

基于ANSYS Fluent的电热毛巾架温度场仿真分析与结构优化设计

苏阔¹, 马安帮¹, 郑永基², 冯继东², 李同杰^{1*}

¹安徽科技学院机械工程学院, 安徽 凤阳

²安徽卡恒电器有限公司, 安徽 凤阳

收稿日期: 2023年4月27日; 录用日期: 2023年5月26日; 发布日期: 2023年6月7日

摘要

本文通过对合作单位主流的电热毛巾架的结构建模与温度场仿真分析, 基于仿真结果优化毛巾架结构, 达到最大程度利用电热毛巾架热量的目的。首先根据现有电热毛巾架结构建立其三维模型, 进而通过ANSYS Fluent软件对电热毛巾架温度场进行数值模拟分析, 得到电热毛巾架干燥毛巾的热量分布云图, 最后根据热量分布云图优化电热毛巾架结构。模拟仿真显示, 优化后的电热毛巾架在干燥毛巾的过程中使得毛巾温度提升了3°C左右, 显著提升了毛巾的干燥效率。

关键词

电热毛巾架, 温度场仿真, 结构优化

Temperature Field Simulation Analysis and Structural Optimization Design of Electric Towel Rack Based on ANSYS Fluent

Kuo Su¹, Anbang Ma¹, Yongji Zheng², Jidong Feng², Tongjie Li^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang Anhui

²Anhui Kaheng Electric Co., Fengyang Anhui

Received: Apr. 27th, 2023; accepted: May 26th, 2023; published: Jun. 7th, 2023

Abstract

Through the structural modeling and temperature field simulation analysis of the mainstream

*通讯作者。

文章引用: 苏阔, 马安帮, 郑永基, 冯继东, 李同杰. 基于ANSYS Fluent的电热毛巾架温度场仿真分析与结构优化设计[J]. 仪器与设备, 2023, 11(2): 104-111. DOI: 10.12677/iae.2023.112014

electric towel rack of cooperative enterprises, this paper optimizes the structure of the towel rack based on the simulation results, so as to maximize the use of the heat of the electric towel rack. Firstly, a three-dimensional model is established according to the existing structure of the electric towel rack, and then the temperature field of the electric towel rack is numerically simulated and analyzed by ANSYS Fluent software to obtain the heat distribution cloud of the dry towel of the electric towel rack, and finally the structure of the electric towel rack is optimized according to the heat distribution cloud map. The simulation shows that the optimized electric towel rack increases the temperature of the towel by about 3°C in the process of drying the towel, which significantly improves the drying efficiency of the towel.

Keywords

Electric Heated Towel Rack, Temperature Field Simulation, Structure Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们对浴室用品(如毛巾,浴巾等)的卫生程度要求越来越高,而浴室内常年潮湿且阴暗,因此长时间放置在浴室里潮湿的毛巾,浴巾以及毛巾架本身等很容易滋生细菌和螨虫[1] [2] [3]。干燥是保持毛巾等织物洁净的简单有效方式之一[4] [5],如何对晾晒在浴室内潮湿的毛巾和浴巾进行烘干越来越被人们所重视。电热毛巾架随之进入人们视野,电热毛巾架是电暖的一种延伸,采用整架一体发热,能够快速烘干毛巾,高效灭杀 99.99%的霉菌滋生[6] [7]。其实,电热毛巾架一开始属于高档卫浴用品的配套产品[8],由于其出色的干燥及抑菌性能,逐渐进入普通家庭的卫浴用品中。

目前关于电热毛巾架的仿真分析比较少[9],佛山科学技术学院工业设计与陶瓷艺术学院的李天赠[10]等提出了一种基于数值模拟技术的产品概念设计方法,阐述了如何将概念设计方法应用在电热毛巾架的设计当中。南通航运职业技术学院的杜虹[11]提出一种基于 Arduino 的电热毛巾架实现了恒温控制等技术。

本文通过对合作单位主流的电热毛巾架的结构进行提取,建立其主要结构的三维模型,通过 ANSYS Fluent 数值模拟软件对电热毛巾架的发热以及干燥过程进行分析,根据分析结果对毛巾架结构进行优化,最后根据优化后的结构再次进行仿真分析,通过优化前后干燥效果的对比,证明了结构优化的合理性。

2. 毛巾架模型的建立及传热问题

2.1. 电热毛巾架模型的建立

根据合作单位主流的电热毛巾架晾晒方式,并对结构特征进行提取仅保留电热毛巾架的发热杆件以及毛巾模型,得到两种类型的电热毛巾架干燥方式:一是毛巾直接与电热毛巾架发热杆接触,如图 1 所示,即毛巾悬挂在电热毛巾架发热杆件上;二是毛巾不与电热毛巾架发热杆接触晾晒,如图 2 所示,即毛巾悬挂在与电热毛巾架距离一定的位置上。

由于电热毛巾架的安装是固定在墙面且与地面垂直,并由两种电热毛巾架的干燥方式可以知道,接触式的电热毛巾架由于在干燥过程中毛巾与发热杆件始终接触,杆件产生的热量大部分会被毛巾吸收,因此接触式电热毛巾架在其结构上相对合理。但由于发热杆件始终被毛巾覆盖,产生的热量会被聚集起来,在使用过程中会产生一定的风险。而分离式电热毛巾架由于发热杆件和毛巾具有一定的距离,热量

不会聚集在毛巾内部从而降低了风险，但是由于折叠后的毛巾只有一半的面积可以直接接收到发热杆件产生的热量，因此分离式的电热毛巾架在干燥速率以及热量的利用率上大打折扣。

基于上述分析，本文对分离式电热毛巾架进行模拟分析。对电热毛巾架的结构进行提取，建立电热毛巾架、毛巾和壁面的三维模型如图 3 所示。

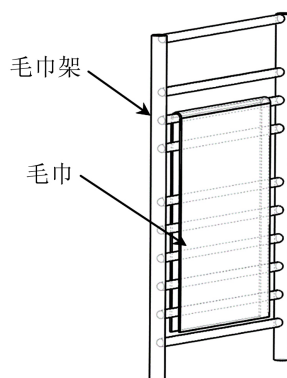


Figure 1. Contact type electric towel rack
图 1. 接触式电热毛巾架

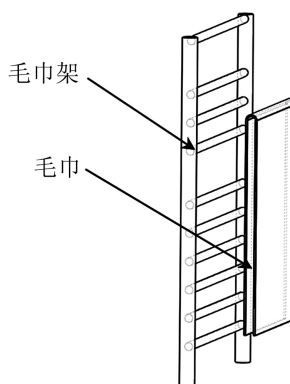


Figure 2. Separate electric towel rack
图 2. 分离式电热毛巾架

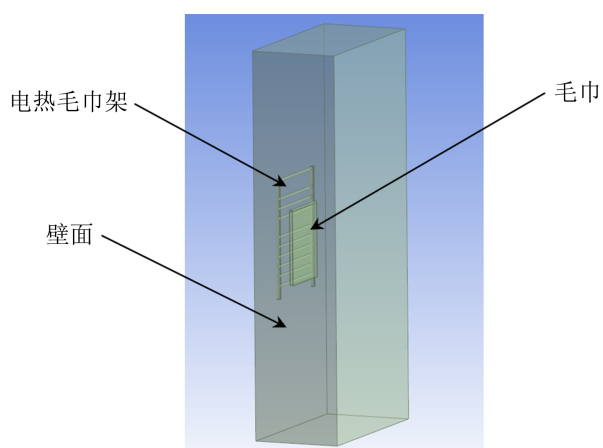


Figure 3. Sketch of structural analysis of electric towel rack
图 3. 电热毛巾架结构分析简图

2.2. 电热毛巾架温度场分析的数学基础

电热毛巾架的传热问题可通过计算流体的方法进行求解, 本文主要通过 ANSYS Fluent 作为数值求解平台对电热毛巾架的传热问题进行求解。将其传热过程视为自然对流模型, 求解过程主要设计三大方程即能量方程、粘性方程以及辐射模型。

能量方程的求解原理如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + P)) \\ & = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T - \sum h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v})) + S_h \end{aligned} \quad (1)$$

式中: K_{eff} 为有效导热率; \mathbf{J}_j 为组分的 j 扩散通量; S_h 包含化学反应放(吸)热以及任何其它的由用户定义的体积热源。

其中

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

式中: 显焓 h 的定义(对理想气体)为 $h = \sum_j Y_j h_j$ 。

由于电热毛巾架的传热过程相对简单, 可以将其看作为自然对流过程, 因此将求解中选择层流模型。对于辐射模型的在本文中 choice DO 模型进行求解, 其求解原理如式(3)的求解如下:

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (I(\mathbf{r}, \mathbf{s})) + (a + \sigma_s) \cdot I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \\ & = a \cdot n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \cdot \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{r} 为位置向量; \mathbf{s} 为方向向量; \mathbf{s}' 为散射方向; s 为沿程长度; a 为吸收系数; n 为折射率; σ_s 为散射系数; I 为辐射强度; Φ 相位函数; Ω' 为空间立体角。

3. 热毛巾架的温度场仿真

3.1. 原电热毛巾架的温度场仿真

基于以上的数值分析原理, 采用 ANSYS Fluent 对电热毛巾架干燥毛巾的过程进行模拟分析。电热毛巾架材料设置为铝合金, 其发热功率设置为 $30,000 \text{ W/m}^3$, 密度及热导率等相关参数按照 Fluent 中铝的默认参数进行设置。毛巾相关参数的设置对分析过程以及结果的收敛程度比较重要, 因此毛巾的模型密度、比热以及热导率等数值由材料决定, 本文所选择毛巾为棉质毛巾由相关资料得到其主要热力学参数如表 1。相关参数设置完成后, 对毛巾架及毛巾进行网格划分, 考虑到网格质量及数量对求解时长和精度等影响, 将计算域的网格尺寸控制在 50 mm , 而接触面的网格进行加密设置为 3 mm 。最终整个计算模型的网格单元数量为 658,114, 节点数为 898,672, 其中电热毛巾架及毛巾模型的网格划分如图 4。

Table 1. Towel model parameter settings

表 1. 毛巾模型参数设置

| 密度(g/cm^3) | 比热容($\text{j/(g}\cdot\text{k)}$) | 热导率($\text{W/(m}\cdot\text{°C)}$) | 温度(°C) |
|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1.3 | 1.28 | 0.063 | 20 |

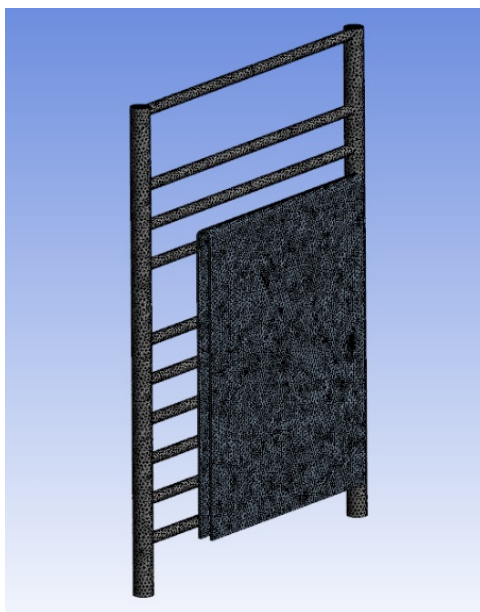


Figure 4. Grid division of electric towel rack
图 4. 电热毛巾架网格划分

根据仿真分析结果，得到毛巾干燥过程温度分布云图，如图 5 所示；电热毛巾架烘干过程横截面温度分布云图，如图 5(c)所示；毛巾温度分布区域占比图，如图 6 所示。从图 5 可以看出，由于毛巾折叠为均匀的两层放置在电热毛巾架一侧，由于空气被发热杆件加热后密度减小，被加热后的热气向上运动导致毛巾受热不均匀，最高温度在 42℃左右，而毛巾底端温度只有 37℃左右，且由于重力的作用，水分将汇集到毛巾最低端，这将导致毛巾最低端干燥时间大大增加。而背对电热毛巾架的一面，电热毛巾架产生的热量基本靠近电热毛巾架的一面吸收，其干燥过程中温度只能维持在 36℃左右。

通过图 5(c)截面温度分布云图可以看出，电热毛巾架产生的热量在放置毛巾的一侧，其热量可以很好的被毛巾吸收，而靠近墙面的一侧，其产生的热量基本传递到了空气当中，没有被充分利用。从图 6 可以看出，毛巾在干燥过程中其温度分布的百分比基本分布在两个温度区间，这与图 5 所分析的结果一致，即毛巾折叠放置在电热毛巾架的一侧进行干燥，一侧可以得到很好的干燥效果，而另一侧则不理想。

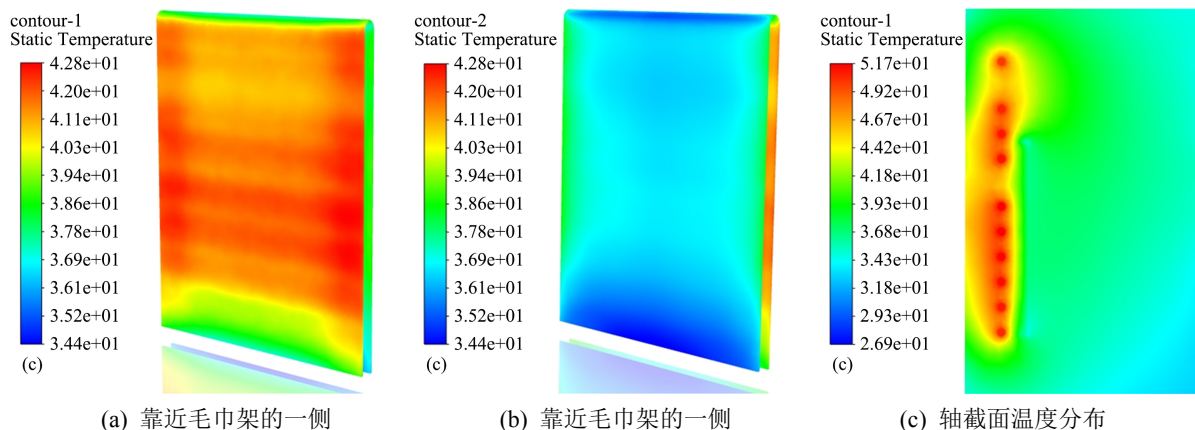


Figure 5. Temperature distribution cloud of towel drying process
图 5. 毛巾干燥过程温度分布云图

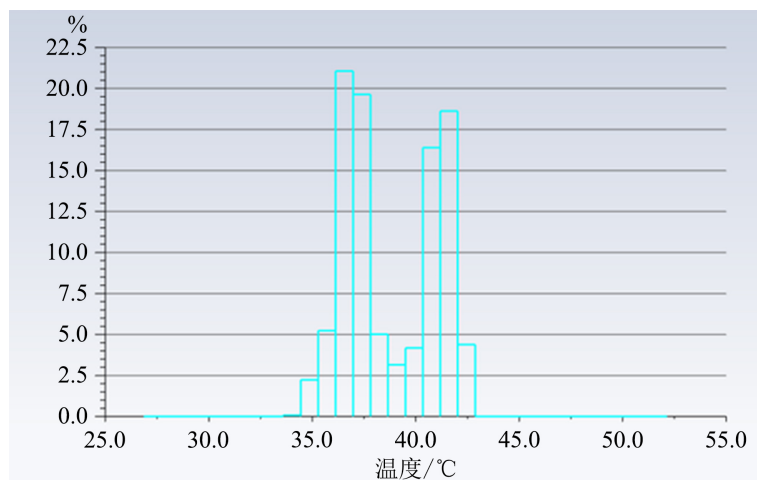


Figure 6. Towel temperature distribution area share chart
图 6. 毛巾温度分布区域占比图

3.2. 优化后电热毛巾架的温度场仿真

通过上述分析,上述电热毛巾架干燥毛巾的效果不理想,产生的大部分热量被浪费,不能很好地被毛巾吸收。因此根据上述分析结果,在不改变电热毛巾架单侧干燥毛巾的前提下,改进电热毛巾架结构,优化后的电热毛巾架结构,如图 7 所示。

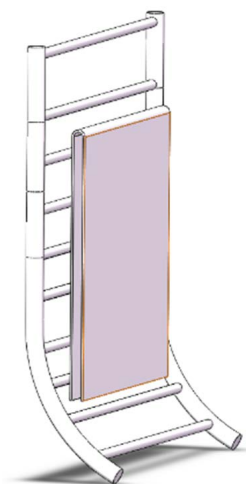


Figure 7. Sketch of the structure of the optimized electric towel rack
图 7. 优化后电热毛巾架结构简图

根据 3.1 节数值模拟分析参数设置,对优化后的电热毛巾架干燥毛巾的过程再进行一次数值模拟分析。得到优化后毛巾温度分布云图,如图 8 所示;电热毛巾架横截面温度分布云图,如图 8(c)所示;毛巾温度所占整个毛巾的百分比,如图 9 所示。通过图 8 可以看出,优化后的电热毛巾架干燥毛巾的效果相对比较理想,靠近电热毛巾架的一侧最高温度基本维持在 43°C 左右,毛巾最低端温度也能达到 41°C 左右,这将大大提高毛巾最低端的干燥速率,而另一侧的温度也维持在了较高的 38°C 附近,提高了毛巾的整体干燥速度。

通过优化后的电热毛巾架结构可以看出, 由于底端的 3~4 根加热杆件向外延伸, 而毛巾折叠后最低端位于加热杆件正上方, 加快了毛巾最低端的干燥速度, 同时当毛巾底部周围空气被加热后由于膨胀向上运动, 干燥且高温的空气进入毛巾两层之间, 充分利用了电热毛巾架的热效率。

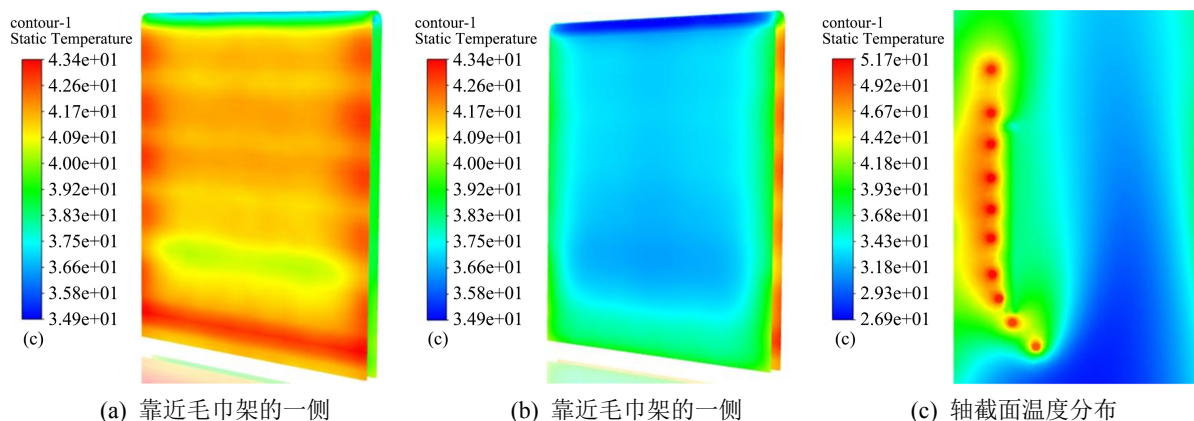


Figure 8. Cloud map of towel temperature distribution after optimization

图 8. 优化后毛巾温度分布云图

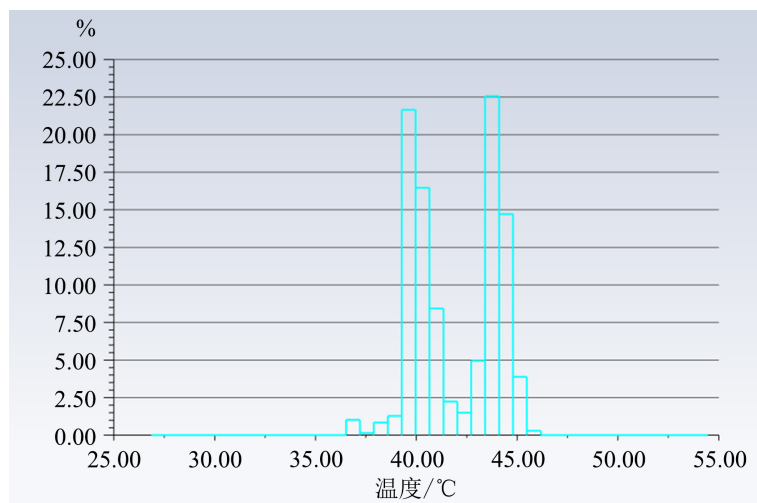


Figure 9. Percentage distribution of towel temperature after optimization

图 9. 优化后毛巾温度分布百分比

从图 9 优化后毛巾温度所占百分比的直方图可以看出, 在双层折叠毛巾的前提下, 毛巾的温度分布主要集中在 40°C 和 43°C 左右, 这是与优化前的毛巾温度分布在两个主要温度区间一致, 但是相比优化前的数值模拟结果有所改善。背对电热毛巾架的毛巾一面温度由原来的 36°C 左右提升到了 38°C 左右, 而另一面则有原来的 42°C 提升到了 43°C 左右, 而毛巾最低端温度提高了 4°C 左右, 毛巾整体温度得到了提升, 加快了毛巾的干燥速度。

4. 结论

通过对结构优化前后的电热毛巾架数值模拟分析结果对比, 发现毛巾架的设计结构对电热毛巾架的能量利用率影有一定的影响。在保持输入功率时间不变的条件下, 优化后的毛巾温度比初始结构下的毛

巾温度整体提升了 3℃左右,同时大大提高了最难干燥的毛巾低端的温度,提高了毛巾干燥速率,增加用户体验的,同时也减少了能源的浪费。证明了结构优化设计在电热毛巾架热效率提升上的可行性,为后来者提供一份理论参考,同时也为我国在 2060 年前实现碳中和贡献一份力量。

基金项目

凤阳县科技计划项目: 高效智能电热毛巾架研制与产业化开发(GY2022-05)。

参考文献

- [1] 毛巾架[J]. 科技创新导报, 2016, 13(15): 189.
- [2] W.D.弗罗斯特. 一种新型单人毛巾架[J]. 科学, 1911, 34(872): 347-348.
- [3] 智能家居[J]. 信息技术与信息化, 2017(3): 14.
- [4] 葱子. 微风架[J]. 设计, 2012(4): 22.
- [5] 孙立香, 邓智照, 张慧. 一款室内智能型风干装置的研制[J]. 现代盐化工, 2020, 47(2): 33+49.
- [6] 余锦波. 多功能毛巾架的设计及生产[J]. 中国新技术新产品, 2022(20): 92-94.
- [7] 热牧电热毛巾架[J]. 砖瓦世界, 2020(24): 封 2.
- [8] 毛巾架[J]. 科学美国人, 1885, 53(3): 36-37.
- [9] 团体标准《电热毛巾架》发布会在京举行[J]. 中国建筑金属结构, 2019(6): 26.
- [10] 李天赠, 黄欣怡, 黄玲. 基于数值模拟技术的产品概念设计方法[J]. 图学学报, 2019, 40(2): 308-314.
- [11] 杜虹, 周杰. 基于 Arduino 自动烘干毛巾架的控制系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2018(10): 3-5.