

基于改进趋近律滑模控制的钢结构柔性探伤机器人轨迹跟踪^①

艾青林^② 王国栋 徐巧宁

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310023)

摘 要 为解决钢结构柔性探伤机器人在轨迹跟踪中存在控制模型复杂、跟踪速度慢和跟踪精度不高的问题,提出一种基于改进趋近律的滑模控制方法。将柔性机器人前后车体作为单独的移动机器人进行运动学分析,通过欧拉-伯努利梁方程求解前后车体与连接钢带之间的运动约束,得出柔性机器人整体运动学模型。在此基础上,通过反演方法设计一种基于改进趋近律的滑模控制器,加快跟踪误差的收敛速度并降低控制系统抖振。基于改进趋近律滑模控制对柔性机器人小车轨迹跟踪进行仿真实验,结果表明,改进趋近律滑模控制方法可以使柔性机器人快速跟踪期望轨迹进行运动,并且具有较好的跟踪精度和稳定性。

关键词 钢结构探伤;柔性机器人;轨迹跟踪;改进趋近律;滑模控制

0 引 言

21 世纪以来我国的经济高速增长,随之而来的是各种基础设施和高楼大厦拔地而起,其中包含许多复杂的大型钢结构建筑^[1]。然而由于现今的钢结构建筑超负荷运营,检测维护不力,再加之这些建筑设计之初存在的结构缺陷和施工质量差等问题,最终事故频发,严重威胁人们的生命财产安全。因此,加强钢结构健康检测、及时进行维修十分重要^[2]。

目前钢结构健康检测中广泛采用有线的数据采集方法,但是存在布线繁琐,花费大量人力成本的缺点;使用无线传感网络的建筑结构健康检测技术需要解决系统长时间供电问题和信号传输可靠性问题。因此现期望使用一种具有自主运动、数据采集、无线通讯功能的柔性机器人作为一个智能移动检测单元^[3],解决目前检测中存在的检测盲区和检测不全面问题。

由于钢结构建筑内部存在各种内外拐角、加强筋、空间异面等复杂结构,检测机器人需要越过或避开各种障碍,因此本文采用柔性结构机器人进行越障控制。为了使柔性机器人顺利避障,首先需要实现机器人轨迹跟踪^[4-5]。与普通移动机器人类似,柔性结构机器人仍属于一种具有非完整约束的多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)非线性系统^[6]。但是由于机器人前后车体通过钢带连接,带来了柔性被动约束,给机器人建模和控制带来了很大的难度。针对传统的移动机器人轨迹跟踪问题,文献[7]提出了一种有限时间跟踪控制算法,使得闭环系统具有快速收敛性能,在有限时间内跟上期望轨迹,但具有输出变量抖动大的问题。文献[8]将基于改进趋近律的滑模控制应用于机械臂中,有效地实施了控制,并且削弱了系统的抖振。文献[9]提出基于粒子滤波的移动机器人控制器,在实现轨迹跟踪控制的同时提高了运动过程中姿态的稳定性,但是其运算量庞大,实时性差。

柔性机器人在轨迹跟踪中存在控制模型复杂,

① 国家自然科学基金(52075488, 51705456, 51275470)和浙江省自然科学基金(LY20E050023)资助项目。

② 男,1976 年生,博士,教授;研究方向:智能移动机器人技术,钢结构探伤机器人技术,多足机器人控制技术,钢带并联机器人技术;联系人, E-mail: aqlaql@163.com

(收稿日期:2019-12-15)

跟踪速度不够快,轨迹跟踪精度不足的问题。针对这些问题本文提出了一种基于改进趋近律的滑模控制方法,在滑模控制中引入新型的滑模面趋近律,提高收敛速度和稳态跟踪精度。由于目前对传统轮式移动机器人的运动学建模^[10]不能够直接应用于此柔性机器人,本文对柔性机器人结构及运动方式进行分析,通过对连接前后车体的柔性钢带进行弹性梁的静力学分析^[11-12],提出一种简化运动学模型,为机器人运动控制提供基础。基于该柔性机器人系统模型,采用反演方法设计滑模切换函数^[13],改进了滑模趋近律,并削弱了抖振。在此基础上针对柔性机器人的轨迹跟踪问题,设计了一种基于改进趋近律的滑模控制器。最后,通过仿真验证了所提方法对柔性机器人控制的有效性和优越性。

1 柔性机器人运动分析及建模

如图1所示,本文针对具有柔性钢带结构的探伤机器人进行研究。具有柔性钢带的机器人整体运动学模型非常复杂,难以直接描述并应用于控制环节。一方面柔性钢带使得前后车体可以发生相对偏转、扭转甚至错位,另一方面也带来了更复杂的运动学模型,并且在柔性机器人控制中必须协调前后车体运动。因此这里利用前后车体的相对位置与钢带的长度变化来简化运动学模型。

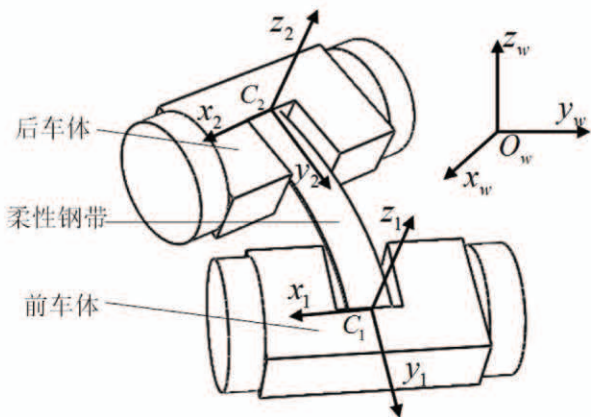


图1 柔性机器人三维模型

为正确描述钢带连接的机器人整体运动学,得到有助于机器人控制的运动学模型,需要给出钢带变形带来的前后车体约束。图2显示了机器人在以

点 I 为旋转中心的转向过程中,某一时刻前后车体与钢带的位姿和形态,其中 C_1 与 C_2 分别是前后车体的几何中心。假设在该时刻前后车体具有确定的位姿,就能够基本确定钢带前后边界,于是钢带在这个机器人中起到的作用相当于一个梁。因此钢带基本符合横截面的最大尺度宽度 h 远小于长度 L ($h \ll L$)这一弹性力学中对梁的一个基本假设。又因为其材料是弹簧钢,弹性模量为207 GPa,密度为 7.69 g/cm^3 ,泊松比为0.3,是一种典型的各向同性材料,所以该钢带能够使用弹性力学的梁理论进行分析。

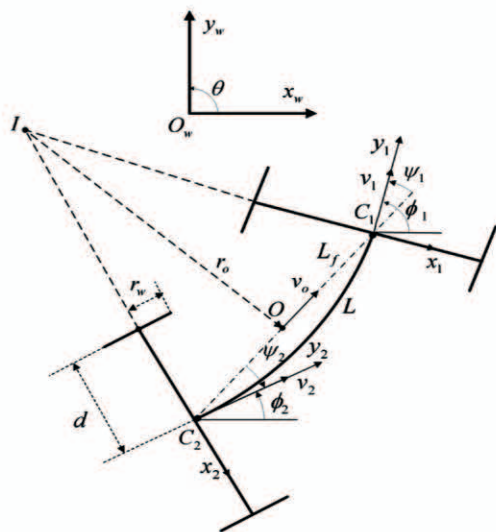


图2 柔性机器人运动模型

同时,钢带的横截面是一个狭长的矩形,满足了平面应变问题的一个基本假设,即厚度 b 与宽度 h 相比很小。在平面运动中,只研究钢带的弯曲变形问题。于是利用欧拉-伯努利梁方程^[14],可以得到钢带的挠度与两端边界的关系,并进一步分析得出前后车体位姿的关系。

图3是将钢带作为简支梁处理的模型, C_1 与 C_2 分别对应于图2柔性机器人运动模型中的前后车体的几何中心。

欧拉-伯努利梁方程表述如下。

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 u}{dx^2} \right) = p(x) \quad (1)$$

式中 u 代表梁的挠度, x 代表沿 x 轴方向的位置, $p(x)$ 代表加在梁上的横向均匀载荷。其中 E 是材

料弹性模量, I 是惯性矩。若给定了梁端的 u 以及 $\frac{du}{dx}$, 则可得到方程的唯一解。

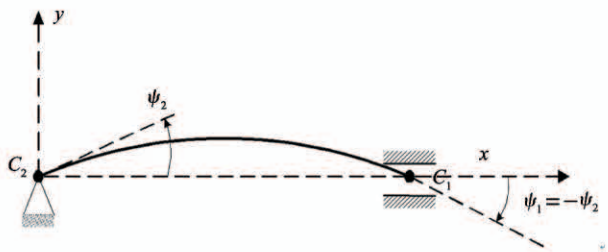


图 3 钢带梁模型

如图 3 所示钢带两端的偏转角度为 ψ , 在梁模型所示的坐标系下可以得出其边界关系:

$$\psi = \frac{du}{dx} \tag{2}$$

于是得到了钢带形变的边界条件 $u_1 = 0, u_2 = 0$ 和 $\psi_1 = \frac{du_1}{dx}, \psi_2 = \frac{du_2}{dx}$ 。代入上述边界条件可得到式(1)的唯一解:

$$u = EI(x^3 \frac{\psi_1 + \psi_2}{L^2} - x^2 \frac{\psi_1 + 2\psi_2}{L} + x\psi_2) \tag{3}$$

其中, L 是钢带的长度, L_f 是 C_1 与 C_2 之间的距离。上述得到的钢带横向变形用来计算其两端的直线距离的缩短, 对应于 C_1 与 C_2 之间距离的变化 dL_f , 令 $k = EI$, 则:

$$dL_f = \frac{1}{2} \int_0^L (\frac{du}{dx})^2 dx = \frac{kL}{30} (2\psi_1^2 - \psi_1\psi_2 + 2\psi_2^2) \tag{4}$$

于是 L_f 表示为

$$L_f = L - dL = (1 - \frac{2\psi_1^2 - \psi_1\psi_2 + 2\psi_2^2}{30}) kL \tag{5}$$

为得到速度限制, 将 L_f 对时间求导:

$$\frac{dL_f}{dt} = -\frac{kL}{30} \dot{\psi}_1 (4\psi_1 - \psi_2) - \frac{kL}{30} \dot{\psi}_2 (4\psi_2 - \psi_1) \tag{6}$$

根据图 2, 得到 C_1 与 C_2 的速度关系:

$$v_1 \cos(\psi_1) - v_2 \cos(\psi_2) = \frac{dL_f}{dt} \tag{7}$$

为简化运动学模型, 点 O 被定义为 C_1 与 C_2 的中点。如图 2 所示, 假设柔性机器人前后车体均绕 I 点转向, 运动过程中 $\psi_1 = -\psi_2$ 始终成立^[15], 定义

$\psi = |\psi_1| = |\psi_2|$ 。此时, 点 O 具有与 C_1 和 C_2 相同的角速度, 也就是绕着旋转中心 I 的角速度, 定义为 w_o 。点 O 处的线速度 v_o 方向沿着 $\overline{C_1 C_2}$, 并与前后车体线速度有如下关系。

$$v_1 = \frac{v_o}{\cos(\psi)} - \frac{1}{2} \frac{dL_f}{dt} \tag{8}$$

$$v_2 = \frac{v_o}{\cos(\psi)} + \frac{1}{2} \frac{dL_f}{dt}$$

将 $\psi = |\psi_1| = |\psi_2|$ 带入到式(7)中, 并结合式(8)可以得到每个车体的线速度:

$$v_1 = \frac{v_o}{\cos(\psi)} - \frac{1}{6} L \dot{\psi} \tag{9}$$

$$v_2 = \frac{v_o}{\cos(\psi)} + \frac{1}{6} L \dot{\psi}$$

若柔性机器人车体及钢带转向角很小, 对钢带的挠度变形影响可以忽略, 因此可得简化的速度约束为

$$v_1 = v_2 = \frac{v_o}{\cos(\psi)} \tag{10}$$

在旋转过程中, I 为旋转中心, r_o 为点 O 绕旋转中心 I 的旋转半径。根据几何关系有:

$$r_o = \frac{L}{2\psi} \cos\psi \tag{11}$$

同时 r_o 可以由下式给出:

$$r_o = \frac{v_o}{w_o} \tag{12}$$

因此, 利用式(11)、(12)可以得到 ψ 来求解出式(10)的前后车体速度约束。

柔性机器人的每一个独立的车体都是一个两轮差速驱动的移动机器人。每个车体的前进速度 v_i 和偏航角速度 w_i 与车轮转速之间的关系可由下式表示^[16]:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \frac{r_w}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{il} \\ \omega_{ir} \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中, r_w 为车轮半径, d 为左右轮的间距, ω_{il} 和 ω_{ir} 分别表示每个车体左右轮的转动角速度, 式中 $i = 1, 2$ 分别代表柔性机器人前后车体。

钢结构探伤机器人的每个车轮表面都贴有强力的弧形磁铁, 增强了车轮与吸附面间的摩擦, 可以假设轮子与接触面之间只发生纯滚动而没有滑动。因

此每个机器人车体都满足非完整性约束:

$$-\dot{x}_i \sin(\phi_i) + \dot{y}_i \cos(\phi_i) = 0 \quad (14)$$

柔性机器人每个车体都是关于中心轴几何对称的,假定每个车体的几何中心与质心重合,在这一理想状况下,结合普通两轮差速移动机器人运动学模型得到:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos(\phi_i) \\ \dot{y}_i &= v_i \sin(\phi_i) \\ \dot{\phi}_i &= \omega_i \end{aligned} \quad (15)$$

式中 (x_i, y_i) 代表一个两轮车模型的几何中心在笛卡尔坐标系下的坐标, ϕ_i 为车体的偏航角。于是每个车体的位姿可由广义坐标向量 $\mathbf{q}_i = [x_i \ y_i \ \phi_i]^T$ 表示。

移动机器人的轨迹跟踪问题可以被描述成在全局坐标系下,机器人从初始位置出发,接着能够达到并跟踪给定的期望轨迹,而期望轨迹由参考机器人的运动轨迹给出^[17]。为了设计机器人的轨迹跟踪控制器,需要将位姿误差在机器人的车体坐标系下表达。每个车体的给定参考轨迹位姿 $\mathbf{q}_{ir} = [x_{ir} \ y_{ir} \ \phi_{ir}]^T$,得到机器人坐标系下的位姿误差 $\mathbf{q}_{ie}$ 为

$$\mathbf{q}_{ie} = \begin{bmatrix} x_{ie} \\ y_{ie} \\ \phi_{ie} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_{ir} - x_i \\ y_{ir} - y_i \\ \phi_{ir} - \phi_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $\mathbf{T}$ 是由全局笛卡尔坐标到局部机器人坐标的变换矩阵,具体形式为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\phi_i & \sin\phi_i & 0 \\ -\sin\phi_i & \cos\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

将机器人单个车体的运动学模型式(15)带入式(16)并结合式(17)得到车体的误差微分方程为

$$\dot{\mathbf{q}}_{ie} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{ie} \\ \dot{y}_{ie} \\ \dot{\phi}_{ie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_i + w_i y_{ie} + v_{ir} \cos\phi_{ie} \\ -w_i x_{ie} + v_{ir} \sin\phi_{ie} \\ w_{ir} - w_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

基于前面得到的柔性机器人参考点 O 和前后车体之间的速度约束式(10),可以得到前后车体期望线速度 v_{ir} 和期望角速度 w_{ir} ,因此本文研究的轨迹跟踪控制目标就转变为寻找适当的控制输入 v_i 和

w_i ,通过设计合理的控制律控制柔性机器人跟踪期望轨迹。

2 柔性机器人改进滑模控制器设计

轮式移动机器人属于多输入多输出的高耦合非线性系统,控制结构存在欠驱动,在轨迹跟踪控制上如果要应用比例积分微分(proportion integral differential, PID)控制等传统方法^[18],必须先解耦处理,而且这样的方法精度不高,抵抗不确定干扰的能力差。滑模控制具有设计本身与参数变化及扰动无关的特点,因而系统响应快且鲁棒性好,已经应用于多种非线性系统^[19,20]。

柔性机器人不但具有轮式机器人系统固有的特点,而且加入了柔性钢带的约束,参数变化维度更多,是一个更复杂的非线性系统。本文使用滑模控制方法来对柔性机器人进行轨迹跟踪控制。首先依据建立的运动学模型轨迹跟踪方程,基于反演设计方法结合李雅普诺夫函数设计滑模控制的切换函数能够使跟踪误差趋于0,然后设计滑模控制器来实现机器人对参考轨迹的跟踪。由于一般的滑模控制在趋近滑模面时会有剧烈的抖振,并且收敛速度较慢,所以设计了趋近律来抑制抖振,并改善控制品质,提高收敛速度。

2.1 设计滑模面

引理1 对于任意 $x \in R$ 并且 $|x| < \infty$,有 $f(x) = x \sin(\arctan(x)) \geq 0$,当且仅当 $x = 0$ 时等号成立。

证明 分以下3种情况讨论。

(1) 当 $x = 0$ 时, $f(0) = 0$;

(2) $x > 0$ 时,有 $\arctan(x) \in (0, \frac{\pi}{2})$,则 $\sin(\arctan(x)) > 0$,即 $f(x) > 0$;

(3) $x < 0$ 时,有 $\arctan(x) \in (-\frac{\pi}{2}, 0)$,则 $\sin(\arctan(x)) < 0$,即 $f(x) > 0$ 。

假定柔性机器人的轨迹跟踪的位置误差 $x_{ie} = 0$,定义 y 方向位置误差的李雅普诺夫函数 V_y :

$$V_y = \frac{1}{2} y_{ie}^2 \quad (19)$$

将上式两边分别对时间 t 求导可得:

$$\dot{V}_y = y_{ie} \dot{y}_{ie} = y_{ie} (v_{ir} \sin \phi_{ie} - w_i x_{ie}) \quad (20)$$

假设,选取虚拟控制量为 ϕ_{ie} :

$$\phi_{ie} = -\arctan(v_{ir} y_{ie}) \quad (21)$$

于是式(20)变为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= y_{ie} v_{ir} \sin(\phi_{ie}) - w_i x_{ie} y_{ie} \\ &= -y_{ie} v_{ir} \sin(\arctan(v_{ir} y_{ie})) - w_i x_{ie} y_{ie} \end{aligned} \quad (22)$$

其中,因为参考输入变量 $v_{ir} > 0$, 当 x_{ie} 收敛到 0 时, 式(22)等号右侧第 2 项也收敛到 0; 根据引理 1 可知 $y_{ie} v_{ir} \sin(\arctan(v_{ir} y_{ie})) \geq 0$, 同样有等式右侧第 1 项小于 0; 因此 $\dot{V}_i$ 负定, 而且当 y_{ie} 收敛到 0 时, ϕ_{ie} 也收敛到 0。

定义滑模切换函数,其具体形式如下:

$$s_i = \begin{bmatrix} s_{i1} \\ s_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ie} \\ \phi_{ie} + \arctan(v_{ir} y_{ie}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

根据以上分析,当 s_{i1} 收敛到 0 时,即 x_{ie} 收敛到 0 时, s_{i2} 收敛到 0 时,即 ϕ_{ie} 收敛到 $-\arctan(v_{ir} y_{ie})$ 时,有系统误差 $[x_{ie} \ y_{ie} \ \phi_{ie}]^T$ 收敛到 0。

2.2 基于改进趋近律的滑模控制器设计

传统的幂次函数趋近律如下所示:

$$\dot{s} = -p |s|^q \operatorname{sgn}(s) \quad (24)$$

其中, $\dot{s}$ 为趋近速度, $p > 0$ 代表系统状态趋近运动到滑模面 $s = 0$ (零点)的速度增益。在系统状态远离滑模面时,通过调整合适的 $0 < q < 1$, 可以使得趋近速度具有较大的值,同时当接近滑模面时减小趋近速度以降低抖振。

其中 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,定义为

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (25)$$

虽然传统的幂次趋近律能够在系统动态过程中很好地抑制抖振,但是仍存在收敛速度慢的问题。因此在这里使用一种改进的趋近律,其表达式为

$$\dot{s} = -p |s|^q \operatorname{sgn}(s) - \alpha \operatorname{ar sinh}(s) \quad (26)$$

式中,增益参数 $\alpha > 0$; $\operatorname{ar sinh}(\cdot)$ 为反双曲正弦函数。在趋近运动阶段由于反双曲正切函数的值在系统状态远离零点时较大, $\alpha \operatorname{ar sinh}(s)$ 能够使系统状态以较大的速度趋近于滑模面; 当系统状态接近零

点时反双曲正切函数的值快速接近于 0, $\alpha \operatorname{ar sinh}(s)$ 几乎不起作用,式(26)退化成幂次趋近律在滑模面附近削弱抖振。因此,改进趋近律可使得系统提高收敛速度,并且在接近滑模面时保证较小的抖振。

滑模可达性的成立是滑动模态控制的前提,对基于改进趋近律的滑模控制可达性进行验证:

$$s \dot{s} = -p |s|^q \operatorname{sgn}(s) - \alpha \operatorname{ar sinh}(s) s \quad (27)$$

式中等式右边的第 1 项显然小于等于 0。考察等式右边第 2 项, $\operatorname{ar sinh}(s)$ 反双曲正弦函数有如下性质,当 $s > 0$, $\operatorname{ar sinh}(s) > 0$; 当 $s < 0$, $\operatorname{ar sinh}(s) < 0$; 当且仅当 $s = 0$ 时有 $\operatorname{ar sinh}(s) = 0$; 因此等式右侧小于等于 0。得出 $s \dot{s} \leq 0$, 当且仅当 $s = 0$ 时等号成立。改进的滑模趋近律满足滑模控制可达性要求。

结合式(23)、(26)以及轨迹误差方程式(18)得到:

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= \begin{bmatrix} \dot{s}_{i1} \\ \dot{s}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_{i1} |s_{i1}|^{q_{i1}} \operatorname{sgn}(s_{i1}) - \alpha_{i1} \operatorname{ar sinh}(s_{i1}) \\ -p_{i2} |s_{i2}|^{q_{i2}} \operatorname{sgn}(s_{i2}) - \alpha_{i2} \operatorname{ar sinh}(s_{i2}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_{ir} \cos \phi_{ie} - v_i + w_i y_{ie} \\ w_{ir} - w_i + \frac{\partial \xi}{\partial y_{ie}} (v_{ir} \sin \phi_{ie} - w_i x_{ie}) + \frac{\partial \xi}{\partial v_{ir}} \dot{v}_{ir} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $\xi = \arctan(v_{ir} y_{ie})$, 整理上式可以得到柔性机器人的滑模控制律:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} v_{ir} \cos \phi_{ie} + w_i y_{ie} + p_{i1} |s_{i1}|^{q_{i1}} \operatorname{sgn}(s_{i1}) + \alpha_{i1} \operatorname{ar sinh}(s_{i1}) \\ w_{ir} + \frac{\partial \xi}{\partial v_{ir}} \dot{v}_{ir} + \frac{\partial \xi}{\partial y_{ie}} v_{ir} \sin \phi_{ie} + p_{i2} |s_{i2}|^{q_{i2}} \operatorname{sgn}(s_{i2}) + \alpha_{i2} \operatorname{ar sinh}(s_{i2}) \end{bmatrix}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial y_{ie}} x_{ie}} \quad (29)$$

2.3 稳定性证明

为证明上述控制律用于柔性机器人系统时的稳定性,定义李雅普诺夫函数为

$$V_i(s) = \frac{1}{2} s_i^T K_i s_i \quad (30)$$

其中 $K_i = \begin{bmatrix} k_{i1} & 0 \\ 0 & k_{i2} \end{bmatrix}$ 是一实对角正定矩阵。

对上式求导可得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(s) &= s_i^T K_i \dot{s}_i \\
&= s_i^T K_i \begin{bmatrix} -p_{i1} |s_{i1}|^{q_{i1}} \text{sgn}(s_{i1}) - a_{i1} \text{ar sinh}(s_{i1}) \\ -p_{i2} |s_{i2}|^{q_{i2}} \text{sgn}(s_{i2}) - a_{i2} \text{ar sinh}(s_{i2}) \end{bmatrix} \\
&= -k_{i1} (p_{i1} |s_{i1}|^{q_{i1}} \text{sgn}(s_{i1}) s_{i1} + a_{i1} \text{ar sinh}(s_{i1}) s_{i1}) \\
&\quad - k_{i2} (p_{i2} |s_{i2}|^{q_{i2}} \text{sgn}(s_{i2}) s_{i2} + a_{i2} \text{ar sinh}(s_{i2}) s_{i2}) \quad (31)
\end{aligned}$$

利用改进趋近律滑模控制的可达性可以得出 $V_i \leq 0$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时 $s_i \rightarrow 0$ 。于是, 据之前的分析, 系统的轨迹跟踪误差将渐进收敛到 0, 因此可证明柔性机器人控制系统是稳定的。

3 仿真实验

为验证本文所设计的控制方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 上对该柔性机器人使用该方法进行轨迹跟踪控制仿真研究。柔性机器人系统的结构模型参数为 $r_w = 0.036 \text{ m}$, $d = 0.137 \text{ m}$, $L = 0.14 \text{ m}$ 。基于改进趋近律的滑模控制器参数为 $p_{11} = p_{21} = 1.5$, $p_{12} = p_{22} = 1.2$, $q_{11} = q_{21} = 0.8$, $a_{11} = a_{21} = 1.5$, $a_{12} = a_{22} = 1.2$, $q_{12} = q_{22} = 0.8$ 。

3.1 直线轨迹跟踪

选取柔性机器人前后车体的中点 O 作为参考点, 进行轨迹跟踪。参考轨迹为一直线, 期望速度和期望角速度为 $v_r = 1 \text{ m/s}$, $w_r = 0 \text{ rad/s}$; 参考轨迹的初始位姿是 $q_r = [1 \ 0 \ \pi/4]^T$; 机器人参考点的初始位姿 $q(0) = [1 \ -1 \ 0]^T$ 。

图 4 所示为在期望轨迹是直线的情况下, 由基于改进趋近律的滑模轨迹跟踪控制器得到的前后车体速度控制输入。从图 4 中可以看出, 系统的控制输入平滑, 有效抑制了抖振。

将基于改进趋近律的滑模控制器与传统的基于幂次趋近律的滑模控制器进行直线轨迹跟踪的仿真比较。图 5 是使用两种方法进行柔性机器人轨迹跟踪得到的轨迹曲线。从图 5 中可以看出, 两种方法都能够使机器人跟踪期望的直线轨迹, 但是对比可以看出, 基于改进趋近律的滑模控制方法能够更快地跟踪期望轨迹。

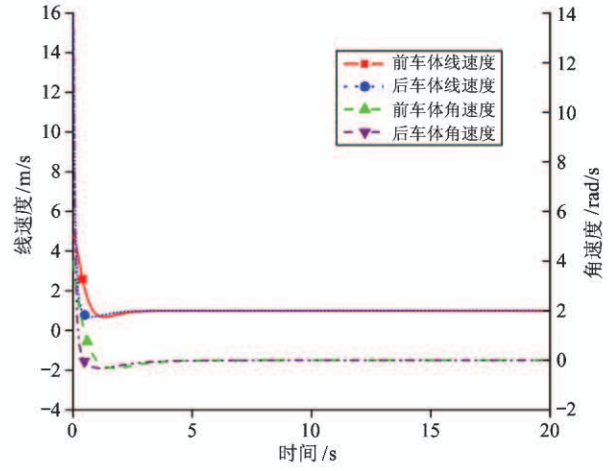


图 4 直线轨迹前后车体速度曲线

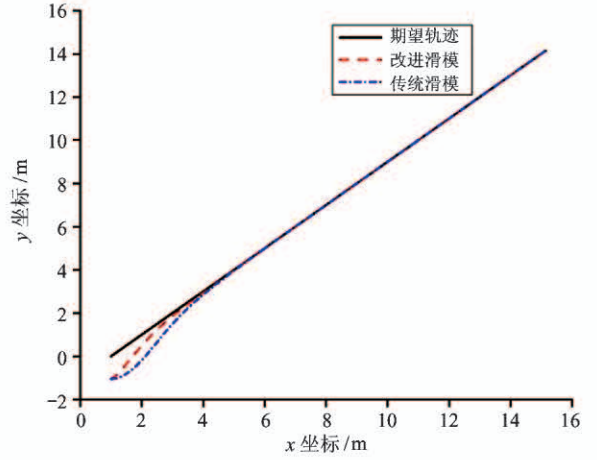


图 5 直线轨迹跟踪曲线

图 6 显示了在基于改进趋近律的滑模控制下, 机器人跟踪直线轨迹位姿误差的变化。柔性机器人

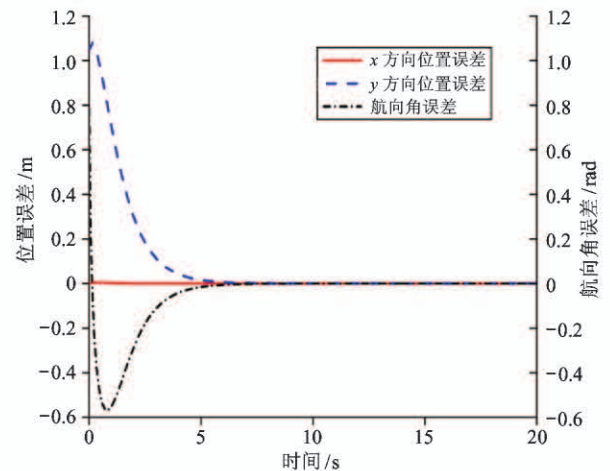


图 6 直线轨迹跟踪误差曲线

参考点 O 在 x 方向的初始误差为 0,并且在轨迹跟踪过程中 x 方向的误差几乎没有变化。在 y 方向的误差刚开始较大,之后逐渐减小,最终稳定在零点附近。这表明基于改进趋近律的滑模控制能够使 x 、 y 方向的跟踪误差快速收敛,并能保持稳定。柔性机器人的偏航角误差在轨迹跟踪过程中先快速减小后增大,直到达到一定的超调后又快速趋向于 0,最终稳定在零点附近,这是由于柔性机器人的非完整性约束使偏航角误差无法直接减小到 0。

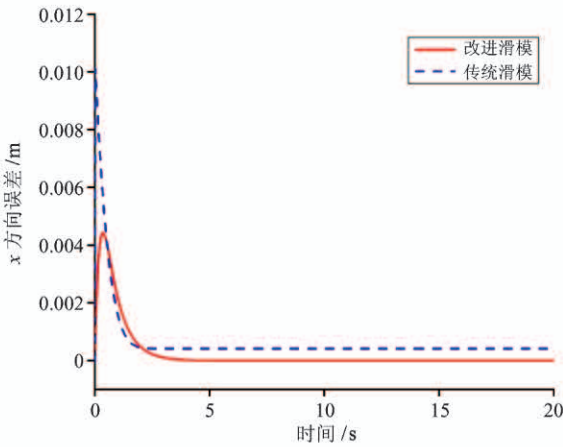
图 7 是两种滑模控制器作用下,柔性机器人轨迹跟踪误差的比较结果。如图 7(a) 所示,当系统达到稳态时,在 x 方向,传统滑模的跟踪误差约为 0.5 mm,而改进滑模可以使跟踪误差远小于 0.5 mm,说明了基于改进趋近律的滑模控制方法具有更高的控制精度。如图 7(a)、(b) 所示,在 x 与 y 方向,改进滑模控制误差比传统滑模控制误差的超调量小很多。如图 7(b)、(c) 所示,对于 y 方向和偏航角 ϕ 误差,改进滑模控制误差比传统滑模控制误差的调节时间更短,加快了误差收敛速度。将机器人的 3 个位姿误差变量动态控制过程中最大的调节时间作为机器人位姿达到稳态的时间,从图 7 中可以看出, y 方向的误差调节时间最大。从图 7(b) 中可知,采用传统滑模控制的机器人在 6.89 s 左右达到稳态,而改进滑模控制的机器人在 5.41 s 左右达到稳态,改进滑模控制比传统滑模控制达到稳态的时间缩短了 27.78%。

3.2 圆形轨迹跟踪

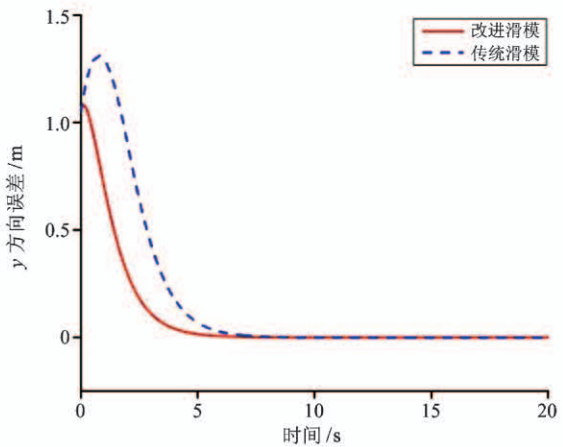
选取机器人前后车体的中点 O 作为参考点,进行轨迹跟踪。参考轨迹为一圆轨迹,期望速度和角速度 $v_r = 1 \text{ m/s}$, $w_r = 1.5 \text{ rad/s}$;参考轨迹的初始位姿 $q_r = [1 \ 1 \ 0]^T$;机器人参考点的初始位姿 $q(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。

图 8 是期望轨迹为圆形的情况下,基于改进趋近律的滑模轨迹跟踪控制器得到的输入,从图中可以看出系统的控制输入平滑,有效抑制了抖振。

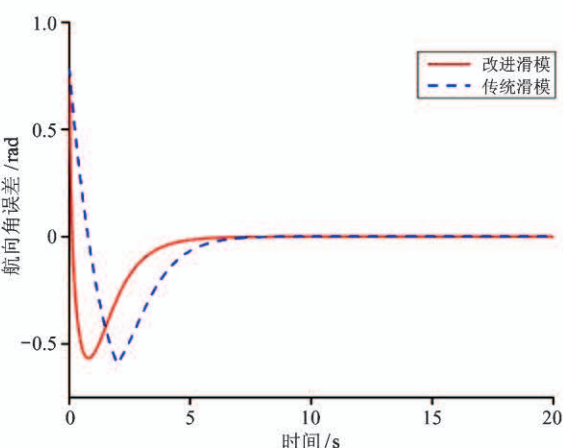
基于改进趋近律的滑模控制器与传统的基于幂次趋近律的滑模控制器进行圆形轨迹跟踪仿真比较。图 9 是使用两种方法进行柔性机器人圆形轨迹跟踪得到的轨迹曲线。从图9可以看出,基于改进



(a) x 方向误差比较图



(b) y 方向误差比较图



(c) 偏航角 ϕ 误差比较图

图 7 柔性机器人轨迹跟踪误差比较

趋近律的滑模控制方法与传统滑模控制方法均能跟踪期望轨迹,但是基于改进趋近律的方法能更快地跟踪圆形轨迹,具有更好的动态性能。

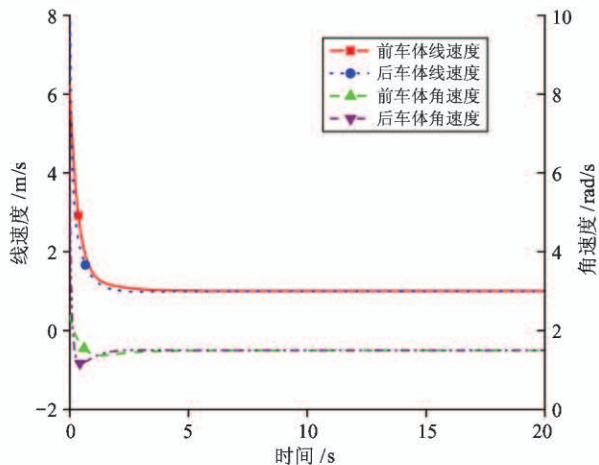


图8 圆形轨迹前后车体速度曲线

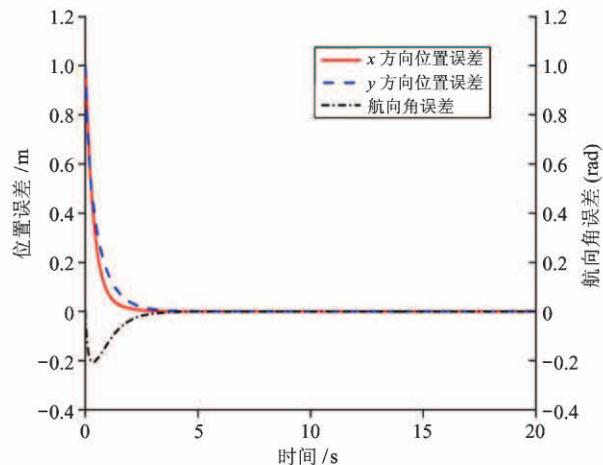


图10 机器人参考点圆形轨迹跟踪误差曲线

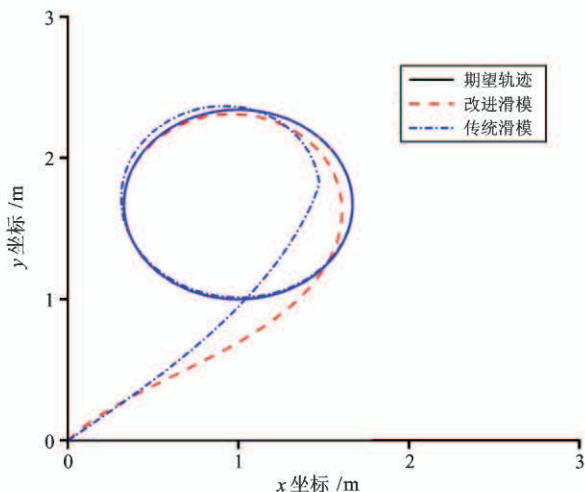


图9 圆形轨迹跟踪曲线

图10显示了在基于改进趋近律的滑模控制下，柔性机器人轨迹跟踪误差的变化。柔性机器人在 x 、 y 方向的误差由较大的初始误差快速减小到零点附近，并能保持稳定。根据式(26)可知，在系统状态远离零点时滑模趋近速度较大。因此 x 、 y 方向较大的初始误差能够快速减小。而柔性机器人的偏航角误差一开始从初始的零误差逐渐变大，但经过基于改进趋近律的滑模控制器作用后最后能够回到零点附近。由式(21)可知，虚拟控制量 ϕ_{ie} 与 y 方向误差有关，当 y 方向误差收敛后，偏航角误差也将收敛。

在两种控制器作用下，柔性机器人圆形轨迹跟踪误差变化比较如图11所示。如图11(a)、(c)所示，对于 x 方向和偏航角 ϕ 误差，改进滑模控制误差

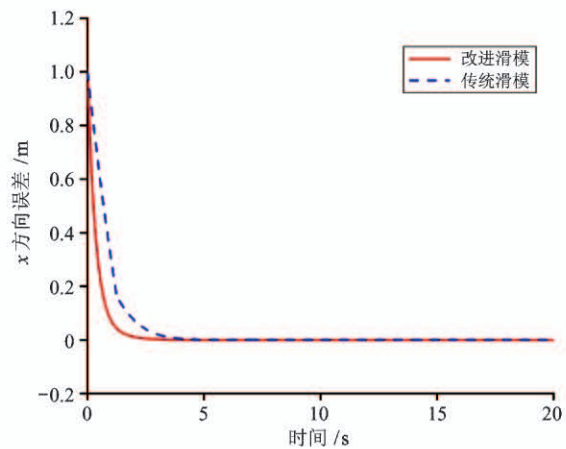
比传统滑模控制误差的调节时间更短。在图11(c)中可以看到，传统滑模的航向角误差变化在1s左右出现了波动，而改进滑模的误差曲线则比较平滑，说明改进滑模对机器人的位姿控制更加平稳。将机器人的3个位姿误差变量动态控制过程中最大的调节时间作为机器人位姿达到稳态的时间，从图11中可以看出，偏航角 ϕ 的误差调节时间最大。由图11(c)可知，采用传统滑模控制的机器人在6.01s左右达到稳态，而改进滑模控制的机器人在4.59s左右达到稳态，相比传统滑模达到稳态的时间缩短了30.43%。

从上述结果可知，本文所提出的基于改进趋近律的滑模控制方法可以实现钢结构柔性探伤机器人的轨迹跟踪控制，相比于传统的滑模控制方法，跟踪误差收敛速度有明显的提升，跟踪稳态误差更小，并且控制过程更平稳。

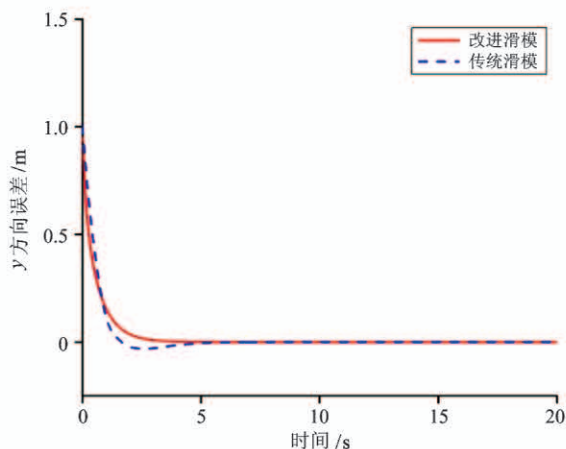
4 结论与展望

本文针对钢结构柔性探伤机器人的滑模控制轨迹跟踪问题，进行了如下研究。

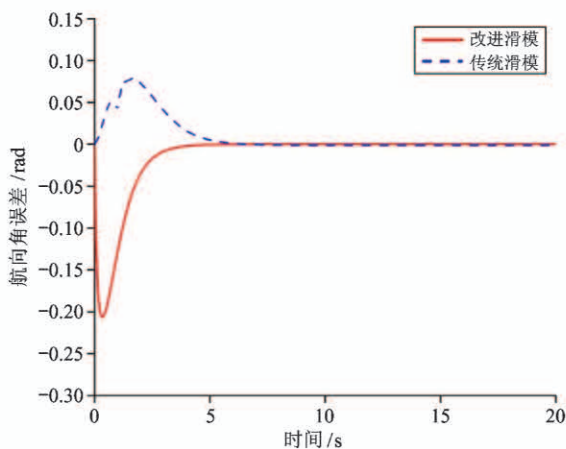
(1) 针对柔性机器人的前后车体复杂运动特性，分别建立运动学数学模型，并且通过对运动过程中前后车体的几何关系与钢带形变的研究，利用欧拉-伯努利梁方程建立了前后车体之间的柔性被动运动约束，最终得到了柔性机器人整体的运动学模型。



(a) x 方向误差比较图



(b) y 方向误差比较图



(c) 偏航角 ϕ 误差比较图

图 11 柔性机器人轨迹跟踪误差比较

(2) 基于柔性机器人整体的运动学模型, 将其转换为全局坐标下的位姿误差模型, 针对柔性机器人的轨迹跟踪提出了一种基于改进趋近律的滑模控制方法, 通过在滑模趋近律中加入反双曲正弦函数

项, 在满足滑模函数可达性的同时, 加快了滑模控制的收敛速度, 并削弱了系统抖振。

(3) 基于改进趋近律滑模控制对柔性机器人小车轨迹跟踪进行了仿真实验, 结果表明, 该控制方法可以使机器人快速、精确地跟踪参考轨迹, 并且具有良好的全局稳定性。在直线轨迹跟踪的情况下改进的趋近律滑模控制能够有效地加快机器人跟踪上参考轨迹的速度, 稳态误差收敛时间相比于传统滑模控制缩短了 27% 以上。在圆形轨迹跟踪的情况下, 改进的趋近律滑模控制方法同样使机器人更快跟踪上参考轨迹, 误差收敛时间相比于传统滑模控制缩短了 30.43%。同时无论在直线轨迹或是圆形轨迹跟踪的情况下, 改进的趋近律滑模控制方法相比于传统滑模控制具有更小的跟踪误差。

在后续的研究工作中将建立柔性机器人动力学模型, 并将其引入到控制系统中, 提高机器人跨越空间障碍以及抵抗外部干扰的能力, 使控制系统输出力矩更平滑, 动态鲁棒性更好, 轨迹跟踪能力更强。

参考文献

[1] Lins R G, Givigi S N. Autonomous robot system architecture for automation of structural health monitoring[C] // The 10th Annual IEEE International Systems Conference, Piscataway, USA, 2016: 200-206

[2] 俞姝颖, 吴小兵, 陈贵海, 等. 无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用[J]. 软件学报, 2015, 26(6): 1486-1498

[3] Guo J, Liu W, Lee K. Design of flexonic mobile node using 3D compliant beam for smooth manipulation and structural obstacle avoidance[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014: 5127-5132

[4] Michael D, Thierry F, Annemarie K Y, et al. Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3944-3953

[5] Key M, Jeon C, Yoo D S. Sliding mode control for a two-wheeled inverted pendulum mobile robot driving on uniform slopes[C] // International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju Island, Korea, 2012: 2159-2162

[6] Nasim E, Alireza A, Hossein K. Balancing and trajectory tracking of two-wheeled mobilerobot using backstepping sliding mode control: designand experiments[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, 87(3): 601-613

[7] 李世华, 田玉平. 非完整移动机器人的有限时间跟踪

- 控制算法研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 750-754
- [8] 张俊辉, 刘斌, 蒋峥, 等. 基于改进趋近律的滑模控制在机械臂中的应用. 高技术通讯[J], 2018, 28(6): 534-546
- [9] Primates S, Bona B. Motion control of mobile robots with particle filter model predictive equilibrium point control[C]//2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, Coimbra, Portugal, 2017: 11-16
- [10] Craig J J. 机器人学导论[M]. 负超, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006: 20-25
- [11] Zhu X, Kim Y, Merrell R, et al. Cooperative motion control and sensing architecture in compliant framed modular mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(5): 1095-1101
- [12] Tsai C, Wang Z. Intelligent adaptive trajectory tracking using fuzzy basis function networks for self-balancing two-wheeled mobile robots[C]//2011 International Conference on System Science and Engineering, Macao, China, 2011: 143-148
- [13] Sen P T H, Minh N Q, Anh D T T, et al. A new tracking control algorithm for a wheeled mobile robot based on backstepping and hierarchical sliding mode techniques[C]//The 1st International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics, Bangkok, Thailand, 2019: 25-28
- [14] 郭日修. 弹性力学与张量分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 157-160
- [15] Minor M A, Albiston B W, Schwensen C L. Simplified motion control of a two-axle compliant framed wheeled mobile robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(3): 491-506
- [16] Wang L, Chai T, Zhai L. Neural-network-based terminal sliding-mode control of robotic manipulators including actuator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3296-3304
- [17] 姜立标, 吴中伟. 基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 381-386
- [18] Abbasi W, Rehman F, Shah I. Steering algorithm for nonholonomic mechanical systems using adaptive sliding mode control[C]//2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, Italy, 2017: 1-5
- [19] Chwa D. Sliding-mode tracking control of nonholonomic-wheeled mobile robots in polar coordinates[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(4): 637-644
- [20] Incremona G P, Rubagotti M, Ferrara A. Sliding mode control of constrained nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(6): 2965-2972

Tracking control for a flexible steel structure inspection robot based on improved approaching law sliding mode

Ai Qinglin, Wang Guodong, Xu Qiaoning

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education and Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In order to solve the problem of complexity, slow tracking speed and low tracking precision of the control model of flexible robot for steel structure damage detection, a sliding mode control method based on improved approaching law is proposed. The front and rear body kinematics models of flexible robot are analyzed as individual mobile robot. The Euler-Bernoulli beam equation is used to solve the motion constraint between the front body, rear body and the connecting steel strip. The whole kinematics model of the flexible robot is obtained. On this basis, a sliding mode controller based on improved approaching law is designed by inversion method, which accelerates the convergence speed of tracking error and reduces the chattering of control system. Based on the improved approaching law sliding mode controller, the simulation of flexible robot trajectory tracking is finished. The results show that the improved approaching law sliding mode control method can make the flexible robot quickly track the expected trajectory for motion, and has better tracking accuracy and stability.

Key words: steel structure damage detection, flexible robot, trajectory tracking, improved approaching law, sliding mode control