第 20 卷第 4 期
2022 年 8 月

动力学与控制学报
JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

Vol. 20 No. 4
Aug. 2022

文章编号:1672-6553-2022-20(4)-074-09

DOI:10.6052/1672-6553-2021-075

遥操作旋转运动梁系统多目标优化控制研究*

李小乐　陈龙祥†

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海　200240)

摘要　本文以旋转运动柔性梁为对象,采用基于胞映射的多目标优化方法进行遥操作系统双边控制研究. 首先建立遥操作旋转运动柔性梁系统动力学方程,其次考虑信号传输时滞和系统主从端跟踪误差信号设计主端控制器和从端控制器,并利用 Lyapunov 稳定性理论获得保证闭环控制系统稳定的控制增益所需要满足的条件. 由于满足稳定性条件并不意味着好的控制性能,最后利用基于胞映射的多目标优化方法进行优化控制设计,得到同时满足多个不同目标的控制增益的 Pareto 最优解集. 仿真结果表明所获得的控制增益能够有效实现遥操作系统主从端的信号跟踪,并且操作者能够及时感受到从端环境的变化.

关键词　遥操作,　时滞,　旋转运动柔性梁,　多目标优化,　双边控制

中图分类号:O313.7;TP13　　　　**文献标志码**:A

引言

遥操作系统在航空、航天、医疗和海洋开发等领域有着广泛的应用前景[1-3]. 典型的遥操作系统由操作者、主端系统、通信信道、从端系统和从端环境几部分组成,操作者通过操控主端系统产生指令信号,该指令信号通过通信信道远距离传输给从端系统,从端系统接收指令后跟踪主端系统的运动与从端环境交互,并将从端环境的相关信息反馈给主端系统. 因此遥操作控制系统一方面要保证主从端控制系统的稳定性,另一方面要求主端系统能够及时感受到从端环境的变化. 远距离操控所面临的主要问题是从端系统与主端系统的通信过程中存在时间延迟,通信时滞对遥操作控制系统的稳定性和透明性造成了严重的不利影响[2-4].

为了消除时滞对遥操作系统的影响,常见的稳定性控制方法有无源性控制[4]、监督控制[5,6]、基于事件的控制方法[7]、模型预测控制[8]、Lyapunov 函数[9,10]、局部自主控制[11]等. 这些方法能够保证遥操作系统的稳定性和透明性,但是大部分都无法明确给出主从端系统跟踪误差的收敛速度[12]. 为平衡主从端系统跟踪误差收敛速度和系统稳定性的矛盾,许多学者对有限时间内遥操作系统的控制设计进行了研究[13,14],由于遥操作系统的控制目标相互冲突,有限时间控制设计方法往往只能获得某种程度上的控制性能最优. 考虑到多目标优化控制设计方法可以根据所需要的控制目标获得对应控制增益的 Pareto 最优解集[15],操作者可以根据需要选择合适的控制增益实现遥操作任务,这对提高遥操作系统的控制性能有很好的意义,而且目前对于遥操作系统的控制尚未见多目标优化相关研究报道.

本文基于 Lyapunov 稳定性,将多目标优化方法引入遥操作系统双边控制设计. 第一节以旋转运动柔性梁为对象建立双边遥操作系统动力学模型;第二节采用 Lyapunov 稳定性理论得到保证遥操作闭环控制系统稳定的控制增益需要满足的条件;第三节采用基于胞映射的多目标优化方法获取保证系统实现控制目标的 Pareto 最优解集;第四节进行数值仿真并分析得出结论.

2021-10-15 收到第 1 稿,2021-11-05 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11972223)

† 通信作者 E-mail:chenlx@sjtu.edu.cn

1　遥操作旋转运动柔性梁系统动力学模型

考虑如图 1 所示的遥操作旋转运动柔性梁系统,主端和从端均为在水平面内作回转运动的旋转运动柔性梁,系统信号传输中存在时滞,其中 $\tau_{\mathrm{m}}(t)$ 为自主端到从端的信号传输时滞,$\tau_{\mathrm{s}}(t)$ 为自从端到主端的信号传输时滞. 假定在旋转梁基座 O 处施加控制扭矩,以实现系统的大范围运动. 同时在柔性梁根部施加控制力矩以控制柔性梁大范围运动中产生的弹性振动. 忽略重力和摩擦的影响,基于 Hamilton 原理和假设模态离散化方法,主端和从端旋转运动柔性梁的一次近似动力学方程分别表示为[16]:

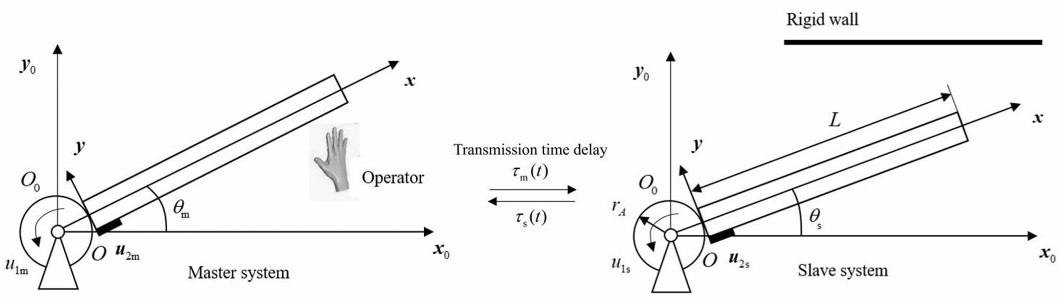

图 1　遥操作旋转运动柔性梁系统
Fig. 1　Teleoperation rotating flexible beam system

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_{\theta\theta\mathrm{m}} & \hat{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{m}} \\ \hat{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{m}} & \hat{\boldsymbol{M}}_{qq\mathrm{m}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\mathrm{m}} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{m}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{g}_{1\mathrm{m}}(\theta_{\mathrm{m}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{m}},\dot{\theta}_{\mathrm{m}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{m}}) \\ \boldsymbol{g}_{2\mathrm{m}}(\theta_{\mathrm{m}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{m}},\dot{\theta}_{\mathrm{m}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{m}}) + \hat{\boldsymbol{K}}_{qq\mathrm{m}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{m}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_{1\mathrm{m}}(t) \\ \boldsymbol{u}_{2\mathrm{m}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\mathrm{h}}(t) \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_{\theta\theta\mathrm{s}} & \hat{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{s}} \\ \hat{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{s}} & \hat{\boldsymbol{M}}_{qq\mathrm{s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\mathrm{s}} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{s}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{g}_{1\mathrm{s}}(\theta_{\mathrm{s}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{s}},\dot{\theta}_{\mathrm{s}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{s}}) \\ \boldsymbol{g}_{2\mathrm{s}}(\theta_{\mathrm{s}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{s}},\dot{\theta}_{\mathrm{s}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{s}}) + \hat{\boldsymbol{K}}_{qq\mathrm{s}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{s}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_{1\mathrm{s}}(t) \\ \boldsymbol{u}_{2\mathrm{s}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{\mathrm{e}}(t) \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,下标 m 表示主端系统,s 表示从端系统;θ_{i} 分别为主端和从端系统的大范围运动角位移($\mathrm{i}=\mathrm{m,s}$);$\boldsymbol{q}_{\mathrm{i}}(t)$ 为 n 维模态坐标向量,$\boldsymbol{q}_{\mathrm{i}}(t)=[q_{1\mathrm{i}}(t),q_{2\mathrm{i}}(t),\cdots,q_{n\mathrm{i}}(t)]^{\mathrm{T}}$;$\hat{M}_{\theta\theta\mathrm{i}}$ 为主从端旋转柔性梁的转动惯量;$\hat{\boldsymbol{M}}_{qq\mathrm{i}}$ 表示柔性梁横向振动的广义弹性质量阵;$\hat{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{i}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{i}}$ 代表大范围运动和弹性变形之间的非线性惯性耦合阵;$\hat{\boldsymbol{K}}_{qq\mathrm{i}}$ 为刚度矩阵;$\boldsymbol{g}_{1\mathrm{i}}(\theta_{\mathrm{i}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{i}},\dot{\theta}_{\mathrm{i}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{i}})$、$\boldsymbol{g}_{2\mathrm{i}}(\theta_{\mathrm{i}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{i}},\dot{\theta}_{\mathrm{i}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{i}})$ 与广义惯性力有关,具体形式可参考文献[16];$\boldsymbol{u}_{1\mathrm{i}}(t)$ 为作用于机械臂的控制力矩,$\boldsymbol{u}_{2\mathrm{i}}(t)$ 为所施加在柔性梁上的模态控制力矩;u_{h} 表示主端所受到操作人员施加的外部力矩,u_{e} 表示从端所受到的外界环境的作用力矩,具有如下形式[9,17]:

$$u_{\mathrm{h}} = u_{\mathrm{h0}} - c_{\mathrm{h}}\dot{\theta}_{\mathrm{m}} - k_{\mathrm{h}}\theta_{\mathrm{m}} \tag{3}$$

$$u_{\mathrm{e}} = u_{\mathrm{e0}} + c_{\mathrm{e}}\dot{\theta}_{\mathrm{s}} + k_{\mathrm{e}}\theta_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

其中,u_{h0}、u_{e0} 分别表示外部操作者和外界环境施加在主从端关节上的等效力矩;k_{h}、k_{e} 和 c_{h}、c_{e} 分别表示主端与操作者、从端与外界环境间相互作用力的等效刚度和等效阻尼系数.

考虑方程(3)和方程(4),并对方程(1)和方程(2)进行线性化,得到遥操作系统的线性化动力学方程为:

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}\ddot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{u}_{\mathrm{h0}} - \boldsymbol{C}_{\mathrm{h}}\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{h}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}\ddot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{e0}} - \boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{e}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{y}_{\mathrm{i}} = [\theta_{\mathrm{i}},\boldsymbol{q}_{\mathrm{i}}]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{M}_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} J_{\mathrm{Hi}} + J_{\mathrm{Bi}} & \bar{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{i}} \\ \bar{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{i}} & \hat{\boldsymbol{M}}_{qq\mathrm{i}} \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{i}} \end{bmatrix}$,$J_{\mathrm{Hi}}$ 为关节转动惯量,J_{Bi} 为梁的转动惯量,$\bar{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{i}}$ 和 $\bar{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{i}}$ 分别表示 $\hat{\boldsymbol{M}}_{\theta q\mathrm{i}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{M}}_{q\theta\mathrm{i}}$ 中忽略时变项后的常值阵,$\bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{i}}$ 为旋转柔性梁的常值广义弹性刚度阵,详见参考文献[16]:

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} u_{1\mathrm{i}} \\ \boldsymbol{u}_{2\mathrm{i}} \end{bmatrix},\boldsymbol{u}_{\mathrm{h0}} = \begin{bmatrix} u_{\mathrm{h0}} \\ 0 \end{bmatrix},\boldsymbol{u}_{\mathrm{e0}} = \begin{bmatrix} u_{\mathrm{e0}} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{h}} = \begin{bmatrix} c_{\mathrm{h}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}} = \begin{bmatrix} c_{\mathrm{e}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\boldsymbol{K}_{\mathrm{h}} = \begin{bmatrix} k_{\mathrm{h}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{e}} = \begin{bmatrix} k_{\mathrm{e}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2 控制器设计和稳定性分析

如图 1 所示,遥操作系统通信网络中存在时滞,旋转运动柔性梁遥操作系统中主端与从端之间的误差可定义为:

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{m}}(t) - \boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}(t - \tau_{\mathrm{s}}(t)) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}(t) - \boldsymbol{y}_{\mathrm{m}}(t - \tau_{\mathrm{m}}(t)) \tag{8}$$

其中:$0 < \tau_{\mathrm{m}}(t) < h_{\mathrm{m}}$, $|\dot{\tau}_{\mathrm{m}}| < u_{\mathrm{m}}$, $0 \leqslant u_{\mathrm{m}} \leqslant 1$;$0 < \tau_{\mathrm{s}}(t) < h_{\mathrm{s}}$, $|\dot{\tau}_{\mathrm{s}}| < u_{\mathrm{s}}$, $0 \leqslant u_{\mathrm{s}} \leqslant 1$.

控制设计的目的是使得从端系统尽可能快地跟踪主端系统的运动,并同时抑制柔性结构的振动,考虑误差(7)和误差(8),如图 2 所示设计主端控制律和从端控制律分别如下:

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} = -\boldsymbol{K}_{\mathrm{pm}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{dm}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{vm}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{m}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}} = -\boldsymbol{K}_{\mathrm{ps}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{ds}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{vs}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{s}} \tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{K}_{\mathrm{di}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{pi}}$ 和 $\boldsymbol{K}_{vi}$ 为控制增益,且 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{li}} = \mathrm{dig}(k_{\mathrm{l1}}, k_{\mathrm{l2}}, \cdots, k_{\mathrm{ln}}) > 0\ (1 = d, p, v)$.

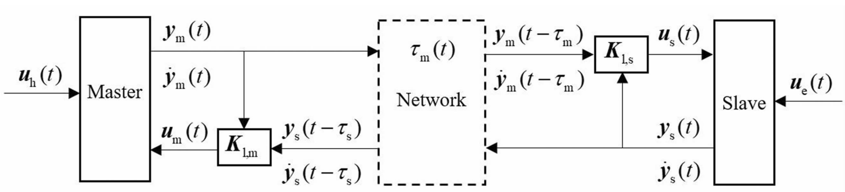

图 2 闭环遥操作系统控制示意图

Fig. 2 Control block diagram of closed-loop teleoperation system

将控制律(9)和控制律(10)代入系统动力学方程(5)和方程(6)中,并令 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} = \boldsymbol{M}_{\mathrm{i}}\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{i}}$,可以得到遥操作系统闭环动力学方程:

$$\dot{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{m}} = -(\boldsymbol{K}_{\mathrm{pm}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{h}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{m}})\boldsymbol{y}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{\beta}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{pm}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}(t - \tau_{\mathrm{s}}) + \boldsymbol{K}_{\mathrm{vm}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}(t - \tau_{\mathrm{s}}) + \boldsymbol{u}_{\mathrm{h0}} \tag{11}$$

$$\dot{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = -(\boldsymbol{K}_{\mathrm{ps}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{e}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{s}})\boldsymbol{y}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{\beta}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{ps}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{m}}(t - \tau_{\mathrm{m}}) + \boldsymbol{K}_{\mathrm{vs}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{m}}(t - \tau_{\mathrm{m}}) - \boldsymbol{u}_{\mathrm{e0}} \tag{12}$$

其中:$\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{dm}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{vm}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}M_{\mathrm{m}}^{-1} + \boldsymbol{C}_{\mathrm{h}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}^{-1}$, $\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{ds}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{vs}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}^{-1} + \boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}^{-1}$.

考虑系统(11)和系统(12)的稳态运动为 $\boldsymbol{y}_{\mathrm{i}}^{*}$,引入扰动变量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{y}_{\mathrm{m}}^{*}$ 和 $x_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{y}_{\mathrm{s}}^{*}$,则方程(11)和方程(12)对应的扰动方程为:

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}(t - \tau_{\mathrm{s}}(t)) \tag{13}$$

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}(t - \tau_{\mathrm{m}}(t)) \tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{\mathrm{i}} \\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{i}}\dot{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{i}} \end{bmatrix}$,

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}} = \begin{bmatrix} 0 & \boldsymbol{M} - 1_{\mathrm{m}} \\ -\boldsymbol{K}_{\mathrm{pm}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{h}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{m}} & -\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{m}} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \boldsymbol{K}_{\mathrm{pm}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{vm}} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}} = \begin{bmatrix} 0 & \boldsymbol{M} - 1_{\mathrm{s}} \\ -\boldsymbol{K}_{\mathrm{ps}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{e}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{s}} & -\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{s}} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{s}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \boldsymbol{K}_{\mathrm{ps}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{vs}} \end{bmatrix}.$$

由于扰动方程(13)和方程(14)的零解与遥操作闭环系统的稳态解完全等价,因此下面考虑采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函对闭环系统稳定性进行分析,同时设计相应的控制律. 选取如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函[9]:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \tag{15}$$

其中:

$$V_1 = \boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}$$

$$V_2 = \frac{1}{1 - \mu_{\mathrm{m}}}\int_{t-\tau_{\mathrm{m}}(t)}^{t}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}(s)\mathrm{d}s + \frac{1}{1 - \mu_{\mathrm{s}}}\int_{t-\tau_{\mathrm{s}}(t)}^{t}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}(s)\mathrm{d}s$$

$$V_3 = \int_{-h_{\mathrm{m}}}^{0}\int_{t+\theta}^{t}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta + \int_{-h_{\mathrm{s}}}^{0}\int_{t+\theta}^{t}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta$$

其中,$\boldsymbol{P}$ 为对称正定矩阵.

将 V_1 关于时间 t 沿扰动方程(13)和方程(14)求导得:

$$\dot{V}_1 = 2\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}} + 2\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}(t - \tau_{\mathrm{s}}) + 2\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}} + 2\boldsymbol{X}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}(t - \tau_{\mathrm{m}}) \tag{16}$$

方程(16)利用不等式关系 $2\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \leqslant \boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M} - 1\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}M\boldsymbol{b}$,有

$$\dot{V}_1 \leqslant 2\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{X}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{X}_{\mathrm{m}} +$$

$$X_s^T(t-\tau_s)PX_s(t-\tau_s)+2X_s^TPA_sX_s+X_s^TPB_sP^{-1}B_s^TPX_s+X_m^T(t-\tau_m)PX_m(t-\tau_m) \tag{17}$$

将 V_2 关于时间 t 沿扰动方程(13)和方程(14)求导,可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \frac{1}{1-\mu_m}(X_m^TPX_m-X_m^T(t-\tau_m)P X_m(t-\tau_m)(1-\dot{\tau}_m))+\frac{1}{1-\mu_s}(X_s^TPY- X_s^T(t-\tau_s)PX_s(t-\tau_s)(1-\dot{\tau}_s))\leqslant \\ &\frac{1}{1-\mu_m}X_m^TPX_m-X_m^T(t-\tau_m)PX_m(t-\tau_m)+\frac{1}{1-\mu_s}X_s^TPY-X_s^T(t-\tau_s)PX_s(t-\tau_s)\end{aligned} \tag{18}$$

将 V_3 关于时间 t 沿扰动方程(13)和方程(14)求导得:

$$\dot{V}_3 = h_mX_m^TPX_m-\int_{t-h_m}^{t}X_m^T(t+\theta)PX_m(t+\theta)\mathrm{d}\theta+h_sX_s^TPX_s-\int_{t-h_s}^{t}X_s^T(t+\theta)PX_s(t+\theta)\mathrm{d}\theta\leqslant h_mX_m^TPX_m+h_sX_s^TPX_s \tag{19}$$

整理方程(17)~方程(19),可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}&\leqslant X_m^T(2PA_m+PB_mP-1B_m^TP+\left(\frac{1}{1-\mu_m}+h_m)P\right)X_m+X_s^T(2PA_s+PB_sP^{-1}B_s^TP+(\frac{1}{1-\mu_s}+h_s)P)X_s= \\ &X_m^T\Pi_mX_m+X_s^T\Pi_sX_s\end{aligned} \tag{20}$$

显然,当 Π_m,Π_s 均为负定矩阵时, $\dot{V}<0$,闭环控制系统渐进稳定.为获得相应控制器增益 K_{di} , K_{pi} 和 K_{vi} ,考虑 $P=I$ 的情况,所设计的控制增益需满足关系为:

$$\mathrm{Re}\,(\lambda_{max}(\hat{\Pi}_m))<0 \tag{21}$$

$$\mathrm{Re}\,(\lambda_{max}(\hat{\Pi}_s))<0 \tag{22}$$

其中, $\hat{\Pi}_m=A_m+A_m^T+B_mB_m^T+(\frac{1}{1-\mu_m}+h_m)I$, $\hat{\Pi}_s=A_s+A_s^T+B_sB_s^T+(\frac{1}{1-\mu_s}+h_s)I$.

3　多目标优化控制设计

方程(21)和方程(22)所得到的控制增益能够保证遥操作闭环控制系统稳定,但无法判断所给出的控制增益的控制效果,而且在直接求解控制增益上有一定的困难.控制设计要求从端系统较好地跟踪主端系统的运动,同时能够有效地抑制柔性结构的振动,这两个目标之间存在一定的矛盾.为协调这一矛盾,同时获得具体的最优控制增益集,下面基于方程(21)和方程(22)采用基于胞映射的多目标优化控制设计方法[15]进行控制设计.

由于方程(21)和方程(22)具有相同的形式,为减少多目标优化计算时间,假定主端和从端具有相同的控制增益, K_{vi} 中对角线元素相同均为 k_v ,考虑一阶模态,则所设计的控制增益向量为:

$$K=[k_{p1},k_{p2},k_{d1},k_{d2},k_v]^T \tag{23}$$

其中,元素 k_{p1} , k_{p2} , k_{d1} , k_{d2} 分别为方程(9)和(10)中 K_{pi} 和 K_{di} 的对角线元素,且控制增益满足约束关系方程(21)和方程(22).

遥操作系统多目标优化设计问题可表述为:

$$\min_{k\in Q}\{t_{s,\theta},e_{IAE}\} \tag{24}$$

其中, $t_{s,\theta}$ 为主端柔性梁的振动趋向于0所需时间, e_{IAE} 为主从端大范围运动误差绝对值的积分,即

$$e_{IAE}=\int T_{ss_0}\mid\theta_m(\hat{t})-\theta_s(\hat{t})\mid\mathrm{d}\hat{t} \tag{25}$$

其中, T_{ss} 为系统大范围运动趋近稳定状态的时间.

4　数值仿真

为验证所设计控制器的有效性,进行数值仿真验证.考虑主端旋转运动梁与从端旋转运动梁参数相同的情况,旋转关节半径为0.03 m,对转轴转动惯量为0.000765 kg·m^2 ,柔性梁尺寸为0.7 m×0.0395 m×0.0018 m ,材料密度为2150 kg/m^3 ,弹性模量为28.0 GPa .

首先采用基于胞映射的多目标优化控制设计,此时假定从端环境自由,外界操作者施加在主端关节上的力矩为0.04 N·m ,操作者与主端相互作用力的等效刚度为0.1 N·m/rad ,从而保证主端大范围运动角度为0.4 rad时操作者施加在主端的力矩为零.为便于优化,最大时滞量 $h_m=0.5$ s 和 $h_s=0.4$ s 为优化过程中遥操作系统的信号传输时滞,时滞变化率均为零.选取参数空间如下:

$$Q=\{K\in R^5\mid[-0.0275,-17.8275,1.51,1.51,-0.0375]\leqslant_pK\leqslant_p[0.1275,20,2.51,202,0.1875]\} \tag{26}$$

将参数空间划分为3×5×4×8×3个胞,对多目标优化控制目标(24)的约束条件为:

$$[t_{s,\theta},e_{IAE}] \leqslant_{p} [17\ s, 0.7\ rad] \tag{27}$$

同时控制增益之间的关系需要满足方程(21)和方程(22).

通过优化在给定区间内得到的 Pareto 最优解集共8组,表1给出某一项指标最优时所获得的控制增益.图3给出了多目标优化所得到的最优解与对应目标函数之间的关系.利用表1和图3,可以根据需要选择合适的控制增益参数对遥操作系统进行有效的控制.由于将方程(21)和方程(22)引入多目标优化设计,原本1440个单元需要约2880min的计算量减少仅需计算208个单元为416min,极大地节省了多目标优化的时间.

表1 极端控制设计所对应控制增益

Table 1 The control gains corresponding to the two extreme performance objectives

K_{p1}	K_{p2}	K_{d1}	K_{d2}	K_v	e_{IAE}	$t_{s,\theta}$
0.1081	3.4505	1.6767	61.6570	0.15	0.3496	9.7360
6.94×10^{-2}	-1.2780	1.6767	21.5590	0.15	0.4491	6.7410

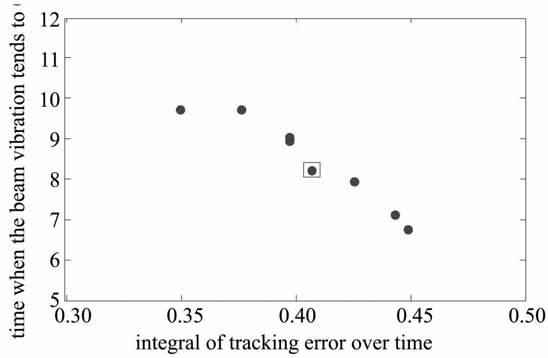

图3 Pareto 解集与控制目标关系图

Fig. 3 Pareto optimal set and control target

为更好地说明控制的有效性,$K=[0.1081,-1.2780,2.3433,21.5590,0.15]$为图3中框点对应的控制增益,其控制目标为$[t_{s,\theta},e_{IAE}]=[8.2220\ s,0.4066\ rad]$.相比控制增益中不考虑$\boldsymbol{K}_{vi}$的情况,所对应的控制目标为$[t_{s,\theta},e_{IAE}]=[8.2780\ s,0.4172\ rad]$,本文所设计的控制器取得了更好的控制效果.

然后考虑外部操作者施加在主端关节上的等效力矩u_{h0}的不同对控制效果的影响.假定系统运动工况与多目标优化时相同,即从端环境自由,操作者与主端相互作用力的等效刚度为0.1 N·m/rad.图4给出了外界操作者施加在主端关节上的等效力矩分别为0.04 N·m,0.06 N·m,0.08 N·m以及0.10 N·m时的控制响应.由图4可以看出,所设计的控制器能够保证遥操作系统的控制效果,但随着主端关节处施加力矩的增大,主从端系统响应的跟踪时间及相对误差也会增加,可见随主端受驱动运动角速度的增大,受时间延迟影响,从端在控制下跟踪的难度会随之加大.

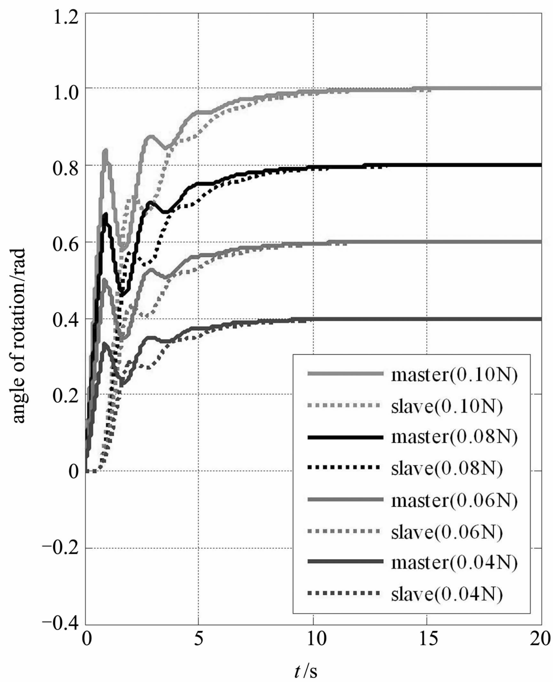

图4 主端不同操作力矩时系统主从端响应

Fig. 4 Tracking responses of the master and slave with different operation torques in the master system

下面考虑不同工况下控制效果的有效性,在0~20s内系统处于自由状态,即主从端系统初始位置不同,主端操作者和从端环境无外部施加力,主端关节初始转角为0,从端关节转角为0.3rad;20~40s内从端与外界环境间作用力中$k_e=0.1$ N·m/rad,40~60s内从端环境受到等效力矩$u_{e0}=0.02$ N·m.图5给出了信号传输时滞量为常时滞$\tau_m=0.5$ s,$\tau_s=0.4$ s时主从端系统关节转角和柔性梁末端变形跟踪曲线和跟踪误差曲线.图6给出了信号传输时滞量为时变时滞$\tau_m=(0.25+0.125\sin(0.02t))$ s,$\tau_s=(0.2+0.1\sin$

$(0.02t)$) s 时主从端系统跟踪情况. 由图 5 和图 6 可以看出，在受到时滞和从端外部环境的影响时，本文所提出的方法能够使得从端系统有效地跟踪主端系统的运动.

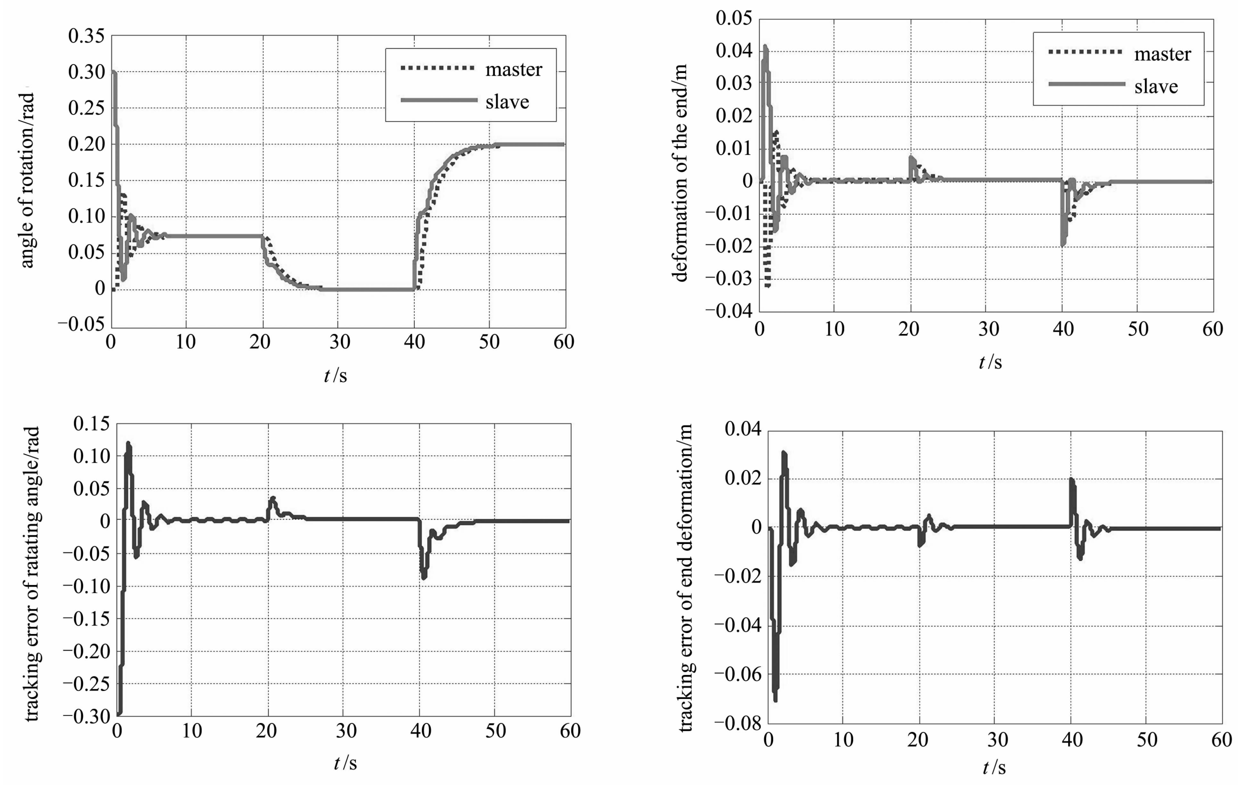

图 5　主从端旋转柔性梁关节转角和梁末端跟踪曲线（τ_m = 0.5 s，τ_s = 0.4 s）

Fig. 5　Tracking of joint rotating angle and end deformation of the master and slave rotating flexible beam（τ_m = 0.5 s，τ_s = 0.4 s）

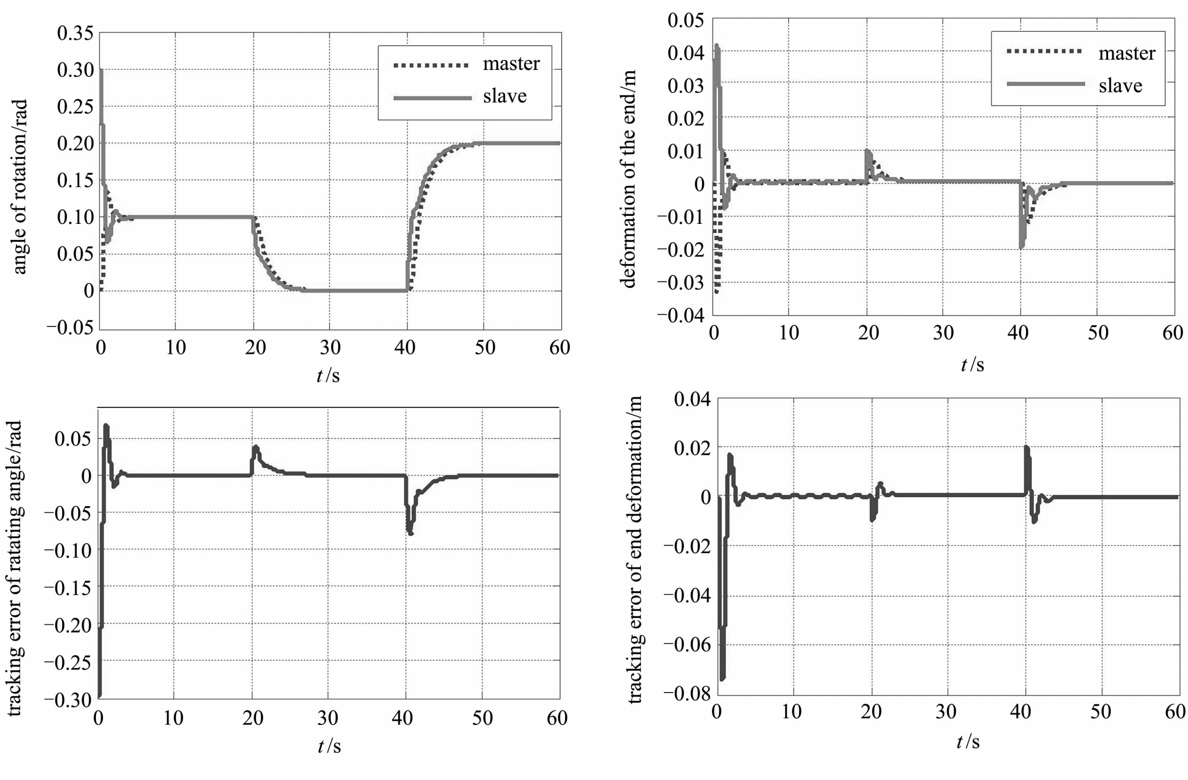

图 6　时变时滞下主从端旋转柔性梁关节转角和梁末端跟踪曲线

（$\tau_m = (0.25 + 0.125\sin(0.02t))$ s，$\tau_s = (0.2 + 0.1\sin(0.02t))$ s）

Fig. 6　Tracking of joint rotating angle and end deformation of the master and slave rotating flexible beam with time－varying time delay

（$\tau_m = (0.25 + 0.125\sin(0.02t))$ s，$\tau_s = (0.2 + 0.1\sin(0.02t))$ s）

考虑从端与刚性墙壁接触的情况，假定主从端机械臂初始时均处于 $\theta_m = \theta_s = 0.4$ rad 位置，主端操作者在柔性梁末端 y_0 方向施加大小为 0.005 N 的力使系统开始运动，当从端柔性梁末端运动到 $y_0 = 0.4$ m 处梁末端与刚性墙壁发生接触，为保证接触后柔性梁与墙壁不再发生分离，通过仿真定义该接触为 $F_e = 20\times(y-y_0)$ N，其中 y 为从端梁末端在 y_0 方向上位移[18]，然后将接触力当作外力考虑，等效为控制力矩施加于方程(5)和方程(6)中，仿真中信号传输时滞量为 $\tau_m = 0.5$ s，$\tau_s = 0.4$ s. 图 7 给出了遥操作系统与刚性墙壁发生碰撞时主从端关节转角和末端变形跟踪情况. 由图中可以看出，大约 6s 从端机械臂与墙面发生接触，由于传输时滞和主端受到恒定力的影响，主端继续运动，当从端信号返回主端后，主端在控制力的作用下停止移动，从端与刚性壁的接触情况及时反馈到主端系统. 仿真结果可以看出系统稳定后主从端系统保持固定有界的跟踪误差且柔性部件的弹性振动得到有效的抑制，反映了所设计控制器的有效性.

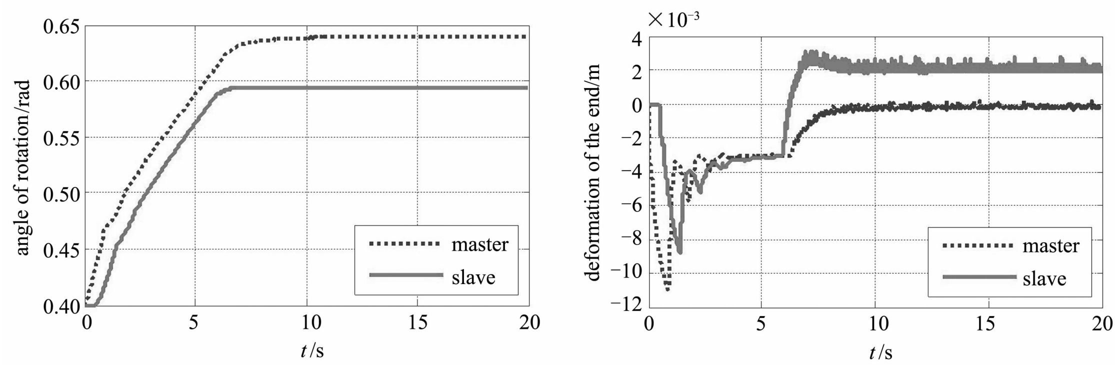

图 7　与刚性墙壁发生接触，主从端旋转柔性梁关节转角和梁末端跟踪曲线

Fig. 7　Tracking of joint rotating angle and end deformation of the master and slave rotating flexible beam when contacting with rigid wall

最后考虑主从端结构参数存在差异的情况，假定其他参数相同的情况下，改变从端柔性机械臂尺寸为 0.9 m × 0.0295 m × 0.0018 m，此时主从端柔性梁一阶固有频率分别为 13.10 Hz 及 7.92 Hz. 首先对主从端刚度不同的遥操作系统进行多目标优化控制设计. 多目标优化中参数空间、空间划分及优化目标与方程(26)和方程(27)相同. 通过优化得到的 Pareto 最优解集共 11 组，图 8 给出了多目标优化所得到的最优解与对应目标函数之间的关系，从图3和图8中可以看出，当主从端结构参数出现差异时，与主从端结构参数相同的遥操作系统相比，Pareto 解集中控制系统跟踪时间和跟踪误差都会增加，因此更需要选择合适的控制增益对遥操作系统进行控制. 然后利用图 8 框点处所对应的控制增益 $\boldsymbol{K} = [0.1081, -1.2780, 2.0100, 21.5590, 0.15]$ 进行主从端结构不同工况下的数值仿真，由图 9所示主从端跟踪情况可以看出，当主从端梁柔性存在差异时，本文所提出的控制方法能够使得从端系统有效地跟踪主端系统的运动.

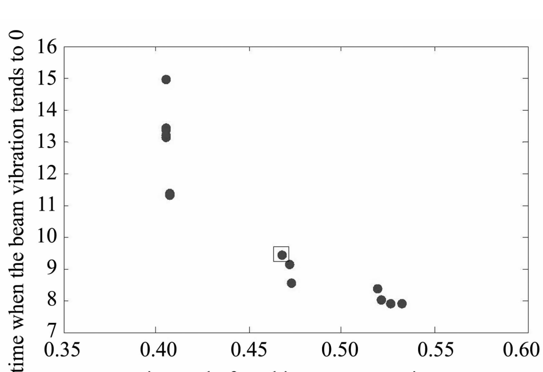

图 8　Pareto 解集与控制目标关系图

Fig. 8　Pareto optimal set and control target

5　结论

基于稳定性理论，本文采用多目标优化控制方法对遥操作旋转运动柔性梁系统进行双边控制研究. 首先利用 Lyapunov 稳定性理论获得保证遥操作闭环控制系统稳定的条件，然后采用多目标优化控制设计获得有效控制遥操作系统的控制增益. 研究表明稳定性条件能够有效地减少多目标优化的计算时间，而基于胞映射的多目标优化方法能够在所给参数空间获得满足控制目标的 Pareto 最优控制增益集，能够更有效地对遥操作系统进行控制. 考虑时滞变化和从端刚性接触的仿真结果表明本

文所获得的控制增益能够保证从端系统对主端系统进行有效的跟踪,而且从端环境的变化能够及时有效地反馈到主端系统.

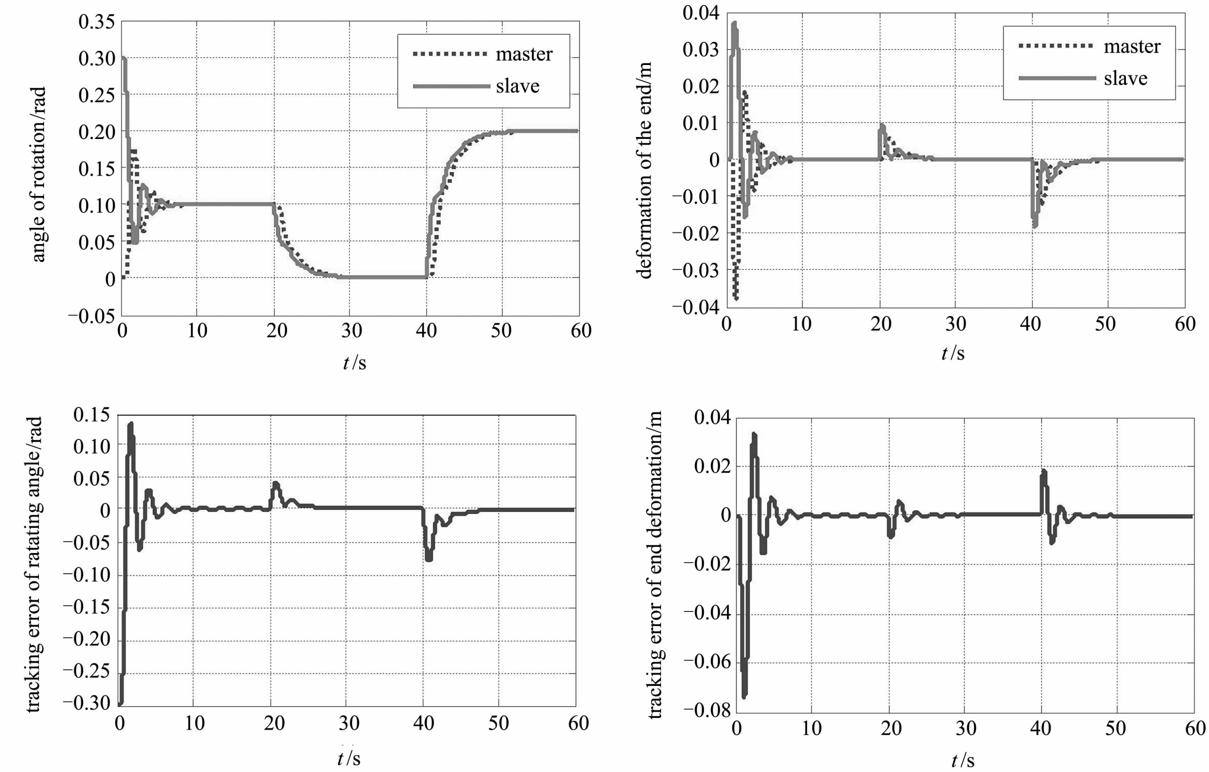

图 9　主从端旋转柔性梁关节转角和梁末端跟踪曲线(主从端参数不同时)
Fig. 9　Tracking of joint rotating angle and end deformation of the master and slave rotating flexible beam (When the parameters of master and slave system are different)

参　考　文　献

1　刘宏,李志奇,刘伊威,等. 天宫二号机械手关键技术及在轨试验. 中国科学:技术科学,2018,48:1313 ~ 1320(Liu H,Li Z Q,Liu Y W,et al. Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments. *Scientia Sinaca Technologica*. 2018,48:1313 ~ 1320(in Chinese))

2　宋爱国. 人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究. 科技导报,2015,33(23): 100 ~ 109(Song A G. Research on human-robot interaction telerobot with force telepresence. *Sicence & Technology Review*, 2015, 33(23):100 ~ 109(in Chinese))

3　张涛,陈章,王学谦,等. 空间机器人遥操作关键技术综述与展望. 空间控制技术与应用,2014,40(6):1 ~ 9(Zhang T,Chen Z,Wang X Q,et al. Overview and prospect of key technologies of teleoperation of space robot. *Aerospace Control and Application*,2014,40(6):1 ~ 9(in Chinese))

4　Anderson R J,Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transaction on Automatic Control*,1989,34(3):494 ~ 503

5　徐效农. 空间机器人地面遥操作的关键技术研究. 南京:东南大学,2017(Xu X N. Research on technologies of ground teleoperation for space robot. Nanjing: Southeast University,2017(in Chinese))

6　庄骏,邱平,孙增圻. 大时延环境下的分布式遥操作系统. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(1):80 ~ 83(Zhuang J, Qiu P, Sun Z Q. Distributed telerobotic system with large time delay. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*,2000,40(1):80 ~ 83(in Chinese))

7　Wang Z W,Lam H K,Xiao B,et al. Event-Triggered Prescribed-Time Fuzzy Control for Space Teleoperation Systems Subject to Multiple Constraints and Uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(9): 2785 ~ 2797

8　薛载敬. 基于模型预测的力反馈遥操作控制策略研究. 北京:北京邮电大学,2020(Xue Z J. Research on force feedback teleoperation control strategy based on model prediction. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications,2020(in Chinese))

9　Ebrahimi Bavili R,Farajzadeh Bavil A,Akbari A. Control of a bilateral teleoperation system in the presence of varying time delay. *Internation Journal of Dynamics and Control*,2020,9(12):1261 ~ 1276

10　刘永,郑鹏,丑武胜. 未知环境下不确定遥操作系统的自适应控制. 控制工程,2015,22(6):1063 ~ 1068(Liu

Y, Zheng P, Chou W S. Adaptive control for uncertain tele-operation system in unknown environment. *Control Engineering of China*, 2015, 22(6): 1063 ~ 1068 (in Chinese))

11 吴广鑫. 空间机器人遥操作系统及局部自主技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019 (Wu G X. Research on space robot teleoperation system and local autonomous technology. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese))

12 Nguyen T V, Liu Y C. Advanced finite-time control for bilateral teleoperators with delays and uncertainties. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119578

13 Wang Z W, Tian Y, Sun Y C, et al. Finite-time output-feedback control for teleoperation systems subject to mismatched term and state constraints. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(16): 11421 ~ 11447

14 Zhang H C, Song A G, Li H J, et al. Novel adaptive finite-time control of teleoperation system with time-varying delays and input saturation. *IEEE Trans Cybern*, 2021, 51(7): 3724 ~ 3737

15 Hernάndez C, Naranjani Y, Sardahi Y, et al. Simple cell mapping method for multiobjective optimal PID control design. *International Journal of Dynamics and Control*, 2013, 1 (3): 231 ~ 238

16 Cai G P, Teng Y Y, Lim C W. Active control and experiment study of a flexible hub-beam system. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26 (2): 289 ~ 298

17 Islam S, Liu P X, Saddik A E, et al. Bilateral shared autonomous systems with passive and nonpassive input forces under time varying delay. *ISA Transactions*, 2015, 54(16): 218 ~ 228

18 Du H P. Brief paper -H_∞ state-feedback control of bilateral teleoperation systems with asymmetric time-varying delays. *IET Control Theory & Applications*, 2013, 7(4): 594 ~ 605

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION CONTROL OF TELEOPERATION ROTATING BEAM SYSTEM*

Li Xiaole[1] Chen Longxiang[1†]

(1. *School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract In this paper, the rotating flexible beam is taken as the research object, and the bilateral control problem for teleoperation systems is investigated via the multi-objective optimization method based on cell mapping. Firstly, the dynamic equation of the rotating flexible beam system in teleoperation system is established. Then, the master controller and slave controller are designed considering the time delays in network transmission and the tracking error signal between the master and slave, and use the Lyapunov stability theory to obtain the conditions of control gains that must be met to ensure the stability of the closed-loop control system. Finally, the stability of the system does not mean a good control performance, the multi-objective optimization method based on cell mapping is used to optimize the control design, and the optimal solution set of the control gains satisfying multiple different goals at the same time is obtained. The simulation results show that the obtained control gains can realize the effective tracking between the master and slave beam in the teleoperation system effectively, and the operator can feel the change of the environment of slave system in time.

Key words teleoperation, time delay, rotating flexible beam, multi-objective optimization, bilateral control

---

Received 15 October 2021, revised 5 November 2021.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11972223)

† Corresponding author E-mail: chenlx@sjtu.edu.cn