

柔性关节机械臂不确定性及灵敏度分析*

李园园¹, 陈国平², 孙东阳³, 高勇², 王成¹

(1. 济南大学机械工程学院 济南, 250022)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(3. 重庆大学航空航天学院 重庆, 400044)

摘要 为了得到整个时间域内参数的不确定性对系统响应的影响,以双连杆柔性关节机械臂为研究对象,通过比较响应的 95%置信区域上下边界之间以及每组置信区域之间的距离分析了具有随机不确定性、认知不确定性以及混合不确定性的参数对系统响应的影响。其中,概率论方法和区间方法分别用来处理参数的随机和认知不确定性,而参数的混合不确定性采用改进的双层循环蒙特卡罗方法处理。仿真结果表明参数的随机不确定性包含于混合不确定性分析中,因此考虑参数的混合不确定性能更具体地分析参数的不确定性对系统响应的影响,从而提高系统的可靠性设计。另外,该不确定性分析方法为分析参数在整个时域内对系统响应的灵敏度提供了理论依据。

关键词 柔性关节机械臂; 95%置信区域; 不确定性; 灵敏度

中图分类号 TH113; TB114

引言

柔性关节机械臂以其速度快、负载/自重比大以及对有人环境或复杂环境的适应性强而得到很快的发展。目前,柔性关节模型基本上都是在 Spong^[1]模型的基础上发展起来的。该模型将关节柔性等效为 1 根线性弹簧,从而得到全局线性反馈的刚柔关节机器人模型。文献[2-5]对柔性关节机械臂做了进一步的研究,综合考虑各种因素,提出了比 Spong 模型更精确的建模方法,建立了全面的柔性关节动力学模型。这些柔性关节模型都是建立在确定性参数基础上的,即把建模过程中的各种参数都作为确定性数据进行处理。实际上,柔性关节的简化建模中存在诸多不确定性的因素(如关节等效弹簧刚度、电机转子转动惯量等参数的不确定性),从而使传统的确定性模型得到的系统响应与试验结果之间存在很大差距。因此,柔性关节机械臂建模中考虑参数的不确定性,并分析这些不确定性参数对响应的影响很有必要。

通常意义上,不确定性分为随机不确定性和认知不确定性两大类^[6]。前者是结构或构件的固有特性,可以被量化但是无法避免或人为消除;后者是由认知上的不足引起的,可以通过完善认知过程得到

减小甚至消除。传统的概率论方法^[7]已被广泛应用于处理参数的随机不确定性,而模糊集理论^[8]、区间分析^[9]、证据理论^[10]和可能性理论^[11]等已被应用于研究参数的认知不确定性。有文献表明,在分析不确定性参数对系统响应的影响时通常有两种方法:a. 求响应均值和标准差,以标准差来评判不确定性参数对系统响应的影响^[12-13];b. 由响应的概率分布求置信区域,以置信区域来评判不确定性参数对系统响应的影响^[14]。二十多年来,概率论方法已经广泛应用于结构动力学的不确定性建模中^[15-16],多体系统的不确定性研究也有了一定的发展,主要集中在车辆工程^[12, 17-19]、多刚体系统^[14]以及柔性多体系统^[13, 20]中。然而,这些有关多体系统不确定性的研究基本上都只考虑了参数的随机不确定性,对于实际工程结构中存在的认知不确定性则鲜少考虑,或只在一些涉及多体系统的可靠性研究中考虑了参数的认知不确定性^[21],甚至提出了区间变量和随机变量同时存在时系统的可靠性分析方法。Sun 等^[22]在多体系统的磨损预测中针对参数存在的混合不确定性提出了改进的双层循环蒙特卡罗法,从整个时域内分析了不确定性参数对磨损性能的影响,提高了系统的可靠性设计。

机械系统设计时进行灵敏度分析,可以快速识别影响系统性能的关键参数。当考虑参数的统计分

* 国家自然科学基金资助项目(51475210);山东省高等学校科技计划资助项目(J17KA027)

收稿日期:2015-11-09;修回日期:2016-01-14

散性时,研究人员提出了不同的系统灵敏度计算方法,如基于均值 1 阶 Esscher's 近似的可靠性灵敏度分析^[23]。然而不管哪种计算方法,求得的灵敏度都只是特定时刻的结构性能参数对结构设计参数变化的敏感性。而在分析整个时域内参数的不确定性对系统响应的灵敏度时,这些方法存在一定的局限性。

鉴于此,笔者针对柔性关节机械臂的简化建模中存在的参数不确定性,通过求响应的 95% 置信区域,在整个时域内分析了参数分别为随机不确定性、认知不确定性以及混合不确定性时对系统响应的影响,并在此基础上分析了具有不确定性的参数在整个时域内对系统响应的灵敏度。

1 柔性机械臂动力学建模

双连杆柔性关节机械臂简化模型如图 1 所示,其中关节柔性按照 Spong 模型等效为 1 根扭簧,连杆等效为刚性杆。柔性关节的电机转子受到驱动力矩的作用而运动,通过扭簧带动机械臂旋转。模型的相关参数如下: K_i 为 i 关节的等效扭簧刚度; J_{mi} 为 i 电机转子的转动惯量; J_i 为连杆 i 转动惯量; L_i 为连杆 i 长度; d_i 为关节 i 到连杆 i 质心的距离; m_i 为连杆 i 质量; θ_i 为连杆 i 转动角度; φ_{mi}, φ_i 分别为 i 电机经过减速器前后的转动角度,且 $\varphi_{mi} = N_i \varphi_i$; N_i 为 i 关节减速比; g 为重力加速度; τ_i 为 i 连杆外部力矩; τ_{mi} 为 i 关节驱动力矩 ($i=1,2$)。

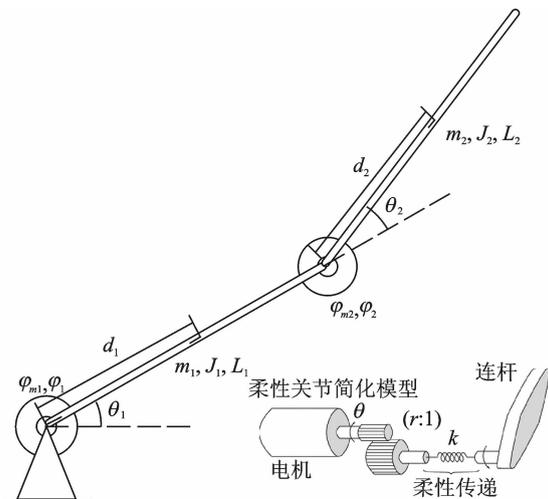


图 1 双连杆柔性关节机械臂模型图

Fig. 1 Model diagram of double link flexible joint manipulator

该系统的总动能由 4 部分构成:连杆 1 动能;连杆 2 动能;电机转子 1 动能;电机转子 2 动能。总动能的具体表达式为

$$T = \frac{1}{2} m_1 (d_1 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_{m1} N_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 [L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + d_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 d_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2] + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} m_{m2} L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_{m2} (\dot{\theta}_1 + N_2 \dot{\varphi}_2)^2 \quad (1)$$

该系统的总势能由关节等效扭簧的弹性势能和连杆的重力势能构成,总势能的具体表达式为

$$V = \frac{1}{2} K_1 (\theta_1 - \varphi_1)^2 + \frac{1}{2} K_2 (\theta_2 - \varphi_2)^2 + m_1 g d_1 \sin \theta_1 + m_2 g [L_1 \sin \theta_1 + d_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)] \quad (2)$$

将总动能和总势能代入 Lagrange 方程,同时考虑到电机转子的质量和转动惯量与连杆的质量和转动惯量相比小很多,整理可得柔性关节机械臂动力学方程为

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & m_2 d_2^2 + J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{m1} N_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{m2} N_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 & -K_1 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & -K_2 \\ -K_1 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & -K_2 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中:连杆 1 和连杆 2 的外部力矩 τ_i 假设均为 0; 2 个关节的驱动力矩 τ_{mi} 分别为 $0, 1 \times (1-t)$ 和 $0, 0.05 \times (1-t)$, t 为机械臂运动时间; M_{11} 为等效到连杆 1 转角上的总转动惯量; M_{12}, M_{21} 为连杆 1 转角与连杆 2 转角耦合的转动惯量; Q_1, Q_2 为离心惯性力和科式惯性力; G_1, G_2 为重力产生的外部扭矩。

参数的具体表达式为

$$M_{11} = m_1 d_1^2 + J_1 + J_2 + m_2 L_1^2 + m_2 d_2^2 + 2m_2 L_1 d_2 \cos \theta_2$$

$$M_{12} = M_{21} = J_2 + m_2 d_2^2 + m_2 L_1 d_2 \cos \theta_2$$

$$Q_1 = m_2 L_1 d_2 \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2$$

$$Q_2 = -m_2 L_1 d_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2$$

$$G_1 = -m_1 g d_1 \cos \theta_1 - m_2 g [L_1 \cos \theta_1 + d_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)]$$

$$G_2 = -m_2 g d_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)$$

上述各参数的确定性数值如表1所示。

表1 机械臂确定性参数性能

Tab. 1 Performance of deterministic parameter of manipulator

| 符号 | 数值 |
|---|-----------|
| $K_i / (\text{N} \cdot \text{m}) \cdot \text{rad}^{-1}$ | 10 |
| $J_{mi} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 10^{-7} |
| $J_i / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.001 4 |
| L_i / m | 0.3 |
| d_i / m | 0.15 |
| m_i / kg | 0.183 8 |
| N_i | 160 |

运用四阶龙格库塔法求解方程(3),得到连杆1和连杆2的转角 θ_1, θ_2 、减速后电机转子的转动角度 φ_1, φ_2 分别随时间的变化如图2所示。

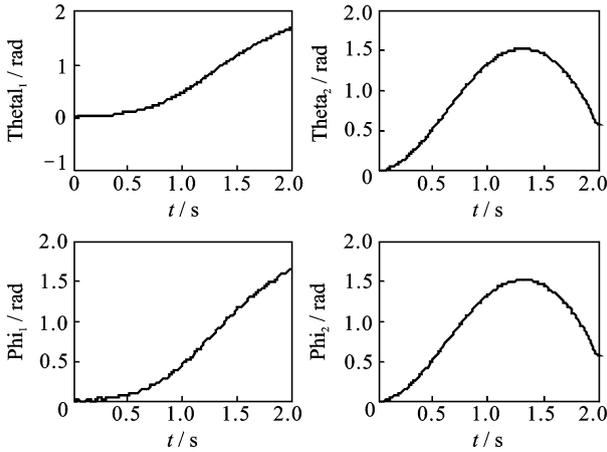


图2 连杆及电机转子转角的确定性解

Fig. 2 Definite solution of rotor angle of connecting rod and motor

上述解是在各参数精确确定时求得的,而在实际工程结构中,由于加工精度问题、试验条件限制和复杂环境的影响,这些输入参数都存在不确定性。因此,有必要分析参数的不确定性对系统动力学响应的影响。

2 不确定性分析

2.1 随机不确定性分析

有一部分不确定性参数可以通过试验找出其概率分布,这种参数的不确定性称为随机不确定性。笔者选用传统概率方法来处理随机不确定性,主要步骤如下。

1) 选择处理随机不确定性的抽样数量 N 。为了准确描述系统响应的分布,一般要求抽样数量 N

比较大。

2) 从每一个随机不确定性分布中选择一个样本。

3) 采用完整的抽样序列计算系统响应。

4) 判断随机不确定性的 N 个样本点是否已经完成计算系统响应,如果否,回到步骤3;如果是,继续步骤5。

5) 计算响应的均值和方差。

6) 求置信区域边界,其中置信区域的计算有两种方法:a.通过均值 μ 和标准差 σ ,以 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 作为置信区域;b.直接由响应求概率分布,再以置信度从2.5%到97.5%的响应区域为95%置信区域。

7) 将均值和置信区域边界画图显示,以分析随机不确定性参数对系统响应的影响。

2.2 认知不确定性分析

对于认知不确定性问题,通常采用非概率方法来处理,比如模糊集理论、区间分析、证据理论及可能性理论等。笔者选用区间分析方法来处理认知不确定性,其步骤1~4与传统概率方法相似,只是抽样时是对认知不确定性参数进行抽样,考虑到计算效率,笔者选用拉丁超立方抽样;步骤5按照系统响应求边界;步骤6将响应边界画图显示,以分析认知不确定性参数对系统响应的影响。

2.3 混合不确定性分析

当随机不确定性和认知不确定性参数同时存在时,概率边界法、2阶概率论方法和 Dempster-Shafer 证据理论常用来处理这种混合不确定性,而对于输出为时间响应的系统来说,上述方法存在局限性。笔者采用文献[23]提出的改进的双层循环蒙特卡罗法进行混合不确定性分析,具体步骤如下。

1) 选择处理认知和随机不确定性的样本点数量 M 和 N 。其中,为了能比较准确的描述系统响应分布,一般要求抽样数量 N 比较大,而 M 的抽样数量相对比较少。

2) 从参数的认知不确定性区间中选择一个样本。

3) 在给定步骤2中样本点的条件下,再依据随机不确定性参数的均值和方差选择一组含 N 个样本点的样本。

4) 采用完整的抽样序列计算系统响应。

5) 判断具有随机不确定性参数的 N 个样本点是否已经完成计算系统响应。如果否,回到步骤3;如果是,则继续步骤6。

6) 基于随机不确定性计算得到的 N 个系统响应,求各时刻系统响应的 95%置信区间。所有时刻置信区间的上下边界即为服从认知不确定性参数在取某一值时服从随机不确定性参数的 95%置信区域上下边界。

7) 判断具有认知不确定性参数的 M 个样本点是否已经完成计算系统响应。如果否,回到步骤 2;如果是,则继续步骤 8。

8) 将 M 对服从随机不确定性参数的响应 95%置信区域上下边界画在同一张图上,以显示具有一定置信度的系统响应的全体。找出置信区域中的最大上边界和最小下边界,则由最大上边界和最小下边界围成的区域即为考虑具有随机和认知不确定性参数的响应 95%置信区域,同时也显示了参数的混合不确定性对系统响应的影响。

3 柔性关节机械臂不确定性和灵敏度分析

假设该双连杆柔性关节机械臂在微重力条件工作,电机转子的转动惯量 J_m 和柔性关节的等效扭簧刚度 K 存在不确定性。笔者针对参数具有随机不确定性、认知不确定性以及混合不确定性 3 种情况,对该双连杆柔性关节机械臂的连杆转角和减速后电机转子转角进行不确定性分析。对于参数为随机不确定性的情况,认为参数 J_m 和 K 都服从正态分布;对于参数为认知不确定性的情况,认为参数 J_m 和 K 都为区间数;而混合不确定性则是上述两种情况的组合。3 种不确定性情况下的参数性能如表 2、表 3 所示。

表 2 随机和认知不确定性参数性能

Tab. 2 Performance of random and cognitive uncertainty parameter of manipulator

| 参数 | 随机不确定性 | 认知不确定性 |
|----------|---|--|
| K_1 | $N(10, 1^2)$ | [8,12] |
| K_2 | $N(10, 1^2)$ | [8,12] |
| J_{m1} | $N(1 \times 10^{-7}, (1 \times 10^{-8})^2)$ | $[0.8 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7}]$ |
| J_{m2} | $N(1 \times 10^{-7}, (1 \times 10^{-8})^2)$ | $[0.8 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7}]$ |

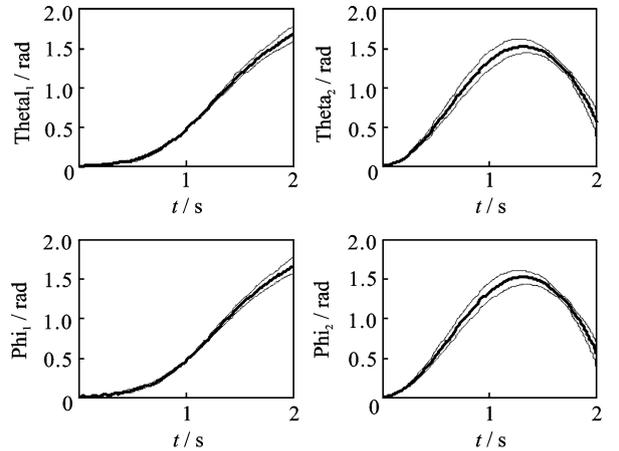
表 3 混合不确定性参数性能

Tab. 3 Performance of hybrid uncertainty parameter of manipulator

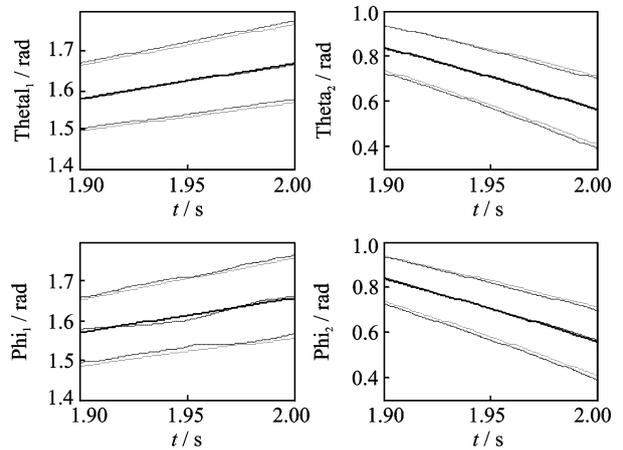
| 参数 | 混合不确定性 1 | 混合不确定性 2 |
|----------|--|---|
| K_1 | $N(10, 1^2)$ | [8,12] |
| K_2 | $N(10, 1^2)$ | [8,12] |
| J_{m1} | $[0.8 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7}]$ | $N(1 \times 10^{-7}, (1 \times 10^{-8})^2)$ |
| J_{m2} | $[0.8 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-7}]$ | $N(1 \times 10^{-7}, (1 \times 10^{-8})^2)$ |

3.1 参数为随机不确定性

当参数 J_m 和 K 都满足随机不确定性时,相应的参数属性如表 2 所示。采用传统的蒙特卡罗抽样技术分别对其抽样 500 次。根据 2.1 节列出的分析随机不确定性参数对系统响应的影响步骤, J_m 和 K 分别作为随机不确定性参数时连杆转角和减速后电机转子转角的均值、标准值及两种方法的置信区域边界如图 3、图 4 所示。其中: Θ_{a1}, Θ_{a2} 表示连杆的转动角度 θ_i ; Φ_{i1}, Φ_{i2} 表示减速后电机转子转角 φ_i 。



(a) 总体结果曲线
(a) Overall result curve



(b) 局部放大图
(b) Local enlarged drawing

..... 95%置信区域边界; —— 2倍标准差边界;
----- 标准值; —— 均值

图 3 考虑电机转子转动惯量的随机不确定性时连杆和电机转子转角的均值、标准值及两种方法的置信区域边界

Fig. 3 Mean value, standard value and confidence region boundary from two methods for the rotor angle of connecting rod and motor rotor considering the random uncertainty of rotor's rotation inertia

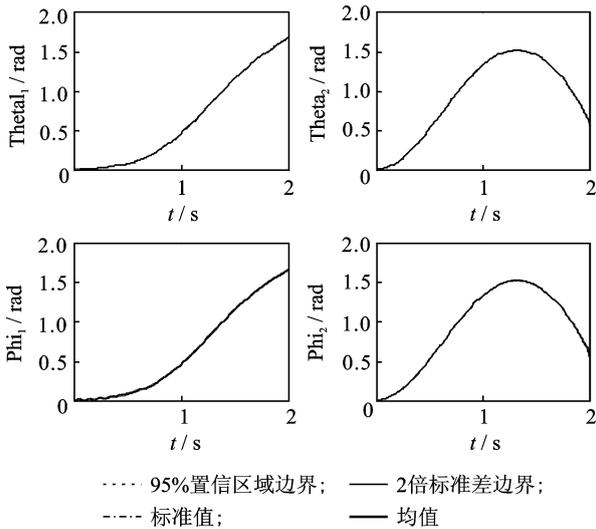


图 4 考虑关节等效扭簧刚度的随机不确定性时连杆和电机转子转角的均值、标准值及两种方法的置信区域边界

Fig. 4 Mean value, standard value and confidence region boundary from two methods for the rotor angle of connecting rod and motor rotor considering the random uncertainty of joint equivalent torsion spring stiffness

对比图 3(a)和图 4 可以发现,图 3(a)中响应的 95%置信区域比图 4 要宽,即在 0~2s 内的任意时刻由关节等效扭簧刚度的不确定性引起的电机转子和连杆转角的变化量比电机转子转动惯量的不确定性要小,说明电机转子转动惯量的随机不确定性对连杆转角和电机转子转角的影响比关节等效扭簧刚度的不确定性影响要大。所以,在实际工程中可以不考虑关节等效扭簧刚度的不确定性影响,而应该尽量建立更精确的电机转子模型,以减小其不确定性对响应结果的影响。同时,上述现象也说明了在系统响应的 95%置信区域内电机转子的转动惯量在整个时间域内对连杆和电机转子转角的灵敏度较大。另外,由图 3(b)的局部放大图可以看出,响应的均值曲线和标准值曲线几乎重合,这说明在后续的计算中,参数在均值状态下的响应输出可以作为系统输出的标准值。由 $\mu - 2\sigma$ 和 $\mu + 2\sigma$ 构成的置信区域边界(两倍标准差边界)以及由系统响应的概率分布求得的 95%置信区域边界几乎重合,表明在量化不确定性参数对系统响应的影响时这两种方法是等效的。

3.2 参数为认知不确定性

参数 J_m 和 K 的认知不确定性参数属性如表 2

所示,当给定参数的区间时,得到的响应也应该是一个区间。这里采用拉丁超立方抽样方法分别抽样 400 次,并将样本点依次代入动力学方程,求出响应的最大值和最小值。此时,连杆转角和减速后电机转子转角的标准值及响应边界如图 5、图 6 所示。

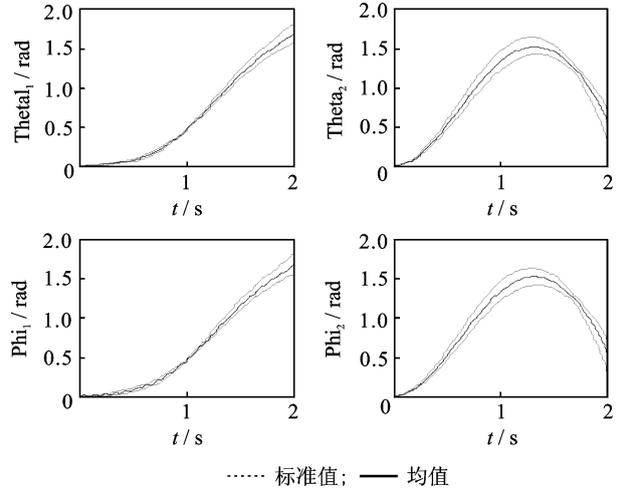


图 5 考虑电机转子转动惯量的认知不确定性时连杆和电机转子转角的标准值及边界

Fig. 5 Standard value and boundary of the rotor angle of connecting rod and motor rotor considering the cognitive uncertainty of rotor's rotation inertia

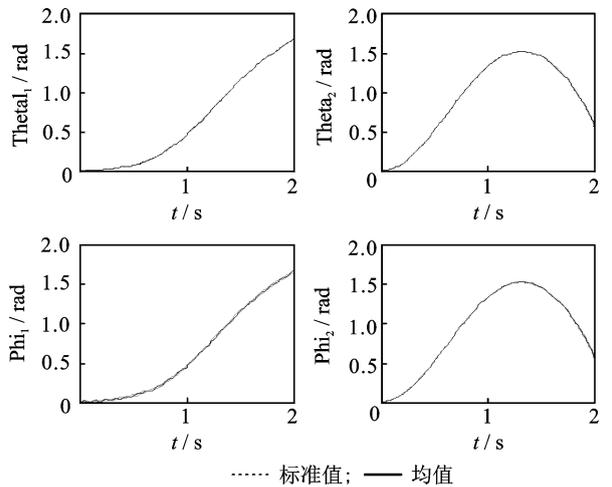


图 6 考虑关节等效扭簧刚度的认知不确定性时连杆和电机转子转角的标准值及边界

Fig. 6 Standard value and boundary of the rotor angle of connecting rod and motor rotor considering the cognitive uncertainty of joint equivalent torsion spring stiffness

对比图 5 与图 6 可以看出,当参数具有认知不确定性特性时,图 5 中的响应区域比图 6 要宽,表明关节等效扭簧刚度 K 的认知不确定性在任意时刻

对连杆转角和电机转子转角的影响比电机转子转动惯量 J_m 要小,或者说电机转子的转动惯量在整个时间域内对响应的灵敏度要大。此结论与考虑参数具有随机不确定性特性时相同,这说明无论存在哪种不确定性,参数对系统响应的敏感程度是确定的。

3.3 参数为混合不确定性

参数 J_m 和 K 的混合不确定性分析分两种情况进行讨论,如表 3 所示。当混合不确定性 1 存在时,参数 K 具有随机不确定性,参数 J_m 具有认知不确定性;而当混合不确定性 2 存在时,参数 K 和 J_m 则分别具有认知不确定性和随机不确定性。针对上述两种情况,采用改进的双层循环蒙特卡罗技术进行混合不确定性分析,计算步骤如 2.3 节所示。在计算模拟过程中,将具有认知不确定性的参数放在外层循环中,而将具有随机不确定性的参数放于内层循环。采用拉丁超立方抽样方法对具有随机不确定性的参数抽取 500 个样本点,对具有认知不确定性的参数抽取 10 个样本点。参数具有混合不确定性时连杆转角和减速后电机转子转角的 95% 置信区域边界以及混合边界的局部放大图如图 7、图 8 所示。

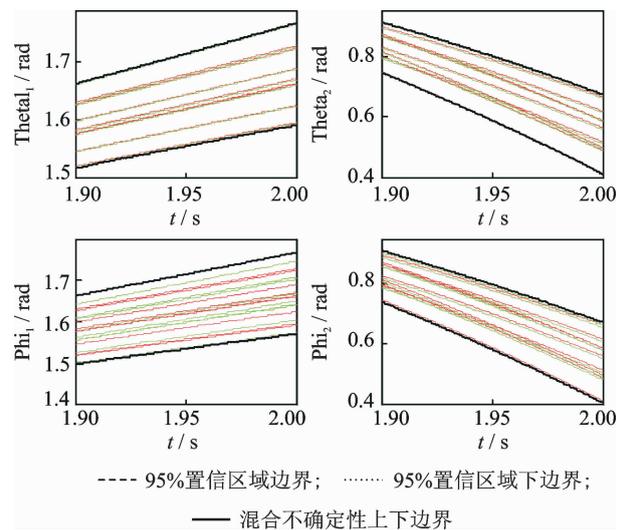


图 7 混合不确定性 1 条件下连杆和电机转子转角的 95% 置信区域边界及混合边界

Fig. 7 95% confidence region boundary and mixed boundary of the rotor angle of connecting rod and motor rotor under mixed uncertainty 1

由图 7 可以看出,在混合不确定性 1 的条件下,响应的 95% 置信区域上下边界并没有像文献[23]那样出现明显的分层,而是几乎重合或交错出现

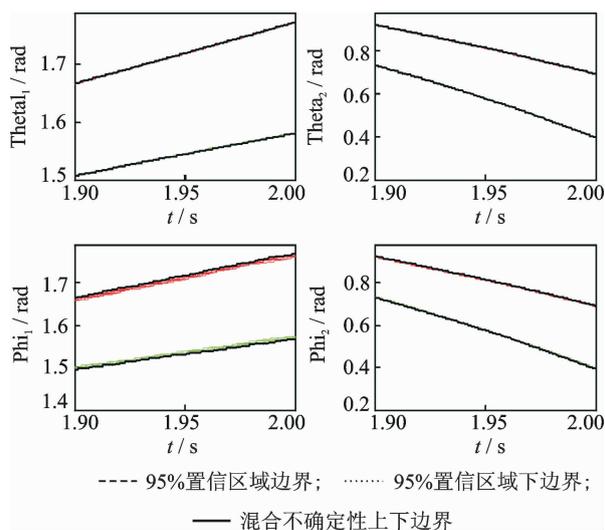


图 8 混合不确定性 2 条件下连杆和电机转子转角的 95% 置信区域边界及混合边界

Fig. 8 95% confidence region boundary and mixed boundary of the rotor angle of connecting rod and motor rotor under mixed uncertainty 2

(Θ_{1} , Θ_{2} 和 Φ_{2} 的置信区域上下边界几乎重合, Φ_{1} 的置信区域上下边界交错出现),这说明参数 K 的随机不确定性对系统响应的影响比较小,从而使响应的置信区域比较窄。当交错出现时,每组置信区域上下边界之间就存在一定的距离,此时参数的随机不确定性对系统响应的影响相对比较大,因此,关节等效扭簧刚度 K 的随机不确定性对 Φ_{1} 的影响比其他 3 个响应输出的影响要大。由图 7 还可以看出,每组置信区域之间存在一定的距离且距离不尽相同,这是由参数 J_m 的认知不确定性对输出响应的影响较大引起的,距离越大, J_m 的影响也就越大;因此,电机转子转动惯量 J_m 的认知不确定性对 Φ_{2} 以及 Θ_{1} 和 Θ_{2} 的影响比对 Φ_{1} 的影响要大。

由图 8 可以看出,在混合不确定性 2 的条件下,响应的 95% 置信区域上下边界出现了明显的上下分层,上下边界之间的距离变大,置信区域变宽,说明了参数 J_m 的随机不确定性对响应的影响比较大。但是转角 Φ_{2} , Θ_{1} 和 Θ_{2} 的每组置信区域上(下)边界几乎重合,而转角 Φ_{1} 的每组置信区域上(下)边界之间有一定的距离,分别对应每组置信区域之间的距离较小和较大的情况。这些现象说明参数 K 的认知不确定性对 Θ_{1} , Θ_{2} 以及 Φ_{2} 的影响比对 Φ_{1} 的影响要小,而参数 J_m 的随机不确定性对 Θ_{1} , Θ_{2} 以及 Φ_{2} 的影响比

对 Φ_1 要大。

总之,通过对参数 J_m 和 K 的混合不确定性分析发现,无论电机转子转动惯量 J_m 存在随机不确定性还是认知不确定性,在整个时域内其对连杆 2 的转角 Φ_2 以及两个电机转子的转角 Θ_{a1} 和 Θ_{a2} 的灵敏度都比较大,对连杆 1 的转角 Φ_1 的灵敏度相对较小。而关节等效扭簧刚度 K 无论存在随机不确定性还是认知不确定性,在整个时域内其对连杆 2 的转角 Φ_2 以及两个电机转子的转角 Θ_{a1} 和 Θ_{a2} 的灵敏度都相对较小,对连杆 1 的转角 Φ_1 的灵敏度却相对较大。

另外,由混合不确定性上下边界可以看出,同时考虑参数的随机和认知不确定性得到的置信区域边界比只考虑参数的随机不确定性时得到的边界要宽。因此,在对非线性机械系统进行分析时同时考虑这两种不确定性的影响,将使系统工作时更加安全。

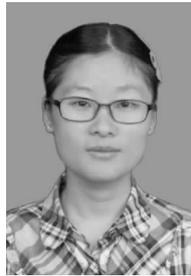
4 结束语

针对参数存在随机不确定性、认知不确定性以及混合不确定性 3 种情况,对双连杆柔性关节机械臂系统进行了不确定性分析,研究了具有不同不确定性特性的参数在整个时间域内对系统响应的灵敏度。使用 2 倍标准差边界及 95% 的置信区域边界分析了随机不确定性参数对系统响应的影响,发现这两种分析方法是等价的。当参数存在随机不确定性或认知不确定性时,关节等效扭簧刚度 K 在任意时刻对连杆和电机转子转角的影响比电机转子转动惯量 J_m 都要小,或者说电机转子转动惯量 J_m 对响应的灵敏度较大,因此在设计时应建立精确的电机转子模型。当随机不确定性和认知不确定性同时存在于系统参数中时,电机转子转动惯量 J_m 对连杆 2 的转角 Φ_2 以及两个电机转子的转角 Θ_{a1} 和 Θ_{a2} 的影响(灵敏度)比对连杆 1 的转角 Φ_1 的影响(灵敏度)要大,而关节等效扭簧刚度 K 对 Φ_2, Θ_{a1} 和 Θ_{a2} 的影响(灵敏度)比对 Φ_1 的影响(灵敏度)要小。由此可见,考虑参数的混合不确定性能更具体地分析在整个时域内参数对不同输出响应的影响,因此在对机械系统进行整个时域内的灵敏度分析时,为使系统工作时更加安全,应尽量考虑参数的混合不确定性。

参 考 文 献

- [1] Spong M W. Modelling and control of elastic joints robots [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(6): 310-319.
- [2] Ider S K, Özgören M K. Trajectory tracking control of flexible-joint robots [J]. Computers and Structures, 2000, 76: 757-763.
- [3] Subudhi B, Morris A S. Dynamic modelling, simulation and control of a manipulator with flexible links and joints [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 41: 257-270.
- [4] Dado M H F, Al-Huniti N S, Eljabali A K. Dynamic simulation model for mixed-loop planar robots with flexible joint drives [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36: 547-559.
- [5] Li Degao, Zu J W, Goldenberg A A. Dynamic modeling and mode analysis of flexible-link, flexible-joint robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 1031-1044.
- [6] 方圣恩, 林友勤, 夏樟华. 考虑结构参数不确定性的随机模型修正方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 832-837.
Fang Shengen, Lin Youqin, Xia Zhanghua. Stochastic model updating method considering the uncertainties of structural parameters [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 832-837. (in Chinese)
- [7] Hacking I. An introduction to probability and inductive logic [M]. New York: Cambridge University Press, 2001:56-108.
- [8] Ross T J. Fuzzy logic with engineering applications [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2004:23-40.
- [9] Jaulin L, Kieffer M, Didrit O, et al. Applied interval analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 2001:5-50.
- [10] Shafer G A. Mathematical theory of evidence [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976:3-40.
- [11] Dubois D. Possibility theory and statistical reasoning [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51: 47-69.
- [12] Schmitt K P, Anitescu M, Negrut D. Efficient sampling for spatial uncertainty quantification in multibody system dynamics applications [J]. International Jour-

- nal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 80: 537-564.
- [13] Wang Shuxin, Wang Yanhui, He Baiyan. Dynamic modeling of flexible multibody systems with parameter uncertainty [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 36: 605-611.
- [14] Batou A, Soize C. Rigid multibody system dynamics with uncertain rigid bodies [J]. Multibody System Dynamics, 2012, 27: 285-319.
- [15] Soize C. Random matrix theory and non-parametric model of random uncertainties in vibration analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 263: 893-916.
- [16] Schuëller G I. On the treatment of uncertainties in structural mechanics and analysis [J]. Computers & Structures, 2007, 85: 235-343.
- [17] Li Lin, Sandu C. On the impact of cargo weight, vehicle parameters, and terrain characteristics on the prediction of traction for off-road vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44: 221-238.
- [18] Sandu A, Sandu C, Ahmadian M. Modeling multibody systems with uncertainties. part I: theoretical and computational aspects [J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15: 373-395.
- [19] Sandu A, Sandu C, Ahmadian M. Modeling multibody systems with uncertainties. part II: numerical applications [J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15(3): 241-262.
- [20] 何柏岩,冯妃,王树新. 计及不确定性的多体系统动力学研究 [J]. 河北工业大学学报, 2005, 34(4): 7-14. He Baiyan, Feng Yi, Wang Shuxin. Study on the dynamics of multibody systems with uncertainty [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2005, 34(4): 7-14. (in Chinese)
- [21] 杜丽,肖宁聪,黄洪钟,等. 认知不确定性的谐波齿轮减速器可靠性分析研究 [J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(3): 470-475. Du Li, Xiao Ningcong, Huang Hongzhong, et al. Reliability analysis approach of harmonic drive under epistemic uncertainty [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(3): 470-475. (in Chinese)
- [22] Sun Dongyang, Chen Guoping, Wang Tiecheng, et al. Wear prediction of a mechanism with joint clearance involving aleatory and epistemic uncertainty [J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2014, 136(4): 041101.
- [23] 张艳林,张义民,金雅娟,等. 基于均值一阶 Esscher's 近似的可靠性灵敏度分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 168-172. Zhang Yanlin, Zhang Yimin, Jin Yajuan, et al. Reliability sensitivity analysis based on mean value first order esscher's approximation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6): 168-172. (in Chinese)



第一作者简介:李园园,女,1986年3月生,博士、讲师。主要研究方向为含间隙多体系统动力学建模及可靠性优化设计。

E-mail:gyailiyuanyuan@163.com