

5-15-2020

Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot

Wu Wei

School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

Li Bo

School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

Nana Liu

School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

Guangzhi Ma

School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot

Abstract

Abstract: To evaluate quantitatively the dynamic locomotion characteristics and obstacle performance of the wheeled traction robot in horizontal well with single pipe diameter, *the mechanical model of the crawling module of the wheeled traction robot is established and the structural and size parameters are optimized. The ADAMS model of the current robot is presented, and the Simulink models of three parts of the driving module, supporting mechanism and traction resistance are built. A specified method of the ADAMS/Simulink joint simulation modeling is proposed to analyze the locomotion characteristics and obstacle performance of the wheeled traction robot.* The simulation results quantitatively show that the dynamic locomotion characteristics of this current robot in horizontal well is improved and meets the requirements of overcoming the obstacles. The simulating calculation results are coincident approximately with the theoretical calculation results.

Keywords

wheeled traction robot, optimization design, ADAMS/Simulink combined simulation, locomotion characteristics

Recommended Citation

Wu Wei, Li Bo, Liu Nana, Ma Guangzhi. Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 918-926.

轮式牵引机器人优化设计及运动特性分析

吴伟, 李博*, 刘娜娜, 马广志

(西安石油大学, 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为定量评价轮式牵引机器人在同一管径水平井内的动态运动特性与越障性能, 建立了轮式牵引机器人爬行模块的受力模型, 优化了结构及尺寸参数, 实现了机器人 ADAMS 整体建模, 并构建了对象机器人驱动机构、支撑机构及牵引阻力的 Simulink 控制模型。提出了轮式牵引机器人的 ADAMS/Simulink 联合仿真建模方法, 进行了对象机器人运动特性及越障性能仿真分析。仿真结果表明结构优化后提高了该型机器人在水平井内的动态运动特性, 验证了其较好的越障能力, 且仿真计算与理论分析结果基本一致。

关键词: 轮式牵引机器人; 优化设计; ADAMS/Simulink 联合仿真; 运动特性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 05-0918-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0631

Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot

Wu Wei, Li Bo*, Liu Nana, Ma Guangzhi

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: To evaluate quantitatively the dynamic locomotion characteristics and obstacle performance of the wheeled traction robot in horizontal well with single pipe diameter, *the mechanical model of the crawling module of the wheeled traction robot is established and the structural and size parameters are optimized. The ADAMS model of the current robot is presented, and the Simulink models of three parts of the driving module, supporting mechanism and traction resistance are built. A specified method of the ADAMS/Simulink joint simulation modeling is proposed to analyze the locomotion characteristics and obstacle performance of the wheeled traction robot.* The simulation results quantitatively show that the dynamic locomotion characteristics of this current robot in horizontal well is improved and meets the requirements of overcoming the obstacles. The simulating calculation results are coincident approximately with the theoretical calculation results.

Keywords: wheeled traction robot; optimization design; ADAMS/Simulink combined simulation; locomotion characteristics

引言

牵引机器人按驱动方式不同可分为: 轮式牵引



收稿日期: 2018-09-19 修回日期: 2019-03-06;
作者简介: 吴伟(1962-), 男, 山东淄博, 博士, 教授, 研究方向为智能控制与故障诊断; 李博(1984-), 男, 陕西洛南, 博士, 讲师, 研究方向为机械设备状态监测与故障诊断。

机器人、抓靠臂伸缩式(伸缩式)牵引机器人、高压射流反冲式牵引机器人以及螺旋桨推进式牵引机器人^[1-2]。其中, 最具代表性是 SONDEX 公司的轮式牵引机器人^[3], 结构上这种机器人采用了模块化的设计方法, 主要由牵引单元及扶正器组成, 一般牵引单元标准配置为 2 组 4 轮, 其最大优点是牵引单元数目在允许范围内可自由选配, 所以它是目前

<http://www.china-simulation.com>

• 918 •

唯一采用电动机与机械方式传动系统来实现运动控制的牵引机器人^[4]。目前轮式牵引机器人主要依赖于其机械结构越障^[5], 对轮式牵引机器人机械传动机构进行优化设计, 尤其是机器人爬行机构或模块, 有助于提高机器人运动稳定性, 提升行进过程中的越障能力及通过性^[3,6]。轮式牵引机器人经结构优化后, 需开展测试实验, 检验其运动特性及越障性能, 采用机器人实体样机进行井下实验, 不仅成本高, 而且会对井下工况造成破坏性影响。

虚拟样机技术可快速构建轮式牵引机器人三维本体模型、约束关系模型和驱动力模型^[7], 基于机械结构与尺寸参数实现机器人动力学建模与分析^[8], 是研究该型机器人井下运动特性及越障性能的重要手段。通过实时仿真分析获得轮式牵引机器人动态运行状态, 验证其结构优化结果是否满足设计要求。具体为: 首先采用 SolidWorks、PRO/E 等三维软件对牵引机器人进行实体建模, 然后将模型装配体导入 ADAMS 或 FEM 软件中^[9], 然后设定仿真参数(如实体模型材料密度、类型、质量), 并对运动副施加载荷, 从而实现机器人实体建模与运动特性仿真分析。然而, 基于虚拟样机技术的机器人运动特性仿真参数设置可控性及实时性较差, 实际作业过程中牵引阻力与爬行轮转动动力大小相等、方向相反, 机器人的电机输

出参数需随着牵引阻力变化实时调整, 但 ADAMS 的控制工具箱不具备对实时变化牵引阻力的自动控制能力^[7], 无法实现轮式牵引机器人运动特性的动态仿真。

为了测试分析优化设计后轮式牵引机器人在同一管径水平井内的动态运动特性与越障性能, 本文建立轮式牵引机器人爬行模块的受力模型, 优化爬行模块结构尺寸, 构建 ADAMS 模型, 并对象机器人驱动机构、支撑机构及牵引阻力进行 Simulink 控制建模。将机器人的 ADAMS 模型导入其控制系统的 Simulink 模型中, 采用 ADAMS/Simulink 联合建模实现牵引机器人越障性能及运动特性的实时仿真分析。仿真分析与理论计算结果基本一致, 验证了爬行模块优化设计可提高轮式牵引机器人井下越障性能, 以及 ADAMS/Simulink 联合仿真结果的正确性。

1 轮式牵引机器人优化及 ADAMS 建模

牵引单元是轮式牵引机器人实现井下运动的核心环节, 主要由爬行模块和动力模块组成^[10-11], 如图 1 所示, 对爬行模块的进行受力分析与建模有助于轮式牵引机器人优化设计, 提高其越障能力。

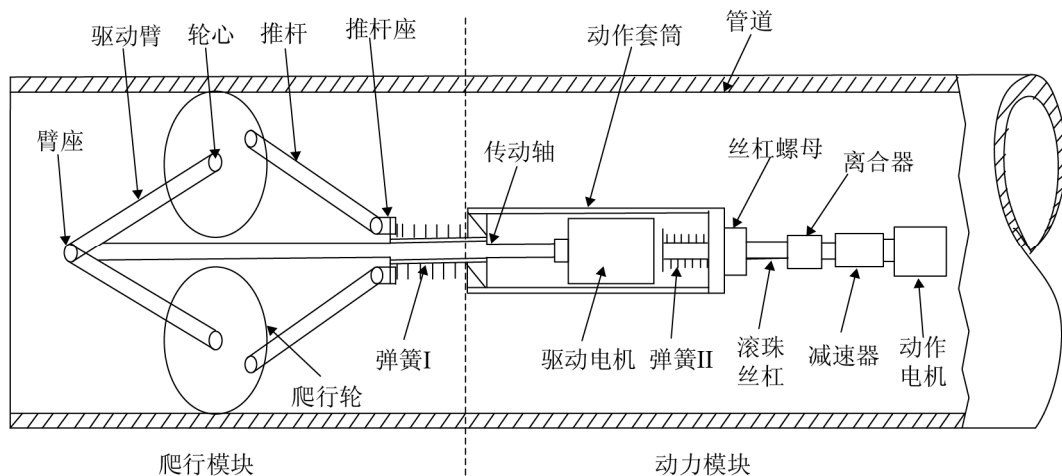


图 1 牵引单元示意图

Fig. 1 Traction unit diagram of wheeled traction robot

如图 2 所示, 建立 xoy 直角坐标系, 以固定支点 O 为原点, 以机器人的前进方向为 x 轴正方向, 驱动臂上升方向为 y 轴正方向。假设驱动臂臂座到轮心长度为 L_1 , 轮心到驱动臂端点长度为 L_2 , 推杆长度为 L_3 , 臂座与推杆座之间的偏心距为 h , 推杆座到臂座的水平距离为 S_1 , 轮心到臂座的垂直距离为 S_2 , 可得

$$\begin{cases} S_1 = -(L_1 + L_2) \cos \alpha - L_3 \cos \beta \\ S_2 = L_1 \sin \alpha \\ (L_1 + L_2) \sin \alpha + h = L_3 \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为驱动臂与 x 轴的夹角; β 为推杆与 x 轴的夹角, 且 $\alpha, \beta \in [0, 70^\circ]$ 。对式(1)进行微分, 推导可得

$$dS_1 = (1 + L_2/L_1)(\tan \alpha + \tan \beta)dS_2 \quad (2)$$

根据虚功原理, 则正压力与弹簧力之间的关系可表示为

$$F_1 \cdot dS_1 = f \cdot dS_2 \quad (3)$$

式中: f 为爬行轮正压力; F_1 为弹簧力。图 1 可见, 作用在单个爬行轮上的牵引力 $F_2 = \mu f$ (其中 μ 为爬行轮与管壁之间的摩擦系数), 由式(2)与式(3)联解可得 F_1 为:

$$F_1 = \frac{L_1 f}{(L_1 + L_2)(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (4)$$

式中: $\tan \alpha$ 和 $\tan \beta$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{D-d}{\sqrt{4L_1^2 - (D-d)^2}} \\ \tan \beta = \frac{(D-d)(L_1 + L_2) + 2L_1 h}{\sqrt{4L_1^2 L_3^2 - [(D-d)(L_1 + L_2) + 2L_1 h]^2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D 为水平井管道直径; 常规取值为 $D=125$ mm; d 为爬行轮直径, 设计值为 $d=50$ mm。综上所述, 将 L_1, L_2, L_3 及 h 作为爬行模块的尺寸优化参数, 其约束条件设定为

$$\begin{cases} L_1 + L_2 > D/2, L_1 > L_2 > 0 \\ L_3 > D/2 \\ (D-d) - 1.88L_1 < 0 \\ 2L_1 h + (L_1 + L_2)(D-d) - 1.88L_1 L_3 < 0, L_3 > L_4 > 0 \end{cases} \quad (6)$$

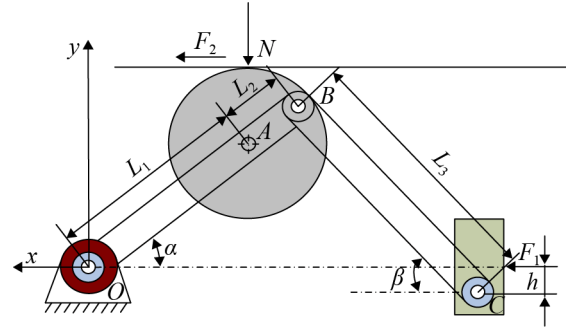


图 2 爬行模块受力模型

Fig. 2 Mechanical model of crawling module

爬行模块优化即求取弹簧力最小值 $\text{Min}(F_1)$ 问题, 可利用 MATLAB 工具箱的 $fmincon(x)$ 函数进行非线性约束优化求解^[12]。国内四轮水平井机器人所受的牵引力 $F_2 \geq 2500$ N, 摩擦系数取值为 $\mu=1.2$ ^[13], 那么计算可得单轮上受到的正压力约为 520 N。当 $D=125$ mm, $d=50$ mm 且 $f=520$ N 时, MATLAB 仿真计算可获得爬行模块的尺寸优化参数如表 1 所示。

表 1 轮式牵引机器人爬行模块的尺寸优化参数

Tab. 1 Optimized parameters of crawling module of wheeled traction robot

序号	主要参数/mm	量值
1	L_1	75.70
2	L_2	19.20
3	L_3	80.30
4	h	7.82

将表 1 中的优化参数代入公式(4)和(5)中计算可得爬行模块承受的最小弹簧力 $\text{Min}(F_1)=660$ N。参照 SONDEX 牵引机器人的实测数据, 优化前爬行模块结构参数分别为 $L_1=62.1$ mm, $L_2=19.2$ mm, $L_3=79.5$ mm, $h=7.82$ mm^[14], 对比表 1 中的优化结果可见, 牵引机器人的驱动臂和推杆长度 L_1 与 L_3 值增大, 且 L_1 与 h 值保持不变。在爬行轮直径固定条件下, 调整 L_1 与 L_3 值可提高轮式牵引机器人的通过性, 增强其越障能力。取系统平衡时的支撑机构的状态为研究对象, 可得正压力 N 与弹簧力 F_1 的关系:

$$\frac{N}{F_1} = \frac{L_1 + L_2}{L_1} (\tan \alpha + \tan \beta) \quad (7)$$

此处正压力 N 为该组爬行轮所受的总压力的标量值, 取 $d=50$ mm, 将优化后的各参数值代入式(7), MATLAB 仿真计算可得 N 、 F_1 与 d 的关系曲线, 如图 3 所示。

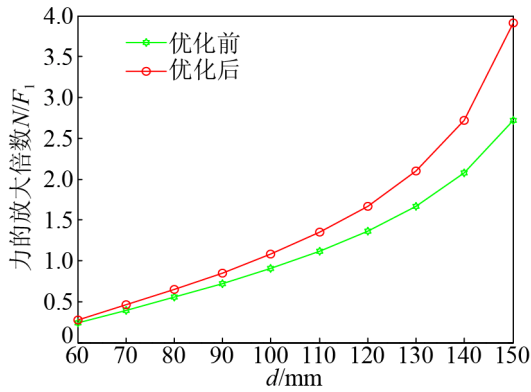


图 3 正压力、弹簧力与套管内径的关系

Fig. 3 Relationship between positive pressure, spring force and inner casing diameter

由图 3 可见, 优化后的支撑机构对力的放大作用大于优化前。当油管内径 $D>95$ mm 时, 支撑机构成为增力机构, 套管内径大小接近 125 mm 时, 优化前后机构力的放大倍数存在差异(优化前放大倍数约为 1.5 倍, 优化后约为 1.89 倍), 且随着套管内径的增大力度的放大倍数随之增大, 表明优化后的支撑机构对管径变化的适应较强, 有利于牵引机器人越障。

扶正器起到定心及支撑的作用, 可将轮式牵引机器人运动过程中的扭矩吸收, 保证遇障时机器人轴线与管道中心轴线重合。为确保所设计轮式牵引机器人稳定可靠运行, 扶正器物理尺寸参考文献 [14] 中的优化参数, 其结构尺寸如图 4 所示。

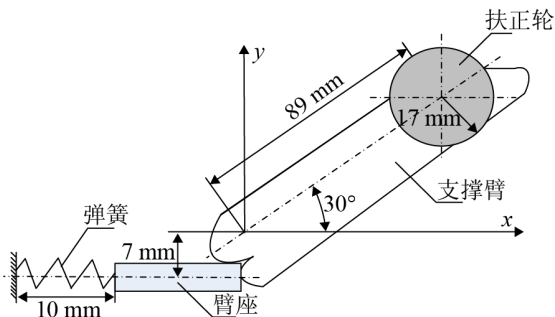
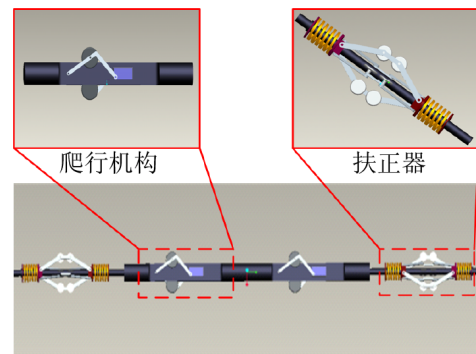


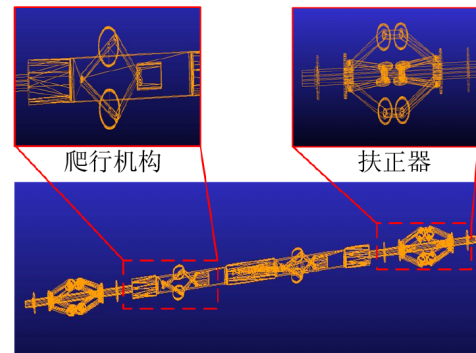
图 4 扶正器物理结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of robot's centralizer

利用表 1 与图 4 中的尺寸参数进行轮式牵引机器人三维建模, 将 PRO/E 模型(如图 5(a)所示)导入 ADAMS/View 软件中, 设置爬行模块与扶正器的材料、质量属性, 以及力和力矩值, 增添与物理样机相同的约束条件。获得 56 个铰链约束, 4 个驱动转矩, 4 个等效弹簧力, 1 个等效阻力和 12 个接触力, 牵引机器人的 ADAMS 模型如图 5(b)所示。



(a) PRO/E 模型



(b) ADAMS 模型

图 5 牵引机器人三维模型

Fig. 5 3D models of wheeled traction robot

2 轮式牵引机器人的 Simulink 建模

如图 1 所示, 轮式牵引机器人的运动特性由动力模块中驱动电机产生的驱动力, 动作电机产生的正压力以及牵引阻力所决定。建立牵引机器人驱动机构、支撑机构及牵引阻力的 Simulink 控制模型, 通过输入与输出反馈调节驱动电机及动作电机的驱动电压, 实现机器人运动状态的实时控制。

驱动机构主要由驱动电机、传动轴及爬行轮组成, 驱动电机可将转动扭矩经传动轴放大后传递于

爬行轮上，以牵引动力的形式驱动机器人运动。由直流电机工作原理，驱动电机输入电压与输出扭矩的相互关系可表示为^[15]：

$$M_d = \frac{V_a(s) - C_e \cdot \omega(s) \cdot s}{1/C_m + T_e/C_m \cdot s} \quad (8)$$

式中： M_d 为驱动电机输出扭矩； V_a 为电机输入电压； C_e 为电动势系数； C_m 为电机转矩系数； T_e 为电磁时间常数； ω 为电机角速度。考虑驱动机构传动比 i ，机械效率 η 及爬行轮有效半径 R ，那么可构建驱动机构扭矩子系统 Simulink 模型如图 6 所示，该模型包括驱动电机模型与爬行轮系模型两部分，其中的参数设置如表 2 所示。

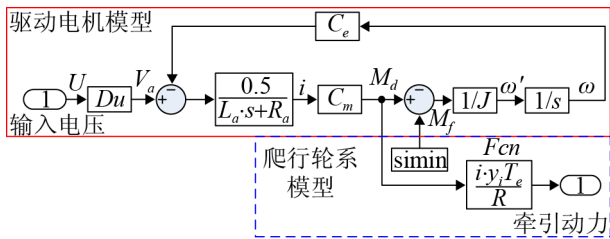


图 6 驱动机构扭矩子系统 Simulink 模型
Fig. 6 Simulink model of robot's driving module

表 2 驱动机构扭矩子系统模型的参数设置^[16]

Tab. 2 Parameters of Simulink model of driving module					
序号	主要参数	量值	序号	主要参数	量值
1	L_a/H	0.01	5	C_e	0.112
2	R_a/Ω	47	6	i	126
3	C_m	0.336	7	η	0.8
4	J/NmS^2	0.814×10^{-4}	8	R/mm	25

表 2 中， $L_a=L_s-M$ (L_s 为定子各相绕组自感， M 为定子各相绕组互感)； R_a 为定子各相绕组电阻； $C_m=2n_p \cdot K_e$ 为电机转矩系数(n_p 为极对数，这里取 3， K_e 为电机的电势常数)； J 为转动惯量， $J=J_1+J_2/N^2$ (J_1 为电机转子转动惯量， J_2 为滚珠丝杠的转动惯量， N 为减速比)； C_e 为电动势系数， $C_m=2K_e$ ； i 为减速传动机构的传动比； η 为驱动机构的机械效率； R 为爬行轮半径。

由图 1 可见，动作电机、减速器、离合器、滚珠丝杠、丝杠螺母、弹簧 I、推杆及驱动臂共同组成支撑机构，动作电机通过减速器增大扭矩，

离合器啮合后驱动滚珠丝杠转动，使得丝杠螺母沿轴向平移，压缩弹簧 I 使推杆绕连接点转动，并带动驱动臂转动，从而实现爬行轮与管道内壁之间正压力的调节。动作电机经减速器将转动转换为丝杠螺母的直线运动，导致弹簧压缩，其弹簧的压缩量为

$$\Delta x = S - \Delta L \quad (9)$$

式中： Δx 为弹簧压缩量； S 为滚珠丝杠的行程(可表示为丝杠的导程与所转圈数之积)； ΔL 为初始位置时推杆座和驱动臂座的间距与爬行轮和管壁间刚好接触时的间距之差。参考驱动机构扭矩子系统 Simulink 模型，则可获得支撑机构的 Simulink 模型如图 7 所示，该模型由驱动电机模型与弹簧力模型构成，其参数设置如表 3 所示。

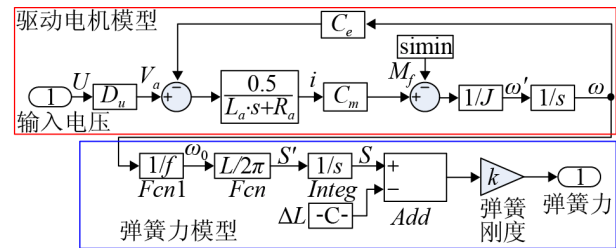


图 7 支撑机构弹簧力子系统 Simulink 模型
Fig. 7 Simulink model of robot's supporting mechanism

表 3 支撑机构弹簧力子系统模型的参数设置^[16]

Tab. 3 Parameters of Simulink model of supporting mechanism					
序号	主要参数	量值	序号	主要参数	量值
1	L_a/H	0.01	6	f	64
2	R_a/Ω	50	7	η	0.8
3	C_m	0.252	8	L/mm	2
4	J/NmS^2	0.716×10^{-4}	9	$\Delta L/mm$	33.85
5	C_e	0.084	10	k	14.6

表 3 中， f 为减速器的减速比； L 为丝杠导程即丝杠每转动一圈螺母移动的距离； ΔL 为初始位置时推杆座与驱动臂座的距离与爬行轮和管壁间刚好接触时的距离之差； k 为弹簧弹性系数。

轮式牵引机器人运动过程中易受自身因素及井下复杂环境的影响，产生阻碍机器人前进的牵引阻力 F_{re} ，可表示为电缆阻力 f_d 、加速阻力 f_a 及流体阻力 f_f 的代数和，即为

$$F_{re} = f_d + f_a + f_f = [F_{ca} + \rho_d r(1 - \mu_d) + \mu_d \rho_d L_s] + m \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} C_f \rho_f S_a v_f^2 \quad (10)$$

式中: F_{ca} 为垂直段末端电缆张力; ρ_d 为单位长度内电缆的重量; r 为电缆造斜弯曲段的曲率半径; μ_d 为摩擦因数; L_s 为水平段内的电缆长度; m 为轮式牵引机器人质量; v 为机器人行进速度; C_f 为综合粘滞系数; ρ_f 为井内流体密度; S_a 为仪器串在井筒的浸湿表面积; v_f 为机器人与井内流体的相对速度。

根据式(10)可获得由电缆阻力、加速阻力及流体阻力子系统共同构成的牵引阻力子系统 Simulink 模型(如图 8 所示), 该模型的参数设置如表 4 所示。

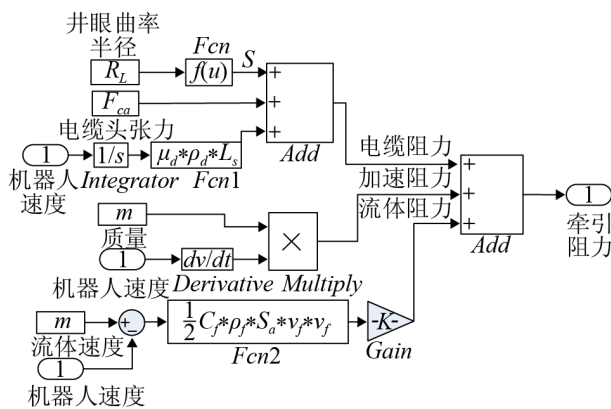


图 8 牵引阻力子系统 Simulink 模型

Fig. 8 Simulink model of traction resistance

表 4 牵引阻力子系统模型的参数设置^[16]

Tab. 4 Parameters of Simulink model of traction resistance					
序号	主要参数	量值	序号	主要参数	量值
1	F_{ca}/N	1 800	5	C_f	10
2	R_L/m	100	6	$\rho_f/kg \cdot m^3$	0.739
3	μ_d	0.4	7	m	86.2
4	$\rho_d/kg \cdot mm^{-1}$	0.285	8	S_a/mm	4.97

表 4 中, F_c 为电缆头张力; R_L 为井眼曲率半径; μ_d 为电缆与管壁间的摩擦因数; ρ_d 为单位长度内电缆的重量; C_f 为流体的粘滞系数; ρ_f 为井内流体密度; m 为机器人总质量; S_a 为仪器串在井筒的浸湿面积。

3 ADAMS/Simulink 联合仿真与结果

3.1 仿真模型的构建

牵引动力取决于驱动机构产生的扭矩和支撑机构弹簧正压力, 所以采用驱动机构扭矩子系统与支撑机构弹簧力子系统模型可组成牵引动力子系统模型, 结合牵引阻力子系统模型构成轮式牵引机器人控制系统模型; 扭矩和正压力可通过控制系统反馈调节之后作用于 ADAMS_sub 模块, 实现该型机器人动力学 ADAMS/Simulink 联合仿真, 其仿真模型如图 9 所示。其中, ADAMS_sub 模块是在 MATLAB 环境下将机器人的 ADAMS 虚拟样机模型导入 Simulink 而生成, 如图 10 所示。值得注意的是, SONDEX 牵引机器人具有 2 组驱动机构和 2 组支撑机构, 为此联合仿真模型中的扭矩子系统与弹簧力子系统均设置为两组。

仿真过程中为实现 ADAMS 与 Simulink 程序间的闭环控制, 机器人控制系统 Simulink 模型的输出参数作为 ADAMS_sub 模块的输入变量, ADAMS_sub 模块的输出量作为控制系统 Simulink 模型的输入参数。ADAMS/Simulink 模型的输入量分别为驱动电机产生的爬行轮扭矩、动作电机产生的弹簧压缩力, 以及阻碍机器人前进的牵引阻力, 输出量则为 ADAMS_sub 模块中的速度测量值。

由图 9 可见, ADAMS/Simulink 联合仿真模型以速度为输出量, 将其与额定速度的偏差通过控制器反馈调节于两驱动电机的实时输出电压将该输出值与额定速度的偏差作为反馈信号用于校正驱动电机与动作电机的实时输出电压, 使轮式牵引机器人克服牵引阻力匀速运动。两个弹簧力子系统均设有弹簧力反馈控制功能, 当反馈值小于弹簧力额定值时, 动作电机持续运转; 当反馈值等于弹簧力额定值时, 动作电机制动, 丝杠螺母停止移动, 支撑机构实现封闭。

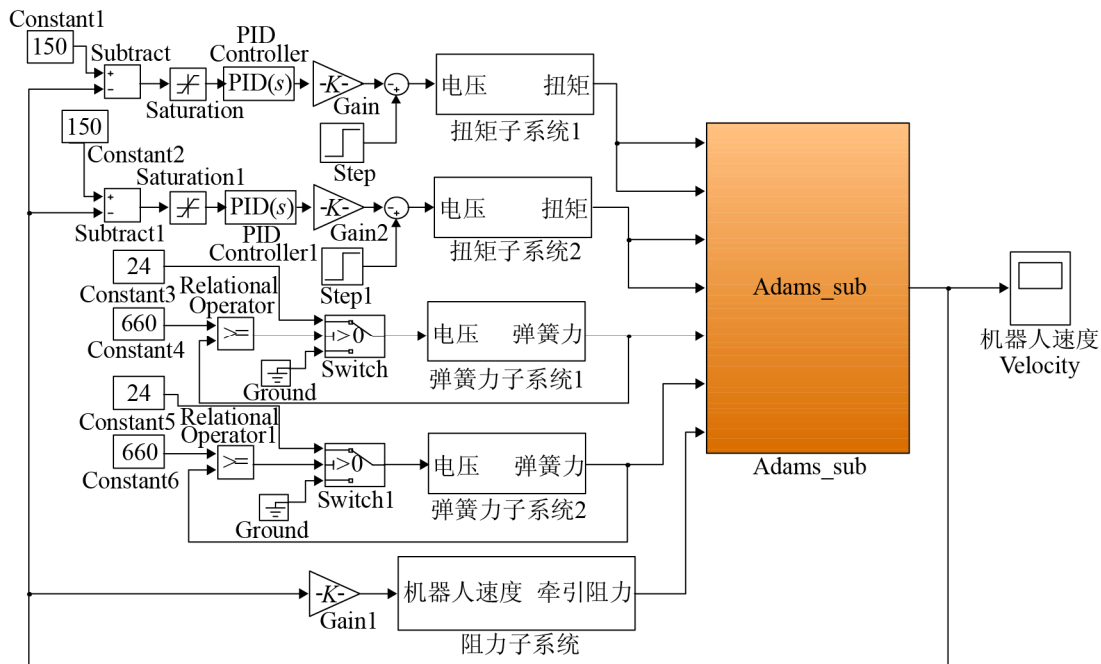


图9 ADAMS/Simulink 联合仿真模型

Fig. 9 Joint simulation model based on ADAMS/Simulink

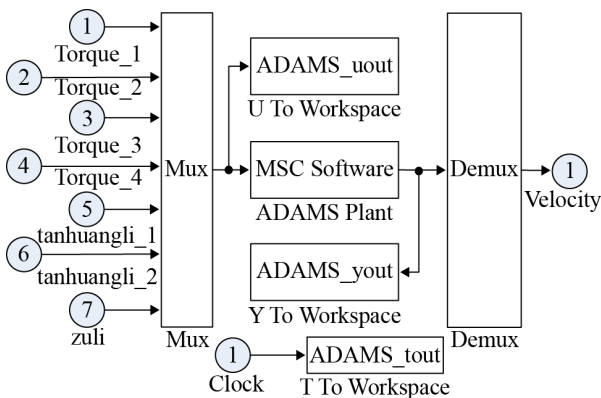


图10 ADAMS_sub 模块图

Fig. 10 Block diagram of ADAMS_sub module

3.2 仿真结果与分析

对结构优化后的轮式牵引机器人运行特性进行仿真分析,研究水平井内该机器人运动状态及越障性能。假设该牵引机器人前进过程中遭遇台阶型障碍物,仿真过程的持续时间设置为4.5 s,获得该牵引机器人的运动速度曲线如图11(a)所示,可见牵引力作用下机器人在水平井内的运动速度快速提升至150 mm/s左右,然后速度趋向于稳定。当机器人通过5 mm环形台阶型障碍,30°局部径障碍以及10 mm高台阶型障碍时,尽管机

器的速度发生剧烈波动,但越过障碍后又迅速恢复正常。该牵引机器人从0.7 s起开始越障,由图11(b)可见,在0.6~1.6 s区间内机器人中轴位置相对于管道中心的最大位移量约为0.125 mm,位移曲线波动较小,则说明优化后该机器人运行更平稳,扶正器定心及支撑性能较好。

由式(4)可知爬行轮正压力与弹簧I的弹簧力成正比,由图11(c)中结果可见,当弹簧力为660 N时,越障过程中两个爬行轮与管道内壁之间的正压力在1 220 N左右,也就是说单个爬行轮所承受的正压力约为610 N,与理论计算结果基本一致,并且该机器人越障时弹簧的压缩变化不会造成爬行轮正压力剧烈变化,从而保证所受牵引力保持不变。图11(d)可见,在0.95~1.95 s的越障区间内该机器人的爬行轮角速度发生脉冲性突变,并迅速恢复原值,但角速度变化趋势基本保持稳定,与正常无障碍状态下的角速度曲线走势基本相同。综上所述,爬行模块优化设计有利于提高轮式牵引机器人井下越障能力和运动平稳性,ADAMS/Simulink联合仿真结果可实时反映水平井中井下机器人的动态运动特性。

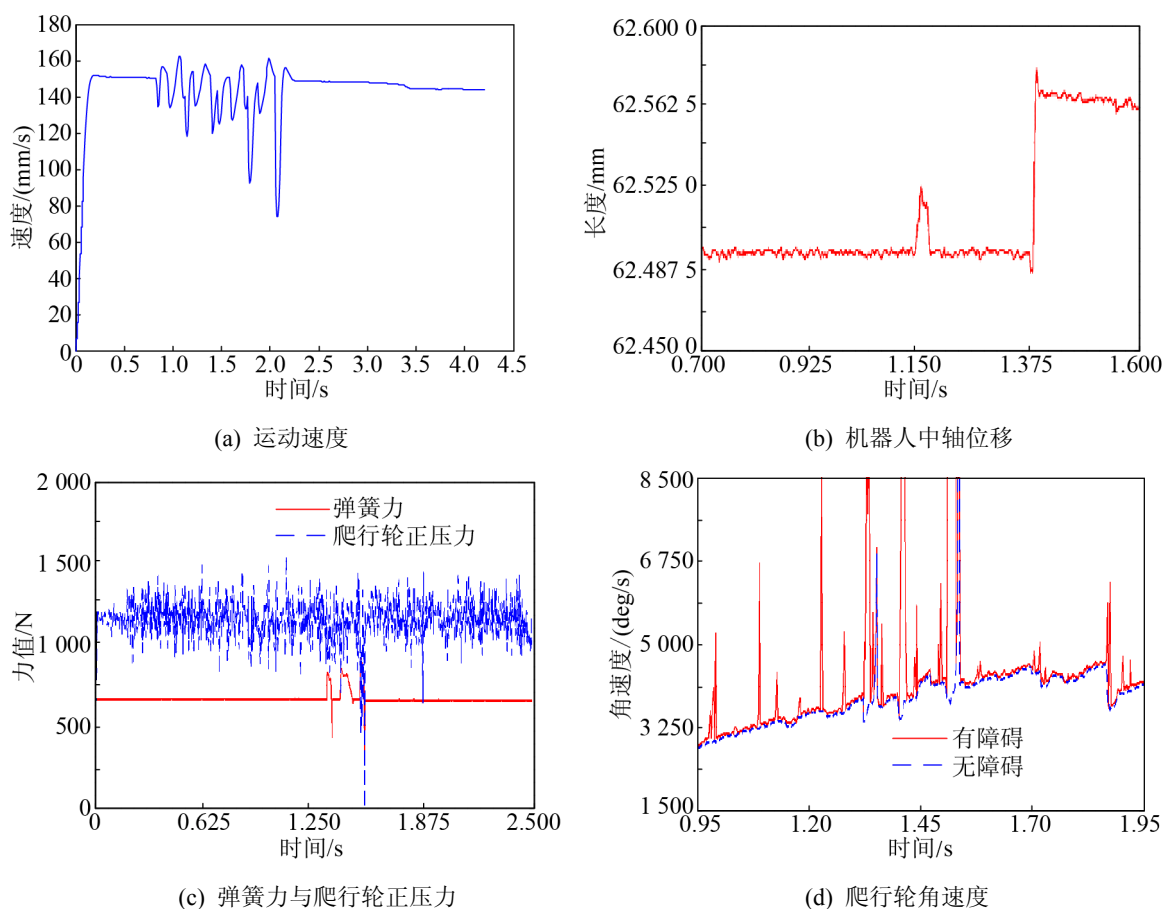


图 11 轮式牵引机器人运动特性仿真曲线
Fig. 11 Simulation curve of robot's locomotion characteristics

4 结论

本文建立了轮式牵引机器人爬行模块的受力模型, 优化了爬行模块的结构尺寸, 构建了该机器人的 ADAMS 模型; 搭建了牵引机器人驱动机构、支撑机构及牵引阻力控制的 Simulink 模型。将 ADAMS 虚拟样机模型导入 MATLAB 下运行生成 ADAMS_sub 模块, 并与控制系统的 Simulink 模型组合, 实现了轮式牵引机器人的 ADAMS/Simulink 联合仿真建模, 并开展机器人运动特性仿真分析, 研究同一管径水平井内其运动状态及越障性能。仿真结果显示, 水平井内该牵引机器人的最大运动速度约为 150 mm/s, 越障过程中机器人中轴位置相对于管道中心的最大位移量约为 0.125 mm, 当弹簧力为 660 N 时越障过程中机器人单个爬行轮所承受的正压力约为

610 N, 与理论计算结果基本一致。最后, 通过 ADAMS/Simulink 仿真实验测试了结构优化后机器人在有障碍与无障碍状态下的爬行轮角速度差异。结果表明: 有障碍与无障碍状态下该机器人爬行轮的角速度变化趋势基本相同, 爬行模块优化设计增强了轮式牵引机器人井下越障能力与运动平稳性。本文仿真研究可定量描述轮式牵引机器人水平井下的动态运动特性, 对提高实际应用中牵引机器人运行可靠性与稳定性具有重要意义和工程价值。

参考文献:

- [1] Siqueira E, Botelho S, Azzolin R, et al. A review about robotic inspection considering the locomotion systems and odometry[C]//IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Italy: IEEE, 2016: 571-576.

- [2] Park J, Kim T, Yang H. Development of an actively adaptable in-pipe robot[C]// IEEE International Conference on Mechatronics. Spain: IEEE, 2009: 1-5.
- [3] Atsushi K, Taiki N, Ma S. Designing arm length of a screw drive in-pipe robot for climbing vertically positioned bent pipes[J]. Robotica (S0263-5747), 2016, 34(2): 306-327.
- [4] Shukla A, Karki H. Application of Robotics in Onshore Oil and Gas industry-A review Part I[J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 2016, 75: 490-507.
- [5] 陈亮帆, 高德利. 一种跨越式水平井越障牵引器设计[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 75-79.
Chen Liangfan, Gao Deli. Design of a Leap-type Horizontal Well Tractor[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 75-79.
- [6] Ye C, Liu L, Xu X, et al. Development of an in-pipe robot with two steerable driving wheels[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). China: IEEE, 2015: 1955-1959.
- [7] 苗毅, 周侗. 遥操作训练仿真系统的月球车虚拟样机设计[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(11): 2701-2708.
Miao Yi, Zhou Ti. Design of Virtual Prototype for Lunar Rover in Training Simulation System for Teleoperation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2701-2708.
- [8] Fischer W, Caprari G, Siegwart R, et al. Magnebike: A magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex-shaped structures[J]. Journal of Field Robotics (S1556-4959), 2009, 26(5): 453-476.
- [9] 陈罡, 周奇才, 吴菁, 等. 七自由度机械臂的 ADAMS/MATLAB 联合仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 99-106.
Chen Gang, Zhou Qicai, Wu Jing, et al. Research for co-simulation of 7DOF manipulator based on Adams and Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 99-106.
- [10] Fang D, Shang J, Luo Z, et al. Research on Hydraulic Performance of Downhole Traction Robot in Oil Field[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science (S1755-1315), 2018, 108(3): 032031.
- [11] 白相林, 李浩昱, 刘文剑. 油田水平井牵引机器人驱动单元的设计[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(2): 122-127.
Bai Xianglin, Li Haoyu, Liu Wenjian. Design of driving unit for horizontal well traction robot[J]. Journal of Jilin University, 2008, 38(2): 122-127.
- [12] 蒋萍, 周建忠, 盛杰, 等. ZK 蜗杆传动系统的参数优化设计[J]. 现代制造工程, 2016(5): 118-124.
Jiang Ping, Zhou Jianzhong, Sheng Jie, et al. ZK worm drive system parameter optimization[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(5): 118-124.
- [13] 曾华军. 水平井牵引器驱动系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Zeng Huajun. Research on Key Technology of Drive System of Horizontal Well Tractor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [14] 白相林. 水平井牵引机器人关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Bai Xianglin. Research on Key Technology of Horizontal Well Traction Robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [15] 梅亮, 刘景林, 董亮辉, 等. 基于 Simulink 无刷直流电机直接转矩控制研究[J]. 微电机, 2013, 46(6): 62-66.
Mei Liang, Liu Jinglin, Dong Lianghai, et al. Study of Brushless DC Motors DTC Based on Simulink[J]. Micromotors, 2013, 46(6): 62-66.
- [16] 谢惠祥. 伸缩式管道机器人动力学建模与控制系统设计[D]. 北京: 国防科学技术大学, 2009.
Xie Huixiang. The Dynamic Modeling and Control System Design of the Telescopic In-pipe Robot[D]. Beijing: National University of Defense Technology, 2009.