

# 油浸式自冷变压器用三维肋管散热器换热特性研究

龙震泽<sup>1</sup>, 陈凌<sup>1</sup>, 罗华东<sup>2</sup>, 丁玉栋<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610094;

2. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**为研究三维肋管散热器的自然对流换热特性,分析不同温升下三维肋管散热器的强化换热性能,搭建了模拟油浸式自冷变压器工作过程的实验平台,在不同功率下分别测试了片间距为45 mm的片式散热器、排间距为45和55 mm的三维肋管散热器的进口温升,拟合得到散热器的温升-功率曲线,计算出3个散热器在相同温升下的散热量。研究表明:相比于片式散热器,三维肋管散热器在温升较小时没有显现出明显的强化换热性能,但随着温升的增加三维肋管的散热性能逐渐优于片式散热器,当温升达到50 K时45和55 mm排间距的三维肋管散热器的单位体积散热量分别增加了14%和11%。

**关键词:**三维肋管;自然对流;强化换热;油浸式自冷变压器

中图分类号:TM406

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.03.016

[引用本文格式]龙震泽,陈凌,罗华东,等.油浸式自冷变压器用三维肋管散热器换热特性研究[J].热能动力工程,2022,37(3):110-114. LONG Zhen-ze, CHEN Ling, LUO Hua-dong, et al. Heat transfer characteristics of three-dimensional finned tube radiator for oil natural air natural power transformer[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 110-114.

## Heat Transfer Characteristics of Three-dimensional Finned Tube Radiator for Oil Natural Air Natural Power Transformer

LONG Zhen-ze<sup>1</sup>, CHEN Ling<sup>1</sup>, LUO Hua-dong<sup>2</sup>, DING Yu-dong<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu, China, Post Code: 610094; 2. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & Systems, MOE, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030)

**Abstract:** To research the natural convection heat transfer characteristics and analyze the effect of different temperatures on the enhanced heat transfer performance of the 3-D finned tube radiator, we set up an experimental platform for simulating the working process of oil natural air natural (ONAN) power transformer, and tested the inlet oil temperature rise of the panel radiator with 45 mm spacing, as well as that of the 3-D finned tube radiators with 45 and 55 mm row spacing under different power. The temperature rise-power curve was fitted based on experimental data, and heat dissipation of these 3 radiators under fixed temperature rise was calculated by the curve. The results show that, compared with the panel type radiator, the 3-D finned tube radiator has no significant heat transfer enhancement under relatively low temperature rise, however, the heat dissipation performance of the 3-D finned tube was gradually better than that of the panel radiator with increasing temperature rise. As temperature rise reaches 50 K, the heat dissipation per unit volume of the 3-D finned radiators with 45 and 55 mm row spacing increases by 14% and 11% respectively compared with the panel radiator.

**Key words:** 3-D finned tube, natural convection, heat transfer enhancement, ONAN power transformer

收稿日期:2021-04-09; 修订日期:2021-05-28

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52199718001R)

**Fund-supported Project:** Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52199718001R)

作者简介:龙震泽(1989-),男,重庆沙坪坝人,国网四川省电力公司电力科学研究院工程师。

通讯作者:丁玉栋(1976-),男,山东巨野人,重庆大学教授。

## 引言

油浸式自冷变压器由于不需要油泵和风机等冷却设备,具有可靠性高、耗能少的优点,从而得到了广泛应用。变压器运行时,内部绕组和铁芯所产生的损耗会使绕组、铁芯及油箱的温度上升,导致变压器的使用寿命缩短,供电安全性降低。为控制变压器的温升,往往要采用散热器进行散热。片式散热器是目前油浸式自冷变压器的主流散热器,散热片由冷轧钢直接冲压而成,表面光洁,传热系数低。当变压器负载增大时,片式散热器满足不了散热需求就会导致变压器过热,严重影响变压器内绝缘材料的寿命<sup>[1]</sup>。为减小变压器的温升,提高变压器迎峰度夏期间的过负载能力,保证变压器安全稳定运行,需要增强散热器的散热能力,提高散热效率。

由牛顿冷却公式可知,在不增加变压器温升的情况下增强散热器的散热能力,需从增大传热系数和增大换热面积角度考虑。增大自然对流传热系数通常需要增加辅助设备,会给系统增加额外负担。因此,优选的强化换热技术是增大换热面积。对油浸式变压器用散热器,油侧的换热热阻约为空气侧换热热阻的 $1/10$ <sup>[2]</sup>,因此,空气侧的换热强化更为关键。目前,片式散热器的空气侧强化换热研究主要集中在加扰流元件<sup>[3-4]</sup>、改变片间距和片数等方面问题<sup>[5]</sup>。三维肋管是具有三维肋片结构的强化换热管,通过专用机床和刀头可在不同材质的基管表面旋转刻切出离散而排列有序的鳞片状肋片<sup>[6]</sup>。已有研究表明,三维肋管在管外空气强制对流<sup>[7-9]</sup>、管外凝结换热<sup>[10-11]</sup>和单管自然对流<sup>[12-13]</sup>等传热过程中均具有良好的强化换热性能。

本文设计了一种新型的三维肋管散热器,应用于油浸式变压器自冷散热,通过实验研究由三维肋管管束构成的整体散热器的自然对流换热性能,并将其与片式散热器进行对比,探讨三维肋管自冷散热器的换热强化能力及其在油浸式变压器中的应用前景。

## 1 实验装置及结构参数

油浸式变压器自冷散热器性能测试装置如图1

所示,实物如图2所示。为了保证周围空气流场稳定,在实验台周围搭建了长4 m、宽4 m的封闭空间,形成环境仓。以3根可调功率、均匀热流的加热棒模拟变压器工作时绕组的发热过程,用标准T型热电偶测量温度。要求在连续的3 h内顶油温升在1 K范围内波动,认为是稳定状态,记录并保存实验数据。

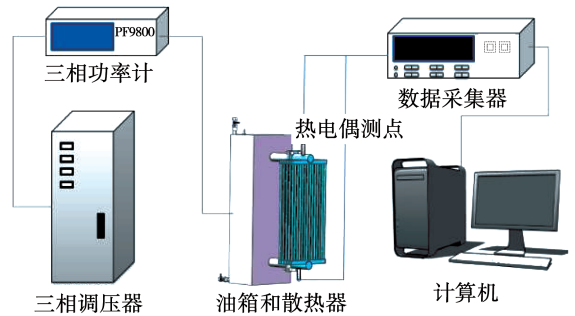


图1 油浸式变压器自冷散热器性能测试装置示意图

Fig. 1 Diagram of heat dissipation performance test device of radiator



图2 实验系统实物图

Fig. 2 Photo of experimental system

三维肋管散热器采用顺排管束结构,管间距、排间距及整体散热器体积如表1所示,其模型如图3所示。对比的片式散热器型号为PC1100-16/480,用于SZ11-3150/35变压器。为了使实验结果具有可比性,用同一温升50 K下的散热功率做基准。每个工况均使用几组不同的加热功率进行温升实验,通过对实验数据的分析和曲线拟合,获得50 K温升所对应的功率。

表 1 散热器结构参数

Tab. 1 Structural parameters of radiators

散热器	排(片间距)/mm	体积/m <sup>3</sup>
1号三维管散热器	45	0.364
2号三维管散热器	55	0.433
片式散热器	45	0.364

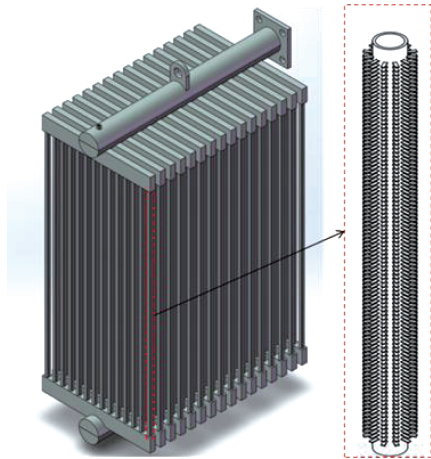


图 3 三维肋管散热器

Fig. 3 Diagram of 3-D finned radiator

## 2 散热性能测试及数据拟合

### 2.1 油箱本体散热性能测试

首先,测试油箱本体的散热性能。3根加热棒的总加热功率  $Q_b$  如表 2 所示,分别获得对应总加热功率下稳定状态的顶层油温,减去环境仓内测试台周边的空气温度,获得温升数据  $\Delta T$ 。

表 2 油箱散热性能实验数据

Tab. 2 Experimental data of heat dissipation performance of oil tank

工况	$\Delta T/K$	$Q_b/W$
1	11.5	48
2	19.9	89
3	28.6	153
4	42	271
5	51	395

由表 2 实验数据经过 origin 拟合获得油箱内顶层油温升 - 功率拟合公式(1),拟合精度为 0.993 6。

$$Q_b = 0.7478\Delta T^{1.589} \quad (1)$$

因此,当油箱顶层油温升为 50 K 时,油箱的总散热量为 375 W。

### 2.2 三维肋管散热器和油箱本体的散热性能测试

将设计的 2 组三维肋管散热器分别安装至油箱,形成油侧自然对流循环回路,测试三维肋管散热器 + 油箱本体的散热性能。实验数据如表 3 和表 4 所示。分别获得对应总加热功率下稳定状态的温升数据  $\Delta T$ 。

同样,由表 3 和表 4 实验数据经过 origin 拟合分别获得 1 号及 2 号三维肋管散热器 + 油箱本体散热时油箱内顶层油温升 - 功率拟合公式(2)和(3),拟合精度分别为 0.999 2 和 0.999 7。

表 3 1号三维肋管散热器的实验数据

Tab. 3 Experimental data of No. 1 3-D finned tube radiators

工况	$\Delta T/K$	$Q_1/kW$
1	16.4	0.5
2	26	1
3	35.7	1.7
4	42.8	2.3
5	47.9	2.8
6	54.1	3.5

表 4 2号三维肋管散热器的实验数据

Tab. 4 Experimental data of No. 2 3-D finned tube radiators

工况	$\Delta T/K$	$Q_2/kW$
1	15.3	0.5
2	24.9	1.1
3	31.6	1.6
4	37.8	2.2
5	44.2	2.8
6	49	3.4

$$Q_1 = 0.00387\Delta T^{1.7033} \quad (2)$$

$$Q_2 = 0.00594\Delta T^{1.6246} \quad (3)$$

当油箱顶层油温升为 50 K 时,1 号三维肋管散热器和油箱的总散热量为 3 030 W,2 号三维肋管散热器和油箱的总散热量为 3 419 W。

### 2.3 片式散热器和油箱本体的散热性能测试

将对实验用片式散热器安装至油箱,形成油

侧自然对流循环回路,测试片式换热器+油箱本体的散热性能,如表5所示。分别获得对应总加热功率下稳定状态的温升数据 $\Delta T$ 。

表5 片式散热器的实验数据

Tab.5 Experimental data of panel radiator

工况	$\Delta T/K$	$Q_0/kW$
1	15.9	0.5
2	27.7	1.1
3	37	1.7
4	44.6	2.2
5	51.3	2.9
6	57.6	3.3

同样,由表5实验数据经过origin拟合获得片式换热器+油箱本体散热时油箱内顶层油温升-功率拟合公式(4),拟合精度为0.9964。

$$Q_0 = 0.00725\Delta T^{1.5125} \quad (4)$$

由拟合公式知,当顶层油温升为50K时,片式散热器和油箱的总散热量为2691W。

### 3 散热强化性能分析

散热强化效率 $\eta$ 是衡量散热器换热强化效果的一个重要参数,值为正时强化了散热,值为负表示弱化了散热能力。换热强化效果越好,散热量越大,强化效率也越高。为便于比较,定义单位体积散热强化效率为单位体积的三维肋管散热器的散热量 $Q_{nv}$ 与单位体积的片式散热器的散热量 $Q_{0v}$ 之差与基准量 $Q_{0v}$ 的比值:

$$\eta_{nv} = \frac{Q_{nv} - Q_{0v}}{Q_{0v}} = \frac{(Q_n - Q_b)/V_n}{(Q_0 - Q_b)/V_0} - 1 \quad (5)$$

式中: $Q_{nv}$ 、 $\eta_{nv}$ 和 $V_n$ —第 $n$ 号散热器的单位体积散热量、单位体积散热强化效率和散热器的体积; $Q_{0v}$ 和 $V_0$ —对比用片式散热器的单位体积散热量及其体积。

将三维肋管散热器+油箱本体的散热功率-温升实验数据和片式散热器+油箱本体的散热功率-温升实验数据均拟合成指数曲线后得到如图4所示温升-功率曲线图。由图4可知,在相同温升情况下,两种排间距的三维肋管散热器的散热量相比于片式散热器均有所增加,且随着温升的增加三维肋

管散热器的散热量增加幅度变大,强化效果也越明显。

对片式散热器、1号和2号三维肋管散热器实验数据进行处理,整理后得到表6。由表中数据得出,1号和2号三维肋管散热器20K温升时没有起到强化换热效果,2号三维肋管散热器在低温升条件下单位体积的散热效果比1号好。但随着温升进一步增加,1号三维肋管散热器的单位体积强化换热效果逐渐优于2号三维肋管散热器,表明三维肋管自冷散热器在较大温升情况下呈现出明显的换热强化能力,利于控制变压器的温升,保证变压器的正常稳定运行。

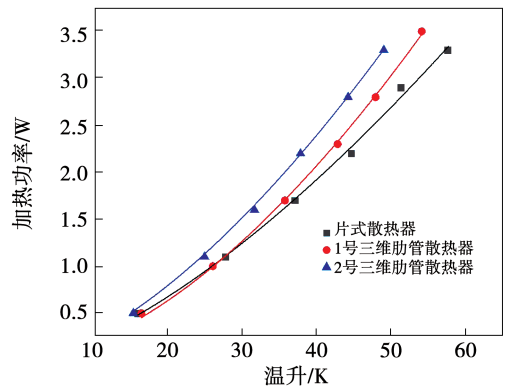


图4 温升-功率曲线图

Fig.4 Curves of temperature rise and power of radiators

表6 拟合的温升-功率数据

Tab.6 Fitted temperature rise and power data

温升/K	$Q_{0v}/$ $kW \cdot m^{-3}$	$Q_{1v}/$ $kW \cdot m^{-3}$	$Q_{2v}/$ $kW \cdot m^{-3}$	$\eta_{1v}$	$\eta_{2v}$
20	1.61	1.51	1.58	-0.06	-0.02
30	2.96	3.03	3.05	0.03	0.03
40	4.56	4.97	4.88	0.09	0.07
50	6.36	7.30	7.03	0.14	0.11

## 4 结论

设计了一种新型的三维肋管散热器,应用于油浸式变压器自冷散热,实验研究了由三维肋管管束构成的整体散热器的自然对流换热性能,并将其与片式散热器进行对比,结果表明:

(1) 与片式散热器相同体积的 1 号三维肋管散热器(排间距 45 mm)在较小温升时未能体现强化换热效果;随着温升的增大,其强化换热效果越发体现得明显,50 K 温升时,散热强化效率达到了 0.14。

(2) 2 号三维肋管散热器(排间距 55 mm)在温升为 50 K 时,单位体积强化散热效率达到 0.11,单位体积强化换热效果并不如 1 号三维肋管散热器,但总体积相较于片式散热器有所增加。

(3) 三维肋管自冷散热器在较大温升情况下呈现出明显的换热强化能力,有利于降低变压器温升,提高变压器过负荷能力,在油浸式变压器散热领域有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 毛士飞,王秀春,王碧霄,等.片式散热器外部绕流结构的实验研究[J].变压器,2011,48(2):45-48.  
MAO Shi-fei, WANG Xiu-chun, WANG Bi-xiao, et al. Experimental research on external circumferential flow of panel type radiator [J]. Transformer, 2011, 48(2): 45-48.
- [2] LUCIANO G, GUSTAVO R R. Numerical and experimental thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer working in ONAN mode[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1271-1280.
- [3] LUCIANO G, GUSTAVO R R. Heat transfer enhancement in panel type radiators using delta-wing vortex generators[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 137: 64-74.
- [4] 翟茜.大型变压器片式散热器散热效率分析与研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2019.  
ZHAI Qian. Analysis and research on heat dissipation efficiency of large transformer plate radiator[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [5] 邵志伟,黄亚继,张强.片式散热器散热特性的数值研究[J].华东电力,2014,42(2):431-434.  
SHAO Zhi-wei, HUANG Ya-ji, ZHANG Qiang. Numerical study on heat dissipation behaviors of panel type radiator[J]. East China Electric Power, 2014, 42(2): 431-434.
- [6] 廖光亚,陆永泰,刘正常,等.三维内肋管及其加工工艺[P].中国:CN1037391,1989-11-22.  
LIAO Guang-ya, LU Yong-tai, LIU Zheng-chang, et al. Three-dimensional inner finned tube and its processing technology[P], China: CN1037391, 1989-11-22.
- [7] 葛铭,赵利杰,戴维葆,等.叉排三维外肋管的传热特性[J].化工学报,2017,68(10):3733-3738.  
GE Ming, ZHAO Li-jie, DAI Wei-bao, et al. Heat transfer of staggered three-dimensional externally finned tube [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(10): 3733-3738.
- [8] 赵偲妍.三维肋管换热器流动及强化换热特性数值模拟[D].重庆:重庆大学,2019.  
ZHAO Si-yan. Numerical simulation of flow and enhanced heat transfer characteristics in three-dimensional finned tube heat exchanger[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [9] 吴伟栋,王厚华,廖光亚,等.空气横掠叉排三维外肋管束换热及流阻特性的实验研究[J].重庆建筑大学学报,2002(3):53-57.  
WU Wei-dong, WANG Hou-hua, LIAO Guang-ya, et al. Heat transfer and friction characteristics for cross-flow over staggered external three-dimensional finned tube banks [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002(3): 53-57.
- [10] 冯云鹏.水平三维肋管管外高不凝性气体含量水蒸气强制对流凝结换热实验研究[D].重庆:重庆大学,2006.  
FENG Yun-peng. Experimental study on forced convection condensation heat transfer of water vapor with high non-condensable gas content outside the horizontal three-dimensional ribbed tube [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [11] 李刚.水平三维肋管管外高不凝性气体含量蒸气的冷凝换热[D].重庆:重庆大学,2006.  
LI Gang. Condensation heat transfer of high non-condensable gas content vapor outside the horizontal three-dimensional finned tube [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] 何春霞,王厚华,廖光亚,等.三维外肋管的自然对流换热特性的实验研究[J].重庆建筑大学学报,2003,25(3):59-62.  
HE Chun-xia, WANG Hou-hua, LIAO Guang-ya, et al. Experiment research on heat transfer of external three-dimensional finned tube in free convection [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(3): 59-62.
- [13] DENG Bin, DING Yu-dong, LIAO Qiang, et al. Experimental investigation of heat transfer characteristics on the exterior surface of a vertical 3-D finned tube under natural convection conditions [J]. Chemical Engineering Transactions, 2020, 81: 1087-1092.

(丛敏编辑)