

文章编号: 2095-2163(2019)04-0267-04

中图分类号: TG501

文献标志码: A

基于阻尼衰减的柔性关节机械结构解耦控制研究

严继超

(广东工业大学 华立学院, 广州 511325)

摘要: 为了提高柔性关节机械结构力学分配和自动控制能力,提出一种基于阻尼衰减的柔性关节机械结构解耦控制方法,构建柔性关节机械结构的力学分配模型,采用线性解耦方法进行柔性关节机械结构的关节稳定位置调节,采用模糊自适应参数反馈修正方法进行机械机构阻尼单元和弹簧单元的力学参数分配和误差修正,在阻尼衰减下进行柔性关节机械结构解耦控制律设计,以动态变化的稳定域为柔性关节机械结构的可靠性控制价约束条件,获取全局最优解,实现柔性关节机械结构解耦控制优化。仿真结果表明,采用该方法进行柔性关节机械结构解耦控制的稳定性较高,自适应性能较好,提高了柔性关节机械结构的力学自动分配能力。

关键词: 阻尼衰减; 柔性关节; 机械结构; 解耦控制

Research on decoupling control of mechanical structure of flexible joint based on damping attenuation

YAN Jichao

(Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

【Abstract】 In order to improve that mechanical distribution and the automatic control ability of the flexible joint mechanical structure, a flexible joint mechanical structure decoupling control method based on the damping attenuation is proposed, and a mechanical distribution model of the flexible joint mechanical structure is constructed, the mechanical parameter distribution and the error correction of the mechanical mechanism damping unit and the spring unit are carried out by adopting a linear decoupling method to adjust the joint stable position of the flexible joint mechanical structure. In that design of the decoupling control law of the flexible joint mechanical structure under the damping attenuation, the dynamic stable domain is the reliability control price constraint condition of the flexible joint mechanical structure, the global optimal solution is obtained, and the decoupling control optimization of the flexible joint mechanical structure is realized. The simulation results show that the stability of the flexible joint mechanical structure decoupling control is high, the self-adaptive performance is good, and the mechanical automatic distribution capability of the flexible joint mechanical structure is improved.

【Key words】 damping attenuation; flexible joint; mechanical structure; decoupling control

0 引言

随着人工智能技术的发展,各种机械臂和机械手出现并逐渐取代繁琐的人工劳动,提高了机械装配的智能化水平,柔性关节机械结构作为常用的机械臂部件,对柔性关节机械结构的力学自动分配和解耦控制是该类机械手设计的关键,研究柔性关节机械结构的解耦控制方法,在提高关节的力学自动分配能力,促进机械臂的自适应力学参数调节方面具有重要意义^[1]。

对柔性关节机械结构解耦控制是建立在对柔性关节的力学特征参数提取和控制律优化设计基础上,传统方法中,柔性关节机械结构解耦控制方法主要有模糊PID控制方法、滑模控制方法等^[2-3],构建柔性关节机械结构解耦控制约束参量模型,结合对

柔性关节机械结构的力学参数分析进行控制律设计,取得了较好的控制效果,但上述方法在对柔性关节机械结构的力学解耦控制中存在自适应性不好和鲁棒性不高的问题,针对上述问题,本文提出一种基于阻尼衰减的柔性关节机械结构解耦控制方法,构建柔性关节机械结构的力学分配模型,采用线性解耦方法进行柔性关节机械结构的关节稳定位置调节,采用模糊自适应参数反馈修正方法进行机械结构阻尼单元和弹簧单元的力学参数分配和误差修正,在阻尼衰减下进行柔性关节机械结构解耦控制律设计,以动态变化的稳定域为柔性关节机械结构的可靠性控制价约束条件,获取全局最优解,实现柔性关节机械结构解耦控制优化,最后进行仿真实验分析,展示了本文方法在提高柔性关节机械结构解耦控制能力方面的优越性能。

作者简介: 严继超(1989-),男,硕士,实验师,主要研究方向:控制工程、机电一体化。

收稿日期: 2019-04-16

1 被控对象描述和约束参量分析

1.1 柔性关节机械结构被控对象

为了实现柔性关节机械结构解耦控制,需要首先构建柔性关节机械结构稳定性控制的约束参量模型,结合参数模型的优化识别,进行柔性关节机械结构的力学参数动态分析^[4],柔性关节机械结构刚体模型如图1所示。



图1 柔性关节机械结构刚体模型

Fig. 1 Rigid body model of mechanical structure of flexible joints

在考虑阻尼衰减约束下,柔性关节机械结构的控制参数辨识模型为:

$$\begin{cases} \dot{\frac{dx_1(t)}{dt}} = f_{x_1}(x_1^0, x_2^0)(x_1 - x_1^0) + f_{x_2}(x_1^0, x_2^0)(x_2 - x_2^0); \\ \dot{\frac{dx_2(t)}{dt}} = g_{x_1}(x_1^0, x_2^0)(x_1 - x_1^0) + g_{x_2}(x_1^0, x_2^0)(x_2 - x_2^0). \end{cases} \quad (1)$$

分析多自由度并联柔性机的辨识误差,构建五轴联动下的柔性关节机械结构约束参量模型,根据柔性关节机械结构的参数优化调节进行模糊控制,在二维 Bernoulli 空间中,柔性关节机械结构的解耦控制调节函数为:

$$\begin{cases} \dot{\frac{dx_1(t)}{dt}} = a_1x_1 + b_1x_2; \\ \dot{\frac{dx_2(t)}{dt}} = a_2x_1 + b_2x_2. \end{cases} \quad (2)$$

结合单自由度柔性关节模型进行特征分解,构建刚度与位置解耦模型,进行柔性关节机械结构的惯性约束参量调节^[5],得到柔性关节机械结构的过程可靠性调节系数矩阵记作:

$$A = \begin{pmatrix} \hat{g}a_1 & b_1\hat{u} \\ \hat{g}a_2 & b_2\hat{u} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

分析柔性关节机械结构的稳态特征方程,得到

机械结构的稳态特征量为:

$$\begin{cases} \lambda^2 + p\lambda + q = 0; \\ p = -(a_1 + b_2); \\ q = \det A. \end{cases} \quad (4)$$

当绳索上作用一定力时,柔性关节机械结构的刚度特征量记作 λ_1, λ_2 :

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{1}{2}(-p \pm \sqrt{p^2 - 4q}). \quad (5)$$

根据拮抗式柔性关节工作原理,构建多自由柔性关节模型,描述为:

$$\Psi(0, h_2) = \Psi + h_1WZ_1^{-1}W^T + h_1L(Z_2 + Z_3)^{-1}L^T + h_2M(Z_2 + Z_3)^{-1}M^T < 0. \quad (6)$$

在导引进给方向为 Y 轴方向上,采用线性解耦方法进行柔性关节机械结构的关节稳定位置调节,结合柔性关节机械结构系统的模态参数识别方法进行自适应调节和可靠性控制。

1.2 力学参数分析

采用力学参数调节方法进行柔性关节机械结构的误差反馈调节,在一个无穷小的转矩 ΔT 作用下,得到静力平衡关系:

$$\begin{aligned} & \max(H_{ac})A^{(\alpha_1, \dots, \alpha_m)}(A^{-1})^{(\alpha_1^{-1}, \dots, \alpha_m^{-1})^T} = \\ & \begin{pmatrix} \alpha_1 a_{1,1} & \dots & \alpha_m a_{1,m} & \ddots & \alpha_1^{-1} t_{1,1} & \dots & \alpha_1^{-1} t_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_m a_{m,1} & \dots & \alpha_m a_{m,m} & \ddots & \alpha_m^{-1} t_{m,1} & \dots & \alpha_m^{-1} t_{m,m} \end{pmatrix} \\ & (x_1, \dots, x_m)^T = EI(a_i), \end{aligned} \quad (7)$$

分析横向方向残余应力,在边界值稳定的条件下进行柔性关节机械结构的自适应反馈调节,求解在关节的位置变换关系作用下的应力分布^[6],得到特征矩阵 $x = (x_1, \dots, x_m)^T \in GF(2^n)^m$, 令 $D_{0+}^\beta u(s), G(t, s)f(s, u(s))$ 为加工解耦控制的状态参量分布,计算刚度条件下平衡约束条件为:

$$\frac{du}{d\xi} = \sum_{j=0}^n ja_j s^{j-1} \xi c_n \xi d_n \xi, \quad (8)$$

采用共轭梯度法进行柔性关节机械结构的力学特征分解,在柔性关节机械结构的操作臂位姿准确控制中,得到联动控制方程满足:

$$g_k + A_k \Delta x_k = 0, \quad (9)$$

将参数代入上式可以得到:

$$x_{k+1} = x_k - A_k^{-1} g_k, \quad (10)$$

考虑刚度改变时引起的阻尼误差,采用阻尼衰减调节方法,实现柔性关节机械结构的联动控制优化,得到状态参量特征解:

$$x_{k+1} = x_k - [J^T(x_k)J(x_k) + \mu_k I]^{-1} J^T(x_k) v(x_k), \quad (11)$$

分析 2 个变刚度装置的刚度误差满足：

$$\dot{s} = 0 \quad (12)$$

可见,本文设计的柔性关节机械结构解耦控制过程是稳定收敛的,根据上述力学参数模型分析,进行控制律的优化设计。

2 柔性关节机械结构解耦控制律优化

2.1 柔性关节机械结构的阻尼衰减调节

在上述构建柔性关节机械结构的力学分配模型中,采用线性解耦方法进行柔性关节机械结构的关节稳定位置调节的基础上,进行控制律优化设计,本文提出一种基于阻尼衰减的柔性关节机械结构解耦控制方法,计算柔性关节机械结构过程可靠性调节的参量集:

$$P^* = \{x^* \mid \neg \exists x \in X_f: x > x^*\}, \quad (13)$$

调整关节刚度的变化量,进行多目标优化求解,为:

$$PF = \{f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_r(X)) \mid X \in \{X^*\}\}, \quad (14)$$

在操作臂重力矩矢量约束下进行阻尼衰减调节,进行柔性关节机械结构的最优参数求解^[7],当模糊约束参量满足 $CH_i (i \in C_1)$, 柔性关节机械结构的过程传递函数表述为:

$$Y(s) = \frac{e^{-L_ms}}{(\lambda_1 s + 1)} R(s) + \frac{(\lambda_2 s + L_m)s}{(\lambda_2 s + 1)} D(s), \quad (15)$$

柔性关节的闭环传递函数:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s)G_0(s)e^{-\tau_s}}{1 + G_C(s)G_m(s) + G_C(s)(G_0(s)e^{-\tau_s} - G_m(s)e^{-L_ms})}, \quad (16)$$

经拉普拉斯变换得到修正函数为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N v_i^2(x) = v^T(x)v(x) \quad (17)$$

假设 $f_i(x_i; \theta_i)$ 为柔性关节机械结构中时滞向量为 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的可靠性界定分布函数, 根据上述分析,进行阻尼衰减调节,提高解耦控制的稳定性^[8]。

2.2 控制律优化及稳定性分析

采用模糊自适应参数反馈修正方法进行机械机构阻尼单元和弹簧单元的力学参数分配和误差修正^[9],机械结构的动态参数辨识阈值 $\bar{\rho}(t)$, 即:

$$|\rho(t)| < \bar{\rho}(t), \quad (18)$$

在上界已知的情况下,根据拉格朗日动力学模型,得到控制律的误差调节函数:

$$\begin{cases} e_1 = \varphi_a - \varphi_{ad}; \\ e_2 = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_{ad}. \end{cases} \quad (19)$$

则:

$$\dot{s} = ce_1 + \dot{e}_2 = ce_2 + \dot{e}_2, \quad (20)$$

基于上界的滑模控制^[10],得到柔性关节机械结构的测量方程:

$$ce_2 + \dot{e}_2 = ce_2 + \ddot{\varphi}_a - \ddot{\varphi}_{ad} = \quad (21)$$

$$ce_2 + M_n^{-1}u - M_n^{-1}h_n(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) - \ddot{\varphi}_{ad} = 0,$$

构建 Lyapunov 函数进行稳定性分析,得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(x(t)) &\leq 2x^T(t)PAx(t) + 2x^T(t)PBx(t - d(t)) - (1 - \tau)x^T(t - d(t))Q_2x(t - d(t)) \\ &+ x^T(t)Q_1x(t) - (1 - \tau_1)x^T(t - d_1(t))(Q_1 - Q_2)x(t - d_1(t)), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(x(t)) &= x^T(t)(R_1 + R_2)x(t) - x^T(t - h)R_1x(t - h) - x^T(t - h_1)R_2x(t - h_1). \end{aligned} \quad (23)$$

基于 Lyapunov 稳定性原理,得到设计的柔性关节机械结构解耦控制律是稳定收敛的,由此获取全局最优解,实现柔性关节机械结构解耦控制优化。

3 仿真实验与结果分析

为了测试本文方法在实现柔性关节机械结构的解耦控制和力学参数自动估计中的应用性能,进行实验分析,实验的控制算法设计采用 Visual C++ 和 Matlab 联合设计,对柔性关节机械结构在垂直臂杆长度设定为 4.2m,关节的数目为 3,对关节的力学数据采样时间为 12s,柔性关节机械结构的构型参数为 1.24,控制器为 DSpace1103,根据上述仿真环境和参数设定,进行柔性关节机械结构的控制仿真,得到关节的力学参数采集结果如图 2 所示。

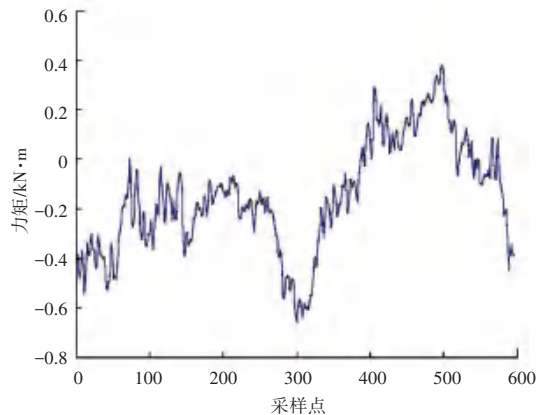


图 2 关节的力学参数采集结果

Fig. 2 Collection results of mechanical parameters of joints

根据图2的数据采集结果,进行柔性关节机械结构位置调节,以动态变化的稳定域为柔性关节机械结构的可靠性控制价约束条件,获取全局最优解,实现对柔性关节机械结构的优化控制,控制收敛曲线如图3所示。

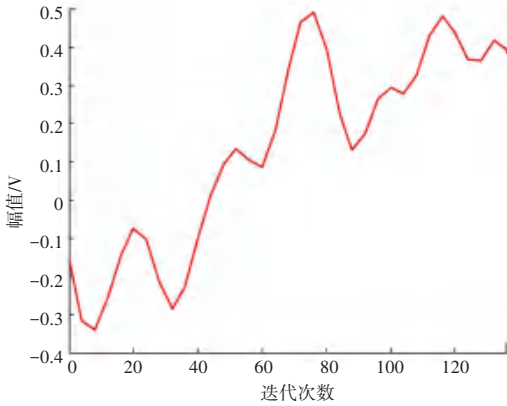


图3 控制收敛曲线

Fig. 3 Control convergence curve

分析图3得知,采用本文方法进行柔性关节机械结构控制的收敛性较好,测试不同方法进行柔性关节机械结构控制的精度。

4 结束语

研究柔性关节机械结构的解耦控制方法,提高关节的力学自动分配能力,本文提出基于阻尼衰减的柔性关节机械结构解耦控制方法,采用线性解耦方法进行柔性关节机械结构的关节稳定位置调节,采用模糊自适应参数反馈修正方法进行机械结构阻

尼单元和弹簧单元的力学参数分配和误差修正,在阻尼衰减下进行柔性关节机械结构解耦控制律设计,以动态变化的稳定域为柔性关节机械结构的可靠性控制价约束条件,获取全局最优解,实现柔性关节机械机构解耦控制优化。研究得知,本文方法进行柔性关节机械结构解耦控制的稳定性较好、收敛性较强、具有很好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 熊培银,赖旭芝,吴敏. 一类二阶非完整平面欠驱动机械系统位姿控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(4):690-695.
- [2] 方群,张则强,李明. 面向多目标拆卸线平衡问题的一种改进粒子群优化算法[J]. 现代制造工程,2016(4):8-15.
- [3] 李美之,钟伟芳,吴国荣,等. 一种求解柔性操纵器动力学方程的数值方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8):25-27.
- [4] 胡兆稳,刘焜,刘小君,等. 表面形貌变形对塑性成形滑动接触界面摩擦的影响[J]. 摩擦学学报,2015,35(4):368-377.
- [5] 王明海,李世永,郑耀辉. 超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究[J]. 农业机械学报,2014,45(6):341-346,340.
- [6] 李刚,杨传健,贾会星. 基于小波特征值容差阈值随机仿真的故障判别方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(9):42-47.
- [7] 王骏腾,张定华,吴宝海,等. 基于装夹力监测的叶片类零件铣削残余应力变形感知预测[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19):241-248.
- [8] 张秀丽,谷小旭,赵洪福,等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. 机器人, 2016, 38(4):385-394.
- [9] BHADOURIA V S, GHOSHAL D, SIDDIQI A H. A new approach for high density saturated impulse noise removal using decision-based coupled window median filter[J]. Signal, Image and Video Processing, 2014, 8(1):71-84.
- [10] 杨洋,王思明. 空间柔性机械臂高阶滑模干扰观测器轨迹跟踪[J]. 传感器与微系统,2019,38(2):114-117,128.

(上接第266页)

- [5] Tian Y, Luo P, Wang X, et al. Pedestrian detection aided by deeplearning semantic tasks[EB/OL]. ar Xiv preprint ar Xiv: 1412. 0069,2014.
- [6] Ouyang W, Wang X. Joint deep learning for pedestrian detection [C]. Computer Vision (ICCV),2013 IEEE International Conference on. IEEE,2013: 2056-2063.
- [7] Sermanet P, Kavukcuoglu K, Chintala S, et al. Pedestrian detectionwith unsupervised multi - stage feature learning [C]. Computer Visionand Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on.IEEE,2013: 3626-3633.
- [8] Luo P, Tian Y, Wang X, et al. Switchable deep network for pedestrian detection [C]. Computer Vision and Pattern Recognition

- (CVPR) ,2014 IEEE Conference on. IEEE,2014: 899-906.
- [9] J.Henriques, R.Caseiro, P.Martins, et al.High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3) :583-596
- [10] Li Y, Zhu J.A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration [C]//European Conference on Computer Vision,2014:254-265.
- [11]何承源.循环矩阵的一些性质[J].数学的实践与认识,2001,31(2):211-216.
- [12]Seung-Hwan Bae.Object Detection based on Region Decomposition and Assembly[C]. Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-19).2019.