

电线电缆

WIRE & CABLE

主办单位:上海电缆研究所有限公司
1958年创刊, 线缆行业学术交流平台

- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- 中国期刊全文数据库全文收录期刊
- 中文科技期刊数据库(全文版)收录期刊
- CACJ中国应用型入库期刊



ISSN 1672-6901
CN 31-1392/TM



网址: jwc.cwc.net.cn

邮箱: wirecable@secri.com

电话: 021-5117 9609

高压电缆蛇形敷设计算分析

冯涛 陈雅琴 李浩浩 董琦

Calculation Analysis of Serpentine Laying of High-Voltage Cables

FENG Tao, CHEN Yaqin, LI Haohao, DONG Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压电缆敷设中牵引力及侧压力算法的优化研究

Study on Calculation Algorithm of Pulling Force and Lateral Pressure in High-Voltage Cable Laying Process

电线电缆. 2021, 64(6): 42-47 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.06.011>

抽水蓄能电站高落差竖井环境下高压电缆敷设方案

High Voltage Cable Laying Scheme for Pumped Storage Power Station with High Drop Shaft Environment

电线电缆. 2022, 65(5): 51-54 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202205011>

高压输电电缆敷设方式的选择研究

Research on the Selection of Laying Methods for High-Voltage Transmission Cables

电线电缆. 2021, 64(4): 29-32 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.04.008>

大长度高压电力电缆在海底电缆登陆段的设计与应用

Design and Application of Large Length High Voltage Power Cable in Landing Section of Submarine Cable

电线电缆. 2021, 64(1): 10-13,23 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.01.003>

基于短路容量法的高压电缆平滑铝套厚度设计

Thickness Design of Smooth Aluminum Sleeve for High Voltage Cables Based on Short-Circuit Capacity Method

电线电缆. 2024, 67(5): 23-26 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202405005>

高压电力电缆护套烧蚀原因分析及解决方法

Cause Analysis and Solutions for Sheath Ablation in High Voltage Power Cables

电线电缆. 2025, 68(4): 68-72 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240094>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



冯涛, 陈雅琴, 李浩浩, 等. 高压电缆蛇形敷设计算分析[J]. 电线电缆, 2025, 68(6): 78-82.

FENG T, CHEN Y Q, LI H H, et al. Calculation analysis of serpentine laying of high-voltage cables[J]. Wire & Cable, 2025, 68(6): 78-82.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240121

高压电缆蛇形敷设计算分析

冯涛, 陈雅琴, 李浩浩, 董琦

(江苏上上电缆集团有限公司, 溧阳 213300)

摘要: 为避免高压电缆运行中轴向力和电动力对电缆的损伤, 以 220 kV 2 500 mm² 电缆为例, 分析了电缆蛇形敷设时半蛇形弧节距、蛇形弧幅等参数对轴向力、金属套伸缩应变的影响。分析结果表明, 蛇形弧幅和半蛇形弧节距对轴向力控制有重要作用。同时, 计算了电缆短路时的电动力并进行了电缆夹具布置的校验, 通过设置合理的蛇形敷设参数, 可以有效吸收轴向力带来的形变。本文可为电缆蛇形敷设和校验提供参考。

关键词: 蛇形敷设; 蛇形节距; 轴向力; 短路电动力校验

中图分类号: TM752

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)06-0078-05

0 引言

随着负荷、周围环境温度变化, 以及短路故障等因素的影响, 电缆会产生热胀冷缩现象, 在电缆线芯内部产生轴向力。轴向力产生的伸缩易集中到电缆的弯曲处, 产生不规则的热伸缩滑移。电缆在轴向力的作用下将反复出现弯曲变形现象, 使电缆金属护套产生疲劳应变, 出现弯曲变形甚至开裂的情况, 影响电缆的运行安全^[1-7]。此外, 电缆的敷设和固定还需要考虑电缆在短路时产生的电动力。

高压电缆采用连续蛇形敷设, 将热伸缩滑移量分散到各个蛇形弧上而不是某一局部弯曲处, 利用蛇形的弧幅宽度来吸收电缆的热伸长量或收缩, 能有效吸收由轴向力带来的形变, 减小电缆轴向推力, 将电缆因受热胀冷缩而对安全运行造成的威胁降低至最小。

目前, 高压电缆本体的结构、工艺相关的研究较多, 电缆安装敷设文献较少。本文通过理论计算分析电缆运行时受到的轴向力和电动力, 为合理设置电缆蛇形敷设参数提供理论依据。

1 电缆敷设参数计算

220 kV 2 500 mm² 电缆的参数见表 1。

1.1 直线敷设轴向力

当电缆线芯温度变化时, 电缆本身会产生热胀冷缩现象, 沿电缆轴向产生轴向力。直线敷设时温升产生的轴向力的计算公式为

表 1 电缆参数表

Tab.1 Cable parameters table

序号	参数	数值
1	导体截面/mm ²	2500
2	绝缘外径/mm	117.5
3	金属套平均外径/mm	140
4	金属套厚度/mm	2.8
5	单位长度电缆重量/(N·mm ⁻¹)	0.38

$$F = \alpha \Delta t EA \quad (1)$$

式中: F 为轴向力, kN; α 为电缆的线膨胀系数, 取值 $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; Δt 为温升, 取值 $65 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 增加至 $90 \text{ } ^\circ\text{C}$); E 为电缆的杨氏模量, 取值 $30\,000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; A 为电缆的导体截面积, mm^2 。

由公式(1)可知, 220 kV 2 500 mm² 电缆直线敷设时, 电缆温升导致的轴向力可达 97.5 kN, 该推力对电缆的破坏力极大。

1.2 蛇形敷设轴向力

电缆蛇形敷设主要分为水平蛇形和垂直蛇形, 两种敷设方式各有优劣。水平蛇形敷设的蛇形弧幅为水平方向, 施工方便且精度易控, 但对支架的宽度和隧道的尺寸要求较高。电缆垂直蛇形敷设与水平蛇形敷设类似, 但蛇形弧幅为垂直方向, 可充分利用隧道的纵向尺寸, 无需增加支架的宽度, 但施工难度相对较大^[8-12]。

1.2.1 轴向力计算公式

电缆水平蛇形敷设示意图见图 1。其中,

B 为蛇形敷设弧幅, mm; L 为半蛇形弧的节距长度, mm; n 为蛇形弧的滑移量, mm。

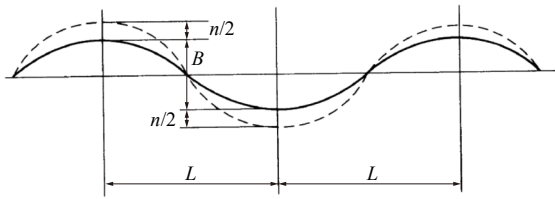


图1 电缆蛇形敷设示意图

Fig.1 Schematic diagram of cable serpentine laying

电缆温度变化产生的轴向力除与电缆的弯曲刚性和自身的摩擦力有关外,还与电缆膨胀系数、温升及支架的摩擦因数有关。蛇形敷设的电缆导体温度由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加至 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即温升为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水平蛇形敷设和垂直蛇形敷设时电缆末端轴向推力计算公式分别为

$$F_H = -\frac{8EI\alpha t}{B^2} - \frac{8EI\alpha t}{(B+n)^2} - \frac{\mu WL^2}{2(B+n)} \times 0.8 \quad (2)$$

$$F_V = -\frac{8EI\alpha t}{B^2} - \frac{8EI\alpha t}{(B+n)^2} + \frac{WL^2}{2(B+n)} \times 0.8 \quad (3)$$

$$n = \sqrt{B^2 + 1.6\alpha t L^2} - B \quad (4)$$

式中: F_H 为水平蛇形敷设时末端轴向力, N, 其中“+”表示轴向力为拉张应力, “-”表示压缩应力; F_V 为垂直蛇形敷设时末端轴向热机械推力, N; I 为电缆的惯性矩, mm^4 ; t 为温升, 取 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$; μ 为电缆的摩擦因数, 取 0.5; W 为单位长度电缆的重量, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

电缆的弯曲刚性表示使电缆在轴向发生变形或弯曲的力矩。电缆的刚性主要包括导体、绝缘和金属套的刚性, 计算公式为

$$EI = E_c I_c + E_i I_i + E_m I_m \quad (5)$$

式中: E_c 、 E_i 、 E_m 分别为导体、绝缘层、金属套的杨氏模量, 分别取 $50\ 000$ 、 400 、 $13\ 000\ \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$; I_c 、 I_i 、 I_m 分别为导体、绝缘层、金属套的惯性矩, mm^4 。其中, 导体惯性矩的公式为:

$$I_c = \frac{\pi}{64} d_c^4 \quad (6)$$

式中: d_c 为导体外径, 取 $61.7\ \text{mm}$ 。

绝缘层的断面是空心圆形, 其计算公式为

$$I_i = \frac{\pi}{64} (d_i^4 - d_c^4) \quad (7)$$

式中: d_i 为绝缘层外径, mm;

同理, 可计算金属套的惯性矩, 需要注意的是, 皱纹金属套的面积是利用其平均外径算出周长, 再用周长乘以厚度得出, 其计算公式为

$$I_m = \frac{\pi}{8} d_m^3 \cdot t_s \quad (8)$$

式中: d_m 为金属套平均外径, mm; t_s 为金属套厚度, mm。

1.2.2 敷设参数对轴向力的影响

由轴向力计算公式可以看出, 两种蛇形敷设方式的轴向力差异在于最后一项及其运算符号上, 这是由于电缆热收缩状态时作用力性质不同。电缆正常运行温升为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同蛇形弧幅时半蛇形弧节距与水平蛇形敷设轴向压缩力的关系曲线见图 2(为便于观察, 去掉数值前面的“-”号)。

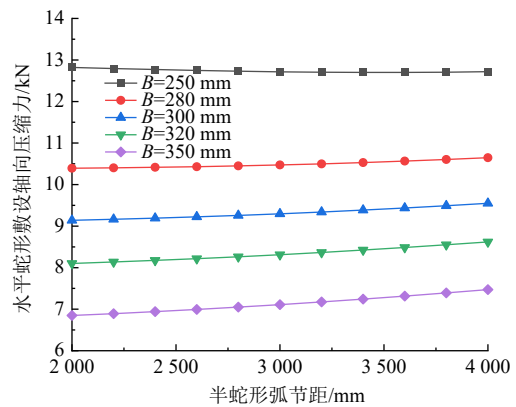


图2 不同蛇形弧幅时半蛇形弧节距与水平蛇形敷设轴向压缩力的关系曲线

Fig.2 Relationship curve between half-serpentine pitch and horizontal serpentine axial force under different serpentine arc amplitudes

由图 2 可知, 在半蛇形弧节距一定的情况下, 水平蛇形敷设轴向压缩力随蛇形弧幅的增大而减小; 在蛇形弧幅一定的情况下, 水平蛇形敷设轴向压缩力随半蛇形弧节距的增大而增大。另外, 水平蛇形敷设轴向压缩力与蛇形弧滑移量也相关, 而蛇形弧滑移量与蛇形敷设弧幅、半蛇形弧节距有直接关系, 故蛇形弧幅和半蛇形弧节距对轴向力控制有重要作用。

1.2.3 伸缩应变变量计算

设定电缆正常运行和短路运行的温升分别为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不同蛇形弧幅条件下, 半蛇形弧节距与蛇形弧滑移量的关系曲线见图 3。

由图 3 可知, 半蛇形弧节距一定的情况下, 蛇形弧滑移量随蛇形弧幅的增大而减小; 在蛇形弧幅一定的情况下, 蛇形弧滑移量随半蛇形弧节距的增大而快速增大, 且温度变化对蛇形弧滑移量影响很大。因此, 除考虑常规温升的受力变化设置合适的蛇形弧幅和节距, 还应考虑电缆在短路状态下的金属套的受力变形, 应变严重时可导致金属套断裂。

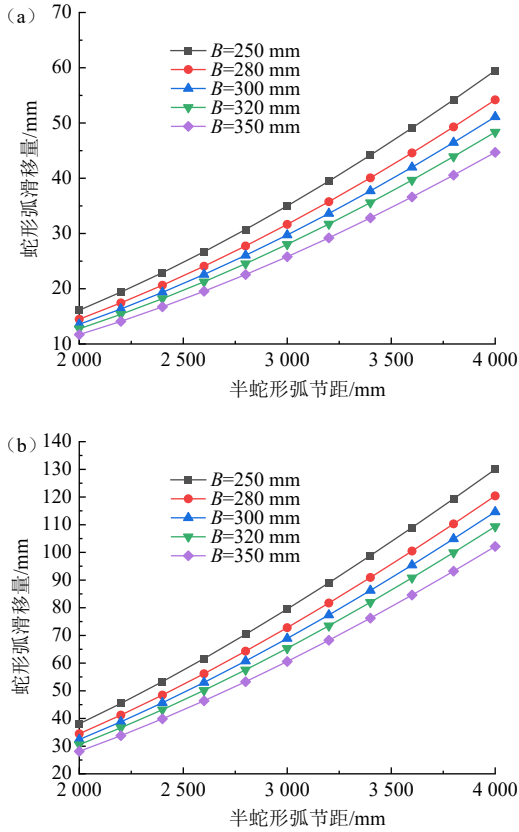


图3 半蛇形弧节距与蛇形弧滑移量的关系曲线:(a)温升为 65 °C; (b)温升为 160 °C

Fig.3 Relationship curve between half-serpentine pitch and serpentine arc slip: (a) $\Delta t=65$ °C; (b) $\Delta t=160$ °C

根据 DL/T 5221—2016《城市电力电缆线路设计技术规定》要求,电缆金属套的伸缩应变应不超过 0.3%。电缆金属套伸缩应变的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{D_s \pi^2 n}{(2L)^2} \quad (9)$$

式中: ε 为伸缩应变,%; D_s 为金属套平均外径,mm。

电缆正常运行和短路,即温升分别为 65 °C 和 160 °C 时,不同蛇形弧幅条件下,半蛇形弧节距与伸缩应变的关系曲线见图 4。

由图 4 可知,温升对伸缩应变的影响同样显著。蛇形节距一定的情况下,伸缩应变随蛇形弧幅的增大而减小;在蛇形弧幅一定的情况下,伸缩应变随半蛇形弧节距的增大而减小。由图 4(b) 还可以看出,蛇形节距和蛇形弧幅不宜配置过小,当蛇形弧幅为 250 mm,电缆半蛇形弧节距低于 3 100 m 时,伸缩应变将超过 0.3%,超出 DL/T 5221—2016 要求的上限,影响电缆使用寿命。

需要说明的是,若电缆未满载运行,发生短路时,温升超过 160 °C,产生的作用力和破坏力更大。综上所述,蛇形敷设参数的选择,应考虑电缆温升引起的轴向力,并确保该轴向力不损

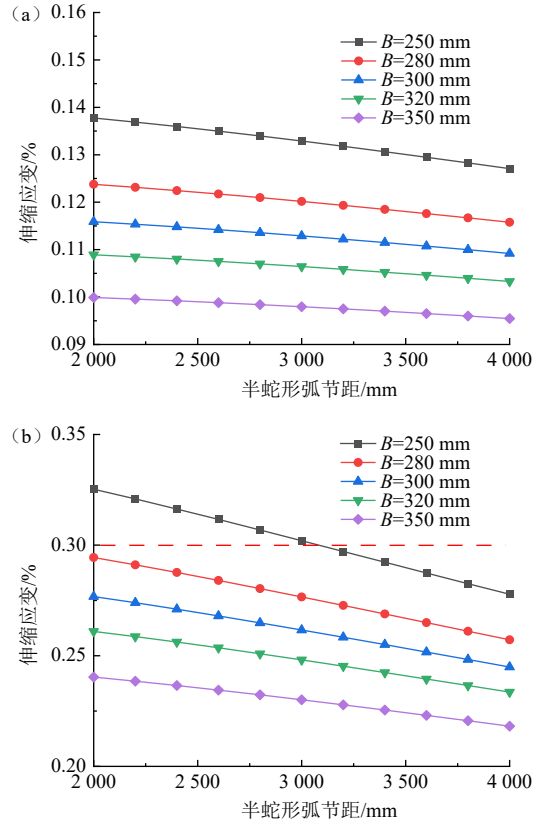


图4 半蛇形弧节距与伸缩应变的关系曲线:(a)温升为 65 °C; (b)温升为 160 °C

Fig.4 Relationship curve between half-serpentine pitch and stretching strain: (a) $\Delta t=65$ °C; (b) $\Delta t=160$ °C

伤电缆绝缘,同时金属护套伸缩应变应在允许范围内,满足金属护套长期运行不产生疲劳断裂的要求。

2 电动力计算及固定夹具设置和校验

2.1 短路运行时的电动力

根据两根平行导体通过的电流和半蛇形弧的节距长度,则导体间的电磁作用力为

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_{p1} i_{p2} L}{a} \quad (10)$$

式中: F_m 为短路电动力,N; μ_0 为介质磁导率,取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$; i_{p1} 、 i_{p2} 为两根平行导体通过的电流峰值,A; a 为导体中心距离,mm。

由公式(10)可知,发生单相短路时, i_{p1} 和 i_{p2} 中一相为短路电流,另一相为额定电流,且额定电流远小于短路电流,而发生两相或三相短路时, i_{p1} 和 i_{p2} 均为短路电流,此时的两导体间的作用力最大。将 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, $i_{p1}=i_{p2}=i_p$ 带入公式(10),两相之间的短路电动力为

$$F_m = \frac{2i_p^2 L}{a} \times 10^{-7} \quad (11)$$

式中: i_p 为短路电流峰值, A。

计算时,经常有设计人员忽略电动力计算应采用短路电流的峰值而不是短路电流的初始值。高压电缆线路一般远离发电厂,根据 DL/T 5222—2021,为便于计算可取 $i_p=2.5I$ 。因此,当短路电流是 50 kA(短路电流峰值 $i_p=125$ kA),线路半个蛇形固定节距为 3 m,导体中心距为 0.3 m,带入公式(11),计算可得 F_m 为 31 250 N。

2.2 校验电缆固定部件的机械强度

一般在蛇形波形起止位置,分别使用夹具进行刚性固定,中间波幅位置宜使用挠性固定。根据需要在接头位置、垂直敷设的高位侧增加刚性固定措施,比如双刚性固定等^[13-15]。

根据 GB 50217—2018《电力工程电缆设计规范》,考虑安全裕度,电缆固定部件的机械强度大于 2.5 倍的短路电动力。

$$F = bh\sigma \quad (12)$$

式中: F 为夹具的机械强度, N; σ 为夹具内橡胶垫片材料容许抗拉力, $40 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; b 为夹具厚度, 45 mm; h 为夹具宽度, 100 mm。

将上述数据代入公式(12)计算可得 F 为 180 000 N, 大于 2.5 倍的 F_m (78 125 N)。选择夹具及蛇形节距满足要求。若设置的蛇形节距和夹具不能满足电动力要求,需要增加固定夹具或改变蛇形敷设参数重新核算。

2.3 校验电缆金属护套容许拘束力

根据 GB 50217—2018 电缆铝护套容许的拘束力大于短路电动力时,铝护套不会发生变形。铝护套容许拘束力计算公式为

$$F_c = \sigma S \quad (13)$$

式中: F_c 为铝护套容许拘束力, N; σ 为铝护套容许拘束力, $40 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; S 为铝护套截面积, $1 217 \text{ mm}^2$ 。

将上述数据代入公式(13)计算可得 F_c 为 48 680 N, 大于 F_m (31 250 N), 即电缆发生短路时,铝护套有足够的强度不会发生变形,可以有效保护电缆。若计算结果不满足校验要求,则需要重新调整电缆敷设参数(如相间距等),或改变铝护套厚度重新校验。

3 结 论

高压电缆采用连续蛇形敷设,将热伸缩滑移量分散到各个蛇形弧上,可以有效吸收由轴向力带来的形变,减小电缆轴向推力。蛇形敷设参数需合理布置,否则影响轴向电缆产品使用寿命,本文可为蛇形敷设的参数设置和校验提供参考。

参考文献 References

- [1] 方建. 超高压电缆蛇形敷设方式选择[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 31-35.
FANG J. Selection of snake laying methods for EHV cables[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 31-35.
- [2] 徐伟, 郑志源. 隧道内电缆蛇形敷设特性[J]. 广东电力, 2014, 27(12): 118-122.
XU W, ZHENG Z Y. Snaking of cable in tunnel[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12): 118-122.
- [3] 罗俊华, 张丽, 刘毅刚, 等. 超高压大截面电力电缆线路热膨胀计算分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1281-1286.
LUO J H, ZHANG L, LIU Y G, et al. Analysis and calculation of thermal expansion of EHV cable line with large size conductor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1281-1286.
- [4] 孟毓, 朱爱钧, 陆歆. 安装在市政隧道及大桥上的 220 kV 电缆设计概述[C]//全国第八次电力电缆运行经验交流会论文集. 杭州: 中国电力企业联合会, 2008: 26-32.
MENG Y, ZHU A J, LU X. Review on design for 220 kV cables installed on municipal bridges and tunnels[C]//Proceedings of the eighth national power cable operation experience exchange conference. Hangzhou: China Electricity Council, 2008: 26-32.
- [5] 王大朋. 高压电力电缆蛇形敷设设计的探讨[J]. 通讯世界, 2015(11): 160-162.
WANG D P. Discussion on snake laying design of high voltage power cable[J]. Telecom World, 2015(11): 160-162.
- [6] 文丽. 隧道内 500 kV 大截面高压电缆敷设类型的选择[J]. 通讯世界, 2017(23): 98-99.
WEN L. Selection of laying type of 500 kV large section high voltage cable in tunnel[J]. Telecom World, 2017(23): 98-99.
- [7] 陈斌, 李帅, 李子扬. 高电压大截面电力电缆敷设方式对线路安全运行的影响[J]. 山东电力技术, 2015, 42(3): 39-42.
CHEN B, LI S, LI Z Y. Laying modes and the effect on safe operation of high voltage cable line with large size conductor[J]. Shandong Electric Power, 2015, 42(3): 39-42.
- [8] 孟毓. 高压电缆蛇形布置的选择[J]. 上海电力, 2005, 18(2): 176-178.
MENG Y. Selection of serpentine arrangement of high voltage cable[J]. Shanghai Electric Power, 2005, 18(2): 176-178.
- [9] LUO M, LI H C, ZHANG S. A new type surge protective grounding device for high voltage power cable lines[C]//Proceedings of 2008 IEE/PES

- Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, IL: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [10] 吉启荣, 吴建良, 李喜. 电力电缆运行过程中的热机械性能变化 [J]. *电力建设*, 2008, 29(4): 46-47.
JI Q R, WU J L, LI X. Electric cable thermalme chanical property change during operation[J]. *Electric Power Construction*, 2008, 29(4): 46-47.
- [11] LUO J H, ZHANG L, LI H C, et al. Water-proof surge protective grounding devices for HV power cable lines[C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing: IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, National Natural Science Foundation of Chima, State Grid Corporation of China, et al, 2008: 253-256.
- [12] 卢永魁, 邬楠, 许卫东, 等. 500 kV 电缆隧道内敷设的研究 [J]. *电气应用*, 2016, 35(24): 34-37.
LU Y K, WU N, XU W D, et al. Study on 500 kV cable laying in tunnel[J]. *Electrotechnical Application*, 2016, 35(24): 34-37.
- [13] 卞荣, 陈科技, 刘胜春, 等. 大截面电力电缆夹具涡流损耗计算与分析 [J]. *浙江电力*, 2020, 39(6): 99-104.
BIAN R, CHEN K J, LIU S C, et al. Eddy current loss calculation and analysis of large section power cable fixture[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2020, 39(6): 99-104.
- [14] 张伟, 洪芳华, 张宇, 等. 500 kV 大截面电力电缆用高强度夹具的研究 [J]. *华东电力*, 2009, 37(11): 1890-1892.
ZHANG W, HONG F H, ZHANG Y, et al. High-strength clamps for 500 kV large-section cables[J]. *East China Electric Power*, 2009, 37(11): 1890-1892.
- [15] 吴军, 李志明, 郭浩. 220 kV 大截面电缆的夹具与支架选择 [J]. *河北水利电力学院学报*, 2018(1): 45-47.
WU JUN, LI ZHI-MING, GUO HAO. Selection of fixture and bracket for 220 kV large section power cable[J]. *Journal of Hebei University Of Water Resources And Electric Engineering*, 2018(1): 45-47.

收稿日期: 2024-07-02

修回日期: 2024-10-16

作者简介: 冯涛 FENG Tao

1980—, 男, 工程师

主要从事高压电缆研发、生产工作

E-mail: 287916109@qq.com

Calculation Analysis of Serpentine Laying of High-Voltage Cables

FENG Tao, CHEN Yaqin, LI Haohao, DONG Qi
(Jiangsu Shangshang Cable Group, Liyang 213300, China)

Abstract: In order to avoid the damage caused by axial force and electrodynamic force during operation of high-voltage cable, taking 220 kV 2 500 mm² cable as an example, analyzed and calculated the influence of parameters such as half-serpentine pitch and serpentine arc amplitude on axial force and expansion strain of metal sheath during the serpentine laying of cable. The analysis showed that the pitch of serpentine laying arc and the pitch of the half serpentine laying arc play an important role in controlling axial force. At the same time, the electrodynamic force during short circuit was calculated and the arrangement of cable clamps was verified. By setting reasonable serpentine laying parameters, the deformation caused by axial force could be effectively absorbed. This paper could provide reference for parameter design and verification of high-voltage cable serpentine laying.

Key words: serpentine laying; serpentine pitch; axial force; short circuit electrodynamic verification