

基于 ADRC 的网络化运动控制系统高精度轮廓跟踪控制^①

吴 祥^② 王军晓 王瑶为 董 辉 俞 立^③

(浙江工业大学信息工程学院 浙江省嵌入式系统联合重点实验室 杭州 310023)

摘 要 本文研究了具有重复任务性质的网络化运动控制系统高精度轮廓跟踪控制问题。首先,分析了网络时延给系统带来的影响,基于自抗扰控制设计了单轴跟踪控制器,将时变时延带来的不确定性建模为系统总和扰动的一部分,设计扩张状态观测器对总和扰动进行估计,并在前馈通道中对其进行补偿,消除时变时延影响,得到稳定的单轴跟踪控制。其次,基于迭代学习交叉耦合控制设计了轮廓误差补偿控制器,实现高精度轮廓跟踪控制。最后,通过实验验证了所提方法的有效性。这种控制方法在设计过程中不依赖于系统模型信息,为网络化运动控制系统轮廓跟踪控制方法的研究及应用提供了一种新的思路。

关键词 网络化运动控制, 时变时延, 自抗扰控制(ADRC), 迭代学习控制, 轮廓跟踪

0 引 言

运动控制系统作为制造设备的核心部件,是决定制造业发展的关键技术之一。近年来,随着传统制造业向智能制造的转型升级,由于传统运动控制系统具有连线复杂、维护困难、扩展性差、抗干扰能力差等诸多缺点,限制了其在智能制造中的应用。所以,现场总线技术在运动控制系统中得到了广泛使用,如 CAN、Ethernet POWERLINK、Ethernet/IP、SERCOS III、EtherCAT 等^[1-5]。相对现场总线而言,以太网具有成本低、通用性高、开放性好、可直接接入互联网等优点,使得基于以太网的运动控制系统受到学术界和工业界的广泛关注,成为热点研究问题。

多轴运动控制系统的主要任务可归为如下 3 种,即点位控制、轨迹跟踪、轮廓控制^[6]。其中,轮廓控制是比较复杂的任务,一直是运动控制中研究

的热点^[7-9]。目前,提高多轴轮廓跟踪精度的方法主要可分为 2 类^[10]。(1)通过提高单轴跟踪精度,从而改善轮廓跟踪精度;(2)通过耦合轮廓误差的补偿方法,首先对单轴误差进行耦合得到轮廓误差,再通过轮廓误差补偿控制器计算得到轮廓误差控制量,并分别补偿给各轴,提高轮廓跟踪精度。轮廓误差补偿方法中,交叉耦合控制^[11]被证明是一种有效手段而得到了普遍应用。交叉耦合控制的基本思想是在单轴跟踪控制基础上考虑其运动的相互影响,将开环的轮廓控制系统变为闭环控制系统,从而直接对轮廓误差进行补偿,所以,稳定的闭环单轴跟踪控制是交叉耦合控制行之有效的前提。

随着网络技术的发展,以太网传输效率已经大大提高,但是将以太网技术引入到运动控制系统中,网络时变时延对系统性能的影响仍不可忽略^[12]。因此,如何消除网络诱导时延给系统带来的影响成为网络化运动控制系统中亟需解决的重要问题。在网络化控制领域,针对网络诱导时延问题,已经有较

① NSFC-浙江两化融合联合基金(U1709213),浙江省自然科学基金(LZ15F030003)和重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室开放基金(2018FF03)资助项目。
② 男,1990 年生,博士生;研究方向:网络化运动控制;E-mail: 522212309@qq.com
③ 通信作者,E-mail: lyu@zjut.edu.cn
(收稿日期:2018-03-07)

多的研究成果和时延补偿方法,如鲁棒控制方法^[13,14]、切换系统方法^[15]、史密斯预估器方法^[16]、模型预测控制方法^[17]、随机系统方法^[18]、时滞系统方法^[19]、通信干扰观测器方法^[20]等。其中,基于扰动观测器的方法可不牺牲标称系统性能,且有潜力处理时变时延问题。

另一方面,在数控机床、工业机械手应用中,大量的生产任务具有重复性质,比如裁割、雕刻、焊接、喷涂、打磨、搬运等。针对此类重复性任务,可通过学习充分利用历史加工数据来优化提升系统性能。迭代学习控制是学习控制的一种,针对有限时间内的重复性任务,可通过对历史数据的不断学习实现完全跟踪控制^[21]。鉴于其可达到完美的跟踪效果,迭代学习控制已经广泛应用于机器人、制造业、交通、医疗等众多领域^[22-27]。

综上所述,设计基于通用以太网的网络化运动控制系统,研究其高精度轮廓跟踪控制问题具有明显意义,且目前针对此类系统对象的相关研究成果较少。本文主要研究网络化运动控制系统高精度轮廓跟踪控制,首先,针对网络诱导时延问题,设计基于自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[28,29]的单轴跟踪控制器,将系统时变时延带来的不确定性建模为系统总和扰动的一部分,利用 ADRC 中的扩张状态观测器对系统总和扰动进行估计,并在反馈控制律中对其进行补偿,消除网络诱导时延的不确定性影响。其次,针对重复性任务,结合迭代学习控制和交叉耦合控制,设计基于迭代学习交叉耦合控制(ILCCC)的轮廓误差补偿控制器,将计算得到的轮廓误差补偿量附加到各伺服轴,进一步提高轮廓跟踪性能,实现网络化运动控制系统的高精度轮廓跟踪控制。

1 问题描述

本文所考虑多轴网络化运动控制系统如图 1 所示。网络化运动控制系统由 PC 机、嵌入式控制器、机械臂、交流伺服器组成。PC 机与嵌入式控制器通过以太网连接,嵌入式控制器与交流伺服器通过 CAN 总线连接,机械臂为笛卡尔坐标系,交流伺服器作为

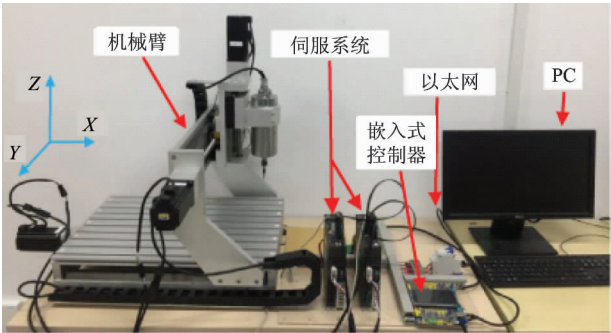


图 1 多轴网络化运动控制系统实验平台

执行单元,通过丝杆驱动机械臂。系统控制流程可大致分为以下 3 个阶段:(1)参考轨迹点生成。PC 机作为控制中心,对实时任务轨迹进行解析,生成期望参考轨迹点。(2)实时位置采样。按照设定采样周期,伺服器通过 CAN 总线将实时位置反馈至嵌入式运动控制器,控制器接收到信息后对数据进行协议封装,通过以太网将数据包发送至 PC 机,并记录当前时间点为 t_1 。(3)控制量计算及下发。PC 机接收到数据包后,对数据进行解析和处理,计算实时控制量并通过以太网将控制量下发至嵌入式运动控制器,控制器接收控制量后立即将其转发至伺服器,并记录当前时间点为 t_2 。同时,可计算得出系统每个控制周期的控制回路总时延 $\tau_k = t_2 - t_1$ 。

在实际应用中,运动控制系统轮廓跟踪精度是关键技术指标之一。传统本地控制方式中,由于控制器与执行器之间的响应是实时的,多个伺服轴之间能保持良好同步。相对而言,本文所考虑的网络化运动控制系统中,由于网络时变时延的存在,多轴同步性能无法得到有效保障。因此,本文主要研究实现图 1 所示网络化运动控制平台中 X 轴和 Y 轴的同步跟踪控制,可将所研究问题描述为图 2 形式。

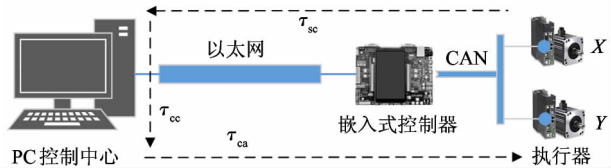


图 2 网络化运动控制系统轮廓跟踪控制结构示意图

由图 2 可知,系统控制回路总时延主要由控制中心算法计算及程序处理时延 τ_{cc} 、控制中心下发控

制指令至执行器的网络传输时延 τ_{ca} 、执行器反馈实时信息至控制中心的网络传输时延 τ_{sc} 3 部分组成,则系统控制回路总时延为

$$\tau_k = \tau_{cc} + \tau_{ca} + \tau_{sc} \quad (1)$$

设定网络化运动控制系统运行周期 $T = 8$ s,控制周期(即采样周期) $h = 5$ ms,传感器采用时间驱动模式,控制器和执行器均采用事件驱动模式。通过实验测得系统某一运行周期的控制回路总时延大小如图 3 所示。

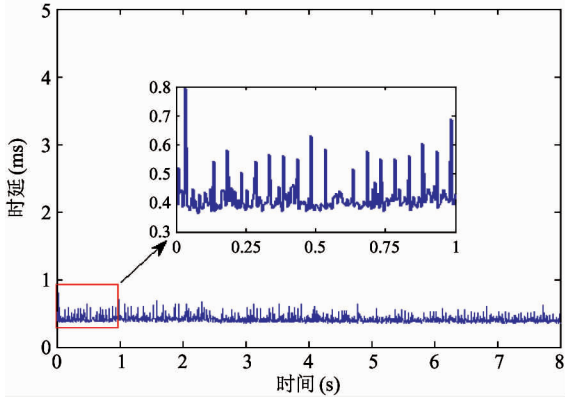


图 3 系统某一迭代周期控制回路时延测量值

由图 3 可知,所测得时延 $0.3\text{ms} < \tau_k < 0.8\text{ms}$,远小于系统控制周期。但是通过实验发现,该时变时延恶化了系统轮廓跟踪控制精度,其影响不可忽略。同时,可得知所考虑网络诱导时延为时变短时延现象,即 $0 \leq \tau_k \leq h$,则在任一采样周期,至多有两个控制量输入作用在执行器上^[15],此时,网络化运动控制系统的控制量输入时序如图 4 所示。图中第 i (i 表示 X/Y) 轴执行器接收到的控制量输入 $u_i(t)$ 可表示如下:

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i(t_{k-1}), & t \in (t_k, t_k + \tau_k] \\ u_i(t_k), & t \in (t_k + \tau_k, t_{k+1}] \end{cases} \quad (2)$$

其中, t_k 表示第 k 个采样时刻,且 $t_{k+1} = t_k + h$ 。

将网络化运动控制单轴系统描述为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1}(t) = x_{i2}(t) \\ \dot{x}_{i2}(t) = f(x_{i1}, x_{i2}, t) + b_i u_i(t) + d_i(t) \\ y_i(t) = x_{i1}(t) \\ f(x_{i1}, x_{i2}, t) = a_{i1} x_{i1}(t) + a_{i2} x_{i2}(t) \end{cases} \quad (3)$$

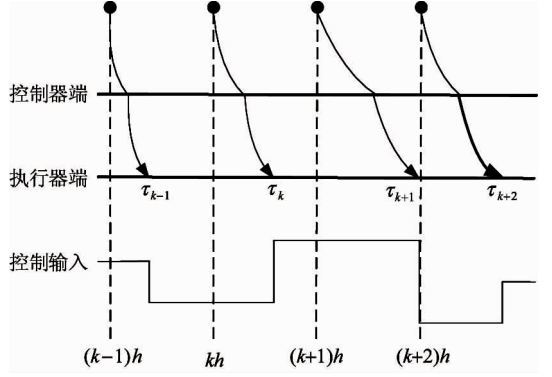


图 4 时变短时延网络化运动控制系统控制输入时序图

其中, $x_{i1}(t)$ 、 $x_{i2}(t)$ 分别为系统的位置和速度状态量, $u_i(t)$ 为系统控制量输入, $d_i(t)$ 为系统外界干扰。结合式(2)和(3),可得含有时变短时延 τ_{ik} 的离散化单轴系统模型为

$$\begin{cases} x_{i1}(k+1) = x_{i1}(k) + hx_{i2}(k) \\ x_{i2}(k+1) = e^{a_{i2}h} x_{i2}(k) + \frac{a_{i1}}{a_{i2}} (e^{a_{i2}h} - 1) x_{i1}(k) \\ \quad + \frac{b_i}{a_{i2}} (e^{a_{i2}(h-\tau_{ik})} - 1) u_i(k) \\ \quad + \frac{b_i}{a_{i2}} (e^{a_{i2}h} - e^{a_{i2}(h-\tau_{ik})}) u_i(k-1) + d'_i(k) \\ y_i(k) = x_{i1}(k) \end{cases} \quad (4)$$

对上式指数函数进行泰勒级数展开,并忽略高阶项,可得:

$$\begin{cases} x_{i1}(k+1) = x_{i1}(k) + hx_{i2}(k) \\ x_{i2}(k+1) = x_{i2}(k) + h(f(x_{i1}, x_{i2}, k) + b_i u_i(k)) \\ \quad + \frac{b_i \tau_{ik}}{h} (u_i(k-1) - u_i(k)) + d'_i(k) \\ f(x_{i1}, x_{i2}, k) = a_{i1} x_{i1}(k) + a_{i2} x_{i2}(k), \\ y_i(k) = x_{i1}(k). \end{cases} \quad (5)$$

由上式可知,网络化运动控制单轴系统的开环系统加速度实时作用量(总和扰动)由 3 部分组成,即系统未建模动态 $f(x_{i1}, x_{i2}, k)$ 、时变时延引起的扰动作用 $\frac{b_i \tau_{ik}}{h} (u_i(k-1) - u_i(k))$ 和系统外扰作用 $d'_i(k)$ 。将系统总和扰动扩张成系统新的状态量 $x_{i3}(k)$, 即:

$$x_{i3}(k) = f(x_{i1}, x_{i2}, k) + \frac{b_i \tau_{ik}}{h}(u_i(k-1) - u_i(k)) + d_i'(k) \tag{6}$$

并记 $\frac{x_{i3}(k+1) - x_{i3}(k)}{h} = w_i(k)$, 则可得到网络化运动控制单轴系统 3 阶离散模型如下。

$$\begin{cases} x_{i1}(k+1) = x_{i1}(k) + hx_{i2}(k) \\ x_{i2}(k+1) = x_{i2}(k) + h(x_{i3}(k) + b_i u_i(k)) \\ x_{i3}(k+1) = x_{i3}(k) + hw_i(k) \\ y_i(k) = x_{i1}(k) \end{cases} \tag{7}$$

2 基于 ADRC 的单轴跟踪控制器设计

本文所考虑网络化运动控制系统高精度轮廓跟踪控制,首先需要实现稳定的单轴跟踪控制。针对式(7)所描述的网络化运动控制单轴系统设计基于 ADRC 的单轴跟踪控制器,结构如图 5 所示。

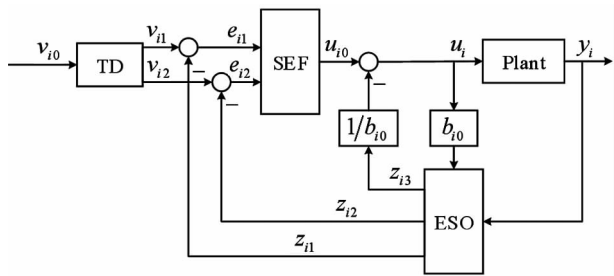


图 5 基于 ADRC 的网络化单轴跟踪控制器

单轴跟踪控制器包括跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和状态误差反馈控制律(SEF)三个部分,其设计过程如下。

(1) 设计跟踪微分器,安排过渡过程。将单轴期望轨迹 v_{i0} 作为参考输入,由于期望转速初值存在不为零的情况,会导致起始阶段位置跟踪精度较差,利用跟踪微分器安排过渡过程可以有效获得位置的过渡信号 v_{i1} , 解决跟踪快速性与超调之间的矛盾;另一方面,可以得到与转速近似的微分信号 v_{i2} 。设计线性跟踪微分器如下:

$$\begin{cases} e_{iv}(k) = v_{i1}(k) - v_{i0}(k) \\ v_{i1}(k+1) = v_{i1}(k) + hv_{i2}(k) \\ v_{i2}(k+1) = v_{i2}(k) + h(-r_{i0}^2 e_{iv}(k) - 2r_{i0} v_{i2}(k)) \end{cases} \tag{8}$$

其中, $e_{iv}(k)$ 为跟踪微分器的位置信号误差, r_{i0} 为速度因子。

(2) 设计扩张状态观测器,对总和扰动进行实时估计,形式如下:

$$\begin{cases} e_{iz}(k) = z_{i1}(k) - y_i(k) \\ z_{i1}(k+1) = z_{i1}(k) + h(z_{i2}(k) - 3w_{i0}e_{iz}(k)) \\ z_{i2}(k+1) = z_{i2}(k) + h(z_{i3}(k) - 3w_{i0}^2 e_{iz}(k) + b_{i0}u_i(k)) \\ z_{i3}(k+1) = z_{i3}(k) + h(-w_{i0}^3 e_{iz}(k)) \end{cases} \tag{9}$$

其中, $e_{iz}(k)$ 为观测器误差,即实际位置与其估计值之间的差值; $z_{i1}(k)$ 、 $z_{i2}(k)$ 、 $z_{i3}(k)$ 为状态量 $x_{i1}(k)$ 、 $x_{i2}(k)$ 、 $x_{i3}(k)$ 的估计; w_{i0} 为状态观测器的增益^[30]。

(3) 设计状态误差反馈控制律,求出控制量 $u_{i0}(k)$ 。通过 ESO 对总和扰动的估计,在求出的控制量 $u_{i0}(k)$ 中减去总和扰动的补偿项 $u_{iwe}(k)$, 得到新的控制量 $u_i(k)$ 。当 $u_i(k)$ 作用到系统对象时,则可以消除时变时延对系统性能的影响。设计带有补偿项的线性反馈控制律如下:

$$\begin{cases} e_{i1} = v_{i1} - z_{i1}, e_{i2} = v_{i2} - z_{i2} \\ u_{i0}(k) = k_{ip}e_{i1}(k) + k_{id}e_{i2}(k) \\ u_{iwe}(k) = \frac{z_{i3}(k)}{b_{i0}} \\ u_i(k) = u_{i0}(k) - u_{iwe}(k) \end{cases} \tag{10}$$

其中, $e_{i1}(k)$ 、 $e_{i2}(k)$ 为微分跟踪器输出过渡值与状态估计值之间的误差,即实际位置与其估计值之间的差值; k_{ip} 、 k_{id} 为控制律的增益系数。

在设计 ADRC 单轴跟踪控制器时,为了简化控制器结构、降低计算量、减少需调节参数个数,上述 3 部分都采用了线性结构进行设计。在实现稳定的单轴跟踪的基础上,进一步设计轮廓误差补偿控制器。

3 基于 ILCCC 的轮廓误差补偿控制器设计

交叉耦合控制器将多轴运动控制系统耦合成一个整体,利用轮廓误差生成轮廓控制补偿量附加到各单轴。其中,交叉耦合控制器增益与期望参考轨

迹相关,控制器增益是否合理,决定了轮廓误差补偿效果好坏。在二维平面上,系统轮廓误差 ε 可描述为

$$\varepsilon = -c_x \cdot e_x + c_y \cdot e_y \quad (11)$$

式中, e_x 、 e_y 分别为 X 、 Y 轴位置跟踪误差, c_x 、 c_y 为交叉耦合控制器增益。在生产加工中,轮廓主要可分为直线轮廓、圆弧轮廓以及两者的组合,直线轮廓和圆弧轮廓如图 6 所示。图中, P_d 、 P_r 分别为期望轨迹点和实际轨迹点; (x_o, y_o) 为圆弧圆心, R 为圆弧的半径。对于直线轮廓而言,交叉耦合控制器增益为一恒定值 $c_x = \sin\theta$, $c_y = \cos\theta$ 。对于圆弧轮廓而言则较为复杂,交叉耦合控制器增益是非线性时变的,由图 6 可知轮廓误差真实值如下式所示。

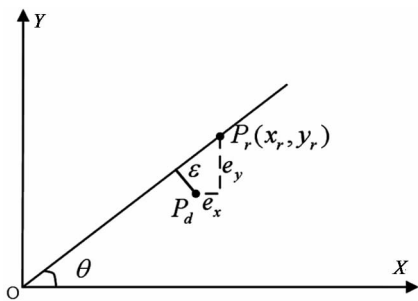
$$\varepsilon = \sqrt{(x_r - x_o)^2 + (y_r - y_o)^2} - R \quad (12)$$

假设轮廓误差足够小,将式 (12) 进行泰勒展开,得到圆弧轮廓误差近似表达式如下。

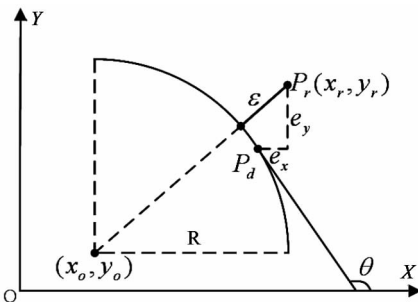
$$\varepsilon = -(\sin\theta - \frac{e_x}{2R}) \cdot e_x + (\cos\theta + \frac{e_y}{2R}) \cdot e_y \quad (13)$$

则圆弧轨迹的控制器增益为 $c_x = \sin\theta - \frac{e_x}{2R}$, c_y

$$= \cos\theta + \frac{e_y}{2R}。$$



(a) 直线轮廓



(b) 圆弧轮廓

图 6 轮廓示意图

本文针对具有重复任务性质的网络化运动控制系统,采用迭代学习控制对轮廓误差经验数据不断学习,优化轮廓误差补偿控制器的补偿量输出,提高轮廓跟踪精度。本文采用 PD-ILC 形式为

$$u_{cj}(k) = u_{cj-1}(k) + k_{cp}\varepsilon_{j-1}(k) + k_{cd}(\varepsilon_{j-1}(k) - \varepsilon_{j-1}(k-1)) \quad (14)$$

式中, ε 为轮廓误差, k_{cp} 、 k_{cd} 为控制器比例和微分系数, j 为系统迭代周期数。系统每次迭代时,轮廓误差初始状态都满足 $\varepsilon_j(0) = 0$, 则基于迭代学习交叉耦合控制 (ILCCC) 的轮廓误差补偿控制器可设计为如图 7 所示。根据图 7 可得, X 、 Y 轴轮廓误差补偿控制量 u_{xcj} 、 u_{ycj} 以及最终下发给执行单元的实时控制量 U_{xj} 、 U_{yj} 为

$$\begin{cases} u_{xcj}(k) = c_x u_{cj}(k), u_{ycj}(k) = c_y u_{cj}(k) \\ U_{xj}(k) = u_{xj}(k) - u_{xcj}(k) \\ U_{yj}(k) = u_{yj}(k) + u_{ycj}(k) \end{cases} \quad (15)$$

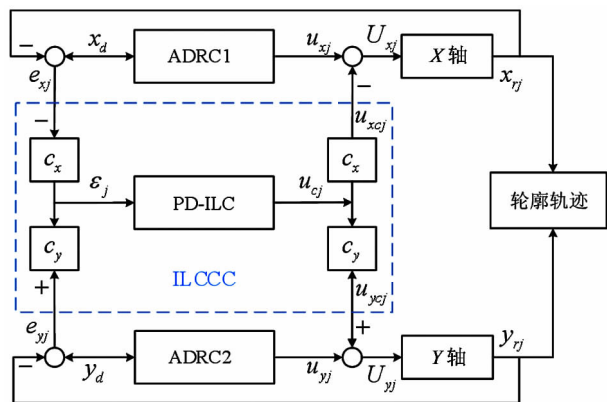


图 7 ILCCC 轮廓误差补偿控制器结构图

4 实验验证

为了验证本文所提方法的可行性和有效性,在图 1 所示网络化运动控制平台上进行轮廓跟踪控制实验。实验平台 PC 控制中心运行 Windows 10 系统,采用 C++ 语言开发上位机软件;嵌入式控制器采用基于 STM32F407 微处理器的开发板设计,装载 UC/OS-II 系统,开发有 TCP/IP 网络协议和 CANopen 主站协议程序;控制中心与嵌入式控制器通过 TCP/IP 协议进行数据传输,嵌入式控制器和执行单元间通过 CANopen 协议进行通信;执行单元为功率

400 瓦的交流伺服器,执行单元通过丝杆传动驱动 X、Y 轴移动。实验过程中,通信回路时延主要由以太网通信和 CAN 总线通信两部分组成,其中 CANopen 协议采用 PDO 传输方式,相对时延极小,可忽略不计,故通信回路时延主要考虑以太网通信诱导时延,通过时间戳记录以太网数据传输时间点,计算得到系统网络诱导时延以及控制回路总时延大小,测得某一运行周期控制回路总时延大小如图 3 所示。

实验对比了 3 种控制方法下的轮廓跟踪控制效果:(1)单轴设计为 ADRC 跟踪控制器,不附加轮廓误差补偿控制,即“ADRC”方法。(2)单轴设计为 ADRC 跟踪控制器,轮廓误差补偿控制设计为 PID 交叉耦合控制器方法,即“ADRC + PIDCCC”方法。(3)本文所提出方法,即“ADRC + ILCCC”方法。设定跟踪微分器的速度因子 $r_{i0} = 160$,扩张状态观测器增益 $w_{i0} = 100$,状态误差反馈控制律增益 $k_{ip} = 0.08$ 、 $k_{id} = 6$,补偿因子 $b_{i0} = 20$,ILCCC 控制器参数 $k_{cp} = 40$ 、 $k_{cd} = 40$,PIDCCC 控制器参数为 $k_p = 500$ 、 $k_d = 50$ 、 $k_i = 0$ 。给定网络化运动控制系统期望轨迹和初始状态为

$$\begin{aligned} x_d &= 10\cos0.25\pi t + 50 & x_j(0) &= 60 \\ y_d &= 10\sin0.25\pi t + 50 & 0 \leq t \leq T, & y_j(0) = 50 \end{aligned}$$

图 8 为单轴跟踪控制效果图,其中 x_0 、 y_0 表示给定期望轨迹, x 、 y 为测量反馈的实际位置值, $zx1$ 、 $zy1$ 为扩张状态观测器对实际位置值 x 、 y 的估计,表明本文设计的基于 ADRC 的网络化单轴跟踪控制器能实现稳定的单轴跟踪控制。图 9 和图 10 分别对比了上述 3 种方法实验得到的轮廓误差大小和累计轮廓误差值(其中方法(2)和(3)取的是最后一次迭代周期的数据),得到最大绝对轮廓误差 $|e_{\max}|$ 以及累计轮廓误差 e_{sum} 的实验结果数据如表 1 所示。显然,本文所提出方法能得到更优结果,可将系统最大轮廓误差减小至 0.0177 mm,累计轮廓误差减小至 4.8908 mm,后者相对减小了 93.7%,效果显著。图 11 为本文所提出方法“ADRC + ILCCC”的累计轮廓误差迭代历程,可知所提出轮廓误差补偿控制器能使网络化运动控制系统轮廓误差稳定收敛到一个较小的值。

由上述实验结果可知,ADRC 控制器能很好地

消除网络时变时延对单轴跟踪性能的影响,ILCCC 轮廓误差补偿控制器能在若干次迭代周期内将系统

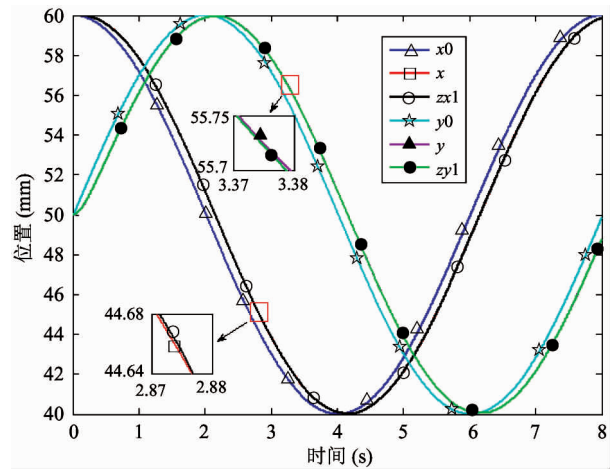


图 8 ADRC 单轴控制器跟踪效果图

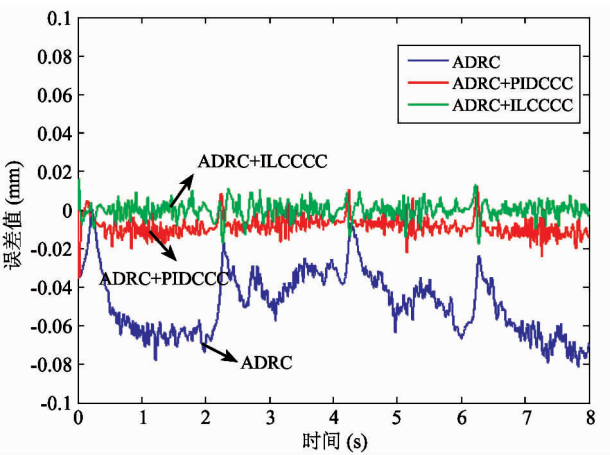


图 9 轮廓误差对比效果图

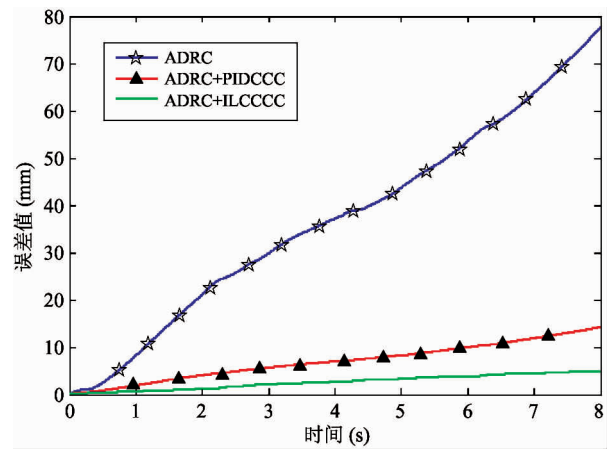


图 10 累计轮廓误差对比效果图

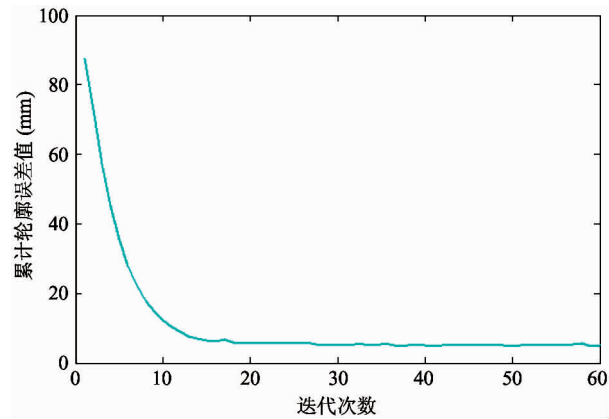


图 11 基于 ADRC + ILCCC 方法的累计轮廓误差迭代历程

轮廓误差控制在一个较小的范围内。在实际应用中,在获得小于设定值的轮廓误差值后,可停止迭代过程。在控制器的设计过程中,基本不依赖系统模型信息,且算法简洁、计算高效,具有较好的应用可行性。

表 1 轮廓误差实验数据(mm)

方法	$ e_{\max} $	e_{sum}
ADRC	0.0811	77.6556
ADRC + PIDCCC	0.0354	14.1730
ADRC + ILCCC	0.0177	4.8908

5 结 论

本文首先设计了基于通用以太网的网络化运动控制系统。为了实现网络化运动控制系统的高精度轮廓跟踪控制,稳定的单轴跟踪控制是前提,而网络诱导时延是影响单轴跟踪性能的主要因素之一。故本文提出了基于 ADRC 的单轴跟踪控制器,能有效消除时延影响,实现稳定的单轴跟踪控制。再者,针对具有重复任务性质的网络化运动控制系统,设计了 ILCCC 轮廓误差补偿控制器,通过学习机制不断优化轮廓补偿控制。最后,通过实验验证了所提方法的有效性,能获得较小的轮廓跟踪误差,实现高精度轮廓跟踪控制。

参考文献

[1] Thomesse J P. Fieldbus technology in industrial automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(6): 1073-

1101
[2] Felser M. Real-time Ethernet-industry prospective [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(6): 1118-1129
[3] Fei J Y, Gao B, Wen J Y. ARM distributed numerical control system design based on CAN-bus[J]. *Applied Mechanics & Materials*. 2013, 415(4):113-116
[4] Erwinski K, Paprocki M, Grzesiak L M, et al. Application of Ethernet Powerlink for communication in a Linux open CNC system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(2): 628-636
[5] Wang S Y, Yang J Q, Li D, et al. An integrated industrial Ethernet solution for the implementation of smart factory[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 25455-25462
[6] Chen S L, Chou C Y. Contouring control of multi-axis motion systems for NURBS paths[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 1062-1071
[7] Chen C S, Chen L Y. Robust cross-coupling synchronous control by shaping position commands in multiaxes system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(12): 4761-4773
[8] Nurcan G U, Erva U, Melih C. Design and analysis of a modular learning based cross-coupled control algorithm for multi-axis precision positioning systems [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2016, 14(1): 272-281
[9] Jia Z Y, Ma J W, Song D N, et al. A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 125: 34-54
[10] Tang L, Landers R G. Multiaxis contour control — the state of the art[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(6): 1997-2010
[11] Yoram K. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1980, 102: 265-272
[12] Shi Y, Huang J, Yu B. Robust tracking control of networked control systems: application to a networked DC motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(12): 5864-5874
[13] Li Q, Shi Y, Pan J F, et al. Robust control for a networked direct-drive linear motion control system: design and experiments[J]. *Information Sciences*, 2016, 370: 725-742
[14] Zhang W A, Yu L. BIBO stability and stabilization of networked control systems with short time-varying delays [J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2011, 21: 295-308
[15] 俞立, 张文安. 网络化控制系统分析与设计——切换系统处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
[16] Lai C L, Hsu P L. Design the remote control system with

- the time-delay estimator and the adaptive smith predictor [J]. *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, 2010, 6(1): 73-80
- [17] Liu G P, Mu J X, Rees D, et al. Design and stability of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC [J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(4): 288-297
- [18] Zhang L Q, Shi Y, Chen T W, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1177-1181
- [19] Gao H J, Chen T W, Lam J. A new delay system approach to network-based control[J]. *Automatica*, 2008, 44(1): 39-52
- [20] Natori K, Ohnishi K. A design method of communication disturbance observer for time delay compensation, taking the dynamic property of network disturbance into account [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(5): 2152-2168
- [21] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1984, 1(2): 123-140
- [22] 郑佳奇, 熊禾根, 陶永, 等. 鲁棒性迭代学习控制在去毛刺机器人轨迹跟踪中的应用[J]. *高技术通讯*, 2015, (12): 1062-1068
- [23] Li X F, Ren Q Y, Xu J X. Precise speed tracking control of a robotic fish via iterative learning control [J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2016, 63 (4): 2221-2228
- [24] Yu Q X, Hou Z S, Xu J X. D-type ILC based dynamic modeling and norm optimal ILC for high-speed trains[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2018, 26(2): 652-663
- [25] Freeman C T. Robust ILC design with application to stroke rehabilitation[J]. *Automatica*, 2017, 81: 270-278
- [26] Sahoo S K, Panda S K, Xu J X. Indirect torque control of switched reluctance motors using iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, 20 (1): 200-208
- [27] Ahn H S, Chen Y Q, Moore K L. Iterative learning control brief survey and categorization[J]. *IEEE Transaction on Systems*, 2007, 37(6): 1099-1121
- [28] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- [29] 刘福才, 李倩, 刘林. 柔性关节空间机械臂奇异摄动自抗扰控制仿真研究[J]. *高技术通讯*, 2016, 26 (6): 567-576
- [30] Gao Z Q. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning [C]. In: *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, USA, 2003. 4989-4996

ADRC-based high precision contour tracking control of networked motion control system

Wu Xiang, Wang Junxiao, Wang Yaowei, Dong Hui, Yu Li

(College of Information Engineering, Zhejiang Provincial United Key Laboratory of Embedded Systems, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

This paper investigates a novel control scheme for high precision contour tracking control of networked motion control systems with repetitive task. First, the effect of delays on the system is analysed, and a single-axis controller is designed based on active disturbance rejection control (ADRC) technique, the uncertainties caused by time-varying delays are modeled as bounded disturbance and the extended state observer is utilized to estimate the total disturbance. Then, after the disturbance is compensated, the stable tracking control of single-axis is achieved. In addition, for improving the contour tracking performance furtherly, the iterative learning method based contour error compensation controller is proposed. Finally, experiments are performed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed approach. This control scheme is easy to implement and provides a new insight and instruction for the industry application of networked motion control systems.

Key words: networked motion control systems, time-varying delays, active disturbance rejection control (ADRC), iterative learning control, contour tracking