

风机塔架基础设计中不可忽视的几个关键问题（下）

王晓可

风机塔架基础具有承受风力循环荷载即大偏心受力的特性，对基础设计的安全性和可靠性要求较高。风机塔架基础的设计区别于常规基础的受力特征及变形规范，有其自身的特点和要求。针对设计师们在风机基础设计及使用盈建科风机基础软件（YJK-WTF）中不可忽视的几个问题给大家进行详细的文字解析，以避免设计中出错或混淆问题的出现。本文分为上下两篇，上篇介绍建模、荷载中的关键问题，下篇介绍风机荷载如何作用到基础上以及分段配筋。

基础顶面的荷载及分段配筋

一、基础顶面上的荷载

塔筒底部的荷载直接施加到第 1 标准层 100mm 高的矮墙上，矮墙上有 12 个节点将矮墙分为 12 段，竖向力 F_{zk} 、水平力 Fr_k 、弯矩 Mr_k 、扭矩 Mz_k 分配到每个节点和每一段矮墙上。下面具体看一下内力是如何分配到矮墙上的。

1. 竖向力 F_{zk}

竖向力 F_{zk} 平均分配到 12 个节点上，每个节点的竖向力是 $F_{zk}/12$ ， $F_{zk}=6011.87\text{kN}$ ，故每个节点的竖向力 $F_{zki}=6011.87/12=500.98\text{kN}$



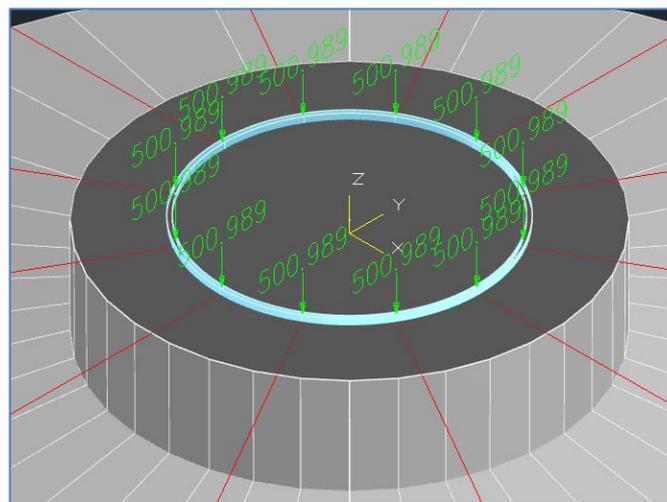
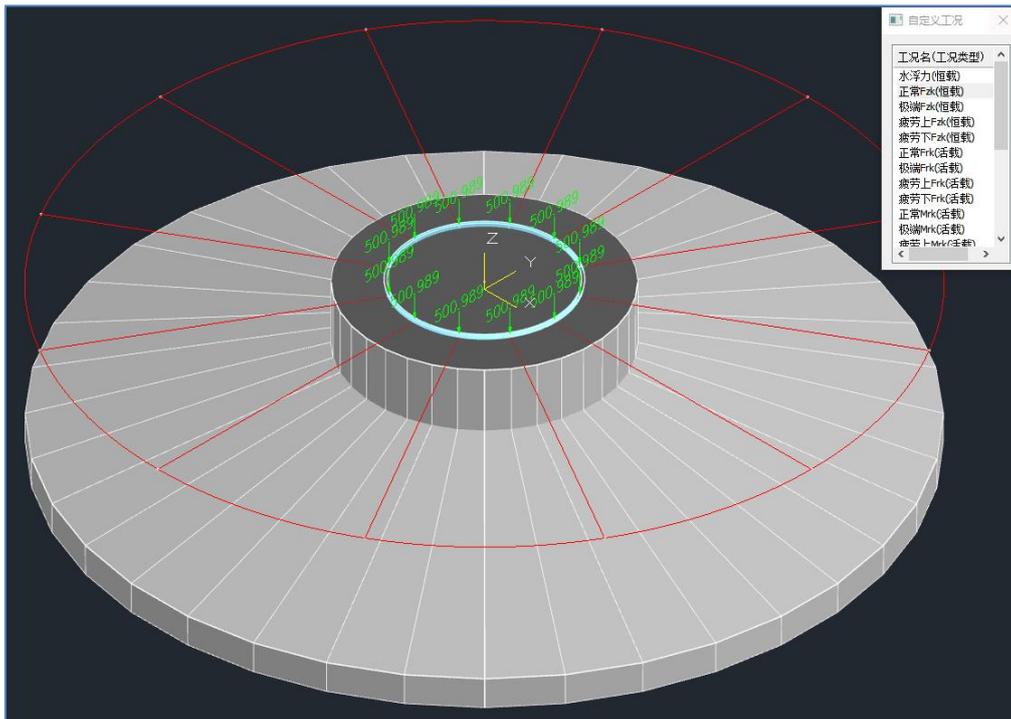
塔筒底部荷载

各工况下的塔筒底部内力标准值

工况名称	Fr_k (kN)	F_{zk} (kN)	Mr_k (kNm)	Mz_k (kNm)
正常运行工况	671.080	6011.870	92637.800	1439.250
极端荷载工况	827.480	5883.920	115411.000	1385.910
多遇地震工况	715.380	6109.270	95755.200	1439.250
罕遇地震工况	937.380	6693.370	112600.300	1439.250
疲劳荷载工况(上限)	321.422	2945.500	44327.028	-1967.200
疲劳荷载工况(下限)	292.301	8990.100	40508.282	2505.600

参数说明：
本界面用于输入厂家提供正常运行、极端荷载、疲劳等工况下的荷载标准值。

合力表示



2. 水平力 Frk

水平力 Frk 平均分配到 12 个节点上，每个节点的水平力是 $Frk/12$ ， $Frk=671.08kN$ ，故每个节点的水平力 $671.08/12=55.92kN$

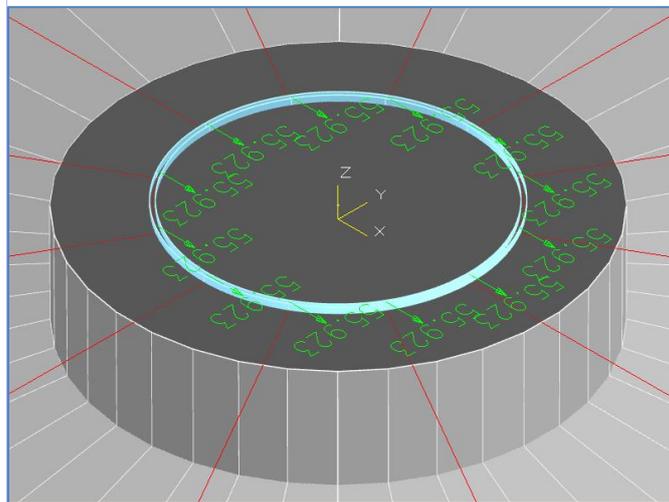
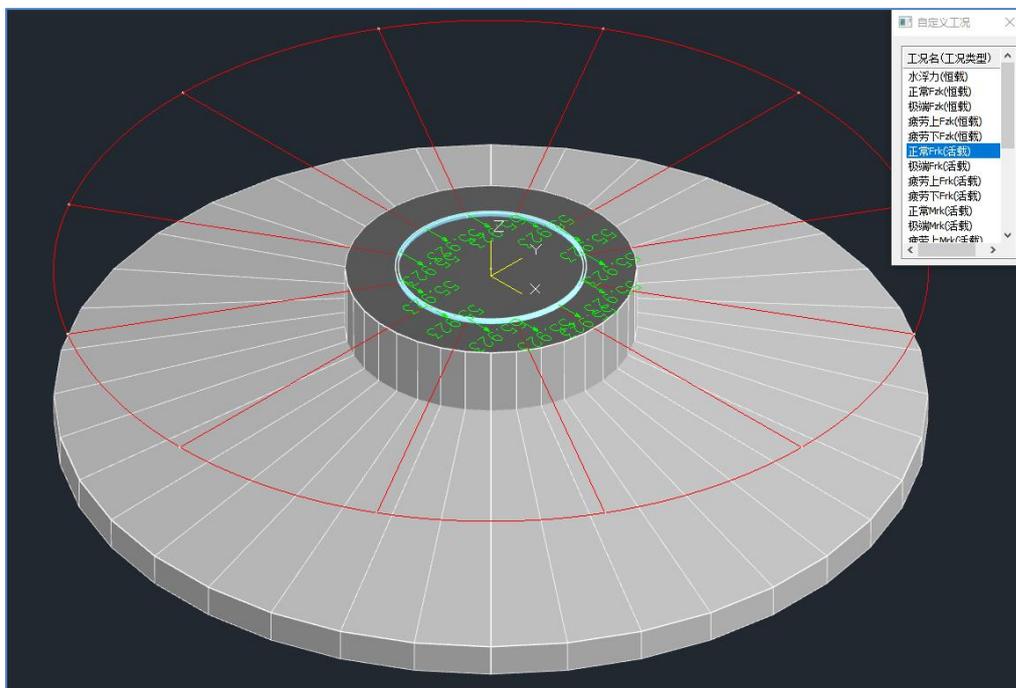
塔筒底部荷载

各工况下的塔筒底部内力标准值

工况名称	Frk (kN)	Fzk (kN)	Mrk (kNm)	Mzk (kNm)
正常运行工况	671.080	6011.870	92637.800	1439.250
极端荷载工况	827.480	5883.920	115411.000	1385.910
多遇地震工况	715.380	6109.270	95755.200	1439.250
罕遇地震工况	937.380	6693.370	112600.300	1439.250
疲劳荷载工况(上限)	321.422	2945.500	44327.028	-1967.200
疲劳荷载工况(下限)	292.301	8990.100	40508.282	2505.600

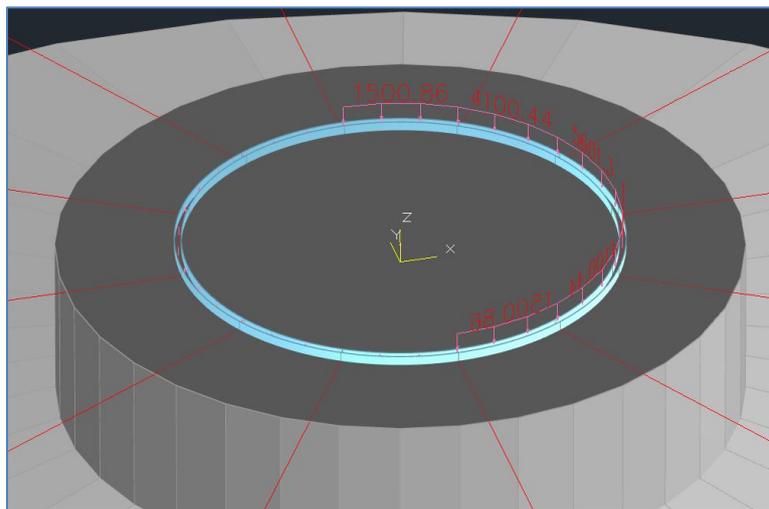
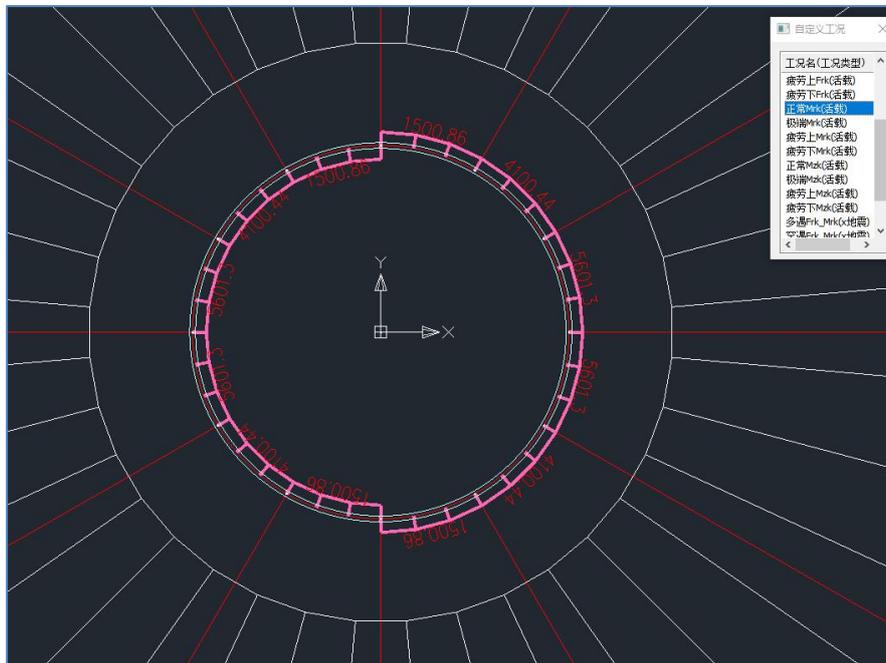
参数说明：
本界面用于输入厂家提供正常运行、极端荷载、疲劳等工况下的荷载标准值。

合力表示 查看坐标系



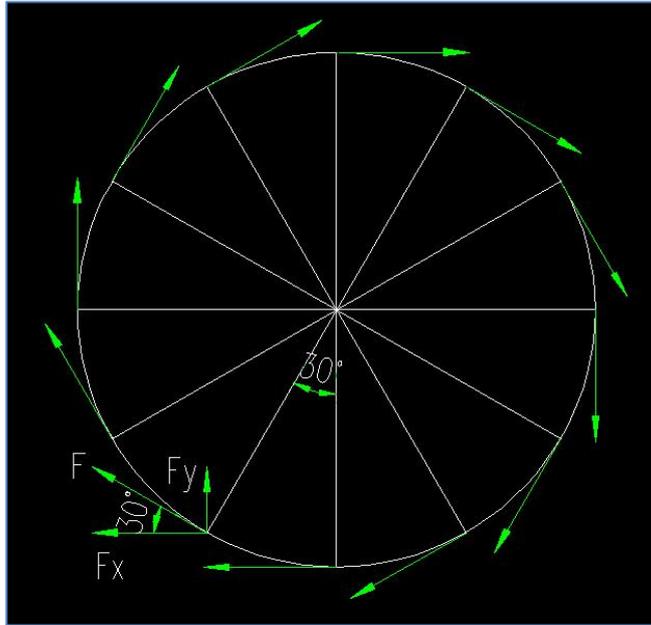
3. 弯矩 Mrk

弯矩 M_{rk} 转化为矮墙的轴向力，每段矮墙的轴向力为 $N_i = M_{rk}/l_y * x_i/t_w$ ，其中 x_i 为每段环墙中心点到圆心距离， t_w 为矮墙厚度，环墙绕 y 轴总惯性矩 $I_y = \pi * (2R+t_w)^4/64 - \pi * (2R-t_w)^4/64$ 。



4. 扭矩 Mzk

矮墙上 12 个节点以直径两 endpoints 为一组，共形成了 6 组节点力，每组节点力形成力偶 $M=M_{zk}/6$ ；力臂是 $2R$ ，则每个节点的合力 $F=M/2R=(M_{zk}/6)/2R=M_{zk}/12R$ ，合力 F 的方向是沿着圆周切线方向。每个节点的分力 $F_x=F\cos \theta$ ， $F_y=F\sin \theta$ ，其中 θ 是合力 F 与 x 轴的夹角。



下面以 $\theta = 30$ 度为例，核算扭矩产生的合力和分力。将 $Mzk=1439.25kN.m$ ，塔筒底外径 4.58m，壁厚 0.07m， $\theta = 30$ 度，带入到上述公式中，

每组力偶： $M=1439.25/6=239.875 kN.m$

力臂： $2R=4.58-0.07=4.51m$

节点合力： $F=239.875/4.51=53.187 kN$

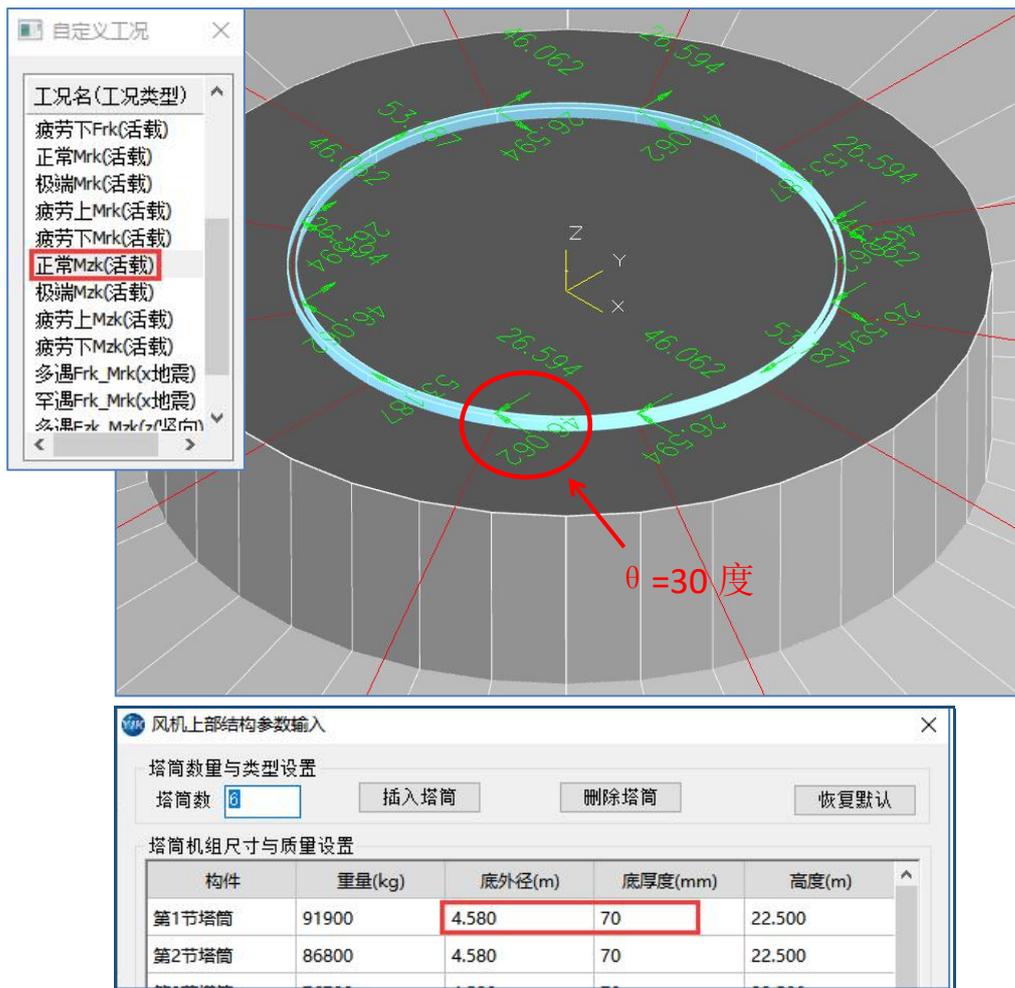
节点分力： $Fx=53.187 \times \cos 30=46.062 kN$

$Fy=53.187 \times \sin 30=26.594 kN$

各工况下的塔筒底部内力标准值				
工况名称	$Frk(kN)$	$Fzk(kN)$	$Mrk(kNm)$	$Mzk(kNm)$
正常运行工况	671.080	6011.870	92637.800	-1439.250
极端荷载工况	827.480	5883.920	115411.000	-1385.910
多遇地震工况	715.380	6109.270	95755.200	-1439.250
罕遇地震工况	937.380	6693.370	112600.300	-1439.250
疲劳荷载工况(上限)	321.422	2945.500	44327.028	1967.200
疲劳荷载工况(下限)	292.301	8990.100	40508.282	-2505.600

参数说明：
本界面用于输入厂家提供正常运行、极端荷载、疲劳等工况下的荷载标准值。

合力表示



二、分段配筋

根据《风机基础规范》第 7.2.8 条，基础底板的配筋弯矩可按承受均布荷载的悬臂构件进行计算。用悬臂构件根部弯矩作为全截面弯矩求配筋面积，由于悬臂板悬挑尺寸较大，用根部弯矩配筋是偏保守、不经济的，因此采用分段配筋更加合理。7.2.8 条条文说明也建议：“在远离变阶面高度的悬臂位置，可以选择部分截面高度再进行配筋计算，对于悬臂段较长的扩展基础可做配筋优化。”因此，软件对基础底板配筋提供分段配筋的功能。

7.2.8 基础底板的配筋应按抗弯计算确定，并符合下列规定：

1 基础底板底面配筋的弯矩值可按承受均布荷载的悬臂构件进行计算，基础台柱半径 r_1 处单位弧长的弯矩设计值，可根据地基净反力分布（图 7.2.8）按下式计算：

$$M_{dh} = \frac{p(2R+r_1)(R-r_1)^2}{6r_1} \quad (7.2.8-1)$$

式中： M_{dh} ——荷载效应基本组合下基础底板单位弧长的弯矩设计值（ $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）；

R ——基础底板半径（ m ）。

2 基础底板顶面配筋的弯矩值可按承受均布荷载的悬臂构件进行计算，且基础台柱半径 r_1 处单位弧长的上部弯矩设计值可按下列式计算：

$$M_{dh} = \frac{q(2R+r_1)(R-r_1)^2}{6r_1} \quad (7.2.8-2)$$

式中： q ——基础底板顶面近似均布荷载（ kPa ）。

3 圆形基础底板宜按径环向配筋取变截面位置进行计算。单位宽度径向配筋弯矩可取 $2/3M_{dh}$ ，单位宽度环向配筋弯矩可取 $1/3M_{dh}$ 。配筋计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.2.6 满足本规范第 7.2.3 条要求的基础，计算基础底板内力时，可按均布荷载采用。均布荷载应取外悬挑 $2/3$ 处的最大压力，其值应按下列式计算：

$$p = \frac{N}{A} + \frac{M(2R+r_1)}{I \cdot 3} \quad (7.2.6)$$

式中： p ——荷载效应基本组合下圆形基础近似均布地基净反力（ kPa ）；

N ——荷载效应基本组合下作用于基础顶面的垂直荷载设计值（ kN ）；

M ——荷载效应基本组合下作用于基础底面的总弯矩设计值（ $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）；

A ——基础底面实际受压区面积（ m^2 ）；

I ——基础底面惯性矩（ m^4 ）。

7.2.8 风电机组扩展基础尺寸比例不满足烟囱基础规范的比例，因此，环径向配筋公式不能直接使用。底板下部配筋弯矩取在变阶面高度单宽扇形单元承受均布地基反力，按悬臂构件进行计算；底板上部配筋弯矩取在变阶面高度单宽扇形单元承受均布荷载 q ，按悬臂构件进行计算，均布荷载 q 可以按下式近似计算。底板上表面近似均布荷载计算尺寸示意图见图 7-1。

$$q = \frac{1}{2} (r_1 \cdot h_1 + r_1 \cdot h_2 + r_2 \cdot h'_1 + r_2 \cdot h'_2) \quad (7-1)$$

式中： q ——基础底板顶面近似均布荷载 (kPa)；

h'_1 ——基础外边缘土体高度 (m)；

h'_2 ——变截面土体高度 (m)。

《风机基础规范》
条文说明

根据《风电机组地基基础设计规定（试行）》FD 003—2007 中条文说明第 9.2.2 条，并依据有限元计算结果，扩展基础的最大弯矩一般发生在变阶面处，因此配筋计算以满足变阶面的抗弯为准，在远离变阶面高度的悬臂位置，可以选择部分截面高度再进行配筋计算，对于悬臂段较长的扩展基础可做配筋优化。

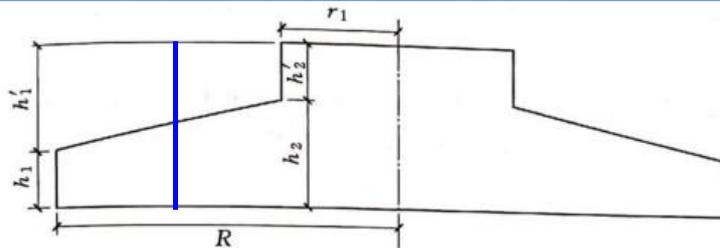
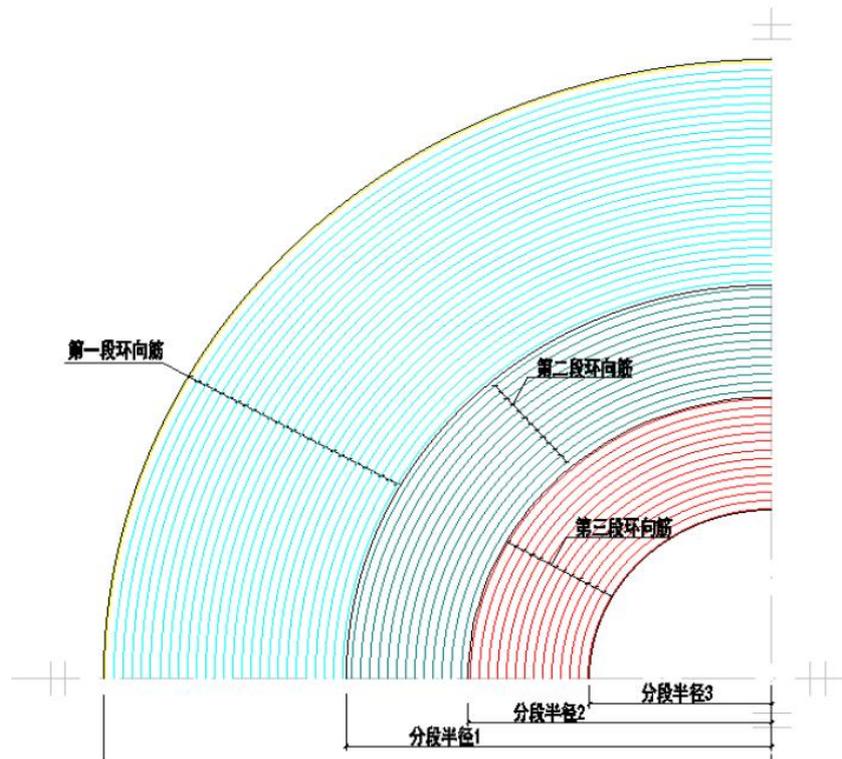


图 7-1 底板上表面近似均布荷载计算尺寸示意图

悬臂构件的均布荷载，对于基础底板底面，根据 7.2.6 条，“均布荷载取外悬挑板 2/3 处基底压力”；对于基础底板顶面，根据 7.2.8 条条文说明，“均布荷载取悬挑板 1/2 处自重应力”。

设计师可以根据经验及配筋情况，将环向钢筋分成 n 段，其中每一段的分段半径表示该段与相邻内圈段的分界半径。如下图所示，分段半径 1 为第一、第二段的分界半径；分段半径 2 为第二、第三段的分界半径；分段半径 3 范围内为台柱，不配环向钢筋。

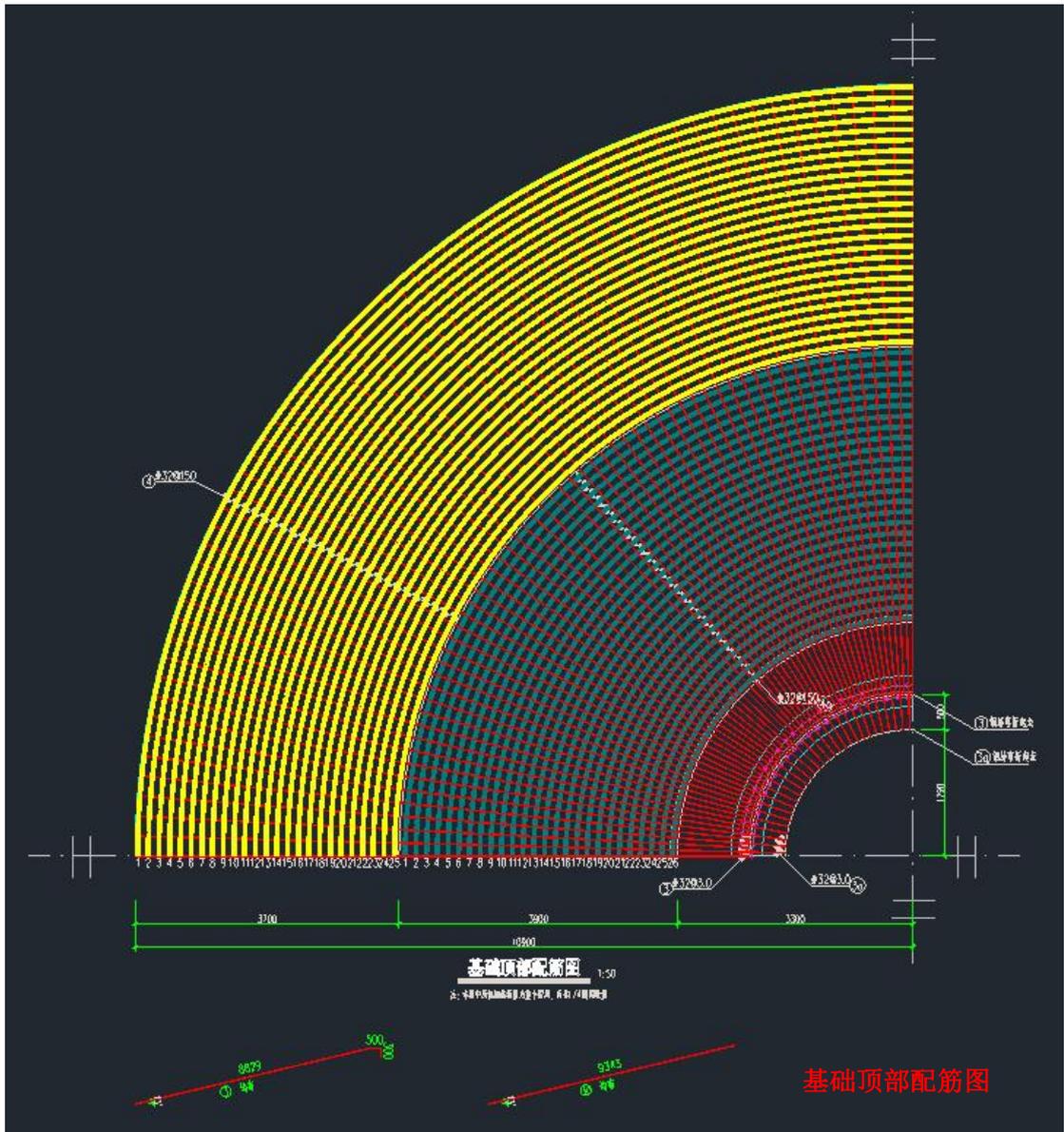
对于第一段，将分段半径 1 作为台柱半径，确定悬挑板上顶、底均布荷载（《风机基础规范》7.2.6 条、7.2.8 条条文说明），带入公式中配筋弯矩（公式 (7.2.8-1)、(7.2.8-1)），进而求出配筋面积；以此类推，第二段、第三段同样的方法。



环向筋分段示意图

环向配筋在【快速建模】【基础悬挑板径环向配筋】中进行初步设置，输入顶、底部环向配筋的分段数和分段半径，如下图：





以上就是风机塔架基础在盈建科软件（YJK-WTF）中的关键问题的全部内容，相信通过上下两篇文章，设计师们对盈建科风机基础软件有了进一步的了解，对风机基础设计更加清晰明确！欢迎大家多多试用盈建科这款基础设计软件，我们将提供最便捷全面的服务，希望对设计师们在风机基础设计上有帮助！