

燕尾型对数天线悬索结构分析

宋宗凤^{1,2}, 梁汉新¹, 陈建军²

1. 中国电波传播研究所青岛分所, 山东青岛 266107

2. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071

摘要 为了使天线帐成形美观、结构可靠, 本文以燕尾型对数周期线天线结构为研究对象, 提出了燕尾型天线结构尺寸的一种近似的解析计算方法。在满足给定振子垂度的要求下, 利用小垂度柔索理论计算出各振子拉力, 通过分析天线边吊索在垂直面内的受力情况, 利用力矩平衡关系计算出边索各挂点的坐标值及其两端拉力。如果各振子和边索拉力值不符合要求, 则通过调整振子垂度和最短尾线来重新分析计算, 直至各拉力值都在允许范围之内, 停止迭代计算。输出天线帐边索和尾线的长度及其各索的预拉力, 为天线结构设计、材料选择和工程应用提供数据支撑。通过实际工程验证, 表明采用该方法得到的分析结果具有良好的工程应用价值。本文方法适用于大小不等、间距不等、方向不同的集中载荷作用下竖向天线边吊索的分析计算。

关键词 燕尾型天线; 结构尺寸; 边吊索; 振子; 尾线

中图分类号 TN821.6

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.25.011

Structure Analysis on the Cable of Coattails Logarithmic Antenna

SONG Zongfeng^{1,2}, LIANG Hanxin¹, CHEN Jianjun²

1. Qingdao Branch, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, Shandong Province, China

2. School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract In order to make antenna have a beautiful feature and a reliable structure, with coattails logarithmic antenna structure is used as the research object, an approximate method for calculating the structure size of logarithmic antenna is proposed. The requirement for the given dipole sag is met in the following calculations. First of all, tension value of each oscillator are obtained by using small sag flexible cable theory, and then by analyzing stressed conditions of antenna cable in the vertical plane, the coordinates of each hanging point and the tension of both ends for cable are calculated through the torque balance. If the tension value of each oscillator and cable is greater than the corresponding required value, then the cable is re-analyzed by adjusting the oscillator sag and the giving the shortest tail until the tension values are within the allowable range, and then the iterative calculation is ended. The length of antenna cable, tail, and cable pre-tension are obtained, thus the data give the support to antenna structure design, material selection, and engineering applications. Finally, through the verification of practical engineering project, the analysis results obtained by using the method have an important value for engineering applications. This method is applicable to the analysis and calculation of cable for vertical wire antenna acted by focus load with different size, distance, and directions.

Keywords coattails logarithmic antenna; structure size; cable; oscillator; tail

0 引言

对数周期天线是一种应用广泛的宽波段行波定向天线^[1]。燕尾型对数周期天线的示意如图 1 所示。天线面中间的集合线和两根边吊索分别悬挂在铁塔和地面 4 个基础上, 天线结构一般采用左右对称形式。设计该天线时, 通常需在满足天线电气尺寸要求, 如天线面宽度和高度、振子长度、振子数、相邻振子在集合线上挂点的间距、振子与集合线的夹角等的基础上计算天线面各部分结构的工程长度, 使天线结构

在架设起来后各部位受力均匀、可靠, 并使整个天线面成型美观。集合线间距和振子长度由电气设计人员给出, 对结构分析计算来说为已知条件, 故结构计算只需确定边吊索各段长度和振子尾线的长度。由于该天线面各部分都是柔索结构, 同时还要保证各振子与集合线的夹角不变, 想很精确地计算出各部分的尺寸, 并非易事。

近年来, 关于线天线结构以及相关的索网结构的分析已有一些研究成果, 如: 沈世钊等^[2]、邵天晓^[3]对单根悬索结构进

收稿日期: 2011-03-18; 修回日期: 2011-08-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(B0906001)

作者简介: 宋宗凤, 博士后, 研究方向为天线结构分析及优化设计, 电子邮箱: anybody_szf@163.com

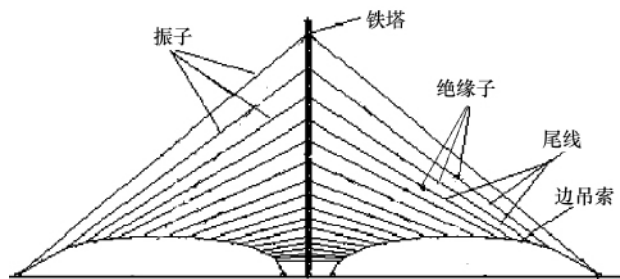


图 1 燕尾型天线结构形式

Fig. 1 Structure of coattails logarithmic antenna

行了详尽的分析;夏正春等^[4]利用力密度法和支座提升法对规则索网结构的找形分析进行了比较;韩大建等^[5]首先引入索网的平衡方程,建立了节点力平衡条件^[6],使索网结构中每个节点的外力与内力处平衡,然后又根据索元的应力-应变关系和位移协调条件^[7],建立变形协调方程的增量形式,从而对索网结构的初始平衡态与荷载态进行分析;Andre等^[8]采用非线性有限元方法对索网结构设计中的预拉力优化配置问题进行了研究;Tabarrok等^[9]采用一种可变形的悬链线单元对索网结构进行了分析研究;杨东武等^[10]对非对称索网抛物面天线进行了预拉力设计;吕普勇^[11]对水平对数周期天线进行了分析计算。然而迄今为止,关于天线面中各个振子均为斜向且各角度均不相同的天线结构分析甚少。

本文以燕尾型对数周期天线结构为研究对象,提出一种近似的解析计算方法,对其结构尺寸参数进行分析计算,并通过与实际架设的天线结构尺寸参数的实测结果进行比较,表明文中方法对于工程应用的可行和有效性。

1 斜向受力柔索的结构特点

现以某工程所要求的燕尾型对数周期天线的边吊索为分析对象。由于该天线振子的走向各不相同,导致边吊索上各振子悬挂点受力方向也不一致,这样该吊索就成为一个斜向受力的空间柔索。对边吊索结构进行分析时,坐标系的选取为:以集合线与地面的交点为坐标原点 O ,垂直地面为 y 轴(平行于集合线), x 轴平行于天线面。假设图 2 所示为天线

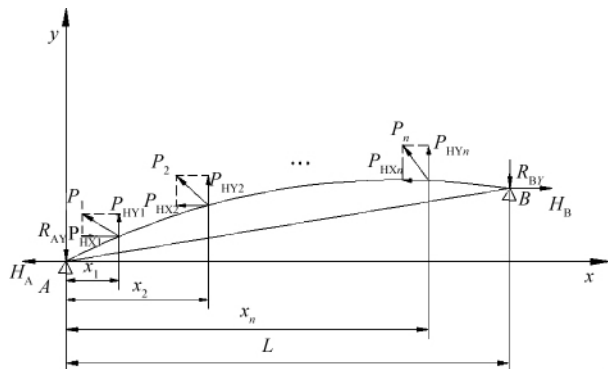


图 2 边吊索整体受力分析

Fig. 2 Force analysis of the whole cable

一侧的边索,则该边吊索受力点(悬挂点)在 x 和 y 方向均有分力。由于 x 方向有分力,则产生如下问题:(1) 边吊索水平力在整个跨距上不是一个常数;(2) 根据静力平衡,支座 A 之垂直反力 R_A 与垂度有关,在未求出垂度之前 R_A 是一个未知数;(3) 为了保证振子悬挂点在空间的位置,振子悬挂点坐标 x 须应随着边吊索垂度的大小而改变。

这 3 个问题即为斜向受力柔索与垂直受力柔索的不同之处,这些不同点将导致了计算方法的一系列不同。

2 吊索受力分析

由于燕尾型天线的天线面与地面垂直,其在架设时,边吊索上将同时承受振子尾线在边吊索上悬挂点处的集中载荷以及振子尾线和边吊索本身的自重。振子作用在边吊索上,振子的集中载荷可分解为 x 方向和 y 方向的分力(P_{HX} 、 P_{HY}),而振子自重是一个均布载荷,在此等效换算成集中力作用在振子悬挂点处。这样,边吊索在 Oxy 平面内悬挂点处的载荷为 P_{HX} 和 P_Y ,此处的 P_Y 包括 P_{HY} 以及振子自重和边吊索自重换算到悬挂点处的集中力。

在本文的分析中,边吊索水平拉力 H_A 以及索上各个悬挂点的载荷为已知条件,欲求边吊索各悬挂点的垂度。

设一根柔索支撑于 A 、 B 两点,其跨距为 L ,两点 A 、 B 高差为 Y_B 。吊索上承受 n 个斜向拉力: $P_1, P_2, \dots, P_n$,相应 x 方向和 y 方向分力为 $P_{HX1}, P_{HY1}, P_{HX2}, P_{HY2}, \dots, P_{HXn}, P_{HYn}$,如图 2 所示。边索在该组载荷的作用下,将产生较大的垂直变位即垂度。

2.1 单元垂度

取任意两相邻受力点为一个单元 i ,并以左端为单元局部坐标原点。分别以 $H_{i-1}, Q_{Y,i-1}, H_i, Q_{Y,i}$ 表示两端水平、垂直剪力,如图 3 所示。以 X_i 和 Y_i 分别表示 i 点在该坐标系中的横向和竖向坐标, Y_i 即为索单元 i 的垂度。

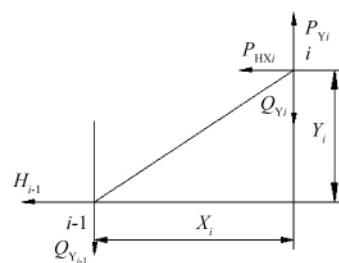


图 3 边吊索上某单元受力分析

Fig. 3 Element force analysis of cable

根据力矩的平衡关系得

$$M_i = M_{i-1} + Q_{Y,i-1} X_i - H_{i-1} Y_i \quad (1)$$

其中, M_{i-1} 和 M_i 分别为 $i-1$ 点和 i 点处的弯矩。

由于柔索不能承受弯矩,故有 $M_i = M_{i-1} = 0$,从而由式(1)推得

$$Y_i = \frac{Q_{Y,i-1} X_i}{H_{i-1}} \quad (2)$$

2.2 总体坐标系下的垂度

在总体坐标系中,经坐标变换后,式(2)被变为以下形式:

$$y = \frac{Q_{Y_{i-1}}(x_i - x_{i-1})}{H_{i-1}} + y_{i-1} \quad (3)$$

其中, $x_{i-1}, y_{i-1}, x_i, y_i$ 分别为 $i-1$ 点和 i 点在总体坐标系中的 x 值和 y 值。

2.3 吊索受力分析

设该天线共有 n 根振子,每根振子与集合线(即 y 轴)的夹角为 $\alpha_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 均不相同。各振子在集合线上挂点的坐标分别为 $h_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 则各振子在总体坐标系下的斜线方程为

$$y = h_i - x \cot(\alpha_i) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

从图 3 中显现,单元左端的垂直剪力为

$$Q_{Y_{i-1}} = R_{AY} - \sum_{k=1}^{i-1} P_{HYk} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中得

$$H_A(y_1 - y_0) - R_{AY}(x_1 - x_0) = 0 \quad (6)$$

$$(H_A + P_{HX1})(y_2 - y_1) - (R_{AY} - P_{Y1})(x_2 - x_1) = 0 \quad (7)$$

$$(H_A + P_{HX1} + P_{HX2})(y_3 - y_2) - (R_{AY} - P_{Y1} - P_{Y2})(x_3 - x_2) = 0 \quad (8)$$

$$\left(H_A + \sum_{k=1}^{n-2} P_{HXk} \right) (y_{n-1} - y_{n-2}) - \left(R_{AY} - \sum_{k=1}^{n-2} P_{Yk} \right) (x_{n-1} - x_{n-2}) = 0 \quad (9)$$

将式(4)代入式(6)一式(9),推导出

$$x_1 = \frac{H_A(h_1 - y_0)}{R_{AY}} + x_0 \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{(H_A + P_{HX1})(h_2 - y_1) + (R_{AY} - P_{Y1})x_1}{(H_A + P_{HX1})\alpha_2 + (R_{AY} - P_{Y1})} \quad (11)$$

$$x_3 = \frac{(H_A + P_{HX1} + P_{HX2})(h_3 - y_2) + (R_{AY} - P_{Y1} - P_{Y2})x_2}{(H_A + P_{HX1} + P_{HX2})\alpha_3 + (R_{AY} - P_{Y1} - P_{Y2})} \quad (12)$$

⋮

$$x_{n-1} = \frac{\left(H_A + \sum_{k=1}^{n-2} P_{HXk} \right) (y_{n-1} - y_{n-2})}{\left(R_{AY} - \sum_{k=1}^{n-2} P_{Yk} \right)} + x_{n-2}$$

$$= \frac{\left(H_A + \sum_{k=1}^{n-2} P_{HXk} \right) (h_{n-1} - y_{n-2}) + \left(R_{AY} - \sum_{k=1}^{n-2} P_{Yk} \right) x_{n-2}}{\left(H_A + \sum_{k=1}^{n-2} P_{HXk} \right) \cot(\alpha_{n-1}) + \left(R_{AY} - \sum_{k=1}^{n-2} P_{Yk} \right)} \quad (13)$$

3 求解方法

3.1 修正各点坐标

通过上面求得各点的 x 坐标值以及振子的斜线方程式(4),可以得出个悬挂点的 y 坐标值,然后重复式(10)一式(13)的计算,即可不断地修正各悬挂点 x 和 y 的坐标,直到振子垂度和最短尾线满足设计要求时停止迭代修正。

3.2 求解方法流程图

应用 Matlab 进行编程,计算流程图见图 4,其图中 f_0 (一

般为振子与尾线之和的 2%) 为电气设计人员给定的振子垂度设计值, d_f 为振子垂度允许的误差值, w_0 为给定的最短尾线控制值。

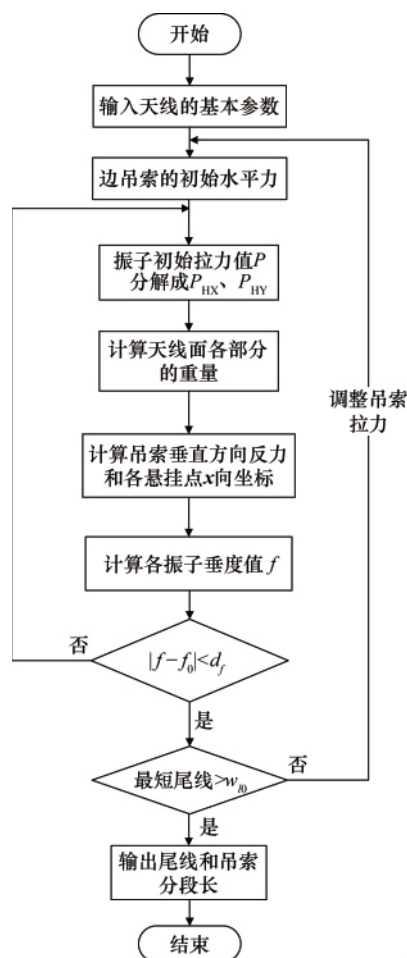


图 4 求解方法流程

Fig. 4 Flowchart of solution method

4 实例分析

为验证以上计算方法对燕尾型线天线边吊索分析计算的可行性和有效性,首先对某工程中的燕尾形线天线结构进行了理论分析计算,随后对相应的实际天线结构进行了架设试验。该天线高 30m,底端天线面宽 35m。

因该天线面为左右对称结构,故在此只对天线面右半边进行了分析。表 1 中列出了部分理论值和实验值的结果,经过对架设实验结果和分析计算的理论结果进行比较,得出各设计参数的最大误差如下:振子和尾线长度的最大误差为 1.80%、悬挂点 x 坐标值的最大误差为 1.51%、悬挂点 y 坐标值的最大误差为 8.33%、边吊索分段长的最大误差为 4.25%,均满足实际工程要求。经分析产生上述误差的原因主要有以下两个方面:(1) 分析计算时忽略或等效了某些小零件的重量;(2) 在加工制作中,会出现一些加工误差,例如振子、尾线

表 1 部分结果比较
Table 1 Comparison of partial results

振子序号	振子+尾线长度			边索上振子悬挂点 y 坐标			边索分段长		
	设计值/m	实验值/m	误差/%	计值/m	实验值/m	误差/%	设计值/m	实验值/m	误差/%
2	4.074	4.075	0.021	2.325	2.292	1.419	0.388	0.385	0.850
5	6.058	6.167	1.796	3.401	3.282	3.499	0.916	0.945	3.211
12	22.393	22.323	0.310	5.138	5.082	1.090	3.174	3.110	2.016
16	37.378	37.464	0.230	3.733	3.422	8.331	2.566	2.596	1.191

或是边吊索的实际长度比理论值长或是短。它们导致了理论值和试验值的差异,而这些误差都是不可避免的。

5 结论

本文提出的方法适用于规模大小不等、不等间距、不同方向受集中载荷作用的竖向线天线边吊索的分析计算。通过对实例结构的理论分析计算和试验测试表明,该方法在实际天线工程中应用效果良好,基本上可以保证天线安装后的成形要求。此外,该计算方法是一种近似的解析法,故应用简单,计算便捷。为此,该方法对于分析振子不等向天线面的受力分析具有良好的工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 邮电部北京设计所. 天线和馈电线[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1985.
Beijing Design Institute of the Post & Telecommunication Ministry. Antenna and feeders[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1985.
- [2] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
Shen Shizhao, Xu Chongbao, Zhao Chen. Design of suspended cable structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [3] 邵天晓. 架空送电线路的电力学计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Shao Tianxiao. Wire mechanics calculation of overhead transmission lines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

- [4] 夏正春, 李黎, 史小伟. 索网结构两种找形方法的对比分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2005, 22(1): 66-68.
Xia Zhengchun, Li Li, Shi Xiaowei. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition*, 2005, 22(1): 66-68.
- [5] 韩大建, 苏建华. 一种确定预应力索网结构几何形状与索力的方法[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 66-68.
Han Dajian, Su Jianhua. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(1): 66-68.
- [6] Leonard J W. Tension structures[M]. New York: Printed and Bound by R. R Donnelley & Sons Company, 1988.
- [7] Szabo J, Koller L, Pavlovic M N. Structural design of cable-suspended roofs[M]. Chichester: Ellis Horwo-od Limited, 1984.
- [8] Andre A U, Gil L, Roca P. A new deformable catenary element for the analysis of cable net structures[J]. *Computers & Structures*, 2006, 84(29-30): 1882-1890.
- [9] Tabarrok T C B, Qin I. Nonlinear analysis of tension structures[J]. *Computers & Structures*, 1992, 45(5): 973-984.
- [10] 杨东武, 保宏. 非对称索网抛物面天线力平衡特性及预拉力设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 308-312.
Yang Dongwu, Bao Hong. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45 (8): 308-312.
- [11] 吕普勇. 对数周期天线结构尺寸的一种近似算法[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(9): 2446-2448.
Lu Puyong. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9 (9): 2446-2448.

(责任编辑 代丽)



《科技导报》“科技纵横捭阖”栏目征稿

“科技纵横捭阖”栏目收录对学术热点、前沿,学术争论、争端,科学与文化,科学人物介绍,海外科研、留学经历,科学史,科学渊源,科学决策、学术会议、科学活动,以及科研经费、科研项目申报、考试等方面的杂谈文章。每篇文章约 2200 字,要求求实、具体,行文深入浅出、言简意赅、逻辑清晰、有理有据、观点鲜明、切中要害,可读性强。栏目责任编辑:王芷,电子信箱:wangzhi@cast.org.cn;在线投稿:www.kjdb.org。