

质量弹簧系统的重构和容错控制研究*

董选明 谭 民

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

摘 要 针对质量弹簧系统, 提出一种基于状态监测和故障诊断(CMFD)的可重构和容错控制设计方法。重构和容错策略是根据 CMFD 和重构逻辑来切换预先设计的 4 个控制器。仿真表明, 该控制方法能有效地保证速度和位移的跟踪性能以及系统的稳定性, 且重构和容错速度快。

关键词 重构控制, 容错控制, 观测器组, 状态监测, 故障诊断, 切换控制

分类号 TP 302.8

Fault Tolerant- reconfigurable Control for a Mass- spring System

Dong Xuaming, Tan Min

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences)

Abstract A novel fault tolerant- reconfigurable control (FTRC) methodology is presented based on condition monitoring and fault diagnosis (CMFD) for the inherent dynamic changes and the anticipated faults of a mass- spring system. The strategy of the FTRC is that the four pre- designed controllers are switched according to the results of CMFD and switching logic. Simulations show that the proposed control scheme can insure the controlled system to be stable and have a good tracking performance of position and speed.

Key words reconfigurable control, fault tolerant control, observer bank, condition monitoring, fault diagnosis, switching control

1 引 言

重构控制(REC)是一种较新的控制系统设计方式。在故障情况下, 重构控制称为容错控制(FTC)。重构容错控制的发展是基于以下两种需求: 1) 需要控制结构性动态变化的对象, 即在整个工作范围内具有多个模型(态); 2) 在对象和控制器发生故障时要求完成满意的控制(稳定性和性能)。一个重构容错控制器可以改变其结构或参数, 以便补偿对象和控制器中的动态变化, 从而实现满意的控制性能; 而传统的控制器往往不能满足这种需求^[1, 2]。

容错控制设计分为两类: 被动容错控制方式^[3, 4]和主动容错控制方式^[5-7]。前者是指采用具有负反馈的自适应控制器或鲁棒控制器来实现的容错控

制, 它以系统的稳定性和完整性为主要目标; 后者是指以状态监测和故障诊断(CMFD)为前提, 重构或重建控制律的容错控制方法, 它以同时保持系统稳定性和改善系统性能为目标。主动容错控制能提高系统的可信性, 是容错控制发展的方向。

本文针对质量弹簧系统, 提出一种基于 CMFD 的可重构容错控制设计方法。对于预知故障, 根据 CMFD 的结果和重构逻辑来切换预先设计的控制律, 实现容错重构控制。

2 重构容错控制问题的提出

考虑图 1 所示质量弹簧系统^[1]。一质量 m 的物体悬挂于一上端固定的弹簧上。弹簧的弹性系数为 k , 原始长度为 l_0 。距固定点 h 以下是粘度系数为 c 的

* 教育部博士后科学基金项目(1998—6) 和国家攀登计划项目

1998 - 11 - 13 收稿, 1999 - 02 - 23 修回

流体。在没有任何外力的情况下, 质量 m 停留在距固定点 l 处, 即 $l = m g / k + l_0$ 。现对质量 m 施加一控制力 F_c , 使其按一定规律和要求运动。控制目标是:

- 1) 使质量 m 按图 1 的轨迹运动, 即质量 m 从 p_1 p_2 p_3 p_4 p_1 往复运动; 2) 能容错对象中的弹簧断裂故障 ($k = 0$)。

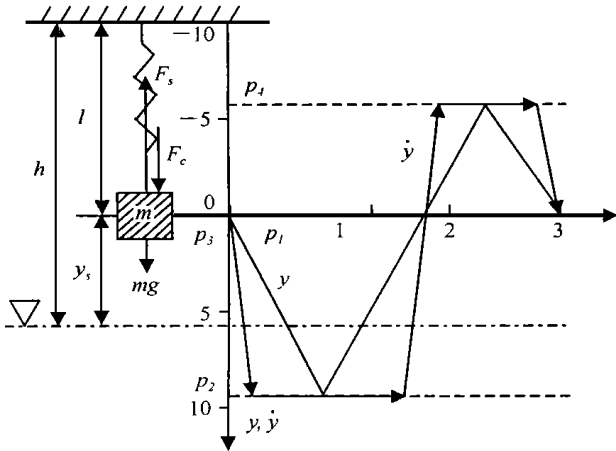


图 1 质量弹簧系统

在正常工作状况下(无故障), 质量 m 的线性动态由以下两个微分方程描述:

无阻尼(流体外)

$$m \ddot{y} + ky = F_c, \quad y < y_s \quad (1)$$

有阻尼(流体内)

$$m \ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_c, \quad y > y_s \quad (2)$$

其中, y_s 是流体表面位置的临界值, 即质量 m 进入或离开流体表面的那一点。该临界值把系统动态空间划分为两个不同的区域。在每个区域内, 其模型是线性时不变的(LTI), 但从一个区域(模型)瞬变到另一区域时, 对象动态特征存在突变或不连续性。

设对象在工作中发生弹簧断裂故障, 此时系统动态用以下两个微分方程描述:

有故障无阻尼模型

$$m \ddot{y} = F_c, \quad y < y_s \quad (3)$$

有故障有阻尼模型

$$m \ddot{y} + c\dot{y} = F_c, \quad y > y_s \quad (4)$$

上面描述的质量弹簧系统是一非线性复杂系统, 需用 4 个不同的模型(结构)描述, 且系统从一种结构转变为另一结构时, 系统动态发生突变。传统的控制系统设计方法是基于一个确定模型或缓变适应模型, 不满足本系统多模态和突变的条件, 因此需要重构和容错控制设计方法。这个例子可作为重构容错控制的试验平台。

3 重构容错控制方案

针对预知动态和故障的主动重构容错控制系统设计方案如图 2 所示。该方案采用解析余度的方法。欲有效地容纳对象和控制器中的故障, 整个系统应是混合余度型的(并行余度和解析余度)^[6]。在已知对象模型的情况下, 可预先根据对应的模型设计控制器, 只要能及时检测出系统的动态变化或故障, 便可根据切换控制来实现重构容错控制。文献[8]已证明: 只要保证每种模态下的控制器使系统稳定且具有满意性能, 那么切换控制后的系统也是稳定的且具有满意性能。

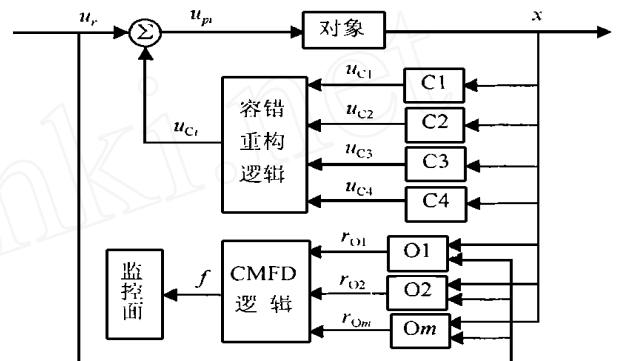


图 2 基于 CMFD 的主动重构容错控制方式

该系统还具有状态反馈控制方式。反馈控制是基本的容错控制方式, 它能在一定程度上使故障后系统稳定且渐近修正(改善)系统性能。因此, 任何一种容错控制系统都应具有反馈控制方式。对本文控制对象而言, 状态反馈控制尤为重要, 因为对象的 4 种模态中, 除模态 2 外, 其它 3 种模态(1, 3, 4)都是开环不稳定的, 因此必须采用状态反馈控制使其达到闭环稳定。这是重构和容错控制的首要任务。

该容错重构控制系统主要由 4 部分组成: 控制器, 观测器组, 状态监测和故障诊断, 容错重构逻辑。下面分别加以讨论。

3.1 控制器设计

本文控制系统为一位置速度跟踪控制。控制目标是使质量 m 的位置和速度达到要求的精度。由于各模态下的模型是预知的, 因此可采用隐含模型跟踪控制(MFC)方法来设计底层控制器。模型跟踪控制也是一种状态反馈控制。

设对象的状态方程为 (A_p, B_p) , 参考跟踪模型(系统)的状态方程为 (A_m, B_m) , 控制和参考信号向

量分别为 u_p, u_r , 对象和参考系统的状态向量分别为 x_p, x_m 。根据隐含模型跟踪控制方法^[9], 可得控制律为

$$u_p = K_p x_p + K_u u_r = B_p^+ (A_m - A_p) x_p + B_p^+ B_m u_r \quad (5)$$

反馈增益为

$$K_u = B_p^+ B_m, \quad K_p = B_p^+ (A_m - A_p) \quad (6)$$

其中 B_p^+ 为矩阵 B_p 的广义逆。

设质量弹簧系统的状态变量分别为 $x_1 = y$ 和 $x_2 = \dot{y}$, 即状态 x_1, x_2 分别代表质量 m 的位移和速度, 且令 $u_p = F_0$ 。于是可得闭环系统状态方程

$$\dot{x}_i = A_{pi} x_i + B_{pi} u_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

其中

$$A_{pi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_{pi1} - k_i & K_{pi2} - c_i \end{bmatrix}$$

$$B_{pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K_{ui} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u_i = [u_r, x_{i1}, x_{i2}]^T$$

根据式(6), 可求出对应的4个容错重构控制律:

无阻尼重构控制器 C1

$$u_{p1} = F_{c1} = K_{u1} u_r + [K_{p1,1}, K_{p1,2}] [x_1, x_2]^T$$

有阻尼重构控制器 C2

$$u_{p2} = F_{c2} = K_{u2} u_r + [K_{p2,1}, K_{p2,2}] [x_1, x_2]^T$$

无阻尼容错控制器 C3

$$u_{p3} = F_{c3} = K_{u3} u_r + [K_{p3,1}, K_{p3,2}] [x_1, x_2]^T$$

有阻尼容错控制器 C4

$$u_{p4} = F_{c4} = K_{u4} u_r + [K_{p4,1}, K_{p4,2}] [x_1, x_2]^T$$

这4个控制器将保证系统在4种模式下闭环稳定且满足跟踪性能要求。

3.2 状态观测器组设计

为了检测和辨识系统动态的变化, 需有一个参考系统。在一定条件下, 状态观测器是一个有效的参考对象。对质量弹簧这样的单输出系统, 由于无法根据系统的输入和输出来设计相互独立的观测器, 也无法实现干扰解耦, 因此给动态变化检测带来了困难。为能有效地检测和辨识出系统的固有动态变化和故障, 本文根据多模型方法设计3个观测器, 组成观测器组来辨识系统动态的变化。观测器O1是基于无故障无阻尼模型设计的, 即 $c_j = 0, k_j = k$; 观测器O2是基于无故障有阻尼模型设计的, 即 $c_j = c, k_j = k$; 观测器O m 是基于参考跟踪模型设计的, 即 $c_j = 2\xi\omega_n, k_j = \omega_n^2$ 。

设 $\hat{x} = [x_1, x_2]^T$ 为系统状态 $x = [x_1, x_2]^T$ 的估计值, $L = [l_1, l_2]^T$ 为调节 \hat{x} 渐近于 x 的反馈增益矩

阵。根据Luenberger观测器理论, 可得到第 j 观测器的状态方程为

$$\dot{\hat{X}}_{oj} = A_{oj} \hat{X}_{oj} + B_{oj} u_i$$

$$j = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

其中

$$A_{oj} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(l_j + k_j) & -(l_{2j} + c_j) \end{bmatrix}$$

$$B_{oj} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K_{ui} & l_{1j} + K_{p,i,1} & l_{2j} + K_{p,i,2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

观测器残差响应为

$$r_{oj}(s) = [(sI - A_{oj})^{-1} B_{oj} - (sI - A_{pi})^{-1} B_{pi}] u_i(s) \quad (9)$$

其中, 观测器的状态变量 $\hat{X}_{oj} = [x_{j1}, x_{j2}]^T, A_{oj}, B_{oj} (j = 1, 2, 3)$ 代表3个观测器的模型参数。

3.3 状态监测和故障诊断设计

设3个观测器O1, O2和O m 的残差分别为 r_{o1}, r_{o2}, r_{om} , 对应3个观测器残差的检测阈值分别确定为 $J_{th1}, J_{th2}, J_{thm}$, 且定义: $|r_{oi}(t)| < J_{thi} \Rightarrow r_{oi} = 0, |r_{oi}(t)| \geq J_{thi} \Rightarrow r_{oi} = 1 (i = 1, 2, m)$ 。于是可设计如下CMFD逻辑:

- 1) 当 $r_{o1} = 0, r_{o2} = 1, r_{om} = 0$ 时, 系统正常工作在模态1, 即无阻尼标称状态;
- 2) 当 $r_{o1} = 1, r_{o2} = 0, r_{om} = 0$ 时, 系统正常工作在模态2, 即有阻尼标称状态;
- 3) 当 $r_{o1} = 0, r_{o2} = 1, r_{om} = 1$ 时, 系统在无阻尼状态发生故障(模态3), 向监控面报警;
- 4) 当 $r_{o1} = 1, r_{o2} = 0, r_{om} = 1$ 时, 系统在阻尼状态发生故障(模态4), 向监控面报警。

表1 状态监测和故障诊断逻辑表

模态	r_{o1}	r_{o2}	r_{om}
模态1	0	1	0
模态2	1	0	0
模态3	0	1	1
模态4	1	0	1

CMFD逻辑列于表1。利用观测器组的3个残差和检测辨识逻辑, 可分离出系统的4种模态。系统固有动态的变化可用观测器O1和O2的残差来辨识, 即当残差 r_{o1} 从0变为1, 且残差 r_{o2} 开始衰减并变为0时, 可判断是模态2开始; 相反, 可判断为模态1。仅仅利用残差 r_{om} 便可检测出故障的发生。即在无故障和实现重构控制的情况下, 观测器O m 的残差等于0; 而一旦故障发生, 该残差则等于1。但要诊断

出故障是发生在无阻尼区还是在阻尼区, 还需参考观测器O1和O2的残差变化。当残差 r_{01} 是从0变为1时, 可判断是无阻尼区故障; 相反, 若残差 r_{02} 从0变为1, 则可判断是阻尼区故障。

3.4 重构容错逻辑设计

重构和容错控制策略为: 多模型(多控制器) + CMFD 逻辑 + 重构容错控制逻辑 + 切换控制。在预知故障模式的情况下, 该策略是一种快速有效的重构和容错控制方式。关键是对系统动态变化的快速准确检测和辨识。每个控制器对应一个模型, 缺省控制器为控制器C1。根据CMFD的结果及重构容错控制逻辑切换4个控制器, 同时向监控面提供状态和故障信息。依据CMFD逻辑可设计出如下的重构和容错控制逻辑:

- 1) CMFD 逻辑1) 成立: 切换到控制器C1, 实现无阻尼区重构控制;
- 2) CMFD 逻辑2) 成立: 切换到控制器C2, 实现阻尼区重构控制;
- 3) CMFD 逻辑3) 成立: 切换到控制器C3, 实现无阻尼区容错控制;
- 4) CMFD 逻辑4) 成立: 切换到控制器C4, 实现阻尼区容错控制。

4 仿 真

对象参数为: $m = 10, g = 10, c = 60, k = 100, h = 15, l_0 = 10$ (无量纲化)。采样周期 $\Delta T = 0.01s$, 仿真时间 $T = 6s$ 。参考输入为一锯齿波, 其周期为3s, 如图1所示。参考跟踪模型为

$$G_m(s) = 1/(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)$$

其中 $\xi = 0.866, \omega = 6.28$ 。它是一个二阶系统, 与有阻尼无故障时的对象模型具有同阶。根据式(6)可求出隐含模型跟踪控制器参数, 即4种模式下的状态反馈增益为

$$\begin{aligned} K_{u1} &= K_{u2} = K_{u3} = K_{u4} = 1 \\ K_{p1} &= [-29.44, -10.88] \\ K_{p2} &= [-29.44, -4.88] \\ K_{p3} &= [-39.44, -10.88] \\ K_{p4} &= [-39.44, -4.88] \end{aligned}$$

根据极点配置方法和要求的渐近速度及可实现性, 可求出观测器的增益为: 对观测器O1和O2: $[l_1, l_2]^T = [5, 5]^T$; 对观测器 O_m : $[l_1, l_2]^T = [10, 10]^T$ 。在无故障并实施重构控制时, 通过计算观测器组残差序列的绝对值最大值, 可得出检测阈值 J_{th1}

$= J_{th2} = J_{thm} = 0.011$ 。故障为弹簧断裂故障 ($k = 0$), 分别在 $t = 0.9s$ (阻尼区) 和 $t = 3.16s$ (无阻尼区) 发生。仿真结果表明:

- 1) 采用隐含模型跟踪控制, 不但使系统获得期望的频率响应特性, 而且可使系统在4种模式下满足闭环稳定性, 实现了重构和容错控制的首要任务。
- 2) 在无重构容错控制时, 系统位移和速度跟踪响应。而采用4个局部模式下的任何一个控制器, 都不能满足系统的全局性能要求。
- 3) 在无故障时, 系统从一种状态转变为另一种状态时, 观测器O1和O2的残差发生突变。无论故障在阻尼区还是在无阻尼区发生, 观测器 O_m 的残差中都能快速显示出来, 并且速度残差中反映故障信息更加迅速和明显。这样可更有效地检测出小幅值和早期故障。CMFD逻辑可延迟一个采样点检测分离出故障, 即分别在 $t = 0.91s$ 和 $t = 3.17s$ 分离出故障。
- 4) 图3示出了实现重构和容错控制后系统的跟踪位移和速度响应。可以看出, 虽然重构和容错有延迟, 即跟踪性能有一定的误差, 但与没有重构容错时相比, 跟踪性能有了很大改善, 并且系统闭环稳定。

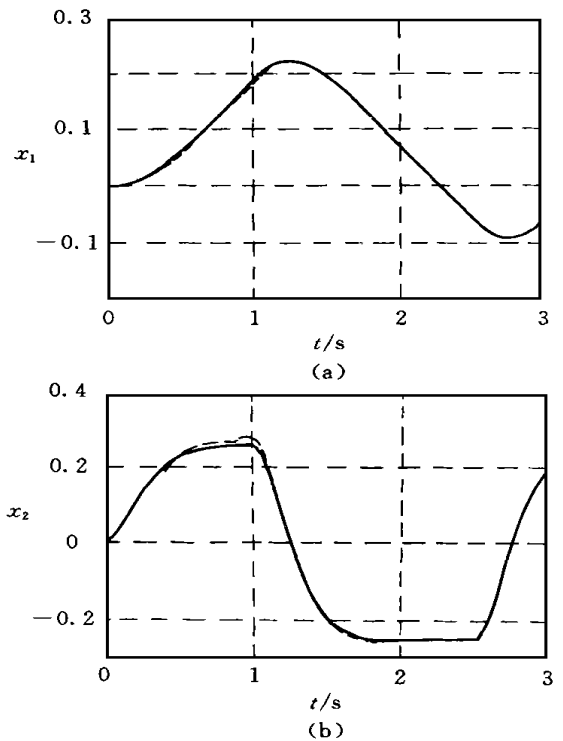


图3 系统的位移响应和速度响应
(a) 重构容错时跟踪位移
(b) 重构容错时跟踪速度

5 结 论

理论分析和仿真实验表明,本文提出的主动重构和容错控制方式能有效地实现对质量弹簧系统固有动态变化的重构控制和对弹簧断裂故障的容错控制。在重构和容错的情况下,保证了系统的稳定性以及速度和位移的跟踪性能要求,且重构和容错控制速度快。本文未考虑切换中的抖振和检测中的鲁棒性问题,这将在以后的文章中做专题讨论。

参 考 文 献

- 1 Spiridon A Reveliotis, Mieczyslaw M Kolar. A framework for on-line learning of plant models and control policies for restructurable control. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, 25(11): 1502_1512
- 2 Robert F Stengel. Intelligent failure-tolerant control. *IEEE Control System s*, 1991, 11(4): 14_23
- 3 Robert J Veillette. Reliable linear-quadratic state-feedback control. *Automatica*, 1995, 31(1): 137_143
- 4 Chang-Jun Seo, Byung Kook Kim. Design of robust reliable H output feedback control for a class of uncertain linear systems with sensor failure. *Int J of System Science*, 1996, 27(10): 963_968
- 5 Jay Farrell, Torsten Berger, Brent Appleby. Using

- learning techniques to accommodate unanticipated faults. *IEEE Control System s*, 1993, June: 16_24
- 6 Herbert E Rauch. Intelligent fault diagnosis and control reconfiguration. *IEEE Control System s*, 1994, June: 26_32
- 7 周东华, 王庆林. 一种非线性系统容错控制的混合方法控制与决策, 1997, 12(2): 167—170
- 8 Kumpati S N arendra, Jeyendran Balakrishnan. Adaptive control using multiple models. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(2): 171_187
- 9 N Dhayagude, Zhiqiang Gao. Novel approach to reconfigurable control system s design. *J Guidance*, 1996, 119(4): 963_967
- 10 董选明. 鲁棒故障诊断及其在液压伺服系统中的应用研究. 北京航空航天大学博士学位论文, 1997

作 者 简 介

董选明 男, 1963年生, 1997年于北京航空航天大学获工学博士学位, 现为中国科学院自动化研究所博士后。主要研究方向为复杂系统状态监测与故障诊断, 智能容错重构控制等。

谭 民 男, 1962年生, 中国科学院自动化研究所研究员, 博士生导师。主要研究方向为机器人的可靠性, 复杂系统控制理论及应用等。

(上接第45页)

参 考 文 献

- 1 唐大宏, 陈珏. 多层决策问题算法的综述. *控制与决策*, 1989, 4(1): 49—56
- 2 Wen U P, Hsu S T. Efficient solutions for the linear bi-level programming problem. *European J of Operational Research*, 1992, 62: 354_362
- 3 Bard J F. Technical note: Some properties of the bi-level programming problem. *J of Optimization Theory and Applications*, 1981, 68: 371_378
- 4 Wen U P, Hsu S T. Linear bi-level programming problems—A review. *Operational Research Society*, 1991, 42: 125_133
- 5 Steuer R E. Multiple criteria optimization: Theory, computation and application. New York: John Wiley & Sons, 1986
- 6 Zeleny M. Multiple criteria decision making. New

- York: McGraw-Hill, 1982
- 7 Bialas W F, Karwan M H. Two-level linear programming. *Management Science*, 1984, 30: 1044_1020
- 8 Bialas W F, Karwan M H. On two-level optimization. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1982, 27: 211_214
- 9 Wen U P, Hsu S T. A note on bi-level programming algorithm based on bi-criterion programming. *Computer and Operations Research*, 1989, 16: 79_83

作 者 简 介

向 丽 女, 1972年生, 天津大学系统工程研究所博士生。主要研究方向为决策理论及方法, 可持续发展等。

顾培亮 男, 1935年生, 天津大学系统工程研究所教授, 博士生导师。主要从事大系统理论, 系统决策理论及方法, 可持续发展等方面的研究。