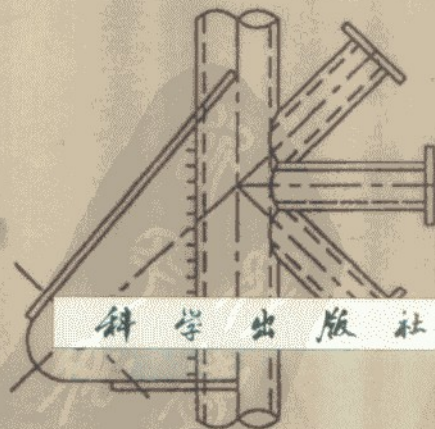
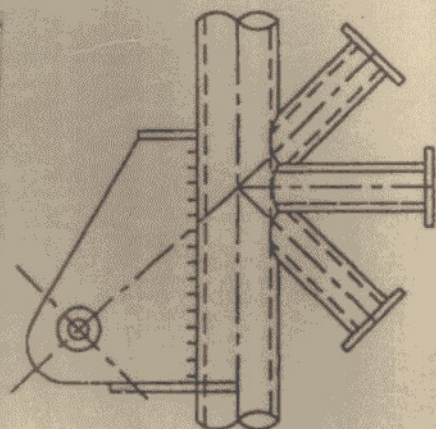
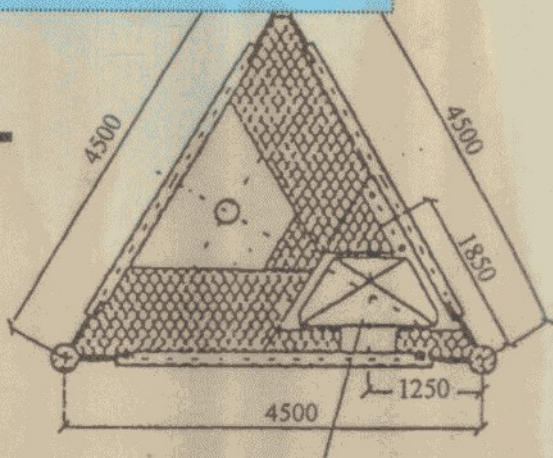
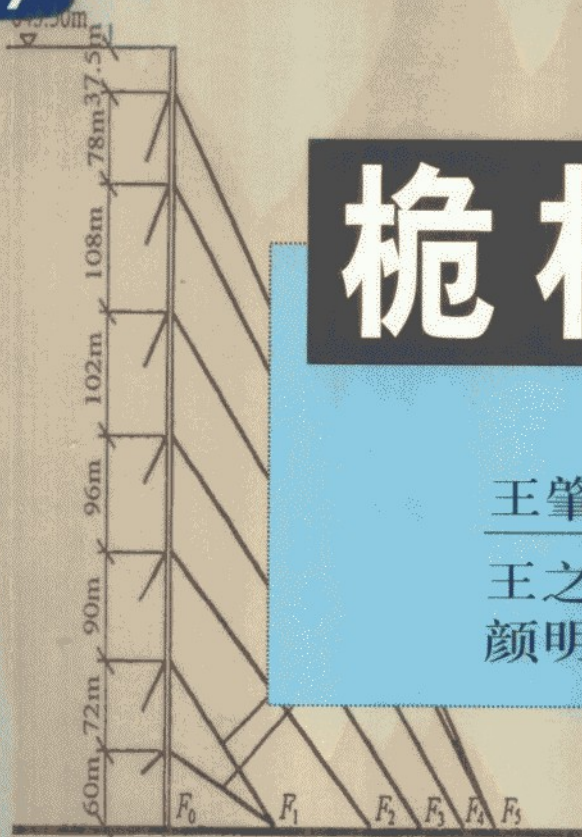


桅杆结构

王肇民 主 编

王之宏 副主编
颜明忠



科学出版社

桅杆结构

王肇民 主 编

王之宏 副主编
颜明忠

科学出版社

2001

HZPB/07

内 容 简 介

本书系统地阐述了桅杆结构的造型与构造原理、计算荷载和作用力(风荷载、裹冰和地震作用)、静力计算、动力特性、风振效应和地震反应、非线性振动、振动控制、疲劳问题、整体稳定以及风洞试验及其实测分析等。

本书在总结近年来国内外学者及作者们最新研究成果的基础上,对桅杆结构的分析计算和设计方法作了较全面的介绍,可供土木工程专业的结构工程的科研、设计、施工人员和研究生以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

桅杆结构/王肇民主编;—北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-008778-X

I. 桅…… II. ①王… ②马… III. 桅杆-结构 N. TU761.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 44057 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张: 29 1/2

印数: 1—3 000 字数: 683 000

定价: 53.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

前 言

高耸结构是一种细长而主要受风荷载作用的构筑物,根据结构形式的不同,可分为自立式塔架结构和拉线式桅杆结构。这两种结构的特点比较接近,又有差不多的应用范围,所以两种结构合在一起称为塔桅结构。

桅杆结构虽然与塔架结构同属一种结构类型,但其非线性特性使桅杆结构的静力和动力特性远比塔架结构复杂得多。桅杆结构的非线性主要表现在纤绳的工作性质和杆身的二阶矩影响。纤绳在三四个方向拉住杆身,保证桅杆的直立和稳定,这种斜挂的、有预应力的索索随荷载作用而改变形状,其内力和变形呈非线性关系。长细比较大的杆身随纤绳节点位移而产生附加弯矩,需要根据二阶矩理论进行结构分析。

桅杆结构受风而振动时,纤绳与杆身的动力特性相互联系、相互影响,杆身振动引起纤绳跨长周期性变化,激发了纤绳的振动,纤绳振动通过节点把反力的周期性变化传到杆身上,两者相互激励和影响,使桅杆结构形成相对复杂的动力体系。桅杆结构没有固定的自振周期,其自振频率是随外界影响而变化的。

高柔的桅杆结构在随机风荷载作用下会产生各种类型的风振效应,有顺风向的结构振动响应,其圆形截面结构会产生横风向涡激振动,一定条件下还会出现横风共振。纤绳受周期性弦向力作用时,可能发生参数振动。当桅杆结构阻尼比较小时,空气动力阻尼可能引起结构自激振动,其振幅不断增加从而导致动力失稳。结构由于非线性及对外界条件的敏感,还会出现跳跃和混沌现象。

桅杆结构由于长细比很大,刚度和阻尼较小,在风荷载作用下易产生大幅振动,强风易引起桅杆剧烈振动而失稳倒塌,微风易引起桅杆频繁摆动而疲劳破坏。桅杆结构的薄弱环节很多,只要某根纤绳松弛、节点板断裂或杆身局部失稳,都会导致桅杆整体破坏。近几年来世界各地由于各种原因而引起桅杆结构倒塌的事故有 100 多起,在各种建筑结构中破坏比例相当高,引起国际上许多塔桅结构专家重视。据分析,除人为因素外,桅杆破坏的主要原因是桅杆结构复杂的工作机理,特别是桅杆结构动力特性尚未为人们所完全认识和掌握,因此要从理论上深入研究以解决这个十分迫切的问题。

同济大学在塔桅结构教学、科研和设计中做了不少工作,也取得不少进展。塔桅结构课题组最近在国家自然科学基金资助下进行了“桅杆结构非线性动力特性及混沌现象研究”(编号:59778030),在教育部高校博士点专项科研基金资助下进行了“拉线式桅杆振动控制”(编号:9524701),在土木工程防灾国家重点实验室基金资助下进行了“塔桅钢结构振动响应及控制的理论与试验研究”,对桅杆结构进行了系统的分析和研究。其主要内容包括:(1)桅杆结构的动力特性;(2)桅杆结构的动力计算模型;(3)桅杆结构频域、时域内顺风向振动响应;(4)桅杆结构横风向涡激振动响应;(5)桅杆结构静、动态下的稳定性;(6)桅杆结构非线性振动(跳跃、混沌现象);(7)桅杆结构振动控制;(8)桅杆结构疲劳现象;(9)桅杆结构风洞试验研究;(10)关于高耸结构规范的修订等。研究成果发表在近期有关学术刊物上,或撰写在博士论文里。

鉴于论述桅杆结构的著作不是很多,加上现在桅杆结构研究取得了长足进步,我们认为有必要根据国内外学者近期在此领域内所取得的成果,写成一本系统介绍桅杆结构的专著——本书。

本书全面阐述桅杆结构的静力、动力分析、计算与构造,以及试验、实测结果。除绪论外,全书共分十章。第一章介绍桅杆结构设计原理、纤绳、杆身和基础计算、构造;第二章叙述桅杆承受的主要荷载;第三章分析桅杆的静力计算方法;第四、五、六章研究桅杆动力特性,包括自振特性、风振动力响应(顺风向和横风向)、地震反应及一些非线性振动现象(如跳跃、混沌);第七章为桅杆结构振动控制原理、控制方法和控制装置的设计及参数研究;第八章分析桅杆疲劳现象及疲劳寿命;第九章是对桅杆静、动态稳定性的研究;第十章介绍桅杆风洞试验和现场实测的部分成果。书中还列有可供参考的各种静力、动力分析计算实例。

参加本书编写的有马星博士、王之宏博士、王仲刚博士、李树逊博士、何艳丽博士和颜明忠博士。

王肇民
1999年10月

目 录

前言

绪论	1
0.1 桅杆结构的特点及应用	1
0.2 桅杆结构的非线性静力、动力特性	1
0.3 桅杆结构的阻尼因素	4
0.4 桅杆结构破坏分析	5
第一章 桅杆结构的选型与构造	7
1.1 桅杆结构设计原则	7
1.2 桅杆结构的选型	7
1.2.1 纤维布置	7
1.2.2 杆身选型	10
1.3 桅杆结构的构造	12
1.3.1 杆身连接构造	12
1.3.2 纤维与杆身节点连接构造	14
1.3.3 杆身腹杆连接构造	14
1.3.4 桅杆底座构造	15
1.4 桅杆结构的基础	16
1.4.1 基础材料与埋深	16
1.4.2 基础选型与构造	17
1.4.3 中央基础计算	20
1.4.4 桩基础设计	24
1.4.5 地锚基础设计	31
1.5 桅杆结构工程实例	38
1.5.1 美国电视桅杆	38
1.5.2 英国电视桅杆	40
1.5.3 德国通讯桅杆	41
1.5.4 波兰无线电桅杆	41
1.5.5 北京环境气象监测桅杆	43
1.5.6 广州输电塔	44
1.5.7 阿根廷旅游桅杆	44
1.5.8 西班牙巴塞罗那电视桅杆	45
第二章 计算荷载和作用力	47
2.1 荷载分类	47
2.2 风荷载	47

2.2.1	风的形成	47
2.2.2	风的基本特性	48
2.2.3	空气动力学与风荷载	57
2.2.4	风荷载的模拟	64
2.2.5	风振系数的计算	70
2.2.6	拟静力风荷载计算	75
2.2.7	横风向共振等效静力风荷载计算	78
2.2.8	最不利风荷载分布	79
2.3	裹冰荷载	80
2.3.1	裹冰荷载分布	80
2.3.2	裹冰荷载计算	80
2.3.3	裹冰风振特性	82
2.4	地震作用	83
2.4.1	地震波与地震反应特点	83
2.4.2	地震分布、震级及烈度	85
2.4.3	地震反应分析	87
第三章	桅杆结构静力分析	93
3.1	概述	93
3.2	纤绳计算	94
3.2.1	纤绳计算原理	94
3.2.2	纤绳方程式	98
3.2.3	纤绳工作研究	104
3.3	杆身计算	111
3.3.1	弹性支座连续梁法	111
3.3.2	杆身等效梁单元法	119
3.3.3	杆单元矩阵位移法	137
3.4	桅杆结构参数分析	143
3.4.1	纤绳初应力对桅杆结构受力性能的影响	143
3.4.2	纤绳布置对桅杆整体稳定的影响	148
3.5	桅杆结构静力计算实例	151
3.5.1	弹性支座连续梁法计算桅杆	151
3.5.2	杆身等效梁单元法计算桅杆	160
第四章	桅杆结构动力特性	166
4.1	概述	166
4.2	桅杆动力计算模型	167
4.3	纤绳自振特性	168
4.3.1	纤绳模型	168
4.3.2	纤绳自由振动	170
4.3.3	纤绳刚度计算	176

4.3.4	桅杆体系空间动力刚度	179
4.3.5	考虑阻尼影响的纤绳动力特性	180
4.3.6	设置辅助纤绳后纤绳的动力特性	183
4.4	杆身自振特性	186
4.4.1	杆身力学模型	186
4.4.2	迭代法求解杆身的自由振动	187
4.4.3	杆身自由振动简化计算	187
4.4.4	传递法计算杆身的自振特性	188
4.5	桅杆自振实测方法	190
4.5.1	桅杆实测自振法	190
4.5.2	桅杆实测共振法	192
4.5.3	桅杆实测脉动法	195
4.6	桅杆自振特性计算实例	198
4.6.1	格构式桅杆自振特性计算——算例一	198
4.6.2	格构式桅杆自振特性计算——算例二	200
4.6.3	单筒式桅杆自振特性计算——算例三	204
4.6.4	桅杆结构地震作用下自振特性计算	207
4.6.5	卸载后桅杆自由振动的计算研究	207
第五章	桅杆结构风效应与地震反应	211
5.1	概述	211
5.2	桅杆顺风向振动响应	212
5.2.1	桅杆顺风向振动分析	212
5.2.2	桅杆顺风向振动响应线性化分析——频域法	213
5.2.3	桅杆顺风向振动响应非线性分析——时域法	216
5.2.4	桅杆随机风振离散分析法	219
5.2.5	桅杆顺风向振动计算实例	225
5.3	桅杆横风向振动响应	240
5.3.1	桅杆横风向振动分析	240
5.3.2	桅杆横风向随机振动响应	241
5.3.3	桅杆横风向涡激振动响应	241
5.4	桅杆驰振响应	243
5.4.1	驰振的机理	244
5.4.2	纤绳裹冰驰振下桅杆结构动力计算	245
5.4.3	纤绳裹冰驰振算例	247
5.5	借助等效阻尼的简化风振计算	249
5.5.1	等效阻尼概念	249
5.5.2	参数选择	250
5.5.3	计算步骤	251
5.5.4	应用实例	261

5.6	桅杆地震反应	269
5.6.1	桅杆地震反应计算模型	269
5.6.2	地震作用下桅杆反应计算	273
5.6.3	桅杆地震反应计算实例	275
第六章	桅杆结构非线性振动中的参数振动和混沌现象	279
6.1	概述	279
6.1.1	非线性振动基本原理	279
6.1.2	非线性振动现象及机理	281
6.2	参数振动	283
6.2.1	桅杆的参数振动现象	283
6.2.2	纤绳参数振动方程	283
6.2.3	纤绳参数振动的动不稳定区	286
6.2.4	参数分析	288
6.3	跳跃现象	291
6.4	混沌动力特性	293
6.4.1	混沌现象分析	293
6.4.2	桅杆在不对称荷载作用下混沌动力计算	294
6.4.3	桅杆在对称荷载作用下混沌现象的研究	298
第七章	桅杆结构振动控制	302
7.1	概述	302
7.1.1	桅杆结构振动控制原理	302
7.1.2	桅杆结构振动控制方法	304
7.2	桅杆结构非线性振动控制理论	305
7.3	纤绳振动控制	308
7.3.1	纤绳参数选择	308
7.3.2	纤绳悬挂减振器	310
7.3.3	辅助纤绳控制	311
7.3.4	纤绳接地阻尼器	313
7.4	杆身振动控制	317
7.4.1	杆身构造措施	317
7.4.2	杆身阻尼器减振形式	322
7.4.3	TMD 对结构风振响应的控制	325
7.4.4	TSD 对结构风振响应的控制	330
7.4.5	TMD 参数研究	333
7.4.6	横风涡激振动控制参数研究	336
7.4.7	振动控制在桅杆实际应用中存在的问题	339
7.5	地震反应控制	343
7.6	桅杆结构 TMD 振动控制计算实例	345
7.6.1	桅杆实例	345

7.6.2	桅杆自振特性	346
7.6.3	TMD 参数	347
7.6.4	控制效果	348
第八章	桅杆结构疲劳分析	349
8.1	概述	349
8.1.1	桅杆结构疲劳现象	349
8.1.2	桅杆疲劳分析	350
8.2	桅杆结构疲劳计算方法	351
8.2.1	桅杆疲劳破坏区及其应力幅	351
8.2.2	疲劳强度计算	354
8.3	桅杆结构疲劳寿命计算	356
8.3.1	规范法计算桅杆疲劳寿命	356
8.3.2	随机疲劳理论计算桅杆疲劳寿命	359
8.4	桅杆结构抗疲劳措施	360
8.4.1	提高桅杆构件的疲劳性能	360
8.4.2	风振疲劳控制设计	361
8.5	桅杆结构疲劳计算实例	362
第九章	桅杆结构整体稳定	366
9.1	概述	366
9.1.1	桅杆结构稳定计算原理	366
9.1.2	桅杆结构静力稳定计算方法	367
9.2	临界力法计算桅杆静力整体稳定	367
9.2.1	精确法计算桅杆静力整体稳定	367
9.2.2	铰链法计算桅杆静力整体稳定	370
9.2.3	平均参数法计算桅杆静力整体稳定	373
9.2.4	初参数法计算桅杆静力整体稳定	374
9.3	极限位移法计算桅杆静力整体稳定	384
9.4	全过程位移跟踪法计算桅杆静力整体稳定	384
9.4.1	桅杆结构的非线性静力平衡方程	384
9.4.2	增量修正弧长法进行位移全过程跟踪	386
9.5	桅杆静力稳定计算实例	388
9.5.1	初参数法计算桅杆静力整体稳定	388
9.5.2	极限位移法计算桅杆静力整体稳定	390
9.5.3	桅杆静力整体稳定两种计算方法的比较	391
9.5.4	全过程位移跟踪法计算桅杆静力整体稳定	392
9.6	桅杆结构动力稳定性分析	392
9.7	桅杆结构动力稳定计算实例	397
第十章	桅杆结构试验测试及分析	399
10.1	概述	399

10.2	风洞试验桅杆模型设计	400
10.2.1	相似原则	400
10.2.2	模型设计	401
10.3	紊流场的模拟	403
10.3.1	紊流场测试仪器	403
10.3.2	模拟装置的调试	403
10.3.3	模拟装置布置及调试结果	403
10.4	桅杆结构自振特性测试及分析	406
10.4.1	模型1测试及计算结果	406
10.4.2	模型2、3测试及计算结果	408
10.5	紊流场下桅杆模型动力响应	410
10.5.1	模型1测试结果及分析	410
10.5.2	模型2在0°风向下的测试结果及分析	416
10.5.3	模型2在0°、30°风向下的混沌现象	417
10.6	桅杆结构风振响应实测	420
附录一	桅杆破坏实例	425
附录二	纤绳的规格、连接和零件	428
附录三	桅杆支座和纤绳绝缘子	437
附录四	分布风段法及阵风系数法研究	440
附录五	蒲福风力等级表	445
附录六	福基达龙卷风等级表	446
附录七	全国基本风压标准值(kN/m^2)	447
附录八	全国城市地震烈度区划表	451
附录九	中国地震烈度表(1989)	452
附录十	各种荷载分布的系数计算	454
附录十一	三角系数 a 、 b 、 c 表	455
附录十二	桅杆结构风洞试验测试	457
参考文献		459

绪 论

0.1 桅杆结构的特点及应用

桅杆结构由一根直立的细长杆身和 3~4 个方向沿高度斜向张拉的数层纤绳组成,杆身是主要的承载结构,纤绳则保证杆身的直立和稳定(图 0.1)。

桅杆结构是一种高耸的构筑物,其特点是高度较大,横截面相对较小,杆身长细比通常在 100~200 左右,远大于一般的高耸结构,横向荷载起主要作用。另一方面,与一般结构相比,桅杆结构是受气候影响更显著的高耸结构,如风荷载和裹冰荷载常常是桅杆结构的控制荷载。

桅杆结构的主要功能是:以杆身作为载体,将某种工艺装置举向高空;或将烟气通过杆身内管道排向高空,以改善燃烧条件,减轻烟气对环境的污染;也可做为安装及施工的起重机结构。因此,桅杆结构广泛应用于广播电视、通讯、电力、冶金、邮电、航天、环保、石油、化工、交通、旅游及市政工程等部门,用作电视桅杆、通讯桅杆、无线电桅杆、烟囱、排气塔、输电塔、风力发电塔、大气污染监测塔、钻井塔、安装塔等(图 0.2)。

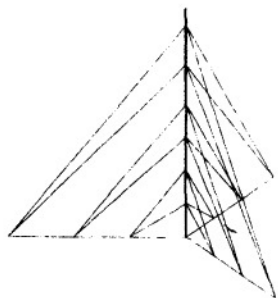


图 0.1 桅杆结构

拉线式桅杆和自立式塔架结构都是高耸结构,其结构特点有许多共同之处,在应用上也有差不多相同的范围。桅杆结构与塔架结构相比具有自重轻、材料省、工期短、构件类型少、制作和安装易于标准化等特点。当然桅杆结构也有其不足之处,如占地面积大,结构偏移大,稳定问题突出,难以设置楼梯、机房及平台,维护工作量大以及动力计算理论还不完善。但由于经济、美观的因素,其应用越来越广泛,计算理论也正在不断地发展和完善。

0.2 桅杆结构的非线性静力、动力特性

桅杆结构的柔索纤绳和细长杆身导致横向荷载作用下的大变形,整个结构的强非线性使其静力和动力特性十分复杂。

0.2.1 桅杆结构的非线性

桅杆结构的非线性主要表现在纤绳的几何非线性以及杆身轴力的二阶矩影响上。

(1) 纤绳几何非线性。

纤绳是一种悬索结构,斜挂在杆身与地面之间,其形状随荷载不同而改变,纤绳张力与弦向变形之间呈非线性关系。若采用抛物线模型,纤绳方程为

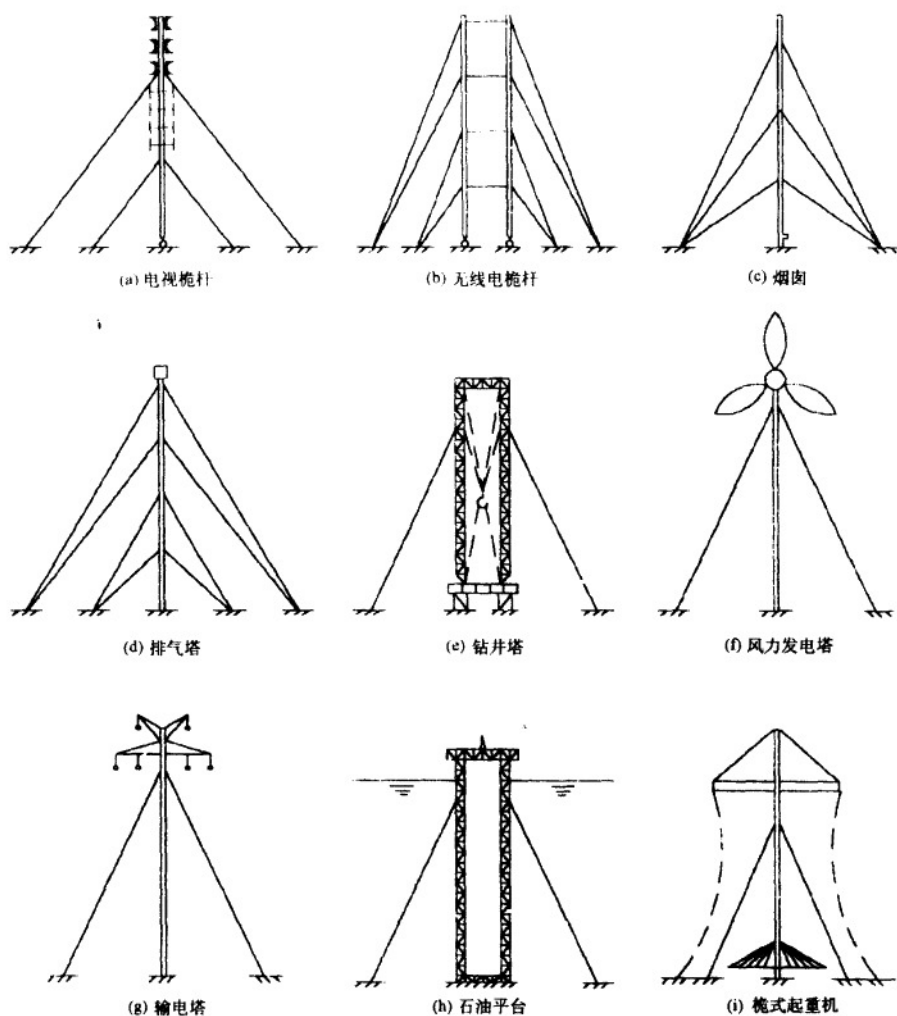


图 0.2 桅杆结构的应用

$$\Delta l = -\frac{l^3}{24} \left(\frac{q^2}{S^2} - \frac{q_0^2}{S_0^2} \right) + \frac{l}{E_k A} (S - S_0) + \epsilon(t - t_0)l \quad (0.1)$$

式中, S, S_0 为纤绳弦向张力和初张力; q, q_0 为作用在纤绳上的均布工作荷载与初始荷载; $l, \Delta l$ 为纤绳跨长和弦向变形; E_k, A 为纤绳弹性模量和截面面积; t, t_0 为纤绳工作温度和初始温度; ϵ 为纤绳材料线温度膨胀系数。

(2) 杆身二阶矩效应。

由于纤绳的斜向张拉对杆身产生了较大的轴向压力, 同时在风荷载作用下杆身的水平位移较大, 位移越大, 轴向压力产生的附加弯矩也越大, 因此桅杆结构的非线性因素很强, 必须根据二阶矩理论进行分析。

0.2.2 桅杆结构的风效应

桅杆结构受气候影响十分显著。风荷载是主要荷载,其分布规律及其动力特性又比较复杂。由于结构的高柔性和风荷载的随机性,桅杆对风的作用特别敏感。桅杆结构的风效应应有如下几类:

(1) 结构顺风向振动响应。

由于风速可分为平均风速和脉动风速,风对桅杆作用也表现为顺风向的平均风荷载和脉动风荷载。桅杆结构的顺风效应包括静力风效应和动力风效应,前者引起结构静内力和静位移,后者产生结构振动响应,包括动内力、动位移和振动加速度。

(2) 结构横风向涡激振动。

风作用在圆截面纤绳或圆筒形杆身上,产生交替脱落的旋涡,桅杆在横风方向上被周期地驱动,但这种驱动只产生很小的响应。当旋涡脱落的频率与结构自振的频率接近或相等时,出现频率锁定现象,引起桅杆杆身或纤绳在横风方向上较大的运动,即横风共振。

(3) 自激振动。

桅杆结构高而柔,随着结构材料高强度化,结构阻尼比越来越小;结构高度不断增加,其高柔特点更加明显;因此除了需考虑结构的风激强迫振动外,还应注意因结构本身振动而引起风相对于结构速度方向的大小改变,及由此而产生的空气动力阻尼引起的结构自激振动。当空气动力阻尼为负值时,结构自激振动的振幅有可能会不断地增加直至动力失稳。

(4) 参数振动。

桅杆结构中有初应力的纤绳受周期性弦向力作用时可能发生参数振动。在风荷载作用下,桅杆结构产生振动。在某段时间内,杆身产生近似周期性运动,同时也使纤绳弦向力变化接近周期性。当周期性的弦向力变化频率与纤绳自振频率相同或是它的两倍时,在纤绳平面内或垂直于纤绳平面外就会产生不稳定振动,并出现大振幅。当频率比为2时,称为参数共振;当频率比为1时,即为通常意义上的共振。

(5) 其它非线性振动。

桅杆结构振动时,杆身和纤绳的动力特性是相互联系的。杆身的振动引起纤绳跨长周期性变化,从而激发了纤绳的自由振动;纤绳振动又通过节点把反力的周期性变化传到杆身上,使杆身和纤绳的振动相互影响、相互激励,形成一个相对复杂的动力体系。已有文献说桅杆是混沌体系,也就是说任何初始条件的微小变化都有可能最终导致最终结果的差异。

在桅杆结构的非线性振动中,如果考虑风激励作为系统运动方程的非齐次项出现,可能得到下列结果:

- 1) 主共振($\omega = \Omega$);
- 2) 组合共振($\omega = n\Omega_1 + m\Omega_2$);
- 3) 超谐波共振($\omega = n\Omega$);
- 4) 次谐波共振($\omega = \frac{n}{m} \cdot \Omega$);
- 5) 混沌运动。

上述结果中 Ω 为激励频率, $n, m = 1, 2, 3, \dots$ 。

此外,结构风振分析中常常忽略的横向湍流也会引起结构的横风向振动。在湍流中,静止结构会受到两种横风荷载的叠加:一种是顺风湍流在结构尾流中的旋涡脱落引起的荷载 $F_{L1}(z,t)$;另一种是来流中横向湍流引起的荷载 $F_{L2}(z,t)$ 。由于横向湍流对结构横风向响应影响较小,它引起的最大偏差一般不超过 10%,同时对于圆截面结构,只需讨论其横风向周期性干扰力引起的结构共振响应,因此横向湍流可忽略不计。横向湍流对桅杆产生的风振效应至今还未有实测,有待于进一步研究。

0.3 桅杆结构的阻尼因素

桅杆结构的阻尼是个非常复杂的问题,纤绳和杆身诸多非线性因素决定了阻尼的非线性,阻尼与使用的材料、截面、连接方式、安装过程及振动的振幅等许多因素有关。因此准确确定桅杆结构的阻尼是很困难的。

就结构受力特性而言,拉线式桅杆结构要优于自立式塔架结构。一方面有纤绳的支撑作用,使桅杆结构截面可达到很小,如波兰华沙长波通讯桅杆,高宽比为 135:1,从而达到轻质、经济的目的;另一方面,由于纤绳和杆身的相互作用,从理论上讲纤绳具备了质量、弹簧、阻尼的特性,相当于一个等效的 TMD,在一定范围内能控制结构的振动(图 0.3)。

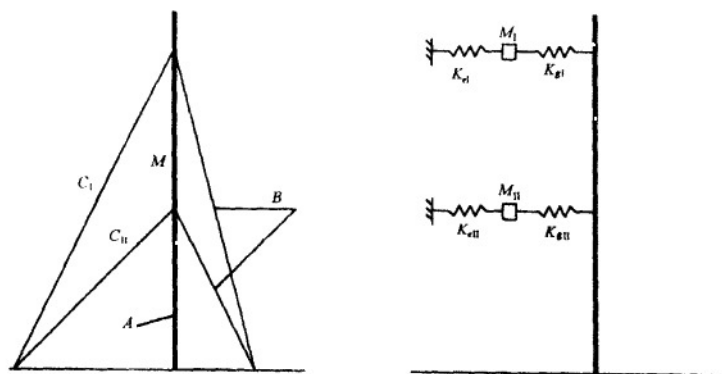


图 0.3 纤绳等效 TMD 作用

纤绳的阻尼作用能迅速衰减振动振幅。纤绳一端接地,另一端与杆身连接,具有一定的挠度,同时在工作状态下产生较大的非线性变形。由于纤绳的非线性对结构产生的阻尼要比结构振动时空气动力阻尼、材料阻尼大得多,可通过以下两方面来说明:

(1) 结构振动过程中,纤绳节点位移及风荷载的变化引起纤绳挠度和纤绳力的变化,从而改变了结构的自振频率。

(2) 振动过程中的“跳跃”现象,使结构非线性振动的振幅要比线性计算的结果小得多。桅杆这种非线性振动中所表现出来的非和谐特性,使得当结构处于共振频率区时,振动振幅得到大幅度衰减。

由于风荷载是随机的,除了纤绳质量外,其挠度、变形随风荷载变化,纤绳的弹簧刚度

和阻尼也不断产生变化。也就是说, 纤维的等效 TMD 效应是随着风荷载而“自动调频”的, 其控制效果在某一范围内较好。当纤维产生共振(例如由于圆柱形杆身涡激振动引起的纤维平面内或平面外的参数振动), 纤维的刚度将大幅度下降, 甚至出现负刚度, 这样纤维不但起不到控制作用, 反而对杆身施加一个更不利荷载。虽然由于上述的结构非线性和阻尼因素引起的振动振幅不会无限放大, 但会对结构产生不利影响, 如影响使用性能或易使纤维节点板产生疲劳损伤, 因而要加以控制。

0.4 桅杆结构破坏分析

由于桅杆结构长细比很大, 刚度、阻尼较小, 在风荷载、裹冰等作用下容易产生较大幅度的振动: 一方面, 在强风作用下容易引起桅杆剧烈振动而导致失稳破坏; 另一方面, 在发生频率较高的微风作用下引起桅杆的频繁振动可能导致结构疲劳而破坏; 同时这种结构的安全可靠度较差, 只要一根纤维松弛、一块节点板断裂或一根弦杆失稳, 就容易引起整个桅杆结构破坏。

据 20 世纪 60 年代以来不完全统计, 世界上大大小小的桅杆因风荷载、冰雹、裹冰而破坏, 或由于结构疲劳、腐蚀、绝缘子断裂而破坏, 以及设计、制造、安装错误而破坏倒塌事故已超过 100 余起。

附录一提供了芬兰广播公司所收集的近 100 个桅杆破坏实例, 高度从 37~646m 不等, 其中约 50% 左右桅杆破坏是因风、冰雹、裹冰等荷载引起的, 有 25% 左右原因不明, 其余破坏事故是由疲劳、腐蚀、绝缘子破坏以及设计、制造、施工错误等因素引起的。

波兰华沙长波通讯桅杆(642.5m)的倒塌是桅杆严重破坏事故之一。该桅杆曾经为世界最高建筑物, 于 1975 年建成并于 1991 年对其纤维进行更换。在更换顶端 C 向纤维之前, 先在该主纤维下端 22.5m、上端 2.5m 处各张拉一根临时辅助纤维, 此时杆身顶端产生 2m 位移。接着卸下主纤维 C, 杆身顶端沿 C 向偏移变为 1m。偏移使两根临时辅助纤维受力不均匀, 下辅助纤维拉力达到 250kN, 比预计的大 4 倍, 远超过其抗拉强度。于是下辅助纤维逐渐松弛并脱落, 导致杆身较大幅度的振动, 引起上辅助纤维的超载。同时拉索节点板产生破坏, 最终使桅杆在高度 500~520m 之间发生破坏, 倒下的杆身段击坏了整座桅杆。

分析桅杆倒塌破坏的主要原因为: 没有按照规定的程序来更换纤维(即临时辅助纤维的张拉应与主纤维的释放同时进行)。目前该桅杆已决定重建, 新方案的研究及设计工作正在进行。

近年来, 美国 400m 以上的桅杆倒塌事故有数十例, Missouri 桅杆(610m)为其中之一, 并造成 3 人死亡。该格构式桅杆杆身为圆钢组合构件, 断面为等边三角形, 弦杆采用 $\phi 95 \sim \phi 160$ 圆钢, 斜腹杆为 $\phi 15 \sim \phi 25$ 圆钢。由于焊接缺陷及桅杆的振荡, 在斜腹杆与节点板连接处产生了裂缝, 于是决定更换杆身上 1130 根斜腹杆。当更换到 146m 处 6 根有裂缝的腹杆时, 用作临时铰链车突然滑动, 造成桅杆倒塌。

298m 的 Bielstein 桅杆位于德国 Teutoburger Wald, 由于倒塌时风速不大, 因此引起工程界的高度重视。该桅杆倒塌的起因是纤维的持续振动在节点区产生了敏感的弯曲响应, 纤维节点板的平面外振动便导致了疲劳裂缝。当时在零下 20℃ 气候条件下, 材料的冷

脆性使节点板断裂,引起结构破坏。这次事故促使德国对大量桅杆进行检验和分析研究。从而对桅杆的疲劳现象更加重视。

国际上一些桅杆结构专家认为:在正常设计、建造及材料情况下,桅杆结构发生破坏的比例在土木工程中首屈一指。导致桅杆破坏的主要原因,除人为因素外,可归结为桅杆结构复杂的工作原理,特别是桅杆结构的动力特性,还没有被人们完全认识和掌握。一系列事故的发生严重阻碍了桅杆结构广阔的发展前景,因此十分迫切需要从理论上深入研究桅杆结构动力特性,解决这一突出的矛盾。

要对桅杆结构进行系统分析研究,建立一套较完整的理论体系,有下列工作要做:

(1)桅杆结构基本动力特性的研究,包括:纤绳抛物线、悬链线模型;桅杆的静力刚度和动力刚度;纤绳和杆身的自由振动、强迫振动;阻尼对纤绳动力特性的影响;辅助纤绳、多拉纤绳的特性等。

(2)桅杆结构动力计算模型的研究,包括:纤绳采用两节点或多节点索元,考虑纤绳几何非线性和纤绳振动及其动张力增量并考虑动力风荷载作用在纤绳上;杆身采用等效梁元模型,也可在原有基础上采用改进的非线性单元理论计算模型。

(3)桅杆上风荷载、裹冰荷载、地震作用等的计算;风荷载的时程模拟;桅杆结构频域、时域内顺风向振动响应的分析;桅杆结构气动弹性现象,如横风涡激振动响应、驰振等;桅杆结构静、动态下的稳定性。

(4)桅杆结构非线性振动研究,如参数振动、跳跃现象、混沌现象等。

(5)桅杆结构的疲劳分析、可靠度分析,用规范法和随机疲劳理论来计算桅杆的疲劳寿命。

(6)桅杆结构的振动控制,包括纤绳控制和杆身控制。

(7)桅杆结构的试验研究,包括风洞试验、结构风振实测。