DOI：10.13245/j.hust.250863

出口挡风结构对于聚风装置喉口加速特性影响研究

曾鹏飞[1] 李春龙[1] 张 峻[2] 叶建军[2] 向文理[2] 张 力[3]
(1．中国电力科学研究院有限公司，江苏 南京 210000；2．华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074；3．国网湖北省电力有限公司电力科学研究院，湖北 武汉 430077)

摘要 为解决外界气流扰动导致小型全向聚风装置喉口聚风加速性能受限的问题，结合流场数值模拟，揭示了出口气流扰动对喉口加速效应的抑制机制，在此基础上，以调控出口流动结构、抑制外部干扰为核心目标，系统研究了出口壁面延伸与外置挡风罩两种结构改进方案对出口流场及喉口加速特性的影响，并对各方案下出口回涡、压力恢复及喉口加速效应的演变规律进行了深入分析．结果表明：延伸出口扩张壁面可以削弱外界气流干扰，但同时会加剧出口区域低速回流，存在出口阻塞风险，因而无法有效解决气流扰动问题；顶端封闭式挡风罩结构可显著抑制外界气流扰动、改善出口尾流发展条件，使喉口平均增速比在2.6～7.0 m/s来流风速范围内均不低于30%．当挡风罩高度H=100 mm、出口直径D_o=280 mm且来流风速为2.6 m/s时，喉口平均风速达到3.43 m/s，相对来流风速提高32.0%，平均增速比较原模型增加27.4%，聚风性能明显改善．

关键词 聚风装置；气流扰动；挡风罩；增速比；风洞实验
中图分类号 TK89 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0023-07

Study on influence of outlet windshield structure on throat acceleration characteristics of wind concentrator

ZENG Pengfei[1] *LI Chunlong*[1] *ZHANG Jun*[2] *YE Jianjun*[2] *XIANG Wenli*[2] *ZHANG Li*[3]
(1．China Electric Power Research Institute Co. Ltd.，Nanjing 210000，China；2．School of Energy and Power Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China；3．Electric Power Research Institute，State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd.，Wuhan 430077，China)

Abstract To solve the problem that the throat wind-gathering acceleration performance of small omnidirectional wind concentrators was limited by external airflow disturbance，the mechanism that outlet airflow disturbance suppressed the throat acceleration effect was revealed through computational fluid dynamics (CFD) simulation．On this basis，with the regulation of the outlet flow structure and the suppression of external disturbance as the core objectives，the effects of two structural improvement schemes，namely outlet wall extension and external windshield，on the outlet flow field and throat acceleration characteristics were systematically investigated，and the evolution laws of outlet recirculation vortex，pressure recovery，and the throat acceleration effect under each scheme were analyzed in depth．Results show that external airflow disturbance can be weakened by extending the outlet expansion wall，but low-speed recirculation in the outlet region is intensified at the same time，and a risk of outlet blockage exists，so the airflow disturbance problem cannot be effectively solved；external airflow disturbance can be significantly suppressed by the top-closed windshield structure，and more favorable conditions can be provided for the development of the outlet wake，with the average wind speed at the throat remaining at least 30% higher than the incoming wind speed over the range of 2.6~7.0 m/s．When the windshield height H is 100 mm，the outlet diameter D_o is 280 mm，and the incoming wind speed is 2.6 m/s，the average wind speed at the throat reaches 3.43 m/s，representing a 32.0% increase relative to the incoming wind speed，while the average throat speed-up ratio increases by 27.4% relative to that of the original model，indicating that the wind-gathering performance is significantly

收稿日期 2025-08-04．
作者简介 曾鹏飞(1987—)，男，高级工程师；叶建军(通信作者)，教授，E-mail：hustyjj@hust.edu.cn．
基金项目 国家电网有限公司科技项目(5700-202458255A-1-1-ZN)．

improved.

Key words　wind concentrator；airflow disturbance；windshield；speed ratio；wind tunnel tests

随着我国电网规模的不断扩大，输配电线路向远距离、大容量和广覆盖方向发展[1]．电力传感器作为感知电网运行状态的基本单元，在保障电网安全稳定运行方面起到了重要支撑作用[2]．但由于输配电线路电压等级高、运行环境恶劣，供电问题已成为电力传感器应用发展的瓶颈[3-4]．近年来，随着微能量收集技术及低功耗传感器的发展，面向风、光等环境能量收集的传感器自供能技术成为一种可行的供电解决方案[5-6]．其中，无叶片聚风取能技术因其在可靠性、安全性和小型化方面具有的优势而备受关注，通过聚风装置捕集各向低速来流风，并对其进行汇聚加速，提高风能密度，从而更高效地驱动取能模块发电，对于实现野外复杂风能环境激励下输配电线路传感器的稳定、可靠性供电具有重要意义[7]．

在聚风装置结构设计方面，Siahpour等[8]通过三维数值模拟研究了不同进风结构下的聚风加速性能，并对其进行了实验验证．吴豫等[9]发现对聚风装置加装防风罩可以显著提高其气动性能，同时不受风向变化的影响．徐恺等[10]针对不同攻角下全向聚风装置的聚风效果进行了分析，并给出了推荐取值范围．此外，在聚风装置型线轮廓优化方面，Li等[11]基于B样条曲线生成了全向聚风装置的外部轮廓，发现该结构下聚风装置的聚风性能得到有效提升．赵守阳[12]提供了一种具有曲线外形的全风向聚风装置，能够显著提高风力机启动力矩系数．马云飞[13]利用响应面分析方法，对聚风装置的主要结构参数进行了优化，得到了一种具有凸流线型轮廓的小型全向聚风装置．

基于上述研究进展，聚风装置的气动性能得到了较大的改进，但在有限空间紧凑结构应用中，受制于尺寸效应，由外界强气流造成的尾流扰动，严重阻碍了小型聚风装置汇聚性能的进一步提升．鉴于此，本研究基于数值模拟开展聚风加速模型的气动性能研究，分析气流扰动对装置喉口加速特性的作用规律，并据此提出结构改进措施，旨在抑制外界气流扰动对喉口加速效应的不利影响，以促进低速风能的高效利用．

1　聚风装置流动仿真模型

1.1　聚风装置三维模型

本研究针对的是小型全向聚风装置，其结构如图1所示．其中，内锥管、外锥管及导流叶片共同构成聚风装置的进口集风结构，可用于收集各向来流风；收缩-扩张式文丘里管构成聚风装置的加速结构，并与外锥管结合形成装置的外部型线轮廓．

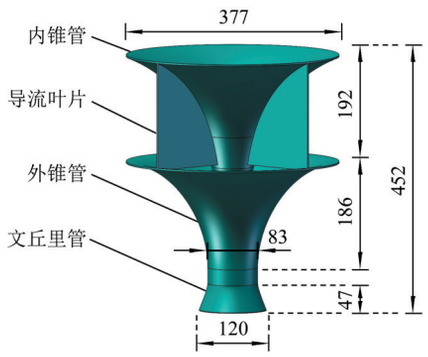


图1　聚风装置三维模型(mm)

聚风装置的工作原理为：进口集风结构通过内、外锥管协同捕获各向来流，并通过导流叶片均匀分配至各个腔室，从而在内锥管底部实现来流风的汇聚，达到全向风能捕集的效果．汇聚气流在进口收缩壁面引导下进入文丘里管加速结构，并在汇聚加速效应和负压抽吸效应[14]共同作用下，于喉口段实现来流风速的显著提高．

1.2　聚风流域模型及网格划分

本研究聚风装置计算域模型采用远流场区域和近流场区域相结合的三维全流场分析方法，以模拟并研究实际风场下聚风装置内部流场分布特性和风能汇聚加速机理，如图2所示．其中，近流场区域为包裹着聚风装置外围的圆柱体计算域，通过三维布尔运算生成，是本研究的核心区域．该区域网格划分精度较高，旨在准确捕捉装置内部及近壁面附近的流动分离和涡旋等复杂流动现象；远流场区域为尺寸在聚风装置模型10倍以上的长方体计算域，将近流场区域完全包裹其中．该区域主要用于模拟实际来流风的边界条件，并为装置出口尾流的演化提供充分的发展空间．鉴于该区域流动相对简单，

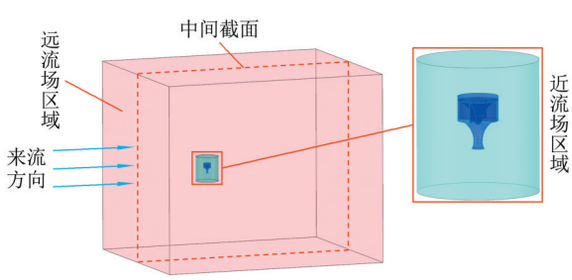


图2　计算域流道模型

故采用相对稀疏的网格进行离散．远流场区域和近流场区域之间通过连续的网格过渡实现流动参数的精确传递，从而保证整个流场计算的连续性和准确性．该流场分析方法可以在保证计算精度的同时，显著降低计算成本．

远流场区域和近流场区域的网格划分均采用多面体网格，通过控制节点数，使得越靠近聚风装置的部分网格越稠密，相应地相距较远处网格较稀疏，从而在保证网格精度的同时大大降低网格数，具体划分方式如图3所示．此外，考虑到聚风装置近壁面处的边界层效应，在近壁面附近生成5层边界层网格，以提高仿真计算结果的准确性．

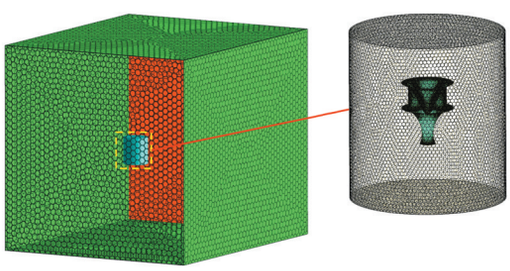


图3　计算域网格模型

1.3　流动控制方程及边界条件设置

在聚风装置三维流动的数值模拟中，传热影响很小，可以不考虑能量守恒方程，故所涉及的流体力学控制方程主要包括连续性方程和动量守恒方程．且由于其内部流体流动较稳定且流速较低，可假定流体定常不可压，因此动量守恒方程选用定常不可压雷诺平均N-S方程进行求解

$$\partial u_i/\partial x_i = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}), \tag{2}$$

式中：下标i和j为笛卡尔坐标系中的方向指标(当取1，2，3时，分别对应x，y，z方向)；x_i和x_j为坐标分量；u_i和u_j分别为时均速度在i和j方向上的分量；ρ为流体密度；p为时均静压；σ_{ij}为黏性应力张量分量；u_i'和u_j'分别为脉动速度在i和j方向上的分量；$-\rho \overline{u_i' u_j'}$为雷诺应力项．

由于雷诺应力项的存在，因此另须补充湍流模型进行求解．考虑到聚风装置内部气流在喉口段会呈现典型的高速射流特征，而准确捕捉该射流的扩展与演变特性是本研究的关键，因此选用Realizable k-ε湍流模型．该模型采用新的湍流黏性公式，且相较于Standard k-ε和RNG k-ε等湍流模型，能够更精确地预测射流的扩展速率[15]；入口边界条件为速度入口，设置为2.6 m/s；空间离散格式为二阶迎风格式；采用标准初始化，监测数据取装置喉口段中间截面的平均流速，当其迭代值稳定时，认为计算结果收敛，停止迭代．

1.4　聚风数值模型网格无关性及实验验证

数值模拟计算结果的精度受网格划分密度影响，通常网格单元数越多，仿真计算结果的准确性越高，但过多的网格数会降低计算效率．因此，为确保数值模拟结果的准确性，同时节省计算资源，在来流风速为2.6 m/s的情况下，选取了10种不同的网格，对装置喉口截面平均风速进行了计算，如表1所示．

表1　网格单元数-喉口截面平均风速对照表

网格单元数/10^6	喉口截面平均风速/(m·s^{-1})	网格单元数/10^7	喉口截面平均风速/(m·s^{-1})
0.517	3.693	1.032 7	2.728
1.523	3.327	1.274 6	2.723
3.995	3.094	1.531 2	2.723
6.473	2.873	1.849 3	2.723
8.245	2.792	2.164 5	2.723

由表可知，随着网格单元数的增加，聚风装置喉口截面平均风速逐渐趋于稳定，当网格单元数增加至1.274 6×10^{7}时，前后两个模型喉口段平均风速的相对误差不超过0.5%，可认为网格单元数不再对数值模拟结果有影响，同时综合考虑计算时长、计算机配置等因素，最终选定网格单元数为1.274 6×10^7．

为验证本文数值计算方法的准确性与可靠性，搭建了如图4所示的实验环境．实验过程中，将聚风装置实验台架布置于风速稳定且均匀的风洞实验段，其中聚风装置喉口段开孔并插入热线式风速仪，开孔位置(A～D)及x轴上布置的8个风速测点如图5所示．实验过程中，根据探头深入距离调整可测得喉口段不同点位处的风速值．

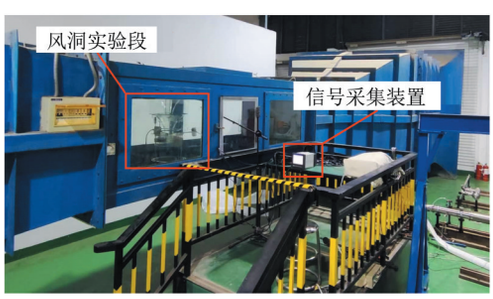


图4　聚风装置数值模型实验验证

调节风洞将来流风速控制在2.6 m/s，对聚风装置喉口截面的风速分布进行测量，并采用前述数值模拟方法对该实验装置模型进行仿真计算，实验结果和仿真结果对比如图6所示．

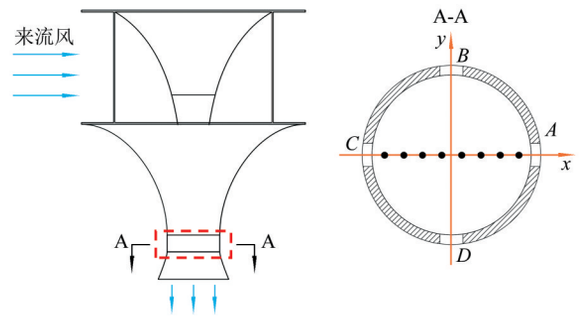
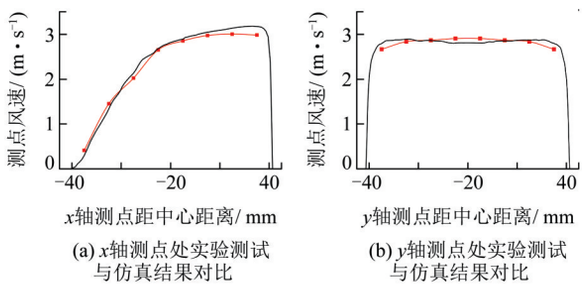


图5　开孔及测点位置示意图



(a) x轴测点处实验测试与仿真结果对比　(b) y轴测点处实验测试与仿真结果对比

实验值；—仿真值.

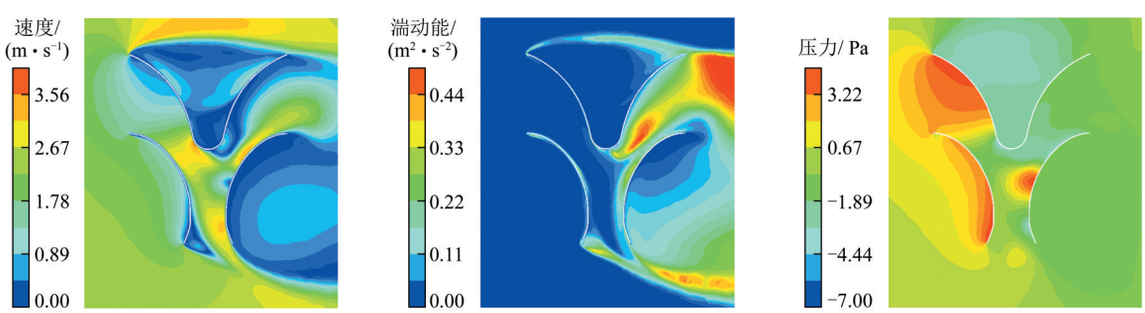
图6　聚风装置喉口截面速度分布

由图可知：实验测试和仿真结果下喉口截面的速度变化趋势较为一致，且平均偏差不超过5%. 考虑到实验过程中壁面阻力效应及风速仪探头对流场扰动的影响，实验与仿真的偏差在工程可接受范围内，从而验证了本文数值计算方法的准确性和可靠性.

2　结果与讨论

2.1　聚风装置流场分布特性研究

为探究聚风装置内部流场加速特性，采用上述数值计算方法，进行2.6 m/s来流风速下聚风初始模型的仿真计算，所得流场分布特性如图7所示. 由图7(a)速度云图和图7(b)湍动能云图可知：进口集风通道前缘上壁面处由于固壁阻挡效应的存在，来流风流速显著降低，最低流速接近于零；通道下游通流面积减小，完成部分压力能向动能的转化，并于通道出口处形成淹没射流，一部分流体直接冲击到背风侧外锥管内壁面处，并与周围气流掺混，在后侧通道处逸出，同时伴随有湍动能的显著提高；另一部分流体则在进口收缩壁面的引导作用下，进入文丘里管加速结构，流速逐渐升高，并于喉口段形成流速可达3.50 m/s的中高速流域，但其平均流速仅为2.72 m/s，相对来流风增速4.6 %，基本不具备聚风利用价值. 其原因可归结为外界气流对装置出口尾流的扰动，导致出口形成低速回涡区，其湍动能最高可达0.35 m^2/s^2. 该回涡区在增加能量耗散的同时，缩减了装置出口有效扩张面积，使得气流的压力恢复过程受阻，出口尾流发展不充分，并最终导致喉口段平均风速降低.

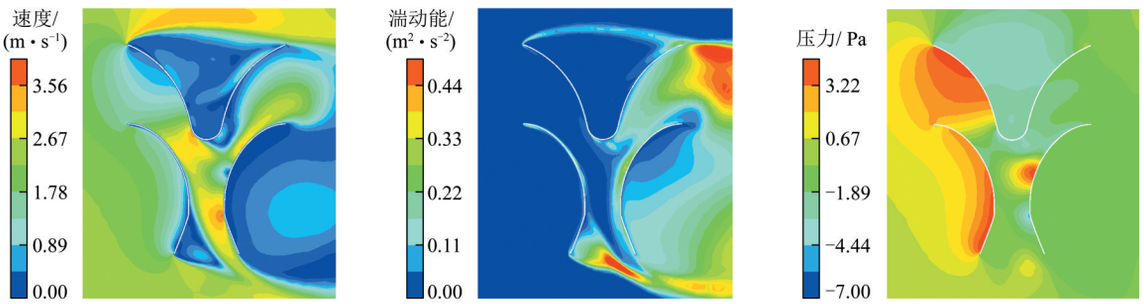


(a) 中间截面速度　(b) 中间截面湍动能　(c) 中间截面压力

图7　聚风初始模型流场分布云图

由图7(c)压力云图可知：由于通道前缘上壁面处低速流体的聚集与挤压，使得近壁面附近压力急剧升高，因此最高压力可达3.93 Pa；外锥管背风侧内壁面处存在由射流气流撞击而产生的局部高压区域，其最高压力为4.01 Pa；装置出口区域附近存在与外界流场掺混而形成的混流中压区，其压力约为2.05 Pa，对装置后续的正常出流产生抑制.

针对上述问题，为削弱外界流场对装置出口尾流的扰动作用，同时减缓混流中压区的出现，本研究对装置出口扩张段进行了适当延伸，以期实现更优的聚风流场加速效果，具体结果如图8所示. 由图可知：喉口段中高速流域主要存在于装置后侧壁面曲率连接处，并随着出口扩张壁面的延伸而进一步扩展，且喉口段平均流速增加至2.99 m/s，相对来流风增速15.0%，较聚风初始模型增加10.4%. 此外，出口扩张壁面的延伸，减缓了装置出口尾流与外界风场的接触，使得出口尾流得到较为充分的发展，同时混流中压区的位置相对装置中轴线后移. 结合上述分析可知，出口延伸可以使装置聚风性能得到一定的提升，但同时也会导致装置出口区域的低速回涡区的范围进一步扩展，加剧湍流耗散的同时也对装置的正常出流产生一定的阻碍作用，



(a) 中间截面速度　　(b) 中间截面湍动能　　(c) 中间截面压力

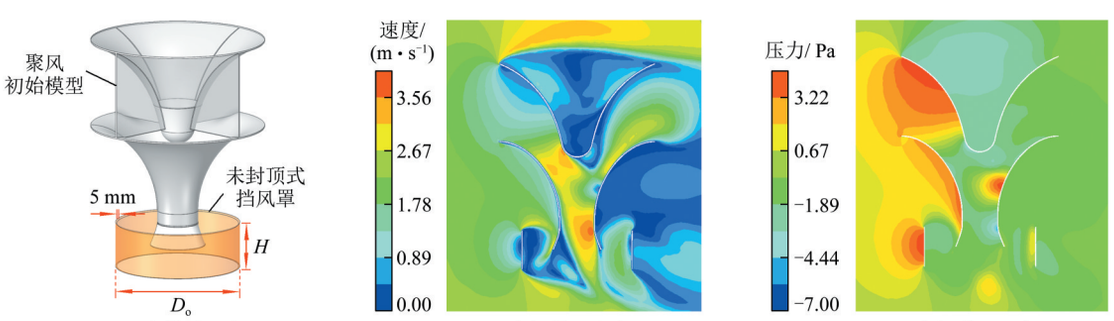
图 8　出口延伸聚风装置流场分布云图

因而装置的整体聚风性能仍然较差．

2.2　不同挡风罩结构下聚风装置喉口增速特性分析

结合上述分析可知，延伸出口壁面虽能在一定程度上减弱外界气流扰动，但风速提升有限且由于出口区域低速回流加剧，存在出口阻塞风险，因而难以有效解决外界气流扰动对喉口加速效应的抑制问题．分析认为延长出口方案的根本局限性在于：其被动地延长了流体通道，却未能主动控制出口高速射流与外界低速流场之间的剧烈剪切层发展，并最终导致装置出口能量耗散和回流的加剧．

受文献[16]中关于采用环形挡风结构改善 Invelox 型大型聚风装置出口流场的初步验证工作启发，本研究认识到增设外部结构是解决出口扰流问题的一种主动控制策略，但遗憾的是文献中并未对其作用机理进行详细说明．鉴于此，本研究在小型聚风装置初始模型出口处增设了未封顶式挡风罩结构，并对该结构下其内部流场分布特性及对喉口聚风增速性能的影响规律进行了系统探究，结果如图 9 所示，以期通过物理屏障隔离并稳定核心射流，抑制剪切层失稳，并最终实现对装置下游流场的主动调控．

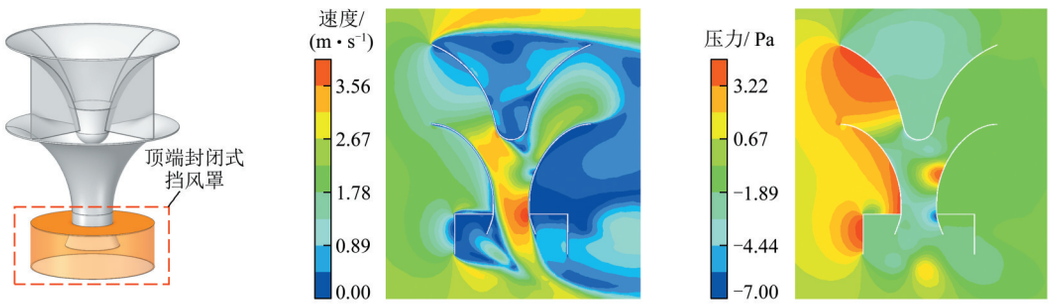


(a) 三维模型示意图　　(b) 中间截面速度云图　　(c) 中间截面压力云图

图 9　具有未封顶式挡风罩的聚风装置流场分布特性

图 9(a)展示了采用未封顶式挡风罩结构下聚风装置三维模型示意图，其中挡风罩高度 H 为 100 mm、出口直径 D_o 为 280 mm，厚度为 5 mm．由图 9(b)速度云图可知：通过在装置出口段外围增设未封顶挡风罩结构，可对外界风场产生有效的隔离作用，且挡风罩内部产生局部低速涡旋区域，可对出口尾流产生一定的卷吸作用，使得出口尾流得到较充分的发展，形态也发生了显著变化，进而导致喉口段中高速流域分布范围的大幅扩张，相应的喉口截面平均风速提升至 3.16 m/s，相对来流风增速 21.5 %．但由于挡风罩的未封顶式结构设计，仍有外界强气流由挡风罩上端侵入装置下游流场，因此在干扰尾流发展的同时，也使得低速涡旋区域主要集中于迎风侧近壁面处．由图 9(c)压力云图可知：挡风罩的存在使得混流中压区沿轴线方向推移至挡风罩出口处，从而削弱了其对装置后续出流的阻塞效应．此外，喉口负压区得到一定的发展，其最小压力可达−4.54 Pa，可对上游气流产生一定的负压抽吸效果．

进一步地，为消除挡风罩上端的强气流侵入现象，保持挡风罩尺寸参数不变，进而提出一种顶端封闭式挡风罩结构，以期实现更优的喉口加速效果，如图 10(a)所示．由图 10(b)速度云图可知：该结构下，封闭的顶盖有效隔绝了外界高速气流的直接侵入，为挡风罩内低速涡旋的稳定、充分发展创造了先决条件，使其区域范围得到进一步的扩张，对流道上游气体的卷吸作用也相应增强，并高效地将其引导至喉口段，为装置出口尾流的发展提供了相对稳定的流场环境．由图 10(c)压力云图可知：此时装置喉口段的负压区范围有效扩张，其最小压



(a) 三维模型示意图　(b) 中间截面速度云图　(c) 中间截面压力云图

图 10　具有顶端封闭式挡风罩的聚风装置流场分布特性

力可达−5.35 Pa，对上游气体因压差产生的负压抽吸效果有效增强，可进一步提升喉口风速．基于此，喉口段中高速流域分布范围显著扩张，基本占据整个喉口段，其截面平均风速升高并达到 3.43 m/s，相对来流增速 32.0 %，整体聚风性能提升显著，并且相较于未封顶式结构，其喉口截面最高流速由 3.69 m/s 增加至 4.00 m/s，装置的局部聚风性能提升同样显著．

图 11 展示了 2.6～7.0 m/s 风速区间内不同挡风罩结构下聚风装置的增速性能．由图可知：未加挡风罩结构的聚风初始模型聚风增速性能较差；通过对聚风装置增设挡风罩结构，装置聚风性能显著提高，且顶端封闭式挡风罩结构明显优于未封顶式挡风罩结构，其在 2.6～7.0 m/s 风速区间内均可达到 30% 的增速比．

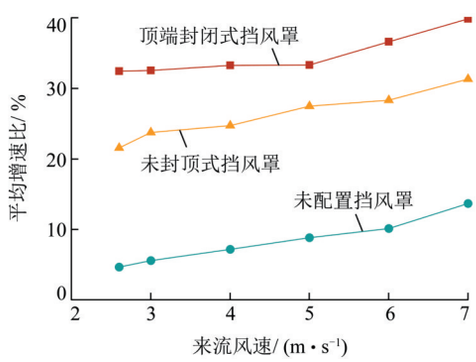


图 11　不同挡风罩结构下聚风装置性能对比

上述研究表明：增设挡风罩结构可以有效隔离外界风场对出口尾流的扰动作用，为尾流的压力恢复过程提供相对稳定的下游区域，从而提升喉口段平均风速．鉴于挡风罩关键几何参数(如高度 H、出口直径等)对装置整体气动性能的重要影响，本研究将通过分析不同几何参数下聚风性能的变化规律，进而提出较优的参数组合，以充分发挥挡风罩的效益并实现装置性能的进一步提升．

图 12 为当挡风罩出口直径为 280 mm 时，不同挡风罩高度下装置喉口截面的平均风速变化曲线．由图可知：随着挡风罩高度的增加，喉口截面平均风速呈现先上升后下降的变化趋势，并当高度为 100 mm 时达到峰值风速 3.43 m/s，相应的增速比为 32.0%，表明适当增加挡风罩高度可有效提升装置的整体聚风性能．综合曲线的总体变化趋势，较合理的挡风罩高度值应在 90～110 mm 范围内取得．

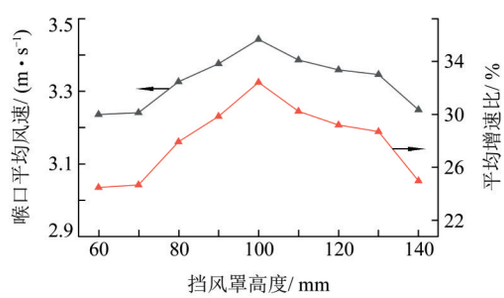


图 12　不同挡风罩高度下喉口平均风速变化曲线

图 13 为当挡风罩高度为 100 mm 时，不同挡风罩出口直径下喉口截面的平均风速变化曲线．由图可知：喉口截面平均风速随挡风罩出口直径的增加同样呈现先升后降的趋势，且在出口直径为 280 mm 时达到峰值风速 3.43 m/s，而当出口直径进一步增加至 300 mm 及以上时，喉口平均风速有所下降并趋于稳定，增速比维持在约 27.4 %．综合喉口风速曲线的总体变化趋势，选定挡风罩出口直径为 280 mm．

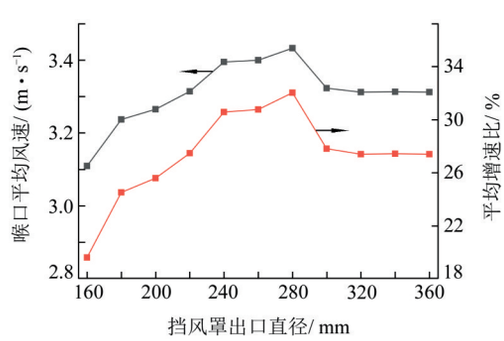


图 13　不同挡风罩出口直径下喉口平均风速变化曲线

综合以上对挡风罩关键结构参数的研究，本研究最终改进得到的挡风罩结构参数为 H=100 mm，D_o=280 mm，此时聚风装置喉口平均风速为 3.43

m/s，相对来流风增速32.0%，较聚风初始模型增加27.4%，表明本文改进措施可以有效抑制外界气流扰动的影响，从而显著提升聚风装置的聚风加速性能，实现风能的高效汇聚利用．

3　结论

a．延伸出口扩张壁面可以一定程度上提升喉口平均风速，但同时也加剧了出口区域的低速回流，且存在出口阻塞风险，无法有效解决外界气流扰动问题；

b．增设挡风罩结构可显著抑制出口混流阻塞效应，并促进出口尾流的充分发展，从而大幅提升装置整体聚风性能，且具有顶端封闭式挡风罩结构的装置性能明显优于未封顶式结构，在2.6～7.0 m/s来流风速范围内，喉口平均增速比均不低于30%；

c．改进后的挡风罩关键结构参数为H=100 mm，D_o=280 mm，喉口平均风速为3.43 m/s，相对来流风增速32.0%，较聚风初始模型增加27.4%，实现了聚风装置整体聚风性能的显著提升．

参　考　文　献

[1] 贾国栋．长距离输电线路风致振动光纤监测方法研究[D]．太原：太原理工大学，2023．

[2] 郝艳捧，梁苇，潘锐健，等．输电线路智能带电检修关键技术研究综述[J]．电力自动化设备，2022，42(2)：163-175．

[3] 周峰，周晖，刁赢龙．泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]．中国电机工程学报，2020，40(1)：70-82．

[4] 江秀臣，刘亚东，傅晓飞，等．输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]．高电压技术，2019，45(5)：1345-1351．

[5] YANG F，DU L，CHEN W G，et al．Hybrid energy harvesting for condition monitoring sensors in power grids[J]．Energy，2017，118：435-445．

[6] 鲍慧，李梦辉，赵伟．全双工中继协作下认知MIMO系统的自干扰收集[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2019，47(6)：17-22．

[7] 李春龙，黄辉，梁云，等．面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]．中国电力，2021，54(2)：27-35．

[8] SIAHPOUR S，KHAKIANI F N，FAZLOLLAHI V，et al．Morphing Omni-directional Panel Mechanism：a novel active roof design for improving the performance of the wind delivery system[J]．Energy，2021，217：119400．

[9] 吴豫，丁力，郭同庆．基于CFD的一种聚风装置流场模拟及改进措施研究[J]．可再生能源，2020，38(10)：1361-1367．

[10] 徐恺，黄成，黄家庚．基于结构优化的聚风装置流场特性数值研究[J]．可再生能源，2024，42(3)：348-354．

[11] LI Y，TONG G Q，MA Y F，et al．Numerical study on aerodynamic performance improvement of the straight-bladed vertical axis wind turbine by using wind concentrators[J]．Renewable Energy，2023，219：119545．

[12] 赵守阳．具有曲线外形聚风装置垂直轴风力机气动特性研究[D]．哈尔滨：东北农业大学，2019．

[13] 马云飞．具有B-Spline曲线聚风罩直线翼垂直轴风力机气动性能研究[D]．哈尔滨：东北农业大学，2022．

[14] RAHMATIAN M A，HASHEMI TARI P，MOJADDAM M，et al．Numerical and experimental study of the ducted diffuser effect on improving the aerodynamic performance of a micro horizontal axis wind turbine[J]．Energy，2022，245(C)：123267．

[15] ANBARSOOZ M，AMIRI M，RASHIDI I．A novel curtain design to enhance the aerodynamic performance of Invelox：a steady-RANS numerical simulation[J]．Energy，2019，168(C)：207-221．

[16] DING L，GUO T Q．Numerical study on the power efficiency and flow characteristics of a new type of wind energy collection device[J]．Applied Sciences，2020，10(21)：7438．