

# 掘进机器人行驶状态嵌入式传感系统研究\*

张宏, 刘阳, 陈小兵, 殷国珠, 宋佳琪

(太原科技大学机械工程学院 太原, 030024)

**摘要** 针对掘进机器人履带行驶结构作业处于高冲击、碰撞、高湿度和复杂煤岩底质等空间受限环境、受到的外部动载荷通常无法直接测量或测量比较复杂问题,提出了一种可实时监测掘进机器人履带动载荷的嵌入式传感系统无线监测方法。设计了适用于掘进机器人的特种履带行驶结构,搭建基体-夹板-无线采集模块等组成的多层复合封装防护结构,在封闭环境下对嵌入式传感系统进行无线传输特性及行驶状态下的动应力分布研究,并进行传感系统封装集成的测试精度标定试验。将嵌入式传感系统随机替换履带链环中的一块山型减振垫,对掘进机器人行驶状态周期循环的履带载历程进行监测测试。结果表明,该嵌入式传感系统在不改变履带链环整体受力的前提下,能实时采集履带行驶结构的动载荷并无线传输给上位机,动载荷时间历程数据完备、稳定可靠,解决了井下极端工况下掘进机器人履带行驶结构动载荷获取难题。

**关键词** 履带行驶结构;嵌入式传感系统;动载荷时间历程;无线测试

**中图分类号** TH113;TD421

## 引言

履带行驶结构因具备接地比压小、越障能力强等优点,在掘进机器人等矿用机械中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。井下的复杂环境使无线监测系统难以直接应用于矿用设备<sup>[2]</sup>,动载荷数据实时获取困难,而履带动载荷时间历程的实时监测是反映履带行驶状态、预测其剩余寿命的重要手段<sup>[3]</sup>。准确、有效地实现履带行驶结构动载荷的实时采集与传输,成为掘进机器人行驶状态健康监测亟待解决的问题。覃凌云等<sup>[4]</sup>建立了履带动力学模型并进行验证,研究了行驶速度、路面不平度和履带板参数对负重轮动载荷的影响。张志宏等<sup>[5]</sup>基于遗传神经网络构建了载荷识别模型,通过实测振动加速度反演得到履带行驶结构的应力载荷。Zhao等<sup>[6]</sup>采用有线采集的方式得到了挖掘机在直线行驶、原地转向及差速转向工况下的履带板链轨节的载荷数据。曾子豪等<sup>[7]</sup>研究了不同块数履带板受拉伸载荷时,载荷分配与应力结果的差异。Liu等<sup>[8]</sup>建立了橡胶履带载荷分布的理论模型,并进行了实测数据和理论模型的对比验证。为了在复杂环境中实现数据的实时采集与无线传输,学者们开发适应性强的无线传感系统,实现机械旋转设备的动态测试<sup>[9]</sup>。白茹等<sup>[10]</sup>提出了小型化应

力测试系统,将测试系统直接封装在履带驱动轮内以采集应力数据。Wang等<sup>[11]</sup>对刮板和输送链条进行结构改造,将张力测试系统嵌入刮板中,通过压电俘能器的自主供电,实现刮板输送机动载荷数据的实时采集与无线传输。李耀明等<sup>[12]</sup>构建了一种联合收割机履带扭矩和转速无线测试系统,通过载荷测试验证了系统的稳定性和可靠性。张强<sup>[13]</sup>研发了可嵌入履带板的无线测试系统,得到了履带行驶过程中的动态载荷谱。翟岩等<sup>[14]</sup>设计了低功耗刮板输送机张力无线监测系统,仿真研究了恶劣工况下无线监测系统的传输能力。骆铁楠<sup>[15]</sup>提出了刮板输送机圆环链张力测试系统,并进行了无线通信质量检测。上述研究在不同旋转机械的无线传感方面取得较大进展,但在履带行驶结构无线传感系统及其应用可靠性方面尚需进一步研究。

笔者针对煤岩底质复杂工况,设计了嵌入式传感系统的多层复合封装防护结构,建立封闭环境下无线传输仿真模型及掘进机器人刚柔耦合模型。将嵌入式传感系统封装集成后用于实际履带掘进机器人,在不改变履带链环整体受力的前提下,实现了履带动载荷的实时采集与无线传输,为履带行驶结构的状态监测和可靠性研究提供有效依据。

\* 国家自然科学基金资助项目(52075355);山西省重点研发计划项目(202202100401012)

收稿日期:2022-11-26;修回日期:2023-03-03

## 1 嵌入式传感系统整体结构设计

### 1.1 特种履带行驶结构

掘进机器人行驶时,履带板历经履带链环的工作支段、自由支段、弧形支段和支持支段。由于履带链环处于周期循环反复旋转状态,故利用无线传输方式实现数据的实时采集和传输。图1为特种履带行驶结构模型。驱动轮采用双排链轮,在每一块钢履带板外加一块山型减振垫,钢履带板和山型减振垫采用螺栓连接,钢履带板材质为Q345钢。

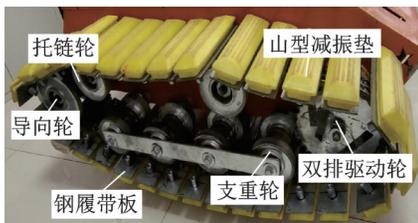


图1 特种履带行驶结构模型

Fig.1 The model of special crawler driving structure

### 1.2 传感系统集成与封装

传感系统在煤矿井下工作时,无线信号传输路径复杂,造成无线传输距离发生变化<sup>[16]</sup>,且煤岩底质复杂地形、高冲击和碰撞的极端工况对传感系统的结构强度要求较高。因此,设计的嵌入式传感系统结构需具有无线数据传输与能源自供给单元,以及结构防护、缓冲隔振和密封等性能。

为了不破坏原钢履带板结构,笔者对图1所示的山型减振垫进行改进,搭建实时获取履带动载数据的嵌入式传感系统。数据无线传输功能由DH5905N无线测试分析系统实现,该分析系统由无线采集模块和电源模块组成,单一模块的尺寸仅为60 mm×30 mm×11 mm(长×宽×高),适于内置。无线采集模块集应变采集、放大滤波为一体,采用Wi-Fi通讯技术,可实现数据的实时无线传输,正常无遮挡工况下无线传输距离为6 m。电源模块为无线采集模块供电,可在温度为0~40℃、相对湿度为20%~90%的环境下完成采集任务。无线采集时采样频率设为1 000 Hz,该采样频率下DH5905N工作时间达4 h以上。

图2为设计的嵌入式传感系统结构。考虑山型减振垫结构尺寸限制,将山型减振垫改造为基体和夹板两部分。基体内部开有安装槽,无线采集模块和电源模块置于基体槽内。夹板处于基体和被测履带

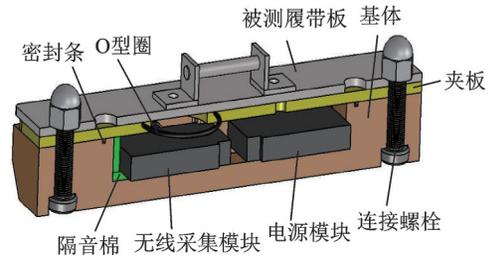


图2 嵌入式传感系统结构

Fig.2 The structure of embedded sensing system

带板之间,保护传感模块不受外力损坏。隔音棉用来减小传感模块在基体内部承受的冲击力。在夹板和基体上部开环形槽和矩形浅槽,分别使用O型圈和密封条实现在被测履带板和夹板间、夹板和基体间的密封。

测试掘进机器人履带载荷历程时,从履带链环中随机选取一组相配套的钢履带板与山型减振垫作为研究对象,将嵌入式传感系统替换该山型减振垫,进行周期循环内完整的载荷历程测试,并将采集到的载荷数据以无线形式发送至上位机。

## 2 封闭环境传感系统无线传输特性

实测过程中,数据的实时传输在动载荷获取中占据重要位置。无线采集模块和电源模块内置于基体和夹板中的封闭空间,实现无线传输必须保证电磁波信号可以透过基体和夹板向外传输,因此基体、夹板材料的选择尤为重要。使用三维结构电磁场软件HFSS模拟嵌入式传感系统的无线传输过程及电磁场分布,完成对封闭材料的选择。

### 2.1 天线无线传输理论

电磁波的无线传输是由无线采集模块内部的发射天线和上位机的接收天线共同进行,图3为无线通信系统工作原理。发射机的发射功率为 $P_T$ ,发射天线的增益为 $G_T$ ,发射天线和接收天线之间的距离为 $r$ ,接收天线的增益为 $G_R$ , $\lambda$ 为工作波长。自由空间中,基于Friis公式<sup>[17]</sup>,距发射机 $T$ 处的接收功率 $P_R$ 为

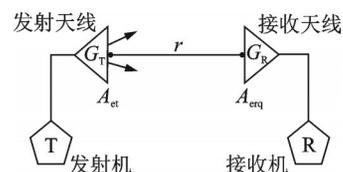


图3 无线通信系统工作原理

Fig.3 Work principle of wireless communication system

$$P_R = \frac{\lambda^2 P_T}{(4\pi r)^2} G_R G_T \quad (1)$$

自由空间是一种理想介质,其传播损耗是一种扩散式的能量自然损耗,也称为路径损耗。发射机发射功率与接收机接收功率之间的差分路径损耗  $L_{path}$  为

$$L_{path} = 10\log \frac{P_T}{P_R} = -10\log \left[ \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi r)^2} \right] \quad (2)$$

实际传输中,无线通信受外界因素影响,总损耗的参考值用  $B_T$  表示。系统衰落储备  $M^{[18]}$  为一数值,与无线传输的稳定性有关。当实际接收功率与接收灵敏度之差超过该数值时,认为设备可以稳定地接收无线数据,其值通常取 20~25 dB。实际应用的 friis 公式为

$$\begin{cases} P_R - P_T = G_R + G_T - M - B_T - L_{path} \\ L_{path} = -27.55 + 20\lg r + 20\lg f \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 无线传输仿真

通过软件 HFSS 仿真得到封闭环境下发射天线增益  $G_T$  的变化,使用 HFSS 进行参数扫描,以接收天线和发射天线之间的距离  $r$  为变量,得到在距离发射天线不同位置下的接收功率  $P_R$  和每种工况下无线传输的最大距离。

#### 2.2.1 无线传输模型建立

图4为无线传输仿真模型。将嵌入式传感系统三维结构导入软件 HFSS 中进行天线建模,发射天线替代原无线采集模块,去除电源模块,在基体外建立接收天线用来替代上位机。设置长方体盒作为仿真空间,介质选择为空气,并添加辐射边界条件。

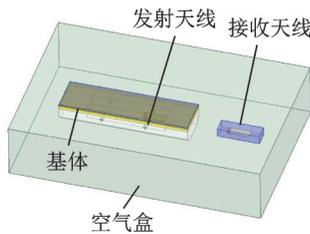


图4 无线传输仿真模型

Fig.4 Wireless transmission simulation model

#### 2.2.2 材料设置

基体和夹板材料的选择对嵌入式传感系统的无线传输特性起决定性作用。山型减振垫为橡胶材料,其本身强度和硬度达不到加工要求。因此,基体和夹板的材料分别选用可加工的聚氨酯、尼龙和 Q345 钢。各材料相关参数<sup>[19]</sup>如表1所示。

表1 各材料相关参数<sup>[19]</sup>

Tab.1 Relevant electrical parameters of each material<sup>[19]</sup>

材料特性	聚氨酯	尼龙	Q345 钢
相对介电常数	3.4	4.3	1.1
电导率/(S·m) <sup>-1</sup>	$2 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-15}$	$1.1 \times 10^6$
介质损耗正切	0.023	0.004	0

### 2.3 基体和夹板材料确定

使用不同夹板材料时,不同基体材料条件下接收天线的无线传输仿真结果如图5所示。

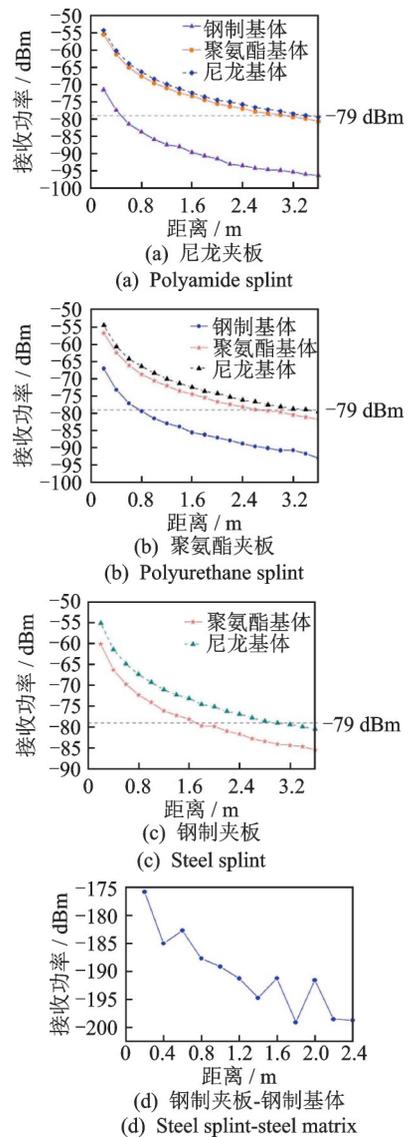


图5 无线传输仿真结果

Fig.5 Results of wireless transmission simulation

根据电磁波传输理论,只有当接收天线的接收功率  $P_R$  大于接收灵敏度 (-79 dBm) 时,上位机才可以收到无线数据。由图5可知,当基体和夹板材料相同且分别为尼龙、聚氨酯和 Q345 钢时,嵌入式传

感系统的最大传输距离分别为3.4、2.6和0 m,对应的接收功率分别为-78.9、-78.8和-176 dBm。因此,尼龙材料对电磁波传输的影响最小,聚氨酯次之,Q345钢影响最大。当基体和夹板材料不同时,尼龙基体-聚氨酯夹板材料组合传输距离较远,为3.0 m,小于尼龙基体-尼龙夹板组合下的传输距离。

尼龙基体-尼龙夹板电磁场分布如图6所示。电磁场存在于尼龙基体和尼龙夹板材料内部,说明尼龙属于透波性材料<sup>[20]</sup>,电磁场从发射天线出来后经过折射进入透波性材料内部,产生少量功率损耗后透过尼龙材料向外传输,尼龙基体内侧面的磁场强度最大为0.43 A/m,尼龙基体外侧面的最大磁场强度为0.32 A/m,传输损耗较小。

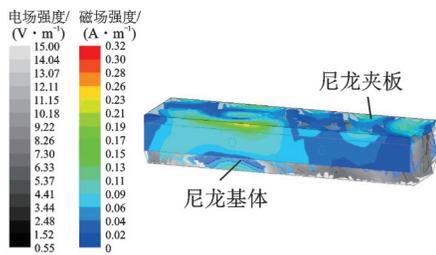


图6 尼龙基体-尼龙夹板电磁场分布

Fig.6 Electromagnetic field distribution of polyamide matrix and polyamide splint

钢制基体-钢制夹板电磁场分布如图7所示。电磁场几乎完全被封闭于钢制基体-钢制夹板组成的内部空间,无法穿过钢制材料,只有一部分电磁场可通过基体通孔向外传输,在基体外所能观测到的最大磁场强度仅为 $1.4 \times 10^{-8}$  A/m,说明Q345钢对无线传输的影响最大。综上所述,基体和夹板材料均选择尼龙。

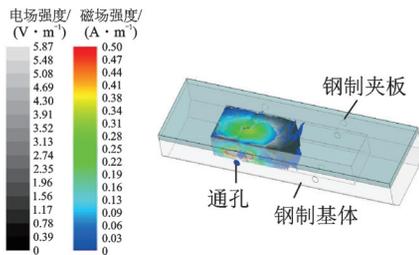


图7 钢制基体-钢制夹板电磁场分布

Fig.7 Electromagnetic field distribution of steel matrix and splint

### 3 行驶状态传感系统动应力分析

掘进机器人行驶时,嵌入式传感系统中的尼龙基体和路面直接接触,与钢履带板、山型减振垫共同

承担整机重量。嵌入式传感系统承受交变载荷,需要对尼龙基体和被测履带板进行强度校核。

#### 3.1 掘进机器人虚拟仿真模型构建

构建包含被测履带板柔性体、尼龙基体柔性体和其余刚体零部件组成的掘进机器人虚拟仿真模型如图8所示。行驶状态设为过硬质路面凸起障碍工况。

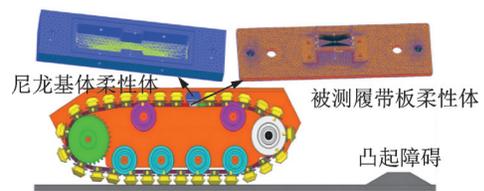


图8 掘进机器人虚拟仿真模型

Fig.8 Virtual simulation model of tunneling robot

#### 3.2 参数设置

实际硬质路面不会因履带的碾压产生变形,可采用刚体接触摩擦模型<sup>[21]</sup>来模拟履带和地面的作用关系。图8中,山型减振垫和尼龙基体柔性体代替钢履带板和硬质地面接触,山型减振垫和地面接触类型为刚性体接触,尼龙基体柔性体和地面间采用柔性面接触。表2为硬质路面特征参数。

表2 硬质路面特征参数

Tab.2 Characteristic parameters of hard road

路面类型	硬质路面
地面刚度 $k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	2 855
阻尼系数 $c/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	0.57
动摩擦因数 $f_d$	0.25
静摩擦因数 $f_s$	0.30

#### 3.3 极端行驶工况

调整掘进机器人和凸起障碍相对位置,使得当掘进机器人过凸起障碍时,尼龙基体柔性体和被测履带板柔性体恰好位于凸起障碍上方。掘进机器人过凸起障碍仿真结果如图9所示,得到的尼龙基体应力分布如图10所示。

瞬时应力最大值出现在螺栓和尼龙基体连接处,数值为14.8 MPa,尼龙材质屈服强度在60 MPa以上,因此在该工况下尼龙基体不会被破坏。

被测履带板应力分布如图11所示。由于被测履带板不和地面直接接触,地面对被测履带板的作用力通过连接螺栓传递至被测履带板,故最大瞬时

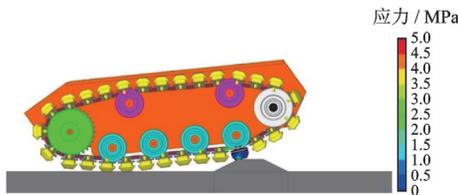


图9 掘进机器人过凸起障碍仿真结果

Fig.9 Simulation results of tunneling robot passing road-blocks

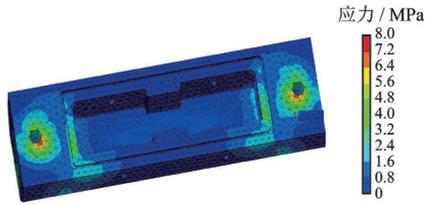


图10 尼龙基体应力分布

Fig.10 Stress distribution of polyamide matrix

应力值出现在连接通孔附近,为 340.17 MPa,被测履带板材质为 Q345 钢,屈服应力值为 345 MPa,最大应力低于屈服应力。因此,在实际测试时,被测履带板不会出现损坏现象而影响测试结果。

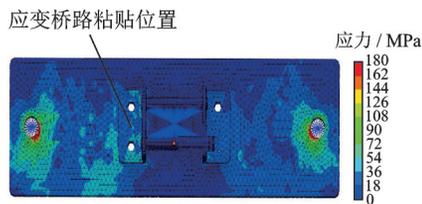


图11 被测履带板应力分布

Fig.11 Stress distribution of tested track plate

实际行驶试验时需综合考虑应变桥路的粘贴位置,既要真实反映履带运行产生的动载荷变化情况,又要便于粘贴。外链板靠近销轴处的应力值为 29.62 MPa,应力变化敏感度较高。

## 4 标定试验

### 4.1 应变片布置

考虑到应变片布置空间较为狭隘,应变桥路选择为半桥桥路,由两片金属应变片(BE120-3AA-P300)垂直布置而成,用来测量被测履带板由于承受拉伸、压缩及弯曲所造成的应力变化。结合图 11 仿真结果,应变桥路粘贴在销轴附近外链板处,可较好地反映履带动载荷的变化。应变桥路布置如图 12 所示。



图12 应变桥路布置

Fig.12 The arrangement of strain gauge bridge

### 4.2 无线传输试验

在传感模块和基体、夹板的接触部位均采用隔音棉填充,组成的嵌入式传感系统结构如图 13 所示。

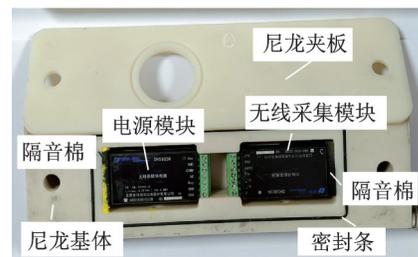


图13 嵌入式传感系统结构

Fig.13 The structure of embedded sensor system

为测试嵌入式传感系统实际的传输距离,在实验室内采用上位机软件对嵌入式传感系统的传输功率进行监测。实际监测时,短距离的变化引起的接收功率的变化较小,因此只记录接收功率产生明显变化时的距离数值。表 3 为无线传输距离对比。

表 3 无线传输距离对比

Tab.3 Comparison of wireless transmission distance

传输距离/m	实测功率/dBm	仿真功率/dBm	相对误差/%
0.6	-65	-63.9	1.7
1.6	-69	-72.4	4.9
2.6	-72	-76.6	6.4
3.6	-77	-79.4	3.1

如表 3 所示,仿真和实测的接收功率误差在 7% 以内,说明所建立的无线传输仿真模型是合理的。接收天线的灵敏度为 -79 dBm,理论上在距离嵌入式传感系统 3.6 m 以内时,上位机均可接收到无线数据,但实测距离超过 3 m 后,上位机和嵌入式传感系统随时会断开连接。因此,实测时考虑将上位机固定在掘进机器人车体处。

### 4.3 传感系统标定

为衡量嵌入式传感系统数据测量及无线传输的准确性,设计标定试验。

1) 组装嵌入式传感系统和被测履带板,上位机和嵌入式传感系统间隔为2 m,在钢履带板单侧销轴处施加不同拉力,共进行4组拉力测试,单一拉力反复施加3次,得到不同拉力下的平均应变数值。

2) 进行外置式DH5905N试验,在无基体、夹板屏蔽作用下对DH5905N进行测试,得到在销轴承受相同拉力工况下的应变数值,与嵌入式传感系统得到的应变数值进行对比。

拉力-微应变标定值如图14所示。可见,相同拉力下的嵌入式传感系统和外置式DH5905N所采集的微应变数值十分接近,说明在尼龙基体、尼龙夹板的屏蔽下,嵌入式传感系统可准确进行数据采集和无线传输。

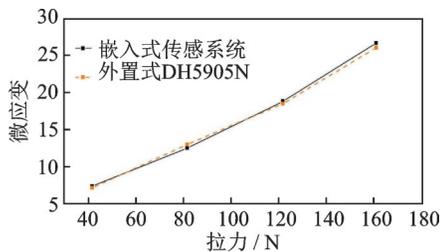


图14 拉力-微应变标定值

Fig.14 The arrangement strain gauge bridge

## 5 传感系统状态监测测试

### 5.1 台架试验

为了验证所设计的嵌入式传感系统动态测试的稳定性,测试得到的动载荷时间历程必须是连续的周期性数据,在实验室设计台架试验。使用台架将掘进机器人从车体托起,使两侧履带悬空,安装嵌入式传感系统进行实测,上位机位于掘进机器人车体处。台架试验布置如图15所示。台架试验动载荷如图16所示。



图15 台架试验布置

Fig.15 Layout of bench test

规定被测履带板和嵌入式传感系统绕履带链环运行一周为一个周期循环,由图16可知,被测履带板和嵌入式传感系统绕履带链环运行3周,动载荷

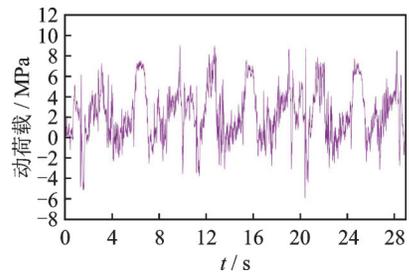


图16 台架试验动载荷

Fig.16 Dynamic load of bench test

变化规律明显。被测履带板和嵌入式传感系统初始位置位于履带链环上部两托链轮间自由支段,2~3.5 s经过导向轮弧形支段,载荷均值为3.29 MPa;4~6 s位于驱动轮和导向轮间下部,载荷均值为0.96 MPa;6~7.5 s位于驱动轮处,载荷均值为4.87 MPa;9.5 s时,被测履带板和嵌入式传感系统回到履带链环上部的初始位置,完成第1个周期循环,在履带链环上部载荷均值为1.5 MPa。在9.5~19 s,19~28 s分别完成第2,3个周期循环。台架工况下,履带链环因重力作用下垂,因此驱动轮和导向轮上部履带为张紧段,动载荷数值相对较大,驱动轮和导向轮间下部履带为悬垂段,动载荷数值相对较小,动载荷在3个周期循环中变化趋势相同,数值相近,同时测试过程中未出现数据中断现象,说明嵌入式传感系统具备稳定的动载荷测试能力。

### 5.2 外路工作状态试验

#### 5.2.1 硬质平路面测试

掘进机器人在硬质平路面直线匀速行驶32 s,嵌入式传感系统共绕履带链环运行3个周期循环。被测履带板硬质平路面动载荷如图17所示。

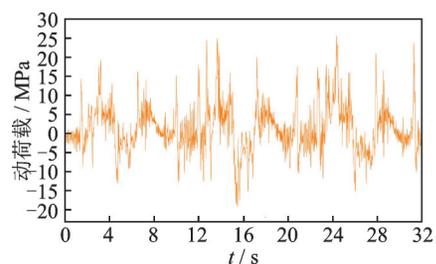


图17 硬质平路面动载荷

Fig.17 Dynamic load of hard flat road

掘进机器人采用后驱行驶,由图17可知,动载荷时间历程具备明显周期性。被测履带板和嵌入式传感系统初始仍位于履带链环上部两托链轮间自由支段,掘进机器人开始行驶后,自由支段载荷均值为

0.61 MPa;被测履带板2~4 s位于导向轮弧形支段,载荷均值为3.11 MPa;4~7 s位于支持支段,载荷均值为1.24 MPa;7~9 s位于驱动轮处,载荷均值为2.97 MPa;在11 s时,被测履带板和嵌入式传感系统回到相对履带链环的初始位置,完成第1个周期循环。动载荷在导向轮和驱动轮处会有较大峰值出现,在支持支段和自由支段数值较小且变化平稳,后续两个周期内的动载荷波动遵循上述变化规律,表明嵌入式传感系统在硬质平路面行驶时,采集的动载荷数据具有完备性和稳定性。

### 5.2.2 过凸起障碍测试

考虑到掘进机器人过凸起障碍时,嵌入式传感系统相对于履带链环有多种相对位置。调整掘进机器人和凸起障碍之间的相对距离,使得当掘进机器人过凸起障碍时,嵌入式传感系统恰好位于凸起障碍上。过凸起障碍测试工况如图18所示。



图18 过凸起障碍测试工况

Fig.18 Test condition of over bulge obstacle

该工况下掘进机器人运行1个周期循环,所得到的被测履带板过凸起障碍动载荷如图19所示。

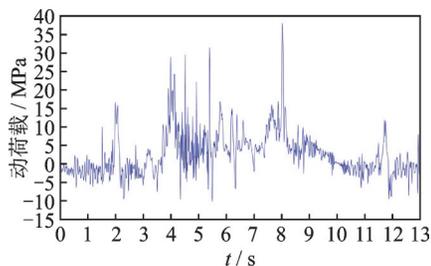


图19 过凸起障碍动载荷

Fig.19 Dynamic load of over bulge obstacle

由图19可知,被测履带板在3.5~4.5 s,7.5~10.5 s分别经过导向轮和驱动轮时会产生较大载荷波动,导向轮弧形支段处的载荷均值为7.9 MPa,驱动轮处的载荷均值为7.22 MPa;在自由支段的载荷均值为0.67 MPa。被测履带板在4.5~7.5 s经过支持支段时的载荷数值变化较大,载荷均值为5.21 MPa,这是由于被测履带板位于凸起障碍上,

每一支重轮和被测履带板接触后都会产生较大的载荷波动。嵌入式传感系统在此工况下采集的动载荷数据反映了被测履带板的载荷变化趋势,且数据采集和传输过程平稳,嵌入式传感系统在过凸起障碍时本身结构未发生变形和损伤,说明系统具备较高的可靠性和安全性。

## 6 结 论

1) 提出了一种实时监测掘进机器人履带动载荷的嵌入式传感系统无线监测方法,在不改变履带链环整体受力完整性的前提下,实现了动载荷的实时可测和无线传输,并验证了嵌入式传感系统的稳定性和可靠性。

2) 通过对嵌入式传感系统的无线传输仿真及实际测试,验证了基体及夹板选材的合理性。通过对掘进机器人的动力学仿真,验证了钢履带板和基体结构强度的可靠性。

3) 嵌入式传感系统可以敏感地反映被测履带板的动载荷时间历程,直接监测履带行驶结构的健康状态,为履带行驶结构的故障预示演化和制定维修策略提供技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] 张宏,康鹏,宋扬,等.滑动式履带行走系统动力学建模方法与试验[J].振动、测试与诊断,2015,35(1):70-75.  
ZHANG Hong, KANG Peng, SONG Yang, et al. Dynamics modeling method and test of sliding crawler travel system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(1): 70-75. (in Chinese)
- [2] 张文栋,薛晨阳.煤矿机械工作状态监测系统研究[J].振动、测试与诊断,2018,38(5):883-889.  
ZHANG Wendong, XUE Chenyang. Research on working state monitoring system of coal mine machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 883-889. (in Chinese)
- [3] 杜秀菊,贾长治,董兆伟.履带车辆行星传动装置疲劳寿命的仿真及预测[J].振动与冲击,2014(13):106-110.  
DU Xiuju, JIA Changzhi, DONG Zhaowei. Simulation and prediction of fatigue life of planetary cage in tracked vehicle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(13): 106-110. (in Chinese)
- [4] 覃凌云,杨书仪,陈哲吾,等.路面激励下的履带车辆负重轮动载荷研究[J].振动、测试与诊断,2021,41(4):

- 652-659.
- QIN Lingyun, YANG Shuyi, CHEN Zhewu, et al. Road wheels' dynamic load of tracked vehicle under road excitation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 652-659.(in Chinese)
- [5] 张志宏, 张宏, 陈有, 等. 基于遗传神经网络的履带行驶系统载荷识别方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(3): 54-61, 89.
- ZHANG Zhihong, ZHANG Hong, CHEN You, et al. Load identification method of track driving system based on genetic neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3): 54-61, 89.(in Chinese)
- [6] ZHAO H Y, WANG G Q, WANG H T, et al. Fatigue life analysis of crawler chain link of excavator[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 737-748.
- [7] 曾子豪, 张京东, 龚雪莲, 等. 拉伸载荷下双销式履带板强度计算方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 831-840.
- ZENG Zihao, ZHANG Jingdong, GONG Xuelian, et al. Strength calculation method of double-pin track shoes under tensile load[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 831-840.(in Chinese)
- [8] LIU W W, CHENG K, WANG J. Failure analysis of the rubber track of a tracked transporter[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(7): 1687814018789526.
- [9] 王方哲, 朱永生, 闫柯, 等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 8-14.
- WANG Fangzhe, ZHU Yongsheng, YAN Ke, et al. Wireless monitoring technology of rolling bearing inner ring temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 8-14.(in Chinese)
- [10] 白茹, 裴东兴, 谢锐. 嵌入式履带车辆主动轮应力测试系统的研究[J]. 电子器件, 2016, 39(3): 746-749.
- BAI Ru, PEI Dongxing, XIE Rui. Researching on the embedded stress test system of vehicle driving wheel[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(3): 746-749.(in Chinese)
- [11] WANG H J, ZHANG Q, XIE F. Dynamic tension test and intelligent coordinated control system of a heavy scraper conveyor[J]. IET Science Measurement & Technology, 2017, 11(7): 871-877.
- [12] 李耀明, 叶晓飞, 徐立章, 等. 联合收割机行走半轴载荷测试系统构建与性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 35-41.
- LI Yaoming, YE Xiaofei, XU Lizhang, et al. Construction and performance experiment of load test system for half axle of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 35-41.(in Chinese)
- [13] 张强. 基于无线传输测试技术的矿用履带行走载荷谱测试方法研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(8): 30-31.
- ZHANG Qiang. Research for load spectrum testing of mining crawler system based on wireless transmission testing technology[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(8): 30-31.(in Chinese)
- [14] 翟岩, 武兵, 牛荫楷, 等. 低功耗刮板输送机张力无线监测系统设计[J]. 工矿自动化, 2019, 45(4): 83-88.
- ZHAI Yan, WU Bing, NIU Linkai, et al. Design of wireless tension monitoring system with low-power consumption of scraper conveyors[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 83-88.(in Chinese)
- [15] 骆铁楠. 刮板输送机圆环链无线张力传感器研制[J]. 工矿自动化, 2018, 44(9): 77-83.
- LUO Tienan. Development of wireless tension sensor of round link chain of scraper conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9): 77-83.(in Chinese)
- [16] 英雪. 无线传感器信号在限定空间传输特性[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [17] 吕文俊, 何华斌. 简明天线理论与设计应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 34-36.
- [18] 吴勇志. 2.4 GHz ISM 频段传输距离计算方法[C]//第二届菲尼克斯电气学术年会. 南京: 菲尼克斯电气中国公司, 2008: 172-176.
- [19] 吕程, 廖瑞金. 阻燃剂  $Al(OH)_3$  对聚氨酯弹性体绝缘性能的影响[J]. 聚氨酯工业, 2016, 31(2): 19-22.
- LÜ Cheng, LIAO Ruijin. The effect of flame retardant  $Al(OH)_3$  on insulation performance of polyurethane elastomer[J]. Polyurethane Industry, 2016, 31(2): 19-22.(in Chinese)
- [20] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2014: 116-118.
- [21] 扈凯, 张文毅, 李坤, 等. 高地隙三角履带底盘多体动力学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 386-394.
- HU Kai, ZHANG Wenyi, LI Kun, et al. Multi-body dynamics modeling and experiment of triangular tracked chassis with high ground clearance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 386-394.(in Chinese)



**第一作者简介:**张宏,男,1970年1月生,博士、教授。主要研究方向为机械动力学设计与健康监测。

E-mail:hexie007@163.com

**通信作者简介:**刘阳,男,1999年4月生,硕士生。主要研究方向为动态测试与无线传感系统。

E-mail:17865566339@163.com