

[GIS]

GIS产品长期载流温升计算模型研究

文/西安西电开关电气有限公司 吕军玲 程立 朱琦琦 马冲 马越星

长期载流温升是GIS产品研发过程中必须考虑的重要指标之一，影响长期温升的因素除了设备所承载电流和自身电阻外，还与表面散热系数有关。以某电力设备的局部结构为例，建立了载流件表面散热热阻模型和计算模型，并在模型建立过程中，提出了模型归并简化方法以及数据处理方法，使得温升分析计算思路明晰，在此模型基础上，对其部分结构进行了表面综合散热系数和温升的计算，并与试验温升数据以及依据温升数据反算的综合散热系数进行对比，两者数值有较高的吻合度，验证此方法的有效性，能为工程实践提供参考。

依据国家标准，GIS产品的通流能力通常以额定电流和温升值来衡量，其长期承载电流的载体为主回路导体，由于主回路导体（包含中心导体、触头）的自身电阻以及各零件之间接触电阻的存在，主回路承载电流后，即成为发热源。若长期的温升值超标，将导致产品的机械性能和电气性能显著下降，产品将产生故障，甚至造成严重后果。在长期载流情况下，主回路导体温升大小与产品承载电流、回路电阻、回路导体形状和散热面积、导体周围流体的物理性质及流动速度等方面都关系密切，因此在产品初期设计，有必要对载流导体进行长期温升分析估算，避免温升过高。

然而当前研发人员在考虑GIS产品载流件长期温升时，主要是将载流导体电流密度与参考书上规定的导体允许电流密度进行比较，来定性评估长期温升是否满足设计要求，这种设计方式存在下述两种问题：一是产品研发实践中，某些形状不规则的载流件，虽然其局部的电流密度大于规定值，看似不满足设计要求，但在实际温升试验中，其长期载流温升却是符合要求；二是通过载流导体电流密度来评估温升的设计方法只能定性评估温升是否满足要求，对温升的具体数值则缺

乏定量的分析。尽管已有研究人员在高压电器的温升数值模拟方面做了大量工作，但由于GIS产品载流导体有不同结构类型、不同材质，其各自的散热方式、散热环境和散热过程等方面都各有不同，如何将各种复杂环境下的散热模型进行细化分类、建立相应的数学模型以及对模型进行归类简化等都需要进一步探索。

为了进一步了解影响温升相关联的因素，为高压电器产品设计提供帮助，将长期载流的GIS产品局部结构散热过程进行研究，通过散热模型分析、建立散热热阻模型并将其简化、形成数学模型等过程，实现对该长期载流结构的温升计算，为同行在高压电器产品设计上提供参考。

模型建立

1. 模型分析

以GIS某产品的局部结构为例，在正常的通流过程中，其散热方式主要包括传导、对流以及辐射，其散热模型如图1所示。该结构的载流件由导电杆、触头和绝缘件中心导体等部件连接形成一个导体，由于导体自身电阻和接触电阻的存在，在长期载流情况下，产生的热量主要是通过外壳

内的气体对流换热以及热辐射传递给外壳，外壳再通过热传导和对流换热，将热量传递到周围环境中。另一部分热量通过绝缘支座传导给金属

环，然后传递到周围环境中。另外，由于设计中壳体回流是必须考虑的问题。因此在建立散热模型时，外壳的流通也应该考虑。

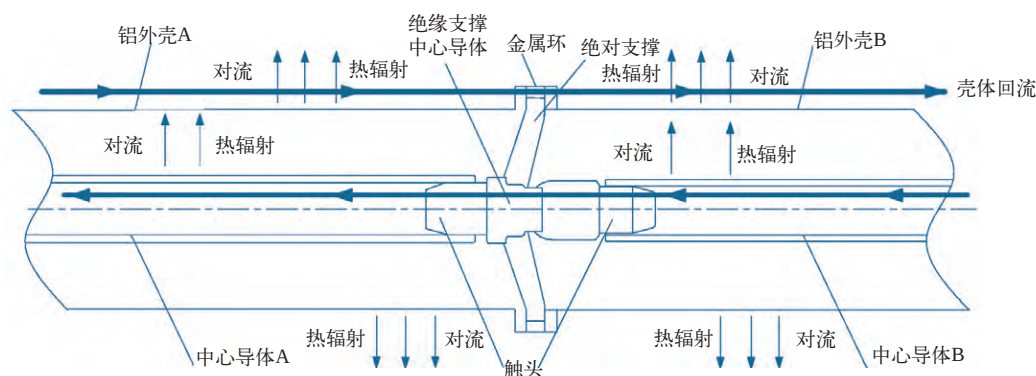


图1 散热模型

2. 表面散热模型

在长期载流导体的温升计算中，关键参数是散热系数，散热系数由发热体周围流体物理性质、流动情况、散热面几何形状、放置方式和流动空间大小等。由于散热系数受物体自身温度影响较小，在一定温度范围内，通流载体的表面散热系数为常数，因此壳体回流不会影响中心导体和外壳表面的散热系数。散热系数与散热热阻有着密切的关系，可用散热热阻求解散热系数，下面首先对散热热阻进行求解。

根据图1所示散热模型，将绝缘支撑两侧的触头与相应侧的中心导体归为一体，分别形成中心导体A和中心导体B，继而建立如图2所示的载流导体表面散热热阻模型，依据不同的散热方式（热对流、热传导和热辐射），散热热阻分为3种类型。

1) 对流散热热阻是指在流体换热过程中，固体壁面与流体之间的热阻。由图2可知，该结构的

对流散热热阻包括：中心导体A外表面对流热阻 R_{11} 、中心导体B外表面对流热阻 R_{17} 、外壳A对流热阻 R_{31} 、金属环对流热阻 R_{32} 以及外壳B对流热阻 R_{33} 。

2) 辐射散热热阻是指两个温度不同的物体相互辐射换热时的热阻。由图2可知，该结构的辐射散热热阻包括：中心导体A外表面热辐射热阻 R_{12} 、绝缘支撑中心导体热辐射热阻 R_{13} 与中心导体B外表面热辐射热阻 R_{18} 、铝外壳A与空气之间的辐射散热 R_{34} 、金属环与空气之间的辐射散热 R_{35} 以及铝外壳A与空气之间的辐射散热 R_{36} 。

3) 热传导散热热阻是指热量在物体内部以热传导的方式传递时遇到的热阻。由图2可知，该结构的热传导散热热阻包括：绝缘支撑热传导热阻 R_{15} 、外壳A热传导热阻 R_{21} 、金属环热传导热阻 R_{22} 和外壳B热传导热阻 R_{23} 。

根据不同类型散热热阻的计算公式，计算相应热阻。

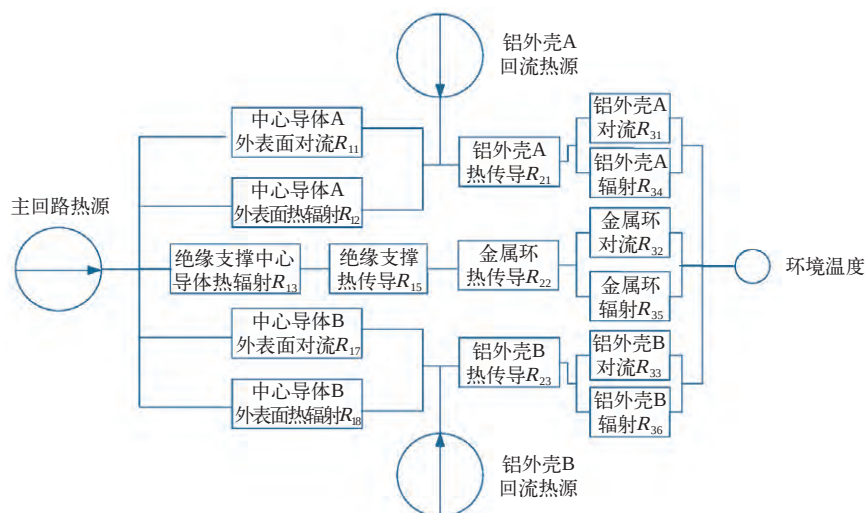


图2 散热热阻模型

(1) 载流导体外表面对流热阻

依据式(1), 可得 R_{11} 、 R_{17} 、 R_{31} 、 R_{32} 、 R_{33} 。

$$R_1 = \frac{1}{K_0 A_0} \quad (1)$$

式(1)中, A_0 为载流导体发生对流的表面积; K_0 为载流导体表面对流散热系数。

对流散热系数 K_0 值由导体表面流体的物理特性、密度和流速等决定, 可用经验公式, 通常用巴兹公式计算。

(2) 载流导体外表面辐射热阻

依据式(2), 可得 R_{12} 、 R_{13} 、 R_{18} 、 R_{34} 、 R_{35} 、 R_{36} 。

$$R_n = \frac{1}{7A_1 \varepsilon} \quad (2)$$

式(2)中, ε 为黑度; A_1 为载流导体发生热辐射的外表面面积。

黑度 ε 值不仅与材料和表面状况有关, 还与表面温度有关, 其值在0~1之间, 在工程实际中, 通过查阅电机工程手册取值。

(3) 热传导的热阻

依据式(3), 可得 R_{15} 、 R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 。

$$R_0 = \frac{\delta_1}{\lambda_1 A_2} \quad (3)$$

式(3)中, δ_1 为传导件的壁厚; λ_1 为热导率; A_2 为导体表面积。

热导率 λ_1 值主要由材料本身属性决定, 由查阅电机工程手册取值。

3. 模型简化

该高压电器产品载流件的散热环境复杂, 为了便于分析计算, 按照不同散热方式之间的关系, 将上述热阻模型根据串并联关系进行归并, 最终可归结为如图3所示的3个综合热阻。

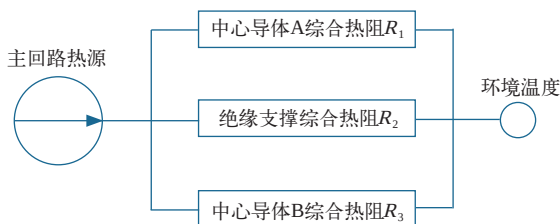


图3 热阻简化模型

1) 中心导体A综合热阻 R_1 : 它是由热阻 R_{11} 与 R_{12} 并联、 R_{31} 与 R_{34} 并联然后再与 R_{21} 串联组成, 可由式(4)表示。

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}}} + R_{21} + \frac{1}{\frac{1}{R_{31}} + \frac{1}{R_{34}}} \quad (4)$$

2) 绝缘支撑表面的综合热阻 R_2 : 它是由热阻 R_{32} 与 R_{35} 并联, 然后再与 R_{13} 、 R_{15} 、 R_{22} 串联组成, 可由式(5)计算所得。

$$R_2 = R_{13} + R_{15} + R_{22} + \frac{1}{\frac{1}{R_{32}} + \frac{1}{R_{35}}} \quad (5)$$

3) 中心导体B综合热阻 R_3 : 它是由热阻 R_{17} 与 R_{18} 并联、 R_{33} 与 R_{36} 并联然后再与 R_{23} 串联组成, 可用式(6)表示。

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{17}} + \frac{1}{R_{18}}} + R_{23} + \frac{1}{\frac{1}{R_{33}} + \frac{1}{R_{36}}} \quad (6)$$

根据散热系数式(4), 可得中心导体A表面的综合散热系数 α_1 、绝缘支撑表面的综合散热系数 α_2 和中心导体B综合散热系数 α_3 。

$$\alpha = \frac{1}{RS} \quad (7)$$

式(4)中, S 为载流体散热表面积, 单位为 m^2 ; α 为表面散热系数, 单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; R 是热阻, 单位为 K/W 。

4. 温升计算

根据不同类型部件所得到的表面散热系数 α , 可按照式(5)进行长期温升计算。

$$\Delta\theta = \frac{i^2 r}{a S} \quad (8)$$

式(5)中, $\Delta\theta$ 为长期温升, 单位为 K ; i 为长期载流, 单位为 A ; r 为载流导体电阻, 单位为 Ω 。

在模型中, 绝缘支撑的径向尺寸大、轴向尺寸小, 绝缘支撑的热传导性能差(即传导热阻大), 绝缘支撑中心导体产生的热量通过绝缘支撑以及金属环散发的热量可以忽略, 主要是通过绝缘支撑中心导体两侧安装的触头将热量传导并散发出去, 因此在温升计算过程中, 将绝缘支撑中心导体的电阻分摊在左右两侧触头的电阻里, 进一步简化了计算过程, 同时也更接近于实际回路的发热与散热过程。

温升计算比较

以模型的中心导体A为算例, 采用前述模型及其公式, 计算其综合散热系数和温升, 并将计算结果与温升试验数据进行对比。

1. 采用模型及相应公式计算

依据前述的散热模型、热阻模型及其相应计算公式, 计算中心导体A的综合热阻 R_1 , 综合散热系数 α_1 , 然后根据式(5)计算其温升 $\Delta\theta_1$, 计算

(下转第83页)

读数降低甚至为零,属正常运作状态;如读数升高,首先考虑避雷器中瓷外套绝缘和避雷器阀片中电流不正常;或避雷器密封不好,内部受潮所致;或是阀片内部零件烘干不好,有部分潮气滞留;或是装置时不慎将密封圈漏放、放偏和在密封圈与瓷套密封封面之间存有杂物;或避雷器使用一段时间后密封零件进潮而坏。

设想前景

随着现代控制技术和现代通信技术在电力(电气)行业的应用,变配电室传统的电磁式继电保护装置正逐步被微机综合保护装置所取代。新一代的微机综合保护器,不仅涵盖了传统继电保护和自动装置的全部功能,而且能对变配电回路的开关状态,电流、电压等模拟信号,事故下的脉冲信号,以及一些非电量信号进行采集、储存和运算。应用先进避雷器的配套产品,使上述

电器产品均具备了安全数据通信接口,为各个电气控制节点间的数据进行交换、整合,实现信息资源共享,实施实时监测、集中管理无疑将成为远程控制提供了基本要素。变配电所综合自动化装置,包含了上述集保护、测量、计量、控制和通信于一体的智能化前端设备,将这些前端设备的通信接口连接起来的现场总线,进行通信预处理的通信管理单元以及经过组态的上位机单元。通过采用先进的技术,提高变配电室综合自动化水平,实现遥控、遥测、遥信和遥调四遥功能。降低变配电室成本,提高变配电室的供配电电能质量和供电安全可靠,尽量减少变电所员工,避免操作误差,缩短事故处理时间,是现代化智能变电应有的功能。所以,实现变配电室综合自动化势在必行。EA

(收稿日期:2015.12.17)

(编辑:刘群点)

(上接第79页)

结果参数表如表1所示。

表1 依据模型的参数计算

项目	参数	单位	备注
R_{11}	0.04	K/W	对流散热热阻
R_{12}	0.23	K/W	辐射散热热阻
R_{21}	8.2×10^{-4}	K/W	传导散热热阻
R_{31}	0.03	K/W	对流散热热阻
R_{34}	0.125	K/W	辐射散热热阻
R_1	0.059	K/W	综合散热热阻
α_1	3.2	W/(m ² ·K)	综合散热系数
$\Delta\theta_1$	47.5	K	计算温升

在载流为4 000 A条件下,中心导体A的综合散热系数计算值为3.2 W/(m²·K),温升的计算值为47.5 K。

2. 比较分析

某GIS产品温升试验数据:载流4 000 A,中心导体A的温升为45.0 K(取中心导体和触头实测温升的最大值)。

依据温升试验数据,采用试凑法对模型的中心导体A的综合散热系数 α_1 进行反算,反算结果是3.3 W/(m²·K)。

将计算所得结果与温升试验数据以及依据试

验数据反算的散热系数值进行对比,如表2所示。

表2 计算值与试验数据(包括反算值)对比

项目	计算值	反算值	试验数据
α_1	3.2	3.3	
$\Delta\theta_1$	47.5		45

通过表2比较可知,理论计算温升和试验温升相差2.5 K;综合散热系数理论计算值和试凑法反算值相差0.1 W/(m²·K),误差率均在5%以内。

结束语

高压开关长期载流温升是高压电器产品载流能力的重要衡量指标之一,在产品研制过程中,长期载流温升是必须考虑的关键内容之一。以某产品的分支母线为例,进行了散热模型分析、模型建立和模型的简化等,并提出了产品散热模型的建立及简化方法,为产品温升计算过程理清思路。同时依据模型及其公式计算了综合散热系数和温升,并将其与试验数据以及依据试验数据反算的散热系数值进行对比,对比结果表明,本文所采用的模型建立、简化方法以及计算过程具有一定的工程指导意义。EA

(收稿日期:2015.12.04)

(编辑:刘群点)