

双水内冷调相机转子线圈强励温升数值模拟

咸哲龙¹, 张小虎¹, 胡磊¹, 王磊¹, 王庭山¹, 袁益超²

(1. 上海电气电站设备有限公司 发电机厂技术部, 上海 200240; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为分析某双水内冷调相机转子线圈的强励能力, 采用计算流体力学软件 Fluent, 对调相机转子线圈在强励工况下的瞬态温度场进行三维数值模拟。按照实际尺寸建立了转子线圈的三维物理模型, 通过网格划分和控制方程的耦合求解, 获得了转子线圈强励工况下铜温及水温的瞬态分布, 同时将三维数值模拟结果与一维近似计算结果进行比较, 指出了传统一维近似计算方法的缺陷。结果表明, 三维数值模拟计算方法具有更高的计算精度。研究成果对双水内冷调相机转子线圈瞬态温升的理论计算及其温升裕度的设计具有重要的指导意义。

关键词: 双水内冷; 调相机; 强励; 三维数值模拟

中图分类号: TM 31 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on Rotor Winding Temperature Rise under Forced Excitation of Double Water Inner Cooled Condenser

XIAN Zhelong¹, ZHANG Xiaohu¹, HU Lei¹, WANG Lei¹, WANG Tingshan¹, YUAN Yichao²

(1. Design Department, Generator Plant, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd. Shanghai 200240;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To analyze the forced excitation capability of double water inner cooled condenser, three-dimensional numerical simulation was carried out to study the rotor winding temperature rise under forced excitation by using Fluent software. A three-dimensional model of the rotor winding was build according to its actual size, and the transient temperature distributions of cooper and water in the rotor winding under forced excitation by grids division and governing equations solution. Finally, the result was compared with that from the one-dimensional approximate calculation, the shortcomings of the traditional one-dimensional approximate calculation method were pointed out. The results show that the three-dimensional numerical simulation provides a higher accuracy. The research has an important guiding significance for the theoretical calculation of transient temperature rise and the design to the temperature margin in rotor winding of double water inner cooled condenser.

Keywords: double water inner cooled; condenser; forced excitation; three-dimentional numerical simulation

收稿日期: 2018-05-08

基金项目: 上海市优秀学科/技术带头人计划 (18XD1421000)

第一作者: 咸哲龙 (1976-), 男, 教授级高工. 研究方向: 汽轮发电机设计研发. E-mail: xianzhl@shanghai-electric.com

调相机是一种无功补偿装置, 是运行于电动机状态、向电力系统提供或吸无功功率的同步电机, 不带机械负载, 也不带原动机。双水内冷调相机是以具有二十余年运行经验、技术成熟可靠的双水内冷发电机为参考机型, 并根据瞬态和动态性能等一系列特殊要求全面采用当代水冷、空冷先进技术设计的产品。该调相机冷却方式为: 定子、转子线圈水内冷; 定子铁心空冷。

双水内冷调相机设计对极端工况运行安全提出了较高的要求: 转子强励能力须达到 2.5 倍 15 s 的水平, 而常规发电机的最高标准也只有 2 倍 10 s, 调相机的强励要求显然更为严苛。

转子强励过程中, 转子在很短的时间内(一般为 1 s 以内), 励磁电压和电流达到强励倍数要求, 转子线圈的发热突然增加, 因而调相机转子冷却能力就显得至关重要。

然而, 对调相机转子线圈的强励能力进行分析具有一定难度。一方面, 旋转参考系的非稳态对流传热问题尚无精确的理论分析模型, 传统的一维线性等效温升叠加分析法在精确设计中其计算误差尚无定量的分析结果可参考^[1-3]; 另一方面, 转子线圈强励能力的试验成本较高。针对以上问题, 数值计算方法不失为一种较好的解决办法。

本文采用计算流体动力学软件 Fluent 对双水内冷调相机的转子线圈在强励工况下的运行特性进行三维数值模拟, 按照实际尺寸建立转子线圈的三维物理模型, 通过一系列方程的耦合求解, 获得转子线圈强励工况下铜温及水温的瞬态温度分布。此外, 还采用传统一维近似计算方法对转子线圈的强励温升进行理论分析, 并与数值模拟计算方法进行对比。

1 转子线圈冷却水路

双水内冷调相机转子线圈水路示意图如图 1 所示。具体水路为: 冷却水由励端进水支座进入中心孔, 经两根径向龕管进入进水箱, 然后通过绝缘引水管进入不锈钢拐脚流入转子线圈, 冷却转子线圈后, 再经出水拐脚进入绝缘出水管, 流入出水箱, 经过外部转子水系统, 完成整个转子线圈的水路循环。转子槽内有两根线圈, 每根线圈为一个水路, 冷却水流入转子线圈后, 在槽内底匝线圈进水, 顶匝线圈出水。

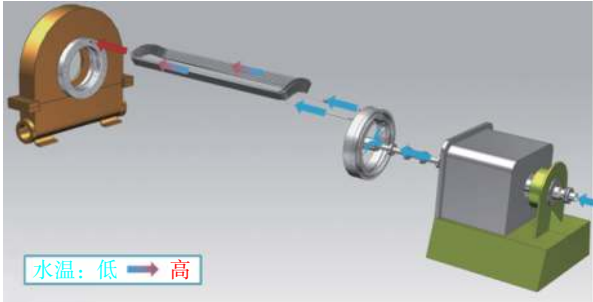


图 1 转子线圈冷却水路示意图
Fig.1 Schematic of cooling water path in rotor winding

2 一维近似计算方法

2.1 稳态温升计算

在计算转子线圈强励工况时的瞬态温升, 必须首先对该线圈强励开始前的稳态温升进行计算, 以便为瞬态温升计算提供合理的初始状态。采用文献[4]中的计算方法, 对双水内冷调相机转子进行稳态流量和温升计算, 结果见表 1。

表 1 调相机转子线圈温升计算结果
Tab.1 Calculation results of temperature rise in condenser's rotor winding

参数	额定工况
额定容量/MVA	300
额定功率/MW	0
励磁电流/A	1 835
进水温度/℃	43
转子水量/(t · h ⁻¹)	37.0
转子出水最高温度/℃	68.3

由表 1 可知, 额定工况转子线圈的最高出水温度为 68.3 ℃, 远低于 90 ℃ 的要求。

2.2 瞬态温升

取转子线圈的其中一根线圈为研究对象, 建立计算模型如图 2 所示。

进水口温度为 t_i , 沿线圈长度 x 点 ($0 \leq x \leq l$) 处的温度为 t_x , 则该处与进水口的温差为 $\theta_x = t_x - t_i$, 工程上一般近似认为铜温沿线圈长度方向为线性分布, 因此从进口处开始至 x 处的平均温差即为 $\frac{\theta_x}{2}$ 。

计算有两个假设: 一是水和铜的换热系数无限大, 水和铜之间的换热温差忽略不计; 二是线圈从绝缘由内对外的散热和轴向导热忽略不计。

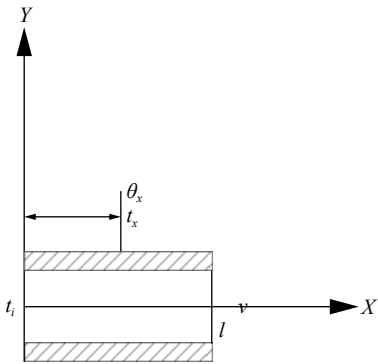


图2 转子线圈单根水路强迫计算分析模型
Fig.2 Analysis model of forced excitation for single water path in rotor winding

转子强励工况下瞬态温升计算时,线圈单位时间内产生的损耗由3部分带走:引起该段线圈内水的温升(静态)损耗,引起该段线圈内铜的温升损耗,单位时间流过该段线圈的水所带走的损耗。忽略线圈从绝缘由内对外的散热和轴向导热,得损耗方程^[1-3]

$$(C_w G_w x + C_{Cu} G_{Cu} x) d\left(\frac{\theta_x}{2}\right) + \rho_w Q C_w \theta_x d\tau = p x d\tau \quad (1)$$

式中: C_w 为水的定压比热容; G_w 为单位长度水的质量; C_{Cu} 为铜的定压比热容; G_{Cu} 为单位长度铜的质量; ρ_w 为水的密度; Q 为该水支路的体积流量; p 为线圈单位长度的发热功率 $p = I^2 R = I^2 \rho_{Cu} l / A$ (I 为强励励磁电流, ρ_{Cu} 为铜的电阻率, A 为铜线截面积; l 为线圈长度); τ 为时间。

由上述推导过程可知: $\tau = 0$ 时, $\theta_x = \theta_0$ 。由于线圈温度最热点即是线圈最末端 l 处,故直接取 $x = l$ 处的温度进行分析。

求解方程(1)可得

$$\theta = \frac{pl}{\rho_w Q C_w} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{M}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{\tau}{M}} \quad (2)$$

式中, M 为热时间常数,其表达式为

$$M = \frac{C_w G_w l + C_{Cu} G_{Cu} l}{2 \rho_w Q C_w}$$

定义线圈出口新的稳态温升 $\theta_m = pl / \rho_w Q C_w$, 则式(2)可进一步化简为

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{M}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{\tau}{M}} \quad (3)$$

3 数值模拟方法

3.1 控制方程

为了描述转子线圈强迫过程的瞬态温度场,忽略整个过程水温变化对水物性的影响,对冷却

水建立连续性方程、动量守恒方程、湍流方程、能量守恒方程,对铜导线建立热传导方程。

冷却水的连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{v}$ 为水流动的速度矢量。

冷却水的动量守恒方程为

$$\rho_w \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \nabla \cdot \mathbf{f}_\tau + \rho_w \mathbf{g} - \nabla P \quad (5)$$

式中: $\mathbf{f}_\tau$ 为切应力; P 为压力。

由于冷却水在线圈内流动的雷诺数超过 10^5 ,属于紊流,借助于标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型进行求解^[5-8]。

冷却水热焓的能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w H) + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla t) + \mathbf{f}_\tau \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (6)$$

式中, H 表示焓。

铜导线的热传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla t) + S \quad (7)$$

式中: ρ 为铜的密度; λ 为铜的热导率; S 为线圈励磁电流所引发的单位体积上的损耗, $S = p / (lA)$ 。

3.2 物理模型

为了简化计算,将线圈简化为中空长直导线,如图3所示。模型的长度及横截面尺寸均按照线圈的真实尺寸设定,以获得更为真实的模拟结果。

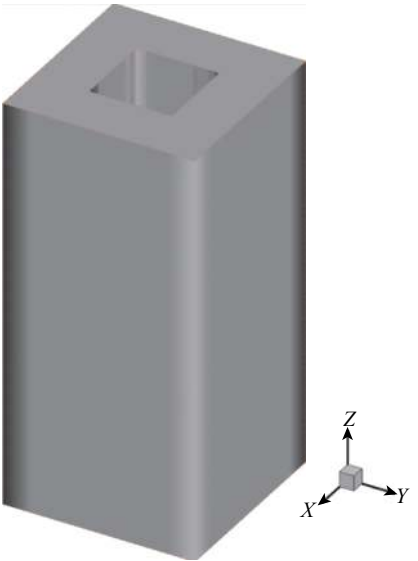


图3 转子线圈三维物理模型
Fig.3 Three-dimensional physical model of rotor winding

3.3 网格划分

针对图3所示的三维物理模型,进行网格划分,网格形状为六面体结构化网格。长度方向按照等距方法划分,横截面上在铜导线部分采取较疏的网格,而在中空部分通水的区域采取较密的

网格, 并且在内壁面处对网格进一步加密以保证冷却水流动边界层的计算精度, 如图 4 所示。经过网格无关性分析, 最终确定的网格数目为 1 400 000, 其中长度方向 10 000 个网格, 横截面上 140 个网格。

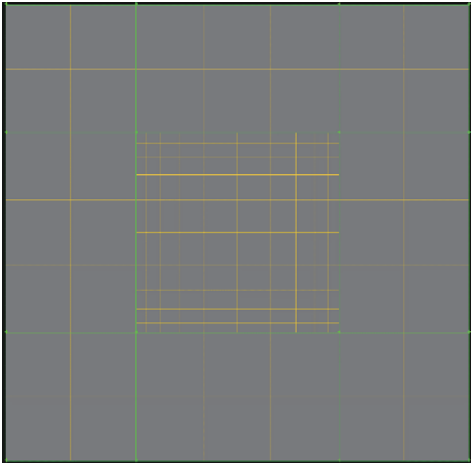


图 4 转子线圈横截面网格划分示意图

Fig.4 Grid division for the cross section of rotor winding

3.4 边界条件和材料物性

初始时刻, 线圈内铜温及水温都设定为 43 ℃。对于线圈入口, 水温设定为 43 ℃, 流速按照实际工况计算得到。出口处设定为压力出口边界, 线圈内壁面处冷却水与铜之间存在对流传热, 而线圈外壁面设定为绝热壁面。励磁电流引发的损耗以内热源的形式均匀地施加到铜导线上。在数值计算中, 水与铜导线的热物性(包括热导率、密度、电阻率等)随温度的变化也在控制方程内予以考虑。

3.5 计算步骤

对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式, 对上述控制方程进行离散化, 得到离散化方程组。在离散化方程组的迭代计算过程中, 当所有参数残差低于 1.0×10^{-6} 时, 认为求解收敛。壁面处理方法采用标准壁面函数, $y^+ = 56.7$, 流动处于对数律层, 满足标准壁面函数要求。

此外, 由于计算对象为瞬态问题, 时间步长的选取对计算结果的精度影响较大。本文依次采取 4 种时间步长 0.005, 0.01, 0.02, 0.05 s 计算线圈强励过程。结果表明, 时间步长为 0.01 s 与 0.005 s 的计算结果偏差小于 0.1%; 而时间步长为 0.02, 0.05 s 时, 其计算结果与 0.005 s 时偏差分别达到 23% 和 57%。因此, 本文选取 0.01 s 为最终计算时间步长, 每个时间步长内迭代 30 次, 以保证计算精度。

4 计算结果与分析

4.1 调相机线圈强励瞬态温升的数值模拟结果

采用三维数值模拟方法对该调相机的最长一根转子线圈强励性能进行理论计算, 以获取该线圈的瞬态温升分布。将产品额定工况(励磁电流 1 835 A)作为强励工况(励磁电流 4 587.5 A)的初始条件, 进行计算。因此, 在计算中, 首先需要计算转子线圈额定工况下的铜温及水温分布, 之后再施加强励电流, 强励电流维持一定时间后再将其恢复到额定电流。

图 5 为给出了该调相机转子线圈从空转状态开始, 经历了额定工况、强励工况、冷却 3 个阶段后, 其出口处铜温及水温的变化情况。

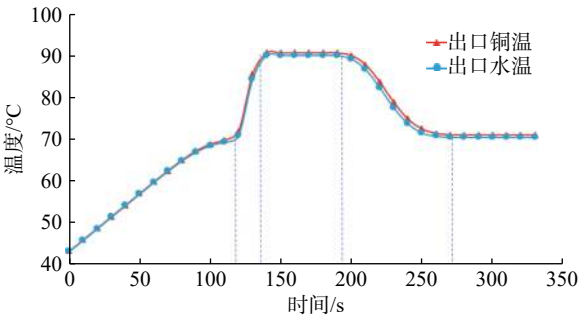


图 5 调相机转子线圈 2.5 倍强励及冷却过程

Fig.5 2.5 times excitation and cooling process of the condenser's rotor winding

由图 5 可见, 在零时刻, 线圈内铜温及水温均为 43 ℃, 此时开始施加额定电流 1 835 A 直至到达稳态, 额定工况稳态时出口铜温及水温分别为 70.1, 69.5 ℃, 与表 1 中所示传统计算方法的最大出水温度 68.3 ℃ 的偏差在 2 ℃ 以内, 可见两种方法在计算额定工况稳态温度时精度相当。水温与铜温温差较小, 表明铜导线与冷却水之间换热很好, 因此两者温差在近似工程计算中可忽略不计。在额定工况稳态下的 118 s 时, 开始施加 2.5 倍强励电流(4 588 A), 维持 15 s, 此时出口铜温及水温分别为 91.2, 90.1 ℃, 满足强励能力的要求。在强励进行 15 s 后, 即 133 s 时, 恢复励磁电流至额定值 1 835 A, 线圈开始冷却, 直到出口铜温和水温恢复至额定工况下的稳态值。图中显示, 强励结束之后出口温度并没有立即开始下降, 而是存在一个平台期, 在 200 s 左右才开始迅速下降, 温度从强励结束时恢复到强励前额定工况时的稳态温度需要约 160 s, 所需整定时间较短。

图 6 为该调相机转子线圈 2.5 倍强励及冷却过程中不同时刻铜温及水温的分布云图(针对图 5 所示工况)。可见,在强励开始时的 118 s,线圈内

温度沿流动方向不断升高,出口处铜温及水温最高;强励结束后,300 s 时线圈内温度分布与强励开始前(118 s)的额定工况稳态温度分布相同。

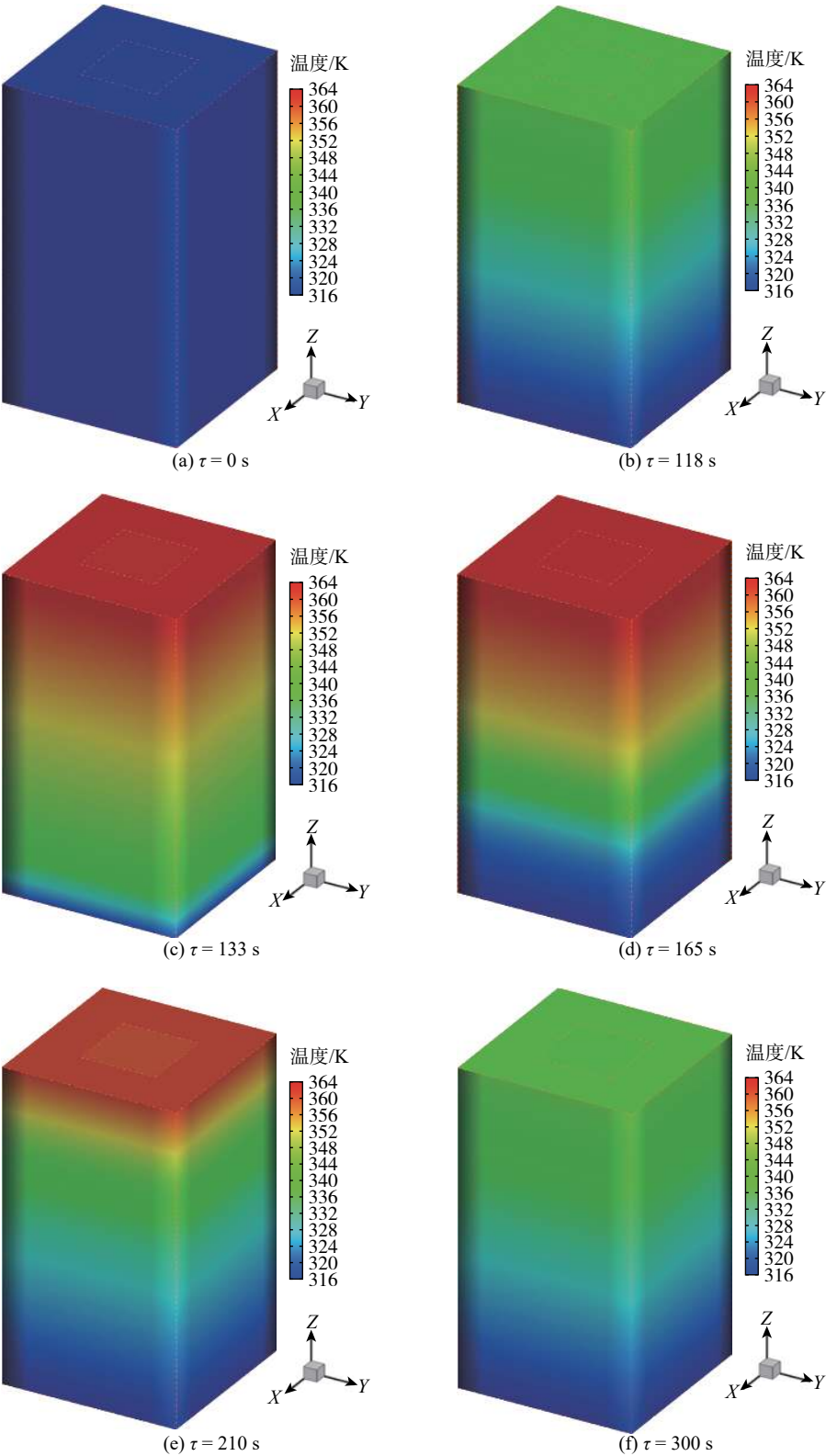


图 6 调相机不同时刻转子线圈内铜温及水温分布

Fig.6 Temperature distribution of copper and water at different time in condenser's rotor winding

图7为该调相机转子线圈在不同倍数下强励、冷却过程中出口铜温的变化情况。值得说明的是, 该图中初始时刻线圈已经处于额定工况的稳态, 因此铜温起始点为额定工况稳态温度70.1℃。

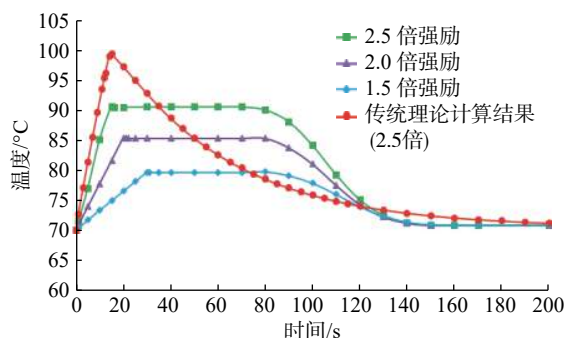


图7 调相机转子线圈不同倍数下强励、冷却过程出口铜温变化
Fig.7 Copper temperature at the outlet of condenser's rotor winding at different excitation times and during cooling process

由图7可知, 在冷却阶段, 虽然线圈发热突然恢复至强励前的水平, 但内部冷却水温仍然较高, 必须等待后续冷却水持续补充并且达到新的平衡以后, 线圈出口温度才能恢复至强励前的水平。从定性判断, 采用传统理论计算方法得到的温度随时间的变化关系依然是不准确的; 而数值计算则可以很好地模拟温度随时间的变化。2.5倍15s、2.0倍20s、1.5倍30s时, 出口铜温分别为91.2、85.9、79.7℃, 均满足相关标准要求。强励结束后至160s时, 线圈温度已经恢复至强励前的温度。

4.2 两种计算方法的对比

采用传统理论算法和CFD算法分别对同一根转子线圈在初始状态为空载时2.5倍强励20s时的沿程水温进行计算, 结果如图8所示。由图中数据可知, 传统计算方法得到的线圈出口温度比数值计算温度偏高较多。这是因为: 强励过程中线圈沿长度方向的温度分布为非线性; 而传统的理论分析法假定线圈内的沿程水温分布为线性增加, 这是造成该方法偏保守的根本原因。

数值模拟方法可以有效地模拟线圈内实际的沿程温度分布, 从而避免这一偏差。可见, 三维数值模拟方法相较一维传统理论计算方法具有更好的计算精度。

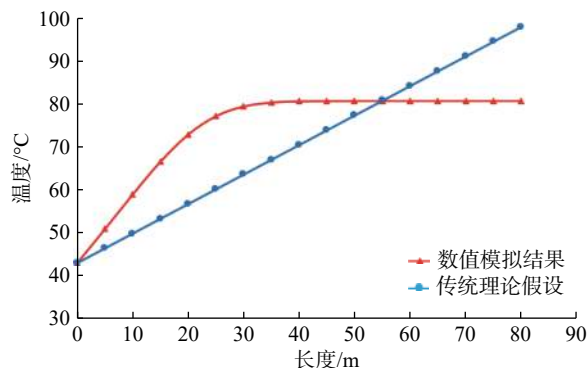


图8 两种方法获得的2.5倍强励20s时沿流动方向的水温分布
Fig.8 Water temperature distribution along the flow direction of 2.5 times strongly excited 20 s by two methods

5 结论

采用计算流体力学软件Fluent对某双水内冷调相机的转子线圈在强励工况下的运行特性进行了三维数值模拟研究, 获得了转子线圈强励工况下铜温及水温的瞬态温度分布, 为产品设计和强励过程的温升风险控制提出了一种较为精确的分析和计算手段。同时通过三维数值模拟与传统一维近似计算结果的对比, 指出了传统一维近似计算方法假设线圈内沿程水温分布线性增加而使计算偏保守, 导致计算精度较差。研究成果对转子线圈瞬态温升的理论计算与双水内冷调相机转子线圈温升裕度的设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 314-317.
- [2] 缪昌明. 汽轮发电机设计和运行若干问题的分析或计算(一)[J]. 大电机技术, 1981(3): 1-7.
- [3] 缪昌明. 汽轮发电机设计和运行若干问题的分析或计算(二)[J]. 大电机技术, 1981(4): 5-11.
- [4] 张小虎, 胡磊, 钟后鸿. 双水内冷汽轮发电机转子线圈水量及温升研究[J]. 电机技术, 2015(1): 9-14.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.