

某风力发电场兆瓦级风电机组塔筒加固方案有限元分析

太原重工股份有限公司技术中心 李永亮

某风力发电场兆瓦级风电机组塔筒基础由于锚栓质量原因出现问题后，结合现场实际情况确定出两种较佳的塔筒加固设计方案。本文针对这两种加固设计方案结合有限元分析程序 NX Nastran 且有分别建立仿真模型进行有限元分析，通过对仿真数据进行比对研究，并结合相应的规范进行评定，确定出符合设计要求可行性的加固设计方案。为解决现场塔筒加固问题提供依据和参考，同时为同类型塔筒的受力校核、改进优化提供有益借鉴。

一、引言

塔筒是风力发电机组中的主要支承装置，尤其是大型风力发电机组，其高度都在数十米以上，它将风力机与地面联接，为水平轴叶轮提供需要的高度，而且要承受极限风速产生的载荷。塔筒的安全性能非常关键，其安全可靠是整个风力发电机组正常工作的前提。

某风力发电场兆瓦级风电机组塔筒底部法兰与基础连接螺栓由于质量问题，局部出现裂纹，而塔筒底部及基础是塔筒受力最大的部分，其要承受巨大的弯矩作用，锚栓出现问题严重影响到整个风力发电机组的安全，因此急需结合现场条件，设计确定出合理可行的塔筒加固方案，以确保整台机组的安全可靠。本文针对两种加固设计方案，利用有限元分析程序 NX Nastran 分别建立三维装配模型、有限元仿真模型，施加极限载荷工况进行有限元分析，通过对仿真数据进行分析比对，结合相应的设计校核规范对加固设计方案进行评定，确定出符合设计要求的可行性方案。为解决工程实际问题，实现塔筒加固，确保风力发电机组安全可靠运行提供依据和参考。

二、塔筒两种加固方案仿真模型的建立

结合风场现场实际情况，确定出两种较佳的塔筒加固

设计方案。在距离塔筒底法兰一定高度区域设计抱箍与塔筒根部打孔，通过 3 排螺栓连接，螺栓施加一定的预紧力。抱箍底部通过锚栓与地基连接，以达到整体加固的效果，详细的连接方式如图 1 所示。

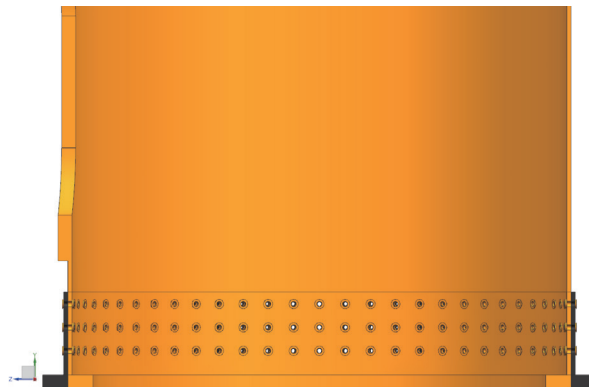


图 1 塔筒基础加固方案抱箍与塔筒连接示意图

其中，方案一为：在抱箍和塔筒根部之间采用 3×60 个 M42 高强度螺栓进行连接，施加螺栓预紧力 672kN。方案二为：在抱箍和塔筒根部之间采用 3×90 个 M30 高强度螺栓进行连接，施加螺栓预紧力 355kN。选用 NX10.0 建立塔筒、抱箍的三维装配模型，同时选用有限元分析程序 NX Nastran10.0，根据塔筒及抱箍的结构特性建立有限元仿真模型，进行网格划分。其中抱箍、塔筒根部（距离塔筒

底法兰一定高度区域与抱箍连接区域)采用3D 8节点6面体单元建立。抱箍与塔筒根部的单元采用网格匹配技术实现接触网格高质量划分,运用接触算法进行模拟。分别建立方案1中180根M42和方案2中270根M30高强度螺栓模型,塔筒上部筒体结构采用选用2D Shell壳单元建立。建立的有限元计算模型如图2、图3所示。其中单元总数324658,节点总数481694。

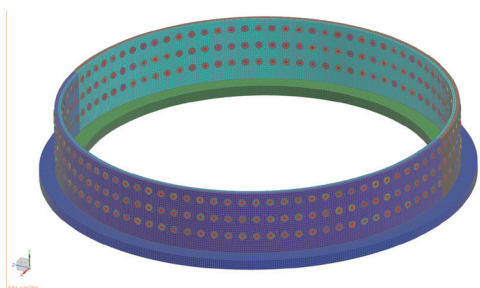


图2 塔筒基础加固方案抱箍与塔筒网格划分示意图

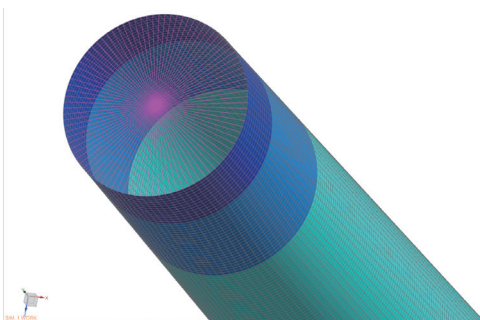


图3 塔筒上部网格划分示意图

塔筒与抱箍选用材料Q345。弹性模量 E 均为210GPa,泊松系数为0.3,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。钢材的屈服极限 σ_s 及强度极限 σ_b 如表1所示。

表1 钢材的力学特性

牌号	质量等级	σ_s , MPa			
		厚度, mm			
		≤ 16	$> 16 \sim 40$	$> 40 \sim 63$	$> 63 \sim 80$
Q345	D	≥ 345	≥ 335	≥ 325	≥ 315

抱箍与塔筒连接螺栓选用10.9级高强度螺栓,其强度极限 σ_b 为1000MPa,屈服极限 σ_s 为900MPa。塔筒有限元模型采用塔筒顶部坐标系,原点位于塔筒中心轴与塔筒顶部上缘的交点处,该坐标系如图4所示,不随机舱罩旋转。

三、边界条件及载荷工况

结合现场实际情况,塔筒加固设计方案中抱箍底部与

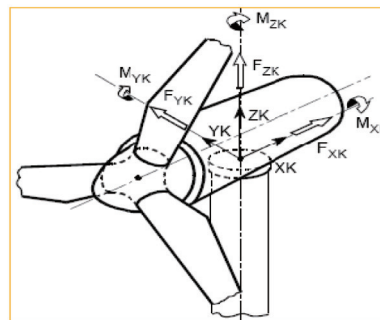


图4 塔筒顶部坐标系

XK—沿风轮轴的水平方向,固定于塔筒; ZK—垂直向上;
YK—按右手定则确定

塔筒根部法兰与地基锚接,因此约束抱箍底部与塔筒根部法兰的全部位移自由度。抱箍与塔筒筒体贴合部位采用接触算法模拟。其中对180根M42高强度螺栓施加预紧力627kN、对270根M30高强度螺栓施加预紧力335kN。详细的边界约束条件如图5所示。

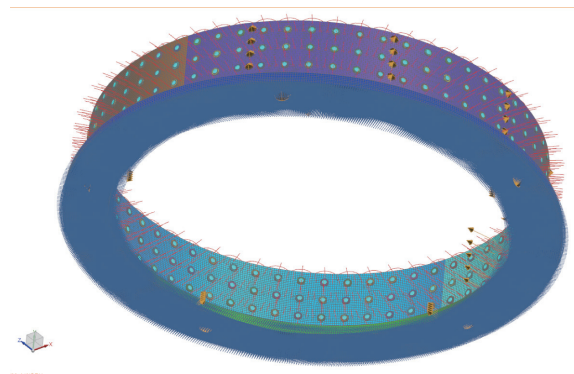


图5 塔筒加强方案边界约束条件示意图

根据塔筒顶部截面处的极限载荷工况(表2),选取了对塔筒影响最大工况 $F_x \text{ Max}$ 中相应的载荷数据分别对两种塔筒加强方案进行有限元计算及对比分析。其中相应的极限载荷施加在塔筒顶部截面位置处。

表2 塔筒顶部截面处的极限载荷

			M_x	M_y	M_{xy}	M_z	F_x	F_y	F_{xy}	F_z
		Load case	kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
F_x	Max	Max	1330.0	-4039.2	3885.0	-1501.3	-696.3	27.9	696.9	-1170.4

四、塔筒加固方案有限元计算结果及分析

应用NX Nastran10.0对2种塔筒根部加固设计方案仿真模型在极限载荷工况下分别进行有限元分析,将计算结果进行汇总对比。计算结果如图6~9所示,图中不同的颜

色表示不同的位移或应力，数值与图中左侧的彩色标尺上的数字相对应。其中，Von Mises 等效应力是按第四强度理论确定的。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力，且有 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

$$\sigma_{ef,max} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

由图 6 可知，该兆瓦级风机塔筒加固方案在极限载荷工况下，整体等效应力相对不高，均在 190MPa 左右。但是两种加固设计方案在局部加强的区域均出现了应力集中现象，特别是在抱箍与塔筒连接的螺栓孔位置及抱箍与塔筒接触的位置，如图 7~9 所示。

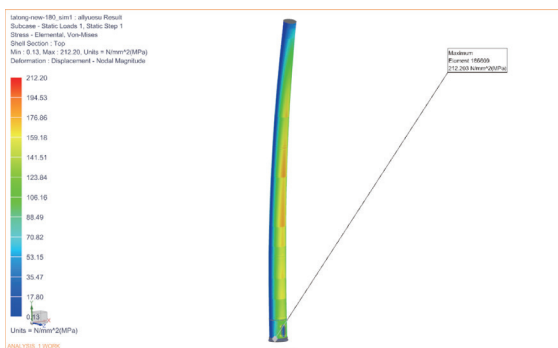


图 6 塔筒加固方案整体 VON MISES 等效应力云图

其中，加固设计方案一中，抱箍与塔筒根部螺栓连接孔接触位置处局部最大 Von Mises 等效应力为 261.38MPa，塔筒根部法兰与抱箍接触位置处最大 Von Mises 等效应力为 209.40MPa，抱箍与塔筒连接螺栓最大 Von Mises 应力 766.57MPa。塔筒基础修复方案 2 时，抱箍与塔筒根部螺栓连接孔接触位置处局部最大的 Von Mises 等效应力为 199.36MPa，塔筒根部法兰与抱箍接触位置处最大 Von Mises 等效应力为 212.20MPa，抱箍与塔筒连接螺栓最大 Von Mises 应力 806.72MPa。将两种加固设计方案有限元计算结果汇总于表 3 中。

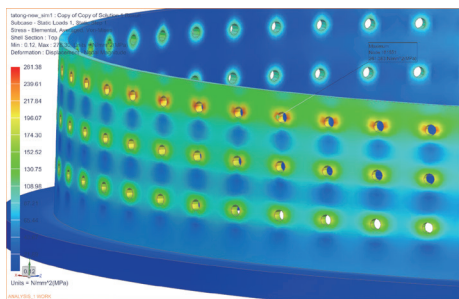


图 7 塔筒加固方案抱箍 VON MISES 等效应力云图

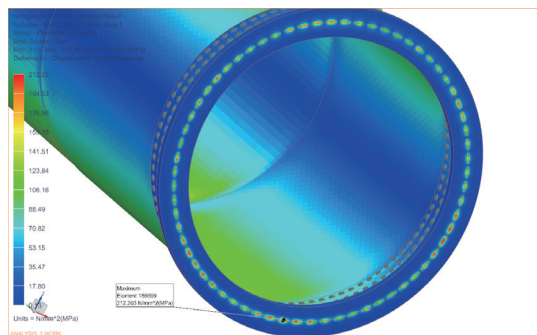


图 8 塔筒与抱箍接触应力分布云图

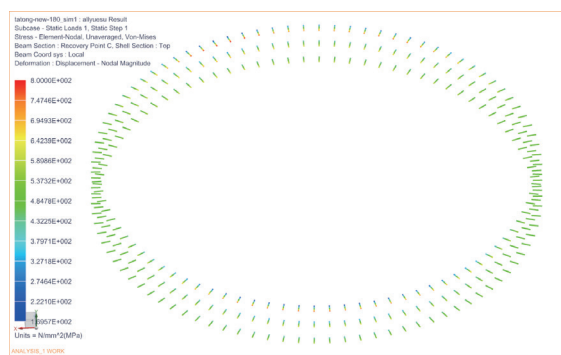


图 9 塔筒与抱箍连接螺栓 VON MISES 等效应力示意图

表 3 塔筒顶部截面处的极限载荷

塔筒加固方案	塔筒整体等效应力 (MPa)	抱箍与塔筒最大等效应力 (MPa)	抱箍与塔筒连接螺栓最大应力 (MPa)	许用应力 (MPa)	
				塔筒	螺栓
设计方案 1	188.95	261.38	766.57	234	783
设计方案 2	189.58	212.20	806.72		

根据 GL 规范及 GB/T18451.1-2012《风力发电机组设计要求》关于极限强度分析的安全系数选取规定：分为载荷局部安全系数、材料局部安全系数、失效后果局部安全系数。载荷局部安全系数在载荷计算中已考虑，金属材料局部安全系数 $\gamma_M=1.1$ ，重要局部安全系数 $\gamma_M=1.3$ （塔筒按三类构件进行考虑），故取应力安全系数 $n=1.1 \times 1.3=1.43$ ，塔筒筒体材料的屈服极限 $\sigma_s=335\text{MPa}$ ，筒体的许用应力 $335/1.43=234\text{MPa}$ 。有表 3 中计算结果可知，塔筒加固设计方案 1 抱箍与塔筒局部最大应力值为 261.38MPa，超过了塔筒筒体的许用极限值。

塔筒加固设计方案 2 中抱箍与塔筒局部最大应力值为 212.20MPa，小于塔筒筒体的许用极限值。但是由于抱箍和塔筒连接螺栓及螺栓孔直径变小，其最大等效应力增大，局

汽车产品研发过程中的流程地图创建及应用

泛亚汽车技术中心有限公司 毛婷婷 郭京敏 江漫清 王莘

汽车产品开发通常会遵循整车开发的大流程，定义主要节点的质量阀要求和时间要求，却并未详细定义各业务领域所要完成的详细工作内容，各业务之间的相互关系，以及交付信息的走向，因此本文提出打造汽车产品研发流程地图的概念，结合整车开发的时间节点要求和质量阀要求，自上而下对汽车产品研发主要过程进行分级和分场景，梳理详细业务流程内容，包括流程任务、角色、获取信息、产出交付物，上下游关系以及使用系统等。打造流程整体框架，并对打造的流程地图信息进行全方位分析，为流程的真正落地执行提供有效依据和工具。

一、前言

迈克尔·哈默说过，“对于 21 世纪的企业来说，流程将非常关键。优秀的流程将使成功的企业与其他竞争者区分开来。”环顾成功企业，它们共同的特点是不断地审视和改进自身的业务流程，不断发展员工的技能和能力，不断将新技术应用到服务或生产实践中，以不断提高企业的运营效率，并最终获取持续的竞争优势。

汽车产品开发零件繁多，开发过程复杂，质量控制也非常严峻，一般一辆新车从架构设计开始到产品投产上市，需要四年半的时间，涉及的业务范围非常宽广；如从整车安全性能开发来说，它涉及架构、造型、零件开发、安全分析及试验认证等方面，在这样一个复杂多样的业务工况环境下，

要保证各业务功能块稳步有序开展，与我们稳健的开发设计流程息息相关。

如今大数据分析 with 人工智能越来越多的应用在汽车产品开发过程中，也要求我们对流程管理的工具，流程执行的效率提出更高的要求。

二、流程地图创建的主要意义

汽车产品开发过程一般会遵循一个大的相对成熟的产品开发流程，如福特采用的 FPDS 流程，通用采用的 GVDP 流程，大众采用 PEP 流程，吉利采用 VPDS 流程，这些开发流程一般跨度较大，时间非常长，是汽车开发过程的总指导和纲领，但它主要是在关键节点设置一些质量阀来保证开

部多个螺栓最大等效应力超过了许用值 783MPa。因此建议将螺栓等级调整为 12.9 级。同时，需要结合现场情况，确保抱箍与塔筒的贴合程度以及连接螺栓孔的加工质量等。

五、结语

本文依据 GL 规范，结合有限元分析程序 NX Nastran，采用有限元方法对某风力发电场兆瓦级风电机组

塔筒两种加固设计方案在极限载荷工况下进行了分析对比，并结合相应的规范进行了评定，由有限元计算结果数据对比可知，塔筒加固设计方案 2 将连接螺栓等级提高 1 级后可以满足设计要求，同时需要确保抱箍及螺栓孔的加工质量。为解决现场塔筒加固问题提供数据依据和参考，为同类型塔筒的受力校核、改进优化提供有益借鉴。