高耸结构设计手册

建筑结构设计手册丛书编委会

王肇民　主编

中国建筑工业出版社

目　录

前言

上篇　高耸结构设计原理和计算方法

第一章　总则
第一节　高耸结构设计基础与标准……1
第二节　高耸结构设计程序与内容……1
第三节　高耸结构设计规范与规程……2
第二章　基本规定
第一节　概率极限状态设计方法……3
第二节　结构可靠度与安全等级……4
一、结构可靠度概念……4
二、可靠度分析方法……4
三、一次二阶矩概率法……5
四、结构安全等级……6
第三节　承载能力极限状态设计……7
一、荷载效应基本组合……7
二、荷载效应偶然组合……8
三、抗震计算基本组合……8
第四节　正常使用极限状态设计……9
第五节　高耸结构变形控制条件……9
第三章　荷载
第一节　高耸结构的荷载……10
一、荷载的分类……10
二、高耸结构主要承受的荷载……10
三、荷载与结构动力特性的关系……11
第二节　风荷载……11
一、风、风力、风速和风压……11
二、风速风压关系式……11
三、风对结构的作用……12
四、基本风压及换算系数……13
五、顺风向的风荷载……20
六、横风向风荷载及共振荷载计算……32
七、失稳式振动……36
八、带塔楼的高耸结构风力下舒适度的计算…38
第三节　裹冰荷载……40
一、裹冰厚度……40
二、裹冰荷载……41
三、裹冰情况下的风振……41
第四节　地震作用……41
一、震级和烈度……42
二、确定地震力的方法……43
三、振型分解反应谱法……44
四、简化反应谱法……50
五、直接动力法（时程分析法）计算动力响应……51
六、罕遇地震作用下的变形验算……54
第五节　风荷载和地震作用对高耸结构的影响……54
一、结构周期对作用力的影响……55
二、结构高度对作用力的影响……55
三、重量对作用力的影响……55
四、迎风面积对作用力的影响……55
五、输入荷载或作用的强度对作用力的影响……55
六、结构体型对作用力的影响……55
七、结构振型对作用力的影响……56
第六节　高耸结构的动力特性……56
一、经典分析方法……56
二、实用分析方法……63
三、自振周期经验公式……67
第四章　钢塔架和桅杆结构
第一节　钢结构材料……69
一、结构钢材……69
二、连接材料……72
三、钢材和连接的强度设计值……79
四、钢材规格和型钢表……81
第二节　钢结构连接……134
一、连接分类……134
二、焊缝连接……134
三、螺栓连接……143
四、拼接和法兰盘连接……149
五、连接计算示例……153

第三节　钢构件强度、稳定计算……160
一、受弯构件计算……160
二、轴心受力构件计算……173
三、偏心受力构件计算……183
四、构件计算长度和容许长细比……190
五、基本构件的构造要求……193
六、钢构件计算示例……193
第四节　塔架结构静力分析……201
一、钢塔架内力分析方法……201
二、简化为平面桁架法……202
三、简化空间桁架法……203
四、分层空间桁架法……204
五、层单元矩阵位移法……211
六、整体空间桁架法……216
七、弦杆连续空间桁架法……219
八、塔架结构计算示例……225
第五节　桅杆结构静力分析……244
一、桅杆结构内力分析方法……244
二、弹性支座连续梁法……245
三、考虑空间作用三向坐标法……254
四、梁单元矩阵位移法……264
五、杆单元矩阵位移法……274
六、桅杆结构计算示例……277
第六节　桅杆结构整体稳定……300
一、桅杆结构整体稳定计算方法……300
二、临界力方法计算桅杆整体稳定……301
三、初参数法计算桅杆整体稳定……304
四、极限位移法计算桅杆整体稳定……307
五、桅杆整体稳定计算示例……307
第七节　桅杆结构动力分析……311
一、桅杆结构动力计算方法……311
二、桅杆结构自振周期及其振型……313
三、迭代法求解桅杆频率方程……316
四、桅杆结构在地震作用下的计算……320
五、桅杆结构的局部减振措施……326
第五章　钢筋混凝土圆筒形塔
第一节　钢筋和混凝土材料……328
一、钢筋的强度计算……328
二、混凝土的强度计算……331
第二节　混凝土筒身附加弯矩计算……332
一、圆筒形塔身的水平变形……332
二、圆筒形塔身的附加弯矩……334
第三节　塔筒承载能力计算……335
一、塔筒截面无孔洞时的计算……335
二、塔筒截面在受压区有一个孔洞时的计算……336
第四节　塔筒正常使用计算……337
一、塔筒截面应力计算基本假定……337
二、水平截面小偏心时应力计算……338
三、水平截面大偏心时应力计算……340
四、塔筒截面受压区半角ϕ计算……341
五、塔筒截面核心距r_{c0}计算……348
第五节　塔筒裂缝宽度计算……349
一、标准荷载作用下裂缝宽度计算……349
二、塔筒内外温差作用下裂缝宽度计算……349
第六节　塔筒正常使用下温度应力计算……350
一、温度应力计算的假定……350
二、塔筒筒壁板带截面全部受拉计算……351
三、塔筒筒壁板带截面全部受压计算……352
四、塔筒筒壁板带截面一侧受拉、另一侧受压计算……353
五、塔筒筒壁温度应力的近似计算……355
第七节　预应力混凝土塔筒计算……356
一、塔筒正截面承载力计算……356
二、塔筒正截面抗裂验算……356
三、预应力钢筋中的预应力损失……359
第八节　钢筋混凝土塔筒构造……362
一、非预应力塔筒构造要求……362
二、预应力混凝土塔筒构造要求……364
第九节　钢筋混凝土塔筒计算示例……366
一、电视塔塔筒变形和附加弯矩计算……366
二、电视塔塔筒截面和裂缝宽度计算……368
第六章　地基与基础
第一节　地基承载力验算……381
一、地基承载力验算公式……381
二、基础底面压力计算……381
三、按地基规范确定地基容许承载力……383
四、软弱下卧层承载力验算……389
五、地基承载力验算例题……390
第二节　地基变形计算……393
一、高耸结构地基变形计算的要求……393
二、分层总和法计算最终沉降量……394
三、基础倾斜计算……405
四、高耸结构的地基变形容许值……407
第三节　基础的抗拔和抗滑稳定性……407
一、基础的抗拔稳定性计算……408

二、基础的抗滑稳定性计算……414
三、基础抗拔稳定验算例题……415
第四节　刚性基础计算……417
一、浅基础的埋置深度……417
二、刚性基础的材料……418
三、刚性方(矩)形基础外形尺寸的确定……419
四、刚性圆(环)形基础外形尺寸的确定……420
五、刚性基础的设计例题……421
第五节　板式基础计算……424
一、板式基础的适用条件及设计内容……424
二、锥形及台阶形板式基础设计……424
三、圆（环）形板式基础设计……427
四、板式基础的设计例题……433
第六节　壳体基础设计……440
一、壳体基础的类型、适用范围及构造……440
二、壳体基础的设计计算原则及内容……442
三、正圆锥形壳体基础计算……443
四、M型组合壳基础计算……446
五、按弹性近似有矩理论计算……446
六、预应力壳体基础……450
七、壳体基础计算实例(按薄膜理论计算)……452
第七节　桩基础设计……457
一、单桩承载力的确定……457
二、桩基础的设计……462
三、承受横向荷载的桩基础设计……475
四、桩基础的设计实例……503

下篇　高耸结构工程设计、选型与构造

第七章　电视塔设计
第一节　电视塔的工艺要求……520
一、无线电波的划分……520
二、电视频道的划分……521
三、常用的电视天线型式和尺寸……521
四、电视天线对结构的要求……522
第二节　电视塔结构的选型与构造……527
一、钢塔的选型与构造……527
二、桅杆的选型与构造……529
三、钢筋混凝土塔的选型与构造……535
四、塔楼和平台的选型与构造……540
五、电视天线杆的选型与构造……541
第三节　荷载计算与内力分析……543
一、风荷载计算与荷载组合……543
二、电视塔结构内力分析方法……544
第四节　电视塔基础设计……545
一、基础布置及型式选用……545
二、基础构造与变形计算……547
第五节　电视塔工程实例……549
一、钢结构电视塔工程实例……549
二、电视桅杆工程实例……553
三、钢筋混凝土电视塔工程实例……555
第八章　无线电塔设计
第一节　无线电塔的工艺要求……565
一、各种无线电波段的天线型式……565
二、天线工艺对塔桅结构的要求……580
第二节　无线电塔桅结构选型和构造……582
一、无线电塔架的选型和构造……582
二、无线电桅杆的选型和构造……583
三、无线电塔桅的绝缘设施……583
第三节　荷载计算和内力分析……585
一、导线及线网风荷载计算与内力分析……585
二、有绝缘子的纤绳荷载计算与内力分析……588
三、有导线及线网的塔桅结构内力分析……589
第四节　无线电塔桅工程实例……590
一、圆钢桅杆结构工程……590
二、角钢塔架结构工程……594
三、中波定向天线钢管桅杆……595
四、华沙长波桅杆……596
第九章　微波塔设计……599
第一节　微波通信工艺要求……599
一、微波通信塔线路设计……599
二、微波天线自重与安装……601
第二节　微波塔选型与构造……602
一、微波塔选型要求……602
二、钢微波塔结构设计……604
三、钢筋混凝土微波塔结构设计……614
第三节　荷载计算和内力分析……616
一、抛物面天线荷载计算……616
二、塔架结构荷载计算……618
三、塔架结构内力计算……619
四、避雷设施及安全照明……627
第四节　地基与基础设计……628
第五节　屋顶微波塔……632
一、概述……632
二、塔的选型……632
三、屋顶微波塔设计特点……633
四、屋顶微波塔抗震设计……634

第六节　微波塔工程实例……635
一、钢结构微波塔工程实例……635
二、钢筋混凝土微波塔工程实例……640
第十章　输电线路塔设计
第一节　输电线路塔概况……645
一、输电线路塔简介……645
二、塔高与档距……648
第二节　输电线路高塔选型……648
一、高塔类型……648
二、常用直线型高塔设计……649
三、塔截面型式、材料及防腐……652
第三节　高塔构造设计……654
一、自立式型钢塔构造设计……654
二、钢管塔构造设计……657
三、拉线塔构造设计……660
四、钢筋混凝土塔构造设计……664
第四节　荷载计算与内力分析……665
一、导地线荷载计算……665
二、横担风荷载计算……667
三、塔身风荷载计算……668
四、结构内力分析……669
第五节　输电线路塔工程实例……671
一、自立式钢塔……671
二、拉线塔……671
三、钢筋混凝土塔……672
第十一章　烟囱设计
第一节　烟囱设计的工艺概况……676
一、烟囱的设计要求……676
二、烟囱的材料……677
第二节　烟囱温度计算……680
一、烟囱烟气温度取值……680
二、空气温度取值……680
三、筒身受热温度计算……681
第三节　砖烟囱设计……684
一、砖烟囱选型……684
二、构造要求……685
三、计算原则及内容……689
四、筒壁计算……689
五、基础选型……693
第四节　钢筋混凝土烟囱设计……694
一、烟囱受热温度计算……694
二、筒壁极限承载力计算……695
三、筒壁使用阶段应力分析……699
四、钢筋混凝土烟囱构造……713
第五节　烟囱工程实例……727
一、砖烟囱工程实例……727
二、钢筋混凝土烟囱计算实例……732
第十二章　水塔设计
第一节　国内外水塔概况……749
第二节　水塔类型与选型……753
一、水柜类型与选型……753
二、塔身类型与选型……754
三、基础类型与选型……754
第三节　水塔荷载计算……755
一、水塔的主要荷载……755
二、风荷载……755
三、地震作用……756
四、荷载组合……758
五、附加弯矩……758
第四节　水塔结构设计计算要求……759
一、水塔结构设计的基本要求……759
二、水塔内力简化计算要求……761
三、水塔设计容许值……762
四、水塔水柜的设计计算……762
五、塔身的设计计算……776
第五节　水塔结构构造设计及附属设施……781
一、水柜构造……781
二、塔身构造……783
三、水塔基础构造……784
四、水塔的附属设施……787
第六节　水塔计算实例……788
一、钢筋混凝土英兹式水柜支架式水塔……788
二、钢筋混凝土倒锥壳水柜支筒式水塔……806
第七节　水形水塔设计……819
一、概述……819
二、钢筋混凝土球形水塔设计……820
三、钢球形水塔设计……822
第八节　现行水塔国家标准图集简表……823
第十三章　排气塔设计
第一节　工艺要求与设计原则……826
一、排气筒和火矩塔概况……826
二、排气塔设计特点……827
三、排气塔使用特点……827
四、排气塔设计原则……828
第二节　排气塔结构选型……829
一、塔架结构选型……829

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

二、塔架结构布置……829
三、塔架结构构件……830
第三节　排气塔计算原则……831
一、一般规定……831
二、节点连接计算……832
三、铰腕计算……834
四、塔架基础计算……835
第四节　排气塔结构构造……836
一、一般规定……836
二、节点连接构造……837
三、基础连接构造……839
四、塔架结构施工要求……839
第五节　排气塔工程计算实例……840
第十四章　石油化工塔基础设计
第一节　石油化工塔基础设计原则……872
一、石油化工塔的功能和对基础的要求……872
二、塔基础的基本设计规定……873
三、塔基础的形式……873
四、塔基础的适用范围和材料要求……874
第二节　塔基础的荷载计算……875
一、石油化工塔及基础的风荷载计算……875
二、石油化工塔及基础的地震作用计算……895
三、石油化工塔上附设的钢平台、钢斜梯的
　　重力荷载计算……896
四、塔基础的基本荷载分类和荷载组合……897
第三节　塔基础的结构计算……897
一、圆筒式和圆柱式塔基础的计算……897
二、框架式塔基础的计算……927
三、联合式塔基础底板的计算……951
第四节　石油化工塔基础的地基计算……953
一、地基承载力计算……953
二、地基变形计算……957
第五节　石油化工塔基础的构造规定……974
一、一般规定……974
二、圆筒式塔基础……979
三、圆柱式塔基础……983
四、框架式塔基础……984
第六节　石油化工塔基础的抗震构造措施…1021
一、圆筒(柱)式塔基础的抗震构造措施……1021
二、框架式塔基础的抗震构造措施……1021
第七节　石油化工塔基础计算实例……1025
一、圆筒式钢筋混凝土塔基础……1025
二、环形框架式钢筋混凝土塔基础……1031
第十五章　高灯杆设计
第一节　高灯杆结构选型……1038
第二节　高灯杆的荷载……1039
一、高灯杆的主要荷载……1039
二、基本风压计算……1039
三、高灯杆计算实例……1041
四、地震作用效应组合……1043
第三节　高灯杆的内力分析……1043
一、计算简图……1043
二、附加弯矩计算……1044
三、钢支杆强度验算……1045
第四节　高灯杆的稳定验算……1046
一、钢支杆的柔度……1046
二、高柔钢杆的稳定验算……1046
三、钢支杆计算实例……1049
第五节　高灯杆的基础……1049
一、基础形式……1049
二、圆板基础计算实例……1050
第六节　高灯杆的构造……1053
一、高杆灯灯杆类型……1053
二、钢支杆底座连接构造……1053
主要参考文献……1054

上　篇

高耸结构设计原理和计算方法

第一章　总　　则

第一节　高耸结构设计基础与标准

高耸结构设计必须遵守我国社会主义经济建设中的技术经济政策，要求做到“技术先进、经济合理、安全适用、确保质量”。

由于高耸结构种类繁多，包括电视塔、无线电塔、微波塔、输电塔、烟囱、水塔、排气塔、石油化工塔、大气污染监测塔、城市高灯杆等。这些结构的共同特性是，有较高的高度，横截面与高度比较相对较小，风荷载起主要作用。因此，这类结构物统称高耸结构。但是各类高耸结构的工艺要求不同，都有自己的专业特性，设计时必须照顾到各自的特点，因塔制宜。

《高耸结构设计规范》(GBJ 135—90)是各类高耸结构设计的技术标准，其适用范围原则上包括所有高耸结构。有些高耸结构有自己的专业规范或规程，这些专业规范或规程则与《高耸结构设计规范》配套施行。

第二节　高耸结构设计程序与内容

高耸结构设计与一般建筑结构设计一样，要通过初步设计、技术设计和施工图三个阶段。但是高耸结构又不同于一般建筑结构，它具有高柔、外露、无围护等特点，因此在设计中必须处理或解决许多特殊性问题。

高耸结构设计必须考虑下列一些特点：

1. 高耸结构是外露性的结构，风荷载起主要作用．风荷载对结构作用的大小，取决于结构布置、尺寸，构件截面形状等等。因此，在设计高耸结构时，首先根据工艺条件假定结构布置和尺寸，然后计算风荷载，在解出构件内力后，验算其强度、刚度和稳定。如不符合要求，则对结构布置和尺寸进行调整，重新进行计算。一般总要反复计算数次，才能使荷载与结构协调；

2. 由于高耸结构的无围护特点，设计时就要考虑其维护保养问题，特别是钢结构防锈

蚀，在设计一开始就要与结构方案紧密联系；

3.高耸结构的施工条件不同于一般结构。对钢结构，必须考虑分段制作、构件运输、高空吊装和拼接技术等施工方案；对钢筋混凝土结构，必须考虑现场浇制的施工方案，包括模板提升、混凝土垂直运输等等；

4.高耸结构与周围环境有密切影响。对特别高的结构要设置航空障碍标志；重要的结构要对选址、建成后的环境影响作出可行性论证；

5.高耸结构主要承受风荷载和地震作用。这些荷载和作用具有动力性质，设计时要考虑振动问题，在构造和计算上要采取相应措施；

6.高耸结构的基础有别于一般工程结构，不仅有受压问题，更重要的是抗拔问题。有时必须考虑高耸结构与基础的共同作用。

第三节　高耸结构设计规范与规程

《高耸结构设计规范》(GBJ 135—90)遵守《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)提出的设计准则，并采用了《工程结构设计基本术语和通用符号》(GBJ 132—90)所规定的符号，以及法定计量单位。

《高耸结构设计规范》(GBJ 135—90)还遵守《建筑结构荷载规范》(GBJ 9—87)、《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)、《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)、《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)和《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)等有关规定。

《高耸结构设计规范》(GBJ 135—90)概括统一各类高耸结构设计中的共性问题，特别是结构可靠度、设计方法、荷载取值和结构抗力，即使对有些高耸结构设计允许在风荷载取值形式上有所不同，但在结构安全度上却保持平衡。由于各类高耸结构的使用条件不一样，工艺要求不相同，因而对结构设计会有许多这样或那样的不同要求，这些特性和细节问题，则由各专业设计规范或规程作具体规定。这就是《高耸结构设计规范》与各专业规范或规程的分工、配套问题。

《高耸结构设计手册》主要以《高耸结构设计规范》为其结构设计标准，同时也遵守有关建筑结构设计规范，以及各类高耸结构的专业设计规范或规程的要求。

第二章　基　本　规　定

第一节　概率极限状态设计方法

高耸结构计算的目的是保证结构构件在使用荷载作用下能安全可靠地工作，既要满足使用要求，又要符合经济要求。结构计算是根据拟定的结构方案和构造，按所承受的荷载进行内力计算，确定出各个杆件的内力，再根据所用材料的特性，对整个结构和构件及其连接进行核算，以验证是否符合经济、安全、适用等多方面要求。

但是，一些实际工程记录、调查和试验资料表明：计算中所采用的标准荷载和结构实际承受的荷载之间，材料的力学指标取值与材料实际数值之间，计算截面和实际尺寸之间，计算所得的应力值和实际应力值之间，以及估计的施工质量与实际质量之间，都存在着一定的差异，所以计算结果不一定很安全可靠。为了保证结构安全，必须在设计中留有余地，使结构在各种不利条件下能保证其正常使用。

我国工程结构设计方法经历了采用总安全系数的容许应力计算法、多系数的极限状态计算方法、以结构极限状态为依据进行多系数分析、采用单一安全系数的容许应力设计法等。最后一种实质上是半概率、半经验的极限状态计算方法。这种方法仅在荷载和材料强度的设计取值上分别考虑了各自的统计变异性，没有对结构可靠度给出科学的定量描述。这种方法有一种假象，以为设计安全系数就是结构可靠度，并易误认只要设计中有某一给定安全系数，结构就能百分之百可靠。例如过去使用的规范中，对于受压构件的安全系数：砖石结构采用2.3；混凝土结构采用1.65；钢筋混凝土结构采用1.55；钢结构Q235钢采用1.41；钢结构16Mn钢采用1.45。这并不说明砖石结构的可靠度最大，钢结构的可靠度最小，也不是几种结构的可靠度一样大。所以定值的安全系数只能从工程经验上和常识上给以解释，不能真正从定量上度量结构的可靠度。

目前建筑结构和高耸结构采用的则是以概率理论为基础的极限状态设计方法，或简称为概率极限状态设计方法，它是以结构失效概率来定义结构可靠度，并以与结构失效概率相对应的可靠度指标 β 来度量结构的可靠度。由于这个方法在结构极限状态方程与结构可靠度之间建立了数学关系，从而能较好地反映结构可靠度的实质，使设计概念更为科学和明确。

结构的极限状态分为两类：承载能力极限状态和正常使用极限状态。

承载能力极限状态主要考虑有关结构安全性的功能，是结构或构件发挥最大限度承载功能的状态。当结构或构件出现下列状态之一时，即认为超过了承载能力的极限状态：

1. 整个结构或结构的一部分作为刚度失去平衡（如高耸结构的倾覆）；
2. 结构构件或连接因材料强度被超过而破坏；
3. 结构转变为机动体系；
4. 结构或构件丧失稳定（如压屈等）。

正常使用极限状态主要考虑有关结构的适用性和耐久性的功能，是结构或构件达到使用功能的某允许限值的状态。当结构或构件出现下列状态之一时，即认为超过了正常使用极限状态：

1.影响正常使用或外观的变形；

2.影响正常使用或耐久性能的局部损坏（包括裂缝）；

3.影响正常使用的振动；

4.影响正常使用的其他特定状态。

所以，高耸结构的设计必须满足下列各项功能要求：

1.能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种荷载作用和附加变形；

2.在正常使用时具有良好的工作性能；

3.在正常维护下具有足够的耐久性；

4.在偶然事件发生时及发生后，仍能保持必需的整体稳定性。

第二节　结构可靠度与安全等级

一、结构可靠度概念

高耸结构能满足承受使用荷载，并能保持必要的强度与稳定性，是为结构的安全性；在正常使用时具有良好的工作性能，是为结构的适用性；在正常维护条件下不易毁坏（锈蚀、表面剥落），是为结构的耐久性。安全性、适用性、耐久性三者总称为结构的可靠性。度量安全性的指标称为安全度；度量可靠性的指标称为可靠度。

可靠度比安全度的含义更为广泛。但是，安全度是可靠度中最重要的内容，直接关系到人身安全和经济效益问题，有时就把工程结构可靠度习称安全度。

由于影响可靠性的各种因素存在着不定性，例如荷载、材料性能等的变异，计算模型的不完善，制作质量的差异等，而且这些影响因素是随机的。因此，工程结构（包括高耸结构）完成预定功能（即安全性、适用性和耐久性）的能力只能用概率度量。结构能够完成预定功能的概率、称为可靠概率；结构不能完成预定功能的概率，称为失效概率。

工程结构（包括高耸结构）设计的目的是力求最佳经济效益，将失效概率限制在人们实践所能接受的适当程度上。失效概率愈小，可靠度愈大，失效概率与可靠度是互补的。

工程结构（包括高耸结构）可靠度分析和计算的依据是：结构的失效标准和各种结构的安全等级划分；各种作用效应和结构抗力的变异性分析；概率模式和极限状态设计方法的选择；工程结构材料和构件的质量控制与检验方法等。

二、可靠度分析方法

结构可靠度分析的目的是保证高耸结构的安全性、适用性和耐久性，以增强结构设计的经济效益。

结构设计必须考虑各种荷载在结构中产生的荷载效应 S 和结构本身的抗力 R 两个基本变量。这两个基本变量的相互关系是：

当 $R>S$ 时，结构处于可靠状态；

当 $R=S$ 时，结构处于极限状态；

当 $R<S$ 时，结构处于失效状态。

结构可靠度分析主要是在经济和可靠之间选择一种较佳的平衡。

结构可靠度分析主要有四种方法：即定值法、半概率法、一次二阶矩概率法和全分布概率法。

定值法有时也称容许应力设计法。用一个总安全系数来考虑各种不利因素的影响，这样使各构件的安全度各不相同，而整个结构的安全度一般取决于安全度最小的构件。半概率法是仅对荷载或荷载效应和抗力的标准值或设计值分别采用概率取值，而不考虑两者联合的概率处理，故称半概率法，这种方法难以确切地度量可靠度大小，所以上述两种方法已不再使用。

全分布概率法要求知道各随机变量的密度函数或其联合密度函数，并用多重积分求解失效概率，在实际工程中一般是很难做到的。目前采用的一次二阶矩概率法，在分析中忽略或简化了基本变量随时间变化的关系，确定基本变量分布时有相当程度的近似性，而且为了简化计算而将一些复杂关系进行了线性化。所以一次二阶矩概率法只能是一种近似的概率设计法。完全的、真正的全分布概率设计法，有待于今后继续深入和完善，还要经过一个较长的发展过程。

三、一次二阶矩概率法

结构的工作性能可用结构的功能函数来描述，若结构设计时需要考虑影响结构可靠性的随机变量有 n 个，即 X_1、X_2、$X_3 \cdots X_n$，则在这些 n 个随机变量间可建立函数关系：

$$Z = g(X_1,\ X_2,\ X_3 \cdots\cdots X_n) \tag{2-1}$$

式中　Z ——结构的功能函数。

当 Z 仅包括荷载效应 S 和抗力 R 两个基本变量时：

$$Z = g(R,\ S) = R - S \tag{2-2}$$

功能函数 Z 是随机变量 R、S 的函数，本身也是一个随机变量，实际工程中可能出现下列三种情况：

$Z > 0$ 结构处于可靠状态；

$Z < 0$ 结构处于失效状态；

$Z = 0$ 结构处于极限状态。

当基本变量满足极限状态方程 $Z = 0$ 时，则结构到达极限状态。按概率理论，结构的失效概率 p_f 为：

$$p_f = P\{Z < 0\} \tag{2-3}$$

若以 P_s 表示结构的可靠度，则

$$p_s = P\{Z \geqslant 0\} \tag{2-4}$$

由于事件 $\{Z < 0\}$ 与事件 $\{Z \geqslant 0\}$ 是对立的，所以结构可靠度 p_s 与结构失效概率 p_f 符合下式：

$$p_s = 1 - p_f \tag{2-5}$$

因此，结构可靠度计算可转化为结构失效概率计算，公式（2-3）中结构功能函数 Z 的概率分布不易求得，因 R 和 S 都是许多随机因素的函数。一次二阶矩概率法不要求推导随机变量函数的全分布，只须计算一阶原点矩（平均值）和二阶中心矩（方差），计算过程中还可将非线性结构功能函数 Z 取一次近似，这样就能比较适用地估算工程结构可靠度中的失效概率 p_f。

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

设结构功能函数$Z=R-S$中，R与S为两个正态随机变量，Z、R、S的平均值分别为μ_Z、μ_R、μ_S，其方差分别为σ_Z^2、σ_R^2、σ_S^2，则由平均值及方差的性质有：

$$\mu_Z=\mu_R-\mu_S \tag{2-6}$$

$$\sigma_Z=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2} \tag{2-7}$$

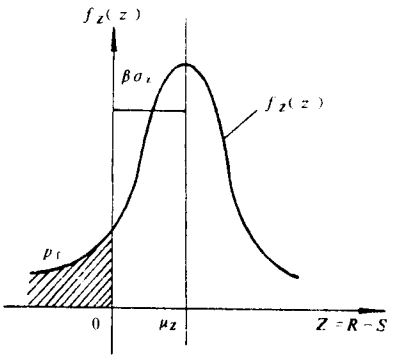

图 2-1 功能函数Z的概率分布

设Z为任意分布（图2-1），图中阴影面积表示失效概率$p_f=P\{Z<0\}$，无阴影的面积为可靠概率$p_s=1-p_f$，用结构功能函数Z的均方差σ_Z去度量$Z=0$到μ_Z这段距离，则可得出反映可靠概率大小的系数β：

$$\beta\sigma_Z=\mu_Z \tag{2-8}$$

将公式(2-6)、(2-7)代入公式(2-8)：

$$\beta=\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}=\frac{\mu_R-\mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2-\sigma_S^2}} \tag{2-9}$$

式中　β——结构构件的可靠指标；

μ_S、σ_S——结构构件荷载效应的平均值和标准差；

μ_R、σ_R——结构构件抗力的平均值和标准差。

在随机变量Z的分布一定条件下，β与p_f关系是对应的，如β增大则p_f减小，即结构可靠度增大；反之β减小则p_f增大，即结构可靠度减小，因此β完全可以作为衡量结构可靠度的一个数量指标。

当以一次二阶矩概率法估算结构可靠度时，可靠指标直接和基本变量的平均值和均方差有关，故此法基本概括了各有关变量的统计特性，比较全面地反映了各种影响因素的变异性。同时可靠指标β是从结构功能函数Z求解的，综合地考虑了结构上的荷载和结构本身抗力的变异性对结构可靠度的影响，这与半概率法有实质上的区别。

四、结构安全等级

我国建筑结构的安全等级是根据破坏后果的严重程度来划分的，有很严重、严重、不严重三种，安全等级相应地划分为一级、二级、三级。在结构延性破坏情况下，对承载能力极限状态设计采用的可靠指标β和相应的失效概率p_f如表2-1所示。

鉴于高耸结构大多用于能源工业、能源输送及广播通信、文化生活等方面，不论平时或战时，其破坏后果与一般民用和工业建筑相比更为严重，还会造成社会影响，因此高耸结构只划分一级和二级两个安全等级（表2-2）。

建筑结构安全等级及延性破坏时的β和p_f　　表 2-1

指　标	安全等级		
	一　级	二　级	三　级
β	3.7	3.2	2.7
p_f	1.1×10^{-4}	6.9×10^{-4}	3.5×10^{-3}

高耸结构的安全等级　　表 2-2

安全等级	高耸结构类型	结构破坏后果
一　级	重要的高耸结构	很严重
二　级	一般的高耸结构	严　重

注：1.对特殊的高耸结构，其安全等级可根据情况另行规定；
2.结构破坏后果是否严重，应视危及人的生命安全，造成经济损失，产生社会影响的程度而定；
3.结构构件的安全等级宜采用与整个结构相应的安全等级，但对部分构件可按具体情况调整其安全等级。

高耸结构的构件原则上与整个结构采用相同的安全等级。但有时容许对部分重要的构件提高一级安全等级，这样所增费用不大而能使结构的失效概率有所减小；反之，也容许对部分次要构件降低一级安全等级，而不致影响结构的整体安全性。调整部分构件的安全等级可以借用结构重要性系数来实现。

第三节　承载能力极限状态设计

一、荷载效应基本组合

承载能力极限状态设计的荷载效应基本组合，指仅有永久荷载和可变荷载效应，而无偶然作用效应的荷载效应组合，基本组合采用下列极限状态设计表达式：

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_k + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^{n} \psi_{ci} \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{ik}) \leqslant R(\cdot) \qquad (2\text{-}10)$$

式中　γ_0——高耸结构重要性系数；

对安全等级为一级的结构，采用1.1；

对安全等级为二级的结构，采用1.0；

γ_G——永久荷载分项系数，一般情况可采用1.2，当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时可采用1.0；

γ_{Q1}、γ_{Qi}——第一个和第i个可变荷载的分项系数，一般情况可采用1.4，但对安装检修荷载可采用1.3，对温度作用可采用1.0；

G_k——永久荷载的标准值；

Q_{1k}——第一个可变荷载的标准值，该可变荷载的效应大于其他任何第i个可变荷载的效应；

Q_{ik}——除第一个可变荷载外，其他任何第i个可变荷载的标准值；

C_G、C_{Q1}、C_{Qi}——永久荷载、第一个可变荷载和其他任何第i个可变荷载的荷载效应系数；

ψ_{ci}——除第一个可变荷载外、其他任何第i个可变荷载的组合值系数，根据不同的荷载组合，按表2-3规定采用；

$R(\cdot)$——结构构件的抗力函数。

可变荷载组合值系数　　**表 2-3**

荷载组合		可变荷载组合值系数				
		ψ_{cW}	ψ_{cI}	ψ_{cA}	ψ_{cT}	ψ_{cL}
Ⅰ	$G+W+L$	1.0	—	—	—	0.7
Ⅱ	$G+I+W+L$	0.25	1.0	—	—	0.7
Ⅲ	$G+A+W+L$	0.25	—	1.0	—	0.7
Ⅳ	$G+T+W+L$	0.25	—	—	1.0	0.7

注：1.表中：G——结构构件自重等永久荷载；W——风荷载；A——安装检修荷载；I——裹冰荷载，T——温度作用；L——塔楼楼面或平台的活荷载。

2.对于带塔楼或平台的高耸结构，需要考虑荷载组合时，在组合Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ中雪荷载的组合值系数ψ_{cs}均取0.5；

3.组合Ⅰ中当$w_0 < 0.3\text{kN/m}^2$时，即采用$w_0 = 0.3\text{kN/m}^2$（w_0为基本风压）；

4.在组合Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ中当$\psi_{cw} \cdot w_0 = 0.25 w_0 < 0.15\text{kN/m}^2$时，即采用$0.15\text{kN/m}^2$。

二、荷载效应偶然组合

偶然组合的极限状态设计表达式，因各种偶然作用的性质差别较大而较难实现。偶然作用的特性是：发生的概率很小，持续时间较短，如一旦发生对结构可能造成相当大的损害。从工程的观点出发，综合考虑了安全与经济两个方面后，结构承载能力按偶然组合计算时，其结构可靠指标，可比基本组合时适当降低，并将结构安全等级降低一级。为此，建立偶然组合设计表达式的一般原则是：

1.只考虑一种偶然作用与其他可变荷载组合；

2.偶然作用的代表值不应乘分项系数；

3.与偶然作用同时出现的可变荷载，可根据具体情况采用相应的代表值；

4.具体的设计表达式及各种系数应按有关专业规范、规程的规定采用。

三、抗震计算基本组合

高耸结构抗震计算时，其基本组合采用下列极限状态设计表达式：

$$\gamma_G C_G G_E + \gamma_{Eh} C_{Eh} E_{hk} + \gamma_{Ev} C_{Ev} E_{vk} + \psi_w \gamma_w C_w W_k \leqslant R/\gamma_{RE} \qquad (2\text{-}11)$$

式中 γ_G——重力荷载分项系数，一般情况取1.2，当重力效应对构件承载能力有利时宜取1.0；

γ_{Eh}、γ_{Ev}——水平、竖向地震作用分项系数，按表2-4的规定采用；

地震作用分项系数 表 2-4

考虑地震作用的情况	γ_{Eh}	γ_{Ev}
仅考虑水平地震作用	1.3	不考虑
仅考虑竖向地震作用	不考虑	1.3
同时考虑水平与竖向地震作用	1.3	0.5

γ_w——风荷载分项系数，取1.4；

G_E——重力代表值，取结构自重和各竖向可变荷载的组合值之和；计算地震作用时结构自重（包括结构构配件自重、固定设备重等）的组合系数取1.0；对设备内的物料重取1.0；对高耸结构内的电梯自重取1.0，但其吊重取0.3；对塔楼楼面和平台等效均布荷载取0.5；对塔楼楼顶的雪荷载取0.5；

E_{hk}——水平地震作用标准值；

E_{vk}——竖向地震作用标准值；

W_k——风荷载标准值；

ψ_w——抗震基本组合中的风荷载组合值系数；可取0.2；

C_G、C_{Eh}、C_{Ev}、C_w——有关各类荷载与作用的作用效应系数，并应乘以国家标准《建筑抗震设计规范》（GBJ 11-88）中规定的效应增大系数或调整系数；

R——结构构件的抗力或连接的抗力；

γ_{RE}——抗力抗震调整系数，对钢及钢筋混凝土高耸结构均取0.8；对焊缝取1.0。

第四节　正常使用极限状态设计

高耸结构的正常使用极限状态，应根据不同的设计目的，按荷载作用的持久性采用两种组合：短期效应组合和长期效应组合。计算时，其变形或裂缝等计算值应不超过相应规定限值。两种效应组合极限设计表达式：

短期效应组合

$$C_G G_k + C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^{n} \psi_{ci} C_{Qi} Q_{ik} \tag{2-12}$$

长期效应组合

$$C_G G_k + \sum_{i=1}^{n} \psi_{qi} C_{Qi} Q_{ik} \tag{2-13}$$

式中　ψ_{ci} ——短期效应组合时，除第一个可变荷载外，其它任何第i个可变荷载组合值系数；

ψ_{qi} ——任何第i个可变荷载的永久值系数。

目前对结构正常使用极限状态的可靠度分析和各种控制条件(即限值)还在研究之中，公式（2-12）、（2-13）仅是概念性模式，具体设计仍可根据过去经验进行试算。

第五节　高耸结构变形控制条件

高耸结构正常使用极限状态的控制条件（结构或结构构件中产生的变形值）应考虑荷载的短期效应组合，采用下列表达式：

$$w_{Gk} + w_{Q1k} + \psi_c \sum_{i=2}^{n} w_{Qik} \leqslant [w] \tag{2-14}$$

式中　w_{Gk} ——永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值；

w_{Q1k}——第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值（该值大于其它任意第i个可变荷载标准值产生的变形值）；

w_{Qik}——第i个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值；

$[w]$ ——结构或结构构件的容许变形值。

高耸结构的容许变形值应符合下列规定：

1. 在风荷载（标准值）作用下，高耸结构任意点的水平位移不得大于该点离地高度的1/100。对桅杆结构，任意层间的相对水平位移，尚不得大于该层间高度的1/100。

2. 对于装有方向性较强（如电视塔、无线电塔、微波塔、导航塔等）或工艺要求较严格的设备（如石油化工塔）的高耸结构，在不均匀日照温度或风荷载（标准值）作用下，在设备所在位置处的塔身转角，应满足工艺要求；

3. 在风荷载的动力作用下，设有游览设施的塔，在游览设施所在位置处的塔身振动加速及水平振幅应满足正常使用要求；

4. 在各种荷载(标准值)组合作用下，钢筋混凝土构件的最大裂缝宽度不应大于0.2mm；

5. 对于有特殊变形要求的高耸结构，应按各专业的规范或规程的规定采用。

第三章　荷　　载

按《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84）规定，使结构产生效应(如内力，位移等）的各种原因，统称为作用。如果作用是以直接施加在结构上的力，例如恒荷载、楼面活荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载等，可称为直接作用。如果作用是引起结构外加变形和约束变形的，例如地震、基础沉降、混凝土收缩、温度变化、焊接等，可称为间接作用。

结构上的直接作用也称为荷载，因为它的作用是由各种负载力形成。但是对于地震、基础沉降等的间接作用，不是直接以力的形式出现，因而应称为作用，以避免将地震形成的惯性力，误认为直接施加在结构上而与地基和结构本身无关的外力。

由于习惯上过去曾将直接作用和间接作用统称为荷载，因此在分类上仍归纳在荷载内容中。在称呼上，直接作用可称为荷载，而间接作用仍称为作用。

荷载（作用）是结构设计的依据。它的取值是否合理和准确，直接影响到结构设计的安全和经济，因而理解及掌握荷载（作用）取值方法有着特别重要的意义。

第一节　高耸结构的荷载

一、荷载的分类

1.按作用时间的变异性和持续性分类

（1）永久荷载：统计规律与时间参数无关，其量值在整个设计基准期内基本保持不变的荷载，例如结构自重；

（2）可变荷载：统计规律与时间参数有关，其量值在整个设计基准期内可以变化的荷载，例如楼面活荷载、风荷载、雪荷载等；

（3）偶然荷载：在整个设计基准期内不一定出现，而一旦出现其量值很大的荷载，例如强烈的地震、爆炸等。

2.按结构的动力反应分类

（1）动力荷载：当荷载在结构上引起的加速度不能忽略，而需计及所产生的惯性力的荷载，例如风荷载中的脉动风、地震作用等。

（2）静力荷载：当荷载在结构上不产生加速度或产生加速度可以忽略不计的荷载。如自重、楼面活荷载等，后者本身具有一定的动力特性，但使结构产生的惯性力以及动力效应等可以忽略不计，故仍作静力荷载处理。与此相似的，还有风荷载中的平均风速部分等。

二、高耸结构主要承受的荷载

高耸结构承受的荷载很多，例如自重、风荷载、裹冰荷载、地震作用、施工检修荷载、温度变化作用等。

高耸结构系高大的直立式结构，因此侧向作用的荷载将对结构产生最为不利的影响。

例如，风荷载和地震作用，它们作用在结构上的力主要是水平力（在某些情况下还考虑竖向力），将在水平方向产生很大的位移。高耸结构，如输电塔架，由于上面的输电线常因裹冰荷载产生很大的竖向位移，有风时还可能产生强烈的振动甚至失稳。因此，在这种情况下裹冰荷载也是主要荷载。可以看出，风荷载、裹冰荷载以及地震作用是高耸结构承受的主要荷载或作用。下节起将分别对这三种荷载或作用加以详细的叙述。

三、荷载与结构动力特性的关系

结构动力特性通常是指频率（或周期）、振型和阻尼比，它是结构固有的、与外界干扰无关。

当荷载按动力反应属于动力荷载时，例如风荷载中的脉动风和地震作用，当它们作用在结构上时，结构产生惯性力。这些惯性力作用在结构上，就等效于这些荷载的动力作用。这些惯性力就是结构设计中所需要的风振力和地震力，而这些力本身的量值则决定于结构的动力特性，结构的动力特性不同，这些力也就不同。风荷载中，横向风力也有类似情形，当横向风作用在结构上时，也产生惯性力即横向风振力，也即横风向等效风荷载。因此要决定这些荷载（实际上是等效荷载）值，必须先求出结构的动力特性。

第二节　风　荷　载

一、风、风力、风速和风压

风是由空气流动而形成的。风的强度常称为风力，常用风级来表示。风级是根据风对地面（或海面）物体影响程度而定出的等级。英国蒲福（F. Beaufort）于1805年拟定了风级，称为蒲氏风级。由于根据地面（或海面）物体对风的影响程度比较笼统，以后逐渐采用以风速的大小来表示风级，自0至12共分13个等级。这就是在气象广播中所听到的风的等级。由于每个风级相当于一段风速范围，例如10级狂风相当于距地10m高处24.5～28.4m/s的风速范围，在用于设计时不能有一确定的值，因而在工程设计中不采用风级作为设计依据，而直接采用具体的风速值。由于风荷载对结构的作用是以力的形式出现的，因而将风速换算成风压对结构设计更为直接，所以必须知道风速与风压的换算公式。

二、风速风压关系式

根据流体力学中的伯努利方程，可以得出风速与风压关系式为：

$$w=\frac{1}{2}\rho v^2$$

$$=\frac{1}{2}\ \frac{\gamma}{g}v^2 \qquad (\mathrm{kN/m^2}) \qquad (3\text{-}1)$$

式中ρ为空气质点密度（$\mathrm{t/m^3}$），γ为空气重力密度（$\mathrm{kN/m^3}$），v为来流风速（m/s）。

在气压为101.325kPa（76cmHg）、常温15℃和绝对干燥的情形下，$\gamma=0.012018\mathrm{kN/m^3}$，在纬度45°处，海平面上的重力加速度为$g=9.8\mathrm{m/s^2}$。将这些数代入上式，得到：

$$w=\frac{0.012018}{2\times 9.8}v^2\approx\frac{v^2}{1630} \qquad (\mathrm{kN/m^2})$$

上式是在标准大气情况下，满足上述条件后得到的。由于各地地理位置不同，γ和g值也就不同，因而$\frac{1}{2}\ \frac{\gamma}{g}$值也就不等于$\frac{1}{1630}$。上式一般适于内陆海拔500m以下地区，对

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com