

铁路风速传感器现场校准装置研究

汤勇,林建辉,钟文生,杜高峰

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:针对目前铁路上广泛使用的 WXT520 超声波风速传感器存在检定及校准效率低、精度低、时间长等一系列问题,基于皮托管测量风速的原理,结合风洞设计理论,设计了一种能够快速、准确地提供均匀和稳定风源的低成本可移动微型低速风洞。通过将皮托管风速的测量值与被检定传感器风速的测量值进行对比,实现在现场完成对风速传感器的校准。利用 SolidWorks 建立了 WXT520 风速传感器和低速风洞的三维模型,并导入 Fluent 中进行仿真计算。仿真结果表明,该风洞满足传感器的校准要求,并通过实验进行了验证。

关键词:WXT520 超声波风速传感器;风洞;皮托管;SolidWorks;Fluent

中图分类号:TM93;TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0179-04

Study of Field Calibration Device of Railway Wind Speed Sensor

TANG Yong, LIN Jianhui, ZHONG Wensheng, DU Gaofeng

(State key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Low verification and calibration efficiency, low accuracy and long time exist in the WXT520 ultrasonic wind speed sensor widely used in railway. Based on the principle of measuring wind speed in pitot tube and the theory of wind tunnel design, a kind of low-cost, movable and low-speed wind tunnel is designed to quickly and accurately provide uniform and stable wind source. By comparing the value of measuring the wind speed in the pitot tube with the value measured by the verified sensor, the verification of the wind speed sensor is completed in the field. In this paper, SOLIDWORK is used to establish a three-dimensional model of WXT520 wind speed sensor and low-speed wind tunnel, and then the model is imported into FLUENT for the simulation calculation. The simulation results show that the wind tunnel meets the verification requirements of the sensor and is verified by experiments.

Keywords: WXT520 ultrasonic wind speed sensor; wind tunnel; pitot tube; SolidWorks; Fluent

0 引言

随着国内列车速度的不断提高,风速的监测对列车运行的安全性越来越重要。通过风速传感器可以对风速进行全天候的监测,从而为列车的正常运行提供保障。但风速传感器因长期在室外使用,受到恶劣天气的影响,其测量的精度会有一定的下降。目前国内风速传感器的现场校准都是针对风杯式的,利用机械传递方法强制风速传感器风杯轴转动,从而完成校准。但这种方法对 WXT520 超声波风速传感器并不适用,因此研究出一种针对超声波风速传感器现场校准的方法具有非常重要的现实意义。

传送时间,就可以算出 3 条超声波路径中每条路径的风速。通过信号处理技术,选用质量最好的两条阵列路径来计算风速大小。超声波风速传感器的现场校准需要持续稳定均匀的风速,本文设计的低速风洞可以满足校准要求。



图 1 WXT520 风速传感器结构图

1 WXT520 风速传感器工作原理

WXT520 是目前铁路上广泛使用的风速传感器,其工作原理是利用超声波时差法即超声波在顺风 and 逆风时的传播速度不同来实现对风速的测量。其结构主要由 3 个等间距的超声波收发探头组成,3 个探头位于同一水平面上,组成一个变换器阵列,如图 1 所示。通过测量超声波沿变换器阵列所形成的 3 条路径的传送时间(双向),即测量 6 个

2 风洞结构设计

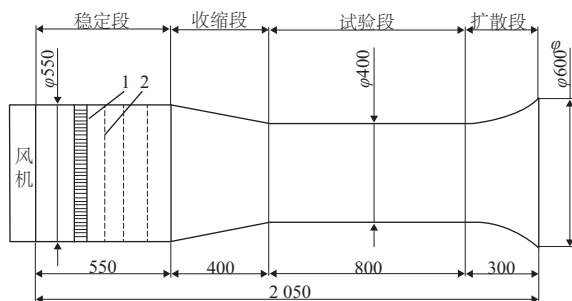
2.1 总体结构

目前风洞的基本形式有两种:开路式风洞和回路式风

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51875481)

第一作者简介:汤勇(1993—),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为车辆工程。

洞^[1]。本次设计风洞的型式为圆形开路式风洞,主要结构包括稳定段、收缩段、试验段和扩散段等。根据风洞设计理论确定各段的尺寸,本次设计风洞的总体尺寸为:2.05 m×0.6 m×0.6 m(长×宽×高),风洞结构如图2所示。



1—蜂窝器;2—阻尼网。

图2 风洞结构图

2.2 工作原理

风机产生的风源到达稳定段后,经过一段距离,通过蜂窝器和阻尼网。蜂窝器可以将气流导直,使其平行于风洞轴线,同时将气流中的大尺度旋涡分割成小旋涡,从而加快旋涡衰减,然后再通过3层阻尼网使气流分布更趋均匀和稳定;收缩段对经过稳定段的气流进行加速,气流速度按面积比而增加,而脉动速度保持不变,紊流度进一步得到改善,使得收缩段出口气流保持均匀、平直且稳定,小旋涡得到进一步衰减,使气流速度分布更趋均匀和稳定^[2]并得到均匀且稳定的试验段气流对风速传感器进行校准;通过扩散段将气流扩散出去。

2.3 试验段设计

试验段是整个低速风洞设计的关键,直接影响传感器校准的结果。一般试验段的截面形状有圆形、方形、三角形、椭圆形以及长方形。在相同的条件下,通过椭圆形界面的气流最均匀,圆形次之,长方形再次之。但是由于椭圆形截面加工工艺复杂且不易安装,故本次设计选取圆形截面作为试验段的截面形状。WXT520风速传感器的实际尺寸为:0.115 m×0.115 m×0.238 m(长×宽×高)。根据传感器的实际尺寸,选取试验段的直径 $D=0.4$ m。由相关资料可知^[1],试验段长度公式为:

$$L=2.0D\sim 2.5D \quad (1)$$

由于本次设计的是微型可移动风洞,故风洞的尺寸应尽量小。选取试验段的长度 $L=0.8$ m,最后得到的试验段是长度为0.8 m、直径为0.4 m的等截面圆形管道。

2.4 收缩段设计

收缩段主要是使来自稳定段的气流均匀加速,达到试验段需要的流速,并改善试验段的流场品质。收缩段的设计应满足以下要求^[1,3-4]:1) 气流单调增加,避免气流在洞壁发生分离;2) 出口处气流分布均匀,方向平直且稳定;3) 收缩段的长度要适中,既要符合结构要求又要使收缩壁的过渡不至过分剧烈而造成流动的分离和扰动。

收缩段的性能主要取决于两个因素:一是收缩比,即

收缩段的进口截面积与出口截面积之比;二是收缩曲线^[5]。风洞收缩比的大小,主要取决于以下因素:对试验段气流的均匀性和紊流度的要求,风洞的能量比以及风洞造价。本次设计主要考虑的是风洞的尺寸及造价,故选取小的收缩比,取收缩比为2。收缩段的长度一般可采用进口直径的0.5~1.0倍^[1],本次设计取收缩段的入口直径为0.55 m,长度为0.4 m。收缩段曲线的设计采用的是Batchelor-Shaw提出的理想不可压流的一维流公式(认为每个截面上的气流参数是均匀的),收缩段曲线方程为:

$$F=F_1 \sqrt{\frac{1}{\left[\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2-1\right]\left(\frac{x}{L}-\frac{1}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{L}\right)+1}} \quad (2)$$

其中: F_1 、 F_2 和 F 分别为收缩段进口、出口及任意 x 处的截面面积; L 为收缩段的长度。

2.5 稳定段设计

稳定段通常为等截面管道,下游与收缩段相接,所以其面积大小取决于风洞收缩比的要求^[1,6-7]。稳定段设计首先要保证蜂窝器和多层阻尼网的安装。稳定段尺寸与收缩段入口尺寸一致,一定长度的等截面管道有利于导直气流、稳定气流和均匀流场,小收缩比风洞稳定长度应该为直径的1.0~1.5倍^[1,6-7]。本次设计稳定段长度为直径的1倍,即0.55 m。

蜂窝器网格有圆形、方形、六角形和梯形等,其中六角形网格最为理想,该网格的损失系数小,气流压力损失小,对降低湍流度有显著效果^[1]。影响蜂窝器性能的主要参数是蜂窝长度 L 和孔径 M 。本文设计的蜂窝孔径为2 mm,根据经验公式^[1]: $L/M=5\sim 10$,蜂窝器的长度取值为15 mm。

阻尼网位于蜂窝器和收缩段之间,阻尼网可降低蜂窝器后的气流旋涡,以减少稳定段气流的湍流强度,使稳定段流场更均匀。阻尼网的选择与迟滞系数 β 有关,由相关资料可知^[1],迟滞系数 β 的计算公式为:

$$\beta=\left(1-\frac{d}{l}\right)^2 \quad (3)$$

其中 d 和 l 分别为网丝直径和网孔边长。

如果网丝的迟滞系数太小,网后气流可能会出现不稳定;如果迟滞系数太大,整流作用将会削弱,一般低湍流度风洞多采用 $0.57<\beta<0.6$ 的大迟滞系数^[8]。对于同一迟滞系数的阻尼网,网丝直径越小,阻尼网效果越好,且多层网组比单层网的效果好^[9]。本次在稳定段设计3层阻尼网,网丝直径为0.4 mm,网孔边长为2 mm。

2.6 风机选型

对于低速风洞,由于马赫数很小,气流可看作不可压缩流体。根据风速传感器检定所需的最大风速和试验段的直径,由流量计算公式:

$$Q_{\max}=S\cdot V_{\max} \quad (4)$$

其中: S 为试验段的截面面积; $V_{\max}$ 为检定的最大风速; $Q_{\max}$ 为试验段所需的最大风量。

由公式(4)可得试验段所需的最大风量值为 $3.77\text{ m}^3/\text{s}$ (约为 $13572\text{ m}^3/\text{h}$)。由于风速经过收缩段到达试验段时,风速约为入口风速的2倍,故本次设计中选择的风T35-11

型,机号为5的轴流风机,该风机的标称风量为 $9\,133\text{ m}^3/\text{h}$,功率为 0.75 kW ,叶轮直径为 500 mm 。采用tesech变频器对风机转速进行控制,该变频器采用脉动输入频率控制和先进的三相切换两相控制技术,具有运算速度快、自动程序运转控制、自动调整加减速、自动转矩补偿、自动滑差补偿、超低噪声及高过载能力等诸多优点^[2]。

2.7 扩散段设计

扩散段主要是使气流通过试验段后能够降速增压,以减少整个风洞的能量损失和对外界环境的影响。通常对于不可压缩流体来说,面积比不超过2.5,扩散角控制在 $8^\circ\sim 10^\circ$ 以内为宜。本次设计选取面积比为2.5,扩散角为 9° ,故计算得到扩散段最大孔径为 0.6 m ,长度为 0.3 m 。

3 皮托管选型

皮托管又名“空速管”,是法国人 Henri-Pitot 发明创造的。皮托管的测量原理依据是理想不可压缩气体下的伯努利方程,即在均匀稳定的理想流场内,同一流线上任意两点的动能、重力势能及压力势能之和是一个常量^[10]。其具体公式为:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + P = \text{cost} \quad (5)$$

式中: ρ 为流体的密度; v 为流体的速度; g 为重力加速度; P 为流体的压力势能, cost 是流体在该点的总能量,为一常数。

皮托管一般有两种常见结构:L型皮托管和S型皮托管。L型皮托管在有灰尘情况下容易造成堵塞,影响测量精度,故本次设计选用S型皮托管,其结构如图3所示。

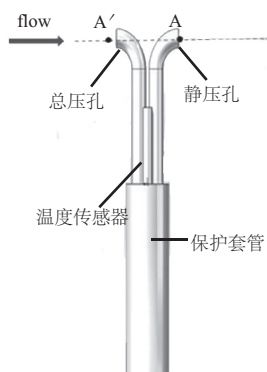


图3 S型皮托管

4 仿真分析

首先利用CATIA根据传感器实际尺寸建立传感器的三维模型,如图4所示。然后再把整个装置导入ICEM中进行网格划分。网格划分时,因蜂窝器和阻尼网为薄片式结构,主要起整流作用,对气体流动产生的阻碍较小,因此忽略,网格划分如图5所示。最后把划分好网格的模型导入Fluent进行流体计算和仿真分析。设定边界条件入口风速和出口压力,其中出口风与外界相连,故出口压力为0,分别对入口风速为 2 m/s 、 5 m/s 、 10 m/s 、 15 m/s 、 20 m/s 、 30 m/s 时风洞内部流场的均匀性和稳定性进行仿真分析,

得出试验段轴向风速分布图和传感器横截面压力梯度分布图,如图6和图7所示。

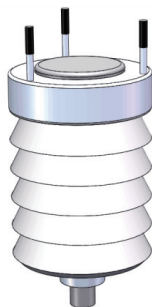


图4 传感器三维模型

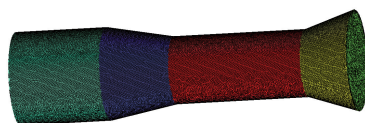


图5 风洞装置网格划分

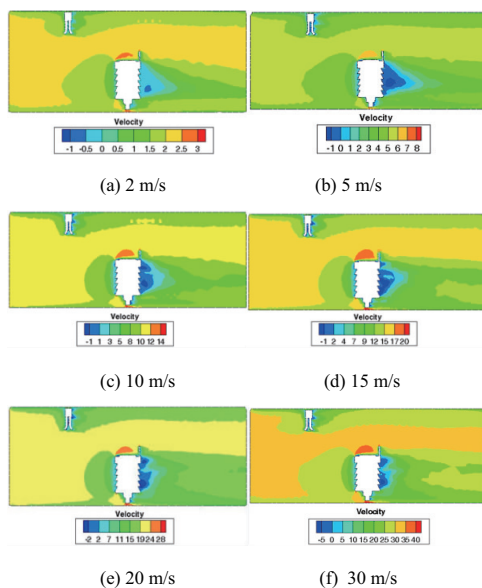
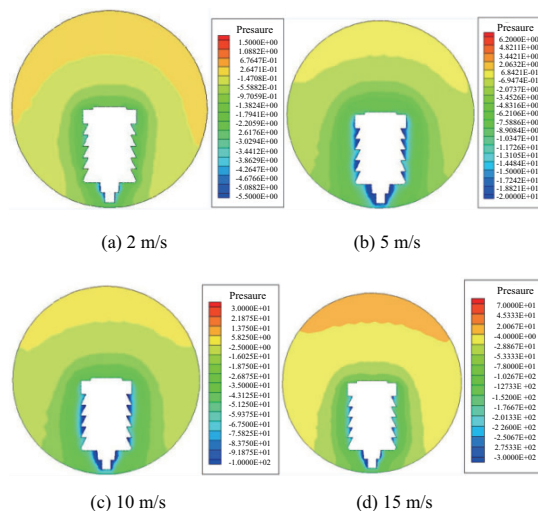


图6 实验段轴向风速分布图



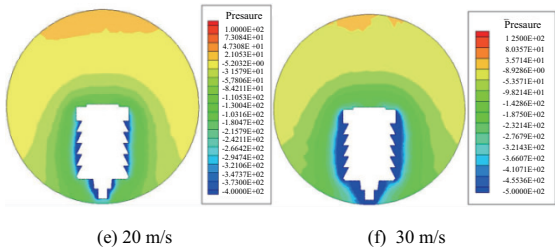


图7 传感器横截面压力分布图

从图6和图7可知,虽然皮托管和传感器使风洞内部流场发生了变化,但是皮托管和传感器所在区域附近的流场仍然趋于均匀稳定,且皮托管和传感器探头接收到的风速也仍然是一样的。模拟仿真结果表明该小型风洞能够达到风速传感器现场检定要求。

5 试验验证分析

为了验证模拟仿真结果的可靠性,在实验室里进行了该试验。试验在5种不同风速下进行,并测出了3组数据,把皮托管测量出的风速值作为当前的标准风速值,把传感器测量的风速值与标准值进行对比分析。试验装置和数据如图8和表1所示,第1组试验速度分析如图9所示。

表1 不同风速下的测量数据 单位:m/s

组别	设定风速值	皮托管风速值	传感器风速值
第1组	2	3.73	3.91
	5	9.44	9.57
	10	18.84	18.93
	15	28.33	28.41
	20	37.76	37.80
第2组	2	3.75	3.95
	5	9.43	9.58
	10	18.84	18.94
	15	28.33	28.40
	20	37.77	37.81
第3组	2	3.74	3.96
	5	9.44	9.59
	10	18.86	18.97
	15	28.33	28.42
	20	37.78	37.83

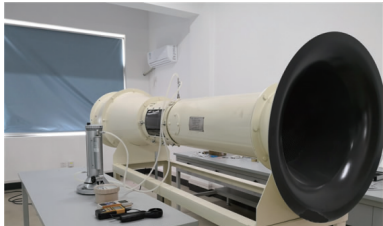


图8 风洞试验装置台

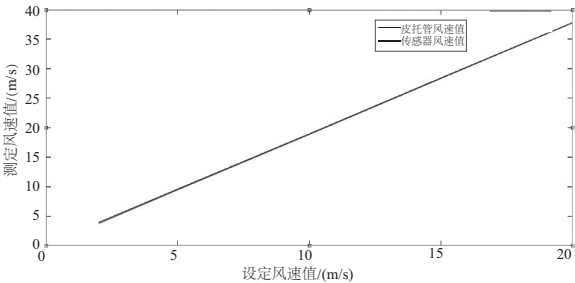


图9 第1组试验速度分析

由风洞设计原理可知,风洞内部流场越稳定,风洞内各点的风速值越接近。从表1和图9中可以看出,随着设定风速值的逐渐增大,皮托管和传感器所测得的风速值越接近,误差越小,即风洞内部流场随着设定风速值的增大而趋于稳定。3组试验数据中最大误差出现在第3组,误差值为0.22 m/s,而传感器允许的最大误差为±0.3 m/s,故该微型低速风洞完全满足传感器校准精度要求。在现场进行传感器的校准时,可选用较大的风速值,这样可以提高校准精度。

6 结语

本文根据铁路上广泛使用的风速传感器,设计了一种可移动微型低速风洞装置。该装置不仅可以用于风速传感器的室外校准,也可用于教学实验。与之前的校准方法相比较,该装置大大缩短了传感器的校准周期,降低了校准成本,并且风洞洞体具有结构简单、质量轻、易加工、成本低等特点。在进行现场检定时,可把风洞设备固定在铁路上专用的维修车上,从而在现场完成风速传感器的检定。由此可见,本文所设计的装置具有重要的工程意义。

参考文献:

[1] 伍荣林. 风洞设计理论[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1985.

[2] 刘海洋,孔丽丽,陈智,等. 可移动微型低速风洞的设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(9):244-249.

[3] 盖晓磊,李光里,张宏. 可移动式风蚀风洞的设计与研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2011,28(3):27-32.

[4] 王帅,刘小康,陆龙生. 直流式低速风洞收缩段收缩曲线的仿真分析[J]. 机床与液压,2012,40(11):100-104.

[5] 高胜寒,李宏刚,王国龙,等. 小型低速风洞洞体结构设计研究[J]. 森林工程,2016,32(6):77-80.

[6] 李强,丁珏,翁培奋. 上海大学低湍流度低速风洞及气动设计[J]. 上海大学学报(自然科学版),2007(2):203-207.

[7] 丁素明,薛新宇,兰玉彬,等. NJS-1型植保直流闭口式风洞设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):76-84.

[8] 王文奎,石柏军. 低速风洞洞体设计[J]. 机床与液压,2008(5):93-95.

[9] 李国森,敖振浪. 风速仪在风洞检定中的阻塞修正[J]. 气象,2006(9):67-70.

[10] 李德林. 基于风洞试验下的皮托管几何结构的优化设计研究[D]. 保定:河北大学,2018.

收稿日期:2019-03-04