

输电线巡检机器人越障工况下基座旋转关节性能分析

李小彭¹, 刘海龙¹, 樊星¹, 石冰²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宁夏理工学院 机械工程学院, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 影响机器人越障性能的主要因素之一是行走臂基座旋转关节. 为了提升机器人在越障工况下的行走性能, 提出了一种基座旋转关节主动调节方法. 首先建立了机器人基座旋转关节的双惯量动力学模型, 基于该模型采用线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)控制理论设计了关节控制器. 对比发现基座旋转关节性能主要由权系数矩阵 Q_c 与 R_c 决定, 使用遗传算法对关节控制器系数矩阵中的参数进行优化, 并通过对比分析优化效果, 找到最佳方案来提升机器人在越障工况下的行走性能. 最后进行了多关节双臂巡检机器人的越障实验, 结果表明, 经优化参数后的关节控制器能更好地控制机器人完成越障任务.

关键词: 双臂巡检机器人; 动力学模型; 关节控制; 遗传算法; 性能分析

中图分类号: TH 11.1; T P1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0052-09

Performance Analysis of Base Rotational Joint Under Obstacle Crossing Condition for Transmission Line Inspection Robot

LI Xiao-peng¹, LIU Hai-long¹, FAN Xing¹, SHI Bing²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Ningxia Institute of Technology, Shizuishan 753000, China. Corresponding author: LI Xiao-peng, E-mail: xpli@me.neu.edu.cn)

Abstract: One of the main factors affecting the obstacle crossing performance is the base rotation joint of the walking arms. To improve the walking performance of the robot under the obstacle crossing conditions, an active adjustment method of the base rotation joint was proposed. Firstly, a dual-inertia dynamic model of the base rotation joint was established, and a joint controller was designed based on linear quadratic regulator (LQR) control theory. Through comparison, it is found that the performance of the base rotation joint is mainly determined by the weight coefficient matrices Q_c and R_c . Genetic algorithm is used to optimize the parameters in the coefficient matrices of the joint controller, and the optimization results are compared and analyzed to find the best scheme to improve the walking performance of the robot under obstacle crossing condition. Finally, the obstacle crossing experiment of the multi-joint double-arm inspection robot is carried out, and the results showed that the joint controller with optimized parameters can better control the robot to complete obstacle crossing tasks.

Key words: dual-arm inspection robot; dynamic modeling; joint control; genetic algorithm; performance analysis

目前,我国已建成世界上最大的输电线网络,随着机器人技术的进步以及输电线网络规模的增加,输电线巡检机器人已成为学者研究的热点^[1].巡检机器人在巡检输电线路过程中,不仅需要沿线行走,还需要跨越输电线上的各种障碍物,如防震锤、绝缘子和引流线等^[2-3].第一台可跨

点^[1].巡检机器人在巡检输电线路过程中,不仅需要沿线行走,还需要跨越输电线上的各种障碍物,如防震锤、绝缘子和引流线等^[2-3].第一台可跨

越障碍巡检机器人出现在20世纪80年代末,由日本东京电力公司研发的光纤复合架空地线巡检移动机器人^[4].随后,美国TRC公司、日本政法大学和加拿大魁北克水电研究院等先后研制出三臂巡检机器人^[5]、多臂巡检机器人^[6]以及双臂机器人LineScout^[7].

三臂及多臂巡检机器人至少有2个臂与输电线接触,具有较高的稳定性.相对于三臂和多臂机器人,双臂巡检机器人具备结构简单、动作灵活和轻量化等诸多优势.然而在其越障过程中,只有一个行走臂直接接触输电线,使得双臂巡检机器人在越障工况下行走的稳定性难以保证^[8].针对双臂巡检机器人底座旋转关节的动力学模型及其性能优化问题,国内外研究人员开展了大量的研究.

关于双臂巡检机器人动力学模型, Jia等^[9]利用Kane方程法,建立了闭链混合系统的机器人双臂动力学模型. Jamisola等^[10]利用双臂机器人的相对雅可比矩阵,将机器人2个机械臂的动力学模型融合到一起,将其看作一个整体机构,再利用单臂机器人的动力学建模方法建立了双臂机器人动力学模型. 李小彭等^[11]利用第二类Lagrange动力学方法建立了输电线双臂巡检机器人的单臂动力学模型. Spong等^[12]首次提出将旋转关节等效为电机-小阻尼扭簧-负载,由此组成双惯量系统.

由于输电线双臂巡检机器人越障主要依赖于底座旋转关节驱动,整个驱动模型可以看作双惯量系统,提升双惯量系统性能参数的主要方法为主动控制^[13]. Chen^[14]提出了一种基于广义扩展状态观测器的鲁棒跟踪控制器和基于扰动观测器的鲁棒跟踪控制器. 文献^[15]将双惯量理论应用于输电线巡检机器人,利用比例积分(PI)控制策略控制巡检机器人的旋转关节,使其获得良好

的输出速度.

为了提升输电线双臂巡检机器人的越障性能,本文建立了双惯量系统动力学模型,并在此基础上针对底座旋转关节设计了LQR控制器.通过遗传算法得到最优解,进而改善其动力学性能.数值仿真和控制实验的结果进一步验证了本文所提出的遗传算法优化控制器参数的有效性.

1 双惯量系统动力学模型

本文研究的多关节双臂巡检机器人如图1所示,主要由2个行走臂、机身与质心调节机构3部分组成.

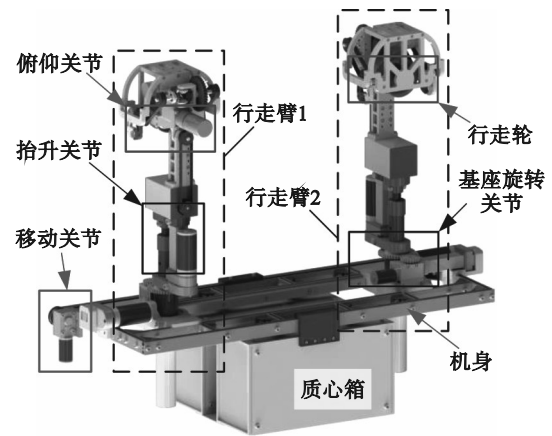


图1 多关节双臂巡检机器人模型

Fig. 1 Multi-joint dual-arm inspection robot model

机器人双臂呈对称分布,其单臂越障过程如图2所示.首先,移动关节调节质心箱位置,使整个机器人的质心在行走臂2的轴线上;然后,行走臂1抬升脱线,由行走臂2的底座旋转关节旋转使行走臂1越过障碍;最后,行走臂1下降搭线,重新调节质心箱位置,重复上述步骤完成行走臂1越障.

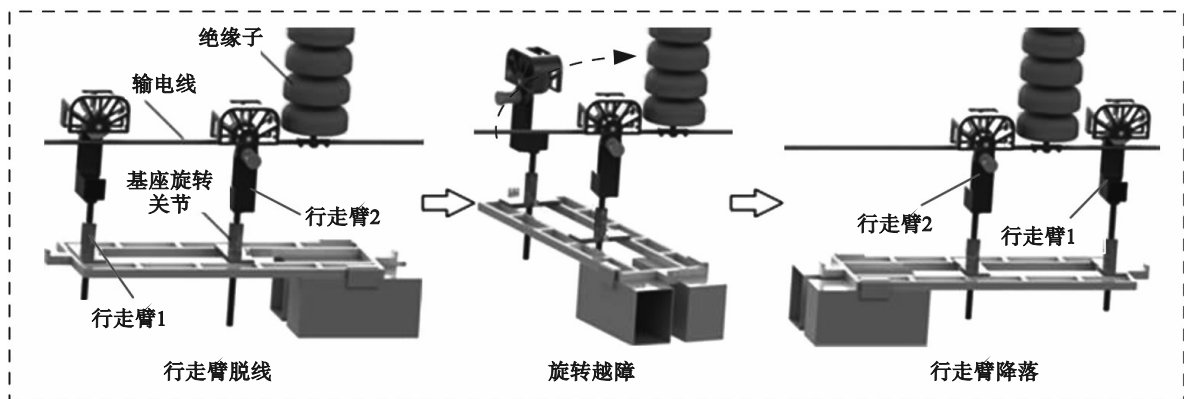


图2 越障过程

Fig. 2 Obstacle crossing process

机器人越障工作主要由行走臂基座旋转关节驱动完成,因此对机器人在越障工况下的行走性能进行优化,研究的主要对象为基座旋转关节.机器人基座旋转关节的驱动电机与负载通过传动轴系连接,因传动轴系具有一定的扭转刚度和阻尼,故将其简化,如图3所示.

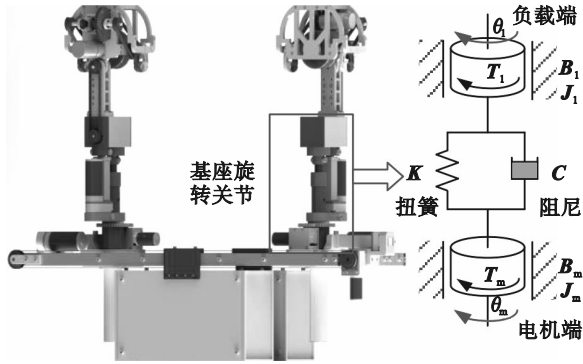


图3 关节简化模型

Fig. 3 Model of simplified joint

图3中各参数物理意义为: T_m 表示电机输出转矩; J_m 表示电机的转动惯量; B_m 表示电机阻尼系数; θ_m 表示电机输出转角; K 表示传动系统扭转刚度; C 表示传动系统扭转阻尼; T_l 表示负载转矩; J_l 表示负载转动惯量; B_l 表示负载阻尼系数; θ_l 表示负载转角.

在实际机械系统中,电机阻尼的作用一般很小,因此可以忽略其阻尼系数 B_m ^[13],并根据图3所示的力学关系,可建立双臂巡检机器人基座旋转关节的双惯量动力学方程.

$$\left. \begin{aligned} T_m &= T_l + T_s, \\ T_l &= J_l \ddot{\theta}_l + B_l \dot{\theta}_l, \\ T_s &= K(\theta_l - \theta_m) + C(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_m). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: T_s 表示由传动轴系的扭转变形引起的扭矩; $\dot{\theta}_l$ 为负载角速度; $\ddot{\theta}_l$ 为负载角加速度; $\dot{\theta}_m$ 为电机角速度.

由式(1)可得多关节巡检机器人的动力学关系,如式(2)所示.

$$\ddot{\theta}_l = \frac{1}{J_l} [T_m - K\theta_l - (B_l + C)\dot{\theta}_l + K\theta_m + C\dot{\theta}_m]. \quad (2)$$

引入变量参数 x_1, x_2 与系统输入 u 满足:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \theta_l, \\ x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{\theta}_l, \\ u &= (K\theta_m + C\dot{\theta}_m + T_m)/J_l. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(3)代入动力学方程,可得其动力学关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K}{J_l} x_1 - \frac{B_l + C}{J_l} x_2 + u. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)整理可得,多关节双臂巡检机器人在越障工况下系统的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u. \quad (5)$$

式中: $a = -\frac{K}{J_l}$; $b = -\frac{B_l + C}{J_l}$.

2 控制仿真

输电线巡检机器人因高空作业,在越障过程中影响其越障性能的主要因素为风载荷.机器人机身为桁架结构,在低风载下影响较小,可忽略不计^[13].针对低风载下机器人基座旋转关节的控制流程如图4所示.结合机器人在越障工况下的动力学方程,以基座旋转关节的实际运动参数作为系统输入,设计了基座旋转关节控制器.通过对机器人的逆运动学求解,可得到基座旋转关节的运动参数,并将其作为系统的期望输入,利用LQR控制理论优化该旋转关节控制器^[16],进而实现对机器人在越障工况下行走性能的提升.

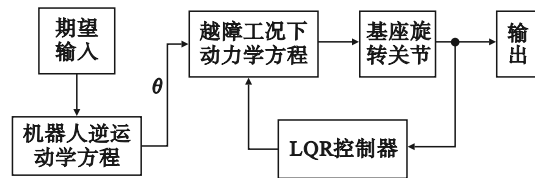


图4 基座旋转关节控制流程图

Fig. 4 Control flow chart of the base rotation joint

2.1 LQR控制器设计

根据简化的Hankel模型^[17],控制系统的状态方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A_r \hat{x} + B_r u + K_c (y - \hat{y}), \\ \hat{y} &= C_r \hat{x}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $(A_r \ B_r \ C_r)$ 为基于Hankel模型简化后的系统传递矩阵法得到的系统模型; \hat{x} 为估计器的系统状态变量; y 为实际关节输出; \hat{y} 为估计器的计算输出; K_c 为估计器的增益矩阵,可通过Riccati代数方程求解.

引入矩阵 S ,其Riccati代数方程如式(7)所示,求得增益矩阵 K_c .

$$\left. \begin{aligned} A_r S + S A_r^T - S K_c S + Q_c &= 0, \\ K_c &= C_r^T R_c^{-1} C_r. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: Q_c 与 R_c 分别为输出误差和系统输入的权系数矩阵.

引入误差向量 e , e 为期望输出 \hat{y} 与实际输出 y 之间的误差.

$$e = \hat{y} - y. \quad (8)$$

引入线性二次型性能函数 J , 如式(9)所示, 线性二次型最优控制律旨在找到一个控制输入, 从而使方程(9)取得最小值.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q_c e + u^T R_c u) dt. \quad (9)$$

通过求解式(9)的最小值问题, 可以得到控制律, 如式(10)所示, 该控制律为线性状态变量反馈和输出前馈的组合.

$$\left. \begin{aligned} u &= K_c \hat{x} + K_g \hat{y}, \\ K_c &= -R_c^{-1} B_r^T P, \\ K_g &= -R_c^{-1} B_r^T (P B_r R_c^{-1} B_r^T - A_r^T)^{-1} C_r^T Q_c. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: K_g 为期望输出的反馈增益; P 为式(11)所示的 Riccati 代数方程的解.

$$P A_r + A_r^T - P B_r R_c^{-1} B_r^T P + C_r^T Q_c C_r = 0. \quad (11)$$

如图 5 所示, LQR 控制器主要由状态估计器与线性二次控制器 2 个部分组成. 本文设计的 LQR 控制器中, 估计模块采用的是卡尔曼滤波器.

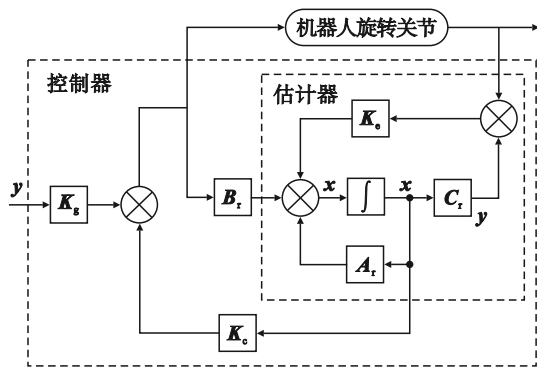


图 5 LQR 控制器结构

Fig. 5 Structure of the LQR controller

LQR 控制器的期望输入为通过机器人位置逆运动学求解得到的理论值, 期望输出为在该期望输入下机器人旋转关节的理论输出, 实际输出为观测器得到的机器人旋转关节的实际运动参数. 控制器的输入为期望输出和实际输出, 控制器的输出为机器人旋转关节的运动参数.

在 LQR 控制算法中, 权系数矩阵 Q_c 与 R_c 是主要参数, 控制器对机器人越障工况下行走性能优化的效果主要由权系数矩阵 Q_c 与 R_c 决定. 权系数矩阵可以直接决定控制器的增益系数, 因此选择合适的权系数矩阵能够提升 LQR 控制器的控制效果以及机器人旋转关节的响应速度和稳定性.

2.2 LQR 控制器的数值仿真

通常 Q_c 与 R_c 的取值为

$$\left. \begin{aligned} Q_c &= \begin{bmatrix} \eta_1 & 0 \\ 0 & \eta_2 \end{bmatrix}, \\ R_c &= \zeta I. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: η_1, η_2 和 ζ 为待定系数; I 为单位矩阵.

由方程(12)可见, Q_c 主要对输出误差效果增益, R_c 主要对系统输入增益, 因此可以合理设置 Q_c 与 R_c 来优化控制系统的效果.

仿真分析所需要巡检机器人旋转关节的物理参数如表 1 所示.

表 1 机器人旋转关节参数

Table 1 Parameters of the robot rotation joint

名称	符号	单位	数值
负载转动惯量	J_1	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	625×10^{-4}
负载阻尼系数	B_1	$\text{N} \cdot \text{s/m}$	0.05
传动系统扭转刚度	K	$\text{N} \cdot \text{s/rad}$	1.3
传动系统扭转阻尼	C	$\text{N} \cdot \text{s/m}$	0.05

以关节匀速运动为例, 设置关节速度为 $9^\circ/\text{s}$, 运动时间为 20 s. 赋值 Q_c 与 R_c 中的 η_1, η_2 和 ζ 不同参数值, 仿真观察控制效果. 随机取 4 组数据, 如表 2 所示.

表 2 Q_c 与 R_c 赋值参数

Table 2 Parameters of Q_c and R_c

序号	η_1	η_2	ζ
1	100	0.1	0.1
2	50	1	1
3	100	1	50
4	100	0.1	100

根据表 2 中权系数矩阵赋值参数, 仿真可得机器人旋转关节位移、速度和加速度的时域响应对比, 如图 6 所示.

不同的 Q_c 与 R_c 赋值将会带来不同的响应曲线, 影响控制效果. 尤其在系统调整时间 T_{ss} 、最大超调量 M_p 与关节最大加速度 a_{\max} 评价指标上, 均有不同表现.

由图 6 可知, Q_c 与 R_c 赋值参数 1 和参数 2 虽在调整时间上有优势, 但具有超调量和较大的关节最大角加速度, 关节角加速度峰值受关节自身能力限制, 因此不能过大. Q_c 与 R_c 赋值参数 3 和参数 4 虽在调整时间上有所不足, 但没有超调量且关节加速度不大, 使得关节运动平稳. 因此, 利用算法确定合适的 Q_c 与 R_c 将是接下来研究的

重点.

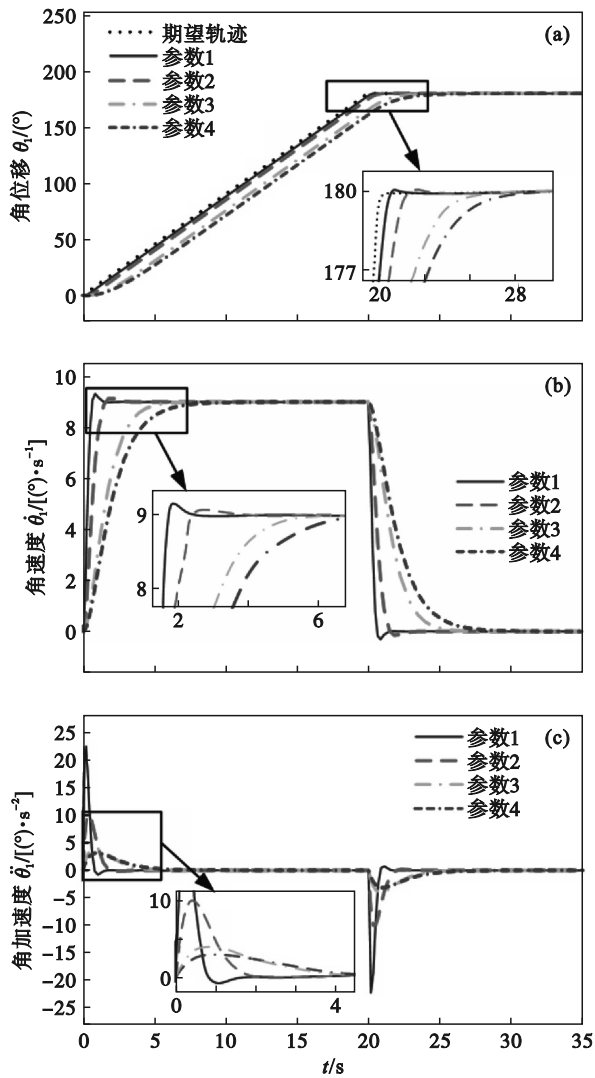


图6 不同参数下旋转关节时域响应对比

Fig. 6 Time domain response comparison of the rotary joint with different parameters

(a)一角位移; (b)一角速度; (c)一角加速度.

3 控制器参数优化

确定合适的权系数矩阵 Q_c 与 R_c 为优化控制器参数的关键,因此,本文利用遗传算法(GA)来寻找合适的权系数矩阵.由于遗传算法的使用条件没有太多的数学要求,仅需要设置合理的目标函数与约束即可,在求解最优化问题的过程中,不需要问题的内在性质.基于上述优势,本文选择遗传算法对权系数矩阵 Q_c 与 R_c 进行优化.

3.1 基于遗传算法的参数优化设计

遗传算法优化流程图如图7所示.遗传算法主要涉及确定实际参数、参数编码、产生群体等过程^[18].过程中需要对群体进行评价,并根据评

价结果进行遗传操作,通过选择、变异、交叉等操作后,产生新一代种群,依次循环操作找到能够满足规划的结果.

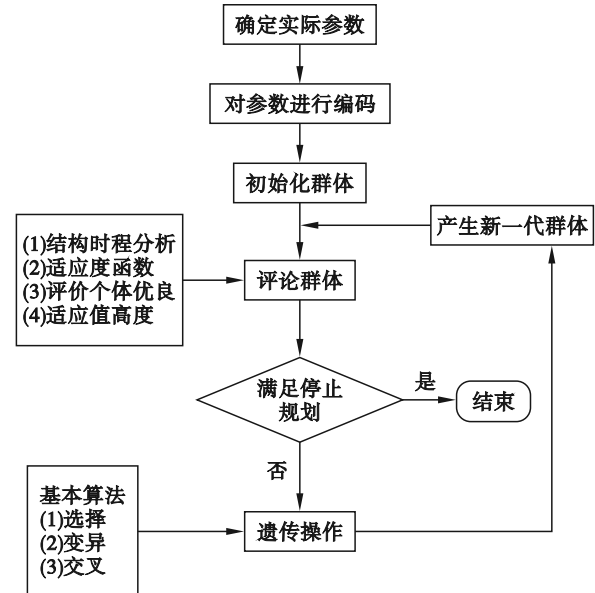


图7 遗传算法优化流程图^[18]

Fig. 7 Flow chart of optimization based on genetic algorithm^[18]

遗传算法的关键是找到合理的目标函数^[19],双臂巡检机器人的稳定性和性能主要受调整时间 T_{ss} 、最大超调量 M_p 和最大加速度 a_{max} 影响.3个指标都直接反映越障性能,为兼顾这3项性能指标,取相同的权重系数,定义目标函数如式(13)所示.

$$W_{min} = \frac{T_{ss}}{\bar{T}_{ss}} + \frac{M_p}{\bar{M}_p} + \frac{a_{max}}{\bar{a}_{max}} \quad (13)$$

式中: \bar{T}_{ss} 为位移、速度和加速度最大调整时间的均值; \bar{M}_p 为最大超调量的均值; \bar{a}_{max} 为关节最大加速度的均值.

经过试算,确定权系数矩阵 Q_c 与 R_c 参数的取值范围如式(14)所示.

$$\left. \begin{aligned} 10 \leq \eta_1 \leq 100, \\ 0.01 \leq \eta_2 \leq 1, \\ 1 \leq \zeta \leq 100. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

拟选择遗传算法的终止代数数为100代,群体数量为30,其中交叉概率为0.45,变异概率为0.15.

在遗传算法中,每次计算的初始种群都是随机生成的,因此每次结果均存在差异,但最优结果基本接近.每次迭代目标函数最小值的变化如图8所示.

运行遗传算法程序得到权系数矩阵参数的最优解,如式(15)所示.

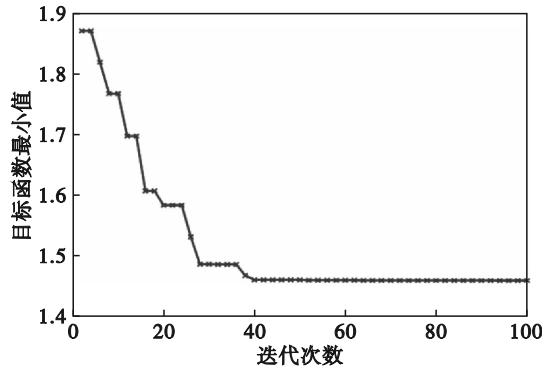


图8 遗传算法进化曲线

Fig. 8 Evolutionary curve of GA

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= 43.517, \\ \eta_2 &= 0.306, \\ \zeta &= 12.483. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3.2 权系数矩阵参数对目标函数影响

为验证遗传算法所得参数的准确性,需要初步判断权系数矩阵参数 η_1, η_2 和 ζ 最优解的大致范围,若式(15)中参数不在最优解范围内,则可初步判定遗传算法所得到的参数存在问题。

结合各参数的取值范围,通过给权系数矩阵参数 η_1, η_2 和 ζ 赋值并仿真,记录不同权系数矩阵参数下各项评价指标,其结果如表3~表5所示。

表3 不同 η_1 仿真结果

Table 3 Simulation results with different η_1

η_1	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$	η_1	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$
10	4.524	0.090	6.437	60	3.092	0.179	10.92
20	3.668	0.127	8.050	70	3.035	0.176	11.41
30	3.537	0.167	9.036	80	2.932	0.177	11.79
40	3.456	0.173	9.769	90	2.830	0.178	12.22
50	2.770	0.165	10.39	100	2.696	0.181	12.53

表4 不同 η_2 仿真结果

Table 4 Simulation results with different η_2

η_2	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$	η_2	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$
0.01	2.770	0.165	10.39	0.5	3.234	0.158	10.30
0.1	3.035	0.202	10.38	0.6	3.184	0.154	10.30
0.2	3.037	0.197	10.36	0.7	3.316	0.149	10.29
0.3	2.747	0.155	10.34	0.8	3.254	0.146	10.27
0.4	3.309	0.161	10.32	0.9	3.203	0.141	10.24

表5 不同 ζ 仿真结果

Table 5 Simulation results with different ζ

ζ	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$	ζ	T_{ss}/s	$M_p/(\circ)$	$a_{max}/((\circ) \cdot s^{-2})$
1	2.747	0.155	10.34	50	11.31	—	3.156
10	5.487	0.034	5.317	60	12.98	—	2.961
20	5.826	—	4.302	70	14.62	—	2.807
30	8.095	—	3.761	80	15.45	—	2.679
40	10.11	—	3.404	90	16.28	—	2.569

拟合出权系数矩阵参数对目标函数的影响曲线,观察不同参数对目标函数的影响规律.分别以 η_1, η_2 和 ζ 为自变量,在不同取值下仿真得到关节调整时间 T_{ss} ,最大超调量 M_p 和最大加速度 a_{max} ,绘制参数变化对目标函数的影响曲线,如图9所示。

由图9a可见,参数 η_1 对目标函数的影响具有波动性, η_1 较小时会使得系统调整时间过长,因此 η_1 的最优范围应该在50附近.由图9b可见,波谷出现在 $\eta_2=0.3$ 附近,此处可能为 η_2 的最优范围.由图9c可见,随着参数 ζ 数值的增加,其对目

标函数的影响先急剧下降后略有提升.当 ζ 取较大值时,系统最大超调量为0,但调整时间较长,需要加以限制。

整体来看,通过观察影响曲线的变化规律,所确定的最优解选取区间与遗传算法给出的最优解基本吻合。

3.3 参数优化效果分析

将式(14)中遗传算法优化的权矩阵参数代入机器人旋转关节系统中,仿真得到参数优化后的各项性能指标列于表6中。

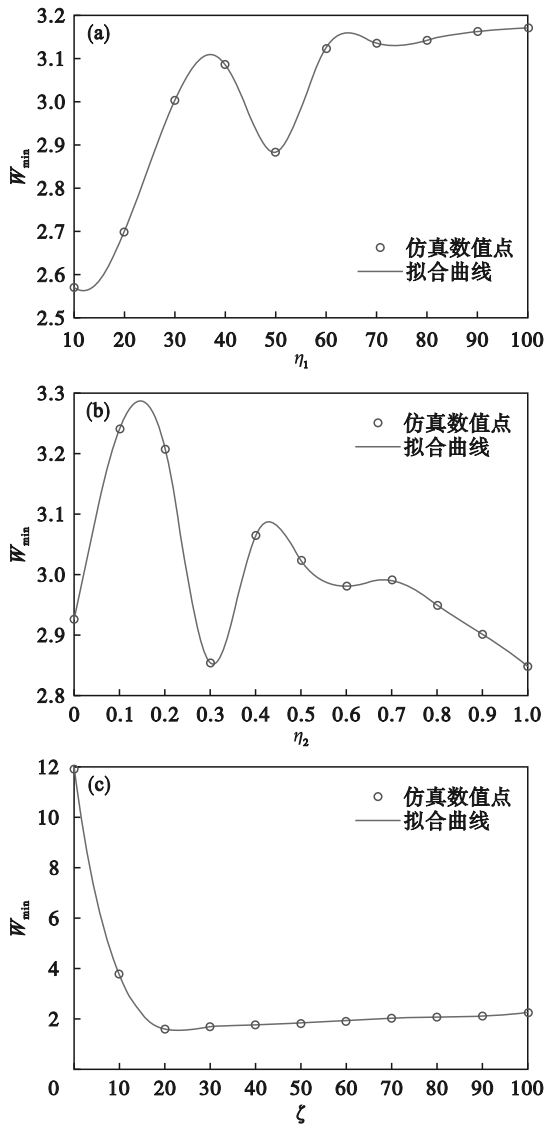


图9 权系数矩阵参数对目标函数影响曲线
Fig.9 Influence curve of weight coefficient parameters on the objective function
(a)— η_1 ; (b)— η_2 ; (c)— ζ .

表6 参数优化后性能指标
Table 6 Performance index after parameter optimization

性能指标	T_{ss}/s			M_p	a_{max}
	θ	$\dot{\theta}$	$\ddot{\theta}$	($^\circ$)	($^\circ$)· s^{-2}
GA-LQR	4.169 3	5.543 5	5.769 3	0.010 9	4.778 2

对比第2节中的4种参数,分析参数优化后LQR控制策略的各性能指标,将各参数对应的性能提升程度汇总到表7中.

由表7中的数据可见,优化后的机器人基座旋转关节性能良好,总体上均有明显的性能提升.遗传算法对关节性能的提升较为全面,并且能够找到相对合适的全局性指标,提升效果明显.此外,该算法能够同时对3项指标进行控制,

即兼顾所有性能指标,避免了人为“试凑”系数而导致的部分指标恶化现象.

表7 性能指标对比
Table 7 Performance index comparison %

性能指标	参数1	参数2	参数3	参数4	
θ	-88.10	-73.31	57.56	65.76	
T_{ss}/s	$\dot{\theta}$	-59.16	-37.23	26.54	50.25
	$\ddot{\theta}$	-62.68	-32.16	21.85	43.99
$M_p/(^\circ)$	91.20	92.04	—	—	
$a_{max}/((^\circ)\cdot s^{-2})$	78.82	52.67	-16.33	-33.87	
合计	33.35	32.38	9.493	9.732	

4 样机实验

首先确定机器人越障过程中的关节运动参数,如表8所示.

表8 机器人关节运动参数
Table 8 Robot joint motion parameters

越障阶段	运行关节	运行时间/s	运行速度
后臂抬升	后臂抬升关节	10	5 mm/s
旋转越障	前臂基座旋转关节	20	9 ($^\circ$)/s
	后臂基座旋转关节	20	9 ($^\circ$)/s
后臂下降	前臂抬升关节	10	5 mm/s

在实验室中搭建模拟输电线实际环境的测试平台,并安装防振锤作为机器人需要跨越的障碍.并通过传感器采集电机端的转角、速度、加速度变化信号,经过处理后传入NI-9401数据采集模块.对多关节双臂巡检机器人跨越防振锤工况进行测试,如图10所示.

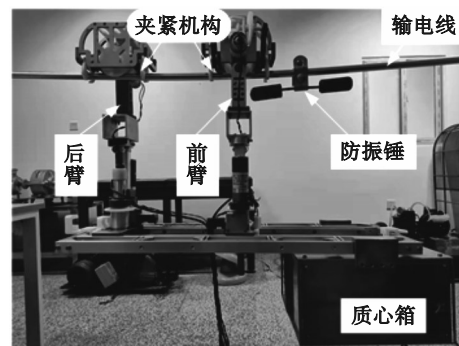


图10 巡检机器人实验样机
Fig.10 Inspection robot test prototype

图10中,机器人位于开始越障的准备阶段,此时,机器人停止于防振锤前,机器人将行走臂上的夹紧机构夹紧,使得机器人前臂与输电线固

定;后行走臂的夹紧机构松开,为接下来后臂脱线做准备.机器人机身与质心箱相互配合调整整体质心,使得机器人质心位于前行走臂的竖直方向上,接下来将进行相应的越障测试.

机器人跨越防振锤的整个测试过程如图 11 所示.机器人跨越防振锤测试分为 2 个阶段,分别为机器人后臂越障阶段,即图 11a~图 11c;前臂越障阶段,即图 11d~图 11f.分别以优化参数 GA-LQR、参数 1、参数 2 和参数 3 为基座旋转关节控制器参数,测得不同参数控制下的基座旋转关节性能如表 9 所示.

从表 9 中可以看出,相较于参数 1 与参数 2,优化参数 GA-LQR 虽在调整时间 T_{ss} 上略有增加,但在最大超调量 M_p 上,对比参数 1 提升 91.93%,对比参数 2 提升 9.10%;在最大加速度 a_{max} 上,对比参数 1 提升 8.27%,对比参数 2 提升 6.05%.相较于参数 3,优化参数 GA-LQR 在调整时间 T_{ss} 上提升 40.91%,最大加速度 a_{max} 下降 11.98%.从整体上看,参数优化后的控制器能较好地兼顾关节调整时间 T_{ss} 、最大超调量 M_p 和最大加速度 a_{max} 3 项性能指标,验证了仿真结果的准确性.

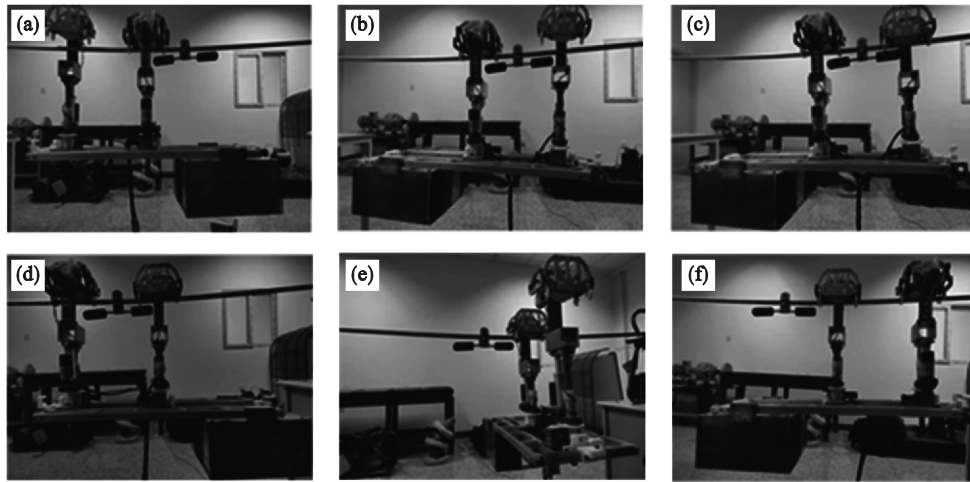


图 11 机器人越障测试

Fig. 11 Obstacle crossing test for robot

(a)一后臂抬升脱线;(b)一关节旋转后臂越障;(c)一后臂越障停止;(d)一前臂抬升脱线;
(e)一关节旋转前臂越障;(f)一前臂越障停止.

表 9 不同控制器参数的实验结果

Table 9 Experimental results for different controller parameters

性能指标	GA-LQR	参数 1	参数 2	参数 3
θ	4.364	1.762	1.638	9.363
T_{ss}/s	4.765	2.635	3.396	8.254
$\dot{\theta}$	5.532	2.461	3.762	8.469
$M_p/(^\circ)$	0.010	0.124	0.145	—
$a_{max}/((^\circ) \cdot s^{-2})$	3.297	19.706	8.687	3.746
整体对比提升/%	—	31.87	29.53	24.36

5 结 论

1) 针对多关节双臂巡检机器人的越障问题,影响机器人在越障工况下行走性能的主要因素是旋转关节,并对巡检机器人旋转关节建立了双惯量动力学模型.

2) 根据机器人动力学模型设计了关节 LQR 控制器,发现控制器的权系数矩阵 Q_c 与 R_c 是影

响控制效果的关键因素,并引入遗传算法设计目标函数,以找到权系数矩阵 Q_c 与 R_c 的最优参数解.

3) 通过仿真对比优化前后的性能指标提升情况发现:遗传算法给出的参数能够全面顾及关节调整时间 T_{ss} 、最大超调量 M_p 和最大加速度 a_{max} 3 项性能指标,不会出现指标恶化现象.通过机器人行走越障实验,验证了仿真结果,关节控制器的参数优化能够提高巡检机器人的越障性能.

参考文献:

- [1] 王志轩. 新中国电气化发展七十年[J]. 中国能源, 2019, 41(10): 9-17.
(Wang Zhi-xuan. Electrification development in 70 years [J]. *Energy of China*, 2019, 41(10): 9-17.)
- [2] Seok K H, Kim Y S. A state of the art of power transmission line maintenance robots [J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2016, 11 (5) : 1412-1422.
- [3] 周军. 超高压输电线路运行维护安全管理的问题与应对策略[J]. 中外企业家, 2019(36): 111.
(Zhou Jun. Problems and countermeasures of operation and maintenance safety management of EHV transmission lines [J]. *Chinese & Foreign Entrepreneurs*, 2019(36): 111.)
- [4] Sawada J, Ishikawa Y, Kobayashi Y, et al. Apparatus for tracking an overhead line and automatically moving around obstacles on the line: US5103739[P]. 1992-04-14.
- [5] Montambault S, Pouliot N. Design and validation of a mobile robot for power line inspection and maintenance [M]//Field and Service Robotics. Heidelberg: Springer, 2008: 495-504.
- [6] Kobayashi H, Nakamura H, Shimada T. An inspection robot for feeder cables—basic structure and control [C]//Proceedings IECON '91: International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Kobe, 1991: 992-995.
- [7] Pouliot N, Montambault S. LineScout technology: from inspection to robotic maintenance on live transmission power lines [C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, 2009: 1034-1040.
- [8] Alhassan A B, Zhang X D, Shen H M, et al. Power transmission line inspection robots: a review, trends and challenges for future research [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 118: 105862.
- [9] Jia Y H, Hu Q, Xu S J. Dynamics and adaptive control of a dual-arm space robot with closed-loop constraints and uncertain inertial parameters [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(1): 112-124.
- [10] Jamisola R S, Kormushev P S, Roberts R G, et al. Task-space modular dynamics for dual-arms expressed through a relative Jacobian [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 83(2): 205-218.
- [11] 李小彭, 尚东阳, 李凡杰, 等. 输电线巡检机器人动力学建模与 DME 评价 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(9): 1280-1284.
(Li Xiao-peng, Shang Dong-yang, Li Fan-jie, et al. Dynamic modeling and DME evaluation of power transmission line inspection robots [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(9): 1280-1284.)
- [12] Spong M W, Hutchinson S, Vidyasagar M. Robot modeling and control [J]. *Industrial Robot International Journal*, 2006, 17(5): 709-737.
- [13] Li X P, Fan X, Shang D Y, et al. Dynamic performance analysis based on the mechatronic system of power transmission line inspection robot with dual-arm [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2023, 237(22): 5391-5408.
- [14] Chen M. Disturbance attenuation tracking control for wheeled mobile robots with skidding and slipping [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64 (4) : 3359-3368.
- [15] 李小彭, 尚东阳, 李凡杰, 等. 输电线巡检机器人位姿变化的柔性关节控制策略 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1577-1583.
(Li Xiao-peng, Shang Dong-yang, Li Fan-jie, et al. Flexible joint control strategy based on posture change of transmission line inspection robots [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(11): 1577-1583.)
- [16] 武凌云, 王晓东, 吴建德. 基于蚁群算法的机器人系统 LQR 最优控制研究 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37(1): 56-59.
(Wu Ling-yu, Wang Xiao-dong, Wu Jian-de. Research on LQR optimal control of robot based on ant colony algorithm [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37 (1): 56-59.)
- [17] Zhang S, Hao Y S, Wang M, et al. Multichannel Hankel matrix completion through nonconvex optimization [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(4): 617-632.
- [18] 侯仰强, 王天琪, 岳建锋, 等. 基于多目标遗传算法的双机器人协调焊接路径规划 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (16): 1984-1989.
(Hou Yang-qiang, Wang Tian-qi, Yue Jian-feng, et al. Path planning for dual-robot coordinate welding based on multi-objective genetic algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(16): 1984-1989.)
- [19] Afzalirad M, Shafipour M. Design of an efficient genetic algorithm for resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29 (2): 427-437.