

基于三层复合结构的特高压内检智能装备设计与散热研究

侯纪勇, 周振洲*, 宗海迥, 王俊峰, 汪通, 阎国增

国家电网有限公司特高压建设分公司, 北京, 中国

*通讯作者

【摘要】特高压变电站主设备的内检是保障电网安全的核心环节。针对当前变压器内检作业中防护装备功能单一、散热不足的突出问题, 本文开发了一款集防护、支撑与散热功能于一体的智能装备。该装备采用三层复合结构: 柔性外层缓冲冲击、高强度中间层提供支撑与设备集成平台、以及内置主动散热风道的可拆卸内衬。本文重点对该智能装备的散热功能进行了理论与实验分析, 通过热力学计算与实地测试验证了其在变压器密闭环境下的有效温控能力。应用结果表明, 该装备显著提升了内检作业的安全性、效率与人员舒适度, 为特高压变电站的智能化内检提供了有效的技术解决方案。

【关键词】特高压变电站; 变压器内检; 智能装备; 三层结构; 热分析

1. 引言

特高压电网作为电力输送的关键枢纽[1-3], 其核心设备(如变压器)的质量直接关系到电网运行的安全稳定, 对国家能源安全与经济发展具有重要影响。在变压器现场安装阶段, 内部检查与接线作业是确保设备质量的核心环节, 亟需高效、可靠的专用智能装备支持。

目前, 国内在变电站智能装备领域已取得一定进展。曹宇等[4]通过将可穿戴智能头盔、智能机器人等智能装备应用于变电运检, 显著提升了作业的安全性与效率; 许炜等[5]对穿戴式智能移动设备与机器人进行了系统分析, 并通过典型应用案例验证了其良好的实践效果; 许晓路等[6]通过应用了一套集成红外、RFID与近场通信等硬件功能并配套标准化作业APP的移动作业装置, 实现了运检流程的规范化与高效化; 李飞等[7]提出一种基于电力物联网的智能移动作业系统, 通过数据采集、处理与场景分析模块, 优化了传统手工记录方式; 严宇等[8]建立了GIS巡检机器人在管道内多壁面攀爬的力学平衡模型, 为机器人结构优化与实用化提供了理论依据与应用支撑。然而, 现有装备主要面向变电站日常运检或线路巡检场景, 尚缺乏专门用于特高压变压器内检作业的专用智能装备。

特高压变压器内检作业环境特殊: 内部空间狭小, 要求装备外壳具备软质防护特性以避免磕碰损伤, 同时需具备足够的结构支撑性以集成照明、摄像、通信、氧气与生理信号监测等功能模块。此外, 内检作业持续

时间长、劳动强度大, 传统简易防护头套散热性能差, 易造成作业人员头部热量积聚, 影响操作舒适度与效率。因此, 亟需开发一种兼具防护、支撑与散热功能的专用智能装备。

针对上述问题, 本文结合经验厚度设计基础, 提出了一种基于5mm热塑性弹性体(TPE)柔性外层、5mm高强度复合材料板功能中间层及15mm可拆卸EVA+泡棉舒适内衬的三层结构智能装备设计方案, 并与传统无衬垫和单层固定衬垫从外层、中间层和内衬层四个方面进行对比, 在此基础上结合热力学分析, 验证了装备的散热性能。最后, 在新疆哈密巴里坤±800千伏换流站工程800千伏变压器内检作业现场开展了智能装备基本功能测试, 监测了作业人员头部温度, 数据与理论计算结果基本吻合, 有效验证了智能装备的良好散热性能。

2. 智能装备三层结构设计

目前传统智能装备主要有无衬垫智能装备、单层固定衬垫智能装备(图1)等, 其外壳为硬质材料、体积较大, 且在密闭空间内透气性差, 不适用于特高压变压器内检作业的特殊环境, 现阶段工作人员普遍使用浴帽作替代, 缺乏一定安全性, 同时内外工作人员沟通受限, 作业人员生理体征无法得到实时监测, 易引起安全隐患[9]。

基于传统智能装备、特高压变压器内检作业的特殊环境以及经验厚度设计基础, 设计了具有三层结构的智能装备, 如图2所示。智能装备的三层结构包括外层、中间层

和内衬层。其中外层与中间层是其实现基础防护与支撑功能的关键[10]，外层采用 5mm 热塑性弹性体 (TPE) 提升缓冲与防刮性能；中间层选用 5mm 高强度复合材料作为独立承载结构，内置设备安装接口，保障整体稳定；内衬层是实现高效散热与舒适佩戴的核心，采用总厚约 15mm 的复合设计，集缓冲、导汗与主动散热功能于一体：固定内衬为带蜂窝散热孔及导流气道的 EVA 材质，有效引导气流与汗液排出，显著增强空气流通；可拆卸部分采用吸汗泡棉与透气面料，提供个性化贴合的同时便于清洁更换[11]。该设计不仅有效解决传统安全帽闷热、积汗的痛点，更为集成主动制冷系统提供物理风道基础，真正实现了持续、可靠的散热性能，适用于特高压变压器内长时间作业的高温环境。



图 1.无衬垫及单层固定衬垫智能装备



图 2.具有三层结构的智能装备

三层结构智能装备通过分层设计实现了功能的专业化与性能的优化：外层缓冲吸能、中层提供稳定支撑、内衬兼顾舒适与散热，在有效分散冲击的同时，避免了因二次加工导致的结构损伤。可拆卸内衬也显著提升了维护便利性。具有三层结构的智能装备与传统智能装备性能对比如表 1 所示。

根据表 1，可以看出具有三层结构的智能装备在安全性、功能适应性和可维护性方面均表现出明显优势。

表 1.智能装备性能对比

功能维度	无衬垫智能装备	单层固定衬垫智能装备	三层结构智能装备
防护性能	基础防护 单层硬质结构，抗冲击能力有限	基础缓冲 增加衬垫提升缓冲，防护有所改善	分级防护 三层级联吸能，大幅提升冲击保护

支撑性能	简单支撑 结构完整性易受安装影响	有限支撑 支撑性能受衬垫影响	稳定支撑 独立承力层，预埋结构保持完整性
散热性能	无散热设计 透气性差，易积聚汗液	被动散热 衬垫一定程度上阻碍散热	主动散热 预留风道与接口，支持强制对流
适用场景	临时简单防护	一般作业环境	特高压密闭环境 长时间高强度作业

3.智能装备热分析

本智能装备热分析的整体思路在于通过建立分层热阻模型来理论计算头部温度。首先分别计算智能装备外层、中间层与内衬层热阻；其中，外层与中间层视为固体导热，采用传导热阻公式计算；而内衬层热阻计算则需综合考虑散热孔洞的等效热阻与主动制冷风道的对流热阻。继而，通过串联各层热阻得到装备总热阻，并将其代入基于能量守恒的热平衡方程，最终可理论计算出佩戴者头部的温度。

3.1 智能装备外层、中间层热阻计算

传导热阻 R 计算公式：

$$R = \frac{L}{K * A_{cap}} \quad (1)$$

式中：

R---传导热阻，单位：m² · K/W；

L--厚度，单位：mm；

K---导热系数，单位：W/(m*K)；

Acap---智能装备等效表面积，单位：m²；

3.2 智能装备内衬层热阻计算

计算内衬层热阻时与外层和中间层不同，需要考虑散热孔洞与主动散热风道的共同影响。合理增加散热孔洞数量、直径、排列方式，可以有效降低孔道部分热阻 R_{hole}，孔洞正六边形排列是效率最高的铺排方式，能在相同面积下实现最高孔隙率，避免局部“热点”，确保散热均匀，这种排列可以在不减小孔间距（保证结构强度）的前提下，最大化孔的数量。利用烟囱效应。确保散热孔道尽可能垂直（当人员站立或行走时），利用热空气自下向上的自然流动来增强对流。

考虑到仅依靠散热孔洞自然对流对降温效果不佳，设置了一组的可拆卸制冷设备，选用挂腰空调扇。冷却气体经通风管道从智能装备通风口吹到工作人员头部，形成强制

对流, 极大增加对流换热系数 h 。

总开孔面积 A_{hole} :

$$A_{hole} = N * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (2)$$

计算孔隙率 Φ :

$$\Phi = \frac{A_{hole}}{A_{cap}} \quad (3)$$

总对流换热面积 $A_{surface}$:

$$A_{surface} = N * \pi * D * L_{liner} \quad (4)$$

多孔材料部分热阻 R_{mat} 计算:

$$R_{mat} = \frac{L_{liner}}{k_{EVA}(1-\Phi)} \quad (5)$$

孔道部分热阻 R_{hole} 计算:

$$R_{hole} = \frac{1}{h * A_{surface}} \quad (6)$$

内衬热阻 R_{liner} 计算:

$$\frac{1}{R_{liner}} = \frac{1}{R_{mat}} + \frac{1}{R_{hole}} \quad (7)$$

以上式中:

R_{liner} ---内衬层热阻, 单位: $m^2 \cdot K/W$;

L_{liner} ---内衬层厚度, 取 15mm;

k_{EVA} ---EVA 材料导热系数;

h ---对流换热系数, 单位: $W/(m^2 \cdot K)$;

Φ ---孔隙率;

R_{mat} ---多孔材料部分热阻, 单位: $m^2 \cdot K/W$;

R_{hole} ---孔道部分热阻, 单位: $m^2 \cdot K/W$;

3.3 头部温度计算

智能装备总热阻计算:

$$R_{total} = R_{outer} + R_{mid} + R_{liner} \quad (8)$$

热平衡方程:

$$q = \frac{T_{head} - T_{amb}}{R_{total}} \quad (9)$$

头部温度计算:

$$T_{head} = q * R_{total} + T_{amb} \quad (10)$$

式中:

T_{head} ---头部温度, 单位: $^{\circ}C$;

T_{amb} ---环境温度, 单位: $^{\circ}C$;

R_{total} ---智能装备总热阻, 单位: $m^2 \cdot K/W$;

q ---头部热流密度, 单位: W/m^2 ;

由上式分析, 必须控制 R_{total} 低于一定值, 才能保证头部温度在安全、舒适的范围内。

3.4 智能装备热分析计算

据前所述, 智能装备三层结构设计为 5mm 热塑性弹性体 (TPE) 柔性外层、5mm 高强度复合材料板功能中间层及 15mm 可拆卸 EVA+泡棉舒适内衬层, 三层结构的热阻系数分别取各层材质的典型值, 分别为 $0.4W/(m^2 \cdot K)$ 、 $0.3W/(m^2 \cdot K)$ 、 $0.05W/(m^2 \cdot K)$ 。不同于运检运维作业, 特高压变压器内检作业严格要求作业环境干燥, 三层结构智能装备采用了全包裹结构避免作业人员汗水滴落, 等效表面积为 $0.15m^2$, 略大于传统智能装备。由式 (1) 计算可得, 外层和中间层的传导热阻分别是 $0.0125m^2 \cdot K/W$ 、 $0.0167m^2 \cdot K/W$ 。

计算内衬层热阻时需要考虑散热孔洞与主动散热风道的共同影响。内衬层上布置 500 个正六边形散热孔洞, 孔洞直径 $D=4mm$, 由式 (2) - (4) 计算得总开孔面积 A_{hole} 为 $0.006283 m^2$, 孔隙率 Φ 为 0.0419, 总对流换热面积 $A_{surface}$ 为 $0.09425m^2$ 。综合分析主动制冷设备功率, 以及对流换热面积, 对流换热系数 h 取 90。由式 (5) - (6) 计算可得多孔材料部分热阻和孔道部分热阻分别是 $0.313m^2 \cdot K/W$, $0.118m^2 \cdot K/W$ 。散热孔洞与主动散热孔道可共同影响内衬层传导热阻, 故采用并联计算方式, 通过式 (7) 计算内衬层热阻 R_{liner} 为 $0.086m^2 \cdot K/W$ 。

综上所述, 由式 (8) 可算得智能装备总热阻 R_{total} 为 $0.115m^2 \cdot K/W$ 。实际变压器内检过程会先通入干燥空气, 变压器内部温度为 $25^{\circ}C$, 头部热流密度为 $q=65W/m^2$ 。通过式 (10) 最终可算得头部温度为 $32^{\circ}C$ 。

4. 实验验证

本实验选定在新疆哈密巴里坤 ±800 千伏特高压换流站进行。图 3 为巴里坤换流站 800 千伏变压器内检作业现场。在特高压变压器内检作业开始前, 需于变压器人孔入口处规范搭建一个全封闭式内检防尘棚, 并在作业全程通过干燥气体发生器持续向变压器内通入干燥空气, 以排除外部沙尘与湿度的干扰。



图 3.内检作业现场

参与内检作业的人员在进入防尘棚前，需规范佩戴集成温度传感器的智能装备。智能装备在作业期间可持续、自动地记录作业人员头部皮肤温度。与此同时，智能装备测试人员位于变压器外部，通过专用的软件平台终端，对作业人员的头部温度数据进行实时远程监控与观察，每30分钟在软件终端上记录一次瞬时温度值。

由图4可知，佩戴智能装备后，整个作业流程内检作业人员头部温度可保持在32℃左右，与理论计算结果基本吻合，证明智能装备散热性能良好。



(a) 刚进入变压器 (b) 进入变压器 0.5h (c) 进入变压器 1h

图4.作业人员头部温度

5. 结束语

本文成功开发了一款面向特高压变电站变压器内检作业的三层结构智能装备，填补了该领域长期缺乏专用智能化装备的空白。采用5mm TPE外层、5mm复合材料中间层及15mm EVA内衬层（具备散热孔洞并集成主动制冷系统）结构方案，通过外层防护、中间层支撑与内衬层散热的协同设计，实现了防护性、结构性与散热性的统一。

在散热方面，通过热力学建模与公式计算，在内检全过程中可将作业人员头部温度稳定控制在32℃左右。最终，在新疆巴里坤±800千伏换流站的实际应用结果表明，该装备的散热性能与理论计算高度一致，形成了从设计、计算到验证的完整技术闭环，为

特高压主设备内检作业提供了一套安全、高效、可靠的专用解决方案。

参考文献

- [1] 白建华.特高压输电能源经济环境效益巨大[J].国家电网, 2014, (06): 28-31.
- [2] 王志轩.电能替代与特高压输电是治霾之本[J].国家电网, 2014, (04): 22.
- [3] 廖菁, 李文英, 文明, 等.特高压输电背景下火电企业调峰辅助服务策略研究[J].价格理论与实践, 2021, (10): 143-147+195.
- [4] 曹宇.变电运检作业中智能化移动设备的应用研究[J].现代工业经济和信息化, 2024, 14(11): 206-208.
- [5] 许炜.智能化移动设备在变电运检作业中的应用[J].电工技术, 2023, (18): 110-112+116.
- [6] 许晓路, 程林, 周正钦, 等.基于移动作业的变电智能运检装置设计与应用[J].仪表技术与传感器, 2019, (6): 115-117, 122.
- [7] 李飞, 王永强, 张聪斌, 等.一种基于电力物联网的变电运检智能移动作业系统及方法: 202010320925[P].2020-08-07.
- [8] 严宇, 刘旭辉, 王彪, 等.电力GIS巡检机器人沿狭小空间管道内壁攀爬特性分析[J].武汉纺织大学学报, 2022, 35(1): 30-34.
- [9] 周友武, 刘明军, 叶爱民, 等.一种适用于电网中智能安全帽系统的研究与测试[J].江西电力, 2017, 41(12): 21-24+28.
- [10] 钱碧甫, 陈海宏, 夏明华, 等.一种新型电力智能安全帽的研制[J].电气防爆, 2018, (03): 43-46.
- [11] 党文龙, 卫琛浩, 李盟洁, 等.纳米吸能材料在安全帽上的应用[J].陕西煤炭, 2023, 42(01): 150-153.