinan@mail.dlut.edu.cn;程耿东\*(1941-),男,教授,博士生导师,中国科学院院 士,E-mail:chenggd@dlut.edu.cn.

#### 1 阻尼装置

采用阻尼系统并对塔的结构和阻尼系统进行 分析优化已经有很多研究. Colwell 等<sup>[6]</sup> 对海上风 电塔这类高柔结构进行附加调谐液柱阻尼器 (TLCD)的响应模拟,用于控制结构在风和波浪 荷载作用下的振动,研究表明 TLCD 的实施可以 延长结构的疲劳寿命. 文献[7]指出对于陆上和海 上的高风电塔及基础的设计挑战越来越大,为了 保证多兆瓦风电结构的完整性,在过去几年采用 了多种结构的阻尼策略,可以使荷载降低 20%, 塔架质量减少高达 10%. Lackner 等<sup>[8]</sup>将 TMD 系统应用于海上发电机,并对风力涡轮机中的被 动、半主动和主动结构控制系统进行模拟并确定 最佳参数.结果表明,被动控制方法可以用于改善 海上风电结构的响应,同时还证明了主动控制方 法的潜力.

在风电塔上安装阻尼装置的突出困难是风电 塔内部空间有限,增加阻尼装置对风电塔总体成 本的影响要尽量降低到企业可接受程度.选择简 便且经济的减振方式,成为风电塔发电技术中一 个重要的问题.2014年,Brodersen等<sup>[9]</sup>研究了在 海上风电塔内安装阻尼器,依靠塔架特定位置弯 曲变形的局部曲率变化产生阻尼力,通过使用肘 节支撑系统(toggle-brace system),增加阻尼器行 程和耗散能量.2016年,Brodersen等<sup>[10]</sup>提出了 将黏性型混合阻尼器安装在塔架的底部,用于控 制海上风电塔塔架振动的新型控制概念.所提出 混合阻尼器,由与称重传感器串联布置的被动黏 性阻尼器和主动制动器组成.Basu等<sup>[11]</sup>提出了 一种新型的圆形液柱阻尼器(CLCD),用于控制 叶片振动.

用于风电塔上减振装置的专利发明很多,它 们都具有占用空间小的优点.圆球减振装置由一 个底部铺有黏弹性层的球壳及在球壳内滚动的圆 球组成,安装在风电塔的适当高度.风电塔振动 时,金属球和壳底部的摩擦提供阻尼<sup>[12]</sup>,用来减 小所有方向的振动.风力发电高塔的阻尼减振装 置<sup>[13]</sup>在风电塔受外荷载作用发生弯曲变形时,塔 身两侧分别产生伸长和缩短变形,从而减小塔体 的动力响应.调谐液体颗粒阻尼(TL-PD)<sup>[14]</sup>装置 结合了调谐液体阻尼技术(TLD)与颗粒阻尼技 术(PD). 按照具体的阻尼装置建立计算模型进行结构 动力分析很重要.但是在初步设计阶段,需要简化 分析模型.为此,在本文的优化设计研究中,假定 阻尼包括了塔身阻尼和附加的阻尼装置.塔身阻 尼假定是瑞利阻尼,即阻尼阵是结构的刚度阵和 质量阵的线性组合.附加的阻尼装置是安装在塔 身特定位置的质量-阻尼器(见图 1).



图 1 塔架及简化的阻尼装置模型 Fig. 1 Tower and simplified damping device model

## 2 风电塔优化问题

## 2.1 优化列式

本文将塔架简化成变断面的欧拉-伯努利梁, 忽略塔内平台等非承载结构,塔顶结构(如风轮、 机舱等)用集中质量代替.

第1阶段,优化横截面尺寸使塔架的固有频 率满足柔性设计的要求,并在满足横截面尺寸约 束和残余振动约束下,得到体积最小的设计,优化 列式如下:

find 
$$\boldsymbol{d} = (d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_{2n})^{\mathrm{T}}$$
  
min  $V = \sum_{e=1}^{n} A_e L_e$   
s. t.  $\omega_j^2 - \omega_{j,u}^2 \leqslant 0; \ j = 1, 2, \cdots, J$   
 $\omega_{j,1}^2 - \omega_j^2 \leqslant 0; \ j = 1, 2, \cdots, J$   
 $R - \gamma R_0 \leqslant 0$   
 $\boldsymbol{d}_1 \leqslant \boldsymbol{d} \leqslant \boldsymbol{d}_n$ 
(1)

式中:d 是设计变量,由风电塔架横截面参数和针 对阻尼器设定的人工密度组成;V 是塔架体积, $A_e$ 和 $L_e$  分别是第e 个单元的横截面积和长度,n 是 风电塔架分成的梁单元数; $\omega_j$  表示塔架第j 阶固 有频率, $\omega_u$  和  $\omega_l$  是相应频率的上、下界,其值由 风机工作频率及设计者对于所设计的塔的刚柔性 要求决定;R 为残余振动, $\gamma$  为相对于初始设计残 余振动 $R_0$  的减小比例.程耿东等<sup>[5]</sup> 给出了刚性 风电塔、柔性风电塔等不同塔型的频率和风轮转 速应该满足的关系. 第2阶段,设置性能参数给定的阻尼器,通过 优化阻尼器在塔身的分布,进一步实现残余振动 最小化,优化列式如下:

find 
$$(\rho_1 \quad \rho_2 \quad \cdots \quad \rho_{N_e})^T$$
  
min  $R$   
s. t.  $\sum_{i=1}^{N_e} \rho_i - N_p = 0$  (2)  
 $\rho_i \in \{0,1\}; i = 1, 2, \cdots, N_e$ 

#### 2.2 设计变量

设计变量分为两部分,包括塔的结构尺寸和 阻尼器分布优化.两者之间相对独立.先在不考虑 阻尼器分布的情况下进行结构优化,然后基于优 化后的结构尺寸设计进行阻尼器分布优化.

本文风电塔架截面采用圆环形,每个截面的 外半径和厚度作为设计变量.这些设计变量都需 要满足上下限约束,即 d<sub>1</sub>≤d≤d<sub>u</sub>.

在以残余振动为目标的阻尼器拓扑优化问题 (2)中,预先在风电塔的梁结构上放置若干个阻尼 器,每一个阻尼器设定人工密度 $\rho_i$ 作为设计变 量,下标i表示第i个阻尼器.当 $\rho_i=1$ 时,该阻尼 器保留;当 $\rho_i=0$ 时,该阻尼器不保留.计算中,为 了应用效率更高的梯度类算法,可以将 $\rho_i$ 的取值 连续化,其取值范围改为[ $\rho_{min}$ ,1],其中 $\rho_{min}$ 为设计 变量的下限,取成大于零的小量.当 $\rho_i = \rho_{min}$ 时,表 示该阻尼器不出现在最终的设计中.为了使上述 优化问题的最优解只取 $0(\rho_{min})$ 或1,优化过程中 阻尼器的参数值与人工密度值之间的插值关系如 下:

$$k_i^{\mathrm{s}} = \rho_i^{p_1} k_i^{\mathrm{s}} \tag{3}$$

$$c_i^{\mathrm{s}} = \rho_i^{p_1} c_i^{\mathrm{s}} \tag{4}$$

$$m_i^{\mathrm{s}} = \rho_i^{p_2} m_i^{\mathrm{s}} \tag{5}$$

其中  $k_i^*$ 、 $c_i^*$  与 $m_i^*$ 分别为当前设计下第 i 个阻尼器 的刚度系数、阻尼系数与质量, $\overline{k_i^*}$ 、 $\overline{c_i^*}$ 与 $\overline{m_i^*}$ 分别为 给定第 i 个阻尼器的刚度系数、阻尼系数与质量,  $p_1$  与  $p_2$  均为惩罚因子.

#### 2.3 设计约束及灵敏度分析

2.3.1 残余振动约束及其灵敏度分析 风机运 行发电时遇到复杂多变的外部环境荷载而需要紧 急停机,假定停机瞬间通过调整桨叶倾斜角等使 风荷载迅速降低,将这个变化简化为一个冲量,即 给予塔顶一个初始速度,此后塔身发生的自由振 动即为所关注的残余振动.由于阻尼的影响,计算 自由振动如何随时间而减小,直到足够小,对于单 自由度系统是很容易的事,但对于多自由度系统, 需要进行长时间的时程积分.在一定意义上,比已 知激振力频率的强迫振动计算困难得多.这一残 余振动满足的动力学控制方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \tag{6}$$

$$u(0) = u_0, \ \dot{u}(0) = \dot{u}_0$$
 (7)

式中:M为质量阵,C为阻尼阵,K为刚度阵,u为 位移向量,它们都是结构设计变量d的函数.值得 注意的是,这里的阻尼阵C采用了瑞利阻尼,C= $\alpha M + \beta K$ .除此之外,后面也考虑了添加简化阻尼 器的计算,此时总阻尼将是塔身阻尼和阻尼器阻 尼的叠加,不能写成瑞利阻尼的形式,采用一般的 振型叠加法是很困难的,但是下面的方法并不依 赖于振型叠加,求解很容易.式(7)中u。与 $\dot{u}$ 。为 自由振动的初始位移和速度,如图 2 所示.



图 2 残余振动初始条件 Fig. 2 Initial conditions of residual vibration

式(1)中的 R 是结构控制领域广泛应用的、 能总体衡量残余振动的二次型积分结构性能指标,如下所示:

$$R = \int_{0}^{\infty} (\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{u}} \boldsymbol{u} + \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{u}} \boldsymbol{u}) \, \mathrm{d}t \qquad (8)$$

式中被积函数为*u*和*u*的二次函数,*Q<sub>u</sub>、Q<sub>u</sub>*为给 定的对称正定或半正定矩阵,*t*为时间变量.为了 计算这一积分形式的函数值,需要进行动力学方 程(6)、(7)的时程积分,计算量很大.一方面增加 了结构分析的难度,使得结构分析耗时增加;另一 方面也使得计算结构响应关于设计变量难以解析 实现.但是,基于李雅普诺夫第二方法<sup>[15]</sup>,可以大 幅简化二次型积分形式函数的表达式及其计算, 从而大幅减少残余振动响应计算的耗时.为了应 用李雅普诺夫第二方法,需将动力学控制方程与 目标函数表达式转化到状态空间:

$$\dot{X} = AX \qquad (9)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} u \\ \dot{u} \end{pmatrix} \quad (10)$$

)

则式(8)中的残余振动 R 可写成

$$R = \int_{0}^{\infty} \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \boldsymbol{X} \mathrm{d}t \qquad (11)$$

其中 $Q = \begin{pmatrix} Q_u & 0 \\ 0 & Q_u \end{pmatrix}$ ,为一个半正定的对称矩阵.

对于线性渐近稳定系统,对任意的Q,存在一个正定对称矩阵P满足李雅普诺夫第二方法:

$$\mathbf{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} + \boldsymbol{P} \boldsymbol{A} = -\boldsymbol{Q} \tag{12}$$

在上式的基础上进行简单运算,可得到:

$$\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{X} = -\dot{\mathbf{X}}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{X} - \mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\dot{\mathbf{X}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{X})$$
(13)

式(11)进一步可表示为

$$R = -\int_{0}^{\infty} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{X}) \mathrm{d}t =$$
$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(0) \boldsymbol{P} \boldsymbol{X}(0) - \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(\infty) \boldsymbol{P} \boldsymbol{X}(\infty) \qquad (14)$$

考虑系统的所有自由度都受到阻尼作用,残 余振动会逐渐减小到0,即 **X**<sup>T</sup>(∞)**PX**(∞)→0.故 衡量残余振动的二次型指标可表示为

$$R = \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(0) \boldsymbol{P} \boldsymbol{X}(0) \qquad (15)$$

$$\ddagger \mathbf{P} \, \boldsymbol{X}(0) = \begin{pmatrix} \boldsymbol{u}_{0} \\ \boldsymbol{\dot{u}}_{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{u}_{0} \\ \boldsymbol{v}_{0} \end{pmatrix}.$$

采用李雅普诺夫第二方法简化后得到的性能 指标(15),不仅有效地减少了计算的困难,还使得 灵敏度计算变得容易实现.采用 Yan 等<sup>[16]</sup>提出的 基于伴随法的灵敏度分析方法,其计算式为  $\frac{\partial R}{\partial d_k} = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^{2n} \lambda_{ij} D_{ij}^k, 其中 \lambda_{ij} 和 D_{ij}^k 可分别由$  $A\lambda + \lambda A^T + S = 0$  (16)

$$\boldsymbol{D}^{\mathrm{k}} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial d_{\mathrm{k}}} + \frac{\partial \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}}{\partial d_{\mathrm{k}}} \boldsymbol{P} + \boldsymbol{P} \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial d_{\mathrm{k}}}$$
(17)

求得.其中 $S = X(0)X^{T}(0), \partial A/\partial d_{k}$ 可以直接通 过解析求解刚度阵、质量阵和阻尼阵的灵敏度.

因为残余振动在设计中是一个控制因素,所 以残余振动出现在约束中.截面半径和厚度这些 设计变量出现在结构体积、刚度阵、质量阵和阻尼 阵中,从而决定残余振动,由此优化目标和残余振 动形成隐式联系.初始设计的截面半径和厚度决 定了初始设计在紧急停机时的残余振动,将约束 设置为优化设计在紧急停机时的残余振动,将约束 现控制残余振动某一个百分数,通过这种方式来体 现控制残余振动.所以在式(1)中,R。为塔结构初 始设计在相同初始激励下的残余振动,γ为小于1 的正数,表示相对于初始设计残余振动的减小比 例,例如,γ=0.9表示残余振动只有初始设计残 余振动的90%,减小了10%.由于采用相对于初 始设计残余振动的减小比例作为约束,初始速度 *u*。取单位值即可.本问题中,衡量残余振动的目 标函数(8)中,*Q*<sub>u</sub>为零矩阵,而*Q*<sub>u</sub>中只有对角线 上的一个位置不为0而是1,该元素所在位置对 应于塔顶水平方向的自由度.

2.3.2 塔顶位移约束及其灵敏度分析 在风电 塔设计中,塔顶位移的控制也是可能要考虑的要 求,希望了解降低塔顶位移和减小残余振动的关 系,分析两者对优化设计的影响有何异同.所以也 研究了不考虑残余振动约束而只考虑塔顶位移约 束的优化设计,即将式(1)的优化列式中第3个约 束条件表示为塔顶位移约束.应用专业软件 Bladed获得紧急停机工况下的风荷载,忽略塔身 受到的正常风荷载,以求得塔顶位移,使得优化的 设计更具有实际意义.

塔顶位移(位移和转角)可用莫尔积分法计算.由于塔结构是变断面的,采用复合梯形法进行数值积分,同一个单元上下两个截面的弯矩是不同的,把梁分成 n 段,每段的长度为 L<sub>i</sub>,那么塔顶位移表示为

$$U_{\tau} = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_{i}}{2EI} \left[ \overline{M}(x_{i}) M(x_{i}) + \overline{M}(x_{i+1}) M(x_{i+1}) \right]$$
(18)

式中:*E* 是弹性模量,*I* 是梁截面惯性矩, $\overline{M}(x_i)$ 和 $M(x_i)$ 分别是单位力和实际荷载在第*i*单元上截面产生的弯矩, $\overline{M}(x_{i+1})$ 和 $M(x_{i+1})$ 分别是单位力和实际荷载在第*i*单元下截面产生的弯矩,由此可以计算出在不同设计下的塔顶位移.将塔顶位移作为约束也加入优化问题列式中,基于式(18)很容易求得优化中需要的塔顶位移对于设计变量的灵敏度.

#### 2.4 优化方法

风电塔架优化设计问题可通过迭代求解,第 1 阶段的优化,即塔身结构的优化如图 3 所示.首 先,初始化设计变量 d,并定义约束条件参数.然 后求出当前设计的目标和约束值及它们对设计变 量的灵敏度,根据这些信息可以构造一个近似规 划,采用 移 动 渐 近 线 法 (method of moving asymptotes,MMA)求解这一近似规划,得到改进 的设计.如果设计的改进足够小,认为优化迭代收 敛,得到优化设计.



图 3 迭代求解过程 Fig. 3 Iterative solution process

## 3 数值算例

算例为具有工业背景的 117.346 m 高钢塔. 为了保证所设计的塔是刚-柔塔,文献[5]中要求 基本频率约束满足 0.225 Hz<ω1<0.375 Hz.截 面外半径上、下限为 2.750 和 1.625 m,厚度上、 下限为 0.10 和 0.01 m.

在下面的数值算例中,设计变量和频率控制 这两个约束按照以上给定的数值来约束,优化过 程中约束值不变,对于给定的残余振动降低程度, 进行优化设计.

#### 3.1 残余振动控制优化设计

残余振动约束中,关心的是初始设计和优化 设计在紧急停机时发出的残余振动大小的相对比 较,初始速度取单位速度 1 m/s. 塔身阻尼参数 α 取 0.002 3, $\beta$ 取 0,此时初始设计的一阶频率、二 阶频率、体积和残余振动分别为 0.264 1 Hz、 1.939 0 Hz、35.342 5 m<sup>3</sup>和 53.326 1.有意义的 优化是 γ 取 0.5 以上,表 1 列出在残余振动约束 下 γ 取不同值时,对应的一阶频率、二阶频率、体 积和残余振动.

由表 1 可知,随着 γ 的增大,一阶频率和体积 均减小,残余振动显著增大.但相对初始设计而 言,体积都在增大,这是为了满足残余振动这个约 束付出的代价.但是,也可以看到,γ=0.9 时得到 的优化设计和初始设计比较,材料增加 3.56%, 残余振动降低 10%. 表1 考虑残余振动约束下的优化设计

 Tab. 1
 The optimal design under residual vibration

constraint

γ	$\omega_1/Hz$	$\omega_2/Hz$	$V/\mathrm{m}^3$	残余振动
0.5	0.276 2	2.074 8	57.250 9	26.670 9
0.6	0.273 2	2.063 1	50.134 2	32.000 7
0.7	0.270 2	2.053 5	44.632 3	37.334 9
0.8	0.267 2	2.045 2	40.224 9	42.663 7
0.9	0.263 5	2.040 5	36.601 3	47.981 9

## 3.2 塔顶位移和残余振动约束对优化设计影响 的比较

采用塔顶位移约束代替残余振动约束进行塔 身优化设计,在紧急停机工况下,117.346 m 钢塔 初始设计的塔顶位移为 1.204 m,分别约束塔顶 位移为 0.7、0.9 和 1.1 m,表 2 列出在该约束下优 化设计的一阶频率、二阶频率和体积.

表 2 考虑塔顶位移约束下的优化设计

Tab. 2 The optimal design under the tower top displacement constraint

位移约束/m	$\omega_1/Hz$	$\omega_2/Hz$	$V/\mathrm{m}^3$
0.7	0.340 9	2.079 1	56.038 9
0.9	0.305 3	2.061 8	43.827 5
1.1	0.278 6	2.050 8	36.192 7

结合表 1、2 的优化结果,给出分别考虑残余 振动和塔顶位移得到的一系列优化设计的轮廓 图.在轮廓图中,高度和外径是成比例的,为了便 于观察,厚度值扩大 25 倍,图 4 是仅在残余振动 约束下的轮廓图.由图可知,在接近塔顶位置处, 半径变小,厚度变大,所以轮廓图中材料集中在接 近塔顶位置处.



图 4 残余振动约束下的轮廓图(α=0.002 3)

Fig. 4 The simplified profiles under residual vibration constraint ( $\alpha$ =0,002 3)

图 5 是仅在塔顶位移约束下的轮廓图. 由图

可知,随着高度的增加,在接近塔顶位置处,半径 变小,厚度一直呈现变小的趋势.



Fig. 5 The simplified profiles under the tower top displacement constraint

从轮廓图可以看到,在残余振动和塔顶位移 约束下得到优化结果的结构形式大体一致,但也 略有差别,考虑残余振动的优化设计在塔顶端的 一小段厚度加大,这一结果如果得到实验的验证, 是有一定意义的.但是,这样的差别与阻尼系数有 关.在残余振动约束下,如果β取0.0023,α取0, 此时初始设计的残余振动为19.3609,轮廓图如 图6所示.



图 6 残余振动约束下的轮廓图(β=0.002 3)

Fig. 6 The simplified profiles under residual vibration constraint ( $\beta$ =0.002 3)

图 4 和 6 的对比说明了瑞利阻尼系数的选取 对于结构形式的影响. 图 5 和 6 的塔顶位移数值 更接近. 根据瑞利阻尼理论,α、β 分别与结构质量 阵和刚度阵相关,因此粗略地说,α 与结构和材料 阻尼相关,β 与塔身空气阻尼相关.

以塔顶位移 U 为横坐标,残余振动 R 为纵坐标,图 7 给出了两条曲线:所计算的仅在残余振动 约束下的优化设计对应的塔顶位移和仅在塔顶位 移约束下的优化设计对应的残余振动.



图 7 残余振动和塔顶位移约束曲线



综上可知,残余振动约束和塔顶位移约束下 残余振动有着相同的变化趋势,但是,是否可以相 互替代还需要根据阻尼的特点来定.

## 3.3 阻尼器分布优化

阻尼器分布优化是一个受初始激励作用的悬 臂梁结构,以最小化残余振动为目标的阻尼器分布 优化设计问题.在式(2)中, $\rho$ 为设计变量,可能放 置阻尼器的位置数目为  $N_e$ ,本例中塔有 53 个截 面,即  $N_e$ =53,允许采用的阻尼器数目为  $N_p$ .

连接若干参数相同的线性阻尼弹簧(在水平 方向)如图 8 所示,加上阻尼弹簧后,整体结构的自 由度在原来梁单元的基础上增加若干阻尼弹簧的水 平自由度,即梁单元和阻尼弹簧的刚度阵、质量阵和 阻尼阵在相应节点上叠加.单元从下往上编号,阻尼 器的各项参数如下:弹簧刚度为 1×10<sup>5</sup> N/m,阻尼 系数为 1×10<sup>3</sup> N•s/m,集中质量为 1×10<sup>4</sup> kg. 在优化阻尼器分布的研究中,考虑塔身的结构和 材料阻尼,α取 0.002 3,β取 0.结构尺寸外半径 和厚度设计采用表 1 中  $\gamma$ =0.9 的优化结果.

本节采用 Matlab 中 fmincon 函数(优化方法 为序列二次规划方法)更新设计变量取值.  $\partial_{p_1} = p_2 = 3$ ,分别取  $N_p = 1$ 、3、5、10下的阻尼器位置优 化设计,见表 3.

由表 3 可知,阻尼器数目为 1 时,分布在塔顶的 53 号单元上,即塔顶;阻尼器数目为 3 时,分布 在塔顶的 51~53 号单元上;依次类推.阻尼器应 尽量靠近梁的自由端放置.

以上是阻尼器的位置优化分布,阻尼器的总 质量会随着阻尼器的数目增加而增加.如果约束 阻尼器的总质量,同理可以计算出阻尼器的质量 分布,约束阻尼器的总质量为10 t.阻尼器的质量 分布会随给定的每个阻尼器的质量上限变化,得 到的结果见表 4.



图 8 梁结构和阻尼弹簧

Fig. 8 Beam structure and damping spring

表 3	不	同	数	量	约	束	下	阻	尼	器	的	拓	扑	分	布
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tab. 3	Topological distribution of dampers under
	different number constraint

$N_{ m p}$	阻尼器单元编号	目标函数值
1	53	184.581 2
3	$51 \sim 53$	79.627 6
5	$49 \sim 53$	60.991 5
10	$44 \sim 53$	48.726 6

表 4	不	同	质	量	F	限	约	束	下	阻	尼	器	的	拓	扑;	分	布
Tab.	4	То	opo	log	ica	1 d	ist	rib	utio	on	of	daı	mp	ers	un	de	r

different upper limits of the mass constraint

阻尼器质 量上限/t	允许采用的 阻尼器数目	每个阻尼器 的质量/t	阻尼器 单元编号	目标函 数值
10	1	10	53	150.619 4
5	2	5	$52\!\sim\!53$	323.085 8
2	5	2	$49 \sim 53$	577.738 3
1	10	1	$44\!\sim\!53$	732.967 1

由表 4 可知,每个阻尼器的质量上限和阻尼 器总质量相同时,在塔顶有 1 个阻尼器,质量为给 定的总质量;每个阻尼器的质量上限为 5 t 时,均 分了 10 t 的总质量,分布在塔顶的两个单元上. 结果显示,阻尼器质量都在尽量地靠近塔顶,这与 阻尼器位置优化得到的结论相一致.但是,在实际 中,安装阻尼器要受到其他条件的限制.

## 4 结 语

本文提出了一种基于残余振动控制的单管型 风电塔架优化设计方法.首先,将残余振动约束引 人风电塔结构的优化列式中,采用了一个二次型 积分指标衡量残余振动,并基于李雅普诺夫第二 方法实现了对上述性能指标及其灵敏度计算的大 幅简化,避免了耗时巨大的时程分析,实现了优化 计算.对于一个典型算例,讨论了残余振动得到不 同程度降低时的优化设计,进而讨论了残余振动 约束和塔顶位移约束的关系.两者在控制振动方 面具有相似效果,但是根据残余振动中不同的瑞 利阻尼系数,最优结构具有不同的分布形式.另 外,阻尼器的位置和质量优化显示,阻尼器尽量靠 近风电塔塔顶,减振效果更佳.

## 参考文献:

- JIANG Zhiyu, MOAN T, GAO Zhen. A comparative study of shutdown procedures on the dynamic responses of wind turbines [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2015, 137(1):1-15.
- [2] MUSKULUS M, SCHAFHIRT S. Design optimization of wind turbine support structures — A review [J]. Journal of Ocean and Wind Energy, 2014, 1(1):12-22.
- [3] GOUDARZI M, STONIS M, BEHRENS B A. Development of lightweight designs for the production of wind turbine towers [C] // Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability: Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013). Switzerland: Springer, 2014:443-448.
- [4] HU Y, BANIOTOPOULOS C, YANG J. Effect of internal stiffening rings and wall thickness on the structural response of steel wind turbine towers [J].
   Engineering Structures, 2014, 81:148-161.
- [5] 程耿东,徐向东,刘晓峰. 基于频率控制的多约束风 电塔优化方法 [J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(6):551-560.
  CHENG Gengdong, XU Xiangdong, LIU Xiaofeng. Frequency-based optimization method for wind turbine tower under multiple constraints [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(6):551-560. (in Chinese)
- [6] COLWELL S, BASU B. Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 358-368.
- [7] RODRÍGUEZ TSOUROUKDISSIAN A, CARCANGIU C E, PINEDA I, et al. Wind turbine structural damping control for tower load reduction [J]. Conference Proceedings of the Society

for Experimental Mechanics Series, 2011, 4: 141-153.

- [8] LACKNER M A, ROTEA M A. Passive structural control of offshore wind turbines [J]. Wind Energy, 2011, 14(3):373-388.
- [9] BRODERSEN M L, HØGSBERG J. Damping of offshore wind turbine tower vibrations by a stroke amplifying brace [J]. Energy Procedia, 2014, 53: 258-267.
- [10] BRODERSEN M L, HØGSBERG J. Hybrid damper with stroke amplification for damping of offshore wind turbines [J]. Wind Energy, 2016, 19(12):2223-2238.
- [11] BASU B, ZHANG Zili, NIELSEN S R K. Damping of edgewise vibration in wind turbine blades by means of circular liquid dampers [J]. Wind Energy, 2016, 19(2):213-226.
- [12] 李 杰,张自立,陈建兵. 一种减振装置及使用该装置的风力发电高塔: CN202040268U [P]. 2011-11-16.
  LI Jie, ZHANG Zili, CHEN Jianbing. Damping device and high wind power generation tower using same: CN202040268U [P]. 2011-11-16. (in Chinese)

[13] 李 杰,张自立,陈建兵,等. 阻尼减振装置及使用 该装置的风力发电高塔: CN102146975A [P]. 2011-08-10.
LI Jie, ZHANG Zili, CHEN Jianbing, *et al.* Damping device and wind power generation tower

using same: CN102146975A [P]. 2011-08-10. (in Chinese)

- [14] 戴靠山,王健泽,毛日丰,等.新型减振装置 TL-PD 的风洞模型试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(5):35-40.
  DAI Kaoshan, WANG Jianze, MAO Rifeng, *et al*.
  Wind tunnel test study on a new passive damper TL-PD [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(5): 35-40. (in Chinese)
- [15] KALMAN R E, BERTRAM J E. Control system analysis and design via the "second method" of Lyapunov: I -continuous-time systems [J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(2):371-393.
- [16] YAN Kun, CHENG Gengdong, WANG Boping. Adjoint methods of sensitivity analysis for Lyapunov equation [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 53(2):225-237.

# Optimum design of residual vibration reduction for tall and slender wind turbine tower

LU Yinan<sup>1</sup>, CHENG Gengdong<sup>\*1</sup>, LIU Xiaofeng<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
  - 2. Goldwind Science & Technology Company Limited, Beijing 100176, China )

**Abstract:** For tall and slender wind turbine towers, the long-time excessive residual vibration due to resonance after emergency shutdown operation causes imminent threat to their safe operation. To ensure the safe operation, a residual vibration control method for optimum design of single-tube type turbine wind towers under multiple constraints is presented. Since it is important to reduce the construction cost of wind turbine towers, the objective function is minimum structural volume and the natural frequency is constrained to ensure the tower a slender design. The residual vibration reduction ratio is constrained to control the effect of emergency shutdown. With the Lyapunov's second method, the quadratic integral index which measures the residual vibration of structure and its sensitivities are simplified, which avoid the time-consuming transit dynamic analysis for residual vibration and its sensitivities computation. In addition, the constraint on tower top displacement at the top of the tower, the professional software Bladed is applied to obtain the wind load at emergency shutdown. The optimum design results with the tower top displacement constraints and the residual vibration constraints are compared and the topology of the damper is optimized, which can provide a reference for design research of tall and slender wind turbine tower.

Key words: wind turbine tower; slender tower; optimum design; residual vibration; emergence shutdown