

DOI:10.19659/j.issn.1008-5300.2019.01.005

长波天线大跨越导线的防微风振动设计^{*}

谢 飞

(西安导航技术研究所, 陕西 西安 710071)

摘 要:长波天线一般架设于陆地平原或山谷中,多采用大跨越导线等作为辐射体,在水下通信中扮演着重要角色。由微风荷载引起的导线长时间、高频小幅振动,会使导线发生疲劳破坏,从而引发断股、断线、金具连接破裂、失效等事故,具有巨大的破坏性。目前,对于长波天线的微风振动研究还未见到相关报道。文中从微风振动的起因入手,对影响长波天线导线振动的因素进行了分析,并结合实际工程对某长波天线大跨越导线进行了防振设计,所采用的多方式联合防振方法,经实测效果良好,相关经验可为后续的长波台的防振设计提供一定参考。

关键词:长波天线;大跨越导线;防振;微风振动

中图分类号:TM726.3 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2019)01-0020-05

Design of Anti-breeze Vibration for Long-wave Antenna with Large Span Conductor

XIE Fei

(Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an 710071, China)

Abstract: The long-wave antenna is typically installed in land plains or valleys and the large span conductor is used as its radiator, which plays an important role in underwater communication. The wind load excitation with great destruction will cause vibration of the conductor, and then lead to fatigue damage, which will lead to broken strands, broken wires, metal joints rupture and failure. Study on the breeze vibration of long-wave antenna has not yet been reported. Starting with the cause of breeze vibration, in this paper the factors affecting the vibration of long-wave antenna wire are analyzed, and the anti-vibration design are carried out for a long-wave antenna with large span conductor combined with a practical project. The multi-mode combined anti-vibration method adopted in this paper is proved to be effective and the relevant experience can be used for the anti-vibration of the following long-wave antenna wire.

Key words: long-wave antenna; large span conductor; anti vibration; breeze vibration

引 言

长波天线一般采用大跨越导线、复杂导线线网以及超高桅杆作为其辐射体,在水下通信中扮演着重要角色。然而,在微风荷载的激励下,导线的振动却具有巨大的破坏性^[1-3]。导线在其波节处经常受到反复的动弯应变,长时间的高频小幅振动会导致其疲劳破坏,从而引发断股、断线、金具连接破裂、失效等事故。此外,桅杆纤绳发生的微风振动还会引起桅杆共振,严重威胁天线的正常工作。因此,采取何种防振措施减轻

或防止导线上微风振动的危害已是关系整个长波天线设计成败的一个关键问题。

目前,对于导线微风振动研究多集中于输电线路^[4-7],对长波天线的微风振动研究还未见到相关报道。长波天线结构的特殊性使得它与一般输电线路的微风振动不同。本文就天线导线振动的特点进行了分析,研究了某大跨越长波天线的防振设计,给出了有效的防振方案,希望能对今后长波天线导线的防振设计提供参考。

^{*} 收稿日期:2018-09-16

1 微风振动

1.1 振动起因

当导线受到一定速度的稳定横向均匀风作用时,在导线的背风面将形成按一定频率变化且上下交替出现的气流旋涡“卡门旋涡”,该旋涡依次出现和脱离使导线受到某一频率的上下交替的冲击力。当冲击力的频率 f_F 与导线的固有频率 f_D 重合时,导线产生谐振。频率 f_F 与导线直径 d 及垂直于导线的风速 v 有关,按式(1)计算:

$$f_F = S \frac{v}{d} \quad (1)$$

式中: f_F 为微风的冲击频率,Hz; v 为垂直于导线的风速,m/s; d 为导线直径,m; S 为系数,取值一般在0.185~0.2之间,在采取防振措施时,可取0.2。

假设导线质量分布均匀、张力恒定且无阻尼,导线在微风作用下产生的振动波沿导线呈驻波分布,如图1所示。振动波形可按式(2)表示:

$$A = A_0 \sin(2\pi x/\lambda) \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中: A 为水平距离 x 处的振幅; A_0 为振幅; λ 为波长; t 为时间; f 为频率。

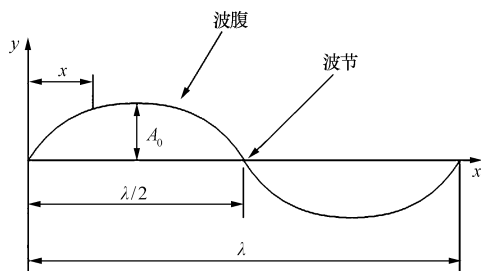


图1 导线微风振动波形

由式(2)可得导线的固有频率:

$$f_D = \sqrt{T/W}/\lambda \quad (3)$$

式中: T 为导线所受张力,N; W 为导线单位长度的质量,kg/m; λ 为波长,m。

当激励频率 f_F 与导线频率 f_D 重合时,导线发生谐振,振幅达到最大值,此时振动的半波长为

$$\lambda/2 = d\sqrt{T/W}/2Sv \quad (4)$$

对常见线路进行大量工程测试,得到表1所示的振动风速表。

表1 振动风速表

跨距/m	悬挂点高度/m	引起振动风速范围/(m·s ⁻¹)
150~250	12	0.5~4.0
300~450	25	0.5~5.0
500~700	40	0.5~3.0
700~1 000	70	0.5~8.0

由表1可知导线的起振风速下限为0.5 m/s左右,而振动上限与导线跨距及悬挂高度有关,在常见线路中一般不超过8 m/s。

1.2 危险振动的判断

目前国际上尚无对危险振动判断的统一标准。我国一般用振动角 α 或弯曲幅值 A_{89} 作为危险振动的判断标准。振动角是指在导线振动的波节处(一般指线夹出口),导线相对平衡位置的夹角,而弯曲幅值 A_{89} 是指离线夹出口89 mm处,导线相对于线夹产生振动的幅值。根据多年工作的情况,一般认为振动角小于5'(A₈₉=254)是安全的。但采用振动角这种表示方法时,使用的仪器仅能测得距离导线端口某一位置处的绝对振幅值,且只有当导线出口线夹静止时,按此计算得到的振动角才能正确反映导线的振动强度。

实际上,振动的危险性除与振幅有关外,还与振动的持续时间有关,少数几次大振幅是不会使线路发生疲劳破坏的。由于长波天线大都架设于山区,环境比较复杂,又没有同类型的线路做参考,因此,在进行防振设计时一定要掌握当地的气象条件,对天线架设地的地形、地物做充分的调研,必要时,先做室内模拟实验,架设后进行现场测振,以验证防振设计的正确性。

2 导线振动影响因素分析

长波天线导线上除串有多个绝缘子链及固定金具外,常常附有以下引线等辅助装置,图2所示为某大跨越长波天线结构,其构成要比一般输电线路复杂得多,且长波天线大都架设在开阔地带或山区山谷处,微风振动现象异常明显。在长波天线有效高度、辐射效率的要求下,其导线跨距能达到几千米,悬挂点高度往往在几百米,且具有运行张力大、垂度小的特点,这些都使长波天线导线与普通的输电线路的振动防振有所不同,分析这些特点对振动中的影响是天线防振设计的一个重要问题。

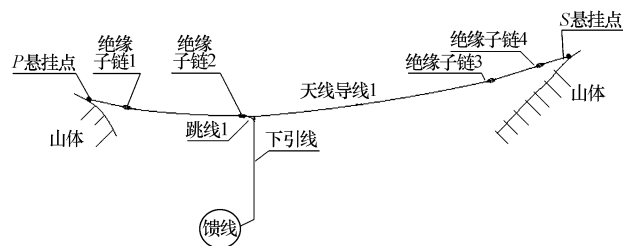


图2 某大跨越长波天线结构示意图

2.1 大跨度、小垂度对振动的影响

当导线悬挂后,其自身的重量使得它内部产生张

力,由张力基本计算公式 $T=ql^2/8c$ 可见,大的跨距 l 、单位水平投影长度上的载荷 q 以及小的垂度 c 都使得导线的张力 T 较大。较大的张力对振动的影响主要有2个方面:

- 1) 增大了导线的振动强度;
- 2) 降低了导线的疲劳极限。

首先,由于导线本身的自阻尼作用,当张力在一定范围时,导线本身消耗的振动能量将随张力的增大而减小,而振幅和振动频率、振动延续时间有所增加。长波天线导线由于跨距大、垂度小,运行张力一般在导线破断拉力的25%以上,如某大跨越天线的运行张力达到导线破断拉力的27%,振动角和弯曲幅值都有可能处在峰值,这对导线的安全极为不利。

其次,增大导线张力对导线的疲劳极限的影响可由式(4)得到:

$$\alpha_{am} = \alpha_a (1 - \alpha_m / \alpha_n) \quad (4)$$

式中: α_a 为线股材料的疲劳极限; α_m 为线股承受的平均应力; α_n 为线股材料的破坏强度; α_{am} 为线股承受应力 α_m 后的疲劳极限。

可见,当导线的张力增大(即 α_m 增大)后,导线的疲劳极限降低,使导线更易受到疲劳损坏。

2.2 高悬挂点对振动的影响

在长波天线中,导线离地高度一般可达几百米。导线距离地面越高,地面对它的摩擦力越小,能够产生稳定的均匀风的风速也就越大。这就使得起振风速的上限值变大,从而引起频率范围变大和振动延续时间变长。如悬挂高度 h 在 15 m ~ 100 m 的导线的起振风速上限可由公式 $v=0.087h+3$ 计算。目前,对于悬挂高度在 100 m 以上的导线的起振风速上限还没有可靠的估算公式,但对某山谷大跨越长波天线进行实验统计,得到引起微风振动的风速最高可达 11 m/s。

2.3 绝缘子链对振动的影响

天线导线与一般输电线路最大的不同点之一是输电线路一跨之间是一根光线,而天线却被绝缘子链分割成多段。如果绝缘子链成为固定的波节点,那么与绝缘子链连接部位的导线则经常受到较大的反复曲折的动态应力,容易造成材料的疲劳破坏。因此,必须弄清楚绝缘子链处的振动情况。

对悬挂在同一高度的其中一根串有绝缘子链的2根结构尺寸完全相同的导线进行振动测试,结果表明:

- 1) 2根导线均可产生稳定振动,振动频率基本相同。
- 2) 从波长的变化中可知,绝缘子链随着导线的振动而振动,链的整体不是振动死点,而是与导线一样形

成振动波,但由于波的传播速度因介质的不同而不同,因此,在频率相同时,导线的波长与绝缘子链的振动波长不等。由此可见,绝缘子链对振动是无害的,但也起不到减振的作用。

2.4 下引线对振动的影响

长波天线导线与一般输电线路另一个不同点是天线上带有1根几百米长的下引线。下引线是1根具有一定刚度的悬索,由天线顶部引至底部馈线。由于下引线受力较小,不易引起振动,当作用点上下振动时,会对导线起到牵制作用,抑制了导线振动。在某长波天线的防振设计中,于2根相同导线的相同位置处,对比有、无加装防振装置的区别。经实测,两处的动弯应变基本相同,这说明下引线对天线的振动起到了一定的抑制作用。

2.5 纤绳的振动对桅杆的影响

长波天线桅杆是一个高柔度、低阻尼的高耸建筑物,各层纤绳的自振频率比较接近,且悬挂高差较大,当遇到适宜的气流外界条件时,容易引起纤绳振动,而当纤绳的振动频率与其杆的固有振动频率重合时,则会导致桅杆共振,影响天线的正常工作。振动过大,时间过长,可能使桅杆遭到破坏。由于桅杆纤绳多是三方拉绳,并且悬挂高差较大,因此,各种风向和风速都很容易引起某一部分纤绳产生振动,而各纤绳的振动通过桅杆互相影响,使得纤绳振动更为敏感,起振概率更高。

综上所述,长波天线大跨度、小垂度及高悬挂点的特性会增加振动对导线的破坏性;下引线对天线振动可起到一定的抑制作用;绝缘子链对导线振动没有影响;纤绳振动会引起桅杆共振,增加振动对天线的破坏性。

3 某大跨越长波天线导线的防振设计

当导线在微风荷载下产生稳定振动时,若引起的振动角不超过许用值,则说明导线在不安装防振装置的情况下也能满足要求,反之则需要进行防振设计,使振动角小于许用值。导线的防振设计应从2个方面考虑:

- 1) 合理的结构设计;
- 2) 有效的防振系统。

3.1 合理的结构设计

合理的结构设计是减小导线振动的一个重要手段,主要包括以下3个方面。

3.1.1 减小导线运行张力

导线上的应力是静态应力和动态应力的合成,因

此,可设法尽可能减小导线所受的静态应力,使其能承受的动态应力相对变大。主要措施包括:

1)在允许的范围内,尽量减小导线所受到的水平张力;

2)在导线出口处,尽量不使用使导线弯曲的线夹;

3)在导线出口处,尽量使用轻质、可靠的连接金具。如以往天线线端多使用熔融锌合金浇注的锚固头,这种形式虽然可靠,但操作复杂,且相对较重,这对大跨越的天线来说是非常不利的。因此,在设计某山谷大跨越长波天线时,使用压接管将导线压在钢管中,通过对钢管出口的合理设计,尽可能消除导线受到的静态弯曲应力。这种方法操作简单,易于现场施工,且压接管较轻,尤其是其导线出口的设计更易于减小导线的弯曲应力。

3.1.2 优化线夹形式

由于大部分的振动破坏发生在导线悬挂点的出口处,因此,提高出口处导线的刚度,优化线夹形式是非常必要的。可通过在出口处加装护线条来提高导线的刚度,而线夹与固定连接点应设计成铰接式,使线夹可相对于固定点自由转动,消耗部分振动能量,大大减小导线在出口处受到的动弯应力,进而降低导线出口处疲劳断股的概率。

3.1.3 尽量选择自阻尼大的导线

导线的结构形式与振动强度也有很大关系,如线股层数及线股数目相同的导线,若层间保持一定的间隙,就可使导线内阻尼增大,消耗的振动能量成倍的增加。专门研制的一种自阻尼导线(也称防振导线)的阻尼可达普通导线的3~15倍,使用这种自阻尼导线,可提高导线的使用张力,减少或取消防振装置,免去安装、检测及维护防振装置的工作量,从而降低建设和维护成本。但由于长波天线的特殊性,能够满足天线强度要求的防振导线很少。

3.2 防振系统

设计有效的防振系统是减小导线振动的另一个重要手段。目前,防振装置种类很多,如防振锤、护线条、阻尼线等。其中防振锤使用最多,很多电力线路及长波天线都主要采用防振锤防振,但在跨距超过1000m的大跨越天线及实测振动较为强烈的桅杆纤绳上,若单独采用防振锤消振,实测效果不佳;若单独采用阻尼线消振,实测低频效果不佳;而护线条主要安装在防振锤或阻尼线夹中,不仅能够提高导线出口处的刚度,进而保护导线,还可增加防振锤或阻尼线的消振作用。

某山谷大跨越长波天线首次将防振锤、阻尼线及

护线条三者联合的方法应用于长波天线防振实例中,通过现场实际测振,防振效果良好。

由于桅杆天线的纤绳在靠近地锚一端不易形成稳定的均匀风,因而也不易形成振动源,而靠近桅杆一端纤绳的起振概率则较高,因此,在防振设计时,可考虑在靠近地锚一侧加一个或不加防振锤,而只在靠近桅杆一侧采取防振措施,这样既能有效地防止振动,又可节省成本。

3.3 工程实例及防振系统测试

图3为某大跨越长波天线防振系统示意图。该天线导线总长约3300m,带有4处绝缘子链及下引线,每处绝缘子链重约300kg~350kg,下引线长约400m。在该天线系统中,采用了防振锤与阻尼线联合布置的防振方案,整个导线上共安装了4处防振装置,见图3中A点处。导线上共安装3台测振仪器,分别安装在P悬挂点侧跳线夹头处(图3中B₁点)、S悬挂点侧阻尼线夹头处(图3中B₂点及B₃点)。

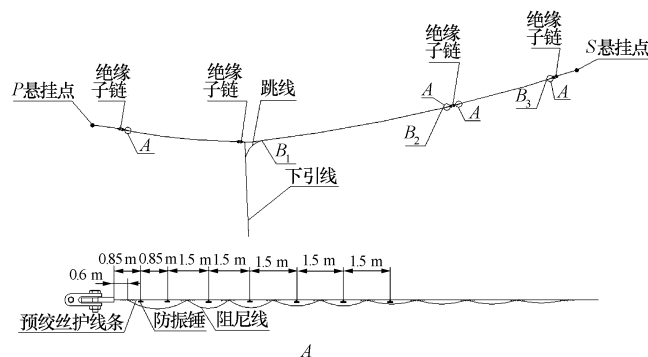


图3 某大跨越长波天线防振系统示意图

测试时间持续20天,B₁~B₃处测点最大弯曲振幅与频率的关系曲线见图4~图6。结果表明,微风振动的弯曲峰值振幅在0.007mm~0.118mm范围内,相应动弯应变在13~211范围内,低于铝包钢绞线的动弯应变许用值,因此,可认为该长波天线大跨越导线的防振措施合理可行、有效。

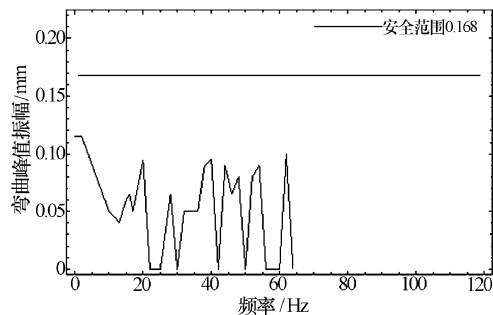
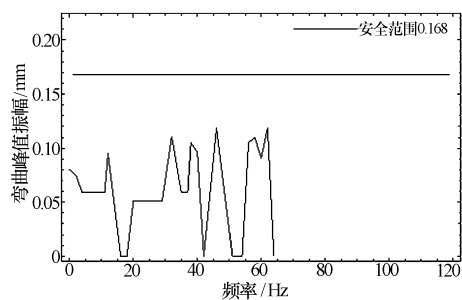
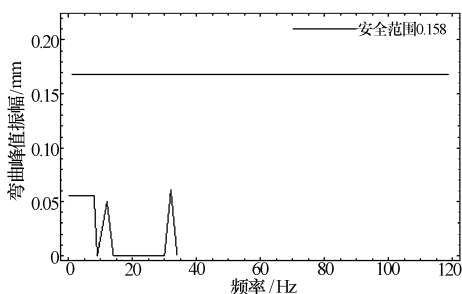


图4 B₁处最大弯曲振幅与频率关系

图5 B_2 处最大弯曲振幅与频率关系图6 B_3 处最大弯曲振幅与频率关系

防振措施的选择及安装方法多样,但要把握住防振装置安装的基本要求,即将防振装置安装在波腹点,兼顾各种振动频率,这样才能达到最佳的综合保护效果。

由于气象、地形、地物、天线结构等不同,防振装置的安装位置、数量等不仅需要理论分析,还需要通过大量的实验、实测进行验证。对于悬挂点高、跨距大的长波天线,这点更为重要。

4 结束语

长波天线导线的防振设计成功与否,直接关系到天线能否正常工作,甚至影响到天线的使用寿命。成功的防振系统可以减小振动对导线带来的疲劳损伤,满足寿命要求。

导线的防振设计是一项综合性工作。充分了解地形、地物、当地气象资料及分析导线本身的特点是进行防振设计的前提;在此基础上设计合理的防振方案,选择并安装防振装置是最大程度地减小导线振动危害的保证;另外,实验和实测也是必不可少的,它不仅可以对已设计的方案进行验证,也可为以后的设计提供经验。这三者均不可忽视。

由于长波天线系统的独特性,在进行防振设计时,应根据天线自身的特点,对影响导线振动的因素进行充分分析,判断哪些因素可以抑制振动,哪些因素

可以加剧振动,切不可盲目进行设计,防止在振动严重的地方防振措施采取不足,而在振动不严重的地方却存在冗余设计,浪费成本。

本文从微风振动的起因入手,对影响长波天线导线振动的因素进行了分析,并结合实际工程对某长波天线大跨越导线进行了防振设计,所采用的多方式联合防振方法,经实测效果良好,相关经验可为后续的长波台的防振设计提供一定参考。

参考文献

- [1] 郑玉琪. 架空输电线微风振动[M]. 北京: 北京水利水电出版社, 1987.
- [2] 张会韬. 架空输电线路微风振动危害的实例及现场测振的重要性[J]. 电力建设, 1997(9): 38-40.
- [3] 杨立秋, 李海花, 高玉竹. 架空输电线路微风振动危害分析[J]. 中国科学技术信息, 2008(12): 54-55.
- [4] 孔德怡. 基于动力学方法的特高压输电线微风振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [5] 杨振华. 大跨越输电线路微风振动分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [6] 李黎, 孔德怡, 龙晓鸿, 等. 输电线微风振动 CFD 数值仿真[J]. 工程力学, 2009, 26(S1): 235-240.
- [7] 彭提, 谢强, 张骥, 等. 微风振动下导线的影响及振动防治[J]. 广东电力, 2017(8): 104-108.

谢 飞(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事长波天线结构设计工作。

声 明

为适应我国信息化建设, 扩大本刊以及作者的知识信息交流渠道, 本刊已被封面数据库全文收录, 其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊申明, 本刊将作适当处理。