

JIEGOUFENG GONGCHENG

# 结构风工程

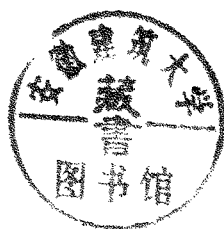
理论·规范·实践

张相庭 编著 ●

中国建筑工业出版社

# 结构风工程 理论·规范·实践

张相庭 编著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

结构风工程 理论·规范·实践 / 张相庭编著. —北

京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08136-X

I. 结... II. 张... III. 抗风结构—结构设计

IV. TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 022415 号

本书根据作者 30 多年来对结构风工程的研究、教学以及担任制定有关风荷载的国家和地方标准、规范取得成果的基础上, 并结合近 10 多年来负责的 10 多个重大工程中风工程设计实践及组织召开 10 多个国内外学术会议的经验, 总结编写出这本关于结构风工程理论与工程实践的图书。

全书共 25 章, 前 10 章为工程抗风设计计算的基本概念和计算方法, 是风工程应用与研究的重要理论基础, 可用以解决一些规范尚未言明或与应用条件不符的工程抗风设计问题。第 11 至 17 章介绍了几本我国涉及风荷载的规范, 以及发达国家的风荷载规范及风荷载计算方法。第 18 至 24 章, 结合我国规范针对具体工程介绍其抗风设计计算。最后一章介绍了城市抗风防灾的基本概念和基本计算方法, 并附有实例。

本书可供设计、科研人员以及大专院校师生使用和参考。

\* \* \*

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 董建平

责任校对: 张景秋 张虹

## 结构风工程 理论·规范·实践 张相庭 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京华艺制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 $\frac{1}{4}$  字数: 650 千字

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 45.00 元

ISBN 7-112-08136-X

(14090)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

# 前 言

在土木工程设计、计算和抗灾防灾规划中，风荷载、地震作用以及雪荷载、楼面荷载等都是应该考虑的主要干扰和作用。其中最有影响和最易引起工程结构失败甚至破坏的首推风荷载和地震作用。对于高、大、细、长等柔性结构，风荷载是重要的甚至是决定性的设计荷载，处理不当或失措会造成工程结构损伤和破坏，给人民生命财产带来重大的损失。

据德国慕尼黑保险公司对 1961~1980 年 20 年间发达国家自然灾害损失 1 亿美元以上的统计，其中风灾造成的损失占总自然灾害损失 40.5%。随着生产和建设的发展，风灾损失与其他损失一样，每年递增。据美国华盛顿世界观察社报导，在 20 世纪的整个 80 年代，因气候变化造成的损失只有 540 亿美元，而 90 年代前 5 年，已造成 1620 亿美元的损失。如按德国统计资料推算，则世界风灾造成每年损失达 137.7 亿美元。但资料显示，实际风灾损失已远远超过上述数值，仅 1992 年安德鲁飓风横扫美国佛罗里达州，把面积达 100 多万平方英里的地方夷为平地，损失达 300 亿美元，7 家保险公司因无法承受赔偿而倒闭。实际上，除美国外，其他国家的风灾损失也是十分惊人的。1991 年孟加拉国风灾造成 14 万人丧生，损坏或摧毁 100 万间民房，造成 30 亿美元损失，相当于孟加拉国国民总产值的 10%；而 1994 年孟加拉国二次风灾又造成 44 万人死亡，损失更加惊人。在我国，风灾损失也是十分惊人的，单单 1994 年 9415 号台风袭击浙江，就造成房屋倒塌和损坏 80 多万间，2397 公里的通信电杆倒毁，死亡 1000 多人，机场屋盖被吹坏，99m 高的通信铁塔也被狂风刮倒。直接经济损失达 108 亿人民币，加上间接损失，总数达 177.6 亿人民币，约合二十多亿美元。2004 年第 14 号台风“云娜”在浙江省温岭市石塘镇登陆，登陆时最大风力在 12 级以上（风速达 45m/s），风力最大的大陈岛风速达 58.7m/s，创历史最高纪录。据统计，这次台风在浙江省造成 176 人死亡，倒塌房屋 6.43 万间，受灾人口 1299 万人，直接经济损失超过 200 亿元（2004.11.20 新民晚报）。今年（2005 年）风灾损失更加惊人，八月份的第 9 号台风“麦莎”、第 13 号台风“泰利”所经过的闽、浙、皖、赣、沪地区，造成直接经济损失达几百亿元人民币。在美国，“卡特里娜”飓风袭击南部的墨西哥湾沿岸三个州，损失更加惊人；据来自路易斯安娜州的参议员维特 9 月 2 日说，仅在该州造成的死亡人数就可能超过 1 万人。美国保险和财经行业担当顾问机构的“风险管理方案公司”估计说，此次飓风造成的经济损失可能高达 1 万亿美元，超过美国历史上其他任何一次自然灾害，甚至与“9.11”袭击不相上下。

近年来，全球气候变化较大，今年美洲地区飓风数量明显较往年增多，且强度大、破坏力强。这提示人们，对台风的影响不可忽视，对台风造成的风灾切不可掉以轻心。

风灾损失的主要部分为工程结构的损坏和倒塌。工程，特别是高、大、细、长的柔性工程结构的抗风设计计算以及城市抗风统计估算的合理和全面与否，是抗风安全的重要关键。与此相应，国际上每四年召开一次风工程学术会议，地区性的如亚太、欧洲等的风工

程学术会议则更频繁。我国以结构风效应为名的学术会议，每二年召开一次，以风工程与工业空气动力学为名的学术会议，则每四年召开一次，说明风工程的研究及其在工程设计计算中的应用已得到很大的重视。

鉴于风在抗灾防灾上的重要性，我国很多的国家和地方标准、规范和规程，如建筑结构荷载规范、高耸结构设计规范、高层建筑设计规程、公路桥梁抗风设计指南、铁路桥涵设计规范等都对风荷载作了整章或整本的专门条文规定。特别由于我国的建设正处在蓬勃发展阶段，大量的新工程均需进行合理全面的抗风设计计算，而国际上发达国家的风荷载规范则在不断变化之中。在这样形势下，工程设计人员及研究工作者迫切需要一本与这一变化相适应的、计算上又较为全面合理的、能与规范一致的，并在一些地方作出了补充的工程抗风设计计算书籍。有鉴于此，作者根据三十多年来对结构风工程的研究、教学以及参加负责制订有关风荷载的国家标准或规范取得的成果，以及十多年来负责的十多个重大工程风响应试验和分析所得经验，编写了这本“结构风工程 理论·规范·实践”书籍，以供读者参考、应用。

本书共分 25 章。前 10 章为工程抗风设计计算的基本概念和基本计算方法，其中第 2 章的结构动力学和可靠指标、第 9 章非线性结构力学是风工程应用、研究的重要的理论基础，其他 8 章是结构风工程的基本内容，可以适应各种工程的一般情况。深入了解风工程基本概念和计算方法，可以解决一些规范尚未言明或与应用条件不符的一般情况的工程抗风设计计算。由于我国大量工程建设需应用我国规范，也由于我国参与的工程设计与施工中不少为涉外工程，还有些重大工程设计则需用到其他发达国家的规范进行对比计算，因而在第 11 至第 17 章中除介绍了我国有关风规范外，还介绍了国际标准化协会 ISO、美国、澳大利亚、日本以及前苏联的风荷载规范及其计算方法，可供计算对比参考。第 18 至第 24 章分别针对具体工程如玻璃幕墙、烟囱及无线杆系塔架（电视塔等）、桅杆、输电铁塔、冷却塔、高层建筑、屋盖、桥梁、起重机等工程，又密切结合我国规范的抗风设计计算内容进行阐述，其中有作者亲自负责的实际风工程试验和设计的介绍。最后一章即第 25 章，介绍了城市抗风防灾的基本概念和基本计算方法，并有实例。

本书在编写过程中，中国建筑科学研究院研究员陈基发先生和金新阳先生提供了国际标准化协会 ISO、美国、澳大利亚、日本等风荷载规范的新版本和荷载规范的电子文本，同济大学颜德恒教授提供了玻璃幕墙的规范资料，对他们的大力支持和帮助，特此表示深切的感谢。还要提到的，中国建筑工业出版社编审赵梦梅女士对风工程的最新发展极为关切，为本书的出版给予了热情的支持，特此表示衷心的感谢。

风工程研究处在不断发展和革新之中，将会出现一些新鲜的课题和新的研究成果，并在规范中引入和更新。作者将在适当时间出版风工程最新发展专著，并希望本书再版时不断引入新鲜内容和补充条文，使广大读者能迅速了解这些变化，获取最新资讯，热诚希望读者在使用本书过程中，不吝提出宝贵意见和建议，以期把这本风工程专题书籍修改得好一些。

张相庭

2005 年 9 月 4 日

# 目 录

<b>第一章 风、风速、风压和风荷载</b> .....	1
第一节 风的基本概念 .....	1
第二节 风力强度表示法 .....	2
一、范围风速 .....	2
二、工程风速 .....	5
第三节 风速风压关系 .....	5
第四节 风对结构的作用 .....	6
一、结构的风力 .....	6
二、结构的风效应 .....	7
第五节 结构抗风分析和风荷载公式 .....	9
一、响应 .....	9
二、空气动力失稳 .....	11
<b>第二章 结构风工程的分析基础 (结构动力学、可靠指标)</b> .....	12
第一节 结构动力学基础 .....	12
一、结构动力方程 .....	12
二、结构动力特性 .....	12
三、结构强迫振动 .....	33
第二节 结构抗风的安全度和可靠度、可靠指标 .....	37
一、概述 .....	37
二、可靠指标 .....	38
三、JC 方法——一次二阶矩法 .....	40
四、我国标准的可靠指标 .....	43
五、抗风抗震可靠指标的简化算法 .....	44
<b>第三章 基本风速或风压及非标准情况的换算</b> .....	45
第一节 基本风压的定义及确定方法 .....	45
第二节 全国基本风压标准值表 .....	51
第三节 非标准情况的分析和换算 .....	69
<b>第四章 风压高度变化系数</b> .....	78
第一节 任一地貌任一高度风压计算基本公式 .....	78

第二节	风压高度变化系数 .....	79
第三节	我国荷载规范有关参数取值 .....	79
第四节	特殊地形下的计算 .....	80
<b>第五章</b>	<b>风载体型系数 .....</b>	<b>84</b>
第一节	风载体型系数及压力系数和力系数 .....	84
第二节	单体建筑风载体型系数 .....	86
第三节	群体建筑风载体型系数 .....	96
第四节	局部风压体型系数 .....	97
一、	外表面 .....	98
二、	内表面 .....	98
<b>第六章</b>	<b>顺风向风振、风振系数和阵风系数 .....</b>	<b>99</b>
第一节	结构顺风向风振随机振动理论及风振系数 .....	99
第二节	参数分析 .....	101
第三节	顺风向风振响应、风振系数 .....	109
一、	风振系数 .....	109
二、	位移响应 .....	116
三、	风振力 .....	117
第四节	考虑结构与风耦合作用时的顺风向弯曲风振计算理论 .....	119
第五节	阵风系数 .....	122
第六节	弯扭耦合响应 .....	124
<b>第七章</b>	<b>横风向旋涡脱落风振及共振响应 .....</b>	<b>126</b>
第一节	基本概念 .....	126
第二节	横风向弯曲响应几种常用的模型 .....	126
第三节	按卢曼模型计算横风向弯曲响应的几个问题 .....	127
一、	横风向力系数 $\mu_{L1}$ .....	127
二、	旋涡脱落圆频率和锁住效应 .....	128
三、	横风向风力图 .....	129
第四节	横风向弯曲响应的计算 .....	129
一、	亚临界范围和跨临界范围的共振响应 .....	129
二、	超临界范围的随机振动 .....	134
第五节	考虑横风向共振荷载时的总响应 .....	135
<b>第八章</b>	<b>风力下结构空气动力失稳 .....</b>	<b>137</b>
第一节	横风向空气动力失稳模型 .....	137
一、	气动力模型 .....	137
二、	静态准定常力模型 .....	137

第二节	横风向弯曲驰振 .....	137
第三节	扭转驰振 .....	142
第四节	横风向弯扭耦合颤振 .....	143
<b>第九章</b>	<b>非线性结构风振理论基础 .....</b>	<b>146</b>
第一节	非线性问题 .....	146
第二节	确定性干扰下结构非线性振动的解析解 .....	146
第三节	随机干扰下的解析解 .....	149
第四节	确定性干扰下的数值解 .....	151
一、	虚荷载法 .....	151
二、	塑性铰法 .....	155
三、	加速度线性化方法 .....	156
四、	应用程序计算 .....	161
第五节	随机干扰下的数值解 .....	165
<b>第十章</b>	<b>结构风振控制 .....</b>	<b>174</b>
第一节	振动控制的类型 .....	174
第二节	振动控制的方法 .....	174
第三节	安装振动控制装置的结构分析 .....	175
第四节	减振系数 .....	181
第五节	简化分析和计算 .....	183
<b>第十一章</b>	<b>建筑结构荷载规范 .....</b>	<b>185</b>
第一节	荷载分类和荷载效应组合 (荷载规范第三章) .....	185
第二节	风荷载 (荷载规范第七章) .....	188
第三节	风荷载 (荷载规范第七章) 编写说明 .....	196
第四节	风荷载附录 E——结构基本自振周期的经验公式 (荷载规范附录 E) .....	202
第五节	风荷载附录——结构振型系数的近似值 (荷载规范附录 F) .....	204
<b>第十二章</b>	<b>高耸结构设计规范 .....</b>	<b>206</b>
第一节	风荷载 (高耸结构设计规范第 4.2 节) .....	206
第二节	风荷载 (高耸结构设计规范第 4.2 节) 修编说明 .....	220
<b>第十三章</b>	<b>国际标准化协会 ISO 风荷载标准 .....</b>	<b>225</b>
第一节	风力公式及基本风压 .....	225
第二节	曝露系数 .....	226
第三节	空气动力体型系数 .....	227
第四节	阵风响应因子 (系数) $C_{m,dyn}$ 和 $C_{p,dyn}$ .....	229
一、	小的刚性结构 .....	229



二、大的刚性结构 .....	229
三、动力敏感结构 .....	230
四、特种风敏感结构 .....	234
第五节 风荷载间组合 .....	236
第六节 阻尼 .....	237
第七节 涡流共振及气弹不稳定性 .....	238
<b>第十四章 美国风荷载规范</b> .....	<b>239</b>
第一节 风荷载公式 .....	239
第二节 速度风压 .....	240
一、基本风速 $V$ .....	240
二、速度压力曝露系数 $K_z$ .....	240
三、风过小山和悬崖 $K_{st}$ .....	242
四、重要性系数 $I$ .....	243
五、系数 0.00256 或 0.613 .....	243
第三节 压力系数、力系数 .....	244
第四节 阵风响应因子 .....	250
一、第一类 刚性结构—简化方法 .....	250
二、第二类 刚性结构—完整分析 .....	250
三、第三类 柔性或动力敏感结构 .....	251
<b>第十五章 澳大利亚风荷载规范</b> .....	<b>254</b>
第一节 场地风速和设计风速 .....	254
第二节 设计风压和设计风分布力 .....	258
第三节 空气动力体型系数 .....	259
第四节 动力响应因子 .....	264
一、高层建筑和塔结构的顺风向响应 .....	264
二、横风向响应 .....	266
三、顺风向响应和横风向响应的组合 .....	269
<b>第十六章 日本风荷载规范</b> .....	<b>271</b>
第一节 设计速度压 .....	271
第二节 风荷载公式 .....	272
一、作用在结构上的水平风荷载 .....	272
二、作用在结构上的屋顶风荷载 .....	273
三、构件和覆面（围护结构）的风荷载 .....	274
四、简化方法 .....	274
五、横风向振动和形成的风荷载 .....	275
六、扭转振动和形成的风荷载 .....	276

第三节	涡流引起的振动和气弹性不稳定 .....	277
第四节	风力系数和风压系数 .....	278
<b>第十七章</b>	<b>前苏联国家风荷载规范 .....</b>	<b>280</b>
第一节	风荷载平均分量公式和基本风压 .....	280
一、	总则 .....	280
二、	风荷载平均分量的标准值 .....	280
第二节	风压沿高度变化系数 $k$ .....	281
第三节	空气动力系数 (体型系数) $c$ .....	281
第四节	脉动系数和动力系数 .....	287
<b>第十八章</b>	<b>低矮房屋、构件和围护结构抗风设计计算和实践 .....</b>	<b>291</b>
第一节	在风作用下按弹性模型计算玻璃围墙 .....	291
第二节	在风作用下按刚性模型计算玻璃围墙 .....	296
<b>第十九章</b>	<b>高耸结构抗风设计计算和实践 .....</b>	<b>300</b>
第一节	塔结构顺风向抗风计算 .....	300
一、	按建筑结构荷载规范 .....	301
二、	按高耸结构设计规范 .....	305
第二节	塔结构横风向涡流脱落和空气动力失稳 .....	308
第三节	桅杆的抗风计算 .....	310
一、	顺风向风力响应 .....	311
二、	横风向共振响应 .....	323
第四节	大跨越输电塔线体系的抗风计算 <sup>[2]</sup> .....	323
第五节	带索的高耸结构风振的合理分析 .....	327
<b>第二十章</b>	<b>双曲冷却塔结构抗风设计计算和实践 .....</b>	<b>330</b>
第一节	冷却塔的受力情况分析 .....	330
第二节	双曲冷却塔风响应的计算 .....	331
第三节	双曲冷却的极限风荷载 .....	336
第四节	双曲冷却塔的自振周期 .....	338
<b>第二十一章</b>	<b>高层建筑抗风设计计算和实践 .....</b>	<b>341</b>
第一节	顺风向等截面高层结构抗风计算 .....	341
第二节	顺风向风振系数计算的简化 .....	345
第三节	高层建筑的弯扭耦合响应 .....	348
一、	产生弯扭耦合作用的条件 .....	348
二、	质量中心和刚度中心的计算 .....	349
三、	弯扭耦合的风振响应实用分析 .....	351
四、	弯扭耦合响应的结构简化分析 .....	355

第四节	风力作用下的舒适度分析 .....	361
一、	弯曲振动 .....	361
二、	扭转振动 .....	362
第五节	工程实例 .....	362
第六节	频率或周期、振型常用公式及经验公式 .....	363
一、	按结构动力学求出的频率振型公式 .....	363
二、	自振周期经验公式 .....	366
<b>第二十二章</b>	<b>屋盖结构抗风设计计算和实践</b> .....	<b>367</b>
第一节	屋盖结构风致响应计算 .....	367
第二节	工程实例 .....	370
第三节	大跨度索膜屋盖结构旋涡脱落共振响应 .....	370
第四节	横风向空气动力失稳 .....	376
第五节	索质量和索上荷载团集在两端结点模式的分析方法 .....	378
<b>第二十三章</b>	<b>桥梁结构抗风设计计算和实践</b> .....	<b>382</b>
第一节	顺风向（横向）风荷载 .....	382
第二节	桥梁空气动力失稳计算 .....	390
一、	按运动方程分析计算 .....	391
二、	按欧洲 ECCS 规范计算 <sup>[57]</sup> .....	394
三、	按实用近似方法计算 .....	395
第三节	桥梁自振频率（或周期）和振型 .....	397
一、	按结构动力学计算 .....	397
二、	经验公式 .....	398
第四节	工程实例 .....	401
<b>第二十四章</b>	<b>起重机结构抗风设计计算和实践</b> .....	<b>404</b>
第一节	起重机结构受力情况分析 .....	404
第二节	工作状态下起重机的风力计算 .....	405
第三节	非工作状态下起重机的风力计算 .....	408
<b>第二十五章</b>	<b>城市抗风防灾分析和实践</b> .....	<b>409</b>
第一节	抗灾防灾的基本概念 .....	409
第二节	城市抗灾防灾分析的基本方法 .....	410
第三节	结构灾害力学 .....	411
一、	弹性极限风压 $w_{0e}$ .....	411
二、	结构极限风压 $w_{0p}$ .....	412
第四节	结构经济损失分析 .....	413
第五节	城市抗风防灾实例 .....	414
主要参考文献	.....	416

# 第一章 风、风速、风压和风荷载

## 第一节 风的基本概念

风是空气从气压大的地方向气压小的地方流动而形成的。气流一遇到结构的阻塞，就形成高压气幕。风速愈大，对结构产生的压力也愈大，从而使结构产生大的变形和振动。结构物如果抗风设计不当，或者产生过大的变形会使结构不能正常地工作，或者使结构产生局部破坏，甚至整体破坏。

风引起对结构作用的风荷载，是各种工程结构的重要设计荷载。风荷载对于高耸结构（如塔、烟囱、桅杆等）、高层房屋、桥梁、起重机、冷却塔、输电线塔、屋盖等高、细、长、大结构，常常起着主要的作用。因而，风力的研究，对工程结构，特别对上述工程结构，是设计计算中必不可少的一部分。

对结构安全产生影响的是强风，可分为热带低压、热带风暴、台风或飓风、寒潮风暴、飓风、龙卷风等。

不同的季节和时日，可以有不同的风向，给结构带来不同的影响。每年强度最大的风对结构影响最大，此时的风向常称为主导风向，可从该城市（地区）的风玫瑰图得出。由于风玫瑰图是由气象台得出的，建筑所在地的实际风向可能与此不同，因而在结构风工程上，除了某些参数需考虑风向外，一般都可假定最大风速出现在各个方向上的概率相同，以较偏于安全地进行结构设计。关于需考虑风向的参数将在下面有关章节中加以说明。

风可以有一定的倾角，相对于水平一般最大可在  $+10^\circ$  到  $-10^\circ$  内变化。这样，结构上除水平分风力外，还存在上下作用的竖向分风力。竖向分风力对细长的竖向结构，例如烟囱等，一般只引起竖向轴力的变化，对这类工程来讲并不重要，因而只有像大跨度屋盖和桥梁结构，竖向分风力才应该引起我们的注意。但其值也较水平风力为小，但属于同一数量级。

根据大量风的实测资料可以看出，在风的时程曲线中，瞬时风速  $v$  包含两种成分：一种是长周期部分，其值常在 10min 以上；另一种是短周期部分，常只有几秒钟左右。图 1-1 是风从开始缓慢上升至稳定值后的一个时程曲线示意图。根据上述两种成分，实用上常把风分为平均风（即稳定风）和脉动风（即阵风脉动）来加以分析。平均风是在给定的时间间隔内，把风对建筑物的作用力的速度、方向以及其他物理量都看成不随时间而改变的量，考虑到风的长周期远远地大于一般结构的自振周期，因而这部分风

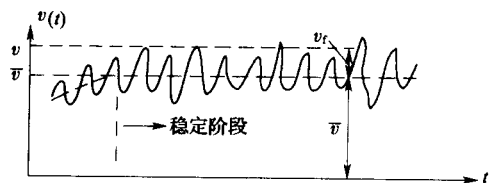


图 1-1 瞬时风速  $v$ 、平均风速  $\bar{v}$  和脉动风速  $v_i$

虽然其本质是动力的，但其作用与静力作用相近，因此可认为，其作用性质相当于静力。脉动风是由于风的不规则性引起的，它的强度是随时间按随机规律变化的。由于它周期较短，因而应按动力来分析，其作用性质完全是动力的。

研究表明，脉动风的影响与结构周期、风压、受风面积等有直接影响，这些参数愈大，影响也愈大，兼之结构上还有平均风作用，因而对于高、细、长、大等柔性结构，风的影响起着很大的、甚至决定性的作用。

## 第二节 风力强度表示法

不同的风有不同的特征，但它的强度常用风速来表达。最常用的风速分类有两种，即范围风速和工程风速。

### 一、范围风速

将风的强度划分为等级，用一般风速范围来表达。常用的有：蒲福风速表；福基达龙卷风风力等级表。

#### (一) 蒲福风速表

英国人蒲福 (F. Beaufort) 于 1805 年拟定了风级，根据风对地面 (或海面) 物体影响程度而定出的，称为蒲氏风级。由于最初根据地面 (或海面) 物体对风的影响程度比较笼统，后来逐渐采用以风速的范围来表示风级，几经修改，自 0 至 12 共分 13 个等级。自 1946 年以来，风力等级又作了某些修改，并增加到 18 个等级，如表 1-1 所示。其中前 13 个等级就是我们在气象广播中所听到的的风的等级，可以看出，7 级或 7 级以上的风力才能对生活或工程结构造成不便或威胁，直至结构倒塌。

蒲福风力等级表

表 1-1

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高 (m)				km/h	nmile/h	m/s
		一般	最高					
0	静风	—	—	静	静，烟直上	<1	<1	0~0.2
1	软风	0.1	0.1	寻常渔船略觉摇动	烟能表示风向，但风向标不能转动	1~5	1~3	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	渔船张帆时，可随风移行每小时 2~3km	人感觉有风，树叶有微响，风向标能转动	6~11	4~6	1.6~3.3
3	微风	0.6	1.0	渔船渐觉颤动，随风行每小时 5~6km	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开	12~19	7~10	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	渔船满帆时倾于一方	能吹起地面灰尘和纸张，树的小枝摇动	20~28	11~16	5.5~7.9

续表

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高 (m)				km/h	nmile/h	m/s
		一般	最高					
5	清劲风	2.0	2.5	渔船缩帆 (即收去帆之一部)	有叶的小树摇摆, 内陆的水面有小波	29~38	17~21	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	渔船加倍缩帆, 捕鱼须注意风险	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 举伞困难	39~49	22~27	10.8~13.8
7	疾风	4.0	5.5	渔船停息港中, 在海上下锚	全树摇动; 迎风步行感觉不便	50~61	28~33	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	近港的渔船皆停留不出	微枝折毁; 人向前行, 感觉阻力甚大	62~74	30~40	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0	汽船航行困难	烟囱顶部及平瓦移动, 小屋有损	75~88	41~47	20.8~24.4
10	狂风	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见, 出现时可使树木拔起或将建筑物吹毁	89~102	48~58	24.5~28.4
11	暴风	11.5	16.0	汽船遇之极危险	陆上很少, 出现时必有重大损毁	103~117	56~63	28.5~32.6
12	台风 (飓风)	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少, 其捣毁力极大	118~133	64~71	32.7~36.9
13	—	—	—	—	—	134~149	72~80	37.0~41.4
14	—	—	—	—	—	150~166	81~89	41.5~46.1
15	—	—	—	—	—	167~183	90~99	46.2~50.9
16	—	—	—	—	—	184~201	100~108	51.0~56.0
17	—	—	—	—	—	202~220	109~118	56.1~61.2

注: 13~17级风力是当风速可以仪器测定时用。

热带风旋是发生在热带海洋上的大气旋涡, 是热带低压、热带风暴、台风或飓风的总称, 直径一般几百公里 (km), 最大可达 1000 公里 (km)。热带气旋区域内的风速, 以近中心为最大。国际上常以近中心最大风速作为分类的标准。通常, 我们把热带气旋中心位置不能精确确定时, 平均最大风力小于 8 级的风称为低压区。热带气旋中心位置能确定时, 中心附近的平均最大风力小于 8 级的风称为热带低压区; 热带气旋中心附近的平均最大风力为 8 级至 9 级的称为热带风暴; 热带气旋中心附近的平均最大风力为 10 级至 11 级的称为强热带风暴; 热带气旋中心附近的平均最大风力为 12 级或 12 级以上的, 在东亚称为台风, 在西印度群岛和大西洋一带称为飓风。台风中心称台风眼, 半径多为 5~30 公里 (km), 气压很低, 风小浪高, 云层裂开变薄, 有时可见日月星光, 其四周附近则是高耸的云壁, 狂风暴雨均发生在台风眼之外。台风形成后, 它一边沿逆时针方向快速旋转, 同时又受其他天气系统 (如副热带高压等) 气流引导或靠本身内力朝某一方向移动, 从而形成台风移动的路径或轨迹。通常自东向西或西北方向移动, 速度一般为 10~20km/h, 当进入中纬度的西风带后, 即折向东或东北移动, 这称为台风转向。袭击我国的台风, 常发

生在5~10月,以7~9月最为频繁。台风的破坏力很大,它不但可以吹倒或损害陆上各种工程结构,而且还大量损害海上物体。台风袭击的地区常有狂风暴雨,沿海岸则多有高潮、巨浪。

我国曾只以袭击我国台风的年份和序号来称呼,如1994年第15号台风(常称9415号台风)等。近年来因为海洋上可能同时出现多个台风,为易于分辨,也为了与国外称呼一致,常加以台风名字。台风的命名由国际气象组织的台风委员会负责,由参与该组织的14个国家和地区(包括中国和澳门等地区)各提供10个名字分为5组列表,再根据热带气旋出现的先后依次、循环使用。根据有关规定,热带气旋要达到热带风暴及以上强度的才进行命名,命名是根据列表给予的名字例如“麦莎”,并同时发布热带风暴或强热带风暴或台风的强度、名称、编号顺序以及编报理由。如某台风曾造成极严重损失,为记着这一标志性事件而不重复,可以改名。如2004年第14号台风“云娜”曾带来重大损失,我国提议经台风委员会一致通过,并由命名国韩国提出替代名字“几亚比”。

## (二) 福基达龙卷风风力等级表

龙卷风是范围小而时间短的强烈旋风。其范围的直径约从几米到几百米不等,中心气压很低,风速通常可达每秒几十米到100米以上。龙卷风移动速度每小时约数十公里(km);所经路程,短的只几十米,长的可超过100公里(km),持续时间可达几分钟到几小时。与热带气旋相比,龙卷风的特征可归纳为范围小、风力大、寿命短,并且运动直线,发生概率远低于热带风旋。美国芝加哥大学福基达(T. T. Fujita)教授曾于1970年提出龙卷风按最大风速划分为7个等级;其计算公式为

$$v_F = 6.30 \times (F + 2)^{1.5} \quad (1-1)$$

到现在为止,记录到龙卷风级别未到6级。根据上式,1至6级范围风速如表1-2所示。从表中可以看出,0级龙卷风实际上就在蒲福风力等级表范围之内,因而是与蒲福风力等级表相呼应的。由于龙卷风作用时间短,因而在同样风速下破坏程度没有一般风严重。

福基达龙卷风风力等级表

表 1-2

等级	名称	征 象	距地 10m 高处的风速 (m/s)
$F_0$	轻龙卷	考虑 $v = 20 \sim 32.2 \text{ m/s}$ , 有轻度破坏。烟囱、标志牌有一定损坏, 树枝折断, 根浅树木被刮倒	< 32.2
$F_1$	中龙卷	有中度破坏。屋顶表层被掀起, 活动房屋被刮倒, 行驶中的车辆被刮偏离道路	32.7 ~ 50.2
$F_2$	大龙卷	有相当程度破坏。屋顶被刮飞, 活动房屋被摧毁, 铁路网罐车被刮翻, 大树被连根拔起, 轻物体被飞掷	50.4 ~ 70.2
$F_3$	强龙卷	有严重破坏。牢固的屋顶和部分墙壁被刮走, 火车被刮翻, 森林大部分树木被连根拔起, 重型车辆被抛起	70.4 ~ 92.4
$F_4$	毁灭性龙卷	有毁灭性破坏。牢固的房屋被整体刮倒, 地基不牢的结构被掀飞, 汽车被抛起, 重物被飞掷	92.6 ~ 116.4
$F_5$	非常龙卷	有非常程度破坏。牢固的房屋被整体掀起。树木搬家, 汽车大小的物体被抛入空中, 能抛出达 100m 之远	116.7 ~ 142.3
$F_6$	极值龙卷	有极为惊人的破坏。目前尚未记录有这样的最大风速	142.6 ~ 169.8

虽然龙卷风破坏力大,但由于范围小、寿命短等,所以在风灾损失中最大的还是热带气旋,其中尤以台风最为严重。根据西德慕尼黑黑保险公司 1982 年的资料,35 个自然灾害损失 1 亿美元以上的项目中,风灾项目占 18 个,占 51.4%;而 18 个风灾项目中,只有一个龙卷风,热带气旋等风灾项目数占 94.4%,其经济损失则占 94.6%。因而对风灾主要是考虑热带气旋等所引起的损失,所以我们应该把较大的注意力集中在热带气旋所引起的风力上。

上述风的强度由于是按范围划分的,不便工程计算,多用于气象分析中。

## 二、工程风速

为了进行结构风工程计算,需要的不是某一范围的风速,而要某一确定的风速。由于风工程中结构不但要承受过去某一时日或今日的风是安全可靠的,还要保证某一规定期限内结构能安全可靠地承受可能经受的风速。而风的记录又是随机的,不同日、月、年都有不同的值和规律,具有明显的非重现性的特征。因而必须根据数理统计方法来求出计算风速,我们将在第三章具体分析它的计算方法。

### 第三节 风速风压关系

对工程结构设计计算来说,风力作用的大小最好直接以风压来表示。风速愈大,风压力也愈大。为此我们需导出风速与风压的关系式。

低速运动的空气可作为不可压缩的流体看待。对于不可压缩理想流体质点作稳定运动的伯努利方程,当它在同一水平线上运动时的能量表达式为

$$w_a V + \frac{1}{2} m v^2 = C \quad (1-2)$$

式中  $w_a V$  为静压能,  $\frac{1}{2} m v^2$  为动能,  $C$  为常数,其中  $w_a$  为单位面积上的静压力 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $V$  为空气质点的体积 ( $\text{m}^3$ ),  $v$  为风速 ( $\text{m/s}$ ),  $m$  为运动流体质点的质量 ( $\text{t}$ )。

将上式两边除以  $V$ , 因为  $m = \rho V$ ,  $\rho$  为空气质点密度 ( $\text{t/m}^3$ ), 则伯努利方程

$$w_a + \frac{1}{2} \rho v^2 = C_1 \quad (1-3)$$

由上式可知,由自由气流的风速提供的单位面积上的风压力为

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \times \frac{\gamma}{g} v^2 \quad (1-4)$$

这即为普遍应用的风速风压关系公式。 $\gamma$  为单位体积的重力 ( $\text{kN/m}^3$ )。

在气压为 101.325kPa (76cmHg)、常温 15°C 和绝对干燥的情形下,  $\gamma = 0.012018 \text{kN/m}^3$ , 在纬度 45° 处海平面上的重力加速度为  $g = 9.8 \text{m/s}^2$ , 代入式 (1-4) 得到

$$w = \frac{\gamma}{2g} v^2 = \frac{0.012018}{2 \times 9.8} v^2 \approx \frac{v^2}{1630} \text{kN/m}^2 \quad (1-5)$$

上式是在标准大气情况下,满足上述条件后求得的。但由于各地地理位置不同,  $\gamma$  和  $g$  值也就不同。在自转的地球上,重力加速度  $g$  不仅随高度变化,且随纬度的变化而变化。而空气重度  $\gamma$  又是气压、气温和湿度的函数。因此各地的  $\gamma/2g$  值均有所不同。上式



一般适于内陆海拔高度 500m 以下地区，对于内陆高原和高山地区，则随着海拔高度增大而减小，海拔高度到达 3500m 以上地区， $\gamma/2g$  可减至 1/2600；对于东南沿海地区，系数约为 1/1750。

使用风杯式测风仪时，可按下述公式确定空气密度：

$$\rho = \frac{0.001276}{1 + 0.00366t} \left( \frac{p - 0.378e}{100000} \right) (\text{t/m}^3) \quad (1-6a)$$

式中  $t$ ——空气温度 (°C)；

$p$ ——气压 (Pa)；

$e$ ——水气压 (Pa)。

也可根据所在地点的海拔高度  $z$  (m) 按下述公式近似估算空气密度：

$$\rho = 0.00125e^{-0.0001z} (\text{t/m}^3) \quad (1-6b)$$

由于我国规范对风速采用的单位为 m/s，风压的单位为 kN/m<sup>2</sup>，而各国采用的单位各不相同，为了便于对照，表 1-3 列出了各种风速及风压单位换算关系表，以供参考。

各种风速及风压单位换算关系表

表 1-3

1. 风速						2. 风压		
$V$	m/s	nmile/h	km/h	ft/s	mi/h	$w$	kN/m <sup>2</sup>	lb/ft <sup>2</sup>
1m/s (米/秒)	1	1.943	3.600	3.281	2.239	1kN/m <sup>2</sup> (千牛/米 <sup>2</sup> )	1	20.898
1nmile/h (海里/时)	0.515	1	1.852	1.688	1.151	1lb/ft <sup>2</sup> (磅/英尺 <sup>2</sup> )	0.04785	1
1km/h (公里/时)	0.278	0.540	1	0.911	0.621			
1ft/s (英尺/秒)	0.305	0.592	1.097	1	0.682			
1mi/h (英里/时)	0.447	0.868	1.609	1.467	1			

## 第四节 风对结构的作用

### 一、结构的风力

设任意高度处的风速为  $v$ ，则在风速  $v$  下该处结构上的风力将含有多种力的成分。图 1-2 (a) 表示一水平风速  $v$  作用下一细长物体在该高度处的任意截面。为了便于表示力的作用，将风速换算成风压来计算。将物体表面上的风压沿表面积分，将得到三种力的成分，即顺风力、横风力以及扭力矩。实际上即使结构截面是对称的 (图 1-2b)，甚至是各向对称的，如圆截面 (图 1-2c)，由于水平风速在水平面内也可以任意方向，或者形成不对称的旋涡，因而除了顺风力以外，均可以产生横风力以及扭力矩，如图 1-2 (d) 所示。

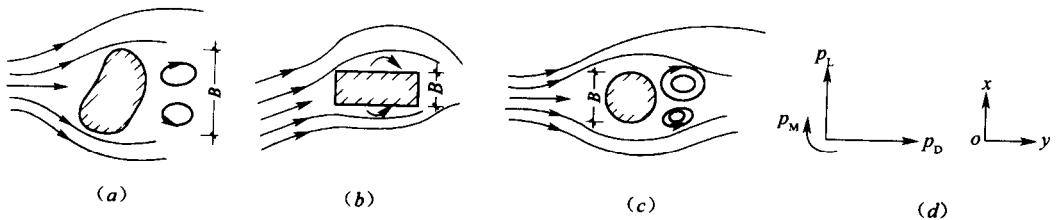


图 1-2 流经物体所产生的力