

基于热传递的光发射次模块结温计算方法

姜振超¹, 唐杰², 黄宏光²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610065;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要: 由于技术和设备等条件限制,对于一些微小的元件,很难通过常规的测量方法得知其内部的温度情况。提供了一种针对小型封装可热插拔光收发一体模块(small form-factor pluggable, SFP)内部光发射次模块(transmitter optical sub-assembly, TOSA)的热学建模方法,通过对TOSA外壁的温度测量及封装材料的热学参数,利用傅里叶定律粗略估算其内部芯片结温,此方法也能对其他微小器件的热学分析提供参考。

关键词: TOSA; SFP; 傅里叶定律; 热传导; 对流传热

Abstract: Due to the restrictions of technology and equipment, it is difficult to obtain the temperature inside with the conventional temperature measurement methods for some micro components. A thermal modeling method for transmitter optical sub-assembly (TOSA) module in small form-factor pluggable (SFP) is presented. Through the temperature measurement outside TOSA and the thermal parameters, the junction temperature of internal chip is estimated roughly with Fourier law. This method could also be used to thermal analysis for other kinds of micro devices.

Key words: transmitter optical sub-assembly (TOSA); small form-factor pluggable (SFP); Fourier law; heat conduction; heat-transfer by convection

中图分类号: TK711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0009-04

0 引言

热是能量的一种形式,热量是对能量在传递过程中的量度,它是过程变量而非状态变量。根据热力学第二定律,只要有温度差的存在就必然发生热量的传递,这一过程称为热量传递,简称传热。导热问题的数学处理方法分为两类,即分析解法和近似解法。分析解法的优点是整个求解过程中的物理概念与逻辑推理比较清晰,求解过程所依据的数学基础有严格证明,求解的结果能比较清楚地表示出各种因素对物体内部温度分布的影响。求解描述热传导的基本微分方程就可以获得温度随时间和空间的函数关系。有时,对于稍微复杂的问题还需要用到数值计算法、图解法、电热模拟或水热模拟法等。

对SFP中的TOSA模块进行建模,运用分析法得出了一种推算芯片结温的近似公式。

1 热传递方式

1.1 热传导

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2011GZ0004); 四川省电力公司科技项目(11H0920)

热传导在固体、液体和气体中都可以发生。流体及非金属固体内的导热是由于分子的微观运动,而纯金属的导热则是由于自由电子的存在而发生。当流体中存在温度梯度时,由于分子的无规律运动,结果是具有较高能量(高温)的分子转移到具有较低能量分子的区域,从而产生热量传递。在非金属材料内,由于分子在其平衡位置处的不断振动,亦能将能量由高温区传递至低温区。故金属若为良导体,一般亦为良导热体。当金属中含有杂质,例如合金,由于自由电子浓度降低,则其导热性能也会大大下降。非金属中的自由电子很少,故其导热性能亦很差。

描述导热现象的物理定律为傅里叶定律,依据此定律,导热速率与温度梯度以及导热面积成正比,即

$$dQ = -\lambda dA \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式中 Q 为导热速率, W; A 为导热面积, m^2 ; $\frac{\partial t}{\partial x}$ 为空

间某点的温度梯度, °C/m 或 K/m; λ 为比例系数 称为导热系数, W/(m·K) 或 W/(m·°C)。

式(1)中的负号表示导热通量的方向与温度梯度的方向相反,即热量朝着温度降低的方向传递。式中的比例常数 λ 为导热系数。该式假定与方向无关,即物质是各向同性的。不同种类物质的导热系数数值差别很大,对同一物质,主要是温度的函数,压力对于大多数物质的导热系数影响很小,仅在很高或很低的压力下,气体的导热系数才与压力有关。

大多数质地均匀的固体材料,在一定的温度范围内,导热系数与温度近似成线性关系,即

$$\lambda = \lambda_0(1 + \alpha t) \quad (2)$$

式中 λ 为固体在温度为 t 时的导热系数, W/(m·K) 或 W/(m·°C); λ_0 为固体在温度为 0 时的导热系数, W/(m·K) 或 W/(m·°C); α 为温度系数,是材料的物理属性随着温度变化而变化的速率。对大多数金属材料为负值,对大多数非金属材料为正值。

导热计算中,若固体材料内各处温度不同,其导热系数取算数平均温度下的数值。

1.2 对流

对流传热是由于流体微团的宏观运动所致。当固体壁面与其邻近的流体之间存在温度差时,由于流体微团位移的结果,便在壁面与流体之间发生热交换。对流传热可以由强制对流引起,亦可由自然对流引起。所谓强制对流是将外力(泵或搅拌器等)施加于流体上,从而促使流体微团发生运动;而自然对流则由于流体内部存在温度差,形成流体的密度差,从而使微团在固体壁面与其附近流体之间产生上下方向的循环运动。

对流传热速率可用牛顿冷却定律表述,即

$$dQ = dAh\Delta t \quad (3)$$

式中 Q 为对流传热速率, W; A 为与对流传热方向相垂直的传热面面积, m^2 ; Δt 为固体壁面与流体主体之间的温度差, °C 或 K; h 为对流传热系数或者膜系数, W/(m·K) 或 W/(m·°C)。

式(3)中的膜系数 h 值与许多因素有关,诸如固体壁面的几何形状与粗糙情况、流体的物理性质、流型、流速以及温度差等。这些影响因素与膜系数 h 之间的关系十分复杂,至今仍未能彻底研究清楚,但流型、流速对 h 有非常显著的影响,这一点是肯定的。从经验得悉,当流体沿固体壁面流过,甚至在强烈湍动的情况下,壁面附近仍存在一层层流内层,此处的流体做层流流动,且紧贴壁面的一层流体静止不动。由此可知,壁面附近的传热只能依靠导热。壁面与流体主体之间的传热阻力主要集中于上述层流内层中,因此,对流传热系数又称为膜系数。

1.3 热辐射

1.3 热辐射

辐射传热过程的机理与导热、对流传热很不相同,后两者需要在介质中进行,而辐射传热无需任何介质,只要物体的温度高于绝对零度,它就可以发射能量,这种能量以电磁波的形式向空间传播。具有能量的这部分电磁波(处于一定的波长范围内)称为热辐射线。当热辐射线投影到较低温度的物体表面时,将部分地波吸收而变为热能。

单位表面积、单位时间内,绝对黑体所发射出去的能量,称为绝对黑体的发射能力,可用斯蒂芬-玻尔兹曼定律描述为

$$\frac{Q_0}{dA} = \sigma T^4 \quad (4)$$

式中 Q_0/dA 为黑体的发射能力; A 、 T 为黑体的表面积, m^2 和黑体表面的绝对温度, °C 或 K; σ 为黑体的发射常数(玻尔兹曼常数), $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$ 。

该式只适用于绝对黑体,并且对于热辐射才是正确的。对于其他形式的电磁波辐射,该式不成立。

2 稳态热传导

稳态热传导是指在导热过程中,各点的温度只随位置变化,不随时间变化。

2.1 通过单层圆筒壁的稳态热传导

如图1所示,设单层圆筒壁内外半径分别为 r_1 、 r_2 ,内外表面分别维持恒定的温度 t_1 、 t_2 ,且 $t_1 > t_2$,圆筒的长度为 L 。由于圆筒的内外半径不等,故传热面积随半径而变化。若 L 足够长,则可忽略沿管长方向的导热,物体的温度只沿半径 r 方向变化,则圆筒壁的导热属稳态——维热传导,温度梯度为 $\frac{dt}{dr}$,微元面积 $dA = 2\pi rL$ 。此时,傅里叶定律可以表示为

$$dQ = -\lambda 2\pi r dL \frac{dt}{dr} \quad (5)$$

由于 r 与 L 无关 t 只沿 r 方向变化 $\frac{dt}{dr}$ 与 L 无关 所以

$$\int_0^Q dQ = -\lambda 2\pi r \frac{dt}{dr} \int_0^L dL$$

$$Q = -\lambda 2\pi r \frac{dt}{dr} L \quad (6)$$

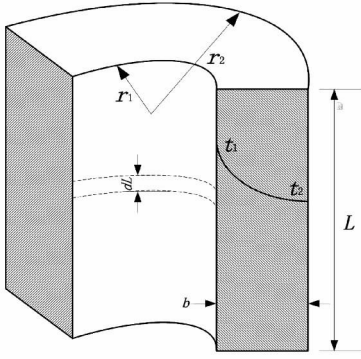


图1 单层圆筒壁

因为是稳态热传导,所以穿过圆筒壁的传热速率应该相等,即 Q 与 r 无关 故

$$\int_{r_1}^{r_2} Q \frac{dr}{r} = \int_{t_1}^{t_2} -\lambda 2\pi L dt$$

$$Q = 2\pi\lambda L \frac{(t_1 - t_2)}{\ln r_2 / r_1} \quad (7)$$

式(7)整理如下。

$$Q = 2\pi\lambda L \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{r_2 - r_1}{t_1 - t_2} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$= \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{r_2 - r_1} \cdot \frac{2\pi L (r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$= \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{b} \cdot 2\pi L \lambda_m \quad (8)$$

式中 r_m 为对数平均半径。

令圆筒内、外壁表面积为 A_1 、 A_2 , 壁厚为 b 因 $A_1 = 2\pi r_1 L$ $A_2 = 2\pi r_2 L$ $b = r_2 - r_1$ 代入式(8) 得

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{b} \cdot \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}}$$

$$= \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{b} \cdot A_m$$

$$= \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda A_m}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (9)$$

式中 A_m 为对数平均面积; Δt 为导热推动力; R 为导热阻力(简称热阻) $R = b / A_m$ 。

2.2 多层圆筒壁的热传导

若壁面由多层不同厚度、不同导热系数的材料组成 各个相邻层间接触紧密,且两接触面温度相等 如图2所示。

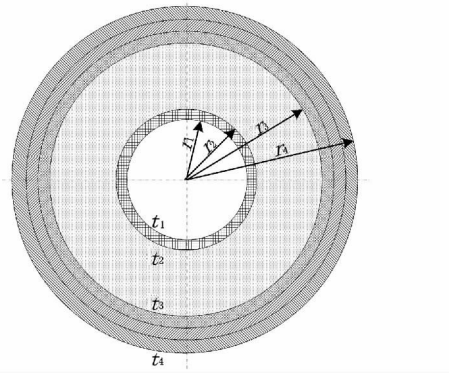


图2 多层圆筒壁

设各层的导热系数分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 , 厚度分别为 $b_1 = (r_2 - r_1)$ 、 $b_2 = (r_3 - r_2)$ 、 $b_3 = (r_4 - r_3)$ 。对于稳态热传导 通过各层的热量相等 因此得

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 A_{m1}}} = \frac{\Delta t_1}{R_1}$$

$$= \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 A_{m2}}} = \frac{\Delta t_2}{R_2}$$

$$= \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 A_{m3}}} = \frac{\Delta t_3}{R_3}$$

应用连比定律可得

$$Q = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{\frac{b_1}{\lambda_1 A_{m1}} + \frac{b_2}{\lambda_2 A_{m2}} + \frac{b_3}{\lambda_3 A_{m3}}}$$

$$= \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$= \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^3 R_i}$$

推广到 n 层圆筒壁有

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}} \quad (10)$$

式中 Δt_i 、 R_i 分别为各层圆筒壁之间的温差和热阻。

3 TOSA 热传导模型

3.1 TO - Can 结构

其中 TO 帽所用材料为快削不锈钢,封管所用材料为铜。

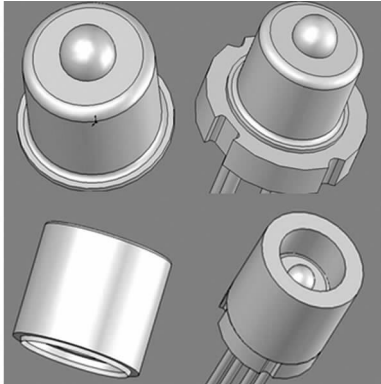


图3 TO 帽和封焊管图

3.2 TOSA 简化模型

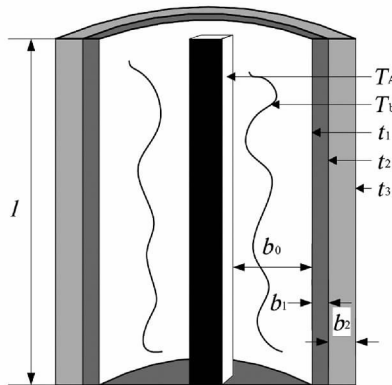


图4 TOSA 简化模型

对于 TOSA 模块来说,其内部热源来自 LD 芯片的发热。热量传递过程:芯片 >> 空气 >> 帽 >> 封管。设芯片传热速率为 Q_1 ,内部空气传热速率为 Q_2 帽和封管的热阻分别为 R_1 和 R_2 ,传热速率为 Q_3 。在本实验中,将环境温度升至指定温度,并保持一段时间之后,TOSA 的温度只与位置有关与时间无关,故为稳态热传导,通过各层壁的传热速率相等,即 $Q_1 = Q_2 = Q_3$ 。

将芯片等效为一个立方体。则其与 TOSA 内部空气相接触的表面积为

$$A_c = 2(a + b)L \quad (11)$$

式中 a 为立方体的长, m ; b 为立方体的宽, m ; L 为立方体的高, m 。

从温度因素考虑,一般来说,只有在很高温度

下,譬如 800 K (527 °C) 以上,辐射传热占主导地位。而在常温下,譬如室温或者低于室温的场合,则辐射传热热量很小,可忽略不计,此时,传热的计算仅按导热和对流传热考虑即可。

芯片的实际使用温度远远低于 800 K,所以可以忽略辐射传热带来的影响。芯片的发热带来了和其他层之间的温度差,而且表面有空气流动,故还存在对流传热。

根据能量守恒定律,芯片的发热功率即传热速率为

$$Q_1 = UI - P_{\text{光}} \quad (12)$$

式中 U 为芯片电压, V ; I 为芯片电流, A ; $P_{\text{光}}$ 为发射光功率, W 。

由此,TOSA 内各处热流率可以表示为

$$\begin{cases} Q_1 = UI - P_{\text{光}} \\ Q_2 = hA_c(T_A - t_1) \\ Q_3 = (t_1 - t_3)/(R_1 + R_2) \end{cases} \quad (13)$$

故

$$T_A = (UI - P_{\text{光}}) \left(\frac{1}{hA_c} + R_1 + R_2 \right) + t_3 \quad (14)$$

由于流体沿固体壁面流过,甚至在强烈湍动的情况下,壁面附近仍存在一层层流内层,此处的流体做层流流动,且紧贴壁面的一层流体静止不动。壁面附近的传热只能依靠导热。TOSA 内部的空气体积很小,所以,可以将空气层等效为一个传热层。则该模型的热流率公式可以描述为

$$Q = \frac{T_A - t_3}{R_0 + R_1 + R_2} = UI - P_{\text{光}} \quad (15)$$

式中 $R_0 = \frac{b_0}{\lambda A_m}$ 为空气的热阻;

得

$$T_A = (UI - P_{\text{光}}) \left(\frac{b_0}{\lambda A_m} + R_1 + R_2 \right) + t_3 \quad (16)$$

式(14)、(16)即为推算芯片结温的算式,只需要测量 TOSA 模块的外部电流、电压、发射光功率及外壳温度就能计算出芯片的结温。

不同的是式(14)的计算模型相对完善,考虑到了 TOSA 腔体中空气的对流传热情况;式(16)则将该层空气等效成一个传热层,简化了模型。后者降低了计算难度,但误差较前者大,适用于结温的粗略估计。

(下转第 72 页)

案3避免了直接引入电流的问题,由保护装置自身来判别,可以做到失灵的正确动作,此外,为避免失灵开入的误开入,保护装置特设定双开入来进行信号的正确性预判,有效防止保护装置的误动。

因此,针对不同的现场实际来采取针对性的措施进行防范:对于部分投运站已配置失灵装置(需采外部电流),可以采用方案1或方案2,但必须确保相应二次回路的正确性,避免出现电流开路造成主变压器保护和母差保护误动;对于新建变电站的主变压器保护可采用方案3,其目的在于避免使用各侧套管TA,可以大大简化二次回路且提高二次设备的可靠性。

3 结论

就现场中压侧失灵判据存在的安全隐患进行了

(上接第12页)

3.3 结温估算

参数见表1。

表1 TOSA 参数列表

| 参数名 | 取值 |
|---|-----------------|
| a/m | $0.9e^{-3}$ |
| b/m | $0.9e^{-3}$ |
| U/V | 3.1 |
| I/A | $62.8e^{-3}$ |
| $P_{光}/W$ | $0.0141e^{-3}$ |
| b_0/m | $1.65e^{-3}$ |
| b_1/m | $2.2500e^{-04}$ |
| b_2/m | $1.2500e^{-04}$ |
| L/m | $2.7e^{-3}$ |
| $\lambda_1/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ | 0.299 |
| $\lambda_2/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ | 121 |
| $\lambda_3/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ | 377 |
| $t_3/^\circ C$ | 100 |

注:其中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为查表所得其在100~150℃下的数值。

根据表1参数,利用式(16)计算结温得: $T_A = 123.2760^\circ C$ 。

分析,在此基础上提出了3种处理方案,对其进行优劣比对并结合现场实际进行相应的措施决策,为此类存在隐患的保护提供一种实用的参考。

参考文献

[1] 舒逸石,魏民,马勇. 500 kV 主变压器保护失灵回路分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011(2): 134-136.

作者简介:

李凡红(1984),男,硕士、工程师,现从事电力系统继电保护调试方面的工作;

肖启繁(1980),男,工程师,现从事变电运行管理及变电检修管理工作;

邹瑜(1984),男,工程师,现从事变电检修管理工作;

庄秋月(1986),女,硕士,工程师,现从事电力系统变电运行管理工作。

(收稿日期:2013-06-19)

4 结束语

通过对傅里叶传热定律的研究和对多层壁传热模型的讨论,得出了一种粗略估算SFP内发光部分芯片结温的方法,对其他需要建立温度模型的工程应用提供了参考。如果要更进一步的温度估算,还需要考虑到物体的肋化,搭建更加复杂的热分析模型。

参考文献

[1] 王晓春. 材料现代分析与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 171-213.

[2] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应[M]. 上海: 科学出版社, 1997: 1-199.

[3] 童钧耕. 热工基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 36-61.

[4] SFF Committee. SFF-8472 Specification for Diagnostic Monitoring Interface for Optical Transceivers[S].

[5] 刘俊俏,苗福生,李星. 二维各向异性功能梯度材料热传导的边界元分析[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 77-81.

(收稿日期:2013-07-03)