第 50 卷 第 1 期：242-249　　高电压技术　　Vol.50, No.1: 242-249
2024 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231166

高海拔特高压换流变压器冷却性能修正研究

刘冀邱[1]，张珊珊[2]，熊凌飞[3]，张　进[1]，王尧玄[3]，卢理成[4]
（1. 国家电网有限公司特高压事业部，北京 100031；2. 西安西电变压器有限责任公司，西安 710075；
3. 国网经济技术研究院有限公司，北京 102209；4. 国网智能电网研究院有限公司，北京 102209）

摘　要：川藏高原是我国的资源富矿，随着藏东南能源大开发，预计建设多个特高压直流工程，而特高压换流变压器是特高压输电工程中至关重要的设备，散热是保证其安全运行的关键。现有标准制定时工程未面临超高海拔特高压工程，为避免变压器的热设计裕量选择不当而影响设备安全稳定运行情况的发生，标准适用性可以继续深入论证。主要对强油循环风冷却器在不同海拔下冷却容量、换流变压器顶部油温升进行理论分析与仿真计算的对比验证。同时利用环境气候模拟实验室完成不同海拔高度下冷却容量的测试试验，通过对试验结果与理论计算的对比验证，给出了不同海拔条件下风冷却器冷却容量的修正建议，即海拔 2000~5000 m 范围内，在 2000 m 基础上，海拔每升高 250 m 温升限值降低 0.75 K。这为高海拔环境下换流变压器的冷却系统设计和标准修订提供了参考依据，对用于高海拔环境下换流变压器的热设计和可靠性评估有一定指导意义。
关键词：高海拔；强油循环风冷冷却器；冷却容量；变压器温升；冷却容量修正；温升修正

Research on the Cooling Performance Correction for UHVDC Converter Transformers at High Altitudes

LIU Jiqiu[1], ZHANG Shanshan[2], XIONG Lingfei[3], ZHANG Jin[1], WANG Yaoxuan[3], LU Licheng[4]
(1. State Grid Corporation of China Ultra High Voltage Division, Beijing 100031, China; 2. Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The Sichuan-Xizang(Tibet)Plateau is a rich resource mine in China. With the development of energy in southeastern Tibet, it is expected to construct multiple ultra-high voltage direct current projects, and ultra-high voltage converter transformers are crucial equipment in ultra-high voltage transmission projects, and heat dissipation is the key to ensuring their safe operation. When the existing standards were formulated, the engineering did not face ultra-high altitude projects. To avoid the occurrence of improper selection of thermal design margin for transformers that may affect the safe and stable operation of equipment, the applicability of the standard can be further elaborated. This article mainly focuses on the theoretical analysis and simulation of the cooling capacity of the forced oil-circulating air cooler and the temperature rise of the top oil of the converter transformer at different altitudes. At the same time, the cooling capacity test was completed at different altitudes in the Environmental Climate Simulation Laboratory. Through comparison and verification of the experimental results and theoretical calculations, recommendations were made for modifying the cooling capacity of air coolers at different altitudes, namely, from 2000 m to 5000 m, and the temperature rise limit was reduced by 0.75 K for every 250 meters of altitude increase based on the 2000 m altitude. This study provides a reference basis for the design and standard revision of the cooling system for converter transformers in high-altitude environments, and iy is of guiding significance for the thermal design and reliability evaluation of converter transformers used in high-altitude environments.
Key words: high altitude; forced oil circulation air-cooled cooler; cooling capacity; transformer temperature rise; cooling capacity correction; temperature rise correction

0　引言

“双碳”背景下，国家统筹规划可再生能源发展体系，新型电力系统建设以风力、光伏发电等新能源为主体。西藏的水能、太阳能、地热资源居全国首位，风能资源同样丰富，是新能源的宝库，是我国的战略腹地[1-3]。金沙江上游、澜沧江等大型水电基地及周边的光伏基地陆续开发建设，总装机容

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2402105)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2402105).

量将超过 1 亿 kW，预计可能需要建设超过 10 回特高压直流工程汇集外送。特高压换流变压器是特高压输电工程中至关重要的设备，散热是保证其安全运行的关键。特高压换流变压器以强迫油循环风冷(oil forced air forced，OFAF)和强迫导向油循环风冷(oil directed air forced，ODAF)冷却方式为主，随着海拔高度的变化，压力空气的密度与压力发生改变，进而影响到散热系统的对流换热系数，对风冷却器的换热能力产生影响[4-6]。现有标准制定时工程界未面临超高海拔特高压工程，标准适用性可以继续深入论证，直接线性外推可能偏于保守或激进，导致变压器的热设计裕量选择不当，影响设备安全稳定运行。当前，关于高海拔对冷却器冷却容量及变压器温升影响的研究尚不完备。文献[5]主要针对高海拔寒冷地区采暖散热器散热性能进行了研究并对壁挂炉及散热器采暖系统进行了现场试验测试，但其研究对象并非针对变压器大容量冷却器。文献[6]虽然在高海拔环境箱中模拟进行了散热器流阻及温升的测试，但并未给出具有工程实践意义的普适性的温升修正方法。文献[7]讨论了海拔高度变化对空气密度的影响，初步分析了不同海拔高度计算机等电子设备散热能力的变化。文献[8]基于流体阻力特性建立全局油路动量模型，提出一种针对绕组、油流及散热器间耦合传热问题的计算方法。文献[9]通过对变压器风冷散热过程热生成与热传导的分析，结合热电类比法建立变压器绕组温度的风冷散热热路模型，可实现变压器风冷散热效果的模拟。文献[10]提出了一种新型金属氧化物限压器(metal oxide voltage limiter，MOV)冷却结构，系统地计算分析了 MOV 冷却通道的直径、条数和分布等几何量对于通风道内传热特性的影响。但以上文献在换流变冷却性能分析方面的适用性有待进一步研究。

综合以上分析，4500 m 级超高海拔换流变压器散热设计的精确计算方法尚属空白，需要依靠理论分析计算及与真型试验相互验证对比，建立覆盖不同海拔高度的换流变散热海拔修正方法。本文对换流变各散热环节进行研究，分析不同海拔对冷却器冷却容量的影响，提出了海拔修正的理论分析模型；利用环境气候模拟实验室开展不同型号冷却器在不同海拔高度下的冷却性能试验。通过对试验数据的分析，给出换流变压器温升的海拔修正建议，为高海拔环境下换流变压器的冷却系统产品设计和标准修订提供了参考依据。

1 高海拔换流变冷却性能理论分析

1.1 换流变冷却过程概述

本文对换流变各散热环节进行研究，分析不同海拔对冷却器冷却容量的影响，提出了海拔修正的理论分析模型。

换流变的热源为器身，器身由铁芯和线圈构成，运行中的损耗产生热量。器身浸润在高标号的绝缘油之中，实现绝缘和冷却。换流变装配有冷却器，绝缘油流经冷却器管路，冷却风扇将热量吹散至空气中。因此，换流变的冷却需经过“器身至绝缘油”、“绝缘油至冷却器”和“风扇至空气”这 3 个物理过程，由图 1 所示，图中 p_T 为换流变的损耗，p_{oil} 为换流变传递到油中的热量，p_a 为冷却器单位时间内向空气中传导的热量，单位都为 kW。

高海拔热传导各个环节的散热性能可通过换热容量表示，但热容量直接计量较为复杂，干扰因素多，精度难以保证，测试操作不便。同时，考虑到热传导效率变差的直接结果是换流变油温超标，因此，标准中将换流变顶层油温作为测试和评价的对象。高海拔空气稀薄[11-13]，直接影响对流散热特性。“器身至绝缘油”、“绝缘油至冷却器”均处于密闭空间中，热交换以传导和辐射为主，受海拔的影响小。“风扇至空气”的散热过程以对流为主。根据 IEC 60076-2 和 GB/T 1094.2 要求[14]，对强迫油循环冷却器，海拔每升高 250 m 温升限值降低 1 K。可以理解为，高海拔换流变在设计计算环节进行热性能优化，需要保证平原地区试验时，海拔高度每升高 250 m 顶部油温的限值降低 1 K。标准制定之时，国际上尚未有 4500 m 海拔的直流工程，标准的适用性需要通过研究进一步证实。热平衡状态之下，假设铁芯和线圈损耗产生的热量全部传导至油中，油中的热量最终需通过冷却器的作用散失至空气中，则有：

$$p_T = p_{oil} = p_a \tag{1}$$

1.2 冷却器的散热性能影响因素分析

变压器用冷却器的结构形式主要为圆管结合

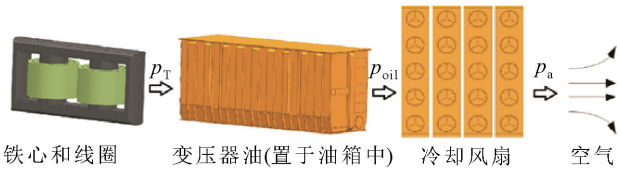


图 1 换流变冷却过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of converter cooling process

翅片组合散热结构。如图 2 所示，圆管呈现正三角形叉形排列，一般根据具体冷却容量设计单回路或多回路循环模式，热油流经圆管，热量由圆管直接与空气换热的同时也传递到翅片上。翅片等间距套装于圆管上，主要作用是扩大散热面积，在提高冷却器紧凑性的同时提高传热的效率。

翅片有多种型式，如多孔形、平直形和波浪形等，大容量冷却器翅片多选用波浪矩形翅片。冷却器风扇正对于翅片侧面，空气流量从波矩形浪翅片的间隙通道中高速穿过，强制将翅片上的热量带走，波浪矩形翅片增大了散热面积，有效地提高了散热效率。在风量一定的情况下，波浪矩形翅片与空气的换热效率决定了冷却器冷却容量的大小。不同海拔下翅片与空气换热效率取决于其对流换热系数，其与空气密度正相关，即海拔高度越高，空气密度越低，对流换热系数越低，换热效率低，冷却容量下降，冷却器及变压器温升升高。

1.3 换流变绝缘油冷却性能计算方法

换流变的油面温升取决于总损耗与冷却器容量[15-17]，表示如下：

$$t_{\text{top}} = \frac{p_{\text{T}}}{N_{\text{c}} p} \times (t_{\text{o}} - t_{\text{c}}) \tag{2}$$

式中：t_{top} 为变压器油面温升，℃；t_{o} 为冷却器进口油温，℃；t_{c} 为冷却器进口风温，℃；p 为单组冷却器散热容量；N_{c} 为冷却器数量。

绝缘油的散热容量为：

$$p = v\rho C_{\text{p}}(t_{\text{o}} - t_{\text{n}}) \tag{3}$$

式中：v 为油体积流量，m^3/h；ρ 为变压器油密度，kg/m^3；C_{p} 为变压器油的比热容，$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$；$t_{\text{n}}$ 为出口油温，℃。

1.4 换流变冷却器对流散热性能计算方法

忽略辐射的热量耗散，假设热量全部通过对流散热的方式传导至大气中，根据传热学理论[9]，传热关联式可表示为：

$$p_{\text{o-c}}(H) = Ah(H)(t_{\text{o}} - t_{\text{c}}) \tag{4}$$

式中：$p_{\text{o-c}}(H)$为海拔高度为 H、温度差为$(t_{\text{o}}-t_{\text{c}})$时的冷却容量，kW；$H$ 为海拔高度，m；A 表示冷却器总散热面积，m^2；$h(H)$为海拔高度为 H 时的对流散热系数。

根据 Chilton-Colburn 比拟理论[18-22]，对流传散热系数可以表达为：

$$h(H) = j(H)\frac{C_{\text{p}}\rho(H)u}{Pr^{2/3}} \tag{5}$$

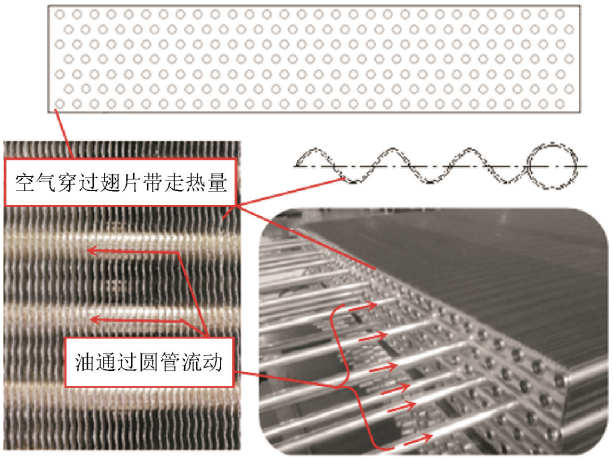


图 2 冷却器内部结构细节图

Fig.2 Internal structure details of the cooler

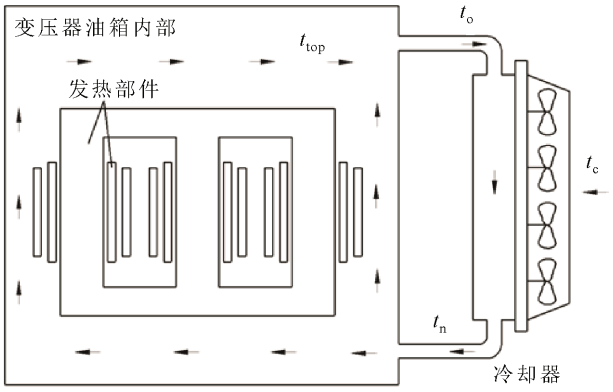


图 3 各处油温示意图

Fig.3 Oil temperature schematic diagram

式中：$j(H)$为海拔高度为 H 时的无量纲传热系数；$\rho(H)$表示海拔高度 H 处的空气密度，kg/m^3；u 表示空气流速，m/s；Pr 为普朗特数，其随海拔高度基本不发生变化。

1.5 换流变冷却性能的海拔影响计算方法

由式(5)可知，海拔高度影响空气密度、大气压强和雷诺系数，进而影响换流变整体的散热性能。根据流体力学定义，雷诺数 Re 表示惯性力与粘性力的比值[23]。空气密度会随着海拔高度的变化而变化，但对于特定的流动空间和空气流量，其特征长度和流速是不变的，并且空气粘度随海拔高度的变化可忽略不计。因此，根据空气密度与海拔高度关系的数学模型，可以得到 $Re(H)$随海拔高度 H 的变化关系为：

$$Re(H) = Re(0)\cdot\frac{p(H)(1+w(H))}{k_{\text{R}}T(H)(1+k_{\text{w}}w(H))}\cdot\frac{k_{\text{R}}t(0)(1+k_{\text{w}}w(0))}{p(0)(1+w(0))} \tag{6}$$

式中：$t(H)$为海拔高度为 H 时的温度，℃；$p(H)$为海拔高度 H 处的压强，Pa；$w(H)$为海拔高度 H 处空气相对湿度；k_R 为气体常数；k_w 为湿度常数。

根据经典热力学，大气的温度、压强，也均可进行海拔修正，具体方法为：

$$\begin{cases} t(H) = t(0) - k_T H \\ p(H) = p(0)(1 - k_P H)^a \end{cases} \tag{7}$$

式中：k_T、k_p 和 a 均为修正系数。

由于冷却器在不同的进口油温与进口风温温差下的散热容量存在差异，为便于对比评价散热性能，将冷却器冷却容量统一折算至进口油温与进口风温相差 30 ℃时的冷却容量[24-25]，即：

$$Q_{30}(H) = 30 p_{o\text{-}c}(H) / (t_o - t_c) \tag{8}$$

式中：$Q_{30}(H)$为海拔高度为 H、温度差为 30 ℃时的冷却容量，kW。

以热力学理论为基础，通过合理假设，经过严格的数学推导，获得了换流变冷却容量和顶部油温海拔影响的修正方法，即：

$$Q_{30}(H) = 30 \frac{vC_p \rho(0) p(H)(1 + w(H))}{k_R t(H)(1 + k_w w(H))} \cdot (1 + k_j H) \cdot \frac{k_R t(0)(1 + k_w w(0))}{p(0)(1 + w(0))} \cdot \frac{(t_o - t_n)}{(t_o - t_c)} \tag{9}$$

$$t_{top}(H) = \frac{p_T k_R t(H)}{N_c j(H) A C_p u} \cdot \frac{(1 + k_w w(H)) Pr^{2/3}}{p(H)(1 + w(H))} \tag{10}$$

式中：k_j 为传热系数修正因子；$t_{top}(H)$为海拔高度为 H 时变压器油面温升。

2 不同海拔下换流变压器温升仿真分析

2.1 建立模型

以某型号为 ZZDFPZ-415000/500-400 的换流变压器为对象，利用仿真软件 FLOEFD 进行三维流体数值模型，对比不同海拔高度下换流变压器油面温升。

建立三维模型如图 4 所示，换流变油箱与 4 组冷却器相连，内部含有发热部件铁芯及线圈，外部建有高度为变压器本体 10 倍的空气域。内部流体子域为油，外部流体域为空气，设置外部流体域空气在不同海拔高度下的压力、动力粘度、比热和热导率属性参数。设置固体材料以及油泵参数，对铁芯及线圈采用体积热源进行损耗赋值，对冷却器网格细化剖分处理后进行计算。

2.2 计算结果

分别进行<1000、3000、4000 和 5000 m 海拔高度下变压器流体仿真分析。图 5 为变压器内部油的流迹线图和外部空气的流迹线图。图 6 为不同海拔高度下油箱长轴中心线处的内部截面油温云图。

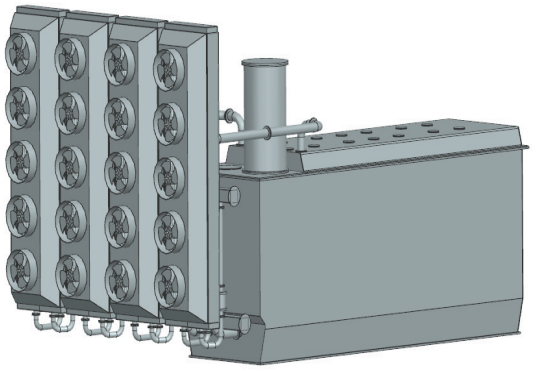
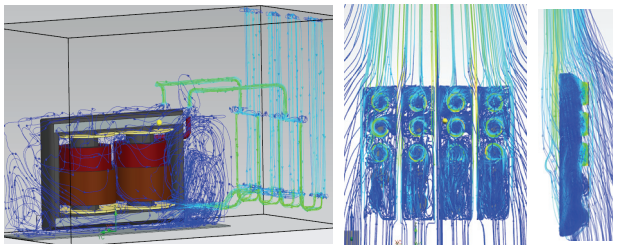


图 4 换流变压器模型

Fig.4 Converter transformer model



(a) 变压器内部 (b) 外部冷却器处

图 5 变压器流迹线图

Fig.5 Transformer flow trace diagram

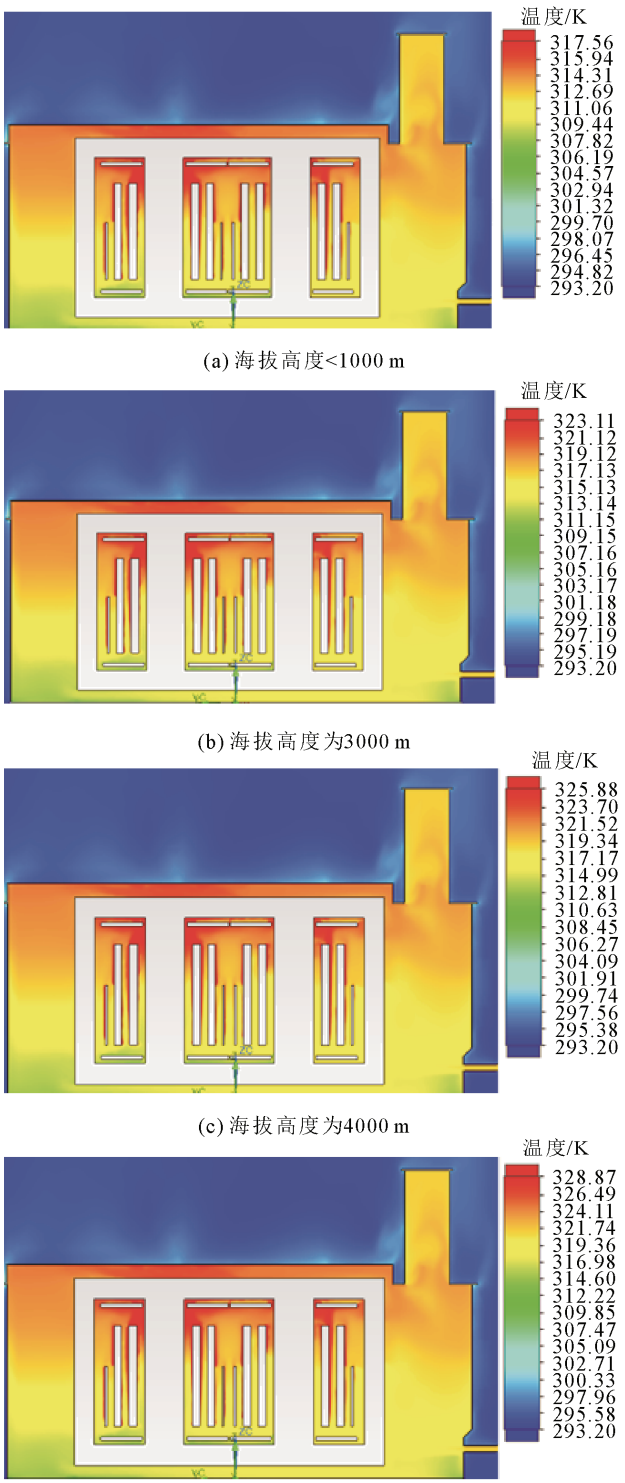
经仿真可知油箱内油的整体温度分布，取油箱顶层内表面流体温度，可得到油箱顶部油温的最大值、最小值及平均值。以此平均值作为变压器顶部油温并进行分析，结果如表 1 所示。

由式(9)、(10)计算可得理论修正值在海拔为 3000、4000、5000 m 时分别为 6.47、9.32、12.61 K，与表 1 中仿真修正值相比，仿真值偏小，可能由于仿真时将外部器身结构及线圈油道简化导致，但其依然可以验证换流变压器随海拔高度变化下温升变化的趋势。

3 冷却器散热特性海拔影响的真型试验

3.1 试验方案与步骤

高原气候环境模拟试验室可灵活模拟 1000~5000 m 的海拔气候环境，包括不同海拔下的温度与气压模拟，本文采用小型变压器带强迫油循环风冷却器开展散热特性试验。高海拔风冷却器冷却容量测试成套装置由绕组、油箱、测量系统与控制系统构成，测量系统主要包括流量计及热电偶测试单元，装置拓扑如图 7 所示。



(a) 海拔高度<1000 m

(b) 海拔高度为3000 m

(c) 海拔高度为4000 m

(d) 海拔高度为5000 m

图 6 不同海拔下油箱内油温分布图

Fig.6 Oil temperature distribution in the tank at different altitudes

分别于冷却器出口及入口处设置热电偶测试进出口油温，油流量在冷却器出口处使用压差式文丘里流量计进行测量。为保证由测量数据得到冷却容量的准确性，进口风温测量点位于进风口 100 mm 处，按照风冷却器风扇数量分区域分别设置 4 个测温点，4 点均匀分布于以风扇为中心、以风冷却器一半宽度为直径的圆周上，取 4 点算数平均值为此风扇处进口风温，计算几个风扇进口风温的算数平均值作为风冷却器的进口风温。

表 1 不同海拔下油箱顶部内表面油温

Table 1 Oil temperature on the inner surface of the top tank at different altitudes

海拔高度/m	油箱顶部内表面油温/K			
	最小值	最大值	平均值	修正值
<1000	311.94	317.56	315.12	
3000	317.46	323.11	320.58	5.46
4000	320.14	325.88	323.33	8.21
5000	323.25	328.87	326.45	11.33

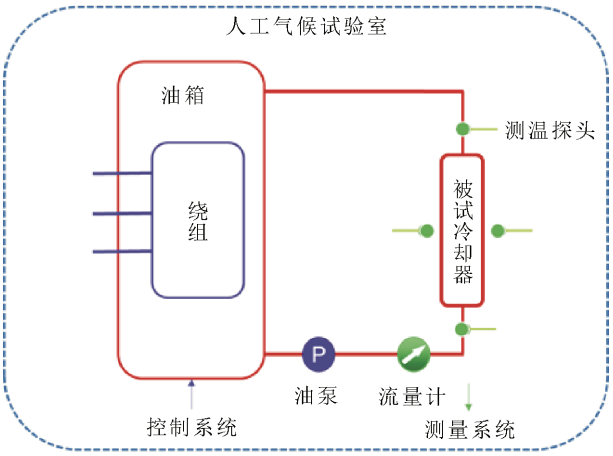


图 7 冷却器冷却容量试验拓扑图

Fig.7 Topological diagram of cooler cooling capacity test

为研究海拔高度对不同型号冷却器冷却容量的影响，同时使结果更具有普适性，本文采用 3 个厂家不同冷却容量的单组风冷却器进行测试试验(C1-MDA56D、C2-XBYF475 和 C3-DZYF475 分别为 3 组风冷却器型号，下文以 C1、C2 和 C3 简称)，依次按照 5000、4500、4000、3000、2000 和<1000 m(即苏科院实际海拔高度，其在 10 m 以内)的海拔高度开展风冷却器冷却容量测试试验。

3.2 试验结果分析

在高原气候环境模拟试验室内完成 3 组风冷却器的冷却容量测试试验，根据式(15)与式(16) 可得到 3 组风冷却器在不同海拔高度下的冷却容量 Q_{30}，如表 2 所示。

以海拔高度<1000 m 下的冷却容量为基准容量，根据理论计算不同冷却器在不同海拔高度下的

表 2　风冷却器在不同海拔高度下的冷却容量 Q_{30}

Table 2　Cooling capacity Q_{30} of the air cooler at different altitudes

海拔高度/m	冷却容量/kW		
	C1	C2	C3
＜1000	385.56	542.73	616.94
2000	347.24	489.87	537.75
3000	330.44	444.27	487.81
4000	307.43	399.86	447.69
4500	298.81	381.72	428.15
5000	295.25	362.77	410.87

冷却容量，与试验结果进行对比见图 8。如图 8 可知，每组风冷却器的冷却容量随着海拔的增加而减少，实测与理论分析趋势一致，理论计算结果与试验测试结果偏差分别是 8.5%、2.4%和 0.6%，偏差较小，证实了本文提出的换流变散热性能海拔理论修正方法。由理论分析可知，根据自然地理环境的原始信息，即可获知不同海拔高度的散热性能并计算顶层油温。但式(9)和式(10)过于复杂，涉及物理量众多，需要进一步研究适合工程中使用的、直接简便的修正建议。

4　换流变油面温升高海拔修正

现以某型号为 ZZDFPZ-415000/500-400 的换流变压器为例进行变压器油面温升计算。在水平面高度下，不同冷却器选用合适组数使变压器油面温升相同，以此为基准使用冷却器冷却容量测试值计算变压器油面温升，结果如表 3 所示。

随着海拔高度的升高，冷却器冷却容量降低，油面温升随之升高。根据国标 GB1094.2 修正方法以及表 3 中通过试验冷却容量计算油面温升数值，得到冷却器在不同海拔高度下相对于水平面海拔高度的油面温升的修正值并进行对比，如图 9 所示。此处不以海拔高度每变化 250 m 进行对比，以体现不同海拔高度下累计修正值的大小，从而减小由于测量误差导致的修正值偏移问题。

由图 9 可知，国标修正值整体均高于 3 组冷却器在不同海拔下的温升修正值。且随着海拔高度的升高，相较于国标修正值，试验得到的温升修正值整体趋势变缓。在海拔高度为 2000 m 时，国标修正值为 4 K，3 组试验冷却器下变压器油温升修正最大值为 3.7 K；在海拔高度为 3000 m 时，国标修正值为 8 K，试验温升修正最大值为 6.65 K；在海拔高度为 4000 m 时，国标修正值为 12 K，试验温升

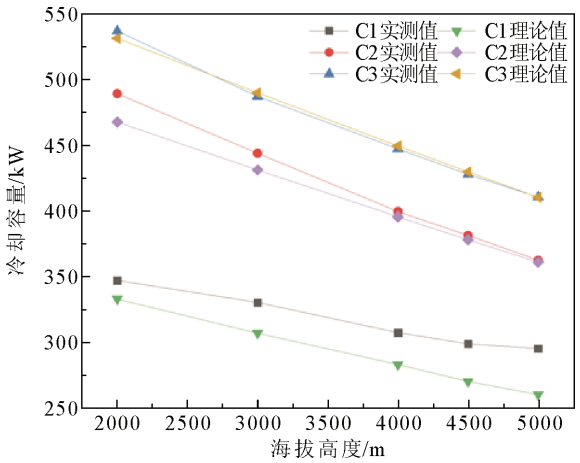


图 8　冷却容量测试值与计算值的对比

Fig.8　Comparison of cooling capacity test values and calculated values

表 3　1 台变压器在不同海拔高度下的油面温升

Table 3　Top oil temperature rise of the transformer at different altitudes

海拔高度/m	实测冷却容量推算的油面温升/K		
	C1	C2	C3
<1000	25.12	25.12	25.12
2000	27.89	27.83	28.82
3000	29.31	30.69	31.77
4000	31.5	34.1	34.62
4500	32.41	35.72	36.2
5000	32.8	37.58	37.72

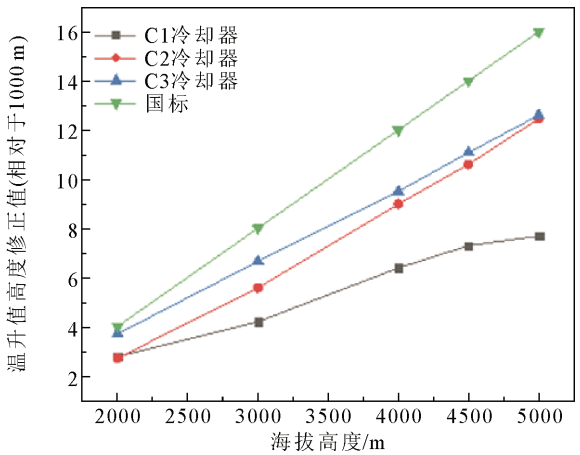


图 9　温升修正值对比

Fig.9　Comparison of temperature rise correction values

修正最大值为 9.5 K；在海拔高度为 4500 m 时，国标修正值为 14 K，试验温升修正最大值为 11.08 K；在海拔高度为 5000 m 时，国标修正值为 16 K，试验温升修正最大值为 12.6 K。若按照国标要求，每 1000 m 统一使用 4 K 作为温度修正值，其裕量偏高。

在冷却器冷却容量与变压器损耗互相匹配的情况下，根据以上对比值，相对于水平面海拔高度，给出以下温升修正建议。

1）在海拔 0~1000 m 范围内，无需进行海拔修正。

2）在海拔 1000~2000 m 范围内，温升修正值沿用国标要求，在 1000 m 基础上，海拔每升高 250 m 则温升限值降低 1 K。

3）在海拔 2000~5000 m 范围内，在 2000 m 基础上，海拔每升高 250 m 温升限值降低 0.75 K。

根据上述修正方法，可得随高度变化的温升建议修正曲线，如图 10 所示。

由图 10 可知，本文建议的修正值与试验值更加相符，根据建议值进行温升修正更加符合工程实际应用。关键海拔高度节点的修正值如表 4 所示。

由表 4 可知，海拔较低时，标准推荐的修正值与试验结果接近。高海拔时，标准推荐的修正方法偏差较大，以 5000 m 为例，温升限制相差 3 K，侧面佐证了标准制定时对超高海拔的研究相对较少，体现了本文研究的价值。修正过高将增加冷却器配置，甚至影响换流变整体的外形尺寸和工程占地。

5 结论

1）通过热力学原理，建立了强油风冷冷却器冷却容量和换流变顶部油温的海拔修正模型，并通过理论计算和仿真对比，佐证其正确性，给出了冷却容量及温升的海拔修正公式。

2）基于换流变风冷却器冷却容量海拔影响真型试验，侧面证实了随着海拔高度增加，冷却器容量成指数降低，变压器温升随之升高。

3）通过不同类型试验冷却器的试验结果统计，得到变压器温升修正值，发现随海拔高度增加，修正值增加速率变缓，并据此提出了换流变顶部油温海拔修正建议：海拔 2000~5000 m 范围内，在 2000 m 基础上，海拔每升高 250 m 温升限值降低 0.75 K。

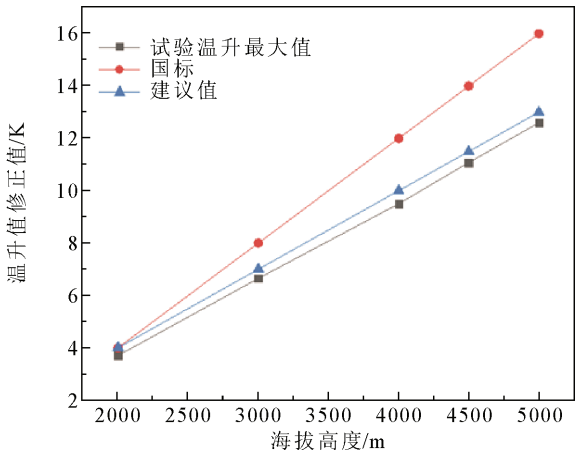


图 10 温升修正建议曲线

Fig.10 Suggested curve for temperature rise correction

表 4 关键海拔节点温升限值

Table 4 Temperature rise limits for key altitude nodes

海拔高度/m	标准推荐限值/K	本文推荐限值/K
1500	2	2.0
2000	4	4.0
2500	6	5.5
3000	8	7.0
3500	10	8.5
4000	12	10.0
4500	14	11.5
5000	16	13.0

参考文献 References

[1] 任东明，张庆分. 我国藏东南水能资源的开发潜力与作用分析[J]. 中国能源，2010，32(12)：10-13，28.
REN Dongming, ZHANG Qingfen. Analysis on the potential and effect of the development hydro-power resources of south-east Tibetan[J]. Energy of China, 2010, 32(12): 10-13, 28.

[2] 任东明，张庆分. 藏东南水电能源基地开发面临的重大问题[J]. 电网与清洁能源，2011，27(3)：3-7.
REN Dongming, ZHANG Qingfen. Key issues on development of the south-east Tibet hydro-power base[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(3): 3-7.

[3] 郅海杰. 资源环境约束下的西藏能源产业发展战略研究[D]. 北京：北京理工大学，2016.
ZHI Haijie. Research on the strategy planning of the development of energy industry in Tibet under the restriction of resources and environment[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2016.

[4] 郭欣娟. 高海拔寒冷地区采暖散热器散热性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2014.
GUO Xinjuan. Study on thermal performance of the heating radiator in cold regions with high altitude[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2014.

[5] 张 壮. 强迫油循环风冷式牵引变压器散热系统研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2021.
ZHANG Zhuang. Research on heat dissipation system of air-cooling traction transformers with forced oil circulation[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[6] 孙保涛，王 婷，段焱辉，等. 大功率强迫风冷散热器高海拔冷却性能研究[J]. 电力电子技术，2020，54(3)：64-67.
SUN Baotao, WANG Ting, DUAN Yanhui, et al. Study on high altitude cooling performance of high power forced air cooled heatsink[J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(3): 64-67.

[7] 黄延平. 海拔高度对计算机散热影响的研究[J]. 电子学报，2014，42(12)：2442-2447.
HUANG Yanping. Research on the effects of altitude in computer heat dissipation[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2442-2447.

[8] 周利军，唐浩龙，王路伽，等. 基于顶层油温升的变压器过负载建模与分析[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2502-2508.

ZHOU Lijun, TANG Haolong, WANG Lujia, et al. Modeling and analysis of transformer overload based on top oil temperature rise[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2502-2508.

[9] 赵振刚，姜　飞，李英娜，等. 变压器绕组的风冷散热热路模型与FBG测温[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3938-3943.
ZHAO Zhengang, JIANG Fei, LI Yingna, et al. Air-cooled thermal circuit model and FBG temperature measurement of transformer winding[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3938-3943.

[10] 温　惠，谭震宇，唐宗华，等. 金属氧化物限压器冷却结构设计及其三维温度场仿真分析[J]. 高电压技术，2011，37(9)：2328-2336.
WEN Hui, TAN Zhenyu, TANG Zonghua, et al. Cooling structure design of metal oxide voltage limiter and simulation study of its three dimensional temperature field[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2328-2336.

[11] 陈伟根，苏小平，陈　曦，等. 变压器顶层油温预测热模型影响因素分析及其改进[J]. 高电压技术，2011，37(6)：1329-1335.
CHEN Weigen, SU Xiaoping, CHEN Xi, et al. Influence factor analysis and improvement of the thermal model for predicting transformer top oil temperature[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1329-1335.

[12] 左弯弯，张建文，王路伽，等. 基于油指数辨识的油浸自冷和油浸风冷式变压器风扇风量异常监测方法[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2747-2753.
ZUO Wanwan, ZHANG Jianwen, WANG Lujia, et al. Fan airflow anomaly monitoring method for ONAN and ONAF transformers based on oil exponent identification[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2747-2753.

[13] 谭风雷，朱　超，徐　刚，等. 基于解耦分析和欧式距离的特高压变压器顶层油温预测方法[J]. 高电压技术，2022，48(1)：298-306.
TAN Fenglei, ZHU Chao, XU Gang, et al. Method of UHV transformer top oil temperature forecasting based on decoupling analysis and Euclidean distance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 298-306.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电力变压器　第2部分：液浸式变压器的温升：GB/T 1094.2—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-part 2: temperature rise for liquid-immersed transformers: GB/T 1094.2—2013[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2014.

[15] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京：机械工业出版社，2014.
XIE Yucheng. Power transformer handbook[M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2014.

[16] 刘传彝，侯世勇，许长华. 电力变压器设计与计算(1)[J]. 变压器，2012，48(7)：44-47.
LIU Chuanyi, HOU Shiyong, XU Changhua. Design and calculation of power transformers (1)[J]. Transformer, 2012, 48(7): 44-47.

[17] 赵永志，刘世明. 智能变压器设计与工程应用[M]. 北京：中国电力出版社，2015.
ZHAO Yongzhi, LIU Shiming. Smart transformer design and engineering application[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[18] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京：高等教育出版社，2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2006.

[19] 王厚华，杨延萍，江　村. 单片矩形翅片表面的换热系数分布[J]. 重庆建筑大学学报，1998，20(5)：57-60.
WANG Houhua, YANG Yanping, JIANG Cui. Convection heat transfer coefficient distribution over the single rectangle fin surface[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1998, 20(5): 57-60.

[20] 颜景龙，孟　松. 采暖散热器散热量测定系统研究[J]. 测试技术学报，1996，10(2/3)：569-574.
YAN Jinglong, MENG Song. Research of the test system of thermal output of heat emittor[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1996, 10(2/3): 569-574.

[21] 邱　燕，田茂诚，牛蔚然，等. 竖直纵向翅片管自然对流传热特性及优化[C]//2007年传热传质学学术会议论文集. 广州：中国工程热物理学会，2007.
QIU Yan, TIAN Maocheng, NIU Weiran, et al. Natural convection heat transfer characteristics and optimization of vertical longitudinal finned tubes[C]//Academic Conference on Heat and Mass Transfer Chinese Society of Engineering Thermophysics. Guangzhou, China: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2007.

[22] 童钧耕，沈维道. 工程热力学[M]. 4版. 北京：高等教育出版社，2007.
TONG Jungeng, SHEN Weidao. Engineering thermodynamics[M]. 4th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2007.

[23] 朱燕君，姚　莉，李小泉. 固定几何高度上大气密度的计算方法[J]. 气象，2002，28(2)：9-12.
ZHU Yanjun, YAO Li, LI Xiaoquan. Algorithm for atmospheric density at fixed altitude[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(2): 9-12.

[24] 国家发展和改革委员会. 变压器用强迫油循环风冷却器：JB/T 8315—2007[S]. 北京：机械工业出版社，2007.
National Development and Reform Commission. Forced-oil and forced-air coolers for transformer: JB/T 8315—2007[S]. Beijing, China: China Machine Press, 2007.

[25] 马润生，赵文强，邱战飞，等. 330 kV冷却器变频控制系统改造及应用[J]. 青海电力，2019，38(1)：28-32，53.
MA Runsheng, ZHAO Wenqiang, QIU Zhanfei, et al. Modification and application of 330 kV cooler frequency conversion control system[J]. Qinghai Electric Power, 2019, 38(1): 28-32, 53.



刘冀邱(通信作者)
1968—，男，硕士，高工
主要从事高压直流输电、新型电工装备研制等方面的研究工作
E-mail: jiqiu-liu@sgcc.com.cn

LIU Jiqiu
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2023-06-27　修回日期　2023-12-13　　编辑　曾文君