

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.08.028

基于小车位置的起重机吊重系统扩张状态观测器设计^①

钟 斌¹, 蒋 猛²

1. 中国人民武装警察部队工程大学 装备工程学院 特种装备研究所, 西安 710086;

2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为了获取起重机吊重系统状态变量的估计信息, 全维重构系统状态空间, 通过坐标变换, 将起重机吊重系统转换为等效的标准积分串联型系统, 以唯一测量的小车位置信息作为输入, 针对起重机吊重积分串联型系统设计扩张状态观测器, 并将起重机吊重系统复杂的建模动态、外部干扰等因素扩张成新的状态变量, 将观测器状态变量通过坐标反变换获得起重机吊重系统的估计状态向量, 实现系统状态空间的重构。仿真实验表明: 各状态变量误差收敛时间不超过 0.2 s; 当连续幂次函数的线性区间长度范围为 (0, 0.01] 时, 观测器能有效地重构系统状态空间; 观测器对系统参数的变化具有良好的鲁棒性。

关键词: 起重机吊重系统; 扩张状态观测器; 状态空间; 重构

中图分类号: TH213; TP271

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2014)8-0173-05

起重机吊重防摇控制系统中需要实时获取小车位置与速度、吊重摆角与摆角角速度等状态变量信息^[1-3], 由于吊重与起重机小车的柔性联接结构^[4-6], 直接用传感器测量吊重摆角存在一定难度, 安装传感器现场测量状态变量信息也会增加控制系统成本。因此, 为了获得起重机吊重系统状态变量的估计信息, 一直寻求基于观测器的理论与方法, 对起重机吊重系统状态空间进行重构。通过实际应用表明, 文献[1]采用极点配置方法设计的状态观测器仅在吊重小摆角、系统参数范围确定及无干扰条件时效果良好, 这主要是由于: ① 观测器的设计完全依赖于起重机吊重系统动力学模型; ② 观测器的设计是针对具有确定参数简化的线性模型, 且所设计的观测器本质上也是线性的, 因此, 观测器的有效性具有一定的实用范围。

扩张状态观测器是一种新型的非线性状态观测器^[7-8]。通过把系统中的内外扰动、系统未建模动态等扩张成新的二阶状态, 再利用特定的非光滑非线性误差反馈, 然后选择适当的观测器参数, 得到系统所有状态的观测值^[9-10], 也包括对象模型的不确定性和未知扰动的观测值。针对文献[1]观测器设计的不足, 本文设计了起重机吊重系统扩张状态观测器, 将起重机吊重系统复杂的建模动态、外部干扰等因素扩张成新

① 收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005246)。

作者简介: 钟 斌(1975-), 男, 四川万源人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机电系统智能控制、军事装备理论及其应用方面的研究。

的状态变量, 惟一利用现场测量的小车位置信息, 得到小车位置与速度、吊重摆角与角速度等状态变量的估计信息, 从而实现重构系统状态空间. 本文的设计方法几乎完全克服了文献[1]基于极点配置的观测器设计方法的不足, 具有更广泛、更实际的工程应用价值.

1 起重机吊重系统扩张状态观测器设计

扩张状态观测器本身是一个动态过程, 只需原对象的输入—输出信息, 无需描述对象传递关系函数的任何信息, 所以观测器的设计并不依赖于确定的系统动态模型. 扩张状态观测器的作用本质是由被观测系统观测出该系统的各阶导数, 并且可以将系统的已建模动态、未建模动态和外部干扰作用等因素扩张成新的状态变量. 为此, 将起重机吊重系统模型转换为等效的积分串联型标准系统.

1.1 起重机吊重系统模型

起重机吊重系统几何模型的建立及动力学模型的建立过程参见文献[1], 动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a(-\frac{1}{2}mg\sin 2x_3 + mlx_4^2\sin x_3 + u) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{a}{l}[\frac{1}{2}mgx_4^2\sin 2x_3 + (M+m)g\sin x_3 + u\cos x_3] \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: 起重机吊重系统状态向量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, 其中 $x_1 = x$ 为小车位置(m), $x_2 = \dot{x}$ 为小车速度(m/s), $x_3 = \theta$ 为吊重摆角(rad), $x_4 = \dot{\theta}$ 为吊重摆角角速度(rad/s); 系数 $a = (M + m\sin^2 x_3)^{-1}$; M 和 m 分别为小车和吊重质量(kg); l 为起升绳长(m); g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; $u = F$ 为小车驱动力输入(N).

1.2 基于小车位置信息的扩张状态观测器设计

令 $f_1(\mathbf{x})$ 、 $f_2(\mathbf{x})$ 、 $f_3(\mathbf{x})$ 和 $f_4(\mathbf{x})$ 分别为式(1) 等号右边各式, 如果 u 存在二阶导数, 令

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{x}, u) = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}f_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}f_2 + \frac{\partial f_1}{\partial x_3}f_3 + \frac{\partial f_1}{\partial x_4}f_4 \\ g_2(\mathbf{x}, u) = \dot{g}_1(\mathbf{x}, u) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{g}_1(\mathbf{x}, u)$ 表示光滑函数 $g_1(\mathbf{x}, u)$ 的全导数, 下同.

对起重机吊重系统(1) 实行以下坐标变换, 并且这一变换是可逆的

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = a\left(\frac{1}{2}mg\sin 2x_3 + mlx_4^2\sin x_3 + u\right) \\ y_4 = -a^2\left(\frac{1}{2}mg\sin 2x_3 + mlx_4^2\sin x_3 + u\right)mx_4\sin 2x_3 + \\ \quad a\left\{mgx_4\cos 2x_3 + mlx_4^3\cos x_3 - 2amx_4\sin x_3\right. \\ \quad \left. + \left[\frac{1}{2}mlx_4^2\sin 2x_3 + (M+m)g\sin x_3 + u\cos x_3\right] + \dot{u}\right\} \end{cases} \quad (3)$$

于是, 由式(1)、式(2) 和式(3), 并令 $y_5 = \dot{g}_2(\mathbf{x}, u)$, 则可将原四阶系统(1) 转换并扩张成为等效的积分串

联型的五阶系统

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = y_3 \\ \dot{y}_3 = y_4 \\ \dot{y}_4 = y_5 \\ \dot{y}_5 = b(\mathbf{x}, u, \omega(t)) \\ y = y_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $b(\mathbf{x}, u, \omega(t))$ 称为系统(4) 的实时作用量, 包括系统已建模动态、未建模动态和外部干扰 $\omega(t)$.

由系统(4) 设计扩张状态观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}_1 = \hat{y}_2 - \beta_1 e \\ \dot{\hat{y}}_2 = \hat{y}_3 - \beta_2 \text{fal}(e, 0.5, \delta) \\ \dot{\hat{y}}_3 = \hat{y}_4 - \beta_3 \text{fal}(e, 0.25, \delta) \\ \dot{\hat{y}}_4 = \hat{y}_5 - \beta_4 \text{fal}(e, 0.125, \delta) \\ \dot{\hat{y}}_5 = -\beta_5 \text{fal}(e, 0.0625, \delta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_5$ 分别为 $y_1, \dots, y_5$ 的估计信息, 构成估计状态向量 $\hat{\mathbf{Y}} = [\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_5]^T$, $e = \hat{y}_1 - y_1$ 为估计误差; $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_5]^T$ 为观测器参数; $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 为原点附近具有线性段的连续幂次函数, 其中 $\alpha = 2^{-n}$ ($n = 1, 2, 3, 4$); δ 为线性段的区间长度, 且 $\delta > 0$.

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} s + |e|^\alpha (1-s) \text{sgn}(e) \quad (6)$$

式中: $s = 0.5(\text{sgn}(e+\delta) - \text{sgn}(e-\delta))$. $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 实际上是对控制工程界的一个经验总结: “大误差, 小增益; 小误差, 大增益” 的数学拟合.

由式(5) 可见, 只要合理选取参数 β 和 δ , 就能得出观测器的动态响应 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3, \hat{y}_4$, 即估计信息; 并且观测器只需小车位置输入, 无需精确的起重机吊重系统模型. 由估计信息根据式(3) 的坐标反变换, 可获得起重机吊重系统(1) 的估计状态向量 $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4]^T$, 从而重构系统(1) 的状态变量空间.

2 仿真实验

为了验证扩张观测器(5) 设计的合理性, 重构起重机吊重系统状态空间 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ 的有效性, 取系统参数: $M = 2\,000\text{ kg}$, $m = 5\,000\text{ kg}$, $l = 5\text{ m}$; 初始状态:

$$\mathbf{X}(0) = [0, 0, 0, 0]^T, \dot{\mathbf{Y}}(0) = [0, 0, 0, 0, 0]^T$$

小车驱动力 $F = 2\,000\text{ N}$. 经反复实验取 $\delta = 0.002$, $\beta = [1\,000; 3\,000; 80\,000; 9\,990\,000; 69\,900\,000]^T$.

图 1 为扩张观测器状态变量 $\hat{y}_1 \sim \hat{y}_4$ 经过坐标反变换得到状态变量 $\hat{x}_1 \sim \hat{x}_4$ 分别重构系统(1) 状态变量 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$ 的结果, 可见观测器能快速重构系统(4) 的状态变量, 从而实现起重机吊重系统状态空间重构. 图 2 为重构状态误差 $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$, $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$, $e_3 = x_3 - \hat{x}_3$, $e_4 = x_4 - \hat{x}_4$, 曲线表明各状态变量的误差收敛时间不超过 0.2 s , 进一步验证了观测器重构状态的快速性和有效性.

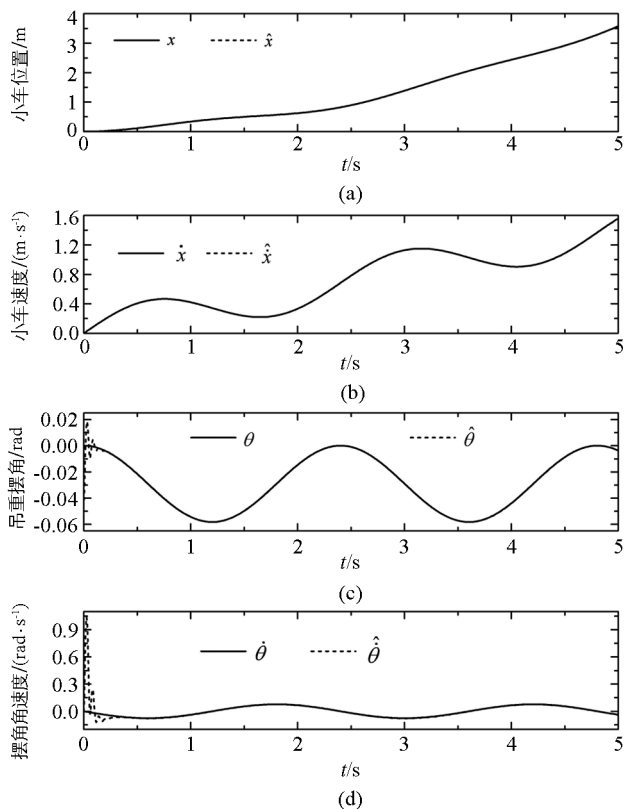


图 1 状态估计

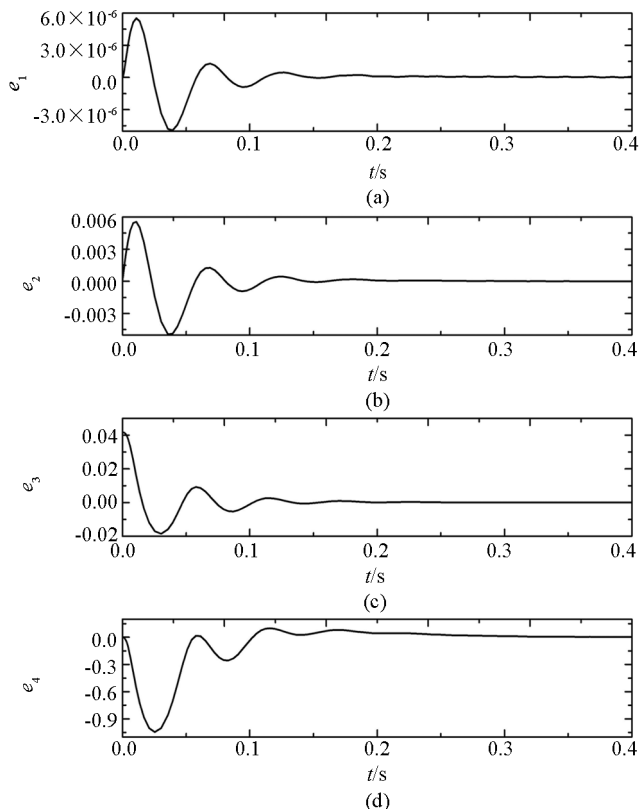


图 2 状态重构误差

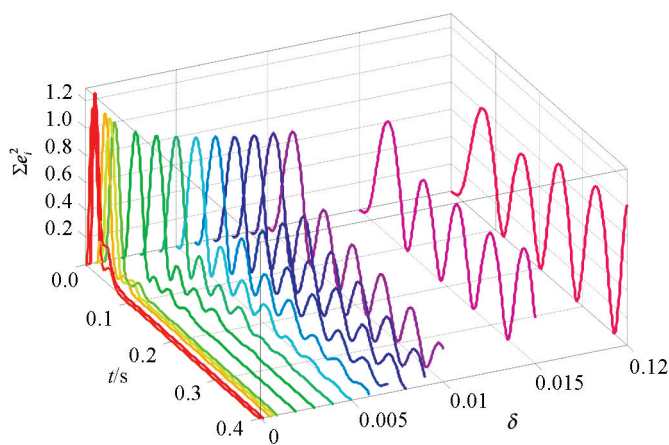
为了仿真研究幂次函数(6)中 δ 对观测器观测误差收敛速度的影响, 取 Σe_i^2 ($i=1, 2, 3, 4$) 作为状态变量综合误差指标如图 3, 仿真实验表明 δ 对 Σe_i^2 有较大的影响: 当 $0 < \delta \leq 0.01$ 时, Σe_i^2 收敛, 表明系统(1)各状态变量估计误差收敛, 在此区间, 随 δ 的增大, Σe_i^2 收敛的时间延长; 当 $\delta > 0.01$ 时, Σe_i^2 发散, 表明系统(1)各状态变量估计误差发散, 不能通过扩张观测器有效地重构起重机吊重系统状态空间. 由此可见, 合理选择 δ 是观测器设计有效的关键.

实验中发现观测效果几乎不受系统参数 M 、 m 、 l 的影响, 具有非常好的系统参数适应性, 这对文献[1]的结论而言, 具有很大的改进, 从而扩大了所设计扩张状态观测器的实用范围.

3 结 论

通过坐标变换, 起重机吊重四阶系统转换为积分串联型五阶系统, 将系统已建模动态、未建模动态和外部干扰等因素扩张成新的状态, 通过设计的扩张状态观测器能有效地全维重构起重吊重系统状态空间, 通过实验得到了如下结论:

- 1) 各状态变量误差收敛时间不超过 0.2 s, 观测器具有良好的快速状态观测性能;
- 2) 连续幂次函数的线性区间范围对状态变量综合误差的影响较大; 要使观测器能有效地重构系统状态空间, 线性区间长度的变化范围为 $(0, 0.01]$;
- 3) 扩张状态观测器相对于基于极点配置方法设计的线性观测器具有非常好的系统参数适应性, 这使

图 3 综合误差 Σe_i^2 ($i=1, 2, 3, 4$)

得本文的扩张状态观测器更具有工程应用价值。

另外, 本文对观测器参数的设置是通过反复实验试凑的方法, 所以下一步的研究重点: 一是观测器参数的理论优化设计; 二是观测器的物理实现。

参考文献:

- [1] 钟 斌, 赵 雁, 赵晓青. 基于状态估计的起重机吊重摆角信息获取方法 [J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 164—169.
- [2] 钟 斌. 桥门式起重机吊重摆角软测量及仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(9): 1985—1989.
- [3] 钟 斌. 铁路集装箱起重机液压减摇系统结构参数研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 133—137.
- [4] YANG BIN, XIONG BIN. Application of LQR Techniques to the Anti-Sway Controller of Overhead Crane [J]. Advanced Materials Research, 2010(139—141): 1933—1936.
- [5] LI Mao-qing. Controller Design for 2-DOF Under Actuated Mechanical Systems Based on Controlled Lagrangians and Application to the Acrobot Control [J]. Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China, 2009, 4(4): 417—439.
- [6] CHENG-YUAN C, SHIHWEI H, KUOHUNG C. A Practical Fuzzy Controllers Scheme of Overhead Crane. Journal of Control Theory and Applications, 2005(3): 266—270.
- [7] 姚 郁, 王宇航. 基于扩张状态观测器的机动目标加速度估计 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 11(31): 2682—2684, 2692.
- [8] 李永刚, 李星野, 史先鹏. 基于扩张状态观测器的一类未知非线性不确定系统滑模控制 [J]. 上海理工大学学报, 2010, 2(32): 111—114.
- [9] 陈文英, 褚福磊, 阎绍泽. 基于扩张状态观测器和非线性状态误差反馈设计自抗扰振动控制器 [J]. 机械工程学报, 2010, 3(46): 59—64.
- [10] 李天云, 朱建华, 刘智铭. 基于李雅普诺夫函数法的扩张状态观测器参数优化 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 1(17): 50—53.

Design of an Extended State Observer for the Crane-Load System Based on Trolley's Position Information

ZHONG Bin¹, JIANG Meng²

1. Research Inst. of Special Equipment, Equipment Engineering College, Engineering University of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China;

2. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to obtain the estimation information of the state variables of the crane-load system and full-dimensionally reconstruct its state space, an extended state observer was designed aiming at the crane-load's integral series type system through coordinate transformation. The extended state observer's input was the trolley's position information, and crane-load's modeled-dynamics and external disturbance were extended into a new state variable. The state space of the crane-load system could be reconstructed if the extended state observer's state variables were calculated through coordinate reverse transformation. Simulation experimental results showed that error's convergence time of each state variable was less than 0.2 s, that the extended state observer could effectively reconstruct the system's state space when the linear interval length's scope for the continuous power time function was 0, 0.01, and that the extended state observer had favorable robustness for the changes in the crane-load system parameters.

Key words: crane-load system; extended state observer; state space; reconstruction

