

接触网绝缘子热风吹扫装置的研发与应用研究

魏孔河^{1*}, 方永忠², 郝巍杰³, 吴文海⁴

¹成都新一驱动技术有限责任公司, 四川 成都

²中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐

³中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司若羌基础设施段, 新疆 巴音郭楞

⁴西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月24日

摘要

针对接触网绝缘子在冬季零度以下低温极端条件下清洗后容易产生覆冰的问题, 采用了水冲洗 + 热风吹扫的低温清洗技术方案, 设计研发了一款绝缘子热风吹扫装置。采用SolidWorks + Flow Simulation软件对其热风枪进行了三维建模和CFD有限元流场分析, 仿真研究了热风枪出风口0~3米内的风速和温度变化损失情况, 再通过样机试验验证了仿真结果的可信度。结果表明: 热风枪出风口2米的位置最高风速可达25 m/s, 通过提高加热器功率提高出风口温度, 可使到达出风口2米位置的吹风温度达到40℃左右。因此此装置研发设计可以实现接触网绝缘子在水冲洗后进行热风吹扫绝缘子表面的残留积水, 从而防止绝缘子在低温极端天气条件下迅速覆冰, 影响绝缘性能。

关键词

绝缘子, 热风吹扫, Flow Simulation, 热风枪

Research and Application of Hot Air Blowing Device for Contact Line Insulators

Konghe Wei^{1*}, Yongzhong Fang², Weijie Hao³, Wenhai Wu⁴

¹Chengdu Xinyi Drive Technology Co., Ltd, Chengdu Sichuan

²China Railway Urumqi Group Co., Ltd, Urumqi Xinjiang

³Ruoqiang Infrastructure Section of China Railway Urumqi Group Co., Ltd, Bayinguoleng Xinjiang

⁴School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: May 24th, 2025; accepted: Jun. 16th 2025; published: Jun. 24th, 2025

*第一作者。

文章引用: 魏孔河, 方永忠, 郝巍杰, 吴文海. 接触网绝缘子热风吹扫装置的研发与应用研究[J]. 机械工程技术, 2025, 14(3): 326-336. DOI: 10.12677/met.2025.143031

Abstract

A low-temperature cleaning technology solution of water flushing and hot air blowing was adopted to address the problem of icing on contact wire insulators after cleaning under extreme conditions of low temperature below zero in winter. A hot air blowing device for insulators was designed and developed. The 3D modeling and CFD finite element flow field analysis of the hot air gun were carried out using SolidWorks + Flow Simulation software. The wind speed and temperature changes within 0~3 meters of the hot air gun outlet were simulated and studied, and the reliability of the simulation results was verified through prototype experiments. The results show that the maximum wind speed at a distance of 2 meters from the air outlet of the hot air gun can reach 25 m/s. By increasing the power of the heater to raise the temperature at the air outlet, the blowing temperature at a distance of 2 meters from the air outlet can reach around 40°C. Therefore, the development and design of this device can achieve the hot air blowing of residual water on the surface of the contact wire insulator after water flushing, thereby preventing the insulator from rapidly icing under low-temperature extreme weather conditions and affecting its insulation performance.

Keywords

Insulator, Hot Air Blowing, Flow Simulation, Hot Air Gun

Copyright © 2025 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

在电气化铁路中,接触网绝缘子起着支撑和绝缘的重要作用。然而,由于长期暴露在户外环境中,绝缘子表面容易积聚灰尘、污垢等污染物,这些污染物会降低绝缘子的绝缘性能,严重时甚至引发污闪事故,危及行车安全。因此,定期对绝缘子进行清扫是保障电气化铁路安全运行的重要措施之一。当前主要清洁方式中,人工清扫存在效率与安全隐患双重缺陷;机械式清扫受限于接触式作业模式;干冰清洗虽效果显著却面临成本与操作难题;水冲洗技术虽效率较高但受制于水质要求与低温结冰风险。

目前国内外对于常温状态下绝缘子的清洁技术研究已经较为深入[1][2],但对于在零度及以下低温环境下极端工况时清洁绝缘子的研究还相对较少。尽管文献[3]-[6]系统分析了覆冰特性及影响机理,却未提出有效的防冰除冰策略。带电水冲洗作为当下最为高效的清洗方式,也存在受环境气温的限制等问题。由于低温气候致使绝缘子表面水冲洗后极易产生覆冰情况,绝缘子覆冰又会带来新的冰闪事故的发生。在文献[7]中有提出水冲洗 + 热风吹扫的方案来应对极端气候时发生污闪后的抢修工作,但文中仅分析了热风吹对绝缘子的影响,并未详细说明如何实现热风吹扫的设计和实施。文献[8]提出了水冲洗车在冬季严寒时通过热风吹扫管道的方法解决排水系统结冻的问题。文献[9][10]分析了高速气流下绝缘子表面雨水的分布情况以及通过热气流来抑制绝缘子发生闪络。

因此本文基于现有接触网绝缘子水冲洗技术进行创新突破,研发配套热风吹扫的辅助清洁装置,进一步完善水冲洗 + 热风吹扫的方案。本文通过 CFD 流体仿真对 0~3 米射程内热风枪的温度场与速度场进行建模分析,结合实物试验双重验证:一方面量化热风传输过程中的温降与风速衰减特性,另一方面评估残余热力学参数对绝缘子表面液态水的清除效能。该研究不仅填补了低温环境清洁技术的理论空白,更构建了从数值模拟到工程验证的完整技术路径,为极端气候下的铁路运维提供了创新解决方案。

2. 热风吹扫装置结构设计

接触网绝缘子热风吹扫装置是通过水冲洗 + 热风吹扫的作业模式[7]，如图 1 所示，设计采用了高压风机 + 电加热的技术方案，在绝缘子经过水冲洗后，表面会残留一层水膜，如不及时清除，极易在寒冷气候条件下迅速结冻，形成表面覆冰，从而影响绝缘性能。然而采用热风吹扫装置，可在绝缘子冲洗后紧接着采用大风量高速加热气流进行吹扫，使绝缘子表面绝大部分积水被吹落，并使绝缘子表面预热，加速水分蒸发，便不会再出现绝缘子表面覆冰现象。

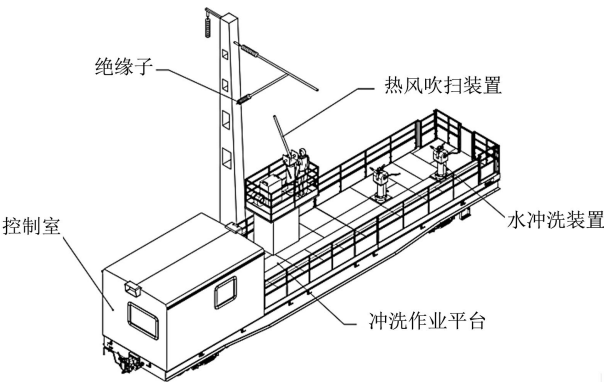


Figure 1. Schematic diagram of low-temperature cleaning technology structure
图 1. 低温清洗技术结构示意图

本文设计研发的绝缘子热风吹扫装置是安装在水冲车平台上的，如图 2 所示。以高压风机为单元的机架部分与水冲洗平台相连，风机机架上安装有可升降装置，升降装置顶端安装吹扫装置，通过伸缩软管将风机与吹扫装置风道相接。吹扫装置是将高压风机提供的高速气流经过装置上的电加热器加热并通过风枪吹到特定距离目标，实现吹扫功能。吹扫装置可以通过电动遥控系统实现热风枪的水平 and 俯仰两个方向的旋转，完成风口位置和方向的调节功能。热风枪上安装有与出风口方向平行的摄像头，操作人员只需要操作遥控手柄，通过视频监控画面即可完成热风枪与绝缘子的对准。吹扫装置随着轨道车的低速运行，热风枪与绝缘子之间的位置关系不断变化，吹扫的角度也会随之变化，控制操作热风枪使热风可以吹扫到绝缘子的大部分表面，吹扫效果可以得到保障。

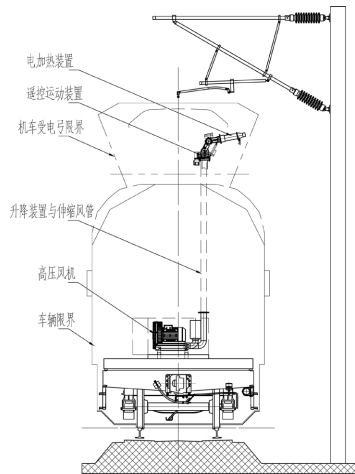


Figure 2. Schematic diagram of the structure of the hot air blowing device
图 2. 热风吹扫装置结构示意图

由于热风枪出风口的收缩大小和结构会影响出风风量、风速和风的流动性，对绝缘子的吹扫效果起到至关重要的作用。根据 TB/T 3271 中受电弓在高速铁路上通过时需要的空间限界，设计吹扫装置作业时，使出风口到两个接触网腕臂绝缘子的最小安全距离大致分别为 1.2 米和 2 米左右，即为吹扫时的最小目标距离。设计应保证热风枪吹出的气流到绝缘子表面的风速不低于 20m/s，并且到达绝缘子表面的吹风温度尽可能高，但相对于环境温度的最大温差不大于 60℃ [7]，避免绝缘子表面的最大应力值超过材料抗弯强度，出现裂纹的风险。因此通过优化风枪出风口的结构和大小，选用合适的高压风机和电加热器匹配，实现对绝缘子的吹扫。风机和加热器性能参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of fan and electric heater
表 1. 风机与电加热器参数

项目名称	参数	备注
风机功率(Kw)	18	
风机风量(m³/h)	1370	
风机风压(mbar)	320	50 Hz
加热器功率(Kw)	24	
加热器最高温度(℃)	900	

3. 仿真建模

3.1. 研究对象

热风枪出风口作为关键部件，通过建模仿真研究其出风口 0~3 米距离的风速和温度变化情况。高压风机的进出风口大小为 φ100 mm，因此将热风枪的进风口设置为 φ100 mm。参考文献[11]对水射流喷嘴结构的设计研究，设计了热风枪出风口形式。经过模型简化，采用 SolidWorks 建模如图 3 所示。

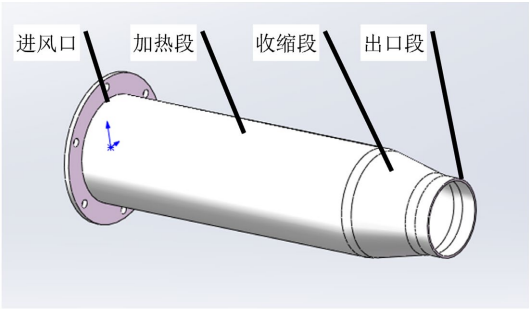


Figure 3. Simplified 3D model of the air outlet of the hot air gun
图 3. 热风枪出风口简化三维模型

由于出风口的收缩大小影响出风风速，其大小分别设置为 φ80/65/50 mm 三种口径进行研究。

3.2. 仿真设置

为了模拟热风枪出口 0~3 米距离的风速和温度变化情况，采用了 SolidWorks 软件中的 Flow Simulation 有限元分析插件模块进行热风枪出风口外部气流的 CFD 流场分析。首先进行模型的前处理，创建风枪进气封盖，建立气流产生的基面；选择热风枪侧视图基面，在出口创建草图，绘制一条 3 米长的基线草图

作为研究参考对象，如图 4 所示。通过 Flow Simulation 插件向导新建项目，如图 5 所示，并设置计算单位，选择外部计算域，选择流体介质为空气，流动类型选择层流和湍流，其他均采用默认值。

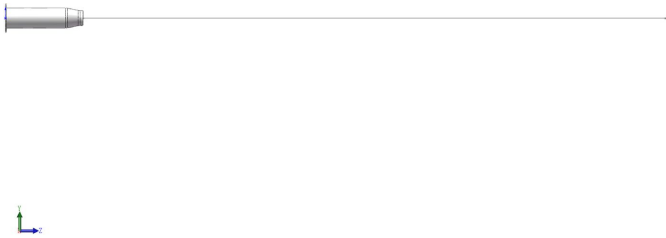


Figure 4. Preprocessing diagram of 3D model
图 4. 三维模型前处理图

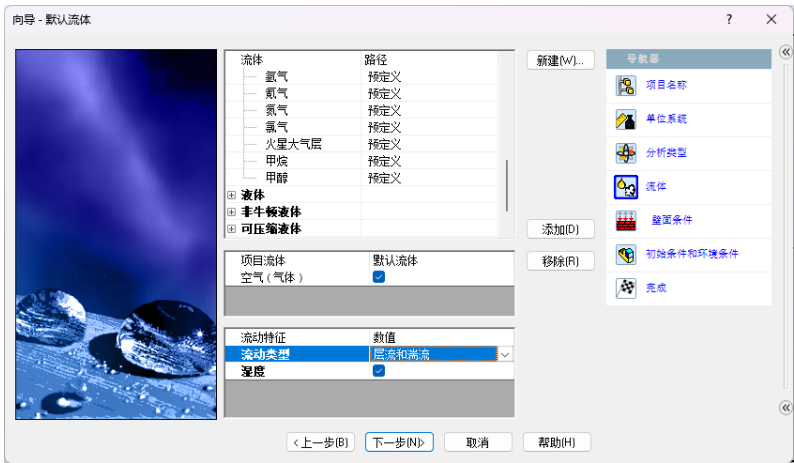


Figure 5. Simulation wizard settings interface diagram
图 5. 仿真向导设置界面图

在 Flow Simulation 分析项目树中调整计算域，设置边界条件为进口体积流量为 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ，温度为 150°C ；插入计算目标为最大速度和最大温度(流体)；由于 SolidWorks Flow Simulation 是基于笛卡尔网格技术使用的，采用的是立方体网格，它可以将 CAD 与 CFD 桥接在一起，可以直接使用原始 CAD 模型中几何体的几何参数，更好地实现自动化网格划分。这里的风枪模型较为简单，是空腔薄壁结构模型，内部并无狭小或细小流道，本文主要分析风枪外部风速和温度，自适应网格划分能根据变量梯度动态细化局部区域，更适用于流动优化求解，故可直接采用全局网格自动划分。反复手动调整细化网格的等级，逐步加密网格直至关键参数(如温度场)变化小于 5%，确定收敛解。如图 6 所示。确定合理的网格数量，最终划分网格数量为 152,440；划分网格后进行运行求解计算，如图 7 所示。

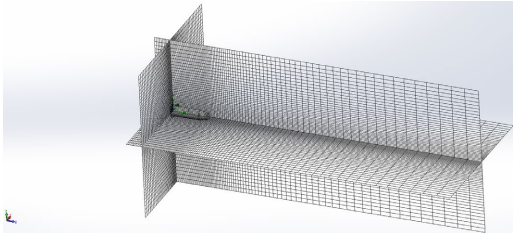


Figure 6. Grid division diagram
图 6. 网格划分示意图

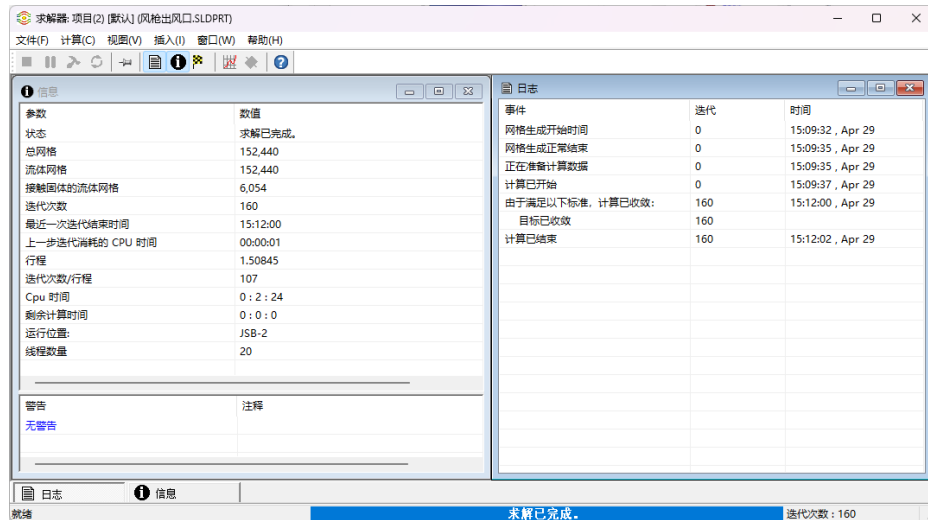
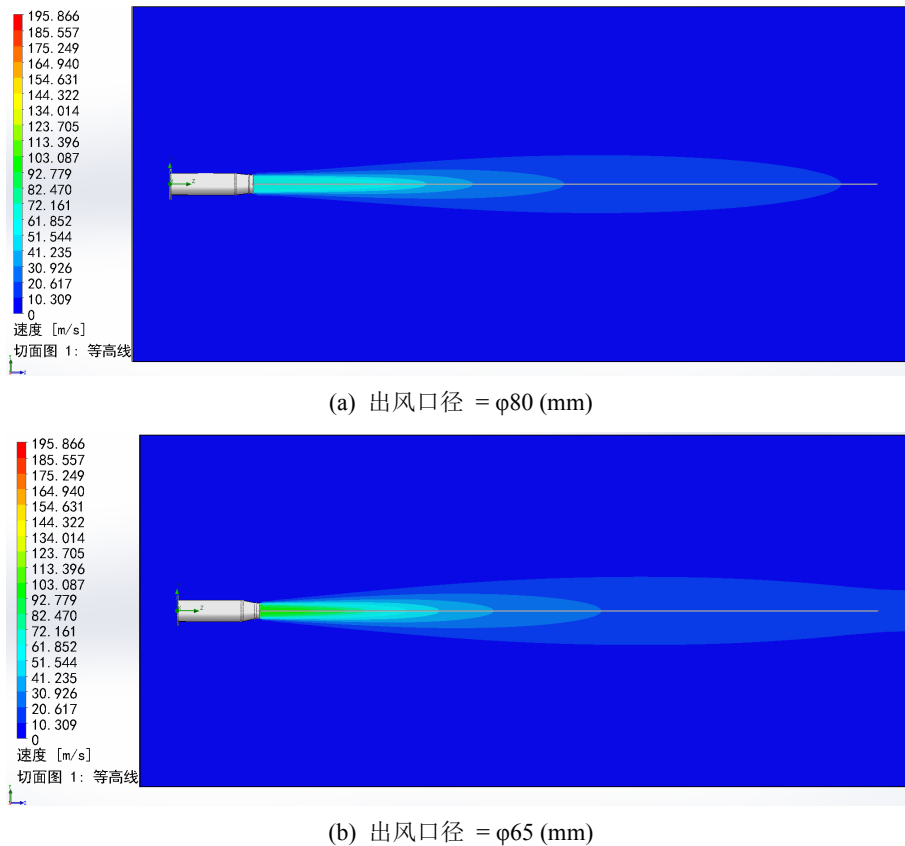


Figure 7. Operation and solution diagram
图 7. 运行求解示意图

4. 计算结果分析

4.1. 出风口流速仿真分析

在结果切面图中插入新建切面图, 将 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 的风量加载到风枪进风口, 得到不同热风枪出风口后 0~3 米的流体速度分布云图如图 8 所示。



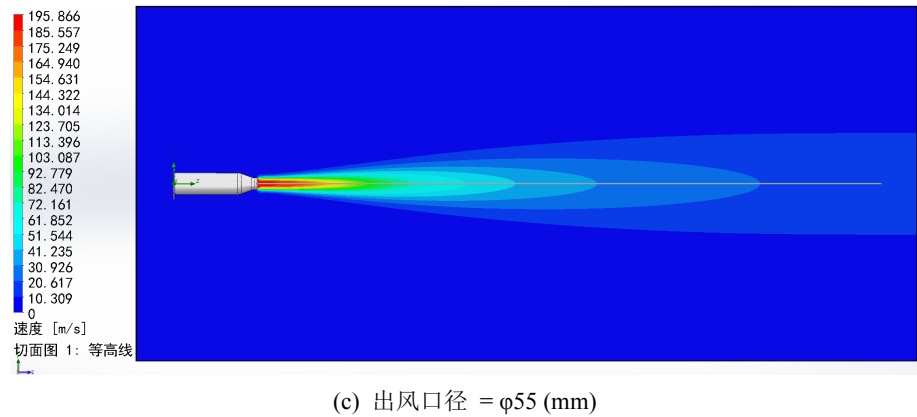


Figure 8. Cloud map of wind speed distribution at 0~3 meters of air outlet under different calibers
图 8. 不同口径下出风口 0~3 米的风速分布云图

在结果 XY 图中插入新建如图 4 绘制的基线草图为研究对象的 XY 图，并导出数据。通过不同口径出风口 0~3 米的风速数据对比，可以看出风枪进风风量一定的时候：出风口风速随出风口面积(出风口口径)的减小而增大；风速在 0~1 米内的损失较快，但在出风口目标点 2 米的位置，随着出风口口径的变小，风速仍有显著提高；在出风口距离越远的位置，其风速增幅就越小。其数据见表 2，对比曲线图如图 9 所示。

Table 2. Wind speed of 0~3 meters at air outlets of different diameters (m/s)
表 2. 不同口径下出风口 0~3 米的风速(m/s)

风口距离(m)	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3
口径 80 (mm)	56	29	19	13	12	9
口径 65 (mm)	79	36	24	17	15	12
口径 50 (mm)	103	51	34	26	22	17

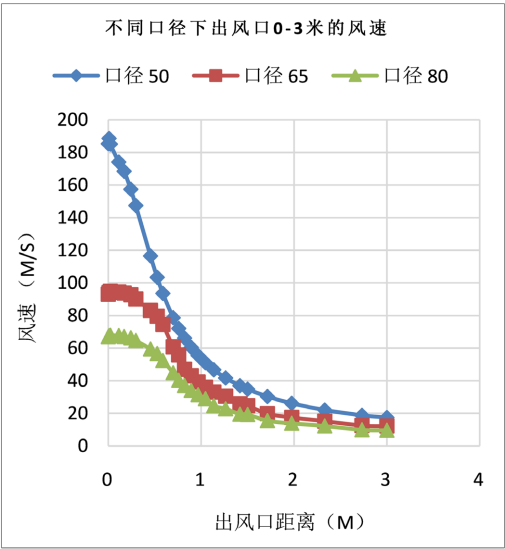


Figure 9. Comparison chart of wind speed curves for air outlets 0~3 meters under different diameters
图 9. 不同口径下出风口 0~3 米的风速曲线对比图

4.2. 出风口温度仿真分析

将上述出风口径为 $\phi 65$ 的风枪模型，以风量不变，温度分别设置为 $100^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}/150^{\circ}\text{C}$ ，系统环境温度默认为 20.5°C ，加载到风枪进风口，得到不同进风温度下出风口后 0~3 米的流体温度分布云图，如图 10 所示。

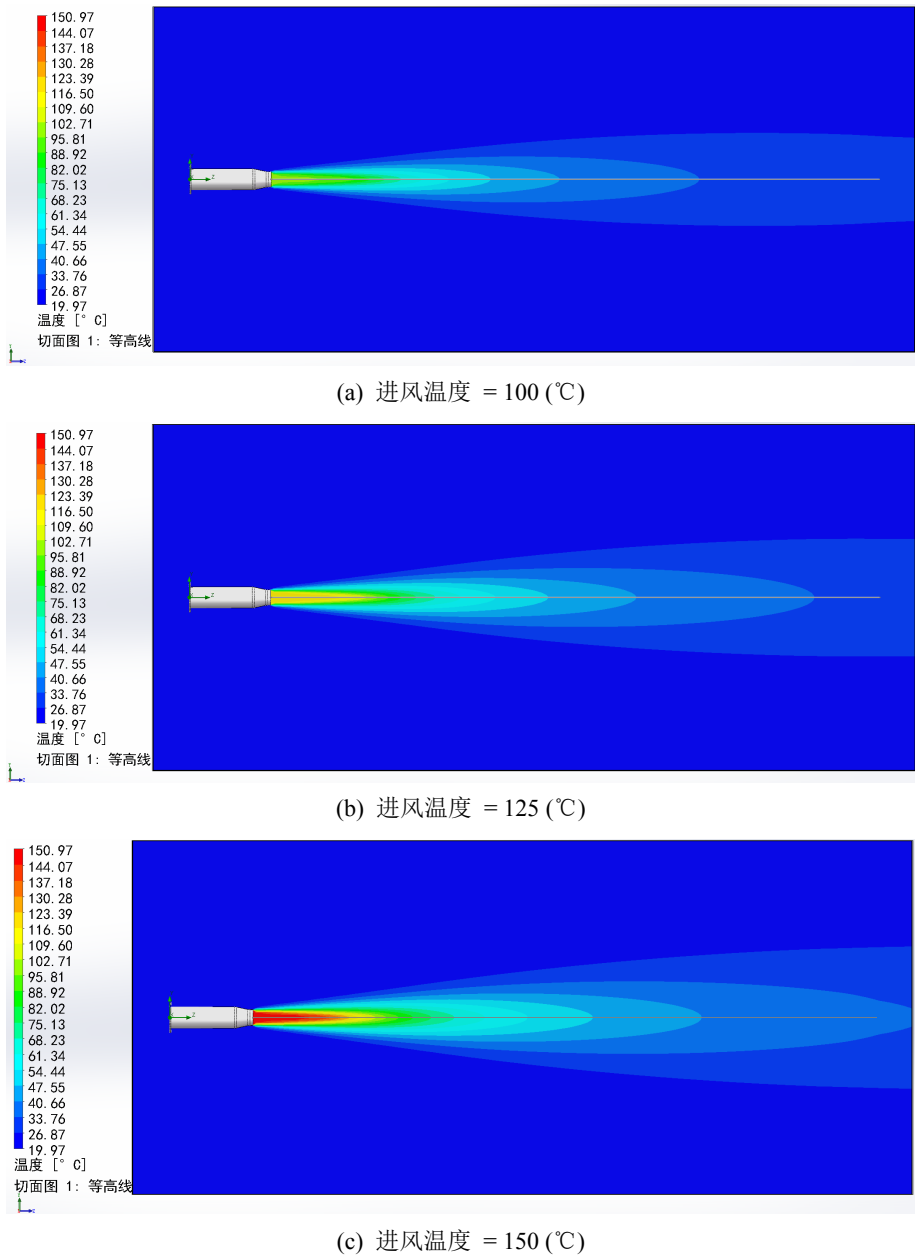


Figure 10. Cloud map of temperature distribution at 0~3 meters of air outlet under different inlet temperatures
图 10. 不同进风温度下出风口 0~3 米的温度分布云图

通过不同进风温度下出风口 0~3 米的流体温度数据对比，如图 11 所示。可以看出距出风口 0~1.5 米内温度损失比较快，1~3 米内温度损失变缓；进风温度越高，到达出口一定距离的剩余温度越高。因此可通过提高进风口温度来保证距离出风口一定距离所需要的温度，但距离较远时流体温度损失很大，就不

能一味通过提高进风口温度来实现。

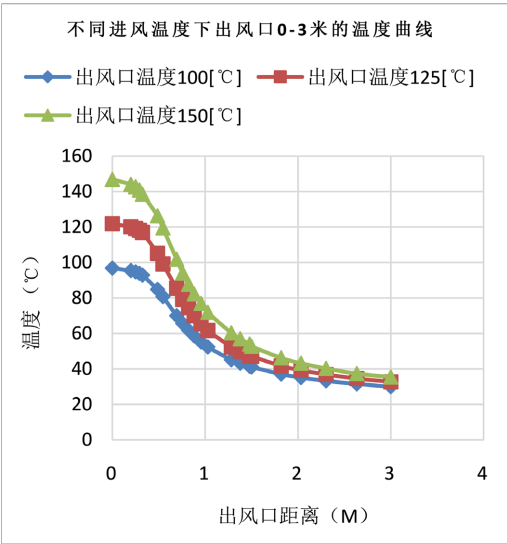


Figure 11. Comparison chart of temperature curves for air outlets 0~3 meters under different diameters
图 11. 不同口径下出风口 0~3 米的温度曲线对比图

5. 样机试验

为了验证上述仿真分析结果，通过制作实体结构样机进行试验验证，试验同样以热风枪出风口为主要试验对象，通过热敏式风速/温度仪进行测量。试验装置如图 12 所示，为避免环境风速的影响，选择在车间室内测试。



Figure 12. Site diagram of the prototype test of the hot air blowing device for contact line insulators
图 12. 接触网绝缘子热风吹扫装置样机试验现场图

5.1. 风速测试

试验分别更换不同变径口径的出风口来测量出风口 0~3 米不同位置的风速。由于测量仪器的风速测

量范围为 0~30 m/s，因此从 3 米位置以每 0.25 米递减距离测量，以测量到达最大风速 30 m/s 为止，记录下测量数据进行对比，数据结果如表 3 所示(文章以 0.5 米间隔列举数据)，对比曲线图如图 13 所示。

Table 3. Test wind speed of 0-3 meters at air outlets with different diameters (m/s)

表 3. 不同口径下出风口 0~3 米的试验风速(m/s)

风口距离(m)	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3
口径 80 (mm)	/	30.2	21	16	11	8
口径 65 (mm)	/	30.5	28	20.5	17	12
口径 50 (mm)	/	31.1	30.2	25	19.5	13

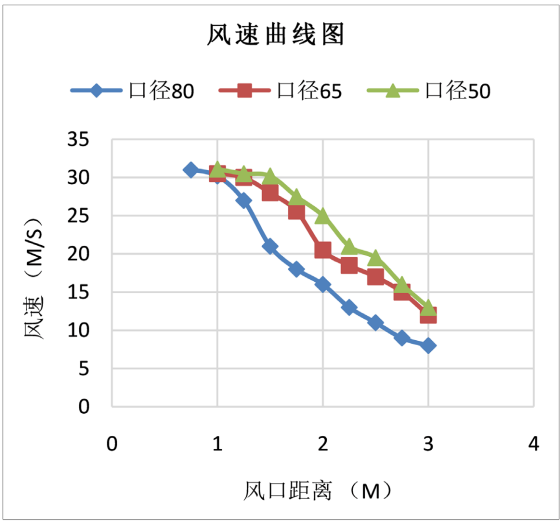


Figure 13. Curve graph of wind speed measurement results from 0~3 meters at air outlets with different diameters
图 13. 不同口径下出风口 0~3 米风速测量结果曲线图

从表 3 和图 13 数据显示，试验测试数据和仿真数据基本接近，风速的损失趋势也保持一致，说明仿真结果的可信度。在距出风口 2 米的位置，风速最高达到了 25 m/s，对于近距离 1.2 米的绝缘子，最高风速达到了 30m/s 的速度。这对于吹扫绝缘子表面的积水有着比较理想的数据了。

5.2. 温差测试

同样以出风口径为 $\phi 65$ 的风枪出口试验，调节电加热器功率，先测试出风口的温度分别达到 100℃/125℃/150℃ 的温度后，然后分别进行出风口 0-3 米的吹风温度测试，测试结果如图 14 所示。

通过试验记录和仿真数据对比，温度变化趋势基本一致，数据稍有偏差，但偏差不大，是由于测量环境温度与仿真条件初始温度的差异。从数据显示，在最近目标点 1.2 米处的温度接近于 60℃，从文献 [7] 中结论可知，处于绝缘子的最大应力极限温差值边界。在距离目标点 2 米处的温度还有大约 40℃。整体数据(流体温度)随着出风口距离的增加先快速下降，然后趋于平缓，逐渐接近环境温度。

在试验过程中通过更换出风口口径，测得加热器功率不变的情况下，出风口温度会随着口径的变小而温度变低，由上述风速仿真和试验分析可知，由于口径变小使得出口风速增大，从而使出口的初始流动温度下降。因此在实际应用中不建议同时追求高风速和高温度的情况下一味地选择小口径出风口而提高加热器功率。可适当平衡风速和温度的要求，从而更加节能。

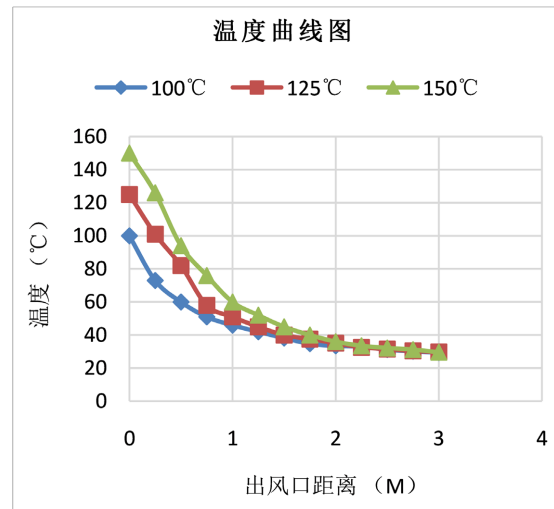


Figure 14. Temperature test curve of air outlet 0~3 meters at different heating temperatures (ambient temperature 23°C)
图 14. 不同加热温度下出风口 0~3 米的温度测试曲线图(环境温度 23°C)

6. 结论

(1) 采用水冲洗 + 热风吹扫的方式, 新研究设计的热风吹扫装置可以解决在零度及以下低温环境对接触网绝缘子的防覆冰问题, 为带电水冲洗在低温环境下应用的局限性提供了新的解决方案。

(2) 通过流体仿真, 获得了热风枪在出风口 0~3 米距离的风速和温度的变化及损失情况, 在目标距离 2 米的位置: 随着出风口口径的变小, 其风速有显著的提升; 但随着进风口温度的提升, 其温度的提升幅度相对较小。

(3) 通过样机试验测试, 热风枪的实际风速和温度的变化损失与仿真结果高度一致, 验证了仿真过程的正确性和结果的可信度。

(4) 试验得到热风枪出口后在目标距离 2 米位置的风速最高能达到 25 m/s, 能有效吹扫绝缘子表面的残留积水, 为低温极端环境下水冲洗的应用提供了可能性。

参考文献

- [1] 张霆, 吴文海, 蓝天, 等. 接触网绝缘子带电水冲洗的关键参数研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 375(5): 181-184.
- [2] 曾鑫鹏, 吴文海, 廖国庆, 等. 绝缘子智能水冲洗装置伺服驱动系统动态性能研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(1): 12-19.
- [3] 陈吉, 蒋兴良, 陈成瑞, 等. 大气参数对串-并联绝缘子覆冰特性的影响研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 10-17.
- [4] 迟明辰, 胡玉耀, 蒋兴良, 等. 复合绝缘子无溢流覆冰增长数值模拟及自然覆冰试验验证[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1694-1703.
- [5] 丁思瑜, 马建桥, 张瑞谦, 等. 接触网腕臂绝缘子覆冰特性分析及结构优化设计[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 349-359.
- [6] 王帅, 李忠涛, 张辉, 等. 变电设备激光除冰技术的应用分析[J]. 云南电力技术, 2023, 51(5): 82-87.
- [7] 方永忠. 基于热流固耦合的接触网绝缘子低温清洗技术研究[J]. 应用物理, 2024, 14(10): 680-691.
- [8] 鹿祥, 魏孔河, 李攀. 冬季水冲洗车排水防寒措施试验研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(5): 446-453.
- [9] 高波, 包健康, 曹桂, 等. 高速气流环境绝缘子积雨特性及其影响因素[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1938-1945.
- [10] 张血琴, 彭松, 吴广宁, 等. 车顶绝缘子雾闪原因及热气流对其抑制效果[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3585-3592.
- [11] 韩启龙, 马洋. 喷嘴结构对高压水射流影响及结构参数优化设计[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 68-74.