

网络化控制系统故障检测技术的最新进展

王永强, 叶 昊, 王桂增

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 伴随着控制系统的日益复杂化以及网络技术的飞速发展, 网络化控制系统受到了人们越来越多的关注. 而作为提高系统安全性和可靠性的一项重要技术, 故障检测逐渐成为控制领域的研究热点之一. 本文针对网络化控制系统中存在的各种典型问题, 综述了相应故障检测技术的最新进展.

关键词: 故障检测; 网络化控制系统; 时延; 丢包; 传输受限

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Recent development of fault detection techniques for networked control systems

WANG Yong-qiang, YE Hao, WANG Gui-zeng

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the rapid development of control and network techniques, networked control systems are receiving more and more attention. Meanwhile, as an important technique to improve the safety and the reliability of dynamic systems, the fault detection technique has become one of the active topics in the control community. Based on a brief introduction to the problems with networked control systems, we review the latest development in fault detection of networked control systems.

Key words: fault detection; networked control systems; network-induced delay; packet dropout; limited communication

1 引言(Introduction)

网络化控制系统 (networked control systems, NCS) 是指通过网络形成控制闭环的系统^[1]. 相比于传统的控制系统结构, NCS可以减少系统布线、降低维护与诊断成本、提高系统的灵活性. 这些突出的优点使得NCS受到人们越来越多的关注, 比如自动控制领域的许多著名杂志都出版了关于NCS的专刊^[2~6].

但是, NCS中网络的引入会带来一些问题: 传感器发出的系统输出信号和控制器发出的系统控制命令要通过网络传送, 由于网络带宽通常是有限的, 因此可能会出现网络不能同时传输所有信息的情况, 这就需要引入调度策略来解决; 在数据传输过程中, 由于网络的不确定性, 传输的信息可能被延迟甚至丢失; 此外, 由于网络只能传输数字信号, 传感器采集的数据需要经过量化才能通过网络进行传送, 这又将导致量化误差的产生.

本文综述了NCS故障检测技术的最新进展. 故障

检测是提高系统安全性和可靠性的一项重要技术, 近30年来得到了飞速的发展^[7~10]. 但是由于NCS中网络的引入所带来的以上各种问题, 已有的故障检测方法已不能直接应用于现有的NCS, 因此NCS故障检测的研究受到了人们越来越多的重视. 值得注意的是, 相比较于已有的NCS控制和稳定性分析方面的众多研究成果, NCS的故障检测研究还处于起步阶段.

图1为一典型的NCS结构图, 假设其中被控对象的动态特性可以表示为以下连续模型^[1]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u_p(t) + E_{p,d} d(t) + E_{p,f} f(t), \\ y(t) = C_p x(t). \end{cases} \quad (1)$$

或者经离散化后的离散模型^[11]

$$\begin{cases} x(k+1) = A x(k) + B u(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = C x(k) + F_d d(k) + F_f f(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中 x, u, y 分别表示系统的状态、输入及输出信息, d, f 表示未知扰动和待检测的故障信息. 矩阵 $A_p, B_p, C_p, E_{p,d}, E_{p,f}, A, B, C, E_d, E_f, F_d, F_f$ 为具有适当维数的已知矩阵. 在本文中, 假设故障检测系统和控制器同处于远程的中央监控站中, 系统的传感器信号通过网络传送给中央监控站, 然后中央监控站将产生的控制信号通过网络发送给执行器节点.

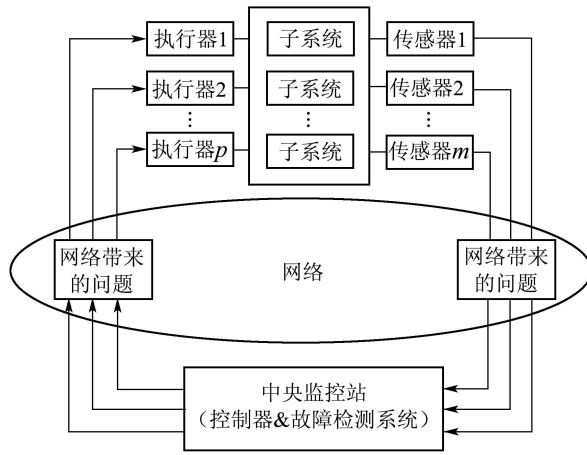


图1 NCS的结构

Fig. 1 Structure of NCS

针对网络带来的各种问题, 如时延、数据包丢失、量化误差和信息传输受限等问题, 我们将分别介绍现有的各种故障检测策略. 为了便于读者了解各类方法的基本思路, 在每类方法中, 我们在全面综述的基础上, 会以部分文献的方法为例, 进行较为具体的介绍. 由于目前多数的NCS故障检测方法的出发点都是解决上述一个或者多个问题, 因此, 下面本文将以前所针对NCS中问题的不同作为分类标准, 来综述目前已有的各种故障检测方法. 需要指出的是, 由于篇幅限制, 本文没有将传统时延系统的故障检测方法包括在内.

2 存在网络诱导时延情况下NCS的故障检测(Fault detection of NCS with network-induced delay)

2.1 问题背景及问题描述(Background and problem formulation)

由于网络的存在, 传感器发送的数据要经过传感器—控制器链路才能到达控制器, 这可能引入传感器—控制器时延 τ_k^{sc} . 而控制器发出的控制信号也要经过控制器—执行器链路才能到达执行器, 这又可能带来控制器—执行器时延 τ_k^{ca} . 在传输中没有丢包发生并且控制律为时不变的情况下, 这两部分时延可以合成为一个单一时延 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$ [1, 12]. 需要指

出的是, 如果控制器中存在处理时延, 则此处理时延可以合并到传感器—控制器时延 τ_k^{sc} 或者控制器—执行器时延 τ_k^{ca} 中 [13].

根据所采用的介质访问控制(MAC)协议的不同, 网络诱导时延可能是时不变的(如采用token-passing协议的网络), 或者是时变的甚至是随机的(如采用carrier sense multiple access—CSMA协议的网络) [1]. 另外, 根据系统节点驱动方式的不同(时钟驱动或者事件驱动), 系统时延又可能为整拍时延(采样周期的整数倍)或者连续时延(任意连续取值). 所谓时钟驱动是指系统节点在预先设定的时刻到来时进行动作, 而事件驱动则采用中断的方式, 即系统节点在特定事件发生后进行动作. 比如, 在传感器和控制器均采用时钟驱动且二者时钟同步的情况下, τ_k^{sc} 一定为整拍时延. 在一定程度上, 整拍时延可以视为连续时延的特殊情况.

在时延 τ_k 小于一个采样周期 h 时, 系统模型(1)可以离散化为 [1]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_k^0 u(k) + B_k^1 u(k-1) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= e^{A_p h}, \quad B_k^0 = \int_0^{h-\tau_k} e^{A_p s} B_p ds, \\ B_k^1 &= \int_{h-\tau_k}^h e^{A_p s} B_p ds, \quad C = C_p, \\ E_\delta &= \int_0^h e^{A_p s} E_{p,\delta} ds, \quad \delta = \{d, f\}. \end{aligned}$$

并且(3)中的 B_k^0, B_k^1 和(2)中的 B 满足 $B = B_k^0 + B_k^1$.

当系统时延可能大于一个采样周期并且存在上限(设小于 l 个采样周期)时, 在时间段 $[kh, (k+1)h]$ 内, 最多可能有 $l+1$ 个控制输入到达执行器, 假设数据包顺序不会发生错乱并且这些数据包的到达时刻为 $kh + \tau_k^i$ ($i = 0, 1, \dots, l-1, \tau_k^i \leq \tau_k^{i-1}$), 则系统(1)可以离散化为 [12, 14]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + \sum_{i=0}^l B_k^i u(k-i) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (4)$$

其中 $B_k^i = \int_{\tau_k^i}^{\tau_k^{i-1}} e^{A_p s} B_p ds$, 其余参数与(3)中的相同.

需要指出的是, 当NCS中的控制器为线性时变或者系统中存在丢包时, 离散模型(3)和(4)的可用性需要进行重新评估 [12]. 此外, (3)和(4)均忽略了一个采样周期内 d 和 f 的变化对系统的影响 [15].

可以看出, 和传统控制系统不同, 对于NCS来说,

当时延 τ_k 和 τ_k^i 未知时, (3)中的 B_k^0 , B_k^1 和(4)中的 B_k^i 为未知矩阵, 这将导致基于模型(2)的传统故障检测方法的失效.

2.2 时延已知情况下的故障检测(Fault detection with known delay)

当网络中不存在同步误差, 并且数据包中含有序列次序信息或者时间信息时, 传感器-控制器之间的网络诱导时延是可以在线得到的. 而对于控制器-执行器时延, 若采用带有回执的通讯策略(如TCP), 则也可以得到时延的具体数值. 由于与传统时延系统的相似性, 时延已知情况下NCS的故障检测问题是早期研究的一个热点. 如在时延为常数的情况下, 文献[16, 17]分别采用了提升(lifting)和增广的方法讨论了时延小于采样周期的NCS的故障检测问题, 文献[18, 19]和[20~22]则分别讨论了带有整拍和连续长时延的NCS故障检测问题, 其中文献[18]采用了降阶观测器的思路, 文献[19, 20]采用了状态/输出增广的思路, 而文献[21, 22]则是基于 H_∞ 滤波的思想进行观测器设计. NCS中时延为常数的情况可能是由网络协议引起的(如采用Token-passing协议), 也可能是由系统的设置引起的(如在接收端设置了长度超过最大时延的缓存器, 从而将时变的时延转变成固定的时延^[21]). 对于时延可能随时间变化但是可以在线获知的情况, 文献[23]利用补偿的方法设计了时延小于采样周期时NCS的故障检测系统, 文献[24, 25]和[26, 27]则分别讨论了整拍和连续两种长时延情况下NCS的故障检测问题, 其中文献[24]和[25, 26]分别基于状态观测器和卡尔曼滤波器对时延影响进行补偿, 文献[27]则采用了 z 变换处理时延对故障检测的影响.

此外, 在时延已知的情况下还有一个直接的思路, 即将时延对残差信号的影响进行完全补偿. 例如, 对于存在时变时延的NCS系统(3), 当时延已知时, B_k^1 , B_k^0 为已知矩阵, 从而可以将残差发生器构造为^[28]

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B_k^0 u(k) + B_k^1 u(k-1) + \\ \quad L(\hat{y}(k) - y(k)), \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \\ r(k) = V(y(k) - \hat{y}(k)). \end{cases} \quad (5)$$

其中 L 与 V 为待设计的参数.

设定 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, 则根据(3), (5)的动态特性可以表示为

$$\begin{cases} e(k+1) = (A - LC)e(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ r(k) = VCe(k). \end{cases} \quad (6)$$

从(6)可以看出, 此时残差信号 $r(k)$ 仅受未知输入 d 和故障 f 的影响, 且残差的动态特性为一线性时不变系统, 所以可以根据传统方法求得满足(7)的 L 与 V 来实现残差信号对扰动与故障影响的最优折衷, 即误报率与漏报率的最优折衷^[7].

$$\begin{aligned} \min_{L, V} J &= \min_{L, V} \frac{\|G_{r,d}(z)\|_\infty}{\sigma_i(G_{r,f}(jw))}, \quad \forall w \in [0, \infty), \quad (7) \\ G_{r,d}(z) &= VC(zI - A + LC)E_d, \\ G_{r,f}(jw) &= VC(e^{jw}I - A + LC)E_f. \end{aligned}$$

式(7)中, σ_i 表示第 i 个非零的奇异值.

以上方法得以实现的本质原因为对象的输入输出信息可以准确得到. 采用同样的思路, 对于存在大于采样周期时延的NCS系统(4), 可以设计如下残差发生器

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + \sum_{i=0}^l B_k^i u(k-i) + \\ \quad L(\hat{y}(k) - y(k)), \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \\ r(k) = V(y(k) - \hat{y}(k)). \end{cases} \quad (8)$$

来完全补偿时延的影响, 从而实现对系统的故障检测(值得注意的是由于整拍时延可以视为连续时延的特殊情况, (8)也可以应用于整拍长时延情况下的NCS故障检测问题, 此时某些 B_k^i 将为0).

2.3 时延概率特性已知情况下的故障检测(Fault detection with delay subject to known probability distributions)

在NCS中, 通过某些设定, 可以将时延的取值限定在离散有限集合之内. 若时延的统计特性已知, 则可以借助传统的随机系统建模方法来描述时延的影响.

在传感器和执行器均为时钟驱动的情况下, 由文献[11, 29]得到时延为采样周期整数倍的NCS. 在时延有界且服从一个马尔可夫过程的假设下, NCS可以描述为以下子系统^[11, 29]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k - r_k) + \\ \quad E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = Cx(k) + F_f f(k), \quad r_k = 1, 2, \dots, l. \end{cases} \quad (9)$$

其中 lh 表示时延的上界. 假设在 k 时刻, 时延为 r ($r = 1, 2, \dots, l$)的概率为 $\mu_k(r)$, 文献[11, 29]采用模糊融合的方法得到NCS的T-S模糊模型

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + \sum_{r=1}^l \mu_k(r) Bu(k-r) + \\ \quad E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = Cx(k) + F_f f(k). \end{cases} \quad (10)$$

由于概率 $\mu_k(r)$ 可以根据马尔可夫过程的初始概率分布以及转移概率矩阵得到, 文献[10]为一线性时变系统, 从而可以利用上一节中提到的方法(如(8))实现NCS的故障检测。

采用类似的思路, 文献[30]用概率融合的方法来表示状态时延对NCS的影响, 针对一阶系统设计了如下残差发生器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + A_1 \sum_{r=1}^l \mu_t(r) \hat{x}(t - \eta_r) + L(\hat{y} - y), \\ \hat{y} = C \hat{x}, \\ r = y - \hat{y}. \end{cases} \quad (11)$$

其中 η_r 和 $\mu_t(r)$ 分别表示状态时延及其出现的概率(为已知参数)。

通过采用快速时钟驱动的控制器和执行器, 文献[31~33]将时延取值限制在离散有限的集合内, 分别为 $\tau_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, l$), 则经过状态和输入增广, NCS可以表示为以下跳变系统^[31]:

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = A_i \tilde{x}(k) + B_i \tilde{u}(k) + E_{d,i} d(k) + E_{f,i} f(k), \\ y(k) = C_i \tilde{x}(k) + F_{f,i} f(k), \end{cases} \quad (12)$$

i 表示可能的跳变状态, $\tilde{x}$ 和 $\tilde{u}$ 分别表示状态和输入的增广向量。文献[31]假设时延的变化服从马尔可夫过程, 则(12)为一马尔可夫跳变系统^[34]。于是通过 H_∞ 滤波的方法, 文献[31]利用LMI优化工具设计了一个跳变故障检测滤波器, 实现了对NCS中故障的敏感性和对扰动的鲁棒性。文献[32]则根据时延的概率信息设计了阈值, 并给出了误报率和漏报率的计算方法。

2.4 时延未知情况下的故障检测(Fault detection with unknown delay)

在更一般情况下, 网络诱导时延是未知的, 这是当前NCS故障检测的难点。针对这一问题, 目前有文献[35~39]提出的基于结构矩阵的方法和文[40,41]提出的基于模型不确定性的方法。

当系统中的时延未知时, (3)可以重新描述为^[35,36]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) - B_k^1 \Delta u(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。 $B_k^1 \Delta u(k)$ 表示时延对系统的影响。由于 B_k^1 为一未知矩阵, 不能写成传统未知输入的形式, 即“已知矩阵 $\times$ 未知向量”的形式, 因此时延影响的结构信息未知^[35,36], 传统的对未知输入鲁棒的故障检测方法无法直接应用。

为了得到时延影响的结构矩阵, 文献[35]和

[36]分别提出了基于凯莱-哈密顿定理的方法和基于特征结构分解的方法, 将时延的影响 $B_k^1 \Delta u(k)$ 转化为

$$B_k^1 \Delta u(k) = \bar{E}_{\tau,k} d_{\tau,k}. \quad (14)$$

其中 $\bar{E}_{\tau,k}$ 为一已知矩阵, 而 $d_{\tau,k}$ 为一未知向量。从而 $\bar{E}_{\tau,k}$ 可以视为时延影响的结构矩阵。需要指出的是, 用这两种方法获得的结构矩阵为时变的, 并且在很多情况下为满秩的, 为了实现对时延影响的鲁棒性, 可以通过设计最优残差评价函数与阈值来实现^[35]。

为实现对未知时延的鲁棒性, 还可以采取近似解耦的方法^[42]。这可以通过对得到的结构矩阵进行近似得到, 即通过压缩时延影响结构矩阵的方法得到一个近似的结构矩阵, 然后实现对此近似结构矩阵的完全解耦。利用主元分析的方法, 文献[36]在保留主要结构信息的前提下得到一个列满秩的“瘦”矩阵, 然后利用等价空间的方法实现了对此“瘦”矩阵的解耦。近似解耦还可以通过直接对时延影响, 即 $B_k^1 \Delta u_k$ 进行近似实现。文献[37]利用泰勒展开的方法得到 $B_k^1 \Delta u_k$ 的一阶泰勒逼近 $(B \Delta u_k) \tau_k$, 然后利用等价空间方法实现了对所得结构矩阵, 即列向量 $B \Delta u_k$ 的解耦。利用Padé逼近的方法, 文献[38]给出了一个更为精确的逼近, 即时延影响 $B_k^1 \Delta u_k$ 可以近似为

$$B_k^1 \Delta u_k \approx \bar{E}_{\tau,k}^{ap} \tau_k. \quad (15)$$

由于此 $\bar{E}_{\tau,k}^{ap}$ 为一列向量, 所以可以对其实现完全解耦。

以上基于结构矩阵的方法, 虽然形式直观, 易于实现, 但是由于需要实时在线计算残差发生器的参数, 因此计算量较大。而基于模型不确定性的方法则可以避免这个问题。文献[40]提出了一种基于有界模型不确定性的方法, 也可以实现对时延影响的鲁棒性。其基本思路是将时延的影响 B_k^1 转化成范数有界的不确定性, 即写成以下形式

$$B_k^1 = E \Sigma F. \quad (16)$$

其中 E, F 为已知矩阵, Σ 表示不确定性且满足 $\Sigma^T \Sigma \leq I$ 。这样, 就可以借鉴传统鲁棒控制的方法实现对此模型不确定性的鲁棒性, 从而实现对时延影响的鲁棒性。需要指出的是, 本方法不仅可以应用于时延小于一个采样周期的情况, 而且可以应用于时延大于一个采样周期的情况。利用类似的思路, 文献[43]讨论了时延变化小于一个采样周期, 并且系统矩阵 A_p 可以对角化的一类特殊NCS的故障检测问题, 即假设时延满足 $\tau_k = lh + \Delta \tau_k$, 其中 l 为已知常数, $0 \leq \Delta \tau_k \leq h$ 。

通过巧妙的变换,文献[41]则将带有时延影响的NCS转化为Polytopic不确定性系统,即

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^n \mu_i^k A_i, \quad B = B_0 + \sum_{i=1}^n \mu_i^k B_i, \quad (17)$$

其中 A_0, A_i, B_0, B_i 为已知参数, $\mu_i^k \geq 0$ 为未知时变参数且满足 $\sum_{i=1}^n \mu_i^k = 1$, 然后设计了针对时变Polytopic不确定性的最优故障检测滤波器. 这种方法可以应用于时延小于一个采样周期或者大于一个采样周期的情况.

另外, 针对网络诱导时延可能大于一个采样周期的情况, 文献[44]利用乘性故障的思路将时延影响转化为系统未知输入的形式, 并引入传统故障检测方法实现对其的鲁棒性. 文献[45]则提出了时延估计的方法, 即利用优化方法估计出时延的数值, 然后采用时延已知情况下的故障检测方法实现对NCS的故障检测. 根据随机时延的影响主要体现为随机噪声的特性, 文献[46]利用小波滤波的思想设计了一个具有低通特性的残差发生器, 实现了对未知时延的鲁棒性, 文献[47]则根据时延的最大影响设计了一个自适应的阈值, 从而消除了因时延造成的故障误报. 这两种方法都只适用于时延小于一个采样周期的情况.

需要指出的是, 以上方法中, 文献[43]可视为文献[40]在系统矩阵 A_p 可对角化, 网络诱导时延小于一个采样周期情况下的特例; 文献[37]则视为文献[44]在系统时延小于一个采样周期情况下的特例. 此外, 除了文献[35]之外, 其他方法均没有系统地讨论残差评价问题.

3 存在丢包情况下NCS的故障检测(Fault detection of NCS with packet dropout)

3.1 问题背景及问题描述(Background and problem formulation)

丢包也是NCS中普遍存在的一个问题. 根据信道性质的不同, 丢包经常被描述为一个伯努利过程或者马尔可夫过程. 伯努利过程适合描述无记忆的通讯网络, 而马尔可夫过程则可用于描述网络情况变化的时间相关性^[48]. 用 $\alpha_k \in \{0, 1\}, \beta_k \in \{0, 1\}$ 分别表示传感器信号和控制命令的传输状态, 其中“1”表示正确传输状态, “0”表示数据丢失状态, 若丢包服从伯努利过程, 则有

$$P\{\alpha_k = 1\} = \alpha, \quad P\{\alpha_k = 0\} = 1 - \alpha, \quad (18)$$

$$P\{\beta_k = 1\} = \beta, \quad P\{\beta_k = 0\} = 1 - \beta. \quad (19)$$

其中, $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$. 若丢包服从马尔可夫

过程, 则有

$$P\{\alpha_k = i | \alpha_{k-1} = j\} = p_{j,i}, \quad (20)$$

$$P\{\beta_k = i | \beta_{k-1} = j\} = q_{j,i}, \quad i, j \in \{0, 1\}. \quad (21)$$

其中 $0 \leq p_{j,i} \leq 1, 0 \leq q_{j,i} \leq 1$ 表示马尔可夫过程的转移概率^[48].

值得指出的是, 由于丢包的存在, NCS中的中央监控站所具有的输入输出信息可能与实际被控对象的输入输出信息不一致.

目前, 丢包问题已经成为NCS研究中的另一个热点, 引起了广泛的重视^[11, 49~54]. 丢包可能发生在传感器—控制器链路或者控制器—执行器链路或者同时两个链路. 根据NCS的结构特征, 故障检测系统和控制器同处于中央监控站, 因此发生在传感器—控制器链路的丢包对故障检测而言是已知的, 处理起来也比较简单, 而发生在控制器—执行器链路上的丢包一般而言是未知的, 是目前研究的一个难点.

3.2 丢包已知情况下的故障检测(Fault detection with known packet dropout)

针对传感器—控制器链路发生丢包的NCS, 由于是否丢包的状态已知, 文献[51]提出利用异步动态系统的理论根据不同的丢包状态设计不同的观测器, 来实现对带有丢包NCS的故障检测. 文献[49]利用鲁棒滤波的思路来降低丢包对故障检测的影响. 令 $y^a(k)$ 代表故障检测系统所使用的观测器驱动信号, 文献[49]使用以下残差发生器进行残差产生:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L^a(y^a(k) - \hat{y}(k)), \\ r(k) = W^a(y^a(k) - \hat{y}(k)), \quad \hat{y}(k) = C\hat{x}(k). \end{cases} \quad (22)$$

其中, 如果丢包没有发生, 则

$$y^a(k) = y(k), \quad L^a = L^1, \quad W^a = W^1;$$

若丢包发生, 则

$$y^a(k) = \text{上一时刻收到的数据}, \quad L^a = L^2, \quad W^a = W^2,$$

L^a 与 W^a 为待设计的参数.

文献[49]证明残差的动态特性可以表示为

$$\begin{cases} e(k+1) = Ae(k) + (A - L^a C)e(k) + (E_f - L^a F_f)f(k) + L^a \theta(k), \\ r(k) = W^a (Ce(k) + F_f f(k) - \theta(k)). \end{cases} \quad (23)$$

其中 $\theta(k) = y(k) - y^a(k)$ 代表丢包的影响, 然后利用马尔可夫跳变系统的有界实引理设计了最优的 L^a 与 W^a , 使得 $\theta(k)$ 到 $r(k)$ 传递函数的 H_∞ 范数达到最小.

3.3 丢包未知情况下的故障检测(Fault detection with unknown packet dropout)

存在控制器-执行器链路丢包的NCS的故障检测问题是目前的一个难点. 其原因为, 发生在此链路的丢包是未知的, 唯一能够利用的是丢包的概率信息, 这样NCS变成一个存在随机参数的确定性系统. 一个完整的故障检测包含残差发生、残差评价(包括残差评价函数设计和阈值设计)和系统性能评估三部分, 其中, 残差评价和系统性能评估都要求知道残差信号统计特性的先验知识. 而对于存在随机丢包的NCS, 整个残差发生器为包含随机参数的确定系统, 残差的随机特性很难得到, 所以残差评价, 特别是故障检测系统性能评估是目前存在丢包的NCS故障检测的一个难点.

对于以上问题, 文献[50]提出了在等价空间框架下的解决方法. 针对在传感器-控制器链路和控制器-执行器链路均可能发生丢包的NCS, 文献[50]首先利用传感器-控制器链路丢包的可知性找出这部分丢包影响的结构信息, 并设计等价向量实现了对这部分丢包影响的解耦. 针对控制器-执行器链路可能存在的丢包, 文献[50]则通过设计阈值的方法实现了对其影响的鲁棒性, 并利用丢包的概率信息给出了相应阈值的误报率. 值得提出的是, 误报率对于故障检测具有至关重要的意义, 因为只有给出相应的误报率, 一个故障检测系统的性能才能进行评价.

4 信息传输受限时NCS的故障检测(Fault detection of NCS with limited communication)

4.1 问题背景及问题描述(Background and problem formulation)

在NCS中, 网络的带宽是有限的, 所以有时只有部分传感器与控制器节点可以占用网络进行通讯, 这时必须采用相应的策略来调度网络的使用. 由于周期通讯序列具有简单、有效的特点, 目前受到了广泛的重视^[11,55~57]. 对于采用周期通讯序列的NCS, 系统可以表示为^[55]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y_c(k) = N_k (Cx(k) + F_d d(k) + F_f f(k)). \end{cases} \quad (24)$$

其中, $y_c(k)$ 表示中央监控站所获得的系统输出信息, N_k 为传感器-控制器的调度策略矩阵^[55~57], 用于定义调度策略在一个周期内的每个时刻允许哪些传感器占用网络资源. 类似地, 令 M_k 表示控制器-执行器的调度策略矩阵, $u_c(k)$ 表示中央监控站所产生的控制信号, 则根据执行器所采用策略的不同, 可以

有:

1)补零策略^[55]. 若控制器在第 k 时刻未能占用网络进行通讯, 则采用信号0作为系统输入, 此时有

$$u(k) = M_k u_c(k). \quad (25)$$

2)零阶保持器策略^[11]. 若控制器在第 k 时刻未能占用网络进行通讯, 则采用上一时刻的数据作为当前输入, 此时有

$$u(k) = M_k u_c(k) + (I - M_k)u(k-1). \quad (26)$$

由网络带宽有限造成的信息传输受限是NCS中的一个重要问题, 在某种程度上甚至是NCS中其他问题的根源^[58,59]. 在信息传输受限的情况下, 故障检测系统的性能将会受到影响, 受影响的程度及如何降低这种影响将会在下面进行分析.

4.2 信息传输受限情况下的故障检测(Fault detection with limited communication)

在信息传输受限时, 每一时刻只有部分传感器和执行器节点可以占用网络资源和中央监控站进行通讯, 所以中央监控站所获得的系统传感器信息是不完整的. 需要指出的是, 一般情况下, 由于网络调度策略是由中央监控站决定的, 且执行器节点未能进行通讯时所采用的策略是固定的(补零或者零阶保持), 因而被控对象的执行器信息对于故障检测系统来说是完全已知的.

由于周期通讯序列是解决NCS信息传输受限的一个有效方法^[55,60,61], 因此采用信息传输序列的NCS的故障检测问题也受到了广泛的关注^[56,57,62]. 文献[56]证明, 若采用等价空间方法产生残差, 则如果信息完全传输时可以实现对未知输入 d 的完全解耦, 则采用周期通讯序列后, 解耦空间的维数会降低; 若信息完全传输时不能实现对未知输入 d 的完全解耦而采用 $S_{f,+}/R_d$ 型优化指标^[7]设计残差发生器, 则在引入周期通讯序列后优化的指标会下降. 文献[62]给出了采用周期通讯序列情况下最优的基于等价空间的故障检测系统设计方法, 并证明了此时故障检测系统存在检测实时性和检测性能的折中. 此外, 通过深入分析等价空间方法和观测器方法的内在联系, 文献[62]还给出了基于最优等价矩阵的故障诊断观测器设计方法.

增加系统的采样时间是另一种解决信息传输受限的有效方法. 文献[63]指出, 针对系统(1), 设系统的采样时间为 h , 若考虑一个采样周期内 d 和 f 的变化对故障检测的影响, 即采用直接法^[15]按照以下优化指标

$$\max_{L_h, W_h} J_{\infty, h} = \max_{L_h, W_h} \frac{\|W_h C (sI - A + L_h C) \bar{E}_f\|_{\infty}}{\|W_h C (sI - A + L_h C) \bar{E}_d\|_{\infty}}, \quad (27)$$

设计观测器

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L_h(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \\ r(k) = W_h(y(k) - \hat{y}(k)) \end{cases} \quad (28)$$

其中 $\bar{E}_d$ 和 $\bar{E}_f$ 由下式决定

$$\bar{E}_\delta \bar{E}_\delta^T = \int_0^h e^{A_p t} E_\delta E_\delta^T e^{A_p^T t} dt, \quad \delta = \{d, f\}, \quad (29)$$

A, B, C 由(2)和(3)决定, 则对于任意自然数 $m \leq n$, 性能指标(27)满足以下关系:

$$J_{\infty, mh} \geq J_{\infty, nh}. \quad (30)$$

因为调度策略会影响故障检测的性能, 所以在保证系统控制性能的前提下, 我们应该尽可能选取对故障检测性能有利的调度策略. 文献[57]研究了以提高故障检测性能为目标的周期通讯序列调度策略的设计问题, 并给出了在一定条件下如何保证原解耦空间得以完全保留的调度策略设计步骤以及完全解耦不能实现情况下可使故障检测性能优于一定指标的周期通讯序列的设计步骤. 针对存在本地控制器的NCS, 文献[64]给出了一种新的只传输残差信号的调度策略, 考虑到无故障情况下残差信号的幅值要远远小于系统的输入/输出数值, 所以在量化位数一定的前提下, 这不仅可以大大降低信息的传输量, 而且可以保证故障检测系统的性能. 文献[65]考虑到数据传输网络的特点, 提出了一种新的基于数据打包的信息传输策略, 并证明了这种策略可以在几乎不增加网络负载的情况下提高故障检测系统的性能.

5 量化及传输错误情况下NCS的故障检测(Fault detection of NCS with quantization and transmission errors)

5.1 问题背景及问题描述(Background and problem formulation)

为了在网络上进行传输, 必须先将模拟信号转变为数字信号, 即经过量化. 在应用中, 最常用的量化方法为均匀量化^[66], 此时量化误差可以表示为有界的未知输入, 即

$$\Delta y(k) = y_a(k) - y_q(k), \quad -\nu < \Delta y(k) < \nu. \quad (31)$$

其中, $y_a(k)$ 和 $y_q(k)$ 分别表示量化前后的模拟信号和对应的数字信号, ν 表示最小的量化单位.

由于形式简单以及易于转化为传统的模型不确定性, 指数量化方法最近引起了人们的重视^[67]. 采用指数量化时, 量化误差可以表示为

$$\Delta y(k) = \delta y_a, \quad -\rho < \delta < \rho. \quad (32)$$

其中 ρ 表示量化密度的大小^[67].

当通讯网络的信噪比不高时, 传输数据序列中的某些位可能发生错误^[68], 这可以视为一种特殊的量化误差^[69].

5.2 量化及传输错误情况下的故障检测(Fault detection with quantization and transmission errors)

针对采用指数量化方法并且存在数据位传输错误的无线NCS, 文献[69]设计了如下残差发生器进行故障检测

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y_{\text{rec}}(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \\ r(k) = y_{\text{rec}}(k) - \hat{y}(k). \end{cases} \quad (33)$$

其中, y_{rec} 表示控制器收到的系统输出信息. 由于量化误差以及可能存在的数据位传输错误, y_{rec} 和系统的真实输出 y 存在以下差别

$$y(k) - y_{\text{rec}}(k) = \Delta_k y, \quad \Delta_k \in \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m\}. \quad (34)$$

$\Delta_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示不同的数据位发生错误造成的影响. 假设传输中数据位错误服从马尔可夫过程, 文献[69]证明(33)的动态特性也为一马尔可夫过程, 并利用马尔可夫系统的故障检测方法设计了对数据位错误鲁棒的参数 L .

6 其它故障检测研究(Other fault detection studies)

在整拍时延和丢包同时存在的情况下, 文献[29, 54]分别研究了时延服从马尔可夫过程和伯努利过程的NCS故障检测问题. 针对同时存在随机丢包和传输受限的网络化控制系统, 文献[70]给出了采用周期通讯序列进行网络调度情况下的残差产生方法和评价方法, 并分析了所设计故障检测系统的误报率. 对于大型动态系统, 文献[71]指出基于协同滤波器(consensus filter)方法, 适合的交叠(overlapping)设计可以增加故障检测系统的性能.

7 相关工作(Related works)

随着NCS故障检测技术的发展, NCS容错控制也引起了人们越来越多的关注^[72~76]. 另外, NCS滤波技术的发展^[53, 77~79]也为NCS故障检测提供了有益的启示与借鉴.

8 总结与展望(Conclusions and prospects)

由于NCS具有突出的优越性, 可以预见, NCS的故障检测技术将会受到越来越多的重视. 本文尝试对NCS故障检测技术的当前发展情况进行分类总结, 并给出当前各个问题的难点所在. 可以看出, 针对存在时延和丢包的NCS, 如果时延和丢包已知, 则NCS可以转化为传统的时变系统或跳变系统, 故

时延和丢包未知时的故障检测方法设计为当前研究的难点。另外, 当前的故障检测方法研究主要集中在残差发生方面, 关于残差评价和故障检测系统性能评估的结果还比较少。而调度策略和故障检测系统集成优化设计的方法可以在降低信息传输量的情况下保持故障检测系统的性能, 是一种非常具有前景的方法。最后, 值得指出的是, 目前关于NCS故障检测的文章都仅仅讨论了线性NCS的情况, 而现实中的被控对象大多为非线性系统, 所以非线性NCS的故障检测问题也值得进一步关注。

参考文献(References):

- [1] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [2] Special Issue on networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1).
- [3] Special issue on networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9).
- [4] Special issue on technology of networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1).
- [5] Special issue on networking, sensing and control for networked control systems: architectures, algorithms and applications[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, 2007, 37(2).
- [6] Special issue on networked embedded hybrid control systems[J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(1).
- [7] DING S X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques-Design Schemes, Algorithms and Tools*[M]. Springer: Berlin, 2008.
- [8] PATTON R J, FRANK P M, CLARK R N. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Applications*[M]. NJ: Prentice-Hall, 1989.
- [9] GERTLER J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*[M]. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [10] CHEN J, PATTON R J. *Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*[M]. London: Kluwer, 1999.
- [11] FANG H J, YE H, ZHONG M Y. Fault diagnosis of networked control systems[C] // *Proceedings of Safeprocess*, 2006, Beijing, China: IFAC, 2006: 1 – 12(also in *Annal Reviews in Control*, 2007, 31(1): 55 – 68).
- [12] HALEVI Y, RAY A. Integrated communication and control systems: part I—analysis[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367 – 373.
- [13] LIAN F L, MOYNE J, TILBURY D. Modelling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays[J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(6): 591 – 606.
- [14] HU S S, ZHU Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delays[J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877 – 1884.
- [15] ZHANG P, DING S X, WANG G Z, et al. An FDI approach for sampled-data systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, USA: IEEE, 2001: 2702 – 2707.
- [16] ZHENG Y, FANG H J, XIE L B, et al. An observer-based fault detection approach for networked control system[J]. *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems—Series B—Applications & Algorithms*, 2003, (Suppl): 416 – 421.
- [17] MAO Z H, JIANG B. Fault estimation and accommodation for networked control systems with transfer delay[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 738 – 743.
- [18] ZHENG Y, FANG F J, WANG H, et al. Fault detection approach for networked control system based on a memoryless reduced-order observer[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 559 – 566.
- [19] 朱张青, 周献中. 不确定长时延网络控制系统的鲁棒故障检测[C] // 第六届全球智能控制与自动化大会会议录, 大连: IEEE, 2006: 5670 – 5674.
(ZHU Zhangqing, ZHOU Xianzhong. Robust fault detection on networked control systems with undertain long time-delay[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China: IEEE, 2006: 5670 – 5674.)
- [20] 谢林柏, 纪志成, 方华京. 具有异步时延的网络化控制系统故障检测[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11): 2717 – 2721.
(XIE Linbo, JI Zhicheng, FANG Huajing. Fault detection for networked control systems with asynchronous measurement delays[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(11): 2717 – 2721.)
- [21] BAO Y, DAI Q Q, CUI Y L, et al. Fault detection based on robust H_{∞} states observer on networked control systems[C] // *Proceedings of 2005 International Conference on Control and Automation*, Budapest, Hungary: IEEE, 2005: 1237 – 1241.
- [22] XIA H W, MA G C, WANG C H, et al. Robust fault detection of networked control systems: an improved LMI approach[C] // *Proceedings of 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. China: IEEE, 2007: 1448 – 1452.
- [23] 马力伟, 田作华, 施颂椒. 基于时滞补偿观测器的网络化控制系统故障检测[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(2): 231 – 235.
(MA Liwei, TIAN Zuohua, SHI Songjiao. Fault detection for networked control systems based on time compensation observer[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(2): 231 – 235.)
- [24] 陈雨, 张颖伟. 基于观测器的网络控制系统的故障检测[J]. 控制工程, 2007, 14(S2): 120 – 123.
(CHEN Yu, ZHANG Yingwei. Fault detection based on observer for networked control system[J]. *Control Engineering of China*, 2007, 14(S2): 120 – 123.)
- [25] ZHANG Y, FANG H J, WANG Y W. Kalman filter based FDI of networked control systems[C] // *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou, China: IEEE, 2005: 1330 – 1333.
- [26] WANG Y W, ZHENG Y. Kalman filter based fault diagnosis of networked control system with white noise[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2005, 3(1): 55 – 59.
- [27] 郑英, 方华京, 谢林柏, 等. 具有随机时延的网络化控制系统基于等价空间的故障诊断[J]. 信息与控制, 2003, 32(2): 155 – 159.
(ZHENG Ying, FANG Huajing, XIE Linbo, et al. Parity sapce based fault diagnosis of networked control system with random delay[J]. *Information and Control*, 2003, 32(2): 155 – 159.)

- [28] ZHANG P, DING S X. Recent development of fault detection in networked control systems[C] // *Proceedings of the 3rd workshop on Networked Control Systems Tolerant to Fault*. France: Nancy-University, 2007.
- [29] ZHENG Y, FANG H J, WANG H O. Takagi-Sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with markov delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2006, 36(4): 924 – 929.
- [30] WINSTEAD V, KOLMANOVSKY I. Observers for fault detection in networked systems with random delays[C] // *Proceedings of the 2004 American Control Conference*. Boston, USA: IEEE, 2004: 2457 – 2462.
- [31] MAO Z, JIANG B, SHI P. H_∞ fault detection filter design for networked control systems modelled by discrete markovian jump systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(5): 1336 – 1343.
- [32] ZHONG M Y, LIU Y X, MA C F. Observer-based fault detection for networked control systems with random time-delays[C] // *Proceedings of the first International Conference on Innovative Computing, Information and Control*. Beijing, China: IEEE, 2006.
- [33] 姜斌, 冒泽慧. 网络控制系统的故障诊断: 综述及新结果[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, in press.
(JIANG Bin, MAO Zehui. Fault diagnosis of networked control systems: review and some new results[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, in press.)
- [34] ZHONG M Y, YE H, SHI P, et al. Fault detection for markovian jump systems[J]. *IEE Proceedings of Control Theory and Applications*, 2005, 152(4): 397 – 402.
- [35] WANG Y Q, YE H, WANG G Z. Fault detection of NCS based on eigendecomposition, adaptive evaluation and adaptive threshold[J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(12): 1903 – 1911.
- [36] YE H, HE R, LIU H, et al. A new approach for fault detection of networked control systems[C] // *Proceedings of 14th Symposium on System Identification*. Newcastle, Australia: IFAC, 2006: 654 – 659.
- [37] YE H, DING S X. Fault detection of networked control systems with network-induced delay[C] // *Proceedings of the 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. China: IEEE, 2004: 294 – 297.
- [38] WANG Y Q, YE H, CHENG Y, et al. Fault detection of NCS based on Eigendecomposition and Pade Approximation[C] // *Proceedings of IFAC Safeprocess*. Beijing, China: IFAC, 2006: 937 – 941.
- [39] 刘云霞, 丁强, 钟麦英. 基于等价空间的网络控制系统故障检测问题研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(10): 1553 – 1556.
(LIU Yuxia, DING Qiang, ZHONG Maiying. Parity sapce based fault detection for networked control systems[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(10): 1553 – 1556.)
- [40] WANG Y Q, YE H, DING S X, et al. Fault detection of networked control systems based on optimal robust fault detection filter[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2008, 34(12): 1534 – 1539.
- [41] WANG Y Q, DING S X, YE H, et al. A new fault detectio scheme for networked control systems subject to uncertain time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(10): 5258 – 5268.
- [42] PATTON R J, CHEN J. Optimal unknown input distribution matrix selection in robust fault diagnosis[J]. *Automatica*, 1993, 29(4): 837 – 841.
- [43] 吕明, 吴晓蓓, 徐志良, 胡维礼. 具有异步时钟的长时延网络控制系统故障检测[J]. 信息与控制, 2007, 36(3): 386 – 391.
(LÜ Ming, WU Xiaobei, XU Zhiliang, et al. Fault detection for networked control systems with long time delays of asynchronous clock[J]. *Information and Control*, 2007, 36(3): 386 – 391.)
- [44] WANG Y Q, YE H, WANG G Z. A New method for fault detection of networked control systems[C] // *Proceedings of 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore: IEEE, 2006: 75 – 78.
- [45] LIANOS D, STAROSWIECK M, COLOMER J, et al. Transmission delays in residual computation[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(5): 1471 – 1476.
- [46] YE H, WANG Y Q. Application of parity relation and stationary wavelet transform to fault detection of networked control systems[C] // *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore: IEEE, 2006: 69 – 74.
- [47] SAUTER D, BOUKHOBZA T. Robustness against unknown networked induced delays of observer based FDI[C] // *Proceedings of IFAC Safeprocess*. Beijing, China: IFAC, 2006: 331 – 336.
- [48] SEILER P, SENGUPTA R. An H_∞ approach to networked control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(3): 356 – 364.
- [49] ZHANG P, DING S X, FRANK P M, et al. Fault detection of networked control systems with missing measurements[C] // *Proceedings of the 5th Asian Control Conference*. Melbourne, Australia: IEEE, 2004: 1258 – 1263.
- [50] WANG Y Q, DING S X, ZHANG P, et al. Fault detection of networked control systems with packet dropout[C] // *Proceedings of IFAC World Congress 2008*. Korea: IFAC, 2008: 8884 – 8889.
- [51] 吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟, 等. 基于异步动态系统的网络控制系统故障检测[J]. 控制与决策, 2008 23(3): 325 – 329.
(LÜ Ming, WU Xiaobei, CHEN Qingwei, et al. Fault detection for networked control systems based on asynchronous dynamical systems[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(3): 325 – 329.)
- [52] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty[J]. *Automatica*, 2005, 41(6): 999 – 1007.
- [53] GAO H J, CHEN T, WANG L. Robust fault detection with missing measurements[J]. *International Journal of Control*, 2008, 81(5): 804 – 819.
- [54] 何潇, 王子栋, 周东华. 带观测时滞和丢失的网络化系统的故障检测[J]. 控制工程, 2008, 15(2): 189 – 192.
(HE Xiao, WANG Zidong, ZHOU Donghua. Fault detection for networked systems with communication delay and measurement missing[J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15(2): 189 – 192.)
- [55] ZHANG L, HRISTU D. Communication and control co-design for networked control systems[J]. *Automatica*, 2006, 42(6): 953 – 958.
- [56] ZHANG P, DING S X. Fault detection of networked control systems with limited communication[C] // *Proceedings of IFAC Safeprocess 2006*. Beijing, China: IFAC, 2006: 1135 – 1140.
- [57] WANG Y Q, DING S X, ZHANG P, et al. Periodic communication sequences design for fault detection of networked control systems[C] // *Proceedings of the 3rd Workshop on Networked Control Systems Tolerant to Fault*. France: Nancy-University, 2007.

- [58] DING S X, ZHANG P, CHIHAI C, et al. Advanced design scheme for fault tolerant distributed networked control systems[C] // *Proceedings of IFAC World Congress 2008*. Korea: IFAC, 2008: 13569 – 13574.
- [59] NAIR G N, FAGNANI F, ZAMPIERI S, et al. Feedback control under data rate constraints: an overview[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 108 – 137.
- [60] WANG Y Q, YE H, DING S X, et al. A new lower bound for the period of communication sequences of NCS[C] // *Proceedings of the 2008 Chinese Control and Decision Conference*. Yantai, China: IEEE, 2008: 22 – 26.
- [61] 宗群, 薄云览, 孙连坤. 一类介质访问约束下的网络控制系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 29(5): 778 – 781.
(ZONG Qun, BO Yunlan, SUN Liankun. Class of networked control systems design under medium access constraints[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 778 – 781.)
- [62] WANG Y Q, YE H, DING S X, et al. Fault detection of networked control systems with limited communication[J]. *International Journal of Control*, DOI: 10.1080/00207170802558967, available on line: <http://dx.doi.org/10.1080/00207170802558967>, 2008.
- [63] ZHANG P, DING S X. On monotonicity of a class of optimal fault detection performance versus sampling period[C] // *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, USA: IEEE, 2007: 2596 – 2601.
- [64] DING S X, ZHANG P. Observer-based monitoring of distributed networked control systems[C] // *Proceedings of IFAC SafeProcess 2006*. Beijing, China: IFAC, 2006: 337 – 342.
- [65] WANG Y Q, DING S X, YE H, et al. Fault detection of networked control systems with packet based periodic communication[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, DOI: 10.1002/acs.1061, available on line: doi.wiley.com/10.1002/acs.1061, 2008.
- [66] LEE E A, MESSERSCHMITT D G. *Digital Communication*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [67] FU M Y, XIE L H. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(11): 1698 – 1711.
- [68] LIN S, COSTELLO D J. *Error Control Coding*[M]. New York: Prentice Hall, 2004.
- [69] LI W, ZHANG P, DING S X, et al. Fault detection over noisy wireless channels[C] // *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, USA: IEEE, 2007: 5050 – 5055.
- [70] WANG Y Q, YE H, DING S X, et al. Fault detection of networked control systems subject to access constraints and random packet dropout[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008.
- [71] FERRARI R M G, PARISINI T, POLYCARPOU M M. Distributed fault diagnosis with overlapping decompositions and consensus filters[C] // *Proceedings of the 2007 American Control Conference*. New York, USA: IEEE, 2007: 693 – 698.
- [72] PATTON R J, KAMBHAMPATI C, CASAVOLA A, et al. A generic strategy for fault-tolerance in control systems distributed over a network[J]. *European Journal of Control*, 2007, 13(2/3): 1 – 17.
- [73] ABERKANE S, PONSART J C, SAUTER D. Output-feedback H_2/H_∞ control of a class of networked fault tolerant control systems[J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(1): 34 – 44.
- [74] LI S B, SAUTER D, AUBRUN C, et al. Stability guaranteed active fault-tolerant control of networked control systems[J]. *Journal of Control Science and Engineering*, 2008, 2008(Special issue): 1 – 9.
- [75] KONG D M, FANG H J. Stable fault-tolerance control for a class of networked control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(2): 267 – 273.
- [76] 王武, 林琼斌, 杨富文. 具有随机通讯时延的离散网络化系统的 H_∞ 滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 366 – 370.
(WANG Wu, LIN Qiongbai, YANG Fuwen. H_∞ filter design for discrete-time networked systems with random communication delays[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 366 – 370.)
- [77] LIU G P, MU J X, REES D, et al. Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC[J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(4): 288 – 297.
- [78] 刘云霞, 丁强, 钟麦英. 网络控制系统故障诊断滤波器设计的LMI方法[J]. 山东大学学报, 2005, 35(3): 63 – 67.
(LIU Yunxia, DING Qiang, ZHONG Maiying. A LMI approach to fault detection filter design for networked control systems[J]. *Journal of Shandong University*, 2005, 35(3): 63 – 67.)
- [79] HE X, WANG Z D, ZHOU D H. Robust H_∞ filtering for networked systems with multiple state delays[J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(8): 1217 – 1232.

作者简介:

王永强 (1982—), 男, 2004年毕业于西安交通大学电气工程学院获得双学士学位, 现为清华大学博士研究生, 目前研究方向为故障检测和网络化控制系统, E-mail: wangyq04@mails.tsinghua.edu.cn;

叶昊 (1969—), 男, 分别于1992和1996年在清华大学自动化系获得学士学位和博士学位. 现为清华大学自动化系教授. 目前研究方向为故障诊断, E-mail: haoye@tsinghua.edu.cn;

王桂增 (1941—), 男, 1965年毕业于清华大学, 现为清华大学自动化系教授, 目前研究方向为软测量和动态系统的故障诊断, E-mail: wgz@tsinghua.edu.cn.