

面向强风环境的带式输送机巡检机器人设计与试验

焦坤洋, 崔钰坤, 景钊时, 王启迪, 迟德霞, 王敏

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2024年9月24日; 录用日期: 2024年10月17日; 发布日期: 2024年10月28日

摘要

本文设计了一种面向滨海地区强风条件下工作的带式输送机巡检机器人。本文首先基于Davenport风功率谱生成了9级风的随机风速, 计算了巡检机器人克服正向随机9级风风载荷下驱动力, 对巡检机器人进行了结构设计, 用Solid works软件进行了建模, 并试制巡检机器人样机。在ADAMS中进行了正向随机风载荷下巡检机器人通过不同轨道间隙以及通过不同坡度的动力学仿真, 结果表明: 当驱动力为75 N、90 N、105 N时, 巡检机器人分别能爬过最大10°、15°、20°的坡。进行了正向随机风载荷下巡检机器人通过20°坡度的通过性试验, 结果表明: 机器人运行过程中振动最大值约为0.21 m/s², 最大振幅约为1.9 mm。

关键词

巡检机器人, 随机风载荷, 带式输送机, 运动学仿真, 抗风性能

Design and Testing of a Belt Conveyor Inspection Robot for Strong Wind Environments

Kunyang Jiao, Yukun Cui, Qianshi Jing, Qidi Wang, Dexia Chi, Min Wang

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Sep. 24th, 2024; accepted: Oct. 17th, 2024; published: Oct. 28th, 2024

Abstract

In this paper, a belt conveyor inspection robot working under strong wind conditions in coastal areas is designed. Firstly, based on the Davenport wind power spectrum, the random wind speed of

文章引用: 焦坤洋, 崔钰坤, 景钊时, 王启迪, 迟德霞, 王敏. 面向强风环境的带式输送机巡检机器人设计与试验[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(5): 464-471. DOI: 10.12677/met.2024.135054

the 9-level wind is generated, and the driving force of the inspection robot to overcome the forward random 9-level wind and wind load is calculated. The structural design of the inspection robot is carried out, and the Solid works software is used to model and trial the inspection robot prototype. The dynamic simulation of the inspection robot passing through different track clearances and different slopes under forward random wind load is carried out in ADAMS. The results show that when the driving force is 75 N, 90 N and 105 N, the inspection robot can climb the slopes of the maximum 10°, 15° and 20° respectively. The passing test of the inspection robot through 15 mm track gap and 20° slope under forward random wind load is carried out. The results show that the maximum vibration value of the robot during operation is about 0.21 m/s², and the maximum amplitude is about 1.9 mm.

Keywords

Inspection Robot, Random Wind Load, Belt Conveyor, Kinematic Simulation, Wind Resistance Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

带式输送机广泛应用在滨海地区煤炭、铁矿石等运输作业中[1], 带式输送机的运行状态直接影响着煤炭进出口的效率。传统的带式输送机人工巡检方式存在较多问题, 已不能够满足带式输送机的巡检需求[2], 使用巡检机器人巡检已成为一个发展方向。Pinto J.K.C 等开发出一款针对变电站设备发热点监测的巡检机器人[3], 这款机器人以悬线为轨道, 内部装设红外热成像仪, 可对所监测设备的温度进行实时监测。吴功平研发了一款具有较强抗干扰能力, 能够实现扫描巡检、图像分析处理等功能的巡检机器人[4]。曹军等研发了一个可长时间对带式输送机进行视觉检测与温度检测的巡检机器人, 用 ADAMS 中对巡检机器人通过 0 mm、0.99 mm 和 1.89 mm 轨道间隙的过程进行仿真, 进行了在不同温度以及齿条缝隙下巡检机器人整体运动和爬坡运动的相关试验[5]。张锐等研究出一种港口带式输送机巡检机器人, 该巡检机器人采用轨道式行走方案, 在 ADAMS 中进行了巡检机器人以 1 m/s 的速度和 0.5 m/s² 的加速度下爬坡过程的仿真, 该研究团队又进行了诸如运动性能试验、定位精度试验、无线通讯试验、无线充电试验等大量试验[6]。

本文针对面向滨海地区强风条件下工作的带式输送机巡检机器人运行问题开展研究。本文基于 Davenport 风功率谱生成 9 级风的随机风速, 计算巡检机器人克服正向随机 9 级风风载荷下驱动力, 对巡检机器人进行了结构设计, 用 ADAMS 进行正向随机风载荷下巡检机器人通过不同轨道间隙以及通过不同坡度的动力学仿真研究。

2. 巡检机器人总体设计

2.1. 正向随机风速的计算

滨海环境下巡检机器人运行时要克服较大的随机风载荷, 该载荷会阻碍巡检机器人的正常行进甚至使巡检机器人发生侧翻, 因此对巡检机器人展开抗风性能的相关研究很有必要。

风功率谱密度是湍流脉动动能在频率上的分布密度, 它常用来描述脉动风基本特性。其中为 Davenport 风功率谱是根据全球各地不同高度实测得到的近 100 多次强风记录, 假定水平阵风谱中的湍流

积分尺度 L 沿高度不变, 并取脉动风速谱为不同离地高度实测值的平均值建立起来的[7] [8]。Davenport 风功率谱的表达式为:

$$\begin{cases} S(n) = \frac{4k\bar{v}_{10}^2 x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \\ x = 1200n / \bar{v}_{10} \end{cases}$$

其中, k 为地面粗糙度系数; \bar{v}_{10} 为标准高度为 10 m 处的平均风速; n 为频率; x 为湍流积分尺度系数。

根据 Davenport 风功率谱, 设计风速为 24.5 m/s (9 级风), 用 MATLAB 编制代码生成一组随机风速, 如图 1 所示。

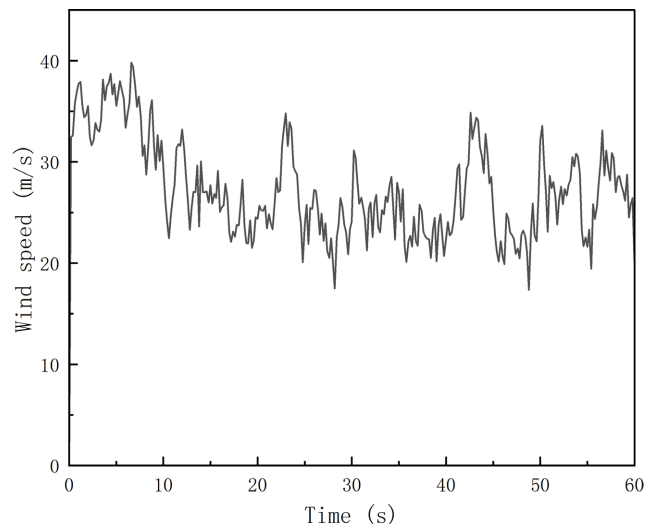


Figure 1. Random wind velocity chart
图 1. 随机风速图

2.2. 正向随机风载下巡检机器人驱动力计算

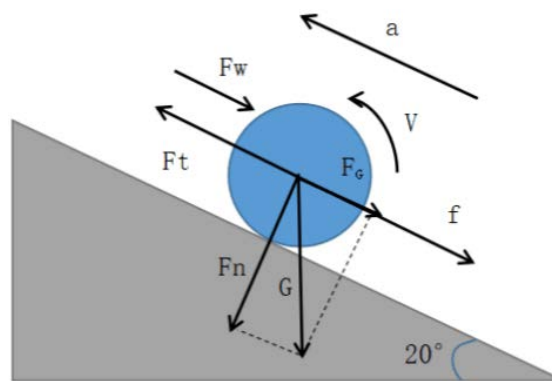


Figure 2. Force analysis diagram of inspection robot
图 2. 巡检机器人受力分析图

巡检机器人的最大速度 v 为 1 m/s, 最大加速度 a 为 0.5 m/s², 机器人整体重量 m 不超过 30 kG, F_t 为电机的驱动力, FG 为机器人由于自身重力所产生的分力, F_w 为机器人受到的风阻, f 为机器人受到的摩擦力。巡检机器人的受力分析如图 2 所示。

巡检机器人驱动力求解方程为：

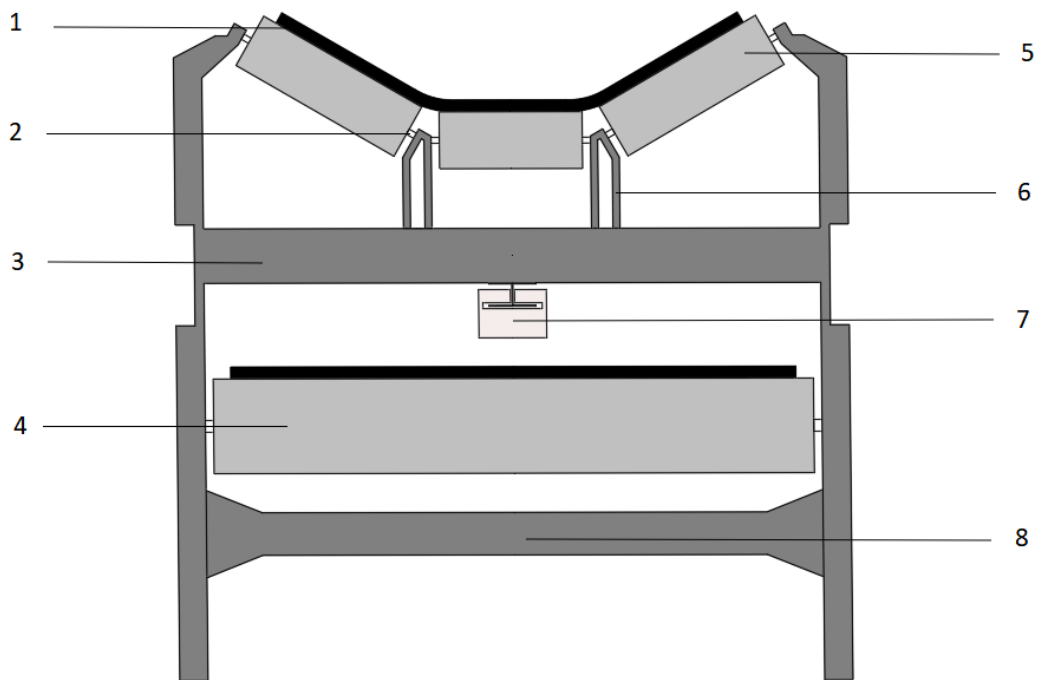
$$\begin{cases} F_t - F_G - F_w - f = ma \\ F_G = G \sin \theta \\ f = \mu G \cos \theta \\ F_w = \frac{1}{2} C_D A \rho U_a^2 \end{cases}$$

其中： C_D 为风阻系数， C_D 为1； ρ 为空气密度，在11℃的情况下 ρ 为1.243 kg/m³； A 为迎风面积，本文所设计的机器人的迎风面积为0.07 m²； U_a 为风速，得到驱动力至少约为189.46 N。

2.3. 巡检机器人结构设计

2.3.1. 巡检机器人的布置方案

本研究于带式输送机上下托辊间安装轨道、巡检机器人，轨道安装在上托辊架支撑横梁3，在支撑横梁中心位置沿着带式输送机方向安装巡检机器人7，如图3所示。



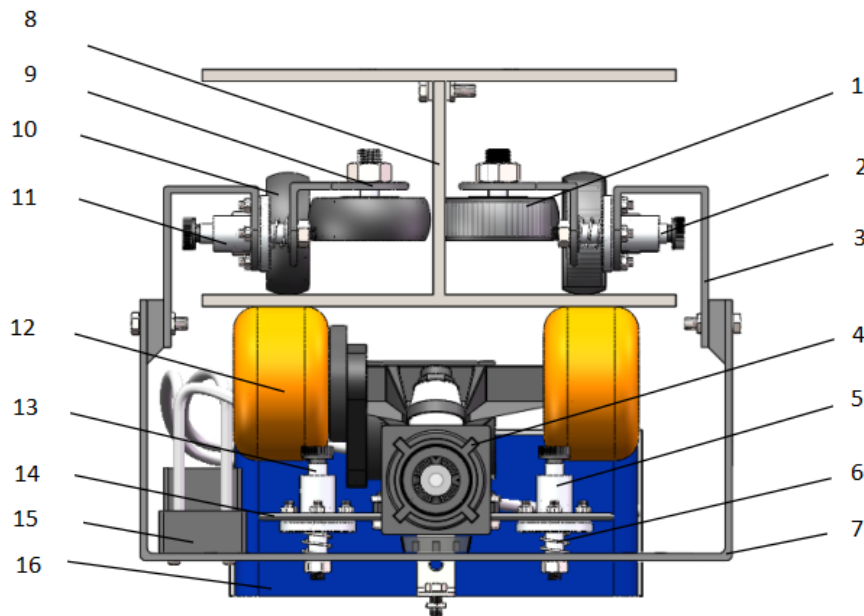
1. 输送带, 2. 托辊中心轴, 3. 上托辊架支撑横梁, 4. 下托辊, 5. 上托辊, 6. 托辊支撑架, 7. 轨道与机器人, 8. 连接板

Figure 3. Layout scheme

图3. 布置方案

2.3.2. 巡检机器人的行走机构设计

巡检机器人行走机构主要由驱动部分、支撑部分、夹紧部分组成，如图4所示。驱动部分由两个驱动轮12紧贴轨道下侧，利用橡胶与轨道之间的摩擦力前进。支撑部分由驱动轮12下方的固定板连接支撑架14支撑驱动轮，驱动轮支撑架14下方使用四组光轴螺栓-直线轴承-弹簧的弹性组合与固定架7实现弹性连接。夹紧部分为保证巡检机器人运行时不脱离轨道，在轨道两侧安装四组夹紧机构进行限位，在弹簧的弹力作用下，两侧夹紧轮紧贴着轨道内侧滑动，将轨道夹紧。



1. 压紧轮, 2. 光轴螺栓, 3. 从动轮支撑架, 4. CCD 高速相机, 5. 直线轴承, 6. 弹簧, 7. 固定架, 8. 专用轨道, 9. 夹紧轮支撑架, 10. 从动轮, 11. 直线轴承, 12. 驱动轮, 13. 光轴螺栓, 14. 驱动轮支撑架, 15. 电子调速器, 16. 电池

Figure 4. Schematic diagram of walking mechanism of inspection robot
图 4. 巡检机器人行走机构示意图

3. 正向随机风载荷下巡检机器人运动学仿真

采用 SolidWorks 软件建立巡检机器人仿真模型, 再导入 ADAMS 软件中进行仿真计算; 对机器人进行建模时, 将重点对外部整体结构进行设计, 忽略掉不影响仿真结果的细节部分。将模型中将机器人轨道通过龙门架固定在地面上, 龙门架于地面之间为固定副连接; 驱动轮、从动轮及夹紧轮设置为旋转副; 直线轴承和制动螺栓之间为移动副; 再添加驱动轮、从动轮及预紧轮与轨道之间的接触约束; 巡检机器人夹紧轮支撑架与从动轮支撑架、机架与驱动轮支撑架之间为弹性连接, 机架与驱动轮支撑架之间各压缩弹簧的预载荷为 25 N, 夹紧轮支撑架与从动轮支撑架之间各压缩弹簧的预载荷为 5 N, 压缩弹簧的刚度系数为 0.7 N/mm。

巡检机器人爬坡时, 其重力会产生一个阻碍机器人前行的分力, 该分力与滨海环境中的随机风载共同作用, 需要巡检机器人在爬坡时需要较大驱动力才能运行。本文用 ADAMS 对驱动力为 75 N、90 N、105 N 时, 巡检机器人爬上分别为 10°、15°、20° 的坡度进行仿真研究, 结果如图 5。

由图 5 可知, 驱动力为 105 N, 在爬坡角度为 10°、15°、20° 时, 巡检机器人在 X 轴方向(垂直地面方向)和 Z 轴方向(前进方向)上的位移分别达到约 608.1 mm、1363.4 mm、2412.4 mm 和 8443.3 mm、11480.4 mm 和 14615.9 mm; 在 Y 轴方向(巡检机器人横向)上的最大位移分别约为 0.5 mm、0.47 mm、0.49 mm, 机器人在不同方向上位移最大值分别出现在 2.8 秒、3.6 秒、5.4 秒, 可知坡度越小, 巡检机器人可以用更短的时间爬上坡。巡检机器人 X 轴与 Z 轴方向上的位移未出现减小的现象, 说明 105 N 的驱动力已经能够驱动巡检机器人能爬过 10°、15°、20° 的坡度。当驱动力分别为 75 N 和 90 N, 巡检机器人能爬过最大坡度分别为 10° 和 15° 的坡, 图略。振动幅值较小。

当驱动力分别为 75 N (图略), 爬坡角度为 10° 时, 巡检机器人于约 5.4 秒左右在 X 轴(垂直地面方向)与 Z 轴(前进方向)方向上的位移分别约为 608.14 mm 和 8565.28 mm; 巡检机器人 X 轴与 Z 轴方向上的位

移未出现减小的现象, 说明 75 N 的驱动力能够驱动巡检机器人翻越 10° 的坡度; 在爬坡角度为 15° 与 20° 时, 巡检机器人 X 轴与 Z 轴方向上的位移出现减小的现象, 说明巡检机器人在运动过程中出现了滑坡, 75 N 的驱动力不能够驱动巡检机器人翻越 15° 和 20° 的坡度。

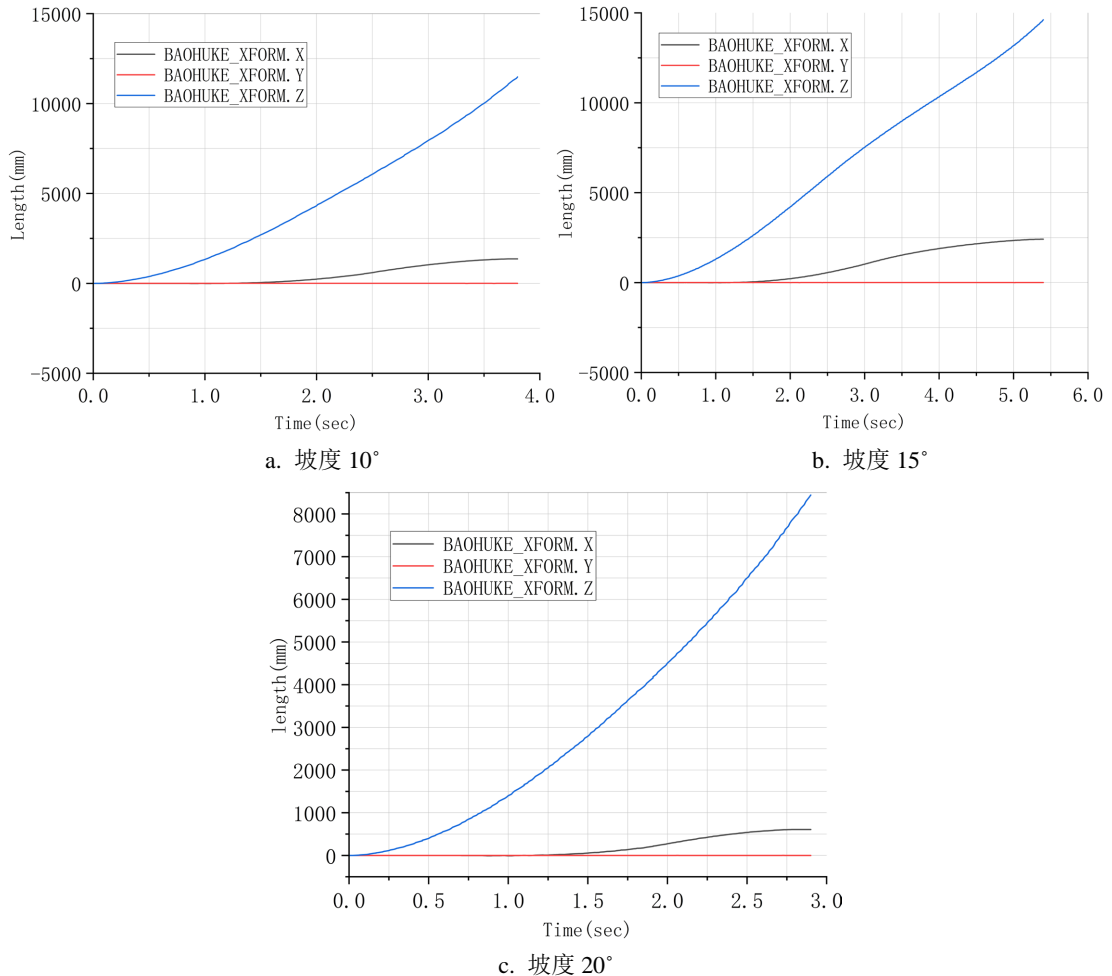


Figure.5. When the driving force is 105 N, the displacement curve of the center of mass of the protective shell when the inspection robot passes through different slopes

图 5. 驱动力为 105 N 时巡检机器人通过不同坡度时保护壳质心的位移变化曲线

当驱动力分别为 90N (图略), 在爬坡角度为 10° 时, 巡检机器人于约 3.5 秒左右在 X 轴方向(垂直地面方向)上的位移约为 608.03 mm, Z 轴方向(前进方向)上的位移约 8299.67 mm; 在爬坡角度为 15° 时, 巡检机器人于约 5.4 秒在 X 轴和 Z 轴方向上的位移分别约为 1363.11 mm 和 11618.61 mm; 爬坡角度为 10° 与 15° 时巡检机器人 X 轴与 Z 轴方向上的位移未出现减小的现象, 说明 90 N 的驱动力能够驱动巡检机器人翻越 10° 与 15° 的坡度。爬坡角度为 20° 时, 巡检机器人 X 轴与 Z 轴方向上的位移出现为减小的情况, 因此, 说明巡检机器人在运动过程中出现了滑坡现象, 90 N 的驱动力不能够驱动巡检机器人翻越 20° 的坡度。

4. 巡检机器人风载荷作用下通过性试验

4.1. 巡检机器人试验台搭建

根据巡检机器人的三维模型制作了物理样机, 用于风载荷作用下通过性试验, 如图 6 所示, 并搭建

了巡检机器人风载荷作用下通过性试验台。成都宇凡科技有限责任公司 的 FDW400 海洋风载荷实验平台可以产生恒定值风载荷，用以生成风载荷，该平台风速范围为 0.5~30 m/s，调频范围为 0~50 Hz，额定功率为 1.5 kW。加速度传感器为澄科 CT1010L 单轴纵向振动加速度传感器，数据采集卡为 NIMCCUSB-23116 位多功能数据采集卡。

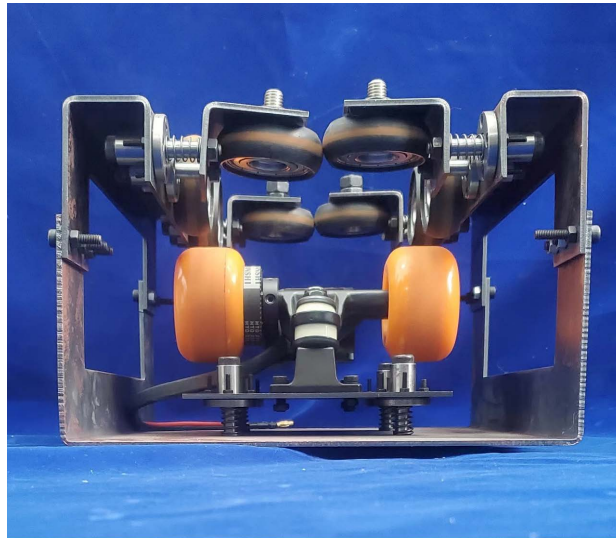


Figure.6. Inspection robot prototype
图 6. 巡检机器人样机

4.2. 正向风载荷下巡检机器人爬坡试验

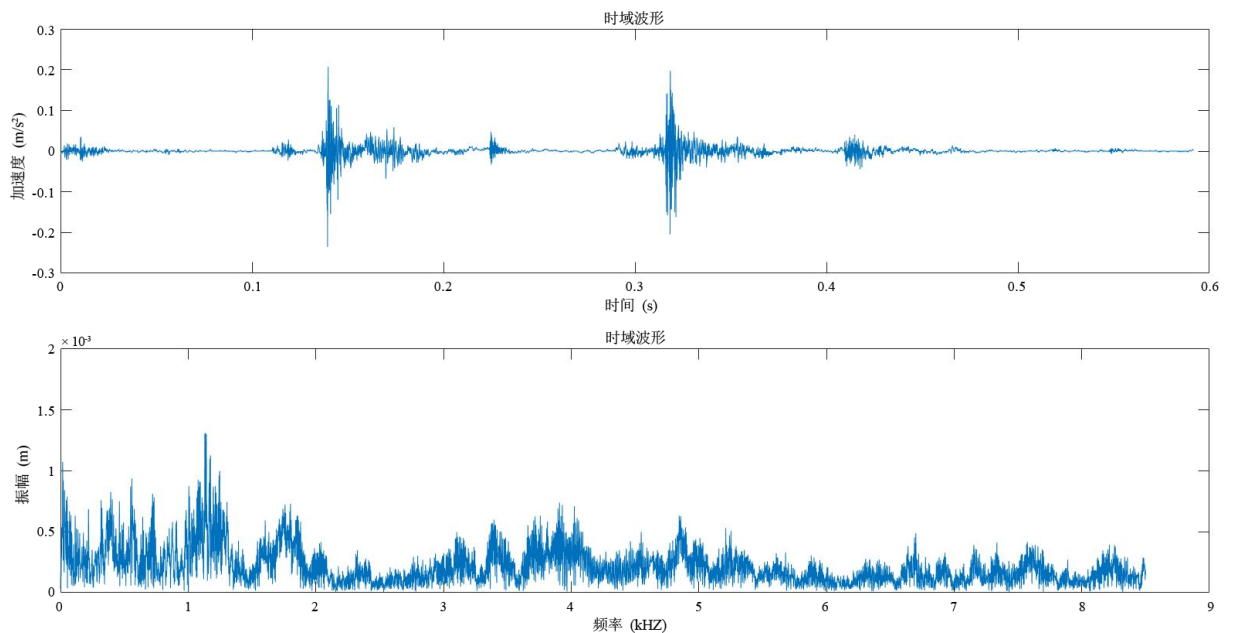


Figure.7. The vibration signal diagram of the inspection robot in time-frequency domain when the climbing Angle is 20°
图 7. 爬坡角度为 20°时巡检机器人时频域振动信号图

将风速设置约为 21 m/s；将轨道与地面的角度设为 20°，用遥控器控制巡检机器人通过 20°的坡度，

巡检机器人爬坡过程的振动信号, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 当爬坡角度为 20° 时, 垂直地面方向(X 轴方向)巡检机器人加速度的最大值约为 0.21 m/s^2 , 最小值约为 -0.23 m/s^2 , 其方差约为 0.000174 , 波形因子约为 2.5 ; 当频率约为 1136 赫兹时, 其振幅达到最大, 约为 1.3 mm 。巡检机器人在此爬坡过程中垂直地面方向的振动较大, 此情况下巡检机器人爬坡过程存在颠簸, 但是能够顺利通过。

5. 结论

本文基于 Davenport 风功率谱生成了 9 级风的随机风速, 计算了巡检机器人克服随机 9 级风载荷所需的驱动力; 对巡检机器人进行了结构设计, 用 Solid works 软件建立了巡检机器人三维模型; 用 ADAMS 软件进行了正向随机风载荷作用下巡检机器人通过不同轨道间隙、不同坡度的动力学仿真, 结果表明: 当驱动力分别为 75 N 、 90 N 、 105 N 时, 巡检机器人能爬过最大值为 10° 、 15° 、 20° 的坡。正向随机风载荷作用下, 巡检机器人通过 20° 坡度的通过性试验结果表明: 巡检机器人爬坡过程中最大振动值约为 0.21 m/s^2 , 最大振幅约为 1.9 mm , 运行状况良好。

基金项目

2023 年大学生创新创业训练计划立项项目(项目编号: S202310148046)。

参考文献

- [1] 杨彦利, 苗长云, 亢伉, 等. 输送带跑偏故障的机器视觉检测技术[J]. 中北大学学报, 2012, 33(6): 667-671.
- [2] 高建龙. 变电站智能巡检机器人机械系统设计与巡检技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [3] Pinto, J.K.C., Masuda, M., Magrini, L.C., Jardini, J.A. and Garbelloti, M.V. (2008) Mobile Robot for Hot Spot Monitoring in Electric Power Substation. 2008 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, 21-24 April 2008, 1-5. <https://doi.org/10.1109/tdc.2008.4517245>
- [4] 吴功平, 肖晓晖, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制[J]. 电力系统自动化, 2006(13): 90-93+107.
- [5] 曹军. 带式输送机巡检机器人设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 张锐. 港口带式输送机巡检机器人的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 曲阜师范大学, 2021.
- [7] 董安正. 高层建筑结构抗风可靠性分析[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [8] 王修琼, 崔剑峰. Davenport 谱中系数 K 的计算公式及其工程应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 849-852.