

文章编号: 1006-7302 (2018) 03-0025-06

基于XXXXX法的XXXXXX研究

批注 [A1]: 方正黑体简体, 20 号, 单倍行距

作者 A¹, 作者 B², 作者 C¹, 作者 D¹, 作者 E³, 作者 F³

批注 [A2]: 方正黑体简体, 五号, 单倍行距

- 1. 中国中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;
- 2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;
- 3. 中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

批注 [A3]: 方正黑体简体, 五号, 上标, 单倍行距

摘要: 本文针对列车车载二维风速测量问题, 提出了一种基于环形周向多点差压感知的二维风速风向测量方法. 首先, 基于圆柱绕流原理推导了圆柱表面压力分布极值点与风速、风向的理论关系模型, 并通过风洞试验进行了样机模型验证, 两者的风速相对误差不超过 1.75%; 同时, 通过风洞试验对风速 5~60 m/s、风向 0°~360° 范围内的模型样机进行了验证, 数据分析结果显示本文方法与风洞试验的风速测量相对误差不超过 4%、风向误差不大于 5°, 本文提出的模型和方法适用于列车运行的恶劣服役环境, 具有较好的理论意义和工程应用价值.

批注 [A4]: 方正楷体简体, 9.5 号, 单倍行距

关键词: 风速测量; 多点差压; 风区铁路; 车载风速

批注 [A5]: 方正楷体简体, 9.5 号, 单倍行距

中图分类号: U271.91

文献标志码: A

批注 [A6]: 方正黑体简体, 9.5 号, 单倍行距

Measurement of Wind Speed and Direction Based on the Circumferential Multi-point Differential Pressure Method

ZUO Zhe-a¹, ZUO Zhe-b², ZUO Zhe-c¹, ZUO Zhe-d¹, ZUO Zhe-e³, ZUO Zhe-f³

批注 [A7]: Times New Roman, 五号, 加粗, 单倍行距

- 1. CRRC Qingdao Sifang Co Ltd, Qingdao 266111, China;
- 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
- 3. Urumqi Railway Administration, Xinjiang Uigur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

批注 [A8]: 方正书宋简体, 9.5 号, 单倍行距

Abstract: In this paper, a new method for measuring wind speed and direction based on circular circumferential multi-point differential pressure perception is proposed for solving the problem of two-dimension wind speed measurement of train vehicles. First, a theoretical relationship model for pressure distribution maximums around cylindrical surface and wind speed as well as wind direction was created. The prototype model was verified through wind tunnel tests and the relative error between the wind speeds was no more than 1.75%. At the same time, validation experiments were performed for the speed range of 5~60 m/s and direction range of 0°~360°, with the prototype installed on a goniometer. Wind tunnel test results show that the relative error between the proposed model and the wind tunnel test is less than 4%, and wind direction error between them is less than 5°. The method proposed in this paper can be applied in severe service environments and is of theoretical significance and engineering application value.

批注 [A9]: 方正书宋简体, 9.5 号, 上标, 单倍行距

批注 [A10]: 方正书宋简体, 9.5 号, 单倍行距

批注 [A11]: 方正书宋简体, 9.5 号, 单倍行距

收稿日期: 2018-02-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB1201201)

通讯作者: 作者 A (出生年—), 男, 山东青岛(籍贯)人, 工程师 (职称), 硕士 (学历), 主要研究方向为 XXXXXXXX; 作者 C, 讲师 (职称), 博士 (学历), 通信作者, 主要研究方向为 XXXXXXXX.

Key words: wind velocity measurement; multiple differential pressure test; railways in wind areas; vehicle-induced wind velocity

批注 [A12]: 方正书宋简体, 9.5号, 加粗, 单倍行距

风区铁路列车运行的车载风速测量一直是列车防风安全研究的热点问题。针对列车行经风区的防风安全评估, 目前主要参考列车所经铁路沿线测风站时的地面监测风速作为依据, 而由于风区地形地貌复杂, 远方来流经地形突变后在列车运行线路位置往往变化较大, 并不能有效表征列车实际承受的服役风载^[1-4]。因此, 亟待提出一种车载式的二维风速风向测量方法, 准确评估列车运行过程中的服役环境风速。

批注 [A13]: 正文: 方正书宋简体, 10号, 行距最小值 18磅

针对环境风速的测量, 目前广泛采用的有机械式、超声波式、热线式等。机械式风速仪的风速测量元件为螺旋桨或风杯, 风向测量元件为风向标, 其螺旋桨或风杯的转速与风速成正比。机械式传感器因其结构简单、低成本, 是目前应用最广泛的。但该类传感器最大缺点是存在机械磨损。

超声波风速仪因其高采样率、实时性、高精度, 并且不存在旋转部件, 得到广泛应用, 但由于超声波的传播距离必须要远大于超声波传感器的尺寸, 限制了超声传感器小型化。

热线式或热场式风速仪在测量低速流动时, 特别是在要求高空间分辨率的测量场合, 比机械式风速仪更有优越性。热式风速仪不存在机械磨损, 其尺寸可以做到很小, 但热式传感器暴露在空气中的热量元件非常脆弱, 很容易损坏。

国内外学者针对基于多点感压的测速开展了系列研究。Bruschi等^[5]通过在圆柱体上设计固定通道, 基于热流量测量差压得出圆柱侧面差压压力分布与风向的余弦函数关系, 设计当使用两个相同的结构并正交放置时, 可同时获得风速和风向。此方法在风速范围 0.9~8.4 m/s 内具有较高的效率, 但雨水、沙尘会通过空气进入到通道内, 对流量测量元件造成损害。

C.Liu等^[6]提出一种利用四组差压传感器测量风速风向的圆柱形设备, 围绕圆柱体侧面均匀布置 8 个小孔, 同一直径上的两个孔为一组, 并通过导压管连接差压传感器, 圆柱体将传感器与气流隔离开。文献[6]指出: 忽略尾流扰动时, 差压传感器数值与动压的比值在一定范围内与雷诺数无关。并由此计算出风速风向; 试验结果表明: 在风速 0.91~39 m/s 时传感器具有较高的可靠性, 但当风速超过 39 m/s 或传感器直径改变时, 文献方法不再适用。

通过测量不同形状物体表面压力分布计算流体的特性的技术正在快速发展。基于该技术, 我们设计了一种利用空气压力传感器获得风速风向数据的二维圆柱形风速仪, 且该风速仪不受自身尺寸大小的约束。在所设计的风速仪圆周上, 均匀分布 12 个小孔, 每个小孔连接一个空气压力传感器。当风向改变时, 迎风侧相邻三个压力传感器的数值变化满足一定函数关系。通过环周向二次压力分布关系推导得到风向, 并由风向和压力值得到风速。由于只考虑迎风侧的压力值, 背风侧涡流干扰不会对其造成影响, 因此风速仪直径改变时, 该方法同样适用。

1 测试原理

批注 [A14]: 方正黑体筒体, 13号, 单倍行距

本文的风速测量仪采用在圆柱表面上设置 12 个感压点, 测量各感压点最大的三个压力点及对应位置, 计算来流的风速和风向。本节主要针对测点的布置方式和样机的设计展开介绍。

1.1 测点布置

批注 [A15]: 方正黑体筒体, 10号, 单倍行距

根据圆柱绕流原理, 二维圆柱低速定常绕流的流型只与雷诺数有关, 如图 1 所示。由于尾流涡

旋的影响，利用圆柱面对称点差压方式计算流体流速，如图 1-a 的 P_1^+ 与 P_1^- 、 P_2^+ 与 P_2^- 、 P_3^+ 与 P_3^- ，雷诺数 Re 较大时已经不能代表其实际流速。因此采取如图 1-b 所示的分离点前圆柱避免压力分布计算方法，以圆柱全封闭稳压腔的压力作为参考压力，可以准确计算流体流速，且设计模型不受直径大小影响。

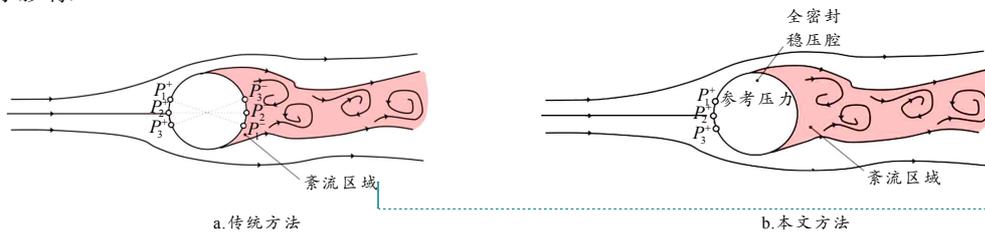


图 1 不同风速测量原理比较

批注 [A16]: 图中标注文字: 方正楷体筒体, 六号, 单倍行距

批注 [A17]: 图中标注文字: 方正黑体筒体, 小五, 单倍行距

在圆柱体表面环周向等间距设置 12 个压力测点，相邻测点之间夹角为 30° 。在稳定的气流中，圆柱体表面某一点的压力 P_θ 随着角度变化而变化，但总能找到压力最大的 3 个点 1#、2# 和 3#。如图 2 所示，以 2# 传感器为参考点，当风向在 $\pm 15^\circ$ 之间改变时，三个压力传感器的值 P_1 、 P_2 、 P_3 都会随之改变。本文的研究重点是找出 P_1 、 P_2 、 P_3 与风速风向之间的关系，并计算得出风速风向。

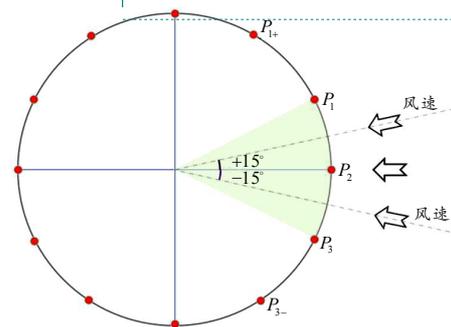


图 2 3 极值压力点及风向变化区域示意图

1.2 样机设计

按照上述测点布置方案，本文设计并制作了一个风速仪，如图 3 所示，圆柱直径为 100 mm，高 400 mm，孔位置高 300 mm，顶部为半径 50 mm 的半球体。

由图 3 可以看出，12 组孔均匀分布在圆柱侧面，每组孔由 3 个直径为 1 mm 的小孔垂直排列而成，气流通过小孔进入密闭腔体，我们称之为感压腔，并通过感压腔上的导管连接至差压传感器的正端，差压传感器和电路芯片安装在圆柱体内，避免了敏感元件位于空气中受腐蚀的问题。多个小孔垂直排列不仅提高敏感度，有效防止感压孔因沙尘、雨水而堵塞。每个感压孔连接一个差压传感器的正压口，所有差压传感器的负压口相互连通至同一个参考压，参考压一般为大气压，多个差压传感器互不影响。

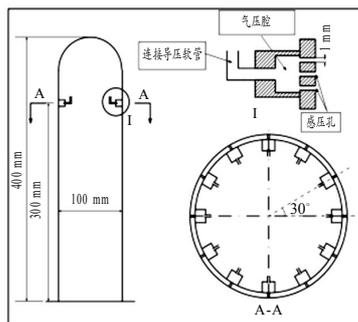


图 3 风速测试样机原理图及实物图

风速仪样机设计参数如下:

1) 压力值与风速的平方成正比,传感器的选择必须满足大量程、高精度度.因此选取 M191D 型数字差压传感器,传感器量程为 ± 3 kPa,最大可测风速可达 68 m/s.

2) 在嵌入式程序中对数据进行处理.传感器输出数字信号,将其转换为压力值后根据公式计算出风速风向值.传感器反应时间为 1.5 ms,因此最大的采样频率为 666 Hz,在本程序中设置数据采集频率为 10 Hz,并求取平均值得到 1s 数据,这样能减少突变和采样点缺失对数据的影响.同时计算 3s 平均风速风向值,最大限度减少随机误差的影响.

3) 该传感器包括 12 个空气压力传感器,因传感器的零点不同,因此在数据计算之前需要在零漂条件下对每个传感器进行零点采集,并将零点数据保存在闪存中.当需要对传感器重新采集零点时,只需要调用 MCU 中的程序即可.

4) 硬件电路设计时,将控制部分与传感器部分分开,这样同一个控制电路可以匹配多个传感器电路,只需重新采集传感器零点并保存即可,反之亦然.

2 测试模型

由图 2 的环周向 12 个风压测点的布置图可知,以 2#测点的正对方向为参考基准,沿俯视图逆时针方向为正,当风向角 θ 在 $\pm 15^\circ$ 之间变化时,总能保证 1#、2#和 3#测点的压力为 12 个测点的 3 个极值压力点,且 2#测点的压力值 P_2 为最大值.

当风向角 $\theta > +15^\circ$, $P_2 \rightarrow P_3$, $P_1 \rightarrow P_2$, $P_{1+} \rightarrow P_1$, 即 P_{1+} 、 P_1 、 P_2 组成了新的 P_1 、 P_2 、 P_3 ; 当风向角 $\theta < -15^\circ$, $P_{3-} \rightarrow P_3$, $P_3 \rightarrow P_2$, $P_2 \rightarrow P_1$, 即 P_2 、 P_3 、 P_{3-} 组成了新的 P_1 、 P_2 、 P_3 . 因此,仅需考虑风向角 θ 在 $\pm 15^\circ$ 之间变化,建立的风向角 θ 与 3 点压力 P_1 、 P_2 、 P_3 之间的数学模型 $\theta = f_1(P_1, P_2, P_3)$ 和风速 v 与 3 点压力 P_1 、 P_2 、 P_3 之间的数学模型 $v = f_2(P_1, P_2, P_3)$, 就可以涵盖所有不同来流方向的风速情况.

当风向角 θ 为 0° 时, 2#测点风压 P_2 最大, 1#、3#测点的风压 P_1 和 P_3 达到平衡, 在此基础上的风向角变化都会引起 3 点压力值的变化, 来流风引起的圆柱面表压拐点不再出现在感压口. 由于在 $\pm 30^\circ$ 范围内, 沿圆柱面环周向的压力分布呈二次多项式分布, 可假设:

$$P(\theta) = a \cdot \theta^2 + P_0, \quad (1)$$

式中 P_0 为来流风速对应风压. 当极值点为 P_2 时, 来流风与 2#测点的相对风向角记为 θ_0 , 则有

$$P_2 = a \cdot \theta_0^2 + P_0, \quad (2)$$

显然, 对于间隔 30° 的 1#测点和 3#测点, 分别有:

$$P_3 = P(\theta_0 - 30) = a \cdot (\theta_0 - 30)^2 + P_0, \quad (3)$$

$$P_1 = P(\theta_0 + 30) = a \cdot (\theta_0 + 30)^2 + P_0. \quad (4)$$

式(4) - 式(3)得:

$$P_1 - P_3 = 120a \cdot \theta_0, \quad (5)$$

式(2) - (式(3) + 式(4)) / 2 得:

$$P_2 - (P_1 + P_3) / 2 = -900a, \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得风向角为:

批注 [A18]: 公式: 用公式编辑器输入, 10 号

$$\theta_0 = -7.5 \cdot \frac{P_1 - P_3}{P_2 - \frac{P_1 + P_3}{2}}, \quad (7)$$

记 $D = P_1 - P_3$, $S = P_2 - (P_1 + P_3)/2$, 则有

$$P_0 = P_2 + \frac{7.5D^2}{120S}. \quad (8)$$

来流风速 v 计算为:

$$v = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}, \quad (9)$$

式中, ρ 为大气密度, 取为 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$.

通过风洞试验验证风速风向的测试模型. 将风速仪样机安装在测角仪上, 在标准风洞中旋转测角仪模拟风向改变的状态, 以 5° 为一个间隔角度, 沿圆周方向旋转 360° , 在每个感压孔的 $\pm 15^\circ$ 范围内, 该感压孔均为风压极值点 P_2 , 总计 12 个测点, 每个测点占用 30° 的旋转工况, 总计完成 360° 的周向旋转工况, 相当于 3 极点风压测试工况进行了 12 次重复性试验. 来流风速 40 m/s 条件下, 对 12 次重复性试验的数据进行平均以消除测量误差, 得到 3 极点风压平均值, 由公式 (7)、(8)、(9) 和参数 S 计算值如表 1 所示.

表 1 不同风向角下 3 极点风压试验平均值及计算参数值

风向 θ	$P_1(\theta)/\text{Pa}$	$P_2(\theta)/\text{Pa}$	$P_3(\theta)/\text{Pa}$	计算风向/ $^\circ$	计算风压/ Pa	计算风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-15°	-532.2	800.9	829.7	-15.7	978.7	40.3
-10°	-378.9	901.5	676.4	-10.5	994.0	40.6
-5°	-87.2	968.0	468.1	-5.4	992.8	40.6
0°	206.4	995.7	209.1	0.0	995.7	40.7
5°	473.9	959.0	-88.2	5.5	984.8	40.4
10°	670.4	895.1	-376.4	10.5	986.6	40.5
15°	823.9	798.3	-531.2	15.6	974.3	40.2

批注 [A19]: 方正黑体简体, 小五, 单倍行距

批注 [A21]: 表中公式: 用公式编辑器输入, 8 号, 单倍行距

批注 [A20]: 表中文字: 方正楷体简体, 六号, 单倍行距

批注 [A22]: 表中数字: Times New Roman, 六号, 单倍行距

注: 公式推导的风向为测点相对于来流风方向, 计算风向为来流风方向相对于测点方向, 风向计算值需取反.

由表 1 的风洞标定数据代入测试模型的风速风向计算结果与给定来流的风速风向进行对比可知, 风向的计算误差不超过 0.7° , 风速的计算相对误差不超过 1.75% .

3 试验验证

3.1 试验方案

为了测试自制传感器的准确性, 将其置于中南大学风速风向传感器标定风洞中进行试验, 并将试验结果与 Cobra 270 风速仪进行对比. 风洞的高速段其截面尺寸为 $0.8 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$, 长度为 3.4 m , 风洞最大风速和最小风速分别为 60 m/s 和 5 m/s . 风洞试验段具有较好的稳定性, 速度稳定性不大于 0.5% , 局部气流偏角不大于 0.8° , 且湍流度不大于 0.8% . 传感器在风洞中的安装如图 4 所示, 传感器固定在测角仪上, 位于风洞正中央, 测角仪的旋转角度通过电脑进行精确控制.

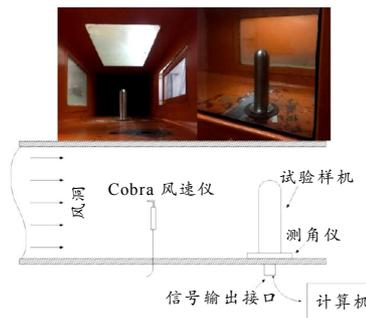


图 4 风速测试样机风洞标定试验

测角仪带动传感器旋转,模拟风向角改变.风速大小是由风洞进行控制,控制精度为0.1 m/s.传感器的输出风速风向通过通讯线传输至电脑上并显示.

3.2 误差分析

在5~60 m/s范围内以5 m/s为间隔逐步进行多组风速试验,在每个风速等级下,以10°为间隔旋转传感器,得到传感器的风速风向数据,并与参考风速风向进行对比,计算相对误差比.测量风速与参考风速之间的相对误差不超过4%,如图5所示.测量风向与测角仪读数之间的误差不超过4°,如图6所示.

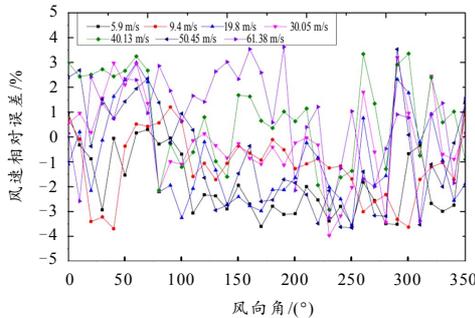


图5 风速测量相对误差

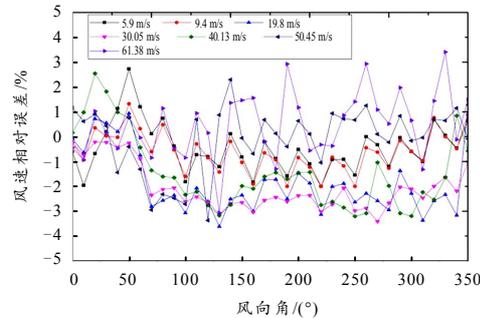


图6 风向测量误差

4 结论

本文提出一种利用差压传感器测量多点压力的二维风速风向测量技术.风速仪位于空气流中时,风速仪圆周上每一点压力值均与风速大小有关,本文的关键点在于研究压力在圆柱上的分布与风速之间的关系,并用公式进行表达,最终根据该公式通过压力值计算得到风速风向值.

根据本文的研究成果,设计制造直径为10 cm的风速仪,并在风洞中进行试验,试验风速范围为5~60 m/s.试验结果表明,风速相对测量误差不超过4%,风向测量误差不超过4°.

本文研究压力与角度之间的关系时,选取±15°的范围.由图3-a可知,当角度扩大至±20°时,D与θ仍具有较好的线性关系,此时只需要9个传感器就可以计算得到风速风向.当改变模型的直径时,所需传感器个数能否更少是本文需要进一步做的研究.

参考文献

[1] 葛盛昌,尹永顺.新疆铁路风区列车安全运行标准现场试验研究[J].铁道技术监督,2006,34(4):9-11.

[2] 葛盛昌.新疆铁路风区大风天气列车安全运行办法研究[J].铁道运输与经济,2009,31(8):32-34.

[3] 程淞.电气化铁路强侧风条件下列车防风研究[J].铁道建筑,2009(6):90-92.

[4] 李鲲.大风区高速铁路新型防风设施研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(2):756-762.

[5] BRUSCHI P, DEI M, PIOTTO M. A low-power 2-D wind sensor based on integrated flow meters[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 12: 1688-1696.

[6] LIU Cheng, DU Lidong, ZHAO Zhao. A directional anemometer based on MEMS differential pressure sensors [C]// IEEE International Conference on Nano/micro Engineered & Molecular Systems, Wakiki: IEEE, 2014: 517-520.

批注 [A23]: 方正黑体筒体, 10号, 单倍行距

批注 [A24]: 方正书宋筒体, 小五号, 行距固定值15磅

批注 [A25]: 方正黑体筒体, 10号, 右对齐

[责任编辑: XXX]