

罗涛, 钱进, 唐虹, 等. 空气源热泵系统能源塔抑制水飘技术研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(4): 47-54. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24061802

## 空气源热泵系统能源塔抑制水飘技术研究

罗涛, 钱进, 唐虹, 张泽茜, 喻光亮, 宋致林

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 空气源热泵作为一种同时兼具制冷与供暖的绿色高效装置, 其通过能源塔的热交换, 实现制冷、供暖以及热水供应, 针对能源塔在冬季工况下水滴中的防冻液逃逸造成的环境污染问题, 基于空气动力学原理提出并自主设计了一种悬臂杆结构, 在能源塔中自动抑制水飘并回收循环利用防冻液的装置, 并在 ANSYS Fluent 仿真模拟环境下进行了装置的数值模拟, 进而对悬臂杆运行的最佳层数与最佳效率进行分析。结果表明该装置在悬臂杆间距 400 mm 的三层设置方式下能有效抑制空气源热泵系统能源塔中防冻液的水飘, 提升防冻液的回收率。

**关键词:** 能源塔; 防冻液; 悬臂杆; 数值模拟; 水飘

中图分类号: TU831.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)04-0047-08

## Research on water drift suppression technology of energy tower in air source heat pump system

LUO Tao, QIAN Jin, TANG Hong, ZHANG Zexi, YU Guangliang, SONG Zhilin

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** As a green and efficient device with both cooling and heating, the air source heat pump realizes the technology of cooling, heating and hot water supply through the heat exchange of the energy tower. Aiming at the environmental pollution caused by the escape of the antifreeze in the water droplets of the energy tower in winter conditions, a cantilever structure is proposed and independently designed based on the principle of aerodynamics. A cantilever-structured device, designed based on aerodynamics for automatically suppressing water drift and recycling antifreeze in an energy tower, is numerically simulated in the ANSYS Fluent environment and then the optimal number of layers and the optimal efficiency of cantilever operation are analyzed. The results show that the installation of the device in three layers with a distance of 400 mm between the cantilever rods can effectively inhibit the water drift of the antifreeze in the energy tower of the air source heat pump system, and improve the recovery rate of the antifreeze.

**Key words:** energy tower; antifreeze; cantilever; numerical simulation; water drift

## 0 引言

空气源热泵凭借清洁环保的特性已得到广泛应用, 在双碳(碳达峰、碳中和)3060目标愿景下<sup>[1]</sup>, 其市场应用前景将更为广阔。空气源热泵以环境中的空气所具有的能量为冷热源, 实现冬季供暖、夏季制冷的功能, 使空气能成为一种清洁的可再生能源。空气源热泵系统的机械活动部件少, 可靠性高, 经久耐用<sup>[2]</sup>。相比较普通空调, 既节能又能提高能量利用效率。能源塔是空气源热泵系统中实现空气与系

统能量传递的重要部件, 也是以水为能量传递载体的外回路中的关键节点<sup>[3]</sup>。夏季制冷时, 能源塔作为高效冷却塔使用; 冬季气温低于 0°C 时, 能源塔内的水结冰会造成系统不能正常运行, 需要在能源塔中添加防冻液以提升水的冰点, 同时防冻液还有除垢、防腐等功能<sup>[4]</sup>。在能源塔上部轴流风机的抽吸作用下, 一部分防冻液被水滴携带, 随水飘逸, 一方面造成防冻液的损失, 需及时补充, 另一方面也造成一定程度的环境污染。

开展空气源热泵能源塔内湿空气除雾装置研

基金项目: 贵州大学“SRT”计划项目([2022]065)。

作者简介: 罗涛(2002—), 男, 本科生, 主要研究方向: 能源与资源节约数值模拟技术。

通信作者: 钱进(1965—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 热力系统多尺度数值模拟与仿真技术。Email: jqian@gzu.edu.cn。

收稿日期: 2024-06-18

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

究,以减少防冻液飘溢,降低损失,一直是学界和业界研究的热点。Arefimanesh 等<sup>[5]</sup>建立了热力学模型,并通过数值和实验结果进行验证,以研究不同天气条件下湿式冷却塔的水耗和冷却性能;Li 等<sup>[6]</sup>开发并验证了 NDWCT 的三维数值模型,通过分析挡板对冷却塔流场的影响,结合循环水温降、蒸发和通风,分析了挡板对冷却塔性能的影响;Sati 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于相变材料(PCM)的新型冷却系统,通过使用 ANSYS 进行 CFD 模拟,该系统的温度适用范围与案例研究中使用的冷却塔基本一致,所提出的系统可能替代冷却塔;Sabdenov 等<sup>[8]</sup>提出了一个数学模型,寻找水滴的最优尺寸及其初始速度,满足冷却水温度和水蒸汽损失的约束条件,在自然对流的情况下,变成了一个具有连续谱的边界值特征值问题,其中特征值是冷却塔入口的空气流量;Hamid 等<sup>[9]</sup>使用银-碳量子点(Ag-CQD)混合纳米流体应用于湿式冷却塔,评估了其对冷却塔效率和水耗的影响,且冷却塔效率从 23.72% 提高到 28.23%,相应地,耗水量从 80.76 mL/min 降低到 69.67 mL/min;Zhevzyk 等<sup>[10]</sup>建立了喷雾冷却塔内传热传质过程的数学模型,数学模型由水滴的运动方程和传热传质方程以及湿空气的热平衡和物质平衡方程组成,考虑了液滴流动的多分散性,根据液滴流动参数计算冷却塔的制冷量;Wang 等<sup>[11]</sup>基于恒热负荷法,建立了高层自然通风湿式冷却塔的三维数值模型,研究了向旁路抽回一定比例的循环水对高位自然通风湿式冷却塔冷却性能和防冻特性的影响;Wang 等<sup>[12]</sup>采用 FLUENT 软件中的多相流模型和物种输运模型对湿空气的冷凝过程进行了模拟,并对节水装置的性能进行了研究,将湿空气视为空气和水蒸气的混合物,忽略了液膜对传热的影响,这种建模方法可以研究湿空气冷凝过程中的湿度变化,适用于冷却塔节水装置的研究;Yang 等<sup>[13]</sup>为提高逆流式湿式冷却塔的传热传质性能,提出了一种新型双 S 波结构填料,并采用数值模拟与实验相结合的方法对其传热传质性能进行了研究;杨柳青<sup>[14]</sup>针对循环水冷却塔存在大量蒸发损失和水雾较大的问题,对冷却塔进行节水消雾技术改造,使达到预期效果;缪伟<sup>[15]</sup>研究了减少循环水冷却塔飘滴、飘雾的技术方案,在冷却塔内架设高效蜂窝状收水器以及通过冷凝换热模块、液滴捕集、水雾冷凝回收等措施,有效地减少冷却塔飘滴、飘雾损失,达到循环水冷却塔节水的目的,并且通过降低空气温度及含湿量,消除可见雾产生的条件,能够起到消雾的作用;王果<sup>[16]</sup>选

择了不同的冷却工质对冷却塔的水飘进行冷凝实验,主要测试不同因素对塔顶饱和湿空气除雾量的影响,并探究有利于回收水飘的最佳条件;赵延春<sup>[17]</sup>介绍了成雾机理及消雾方法,分析了各种消雾方法的优点与缺点,并指出干湿联合消雾方法是目前最为成熟的消雾方法,而冷凝消雾方法是目前较为有效的消雾方法,雾滴捕捉是目前比较新颖的消雾方法。

上述文献从不同的角度解决了能源塔水损失量大的问题,本文设计构建了一种与前述方法有较大差别的基于空气动力原理的空气源热泵能源塔水飘抑制装置,为探索能源塔防冻液回收方式提供新思路。

## 1 装置结构

空气源热泵系统由蒸发器、压缩机、冷凝器、节流阀、能源塔等组成,是基于逆卡诺循环原理建立起来的一种节能、环保制热技术通过自然能获取低温热源,经系统高效集热整合后成为高温热源,用来取(供)暖或供应热水,如图 1 所示<sup>[18]</sup>。

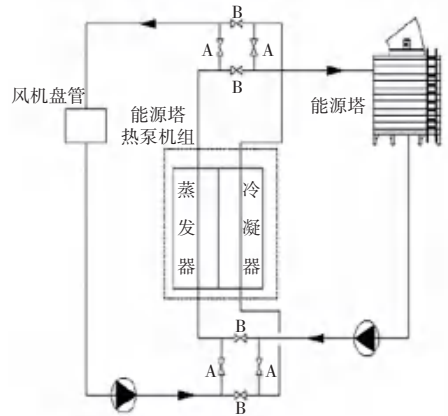


图 1 空气源热泵系统图

Fig. 1 Air source heat pump system diagram

能源塔是工业生产中常见的设备,在冬季其主要作用是将低温低压空气的热量通过填料区与水滴进行热交换,机组输入少量的高品位热源,以达到制热的目的。

## 2 仿真模型建立

### 2.1 几何建模与网格划分

#### 2.1.1 几何模型

本文选取贵阳某中学的 NYT300A 能源塔为计算模型,该能源塔的工作环境按照相关规程进行设置,结构参数见表 1。

表 1 能源塔结构尺寸

Table 1 Structural dimensions of energy tower

| 能源塔参数                  |                   |
|------------------------|-------------------|
| 能源塔型号                  | NYT300A           |
| 风机直径/mm                | 2 200             |
| 风机数量/台                 | 1                 |
| 最小运行重量/kg              | 20 220            |
| 最大运行重量/kg              | 37 600            |
| 单台电机功率/kw              | 7.5               |
| 外形尺寸/mm×mm×mm          | 3 900×3 900×6 000 |
| 能源塔占地面积/m <sup>2</sup> | 3.9×3.9=15.21     |

2.1.2 网格划分

根据能源塔的结构参数,利用 SpaceClaim 采用 1:100 对所涉及到的研究对象进行几何建模,后续结构参数也为 1:100 等比例缩小,能源塔外形尺寸为 39 mm×39 mm×60 mm,建立的三维几何模型如图 2 所示。



图 2 NYT300A 能源塔三维模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of NYT300A energy tower 3D model

由于本文的研究重点在于能源塔水飘抑制和防冻液逃逸的问题,为提高数值模拟研究,对真实的物理模拟进行了部分简化:忽略了能源塔顶部风机结构,对其空气进口设置进口速度;忽略了能源塔填料区;简化了布水器结构;设置布水器进口;简化了能源塔收水器。设置成的模型如图 3 所示。

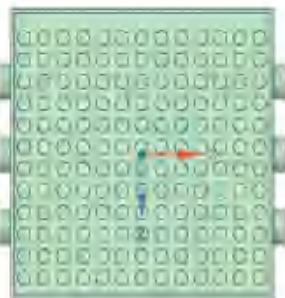


图 3 能源塔收水器模型

Fig. 3 Water collector model of energy tower

网格划分是数值模拟求解过程中的重要步骤,而网格质量也至关重要数值模拟。通过 Fluent Meshing 来划分网格,网格应该尽可能结构化,四边形网格适用于二维流动模拟,六面体网格适用于三维流动,此次对网格划分使用了六面体网格,并对速度入口和压力出口进行网格加密,加密效果如图 4 所示。

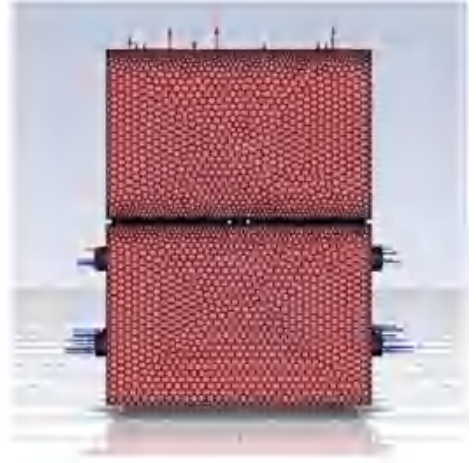


图 4 能源塔网格划分示意图

Fig. 4 Grid division diagram of energy tower

2.2 数学模型与求解条件设定

2.2.1 数学模型

在能源塔内,空气在风机的作用下自下而上流动,这个过程中空气和水之间不断地进行着动量、质量和能量间的传递与交换,气流以不规则的湍流形式流动。在环境条件和操作参数保持不变的情况下,将塔外的空气流动视为定常流动,能源塔中的空气和水滴运动过程控制方程由动量守恒方程、质量守恒方程、能量守恒方程组成<sup>[19]</sup>。

液滴状态控制方程

液滴受力分析:基于牛顿第二定律,液滴在流场中的受力分析<sup>[20]</sup>如下:

$$\frac{d\mu_p}{dt} = F_d + M_g + \frac{(F_m + F_p + F_B + F_s + F_{M_a})}{m_p} \quad (1)$$

其中,  $F_d$  表示流体曳力;  $M_g$  表示浮力;  $F_m$  表示虚假质量力;  $F_p$  表示压力梯度力;  $F_B$  表示 Basset 力;  $F_s$  表示 Saffman 力;  $F_{M_a}$  表示 Magnus 力。

由于液滴在流场中受力复杂,所以在计算时对其进行简化,忽略较小的力后,其运动方程可表示如下式:

$$\frac{d\mu_p}{dt} = F_d + M_g \quad (2)$$

液滴在流动的流体中,会受到流体的拖曳作用,

其受到流体的曳力大小为:

$$F_D = \frac{18\mu_f C_d Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \quad (3)$$

其中,  $\mu_f$  表示流体的动力粘度;  $\rho_p$  和  $d_p$  表示液滴的密度和直径;  $C_d$  表示液滴的阻力系数。  $Re_p$  表示雷诺数, 可以表示为:

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |\mu_p - \mu_f|}{\mu_f} \quad (4)$$

### 2.2.2 求解条件设定

能源塔定义中的初始条件为初始速度、压力、温度、直径等参数, 当工作条件改变时, 初始条件改变, 数值模拟的结果也会发生改变。研究的工况是空气和水滴, 其中水滴中大部分是水, 少部分是质量占比9%的氯化钙溶液<sup>[21]</sup>。本文的能源塔入口边界采用速度入口, 出口采用压力出口条件, 塔体为墙壁, 具体设置参数见表2。

表2 入口边界条件

Table 2 Entry boundary conditions

| 入口边界 | 速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 温度/℃ |
|------|-------------------------|------|
| 空气   | 4                       | 6    |
| 防冻液  | 1                       | 2    |

在能源塔数值模拟研究中, 需要设置多相流模型和湍流模型, 多相流模型选择 VOF<sup>[22]</sup>, 该模型是一种基于体积分数的多相流模型, 适用于两相或多相流动的建模, 可以用于模拟塔内水—气两相流动, 并可以输出各相的体积分数云图, 反映两相流的界面形态, 通过分析分布和浓度, 比较水飘抑制效果。湍流模型则选择 SST k- $\omega$  (Shear Stress Transport k- $\omega$ )<sup>[23]</sup>, 该模型是一种流体力学中常用的湍流模型, 结合了 k- $\omega$  模型和 k- $\epsilon$  模型的优点, 而且计算量小, 适用于边界层内外各个速度范围的湍流流动, 能够较准确地预测边界层内外的流动特性和回流现象, 包括壁面附近的速度分布、压力分布等, 这一特征对于需要考虑边界层影响的复杂流场模拟至关重要, 能源塔内部流动的模拟即属于此类场景。

## 3 数值模拟分析与水飘抑制最佳效率分析

### 3.1 数值模拟分析

#### 3.1.1 水滴的体积分数云图

本章主要使用 ANSYS Fluent 在能源塔收水器上方设置悬臂杆层数对水飘抑制进行模拟分析<sup>[24]</sup>, 结构参数等比例缩小, 悬臂杆设置材料为铝, 如图5所示, 每根杆直径为 2 mm, 悬臂杆一侧与塔体固定,

另一侧靠近塔体, 与塔体间距 4 mm, 但不与塔体接触, 形成悬臂杆, 通过数值模拟分析, 得出较合理的悬臂杆层数和悬臂杆间距, 以提高节能效率。

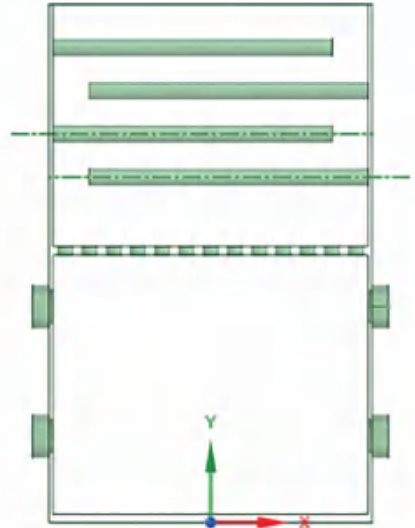


图5 悬臂杆设置

Fig. 5 Setup of cantilever

(1) 设置不同层数的悬臂杆, 在能源塔收水器上方设置一层、两层、三层、四层, 第一层与第三层设置 5 根悬臂杆并与塔体一侧固定位置相同, 第二层与第四层设置 6 根悬臂杆, 而杆与第一层和第三层相比固定位置相反, 相邻层数之间互相叠错, 悬臂杆之间的间距为 5 mm, 上下杆与杆的间距也为 5 mm。

(2) 设置与上述相同层数、不同间距的悬臂杆, 同样设置一层、两层、三层、四层, 悬臂杆单侧固定的位置与上述相同, 不同的是第一层与第三层设置 6 根悬臂杆, 第二层与第四层设置 7 根悬臂杆, 悬臂杆之间的间距为 4 mm, 减小了杆与杆之间的间距, 同样相邻层数之间互相叠错, 上下杆间距也为 5 mm。

在图6中是能源塔既有水飘抑制结构和设置4层悬臂杆间距为5 mm的体积分数仿真云图, 其中,  $Y = 25$  mm (a-e) 剖面图表示能源塔收水器下方的水滴质量分数, 此时水滴尚未经过收水器和设置的悬臂杆;  $Y = 59$  mm (f-j) 表示能源塔塔顶出口的水滴质量分数变化情况, 随着悬臂杆层数的增加, 出口的水滴质量分数逐渐减小。主要是因为收水器上方设置的悬臂杆在接触到气流携带的水滴时, 水滴会在悬臂杆上形成液膜, 聚集成大液滴, 在重力大于浮力和曳力时, 通过收水器流向至回流池里, 而悬臂杆之间是互相叠错分布, 没有接触悬臂杆的气流会在后面设置的第二层、第三层、第四层悬臂杆上形成液膜, 以达到抑制水飘的效果。说明了悬臂杆抑制水

飘作用随着层数的增加而增大。

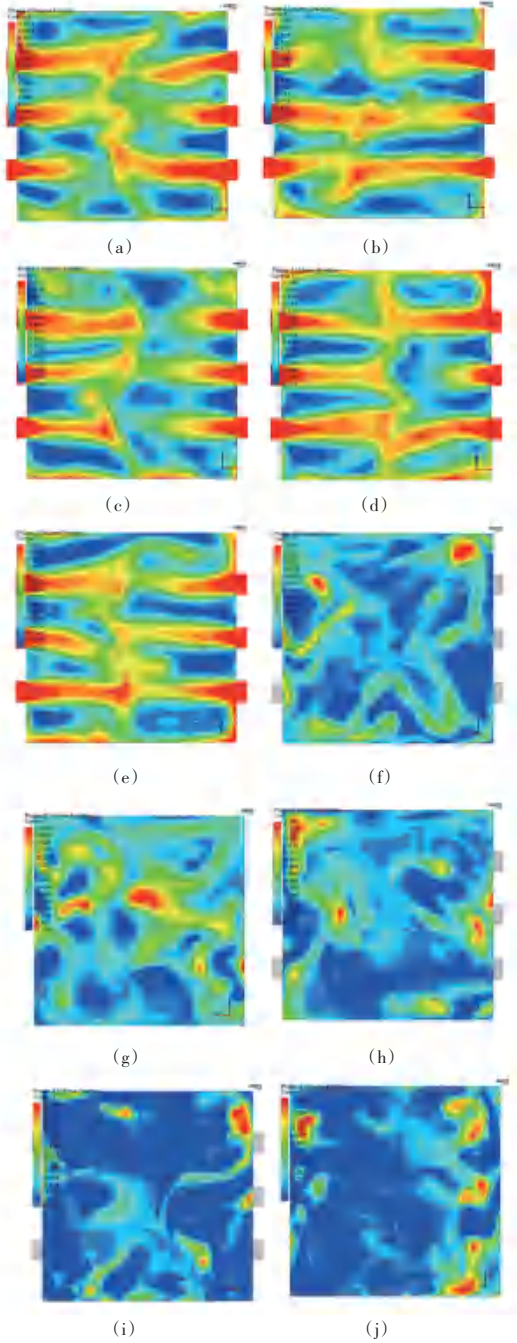


图 6 能源塔从零到四层悬臂杆间距 5 mm 在  $Y=25\text{ mm}$  (a-e) 和  $Y=59\text{ mm}$  (f-j) 的体积分数云图

Fig. 6 Distance between the cantilever rods of the energy tower from zero to four layers is 5 mm cloud maps with volume fractions at  $Y=25\text{ mm}$  (a-e) and  $Y=59\text{ mm}$  (f-j)

图 7 是能源塔既有水飘抑制结构和设置四层悬臂杆(间距为 4 mm)的体积分数仿真云图,与悬臂杆间距 5 mm 的体积分数仿真云图相比,在  $Y=59\text{ mm}$  (f-j) 剖面图中可以看出能源塔出口的水滴质量分数呈现减小的趋势,且水飘抑制效率比间距 5 mm 的高,主要是因为相同悬臂杆层数下,间距 4 mm 小,

水滴附着在悬臂杆上就越容易,在同一个面接触面积就越大,空气流动受到的阻挠就越大,提高了接触面积,使水飘抑制更加充分,在悬臂杆抑制水飘的时候,由于悬臂杆是互相叠错分布,在上一层被抑制回流的液滴会被下一层产生一个副作用,减小了抑制效率,因此悬臂杆的设置在保证水飘抑制效率的同时,需考虑悬臂杆的增加,对水飘抑制的副作用。

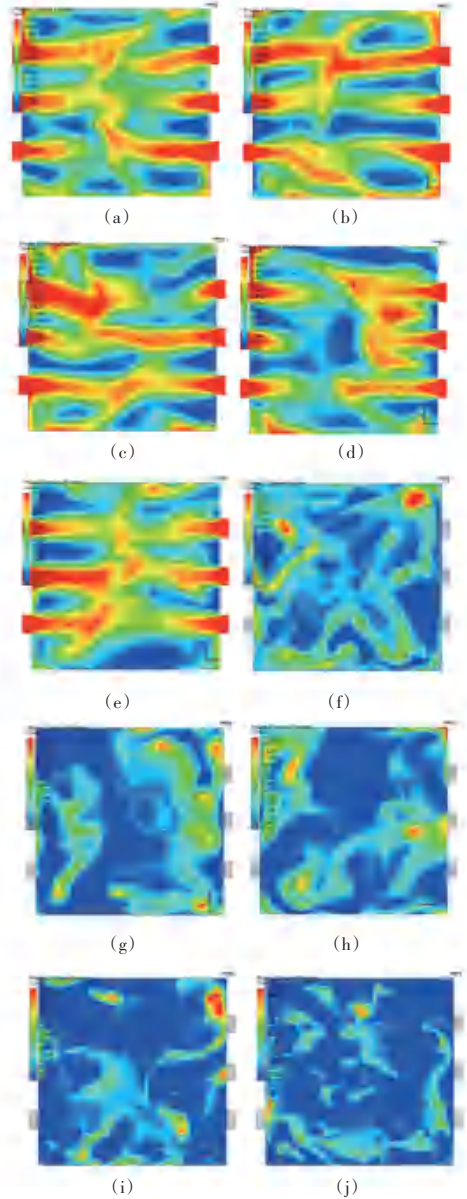


图 7 能源塔从零到四层悬臂杆间距 4 mm 在  $Y=25\text{ mm}$  (a-e) 和  $Y=59\text{ mm}$  (f-j) 体积分数云图

Fig. 7 Distance between the cantilever rods of the energy tower from zero to four layers is 4 mm cloud maps with volume fractions at  $Y=25\text{ mm}$  (a-e) and  $Y=59\text{ mm}$  (f-j)

### 3. 1. 2 空气的压力分布云图

图 8 是能源塔既有水飘抑制结构和设置四层悬臂杆间距为 5 mm 的压力仿真云图,  $Y=25\text{ mm}$  (a-e) 剖面图表示能源塔塔下方方的压力,此时空气还没

有经过收水器和设置的悬臂杆,压力最大,而  $Y = 59$  mm(f-j)表示能源塔塔顶出口的压力情况,可以清晰的看见压力分布差距,压力都是沿着空气流动方向从塔低到塔顶逐渐降低,且随着悬臂杆层数的增加,能源塔塔底到能源塔塔顶的压差会越来越大,主要是因为四层悬臂杆的设置,当收水器没能抑制的水滴,会与空气流向悬臂杆,当接触到悬臂杆后,水滴会在杆上形成液膜,聚集成大液滴,大液滴的重力大于浮力和曳力时,液滴就会脱离悬臂杆,通过收水器流向回流池,由于悬臂杆的设置,空气接触到悬臂杆会从杆的两侧继续流动,增加了空气的流动阻力,使压阻增大,导致风机产生的能耗增加。

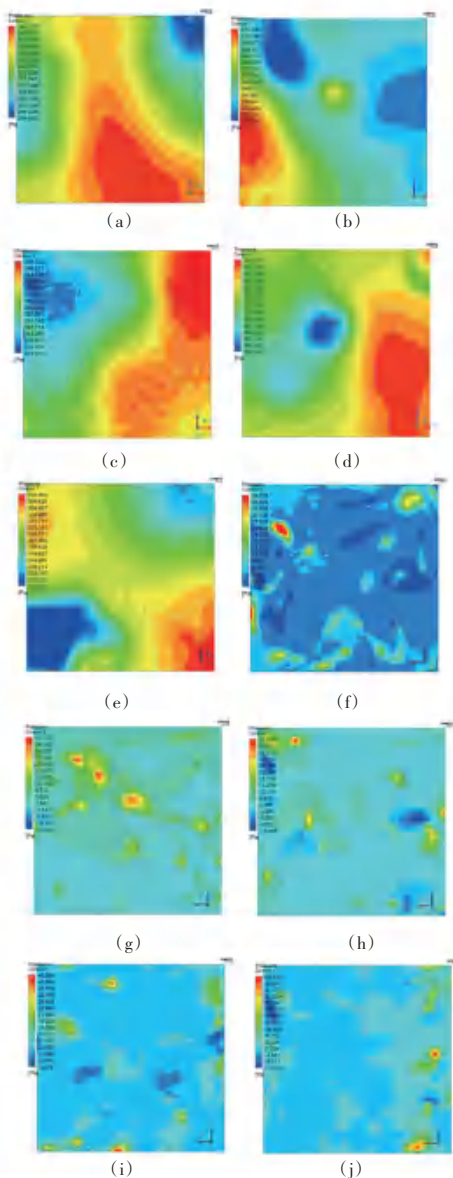


图8 能源塔从0~4层悬臂杆(间距5 mm)在  $Y = 25$  mm(a-e)和  $Y = 59$  mm(f-j)的压力分布云图

Fig. 8 Pressure distribution of energy tower with 0~4 layers of cantilever rods (spacing 5 mm)

图9是能源塔既有水飘抑制结构和设置4层悬臂杆间距为4 mm的压力仿真云图。与悬臂杆间距5 mm的压力仿真云图相比,在  $Y = 59$  mm(f-j)剖面图中可以看出能源塔出口的负压呈现最大的趋势,且压阻比间距5 mm的高,主要是因为相同悬臂杆层数下,间距4 mm更小,空气与悬臂杆的接触就越容易,在同一个面接触面积就越大,空气流动受到的阻挠就越大,提高了接触面积,空气需要从更多的悬臂杆两侧流动,增大了空气的流动阻力,压阻增大,导致风机的能耗增加,悬臂杆抑制水飘的时候,会产生压阻,且悬臂杆的层数越多,压阻增加的越快,因此悬臂杆的设置在保证水飘抑制效率的同时,得考虑悬臂杆的增加,导致压阻的增大,使风机能耗增加。

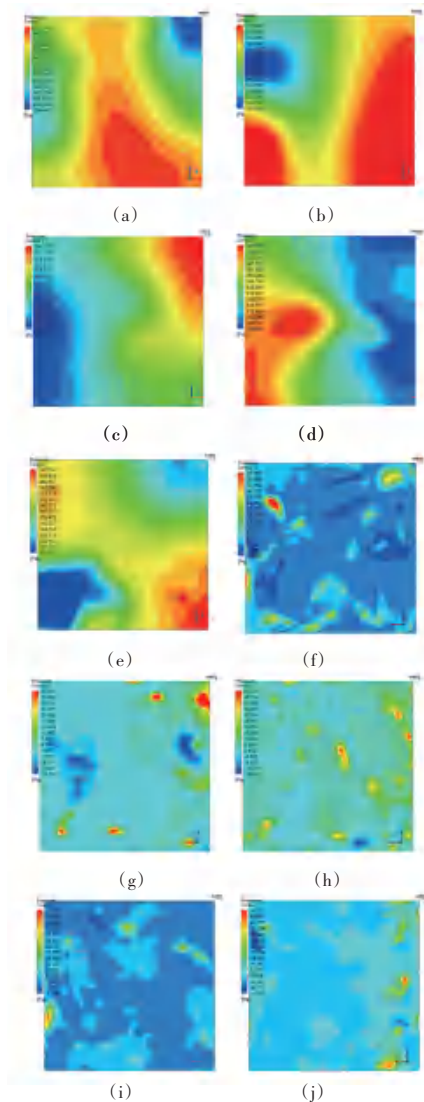


图9 能源塔从0~4层悬臂杆(间距4 mm)在  $Y = 25$  mm(a-e)和  $Y = 59$  mm(f-j)的压力分布云图

Fig. 9 Pressure distribution of energy tower with 0~4 layers of cantilever rods (spacing 4 mm)

### 3.2 水飘抑制最佳效率分析

在其他参数条件不变的情况下,对比两组不同的方案,在实际工程数据下第一组杆与杆的间距为 500 mm,第二组杆与杆的间距为 400 mm,在其出口设置对水滴的质量分数监测,加上能源塔既有水飘抑制,总共 9 组出口监测,按顺序分别是能源塔既有水飘抑制结构、能源塔设置 1~4 层悬臂杆间距 5 mm 和能源塔设置 1~4 层悬臂杆间距 4 mm,观察悬臂杆层数对水飘的抑制情况,并进行数据分析。

表 3 能源塔设置悬臂杆间距 500 mm 时出口监测平均抑制体积分数

Table 3 Average suppressed volume fraction of outlet monitoring for energy tower with cantilever bar spacing of 500 mm

| 能源塔既有水飘结构(零) | 间距为 500 mm(一) | 间距为 500 mm(二) | 间距为 500 mm(三) | 间距为 500 mm(四) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.130        | 0.125         | 0.120         | 0.100         | 0.090         |

表 4 能源塔设置悬臂杆间距 400 mm 时出口监测平均抑制体积分数

Table 4 Average suppressed volume fraction of outlet monitoring for energy tower with cantilever bar spacing of 400 mm

| 能源塔既有水飘结构(零) | 间距为 400 mm(一) | 间距为 400 mm(二) | 间距为 400 mm(三) | 间距为 400 mm(四) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.130        | 0.120         | 0.115         | 0.090         | 0.086         |

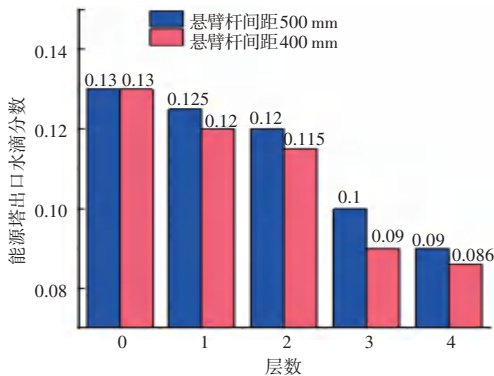


图 10 能源塔悬臂杆间距 500mm(蓝)和间距 400 mm(红)时出口水滴质量分数随层数的变化

Fig. 10 Variation of outlet water drop mass fraction with layer number for energy tower with cantilever bar spacing of 500 mm (Blue) and 400 mm (Red)

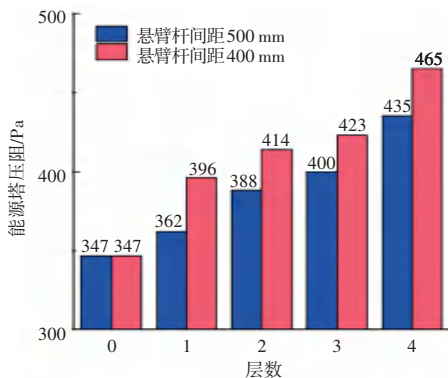


图 11 能源塔悬臂杆间距 500 mm(蓝)和间距 400 mm(红)时压阻随层数的变化

Fig. 11 Variation of piezoresistance with layer number for energy tower with cantilever bar spacing of 500 mm (Blue) and 400 mm (Red)

取其能源塔既有水飘抑制的平均数和两组方案的平均水飘抑制的体积分数如表 3、表 4 所示,并从图 10,图 11 中可以看出不改变其他参数的情况下,随着悬臂杆的层数增加,能源塔出口的水飘会逐渐的下降,说明了悬臂杆确实可以减小水滴的损失,但能源塔的压阻也会增大,要达到相同的效率,能源塔风机会做更多的功,导致能耗增加。从图中还可以看出,悬臂杆间距 400 mm 的水飘抑制效果更优,但是压阻也比间距 500 mm 的大。

从图 12,图 13 可以看出,压阻和水滴的质量分数有一个较大的变化,抑制水飘的同时也会增大压阻。随着悬臂杆层数的增加,出口水滴的质量分数会减小,从而实现抑制水飘和防冻液的逃逸,但是压阻也会增大,从而导致风机能耗增加。在曲线中,看见第三层悬臂杆时,出口水滴的质量分数在第二层与第三层有一个斜率的变化,抑制水飘增长速率快,而在第三层与第四层水飘抑制斜率变缓,抑制水飘效果也提升,但是水飘效率增长速率变慢,因为悬臂杆是互相叠错分布,在抑制水飘的同时,也会对上一层被抑制回流的水飘产生一种副作用,而且此时的压阻太大,能耗增加。综上,选择悬臂杆间距 400 mm 三层设置的方案,兼顾了水飘抑制效果和风机能耗两个因素。

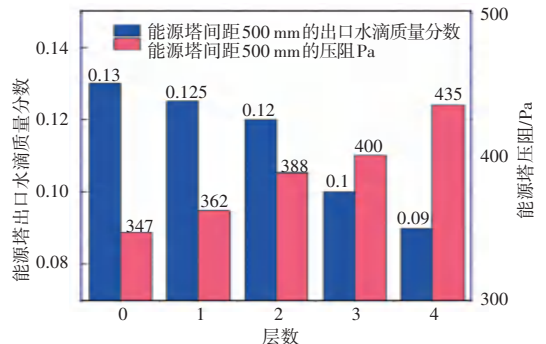


图 12 能源塔悬臂杆间距 500 mm 的水飘(蓝)、压阻(红)随层数变化

Fig. 12 Variation of water floating (Blue) and piezoresistive (Red) with layer number for energy tower with 500 mm cantilever bar spacing

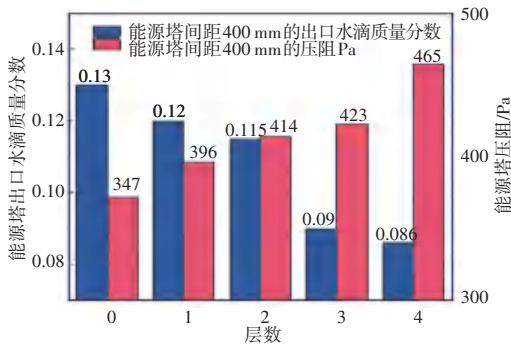


图13 能源塔悬臂杆间距400 mm时的水飘(蓝)、压阻(红)随层数的变化

Fig. 13 Variation of water floating (Bule) and piezoresistive (Red) with layer number for energy tower with 400 mm cantilever rad spacing

## 4 结束语

通过对相同层数不同间距的悬臂杆进行数值模拟研究,比较两组方案的最优效率,随着悬臂杆层数的增加,两组方案的水飘都会逐渐下降,而压阻也会增大,对两组方案出口都进行水滴质量分数监测后,结合曲线形式分析并考虑压阻的因素,发现两组方案的最佳效率都在三层悬臂杆设置,且选择间距为400 mm比间距500 mm的方案水飘抑制效果更优。

## 参考文献

- [1] 蔡睿,朱汉雄,李婉君,等.“双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究[J].中国科学院院刊,2022,37(4):502-510.
- [2] LIU Y, NAN X, HAN H, et al. The variable water temperature control strategy of the air-source heat pump compatible with floor heating system for an apartment [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90(10): 109440.
- [3] 魏代晓,徐铭忆,张悦,等.空气源能源塔与空气热泵机组在寒冷地区供暖的应用分析[J].建筑节能,2024,52(2):17-22.
- [4] LV Q, LI N P, LI C M, et al. Fabrication of environmentally friendly superhydrophobic coatings for corrosion protection under simulated conditions of antifreeze solutions for heat-source tower [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 471(12): 129314.
- [5] AREFIMANESH A, HEYHAT M M. Investigation of the simultaneous effect of fouling and ambient conditions on cooling performance and water consumption of a wet cooling tower [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 62(3): 104426.
- [6] LI Y, WU Y, ZHONG Y, et al. Numerical study on heat and mass transfer performance of a natural draft wet cooling tower based on baffle optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 263(5): 122738.

- [7] SATI V, PERIASWAMY S. Numerical simulation and experimental investigation on Phase Change Materials based energy storage system for cooling the water in process industries towards water conservation and environmental sustainability [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 110997.
- [8] SABDENOV K O, ERZADA M, ZHAKISHEV B A. Contribution to the search for the optimum conditions for reducing water loss in the cooling tower [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2023, 96(1): 79-90.
- [9] HAMID M, SEYED M T G, ALIMORAD R, et al. A novel approach for energy and water conservation by using silver-carbon quantum dots hybrid nanofluids in wet cooling towers systems [J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30: 1827-1841.
- [10] ZHEVZYHYK O, POTAPCHUK I, PERTSEVYI V, et al. Numerical modeling of the thermal characteristics of a fan spray cooling tower [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1348(1): 012038.
- [11] WANG Z, YUE Z, WANG W, et al. Study on the influence of circulating water bypass on the thermal and anti-freezing characteristics of high-level wet cooling tower [J]. Energies, 2024, 17(9): 10463.
- [12] WANG W, LI L, GAO M, et al. Water-saving performance study of water conservation and plume abatement device in wet mechanical draft cooling towers [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 56: 104188.
- [13] YANG L, ZHANG L, HU J, et al. Experiment and numerical study on thermal performance of counterflow wet cooling tower filled with double S-wave packing [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 200: 108984.
- [14] 杨柳青. 冷却塔消雾节水改造 [J]. 氯碱工业, 2023, 59(4): 28-29.
- [15] 缪伟. 循环水冷却塔消雾节水试验研究 [J]. 纯碱工业, 2022(3): 15-17.
- [16] 王果. 化工厂循环冷却塔水汽回收技术研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [17] 赵延春. 干湿联合冷却塔成雾分析及评价 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [18] 李金洋. 能源塔热泵系统在天津地区的供暖适用性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [19] 白运运. 闭式能源塔换热器性能分析及实验研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
- [20] 李婉艺. 微小颗粒在裂隙通道中运移沉积特性的数值研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [21] 段其涛, 朱涛, 王塑博, 等. 冬季防冻液喷洒对化工用煤的影响及应对措施研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(9): 120-124.
- [22] 何林基, 张天雷, 徐刚, 等. 不锈钢激光深熔焊熔池动态行为数值模拟 [J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(3): 124-129.
- [23] OLIVEIRA D S A, SILVA A L, COSTA J D, et al. Comparative study of cooling tower fills: experimental analysis and CFD simulation of an alternative fill [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(7): 2456.
- [24] 钱仲楷. PUMPLINX 与 FLUENT 在轴承润滑性能计算中的比较分析 [J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(12): 116-121.