

## 基于丢包和带宽限制网络化系统稳定性分析

詹习生<sup>1,2</sup>, 吴杰<sup>1†</sup>, 关治洪<sup>2</sup>, 姜晓伟<sup>1</sup>

(1. 湖北师范学院 机电与控制工程学院, 湖北 黄石 435002; 2. 华中科技大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 基于数据包丢失和网络带宽限制研究了网络化系统稳定性问题. 通信网络的特征通过数据包丢失、带宽和加性白噪声来体现. 采用频域的方法得到了网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值. 该最小(极限)值说明了网络化系统稳定所需信噪比是由通信网络通道的丢包率、带宽、系统的不稳定极点的位置和非最小相位零点的位置决定. 研究结果进一步揭示网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值与系统本质特征(非最小相位零点的位置和不稳定极点的位置)和通信网络参数(数据包丢失和带宽)的关系. 仿真结果说明该理论的正确性.

**关键词:** 不稳定极点; 非最小相位零点; 网络化系统; 丢包率; 带宽

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Stability analysis of networked system based on packet dropouts and bandwidth constraints

ZHAN Xi-sheng<sup>1,2</sup>, WU Jie<sup>1†</sup>, GUAN Zhi-hong<sup>2</sup>, JIANG Xiao-wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Hubei Normal University, Huangshi Hubei 435002, China;  
2. College of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** The stability of networked system with packet dropouts and network bandwidth constraints is investigated. The communication network is characterized by packet dropouts, bandwidth and the additive white noise. The minimal value of signal-to-noise ratio to stabilize the networked system is obtained by frequency-domain approach. It is shown that the minimal value is heavily dependent on nonminimum phase zero positions, unstable pole positions of the given plant, the packet dropout probability and the bandwidth of communication network. The obtained result shows the relationship among the stability of networked system, structural characteristics of the given plant (non-minimum phase zero positions and unstable pole positions) and communication network parameters (packet dropouts, bandwidth). A typical example is given to illustrate the theoretical results.

**Key words:** unstable poles; nonminimum phase zeros; networked systems; packet dropout probability; bandwidth

### 1 引言(Introduction)

控制系统的性能极限研究一直是一个重要的研究方向. 目前, 国内外许多学者从事文献[1–3]这方面的研究. 文献[2]指出线性时不变系统的性能极限是由系统的不稳定极点的位置和非最小相位零点的位置决定的; 文献[3]中进一步指出, 多输入多输出系统的性能极限不仅由系统的非最小相位零点的位置和不稳定极点的位置决定的, 而且还与零点方向和极点方向有关. 目前得到的结果都说明控制系统的性能极限由系统的本质特征决定. 这些理论在研究分析系统的性能极限与系统的本质特征之间的关系都是非常有用的, 对于了解系统的局限性和控制设计也是很有帮助的, 从而这些理论为控制系统设计提供技术指导.

在近几年中, 网络化系统已广泛应用于许多领域, 如工业自动化、分布式移动通信、无人机等<sup>[4–5]</sup>. 在网络化系统带来很多优点的同时, 也给人们生活带来了许多新的挑战. 在网络化系统中, 数据是通过通信网络传递的, 而通信网络的带宽和信道容量(信噪比)有限, 就会产生数据包丢失和延时的问题, 这些问题往往会导致系统性能下降, 甚至导致系统不稳定. 而传统的控制理论技术不能简单地应用于网络化系统, 面对现有网络化系统中出现的新问题, 就应该采用新的分析方法来研究和设计网络化系统. 目前国内外许多学者在这方面做了大量的工作. 文献[6]针对有通信网络诱导时延和数据包丢失的网络化控制系统的稳定性问题进行深刻研究. 文献[7]考虑了网络控制系统在

收稿日期: 2013–10–10; 录用日期: 2014–03–26.

†通信作者. E-mail: wujiezhan@163.com; Tel.: +86 7146571055.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61100076, 61370093, 61364002); 中国博士后基金资助项目(2013M540581); 湖北省教育厅青年基金资助项目(Q20142506).

网络诱导时延情况下的建模问题,并进一步研究了系统稳定性的条件和控制器设计问题.文献[8]考虑变时滞和多数据包丢失的情况下研究网络化控制系统的 $H_\infty$ 控制问题,并得到系统满足均方意义下指数稳定充分条件.文献[9]考虑时变传输间隔、时变传输时延和数据包丢失的影响研究网络化系统的稳定性,并得出系统稳定的条件.文献[10]考虑了网络控制系统的在随机测量时滞的情况下的最优估计问题.以上这些都是从状态空间的角度来研究网络化系统的稳定性问题,并通过求解线性不等式的方法获得系统稳定的条件,但是这些研究成果大部分都是基于通信网络诱导时延和数据包丢失等情况研究网络化系统稳定性问题,很少考虑通信网络带宽的影响.

在网络化系统分析与设计中,通信网络带宽是一个非常重要的参数.文献[10]基于通信网络带宽的限制和噪声影响研究多变量多通道网络化系统的最优性能问题.文献[11]指出多变量离散控制系统的最优跟踪性能是由系统的本质特征和网络通道的带宽决定.文献[12]基于信噪比和时延影响研究网络控制系统的稳定性问题.文献[13]基于带宽的约束研究不稳定时滞系统的稳定性问题.在实际网络化系统通讯过程中,通道里传输的信号都是用其频域特性来描述的,然而采用频域分析方法来分析网络化系统稳定性问题却很少.目前采用频域方法研究网络控制系统性能已经取得一些成果<sup>[14-17]</sup>,研究所得到的结果均表明网络控制系统性能极限由系统内部结构特征和网络通道参数决定.因此采用频域分析方法来研究网络化系统的相关问题具有很大的优势.

基于通信网络带宽和数据包丢失的影响研究了网络化系统的稳定性问题.通信网络通道的带宽通过滤波器来模拟,数据包丢失过程通过伯努利分布的随机过程来模拟.采用频域分析方法和谱分解技术得到网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值.该最小(极限)值是由系统的非最小相位零点的位置和不稳定极点的位置以及带宽和丢包概率决定.研究结果表明镇定网络化系统所需信噪比的最小值与系统的本质特征和通信网络参数之间存在着紧密的联系,从理论上,将给网络化系统的设计以指导.

$\mathbb{C}_+ := \{s : \text{Re}(s) > 0\}$ 表示右平面,  $\mathbb{C}_- := \{s : \text{Re}(s) < 0\}$ 表示左平面.  $\mathcal{H}_2$ 和 $\mathcal{H}_2^\perp$ 表示在 $\mathbb{C}_+$ 和 $\mathbb{C}_-$ 中可解析函数构成的子空间.  $\|\cdot\|$ 表示欧几里得向量范数和 $\mathcal{L}_2$ 空间中的 $\|\cdot\|_2$ 范数.  $\mathcal{L}_2$ 空间是有内积的希尔伯特空间

$$\langle f, g \rangle := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[(f^H(j\omega)g(j\omega))]d\omega.$$

可以进一步得出 $\|f\|_2^2 := \langle f, f \rangle$ . 对于任意的 $f, g \in \mathcal{L}_2$ , 如果 $\langle f, g \rangle = 0$ 则他们是正交的.  $\mathcal{L}_2$ 空间可正交分解为子空间 $\mathcal{H}_2$ 和 $\mathcal{H}_2^\perp$ <sup>[18]</sup>. 最后,  $\mathcal{RH}_\infty$ 定义为所

有有理、正则、稳定的传递函数构成的集合.

## 2 问题描述(Problem formulations)

本文只考虑传感器与控制器之间相差很远,数据通过网络传输,并且同时考虑通信网络带宽,数据包丢失和通道加性白噪声(additive white noise, AWN)的影响.这些因素对无线通信系统和网络化系统中数据的传输存在着重要的影响.虽然可以通过对系统中通信和控制协议进行优化,但是仍然不能保证网络化系统绝对稳定.基于上述分析本文将研究通信网络带宽、数据包丢失和白噪声影响下的网络化系统的稳定性问题.控制系统框图如图1所示.在图1中: $G$ 代表对象的模型,  $K$ 代表单自由度补偿器,  $y$ 代表系统输出,  $G(s)$ ,  $K(s)$ 和 $Y(s)$ 分别代表它们的传递函数.通道网络的特征分别通过网络带宽 $H$ , 数据丢包 $d_r$ 和白色噪声 $n$ 体现.  $H(s)$ 表示网络带宽 $H$ 的传递函数.这里假设 $H(s)$ 是稳定的、最小相位的传递函数,结合实际情况,采用线性时不变巴特沃斯低通滤波器来模拟通信网络的带宽 $H(s)$ .数据包丢失过程可以用一个伯努利分布的随机过程 $d_r$ 来模拟.

$$d_r = \begin{cases} 0, & \text{如果系统输出的数据没有成功传给控制器,} \\ 1, & \text{如果系统输出的数据成功地传给控制器,} \end{cases}$$

且 $d_r$ 的分布概率为 $P\{d_r = 1\} = 1 - \alpha$ ,  $P\{d_r = 0\} = \alpha$ ,  $0 \leq \alpha < 1$ ,  $\alpha$ 表示数据包丢失的概率.在后面的分析中,假设数据包丢失过程与加性白噪声是完全独立的.

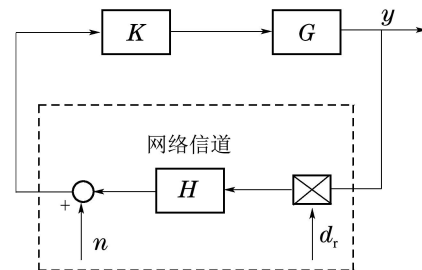


图1 网络化系统结构图

Fig 1 The physical architecture of networked system

一般通信网络通道的输入能量都是受限的,即

$$E\{\|Y\|^2\} < \Gamma,$$

其中 $\Gamma$ 为网络通道的输入能量的最大值.

要使网络化系统达到稳定,通信网络通道的输入能量必须大于某个最小(极限)值,也就是通信网络通道的信噪比必须大于某个最小(极限)值,也即是网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值.为了得到使网络化系统稳定的所需信噪比的最小(极限)值,本文首先推导出系统输出功率谱密度的表达式.根据图1可以得出

$$Y = (Yd_rH + n)GK. \quad (1)$$

首先定义 $S_Y(j\omega)$ 为通信网络通道的输出频率特

性,  $S_{nY}(j\omega)$  为通信网络通道的白噪声到系统输出的频率特性. 根据文献[17]的方法和简单的计算, 式(1)可以变为

$$S_Y(j\omega) = \frac{G(j\omega)K(j\omega)}{1 - (1 - \alpha)H(j\omega)G(j\omega)K(j\omega)} S_{nY}(j\omega).$$

进一步, 根据文献[17]可以得到

$$E\{\|Y\|^2\} = P = \left\| \frac{KG}{1 - HK(1 - \alpha)G} \right\|_2^2 \Phi.$$

这里  $P$  表示通信网络通道的输入能量,  $\Phi$  表示白噪声的功率谱密度. 定义网络通道信噪比  $\gamma = P/\Phi$ , 因此系统稳定所需要信噪比应该满足

$$\left\| \frac{KG}{1 - HK(1 - \alpha)G} \right\|_2^2 < \frac{P}{\Phi}. \quad (2)$$

### 3 网络化系统稳定性分析(Stability analysis of networked systems)

对于任意的传递函数  $(1 - \alpha)HG$ , 本文都可以将  $(1 - \alpha)HG$  进行互质分解, 其结果可以表示为

$$(1 - \alpha)HG = \frac{N}{M}, \quad (3)$$

其中  $N, M \in \mathcal{RH}_\infty$ , 且满足Bezout恒等式

$$MX - NY = 1, \quad (4)$$

其中  $X, Y \in \mathcal{RH}_\infty$ . 根据文献[2], 所有使系统稳定的补偿器集合  $\mathcal{K}$  都可以用Youla参数化来表示

$$\mathcal{K} := \left\{ K : K = \frac{Y - MQ}{X - NQ}, Q \in \mathcal{RH}_\infty \right\}. \quad (5)$$

众所周知, 任一个非最小相位传递函数都可以分解一个最小相位部分和一个全通的因子<sup>[18]</sup>, 则

$$N = (1 - \alpha)HL_z N_m, M = B_p M_m, \quad (6)$$

其中:  $L_z$  和  $B_p$  为全通因子,  $M_m$  和  $N_m$  是最小相位部分,  $L_z$  包括了给定对象所有非最小相位零点  $z_i \in \mathcal{C}_+$ ,  $i = 1, \dots, n$  和  $B_p$  包括了给定对象所有不稳定的极点  $p_j \in \mathcal{C}_+$ ,  $j = 1, \dots, m$ <sup>[2]</sup>.  $L_z$  和  $B_p$  可以表示为

$$L_z(s) = \prod_{i=1}^{n_s} \frac{s - z_i}{s + \bar{z}_i}, B_p(s) = \prod_{j=1}^m \frac{s - p_j}{s + \bar{p}_j}. \quad (7)$$

**定理 1** 考虑如图1所示的网络化系统, 假设被控对象有不稳定极点  $p_j \in \mathcal{C}_+$ ,  $j = 1, \dots, m$  和非最小相位零点  $z_i \in \mathcal{C}_+$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 则要使网络化系统稳定, 必须使得通信网络通道的信噪比满足

$$\frac{P}{\Phi} > \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \times \sum_{j,i \in m} \frac{4\text{Re}(p_j)\text{Re}(p_i)}{\bar{p}_j + p_i} \frac{L_z^{-1}(p_i)L_z^{-H}(p_j)}{H(p_j)H^H(p_i)\bar{b}_j b_i}, \quad (8)$$

其中  $b_j = \prod_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \frac{p_i - p_j}{p_j + \bar{p}_i}$ .

证 定义噪声和输出信号的传递函数为  $T_{yn}$ , 并且

根据式(2)可以得到

$$T_{yn} = \frac{KG}{1 - HK(1 - \alpha)G},$$

本文的目的就是得到

$$\inf_{K \in \mathcal{K}} \left\| \frac{KG}{1 - HK(1 - \alpha)G} \right\|_2^2.$$

根据式(2)–(5), 可得到

$$J_{yn} = (1 - \alpha)^{-1} H^{-1}(Y - MQ)N.$$

定义

$$J_1^* = \inf_{Q \in \mathcal{RH}_\infty} \|T_{yn}\|_2^2,$$

则

$$J_1^* = \inf_{K \in \mathcal{K}} \left\| \frac{H^{-1}(Y - MQ)}{1 - \alpha} N \right\|_2^2. \quad (9)$$

因为  $L_z$  是全通因子, 根据式(6)(9),  $J_1^*$  可化为

$$J_1^* = \inf_{K \in \mathcal{K}} \|(Y - MQ)N_m\|_2^2.$$

因为  $B_p$  是全通因子,  $J_1^*$  可以进一步化为

$$J_1^* = \inf_{K \in \mathcal{K}} \left\| \frac{N_m Y}{B_p} - M_m N_m Q \right\|_2^2.$$

根据部分分式分解有

$$\frac{N_m Y}{B_p} = \sum_{j \in m} \left( \frac{\bar{p}_j + s}{s - p_j} \right) \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} + R_1,$$

其中:

$$R_1 \in \mathcal{RH}_\infty, b_j = \prod_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \frac{p_i - p_j}{p_j + \bar{p}_i}.$$

因此

$$J_1^* = \inf_{Q \in \mathcal{RH}_\infty} \left\| \sum_{j \in m} \left( \frac{\bar{p}_j + s}{s - p_j} - 1 \right) \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} + R_1 + \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} - N_m Q M_m \right\|_2^2.$$

因为

$$\sum_{j \in m} \left( \frac{\bar{p}_j + s}{s - p_j} - 1 \right) \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j}, R_1 + \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} - N_m Q M_m$$

分别属于  $\mathcal{H}_2^+$  和  $\mathcal{H}_2$  空间, 则

$$J_1^* = \inf_{Q \in \mathcal{H}_\infty} \left\| R_1 + \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} - N_m Q M_m \right\|_2^2 + \left\| \sum_{j \in m} \frac{2\text{Re}(p_j)}{s - p_j} \frac{N_m(p_j)Y(p_j)}{b_j} \right\|_2^2. \quad (10)$$

根据式(4)和  $M(p_j) = 0$ , 可以得到

$$N_m(p_j)Y(p_j) = \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{1 - \alpha}. \quad (11)$$

把式(11)代入式(10)可以得到

$$J_1^* = \left\| \sum_{j \in m} \frac{2\text{Re}(p_j)}{s - p_j} \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{(1 - \alpha)b_j} \right\|_2^2 + \inf_{Q \in \mathcal{RH}_\infty} \left\| R_1 + \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{(1 - \alpha)b_j} - N_m Q M_m \right\|_2^2. \quad (12)$$

因为 $N_m$ 和 $M_m$ 是最小相位部分,同时 $R_1 \in \mathcal{RH}_\infty$ ,  $Q \in \mathcal{RH}_\infty$ , 可以通过选择 $Q$ 使得

$$\inf_{Q \in \mathcal{RH}_\infty} \left\| R_1 + \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{(1 - \alpha)b_j} - N_m Q M_m \right\|_2^2$$

任意小,即

$$\inf_{Q \in \mathcal{RH}_\infty} \left\| R_1 + \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{(1 - \alpha)b_j} - N_m Q M_m \right\|_2^2 = 0.$$

因此

$$J_1^* = \left\| \sum_{j \in m} \frac{2\text{Re}(p_j)}{s - p_j} \frac{H^{-1}(p_j)L_z^{-1}(p_j)}{(1 - \alpha)b_j} \right\|_2^2.$$

通过一个简单的计算可以得到

$$J_1^* = \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \sum_{j, i \in m} \frac{4\text{Re}(p_j)\text{Re}(p_i)}{\bar{p}_j + p_i} \frac{L_z^{-1}(p_i)L_z^{-H}(p_j)}{H(p_j)H^H(p_i)\bar{b}_j b_i}.$$

证毕.

定理表明了网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值由系统的非最小相位零点的位置, 不稳定极点的位置, 通信网络带宽和数据丢包概率决定的.

#### 4 数值仿真(Numerical example)

考虑不稳定系统模型如下所示:

$$G(s) = \frac{s - 1}{s(s - 2)(s + 3)}.$$

该传递函数是非最小相位的, 并且含有一个不稳定的极点 $p_1 = 2$ , 一个非最小相位零点 $z_1 = 1$ . 网络数据丢包概率为 $\alpha \in (0, 1)$ . 二阶低通巴特沃斯滤波器被用来模拟通信网络带宽 $H(s)$ .  $H^1(s)$ 和 $H^2(s)$ 分别代表不同网络通道的带宽

$$H^1(s) = \frac{400}{s^2 + 28.28s + 400},$$

$$H^2(s) = \frac{6400}{s^2 + 113.1s + 6400}.$$

根据定理, 网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值为

$$J^* = \frac{36}{(1 - \alpha)^2 H(2)H^H(2)}.$$

基于不同的丢包率和带宽的网络化系统稳定的最小(极限)值如图2所示. 从图2中可以看出, 由于通信网络通道的带宽限制和数据丢包的影响, 网络化系统稳定的最小(极限)值进一步增大, 同时还可以看出, 通信网络通道的带宽越宽, 网络化系统稳定所需信噪比

的最小(极限)值越小.

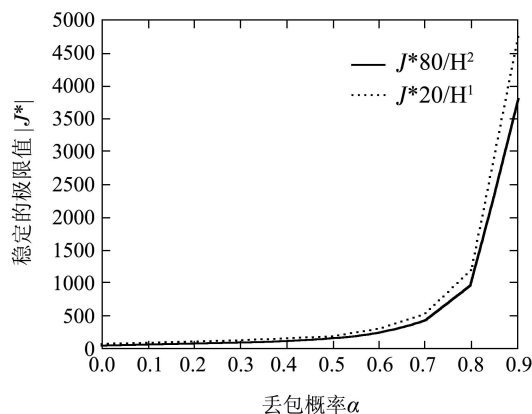


图2 基于不同丢包率的系统稳定极限值

Fig 2 Stability Limitation of systems with different packet loss rate

#### 5 结论(Conclusions)

基于通信网络通道带宽和数据丢包约束研究网络化系统稳定性问题. 通过用伯努利随机过程来模拟通信网络通道的数据丢包和低通巴特沃斯滤波器来模拟网络通道带宽, 同时采用谱分解的技术得到网络化系统稳定所需信噪比的最小(极限)值. 该极限值是由系统的非最小相位零点的位置, 不稳定的极点的位置, 通信网络通道的带宽和数据丢包率决定. 所得到的结论可为网络化系统设计提供理论指导. 仿真结果说明了本文所得理论的可行性和正确性.

#### 参考文献(References):

- [1] ZHANG X S, GUAN Z H, LIAO R Q, et al. Optimal performance in tracking stochastic signal under disturbance rejection [J]. *Asian Journal of Control*, 2012, 14(6): 1608 - 1616.
- [2] MORARI M, ZAFIRIOU E. *Robust Process Control* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
- [3] CHEN J, QIU L, TOKER O. Limitations on maximal tracking accuracy [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45 (2): 326 - 331.
- [4] ZHANG L X, GAO H J, KAYNAK O. Network-induced constraints in networked control systems: A survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 403 - 416.
- [5] CHEN W, QIU L. Stabilization of networked control systems with multirate sampling [J]. *Automatica*, 2013, 49(6): 1528 - 1537.
- [6] XU H, JAGANNATHAN S, LEWIS F L. Stochastic optimal control of unknown linear networked control system in the presence of random delays and packet losses [J]. *Automatica*, 2012, 48(6): 1017 - 1030.
- [7] 杨春曦, 关治洪, 黄剑, 等. 时延加权融合技术的无线传感器网络控制 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28 (2): 157 - 165. (YANG Chunxi, GUAN Zhihong, HUANG Jian, et al. Stabilization of networked control systems with wireless sensors based on time delay weighted fusion [J]. *Control Theory and Applications*, 2011, 28(2): 157 - 165.)
- [8] 严怀成, 苏阵阵, 杨富文, 等. 具有时变时滞和多包丢失的网络控制系统量化 $H_\infty$ 控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(4): 469 - 474.

- (YAN Huaicheng, SU Zhenzhen, YANG Fuwen, et al. Quantized H-infinity control for networked control systems with time-varying delay and multiple packet dropouts [J]. *Control Theory and Applications*, 2013, 30(4): 469 – 474.)
- [9] DONKERS M F, HEEMELS W H, BERNARDINI D. Stability analysis of stochastic networked control systems [J]. *Automatica*, 2012, 48(5): 817 – 925.
- [10] 杨园华, 韩春艳, 刘晓华. 有界随机测量时滞的网络控制系统的最优估计 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(2): 181 – 187.  
(YANG Yuanhua, HAN Chunyan, LIU Xiaohua. Optimal estimation for networked control systems with bounded random measurement delays [J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(2): 181 – 187.)
- [11] GUAN Z H, CHEN C Y, FENG G, et al. Optimal tracking performance limitation of networked control systems with Limited bandwidth and additive colored white gaussian noise [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(1): 189 – 193.
- [12] GUAN Z H, ZHAN X S, FENG G. Optimal tracking performance of MIMO discrete-time systems with communication constraints [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, 22(13): 1429 – 1439.
- [13] ROJAS A J, BRASLAVSKY H, MIDDLETON H. Fundamental limitations in control over a communication channel [J]. *Automatica*, 2008, 44(12): 3147 – 3151.
- [14] ROJAS A J, BRASLAVSKY H, MIDDLETON H. Output feedback stabilization over bandwidth limited, signal to noise ratio constrained communication channels [C] // *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis, MN: IEEE, 2006: 14 – 16.
- [15] 詹习生, 关治洪, 吴博. 网络化控制系统最优跟踪性能 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(12): 48 – 51.  
(ZHAN Xisheng, GUAN Zhihong, WU Bo. Optimal tracking performance of networked control systems [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(12): 48 – 51.)
- [16] ZHAN X S, GUAN Z H, ZHANG X H, et al. Optimal performance of SISO discrete-time systems based on network-induced delay [J]. *European Journal of Control*, 2013, 19(1): 37 – 41.
- [17] 詹习生, 关治洪, 吴杰, 等. 多通道网络化系统跟踪性能极限 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(4): 503 – 507.  
(ZHAN Xisheng, GUAN Zhihong, WU Jie, et al. Tracking performance limitation of multi-channel networked systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(4): 503 – 507.)
- [18] GUAN Z H, JIANG X W, ZHAN X S, et al. Optimal tracking over noisy channels in the presence of data dropouts [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2013, 7(8): 1634 – 1641.
- [19] ZHOU K M, DOYLE J C. *Robust and Optimal Control* [M]. New York, U.S.: Prentice Hall, Inc., 1995.

### 作者简介:

**詹习生** (1979–), 男, 副教授, 博士后, 目前研究方向为网络化控制系统、复杂网络和迭代学习控制, E-mail: xisheng519@126.com;

**吴杰** (1980–), 女, 副教授, 硕士, 目前研究方向为复杂网络与工业过程控制, E-mail: wujiezhan@163.com;

**关治洪** (1955–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂网络系统与控制、脉冲切换混杂系统、群集智能系统、非线性混沌分叉动力学等, E-mail: zhguan@mail.hust.edu.cn;

**姜晓伟** (1983–), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为网络化控制系统与最优控制, E-mail: jxw07045136@126.com.