

## 风载和冲击载荷下系留塔强度可靠性灵敏度分析\*

## Strength Reliability and Parameter Sensitivity Analysis of Mooring Tower Under Wind and Impact Load

西北工业大学力学与土木建筑学院飞行器可靠性工程研究所 何勇 刘永寿 曹刚 岳珠峰

**[摘要]** 以提高系留塔结构强度可靠性为目的,借助有限元软件分析了系留塔在风和冲击载荷同时作用下的应力分布,获得系留塔应力最大的位置,校核了塔架结构强度是否满足设计要求。在此基础上充分考虑了塔架结构的尺寸分散性,将可靠性分析方法和有限元参数化分析方法相结合,采用四阶矩法对塔架的可靠性和灵敏度进行分析。分析结果表明:系留塔的结构失效概率 $P_f=4.65 \times 10^{-7}$ ;方管的壁厚是影响系留塔强度可靠性的主要因素。

**关键词:** 系留塔 四阶矩法 可靠性 灵敏度

**[ABSTRACT]** The stress distribution of the mooring tower under wind and impact load is analyzed, and the maximum stress and location are obtained for the purpose of improving strength reliability and checking strength of the mooring tower. Considering the dispersive size of the mooring tower structure and combining the strength reliability method with parameter finite element method, the strength reliability and sensitivity of the mooring tower are analyzed by fourth moment method. The result shows that the strength failure probability of the mooring tower structure is  $P_f=4.65 \times 10^{-7}$  and the thickness of square pipes is main factor which influences on the strength reliability of the mooring tower.

**Keywords:** Mooring tower Fourth moment method Reliability Sensitivity

系留气球(飞艇)作为浮空器具有滞空时间长、覆盖面积大、机动性强等特点,可对一定范围内的地貌、人员等自动完成摄像,在军事上和民用领域都得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

系留气球(飞艇)在地面锚泊时需要约束在系留塔上,与其产生支反力相平衡<sup>[2]</sup>。系留塔是系留气球(飞艇)的地面装置,主要用于系留气球(飞艇)日常的使用维护,多为钢构件构成的空间桁架结构。系留塔在工作期

间必然面临系留气球(飞艇)的冲击作用和风载荷问题,在这2种作用力下系留塔可能会发生强度失效<sup>[3]</sup>。

在传统的结构设计中,一般是在确定性分析的基础上采用安全系数法,但在设计中安全系数的取值很大程度上依赖设计者的经验,具有一定的不准确性。实际中,塔架构件的材料尺寸由于在加工等各个环节的随机因素的影响下而具有随机性,这就要求必须定量的获得尺寸分散性对结构强度的影响。本文将塔架的几个关键尺寸作为随机变量,充分考虑其分散性,采用四阶矩法对系留塔进行了可靠性分析,并定量的给出系留塔安全工作的可靠度及影响其强度失效因素的灵敏度,从而找出影响系留塔强度失效的主要因素<sup>[4]</sup>,并可用于指导系留塔的设计。

## 1 模型和材料

系留塔的CAD模型如图1所示,有限元模型如图2所示。材料的参数为:弹性模量 $=210000\text{MPa}$ ,泊松比 $=0.3$ ,屈服强度 $=345\text{MPa}$ 。模型的边界条件是底端固定,载荷是在塔顶的4个顶点同时加载由于飞艇的冲击带来的冲击载荷和由于风通过飞艇传递给系留塔引起的集中力。冲击载荷在每个顶点的大小是为 $F=8467.5f\text{N}$ ,作用时间为 $0.3\text{s}$ ,朝向是 $y$ 轴的负向, $f$ 的变化规律如图3所示。风载以系留塔所在地区的最大

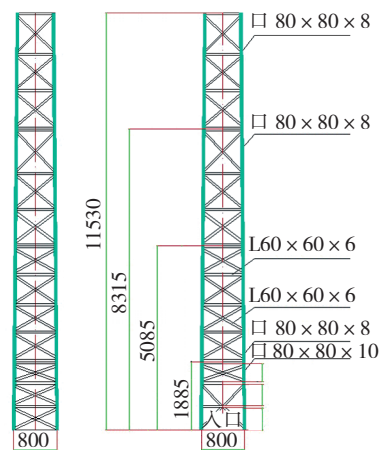


图1 系留塔CAD模型

Fig.1 CAD model of mooring tower

\* 西北工业大学基础科研项目(JC201114)、高等学校学科创新引智计划项目(B07050)资助。

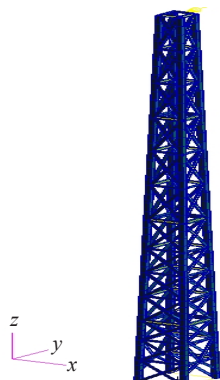


图2 系留塔有限元模型

Fig.2 Finite element model of mooring tower

风速为 40m/s 换算,在每个顶点的风载作用力是大小为 ( 2102.5N, -3900N, 345N )。

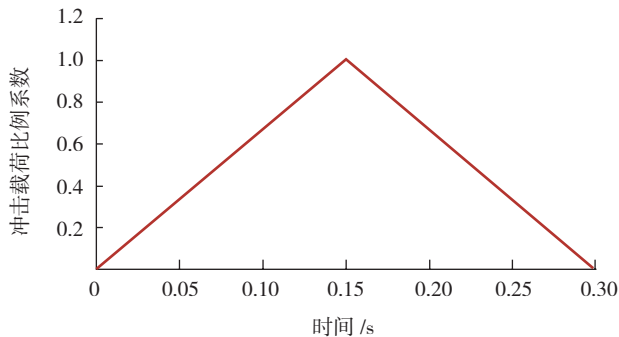


图3 f的变化规律

Fig.3 Variable rule of f

## 2 确定性分析

### 2.1 有限元分析

模型由 MSC.Patran 软件建立,有限元分析由 MSC.Nastran 完成,使用 MSC.Patran 对分析结果进行后处理。

计算得出,时间  $t=0.15s$  时塔架的应力值最大,位置在塔的底端, $t=0.15s$  时塔架应力分布云图如图 4 所示。

### 2.2 强度校核

通过有限元分析得出,系留塔最大应力为 209MPa,由其材料参数知,材料的屈服极限为 345MPa。由于结构所承受载荷、材料性能、结构尺寸和加工质量等存在分散性,为保证结构安全可靠,在设计中引入安全系数概念。选取安全系数  $n=1.5$  校核系留塔结构,345/209 大于安全系数  $n$ ,因此,系留塔是安全的。

## 3 可靠性分析

由于结构中关键尺寸的分散性对系留塔强度可靠性的影响,建立塔架结构的失效函数,编译相关计算机程序将结构的可靠性分析方法和有限元参数化分析方

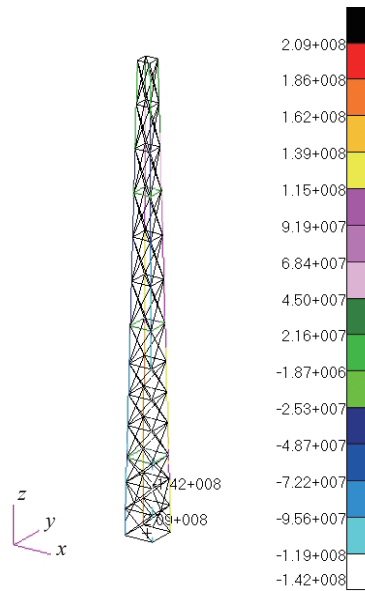


图4 在  $t=0.15s$  时系留塔的应力分布云图

Fig.4 Diagram of stress distribution on mooring tower at  $t=0.15s$

法相结合进行可靠性分析。文中采用的是由课题组所编写的软件《飞机结构强度和寿命可靠性分析》进行计算,采用四阶矩对系留塔的可靠性和灵敏度进行分析。

### 3.1 随机变量及其分布

通过确定性分析发现应力最大处为系留塔底端。因此在对塔架进行可靠性分析时,选取方管厚度参数作为随机变量,选取的随机变量及其分布特性如表 1 所示。

表1 随机变量及其分布特性

随机变量	分布类型	均值 /m	标准差 /m
方管 1 长的厚度	正态分布	0.01	0.001
方管 1 宽的厚度	正态分布	0.01	0.001
方管 2 长的厚度	正态分布	0.008	0.0008
方管 2 宽的厚度	正态分布	0.008	0.0008

注:方管 1 的尺寸为  $80mm \times 80mm \times 10mm$ ; 方管 2 的尺寸为  $80mm \times 80mm \times 8mm$ 。

### 3.2 失效模式

本文中,以塔架承受的最大应力超过其材料的屈服应力作为塔架的失效准则,其强度的失效功能函数为:  $g=345000000-\max(\delta)$ 。其中的 345000000 是材料的屈服极限,单位是 Pa;  $\max(\delta)$  是塔身所受的最大应力值。

### 3.3 可靠性分析

本文采用的是四阶矩法对系留塔进行可靠性和可靠性灵敏度进行分析,四阶矩属于点估计可靠性分析方法。点估计方法和其他可靠性方法相比,不存在求解功能函数的导函数和寻找射击点问题,它直接利用功能函

数在一些特征点处的函数值来近似计算功能函数的低阶矩(主要是一阶到四阶矩),然后由功能函数的各阶矩来计算近似失效概率。基于点估计的可靠性和灵敏度分析方法,依据灵敏度的定义,将失效概率对基本变量分布参数的偏导数转化成功能函数的各阶矩对基本变量分布参数的偏导数形式;再将功能函数矩对基本变量分布参数的导数转化成特征函数矩的形式,然后再采用特征函数矩的点估计方法来估计可靠性灵敏度<sup>[4-8]</sup>。

按本文取4个随机变量,则随机变量为 $x=\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ ,随机变量的联合概率密度为 $f_x(x)$ ,则功能函数可以写做 $Z=g(x)=g\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ 。功能函数的概率矩可由以下公式<sup>[3]</sup>计算:

$$u_g = \int g(x)f_x(x)dx, \quad (1)$$

$$\sigma_g = [\int [g(x) - u_g]^2 f_x(x)dx]^{1/2}, \quad (2)$$

$$a_{3g} = \frac{1}{\sigma_g^3} \int [g(x) - u_g]^3 f_x(x)dx, \quad (3)$$

$$a_{4g} = \frac{1}{\sigma_g^4} \int [g(x) - u_g]^4 f_x(x)dx, \quad (4)$$

其中 $u_g, \sigma_g, a_{3g}, a_{4g}$ 分别表示功能函数的前四阶矩,分别称为均值、标准差、偏度和峰度。

基于高阶矩标准化技术法的四阶矩算失效概率,可按以下公式<sup>[3]</sup>计算。

$$\beta_{2m} = \frac{u_g}{\sigma_g}, \quad (5)$$

$$\beta_{4m} = \frac{3(a_{4g} - 1)\beta_{2m} + a_{3g}(\beta_{2m}^2 - 1)}{\sqrt{(5a_{3g}^2 - 9a_{4g} + 9)(1 - a_{4g})}}, \quad (6)$$

$\beta_{4m}$ 就是基于四阶矩方法的可靠度指标,相应的基于四阶矩的失效概率为:

$$P_{f4m} = \phi(-\beta_{4m}). \quad (7)$$

由课题组所编译的软件可计算得到功能函数的均值、标准差、偏度和峰度。有4个随机变量,因此需要调用81次功能函数可得到前四阶矩并得出 $P_f=4.65 \times 10^{-7}$ ,其中 $P_f$ 为失效概率。

#### 4 可靠性灵敏度分析

可靠性灵敏度的分析可以提供基本变量的变化引起失效概率变化的信息,为工程设计提供有益的指导。由前文已经知道可以利用功能函数的概率矩计算失效概率,我们可以根据失效概率与可靠度指标的关系,以及可靠度指标与功能函数各阶矩的关系,采用函数求导法推出失效概率对基本变量分布参数的灵敏度计算公式<sup>[3]</sup>为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_f}{\partial \theta_x^{(k)}} &= \frac{\partial P_f}{\partial \beta_{4m}} \frac{\partial \beta_{4m}}{\partial \theta_x^{(k)}} \\ &= \frac{\partial P_f}{\partial \beta_{4m}} \left[ \frac{\partial \beta_{4m}}{\partial \beta_{2m}} \left( \frac{\partial \beta_{2m}}{\partial u_g} \frac{\partial u_g}{\partial \theta_x^{(k)}} + \frac{\partial \beta_{2m}}{\partial \sigma_g} \frac{\partial \sigma_g}{\partial \theta_x^{(k)}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \beta_{4m}}{\partial a_{3g}} \frac{\partial a_{3g}}{\partial \theta_x^{(k)}} + \frac{\partial \beta_{4m}}{\partial a_{4g}} \frac{\partial a_{4g}}{\partial \theta_x^{(k)}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\theta_x^{(k)}(i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m_i)$ ,  $m_i$ 为第 $i$ 个变量 $x_i$ 的分布参数的总个数,是基本随机变量 $x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的分布参数,常用到的分布参数有均值和标准差。

经计算,文中所选4个随机变量的灵敏度见表2。方管1长和宽的厚度是影响系留塔强度的主要因素,这为系留塔的设计提供了依据,具有一定的工程意义。

表2 随机变量的灵敏度

随机变量	分布类型	均值灵敏度	标准差灵敏度
方管1长的厚度	正态分布	-0.00107808	0.00346227
方管1宽的厚度	正态分布	-0.00115944	0.00384599
方管2长的厚度	正态分布	-0.00000019	0.00000001
方管2宽的厚度	正态分布	-0.00000029	0.00000003

#### 5 结论

(1)对系留塔结构在风载荷和撞击载荷下进行有限元分析,校核结构满足设计要求。

(2)对系留塔采用可靠性分析方法和有限元结合的方法计算得到系留塔的失效概率。

(3)通过对系留塔结构进行可靠性灵敏度分析发现方管的壁厚是影响系留塔结构强度的主要因素。

#### 参考文献

- [1] 宋杰,辛秀东,吉利,等.传媒飞艇用系留综合缆制造技术探讨.电线电缆,2010(2):23-26.
- [2] 杨燕初,王生,马毅.基于动力学仿真的系留气球鼻锥有限元分析.计算机仿真,2008,25(2):57-60.
- [3] 胡亮霞,李黎,尹鹏.橡胶铅芯阻尼器控制下大跨越输电塔的可靠性分析.电力建设,2008,29(11):19-23.
- [4] 吕震宙,宋述芳,李洪双,等.结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析.北京:科学出版社,2009.
- [5] 何水清,王善.结构可靠性分析与设计.北京:国防工业出版社,1993.
- [6] 张屹尚,赵彬,刘永寿,等.金属波纹管在航空管路中的动力学优化及可靠性分析.航空制造技术,2010(21):81-85.
- [7] 高宗战,刘志群,姜志峰,等.飞机翼梁结构强度可靠性灵敏度分析.机械工程学报,2010,46(14):194-198.
- [8] 高宗战,刘志群,姜志峰,等.有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命可靠性分析.材料工程,2010(5):20-24.

(责编 三丰)