

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.011

# 隧道电缆巡检机器人结构设计及其力学性能分析

刘子恒, 吴杰, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210000)

**摘要:** 为利用机器人代替人工完成隧道电缆巡检, 设计一款带云台升降的吊轨式巡检机器人并对其行走过程进行力学分析。根据隧道内具体环境的要求, 确定机器人工作原理与系统构成; 对机器人的主要结构模块进行设计, 并搭建机器人传感与控制系统; 基于达朗贝尔原理建立机器人行走过程力学模型, 通过仿真对其行走过程中的驱动力变化规律进行分析。仿真结果表明: 该机器人满足行走速度大于 0.8 m/s、爬坡能力大于 15°以及转弯半径小于 0.5 m 的性能指标, 具备可行性与实用价值。

**关键词:** 巡检机器人; 隧道电缆; 力学性能分析

**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** A

## Structure Design and Mechanical Performance Analysis of Inspection Robot for Tunnel Cable

Liu Ziheng, Wu Jie, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to use robot to replace manual work to complete the inspection of tunnel cable, a hanging rail inspection robot with PTZ lifting is designed and its walking process is analyzed. According to the requirements of the specific environment in the tunnel, the working principle and system composition of the robot are determined. The main structural modules of the robot are designed, and the sensing and control system of the robot is built. Based on the D'Alembert principle, the mechanical model of the walking process of the robot is established, and the driving force change law in the walking process is analyzed through simulation. The simulation results show that the walking speed of the robot is greater than 0.8 m/s, the climbing ability is greater than 15°, and the turning radius is less than 0.5 m, so the robot has feasibility and practical value.

**Keywords:** inspection robot; tunnel cable; mechanical property analysis

### 0 引言

目前我国电力输送主要依赖以塔杆为主的地上输电线路, 约占全国总输电线路的 90%; 但在城区范围, 考虑到安全性与维护方便性, 地下隧道输电线路已成为更好的选择。由于地下隧道环境相对封闭, 使得输电线路不易受到气候变化的影响, 具有易于规划、方便管理与输电能力高等优点。

近年来, 国内外在城区及电厂周围建设了大量地下隧道输电线路。为保证地下隧道输电线路的安全性与可靠性, 需要定期对其进行巡检。由于地下隧道内环境复杂、存在高电压器件且易积累有毒有害气体, 人工巡检潜在危险较大, 采用巡检机器人来实现高压电缆的无人化智能巡检非常必要<sup>[1]</sup>。国内外在地下隧道电缆巡检机器人方面已取得了一些研究成果, 比较典型的包括华盛顿大学研制的“巡游者”电缆检测机器人、上海交通大学研发的小型

电缆巡检机器人、山东国网电力公司研发的吊轨式电缆巡检机器人等<sup>[2-4]</sup>。虽然这些隧道电缆巡检机器人在结构有所不同, 但都能在所设定的特定环境中取代人工巡检。针对一种复杂走向地下隧道中的输电线路, 设计一种隧道电缆巡检机器人并对其行走过程中的性能进行分析<sup>[5-6]</sup>。根据所针对的输电线路的检测要求确定机器人的性能与技术指标, 进行总体方案设计; 在此基础上, 设计机器人模型结构并搭建机器人控制系统, 最后结合力学模型对其运动过程中的力学性能进行分析与仿真, 验证了设计方案的可行性。

### 1 性能指标及总体方案

根据现场勘察结果, 所应用的电缆隧道总体高度为 240 cm, 两侧分别设置有电气开关柜与 3 层电缆支架。如图 1 所示, 用于机器人行走的隧道通行宽度约为 51 cm, 电缆直径约为 20 cm, 3 层电缆的

收稿日期: 2022-08-21; 修回日期: 2022-09-25

作者简介: 刘子恒(1998—), 男, 湖南人, 硕士, 从事智能机械与机器人应用技术研究。E-mail: 798959394@qq.com。

中心距离地面的高度分别为 150、120 与 52 cm。

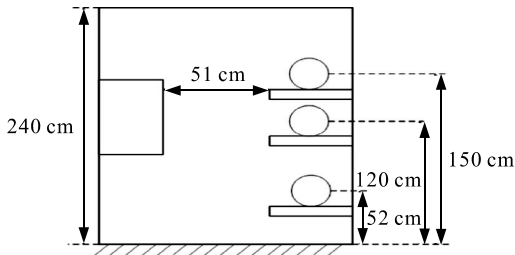


图 1 隧道内部主要结构尺寸

### 1.1 功能要求与运动性能指标

隧道电缆巡检机器人系统要求机器人能在隧道内进行自动化巡检,对隧道内的温湿度与有毒气体、火灾及烟雾、所有 3 层电缆外观与发热情况进行检测,代替人工巡检并预防与发现电缆破损或过度发热。机器人的运动性能指标如表 1 所示。

表 1 隧道电缆巡检机器人运动性能参数

项目内容	性能指标
水平轨道最大行驶速度/(m/s)	≥0.8
正常行驶速度/(m/s)	0.2
最大爬坡能力/(°)	≥15
最小转弯半径/m	≤0.5

### 1.2 方案与工作原理

从稳定性与可靠性的角度考虑,机器人采用吊轨式巡检模式<sup>[7]</sup>,在隧道顶部安装轨道并使得机器人在轨道上来回移动。在机器人移动过程中,所搭载的温湿度传感器、气体检测传感器、烟雾检测传感器以及云台一体化双光摄像头,来完成相应的环境检测与电缆检测任务。此外,由于 3 层电缆在高度方向上跨度达到 1 m;因此,在机器人本体上需要采用升降机构来调整电缆检测用摄像头的高度。机器人系统结构布局及构成如图 2 所示。

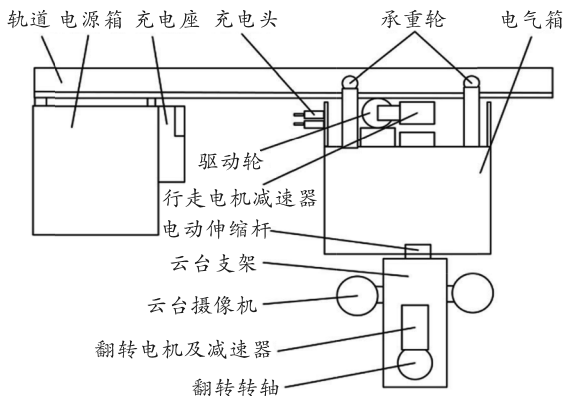


图 2 机器人结构布局与构成

如上图所示,承重轮左右各 2 个,设置在工字形截面轨道上移动。机器人左右移动的动力由轨道下表面与驱动轮之间的摩擦力提供,行走电机及减

速器与驱动轮的转轴相连接。4 个承重轮的支架与电气箱连接,电气箱下部安装有电动伸缩杆,云台支架与电动伸缩杆的底部相连接并随着伸缩杆的伸长而下降。此外,考虑到摄像机升降距离达到 1 m 且受到隧道高度空间限制,仅用电动伸缩杆无法同时保证摄像头检测到所有 3 层电缆;因此,在云台支架上增加一组翻转机构,可通过对云台摄像机底部安装的翻转转轴实现摄像机的 180°翻转,并与电动升降杆的伸缩运动相配合以实现对全部 3 层电缆的检测。

### 1.3 控制系统硬件构成

电缆巡检机器人控制系统硬件构成与设计如图 3 所示。工控机作为机器人上搭载的主控制器,通过 CAN 总线控制 3 台直流伺服驱动器来控制 3 台配套电机以实现机器人在轨道上的移动、电动伸缩杆的伸缩运动以及云台摄像机的翻转运动。烟雾报警传感器、气体检测传感器与温湿度传感器则通过 RS485 通信接口与工控机进行通信,通过 RS485 总线与工控机连接。安装在充电位置、轨道终点位置与定点位置的接近传感器,直接与工控机自带的 GPIO 接口连接。此外,云台摄像机直接通过网口连接车载无线 AP,把图像直接发送到无线基站,进而通过网络发送到后台监控计算机进行图像处理与视频保存,车载无线 AP 则与无线基站分别通过网线与工控机与后台监控计算机连接。工控机与后台监控计算机之间的数据发送与信息通信通过车载无线 AP 与无线基站之间的 5.8 GHz 的无线通信实现。

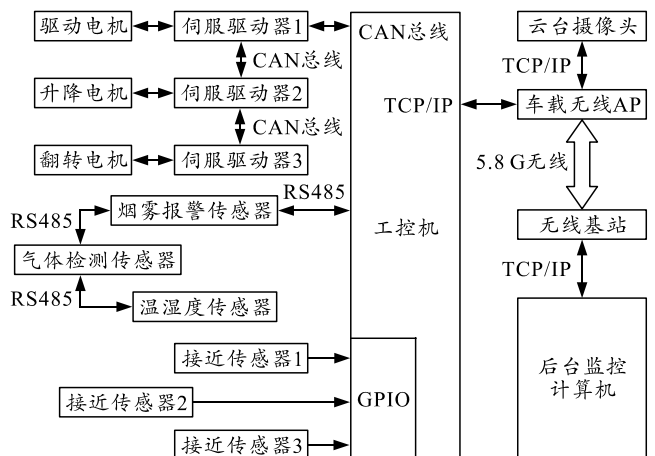


图 3 机器人控制系统的构成

## 2 机器人结构设计

### 2.1 驱动机构设计

巡检机器人行走驱动机构方案设计采用摩擦轮

传动配合同步带传动<sup>[8]</sup>。电机经减速器驱动转轴转动，转轴上安装有摩擦轮和同步带轮，包胶轮与轨道下表面接触，同时轨道下方固定安装同步带，可配合同步带轮传动。驱动机构通过左右侧安装支架固定安装在驱动轮安装机构上，整体安装在机器人舱体与轨道之间，驱动轮安装机构提供弹性支撑，驱动机构与轨道下表面紧紧贴合。

巡检机器人行走驱动机构分为辅助导向机构和驱动机构 2 部分，驱动机构提供动力源，辅助导向机构用于辅助机器人前后运动以及实现转向等功能。具体结构如图 4 所示。

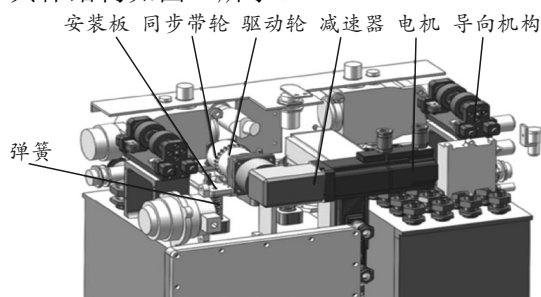


图 4 防爆吊轨式机器人驱动部分结构

机器人上导向机构有 2 组，沿导轨方向安装在机器人两端。机器人安装在导轨上时，行走轮贴紧导轨上表面，导向轮夹紧导轨两侧面。前后 2 个导向机构起辅助夹紧作用，使机器人能够紧紧贴合轨道运动。同时，导向机构可绕中间转轴转动，当进入弯轨时，前后 2 个导向机构配合驱动机构，可以实现转弯功能。

机器人驱动机构主要由电机、减速器、转轴、橡胶轮和同步齿轮等组成。驱动机构是机器人运动的动力来源，同步齿轮与安装在导轨上的同步带相啮合，橡胶轮与导轨底部接触。电机通过减速器驱动转轴转动，带动同步齿轮转动，从而实现机器人的前进后退。

## 2.2 云台升降与翻转机构设计

隧道内需检测的电缆共有 3 层，因此结构设计中首先考虑云台升降机构的设计。参考国内目前的产品<sup>[9]</sup>，一般采用市面上常见的升降杆来实现其升降过程。经市场调研，发现能满足机器人检测 3 层电缆所需行程的升降杆初始长度较大，在完成轨道吊装后云台摄像头难以检测到最上层电缆。由此，经过多次方案讨论与比较，最终确定采用云台升降及翻转方案。

具体而言，采用行程较小的升降杆作为升降机构，此时升降杆初始高度较小，避免整体高度过低

从而云台无法测量最上层电缆的情况；其次，设计云台翻转机构，将防爆云台固定安装在云台安装板上，经电机及减速器驱动转轴转动，防爆云台完成 180° 翻转，从而使得云台摄像头位置能够对准不同高度。云台翻转机构整体安装在升降杆底端，升降杆配合翻转机构实现云台对 3 层电缆的红外测温与视频监控。

## 2.3 机械结构设计

巡检机器人机械系统主要包括行走驱动结构、本体防爆机构、云台升降及翻转机构、充电屋及充电机构的设计，初步拟定该机器人宽度 40 cm，高度 110 cm，长度 65 cm 左右。主要结构如图 5 所示。

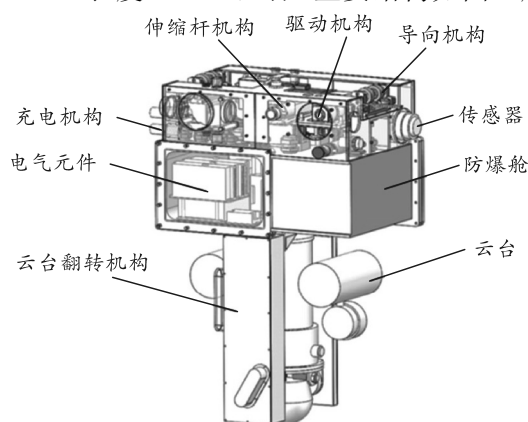


图 5 防爆吊轨式机器人结构

行走驱动结构主要实现机器人在轨道上的行走与定位；本体防爆机构主要考虑防爆安全要求，进行相关防爆设计<sup>[10]</sup>，并合理安装各类传感器、控制器等；云台升降及翻转机构主要实现对电缆的测温监控，考虑隧道内实际情况，所需监控的电缆共有 3 层，巡检机器人巡检过程中需要依次测量各层电缆情况，初步采用伸缩杆机构，尾端安装云台，通过伸缩杆的伸缩控制云台的升降。但是能测量 3 层电缆的行程，所需要的伸缩杆机构过长，不适合当前隧道环境。因此，采用伸缩杆机构配合云台翻转机构，测量第 1 层电缆时，云台处于初始位置，云台摄像头对准第 1 层电缆；测量第 2 层电缆时，伸缩杆伸长，云台下降至第 2 层电缆位置；测量第 3 层电缆时，云台翻转电机启动，控制云台进行 180° 翻转，配合伸缩杆机构，摄像头位置对准第 3 层电缆。综上实现对各层电缆的测温监控。同时该巡检机器人需实现自主充电功能，因此设计充电屋及充电机构，使机器人能实现自主充电功能。

机器人本体上设计充电机构插头部分，充电座则安装在充电箱上，具体结构如图 6、7 所示。

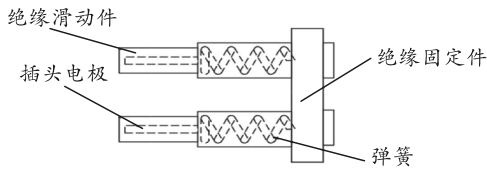


图 6 充电机构插头结构

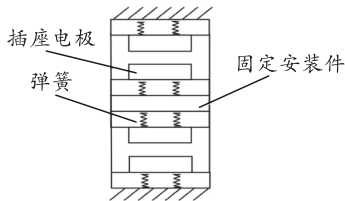


图 7 充电座结构

插头部分由电极、固定件、活动件和弹簧组成，充电座由电极、弹簧、安装板等组成。机器人运动到充电箱端，插头部分活动件顶住充电座外壳，弹簧压缩，充电电极伸入充电座内部，与充电座电极接触，完成充电对接过程，进行自主充电。

### 3 机器人动力学建模与分析

主要针对机器人在轨道上行走过程中的力学性能，可考虑消除一些次要影响因素来建立其力学模型，由此设定如下：

- 1) 将机器人整体视为对称结构，经初步分析设定其质量集中在防爆舱上的  $O$  点；
- 2) 机器人在整个运动过程中保持匀速，且忽略行进过程中可能产生的振动；
- 3) 机器人在运动过程中所有接触为纯滚动，无相对滑动。

#### 3.1 水平直线轨道动力学建模

巡检机器人在直线行走状态下的受力，如图 8 所示。

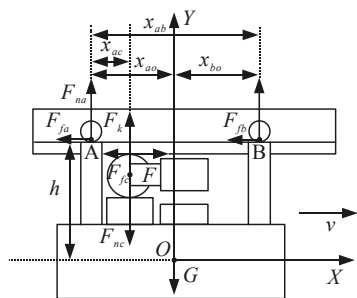


图 8 机器人做水平直线运动时的受力情况

图中：参数  $x_{ab}$  为前后行走轮在轨道上的接触点 A 与 B 之间的距离； $x_{ac}$  和  $x_{bc}$  分别为驱动轮与轨道的接触点 C 在 AB 连线上的垂直投影点与点 A 和点 B 的距离； $x_{ao}$  和  $x_{bo}$  分别为机器人重心 O 在 AB 连线上的垂直投影点与点 A 和点 B 间的距离； $h$  为

机器人重心位置到 AB 连线的距离。

根据达朗贝尔原理建立机器人在轨道上的力平衡与力矩平衡方程组如下：

$$\left. \begin{aligned} F - F_{fa} - F_{fb} &= F_{fc} \\ -F_{nc} + F_{na} + F_{nb} &= G \\ -Fh + F_{nc}x_{ao} + F_{fa}h - F_{na}x_{ao} + F_{fb}h + F_{nb}x_{bo} &= F_{fc}h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $G$  为机器人自身重力； $F_{nc}$  为驱动轮与轨道之间压力，大小等于驱动轮底部 4 个模具弹簧提供的预紧力  $F_{k0}$ ； $F_{na}$  为行走轮上点 A 处所受支持力； $F_{nb}$  为行走轮上点 B 处所受支持力； $F$  为驱动电机产生的驱动力； $F_{fc}$  为驱动轮 C 处所受摩擦力， $F_{fa}$ 、 $F_{fb}$  分别为行走轮上 A、B 处所受摩擦力，计算公式为：

$$\left. \begin{aligned} F_{fc} &= u_1 F_{nc} \\ F_{fa} &= u_2 F_{na} \\ F_{fb} &= u_2 F_{nb} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $u_1$  为驱动轮与轨道间的摩擦系数； $u_2$  为行走轮与轨道间的摩擦系数。

#### 3.2 斜坡轨道运动状态分析

由于隧道内环境高度不定，不同路段需要检测的高度不同，因此会出现上下坡情况，此时需对爬坡过程进行受力分析<sup>[11]</sup>。

依据驱动轮的位置和机器人整体受力情况可以将爬坡过程分为图 9 所示的 3 个阶段：

- 1) 在爬坡 a 阶段，前行走轮进入斜坡，后行走轮和驱动轮仍处于水平轨道。
- 2) 在爬坡 b 阶段，驱动轮 C 点和前行走轮 B 点同处斜坡轨道，后行走轮 A 点仍处水平轨道。
- 3) 在爬坡 c 阶段，后行走轮 A 点进入斜坡，巡检机器人整体都处于斜坡轨道。

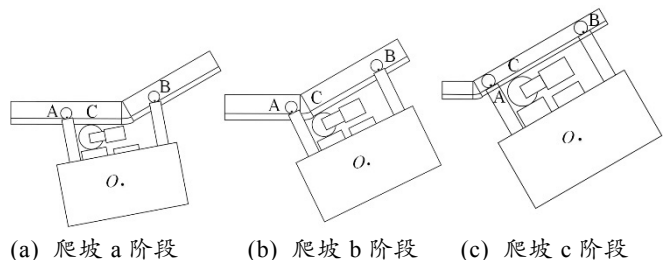


图 9 机器人斜坡运动状态

#### 3.3 斜坡轨道动力学建模与分析

机器人进行爬坡运动时，前后行走轮上 AB 连线将与水平方向产生夹角  $\beta$ ，机器人爬坡过程中夹角  $\beta$  随时间  $t$  的增大将从  $0^\circ$  逐渐增大至与斜坡一致的角度  $\theta$ ，如图 10 所示。

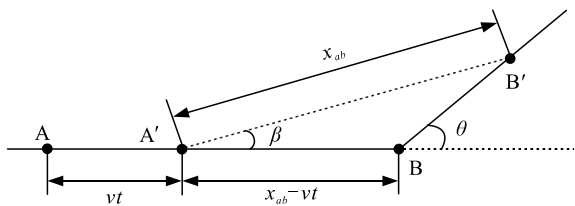


图 10 夹角  $\beta$  变化

通过分析上图中的几何关系，由正弦定理可得：

$$\sin(\theta - \beta) / (x_{ab} - vt) = \sin(\pi - \theta) / x_{ab} \quad (3)$$

由式(3)可解得：

$$\beta = \theta - \arcsin \frac{x_{ab} - vt}{x_{ab}} \sin \theta \quad (4)$$

接着以机器人重心为原点建立直角坐标系  $XOY$ ，针对巡检机器人在斜坡轨道上运动的 3 个阶段进行分析。

1) 机器人处于爬坡 a 阶段，将驱动轮底部弹簧长度的变化量视为驱动轮与防爆舱之间距离的变化量，如图 11 所示。

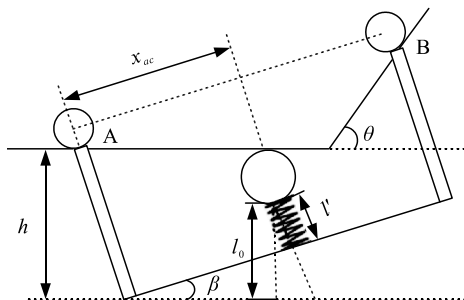


图 11 驱动轮底部弹簧长度变化

由图中几何关系可得：

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= h - 2R \\ l' &= l / \cos \beta - x_{ac} \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $l_0$ 为机器人在水平直线轨道时弹簧的长度； $l'$ 为爬坡 a 阶段弹簧产生形变后的长度；则弹簧变化量  $\Delta l = l_0 - l'$ 。

如图 12 所示进行受力分析。驱动轮所受弹簧力  $F_k$ 、轨道支持力  $F_{nc}$ 、滚动摩擦力  $F_{fc}$  之间的关系为：

$$\left. \begin{aligned} F_k &= 4k\Delta l + F_{k0} \\ F_{nc} &= F_k \cos \beta \\ F_{fc} &= u_2 F_{nc} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $k$ 为弹簧刚度系数； $F_{k0}$ 为机器人在水平直线轨道时的初始预紧力。

根据达朗贝尔原理，机器人满足  $\Sigma F_x=0, \Sigma F_y=0, \Sigma M_A=0$ 。可得爬坡 a 阶段机器人动力学方程如下：

$$\left. \begin{aligned} F - F_{fa} - F_{fb} \cos \theta - F_{nb} \sin \theta &= F_{fc} \\ -F_{nc} + F_{na} - F_{fb} \sin \theta + F_{nb} \cos \theta &= G \\ F_{nc} x_{ac} / \cos \beta - F_{fb} x_{ab} \sin(\theta - \beta) + \\ F_{nb} x_{ab} \cos(\theta - \beta) &= G(x_{ao} + h \sin \beta) \cos \beta + J_a \ddot{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

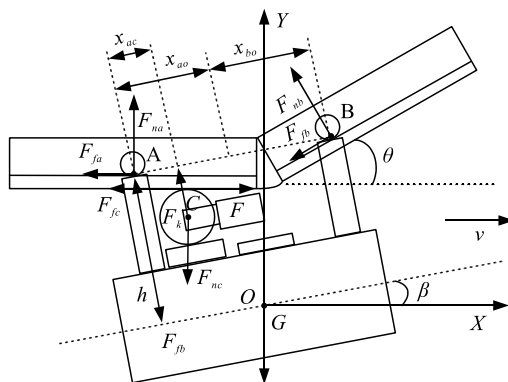


图 12 爬坡 a 阶段受力分析

式中： $\theta$ 为轨道坡度； $J_a$ 为机器人绕 A 点的转动惯量； $\beta$ 为前后行走轮上 AB 连线与水平方向夹角； $\ddot{\beta}$ 为角加速度。

2) 机器人处于爬坡 b 阶段，其受力分析如图 13 所示。根据达朗贝尔原理，机器人满足  $\Sigma F_x=0, \Sigma F_y=0, \Sigma M_A=0$ 。

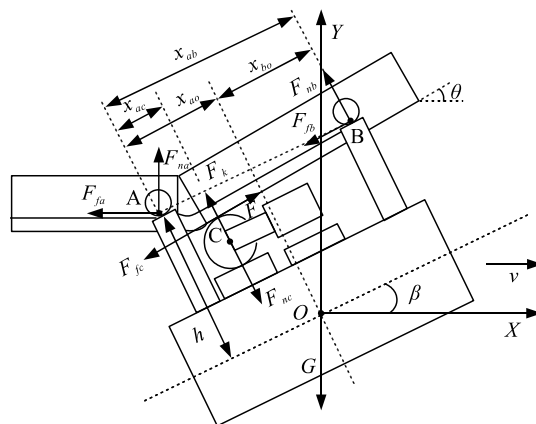


图 13 爬坡 b 阶段受力分析

可得爬坡 b 阶段机器人动力学方程如下：

$$\left. \begin{aligned} F \cos \theta + F_{nc} \sin \theta - F_{fa} - F_{fb} \cos \theta - \\ F_{nb} \sin \theta &= F_{fc} \cos \theta \\ F \sin \theta - F_{nc} \cos \theta + F_{na} - F_{fb} \sin \theta + \\ F_{nb} \cos \theta &= F_{fc} \sin \theta + G \\ -F_{nc} x_{ac} / \cos(\theta - \beta) - F_{fb} x_{ab} \sin(\theta - \beta) + \\ F_{nb} x_{ab} \cos(\theta - \beta) &= G(x_{ao} + h \sin \beta) \cos \beta + J_a \ddot{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3) 机器人处于爬坡 c 阶段，进行如图 14 所示受力分析。根据达朗贝尔原理，机器人满足  $\Sigma F_x=0, \Sigma F_y=0, \Sigma M_O=0$ 。

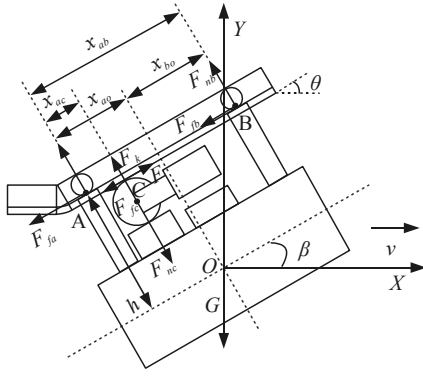


图 14 爬坡 c 阶段受力分析

可得爬坡 c 阶段机器人动力学方程:

$$\left. \begin{aligned} F \cos \theta + F_{nc} \sin \theta - F_{fa} \cos \theta - \\ F_{na} \sin \theta - F_{fb} \cos \theta - F_{nb} \cos \theta = F_{fc} \cos \theta \\ F \sin \theta - F_{nc} \cos \theta - F_{fa} \sin \theta = F_{fc} \sin \theta + G - \\ Fh + F_{nc}x_{co} + F_{fa}h - F_{na}x_{ao} + F_{fb}h + F_{nb}x_{bo} = -F_{fc}h \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

### 3.4 水平弯轨行走受力分析

当机器人行走至弯轨阶段时, 以驱动轮与导轨

$$\left. \begin{aligned} F - F_{fa} \cos \theta_1 - F_{fb} \cos \theta_2 &= (F_{nm} - F_{mn}) \sin \theta_1 + (F_{ne} - F_{nf}) \sin \theta_2 \\ F_{fa} \sin \theta_1 - F_{fb} \sin \theta_2 &= -(F_{nm} - F_{mn}) \sin \theta_1 + (F_{ne} - F_{nf}) \sin \theta_2 + F_n \\ -F_{fa} \left[ \left( \frac{R}{\cos \theta_1} - R - \frac{d}{2} \right) \cos \theta_1 + \frac{d}{2} \right] - F_{fb} \left[ \left( R + \frac{d}{2} - \frac{R}{\cos \theta_2} \right) \cos \theta_2 + \frac{d}{2} \right] &= F_{fm} \left[ \left( \frac{R}{\cos \theta_1} - R - \frac{d}{2} \right) \cos \theta_1 + d \right] \\ + F_{fn} \left[ \left( \frac{R}{\cos \theta_1} - R - \frac{d}{2} \right) \cos \theta_1 + F_{ff} \left[ \left( R + \frac{d}{2} - \frac{R}{\cos \theta_2} \right) \cos \theta_2 + d \right] - F_{fe} \left( R + \frac{d}{2} - \frac{R}{\cos \theta_2} \right) \cos \theta_2 \right] & \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $F_{nm}$ 、 $F_{nn}$ 、 $F_{ne}$ 、 $F_{nf}$  分别为导向轮 M、N、E、F 受到导轨作用的支持力;  $d$  为弯轨宽度;  $R$  为弯轨半径;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为行走轮 A 点和 B 点的支持力作用线与 Y 轴正向的夹角, 其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \omega t_1 \\ \theta_2 &= \omega t_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $\omega$  为机器人在弯轨运动时的角速度,  $\omega = v/R$ ;  $t_1 = x_{ac}/v$ ;  $t_2 = x_{bc}/v$ 。

$F_{fm}$ 、 $F_{fn}$ 、 $F_{fe}$ 、 $F_{ff}$  分别为行走轮 M、N、E、F 与轨道之间的摩擦力, 其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} F_{fm} &= u_2 F_{nm} \\ F_{fn} &= u_2 F_{nn} \\ F_{fe} &= u_2 F_{ne} \\ F_{ff} &= u_2 F_{nf} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

## 4 仿真与分析

利用 Matlab 软件对上述巡检机器人行走过程中的力学模型进行仿真, 仿真中的主要参数如表 2 所示。

的接触点建立固连直角坐标系  $XOY$ , 并对转弯阶段的机器人进行如图 15 所示的受力分析。

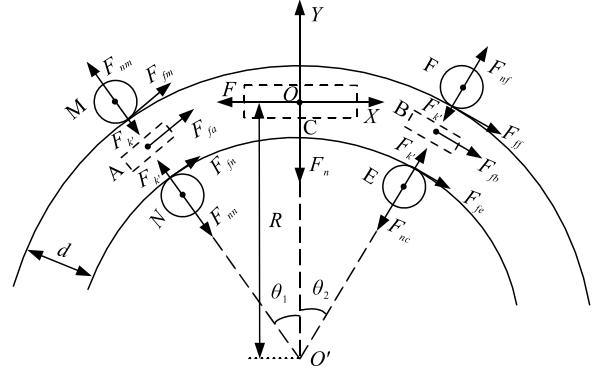


图 15 弯轨阶段受力分析

图中:  $F_k$  为固连在机器人本体上弹簧提供的预紧力, 行走轮 M、N、E、F 所受预紧力相同;  $F_n$  为机器人所受向心力。

根据达朗贝尔原理, 机器人满足  $\Sigma F_x=0$ ,  $\Sigma F_y=0$ ,  $\Sigma M_O=0$ , 可得方程:

表 2 仿真主要参数

参数	符号	值
机器人总质量/kg	$m$	100
机器人前进速度/(m/s)	$v$	0.2
驱动轮半径/mm	$R$	30
轨道宽度/mm	$d$	80
驱动轮与轨道间的滚动摩擦系数	$u_1$	0.1
行走轮与轨道间的滚动摩擦系数	$u_2$	0.05

### 4.1 水平到斜坡轨道行走仿真分析

使机器人云台位置保持固定, 令初始预紧力  $F_{k0}=0$  N, 对巡检机器人由水平至爬坡不同阶段的运动过程进行计算仿真, 得到驱动力矩随时间的变化如图 16 所示。

根据上图所示的仿真结果可见, 水平阶段机器人保持稳定前行状态, 电机驱动力矩维持恒定值, 约为  $2.94 \text{ N}\cdot\text{m}$ ; 从水平阶段进入爬坡 a 阶段时, 前行走轮进入斜坡, 其受力大小和方向的改变导致驱动力矩产生突增, 而在整个爬坡 a 阶段由于驱动轮底部的弹簧进一步压缩, 输出力矩呈上升的趋势; 当机器人由爬坡 a 阶段进入爬坡 b 阶段时, 驱动轮开始进入斜坡, 其弹簧压缩量突然变小导致输出力

矩产生突降，并在 b 阶段保持较为稳定的输出值；当机器人由爬坡 b 阶段过渡至 c 阶段时，后行走轮进入斜坡，电机驱动力矩在 c 阶段维持定值。当坡度  $\theta$  上升时，可以观察到电机驱动力矩在爬坡的各个阶段均有升高趋势，尤其在 a 阶段有了明显升高，输出力矩最大值由坡度为  $5^\circ$  时的  $11.76 \text{ N}\cdot\text{m}$  上升到坡度为  $10^\circ$  时的  $22.45 \text{ N}\cdot\text{m}$  以及坡度为  $15^\circ$  时达到的  $35.09 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

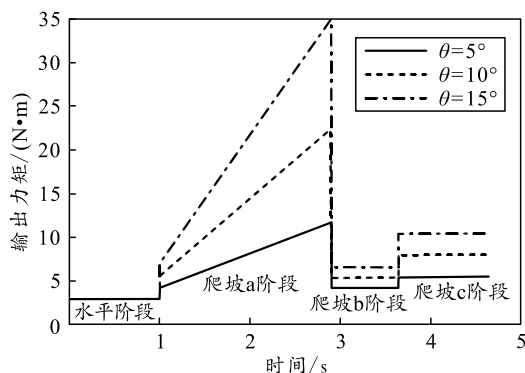


图 16 不同阶段电机输出力矩变化

在此基础上，在坡度  $\theta=15^\circ$  的情况下对预紧力变化对机器人输出力矩的影响进行分析。改变机器人的初始预紧力  $F_{k0}$ ，得到对应的电机输出力矩变化如图 17 所示。

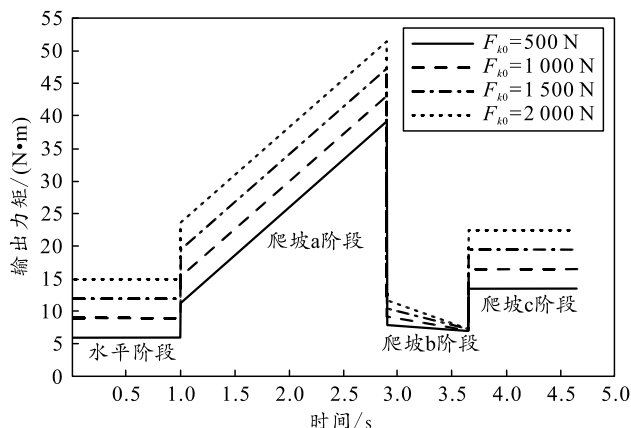


图 17 不同初始预紧力下电机输出力矩变化

由上图可以看出，随着初始预紧力的增大，在不同阶段电机的输出力矩均有上升，由  $F_{k0}=500 \text{ N}$  时的最大输出力矩  $39.16 \text{ N}\cdot\text{m}$  到  $F_{k0}=1\ 000 \text{ N}$ 、 $F_{k0}=1\ 500 \text{ N}$ 、 $F_{k0}=2\ 000 \text{ N}$  时对应的最大输出力矩分别为  $43.23$ 、 $47.29$ 、 $51.37 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，对应分别增加了  $10.39\%$ 、 $20.76\%$ 、 $31.18\%$ 。即合适的预紧力通常可以增加机器人运动过程中的平稳性，但若预紧力过大，一方面可能加剧零件结构的磨损，另一方面也会给电机带来更大的输出负担<sup>[12-13]</sup>；因此，需要从机器人设计需求的角度出发，更加全面地考虑对各

个运动阶段的影响。

根据以上分析结果，在机器人设计过程中其预紧力按  $F_{k0}=1\ 500 \text{ N}$  进行设计，在保证运动平稳性的同时也能满足其行走与爬坡性能要求。综合考虑机器人性能指标要求和制造成本进行合适的电机选型，可选择型号为 130DB260C 的直流防爆伺服电机，额定功率为  $2.3 \text{ kW}$ ，最高转速可达  $2\ 600 \text{ r/min}$ ，其额定转矩为  $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，配合减速比为  $8:1$  的 IDR64L1 减速器能提供  $80 \text{ N}\cdot\text{m}$  的输出转矩，可满足机器人水平直线轨道最大行驶速度大于等于  $0.8 \text{ m/s}$  以及爬坡能力大于等于  $15^\circ$  的性能指标。

## 4.2 弯轨阶段仿真与分析

改变轨道半径  $R$  和导向轮弹簧预紧力  $F_{k'}$  的值，对巡检机器人在弯轨行走过程进行仿真<sup>[14-15]</sup>，在不同的导向轮弹簧预紧力下，电机输出力矩随轨道半径变化的关系如图 18 所示。

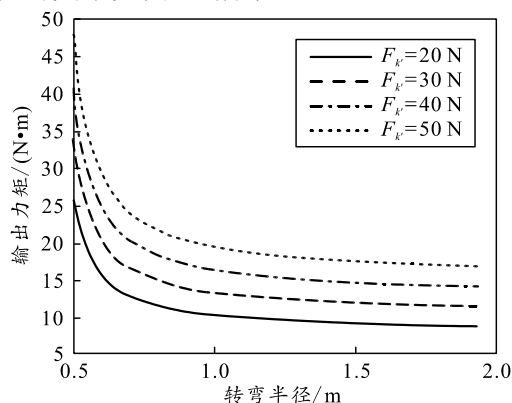


图 18 弯轨阶段电机输出力矩变化

从上图可知，驱动力矩与轨道半径大致成反比关系，随着轨道半径的增大而减小。当弹簧预紧力增大时，所需的输出力矩也相应增大，但机器人在转弯时的稳定性也越强。将图 18 与 17 相互比较可以发现，当轨道半径  $R=0.5 \text{ m}$ ，导向轮弹簧预紧力  $F_{k'}=50 \text{ N}$  时电机所需输出力矩为  $48.71 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，而坡度  $\theta=15^\circ$ 、初始预紧力  $F_{k0}=1\ 500 \text{ N}$  时爬坡过程中需要的最大输出力矩为  $47.29 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，在这 2 种不同轨道下所需要的输出力矩十分接近。为充分利用驱动电机的输出性能，以及考虑到机器人各个运动阶段的平稳性，上述轨道参数可以视为一种具有参考价值的选择。130DB260C 直流防爆伺服电机配合减速比为  $8:1$  的 IDR64L1 减速器所能提供的  $80 \text{ N}\cdot\text{m}$  的输出转矩，显然可以满足机器人最小转弯半径小于等于  $0.5 \text{ m}$  的性能要求。