



氢能轨道车辆氢泄漏压力检测方法研究

姚璐娇¹, 李建威^{1,2}

(1. 北京理工大学 电动车辆国家工程研究中心, 北京 100081;

2. 北京理工大学长三角研究院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 氢能轨道车辆的氢安全监测是保障其安全运行的关键环节。针对现有氢气泄漏压力检测法在实时性和准确性方面的不足, 文章提出了一种基于激光可视化技术与机器学习相结合的智能检测方法。通过建立氢泄漏压力与激光束轮廓变形量之间的定量关系, 利用图像处理技术提取激光光斑的几何参数特征, 构建了基于神经网络的预测模型。试验结果表明, 优化后的神经网络模型(2-16-1拓扑结构)具有优异的预测性能, 其决定系数 R^2 达到0.988, 均方根误差RMSE为0.004 6。该方法实现了氢泄漏压力的非接触式高精度检测, 为氢能轨道车辆氢泄漏提供了一种新型的智能监测方案, 对提升轨道交通氢安全水平具有重要的工程应用价值。

关键词: 氢射流; 可视化; 激光束; 轨道车辆; 泄漏检测

中图分类号: U270

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0040-08

0 引言

在全球应对气候变化和我国积极推进“双碳”战略的背景下, 氢能轨道车辆作为轨道交通领域绿色低碳转型的重要技术路径, 正迎来前所未有的发展机遇。近年来, 国家发改委等部委相继出台政策支持氢能交通装备的示范应用, 开展氢能轨道车辆关键技术研究具有重要的理论价值和实践意义。

氢气具有极低的最小点火能量(0.017 mJ)和最宽的可燃范围(4%~75%), 这些特性使其在轨道车辆运行环境中存在较高安全风险。列车高速运行引发的振动、温度波动及复杂工况可能增加供氢系统泄漏风险, 而隧道等密闭空间更易导致氢气积聚。据统计, 90%以上的氢气事故源于泄漏, 且轨道车辆供氢系统常以气体射流形式发生, 一旦发生泄漏, 可能造成严重安全事故, 因此氢气泄漏压力检测是控制安全风险的核心关键环节。目前, 针对氢泄漏的研究方法主要有粒子图像测速技术(PIV)、平面激光瑞利散射成像技术、数值模拟技术、纹影技术等。在粒子图像测速技术方

面, 文献[1]研究了喷射超高压氢气射流近场的非定常特性。文献[2]评估了非均匀折射率场定量测量误差的空间分布。文献[3]使用纹影图像测速技术(SIV)研究了轴对称湍流氢射流的流场。文献[4]研究了压缩储存容器中氢气释放的物理特性。文献[5]融合PIV与纹影技术, 实现了欠膨胀超音速射流的速度场和激波结构的同步测量。在平面激光瑞利散射成像技术方面, 文献[6]研究了湍流氢-空气混合射流中激光点火能量的新测量方法。文献[7]研究了大气氢射流的自相似标量混合过程和欠膨胀氢射流的下游区域。文献[8]分析了泄漏下游的氢射流体积分数统计量以及相应的概率密度分布。文献[9]同步获取了亚声速氢气泄漏射流体积分数场与高压欠膨胀射流激波结构图像, 并测量了马赫盘的位置、直径等关键特征参数。在数值模拟技术方面, 文献[10]探讨了障碍物和泄漏孔形状对氢气泄漏扩散模式及体积分数分布的影响。文献[11]开展了欠膨胀氢气射流动力学的高保真仿真分析。文献[12]研究了圆形和矩形喷嘴的欠膨胀射流释放过程, 比较了不同喷嘴形状对射流结构和分散特性的影响。文献[13]研究了氢浓度沿自由水平亚音速射流中心线的衰减。文献[14]

基金项目: 国家自然科学基金项目(52322707)

通信作者: 李建威, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事多能源系统高效转换与安全利用研究; E-mail: lijianw@bit.edu.cn

引用格式: 姚璐娇, 李建威. 氢能轨道车辆氢泄漏压力检测方法研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 40-47.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.005.

Citation: YAO Luqiao, LI Jianwei. Hydrogen leakage pressure detecting method for hydrogen rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 40-47.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.005.

分析了半封闭通风设备中的氢气泄漏。在纹影技术方面, 文献[15]研究了轴对称超声速膨胀射流的全场密度信息测量。文献[16]分析了水平固定氢射流的体积分数和流速分布。文献[17]结合自适应傅里叶-汉克尔算法研究了轴对称射流径向密度分布。文献[18-19]提出了一种新的校准方法处理射流泄漏体积分数与纹影图像灰度值之间的映射关系。文献[20]利用动态压力传感器和高速纹影技术研究了高压氢气泄漏过程中激波的产生和传播规律。文献[21]运用纹影成像技术详细揭示了中低压氢气射流的近场结构特征。文献[22]提出了一种基于物理信息图神经网络的模型, 利用稀疏传感器数据对氢气射流和扩散过程进行实时预测。

综上所述, 氢泄漏问题已引发广泛关注。学者们采用不同的研究方法对氢泄漏流场进行分析, 研究了氢气的泄漏扩散规律, 研究成果丰富。然而, 上述技术中, 粒子图像测速技术(PIV)成本较高且不适用于移动场景; 平面激光瑞利散射成像技术操作复杂度高; 数值模拟技术难以模拟列车动态运行环境; 纹影技术在移动测量中存在精度局限。针对氢能轨道车辆特有的运行环境及安全需求, 亟需开发一种适应移动工况、抗干扰能力强、响应快速的氢气泄漏检测方法。基于此, 本文提出一种基于激光束轮廓变形与机器学习融合的氢气泄漏压力智能检测方法。该方法具有非侵入、抗振动、适应移动测量等特点, 可为氢能轨道车辆提供实时、可靠的氢安全监测解决方案, 助力我国绿色智能轨道交通体系建设。

1 氢气泄漏压力检测方法

1.1 激光可视化方法

当氢能轨道车辆的供氢管路发生气密性失效时, 氢气通过小孔、裂缝或松动接头泄漏, 在列车运行产

生的复杂气流场中形成高速气体射流。由于氢气分子的扩散黏性效应, 氢气质点通过碰撞把动量传给周围静止的介质, 带动介质一起运动, 并导致气体射流的流股逐渐扩大, 逐渐演化为三维空间射流。环境空气受卷吸作用进入气体射流中, 沿着气体射流的中心线径向向外扩散, 导致射流截面不断扩张, 流量增大, 速度随之降低, 但总动量守恒。同时, 气体射流的体积分数沿轴向方向逐渐减小, 由于混合气体密度与体积分数存在对应关系, 气体射流体积分数的变化导致径向方向上产生密度梯度。为定量描述体积分数分布, 通过圆形小孔泄漏出的气体射流满足以下假设: ①温度变化对气体体积分数变化的影响可以忽略不计; ②与径向(水平)分量相比, 体积分分数梯度中的轴向(垂直)分量可以忽略不计; ③气体射流的轴向体积分分数分布变化缓慢, 并遵循双曲线定律; ④在高度 z 处的横截面上, 径向体积分分数分布近似遵循高斯分布规律。

本文采用激光可视化技术检测圆孔泄漏形成的压力场, 其原理如图1(a)所示。He-Ne激光束穿过气体射流时, 喷射方向与激光传播方向垂直。该射流在水平方向上存在密度梯度, 表现为中心区域气体密度最低, 并沿中心线径向向外密度逐渐增大, 如图1(b)所示。由于氢气的密度低于空气, 气体射流可等效为一个折射率模型: 中心折射率最小, 从中心向四周折射率递增至空气折射率的圆柱型“气体透镜”。当激光束沿射流中心线处穿过时, 气体射流两侧的密度梯度产生类似透镜效应, 导致激光束因折射而发生偏折。

氢射流的气体透镜效应导致出射激光束相对于入射激光束产生变形。由于气体射流的轴向密度梯度分量远小于径向分量, 激光束轮廓在径向的变形显著大于轴向, 致使在接收平面上形成椭圆形光斑, 如图1(c)所示。该激光光斑的椭圆率取决于气体射流的折射率。

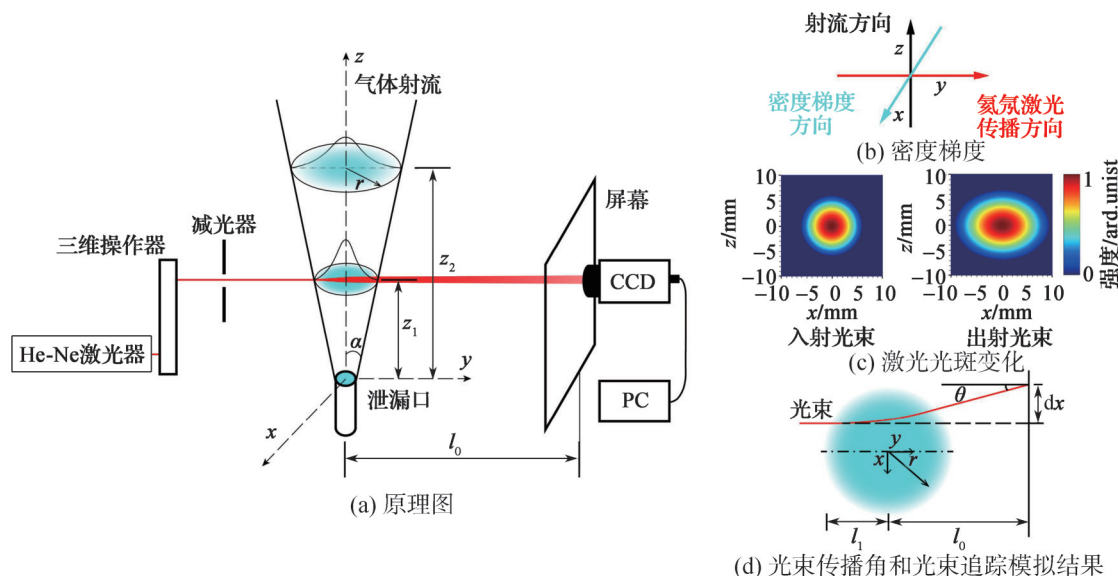


图1 基于激光可视化的气体射流压力检测原理

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogen jet pressure detection based on laser visualization

激光束的传播方向取决于折射率梯度,其偏折规律遵循向光密介质偏转。试验坐标系原点设定于直径 $d=2\text{ mm}$ 的喷嘴中心, z 轴平行于气体射流喷射方向。将激光束与气体射流的中心线对齐,从而产生椭圆形激光束变形。光束传播角度由 $\tan\theta=dx/l_0$ 确定,其中光斑接收屏幕至气体射流中心线的距离 l_0 为 5 m ,利用CCD相机测量屏幕上的激光束轮廓的水平变形量 dx 。基于100次重复测量获得的光束传播角和光束追踪模拟结果如图1(d)所示。

影响测量精度的关键参数之一是屏幕上激光束轮廓的水平变形量。当气体射流中心线与屏幕之间的距离(l_0)增加时,激光束轮廓的水平变形增大,表明此技术具有较高的测量灵敏度。屏幕上激光束轮廓的水平变形取决于激光束的传播角度 θ ,该角度 θ 与气体射流中沿激光路径的密度梯度积分成正比。气体射流的密度梯度越小,角度 θ 越小。

对于高度 z 的水平横截面,环境空气和气体射流之间的径向密度差呈高斯分布,可以表示为

$$\rho_{\text{air}} - \rho(z, r) = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{cl}}(z)) \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: ρ_{air} 为环境空气密度; $\rho(z, r)$ 为高度 z 、径向 r 位置处的密度; ρ_{cl} 为中心线上的密度,仅与高度 z 相关; λ 为气体射流体积分数与速度的径向扩散率之比,取值1.51; σ 为气体射流的特征宽度,在 $r=\sigma$ 处,气体射流速度是中心线速度的 $1/e$ 。

射流中任一点的密度可以表示为

$$\rho(z, r) = (\rho_{\text{cl}}(z) - \rho_{\text{air}}) \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right) + \rho_{\text{air}} \quad (2)$$

基于理想气体状态方程和二元气体混合物理论,可建立气体射流中心线处体积分数与其密度的函数关系。理想气体状态方程表述为

$$P = \rho_{\text{cl}}(z) R_{\text{g, mix}} T = \rho_{\text{cl}}(z) \frac{R}{M} T \quad (3)$$

式中: P 为气体射流压力, $\rho_{\text{cl}}(z)$ 为中心线处气体射流的密度; $R_{\text{g, mix}}$ 为气体射流的气体常数; T 为环境温度; R 为通用气体常数; M 为气体射流相对分子质量,计算公式如式(4)。

$$\frac{1}{M} = \frac{Y_{\text{cl}}(z)}{M_{\text{H}_2}} + \frac{1 - Y_{\text{cl}}(z)}{M_{\text{air}}} \quad (4)$$

式中: M_{H_2} 、 M_{air} 分别为氢气和空气的相对分子质量; $Y_{\text{cl}}(z)$ 为出口中心线处氢气质量分数。

此外,激光束轮廓的水平变形量 dx 可描述为

$$dx = l_0 \int_{-l_1}^{l_1} \frac{1}{n_{\text{air}}} \frac{\partial n}{\partial x} dy \quad (5)$$

式中: l_0 为气体射流中心到屏幕的距离; $2l_1$ 为气体射流的厚度; n_{air} 为环境空气的折射率; n 为气体射流折射率。

由于折射率与密度分布呈线性关系,因此根据Gladstone-Dale方程可知

$$n = 1 + K\rho \quad (6)$$

式中: K 为Gladstone-Dale常数; ρ 为密度。

根据上述分析, dx 可以表示如下:

$$dx = l_0 \int_{-\Delta l_1}^{\Delta l_1} \frac{K}{1 + K\rho_{\text{air}}} \frac{\partial \rho}{\partial x} dy \quad (7)$$

由式(7)可知, dx 由气体射流的密度分布确定。如果密度分布恒定,则 dx 与 l_0 成正比。通过测量激光光斑的尺寸大小,可以定量地获得气体射流的密度分布。

根据式(2),气体射流的 r 可以用横向坐标 x 和 y 表示:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (8)$$

ρ 可以表示为

$$\rho(x, y) = (\rho_{\text{cl}} - \rho_{\text{air}}) \exp\left(\frac{-x^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right) + \rho_{\text{air}} \quad (9)$$

结合式(7), dx 可进一步表示为

$$dx = l_0 \int_{-\Delta l_1}^{\Delta l_1} \frac{K}{1 + K\rho_{\text{air}}} \frac{\partial \rho(x, y)}{\partial x} dy \approx \frac{\sqrt{2\pi} (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{cl}}) l_0 K x}{\lambda \sigma (1 + K\rho_{\text{air}})} \exp\left(\frac{-x^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right) \quad (10)$$

$$\text{记 } A = \frac{\sqrt{2\pi} K}{\lambda \sigma (1 + K\rho_{\text{air}})}, B = \frac{M}{RT}, C = \frac{1}{\lambda^2 \sigma^2},$$

则椭圆激光光斑的半长轴尺寸 a 可以描述为

$$a = \Delta x_0 + dx = \Delta x_0 + A (BP - \rho_{\text{air}}) l_0 \Delta x_0 \exp(-C \Delta x_0^2) \quad (11)$$

式中: Δx_0 为入射激光束轮廓的半径。

记 $F = \Delta x_0 \exp(-C \Delta x_0^2)$,激光光斑面积 S 可表示为压力 P 的函数,具体如下:

$$S = \pi ab = \pi (dx + \Delta x_0) b = \pi b (l_0 FABP + \Delta x_0 - l_0 FA\rho_{\text{air}}) = EP + G \quad (12)$$

式中: a 和 b 分别为椭圆激光光斑的半长轴长和半短轴长, $E = \pi b l_0 FAB$, $G = \pi b (\Delta x_0 - l_0 FA\rho_{\text{air}})$ 。

根据式(12)可推导出光斑面积 S 和压力 P 呈线性关系。

在本研究中,激光可视化模型建立了光斑形变量与氢气泄漏压力之间的映射关系,核心依赖于激光在密度梯度中的折射路径变化。根据理想气体状态方程计算气体密度为

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (13)$$

由式(13)可知,受气体温度影响,在一定压力 P 下,气体密度 ρ 随温度 T 升高而降低,进而影响折射率分布和激光光斑变形特征。然而,如式(6)所示,气体折射率对密度变化的响应表现为弱线性依赖关系。因此,温度变化主要通过调控密度来间接影响折射率和光斑特征。为定量评估温度效应,在模型中引入温度扰动项,针对不同环境温度(273 K, 293 K, 313 K)下

的折射率变化进行了敏感性分析, 计算其对预测压力的影响程度。结果表明, 在铁路典型运行环境温度范围(0~40℃)内, 光斑面积与泄漏压力之间的线性映射关系保持稳定, 决定系数 R^2 波动不超过0.015, 模型表现出良好的鲁棒性。

1.2 抗干扰性能分析

为验证本方案在轨道交通实际场景中的适用性, 需要进一步系统评估检测系统在典型干扰因素下的鲁棒性。

轨道车辆运行过程中的振动主要由轨道不平顺、轮轨相互作用及车体结构谐振引起, 呈现周期性或随机性特征。轨道车辆振动频率一般分布在1~100 Hz频段, 其中设备安装区域通常以中低频振动为主。氢气泄漏诱导的光斑形变属于稳定的光学响应过程, 相比之下, 振动干扰主要作用于激光束传播路径和图像采集稳定性。振动可能导致激光发射方向或探测器相对位置发生轻微偏移, 从而降低图像边缘清晰度及轮廓定位精度。为缓解该影响, 系统采用多点支撑及防振安装方式, 结合时序滤波与图像增强算法, 可有效抑制由中高频振动引入的短时扰动。同时, 神经网络模型以光斑面积、椭圆度等统计量作为特征输入, 该类全局尺度特征对瞬时扰动的敏感性较低, 具备天然抗干扰能力。此外, 系统可根据帧间图像的相关性动态调整分析窗口, 增强对低频扰动的适应性。因此, 在典型的低中频振动环境下, 系统压力预测误差影响有限。

轨道交通运行环境中的电磁干扰(EMI)主要源自牵引电机、电力电子设备及无线通信系统等, 它对依赖电信号的传统传感器构成挑战。本方案采用的激光发射与成像机制均基于光学原理, 不包含电磁感应元件, 具备天然的抗EMI能力。图像采集模块采用数字相机, 并

通过屏蔽线缆将图像数据传输至嵌入式处理模块。后续的信号处理与模型运算部分均在数字域内完成, 通过设置循环冗余校验(CRC)、冗余数据缓存等措施进一步增强系统的通信稳定性。在工程实现层面, 系统可采用光纤通信替代电缆连接, 从根本上规避电磁耦合干扰。因此, 所提出的激光可视化检测系统在轨道交通复杂的电磁环境中仍具备较强的抗干扰能力。

1.3 机器学习方法建模

针对氢能轨道车辆氢安全监测的特殊需求, 本研究提出一种基于机器学习的激光光斑图像分析方法, 实现气体泄漏压力的智能预测。轨道车辆运行环境复杂, 泄漏参数组合(如泄漏孔径、压力、流速等)与激光光斑变形量之间的映射关系呈现高度非线性特征。传统的理论计算方法虽能建立数学模型, 但其计算复杂度难以满足轨道实时监测的时效性要求。为此, 本文构建了一种自适应神经网络模型, 利用其强大的非线性拟合能力和高速计算优势, 可快速建立从光斑特征到泄漏参数的反演模型, 并通过持续学习历史数据不断提升其在振动、温变等复杂工况下的预测准确性。

机器学习方法流程概述如图2所示。首先收集激光光斑图像以构建数据集, 随后采用高斯拟合算法进行图像预处理; 接着, 进行图像的灰度转化, 并利用简单的阈值操作从背景分割激光光斑; 最后, 使用Bounding Box对分割的激光光斑进行标记, 获得激光光斑的长轴和短轴长度。其中, 激光光斑的半长轴定义为从中心到最远边缘点的水平线, 且半长轴与水平轴(x轴)重合; 同理, 半短轴定义为从中心到最远边缘点的垂直线, 半短轴与垂直轴(z轴)重合。将提取的激光光斑图像的几何参数输入至神经网络模型, 实现对气体射流压力的预测。

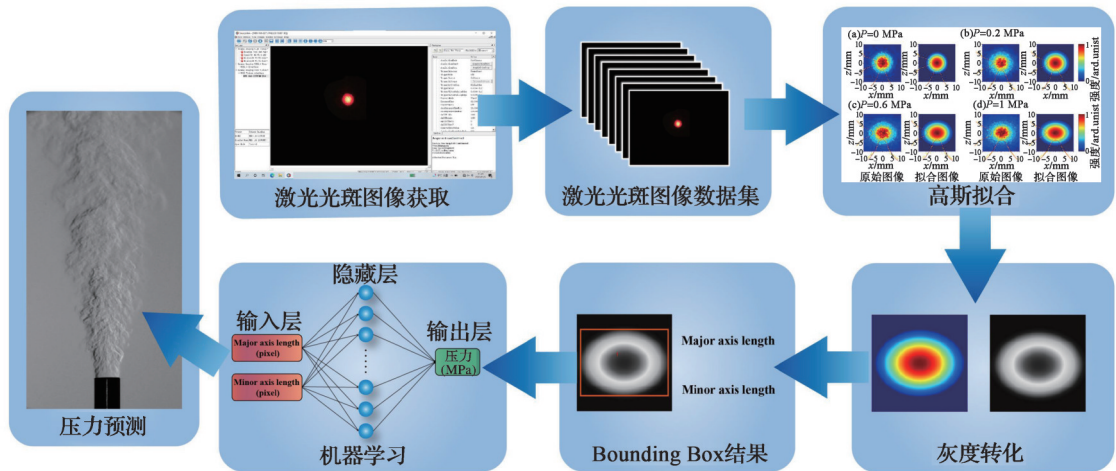


图2 机器学习方法流程概述
Fig. 2 Process flow of machine learning method

在神经网络架构中, 多层感知机(MLP)网络被应用于气体射流压力的预测。MLP由输入层、一个或多个隐藏层和以及输出层组成, 其训练过程采用误差

反向传播算法。误差最小化可通过各种算法实现, 包括梯度下降算法(GD)、Levenberg-Marquardt算法(LM)和共轭梯度算法(CG)。本文选用LM算法进行

误差最小化, 其优势在于能以接近二阶训练速度进行优化, 避免 Hessian 矩阵的高计算成本。选择激光光斑的长轴和短轴长度作为神经网络输入参数, 选择气体射流压力值作为输出参数。

神经网络拓扑结构 (包括隐藏层及神经元数量) 对模型的预测精度和计算复杂度具有决定性影响。预测的复杂性会影响隐藏层和神经元的数量。本文采用具有可变数量神经元 (2~54 个神经元) 的隐藏层开发 MLP 网络, 并使用 MATLAB R2023a 设计和测试神经网络模型。

为评估人工神经网络性能并确定最佳模型, 采用了方均根误差 (A_{RMSE})、平均绝对误差 (A_{MAE}) 和平方相关系数 (A_{R2}) 作为性能评价指标对测试模型进行评估, 如式(14)~式(16)。

$$A_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (14)$$

$$A_{\text{MAE}} = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (15)$$

$$A_{R2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

式中: P_i 为模型预测值; O_i 为模型试验值; $\bar{O}$ 为模型平均试验值; n 为采样数。

2 氢泄漏压力检测试验平台

为开展氢泄漏压力的检测试验, 设计并搭建了氢泄漏可视化试验平台, 如图3所示。该平台主要由气路系统、光路系统和图像采集系统3部分组成, 其中气路系统严格参照轨道交通车辆供氢系统的典型布局进行设计。

为确保试验安全性与数据可靠性, 选用物理性质与氢气高度接近的氦气作为试验介质。氦气在关键物理参数, 尤其是光学折射率方面与氢气最为接近, 能有效模拟氢气泄漏引起的光斑变形响应。气路系统由双冗余高压氦气瓶组 (2×40 L@15 MPa, 符合 EN 45545 标准) 供气, 通过比例减压阀和快速响应电磁阀 (动作时间短于 50 ms) 控制气体流量。采用直径 2 mm 的标准喷嘴模拟泄漏工况, 并利用高精度质量流量传感器 (精度±0.5%FS) 和压力变送器 (精度等级 0.1 级) 实时监测气体参数。光路系统采用氦氖激光器 (Lumentum 1107P, 波长 $\lambda=632.8$ nm, 束腰半径 $w_0 \approx 0.48$ mm) 作为光源, 配合电动位移平台 (分辨率 3 μm) 实现激光束的精确对焦与稳定传输。图像采集系统由高速 CCD 相机 (Phantom VEO 440L, 帧率 290 000 帧/s) 和低畸变镜头 (焦距 $f=22$ mm) 组成, 并配置抗环境光干扰的黑色背景观测屏, 确保在复杂工况下仍能获取高信噪比的激光光斑图像。整个试验环境维持在标准大气压 (101.325 kPa) 和恒温 [(293±1) K] 条件下进行, 以满足轨道交通氢安全检测的严苛要求。

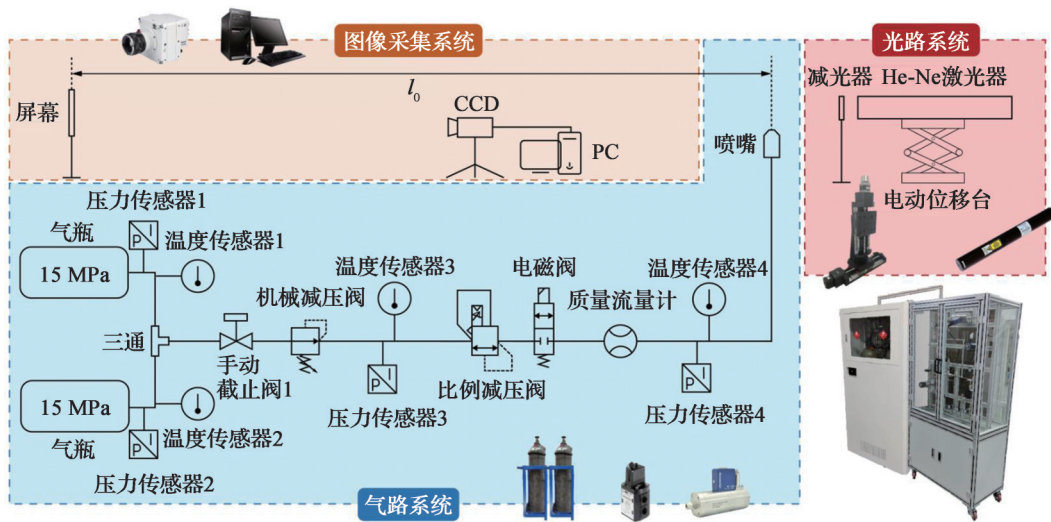


图3 氢泄漏可视化试验平台

Fig. 3 Experimental platform of hydrogen leakage visualization

3 泄漏压力检测结果与讨论

3.1 基于激光可视化技术的泄漏压力检测

为研究氢能轨道车辆供氢系统泄漏特性, 设计专用

气体泄漏模拟试验系统, 试验采用直径 2 mm 的标准喷嘴模拟供氢系统可能出现的泄漏工况。利用定位精度为 ±3 μm 的高精度电动位移平台, 实现激光束与气体射流中心线的精确对位, 确保在模拟列车运行环境的振动条件下仍能维持 1.5 mm 的稳定测量距离。为复现车厢内实

际泄漏监测场景, 测量系统采用5 m长光路设计。试验获取的不同压力工况下的激光光斑图像如图4所示。

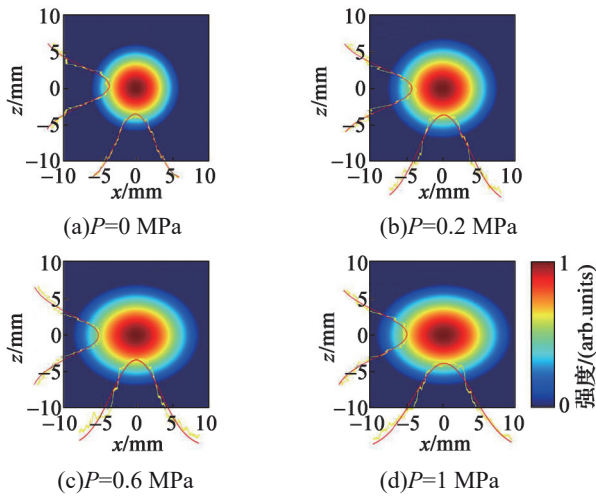


图4 激光束轮廓随泄漏压力的变化

Fig. 4 Variations in laser beam profile with leakage pressure fluctuations

图4(a)展示了环境空气无泄漏条件下未受干扰的基准光斑, 其水平方向 x 轴和垂直方向 z 轴分别对应轨道车辆的横向和纵向; 图4(b)~图4(d)分别呈现了泄漏压力为0.2 MPa、0.6 MPa和1 MPa时的光斑形变特征。结果表明, 氢泄漏形成的气体射流会产生显著的气体透镜效应, 随着泄漏压力升高, 光斑在水平方向 x 轴的形变量呈现规律性增大, 而在垂直方向 z 轴形变可忽略不计。这一特性为轨道车辆在复杂环境下实现高可靠性泄漏检测提供了重要依据。

通过测量激光光斑的长轴与短轴尺寸, 计算了相应光斑面积。在0.2 MPa、0.6 MPa和1 MPa压力下, 随着出口压力增加, 激光束轮廓变形增加。图4中的深蓝色区域表示光斑强度近似0的区域, 而红黄区域代表光斑强度较高的区域, 整体呈高斯分布, 所有子图采用统一强度范围0~1。各子图中, 水平与垂直方向曲线分别为两个正交方向上光斑强度的试验测量值及对应的高斯拟合曲线。在半峰全宽(FWHM)区域内, 试验得到的黄色高斯强度曲线与红色拟合曲线的形状近似一致。

对于直径为2 mm的喷嘴, 激光光斑面积与泄漏压力的关系如图5所示。从图5可以看出, 激光光斑的面积与泄漏压力近似线性, 通过线性拟合得到相应的函数, 可表示为 $S=3.28P+162.7$ 。

3.2 基于机器学习的泄漏压力预测

针对氢能轨道车辆氢泄漏检测需求, 在0.1~1 MPa压力范围(间隔0.02 MPa)内, 系统采集了共46个压力等级下的激光光斑图像。在每个压力点获取1 000张图像, 构建了包含46 000个样本的专用数据集。为开发基于人工神经网络的泄漏压力预测模型, 将数据集

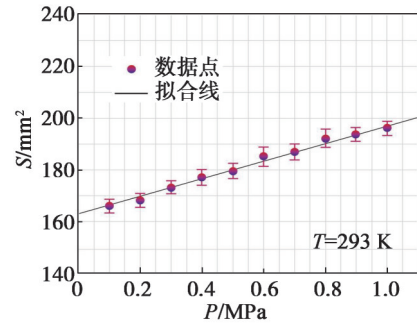


图5 激光光斑面积与泄漏压力的函数关系

Fig. 5 Functional relationship between laser spot area and leakage pressure

按70:15:15的比例划分为训练集、交叉验证集和测试集。为确定人工神经网络的最优结构, 测试了隐藏层包含4~54个神经元的 R^2 值和RMSE值。经初步试验, 隐藏层含2个或3个神经元的网络性能较差, 故予以排除。结果表明, 拓扑结构为2-16-1的网络性能最优, 具有最高的 R^2 值(图6)和更高的RMSE值(图7)。该网络包含两个输入参数(激光光斑的长轴长度和短轴长度)、一个含16个神经元的隐藏层和一个输出层(泄漏压力), 如图8所示。最优网络的 R^2 值高达0.988, RMSE值低至0.004 6 MPa。

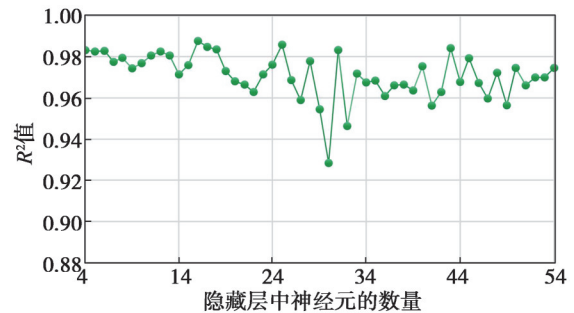


图6 隐藏层中具有不同神经元数量的神经网络模型的 R^2 值

Fig. 6 R^2 values of neural network models with different numbers of neurons in the hidden layer

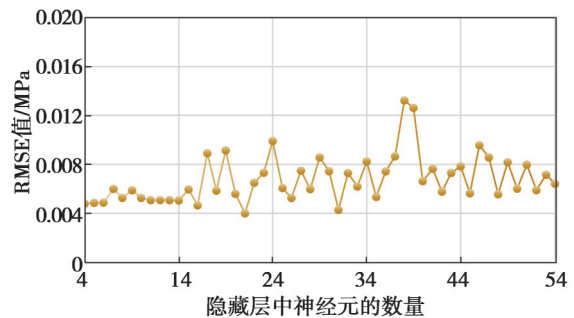


图7 隐藏层中具有不同神经元数量的神经网络模型的RMSE值

Fig. 7 RMSE values of neural network models with different numbers of neurons in the hidden layer

为评估所开发模型的性能, 分别采用激光可视化技术和人工神经网络模型预测泄漏压力。图9对比了两种方法的预测压力与实际压力值, 表1显示了评估的统计结果。与激光可视化技术相比, 神经网络模型的预

测结果精度更高，离散程度更低，与实际压力值吻合度更高。综合结果表明，将激光可视化技术与神经网络结合，可以实现更优的预测效果。

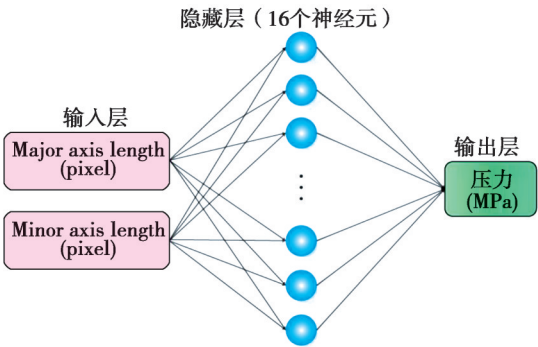


图8 用于泄漏压力预测的最优神经网络拓扑结构

Fig. 8 Optimal neural network topology for leakage pressure prediction

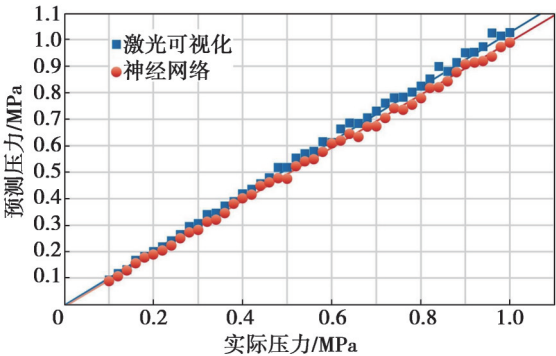


图9 单独使用激光可视化技术和结合神经网络的结果比较

Fig. 9 Comparison between results from laser visualization techniques alone and results from a combination with neural networks

表1 泄漏压力预测模型的统计分析结果

Table 1 Statistical analysis results of leakage pressure prediction model

方法	R^2 值	MAE 值/MPa	RMSE 值/MPa
结合 ANN	0.988	0.004 4	0.004 6
激光可视化	0.991	0.010 6	0.018 9

4 结论

本研究针对氢能轨道车辆提出了一种创新的氢泄漏压力检测方法，结合激光可视化技术与机器学习算法实现了泄漏压力的智能化监测。采用非接触式光学检测原理，通过分析激光束穿过氢射流中心线时产生的光斑变形特性，准确反映气体泄漏压力。基于氢射流密度分布和折射率场特性，建立了泄漏压力与激光束径向变形量的线性数学模型；然后进一步地开发了拓扑结构为2-16-1的MLP神经网络模型，精确构建了光斑特征与泄漏压力的映射关系，试验验证表明该模型具有优异的预测性能（ R^2 值为0.988，RMSE值为0.004 6 MPa）。相较于传统检测技术，该技术具有成本低、灵敏度高、响

应快、非侵入及本质安全等优势，适用于氢能轨道车辆供氢管路泄漏的静态和动态特性检测。

参考文献：

[1] ASAHARA M, IWATSUKI K, KANG D, et al. Characterization of hydrogen jets considering leakage from high-pressure storage tanks using shadowgraphy[J]. International journal of hydrogen energy, 2024, 61: 1456-1472.

[2] VANSELOW C, FISCHER A. Influence of inhomogeneous refractive index fields on particle image velocimetry[J]. Optics and lasers in engineering, 2018, 107: 221-230.

[3] BISWAS S, QIAO L. A comprehensive statistical investigation of schlieren image velocimetry(SIV) using high-velocity helium jet[J]. Experiments in fluids, 2017, 58(3): 18.

[4] CHERNYAVSKY B, WU T C, PÉNEAU F, et al. Numerical and experimental investigation of buoyant gas release: application to hydrogen jets[J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(3): 2645-2655.

[5] JIANG Guanlei, WEN Ming, YE Jifei, et al. A combined measurement method with PIV and schlieren technology on under expanded supersonic jet[J]. Advanced materials research, 2011, 346: 842-846.

[6] JO S, GORE J P. Laser ignition energy for turbulent premixed hydrogen air jets[J]. Combustion and flame, 2022, 236: 111767.

[7] RUGGLES A J. Statistically advanced, self-similar, radial probability density functions of atmospheric and under-expanded hydrogen jets[J]. Experiments in fluids, 2015, 56 (11): 202.

[8] SCHEFER R W, HOUF W G, WILLIAMS T C. Investigation of small-scale unintended releases of hydrogen: momentum-dominated regime[J]. International journal of hydrogen energy, 2008, 33(21): 6373-6384.

[9] KANG Yong, MA Shuye, SONG Bingxue, et al. Study on the hydrogen leakage diffusion behavior by obstacles in confined spaces[J]. Fuel, 2024, 358(Part A): 130110.

[10] CARAMIA G, AMIRANTE R, DE PALMA P. Unsteady RANS simulations of under-expanded hydrogen jets for internal combustion engines[J]. International journal of hydrogen energy, 2024, 96: 849-859.

[11] 李雪芳, 何倩, 柯道友, 等. 高压氢气小孔泄漏射流分层流动模型与验证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58 (12): 1095-1100.

LI Xuefang, HE Qian, CHRISTOPHER D M, et al. Validation of flow partitioning model for high pressure hydrogen jets through small orifices[J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2018, 58(12): 1095-1100.

[12] STEWART J R. CFD modelling of underexpanded hydrogen jets exiting rectangular shaped openings[J]. Process safety and environmental protection, 2020, 139: 283-296.

- [13] HOURRI A, GOMEZ F, ANGERS B, et al. Computational study of horizontal subsonic free jets of hydrogen: validation and classical similarity analysis[J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(24): 15913-15918.
- [14] MALAKHOV A A, AVDEENKOV A V, DU TOIT M H, et al. CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation[J]. International journal of hydrogen energy, 2020, 45(15): 9231-9240.
- [15] VAN HINSBERG N P, RÖSGEN T. Density measurements using near-field background-oriented schlieren[J]. Experiments in fluids, 2014, 55(4): 1720.
- [16] VESER A, KUZNETSOV M, FAST G, et al. The structure and flame propagation regimes in turbulent hydrogen jets [J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(3): 2351-2359.
- [17] TAN D J, EDGINGTON-MITCHELL D, HONNERY D. Measurement of density in axisymmetric jets using a novel background-oriented schlieren(BOS) technique[J]. Experiments in fluids, 2015, 56(11): 204.
- [18] LI Jianwei, TIAN Zhonghao, YANG Qingqing, et al. A new visual approach with the concentration calibration method for the hydrogen leakage and distribution research[J]. Fuel, 2023, 346: 128132.
- [19] ZOU Weitao, LI Jianwei, WAN Xinming, et al. Investigation of concentration measurement for hydrogen leakage with a new calibration visual approach[J]. International journal of hydrogen energy, 2023, 48(72): 28235-28245.
- [20] 段强领, 曾倩, 李萍, 等. 管道内障碍物对高压氢泄漏自燃特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(9): 164-170.
- DUAN Qiangling, ZENG Qian, LI Ping, et al. Study on influence of obstacles on self-ignition of high-pressure hydrogen leakage[J]. China safety science journal, 2020, 30(9): 164-170.
- [21] ZHANG Gengxin, ZHANG Yifei, SHI Penghua, et al. Near-field jet characteristics of a single-hole medium-/low-pressure hydrogen injector[J]. Energy, 2025, 314: 134122.
- [22] ZHANG Xinqi, SHI Jihao, LI Junjie, et al. Hydrogen jet and diffusion modeling by physics-informed graph neural network[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2025, 207: 114898.

Hydrogen leakage pressure detecting method for hydrogen rail vehicles

YAO Luqiao¹, LI Jianwei^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Yangtze River Delta Research Institute, Beijing Institute of Technology, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

Abstract: Hydrogen safety monitoring is a crucial element in ensuring the safe operation of hydrogen-powered rail vehicles. To address the limitations of existing hydrogen leakage pressure detection methods in terms of real-time performance and accuracy, this paper proposes an intelligent detection method that combines laser visualization technology with machine learning. By establishing a quantitative relationship between hydrogen leakage pressure and deformation in the laser beam profile, geometric features were extracted from laser spots using image processing techniques. These parameters were then used to construct a prediction model based on neural networks. Experimental results demonstrate the excellent predictive performance of the optimized neural network model (with a 2-16-1 topology), achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.988 and a root mean square error (RMSE) of 0.004 6. This method enables non-contact, high-precision detection of hydrogen leakage pressure and offers a novel intelligent monitoring solution for hydrogen-powered rail vehicles, holding significant engineering application value in enhancing hydrogen safety in rail transit.

Keywords: hydrogen jet; visualization; laser beam; rail vehicle; leakage detection