

输电线巡检机器人动力学建模与 DME 评价

李小彭, 尚东阳, 李凡杰, 曹伟龙
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以新设计的输电线巡检机器人为具体研究对象,采用 D-H 法推导出机器人的雅可比矩阵;然后建立输电线巡检机器人的 Lagrange 动力学模型,进而依据机器人动力学模型求得输电线巡检机器人的操作臂惯性矩阵,提出了基于操作臂惯性矩阵所建立的机器人动力学评价指标:动态可操作性椭球(DME: dynamic operability ellipsoid)评价指标;最后结合逆运动学的反解,建立了不同空间轨迹坐标下的动态可操作性衡量指标,获得机器人动力学性能最佳的越障轨迹.通过机器人跨越绝缘子障碍的实验证明了所提动力学评价方法的有效性.

关 键 词: 巡检机器人;Lagrange 动力学;动态可操作性椭球(DME);越障轨迹;动力学评价方法
中图分类号: TH 16; TP 242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)09-1280-05

Dynamic Modeling and DME Evaluation of Power Transmission Line Inspection Robots

LI Xiao-peng, SHANG Dong-yang, LI Fan-jie, CAO Wei-long
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: SHANG Dong-yang, E-mail: 844377236@qq.com)

Abstract: Taking the newly designed power transmission line inspection robot as the specific research object, the Jacobian matrix of the robot was derived using the D-H method and then the Lagrange dynamic model of the power transmission line inspection robot was established. The inertial matrix of the operating arm of the robot was obtained with the dynamic model, and the evaluation indexes of robot dynamics were put forward based on the inertial matrix of the operating arm—dynamic operability ellipsoid (DME) evaluation index. Finally, combined with the inverse solution of inverse kinematics, dynamic maneuverability indexes under different spatial trajectory coordinates were established, and the obstacle trajectory with the best robot dynamic performance was obtained. Experiments of robots crossing insulator barriers proved the effectiveness of the proposed dynamic evaluation method.

Key words: inspection robot; Lagrange dynamics; dynamic operability ellipsoid (DME); obstacle trajectory; dynamic evaluation method

输电线由于长期暴露在恶劣的荒郊野外环境中,易受到自然环境及自身损耗的影响,需要对输电线路进行定期巡检.近年来随着机器人技术的发展和广泛应用,输电线巡检机器人已经成为全球机器人研究的一个热点.

输电线巡检机器人的研究始于 20 世纪 80 年代末,日本东京电力公司研制出的光纤复合架空地线巡检移动机器人^[1]成为世界上第一台可跨障碍巡检输电线路的机器人.加拿大、美国、泰国等国家也紧随其后,率先开展了输电线巡检机器人的研究,并取得了一定的成果.国外典型的输电线巡检机器人有:“Expliner”机器人^[2]、“SkySweeper”机器人^[3]等.国内,武汉大学研发出了具有自动越障功能的高压输电线路巡线小车^[4].中国科学院沈阳自动化研究所则在巡检机器人的自主控制专家系统、视觉检测与导航方面取得了一系列研究成果^[5-6].

目前针对输电线巡检机器人的研究,多见于机器人结构设计及其越障过程的运动学分析.随着输电线巡检机器人研究的深入开展,其动力学建模和动力学性能评价等问题得到了学者的广泛关注.如文献[7]建立了输电线巡检机器人整体的动力学模型,但未考虑局部机器臂的具体动力学性能;文献[8]通过 Lagrange 动力学方程实现了双臂机器人的动力学建模;文献[9]应用动力学性能评价指标进行了最优越障轨迹选择的研究;文献[10]通过速度、加速度图谱对机器人的结构参数进行优化,进而改善动力学性能.

上述研究的评价指标多通过机器人 Jacobian 矩阵构造,随着机器人运动精度、平稳性的提高,还需要考虑关节空间状态方程对于机器人动力学性能的影响. Asada^[11]提出用评价指标衡量机器人动力学特征,进而确定机器人的工作空间.此种方法通过多维广义椭球表征动力学性能,具有几何上明显直观的优点.文献[12-13]将机器人质量矩阵和 Jacobian 矩阵相结合,提出了 DME 评价指标.文献[14-15]开展了臂型机器人的动力学实验,验证了 DME 动力学评价指标的有效性.

因此,本文在完成输电线巡检机器人结构设计的基础上,建立了机器人的 Lagrange 动力学模型,并进行动力学方程的推导;通过动力学模型建立了机器人的 DME 评价指标,用以最优逆运动学路径的选择评价;最后通过实物样机实验,验证所选越障轨迹的正确性.

1 机器人的正运动学分析

根据 D-H 法建立巡检机器人单臂连杆坐标系,其中机器人连杆坐标系的建立与实验部分独立关节的布置相一致.连杆坐标系 1,2,3,4 和 5 如图 1 所示.

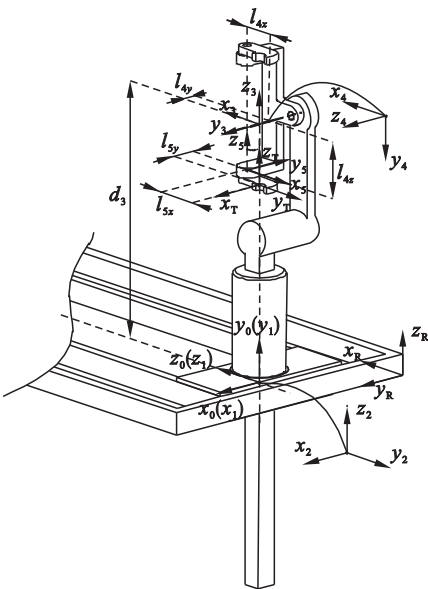


图 1 输电线巡检机器人连杆坐标系
Fig. 1 Coordinate system of power transmission line inspection robot linkage

根据图 1 所建立的坐标系,设定各连杆参数,得到输电线巡检机器人的连杆参数,如表 1 所示.

表 1 输电线巡检机器人连杆参数表									
Table 1 Parameter list of the inspection robot linkage of the power transmission line									
连杆	a_i/mm	$\alpha_i/(\text{^\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(\text{^\circ})$	关节变量	m/kg	$P_c = [x_c, y_c, z_c]/\text{mm}$	$I = [I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}]/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
1	0	0°	d_1	0	d_1	1.96	[0,0,0]	[0.81,0.25,0.31,0.25,-0.09,0.43]	
2	0	-90°	0	θ_2	θ_2	2.31	[0,0,48.5]	[0.42,0.43,0.17,0.02,-0.35,0.31]	
3	0	0°	d_3	-90	d_3	3.28	[0,16.8,239.7]	[0.32,0.33,0.14,-0.74,0.33,0.02]	
4	0	-90°	$-l_{4y} = -15$	θ_4	θ_4	1.97	[75.3,1.2,6.2]	[0.45,0.44,0.36,-0.06,0.112,0.97]	
5	$l_{4x} = 40$	90°	$-l_{4z} = -82$	θ_5	θ_5	0.06	[15.1,1.45,0]	[0.29,0.71,0.03,0.25,-0.14,0.06]	

注: a_i 表示轴线间的距离; α_i 表示轴向间的夹角; d_i 表示连杆的偏距; θ_i 表示连杆之间的转角; m 表示连杆质量; P_c 表示连杆质心相对位置; I 表示连杆惯量矩阵.

利用微分变化法求得雅可比矩阵,如式(1)所示:

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & -s\theta_4c\theta_5 & -l_{4z}c\theta_5 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & s\theta_4s\theta_5 & l_{4z}s\theta_5 & 0 \\ c\theta_2s\theta_4 & l_{4y}s\theta_4 & c\theta_4 & -l_{4x} & 0 \\ 0 & -s\theta_4c\theta_5 & 0 & s\theta_5 & 0 \\ 0 & s\theta_4s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -c\theta_4 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

(1)

式中: $J_{11} = -s\theta_2s\theta_5 + c\theta_2c\theta_4c\theta_5$;
 $J_{12} = s\theta_5(l_{4y}c\theta_4c\theta_5 + l_{4x}c\theta_4 - l_{4z}s\theta_4)$;
 $J_{21} = -s\theta_2c\theta_5 - c\theta_2c\theta_4s\theta_5$;
 $J_{22} = c\theta_5(l_{4x}c\theta_4 - l_{4z}s\theta_4 - l_{4y}c\theta_4s\theta_5)$.
其中:s 为 sin 缩写;c 为 cos 缩写; l_{4x}, l_{4y}, l_{4z} 表示连杆 4 质心相对于坐标系的距离.

2 动力学模型的建立

本文采用第 2 类 Lagrange 方法,构造 Lagrange

能量函数,推导输电线巡检机器人的动力学模型.

Lagrange 动力学的描述是基于系统能量的概念,对于任何机械系统,Lagrange 函数 L 定义为动能 K 与位能(势能) P 的差值:

$$L = K - P. \tag{2}$$

机器人动力学方程为

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}. \tag{3}$$

式中: q_i 为关节广义位移; \dot{q}_i 为关节广义速度; τ_i 为关节广义力.

巡检机器人的总动能如式(4)所示:

$$K = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_j} \mathbf{I}_i \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_k} \right)^T \dot{q}_j \dot{q}_k \right) + \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \right). \tag{4}$$

巡检机器人的总位能如式(5)所示:

$$P = - \sum_{i=1}^n m_i g \mathbf{T}_i r_i. \tag{5}$$

在求得巡检机器人连杆坐标系的动能和位能表达式之后,即可求得动力学方程.对上式进行合并化简后得到:

$$\begin{aligned} \tau_i = & \sum_{i=p}^n \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_k} \mathbf{I}_i \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_p} \right)^T \right) \ddot{q}_k + I_{ap} \ddot{q}_p + \\ & \sum_{i=p}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}_j \partial \mathbf{q}_k} \mathbf{I}_i \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_p} \right)^T \right) \dot{q}_j \dot{q}_k - \\ & \sum_{i=p}^n m_i g \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_p} \right)^T r_i. \end{aligned} \tag{6}$$

将式(6)写成如下形式:

$$\begin{aligned} \tau_i = & \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i = \\ & \mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}). \end{aligned} \tag{7}$$

式中: D_{ij} 为关节 i 和关节 j 之间的耦合量系数; D_{ijk} 为关节之间的向心力项、哥氏力项系数; D_i 为关节 i 处重力项系数; $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ 是 $n \times n$ 的正定对称矩阵,称为操作臂的惯性矩阵; $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 是 $n \times 1$ 的离心力和哥氏力向量; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 是 $n \times 1$ 的重力矢量. D_{ij}, D_{ijk}, D_i 如式(8)所示:

$$\left. \begin{aligned} D_{ij} &= \sum_{p=\max(i,j)}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \mathbf{q}_j} \mathbf{I}_p \left(\frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \right), \\ D_{ijk} &= \sum_{p=\max(i,j,k)}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}_p}{\partial \mathbf{q}_j \partial \mathbf{q}_k} \mathbf{I}_p \left(\frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \right), \\ D_i &= \sum_{i=1}^n -m_i g \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{q}_i} r_i. \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

3 DME 评价指标

机器人动力学十分复杂,如何评价动力学性

能对于输电线巡检机器人的结构设计、工作空间选择、轨迹规划、控制方案等都具有十分重要的意义.本文采用 DME 指标评价机器人动力学特性.

动态可操作性椭圆 DME 将雅可比所定义的可操作度与加速度分析相结合提出了 DME 评价指标.DME 基于矩阵 $\mathbf{E}(\mathbf{q})$,表示关节广义力与广义加速度之间的关系,其中 $\mathbf{E}(\mathbf{q})$ 为

$$\mathbf{E}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}). \tag{9}$$

将 $\mathbf{E}(\mathbf{q})$ 进行奇异值分解,

$$\mathbf{E}(\mathbf{q}) = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T. \tag{10}$$

式中,

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ & \sigma_2 & \\ \vdots & & \sigma_3 & \vdots \\ & & & \ddots \\ 0 & \cdots & & \sigma_m \end{bmatrix}. \tag{11}$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_m$ 为矩阵 $\mathbf{E}(\mathbf{q})$ 的奇异值,用来构造动态性能指标.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\omega}_1 &= \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m, \\ \tilde{\omega}_2 &= \frac{\sigma_1}{\sigma_m}, \\ \tilde{\omega}_3 &= \sigma_m, \\ \tilde{\omega}_4 &= \tilde{\omega}_1^{\frac{1}{m}}. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

DME 评价指标中的 $\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \tilde{\omega}_3, \tilde{\omega}_4$ 变化规律如图 2a,2b,2c,2d 所示.由 DME 评价指标可知:第三条轨迹的动力学性能最佳.

4 实验验证

输电线巡检机器人实物样机如图 3 所示.巡检机器人质量为 25 kg,长为 (980 ± 60) mm,宽为 440 mm,高为 (980 ± 100) mm.

根据文献[7]提出的采用伺服电机电流间接表示关节输出力矩变化的方法,本文选择伺服电机电流作为测量指标.通过观测关节 3 中的伺服电机电流间接反映动力学性能.测得在越障实验中关节 3 的伺服电机电流如图 4 所示.

从图 4 中可发现,关节 3 中的伺服电机电流在轨迹 3 的越障过程较小.说明在此种轨迹越障过程中,伺服电机的输出力矩较小.此结论可通过实验验证:轨迹 3 出现电流瞬时过载的情况要好于其他越障轨迹.这种情况说明在此种轨迹越障过程中,关节 3 负载端的惯量变换较为平顺.因此通过伺服电机电流的变化可得出结论:轨迹 3

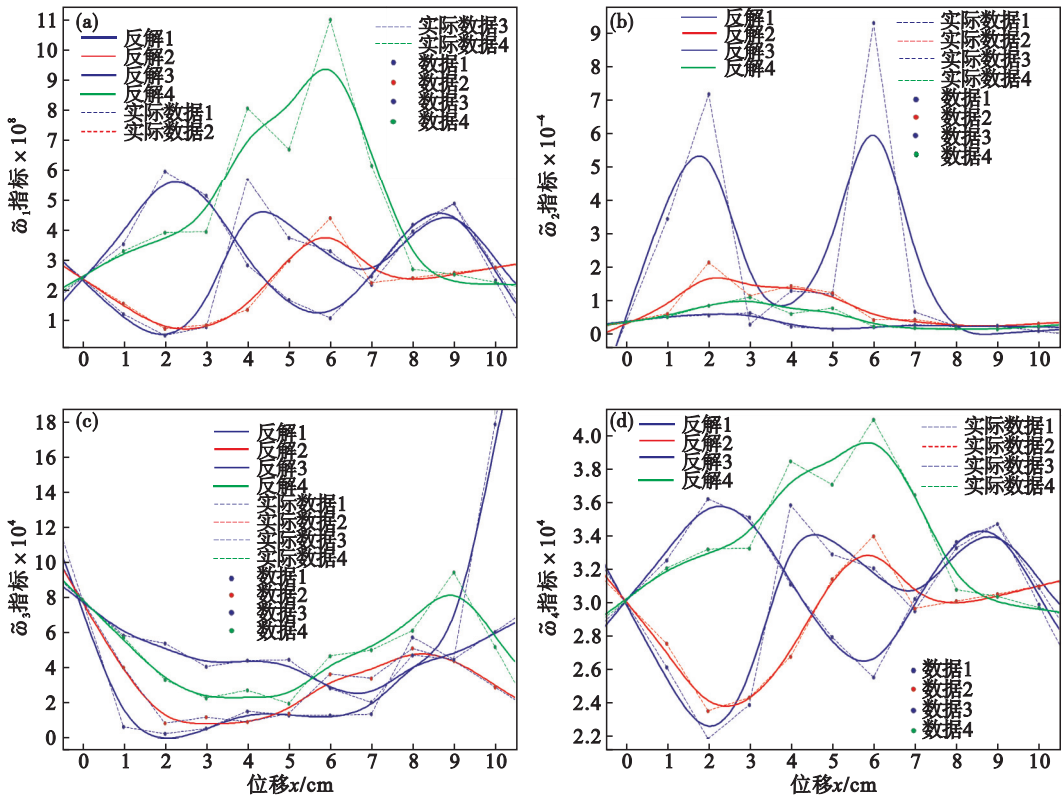


图 2 动态可操作性椭圆 (DME)

Fig. 2 Dynamic operability ellipsoid (DME)

(a)—动态可操作性衡量指标；(b)—矩阵 $E(q)$ 条件数；
(c)—矩阵 $E(q)$ 最小奇异值；(d)—动态可操作性椭圆 DME 各主轴的几何均值。

的动力学性能优于其余越障轨迹. 该实验结论与上述应用 DME 评价指标所得出的结论一致,进而验证 DME 评价指标选择越障轨迹的正确性.

越障过程中输电线巡检机器人运动平稳,各个关节引起的抖动程度较轻,其越障过程如图 5 所示. 巡检机器人后臂重复前臂动作,完成整个越障过程,实现跨越绝缘子障碍.

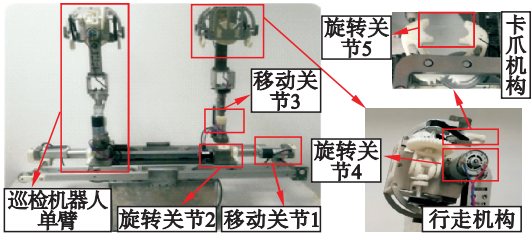


图 3 输电线巡检机器人样机

Fig. 3 Inspection robot prototype for power transmission line

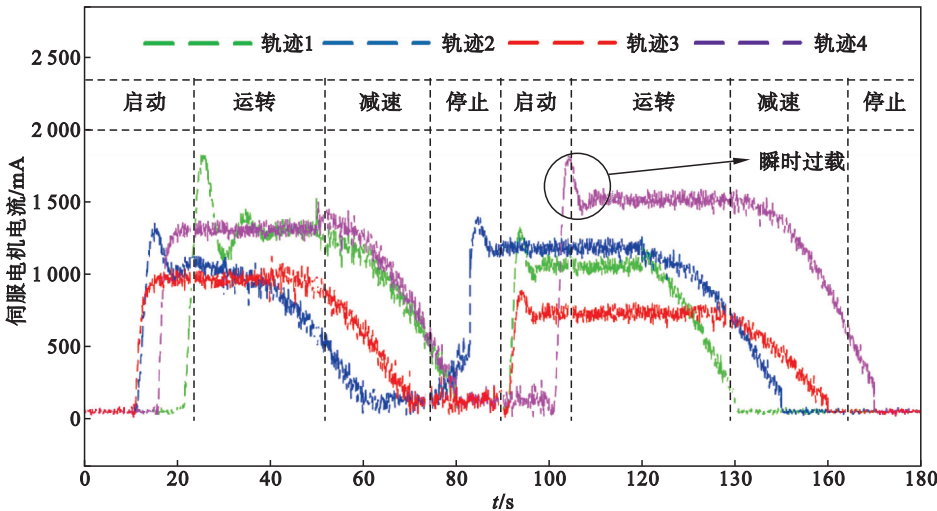


图 4 关节 3 的伺服电机电流

Fig. 4 Servo motor current of joint 3

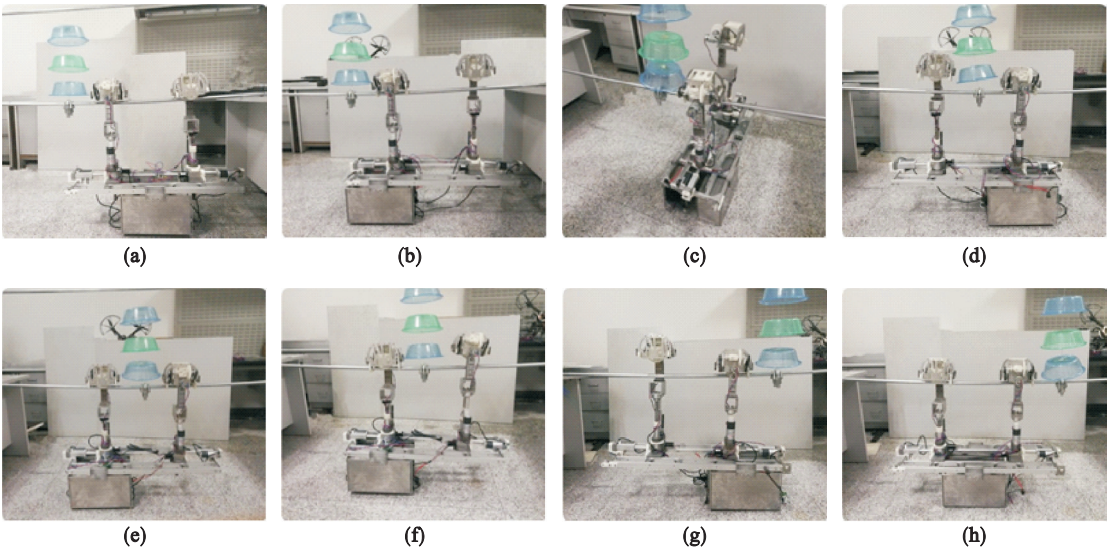


图 5 越障过程
Fig. 5 Obstacle crossing process

(a) —准备越障; (b) —后臂升起; (c) —后臂旋转; (d) —后臂完成越障; (e) —调整质心;
(f) —前臂抬升; (g) —前臂旋转后; (h) —完成越障.

5 结 论

1) 建立了输电线巡检机器人的第二类 Lagrange 动力学模型,应用 Lagrange 动力学方程推导出了巡检机器人操作臂惯性矩阵表达式.

2) 提出了基于操作臂惯性矩阵所建立的 DME 评价指标,从动力学的角度评价分析机器人路径规划的方法.

3) 本文通过建立输电线巡检机器人的 DME 评价指标,规划出了巡检机器人最优的动力学特性运动轨迹,为机器人的控制奠定了理论基础.应用 DME 评价指标,将机器人动力学分析更加直观地表现出来,从而更好地评价机器人的动力学特性.

参考文献:

[1] Sawade J, Kusumoto K, Munakata T, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991 (1) : 309 – 315.
[2] Debenest P, Guarnieri M, Takita K, et al. Expliner-toward a practical robot for inspection of high-voltage lines [J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2010, 62 : 45 – 55.
[3] Morozovsky N, Bewley T. Sky sweeper: a low DOF, dynamic high wire robot [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hong Kong: IEEE, 2014 : 2339 – 2344.
[4] Xiao X, Wu G, Li S. The rigid-flexible coupling dynamic characteristic between mobile robot along overhang flexible cable and its moving path [J]. *WSEAS Transactions on Computers*, 2006, 5 (3) : 521 – 527.
[5] Tang L, Fang L J, Wang H G. Development of an inspection robot control system for 500kV extra-high voltage power

transmission lines [C] // SICE Annual Conference. Sapporo, 2004 : 1819 – 1824.
[6] Xiao X H, Wu G P, Du E, et al. Dynamic simulation and experimental study of inspection robot for high-voltage transmission-line [J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 2005, 12 (6) : 726 – 731.
[7] Yang D, Feng Z, Ren X, et al. A novel power line inspection robot with dual-parallelgram architecture and its vibration suppression control [J]. *Advanced Robotics*, 2014, 28 (12) : 807 – 819.
[8] 张建华, 许晓林, 刘璇, 等. 双臂协调机器人相对动力学建模 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55 (3) : 34 – 42.
(Zhang Jian-hua, Xu Xiao-lin, Liu Xuan, et al. Relative dynamic modeling of dual-arm coordination robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55 (3) : 34 – 42.)
[9] Yao J, Yang Q, Gao S, et al. Optimization design for a jumping leg robot based on generalized inertia ellipsoid [J]. *Robotica*, 2012, 30 (7) : 1213 – 1219.
[10] 郭希娟, 彭艳敏, 耿清甲. LR – Mate 机器人动力学性能分析 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44 (10) : 123 – 128.
(Guo Xi-juan, Peng Yan-min, Geng Qing-jia. Dynamics performance analysis for LR-mate robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44 (10) : 123 – 128.)
[11] Asada H. Dynamic analysis and design of robot manipulators using inertia ellipsoids [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei: IEEE, 2003.
[12] Yoshikawa T. Multifingered robot hands; control for grasping and manipulation [J]. *Annual Review in Control*, 2010, 34 (2) : 199 – 208.
[13] Yokokohji Y, Yoshikawa T. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment [J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2002, 10 (5) : 605 – 620.
[14] Patel B V, Shadpey F. Control of redundant robot manipulators [M]. Berlin: Springer, 2005.
[15] Ren J, Mcisaac K A, Patel R V. Modified Newton’s method applied to potential field-based navigation for nonholonomic robots in dynamic environments [J]. *Robotica*, 2008, 26 (1) : 117 – 127.