DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.104

基于智能巡检机器人系统平台的列车空气泄漏超声波检测装置设计

王文超[1]，王俊平[1]，丁建明[2]，朱谦怿[2]，陈欣安[1]
（1.中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲 412001；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

摘　要：民众日益增长的交通出行需求，直接推动了列车及其营运线路的开通与增长，也给列车日检工作带来了不断增大的压力。作为保障列车制动安全的重要环节，空气制动管路的密封性检测在列车日检作业中不可或缺。为满足实际需求，弥补当前智能巡检机器人巡检功能短缺，文章以双臂机器人为平台，基于泄漏小孔产生湍流、湍流产生超声波的原理，采用“一板两头”结构型式，设计开发了一套空气泄漏超声波检测装置。从信号采集、信号放大和滤波等预处理功能层面对装置结构和硬件配置展开设计，并基于FFT与Parseval定理设计了气体泄漏检测判断算法。通过模拟检测不同孔径（0.125 mm, 0.200 mm, 0.400 mm）的小孔在不同工况下的泄漏状况，验证了试验样机在0.3 s采集时间内能满足接收与正确判断50 °锥角、600 mm范围内气体泄漏信号的功能需求。

关键词：列车日检；双臂机器人；气体泄漏；超声波探测；城市轨道交通

中图分类号：U270.7；TP18　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）03-0164-09

0　引言

城市轨道交通作为主要的城市交通形式，车辆的安全性、可靠性是乘客安全出行的必要条件。城轨车辆的使用年限一般为30年，为保证车辆的安全运营，需要合理、科学地对车辆进行检查和维护。

城市轨道交通事业的蓬勃发展及其营运线路的增长，不可避免地给车辆日常检修带来了更为繁重的工作，给检修作业人员带来了极大的工作压力，同时，愈加大量的检修数据更加难以追溯与共享，检修数据利用率低。

按照城轨车辆检修部门通常的管理工作要求，每日列车运营结束后，车辆检修部门需在凌晨非营运时间对回库列车进行人工检修。若在当前阶段仍然按照传统的“计划修”人工检修模式进行作业，检修的效率和质量将难以保证；同时，传统的人工检修也存在夜班作业安全风险高、停送电交接时间较长、夜班人员疲劳作业导致的漏检漏修、检修质量参差不齐、检修数据溯源困难等问题。

目前，诸多研发机构与企业都在关注城市轨道交通“状态修”领域[1]，尤其在地铁列车车底零部件缺陷、异常检测方面，通过研发巡检机器人、作业机器人等自动化、智能化设备来帮助提升地铁车辆检修效率、降低作业人员劳动强度。当前的巡检功能主要集中在基于图像识别对列车车底、车侧进行零部件丢失、松动、破损、漏油等故障的检测，检测类型固化，相比于列车日检完全规程，现有的巡检机器人[2-3]产品功能还有待进一步补充与完备。

需要特别指出的是，关于列车制动气体的泄漏检测尚处于日检作业自动化技术的应用空白，如何友好、高效地集成气体泄漏检测功能是现阶段巡检机器人系统优化的一大关键方向。

通信作者：王文超，男，硕士，主要从事智能设备开发与设计；E-mail: 17863130890@163.com

引用格式：王文超, 王俊平, 丁建明, 等. 基于智能巡检机器人系统平台的列车空气泄漏超声波检测装置设计[J]. 机车电传动, 2024(3): 164-172. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.104.

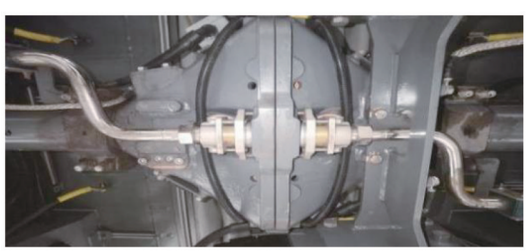
Citation：WANG Wenchao, WANG Junping, DING Jianming, et al. Design of ultrasonic detection device for train air leakage based on intelligent inspection robot system platform[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 164-172.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.104.

1　气体泄漏检测背景

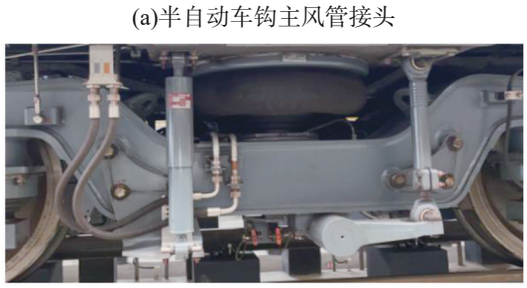
列车气体泄漏故障基本发生在空气制动系统。地铁的制动工况较复杂，特别是在站内的精确制动，其制动可靠性关乎列车的运行安全和乘客的人身安全。

列车制动方式有2种：电制动和空气制动[4]，当电制动不能满足制动需求时，电制动与空气制动进行复合制动。

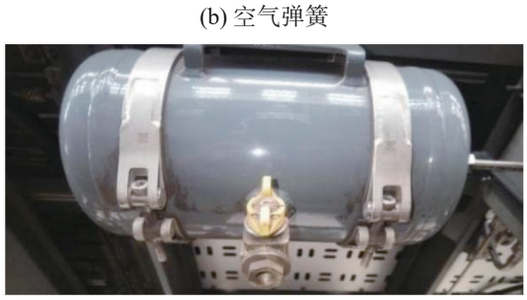
空气制动以压缩空气为动力传输介质，压缩空气由列车的供气系统提供，其产生、存储与传输环节分布在全列车范围内的管路、阀门、气缸等零部件，如图1所示。制动的频繁触发会加速这些储气、导气部件的磨损、腐蚀，进而形成泄漏孔。由于泄漏孔内、外环境存在压强差，管道内气体会持续向外泄漏，进而影响压缩空气的气压值，这不仅会加速压缩空气沿程压力的快速衰减，而且会导致列车制动力分布不合理，进而影响制动安全。因此，列车日检作业将气体泄漏检测作为一个重要的检测环节。



(a)半自动车钩主风管接头



(b) 空气弹簧



(c) 辅助气缸

图1　地铁列车底部典型的储气与导气部件

Fig. 1　Typical air storage and guide components at the bottom of subway train

目前，列车日检作业人员主要是待列车回库静止停放后，通过观察各压力仪表显示值与标准值之间的差值来判断是否存在气体泄漏情况；若有气体泄漏，再通过对全车进行人耳探听或抹肥皂水观察气泡等方式对管道泄漏状态进行辨别、记录与处置。然而，用肥皂水涂抹并观察气泡的方式极其繁琐，耗时费力，还难以排查到位，人耳听声又存在如下问题：

①人耳听声的辨别能力有限。由于人耳可听声的频率一般为20~20 000 Hz，通过人耳听声的方式只能对严重泄漏的故障进行辨别，而无法对早期的小孔泄漏故障进行辨别。

②人工甄别结果具有一定的主观性和不确定性。听声监测结果与工作人员自身的声道结构、从业经验、工作态度等存在严重依赖关系，常常导致泄漏监测结果存在误判、漏判等不确定性。

③人工听声的数据和信息难以溯源。无法动态记录列车通过时管道泄漏声音的状态数据，无法进一步分析利用数据和提升管理。

④人工听声难以准确定位泄漏源。由于泄漏射流在空气中会逐渐以涡旋形式扩散，声场分布复杂，人耳难以定位泄漏位置。

⑤人工听声鉴别模式影响工作人员的身体健康。长期贴近列车监听噪声，人的听觉功能会衰退。

另外，地铁日检作业规程覆盖了车辆底部全自动车钩、空气弹簧、辅助控制箱、风缸、半永久牵引拉杆、辅助升弓装置、半自动车钩、空压机等一级部件的检测作业，覆盖范围大，单纯依靠人力难以顾及整车检测。

针对上述背景，为提升产品竞争力，促使列检进一步智能化，有必要探索一种便捷可靠的列车制动气体泄漏源检测、定位方法，将其同巡检机器人结合，对上述部件的风管接头与裂纹、气缸缸体裂纹与阀门等进行气体泄漏检测，以实现检测自动化、提高检测效率、提升可靠性，实现检测数据和检测结果的可溯源，保障列车制动安全性。

2　空气泄漏超声波检测装置设计

总体来说，现有的智能巡检机器人系统已能覆盖绝大多数列车零部件故障检测，达到了较高水平的日检应用效果，但是还不具备气体泄漏检测功能，无法满足日检作业中针对列车制动管路气体泄漏情况的自动化检测需求，为促使列检进一步智能化，有必要探索一种便捷可靠的列车制动气体泄漏源检测方法。

2.1　空气泄漏检测方法综述

针对非可燃性气体，根据目标检测部件的类型和密封要求的不同，可采用2类常用气密性检测方法——湿式检测法与干式检测法。湿式检测法不需要较高的操作技术及特殊设备，主要有气泡法、涂抹法等，人工使用肥皂水就可以操作，但由于操作者主观性影响

等，该类方法很容易误判。到20世纪90年代初，干式检测法开始兴起，鉴于气体泄漏会引起储气内、外部环境的相关参数变化，则可据此进行泄漏判断。此外，常用的气密性检测方法还包括气体化学变化法、放射性同位素法、质谱法、红外热成像法、超声波法等，各类方法的优缺点如表1所示[5]。

根据表1比较可知，传统湿式检测方法不能满足高精度、高效率和自动化的检测需求。基于气体分析的质谱检测法又存在着仪器昂贵等问题。相较之下，超声波和红外检测技术在可以满足检测精度的前提下，操作方便、造价适中，是泄漏检测应用前景较好的2种方法，并且超声波设备性价比更高。

超声波法分为有源检测和无源检测。有源超声检测的典型应用是超声相控阵探伤[6]，其通过阵列发射超声波再接收反射波，构成全采集矩阵，最后根据聚焦算法形成检测目标剖面图，通过观察检测是否存在裂纹、孔隙等损伤。对于管道泄漏，该方法可用于精确定位泄漏位置和估算泄漏孔径，但耗时长，与现场检修的要求不符。无源超声波检测则通过超声探头接收泄漏产生的超声波，从而判断是否泄漏，同时搭配多元阵列能够实现泄漏源的位置估计。泄漏超声的形成机理可以通过小孔泄漏模型解释。

2.2 基于无源超声波的泄漏检测装置方案

2.2.1 气体泄漏激发超声波原理

根据已有试验数据显示，当小孔和接头类管道发生气体泄漏时，由于管道内外的压力差，泄漏的气体会在通过泄漏点达到外部时形成湍流，而湍流是产生超声的必要条件，当雷诺数大于 4 000时，就会产生湍流[7]，雷诺数的计算公式为

$$Re=\frac{\rho_c V d}{\mu} \tag{1}$$

式中：Re为雷诺数；ρ_c为气流密度；μ为流体的动力黏度，在一般温度293.15 K(20 ℃)、标准大气压101.3 kPa条件下，约为常数值1.791×10^{-5} Pa·s；V为气体出射速度；d为泄漏孔半径。

气流密度ρ_c的计算公式为[8]

$$\rho_c=\begin{cases}\dfrac{P_a+P}{RT_0}\left(\dfrac{P_a}{P_a+P}\right)^{\frac{1}{k}}, & 0.528<\dfrac{P_a}{P_a+P}<1\\ 0.8333\dfrac{P_a+P}{RT_0}, & 0<\dfrac{P_a}{P_a+P}\leqslant 0.528\end{cases} \tag{2}$$

式中：k为比热容比，对于多原子气体，$k=1.4$；R为气体常数，R=287.1 J/(kg·K)；T_0表示一般温度，取293.15 K(20 ℃)；P_a为标准大气压强101.3 kPa；P为容器内部压强。

另外，管道内一维流动的气体处于等温流动和绝热流动过程，满足三大守恒定律[9]。结合这一物理规律和流体力学相关理论，能够构建小孔泄漏模型，图2为管道气体泄漏示意图，图2中“1”为输气起点横截面的中心，“2”为泄漏孔所处位置的横截面的中心，“3”为泄漏孔的位置，“L_e”表示泄漏口到输气起点的距离[10]。

根据欧洲输气管道事故数据组织（EGIG）的分析，孔径在20 mm以下的均可以使用小孔泄漏模型计算[11]。在泄漏孔形成初期，半径非常小，因此适用于小孔泄漏模型，根据相关文献，其出射速度为[12-14]

表1 气密性检测方法

Table 1 Testing methods for air tightness

方法	原理	优点	局限性
气泡法	气体泄漏处会外溢气体，水浸情况下会在水中产生气泡	能直接且迅速地找到泄漏点	体积较大的设备不方便浸水检测；列车储气、导气件众多，难以全面且快速地进行全车检测
涂抹法	在储气、导气件表面涂抹肥皂水，若有泄漏，则产生气泡	操作方便，快捷	不能进行自动化检测，且气泡不易观察
超声波法	气体泄漏将产生超声波，利用超声波探测设备可检测泄漏	可搭载于自动化设备上，对泄漏敏感，结果获取迅速，定位准确	易受环境噪声等因素干扰
气体化学变化法	在储气、导气件内充入化学气体(如氦气)，在容器外放变色试纸，若泄漏，试纸变色	简单明了，指标清晰可辨，检测设备简单	化学气体的充入过程繁琐，化学药品危险性高，不方便对全车范围进行检测
放射性同位素法	充压时混入弱放射性气体，用放射性检测设备检测泄漏	灵敏度高，反应速度快	制动充压需要额外的设备与步骤，放射性气体对人体有害
质谱检测法	以氦气作为示踪气体对气体泄漏进行跟踪/定位检测	灵敏度高，无毒安全，反应速度快	制动充压需要额外的设备与步骤，设备投资大
红外检测	综合应用热成像检测和红外图像处理对泄漏进行检测	快速，直观，可直接检测泄漏区域	设备投资大且检测易受环境影响
差压法	测量列车储气、导气件内外压力变化来检测泄漏	设备简单，结果显示直观	全车各类储气件繁多，均安装检测设备不现实，且设备易受环境影响

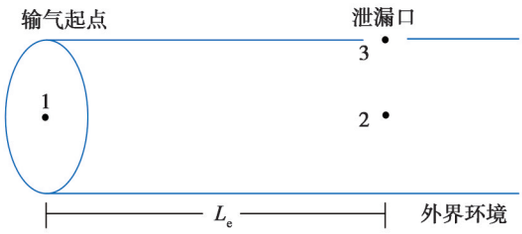


图2　管道气体泄漏示意图

Fig. 2　Schematic diagram of pipeline air leakage

$$V=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{2k}{k-1}\cdot \mathrm{R}T\left[1-\left(\dfrac{P_a}{P+P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, & 0.528<\dfrac{P_a}{P_2+P_a}\leqslant 1\\ \sqrt{0.8333k\mathrm{R}T}, & 0<\dfrac{P_a}{P_2+P_a}\leqslant 0.528\end{cases} \tag{3}$$

式中：k为比热容，对于多原子气体，k=1.4；标准大气压强P_a=101.3 kPa；气体常数R=287.1 J/(kg·K)；T为管道内气体温度。

根据绝热流动的假设，点“1”和点“2”处的温度有$T_1=T_2=T=T_0$，取一般温度293.15 K（20 ℃）；容器内部点“2”处压强为P_2，根据绝热流动的假设，可认为$P_2=P_1=P$。针对列车关键气压位置——制动风管和受电弓风管，两者分别代表列车上高气压与低气压位置，在工作时实测其内部压强分别为850 kPa和350 kPa，而且由于小孔泄漏实际是非常微弱的，管路中的压力变化非常缓慢，可以认为在一段时期内是恒定的；又由雷诺数Re与气流密度ρ_c的计算公式可知，压强与管内气流密度、雷诺数成正比，管内压强越大，雷诺数越大，越能导致形成湍流，以激发超声波。因此，取最小值P=350 kPa作为管道内部压强计算值，以证实列车各位置风管发生泄漏时的超声波激发情况。

经计算，可得气流密度ρ_c=4.49 kg/m^3，射速V=313.3 m/s。对于列车空气管路，其泄漏孔尺寸一般为毫米级，在此取泄漏小孔半径范围为0.1~20.0 mm。综上汇总计算后可得，当泄漏小孔半径d=20 mm时，雷诺数Re=1 570 873.26；泄漏小孔半径d=0.1 mm时，雷诺数Re=7 854.37，雷诺数均大于4 000，这说明当小孔泄漏发生时湍流也随之产生，即产生了可供检测识别的超声波信号。

由于超声波具有能量，则可以利用其与检测环境背景噪声所具有的能量差异来判断当前检测区域是否存在泄漏情况。重心频率是用来描述信号在频谱中分量较大的信号成分的频率，反映了信号功率谱的分布情况[15]。据参考文献和试验可知，小孔和接头类气体泄漏所产生的声波频率多分布在0~200 kHz，主要集中在10~50 kHz，重心频率40 kHz处的信噪比较强。因此，选择检测40 kHz频率附近的泄漏信号将有更高的灵敏度。利用这一原理，可设计针对小孔和接头类气体泄漏的超声检测装置。

为此，本文提出并设计了一套基于超声波探测原理的列车制动气体泄漏检测装置（以下简称“空气泄漏超声波检测装置”），采用压电式超声波接收探头检测声波信号，分析压电转换后表征声波信号强度的电信号值，聚焦频段35~45 kHz的信号，通过频谱、时频谱分析等信号处理手段判断当前探测点位附近是否存在气体泄漏的情况。

2.2.2　空气泄漏检测装置功能定义

考虑到后续工程的应用推广，经技术实用性、迁移性和可行性评估，采用模块化设计，定义空气泄漏超声波检测装置的基本功能如下：

1）信号采集功能

空气泄漏超声波检测装置应包含超声波信号采集器，采集器应可同时与精扫相机模块集成安装在六自由度机械臂末端执行器上，具备单点位0.3 s采集时间内完成灵敏接收50 °锥形区域600 mm范围内声波信号的功能。

2）预处理功能

针对采集器所接收的环境声波，空气泄漏超声波检测装置应有数据处理模块对原始采集数据进行预处理（滤波、放大处理等）的功能，对源于智能巡检机器人本体、列车零部件与库内环境的非相干频带声波信号进行滤除。

3）信号分析功能

空气泄漏超声波检测装置所含数据处理模块应具备对预处理后信号数据进行频谱或时频谱分析等信号处理功能，能准确判断出当前检测点位区域的气体泄漏情况。

以上3类主要功能的实现按顺序分别对应硬件选型及安装部署、系统硬件设计、泄漏检测算法设计。下面分别针对3类主要功能的实现进行说明。

1）硬件配置及安装部署

目前，基于需求的差异，巡检机器人有单臂与双臂2种形式。为便于迁移与扩展，空气泄漏检测装置采用“一板两头”的分装式配置形式，如图3所示。

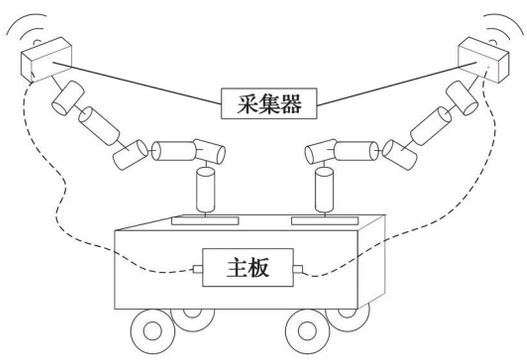


图3　基于双臂机器人的泄漏检测装置配置示意图

Fig. 3　Configuration schematic of leakage detection device based on dual-arm robot

空气泄漏超声波检测装置以1块主板为核心，可连线外接扩展2只采集器，故可在按需满足单臂式或双臂式巡检机器人检测的前提下，有效控制成本，压缩装置安装空间。

采集器采用压电式超声波接收探头SWT US16R+40MPB，其探测重心频率为40±0.1 kHz，探测方位角为50 °，可探测范围为0.2~4.0 m，探头外形尺寸如图4所示。

主板部分搭载两级运放、滤波等调理电路、CPU处理器和DSP等。

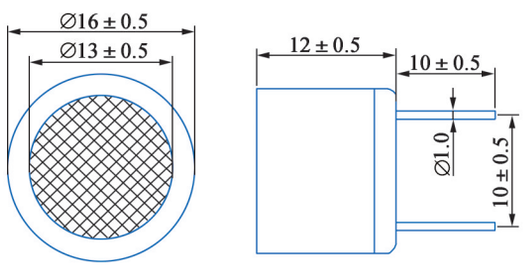


图4 压电式超声波接收探头SWT US16R+40MPB

Fig. 4 Piezoelectric ultrasonic receiving probe SWT US16R+40MPB

气体泄漏产生的超声波在通过空气介质传播的过程中，强度会衰减，因此采集器能够接收到的信号相对微弱，又由于采集器捕获到的信号中夹杂着大量的直流成分、噪声和干扰等无用成分，所以需要在信号进入模数转换处理前对信号进行调理，突出有用频率信号，衰减无用频率信号，抑制干扰和噪声，达到提高信噪比与选频的目的。

2）系统硬件设计

主板CPU采用AM5708并设计了导热片，保证设备具备良好散热以发挥较佳性能；DSP采用TI C6000，拥有强大的浮点运算能力。主板支持双向通信，具备多通道的外部输入接口拓展功能，并能够快速处理气体泄漏信号。

2只采集器均通过双绞屏蔽线分别连接到主板接口上，实现气体泄漏数据的传输。采集器和主板均配有铝合金外壳，兼具良好的防护等级和电磁屏蔽性能。主板与机器人交换机通过RJ45网口，使用TCP/IP协议实现数据通信。接入空气泄漏超声波检测装置后的机器人系统功能拓展关系简图如图5所示。

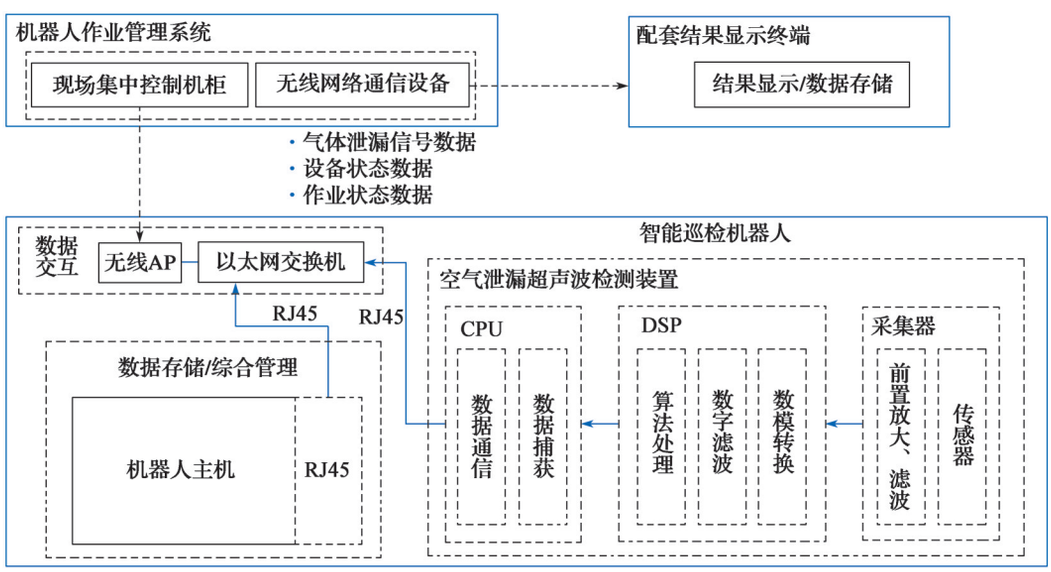


图5 气体泄漏检测功能拓展关系简图

Fig. 5 Relationship diagram for the expansion of air leakage detection capabilities

3）气体泄漏检测判断算法设计

列车制动气体泄漏检测判断是通过对比信号差异实现的，即通过对比同一采集时长下同一超声频带范围内无气体泄漏环境信号的能量与当前检测区域信号能量大小来实现。当存在高压气体泄漏时，外泄湍流会激发超声波，则在有限截断的超声波频段范围，当前环境信号能量值将远高于无气体泄漏环境信号能量值。

设置采集时间为0.3 s，采样频率为350 kHz，带通滤波35~45 kHz频段信号。取0.3 s的无气体泄漏环境压电信号能量值作为对比参考，并设置能量比较倍数阈值T_h，即在同一滤波参数下当前环境信号能量计算值与无气体泄漏环境信号能量值的比值大于T_h时，判定当前检测环境存在气体泄漏。

气体泄漏判断的算法流程如下：

第一步：对第1只探头在0.3 s内传入的压电信号进行采样离散。

第二步：数据中心化处理，抑制电路漂移电压直流分量的零频放大影响。

第三步：归一化数字带通滤波，对Nyquist频率350 kHz，进行35~45 kHz的归一化处理。采用FIR有限长单位冲激响应滤波器，使用Hamming窗生成滤波器系数，并移动平均滤波。

第四步：取频率分析点进行FFT运算（快速傅里

叶变换），得到频域信号。根据DFT形式的Parseval定理，频域的能量和时域的能量相等，可计算能量值。时域能量计算与频域能量计算关系为

$$E_x=\sum_{n=1}^{N}\left|x(n)\right|^2=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|X(n)\right|^2 \tag{4}$$

式中：E_x为环境信号能量值；N为采样点数；$\left|x(n)\right|^2$为对应于第n个采样点的时域信号绝对值的平方；$\left|X(n)\right|^2$为频域信号值模的平方，即能量谱密度。

第五步：将当前环境信号能量计算值E_x同无气体泄漏环境信号能量参考值相比较，若比值大于T_h，判定当前检测环境存在泄漏，机器人记录当前机械臂动作点位，泄漏判断流程结束；否则，进行下一超声波探头接收数据的分析，流程跳转至“第一步”，直至出现气体泄漏情况或所有探头均未探测到气体泄漏情况，流程结束。

气体泄漏检测判断算法流程如图6所示。

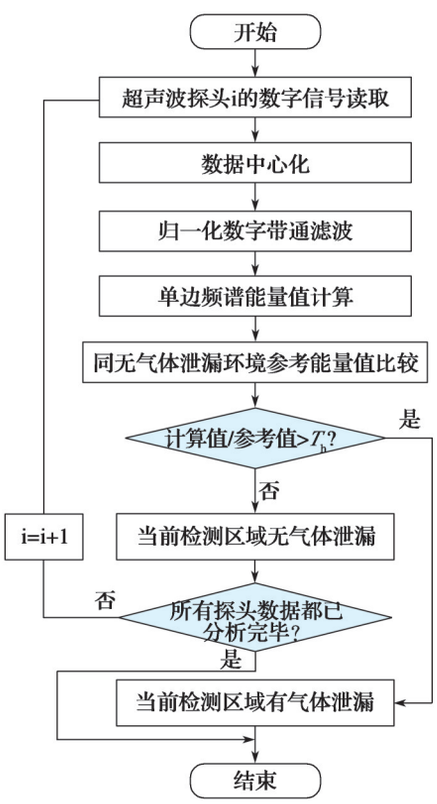


图6　气体泄漏检测判断算法流程

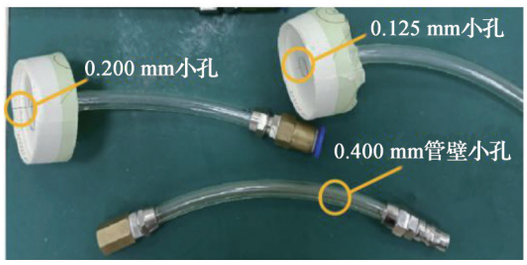
Fig. 6　Algorithm process of air leakage detection judgment

2.3　空气泄漏检测装置效果测试

2.3.1　泄漏检测条件

泄漏可以分为小孔泄漏和接头泄漏2类，其中小孔泄漏主要发生在受电弓的软管，接头泄漏则出现在管路的连接部分。造成泄漏的原因有振动磨损、生料带缠绕不均匀、气流冲击等。对小孔泄漏进行模拟，试验涉及器材如图7所示。

用于泄漏试验的小孔分别选用半径为0.125/0.200 mm的针头，由环氧树脂固定在软管一端，0.400 mm



(a) 泄漏点模拟材料



(b) 低压空压机

图7　试验器材

Fig. 7　Experimental equipment

小孔则使用0.200 mm针头戳穿软管得到，软管外径为6.600 mm。搭建气体泄漏环境所使用的空压机为1 MPa的低压空压机，气缸容量14 L，试验时，加压至550 kPa，稳定后再进行测试。

2.3.2　小孔泄漏试验

为了测试小孔泄漏孔径、检测距离对超声波检测的影响，验证前文所提出的信号采集指标，小孔泄漏测试试验设置了3类孔径，分别为0.125 mm、0.200 mm、0.400 mm，每种孔径对应设置5组工况，泄漏方位和距离充分覆盖前文所提的信号采集指标，采集时间和其他参数设置也按前文进行设置，具体如表2所示。同时，需采集无气体泄漏环境信号作为对比参考。工况实拍示意图如图8所示，D_1、D_2的测量基准均为泄漏孔中心点与2只探头的中轴点。

表2　采集工况设置

Table 2　Settings of acquisition conditions　　cm

工况编号	D_1	D_2
1	60	0
2	60	30
3	60	60
4	120	0
5	180	0

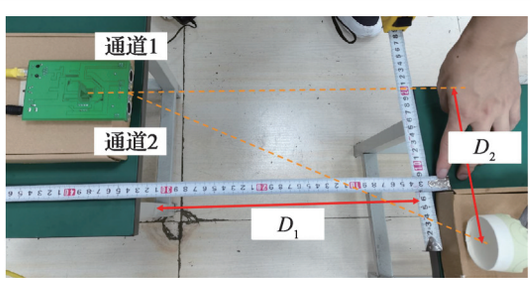


图8　工况实拍示意

Fig. 8　Actual operating conditions

鉴于2只探头通道间距较短（5 cm），并且多探头的布置是为了增大探测范围与确保检测的可靠性，在泄漏气体试验中仅对通道1所采集信号进行分析。针对0.125 mm、0.200 mm、0.400 mm这3种孔径，在5组工况下通道1采集的超声气体泄漏信号能量同对应条件下的无气体泄漏环境的能量对比如图9~图11所示（35~45 kHz带通滤波）。

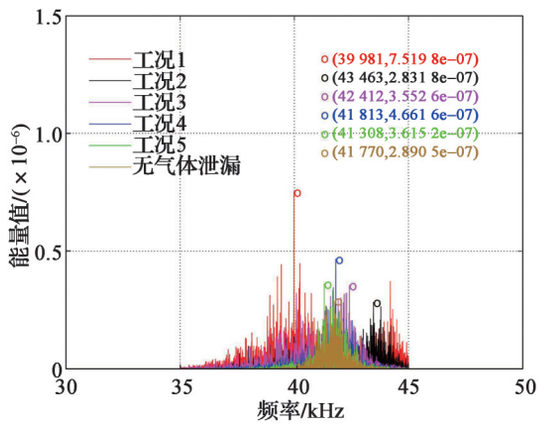


图9 0.125 mm孔径小孔在各工况下能量谱图

Fig. 9 Energy spectrum diagram of 0.125 mm-diameter hole under different operating conditions

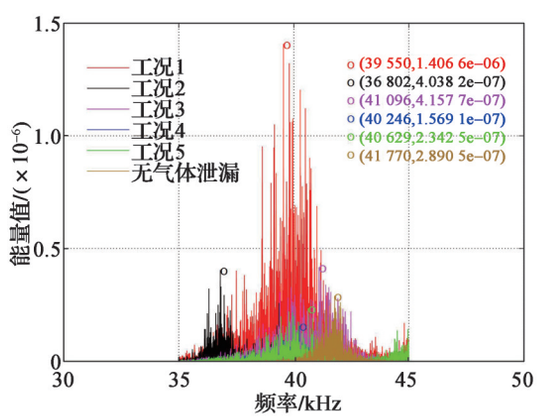


图10 0.200 mm孔径小孔在各工况下能量谱图

Fig. 10 Energy spectrum diagram of 0.200 mm-diameter hole under different operating conditions

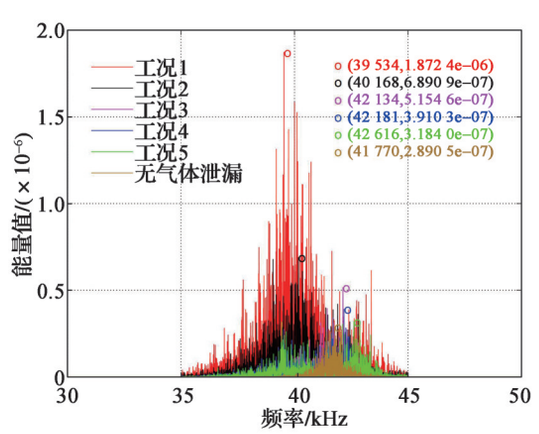


图11 0.400 mm孔径小孔在各工况下能量谱图

Fig. 11 Energy spectrum diagram of 0.400 mm-diameter hole under different operating conditions

由图9~图11可知，经35~45 kHz滤波后，不同孔径的小孔在5组工况下的最大能量值随检测距离增大而减小。为进一步验证该带通频率区间下超声能量与检测距离、气体泄漏孔径的关系，分别计算各工况对应的超声能量总值，如图12所示。

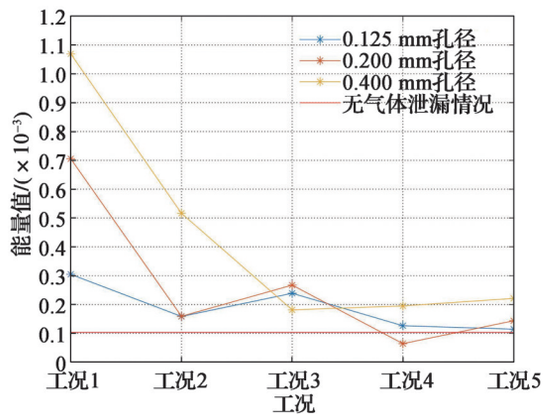


图12 不同孔径在不同工况下气体泄漏能量变化趋势图

Fig. 12 Energy change trend of air leakage under different operating conditions for different hole diameters

由图12可知，在同种工况下，小孔泄漏产生的能量大体上随着孔径的增大而增大，这说明采集器对大孔径泄漏孔产生的超声信号更敏感，而对于同一孔径的泄漏孔，随着检测距离的增大，小孔泄漏能量逐渐减小，超声波能量随传播距离的增大而衰减。针对3种孔径，通过对比35~45 kHz滤波后各工况与无泄漏条件下的能量值，可以看出工况1的能量比较倍数阈值T_h已超过2，气体泄漏明显。

当检测偏移距离较大时，小孔泄漏（0.125 mm, 0.200 mm）的情况不能够被精确判断，而且随着检测距离的逐渐增大，采集器捕获与处理得到的各孔径气体泄漏能量渐渐趋同于无气体泄漏环境信号能量，即超出一定范围后难以判断当前环境是否存在气体泄漏情况。针对此类情况，可考虑在实际应用时缩短搭载有气体泄漏检测装置的机械臂末端与检测点间的距离或进一步改进装置的传感功能。

3 总结与展望

列车的精确制动至关重要，其可靠性关乎列车运行安全和乘客的人身安全。空气制动的频繁触发会导致气体管路、阀门等部件的磨损、腐蚀，形成泄漏孔，造成制动空气沿程压力的快速衰减，导致列车制动力分布失衡，进而影响制动安全，因此气体泄漏日检非常关键。目前，诸多智能巡检机器人产品并未具备气体泄漏检测功能。为满足列车日检的全面需求，增补现有机器人巡检功能，本文提出并设计了针对列车制动气体泄漏进行超声波检测的功能模块，并验证了其性能。具体工作如下：

①对气体泄漏检测的各类技术进行合理对比，最

终选定基于超声波的气体泄漏检测技术进行深入研究，并对气体泄漏伴生超声波这一现象进行了原理剖析。

②基于超声波检测原理，考虑可行性和效率，定义了列车制动气体泄漏超声波检测装置的关键功能，包括信号采集、信号调理、气体泄漏检测判断算法。此外，结合机器人一般作业流程确定了检测时间、检测范围等指标。

③基于检测功能和检测指标，配置了相应的空气泄漏超声波检测装置硬件模块，并根据双臂机器人结构型式与数据传输设计了“一板两头”的装置结构型式。

④基于FFT方法和超声信号能量比的思路，设计了一套空气泄漏检测逻辑，并完成了对应算法的开发。

⑤在实验室环境中进行了空气泄漏超声波检测装置的效果测试，通过模拟检测不同孔径小孔及接头在5种检测工况下的气体泄漏，验证了泄漏检测判断算法的可靠性和设备性能，能够满足检测指标要求。

后续，研发团队还会针对超声波探测理论与气体泄漏检测算法进行深入研究，将整套样机搭载于智能巡检机器人上，并运用于实际；针对真实故障进行测试与数据采集，围绕检测的误报率与漏报率等指标进行多目标优化以确认最优的能量比较倍数阈值，进而完善气体泄漏判断算法，并在算法与硬件等方面测试检测的稳定性、准确性、抗干扰性、效率。

参考文献：

[1] 刘可安, 戴计生, 徐海龙. 城轨车辆关键部件状态修技术与系统解决方案[J]. 机车电传动, 2020(4): 1-7.
LIU Kean, DAI Jisheng, XU Hailong. Condition repair technology and system solutions for key components of urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2020(4): 1-7.

[2] 王健. 铁路机辆车底智能巡检机器人的设计研究[J]. 工程技术研究, 2018(8): 210-211.
WANG Jian. Design and research of intelligent inspection robot for railway locomotive and vehicle bottom[J]. Engineering and technological research, 2018(8): 210-211.

[3] 巫红波, 邱伟明, 王静, 等. 城轨车辆用多股道智能巡检机器人检测系统[J]. 机车电传动, 2022(1): 45-52.
WU Hongbo, QIU Weiming, WANG Jing, et al. Detection system of multi-track intelligent inspection robot for urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2022(1): 45-52.

[4] 杨兵, 许利利. 地铁车辆空气制动系统应用分析[J]. 现代制造技术与装备, 2019(4): 191-192.
YANG Bing, XU Lili. Application analysis of air brake system for metro vehicles[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2019(4): 191-192.

[5] 王涛, 王东颖, 范伟. 气体泄漏检测新方法的研究进展[J]. 液压与气动, 2015(10): 1-11.
WANG Tao, WANG Dongying, FAN Wei. The research progress of new gas leak detection method[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2015(10): 1-11.

[6] 朱晓恒, 高晓蓉, 王黎, 等. 超声探伤技术在无损检测中的应用[J]. 现代电子技术, 2010, 33(21): 112-116.
ZHU Xiaoheng, GAO Xiaorong, WANG Li, et al. Application of ultrasonic flaw detection in non-destructive test[J]. Modern electronics technique, 2010, 33(21): 112-116.

[7] 徐孟杰. 基于TDOA与ED数据融合的超声波式气体泄漏点定位的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
XU Mengjie. Study on ultrasonic location of gas leakage point based on TDOA and ED data fusion[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.

[8] 郑浩南. 压缩气体泄漏超声检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
ZHENG Haonan. Research on ultrasonic detection method of compressed gas leak[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

[9] 朱爱民. 流体力学基础[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
ZHU Aimin. Hydromechanics basis[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004.

[10] 方有强. 动车组制动管路泄漏的超声波探测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
FANG Youqiang. Research on a probing technology of ultrasonic wave caused by leaks from the EMU brake piping system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[11] 姜俊荣, 丁建林. 1970 ~ 1992年欧洲输气管道事故[J]. 油气储运, 1997(5): 56-58.
JIANG Junrong, DING Jianlin. European gas pipeline accidents from 1970 to 1992[J]. Oil & gas storage and transportation, 1997(5): 56-58.

[12] 朱谦怿, 丁建明, 何霞. 动车组制动风管及接头早期泄漏的超声能量特征辨识研究[J]. 智慧轨道交通, 2023, 60(3): 30-36.
ZHU Qianyi, DING Jianming, HE Xia. Research on ultrasonic energy feature identification on early leakage of brake ducts and joints of EMUs[J]. Smart rail transit, 2023, 60(3): 30-36.

[13] 江洋. 气体泄漏量超声检测理论及检测系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
JIANG Yang. Theoretics and system of using ultrasonicsto detect the leakage amount[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.

[14] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
MA Dayou. Fundamentals of modern acoustic theory[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[15] 刘庆辉. 基于超声波虚拟相控阵列的气体泄漏源定位算法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
LIU Qinghui. Localization algorithm of gas leakage source based on ultrasonic virtual phased array[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.

Design of ultrasonic detection device for train air leakage based on intelligent inspection robot system platform

WANG Wenchao[1], WANG Junping[1], DING Jianming[2], ZHU Qianyi[2], CHEN Xinan[1]

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The increasing demand for transportation by the public has directly promoted the opening and expansion of train services and routes, which has also led to increasing pressure on the daily inspection work for trains. As an important part of ensuring train braking safety, the tightness detection of air braking pipeline is indispensable in daily train inspection. To meet practical needs and address deficiencies in the current capabilities of intelligent inspection robots, this paper introduced a dual-arm robot platform. Based on the principle of turbulence generated by small leakage holes and the subsequent generation of ultrasonic waves, a "one board, two ends" structural design was adopted to design and develop an ultrasonic detection device for air leakage. The design focused on the structure and hardware configuration of the device from the aspects of signal acquisition, signal amplification and filtering preprocessing capabilities. In addition, an algorithm for air leakage detection was designed based on FFT and the Parseval's theorem. By simulating the air leakage conditions of small holes with different diameters (0.125 mm, 0.200 mm and 0.400 mm) under different conditions, the experimental prototype was verified to be able to receive and correctly judge air leakage signals within a range of 50° cone angle and 600 mm distance in a 0.3 s acquisition time.

Keywords: daily train inspection; dual-arm robot; air leakage; ultrasonic detection; urban rail transit

收稿日期：2023-08-09；修回日期：2023-12-26