

电缆隧道架空式巡检机器人行走机构研究与应用

黄双得¹, 周仿荣², 普凯¹, 王韬¹

(1. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650001; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 随着电缆隧道建设的普及, 架空式巡检机器人得到了广泛应用。为保证巡检机器人安全稳定行走, 针对电缆隧道特点, 设计了一种架空式巡检机器人行走结构。首先, 详细阐述机器人行走机构的整体结构; 其次, 对行走机构的驱动力、爬坡能力和最小转弯半径等相关参数进行研究分析; 最后, 通过仿真实验和实际机器人测试实验, 验证了所设计行走机构的可行性和合理性。

关键词: 电缆隧道; 架空式巡检机器人; 行走机构; 参数分析

Research and application of walking mechanism of overhead patrol robot for cable tunnel

HUANG Shuangde¹, ZHOU Fangrong², PU Kai¹, WANG Tao¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd. Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650001, China; 2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: With the popularization of cable tunnel construction, overhead patrol robot has been widely used. In order to ensure the safe and stable walking of patrol robot, an overhead patrol robot walking mechanism is designed according to the characteristics of cable tunnel. Firstly, the structure of the overall robot walking mechanism is elaborated in detail; secondly, the driving force, climbing ability and minimum turning radius of the walking mechanism are studied and analyzed; finally, the feasibility and rationality of the designed walking mechanism are verified by simulation experiments and actual robot test experiments.

Key words: cable tunnel; overhead patrol robot; walking mechanism; parameter analysis

0 引言

随着现代城市建设的快速发展, 架空线路入地已经成为了一种发展趋势, 与此同时, 各

类电缆隧道也得到了迅速发展。目前, 电缆隧道大致可以分为三种形式: 明挖法隧道、盾构法隧道和顶管法隧道, 其主要特点是距离长、地形复杂以及电缆种类多并且相互错综复杂, 这给人工巡检带来了极大的挑战。因此, 为了有效地完成对电缆隧道的巡检工作, 巡检机器

电缆隧道智能可视化移动检测技术应用研究
(YNKJXM20170248)

人逐渐成为了替代人工巡检的最佳工具^[1-2]。

对于电缆隧道巡检机器人而言,合理的行走机构是机器人完成避障及越障等动作,实现正常巡检工作的基础和关键^[3]。目前,电缆隧道巡检机器人的行走机构主要分为两种:地面行走式^[4]和架空轨道式^[5]。而地面行走式机器人又可以分为两种:轮式行走机器人和履带式行走机器人^[6]。轮式行走机器人操控简单,但是越障困难,对隧道地面环境要求高。履带式行走机器人相比轮式行走机器人越障能力有所增强,但是其操作困难且成本昂贵。与地面行走式机器人相比,架空隧道式巡检机器人更容易控制且不受电缆隧道路面环境的干扰,同时具有构造简单、技术成熟和巡检效率较优等特点^[7-8]。目前,国内外对电力隧道巡检机器人的研究已经取得了一些成果。华盛顿大学的Bing Jiang, Alanson P. Sample等人于2005年研制出了一套名为“巡游者”的地下电缆检测机器人^[9-10]。

“巡游者”机器人沿着电缆线路行走,遇到障碍物时,越过障碍物继续行走,但目前的电缆排列并非全在地面敷设,还有靠墙架空敷设,故该巡检机器人存在着较大的局限性。上海电力公司和上海电力大学于2009年合作研发了一种小型的电缆隧道巡检机器人^[11],该机器人采用履带式移动结构,越障能力较强,但地面障碍物也极大地影响着巡检机器人的移动。杭州市电力公司和浙江大学于2012年合作研制了一台电缆隧道巡检机器人^[12],该机器人采用轮式移动机构,越障能力较差,只能在大型地面相对平缓的电缆隧道中进行工作。

综上所述,无论是驱动系统为轮式的电缆隧道巡检机器人,还是为履带式的电缆隧道巡检机器人,都对道路环境的依赖非常严重。因此,为了避免和减少环境给智能巡检机器人巡检带来的影响,本文根据电缆隧道特点,设计了一种架空式巡检机器人行走机构,并通过实验验证了该行走机构能够有效地应用于架空式机器人对电缆隧道的巡检中。

1 机器人行走机构整体结构

根据电缆隧道特点,本文设计的架空式巡检机器人行走机构主要包含四个部分,即轨道结构、传动结构、导向结构和紧急制动结构,如图1所示。

轨道结构采用改进后的工字梁轨道,为了进一步提高巡检机器人轨道使用率,同时,对于用料采用具有较高强度和耐腐蚀性的铝合金材料。

传动结构采用齿轮齿条传动方式进行设计,通过齿轮齿条的咬合来提高机器人巡检的精确度及稳定性^[13]。

导向结构主要是提供机器人在轨道上的约束与导向,保证机器人能够紧贴轨道运动,同时保证经过弯道部分能够平稳转弯,不会卡住或者脱离轨道。

制动结构主要针对电缆隧道内部出现突发情况时,如火灾或线路短路等,能够紧急制动避免对机器人造成损害,并迅速定位事故地点以及进行灭火作业。同时,在机器人紧急制动时将现场的情况传输给相应的工作人员,使工作人员对现场突发情况做出及时有效的应对措施,确保电缆隧道的安全。

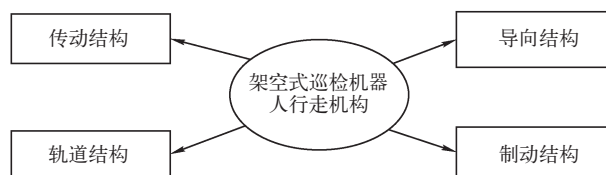


图1 行走机构组成示意图

Fig. 1 Composition sketch of walking mechanism

2 机器人行走机构参数分析

为保证所设计的行走机构能够满足电缆隧道架空式巡检机器人的行走要求,需要对部分的参数进行分析,其中包括行走机构的驱动力分析、爬坡性能分析和运动约束下最小转弯半径分析。为了方便分析,本文以实验测试的巡检机器人为例进行分析。

2.1 驱动力分析

对于电缆隧道架空式巡检机器人行走机构。首先需要对驱动力进行分析,针对导向结构,机器人受力示意图如图2所示。

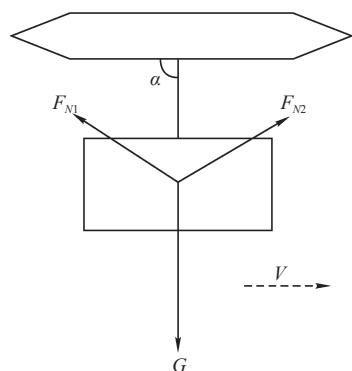


图2 机器人导向结构受力示意图

Fig. 2 Force diagram of robot guiding structure

假设该机器人总重量为 G ,最大运动速度为 V ,机器人与轨道角度为 α ,齿轮与轨道间的滚动摩擦系数为 μ_1 ,齿轮模数为 m ,齿数为 z ,齿轮传动效率为 η_1 ,导向机构左右两侧轮子受力情况为 $(F_{N1}+F_{N2})$ 。由此,巡检机器人直线行驶时所受的重力 G 、滚动摩擦力 F_μ 、电功率 P 以及减速器输出扭矩 M 分别可由式(1)~式(4)计算得到

$$G = (F_{N1} + F_{N2}) \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$F_\mu = \mu_1 (F_{N1} + F_{N2}) \quad (2)$$

$$P = \frac{F_\mu V}{\eta_1} \quad (3)$$

$$M = F_\mu \frac{d}{2} = F_\mu \frac{mz}{2} \quad (4)$$

本文以实验测试的电缆隧道巡检机器人为例,该机器人总重量 G 为40 kg,最大运动速度 V 为1.6 m/s, α 为 90° ,齿轮与轨道间的滚动摩擦系数 μ_1 为0.3,齿轮模数 m 为4 mm,齿数 z 为24,齿轮传动效率 η_1 为0.95。由此可得,该机器人各项参数为: $F_{N1}+F_{N2}=\sqrt{2} G$; F_μ 为169.71 N; P 为285.8 W; M 为8.146 N·m。

2.2 爬坡性能分析

对电缆隧道而言,其不可能所有路段都是

平坦笔直的,总会存在高低起伏的线路,这是必然亦是正常的现象^[14]。因此本文对巡检机器人爬坡的受力情况进行了分析。首先,假设:①机器人在爬坡期间,忽略冲击力的干扰,保持匀速前行;②导向轮与轨道之间只存在静摩擦力。机器人爬坡受力情况如图3所示。

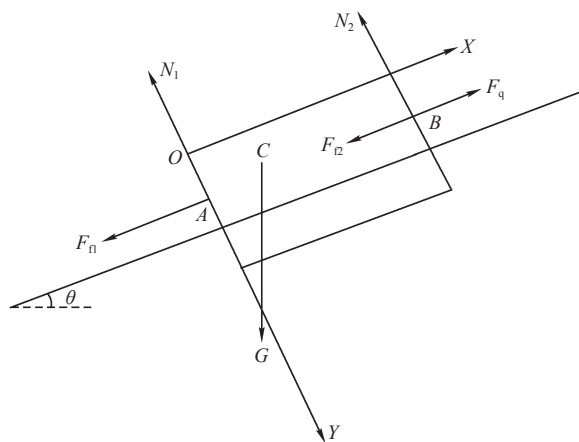


图3 机器人爬坡示意图

Fig. 3 Sketch of robot climbing

图3中, G 为巡检机器人的重力,力作用于点 C 上; N_1 、 N_2 为隧道对机器人前后两组导向结构的支持力; θ 为隧道的坡度; F_q 为巡检机器人的驱动力,力作用于 AB 段中; F_{f1} 为前端导向结构承受的摩擦力,力作用于 A 点上; F_{f2} 为后端导向结构承受的摩擦力,力作用于 B 点上。经整理化简后,支持力 N_1 、支持力 N_2 以及驱动力 F_q 分别为

$$N_1 = \frac{(\overline{AB} - \overline{AC} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}) G \cos \theta}{\overline{AB} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

$$N_2 = \frac{G \cos \theta \cdot \overline{AC}}{\overline{AB} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (6)$$

$$F_q = G \left[\frac{\cos \theta}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \sin \theta \right] \quad (7)$$

由于电缆隧道顶部坡度通常都会保持在 20° 以内,因此,本文选取了三个角度(20° 、 15° 和 10°)来测量隧道对机器人前后两组导向结构的支持力 N_1 、 N_2 ,巡检机器人的驱动力 F_q

以及减速器输出力矩 M 。此外,设重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 , $\overline{AB}$ 为 360 mm ,由于装配与实际加工是存在一定误差,故 $\overline{AC}$ 选取了一个范围值,即 $90\sim 110\text{ mm}$ 。结合上文设定的参数可对 N_1 、 N_2 和 F_q 进行计算,结果如下表所示。

根据表1可以看出,巡检机器人在坡度为 20° 时的减速输出扭矩为 $13.93\text{ N}\cdot\text{m}$ 。因此,为保证行走机构正常运行,其驱动电动机的减速输出扭矩,应大于 $13.93\text{ N}\cdot\text{m}$ 。基于此,本文选择型号为EC-4POLE 32型的驱动电动机,其额定功率为 480 W ,额定力矩为 $0.961\text{ N}\cdot\text{m}$,最大效率为 82% 。选择与此相对应的减速器,型号为MX50,其减速比为 $30:1$,最大效率为 68% 。由驱动电动机和减速器信号可知其输出扭矩为 $16.075\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

表 不同坡度下的输出

Tab. Output at different slopes

$\theta (^\circ)$	10	15	20
N_1/N	449.44 ~ 427.99	440.82 ~ 419.79	428.85 ~ 408.38
N_2/N	136.49 ~ 166.82	133.87 ~ 163.62	130.23 ~ 159.18
F_q/N	231.85	262.10	290.35
$M/\text{N}\cdot\text{m}$	11.13	12.58	13.93

2.3 运动约束下最小转弯半径分析

电缆隧道除了斜坡路段和平坦路段以外,也存在较多弯曲路段,当巡检机器人转弯时,需要外力来协助机器人^[15]。由于本文研究的巡检机器人与轨道垂直,主要受向下的重力和向上的支持力影响,但重力无法为机器人转弯提供向心力,因此,本文通过导向结构提供的支持力作为巡检机器人转弯时的向心力,如图4所示。设导向结构以 A 点为中心点进行转动的,当 AB_1 摆动到 AB 时,会与制动结构中的 C 相切,说明导向机构的运转会受到制动结构的干扰,转动角度存在一定的局限性。根据图4可得

$$\frac{AD-BC}{AB} = \sin \lambda \quad (8)$$

$$\frac{AE}{AO} = \sin \lambda \quad (9)$$

式中, AD 为导向结构与制动结构之间的间距为 85 mm ; BC 为V形轮的半径, BC 为 55 mm , ; AE 为 170 mm ; AB 为 172.9 mm 。

由此可以计算出, λ 为 10° ,机器人转弯最小半径 AO 为 979.77 mm 。

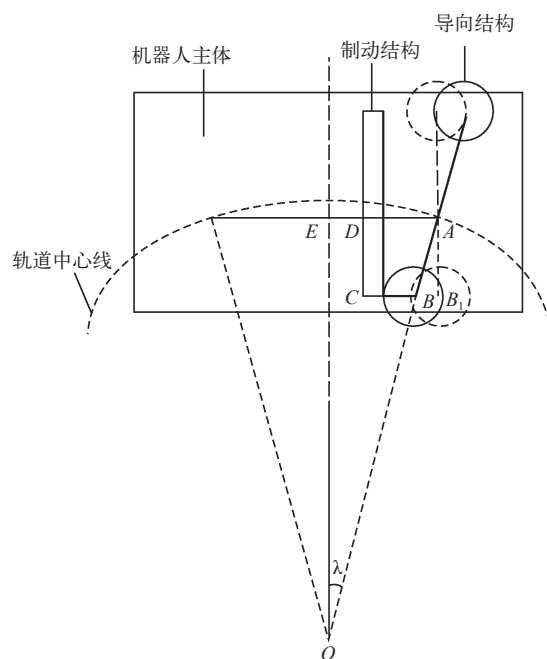


图4 导向结构转弯半径

Fig. 4 Turning radius of guiding structure

3 实验与结果分析

3.1 仿真实验

仿真实验主要通过ADAMS软件平台对多刚体系统进行运动学和动力学求解^[16]。仿真实验无须考虑巡检机器人中的零件、控制元件以及驱动器等带来的约束,只需对系统的质心与质量进行考虑即可。因此本文通过Solid Works软件对电缆隧道架空式巡检机器人简化模型进行构建后再导入ADAMS平台进行仿真,简化模型如图5所示。该模型主要由轨道、机器人本体、伸缩机构和导向轮等构成。

对于行走机构而言,动力源的选择至关重要。因此,本文主要对所设计行走机构的动力源选择的合理性进行了验证。通过仿真实验测试了巡检机器人在定速和变速行驶下电动机输出转矩间的关系。实验基本步骤如下:①设置

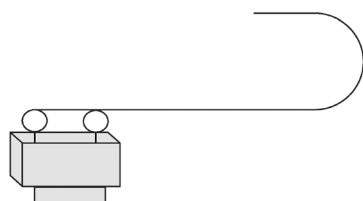


图5 机器人简化模型

Fig. 5 Robot simplified model

工作环境；②修改模型中各个部件的名称及颜色；③构建约束副；④施加力载荷；⑤添加驱动；⑥仿真控制。

对于机器人水平直线运动时，机器人速度变化趋势与减速器输出扭矩的仿真结果分别如图6、图7所示。从图6、图7中可以看出，减速输出扭矩峰值为 $8.284 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，大于前文计算的理论值 $8.146 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，其中 $7\sim 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 属于稳定值的波动范围。同时，实验仿真了机器人在坡度为 20° 的直线电缆隧道中行驶时的减速器输出扭矩变化趋势如图8所示。从图8中可以看出，减速输出扭矩峰值为 $14.73 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，大于上述所计算的理论值 $13.93 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，并且均小于行走机构所选的驱动源的减速输出扭矩 $15.23 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。由此表明，本文对行走机构的参数分析基本合理，且驱动源的选择也满足行走要求。

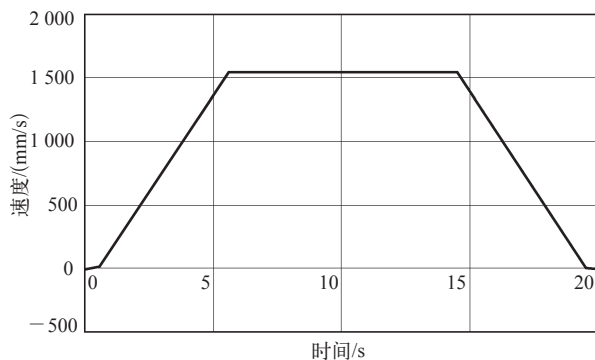


图6 机器人运动速度变化趋势

Fig. 6 Variation trend of robot motion velocity

3.2 电缆隧道架空式巡检机器人测试实验

为进一步验证本文所设计的行走机构的合理性，对实际电缆隧道架空式巡检机器人进行了测试，如图9所示。实验主要测试了机器人运动时行走机构减速器的输出扭矩，结果如图10所示。

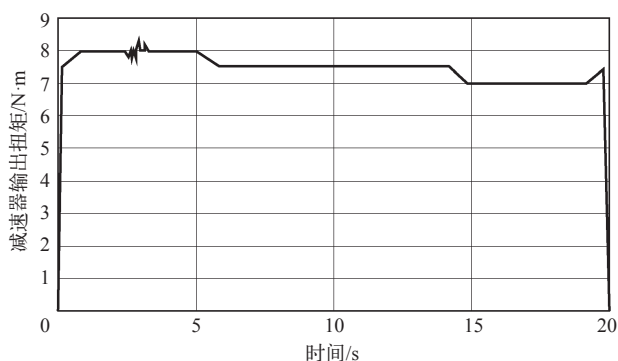


图7 水平直线行驶减速器输出扭矩

Fig. 7 Output torque of horizontal linear driving reducer

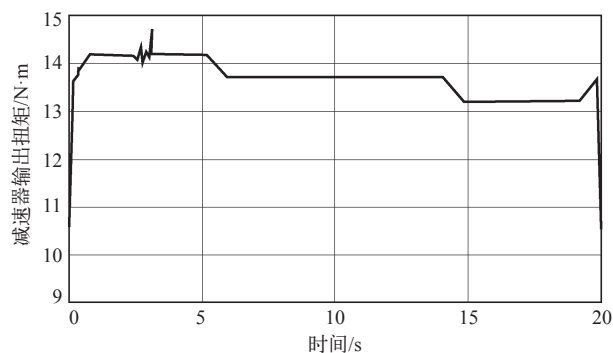


图8 坡度为 20° 下行减速器输出扭矩

Fig. 8 Output torque of downward driving reducer with slope of 20 degree



图9 电缆隧道架空式巡检机器人

Fig. 9 Overhead patrol robot for cable tunnel

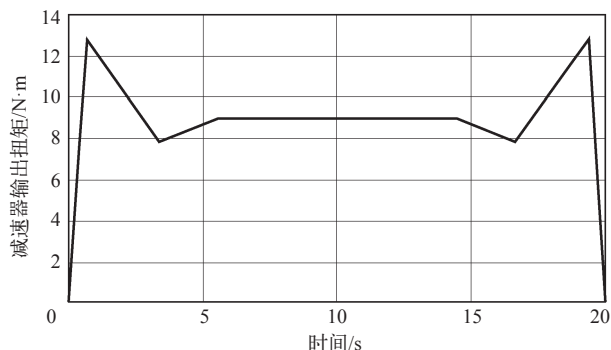


图10 机器人减速器输出扭矩变化

Fig. 10 Variation of torque output of robot reducer

从图10中可以看出, 减速器输出扭矩的峰值为12.766 N·m, 较大于仿真测试结果, 稳定值为7.974 N·m, 与仿真测试中的稳定值波动范围吻合。对于峰值超出仿真实验中的峰值主要是由于机器人在运行中加速度变化不稳定造成的, 但实际上仍小于驱动电动机额定输出的扭矩15.23 N·m。因此, 通过实测结果进一步验证了所设计的行走机构的合理性。

4 结束语

本文针对电缆隧道特点, 分析了架空式巡检方案的优越性, 并设计了巡检机器人行走机构; 同时, 针对机器人行走机构的驱动力、机器人爬坡性能以及运动约束下最小转弯半径进行了深入分析; 最后, 通过仿真实验以及实际电缆隧道巡检机器人对该行走机构进行了验证。实验结果表明, 本文对行走机构的参数分析以及驱动源的选择都具有合理性, 并且所设计的行走机构可以有效地应用于电缆隧道的巡检中。由于实验条件限制, 仅对机器人最小转弯半径进行了理论分析, 未对其进行实验验证, 后续工作将对其进行进一步验证; 同时, 针对巡检机器人在运行中加速度变化不稳定等问题, 对行走机构进行进一步优化。

参考文献

- [1] 卢嘉栋. 面向电缆隧道巡检机器人的漏泄电缆分布式系统[J]. 电气应用, 2016, 35(17): 44-50.
- [2] 周维, 张彬. 广州地区电力隧道内电缆铺设设计[J]. 中华民居, 2011(9): 6-7.
- [3] 周卫元, 方飞, 陈立建, 等. 面向地下管道的四向行走智能机器人系统[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(9): 73-76.
- [4] 付汝辉. 小型隧道检测用履带机器人的研究[J]. 装备制造技术, 2010(3): 21-22.
- [5] 罗俊豪, 颜雨薇. 变电站自动巡检机器人系统及其关键技术[J]. 电气应用, 2014, 33(13): 80-84.
- [6] 张惠. 悬挂式巡线机器人的设计与实现[D]. 兰

州: 兰州大学, 2015.

- [7] 刘冰, 张兴永, 张卫东, 等. 电缆隧道智能巡检机器人的设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 88-88.
- [8] 崔旺. 隧道巡检机器人的结构设计与运动控制[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017.
- [9] JIANG B, MAMISHEV A. Robotic monitoring of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 912-918.
- [10] JIANG B, SAMPLE A P, MAMISHEV A. Mobile Monitoring for Distributed Infrastructures[C]. IEEE International Conference Mechatronics and Automation, IEEE, 2005: 138-143.
- [11] 姜芸, 付庄. 一种小型电缆隧道检测机器人设计[J]. 华东电力, 2009, 37(1): 95-97.
- [12] 李佰国. 对电缆隧道运行中巡检机器人技术的研究[J]. 中国新通信, 2016, 18(23): 156-156.
- [13] 杜益刚. 电缆隧道巡检机器人的研制[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014.
- [14] 高原, 张兴永, 张卫东, 等. 电缆隧道运行中巡检机器人的有效运用[J]. 中国新通信, 2017, 19(7): 148.
- [15] 张志飞. 变电站机器人智能巡检系统应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [16] 魏可心, 周璇, 翟亚婷, 等. 基于ADAMS的双足机器人建模仿真方法[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(2): 64-68.

作者简介



黄双得

黄双得(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路工程。

周仿荣(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备故障诊断、电网防灾减灾。

(收稿日期: 2019-05-30) **EA**