

深海供电用脐带缆载流量与温升计算分析

郭宏¹, 郭江艳¹, 郝丽², 袁建生²

¹中海油研究总院有限责任公司技术研发中心, 北京

²清华大学电机系, 北京

Email: guojy4@cnooc.com.cn, yuan@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020年8月20日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月10日

摘要

脐带缆用于对深海设备提供动力电源与化学剂, 是由电力电缆和各种管道组合在一起的管缆, 脐带缆内部电力电缆中的大电流功率损耗和化学剂热量会引起脐带缆温升, 若温度超过材料的温度限值则寿命会急剧下降。本文采用电磁场与温度场耦合方法计算分析了脐带缆的温升, 得到了电力电缆采用铜芯与铝芯、在不同载流量或不同电流密度下、绝缘材料具有不同导热系数时的温升, 给出了不同因素对温升的影响程度。研究结果可为脐带缆的结构设计, 特别是电缆的载流量设计提供依据。

关键词

深海供电, 脐带缆, 电磁与温度耦合场, 温升计算

Calculation and Analysis on Ampacity and Temperature Rise of Umbilical Cable for Deep Sea Power Supply

Hong Guo¹, Jiangyan Guo¹, Li Hao², Jiansheng Yuan²

¹Technology R & D Center, CNOOC RI Ltd., Beijing

²Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: guojy4@cnooc.com.cn, yuan@tsinghua.edu.cn

Received: Aug. 20th, 2020; accepted: Sep. 3rd, 2020; published: Sep. 10th, 2020

Abstract

Umbilical cable is used to provide power supply and chemicals for deep-sea equipment. It is a combination of power cable and various pipelines. The high current in the power cable and the

heat of chemicals inside the umbilical cable will cause temperature rise. If the temperature exceeds the temperature limit of the material, the service life will drop sharply. In this paper, the temperature rise of umbilical cable is calculated and analyzed by the coupling method of electromagnetic field and temperature field. The temperature rise of umbilical cable with copper core and aluminium core, different ampacity or current density, different cross-section and insulation material with different thermal conductivity is studied. The influence degree of different factors on temperature rise is given. The results can be taken as the basis for the structure design of umbilical cable, especially for the design of ampacity or current carrying capacity of power cable.

Keywords

Deep Sea Power Supply, Umbilical Cable, Electromagnetic and Temperature Coupling Field, Temperature Rise Calculation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脐带缆是用于对深海设备提供动力电源与化学剂，是由电力电缆和各种管道组合在一起的管缆[1]。在其设计中，分析其力学特性是首要问题[2] [3] [4]。但其温度特性对力学特性以及脐带缆的性能和运行寿命影响很大，也需要在设计中给予精确计算分析，而温度主要取决于脐带缆中电力电缆的截面、材料和通过的电流或载流量大小。载流量设计是脐带缆电气设计的重要参数。

脐带缆中的电力电缆在运行中会产生一定热量，使脐带缆的温度升高。若温度高于绝缘材料的耐受温度时，材料会被破坏或影响脐带缆的寿命。有文献指出[5]：当温度高于绝缘材料的标称耐受温度的8%时，材料的使用寿命会减为原来的一半。另外，导体的温度升高会使其电阻随之增大，这不仅会进一步增加脐带缆的温度，还会增加电力电缆的电压降，降低负载端的电压，从而影响设备的工作性能。当然，功率损耗也会增加电能损耗，浪费能源和增加油田开采成本。因此，在脐带缆设计中，准确计算温升与控制温升具有重要意义。

在一般电力电缆温度计算中，国际电工协会标准 IEC 60287-2-1 给出了相应的热阻计算方法[6]。但对于复杂截面和多个管缆构成的脐带缆，热阻网络法实施复杂，且难以准确计算出温升。因此需要采用有限元数值计算方法。采用有限元软件进行温度场仿真计算的文献较多。文献[7] [8] [9]基于二维有限元模型分别计算了脐带缆的电磁场与温度场。文献[10]在温度分析中，计算了“最坏情况”，即平台上的“挂起”部分，设脐带缆位于外径0.4 m的空气管道内，长度为10 m。文献[11]分析了电力电缆的电流为1500 A的脐带缆温度。

在以往的温度场计算中，一般都是将电力电缆中的电流视为直流电流或计算出电缆的电阻，依次解析计算出电流的功率损耗，然后将该损耗作为热源进行温度计算。且只是针对一种材料或热导率参数进行计算，没有给出不同材料或热导率下温升的一般性规律。

电缆中的电流在芯线上的分布具有趋肤效应与邻近效应，且在金属屏蔽层与其它金属管线上也会感应出电流；而温度又会影响导体的电阻，电阻又会影响电流的分布与功率损耗及温升，因此这是一个电磁场与温度场耦合问题，需联合求解。本文的计算考虑了电流在电缆中的不均匀分布以及其它金属管道

上的感应电流。

2. 分析模型

图 1 为一种脐带缆结构模型，其中心成“品”字形的为三相电力电缆，其它为各种管道。在温度分析中将管道内视为空气，管道外为绝缘填充物，一般用交联聚乙烯。仿真采用有限元软件 ANSYS 的时谐稳态涡流场分析模块和静态温度分析模块。为了控制各子区域中的有限元网格分布以提高计算准确度，将各导体与介质区域(特别是薄管道)分割成了很多圆环(如图所示)，以保证在薄圆环区域内能生成多层网格，这对于精确计算薄导体区域中的涡流尤为重要。

脐带缆中的各管线之间是非粘结螺旋缠绕结构，这种结构可使线缆具有较好的柔韧性。这种非粘结缠绕结构与温度分析有直接关系，因为这将影响不同构件之间的热传导。显然，要想精确描述这种结构的各界面处的接触特性与导热特性很困难，或几乎不可能，所以只能将其简化或理想化、将不同层之间的界面对传热的影响综合到材料的导热系数中，即在建模时不考虑这些界面，建立成连续的媒质，但媒质的导热系数不是与材料的系数，而是取一个较小的导热系数来反应界面对传热的影响。

当然，等效前的材料与等效后的材料导热系数都不易准确获得。因此，在下面的分析中将给出材料导热系数在一个范围内取不同值时的结果，从而可以得到温升与材料参数的关系，为脐带缆的设计提供参考。从此也可以看出，仿真的基础是获得材料的等效参数，若参数不准确则仿真的精度就无从谈起。当然，就像本文下面的内容，给出一定参数范围内的结果对实际工程设计仍具有一定的意义或参考价值。

上面已经指出：电缆中的电流在芯线上的分布具有趋肤效应与邻近效应，电流和功率损耗分布会影响温度分布，而温度又会影响导体的电阻，电阻又会影响电流分布与功率损耗分布，因此这是一个电磁场与温度场耦合问题。原则上讲，对于该耦合问题需要进行电磁与温度场的直接耦合求解，即考虑各点电阻率是温度的函数，温度场的热源又是电阻率的函数之耦合关系。

但这种直接耦合求解很困难，且 ANSYS 中没有这种直接耦合求解功能。因此，在本文计算中采用的是近似的间接耦合求解方法，即先任意设导体的一个电阻率，进行电磁场求解，然后将计算结果的功率损耗施加到温度场计算中作为热源，实现这一功能的 ANSYS 宏命令为：ldread,hgen,,,2 (apply coupled joule heating load from emag); 计算出温度之后，根据电缆芯线的平均温度修改电阻率值重新计算电磁场，这样循环两次后便作为最终的计算结果。这样计算虽然存在一定的误差，但这个环节对温度的计算结果影响应该不大，应该小于绝缘材料热导系数的不确定性所带来的误差。

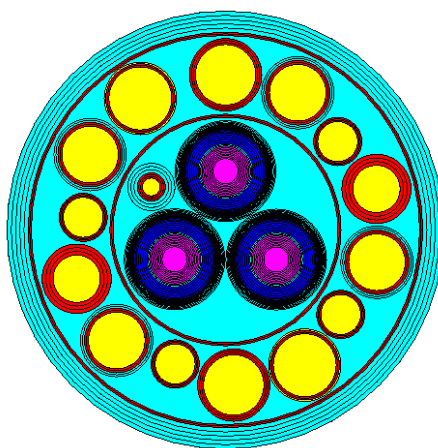


Figure 1. ANSYS model of umbilical structure
图 1. 脐带缆结构 ANSYS 模型

3. 不同情况下的温升计算结果与分析

采用 ANSYS Multiphysics 的电磁场与温度场耦合功能进行了正弦稳态电磁场与静态温度场计算，得到了不同电力电缆截面和材料与不同材料热导率对温升的影响程度。在计算中，20℃下铜和铝的电阻率分别取： $1.71\text{e-}8$ 和 $2.83\text{e-}8$ 欧米，温度系数均为 0.004 和 0.0043/℃。

3.1. 电磁场与功率损耗计算

首先进行 50 Hz 下的时谐稳态涡流场分析。由于电缆的磁场将透出脐带缆延伸到无限远处，所以在脐带缆模型的外侧设置了一层无限远单元来模拟场延伸到无限远的特性。

通过计算可以得到电力电缆中的电流分布，其反应了每根芯线中电流的趋肤效应以及不同相之间相互影响的临近效应，并可以得到脐带缆中金属管道上感应的涡流分布以及各导体上的功率损耗分布。

当电缆芯线材料取为铜，电缆电流有效值为 400 A，导线截面为 185 mm^2 ，即电流密度为 2.16 A/mm^2 时，总损耗为 38.1 W/m，其中电缆芯线损耗 32.1 W/m，电缆外屏蔽损耗 6 W/m，其它管线损耗 42 mW/m；相同电流与尺寸下，铝芯电缆芯线损耗 44.8 W/m，电缆外屏蔽 13 W/m。

对于铜芯电力电缆，图 2 给出了电缆芯线的损耗分布，图 3 给出了电缆屏蔽层与护套及其它金属管道上的损耗分布，图 4 给出了仅其它管道上的损耗分布。

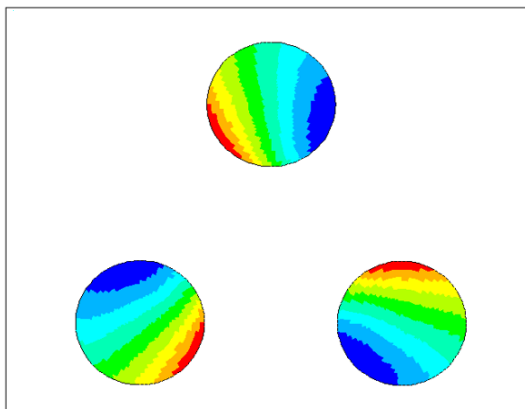


Figure 2. Loss distribution of cable core
图 2. 电缆芯线的损耗分布

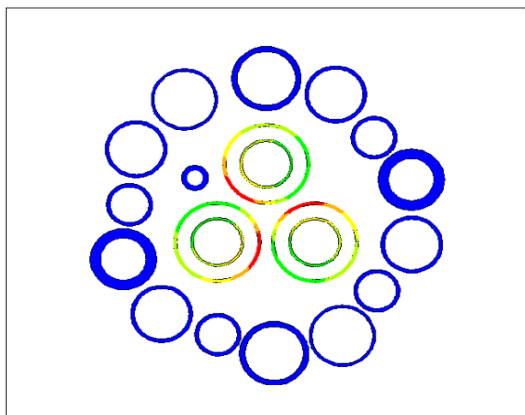


Figure 3. Loss distribution on cable shield and other metal pipes
图 3. 电缆屏蔽层与其它金属管道上的损耗分布

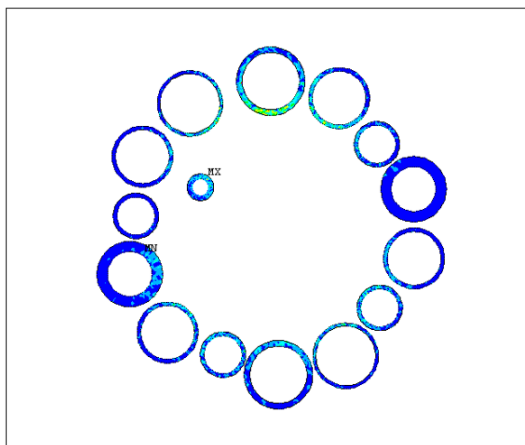


Figure 4. Loss distribution on other pipes
图 4. 仅其它管道上的损耗分布

3.2. 材料热导率对温升的影响

绝缘材料特别是考虑层间结构之后的材料的等效导热系数不易准确获得。因此，这里分析材料导热系数在一个范围内取不同值时的温度结果，从而可以得到温升与材料参数的关系，

一般高密度聚乙烯材料的热导率 λ 可达 $0.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。但脐带缆的电力电缆外包裹有“阻水带”，加之各管缆之间的非粘结特性，绝缘材料的整体等效热导率肯定达不到 0.4 。表 1 给出了绝缘材料取不同热导率下电缆芯线的最高温升值，电缆芯线材料为铜，电缆电流有效值为 400 A ，电流密度为 2.16 A/mm^2 。图 5 是热导率为 0.1 时的温升分布图，计算中取环境温度为 30°C 。环境温度取不同数值时只影响温度结果，但不影响温升结果。

由计算结果可知：当热导率为 $0.115 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 时温升正好为 50 K ，若环境空气温度为 40°C ，则电缆最高温度为 90°C ，这是标准中规定的交联聚乙烯绝缘电缆温度限值[12]。

Table 1. Temperature rise of copper core with current density of 2.16 A/mm^2 under different thermal conductivity

表 1. 不同热导率绝缘材料下铜芯电缆电流密度为 2.16 A/mm^2 时的温升

热导率	0.07	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2	0.3
T	73	65	59	55	40	33	25

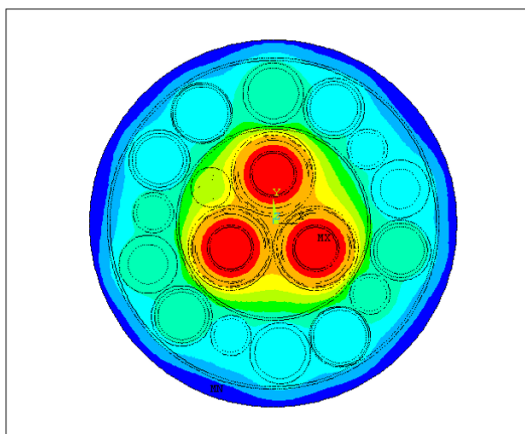


Figure 5. Umbilical temperature distribution
图 5. 脐带缆温度分布图

3.3. 不同电力电缆材料与截面对温升的影响

上面的计算结果表明：绝缘材料的热导率为 0.115 时则电缆便不超过温度限值。显然，材料的温度系数应该会大于 0.115。因此，该铜芯电缆的截面选择有些过大。

由于铝材料具有高抗拉强度、优异的疲劳性、轻重量，使其成为深水动力脐带缆的一种选择，当然其电阻率较铜要大，温升会高于铜芯电缆。表 2 是与表 1 相同脐带缆与电力电缆截面下，但改为铝芯的电缆温升值计算结果。当热导率为 0.185 时温升为 50 K，温度不超过限值。此时总损耗为 60.7 W/m，电缆芯线损耗为 47.9 W/m，电缆外屏蔽损耗为 12.8 W/m。铝的电阻率是铜的 1.65 倍，而总损耗铝是铜的 1.49 倍，芯线损耗是 1.4 倍，温升约为 1.48 倍。

图 6 为铝芯与铜芯电缆的温升随热导率的变化曲线。从图中的变化曲线可以看出，随着热导率的增加，温升变化会放缓；当热导率大于 0.2 后温升变化较小。

从上面的结果可以看出，无论是铜芯还是铝芯电缆，截面 185 mm^2 、电流密度为 2.16 A/mm^2 的选择都显得有些保守。为此，表 3 给出了将电流密度增加为 2.592 (即 2.16 的 1.2 倍)，即截面降为 154.3 mm^2 的温升结果。当热导率为 0.15 时，铜芯电缆的温度不超过限值；而当热导率为 0.3 时，铝芯电缆的温度不超过限值。

从上面的结果可以看出，对于铜芯电缆，截面仍然有进一步降低的空间，表 4 给出了将电流密度增加为 3 (即 2.16 的 1.4 倍)，即截面降为 132.1 mm^2 的温升结果，当热导率为 0.2 时，铜芯电缆的温度不超过限值。

Table 2. Temperature rise of aluminum core cable with different thermal conductivity

表 2. 不同热导率绝缘材料下铝芯电缆的温升

热导率	0.07	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2	0.3
T	107	96	87	80	59	48	38

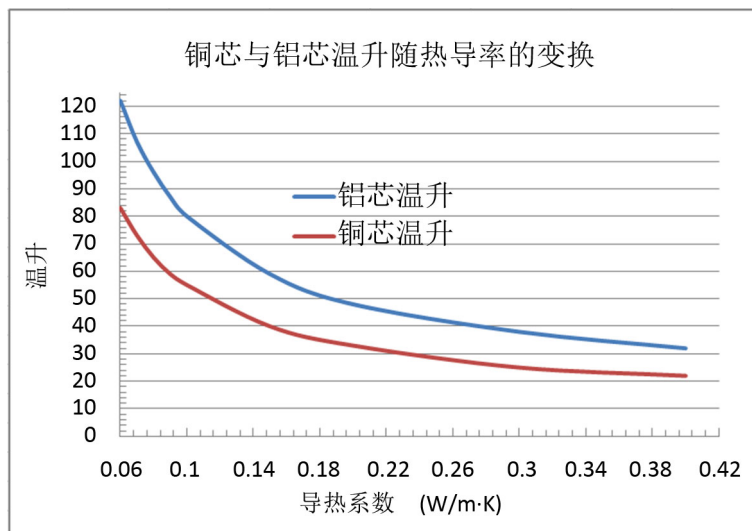


Figure 6. Temperature rise of aluminum and copper core cables against thermal conductivity

图 6. 铝芯与铜芯电缆的温升随热导率的变化

Table 3. Temperature rise of cable with current density of 2.59 A/mm^2

表 3. 电缆的电流密度为 2.59 A/mm^2 时的温升

热导率	0.07	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2	0.3
铜	88	79	72	66	48	40	31
铝	137	122	111	102	75	61	47

Table 4. Temperature rise of cables with current density of 3 A/mm²**表 4.** 电缆的电流密度为 3 A/mm² 时的温升

热导率	0.07	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2	0.3
铜	104	93	84	78	57	46	36

4. 结论

绝缘材料的导热系数对温升的影响规律为：随着热导率的增加，温升变化会放缓；当热导率大于 0.2 W/m·K 后温升变化较小。电流密度取 2.16 A/mm² 时铝芯电缆的温度应不会超过 90℃；而对于铜芯电缆，电流密度取 3 A/mm² 时温度也应不会超过 90℃；条件是绝缘材料的热导率要大于 0.2 W/m·K，而这个条件对于采用聚乙烯作为填充物的脐带缆应该能够得到满足。

参考文献

- [1] Gnanaraj, A.A., Venkatesan, K. and Sasikala, T. (2018) Testing of Umbilical Cable for Reliable and Safe Operation. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Sapporo, June 2018, 100-105.
- [2] Wu, Q.Q., Liu, B.L., Cui, N., et al. (2019) Analysis of Umbilical Cables for Maglev Vibration Isolation Systems. *AIAA Journal*, **57**, 1752-1762. <https://doi.org/10.2514/1.J057914>
- [3] Meng, Y., Xu, X.S. and Zhao, M. (2020) Dynamics Calculation of Complex Deep-Sea Cable System Based on Hybrid Optimization Algorithm. *Ocean Engineering*, **200**, Article ID: 107041. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107041>
- [4] Guttner, W.C., Santos, C.C.P. and Pesce, C.P. (2017) A Finite Element Method Assessment of a Steel Tube Umbilical (STU) Cable Subjected to Crushing Load: Comparison between Two and Three-Dimensional Approaches. *Marine Structures*, **53**, 52-67. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.01.002>
- [5] 马国君. 考虑温度场效应的脐带缆截面结构设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [6] IEC 60287-2-1 (1994) Calculation of the Current Rating of Electric Cables, Part 2: Thermal Resistance, Section 1: Calculation of Thermal Resistance. IEC Publication, Geneva.
- [7] 刘骥, 李秀婧, 高欢, 郭宏. 基于有限元分析的水下脐带电缆电场与温度场特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1658-1665.
- [8] 郭宏, 高欢. 水下生产系统脐带缆温度场与载流量分析的有限元方法[J]. 电线电缆, 2013(3): 5-8.
- [9] Shackleton, D., Abib, L. and Balena, R. (2007) Electrical and Thermal Design of Umbilical Cable. *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, Prysmian, June 2007.
- [10] Henriksen, T., Lervik, J.K. and Normann, T. (2007) Thermal and Electromagnetic Modelling of Power Umbilicals. *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, Prysmian, June 2007.
- [11] Young, B.S., Gyu-Hong, K. and Kwan, S.J. (2017) Thermal and Electromagnetic Characteristics for Cross-Sectional Design Optimization of the Integrated Production Umbilical. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **53**, 1598-1604. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2617298>
- [12] 中国电器工业协会. GB/T12706.2-2002 额定电压 6 kV 到 30 kV 电缆[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.