

航向台天线杆强度分析

林 剑, 王春玲, 靳 猛, 罗阿妮, 李守仁
(哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 在天线杆结构的设计中, 为适应某些特殊要求, 开始采用底部使用球支座结构、以拉索稳固的天线杆结构, 来满足特殊的使用要求。特殊环境下, 其所受的外载荷(主要指风载)对结构的强度有很大的影响。为提高高天线杆结构的可靠性, 应用力学基本原理与算法, 对台风冲击条件下的杆结构受力与变形进行分析, 提出了一种结构强度和变形的简便计算方法, 计算结果满足设计要求, 符合工程实际。

关键词: 杆; 拉索; 风压; 变形

中图分类号: TB125 文献标识码: A 文章编号: 1006-7043(2003)01-0075-04

Strength analysis for body-mast

LIN Jian, WANG Chun-ling, JIN Meng, LUO A-ni, LI Shou-ren

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The effect of external loads, especially the wind pressure of typhoon, on the structural strength of a body-mast is analysed using the basic mechanics principle and algorithm with the strength and deformation calculated for the purpose of improving both the stability and reliability of a body-mast.

Key words: mast; cord; wind pressure; deformation

某些特殊用途导航台天线杆在设计中采用球支承底座, 拉索为伞状分布的结构, 以适应特殊的使用要求。在天线杆结构的强度计算中, 主要载荷为天线杆上设备的重力、拉索施加的拉力和风载。其所受的外载荷(主要是指风载)对天线杆结构的强度与稳定性有很大影响。为提高天线杆结构可靠性与稳定性, 需对天线杆结构在受外载荷条件下的受力与变形进行分析, 因此提供一个有效简洁的计算方法是非常必要的。

本文以采用3段不同直径的钢管焊接, 3层拉索呈120°分布的天线杆结构为例(结构如图1所示), 对该类型天线杆结构的受力与变形进行分析。给出天线杆在自重、拉索施加拉力和风载的共同作用下的刚度、强度与变形的计算方法。

1 刚度分析

为便于杆的受力等的分析, 首先将绳索所施加影响转化到水平方向, 以简化计算。

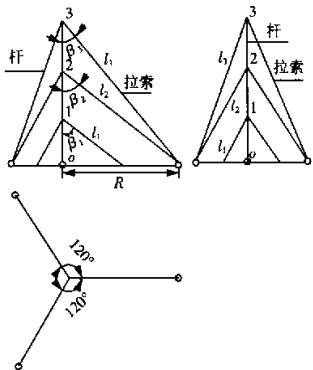


图1 天线杆布局图

Fig. 1 Layout of mast

表1 钢丝绳的参数

Table 1 Data of cord

参 数	代 号
弹性模量	E_s
横截面面积	A_s
线胀系数	α_s
预拉力	S_0
钢丝绳单位长度的重量	g
拉索长	l

收稿日期: 2002-05-14。

作者简介: 林 剑(1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设计与动态仿真。

1.1 不计载荷和自重的刚度计算

拉索受力及其在地面的投影如图2所示。

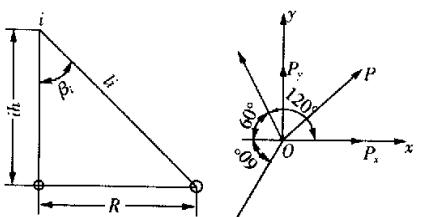


图2 拉索受力图

Fig. 2 Force on the cord

对于拉索节点处加力 P 时, 考虑到对称与反对称条件, 有

$$P_x = \bar{k}_x \Delta_x, P_y = \bar{k}_y \Delta_y,$$

式中: \bar{k}_x 、 \bar{k}_y 分别为 x 与 y 方向的刚度.

1) P_x 单独作用

$$P_x = \bar{k}_x \Delta_x, \Delta_y = 0.$$

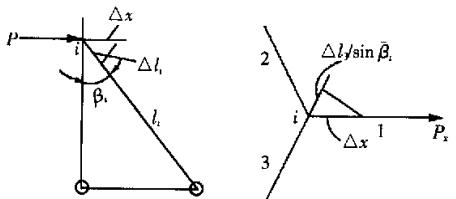


图3 P_x 单独作用受力图

Fig. 3 Force P_x act independently

受力如图3所示.

$$\Delta_x = \Delta l_1 / \sin \beta_i,$$

$$\frac{\Delta l_2}{\sin \beta_i} = \Delta_x \cos 60^\circ = \frac{\Delta l_1}{2 \sin \beta_i},$$

$$\Delta l_2 = \Delta l_3 = \Delta l_1 / 2.$$

物理方程

$$l_i = N_i L_i / E_i A_i,$$

从而

$$N_2 = N_3 = N_1 / 2;$$

平衡方程

$$2N_2 \sin \beta_i \cos 60^\circ + N_1 \sin \beta_i = P_x;$$

x 方向的刚度为

$$\bar{k}_x = \frac{3}{2} \frac{E_i A_i}{l_i} \sin^2 \beta_i.$$

2) P_y 单独作用

$$P_y = \bar{k}_y \Delta_y, \Delta_x = 0.$$

由

$$\begin{cases} \Delta l_1 = 0 \\ \Delta l_3 = \Delta_y \sin \bar{\beta}_i \cos 30^\circ = -\Delta l_2 \end{cases}$$

从而, 有 $-N_2 = N_3, N_1 = 0$.

平衡方程

$$2N_3 \sin \bar{\beta}_i \cos 30^\circ = P_y,$$

得

$$\bar{k}_y = \bar{k}_x = \frac{3}{2} \frac{E_i A_i}{l_i} \sin^2 \bar{\beta}_i = \bar{k}_i.$$

3) 任意方向作用水平力 P

由前边分析可知:

$$\frac{\Delta_y}{\Delta_x} = \frac{P_y}{P_x},$$

沿 P 方向的位移

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} = \frac{1}{\bar{k}_i} \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \frac{P}{\bar{k}_i}.$$

结果表明: 此结构节点水平刚度(k_i)各向同性.

1.2 考虑拉索自重与外载荷对节点刚度的修正

工程上用的钢丝绳会带有绝缘用的绝缘子或着拉环等. 设 P 为此外挂物的重量, 每根拉索共有 n 个等重的外挂物. 显然, 在此情况下各节点3条拉索都有相同的 θ_i , 即相应的刚度 k_i 仍具有各向相同的性质.

考虑外载荷(如: 风载)对拉索的影响, 设拉索所受外载荷分布为 $q_s(z)$. 当拉索位于外载荷影响最大的平面内(如: 风载的迎风面)时, 外载荷对 k_i 影响最大. 此时节点刚度不再具有各向同性的性质. 如图4所示.

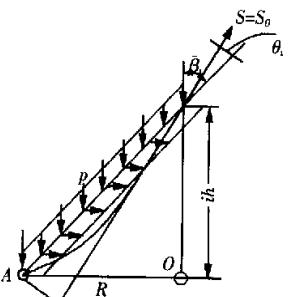


图4 外载荷施力图

Fig. 4 External load figure

由力矩平衡条件:

$$S_0 l_i \sin \theta_i = \frac{1}{2} g l_i^2 \sin \bar{\beta}_i + \sum_{m=1}^n P_m l_m \sin \bar{\beta}_i + \int_0^h q_s(z) dz.$$

式中: l_m 是第 m 个外挂到 A 的绳长, θ_i 为第 i 个节点处拉索在自重下的倾角改变量, R 为拉索底部到杆的底部的距离.

显然得到的 θ_i 是 3 根拉索中最大的一个. 考虑到简化计算和使得分析结果偏于安全, 可假定 3 条拉索的 θ_i 相同. 从而节点刚度仍具有各向同性的性质. 从而

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= \frac{R}{2S_0} g + \frac{P}{S_0 l_i} \sum_{m=1}^n l_m \sin \bar{\beta}_i + \frac{1}{S_0 l_i} \int_0^h q_s(z) dz, \\ \beta_i &= \bar{\beta}_i - \theta_i, \\ k_i &= \frac{3}{2} \frac{E A_i}{l_i} \sin^2 \beta_i. \end{aligned}$$

2 在风载作用下的位移与强度分析

将连接杆的每个节点的拉索视为一个具有水平约束的线性弹簧, 不计杆自重, 设各个节点所受

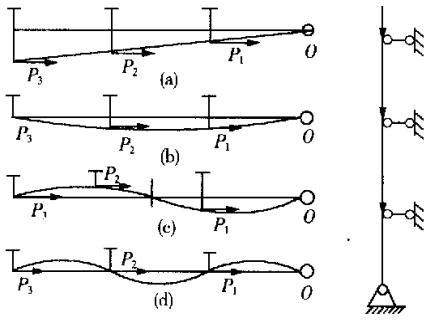


图 5 屈服模态图

Fig. 5 Yield mode

轴向外力为 P_i , 天线杆在临界状态下有 4 种屈服模态, 分别如图 5 所示. 将天线杆的挠度取为 4 种屈曲模态的线性组合, 即

$$\omega(z) = \sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z),$$

式中

$$\omega_1 = \frac{z}{3h}, \quad \omega_2 = \sin \frac{z\pi}{3h},$$

$$\omega_3 = \sin \frac{2z\pi}{3h}, \quad \omega_4 = \sin \frac{3z\pi}{3h}.$$

根据合力距定理, 设拉索传给天线杆的水平力为

F_i ($i=1, 2, 3$), 得变形能 U 为

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_0^{3h} EI_i \{ \omega''(z) \}^2 dz + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 k_i \{ \omega(z_i) \}^2 = \\ &\quad \frac{1}{2} \int_0^{3h} E I_i \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z) \right)^2 dz + \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 k_i \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z_i) \right)^2. \end{aligned}$$

式中: I_i 横截面惯性矩可为与高度相关的公式.

其外力势能 V 为 (设风载沿杆高分布规律为 $q(z)$)

$$\begin{aligned} V &= \sum_{i=1}^3 P_i \lambda_i - \int_0^{3h} q(z) \omega(z) dz - \sum_{i=1}^3 F_i \omega(z) = \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 P_i \int_0^{z_i} \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega'_n(z) \right)^2 dz - \\ &\quad \int_0^{3h} q(z) \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z) \right) dz - \\ &\quad \sum_{i=1}^3 F_i \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z_i) \right), \end{aligned}$$

系统总势能为 $\Pi = U - V$.

根据势能原理, 真实的 a_n 应使 Π 取极小值, 即

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_m} = 0, \quad m = 1, 2, 3, 4,$$

得

$$\begin{aligned} &\int_0^{3h} EI_i \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega''_n(z) \omega''_m(z) \right) dz + \\ &\sum_{i=1}^3 k_i \sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z_i) \omega_m(z_i) - \\ &\sum_{i=1}^3 P_i \int_0^{z_i} \left(\sum_{n=1}^4 a_n \omega'_n(z) \omega''_m(z) \right) dz = \\ &- \int_0^{3h} q(z) \omega_m(z) dz - \sum_{i=1}^3 F_i \omega_m(z_i). \end{aligned}$$

从而得到关于 a_n 4 个线性代数方程组, 其解为

$$\sum_{n=1}^4 A_{mn} a_n = B_m, \quad m = 1, 2, 3, 4, \quad (A_{mn} = A_{nm}).$$

求出相应的公式, 利用上述基本关系对 a_n 求解. 由已知的 a_n 就可知挠度函数 $\omega(z)$ 和各节点的位移 $\omega(z_i)$, 求出杆的反力 R_i :

$$\begin{aligned} R_i &= -k_i \omega(z_i) = -k_i \left[\sum_{n=1}^4 a_n \omega_n(z_i) \right], \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned}$$

天线杆下端的反力 R_0 可由杆的力矩平衡求出, 以顶点为原点进行力矩平衡求出.

杆的相对挠度为

$$f = \frac{|\omega_{\max}|}{h}, \quad \theta_{\max} = a \sin \frac{|\omega_{\max}|}{h}.$$

式中: ω_{\max} 为顶部挠度.

用势能原理求解结构的平衡问题, 往往是结构的全部平衡条件, 不能严格地被满足, 其误差为该解法的误差. 对桅杆结构, 各力沿风力载荷方向 y 的平衡方程 $\Sigma y = 0$, 一般不能严格满足. 以 F_y 和 R_y 分别代表载荷及反力 R_y 在 y 轴上的投影.

$$F_y = \int_0^{3h} q(z) dz + \sum_i^3 F_{y,i},$$

$$R_y = \sum_0^3 R_{y,i}.$$

最大误差

$$\delta = \frac{|F_y - R_y|}{F_y}.$$

如果存在误差, 若误差与数字计算积累误差是相同数量级, 则可认为采用上述 4 个挠度模态, 对天线杆结构求解有很高的精度.

3 实例计算

现以某航向台天线杆设计为例.

参数如下: 天线杆由 3 段不同直径的钢管构成, 每段均为 7 m, 各段直径从底部到顶部依次为 180、140、100 mm, 壁厚分别为 10、8、6 mm, 顶部有伸长节部分带有航向灯.

钢管材料: 4cr13 (取 20 °C 以下的各种参数)
拉线使用标准: φ6 mm 镀锌钢丝绳制成.

表 2 拉线绝缘子数据表

Table 2 Data sheet of insulator

参 数	数 值
工作拉力	2 000 kg
自重 P	0.003 2 kN/个

绝缘子布置: 第 1 个距接地点为 0.5 m, 其余间距为 2 m.

其中拉线下端与杆底部的距离为: $R_1 = 7.5$ m, $R_2 = 14.8$ m, $R_3 = 14.8$ m. 取天线杆底部相对于基座高 0.55 m.

将天线杆的外伸段的风载简化到节点 3, 得到一个力 Q_4 与力偶 M_4 , 取

$$Q_4 = 0.256 94 \text{ kN}, M_4 = 0.154 44 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

考虑拉线自重和风载作用对节点刚度影响, 得到 k_i 的修正值(见表 3、4).

表 3 β_i 与 k_i 数值(无风载)

Table 3 Value of β_i and k_i (without wind pressure)

i	无 风 载	
	$\beta_i / (\text{deg})$	$k_i / \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
1	44.491 1	182.750 2
2	44.936 3	95.189 73
3	33.909 9	47.145 4

表 4 β_i 与 k_i 数值(有风载)

Table 4 Value of β_i and k_i (with wind pressure)

i	有 风 载	
	$\beta_i / (\text{deg})$	$k_i / \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$
1	43.597 3	176.948 4
2	43.146 4	89.233 4
3	31.023 6	40.236 2

误差分析得: $\delta_{\max} = -0.001 3$.

误差较低, 故可认为采用上述 4 个挠度模态对天线杆求解, 具有较高的精度.

4 结束语

本文系统地介绍了采用球支承、拉索为伞状分布的天线杆在风载、自重、拉索施加外力影响下的强度与形变的分析与计算方法. 计算结果符合工程实际. 为对杆系和带拉索的结构的分析计算提供了可参考的有效的方法.

参考文献:

- [1] 斯米尔诺夫 A. Φ. 建筑力学—杆件体系 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.
- [2] 刘光栋, 罗汉泉. 杆系结构稳定 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [3] 潘良贵, 纪名刚. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [4] 李国强, 沈祖炎. 钢结构框架体系弹性及塑性分析与计算理论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.

[责任编辑: 李玲珠]

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>