

本文引用格式: 刘恩广,李国梁,于锋,等.基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统[J].自动化与信息工程,2024,45(4):42-49.  
LIU Enguang, LI Guoliang, YU Feng, et al. Tunnel robot geological radar detection system based on active and passive compliance[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(4):42-49.

## 基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统\*

刘恩广<sup>1</sup> 李国梁<sup>2</sup> 于锋<sup>1</sup> 倪效虎<sup>1</sup> 李凤鸣<sup>3</sup> 王艳红<sup>4</sup>

(1.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102

2.山东云晟智能科技有限公司, 山东 济南 250101

3.山东建筑大学, 山东 济南 250101

4.山东大学机器人研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 隧道墙体缺陷检测是保障轨道交通良好运营的重要环节。针对轨道交通综合检测装备检测灵活性差的问题,设计一套基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统,实现隧道墙体裂缝、轮廓断面等病害的高效检测。首先,设计基于弹性回复机构的被动柔顺控制装置,实现地质雷达贴壁检测的自然顺从;然后,提出基于阻抗控制算法的隧道机器人主动柔顺控制算法,主动适应隧道的贴壁检测;最后,通过隧道机器人地质雷达检测系统平台验证了基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统的有效性,并将该系统集成到轨道交通综合检测装备上进行了实地应用,提高了该装备的检测能力。

**关键词:** 隧道机器人; 隧道检测; 柔顺控制; 地质雷达; 阻抗控制算法

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)00-0007-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.04.007

开放获取

## Tunnel Robot Geological Radar Detection System Based on Active and Passive Compliance

LIU Enguang<sup>1</sup> LI Guoliang<sup>2</sup> YU Feng<sup>1</sup> NI Xiaohu<sup>1</sup> LI Fengming<sup>3</sup> WANG Yanhong<sup>4</sup>

(1.Shandong Transportation Institute, Jinan 250102, China

2.Unimation Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China

3.Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

4.Center for Robot Research, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Defect detection of tunnel walls is an important part of ensuring the smooth operation of rail transit. Design a tunnel robot geological radar detection system based on active passive compliance to address the problem of poor flexibility in comprehensive detection equipment for rail transit, and achieve efficient detection of tunnel wall cracks, contour sections, and other defects. Firstly, design a passive compliant control device based on an elastic recovery mechanism to achieve natural compliance in geological radar wall detection; Then, an active compliant control algorithm for tunnel robots based on impedance control algorithm is proposed to actively adapt to wall detection in tunnels; Finally, the effectiveness of the tunnel robot geological radar detection system based on active passive compliance was verified through the tunnel robot geological radar detection system platform, and the system was integrated into the comprehensive detection equipment of rail transit for field application, improving the detection capability of the equipment.

**Keywords:** tunnel robot; tunnel inspection; compliance control; geological radar; impedance control algorithm

### 0 引言

轨道交通隧道在长期运营的过程中,受交通载荷、

地质条件等因素的影响,不可避免地会产生一系列病害,如衬砌裂损、漏水和变形等。若及时发现这些

病害并进行维护，可能会影响隧道的安全运营<sup>[1]</sup>。隧道墙体缺陷检测是保障隧道安全运营的重要手段。目前，隧道检测设备多用于公路隧道检测，而用于轨道交通隧道检测的设备相对较少，且检测项目大多集中在隧道衬砌表面病害，无法进行隧道衬砌内部检测。而地质雷达穿透能力较强，可以确定隧道衬砌内部病害的位置和程度<sup>[2]</sup>。隧道墙体缺陷检测通常采用人工手持地质雷达的方式，既费时费力，又存在安全隐患。随着机器人技术的快速发展，利用隧道机器人搭载地质雷达进行隧道墙体缺陷检测，可提高检测效率、精度和灵活性，适用于不同复杂墙体的缺陷检测。

在隧道机器人搭载地质雷达进行隧道墙体缺陷检测的过程中，难以保证地质雷达与被测隧道墙体紧密贴合，易造成地质雷达抖动，降低检测准确性，甚至发生碰撞而损坏设备。而机器人柔顺控制技术可弥补因定位而引起的离线编程轨迹误差，减少检测过程中的振动，避免检测精度下降。根据是否改变机器人的预设轨迹，柔顺控制可分为被动柔顺控制和主动柔顺控制两大类。被动柔顺控制主要通过弹性元件变形起到缓冲吸震的作用。何伟崇<sup>[3]</sup>设计一种一维恒力装置用于机器人力控打磨，打磨后的工件表面光滑均匀。黄婷等<sup>[4]</sup>基于气缸和伸缩杆设计了一种被动柔顺装置，用于打磨机器人航空叶片曲面，获得了良好的表面质量。朱安等<sup>[5]</sup>设计了一种弹簧阻尼装置，安装在机械臂和电机之间，保护机器人的关节免受损坏，并通过仿真实验验证了该装置的有效性。被动柔顺控制装置具有控制简单、柔性高、响应快等特点，但因硬件结构固定，存在灵活度不高、可控性不强等问题。主动柔顺控制以阻抗控制算法为基础，利用反馈信息在线调整机器人的运动轨迹，从而控制接触力的大小。HE等<sup>[6]</sup>以力矩为反馈变量，实现了机器人的装配任务。叶伯生等<sup>[7]</sup>采用阻抗控制算法实现了工业机器人的柔顺控制，保证了机器人轨迹的跟踪精度。陈少南等<sup>[8]</sup>根据末端接触力的反馈信息，实现了液压机械臂管道搬运。主动柔顺控制技术具有可控性强、实时性好等特点，但由于机器人控制系统具有延迟性，较小的误差会产生较大的冲击力，易损坏装置。因此，将被动

柔顺控制装置与主动柔顺控制技术融合，有助于隧道机器人搭载地质雷达快速地适应被检测的隧道墙体，提高隧道墙体缺陷检测的灵活性和安全性。

本文基于主被动结合的隧道机器人柔顺控制策略，设计一套隧道机器人地质雷达检测系统。首先，设计基于弹性回复机构的被动柔顺控制装置，减少隧道机器人的控制响应时间，提升其安全性；然后，提出基于阻抗控制算法的隧道机器人主动柔顺控制算法，以保证隧道机器人搭载地质雷达自适应地贴壁检测隧道墙体，并进行算法有效性验证；最后，将基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统集成到轨道交通综合检测装备上，进行实地应用验证。

## 1 隧道机器人柔顺控制策略

在隧道机器人搭载地质雷达进行隧道墙体缺陷检测的过程中，采用主被动结合的隧道机器人柔顺控制策略（见图1），确保隧道机器人在移动的过程中，地质雷达的位姿能够及时调整，贴合被检测的隧道墙体。为了避免地质雷达与隧道墙体刚性接触造成损伤，设计了基于弹性回复机构的被动柔顺控制装置；同时，根据隧道机器人末端六维力传感器采集的接触力，利用基于位置的阻抗控制算法，实现地质雷达与隧道墙体之间的主动柔顺控制。

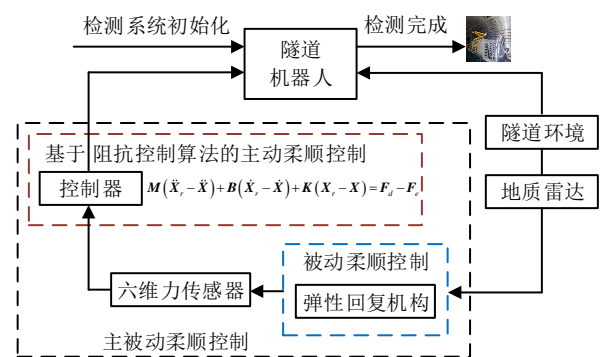


图1 主被动结合的隧道机器人柔顺控制策略

## 2 系统设计

基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统主要由六维力传感器、控制系统、通信系统、地质雷达、被动柔顺控制装置、UR5 六轴机器人等组成，

系统框架如图 2 所示。

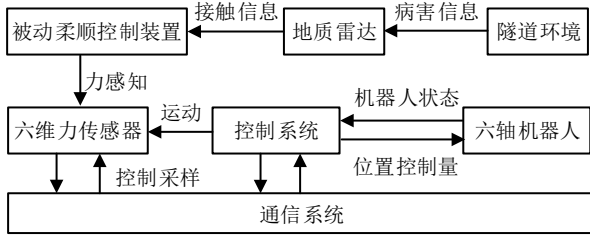


图 2 基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统框架

隧道机器人采用定位精度较高的 UR5 六轴机器人，其末端带有六维力传感器 ATI-Axia80，用于采集地质雷达与隧道墙体的接触力；通信系统（以太网）将采集的接触力传输给控制系统；控制系统基于阻抗控制算法计算出末端位置控制量，并传递给 UR5 六轴机器人；UR5 六轴机器人基于控制系统的反馈信息，结合被动柔顺控制装置，自适应隧道墙体滑行，以保证地质雷达的检测精度；地质雷达 SIR-4000 检测隧道墙体缺陷。

### 3 被动柔顺控制装置

被动柔顺控制装置主要由支撑机构（关节轴、定法兰盘、动法兰盘）、弹性回复机构（圆柱钢丝弹簧、滑孔）、导向机构（中间导向柱、弹顶销）等组成，如图 3 所示。

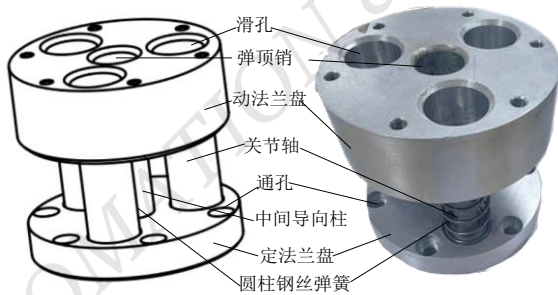


图 3 被动柔顺控制装置设计与实物图

支撑机构关节轴的一端嵌入动法兰盘的滑孔中，另一端连接定法兰盘；定法兰盘上的 6 个通孔与 UR5 六轴机器人末端相连；圆柱钢丝弹簧套在关节轴上，起到缓冲吸震的作用；动法兰盘连接地质雷达。

弹性回复机构主要依赖圆柱钢丝弹簧受力挤压

后的恢复作用，保证 UR5 六轴机器人末端自然顺从。在隧道墙体缺陷检测的过程中，地质雷达通过动法兰盘将接触力传递到关节轴和圆柱钢丝弹簧上，以实现被动柔顺控制。

导向机构通过中间导向柱实现动法兰盘的往复运动，并利用弹顶销锁止弹簧限制行程，约束空间运动自由度。动法兰盘滑动的最大行程为 20 mm。

### 4 隧道机器人主动柔顺控制算法

阻抗控制算法通过设定 UR5 六轴机器人末端位姿和接触力之间的关系来保证柔顺控制。将 UR5 六轴机器人的末端位姿/接触力等效为一个阻尼弹簧质量模型<sup>[9]</sup>，使 UR5 六轴机器人在未知的环境中按照指定轨迹运行的同时，还能够保持适当的接触力。其数学模型用二阶微分方程表示为

$$M_d(\ddot{X}_r - \ddot{X}) + B_d(\dot{X}_r - \dot{X}) + K_d(X_r - X) = F_e \quad (1)$$

式中： $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$  分别为 UR5 六轴机器人末端的实际位置向量、实际速度向量和实际加速度向量； $X_r$ 、 $\dot{X}_r$ 、 $\ddot{X}_r$  分别为 UR5 六轴机器人末端的期望位置向量、期望速度向量和期望加速度向量； $M_d$ 、 $B_d$ 、 $K_d$  分别为阻抗控制的期望惯性系数正定矩阵、期望阻尼系数正定矩阵和期望刚度系数正定矩阵，均为正定的对角矩阵； $F_e$  为 UR5 六轴机器人末端与隧道环境的实际接触力向量。

一般情况下， $M_d$ 、 $B_d$ 、 $K_d$  系数正定矩阵均为未知的，常用  $M$ 、 $B$ 、 $K$  来表示。将期望的 UR5 六轴机器人末端接触力  $F_d$  引入到阻抗控制算法中，将实际接触力与期望接触力的误差  $\Delta E_f = F_d - F_e$  作为阻抗控制算法的驱动信号，公式(1)可改写为

$$M(\ddot{X}_r - \ddot{X}) + B(\dot{X}_r - \dot{X}) + K(X_r - X) = F_d - F_e \quad (2)$$

由公式(2)可知，当 UR5 六轴机器人与隧道环境进行交互时，阻抗控制算法能够根据接触力误差  $\Delta E_f$  在线计算 UR5 六轴机器人末端的运动轨迹，从而实现末端期望接触力的跟踪控制。



阻抗控制分为基于位置的阻抗控制和基于力矩的阻抗控制<sup>[10-11]</sup>。其中，基于力矩的阻抗控制依赖机器人的动力学模型，计算过程复杂，且力矩控制器的控制精度对力跟踪精度影响较大。因此，本系统采用基于位置的阻抗控制算法来实现主动柔顺控制，隧道机器人主动柔顺控制算法原理框图如图4所示。

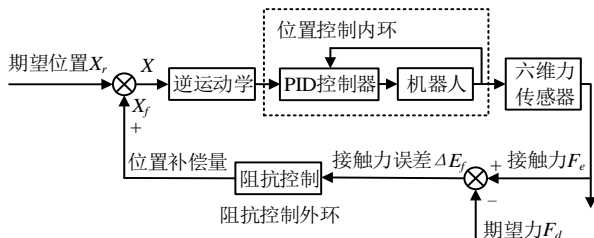


图4 隧道机器人主动柔顺控制算法原理图

隧道机器人主动柔顺控制算法由阻抗控制外环和位置控制内环组成。其中，阻抗控制外环主要负责力控制，位置控制内环基于PID控制器实现运动控制。在公式(2)中，令 $X_f = X_r - X$ ，则有

$$M\ddot{X}_f + B\dot{X}_f + KX_f = \Delta E_f \quad (3)$$

当地质雷达沿隧道墙体滑行时，若六维力传感器检测到实际接触力与期望接触力存在误差，则阻抗控制外环根据公式(2)计算位置补偿量，并与期望位置共同作为位置控制内环的输入。位置控制内环根据实际位置和位置补偿量进行修正，使UR5六轴机器人末端移动到修正后的期望位置，从而实现基于阻抗控制算法的隧道机器人主动柔顺控制。

## 5 实验验证与分析

在实验室搭建了隧道机器人地质雷达检测系统平台，对基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统进行有效性验证。该检测系统平台主要包括移动平台（横向移动滑台和升降平台）、地质雷达采集模块和隧道机器人3部分，如图5所示。

移动平台用于实现轨道交通综合检测装备的水平、竖直方向移动。地质雷达采集模块包括地质雷达和被动柔顺控制装置，用于实现地质雷达稳定随动检测。隧道机器人采用UR5六轴机器人。

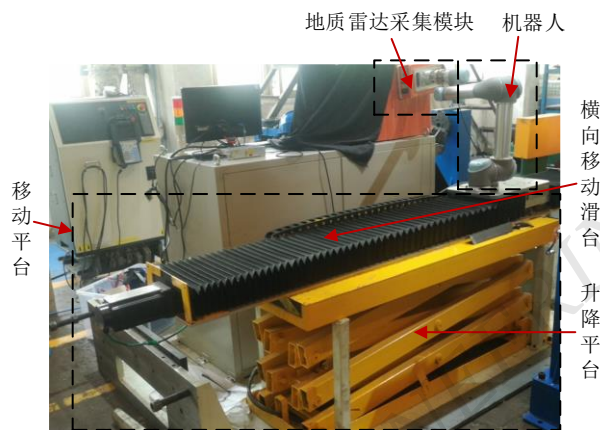


图5 隧道机器人地质雷达检测系统平台

首先，在UR5六轴机器人上对隧道机器人主动柔顺控制算法进行验证；然后，模拟隧道墙体缺陷检测过程，进行基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统的测试；最后，将基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统集成在轨道交通综合检测装备上，并在某轨道交通进行实地应用验证。

### 5.1 隧道机器人主动柔顺控制算法验证

为验证隧道机器人主动柔顺控制算法的有效性，进行隧道机器人末端碰撞安全性实验和隧道机器人末端接触力实时反馈实验。

#### 5.1.1 隧道机器人末端碰撞安全性实验

设定UR5六轴机器人的随机初始状态，人为碰撞UR5六轴机器人末端，施加外力干扰，验证UR5六轴机器人在扰动状态下是否保持接触力在预设的安全范围内。实验设置UR5六轴机器人末端安全接触力和扭矩均为0。隧道机器人末端碰撞安全性实验过程如图6所示。

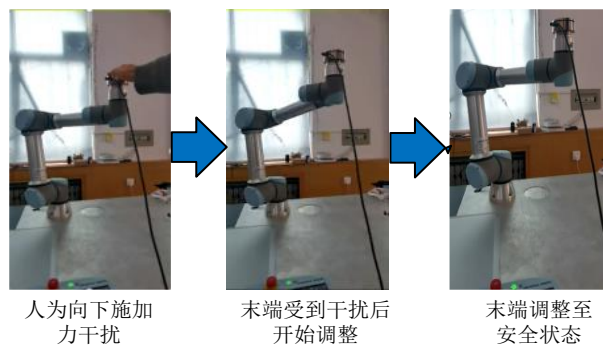
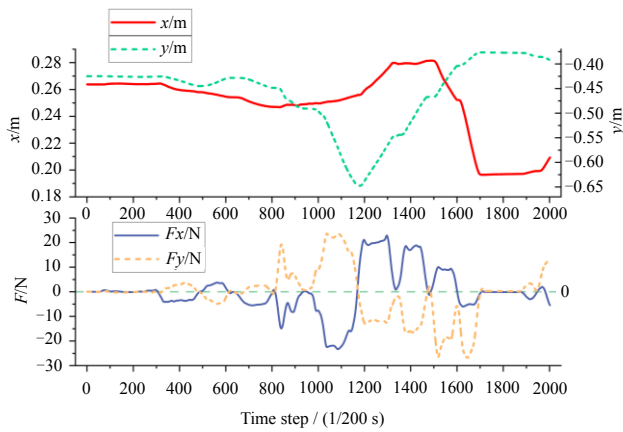
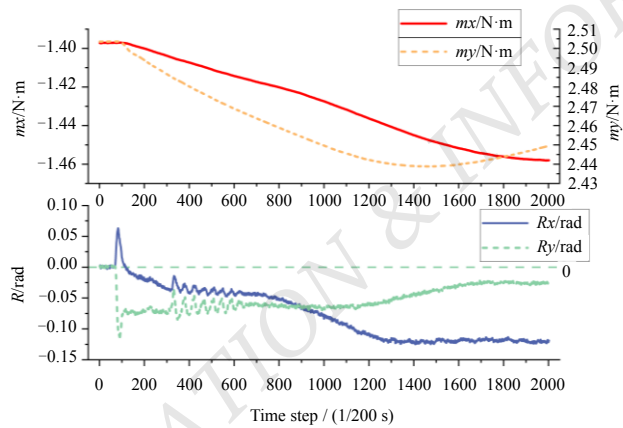


图6 隧道机器人末端碰撞安全性实验过程

由六维力传感器实时采集人为施加的力和扭矩，通过隧道机器人主动柔顺控制算法实时调整 UR5 六轴机器人的末端位姿，并记录碰撞过程中 UR5 六轴机器人末端在力的作用下位置和姿态的变化情况。UR5 六轴机器人末端力、扭矩和位姿的变化如图 7 所示，实线表示  $x$  轴，虚线表示  $y$  轴。其中，图 7(a) 的上方为位移曲线，下方为力曲线；图 7(b) 的上方为扭矩曲线，下方为姿态变化曲线。



(a)  $x$  轴、 $y$  轴方向力和位置的变化



(b)  $x$  轴、 $y$  轴方向扭矩和姿态的变化

图 7 UR5 六轴机器人末端碰撞安全性实验结果

由图 7 可知，UR5 六轴机器人运动方向受力和扭矩的影响，当  $x$  轴、 $y$  轴方向的力、扭矩变化较大时，UR5 六轴机器人沿  $x$  轴、 $y$  轴的运动曲线斜率变化也较大，即当 UR5 六轴机器人末端受到人为碰撞时，机器人的运动方向可顺应力/扭矩的正方向运动。

### 5.1.2 隧道机器人末端接触力实时反馈实验

UR5 六轴机器人末端固定位置为  $(0.157\ 515\ 025, -0.461\ 575\ 145, 0.217\ 907\ 191, -1.397\ 161\ 538, 2.503\ 542\ 54, -0.054\ 661\ 9)$ ，设置阻抗参数  $K$  为 3， $M$  为 300， $B$  为 2400。未安装地质雷达时，UR5 六轴机器人末端  $z$  轴期望接触力为 4 N，测试 UR5 六轴机器人末端是否能稳定于该期望接触力，实验过程如图 8 所示。

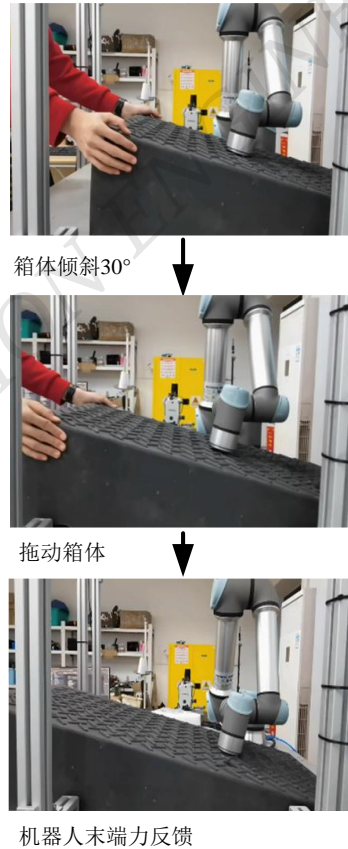


图 8 隧道机器人末端接触力实时反馈实验过程

实验初始设置接触箱体斜坡为  $30^\circ$ ，实验人员拖动箱体与 UR5 六轴机器人末端贴合运动，UR5 六轴机器人通过调整末端位置来保证末端  $z$  轴的接触力，实验结果如图 9 所示，其中上方为  $z$  轴位移曲线，下方为  $z$  轴接触力曲线。

由图 9 可知，隧道机器人主动柔顺控制算法能够实现接触力的跟踪，随着斜坡持续后移，UR5 六轴机器人末端也不断下移， $z$  轴接触力低于 4 N，在 15% 的误差范围内波动。

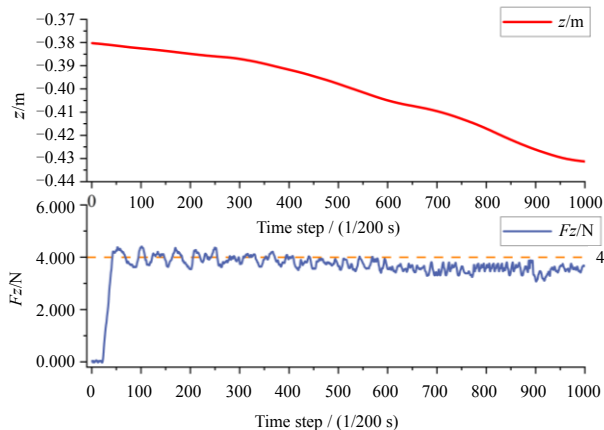


图9 UR5六轴机器人末端接触力

### 5.2 系统测试

为验证基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统的有效性，模拟地质雷达贴壁滑行检测隧道墙体缺陷的过程，包括平面墙体和曲面墙体，并记录UR5六轴机器人的末端力和位置数据，实验流程如图10所示。

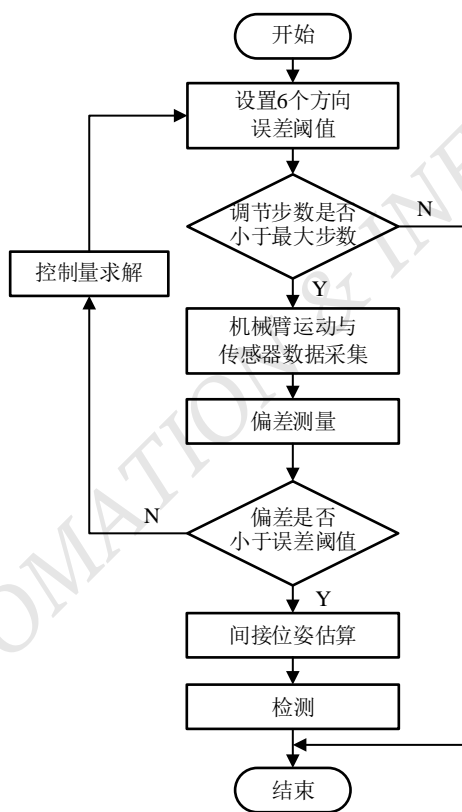
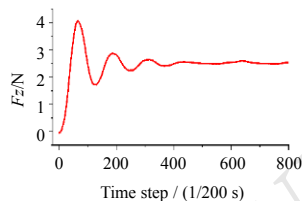
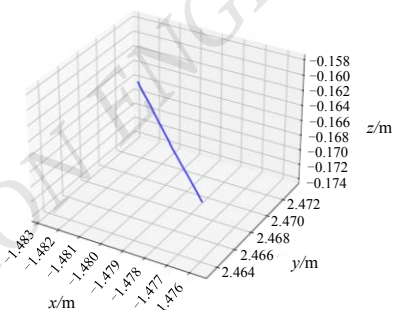


图10 基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统测试流程图

基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统检测平面墙体时，设置UR5六轴机器人末端 $z$ 轴的期望接触力为2.5 N，沿墙体向末端坐标系 $y$ 轴正方向运动，实验结果如图11所示。



(a)  $z$ 轴方向力的变化

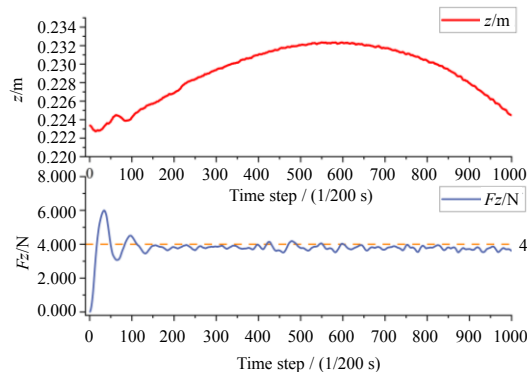


(b) 三维空间运动曲线

图11 平面墙体检测实验结果

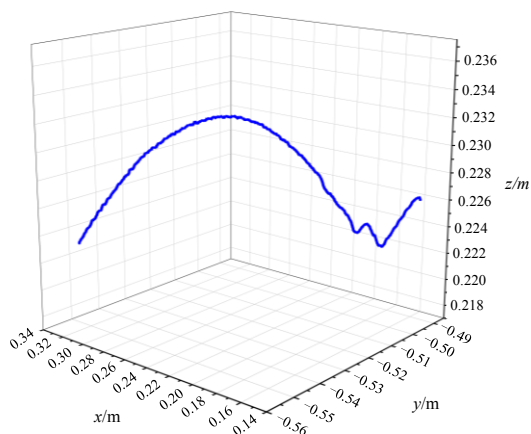
由图11可知，在平面墙体检测过程中， $z$ 轴接触力最大为4 N，经过末端位置的不断调整，最后稳定在期望接触力2.5 N。

基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统检测曲面墙体时，设定UR5六轴机器人末端安全扭矩为0 N·m， $z$ 轴期望接触力为4 N，实时控制UR5六轴机器人末端运动，记录 $z$ 轴运动曲线、 $z$ 轴接触力、三维空间运动曲线如图12所示。



(a)  $z$ 轴接触力与运动曲线





(b) 三维空间运动曲线

图 12 曲面墙体检测实验结果

由图 12 可知，UR5 六轴机器人能够完成曲面墙体检测，同时接触力稳定在 4 N。

### 5.3 实地应用

将基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统集成在轨道交通综合检测装备上，如图 13 所示，并在某地铁隧道进行了实地应用。

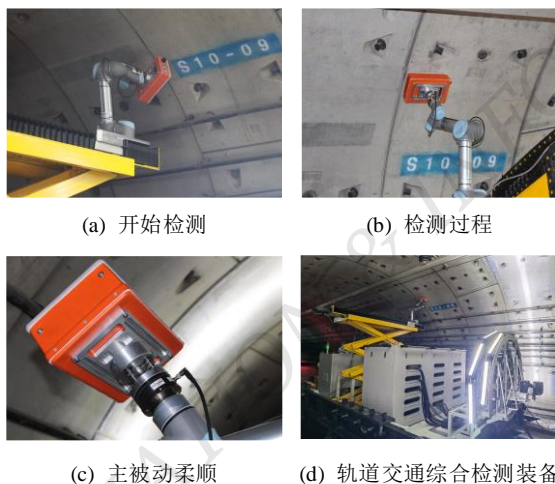


图 13 基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统现场实验

基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统现场检测的隧道断面部分数据如表 1 所示。其中，长半轴、短半轴、椭圆度分别为隧道横断面半径参数。

由表 1 可知：隧道横断面长半轴约为 2.9 m，短半轴约为 2.8 m，隧道呈现了水平方向外凸，竖直方向内凹的状态，符合隧道正常的变形趋势；椭圆度最

大值为 3.92%，满足《盾构法隧道施工及验收规范》(GB50446—2017)中椭圆度允许偏差为 6‰的要求。

表 1 基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统部分检测数据

| 序号 | 长半轴/m   | 短半轴/m   | 椭圆度/‰ |
|----|---------|---------|-------|
| 1  | 2.902 0 | 2.894 8 | 2.12  |
| 2  | 2.905 4 | 2.894 7 | 3.92  |
| 3  | 2.905 7 | 2.894 9 | 3.85  |
| 4  | 2.904 3 | 2.894 6 | 3.34  |
| 5  | 2.905 6 | 2.895 6 | 3.00  |
| 6  | 2.901 7 | 2.893 7 | 1.39  |
| 7  | 2.901 8 | 2.896 7 | 1.19  |
| 8  | 2.902 9 | 2.896 8 | 2.15  |
| 9  | 2.901 1 | 2.897 2 | 1.46  |
| 10 | 2.901 3 | 2.897 0 | 1.47  |

按照地铁隧道内实际轨距 1.435 m 进行检测装备布设，对隧道变形量较大的 2、3、4 号断面进行检测，部分检测数据如表 2 所示。

表 2 断面部分检测数据

| 断面号 | 裂缝尺寸/mm | 断面误差/mm | 变形量/mm |
|-----|---------|---------|--------|
| 2   | 0.124   | 0.896   | 5.6    |
| 2   | 0.135   | 0.895   | 5.3    |
| 3   | 0.156   | 0.963   | 5.4    |
| 3   | 0.224   | 0.968   | 5.7    |
| 4   | 0.198   | 0.988   | 3.3    |
| 4   | 0.235   | 0.965   | 3.0    |

由表 2 可知：裂缝最小采集尺寸小于 0.2 mm，轮廓断面误差小于 1 mm，变形量小于 6 mm，检测指标均满足相关要求。因此，集成了基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统的轨道交通综合检测装备，能够实现轨道交通隧道墙体缺陷的检测。

## 6 结论

针对隧道衬砌背部空洞、脱空及衬砌本身内部损伤的检测需求，本文设计了基于主被动柔顺的隧道机器人地质雷达检测系统，包括被动柔顺控制装置和隧道机器人主动柔顺控制算法设计，并在搭建的隧道机器人地质雷达检测系统平台上进行了系统验证。经实地应用验证，该系统提高了轨道交通综合检测装备的检测能力，保障了隧道的安全稳定运行。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## 参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- [2] 王建华, 董垠枫. 地质雷达在公路隧道仰拱检测中的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(15): 160-162.
- [3] 何伟崇. 面向机器人抛光打磨的一维恒力装置及控制系统[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [4] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J]. 机器人, 2017, 39(6): 776-785; 794.
- [5] 朱安, 陈力. 含弹簧阻尼装置空间机器人捕获卫星操作力学分析及缓冲、柔顺控制[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 202-212
- [6] HE G, SHI S, WANG D, et al. A strategy for large workpiece assembly based on hybrid impedance control[C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2019: 799-804.
- [7] 叶伯生, 陶婕好, 张文彬, 等. 基于动力学模型的工业机器人导纳控制研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 98-102; 108.
- [8] 陈少南, 赵桂生, 刘蕾, 等. 基于自适应阻抗控制的大负载液压机械臂柔顺控制[J]. 液压与气动, 2024, 48(4): 15-21.
- [9] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1984, 107(1): 304-310.
- [10] WHITNEY D E. Historical perspective and state of the art in robot force control[J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(1): 3-14.
- [11] ANAND A S, GRAVDAHL J T, ABU-DAKKA F J. Model-based variable impedance learning control for robotic manipulation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 170.

## 作者简介:

刘恩广, 男, 1983年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 隧道桥梁检测技术。E-mail: lfmleg@foxmail.com  
 李国梁, 男, 1988年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 智能机器人技术。E-mail: liguoliang@sucro.org  
 于锋, 男, 1986年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 桥梁隧道检测技术。E-mail: 15688880312@163.com  
 倪效虎, 男, 1986年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 隧道桥梁检测技术。E-mail: 928628233@qq.com  
 李凤鸣, 女, 1984年生, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向: 机器人技术、柔顺控制。E-mail: lifengming21@sdjzu.edu.cn  
 王艳红, 男, 1987年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 机器人技术、柔顺控制。E-mail: wangyanhong@sdu.edu.cn

(上接第 41 页)

- [17] LIVINGSTONE S R, RUSSO F A. The Ryerson audio-visual database of emotional speech and song (RAVDESS): A dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English[J]. Plos One, 2018, 13(5): e0196391.
- [18] MENG H, YAN T, YUAN F, et al. Speech emotion recognition from 3D Log-Mel spectrograms with deep learning network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 125868-125881.
- [19] LI L Q, XIE K, GUO X L, et al. Emotion recognition from speech with StarGAN and Dense-DCNN[J]. IET Signal Processing, 2022, 16(1): 62-79.
- [20] PARK D S, CHAN W, ZHANG Y, et al. Specaugment: A simple data augmentation method for automatic speech recognition[J]. arXiv preprint arXiv:1904.08779, 2019.
- [21] TUNCER T, DOGAN S, ACHARYA U R. Automated accurate speech emotion recognition system using twine shuffle pattern and iterative neighborhood component analysis techniques[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 211: 106547.

## 作者简介:

钟善机, 男, 1998年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 语音情感识别。E-mail: 2112104088@mail2.gdut.edu.cn  
 张学习, 男, 1978年生, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 机器人与智能控制。E-mail: zxxnet@gdut.edu.cn  
 陈楚嘉, 男, 1998年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 姿态估计与目标检测。E-mail: 2112104227@mail2.gdut.edu.cn  
 高学秋, 男, 1997年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 目标检测与深度学习。E-mail: 2107130229@qq.com  
 陶杰, 男, 1990年生, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 无人机协同控制。E-mail: taojiedyx@163.com