

自适应容错控制的发展与展望

李俊领¹, 杨光红²

(1. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 自适应容错控制出现了一些新进展及其代表性工作. 首先, 给出自适应容错控制的内涵; 然后, 将其分为四大类: 基于故障参数估计的自适应容错控制, 基于近似模型的自适应容错控制, 基于多模切换与校正的自适应容错控制和直接自适应容错控制, 重点论述了模型参考自适应容错控制; 最后, 提出了一些具有挑战性的问题.

关键词: 自适应控制; 容错控制; 模型参考自适应

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Development and prospect of adaptive fault-tolerant control

LI Jun-ling¹, YANG Guang-hong²

(1. College of Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: LI Jun-ling, E-mail: lijunling@cumt.edu.cn)

Abstract: Some new progress and its representative works appear in adaptive fault-tolerant control. Firstly, the connotation of adaptive fault-tolerant control is clarified, and then adaptive fault-tolerant control is divided into four categories: adaptive fault-tolerant control based on fault parameters estimations, adaptive fault-tolerant control based on approximate models, adaptive fault-tolerant control based on multi-mode switching and tuning, and direct adaptive fault-tolerant control. Especially, model reference adaptive fault-tolerant control is discussed separately. Finally, some challenging issues in this area are proposed.

Key words: adaptive control; fault-tolerant control; model reference adaptive control

0 引言

生产设备日趋复杂, 运行过程中极有可能发生各种故障, 轻则降低系统性能、影响生产, 重则导致设备损坏、威胁操作人员的人身安全. 由于传统的反馈控制不能有效补偿这些故障造成的不良影响, 促使了容错控制的快速发展^[1-2]. 其最初的发展动力源于航空领域, 目的是研发具有高度容错能力的战斗机^[3-4]. 更多关于容错控制的介绍可参见经典的综述文献^[3-7].

自适应控制研究大多是针对结构已知而参数未知的系统, 但实际中不可预测的系统故障可能会导致被控系统的结构和参数均出现不确定性, 使得自适应容错控制所能依据的先验信息比传统的自适应控制更少, 只能依据被控对象的输入输出数据提取有效信息, 以实现控制系统的容错功能. 需要指出的是, 自适应控制系统本质上是非线性时变系统, 因此自适应容错控制属于非线性容错控制的范畴.

1 自适应容错控制

不可预测的故障会使系统自身结构和参数发生变化, 自动在线校正相关参数, 以补偿、减弱、抑制甚至消除故障的影响, 这种通过自适应机制使系统获得容错能力的控制方案称为自适应容错控制. 从设计方法上, 自适应容错控制可分为以下四大类.

1) 基于故障估计的自适应容错控制.

该方法通过设计自适应故障估计算法在线获取故障信息, 进而重构或重组控制器以实现容错, 因此该方法的关键在于故障估计得准确与否. 该方法的一种研究思路是, 将线性矩阵不等式技术与自适应方法相结合, 利用自适应机制来估计故障损害程度, 根据故障参数估计将控制器参数作相应变化, 以补偿故障对系统的影响^[8-12]. 其代表性工作^[9-11]可确保系统在正常和故障情况下均渐近稳定, 且能获得自适应 H_∞ 性能, 设计条件相对于固定增益控制器设计条件

收稿日期: 2013-07-04; 修回日期: 2014-06-14.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QNA54); 国家青年科学基金项目(11201473).

作者简介: 李俊领(1976-), 男, 讲师, 博士, 从事自适应控制与容错控制的研究; 杨光红(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断、容错控制、鲁棒控制、非线性控制等研究.

保守性要小. 但设计过程要求系统的标称模型必须准确已知, 故该思路是以故障不改变系统动态的标称参数为前提的. 该方法的另一种研究思路是, 利用自适应故障观测器为容错提供有效的故障信息^[13-19]. 其优点在于: 对于故障系统, 不需要设计残差生成器, 就能同时获得系统的状态估计和故障信号的估计. 但自适应故障观测器的设计条件较为严格^[13-14], 其前提是存在适当的观测器增益矩阵, 使得状态跟踪误差动态, 满足严格正实条件. 文献[15-17]通过修正的鲁棒自适应律, 将严格正实条件转化为线性矩阵不等式的正定对称解的存在性问题, 在一定程度上弱化了该条件.

2) 基于近似模型的自适应容错控制.

该方法采用非线性建模技术来监督系统动态的变化, 用可校正参数的广义函数近似器(**generic function approximator**)逼近故障发生后的动态系统^[20-26]. 而神经网络的大量并行结构及其内在的学习能力, 为在线近似器的建立提供了一个有效途径. 最先把神经网络引入容错控制的是文献[20]. 随后, 文献[21]给出了基于神经网络的在线近似模型的故障诊断与容错的理论框架, 研究了突变故障的容错控制的稳定性. 文献[22]针对一类含建模不确定性的非线性系统, 给出了一个稳定的容错控制方案. 文献[23-24]分别针对单输入单输出与多输入多输出非线性参数反馈系统, 统一整合了故障诊断与容错控制问题. 这些基于近似模型自适应容错控制方案采用了李亚普诺夫方法, 能够保证闭环稳定. 其优点是可建立故障的非线性模型; 缺点是学习时间过长, 瞬态性能差. 该自适应容错控制并不局限于基于神经网络的方法, 还有基于多项式逼近、有理函数逼近、样条函数逼近及模糊的自适应容错控制方法^[26].

3) 基于多模、切换与校正的自适应容错控制.

该方法需要多个模型平行运行, 每一个模型对应各自的控制器, 设计适当的切换规则, 在故障发生时, 能够在线获得与被控对象最接近的模型及相应的控制器^[27-30]. 其优点在于: 切换规则提高了系统的响应速度, 故障发生后能够快速切换到最接近故障动态的系统模型, 并获得最适宜的控制器; 自适应在线校正从最接近故障系统的模型开始, 校正模型参数及对应的控制器参数, 进一步提高控制精度, 改善了系统的瞬态性能; 多模型实现了控制器的快速重构. 自适应律在参数子空间内部进行, 而不是像传统自适应控制那样, 在整个参数空间内进行. 其缺点是稳定性分析过于复杂, 因为该方法最终导致的闭环系统本质上是非线性时变切换系统.

4) 直接自适应容错控制.

直接自适应容错控制^[31-41], 不需对系统参数及

故障进行估计, 直接在线更新控制器参数, 补偿故障的不良影响. 文献[34-37]针对具有执行器卡死故障和不确定参数的线性时不变系统, 分别给出了状态反馈状态追踪、状态反馈输出追踪和输出反馈输出追踪的容错控制方案. 状态反馈状态跟踪方案^[34]为满足对象与模型间的匹配条件, 控制矩阵的各列应相互平行, 这实际上要求所有执行器具有相似的物理结构, 假设条件过于严格. 文献[35]在一定程度上弱化了该假设, 要求故障不改变控制矩阵的秩. 文献[36]把状态追踪改为输出追踪, 通过弱化控制目标在一定程度上弱化了原假设. 文献[37]考虑了输出反馈方案, 要求执行器故障不能改变系统的相对阶及最小相位等特性, 即执行器故障程度不能太严重, 故其自适应容错控制算法有待提高. 将上述结果推广到非线性系统^[38-41]也需要系统的一些结构信息, 如参数反馈规范型、输出反馈规范型. 文献[38]用状态反馈给出两种自适应容错控制方案. 其假设是: ①控制函数对应的向量场相互平行, 或者各执行器对应的输入对输出的相对阶相同; ②非线性系统的标称部分是最小相位的; ③控制输入各个分量的控制方向已知. 文献[39]利用输出反馈研究了具有状态非线性依赖的非线性系统的容错控制. 文献[40]研究了更一般的具有输出依赖的动态及静态函数的非线性容错控制问题, 其动态边界函数与静态边界函数相比, 可提供更紧的边界, 可适当减小反推设计导致的控制器高增益特性. 此外, 多输入单输出的结果通过分组技术可推广到多输入多输出的情况^[41]. 同样, 这些结果对故障系统作出了过于严格的系统假设, 并且假定故障不能改变这些特性.

综上所述, 方法1)和方法2)适用于被控系统的标称模型已知的情形, 而方法3)和方法4)可用于标称模型未知的情形. 方法1)可以优化控制性能; 方法2)更适于复杂的非线性系统; 方法3)既可弱化模型信息, 又可利用切换规则优化控制性能, 但算法复杂; 方法4)弱化了模型的要求, 但控制性能难以优化.

2 模型参考自适应容错控制

模型参考自适应控制属于直接自适应控制的范畴, 该方法在被控系统发生故障时, 自动调节控制器参数以适应故障引起的变化, 保证被控对象输出仍能跟踪参考模型输出. 这种自重构功能, 无需故障检测与分离单元, 属于隐式方式处理故障, 算法简单易行, 但只能处理相对简单的特定类型的故障.

文献[42]针对一类相对阶为1、最小相位的线性时不变多变量系统, 分别附加额外不同的故障系统假设, 给出了直接输出误差法与直接输入误差法两种直接方案. 前者要求系统严格正实条件, 且高频增益矩

阵的转置与自适应增益矩阵的逆矩阵之积必须是正定矩阵,但目前仍没有有效方法确保这一点;后者需要输出的导数信息及输出矩阵的估计在任何时刻都是可逆的.文献[43]在标称模型已知、状态可测的前提下,利用修正的控制器混合算法,给出了模型参考自适应容错控制器的设计.但要求控制输入的个数应大于被控系统的状态变量数,且发生故障的执行器仅限于冗余的执行器.文献[37]给出了输出反馈的等控制设计(equal-control design),要求不同的故障系统具有共同的结构特性,例如相对阶、最小相位及控制方向等.文献[44]减弱了最小相位的假设条件,但对故障系统的结构限制仍过于苛刻.可见,这些模型参考自适应容错控制仅解决了满足相应条件的某类问题.文献[45]针对具有状态时滞与执行器卡死故障的连续时间线性时不变系统,结合滑模技术,在与文献[34]相类似的假设条件下,给出了一种基于李亚普诺夫方法的自适应容错控制方案.文献[46]则对单输入单输出与双输入双输出系统,给出了一个基于死区修正的鲁棒模型参考自适应容错控制方案,消除了由死区作用而导致的非零的稳态误差问题,但仅限于低阶系统.

综上,模型参考自适应容错控制虽算法简单、易于实现,但要求过于严格,系统的某些结构特性在故障发生前后不变,即系统的故障不能过于严重.该方法仅解决了执行器故障的简单情形.其局限性为:1)需要被控系统的结构特性已知,但故障往往会改变这些特性,导致原先的设计条件在故障发生后失效;2)自适应控制往往要求系统参数是慢变的或者定常的,但突变故障使系统参数快速变化,系统动态模型产生跳变的多模式,使自适应容错控制系统产生较长的适应过程,瞬态性能较差.

3 展 望

故障的多样性和不可预知性都给自适应容错控制理论的发展带来了新的挑战性问题,具体如下.

1) 变参考模型自适应容错控制.故障的多样性导致了被控系统的多模态,而且各模态间动态行为差别也可能较大.传统的模型参考自适应容错控制设计,往往会让不同动态模式与同一个参考模型相匹配,导致设计条件过于苛刻,也不现实,而应该针对不同的故障模式设计相应的参考模型.文献[47-48]提出了性能降低的多参考模型容错控制方案,文献[49]给出了时变的自适应参考模型,这些都为变参考模型自适应容错控制提供了初步尝试.其难点在于,如何设计适宜的自适应律以及如何确定参数校正方向.最新的模型参考控制,如:文献[50]中的分段线性参考模型,

文献[51]中的分段放射的参考模型和文献[52]中的一组可控规范型参考模型,或许能够提供一些借鉴.

2) 自适应容错控制的瞬态性能.突变故障使系统参数发生快速变化,如何保证故障发生后,改善自适应控制的瞬态性能是一个新的挑战性问题.文献[53]通过设计一个严格增的、过零点的且值域有界的光滑函数,使得跟踪误差满足预先规定的性能边界,代价是自适应容错控制量太大.另外一种改善瞬态性能的方式是多模自适应控制器^[54].但究竟如何改善自适应容错控制的瞬态性能,仍是一个难题.

3) 自适应容错控制与故障诊断的同步整合.自适应控制能容忍小故障导致的系统参数的小变化或慢变化,若故障改变了被控系统阶次、最小相位等结构特性,则传统的自适应控制算法将失效.需要说明的是,自适应容错控制即使有容错诊断单元,对于小故障仍难以获得准确的信息,因为自适应容错控制有隐藏小故障的弊端^[55].如果故障系统长期运行,则故障严重程度将增加,自适应控制容错能力将逐步减弱甚至完全丧失.如何在自适应容错控制器丧失容错功能之前,正确检测并诊断出故障,以便于重构控制器?这需要自适应控制在提供容错能力的同时,也能进行故障检测与诊断.文献[56]结合观测器已作了初步尝试;文献[57]提出了对偶环(dual-loop)的设计思想.但在模型参考自适应容错框架下的相关结果还未出现.

4) 自适应容错控制与故障诊断的性能折中.针对问题3)提及的同时设计容错控制器与故障辨识器,早在1997年文献[3]就已指出,故障诊断与容错控制是相互影响的.故障诊断要求系统响应中能充分体现故障的影响,而容错控制则尽量削弱甚至抑制故障对系统行为的影响,两者是矛盾的,两性能不能同时兼顾,只能进行折中.如何在自适应容错控制框架下,进行合理折中是一个值得深入探讨的问题,也许经典的对偶自适应控制^[58]能够提供一些启发.

5) 自适应容错控制系统的主动故障诊断.除了问题4)提及的折中方案,一种有效的方法就是容错控制与故障诊断分别独立进行设计,大量文献也确实如此处理,默认了两者可分离.但实际上,这种分离性也是有条件的,不能简单地认为故障诊断环节是故障信号到残差信号的开环,毕竟整个控制系统是闭环的,输入与输出之间相互作用.已有学者提出了该方面的问题^[57],但成果较少.另一方面,即使承认两者可以独立设计,是先设计故障诊断单元还是先设计容错控制单元呢?目前的主流方法是先进行故障诊断,获得故障信息,再以此重构或重组控制器来实现容错目的^[23],前提是故障信息提供的及时性与准确性能

够满足容错控制的要求. 该思路较为适合突变故障的自适应容错控制. 而对于慢变故障, 故障诊断将产生大时延, 且易出现误诊, 如误报、漏检等, 减低了故障信息的及时性和准确性. 对于慢变故障, 先设计自适应容错控制器再进行故障诊断将更为合理. 容错控制可保证闭环系统稳定, 虽然容错增加了诊断难度, 但可引入附加的外部输入信号以凸显故障特征. 对应于主动容错控制的术语, 该方法可定义为主动故障诊断. 文献 [59] 提出的故障隔离设计函数 (fault isolation design functions), 为该思路提供了新的启示. 但是, 关于先进行自适应容错控制器设计再诊断故障的尝试, 目前还未出现.

6) 无模自适应容错控制. 由于自适应控制系统本质上是非线性时变系统, 基于模型的自适应控制为保证闭环系统的稳定性, 往往对被控对象的数学模型做了严格的结构性假设, 而系统故障有可能改变系统的结构, 使得系统存在丧失稳定性的风险. 这一矛盾或许可通过无模自适应容错控制得到彻底解决, 因为无模自适应控制无需对模型做任何结构性约束假设^[60-61], 无疑将会成为研究自适应容错控制最有前景的方法之一. 但由于无模自适应的控制理论还不够成熟, 其在容错上的应用还处于起步阶段.

参考文献(References)

- [1] Stengel R F. Intelligent failure tolerant control[J]. IEEE Control System Magazine, 1991, 11(3): 14-23.
- [2] Blanke M, Frei C, Kraus F, et al. What is fault-tolerant control?[C]. Proc of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process. Budapest, 2000: 40-51.
- [3] Patton R J. Fault-tolerant control: The 1997 Situation[C]. Proc of IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection and Safety for Technical Process. Hull, 1997: 1033-1055.
- [4] 周东华, Ding X. 容错控制理论与应用[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 788-797.
(Zhou D H, Ding X. Theory and applications of fault tolerant control[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(6): 788-797.)
- [5] 王福利, 张颖伟. 容错控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
(Wang F L, Zhang Y W. Fault-tolerant control[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003.)
- [6] Jiang J. Fault-tolerant control systems — An introductory overview[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 161-174.
- [7] Zhang Y, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2): 229-252.
- [8] Yang G H, Ye D. Adaptive fault-tolerant H_∞ control against sensor failures[J]. IET Control Theory and Applications, 2009, 2(2): 95-107.
- [9] Yang G H, Ye D. Reliable H_∞ control of linear with adaptive mechanism[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(1): 242-247.
- [10] Ye D, Yang G H. Adaptive fault-tolerant tracking control against actuator faults with application to flight control[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1088-1096.
- [11] Ye D, Yang G H. Adaptive reliable H_∞ control for linear time-delay systems via memory state feedback[J]. IEE Proc of Control Theory & Applications, 2007, 1(3): 713-721.
- [12] Jin X Z, Yang G H, Chang X H. Robust H_∞ and adaptive tracking control against actuator faults with a linearised aircraft application[J]. Int J of Systems Science, 2013, 44(1): 151-165.
- [13] Wang H, Daley S. Actuator fault diagnosis: An adaptive observer-based technique[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1073-1078.
- [14] Wang H, Huang Z J, Daley S. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis[J]. Automatica, 1997, 33(2): 217-225.
- [15] Jiang B, Staroswiecki M. Adaptive observer design for robust fault estimation[J]. Int J of Systems Science, 2002, 33(9): 767-775.
- [16] Jiang B, Wang J L, Soh Y C. An adaptive technique for robust diagnosis of faults with independent effects on system outputs[J]. Int J of Control, 2002, 75(11): 792-802.
- [17] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [18] Jiang B, Zhang K, Shi P. Less conservative criteria for fault accommodation of time-varying delay systems using adaptive fault diagnosis observer[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 2010, 24(4): 322-334.
- [19] Shen Q, Jiang B. Vincent cocquempot: Adaptive fuzzy observer-based active fault-tolerant dynamic surface control for a class of nonlinear systems with actuator faults[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2014, 22(2): 338-349.
- [20] Farrell J A, Berger T, Appleby B D. Using learning techniques to accommodate unanticipated faults[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1993, 13(3): 40-49.
- [21] Polycarpou M M, Helmicki A J. Automated fault detection and accommodation: A learning systems approach[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25(11): 1447-1458.

- [22] Polycarpou M M. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(5): 736-742.
- [23] Zhang X, Parisini T, Polycarpou M M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: A diagnostic information based approach[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(8): 1259-1274.
- [24] Zhang X, Polycarpou M M, Parisini T. Adaptive fault diagnosis and fault-tolerant control of MIMO nonlinear uncertain systems[J]. *Int J of Control*, 2010, 83(5): 1054-1080.
- [25] 张绍杰, 刘春生, 胡寿松. 一类 MISO 最小相位系统的执行器故障自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(7): 1084-1087.
(Zhang S J, Liu C S, Hu S S. Adaptive fault tolerant control for a class of MISO minimum phase systems with actuator failures[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(7): 1084-1087.)
- [26] Shen Q, Jiang B, Shi P. Adaptive fault diagnosis for T-S fuzzy systems with sensor faults and system performance analysis[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2014, 22(2): 274-285.
- [27] Břsković J D, Mehra R K. Stable adaptive fault-tolerant control of overactuated aircraft using multiple models, switching and tuning[C]. *Proc of the 1998 AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. Boston*, 1998, 1: 739-749.
- [28] Břsković J D, Mehra R K. Stable multiple model adaptive flight control for accommodation of a large class of control effector failures[C]. *Proc of the 1999 American Control Conf. San Diego*, 1999: 1920-1924.
- [29] Břsković J D, Mehra D K. A multiple model adaptive flight control scheme for accommodation of actuator failures[J]. *AIAA J of Guidance, Control & Dynamics*, 2002, 25(4): 712-724.
- [30] Guo Y Y, Jiang B. Multiple model-based adaptive reconfiguration control for actuator fault[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(11): 1452-1458.
- [31] Liu Y, Tang X D, Tao G, et al. Adaptive compensation of aircraft actuation failures using an engine differential model[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 971-982.
- [32] Tao G, Chen S H, Tang X D. Adaptive control of systems with actuator failures[M]. New York: Springer-Verlag, 2004.
- [33] Chen S H, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation designs for linear systems[J]. *Int J of Control, Automation, and Systems*, 2004, 2(1): 1-14.
- [34] Tao G, Joshi S M, Ma X L. Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(1): 78-95.
- [35] Chen S H, Tao G, Joshi S M. On matching conditions for adaptive state tracking control of systems with actuator failures[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(3): 473-478.
- [36] Tao G, Chen S H, Joshi S M. An adaptive control scheme for systems with unknown actuator failures[J]. *Automatica*, 2002, 38(6): 1027-1034.
- [37] Tao G, Chen S H, Joshi S M. An adaptive actuator failure compensation controller using output feedback[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(3): 506-511.
- [38] Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for parametric strict feedback systems and an aircraft application[J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1975-1982.
- [39] Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive output feedback actuator failure compensation for a class of nonlinear systems[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2005, 19(6): 419-444.
- [40] Tang X D, Tao G. An adaptive nonlinear output feedback controller using dynamic bounding with an aircraft control application[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2009, 23(7): 609-639.
- [41] Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application[J]. *Automatica*, 2007, 43(11): 1869-1883.
- [42] Bodson M, Groszkiewicz J E. Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1997, 5(2): 217-239.
- [43] Břsković J D, Yu S, Mehra R K. A stable scheme for automatic control reconfiguration in the presence of actuator failures[C]. *Proc of the 1998 American Control Conf. Philadelphia*, 1998: 2455-2459.
- [44] Li J L, Yang G H. Adaptive actuator failure accommodation for linear systems with parameter uncertainties[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(2): 274-285.
- [45] Mirkin B M, Gutman P O. Model reference adaptive control of state delayed system with actuator failures[J]. *Int J of Control*, 2005, 78(3): 186-195.
- [46] Charandabi B A, Salmasi F R, Sedigh A K. Improved dead zone modification for robust adaptive control of uncertain linear systems described by input-output models with actuator faults[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2011, 56(4): 863-867.

- [47] Zhang Y M, Jiang J. Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 838-848.
- [48] Jiang J, Zhang Y M. Accepting performance degradation in faulttolerant control system design[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 284-292.
- [49] Joshi S M, Tao G, Patre P. Direct adaptive control using an adaptive reference model[J]. Int J of Control, 2011, 84(1): 180-196.
- [50] Sang Q, Tao G. Adaptive control of piecewise linear systems: The state tracking case[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(2): 522-528.
- [51] Bernardo M, Montanaro U, Santini S. Hybrid model reference adaptive control of piecewise affine systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 58(2): 304-316.
- [52] Wang Q, Hou Y, Dong C. Model reference robust adaptive control for a class of uncertain switched linear systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(9): 1019-1035.
- [53] Wang W, Wen C Y. Adaptive actuator failure compensation control of uncertain nonlinear systems with guaranteed transient performance[J]. Automatica, 2010, 46(12): 2082-2091.
- [54] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(2): 171-187.
- [55] Chen W, Chowdhury F N. Analysis and detection of incipient faults in post-fault systems subject to adaptive fault-tolerant control[J]. J of Adaptive Control and Signal Processing, 2008, 22(9): 815-832.
- [56] Chen W, Chowdhury F N. A synthesized design of sliding-mode and Luenberger observers for early detection of incipient faults[J]. J of Adaptive Control and Signal Processing, 2010, 24(12): 1021-1035.
- [57] Chowdhury F N, Chen W. A dual-loop scheme for fault-tolerance and early fault detection[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(4): 925-932.
- [58] Filatov N M, Unbehauen H. Adaptive dual control: Theory and applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [59] Chen W, Saif M. Adaptive actuator fault detection, isolation and accommodation in uncertain systems[J]. Int J of Control, 2007, 80(1): 45-63.
- [60] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状和展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586-592.
(Hou Z S. On model-free adaptive control: The state of the art and perspective[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(4): 586-592.)
- [61] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.
(Hou Z S, Xu J X. On data-driven control theory: The state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.)

(责任编辑: 李君玲)