

# 风电机组塔筒结构 强度校核与优化设计

龙凯 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 风电机组塔筒结构 强度校核与优化设计

龙凯 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

为了使广大企业技术人员、科研人员、高校教师与学生能了解风电机组塔筒结构强度校核和分析方法,本书细致阐述了塔筒薄壁圆筒屈曲强度、应力疲劳相关概念、塔筒焊缝极限强度与疲劳强度分析方法、法兰连接螺栓疲劳强度分析方法、塔筒涡激振动焊缝疲劳分析方法等。

本书既可以供从事风电机组塔筒结构设计的从业人员学习使用,也可作为高校教学单位师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风电机组塔筒结构强度校核与优化设计 / 龙凯著  
· 一 北京:中国水利水电出版社,2020.10  
ISBN 978-7-5170-9113-4

I. ①风… II. ①龙… III. ①风力发电机—发电机组—钢塔—结构强度—研究 IV. ①TM315.36

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第218739号

书 名	风电机组塔筒结构强度校核与优化设计 FENGDIAN JIZU TATONG JIEGOU QIANGDU JIAOHE YU YOUHUA SHEJI
作 者	龙凯 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 3.875印张 104千字
版 次	2020年10月第1版 2020年10月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

在一般性行业中，通用性的结构分析方法通常采用有限元法计算得到结构响应量如位移、应力等，并用于评估结构的刚强度等。与此有所不同，在风电机组结构分析方面，大量采用了工程类算法和有限元法相结合的手段，并在认证计算（如德国劳式船级社认证、中国鉴衡认证）中强制要求了相关内容。作为风电机组支撑结构的塔筒，具有载荷比较复杂，失效形式多样等特点，在结构强度校核上针对不同的强度类型，需要选择应用工程类算法或有限元法，由于结构参数同时影响多种不同类型的强度参数，这使得塔筒结构强度分析与优化设计的掌握较为烦琐困难。因此，向高校学生、工程技术人员普及有关于风电塔筒强度分析与校核的方法，是十分必要的。

有鉴于此，为了适应风力发电专业教学的需求，使得风力发电专业的研究生具有对风电塔筒结构强度分析与校核、优化设计、认证涉及的相关方法的基本认识，作者编写了这本教材。

本书第 1 章对风电机组塔筒屈曲分析、螺栓强度、法兰结构和动力学研究进行了历史和发展历程的综述；第 2 章介绍了塔筒焊缝截面应力计算方法，重点介绍了 DIN18800 - 4 标准中薄壁圆筒屈曲强度计算方法；第 3 章介绍了有关应力疲劳相关概念，为后续章节打下基础；第 4 章介绍了塔筒焊缝极限强度和疲劳强度，其中包括普通焊缝和顶部法兰焊缝，分别采用了工程算法和有限元方法；第 5 章介绍了塔筒门洞结构极限强度和焊缝处疲劳强度计算方法；第 6 章针对法兰—螺栓系统，采用 GL 认证（德

国劳氏船级社) 规范中推荐的 Schmidt-Neuper 算法对螺栓疲劳强度进行了校核。在此基础上, 采用有限元法建立了法兰的缺陷模型, 进一步揭示了法兰缺陷对螺栓疲劳寿命的影响; 第 7 章开展了涡激振动下焊缝疲劳分析。

本书出版得到了华北电力大学“双一流”研究生人才培养项目、国家重点研发计划“大型海上风电机组及关键部件优化设计及批量化制造、安装调试与运行关键技术”子课题“传动链关键部件优化设计和批量制造工艺及检测技术课题”(2018YFB1501304) 的资助, 在此表示感谢。此外, 已毕业本科生龚大副、刘雨菁, 已毕业研究生谢园奇、毛晓娥、丁文杰, 北京航空航天大学贾娇博士完成了本书中有关章节的计算分析工作; 吉亮、谷春璐、陈卓、杨晓宇等研究生参加了本书的编辑和整理工作, 感谢他们付出辛苦的工作和宝贵的时间。

龙凯

2020 年 8 月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 风电机组钢制塔筒概述 .....	1
1.2 薄壁圆筒屈曲分析 .....	3
1.3 螺栓连接与其疲劳强度特性 .....	3
1.4 风电机组塔筒法兰结构设计概况 .....	5
1.5 风电机组塔筒动力学分析 .....	7
1.6 本章小结 .....	7
<b>第 2 章 塔筒薄壁圆筒屈曲强度校核</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 塔筒坐标系 .....	8
2.3 钢制塔筒材料数据 .....	9
2.4 塔筒截面几何数据 .....	9
2.5 塔筒截面载荷.....	11
2.6 基于 DIN18800 - 4 的屈曲强度校核 .....	14
2.6.1 薄壁圆筒的截面应力计算方法 .....	14
2.6.2 理想屈曲强度 .....	15
2.6.3 实际屈曲强度计算 .....	17
2.6.4 极限屈曲强度 .....	19
2.6.5 屈曲强度判断准则 .....	19
2.6.6 实际工程应用 .....	20
2.7 塔筒门洞的屈曲强度校核.....	25
2.7.1 基于 GL 规范的缩减因子计算 .....	25
2.7.2 基于有限元法的缩减因子计算 .....	26

2.8	本章小结	32
<b>第3章</b>	<b>应力疲劳相关概念</b>	<b>34</b>
3.1	引言	34
3.2	疲劳基本概念	34
3.3	应力疲劳	35
3.4	S-N 曲线	36
3.5	平均应力的影响	38
3.6	Miner 线性积累损伤理论	39
3.7	随机谱与循环计数法	40
3.7.1	随机载荷谱及若干定义	40
3.7.2	简化雨流计数法	41
3.8	本章小结	43
<b>第4章</b>	<b>塔筒焊缝极限强度和疲劳强度</b>	<b>44</b>
4.1	引言	44
4.2	塔筒截面任意位置应力	44
4.3	塔筒焊缝极限强度分析	45
4.4	塔筒焊缝疲劳强度分析	46
4.5	等效疲劳强度分析	47
4.6	实际工程应用	48
4.6.1	软件设置	48
4.6.2	时序载荷	49
4.6.3	分析结果	52
4.7	塔筒顶部法兰焊缝强度	54
4.7.1	极限强度	54
4.7.2	疲劳强度	60
4.7.3	结构优化方案	63
4.8	本章小结	67
<b>第5章</b>	<b>塔筒门洞结构极限强度与疲劳强度</b>	<b>68</b>
5.1	引言	68

5.2	热点应力法	68
5.3	塔筒门洞的极限强度分析	69
5.3.1	有限元模型的建立	69
5.3.2	分析结果	70
5.4	塔筒门洞的疲劳强度分析	74
5.4.1	分析软件设置	74
5.4.2	不同门框宽度对疲劳结果的影响	75
5.4.3	不同门框长度对疲劳结果的影响	77
5.4.4	不同塔筒薄壁厚度对疲劳结果的影响	77
5.5	结构优化后的强度校核	79
5.6	本章小结	82
<b>第 6 章</b>	<b>法兰连接螺栓疲劳强度分析方法</b>	<b>84</b>
6.1	引言	84
6.2	基于 Schmidt - Neuper 算法的螺栓疲劳强度校核	84
6.2.1	塔筒螺栓时序应力计算	84
6.2.2	塔筒螺栓疲劳损伤计算	87
6.2.3	初始法兰结构的螺栓疲劳损伤计算	87
6.2.4	螺栓中心线圆周分布直径对螺栓疲劳强度的影响	90
6.2.5	法兰内径对螺栓疲劳强度的影响	91
6.2.6	法兰厚度对螺栓疲劳强度的影响	92
6.2.7	法兰结构优化设计	93
6.3	基于有限元法的螺栓疲劳强度校核	96
6.3.1	无间隙法兰 FE 建模	96
6.3.2	间隙模型分类	98
6.3.3	各间隙法兰螺栓疲劳损伤计算	102
6.4	本章小结	104
<b>第 7 章</b>	<b>塔筒涡激振动焊缝疲劳分析</b>	<b>106</b>
7.1	引言	106

7.2	塔筒频率分析 .....	106
7.3	塔筒涡激振动分析 .....	107
7.4	塔筒焊缝疲劳强度分析 .....	109
7.5	本章小结 .....	112
参考文献.....		113

# 第1章 绪 论

众所周知，经济的发展离不开能源的利用。随着世界经济的快速发展，各行各业对能源的需求日益增加，能源问题作为关系到人类生存的重大问题越来越受到世界各国的关注。传统的化石能源，如煤、石油、天然气，在一定程度上满足了社会的生产发展和人们的生活需求，但这些不可再生能源的开采、利用不仅破坏了生态环境，还造成环境污染。在能源需求量不断增加和保护生态环境的双重压力下，对新能源的开发与研究成了能源利用的新天地。风能作为一种主要的可再生能源，其开发和利用一直在新能源研究中被广泛关注。

## 1.1 风电机组钢制塔筒概述

塔架是支撑机舱及风电机组零部件的结构。它将风电机组与地面连接，为风轮提供必要的工作高度，通过基础将风电机组各部件的荷载传至地面。目前采用的塔架有以下几种：

(1) 按固有频率分类。按固有频率分类，塔架可分为刚性塔架（固有频率大于风轮旋转频率的塔架）和柔性塔架（固有频率小于风轮旋转频率的塔架）。柔性塔架质量轻而且较便宜，它能够允许更多的位移并承受更大的应力。由于柔性塔架的固有频率低于叶片旋转频率，因而每当风电机组升速时，将会引起瞬态共振。尽管这种瞬态共振会使机舱产生一些位移，但由于发生的时间较短，不会有危险。在设计风电机组塔架的结构动力时，需要在满足安全性的同时兼顾经济性。目前大型风电机组的塔架多为刚性塔架。

(2) 按结构形式分类。按结构形式分类，塔架可分为桁架式

塔架和圆筒式塔架。

1) 桁架式塔架常用于中小型风电机组，主要由角材杆件组成，各杆件通过螺栓连接，其优点是造价不高，运输方便，但由于桁架式塔架是开放式的，风电机组维修时不利于工作人员攀爬，也不利于线缆安装和保护。

2) 圆筒式塔架具有美观大方，安全性能好，维修方便等优点，在大中型风电机组中被广泛采用。塔架由底向上直径逐渐减小，整体呈圆台状，塔架底部用法兰盘由螺栓与地基连接，顶部由连接座和偏航轴承与机舱连接起来，各段塔筒均有法兰，法兰之间采用螺栓连接。塔架内部装有爬梯和安全绳以及工作平台，控制系统放在塔架内部的平台上。本书以圆筒式塔架为研究对象。

由于塔筒所受载荷比较复杂，而且是组合部件，在进行结构分析时需要考虑的因素比较多，如由于自然风的风速和风向不断变化，风也可能发生湍流等状态的变化，因此在设计塔筒时，需要满足在风载作用下的静强度、疲劳强度和稳定性要求，同时塔筒的刚度和强度也需要满足要求，防止风脱离塔筒时，产生的附加载荷引起塔筒发生振动或变形；风电机组运行时风轮的转动激励塔筒振动，那么塔筒的固有频率须避开激励频率以防止因共振而产生破坏。随着风电机组逐渐向大型化发展，塔筒高度逐渐增加，重量超过百吨。由于风电机组的零部件大部分都安装在塔筒上，塔筒如果发生倒塌或者断裂，将造成风电机组重大损失。因此对其结构强度的要求越来越高。

塔筒失效形式繁多，通常在认证标准中涉及的刚强度校核内容包括固有频率、涡激振动下的焊缝疲劳分析、薄壁圆筒件的屈曲失效分析、焊缝的极限强度与疲劳强度、法兰—螺栓系统的极限强度与疲劳强度、塔筒门洞处的焊缝极限强度与疲劳强度等。按认证分析方法分为工程类算法和有限元方法。其中在 GL2010 认证标准<sup>[1]</sup>中涉及的工程类算法包括 DIN18800 - 4 标准、EC3 标准、DIN4133 标准等。有限元法通常对于不满足材料力学假设的结构对象，如塔筒门洞、顶部法兰等结构开展研究。

## 1.2 薄壁圆筒屈曲分析

轴压圆柱钢薄壳结构包括筒仓、塔桅、烟囱、容器等，其屈曲问题是壳体稳定研究中最活跃的课题之一<sup>[2]</sup>。各国学者围绕壳体屈曲的缺陷敏感性进行了富有成效的研究，其中较为典型的研究包括欧洲钢壳规范中规定的屈曲算法<sup>[3]</sup>。在风电机组塔筒方面，屈曲校核大致分为工程算法和有限元算法两大类，如赵世林等<sup>[4]</sup>研究了塔架在风轮、机舱荷载和自身重力作用下引起的塔架屈曲问题的工程算法和有限元法。陈严等<sup>[5]</sup>根据叶素动量理论，考虑三维紊流风场、Beddoes - Leishman 动态失速模型、惯性载荷及重力载荷计算得到塔架动态载荷，并运用有限元法对塔筒进行了屈曲分析。文献 [6] 运用工程算法，考虑了局部屈曲稳定性约束，实现了塔筒的轻量化设计。由于缺少必要的研究和设计标准指导，大型风电机组塔架门洞局部失稳、折断等事故时有发生。随着大型化风电机组设计研究的发展，塔筒门洞及门框设计呈现多样化趋势，这使得以往的经验设计已不再适用。有限元等数值分析方法具有坚实的理论基础与广泛的工程应用，近几年来逐步应用于大型化风电机组塔筒结构设计中。但是对于塔筒门洞屈曲失稳这类问题，有限元法只能作为一种辅助分析手段，它需要与其他工程算法相结合来进行分析计算。

## 1.3 螺栓连接与其疲劳强度特性

螺栓连接是机械设备连接的主要形式。高强度螺栓因其具有连接紧密、受力和抗震性能好等优点，被广泛应用在各种大型机械设备中<sup>[7]</sup>。如大型核电设备压力容器的高密封性紧固连接<sup>[8]</sup>，航天飞机承力部件的干涉配合<sup>[9]</sup>，复杂钢结构工程中采取的摩擦型高强度螺栓连接等<sup>[10]</sup>。由复杂交变载荷引起的疲劳失效在高

强度螺栓失效中最为常见。有限元法与实验研究等手段在此类研究中应用广泛。杜运兴等<sup>[11]</sup>应用理论计算结合有限元方法 (finite element method, FEM) 确定了常用螺栓螺纹力与螺栓位移系数的计算公式, 计算得到螺栓应力集中系数。Liao 等<sup>[12-13]</sup>考虑了螺纹结构和损伤力学行为, 应用多轴疲劳模型进行螺纹连接结构疲劳寿命的高精度预测。Luan 等<sup>[14]</sup>引入双向非线性动力学模型, 并对比传统线性梁模型, 分析了螺栓的静态力学性能和耦合振动问题。Ma 等<sup>[15]</sup>讨论了法兰厚度、螺栓间距和螺栓规格对螺栓连接强度的影响, 提出一种不包含垫片的法兰螺栓轻量化设计方法。

近几年, 随着大型风电机组的装机容量日益增加, 工作条件更加恶劣, 对连接螺栓的抗疲劳性能要求不断提高。在风电机组中, 螺栓连接主要体现在叶片根部与轮毂连接<sup>[16-17]</sup>、轮毂与主轴连接<sup>[18-19]</sup>以及塔筒法兰连接<sup>[20-24]</sup>等方面。

史文博等<sup>[16]</sup>基于 VDI2230 标准, 对风电机组轮毂法兰与变桨轴承螺栓连接进行接触强度分析, 提出用等效梁模拟螺栓连接, 建立一种螺旋副轴向径向接触刚度模型计算方法。喻光安等<sup>[17]</sup>采用有限元数值方法, 研究法兰结构缺陷以及螺栓套伸出长度对叶片螺栓连接载荷系数和疲劳寿命的影响。杜静等<sup>[18]</sup>基于 VDI2230 标准, 建立螺栓等效轴向和径向刚度梁模型, 分析了风电机组轮毂与主轴法兰螺栓连接强度和极限载荷。晁贯良等<sup>[19]</sup>利用有限元结合理论分析方法, 研究了主轴连接螺栓强度和接触面滑移问题, 计算得到危险螺栓疲劳损伤。

与上述部件不同, 风电机组塔筒法兰螺栓强度研究大致分为工程算法、有限元法和实验研究三类方法。与其他工业装备螺栓校核有所不同, 塔筒法兰螺栓疲劳强度校核广泛采用工程设计算法, 如 Petersen 算法、VDI2230 算法、Seidel 算法和 Schmidt - Neuper 算法<sup>[20]</sup>等。以上方法的共同思路是通过建立塔筒薄壁外界拉力和螺栓应力关系, 在此基础上, 获取螺栓时序应力, 并基于线性累积假设得到螺栓疲劳损伤值。近几年, 国内许多学者基

于传统的工程算法对螺栓疲劳损伤开展了一系列研究，龙凯等<sup>[20-21]</sup>基于 Schmidt - Neuper 算法分析了法兰厚度、螺栓数量、螺栓预紧力、螺栓中心线圆周分布直径和法兰内径对螺栓最大累积损伤的影响，在此基础上实现了塔筒法兰系统的轻量化设计<sup>[21]</sup>。何玉林等<sup>[22]</sup>基于 Schmidt - Neuper 算法计算了某风电机组塔筒螺栓的疲劳寿命。

基于有限元法的研究方面，周舟等<sup>[23]</sup>建立了基础法兰系统 FE 模型，研究其受力特性，同时采用试验的方法研究螺栓过载失效问题。杜静等<sup>[24]</sup>对比了 FEM、Schmidt - Neuper 和 Seidel 三种不同方法下的螺栓疲劳损伤结果，结果表明 FE 模型因忽略塔筒法兰间隙，高估了螺栓的抗疲劳性能。

不少学者基于试验研究几何形状和预紧力对螺栓疲劳特性影响，Schmidt 等<sup>[25]</sup>基于试验研究，指出特定形状的几何间隙会显著增加应力幅值，从而影响结构的疲劳寿命。Schaumann 等<sup>[26]</sup>对大直径高强度螺栓进行了疲劳试验，并采用局部缺口应变法计算了螺栓疲劳强度。Caccese 等<sup>[27]</sup>通过试验研究应力松弛对螺栓预紧力、连接强度和疲劳寿命的影响。

## 1.4 风电机组塔筒法兰结构设计概况

法兰系统由于高可靠性、承载力好，以及良好的通用性，广泛应用于不同的工业装备领域的连接结构中<sup>[28]</sup>。风电机组塔筒法兰系统由法兰、螺栓和垫片组成，其设计形式借鉴了传统行业的设计方法，如 VDI2230 标准。常见的塔筒法兰结构形式有 L 型和 T 型。目前，国内大型风电机组多采用 L 型厚法兰，具有依赖进口，体积庞大和生产条件不足等缺点。随着风电机组单机容量增加以及海上风电进一步发展，机组的高度和重量不断加大，传统法兰只能通过增加厚度的方式，提高法兰系统力学性能。但同时也增加了材料成本及加工成本，不利于风电行业的长远发展。针对以上痛点问题，许多国内学者通过建立简化的法兰

工程模型，研究不同参数变量对法兰力学性能的影响程度，对法兰系统进行参数优化设计，使之在满足可靠强度的前提下，尽量减少材料用量，满足法兰轻量化设计要求<sup>[29]</sup>。

龙凯等<sup>[21]</sup>基于一阶泰勒展开，建立了塔筒法兰结构显式优化模型，在保证螺栓疲劳损伤限值条件下，实现优化结构总重量大幅度下降。刘远东等<sup>[30]</sup>基于响应面法，建立螺栓—法兰连接的多目标优化设计模型，计算得到法兰结构的最优几何参数。蒋国庆等<sup>[31]</sup>考虑经典响应面模型的局限性，基于结构参数与响应指标的内在联系建立修正模型，并结合遗传算法计算得到优化参数，提高了优化效率。王洪锐等<sup>[32]</sup>通过有限元和试验结合的方法，分析了某螺栓法兰连接结构失效主要原因，提出三种增大法兰刚度和螺栓承载能力方案，增强了法兰连接系统的可靠性。此外，更有学者创造性地提出一些新型法兰连接结构，并开展了相应研究。如马人乐等<sup>[33-34]</sup>率先提出反向平衡法兰结构（图 1-1），采用有限元法分析了反向平衡法兰的静强度和疲劳特性，并基于试验验证了新型结构的稳定性。

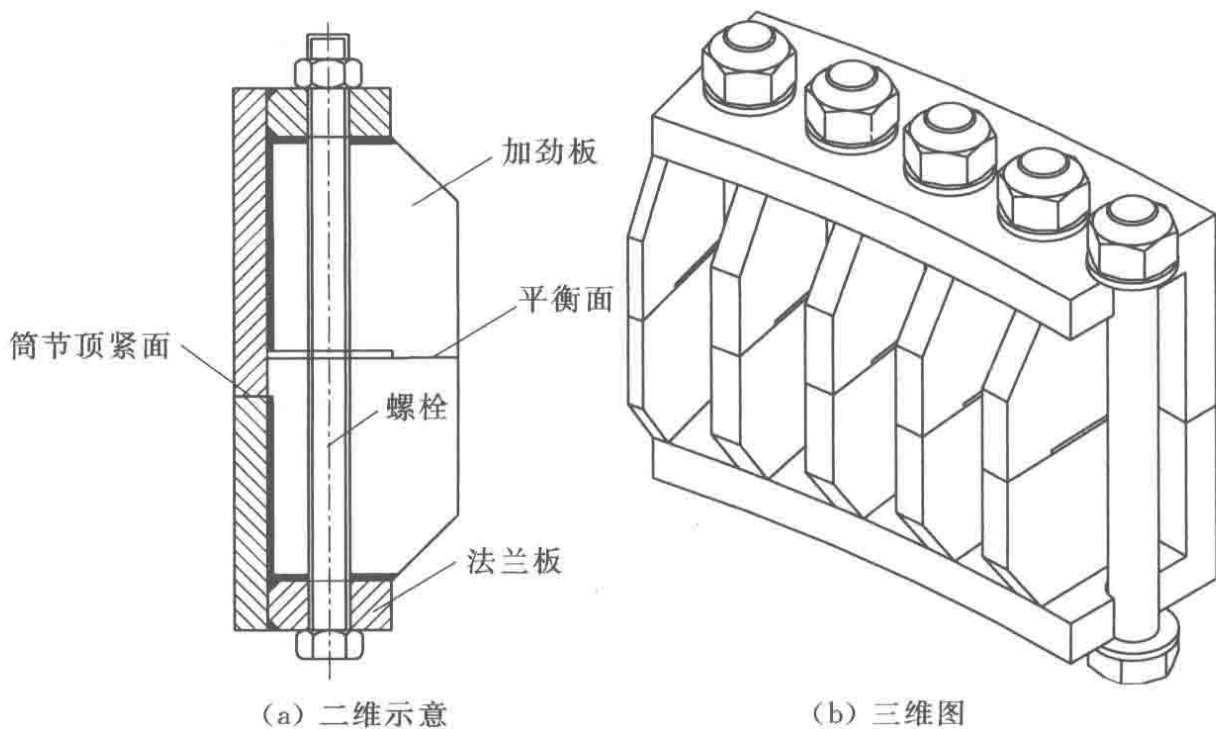


图 1-1 反向平衡法兰结构

## 1.5 风电机组塔筒动力学分析

大中型水平轴风电机组塔筒承受风轮、轮毂及其他塔顶部件的重量，其振动特性直接影响到风电机组的结构可靠性和运行稳定性。由于自然界风在时间和空间上的多变性，造成风电机组塔筒结构受力非常复杂。在空间上要考虑风速、风向和风压沿塔架高度的变化，在时间上由于风速的脉动以及随风频脱落的涡系等。塔架结构的变形和振动，不仅会引起塔基附加应力，而且会影响顶端风轮的变形和振动。风轮与塔筒间存在着强耦合振动关系，故而塔筒结构动力学是结构性能研究首先要解决的问题。在此方面，陆萍等<sup>[35]</sup>采用自动划分单元网格技术，研制了用于风电机组塔筒结构的动态分析程序系统。陈严等<sup>[36]</sup>根据叶素动量理论，考虑三维紊流风场、Beddoes - Leishman 动态失速模型、惯性载荷等计算了风电机组整机载荷，得到了塔筒极限载荷。刘雄等<sup>[37]</sup>在风轮建模基础上计算得到作用在塔筒顶端的集中载荷，采用二结点梁单元建立塔筒离散化模型，考虑结构阻尼和气动阻尼，运用线性加速度法和模态叠加原理计算得到塔筒动态响应。李德源等<sup>[38-39]</sup>应用有限元法分析了某 1.5MW 风电机组塔筒在非定常气动力下的动力响应，研究了作用在圆筒型塔架上的气动力特别是非定常气动力与雷诺数的关系，计算了塔顶处横向和顺风向在过临界和超临界条件下的动态位移，并考察了风轮和机舱重量对塔架固有频率的影响。

## 1.6 本章小结

从风电机组塔筒薄壁圆筒的屈曲分析、螺栓连接及其疲劳强度特性、法兰结构设计和结构动力学方面，论述了大型风电机组塔筒结构分析与设计研究的历史发展进程和研究现状。

## 第 2 章 塔筒薄壁圆筒屈曲强度校核

### 2.1 引言

塔筒薄壁圆筒结构满足材料力学的基本假设。本章将考虑塔筒薄壁圆筒锥角，采应用 DIN18800 - 4 标准计算得到每一个薄壁圆筒段的应力值。同时按照 DIN18800 - 4 标准规定内容，在考虑几何缺陷、材料缺陷基础上，计算得到理想屈曲强度、实际屈曲强度和极限屈曲强度，从而校核薄壁圆筒段的屈曲强度。对于塔筒底部门洞，由于其几何形状具有非规则特点，提出基于 GL2010 标准和有限元两种计算方法结果来作为 DIN18800 - 4 计算结果的修正。作为风电机组零部件中典型工程类算法的应用，本章内容也为后续章节中焊缝处应力计算做好准备<sup>[40]</sup>。

### 2.2 塔筒坐标系

根据 GL2010 标准，塔筒坐标系如图 2-1 所示，塔筒坐标

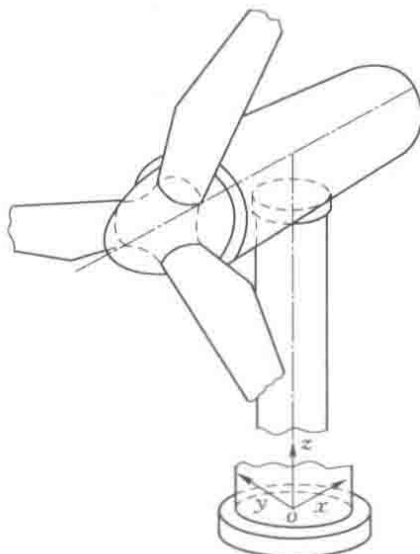


图 2-1 塔筒坐标系