

输电导线分层应力计算方法研究

姚成¹ 袁飞¹ 齐翼² 张暕²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司 2. 中国电力科学研究院有限公司)

摘要：架空输电导线在多变自然环境中，各股单线受力错综复杂。外荷载作用下，因股线捻角、弹性模量及长度差异，应力分配不均。铝股作为导电主体，力学性能较弱，一旦应力超限极易断股，危及导线寿命。本文通过分析导线应力分布特性，提出在线路设计阶段采取导线选型、减张等措施，以减轻铝股受力，预防断股，提升输电安全可靠。为此，构建了应力均分与分层应力两种模型，对导线分层应力进行计算与对比分析。计算结果显示，分层应力模型计算的钢芯层单线轴向应力值大于应力均分模型，铝合金线层单线轴向应力值小于应力均分模型；应力均分模型的钢芯层单线股向应力值大于应力均分模型，铝合金线内层单线股向应力值大于应力均分模型，铝合金线外层单线股向应力小于应力均分模型。对于股向应力，导线从内层到外层依次减少，钢芯最大股向应力发生在钢芯中心层，铝线最大股向应力发生在铝线内层。

关键词：输电线路；导线；应力分布；股向应力；轴向应力

2025.07.DQGY
45

0 引言

随着我国经济与社会的快速发展，电能需求激增，电力供应面临严峻挑战。建设大跨越、大容量、低损耗的特高压输电系统，成为推动能源与经济协调发展的关键。在此背景下，确保输电线路的安全运行至关重要。微风振动作为一大隐患，主要导致输电线疲劳断股与磨损，直接缩短线路寿命，引发安全隐患。大跨越换线不仅耗资巨大，停电损失亦不容忽视。同时，微风振动限制了输电线的使用应力，无形中增加了运行成本。因此，采取有效措施应对微风振动，保障输电线路安全，对于维护能源安全与经济发展具有重大意义^[1-4]。

架空输电导线暴露于自然环境中，受风、雨、

冰雪等多种因素影响，受力状况复杂多变^[5-6]。由于股线间捻角、弹性模量及长度等参数的差异，外荷载作用下导线内部应力分配不均^[7-9]。特别是铝股，作为导电主体且力学强度相对较低，一旦应力超过极限极易发生断股，严重缩短导线寿命^[10-12]。深入了解导线受力时的应力分布特性，有助于在设计与制造阶段通过优化材料选择等措施预防断股，为输电系统安全稳定运行提供坚实保障。因此，探究大跨越架空输电导线内部应力分布规律具有极高的重要性。

本文基于几何关系和力学理论，提出两种导线分层应力的计算模型，开展不同工况条件下导线分层应力的计算，根据计算结果对比分析两种计算模型的优缺点，研究导线分层应力的分布特性。

1 输电导线结构力学特性

1.1 导线结构特性

导线的结构特性由自身的相关参数体现,如图1所示。其中 d_n 为股线直径, α_n 为捻角,节距 l_n 为缠绕一周股线旋绕上升的轴向距离,节圆半径 R_n 为截面圆心至第 n 层股线中心的距离, S_n 为一个节距内股线的长度,下标 n 为股线层数。同层股线具有相同的 d_n 、 α_n 、 R_n ,三者关系如下:

$$\tan \alpha_n = \frac{2\pi R_n}{l_n} \quad (1)$$

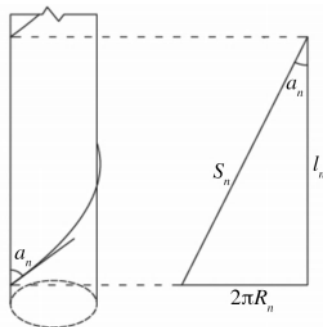


图1 输电导线缠绕示意图

1.2 导线力学特性

在分析输电导线力学特性时,首先做出如下假设^[13]:

- 1) 绞线受张力时,各股线始终紧密缠绕,不允许发生绞股、松股现象。
- 2) 各层股线间不产生相对滑移,各股线单丝螺旋角变化微小。
- 3) 绞线整体受轴向拉伸时,各股线沿自身轴线伸长,同时由于材料的泊松效应,导线直径及各股线的分布圆柱直径也产生相应的变化。

承载导线满足典型金属材料的应力-应变关系,导线拉伸时大致经历弹性变形、屈服、强化和局部形变等阶段,其中弹性变形阶段对应导线的常规工况,非弹性阶段导线因承受较大载荷,严重影响其机械及电气性能而需尽量避免出现。图2为导线中常用的两种组成材料的基本拉伸试验曲线。

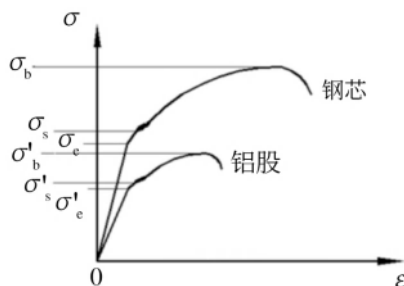


图2 导线材料的拉伸试验曲线

导线中的钢芯部分增加了导线的机械强度,使其可以承受更大的张力,从而增大线路的跨度;钢芯还增大了导线的截面面积,从而降低了高压作用下电晕对导线的影响。根据实际经验,即使铝股全部断裂,钢芯也不易破坏。事实上,绞线中钢芯分配的最大使用应力始终在其弹性范围内。因此对于钢芯来说可以严格按照弹性体考虑。一般来说,当输电线路处于正常工况下运行时,导线中的钢芯和铝股都可以认为始终处于弹性阶段。

2 输电导线分层应力计算模型

2.1 应力均分模型

架空输电导线运行过程中,在受到张力的作用下,会产生与导线方向相同的伸长。认为钢芯和铝股的应变均为 ε ,扣除温度变化引起的变形后,有:

$$(\varepsilon - \alpha_a \Delta t) E_a A_a + (\varepsilon - \alpha_s \Delta t) E_s A_s = T \quad (2)$$

根据上式计算应变 ε ,即可求出钢芯和铝股的应力如下:

$$\sigma_a = \frac{T - (\alpha_a - \alpha_s) \cdot \Delta t \cdot A_s \cdot E_s}{A_a \cdot E_a + A_s \cdot E_s} \cdot E_a \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{T + (\alpha_a - \alpha_s) \cdot \Delta t \cdot A_a \cdot E_a}{A_a \cdot E_a + A_s \cdot E_s} \cdot E_s \quad (4)$$

式中, σ_a 、 σ_s 分别为铝部、钢芯应力,MPa; A_a 、 A_s 分别为铝部、钢芯截面积, mm^2 ; α_a 、 α_s 分别为铝、钢线膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; E_a 、 E_s 分别为铝、

钢弹性模量, MPa; Δt 为使用温度与制造温度的差别, $1/^\circ\text{C}$; T 为导线张力, N。

在给定导线张力的情况下, 根据式 (3)、式 (4) 即可计算出钢芯和铝部的应力。显然, 应力均分模型简洁, 便于计算, 但由于认为钢芯和铝部的应力均分, 未考虑股线不同层受力区别, 无法计算出钢芯和铝部各股层的应力。另外, 该模型在计算时未考虑各层捻角, 即认为各股单线受力均为轴向方向, 因此计算的应力为各股单线轴向应力。

2.2 分层应力模型

架空输电导线运行过程中, 在受到张力的作用下, 会产生与导线方向相同的伸长。当导线由多股扭绞成绞线时, 受拉力后的线股伸长量与轴线方向的伸长量并不相同, 因为线股间会发生相对的滑动。

假定绞线受拉力后各股无不同的塑性变形, 且各层线股间无挤压力和摩擦力, 各线股仅产生弹性伸长。图 3 所示为一个节距为 1 的单股绞线受拉伸展开图。未受力前, 节距 1 对应的线股长度 L 为:

$$L = \sqrt{[\pi(D_n - d_n)]^2 + l^2} \quad (5)$$

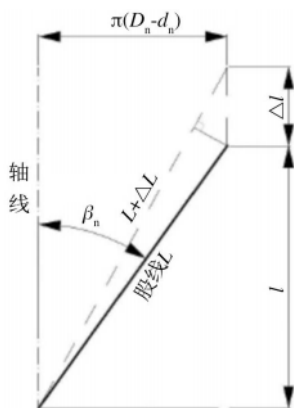


图 3 单股绞线受拉伸展开图

当绞线受轴向张力后, 各线股均产生相同的轴向弹性伸长量 Δl , 则线股长度由 L 变成了 $L + \Delta L$ 。 ΔL 与 Δl 之间的关系可利用式 (5) 对 L 和 l 微分取近似值为:

$$\Delta L \approx \frac{l}{L} \Delta l = \Delta l \cos \beta_n \quad (6)$$

线股的伸长率可写为:

$$\varepsilon'_n = \frac{\Delta L}{L} = \frac{l}{L^2} \Delta l = \left(\frac{l}{L}\right)^2 \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon \cos^2 \beta_n \quad (7)$$

式中, ε 为线股的轴向伸长率, 其比股向伸长率要大。

当只有弹性伸长时, 线股截面上的股向应力为线股单线弹性模量与股向弹性伸长率之积, 可写为:

$$\sigma'_n = \varepsilon'_n \cdot E_n = E_n \varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n \quad (8)$$

在上述变形中, 有一部分变形是温度变化引起的, 所以在计算线股应力时应扣除这部分的温度应力, 则第 n 层线股的股向应力为:

$$\sigma'_n = (\varepsilon \cdot \cos^2 \beta_n - \alpha_n \cdot \Delta t_n) E_n \quad (9)$$

设同层线股的股径为 d_n , 股数 z_n , 扭角为 β_n , 则该层顺轴线方向的张力为:

$$\begin{aligned} t &= \frac{\pi}{4} d_n^2 z_n \sigma'_n \cos \beta_n \\ &= \frac{\pi}{4} d_n^2 z_n E_n (\varepsilon \cos^3 \beta_n - \alpha_n \Delta t_n \cos \beta_n) \end{aligned} \quad (10)$$

整根导线的轴向张力 T 为包括中心线在内的各层张力之和, 可写为:

$$\begin{aligned} T &= \sum t \\ &= \frac{\pi}{4} \sum [z_n d_n^2 E_n (\varepsilon \cos^3 \beta_n - \alpha_n \Delta t_n \cos \beta_n)] \end{aligned} \quad (11)$$

在轴向张力已知的情况下, 根据式 (11) 可以求出应变 ε , 代入式 (9)、式 (10) 即可计算出张力作用下的各层股向应力、轴向应力和轴向张力。

2.3 两种模型计算分析

选择某大跨越工程选用的导线 JLHA1/G6A-500/280, 导线参数如表 1、表 2 所示, 悬挂点平均运行张力 21.0% 保证拉断力 (计算拉断力与新线系数的乘积)。

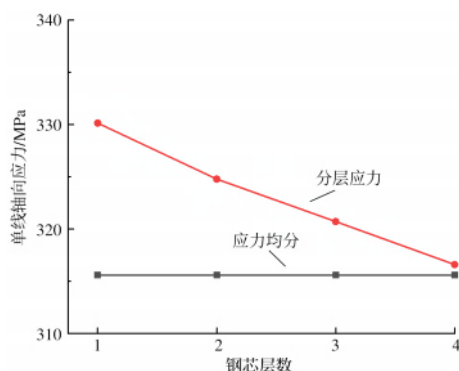
表 1 导线技术参数

型号	JLHA1/G6A-500/280
导线直径 (mm)	36.51
导线总截面积 (mm ²)	786.94
铝合金/钢截面积 (mm ²)	502.25/284.70
计算拉断力 (kN)	680.4
单位长度质量 (kg/km)	3636.5
新线系数	0.95
使用温度与制造温度之差 (°C)	0

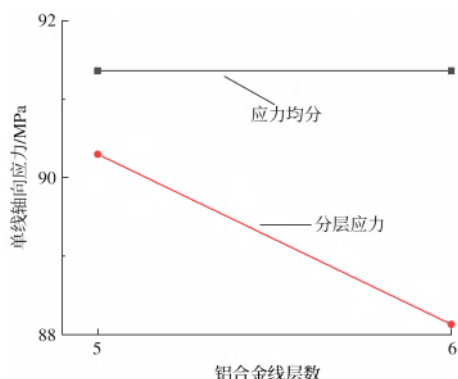
表 2 导线结构参数

结构	绞层	单线根数/ 单线直径 (mm)	节径比	捻角 (°)	弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	泊松比
钢芯	第 1 层	1/3.13	-	-	190	11.5	0.28
	第 2 层	6/3.13	20	5.98	190	11.5	0.28
	第 3 层	12/3.13	18	7.95	190	11.5	0.28
	第 4 层	18/3.13	16	9.55	190	11.5	0.28
铝合金股	第 5 层	21/3.65	14	11.11	55	23	0.3
	第 6 层	27/3.65	12	13.26	55	23	0.3

图 4 为基于两种模型的导线各层轴向应力计算值对比图。可知，对于钢芯层单线轴向应力，应力均分模型认为各层应力相同，应力值均为 315.61MPa，而分层应力模型的应力值大于应力均分模型。对于铝合金线层单线轴向应力，应力均分模型认为各层应力相同，应力值均为 91.36MPa，而分层应力模型的应力值小于应力均分模型。这主要是因为与应力均分模型相比，分层应力模型考虑各层的捻角不同，而由于钢芯层捻角要小于外部铝合金线层，导致在计算时钢芯层张力的占比增大，从而导致分层应力模型钢芯层单线轴向应力偏大，铝合金线层单线轴向应力偏小。



(a) 钢芯层单线轴向应力



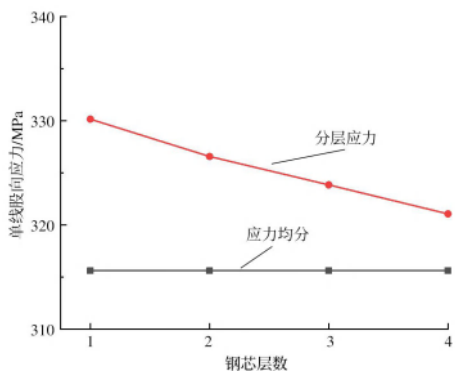
(b) 铝合金线层单线轴向应力

图 4 导线各层轴向应力

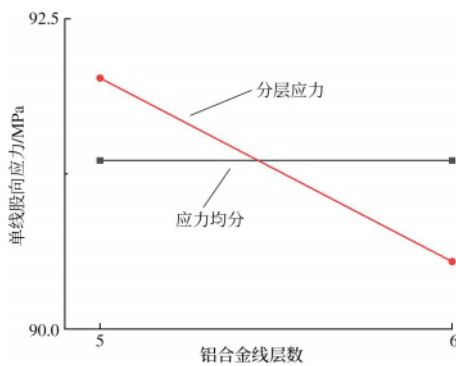
根据计算结果可知，分层应力模型与应力均分模型的钢芯层单线轴向应力计算值差约为 1~15MPa，且在钢芯中心层差值最大，钢芯最外层差值最小。分层应力模型与应力均分模型的铝合金线层单线轴向应力计算值差约为 1.1~3.2MPa，且在铝合金线外层差值最大，铝合金线内层差值最小。

图 5 为基于两种模型的导线各层股向应力计算值对比图。由 2.1 分析可知，应力均分模型未考虑单线的绞制及捻角，故计算的轴向应力与股向应力值相同。由图 5 可知，对于钢芯层单线股向应力，应力均分模型认为各层应力相同，应力值仍为轴向应力的计算值 315.61MPa，而分层应力模型的应力值大于应力均分模型。对于铝合金线层单线股向应力，应力均分模型认为各层应力相同，应力值仍为轴向应力的计算值 91.36MPa，而分层应力模型计算的铝合金线内层单线股向应力大于应力均分模型，铝合金线外层单线股向应力小于应力均分模型，其原因与轴向应力类似。而出现的特殊点原因是，单线的轴向应力实际上是股向应力的分量，因此计算的股向应力值均大于轴向应力值，由于应力均分模型认为股向应力值与轴向应力值一致，导致股向应力值偏小，两种因素综合作用下，造成了基于不考虑泊松比的分层应力模型计算

的铝合金线内层单线股向应力值大于应力均分模型。



(a) 钢芯层单线股向应力



(b) 铝合金线层单线股向应力

图 5 导线各层股向应力

根据计算结果可知，分层应力模型与应力均分模型的钢芯层单线股向应力计算值差约为 5~15MPa，且在钢芯中心层差值最大，钢芯最外层差值最小。分层应力模型与应力均分模型的铝合金线层单线股向应力计算值差约为 0.7~0.8MPa。

两种模型的优缺点如表 3 所示。应力均分模型较为简洁，计算方便，但是未考虑股线不同层的受力区别，而分层应力模型虽然计算复杂，需考虑导线结构、材料属性等参数，但可计算出不同层单线的受力。相比而言，分层应力模型与实际导线受力情况更为接近。

表 3 导线应力模型对比

应力模型	应力均分模型	不考虑泊松比的分层应力模型
主要原理	单线均分应力	导线分层特性
优点	模型简洁，便于计算	考虑不同层单线受力
缺点	未考虑股线不同层受力区别	模型复杂，需考虑导线结构、材料属性

3 导线分层应力特性分析

根据上文提出的分层应力模型，JLHA1/G6A-500/280 导线在悬挂点平均运行张力 21.0% 保证拉断力时的导线各层应力和张力计算值如图 6、图 7 所示。

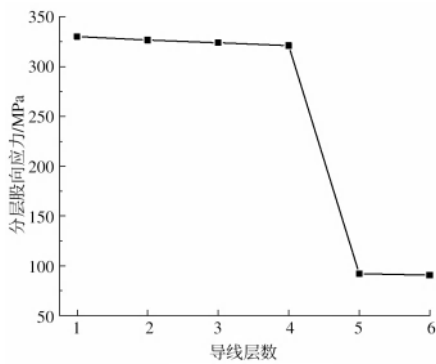


图 6 导线各层股向应力

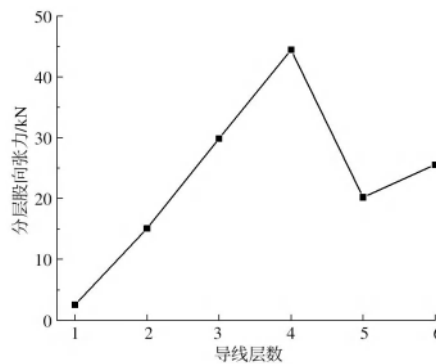


图 7 导线各层股向张力

可知，对于股向应力，导线从内层到外层依次减少。钢芯层股向应力在 320~330MPa，其中中心层股向应力最大，为 330.2MPa；铝合金线层股向应力在 90~92MPa，其中铝合金线内层应力最大，为 92.0MPa。对于股向张力，钢芯层股向张力从内层到外层依次增大，范围在 2~45kN，其中钢芯最外层股

向张力最大, 为 44.5kN; 铝合金线层股向张力同样从内层到外层依次增大, 范围在 20~26kN, 其中铝合金线最外层股向张力最大, 为 25.6kN。

综上所述, 钢芯最大股向应力发生在钢芯中心层, 铝合金线最大股向应力发生在铝合金线内层。由于钢的抗拉强度和疲劳强度要远高于铝, 实际导线的疲劳断线等事故也都是发生于铝线层。

4 结束语

本文分析输电导线的结构特性和力学特性, 提出两种导线分层应力的计算模型, 对比分析两种计算方法的优缺点, 研究导线分层应力的分布特性, 具体结论如下:

1) 分别建立了应力均分模型和分层应力模型, 实现了导线分层应力的计算。

2) 分层应力模型计算的钢芯层单线轴向应力值大于应力均分模型, 铝合金线层单线轴向应力值小于应力均分模型; 应力均分模型的钢芯层单线股向应力值大于应力均分模型, 铝合金线内层单线股向应力值大于应力均分模型, 铝合金线外层单线股向应力小于应力均分模型。

3) 对于股向应力, 导线从内层到外层依次减少, 钢芯最大股向应力发生在钢芯中心层, 铝线最大股向应力发生在铝线内层。

参考文献

[1] Hagedorn P. On the computation of damped wind-excited vibrations of overhead transmission line[J]. Journal of Sound and Vibration. 1982, 83 (2): 253-271.

[2] Diana G, Falco M. On the forces transmitted to a vibrating cylinder by a blowing fluid mechanical[J].

Meccania, 1971, 6 (1): 9-22.

[3] 徐乃管, 王景朝, 宗福琳. 导线自阻尼的测量及实用归算方法 [J]. 中国电力, 1995 (2).

[4] Lu M L, Chan J K. An Efficient Algorithm for Aeolian Vibration of Single Conductor With Multiple Dampers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (3): 1822-1829.

[5] Claren R, Diana G. Mathematical analysis of transmission line vibration[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1969 (12): 1741-1771.

[6] Vecchioarelli J, Currie I G. Computational analysis of aeolian conductor vibration with a stockbridge-type damper[J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14 (4): 489-509.

[7] Bishop R, Hassan A. The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid[J]. Proceedings of the Royal Society, 1964 (277).

[8] Hartlen R T, Currie I G. Lift oscillation model for vortex-induced vibration[J]. Engineering Mechanics, 1970, 96 (2): 577-591.

[9] W J Kim, N C Perkins. Two-dimensions vortex-induced vibration of cable suspension of elastic systems[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1981 (48): 959-964.

[10] 孔德怡. 基于动力学方法的特高压输电线路微风振动研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[11] 杨振华. 大跨越输电线路微风振动分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[12] 朱光荭. 输电线微风振动与疲劳寿命 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[13] 李黎, 叶志雄, 孔德怡. 输电线微风振动分析方法能量平衡法的改进研究 [J]. 工程力学, 2009, 26 (S1): 176-180, 197.

(收稿日期: 2024-10-22)