

风场对雨量计收集降水影响的流体动力学研究

蔡 钊,刘九夫,李薛刚,王 妞,王 欢,廖敏涵

(南京水利科学研究院水文水资源研究所,江苏 南京 210000)

摘要:为研究风场对雨量计收集降水精确性的影响,对单个雨量计以及 Alter 和 Tretyakov 防风圈的 风场特性进行数值模拟。结果表明:单个雨量计中心线上速度最大增比达 19%,出现在器口上 8 cm 左右;加入 Alter 和 Tretyakov 防风圈可有效减少雨量计器口上方的风速大小和梯度;Alter 防风 圈使中心线上最大速度减小 11%,并在主流方向 90°位置产生两个强烈涡旋区域,破坏到达雨量计 收集区域的流场强度和均匀性,使其流向较为紊乱,可能对降雪 的收集产生不利影响;Tretyakov 防 风圈使雨量计中心线上最大速度减小 7%,并由于叶片特殊勾角结构,使到达雨量计降水收集区域的 流向更一致,更有利于对降雪 的收集。Alter 防风圈对风速大小和梯度的减弱程度优于 Tretyakov 防风 圈,但低风速下 Tretyakov 防风圈在雨量计器口上方的涡核心区域范围小于 Alter 防风圈,更有利于降 水收集。Tretyakov 防风圈的直径比 Alter 防风圈小约 0.3 m,如对 Tretyakov 防风圈进行改进,可增加 其直径以及叶片个数来规避高风速下 Tretyakov 防风圈叶片产生的涡核心区域对雨量计收集区域的 影响。对 Alter 防风圈改进,可参考 Tretyakov 防风圈,增加叶片倾斜角,以提高降水收集率。

关键词:防风圈; 风速; 涡流; 湍动能; CFD

中图分类号:TV123 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0017-07

CFD simulation of wind field impact on gauge precipitation//CAI Zhao, LIU Jiufu, LI Xuegang, WANG Niu, WANG Huan, Liao Minhan(*Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China*)

Abstract:To study the impact of wind field on the accuracy of a rain gauge, numerical simulation of the wind turbulence for a single rain gauge and gauges with Alter and Tretyakov wind shield was performed. The results show that the maximum velocity increase ratio of a single gauge on the center line can reach 19%, located 8cm above the gauge mouth. The Alter and Tretyakov wind shield can effectively reduce the intensity and gradient of the wind above the rain gauge mouth. The blades of the Alter wind shield can reduce the maximum velocity on the center line of the rain gauge by 11%. Two strong eddy regions are generated on the 90° of the main stream direction, which destroy the uniformity of the streamlines and reduce the continuity of the wind above the rain gauge. Due to the more turbulent wind field, there may be an adverse effect on snow collection. The Tretyakov wind shield can reduce the maximum speed on the center line of the rain gauge by 7%. The special angle structure of the blade makes the wind field in the collecting region more uniform, which is in favor of snow collection. The Alter wind shield is superior to the Tretyakov in reducing the wind speed and wind gradient, but the vortex core region of the Tretyakov at the top of the rain gauge is less than that of the Alter at low wind speed, which is beneficial to the precipitation collection. The diameter of the Tretyakov wind shield is about 0.3m smaller than that of the Alter. Therefore, the Tretyakov wind shield can be improved by increasing its diameter and the number of the blades to avoid the influence on the core area of the collecting region in the condition of high wind speed. The structure of the Tretyakov wind shield can be referred to improve the Alter wind shield and the influence on precipitation collection efficiency can be explored by increasing the angle of the blades.

Key words: wind shield; wind velocity; vortex; turbulence kinetic energy; CFD

降水资料的准确性在流域气候和水文研究中至 别风场在雨量计器口附近的风场扰动,对降雪的观 测准确性形成巨大挑战^[2-3]。雨量计器口结构和面 积的不同也会产生不同的风场湍流强度,先前

关重要,降水测量误差不仅有雨量计的湿润和蒸发 损失因素,也有风场扰动引起的动力学因素^[1]。特

Sevruk 等^[4]的研究得出器口越薄、器口面积越大,在雨量计器口上方形成的风场湍流强度越大的结论。另外,在高风速下,防风圈将降低测量区域内的流速并抑制流动的上升效应^[5]。任芝花等^[6-7]对我国 30 个标准雨量站进行对比观测,发现降雨风场变形误差为 0.19 mm,降雪为 0.32 mm,并对 DIFR 防风圈的雨量计进行观测试验,发现带有防风圈结构可有效提升降水捕获率,在风速大于 3.5 m/s 后,对降雪捕捉率可提升 48% 左右。而数值模拟可在具体物理机制上探究空气动力学因素对降水收集精确性的影响。Sevruk 等^[4]开展风洞试验,得到不同风速下 Mk2 型雨量计收集区域上方风速增加百分比的等值线图。Nešpor 等^[8-9]使用 RANS 和 LES 湍流模型对 TB200 型雨量计的单 Alter 和双 Alter 防风圈进行数值模拟,发现防风圈会在其叶片附近引起湍流传播,从而对降水测量产生不利影响。这些研究均表明降水收集率对湍流区域非常敏感,尽管挡风板可减少风力影响,但在高风速下也会加剧雨量计附近的湍流^[10-11]。由于 Mk2 和 TB200 型雨量计结构和尺寸与国内雨量计区别较大,并只探究了单 Alter 和双 Alter 防风圈的动力学特征,且国内雨量计在安装高度上也与国外存在差异,亦缺乏对空气动力学影响降水准确性的物理试验和模拟探究,而且在中华人民共和国成立之后很长一段时间根据苏联标准使用 Tretyakov 防风圈,对防风圈标准的使用并没有明确的规定,因此,对我国 70 cm 安装高度的雨量计风场特性开展研究,有助于了解防风圈形成湍流提高降水收集率的物理机制。本文比较雨量计有无防风圈(无防风圈的单个雨量计、Alter 防风圈和 Tretyakov 防风圈)在不同风速下的风场特性,深入了解这两种防风圈对提升降水收集率的作用,旨在改进防风圈,为实现更高精度的测量提供参考。

1 材料与方法

1.1 模拟条件

雨量计建模依据南京自动化研究所生产的国标翻斗式雨量器,器口直径 20 cm,边缘倒角 45°,壁厚

0.5 cm,距地面高 70 cm,模拟风速依据南京水利科学研究院滁州基地常年风速特征。滁州实验基地的风速测量装置主要为风速梯度塔,测量 4 m、6 m、8 m 和 10 m 高度的风速风向,另外自动气象站记录 2 m 高度的风速风向,数据测量每隔 10 min 一次。图 1 为此实验基地 2015 年 7 月至 2016 年 7 月整年风速梯度塔测得的风速情况(滤波后)。

由于风速测量间隔为 10 min,且有 5 个高度的风速值,直接绘出的风速图较为凌乱,因此图 1 给出滤波之后的整年风速数值。未滤波前,10 m 高度最大风速为 10.49 m/s。根据不同高度风速推算方法和风速函数^[12-13],可推知 70 cm 高度风速最大值为 6.3 m/s,因此选定模拟风速为 1~7 m/s,所运用软件 Fluent 被广泛应用于流体动力学研究中,依据要研究对象的参数特征,选择使用的模型求解方法见表 1。

表 1 模型求解方法

模型方法	内 容
湍流模型	雷诺平均;可实现的 $k-\varepsilon$ 模型
压力-速度组	半隐式连接压力方程方法(SIMPLE)
空间离散法	梯度;基于单元体的最小二乘法插值
	压力;急剧变化
	动量;二阶修正迎风
	湍动能;二阶修正迎风 湍动能耗散项;二阶修正迎风

模拟计算的模型基础为不可压缩的 Navier-Stokes 方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为流速; ρ 为流体密度; p 为压力; ν 为运动黏度; t 为时间。

对 Navier-Stokes 方程平均求解(RANS)的 realizable $k-\varepsilon$ 模型在强流线弯曲、漩涡和旋转模拟上有很好的应用^[13],其湍动能及其耗散率输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

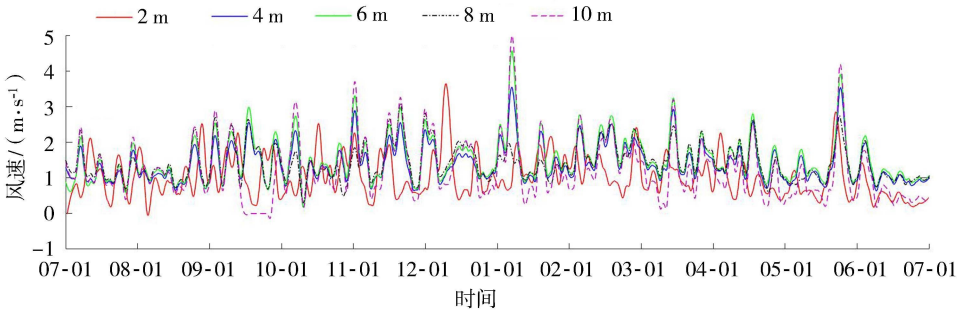


图 1 滁州水文实验基地风速梯度塔测得的不同高度整年风速

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon + \rho C_{k2} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (4)$$

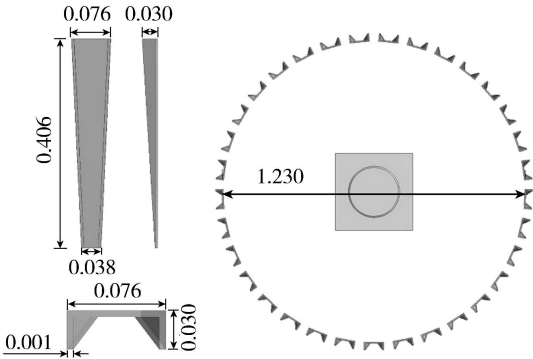
其中 $\eta = \frac{S_k}{\varepsilon}$

式中： k 、 μ 和 ε 分别为湍动能、动力黏度和耗散率， G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能， σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数， S_k 、 S_ε 分别为湍动能及其耗散率的应变率张量， C_{k2} 为 1.9， $C_1^{[14]}$ 为系数。

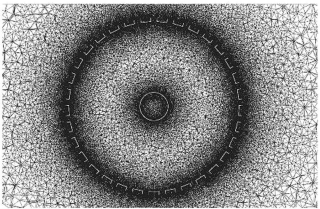
联立方程(1) ~ (4)，即利用雷诺平均(RANS)的 realizable $k-\varepsilon$ 模型进行模拟计算。

1.2 建模与网格划分

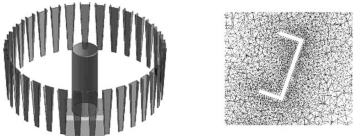
我国标准雨量计安装高度为 70 cm，器口面积为 314.15 cm²，器口存在 45°倒角。防风圈三维模型依据 WMO 标准^[15-16]，其中 Alter 防风圈直径为 1.23 m，叶片数为 32，叶片厚度为 1 mm；Tretyakov 防风圈直径为 0.91 m，叶片数为 16，叶片厚度为 2 mm，详细参数以及模型尺寸和划分网格见图 2 和图 3。



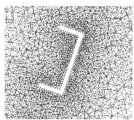
(a) 防风罩尺寸 (b) 俯视图



(c) 划分的网格



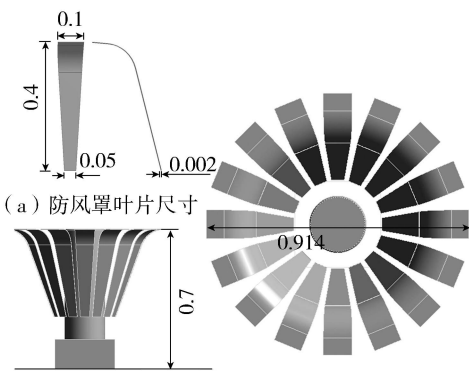
(d) 3D视图



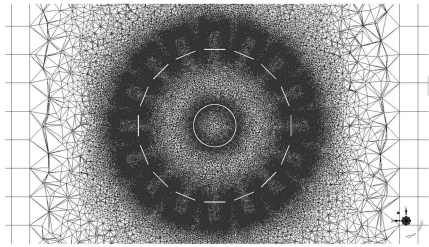
(e) 叶片附近网格

图2 装配 Alter 防风圈的雨量计 3D 模型和网格(单位:m)

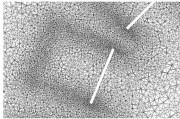
根据 WMO 标准尺寸可知，Alter 和 Tretyakov 防



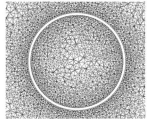
(b) 侧视图 (c) 俯视图



(d) 划分的网格



(e) 叶片附近网格



(f) 雨量计器口附近网格

图3 装配 Tretyakov 防风圈的雨量计 3D 模型和网格(单位:m)

风圈的区别在：① Alter 防风圈的直径为 1.23 m，Tretyakov 防风圈直径为 0.91 m；② Alter 防风叶片上边沿高于雨量计器口上边沿 20 mm，而 Tretyakov 防风圈上边沿与雨量计器口齐平；③ Alter 防风叶片竖直，而 Tretyakov 防风叶片具有 70°角度倾斜。

由于雨量计器口存在倒角，且 Alter 和 Tretyakov 防风圈的叶片物理结构较复杂，并考虑到其厚度只有 1 mm 和 2 mm，因此采用非结构化网格划分，整体为四面体和六面体网格。设置叶片边界面的最小尺寸为 0.5 mm，边界面网格最大增长层数为 5，增长率 1.2；雨量计倒角面最小尺寸为 2.5 mm，网格最大增长层数为 5，增长率 1.2。考虑到网格和节点数量，在雨量计周围 3 m×3 m 范围划分为四面体网格，剩余计算域自动划分为六面体网格，这样既保证了在雨量计周围计算域内的计算精度，又减少了网格和节点数量。Alter 和 Tretyakov 防风圈划分的网格数分别为 423 万和 301 万。

2 模拟结果与分析

2.1 与已有成果对比

图 4 为本文与 Colli 等^[10-15]对 TB200 型雨量计的模拟结果对比，曲线纵坐标数值为 0 处是雨量计器口上边沿位置。由于 TB200 型雨量计的器口边

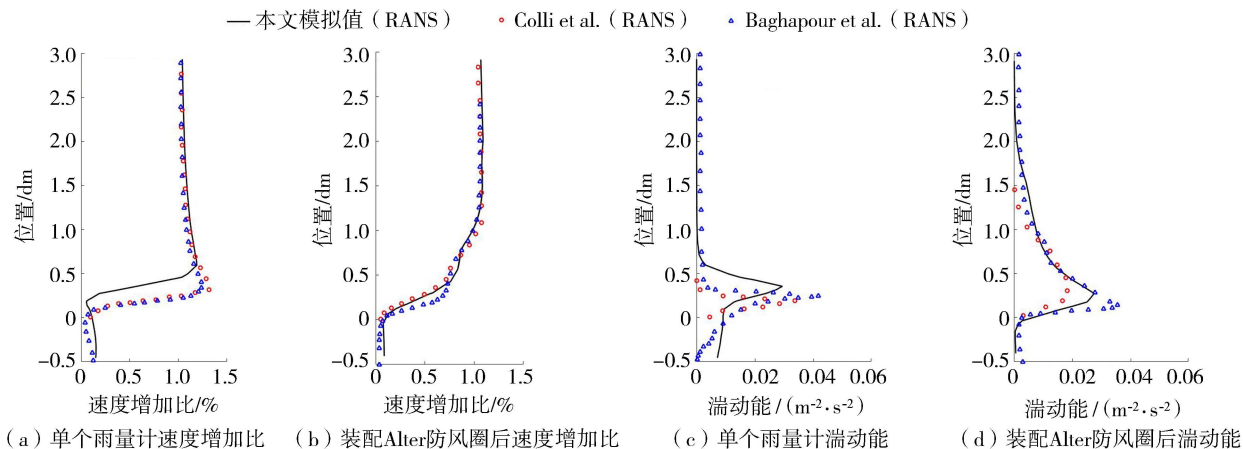


图4 本文与 Colli 等^[10-15]对 TB200 型雨量计模拟结果对比

沿不存在倒角,因此与本模拟结果存在区别;根据图 4(a)(c)可知,由于我国标准雨量计存在器口倒角,中心线上速度和湍动能变化梯度较大的位置比 TB200 型雨量计高约 2.5 cm,速度增加比最大值比后者小约 2%,湍动能最大值比后者小约 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。由图 4(a)(b)的对比可知,在加入 Alter 防风圈后,由于防风圈对风场的作用,使雨量计中心线上速度增加比变化均匀。对比图 4(c)(d),发现在装配 Alter 防风圈后,湍动能最大值略微减小,但其变化范围增大,说明防风圈叶片在雨量计器口收集区域也会产生一定范围的扰动。总的来说,模拟结果与先前模拟结果吻合度较高,有较高可信度。另通过图 4(a)~(d)的对比,发现速度增加比和湍动能的主要变化位置范围为 $0 \sim 5 \text{ cm}$,主要由于风场在雨量计器口倒角处产生畸变,对雨量计器口上部的区域产生了影响。

2.2 结果与分析

图 5 对比了有无防风圈雨量计周围风速云图。通过图 5(a)(c)(e)纵剖面的速度变化可知,单个

雨量计的器口收集区域上方是风场速度畸变的主要区域,这严重影响了雨量计收集降水的精确性,在加入防风圈后均可降低雨量计器口上方的风速大小和风速畸变梯度。其中 Alter 防风圈将高风速区域集中于防风叶片之间和叶片的上下部位,Tretyakov 防风圈则将高风速区域集中于叶片的背部,从而降低到达雨量计器收集区域的风速。从俯视图可知,Alter 防风圈可有效减少进入其内部的风速大小,风速最小值可达到 0.2 m/s 左右。Tretyakov 防风圈则将高风速区域集中于迎风叶片的背部两侧,此区域最大风速增值可达 90%,远高于 Alter 防风圈。

对于两种不同防风圈对雨量计收集区域的影响,取剖面 3 条线上风速进行对比,如图 6 所示。图 6 中各速度曲线的对比表明,出现剧烈变化的位置集中在器口上方 $0 \sim 0.05 \text{ m}$ 位置,这主要由于风场在雨量计器口倒角处产生畸变,对雨量计器口上部的区域的风速大小和梯度产生影响。图 6 中分别标记出每条线上最大速度值和出现的位置,并通过对比得到风速最大增速比为 19%,出现在中心线

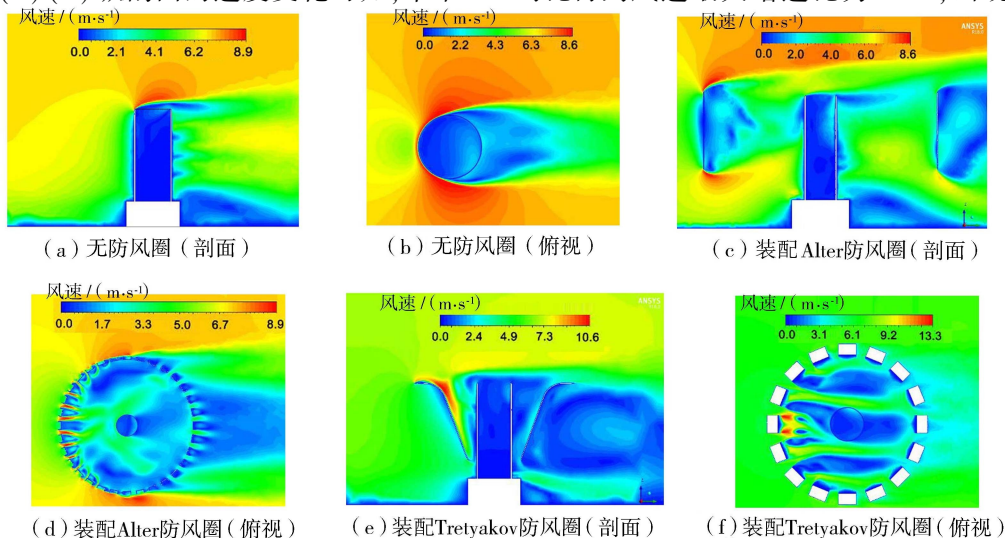


图5 7 m/s 风速下有无防风圈雨量计风速云图

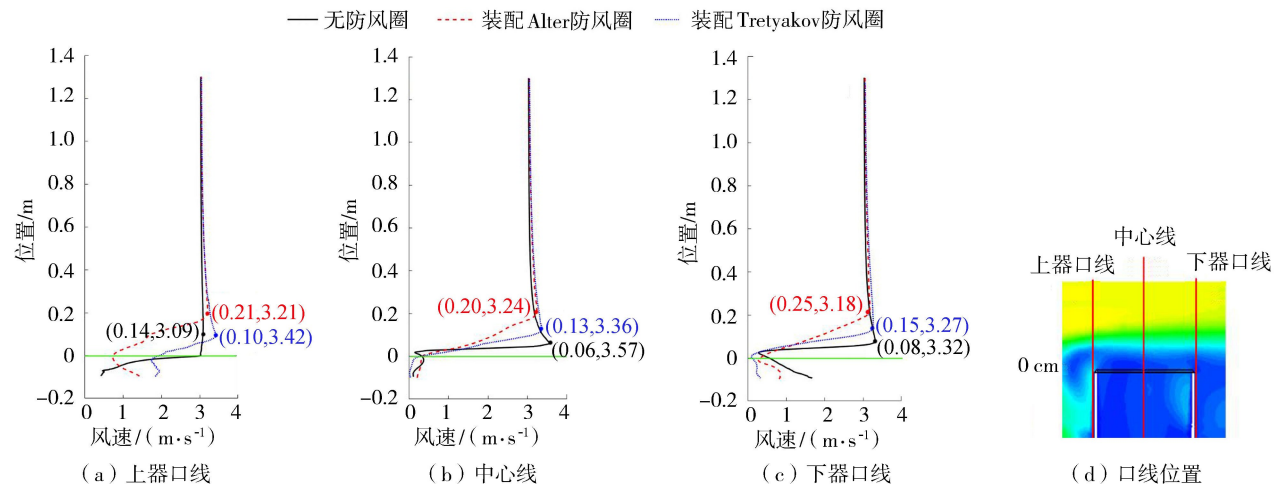


图 6 3 m/s 风速下有无防风圈雨量计在不同口线的风速变化

上。加入防风圈可有效减少雨量计降水收集区域上方的风速最大值,Alter 和 Tretyakov 防风圈可分别将风速最大值减小 11% 和 7%,并使出现最大值的位置分别提高 14 cm 和 7 cm,减小曲线变化的斜率,说明防风圈可有效减少雨量计器降水收集区域的风速大小以及变化梯度,进而增加降水收集的精确性。

图 7 比较了 Alter 和 Tretyakov 防风圈在 3 m/s 风速下的流线图。从图 7(a)可知,Alter 防风圈的主要作用是在主流方向的 90°位置产生两个强涡旋区,涡旋区域可增加能量耗散^[17],从而减小风速。此涡旋区域使雨量计收集区域的流场强度和均匀性受到破坏,从而降低雨量计收集区域的风速大小和强度。Tretyakov 防风圈由于其叶片的特殊勾角结构,涡旋形成主要区域集中在叶片的背部,破坏了风场流线的均匀性,也降低了到达雨量计收集区域上

方的风场连续性和强度。从雨量计收集区域的流线均匀性可知,Tretyakov 防风圈使得该区域的流向更一致,更有利于对降雪收集。

降水特别是降雪对涡流区域非常敏感,因此对雨量计器口上方降水收集区域涡核心区域的探知尤为重要。流体在经过障碍物时,必然会产生流场变形,流场的变形往往会带来涡旋区域。图 8 比较了风速为 3 m/s 和 7 m/s 时两种防风圈产生的涡核心区域(速度着色)。通过对比可知,两种防风圈结构均将强涡核心区域集中于防风叶片周围,从而降低到达雨量计器口收集区域的涡量。但两种防风结构在此区域产生的涡大小和范围不同。Alter 防风圈在高速(7 m/s)下,防风圈叶片产生的涡区域对雨量计器口收集区域无影响,但 Tretyakov 防风圈叶片在高速下产生的涡流会影响到雨量计收集降水区

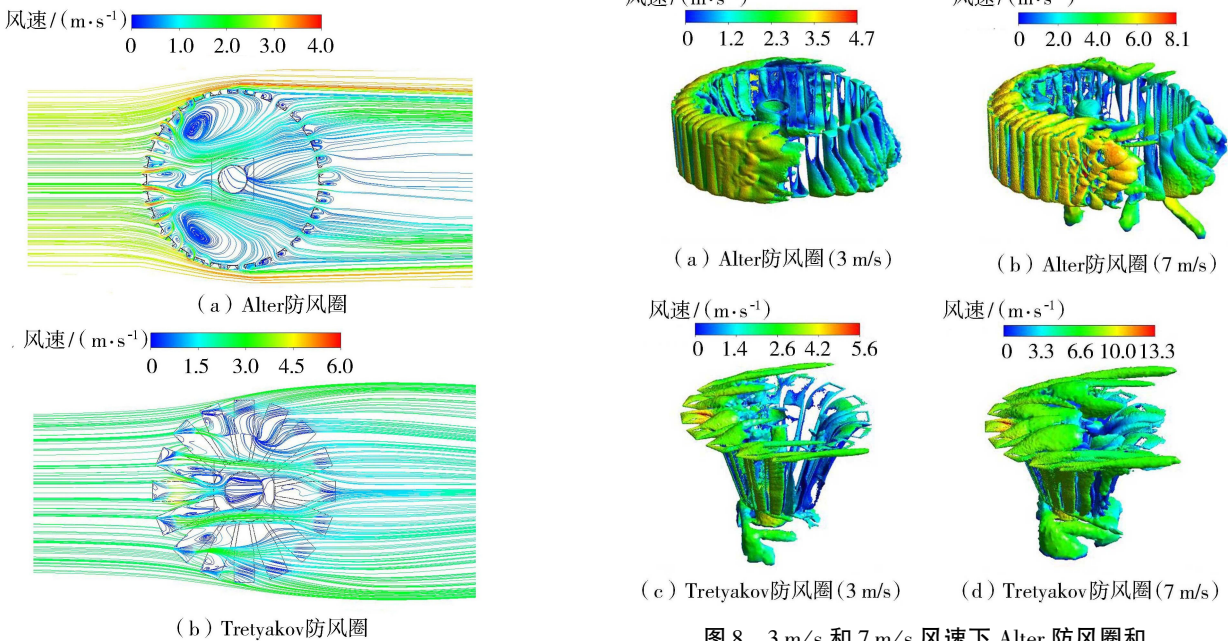


图 8 3 m/s 和 7 m/s 风速下 Alter 防风圈和 Tretyakov 防风圈的涡核心区

图 7 3 m/s 风速下 Alter、Tretyakov 防风圈风速流线

域,从而对降水收集产生不利影响。然而 Tretyakov 防风圈在低风速下,雨量器口上区域的涡强度弱于 Alter 防风圈,说明 Tretyakov 防风圈在低风速下对于提高雨量计降水收集率,特别是提高降雪收集率的作用优于 Alter 防风圈。由图 2 和图 3 中两种防风圈的尺寸可知,Tretyakov 防风圈的直径比 Alter 防风圈小约 0.3 m,因此,如果进一步对 Tretyakov 防风圈进行改进,可增加其直径和叶片个数,来规避高风速下叶片对于雨量计收集区域涡核心区域的影响。

湍动能 k 可反映风场湍动的剧烈程度,即风场在绕过障碍物后,产生风场的扰动大小。图 9 对比了有无防风圈雨量计湍动能的分布情况。单个雨量计形成的湍动能最大值为 $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$,最大影响范围为 1.5 m。Alter 防风圈产生的湍动能最大为 $8.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$,比 Tretyakov 防风圈大 $1.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$,且 Alter 防风圈的湍流区域集中于迎风叶片的背部和雨量计迎风器口边缘,而 Tretyakov 则的高端动能区域则分散于防风圈内部。通过图 9(b)(c)的对比,可知在 Alter 防风圈对于提高雨量计降水收集区域流场的稳定性方面要优于 Tretyakov 防风圈,并且稳定流场的区域范围大于后者。Alter 防风圈和 Tretyakov 防风圈最大影响范围分别为 4 m 和 2.25 m,因此在安装雨量计或者添加防风圈时,保证彼此间距的合适范围。

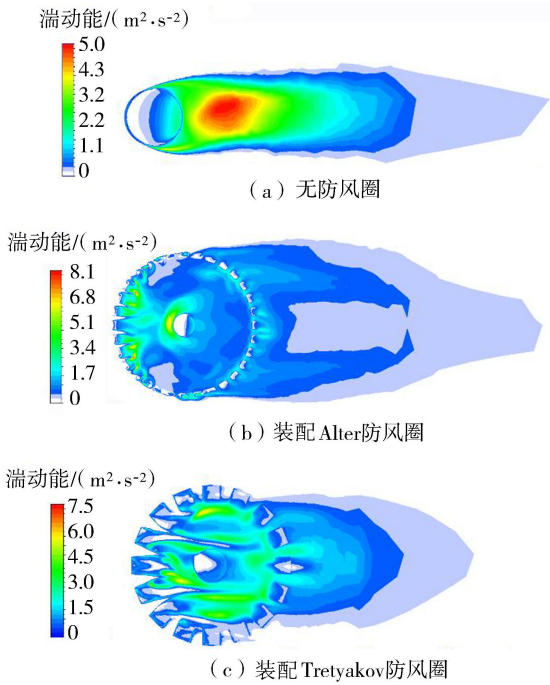


图 9 7 m/s 风速下有无防风圈的湍动能分布情况

3 结 论

a. 雨量计器口上方是风场畸变的主要区域,此区域严重影响了雨量计收集降水量的准确性。Alter 和 Tretyakov 防风圈均可降低雨量计器口上方的风

速大小和梯度。Alter 防风圈可将高风速区域集中于防风叶片之间;Tretyakov 防风圈则将高风速区域集中于叶片的背部,从而降低到达雨量计收集区域的风速。

b. Alter 和 Tretyakov 防风圈最大风速分别减小 11% 和 7%,并可使出现风速最大值的位置比单个雨量计提高 14 cm 和 7 cm,并减小速度曲线变化的斜率,Alter 和 Tretyakov 防风圈均可有效减少雨量计器口上方附近的风速大小以及变化梯度。

c. Alter 防风圈的主要作用是在主流方向的 90°位置产生两个强涡旋区,此涡旋区域使雨量计收集区域的流场强度和均匀性受到破坏,从而降低雨量计收集区域的风速大小,但其流向较为紊乱,可能对降雪的收集产生不利的影响。Tretyakov 防风圈涡旋形成的主要区域主要集中在叶片的背部,使到达雨量计降水收集区域的流场方向更一致,更有利于对降雪的收集。

d. 低风速下 Tretyakov 防风圈在雨量计降水收集区形成的涡核心区域范围小于 Alter 防风圈,更有利于对降水特别是对降雪的收集;高风速下 Alter 防风圈涡核心影响区域则优于 Tretyakov 防风圈, Tretyakov 防风圈的直径比 Alter 防风圈小约 0.3 m,因此可对 Tretyakov 防风圈进行改进,增加其直径以及叶片个数,来规避高风速下 Tretyakov 防风圈叶片产生涡核心区域对雨量计收集区域的影响。

Alter 以及 Tretyakov 防风圈由于物理结构不同,对减小雨量计收集区域的风速大小效果不同。Alter 防风圈在速度减小百分比方面优于 Tretyakov 防风圈(4%),但流线的均匀性弱于 Tretyakov 防风圈,不利于对降雪的收集。高风速下 Tretyakov 防风圈产生的涡核心区域会影响到雨量计的降水收集。因此可根据实际测量区域的常年风速情况,如低风速 ($\leq 3 \text{ m/s}$) 下可使用 Tretyakov 防风圈,高风速下可使用 Alter 防风圈。对于 Tretyakov 防风圈,可增加其直径以及叶片个数,来规避高风速下 Tretyakov 防风圈叶片对雨量计收集区域涡核心区域的影响。对于 Alter 防风圈,可参考 Tretyakov 防风圈,对叶片增加倾斜角,提高降水收集率。另外在流体动力学模拟方面,可利用 DPM 等模型对降雨或者降雪收集率的进一步精确模拟。

参考文献:

[1] 叶柏生, 杨大庆, 丁永建, 等. 中国降水观测误差分析及其修正 [J]. 地理学报, 2007, 62 (1): 3-13. (YE Baisheng, YANG Daqing, DING Yongjian, et al. A bias-corrected precipitation climatology for China [J]. Acta

- Geographica Sinica, 2007, 62(1):3-13. (in Chinese))
- [2] ALLETT M, BREUER M. One-way, two-way and four-way coupled LES predictions of a particle-laden turbulent flow at high mass loading downstream of a confined bluff body [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 45(45):70-90.
- [3] FOLLAND C K. Numerical models of the raingauge exposure problem, field experiments and an improved collector design [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114:1485-1516.
- [4] SEVRUK B, HERTIG J A, TETTAMANTI R. The effect of orifice rim thickness on the wind speed above precipitation gauges [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(11):1939-1944.
- [5] THÉRIAULT J M, RASMUSSEN R, PETRO E, et al. Impact of wind direction, wind speed, and particle characteristics on the collection efficiency of the double fence intercomparison reference [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2015, 54(9):1505.
- [6] 任芝花, 李伟, 雷勇, 等. 降水测量对比试验及其主要结果 [J]. 气象, 2007, 33(10):96-101. (REN Zhihua, LI Wei, LEI Yong, et al. A comparison experiment of solid precipitation measurement and its primary results [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(10):96-101. (in Chinese))
- [7] 任芝花, 王改利, 邹风玲, 等. 中国降水测量误差的研究 [J]. 气象学报, 2003, 61(5):621-627. (REN Zhihua, WANG Gaili, ZOU Fengling, et al. The research of precipitation measurement errors in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(5):621-627. (in Chinese))
- [8] NEŠPOR V, SEVRUK B. Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1999, 16(4):450-464.
- [9] CONSTANTINESCU G S, KRAJEWSKI W F, OZDEMIR C E, et al. Simulation of airflow around rain gauges; comparison of LES with RANS models [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(1):43-58.
- [10] COLLI M, LANZA L G, RASMUSSEN R, et al. The collection efficiency of shielded and unshielded precipitation gauges. Part I: CFD airflow modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1):231-243.
- [11] COLLI M, LANZA L G, RASMUSSEN R, THÉRIAULT J M. The collection efficiency of shielded and unshielded precipitation gauges. Part II: modeling particle trajectories [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1):245-255.
- [12] 吕鹏远. 响水风电场的微观选址 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊2):4-5. (LYU Pengyuan. Location of Xiangshui wind farm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup2):4-5. (in Chinese))
- [13] 闵骞. 道尔顿公式的应用研究 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1):21-24. (MIN Qian. Research on the application of Dalton's formula [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1):21-24. (in Chinese))
- [14] 周凌九, 胡德义, 王正伟. 可实现性 $k-\varepsilon$ 模型在水轮机流场计算中的应用 [J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(1):68-72. (ZHOU Lingjiu, HU Deyi, WANG Zhengwei. Application of realizable $k-\varepsilon$ model in flow filed simulation for hydraulic turbine runner [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(1):68-72. (in Chinese))
- [15] BAGHAPOUR B, CAO W, SULLIVAN P E. Numerical simulation of wind-induced turbulence over precipitation gauges [J]. Atmospheric Research, 2017, 189:82-98.
- [16] SEVRUK B, KLEMM S. Instruments and observing methods report NO. 39 [J]. WMO/TD, 1989, 313:16-18.
- [17] 杨开林, 王涛, 董兴林, 等. 排水系统入海口新型消能工 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6):69-72. (YANG Kailin, WANG Tao, DONG Xinglin, et al. Anew type of energy dissipator for coastal outfall of a drainage project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6):69-72. (in Chinese))

(收稿日期:2018-08-14 编辑:彭桃英)

