铝合金芯铝绞线载流量简化计算的研究

叶芳　马崇　张健

（天津市电力公司电力科学研究院，天津　300384）

摘要　针对铝合金芯铝绞线载流量计算复杂的特点，本文提出了一种铝合金芯铝绞线载流量的简化算法。首先研究了计算导线载流量的理论方法，根据钢芯铝绞线和铝合金芯铝绞线的特点分析两者在载流量计算中的差异，提出铝合金芯铝绞线载流量的简化算法，并使用该简化计算法计算了某种铝合金芯铝绞线在不同环境温度下的载流量值。然后对该种导线进行载流量试验记录载流量实测值，对比载流量计算值与实测值，分析简化计算法产生误差的原因。试验结果表明，该简化算法计算量小且计算精度满足工程要求，为铝合金芯铝绞线载流量的分析提供参考。

关键词：铝合金芯铝绞线；钢芯铝绞线；载流量；Morgan 公式

The Research on Simplified Calculation for Current-Carrying Capacity of Aluminum Alloy Core Aluminum Strand Conductor

Ye Fang　Ma Chong　Zhang Jian

(Tianjin Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, Tianjin　300384)

Abstract　According to the characteristics that the current-carrying capacity calculation of aluminum alloy core aluminum stranded conductor is complicated, the paper proposes a simplified method for calculating the current-carrying capacity of the wire. It is studied the theoretical method for calculating the current-carrying capacity of the wire, according to the characteristics of steel core aluminum stranded wire and aluminum alloy cored aluminum strand, the differences in current-carrying calculation is analyzed, it proposed the calculation method for current-carrying of aluminum alloy core aluminum stranded conductor can be simplified, and the method is used to calculate some aluminum alloy core aluminum stranded in different ambient temperature. Then the experiment of current-carrying capacity on the wire is done, the experimental value is recorded, it compared the calculated value and experimental value, it analyzed the reasons of errors of simplified calculation method. The experimental results show that the simplified method amount of calculation is significantly reduced, and the calculation accuracy, meeting the requirements of engineering, which can be a reference for the current-carrying capacity analysis of aluminum alloy core aluminum stranded conductor.

Keywords：aluminum alloy core aluminum strand conductor；steel-cored aluminum strand conductor；current-carrying capacity；the morgan formula

铝合金芯铝绞线采用 53%IACS 的高强度铝镁硅铝合金替代普通钢芯铝绞线中的钢芯和部分铝线，导线外部铝线与普通钢芯铝绞线的铝线相同。铝合金芯铝绞线因为具有电阻损耗低、弧垂性能好、无磁滞损耗、过载性能好、机械性能稳定等特点在近年来得到大规模推广运用[1]，但其载流量计算一直是工程难点。

载流量计算是确定架空线路输送容量的理论基础，传统计算载流量的方法复杂，不利于工程实际，因此一般钢芯铝绞线的载流量是通过试验获得交直流电阻等参数再根据导线服役的环境参数进行计算，针对不同型号不同环境温度下的钢芯铝绞线载流量均有参考值，方便工程应用。但是对于铝合金芯铝绞线来说，其载流量计算没有交直流电阻等试验参数和参考载流量表，而且传统载流量计算方法计算复杂，因此本文利用导体的稳态热平衡方程和 Morgan 公式[2]推导铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系，通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算铝合金芯铝绞线的载流量。

1　导线载流量计算方法

影响导线实际载流量的因素主要有两个方面：

外界环境条件（如风速、环境温度、环境湿度、日照强度等）；导线性能和尺寸（如导线的吸热系数、辐射系数、导线允许温度、导线直径等）。

1.1 载流量计算方法

架空导线载流量的计算是由导线的发热和散热的热平衡推导出来的，即导线中没有通过电流时，其温度与周围介质温度相等；当通过电流时，其内部产生的热量一部分使导体本身的温度升高，另一部分散失到周围介质中，他们之间呈动态分配，直至导体发热过渡到稳态[3]。

导体的稳态热平衡方程如下：

$$p_c + p_r = p_s + I^2 R_T \tag{1}$$

对已知环境温度和给定的导体工作温度下的最大稳态电流 I，即导体载流量计算公式如式（1）所示，载流量取决于导体类型、电阻、允许最高工作温度和环境参数（如环境温度等）[4]。

$$I = \sqrt{\frac{p_r + p_c - p_s}{R_T}} \tag{2}$$

式中，p_r 为辐射热损耗，W/m；p_c 为对流散热损耗，W/m；p_s 为太阳辐射热，W/m；R_T 为工作温度下的导体单位长度交流电阻，Ω/m。

1）辐射热参数的计算

导体表面向周围空间辐射热损耗由 下式计算：

$$p_r = s \times \pi \times D \times k_e (T_c^4 - T_o^4) \tag{3}$$

由于自然风的存在，强迫对流散发出的热损耗由式（4）可知：

$$p_c = \lambda \times N_u \times D \times \pi (T_c - T_o) \tag{4}$$

导体吸收的太阳辐射热由式（5）计算：

$$p_s = \gamma D S_i \tag{5}$$

2）交流电阻的计算

交流电阻 R_T 总是以直流电阻 R_d 乘以交直流电阻比 β 表示，即：

$$R_T = \beta R_d \tag{6}$$

（1）直流电阻。计算直流电阻时忽略铝合金芯和钢芯的导电性，则铝导体 20℃的直流电阻计算式如下：

$$R_{20} = \frac{4\rho_{20}\lambda_{am}}{\pi d^2 N} \tag{7}$$

工作温度下导体的直流电阻如下：

$$R_d = R_{20}\left[1 + \alpha\left(T_c - 20\right)\right] \tag{8}$$

式中，d 为铝单线直径，mm；ρ_{20} 为铝单线的电阻率，Ω·m；N 为铝线总根数；α 为温度系数，1/℃；

λ_{am} 为铝线平均绞入率按各层铝线平均节距比计算。

（2）交直流电阻比。直流电阻与其总增量（由涡流和磁滞损耗引起的电阻增量和由集肤效应引起的电阻增量之和）之和相对于直流电阻之比率即交直流电阻比，采用 Morgan 公式计算，如式（9）所示：

$$\beta = 1 + \frac{\Delta R_1}{R_d} + \frac{\Delta R_2}{R_d} \tag{9}$$

ΔR_1 是涡流和磁滞引起的电阻增量，由式（10）计算[5]：

$$\Delta R_1 = \frac{8\pi^2 a f \left(\sum_1^m \frac{n_m}{l_m}\right)^2 \times 10^{-7}}{N^2} \cdot \mu \tan\delta \tag{10}$$

式中，a 为钢芯截面，mm²；m 为铝线层数；n_m 为第 m 层铝线根数；l_m 为第 m 层铝线节距长，mm；N 为导线中铝线总根数；μ为钢芯复合导磁率；$\tan\delta$ 为磁损耗角正切。

ΔR_2 是集肤和邻近效应引起的电阻增量。由于导线的集肤效应，将铝合金芯和钢芯导电性近似为零，集肤和邻近效应引起的相对电阻增量由式（11）计算：

$$\frac{\Delta R_2}{R_d} = Y_s (1-\phi)^{-1/2} - 1 \tag{11}$$

式中，Y_s 为由集肤效应引起的相对电阻增量，见式（12）：

$$Y_s = 1 + a(z)\left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z)\right] \tag{12}$$

ϕ为由邻近效应引起的相对电阻增量，如式（13）至式（21）所示：

$$\phi = \lambda y^2 \left[\frac{z^2(2-\beta)^2}{z^2(2-\beta)^2 + 16\beta^2}\right] \tag{13}$$

$$\lambda = 1 - \beta\left(1 + \frac{z^2}{4}\right)^{-1/4} + \frac{10\beta^2}{20 + z^2} \tag{14}$$

$$a(z)=\frac{7z^2}{(315+3z^2)}\quad(0<z<5)\qquad(15)$$

$$b(z)=\frac{56}{(211+z^2)}\quad(0<z<5)\qquad(16)$$

$$z=8\pi^2\left[\frac{D-d_s}{2}\right]^2 f\cdot r\qquad(17)$$

$$\beta=\frac{(D-d_s)}{D}\qquad(18)$$

$$y=\frac{D}{s}\qquad(19)$$

$$r=\frac{1}{AR\times10^9}\qquad(20)$$

$$A=\pi\frac{D^2-d_s^2}{4}\qquad(21)$$

式中，D 为导线直径，mm；d_s 为铝合金芯或钢芯直径，mm；s 为导线之间距离，mm。

2 铝合金芯铝绞线载流量的简化计算

导线载流量计算方法复杂，在工程中不利于操作，但钢芯铝绞线载流量计算已经很成熟，针对不同截面、不同工作温度的钢芯铝绞线均有载流量表作为参考。下面从载流量计算方法上寻找铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线的差别，以期通过钢芯铝绞线载流量推算出铝合金芯铝绞线载流量数值。以铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 为例进行计算，先将两种导线主要计算参数列于表 1。

表 1 导线主要技术参数对比

导线型号	外径 D /mm	铝单线直径 /mm	铝线总根数	各层铝线平均节径比	铝合金芯/钢芯直径 /mm
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	33.75	3.75	2	12.1	16.15
钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7	29.3	3.26	4	16.5	9.77

由式（3）至式（5）可以看出，热损耗部分与导体直径和环境参数有关，相同环境条件下的铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线环境参数均相同，因此，根据公式（3）至式（5）可知，两者的辐射热参数之比即两者外径比：

$$\frac{p_{LH}}{p_G}=\frac{D_{LH}}{D_G}\qquad(22)$$

即

$$p_{LH}=1.152p_G\qquad(23)$$

根据式（7）、式（8）可知，铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 的直流电阻比为

$$\frac{R_{dLH}}{R_{dG}}=\frac{\lambda_{amLH}}{d_{LH}^2N_{LH}}\cdot\frac{d_G^2N_G}{\lambda_{amG}}\qquad(24)$$

即

$$R_{dLH}=0.73R_{dG}\qquad(25)$$

铝合金芯铝绞线是铝基体材质[6]，可避免由于涡流、磁滞损耗带来的电能损失，因此铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 无涡流和磁滞引起的电阻增量ΔR_1。

由于铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 的导线间距离 S 相差不大可以忽略，仅将导线直径 D，铝合金芯或钢芯直径 d_s 代入式（17）至式（21）进行计算，得到以下数据：

$$A_{LH}=1.151A_G\qquad(26)$$

$$r_{LH}=0.754r_G\qquad(27)$$

$$y_{LH}=1.152y_G\qquad(28)$$

$$\beta_{LH}=0.782\beta_G\qquad(29)$$

$$z_{LH}=0.6125z_G\qquad(30)$$

将上述结论代入式（12）至式（16），将非线性部分进行线性拟合，推导出集肤和邻近效应引起的电阻增量，得出铝合金芯铝绞线和钢芯铝绞线交直流电阻比的关系：β_{LH}=0.782β_G，进而算出两导线交流电阻比的关系：

$$R_{\mathrm{TLH}} = 0.571 R_{\mathrm{TG}} \qquad (31)$$

将式（23）、式（31）代入式（2）中，得到：

$$I_{\mathrm{LH}} = 1.42 I_{\mathrm{G}} \qquad (32)$$

因为钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 载流量已知，从而铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量可由钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 载流量和式（32）计算出，计算结果如表 2 所示。

表 2　铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量计算结果

导线型号	工作温度/℃			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	552	869	1083	1250
钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7	389	612	763	880

3　实验验证

对铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 进行试验，测量其载流量值，以此验证表 2 中计算结果。

采用环境参数值为[7-8]：风速 v=0.5（m/s）；日照强度 S_i=1000（W/m²）；吸热系数 r =0.45；黑体辐射系数 K_e=0.45；导体温度 $\theta_c = 60 \sim 90$℃；环境温度 $\theta_0 = 45$ ℃。

利用实验测得铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 的载流量数值列于表 3。

表 3　铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量试验值结果

载流量	工作温度/℃			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	567	879	1085	1246

将表 2、表 3 中的数据作对比，如图 1 所示。

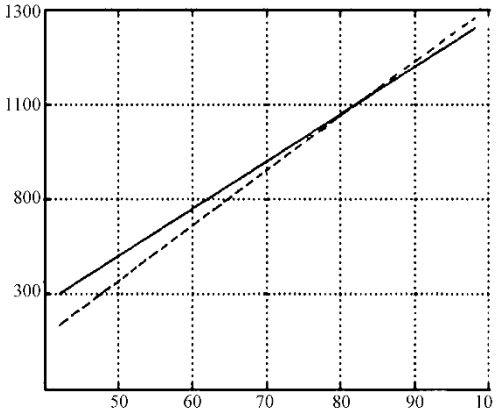


图 1　铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量计算值与试验值的对比

图 1 中虚线表示铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量的试验结果，实线表示该导线载流量的计算结果。可以看出，当工作温度高载流量大时，计算结果与试验结果很接近，误差较小，而工作温度较低载流量小时，计算结果与试验结果偏差增大。产生此现象的原因是由于 Morgan 公式不是纯线性公式，而在计算过程中为了简化计算，使相应型号的铝合金芯铝绞线载流量和钢芯铝绞线载流量关系直观明了，利用了线性拟合，因此舍去的非线性部分造成了误差出现。该舍去部分在载流量大时所占比重很小，误差不明显，但是随着载流量的减小，误差逐渐增大；但是通过上述结论可知，利用载流量简化计算方法造成的误差最大仅为 2.6%，可以满足工程需要，而且大大缩短了计算时间。

4　结论

本文利用理论公式推导了铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系，通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算出铝合金芯铝绞线的载流量，并通过实际条件下的试验对该方法进行了验证，验证结果表明该简化方法数据可靠，计算简单，可以运用到工程实践中，其计算的快捷有效性保证了在输电线路安全可靠运行条件下最大限度地提高线路的输送容量。

参考文献

[1] 张瑞永，赵新宇，李明，等. 输电线路新型节能导线的推广应用[J]. 电力建设, 2012, 33(6): 89-92.

[2] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
[3] 张辉, 韩学山, 王艳玲. 架空输电线路运行载流量分析[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 31-35.
[4] 陆鑫淼, 曾奕, 盛戈皞, 等. 基于导线温度模型的线路动态容量误差分析 [J]. 华东电力, 2007, 35(12): 47-49.
[5] 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 92-96.
[6] 韩晓燕, 张虹. 架空导线摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 河南电力, 2010(1): 33-36, 49.
[7] 韩芳, 徐青松, 侯炜, 等. 架空导线动态载流量计算方法的应用[J]. 电力建设, 2008, 29(1): 39-43.
[8] 林玉章. 高压架空输电线路载流量和温度计算 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 23-27.

作者简介: 叶芳（1986-），女，天津市人，硕士研究生，助理工程师，主要从事线路设计、检修及故障分析工作。