

基于动态转矩反馈的机械臂柔性系统振动抑制

李佩颖¹, 夏加宽¹, 万成超²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳裕衡驱动科技有限公司, 辽宁 沈阳 110027)

摘要:针对机械臂关节伺服系统由于谐波减速器、齿皮带等柔性环节的存在使系统发生机械振动现象,建立了考虑刚度系数变化和大减速比的数学模型,分析机械谐振产生机理,提出了一种动态转矩反馈的控制策略,由扰动观测器实时观测动态转矩构成动态转矩闭环。为进一步抑制振动现象,增强系统鲁棒性和抗扰能力,研究了随动态转矩实时调整的转速变增益PI控制方法。仿真表明,采用动态转矩反馈的转速变增益PI控制策略能够很好地抑制机械振动且有较强的抗扰能力和动态响应性能。

关键词:机械谐振;变增益PI控制;动态转矩反馈;扰动观测器

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24126

Vibration Suppression of Flexible Manipulator System Based on Dynamic Torque Feedback

LI Peiying¹, XIA Jiakuan¹, WAN Chengchao²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;

2. Shenyang Yuheng Drive Technology Co., Ltd., Shenyang 110027, Liaoning, China)

Abstract: In view of the mechanical vibration of the manipulator joint servo system due to the existence of flexible links such as harmonic reducer and toothed belt, a mathematical model considering the change of stiffness coefficient and large reduction ratio was established, the mechanism of mechanical resonance was analyzed, and a dynamic torque feedback control strategy was proposed. The dynamic torque was observed in real time by a disturbance observer to form a dynamic torque closed loop. In order to further suppress the vibration phenomenon and enhance the robustness and disturbance rejection ability of the system, the speed variable gain PI control method adjusted in real time with dynamic torque was studied. Simulation results show that the speed variable gain PI control strategy with dynamic torque feedback can suppress mechanical vibration well, and has strong anti-disturbance ability and dynamic response performance.

Key words: mechanical resonance; variable gain PI control; dynamic torque feedback; disturbance observer

电驱动机械臂关节传动系统由驱动电机、谐波减速器或RV减速器、齿皮带、负载等部分组成^[1]。尽管用于不同负载或不同自由度数目的机械臂各关节组成有所差异,但是电机与负载间并不是理想的刚性连接,由于大减速比、连接装置本身固有属性等因素会产生一定柔性^[2-6],柔性的存在会引发机械振动现象,从而影响机械臂的控制精度,严重情况下还会造成整个伺服系统发散^[7]。

机械臂在垂直运动过程中负载不断变化或因某一位置受到扰动导致中间环节刚度系数变化。传统PI控制下,转速无法快速跟随负载变

化,导致速度波动,位置精度降低。为保证输出大转矩,往往存在大减速比的情况,会更加恶化系统的振动。

传统设计中,人们通常忽略中间环节的柔性,将其视作理想刚性体,或不考虑大减速比,将柔性环节抽象为固定刚度系数的扭簧,进而采用主动或被动控制方式对谐振进行抑制,使机械臂等对精度要求极高的伺服系统不稳定^[8-9]。文献[10]在分析柔性关节或柔性连杆机械臂伺服系统PI控制器参数与系统零极点的关系基础上,分别给出了两对极点阻尼系数相同、两对极点幅值相

基金项目:辽宁省高等学校产业技术研究院重大项目(201834011)

作者简介:李佩颖(1997—),女,硕士,Email:L15542258343@163.com

通讯作者:夏加宽(1962—),男,博士,教授,Email:sygdjxk@163.com

等和两对极点实部相等的极点配置PI参数的整定方法。但基于极点配置方法仅对大负载惯量比和低刚度系数伺服系统有较好的效果。文献[11]设计了龙贝格状态观测器进行状态反馈控制以抑制振动,仿真结果验证了引入状态反馈的有效性,但是并未针对某一特定场合进行研究,并未在建模过程中考虑大减速比的存在和伺服系统在运行过程中的抗扰能力。文献[12]以在重载工况下的机械臂为研究对象,为克服不同轴之间的振动频率不同的问题,提出了一种鲁棒性较强的输入整形器来解决末端抖振问题,但输入整形技术仅仅停留在研究阶段,难以应用到实处。

综上,本文提出了一种动态转矩反馈的控制策略,在此基础上研究了随动态转矩实时调整的转速变增益PI控制方法,进一步增强了系统的鲁棒性和抗扰能力。考虑机械臂在垂直运动过程中负载转矩不断变化带来的刚度变化及大减速比的影响,建立了机械臂柔性关节数学模型,分析了产生机械振动的原因。在原有三环控制的基础上,以扰动观测器观测出的动态转矩作为反馈环节构成转矩闭环。分析了轴转矩与转速PI控制器参数的关系,研究了随动态转矩实时调整的转速变增益PI控制方法,给出了PI参数调节规律。仿真结果表明,采用动态转矩反馈与转速变增益PI控制相结合的控制策略能够很好地抑制柔性带来的振动。

1 关节伺服系统振动原理分析

机械臂的柔性包括臂杆的柔性和关节的柔性^[13]。而关节的柔性在机械臂中占比极大,因此本文将机械臂的臂杆视为刚性,研究关节柔性对系统造成的影响。机械臂关节伺服系统包括伺服电机、减速器、齿皮带、负载等环节。如图1所示,整个关节可以抽象为电机+传动装置+负载的二质量系统。图中包括三部分:A部分为驱动电机(惯量1)、B部分为由传动装置等效的可变刚度系数扭簧、C部分为负载(惯量2)。

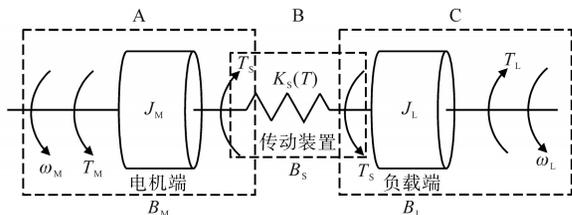


图1 关节伺服系统等效模型

Fig.1 Equivalent model of joint servo system

1.1 平衡方程的建立

根据图1建立各部分相关数学模型。对于A部分,电机作为动力源,扭簧的一侧视为负载,有如下机械运动方程:

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} = T_M - \frac{T_s}{i} - B_M \omega_M \quad (1)$$

式中: \$J_M\$ 为电机转动惯量; \$\omega_M\$ 为电机机械角速度; \$T_M\$ 为电机的电磁转矩; \$T_s\$ 为轴转矩; \$i\$ 为减速器的减速比; \$B_M\$ 为与电机机械角速度相关联的阻尼系数。

对于B部分,有如下转矩平衡方程:

$$T_s = K_s(T)(\theta_M/i - \theta_L) + B_s(\omega_M/i - \omega_L) \quad (2)$$

式中: \$K_s(T)\$ 为随转矩变化的等效刚度系数; \$\theta_M, \theta_L\$ 分别为转子位置角和负载位置角; \$B_s\$ 为中间传动装置的等效阻尼系数; \$\omega_L\$ 为负载侧的机械角速度。

对于C部分,等效的扭簧认为是驱动端,负载为制动端,转矩平衡方程如下:

$$J_L \frac{d\omega_L}{dt} = T_s - T_L - B_L \omega_L \quad (3)$$

式中: \$J_L\$ 为负载侧转动惯量; \$T_L\$ 为负载转矩,包括臂杆转矩和物料转矩; \$B_L\$ 为负载端的等效阻尼系数。

多数情况下,各部分的阻尼系数很小,忽略掉阻尼系数的平衡方程如下:

$$\begin{cases} J_M \ddot{\theta}_M = T_M - T_s/i \\ T_s = K_s(\theta_M/i - \theta_L) \\ J_L \ddot{\theta}_L = T_s - T_L \end{cases} \quad (4)$$

1.2 振动产生机理

忽略阻尼系数的影响,电磁转矩到电机转速的传递函数为

$$\begin{aligned} G_{\omega_T}(s) &= \frac{J_L s^2 + K_s(T)}{J_M J_L s^3 + K_s(T)(J_M + J_L/i^2)s} \\ &= \frac{1}{(J_M + J'_L)s} \cdot \frac{J_L s^2 + K_s(T)}{J_P s^2 + K_s(T)} \\ &= G_R(s) \cdot G_F(s) \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} G_R(s) &= 1/(J_M + J'_L)s \\ G_F(s) &= [J_L s^2 + K_s(T)]/[J_P s^2 + K_s(T)] \\ J'_L &= J_L/i^2 \\ J_P &= J_M J_L/(J_M + J'_L) \end{aligned}$$

式中: \$G_R(s)\$ 为刚性系统传递函数; \$G_F(s)\$ 为引入柔性环节后产生含有双二阶项的附加传递函数。

使得式(5)取得极大值对应的角频率 \$\omega_{res} = \sqrt{K_s(T)/J_P}\$ 称为谐振角频率;使得式(5)取得极小值对应的角频率 \$\omega_{ares} = \sqrt{K_s(T)/J_L}\$ 称为反谐振角频率。

由上述分析可知,由于谐振环节的引入,系统在谐振频率附近幅值大幅度增加,幅值裕度减小,导致了系统的振荡。

2 动态转矩反馈谐振抑制

2.1 负载转矩及运动过程分析

小臂关节转矩分析结果如图2所示,设小臂水平位置为 $0 \text{ rad} (\pi \text{ rad})$,垂直位置为 $\pi/2 \text{ rad} (-\pi/2 \text{ rad})$,针对实际搬运过程,本文研究负载位置变化情况为 $0 \text{ rad} \rightarrow \pi/3 \text{ rad} \rightarrow 0 \text{ rad} \rightarrow -\pi/3 \text{ rad} \rightarrow 0 \text{ rad}$ 。转矩随负载位置变化,刚度系数随负载转矩变化,假设小臂质量分布均匀,则电机的负载转矩为

$$T_L = T_{L1} + T_{L2} = [G_{L1} \cdot (R/2) + G_{L2} \cdot R] \cdot \cos\theta \quad (6)$$

其中

$$T_{L1} = G_{L1} \cdot (R/2) \cdot \cos\theta$$

$$T_{L2} = G_{L2} \cdot R \cdot \cos\theta$$

式中: G_{L1} , G_{L2} 分别为小臂重力和物料重力; R 为小臂长度(物料到电机转子中心长度); θ 为物料所处位置角; T_{L1} 为小臂力矩; T_{L2} 为物料力矩。

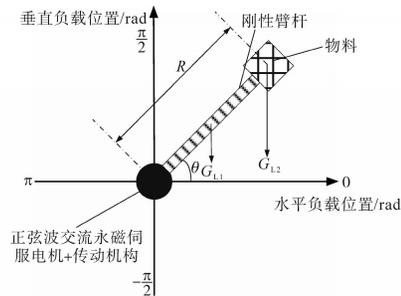


图2 小臂关节转矩分析

Fig.2 Torque analysis of the forearm joint

负载转矩(不含物料)和电机转子位置变化曲线如图3所示。

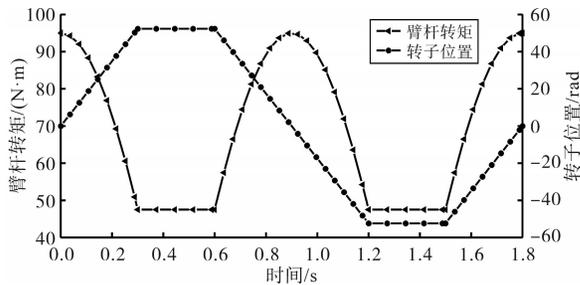


图3 臂杆转矩和转子位置变化曲线

Fig.3 Curves of boom torque and rotor position

2.2 基于动态转矩反馈的振动抑制方法

忽略阻尼力矩影响,定义动态转矩 ΔT 如下:

$$\Delta T = J_M \dot{\omega}_M = T_M - T_S \quad (7)$$

由于柔性环节存在会直接导致系统转速产生波动,进而影响位置控制精度,因此本文以转

速波动来衡量系统的振动。在传统三闭环控制中,转速因柔性环节存在、负载转矩变化等因素出现实时动态变化,当采用 $i_d=0$ 控制时,转速发生波动后,通过转速控制器调整转矩电流分量 i_q ,给定相对应的电磁转矩值,将电流环近似等效为电磁转矩环,以达到稳定转速目的。显然,对于机械臂等精度要求较高且长期存在动态运行的场合,通过调整电磁转矩来调整转速不能达到快速响应、减小转速波动的要求。由式(1)可知,转速的变化实质上对应的是动态转矩的变化,电磁转矩只是一个间接调整转速的量,转速控制器的输出若为动态转矩给定,则对应关系准确。因此,本文为改善动态性能,减小系统振动,转速控制器输出为动态转矩,且引入动态转矩控制器,在原有三环控制系统中嵌入动转矩环。

图4为基于动态转矩反馈的谐振抑制原理框图。当转速因柔性环节或负载扰动发生波动后,因动转矩环响应速度快,首先进行调整,根据动态转矩的变化而给定相应的转矩电流。

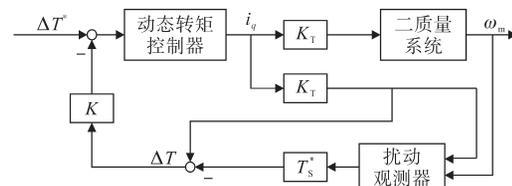


图4 基于动态转矩反馈的谐振抑制原理

Fig.4 Based on dynamic torque feedback resonance suppression principle

图4中,转速控制器的输出为动态转矩的给定 ΔT^* ,动态转矩 ΔT 经反馈系数 K 负反馈至给定的 ΔT^* ,嵌入动态转矩控制器实现动转矩闭环。转矩控制器采用PI控制器,可根据动态转矩的变化准确给定电磁转矩电流分量,增强抗扰能力。由于转矩传感器占用空间大、成本高,轴转矩 T_S 采用扰动观测器获取。

动转矩环响应速度远大于转速环,将转矩控制器环节等效为1,此时电磁转矩到电机转速的传递函数变为

$$\begin{aligned} G'_{\omega T}(s) &= \frac{J_L s^2 + K_S(T)}{(1+K)J_M J_L s^3 + K_S(T)[(1+K)J_M + J_L/i^2]s} \\ &= \frac{1}{(J_M + J'_L)s} \cdot \frac{J_L s^2 + K_S(T)}{(1+K)J_P s^2 + (1+KJ_P/J_L)K_S(T)} \\ &= G_R(s) \cdot G'_F(s) \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$G'_F(s) = \frac{J_L s^2 + K_S(T)}{(1+K)J_P s^2 + (1+KJ_P/J_L)K_S(T)} \quad (9)$$

由式(8)可以得出,引入动态转矩反馈后,谐振角频率变为

$$\omega'_{res} = \sqrt{\frac{(1+KJ_P/J_L) \cdot K_S(T)}{(1+K) \cdot J_P}} \quad (10)$$

由上述分析可知,通过调整动态转矩反馈系数,增加了电机转动惯量,进而增加了系统刚度,从而使谐振频率处的幅值减小。动态转矩反馈系数越大,振动抑制效果越明显,转速波动越小,但是在启动和受到扰动后转速超调量会明显增加。

3 基于转速的变增益PI控制

3.1 轴转矩与转速PI控制器参数关系

由上述分析可知,机械臂负载随臂杆运动而变化,采用传统的固定增益PI控制器系统需多次调整才能恢复平衡状态,导致系统响应滞后,从而使转速产生实时波动,影响机械臂运行质量。因此PI参数需根据偏差大小进行实时调整,从而增强抗扰能力。

图5为柔性连接伺服系统速度控制框图,考虑到电流环和检测环节响应速度比转速环大得多,将其等效为1。

图5中, ω^* 为转速给定值; $G_s(s)$ 为速度控制器传递函数, $G_s(s) = k_p + k_i/s$; K_T 为转矩常数;虚线框内为式(4)对应的二质量系统。

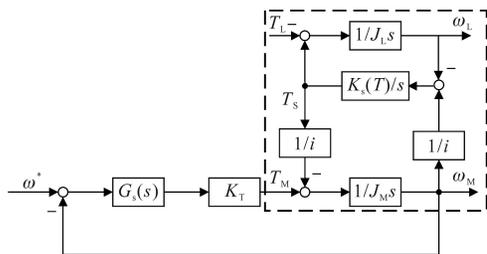


图5 柔性连接伺服系统速度控制框图
Fig.5 Speed control block diagram of flexible connection servo system

由图5可以得到由轴转矩 T_s 到电机输出转速的传递函数为

$$G_T(s) = \frac{s}{J_M s^2 + K_T k_p s + K_T k_i} \quad (11)$$

式中: k_p, k_i 分别为速度控制器比例、积分系数。

令转矩常数和电机转动惯量为常数,根据式(10)绘制出轴转矩幅频特性曲线如图6所示。

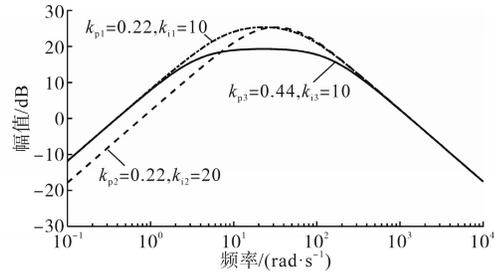


图6 不同PI控制器参数下的轴转矩幅频特性
Fig.6 Amplitude-frequency characteristics of axial torque under different PI controller parameters

3.2 转速环PI变增益控制

由图6可以看出,在保证 k_p 不变的情况下,随着 k_i 的增加,低频幅值增益降低且幅频增益最大值稍有右移,但过大的 k_i 会导致系统超调增加;保证 k_i 不变,随着 k_p 的增加,幅频增益最大值显著下降,提高了系统的刚性,但过大的 k_p 会造成系统不稳定。因此合理选取 k_p 和 k_i 能有效抑制转速波动。

由式(1)及图3可知,负载转矩或轴转矩近似呈现周期性变化规律,会带来较大的速度偏差。文献[14]和文献[15]都是在转速产生偏差之后再行PI参数的设计,无法在转速发生波动前进行调节。动转矩环的响应速度远快于转速环,以动态转矩作为PI参数的调整依据可达到更好的控制效果。将上述控制系统得到的动转矩输入到转速PI控制器中,当转速偏差逐渐趋于零时, k_p 随之减小,且当转速偏差接近零时, k_p 加速减小。相反,当转速偏差逐渐增加时, k_p 随之增加,且当偏差距零点很远时, k_p 加速增加。

考虑到 k_i 会影响超调和稳态精度,随着偏差的逐渐减小,积分作用应逐渐增加,反之逐渐减小。

定义 k_p 和 k_i 的系数分别为 $f(\Delta T)$ 和 $g(\Delta T)$, 则变PI参数的变化规律为

$$f(\Delta T) = \begin{cases} m_1 & \Delta T \leq a \\ \sqrt[3]{\Delta T} & a < \Delta T < b \\ n_1 & \Delta T \geq b \end{cases} \quad (12)$$

$$g(\Delta T) = \begin{cases} m_2 & \Delta T \leq a \\ k\Delta T & a < \Delta T < b \\ n_2 & \Delta T \geq b \end{cases} \quad (13)$$

式中: m_1, m_2, n_1, n_2, a, b 为非负常数; k 为线性函数的斜率。

$f(\Delta T)$ 和 $g(\Delta T)$ 对应的函数图像如图7所示。通过合理选择非负实数和积分增益系数的斜率,可减小转速波动,增强抗扰能力。

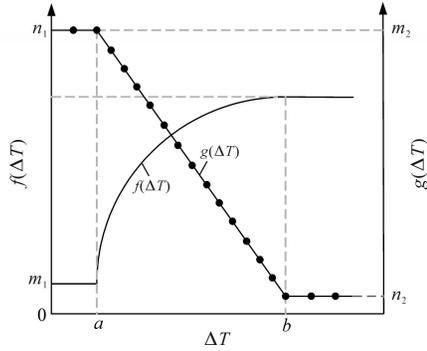


图7 比例、积分增益系数函数变化规律
Fig.7 Variation rule of proportional and integral gain coefficient function

4 仿真结果与对比分析

在 Matlab/Simulink 中搭建机械臂柔性关节伺服系统的传统固定增益 PI 控制、动态转矩反馈控制和动态转矩反馈的变增益 PI 控制仿真模型, 给定图 3 所示负载转矩变化情况和转子位置, 对机械臂垂直运动状态进行仿真分析。为进一步验证抗扰能力, 分别在 30° (正转速、反转速), -30°, -60° 四个位置突加 70 N·m 的负载扰动, 设置仿真时间为 1.8 s, 相关仿真参数如下: 额定功率 750 W, 额定转矩 2.4 N·m, 电机端转动惯量 $1.2 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 负载端转动惯量 $6.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转子磁链 0.082 T, 交、直流电感 $9.828 \times 10^{-3} \text{ H}$, 减速比 50, 最大等效刚度系数 1 100 N·m/rad, 采样频率 50 kHz。

传统固定增益 PI 控制的转速响应曲线如图 8 所示。由仿真结果可以看出, 机械臂在不同位置时, 转速波动大, 抗扰能力差, 难以满足实际运行需求。图 9 为引入动态转矩反馈控制的转速响应曲线。由图 9 可知, 转速波动较传统固定增益 PI 控制大大减小。

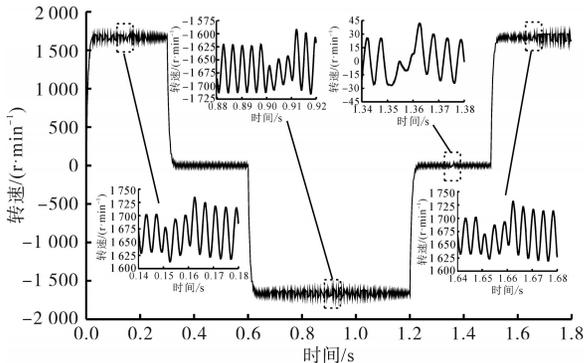


图8 固定增益PI控制转速响应
Fig.8 Speed response controlled by fixed gain PI

在动态转矩反馈控制的基础上引入转速变增益 PI 后的转速响应曲线和转子位置变化曲线

分别如图 10 和图 11 所示。由图可知, 转速波动进一步减小, 受扰后超调量小且能够迅速回到稳态值, 位置最大偏差仅为 1.1 rad。

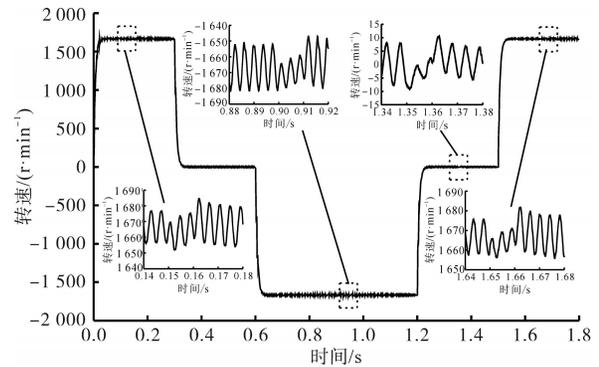


图9 动态转矩反馈控制转速响应

Fig.9 Dynamic torque feedback control speed response

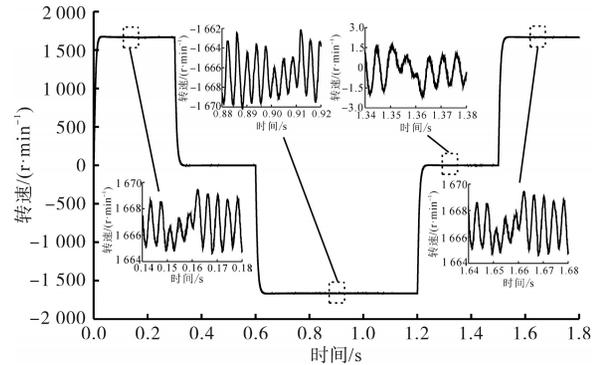


图10 动态转矩反馈控制+变增益PI控制转速响应

Fig.10 Dynamic torque feedback control + variable gain PI control speed response

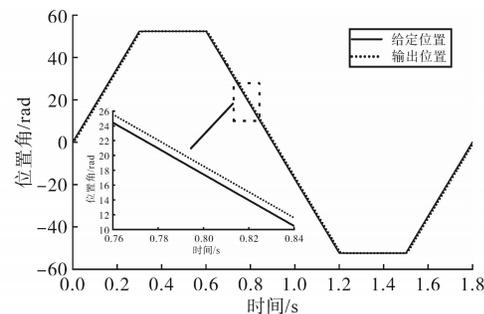


图11 转子位置变化曲线

Fig.11 Rotor position change curve

由于转速为零时的波动较小, 因此仅对比不同控制方式下转速不为零时的波动情况。定义未受扰动时稳态下的转速波动 k_ω 为

$$k_\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_M \times 100\% \quad (14)$$

式中: ω_{\max} , ω_{\min} 分别为对应平均转速为 ω_M 的最大转速和最小转速。

根据转速响应曲线得到不同控制方式下的 k_ω 和受扰动后的超调量 M_p 如表 1 所示。

由仿真结果对比可知, 采用动态转矩反馈的转速变增益 PI 控制策略能够大幅度减小由于柔

性连接带来的转速波动,且可以保证位置的精确控制,提高了机械臂系统的抗扰能力与动态响应。

表1 仿真结果对比

Tab.1 Comparison of simulation results

控制策略	$k_{\omega}/\%$	M_p
固定增益PI控制	8.19	59.6
动态转矩反馈控制	1.32	18.2
动态转矩反馈控制+变增益PI控制	0.24	2.70

5 结论

针对机械臂关节伺服系统柔性连接产生的机械谐振现象,考虑刚度随负载转矩变化及大减速比的情况下,对关节伺服系统进行了数学模型的建立,提出了一种动态转矩反馈的振动抑制控制策略,动态转矩经扰动观测器观测后反馈到转速控制器的输出构成动转矩环,增加了系统的刚度。针对转速固定增益PI控制器不能满足机械臂的工作需求,通过分析轴转矩与PI参数的关系,设计了随动态转矩变化的变增益PI控制器,进一步抑制系统振动。通过对不同控制方式下柔性关节伺服系统仿真,验证了本文所提出的基于动态转矩反馈的转速变增益PI控制策略的有效性,不仅可以减小系统振动且动态性能良好。

参考文献

[1] 刘极峰,丁继斌. 机器人技术基础[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2012.
LIU Jifeng, DING Jibin. Ji qi ren ji shu ji chu[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2012.

[2] ELLIS G, GAO Z. Cures for low-frequency mechanical resonance in industrial servo systems[C]//Industry Applications Conference, IEEE, 2001.

[3] 杨影,李之珂,王爽,等. 基于轴转矩扰动观测器的伺服系统扭振抑制研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3556-3563.
YANG Ying, LI Zhike, WANG Shuang, et al. Research on torsional vibration suppression of servo system based on shaft torque disturbance observer[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2018, 33(15): 3556-3563.

[4] CARRIERE S, CAUX S, FADEL M. Optimised speed control in state space for PMSM direct drives[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(3): 158-168.

[5] CHOI H H, VU T T, JUNG J W. Digital implementation of an adaptive speed regulator for a PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(1): 3-8.

[6] 黄梁松,曲道奎,徐方,等. 基于可调惯量比的伺服系统低频谐振控制[J]. 电气传动, 2010, 40(7): 61-65.
HUANG Liangsong, QU Daokui, XU Fang, et al. Servo control

strategy for low-frequency resonance suppression base on adjustable inertia ratio[J]. Electric Drive, 2010, 40(7): 61-65.

[7] 咸明辉,罗欣,沈安文,等. 基于扰动转矩反馈的机械谐振抑制方法[J]. 电气传动, 2016, 46(1): 45-49.
XIAN Minghui, LUO Xin, SHEN Anwen, et al. Suppression of mechanical resonance based on disturbance torque feedback[J]. Electric Drive, 2016, 46(1): 45-49.

[8] 王璨,杨明,徐殿国. 基于PI控制的双惯量弹性系统机械谐振的抑制[J]. 电气传动, 2015, 45(1): 49-53.
WANG Can, YANG Ming, XU Dianguo. Mechanical resonance suppression of the elastic two-inertia system based on PI control [J]. Electric Drive, 2015, 45(1): 49-53.

[9] 巩凤娇. 伺服系统中抑制机械谐振方法的研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
GONG Fengjiao. Research on mechanical resonance suppressing for servo system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[10] 丁有爽,肖曦. 基于极点配置的永磁同步电机驱动柔性负载PI调节器参数确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1225-1239.
DING Youshuang, XIAO Xi. Parameter tuning methods based on pole placement for PI controllers of flexible loads driven by PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1225-1239.

[11] 潘珩. 双惯量系统振动抑制算法研究[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2020, 19(1): 15-20.
PAN Heng. Research on the vibration suppression algorithm of two-inertia system[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2020, 19(1): 15-20.

[12] GHAO Y, CHCN W, TANG T, et al. Gero time delay input shaping for smooth settling of industrial robots[C]//2016 IEEE international Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Fort Worth, TX, USA, 2016: 620-625.

[13] 杨益波. 柔性关节柔性臂杆机械臂动力学建模与振动抑制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
YANG Yibo. The dynamics modeling and vibration suppression research of flexible joint-flexible link manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[14] 肖卫文,熊芝耀,李世春,等. 基于变参数PI的永磁同步电动机矢量控制系统[J]. 电力电子技术, 2009, 43(4): 32-33.
XIAO Weiwen, XIONG Zhiyao, LI Shichun, et al. Vector control system of permanent magnet synchronous motor based on variable arguments PI controller[J]. Power Electronics, 2009, 43(4): 32-33.

[15] 吴一祥,曾岳南. 直线电机速度伺服系统的变增益PI控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(11): 60-63.
WU Yixiang, ZENG Yuenan. Variable gain PI control of linear motor velocity servo system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(11): 60-63.

收稿日期:2021-12-09

修改稿日期:2022-01-21