

## 时隙ALOHA协议下的网络化控制系统协同设计

李志慧<sup>1</sup>, 刘中常<sup>2†</sup>, 郭戈<sup>3,4</sup>

(1. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026;  
3. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 4. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对网络化控制系统中信道容量有限的问题, 本文提出一种基于时隙ALOHA通信协议的控制与通信协同设计方法。将控制系统的采样周期划分为若干等长度的时隙, 在每个时隙中, 系统的分布式传感器通过时隙ALOHA协议来随机竞争接入网络。由于在不同的采样周期各个传感器的接入状态不同, 整个状态反馈控制系统将在若干子系统之间进行切换。据此, 本文建立了离散的切换系统模型, 并利用分段李雅普诺夫函数方法和平均驻留时间技术得到了能够保证系统指数稳定的充分条件。然后, 给出能够保证控制系统稳定所需的信道吞吐率的界限, 进而得到了时隙ALOHA协议中的最大重传次数与控制系统衰减率的定量关系。通过上述方法, 本文建立了控制-通信协同设计的框架结构, 可将控制器的增益矩阵和时隙ALOHA通信协议进行协同设计。最后, 通过仿真验证了本文所提出的协同设计方法的有效性。

**关键词:** 网络化控制系统; 时隙ALOHA; 吞吐率; 协同设计; 切换系统

**引用格式:** 李志慧, 刘中常, 郭戈. 时隙ALOHA协议下的网络化控制系统协同设计. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1122–1129

DOI: 10.7641/CTA.2018.80270

## Control communication co-design for networked control systems with slotted ALOHA protocol

LI Zhi-hui<sup>1</sup>, LIU Zhong-chang<sup>2†</sup>, GUO Ge<sup>3,4</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;  
2. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;  
3. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Industrial Process, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;  
4. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** Considering that the communication channel of networked control systems (NCSs) is capacity limited, this paper investigates a control-communication co-design problem by using the slotted ALOHA protocol. Each sampling time interval is divided into several time slots, in each of which the distributed sensors randomly contend to access the communication channel based on the slotted ALOHA protocol. As the access states of the sensors change in different sampling time periods, the closed-loop NCSs switch among subsystems that are modeled from the original NCSs. Accordingly, a discrete time switch system model is built in this paper, and sufficient conditions that can ensure the exponential stability of the NCSs are derived by applying the piecewise Lyapunov function method and the average dwell time approach. Then, the lower bound of the communication throughput to guarantee the exponential stability of the NCSs is provided. Moreover, the quantitative relation between the maximum number of retransmissions in the slotted ALOHA protocol and the attenuation rate of the NCSs is derived. Based on these results, a control-communication co-design method is proposed such that the control gain matrix and the slotted ALOHA protocol can be designed simultaneously. Finally, a numerical simulation example illustrates the effectiveness of the proposed co-design method.

**Key words:** networked control systems (NCSs); slotted ALOHA; throughput; co-design; switching system

**Citation:** LI Zhihui, LIU Zhongchang, GUO Ge. Control communication co-design for networked control systems with slotted ALOHA protocol. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(7): 1122–1129

收稿日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-09-04。

†通信作者. E-mail: zcliu@foxmail.com; Tel.: +86 13149983716.

本文责任编辑: 陈积明。

国家自然科学基金项目(61573077, 61703445), 辽宁省自然科学基金项目(20180540064), 广东省自然科学基金项目(1614050001452, 2017A030310050), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132018123)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573077, 61703445), the Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180540064), the Guangdong Natural Science Foundation (1614050001452, 2017A030310050) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132018123).

## 1 引言

近年来,网络化控制系统因其具有便捷、成本低、易维护等优点,受到了学者的广泛关注和研究。网络化控制系统已广泛地应用到各行各业,如工业控制、环境监测和交通系统等<sup>[1-3]</sup>。在网络化控制系统中,多个分布式的节点一般需要通过网络的通信信道来传输信息以实现资源共享,进而完成控制任务。然而,由于信道容量有限,多个节点同时接入网络时可能产生大量的信息传输冲突,甚至引起网络崩溃<sup>[4]</sup>,从而影响控制系统的稳定性。因而,同时保证控制系统与通信系统的稳定是一个具有挑战性的问题。

为了保证通信系统的稳定,在通信系统中一般采用媒介接入协议(medium access control, MAC)来定义网络节点如何访问共享的通信介质或信道。一般来说,MAC协议可分为确定性协议和随机协议。确定性协议<sup>[5-8]</sup>(例如,轮询协议、时分多址协议)已经广泛地应用到网络化控制系统中,然而这种通信协议一般需要一个中心节点来分配各个节点的网络接入状态,或者可扩展性差(例如时分协议)。而随机媒介接入协议(如ALOHA协议<sup>[9]</sup>、时隙ALOHA协议<sup>[10-11]</sup>和载波侦听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA)协议<sup>[12]</sup>等)可由各分布式的远程节点自主选择接入信道的时间,不需要中心节点的调度,因而适用于分布式的网络化控制系统中。随机媒介接入协议一般通过重传机制<sup>[13]</sup>来处理多个节点同时接入信道产生的碰撞问题。其中,时隙ALOHA协议是纯ALOHA协议的改进,通过将媒介接入的时间划分为小的时隙来提高吞吐率。另外时隙ALOHA协议与CSMA协议相比成本更低,具有较强的实用性。基于此,本文研究利用时隙ALOHA协议作为网络化控制系统中分布式节点的信道访问协议,并分析其对控制系统性能的影响。

在网络化控制系统的研究中,对多传感器调度问题的研究受到越来越多学者的关注。文献[14-15]将传感器接入网络的过程描述为随机过程,结合李雅普诺夫函数方法获得系统稳定的充分条件。文献[16]针对传感器随机调度问题,利用优化算法使状态误差估计量最小。文献[17]建立了传感器传输的随机模型,利用优化方法研究系统的控制性能。文献[18]研究传感器的随机调度问题,寻找优化的调度策略。文献[19-20]研究事件驱动传感器对控制系统的影响,给出最小均方误差估计器。以上文献着重讨论传感器的网络接入状态对控制系统性能产生的影响,而未将通信协议和控制器进行协同设计。Tatikonda等在文献[21-22]中研究了传感器的信息传输速率与控制系统稳定性之间的关系,从而为通信系统和控制系统的协同设计提供了参考依据。文献[23]中采用解析的二进制序列来调度节点接入网络,并对二进制序列的生成参数和控制器进行了协同设计。然而文献[23]中的二进制

序列是确定性的通信协议,需要中心节点进行分配和调度。在本文中,所有的传感器采用时隙ALOHA协议来接入网络,该协议为随机协议,不需要中心节点的调度。另外,切换控制的方法经常被用于网络化控制系统的研究当中,例如文献[24-25]针对传感器传输过程中存在的延时和丢包问题,利用任意切换的方法研究网络化控制系统的渐近稳定性。然而,文献[24-25]未能得到网络化控制系统的稳定性与丢包率之间的关系。文献[26]针对传感器调度过程中存在的丢包问题,利用了基于平均驻留时间的切换系统方法,得到了网络化控制系统的稳定性与丢包率之间的关系。受此启发,本文也将利用基于平均驻留时间的切换系统方法,分析控制系统稳定性与通信系统吞吐率的关系,并进一步对控制器增益和时隙ALOHA协议进行协同设计。

本文以多维的线性时不变系统为研究对象,假设系统的每个状态的测量数据由相互独立的分布式传感器提供,所有的传感器共用同一个通信信道。为了解决多个传感器同时传输数据的冲突问题,采用时隙ALOHA协议作为传感器的信道访问机制。根据传感器接入状态的不同,本文建立了离散时间切换系统模型,利用平均驻留时间的方法获得控制系统所需吞吐率与系统状态指数衰减率的定量关系,并进一步得到时隙ALOHA协议的最大重传次数与系统状态指数衰减率的定量关系。根据这些关系,本文提供了通信协议与控制器的协同设计方法,并通过数值仿真展示了协同设计方法的有效性及其相较于非协同设计方法的优越性。

本文后续结构如下:第2部分针对时隙ALOHA协议下的网络化控制系统,分析了通信系统性能并建立了切换系统模型;第3部分给出了主要结果,包括系统的指数稳定性分析,满足控制系统所需的最小吞吐率分析,时隙ALOHA协议中的最大重传次数与系统状态衰减率的定量关系,以及控制器与最大重传次数的协同设计算法;第4部分通过MATLAB数值仿真证明本文算法的有效性;第5部分给出了结论。

## 2 问题描述

### 2.1 基本系统模型

考虑网络化控制系统如图1所示。传感器采集系统状态信息并将其通过网络发送至远端控制器。后者根据反馈信息做出控制决策并将控制指令发送给执行器,进而作用在被控对象上。采用的控制器与执行器是时间驱动的。网络化控制系统的离散时间数学模型表示为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

其中:  $x \in \mathbb{R}^n$  代表系统状态,  $u \in \mathbb{R}^m$  为控制输入,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $(A, B)$  为可镇定矩阵对。

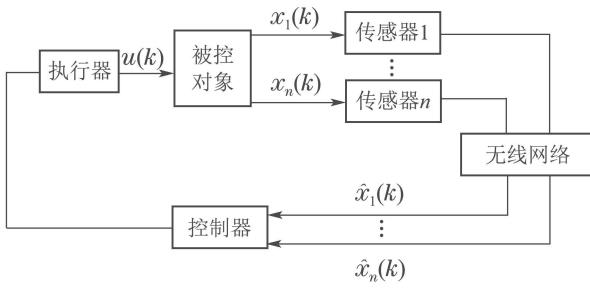


图 1 网络化控制系统模型

Fig. 1 The diagram of a networked control system

## 2.2 时隙ALOHA协议及切换系统模型

本文中假定 $n$ 个传感器通过单信道网络传输信息,由于网络的信道容量有限,这 $n$ 个传感器无法同时接入网络信道来传送数据至控制器.本文采用时隙ALOHA协议作为传感器接入无线网络的媒介访问协议.在时隙ALOHA协议中<sup>[27]</sup>,时间轴被划分为等长度为 $\tau$ 的时隙.在时隙开始时刻,传感器请求接入网络信道,如果接入成功则传输数据至控制器.假设传感器可以在一个时隙内完成信道的接入和数据的传输.在任意时隙的开始时刻,如果没有传感器请求接入网络,则信道将处于空闲状态;如果只有一个传感器请求接入网络,则该传感器可以成功接入网络,此时,信道处于忙状态;如果不止一个传感器请求接入网络,则所有请求接入网络的传感器发送的信息将发生数据包的碰撞,此时信道处于碰撞状态.为了解决信息传输的碰撞问题,时隙ALOHA协议规定,所有发生碰撞的数据将被禁止传输,对应的传感器需随机等待 $M$ 个时隙重新请求发送数据包或丢弃数据包.而重传次数是有限的,最大的重传次数表示为 $r_{\max}$ .如果传感器进行第 $r$ , $r < r_{\max}$ 次重传时,其数据包发生碰撞,则传感器将会重新请求发送数据包;如果传感器进行第 $r_{\max}$ 次重传时其数据包仍发生碰撞,则放弃传输此数据包.在控制器之前存放一个缓存器,用来收集到达控制器的传感器信息.假设控制系统的采样周期为 $T$ ,每个传感器用于接入信道及传输数据的时间小于控制系统的采样周期.那么,在一个采样周期内,传感器或者成功传输数据或者因接入网络信道不成功超时而丢弃数据.

在第 $k$ 个采样周期,传感器 $i$ ( $i=1, 2, \dots, n$ ),接入网络的状态用 $\delta_i(k) \in \{0, 1\}$ 表示.  $\delta_i(k) = 1$ 表示传感器 $i$ 在第 $k$ 个采样周期成功接入网络,即传感器数据可以成功到达控制器;  $\delta_i(k) = 0$ 表示传感器在第 $k$ 个采样周期未成功接入网络,即控制器在第 $k$ 个采样周期无法接收到传感器 $i$ 的信息.在每个采样周期内,每个传感器有两种状态,对于 $n$ 个传感器,有 $2^n$ 种接入状态.用集合 $\varpi$ 表示接入网络的传感器,  $\varpi \in W$ ,其中 $W$ 表示 $\{1, \dots, n\}$ 的所有子集(包括空集,表示所有传感器未接入网络).接入网络的传感器个数 $\omega$ 为集

合 $\varpi$ 所含的元素个数.如果在 $n$ 个传感器中有 $\omega$ 个传感器接入了网络,则有 $C_n^\omega$ 种组合情况.用 $\omega_j$ 表示 $\omega \in \{0, 1, \dots, n\}$ 个传感器以第 $j \in \{1, \dots, C_n^\omega\}$ 种形式接入网络. $C_n^\omega$ 的所有形式用集合 $Z_\sigma = \{\omega_j : \omega = 0, 1, \dots, n, j = 1, \dots, C_n^\omega\}$ 来表示.则在第 $k$ 个采样周期,控制器接收到的状态信息表示为

$$\hat{x}(k) = \psi_{\omega_j}(k)x(k), \quad (2)$$

其中 $\psi_{\omega_j}(k) = \text{diag}\{\delta_1(k), \delta_2(k), \dots, \delta_n(k)\}$ 表示第 $k$ 个采样周期内某一种组合 $\omega_j \in Z_\sigma$ 的传感器接入网络的状态,其由时隙ALOHA协议决定.

选取控制器为如下状态反馈的形式:

$$u(k) = K\hat{x}(k). \quad (3)$$

那么,在第 $k$ 个采样周期,网络化控制系统(1)的闭环形式为

$$\begin{aligned} S_{\omega_j} : x(k+1) &= H_{\omega_j}(k)x(k), \\ H_{\omega_j}(k) &= (A + BK\psi_{\omega_j}(k)), \quad \omega_j \in Z_\sigma. \end{aligned}$$

对于所有的 $k$ ,网络化控制系统(1)表示为如下切换系统的形式:

$$x(k+1) = H_{\sigma(k)}x(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

其中:  $\sigma(k) = k_1, k_2, \dots, k_l$ ,  $0 < k_1 < k_2 < \dots < k_l < k$ ,  $H_{\sigma(k)} \in \{H_{\omega_j}(k) : \omega_j \in Z_\sigma\}$ .容易看出,由于 $n$ 个传感器接入网络的状态为 $2^n$ 种,存在 $2^n$ 个子系统 $S_{\omega_j}$ 相互切换.

本文的目标是获得保证系统稳定的控制器,进而设计时隙ALOHA协议中的相应参数,从而实现控制与通信协议的协同设计.

## 3 主要结果

### 3.1 指数稳定性分析

为系统(4)的子系统 $S_{\omega_j}$ 选取正定二次型函数如下:

$$V_{\omega_j}(k) = x^T(k)Q_{\omega_j}x(k), \quad (5)$$

其中 $Q_{\omega_j}$ 为对称正定矩阵.以下引理给出 $V_{\omega_j}(k)$ 指数增长或衰减的估计,其在主要结果的分析过程中有重要作用.

**引理 1** 对于任一 $\omega_j \in Z_\sigma$ ,选择参数 $\beta_{\omega_j} > 0$ ,如果存在对称正定矩阵 $Q_{\omega_j} > 0$ ,使得矩阵不等式

$$\Phi_{\omega_j} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} -Q_{\omega_j} & \beta_{\omega_j} H_{\omega_j}^T Q_{\omega_j} \\ \beta_{\omega_j} Q_{\omega_j} H_{\omega_j} & -Q_{\omega_j} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

成立,则函数 $V_{\omega_j}(k)$ 具有如下指数衰减或增长估计:

$$V_{\omega_j}(k) \leq \beta_{\omega_j}^{-2(k-k_0)} V_{\omega_j}(k_0), \quad \forall k > k_0. \quad (7)$$

**证** 考虑到切换系统(4)的任一子系统 $S_{\omega_j}$ , $\omega_j \in Z_\sigma$ ,定义 $z(k) = \beta_{\omega_j}^{k-k_0}x(k)$ , $\forall k > k_0$ ,可得新的子系统模型如下:

$$z(k+1) = \beta_{\omega_j} H_{\omega_j} z(k). \quad (8)$$

为系统(8)选择以下李雅普诺夫候选函数:

$$W_{\omega_j}(k) = z^T(k) Q_{\omega_j} z(k), \quad (9)$$

其中  $Q_{\omega_j}$  是不等式(6)的解. 沿系统(8),  $W_{\omega_j}(k)$  的一阶前向差分方程为

$$\begin{aligned} \Delta W_{\omega_j}(k) &= W_{\omega_j}(k+1) - W_{\omega_j}(k) = \\ &z^T(k) \Omega_{\omega_j} z(k), \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $\Omega_{\omega_j} = \beta_{\omega_j}^2 H_{\omega_j}^T Q_{\omega_j} H_{\omega_j} - Q_{\omega_j}$ . 依据 Schur 补引理知, 矩阵不等式(6)等价于  $\Omega_{\omega_j} < 0$ . 对于非零  $z(k)$ ,  $\Omega_{\omega_j} < 0$  意味着  $\Delta W_{\omega_j}(k) < 0$ , 从而  $W_{\omega_j}(k) < W_{\omega_j}(k_0)$ . 因此,

$$\begin{aligned} V_{\omega_j}(k) &= \beta_{\omega_j}^{-2(k-k_0)} z^T(k) Q_{\omega_j} z(k) = \\ &\beta_{\omega_j}^{-2(k-k_0)} W_{\omega_j}(k) \leqslant \\ &\beta_{\omega_j}^{-2(k-k_0)} W_{\omega_j}(k_0) = \\ &\beta_{\omega_j}^{-2(k-k_0)} V_{\omega_j}(k_0), \end{aligned} \quad (11)$$

等号只在  $z(k) = 0$  时成立. 证毕.

如果在足够长  $k$  个采样周期内, 所有传感器的某一接入状态  $\omega_j \in Z_\sigma$  发生了  $m_{\omega_j}$  次, 则相应的子系统  $S_{\omega_j}$  被激活的频率为  $r_{\omega_j} = m_{\omega_j}/k$ . 存在  $\sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n^\omega} r_{\omega_j} = 1$ .

定义  $\tau_a$  为所有传感器的接入状态的平均驻留采样周期个数. 下面的定理1给出了切换系统(4)指数稳定的充分条件.

**定理 1** 如果对于所有  $\omega_j \in Z_\sigma$  存在参数  $\beta_{\omega_j} > 0$  和对称正定矩阵  $Q_{\omega_j} > 0$ , 以及存在参数  $\beta > 1$  和  $\mu > 1$ , 使得以下不等式成立:

$$\Phi_{\omega_j} < 0, \forall \omega_j \in Z_\sigma, \quad (12)$$

$$Q_a \leqslant \mu Q_b, \forall a, b \in Z_\sigma, \quad (13)$$

$$\prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^\omega} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} \geqslant \beta, \quad (14)$$

且传感器接入状态的平均驻留采样周期个数  $\tau_a$  满足

$$\tau_a > \frac{\ln \mu}{2 \ln \beta}, \quad (15)$$

则系统(4)是指数稳定的, 且衰减率为  $\rho(\tau_a, \beta) = \beta \mu^{-\frac{1}{2\tau_a}} > 1$ .

**证** 选取分段李雅普诺夫候选函数

$$V_{\sigma(k)}(k) = x^T(k) Q_{\sigma(k)} x(k),$$

其中:  $Q_{\sigma(k)} \in \{Q_{\omega_j} > 0 : \omega_j \in Z_\sigma\}$ ,  $\sigma(k)$  为切换信号,  $0 < k_1 < k_2 < \dots < k_l \leqslant k$  为切换时刻. 依据不等式(13), 可得  $V_a \leqslant \mu V_b, \forall a, b \in Z_\sigma$ . 因此, 由引理1可得

$$V_{\sigma(k)}(k) \leqslant \beta_{\sigma(k)}^{-2(k-k_l)} V_{\sigma(k_l)}(k_l) \leqslant$$

$$\begin{aligned} \beta_{\sigma(k_l)}^{-2(k-k_l)} \mu V_{\sigma(k_l^-)}(k_l) &\leqslant \\ \mu \beta_{\sigma(k_l)}^{-2(k-k_l)} \beta_{\sigma(k_{l-1})}^{-2(k_l-k_{l-1})} V_{\sigma(k_{l-1})}(k_{l-1}) &\leqslant \\ \vdots \\ \mu^{N_\sigma[0,k]} \beta_{\sigma(k_l)}^{-2(k-k_l)} \dots \beta_{\sigma(0)}^{-2k_1} V_{\sigma(0)}(0), \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $k_l^-$  为切换时刻  $k_l$  的前沿;  $N_\sigma[0, k], k \geqslant 1$ , 表示  $\sigma(k)$  在时间间隔  $[0, k]$  的切换次数, 满足  $N_{\omega_j(k)} \leqslant N_0 + k/\tau_a$ ,  $\tau_a > 0$ ,  $N_0 \geqslant 0$ . 不失一般性, 选取  $N_0 = 0$ . 考虑到式(14), 可得

$$\begin{aligned} V_{\sigma(k)}(k) &\leqslant \mu^{N_\sigma[0,k]} \left( \prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^\omega} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} \right)^{-2k} V_{\sigma(0)}(0) \leqslant \\ &\mu^{N_\sigma[0,k]} \beta^{-2k} V_{\sigma(0)}(0) = \\ &\mu^{\frac{k}{\tau_a}} \beta^{-2k} V_{\sigma(0)}(0) = \\ &\rho^{-2k} V_{\sigma(0)}(0). \end{aligned} \quad (17)$$

进一步, 依据式(16)–(17), 可得

$$\theta_1 \leqslant V_{\sigma(k)}(k) \leqslant \rho^{-2k} V_{\sigma(0)}(0) \leqslant \rho^{-2k} \theta_2, \quad (18)$$

其中:  $\theta_1, \theta_2$  分别为  $\theta_1 = \min_{\omega_j \in Z_\sigma} \lambda_{\min}(Q_{\omega_j}) \|x(k)\|^2$ ,  $\theta_2 = \max_{\omega_j \in Z_\sigma} \lambda_{\max}(Q_{\omega_j}) \|x(0)\|^2$ ,  $\lambda_{\max}(Q_{\omega_j})$  和  $\lambda_{\min}(Q_{\omega_j})$  是矩阵  $Q_{\omega_j}$  的最大特征值和最小特征值. 因此, 可得  $\|x(k)\| \leqslant \rho^{-k} \sqrt{\theta_2/\theta_1} \|x(0)\|$ . 此外, 不等式(14)和(15)保证了  $\rho > 1$ . 因此, 系统(4)是指数稳定的, 且有衰减率  $\rho$ . 证毕.

**注 1** 对于离散时间系统, 切换只发生在不同的采样周期之间, 在一个采样周期内不会发生子系统间的切换. 考虑到  $\tau_a$  代表的是平均驻留的采样周期个数, 因此,  $\tau_a$  的默认取值范围是  $\tau_a \geqslant 1$ . 如果使式(12)–(14)成立的  $\beta$  和  $\mu$  同时满足  $\frac{\ln \mu}{2 \ln \beta} < 1$ (或者  $\beta > \sqrt{\mu}$ ), 则不等式(15)就可被满足.

### 3.2 时隙ALOHA协议分析

本节的主要目的是获得保证系统(4)指教稳定的时隙ALOHA协议下网络通信系统应该满足的条件, 包括对丢包率和吞吐率的要求. 然后根据吞吐率的条件分析得到时隙ALOHA协议中具体的参数应该满足的条件.

在时间段  $[0, k]$  内,  $n$  个传感器将产生  $nk$  个数据包需要发送. 将丢包率表示为足够长的时间段  $[0, k]$  内丢弃的数据包个数与所有要发送的数据包的比率, 即

$$\alpha = \sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n^\omega} \frac{(n-\omega)m_{\omega_j}}{nk}, \quad (19)$$

其中  $m_{\omega_j}$  表示所有传感器的某一接入状态  $\omega_j \in Z_\sigma$  发生的次数. 那么成功接入网络的传感器数据包个数可表示为

$$s_1 = \sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n^\omega} \omega m_{\omega_j} = (1-\alpha)nk. \quad (20)$$

在使用时隙ALOHA协议的网络中, 网络的业务量  $G$

定义为所有传感器发送数据包的总次数<sup>[28]</sup>, 包括首次传输和重传次数, 其一定不小于需要发送的数据包个数 $nk$ . 在一个采样周期内, 每一个未接入网络的传感器需要经历 $r_{\max} + 1$ 次失败的传输, 每一个成功接入网络的传感器需要经历至少一次传输, 最多 $r_{\max} + 1$ 次传输. 因此, 业务量 $G$ 的范围满足 $(r_{\max}\alpha + 1)nk \leq G \leq (r_{\max} + 1)nk$ . 网络的吞吐率 $S$ 为成功接入网络的数据包个数与业务量的比, 其表示为

$$S = \frac{s_1}{G}. \quad (21)$$

下面分别给出时隙ALOHA协议下对通信信道丢包率和吞吐率的要求, 以满足定理1中式(14)对子系统的激活频率 $r_{\omega_j} = m_{\omega_j}/k$ 的要求. 每个 $\beta_{\omega_j}$ 表示对应子系统 $S_{\omega_j}$ 的衰减率.

**推论1** 如果存在参数 $\beta_{\omega_j} > 0, \forall \omega_j \in Z_{\sigma}, \beta_{\omega_j} = \beta_{0_1}^{\frac{n-\omega}{n}} \beta_{n_1}^{\frac{\omega}{n}}, j = 1, \dots, C_n^{\omega}, \mu > 1, \beta > \sqrt{\mu}$ 和对称正定矩阵 $Q_{\omega_j} > 0$ 满足不等式(12)–(13), 数据传输的丢包率 $\alpha$ 满足以下不等式:

$$\alpha \leq \frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1})}, \quad (22)$$

则系统(4)是指数稳定的, 且衰减率为 $\rho(\tau_a, \beta) = \beta \mu^{-\frac{1}{2\tau_a}}$ .

**证** 依据 $\sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n^{\omega}} r_{\omega_j} = 1$ , 可得

$$\begin{aligned} \prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} &= \prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} (\beta_{0_1}^{\frac{n-\omega}{n}} \beta_{n_1}^{\frac{\omega}{n}})^{r_{\omega_j}} = \\ \prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} \beta_{0_1}^{\frac{(n-\omega)m_{\omega_j}}{nk}} \beta_{n_1}^{\frac{\omega m_{\omega_j}}{nk}} &= \beta_{0_1}^{\alpha} \beta_{n_1}^{1-\alpha}. \end{aligned} \quad (23)$$

由于不等式(22)保证了 $\beta_{0_1}^{\alpha} \beta_{n_1}^{1-\alpha} \geq \beta$ , 因而可得不等式(14)成立. 进一步依据定理1, 可得推论1. 证毕.

下面给出依赖吞吐率的网络化控制系统指数稳定的充分条件.

**推论2** 如果存在参数 $\beta_{\omega_j} > 0, \forall \omega_j \in Z_{\sigma}, \beta_{\omega_j} = \beta_{0_1}^{\frac{n-\omega}{n}} \beta_{n_1}^{\frac{\omega}{n}}, j = 1, \dots, C_n^{\omega}, \mu > 1, \beta > \sqrt{\mu}$ 和对称正定矩阵 $Q_{\omega_j} > 0$ 满足不等式(12)–(13), 网络的吞吐率 $S$ 能达到以下条件:

$$S \geq \frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1}) - \ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1}) + r_{\max} \ln(\beta_{n_1}/\beta)}, \quad (24)$$

则系统(4)是指数稳定的, 且衰减率为 $\rho(\tau_a, \beta) = \beta \mu^{-\frac{1}{2\tau_a}}$ .

**证** 结合式(20)–(21)以及业务量 $G$ 的范围, 可得

$$\begin{aligned} S &= \frac{(1-\alpha)nk}{G} \leq \\ \frac{(1-\alpha)nk}{(r_{\max}\alpha + 1)nk} &= \frac{1-\alpha}{r_{\max}\alpha + 1}. \end{aligned} \quad (25)$$

对式(25)进行不等式变换, 可得

$$\alpha \leq \frac{1-S}{1+r_{\max}S}. \quad (26)$$

将上式与式(23)结合可得

$$\begin{aligned} \prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} &= \beta_{0_1}^{\alpha} \beta_{n_1}^{1-\alpha} = \\ (\beta_{0_1}/\beta_{n_1})^{\alpha} \beta_{n_1} &\geq (\beta_{0_1}/\beta_{n_1})^{\frac{1-S}{1+r_{\max}S}} \beta_{n_1}. \end{aligned} \quad (27)$$

进一步将式(24)代入式(27), 可得

$$\prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} \geq (\beta_{0_1}/\beta_{n_1})^{\frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1})}} \beta_{n_1}. \quad (28)$$

因为 $\ln((\beta_{0_1}/\beta_{n_1})^{\frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1})}} \beta_{n_1}) = \ln \beta$ , 所以有

$$(\beta_{0_1}/\beta_{n_1})^{\frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1})}} \beta_{n_1} = \beta. \quad (29)$$

由式(28)–(29)可知 $\prod_{\omega=0}^n \prod_{j=1}^{C_n^{\omega}} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} \geq \beta$ , 即不等式(14)成立. 依据定理1, 可得推论2. 证毕.

为了保证系统(4)的指数稳定, 推论1和推论2分别给出了时隙ALOHA协议下网络中的丢包率和吞吐率应该满足的条件. 为了满足这些条件, 就需要对时隙ALOHA协议进行设计. 观察式(22)–(24)可见, 丢包率的条件式(22)与时隙ALOHA协议的参数无直接关联, 而吞吐率条件式(24)与最大重传次数 $r_{\max}$ 直接相关. 因此, 本文将从吞吐率出发, 分析时隙ALOHA协议中的最大重传次数应该满足的条件. 下面的结论将用到时隙ALOHA协议的最大吞吐率这一概念, 表示为 $S_{\max}$ , 它是一个只与通信系统中节点的个数有关的常数, 即 $S_{\max} = (1 - \frac{1}{n})^{n-1}$ <sup>[27]</sup>.

**引理2** 给定参数 $\beta > 1, \beta_{\omega_j} > 0, \beta_{\omega_j} = \beta_{0_1}^{\frac{n-\omega}{n}} \beta_{n_1}^{\frac{\omega}{n}}, j = 1, \dots, C_n^{\omega}$ , 如果时隙ALOHA协议的最大重传次数 $r_{\max}$ 满足下列不等式:

$$\frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1})}{\ln(\beta_{n_1}/\beta)} \left( \frac{1}{S_{\max}} - 1 \right) - \frac{1}{S_{\max}} < r_{\max} \leq \frac{N}{M} - 1, \quad (30)$$

则此时隙ALOHA协议可提供满足不等式(24)要求的吞吐率, 其中 $N$ 为每个采样周期内的时隙个数, 有 $N = T/\tau$ .

**证** 由式(30)左侧不等式可得

$$\frac{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1}) - \ln(\beta_{n_1}/\beta)}{\ln(\beta_{n_1}/\beta_{0_1}) + r_{\max} \ln(\beta_{n_1}/\beta)} < S_{\max}. \quad (31)$$

容易看出, 上式左侧的表达式即式(24)右侧的表达式. 因此, 在时隙ALOHA协议中的最大重传次数 $r_{\max}$ 满足式(30)时, 通信信道可支持的吞吐率能满足式(24)的要求.

另外, 由不等式(30)的右侧可得 $T \geq M(r_{\max} + 1)\tau$ , 即一个采样周期的长不小于 $M(r_{\max} + 1)$ 个时隙的总长度, 从而保证在每个采样周期内所有传感器的最大重传次数都能达到 $r_{\max}$ . 证毕.

**注2** 式(30)左侧给出了时隙ALOHA协议中的最大重传次数的下界, 由于笔者要求所有传感器需在一个采样周期的时间T内发送数据, 因此最大重传次数不能无限增大, 式(30)的右侧即给出了最大重传次数的上界。其中,  $M$ 又被称为竞争窗口, 其大小与用户节点的个数、丢包率和通信时延有关, 本文中可使 $M$ 不小于传感器的个数 $n$ , 更详细的选择方法可参考文献[27]。

根据推论2和引理2可直接得到如下结论。

**定理2** 如果存在参数 $\beta_{\omega_j} > 0, \forall \omega_j \in Z_\sigma$ ,  $\beta_{\omega_j} = \frac{\mu}{\beta_{0_1}} \beta_{n_1}, j = 1, \dots, C_n, \mu > 1, \beta > \sqrt{\mu}$ 和对称正定矩阵 $Q_{\omega_j} > 0$ 满足不等式(12)–(13), 并且时隙ALOHA协议的最大重传次数 $r_{\max}$ 满足式(30), 则网络化控制系统(4)是指数稳定的, 且衰减率为 $\rho(\tau_a, \beta) = \beta \mu^{-\frac{1}{2\tau_a}}$ 。

### 3.3 控制器–通信协同设计算法

本节主要研究状态反馈控制增益矩阵的设计方法。依据引理1可知, 控制器的设计即求解矩阵不等式(6)中 $K$ 的问题。

将矩阵不等式(6)中的矩阵 $\Phi_{\omega_j}$ 分别左乘和右乘对角矩阵 $\text{diag}\{I, Q_{\omega_j}^{-1}\}$ , 可得 $\Phi_{\omega_j} < 0$ 等价于以下非线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -Q_{\omega_j} & \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j})^T \\ \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j}) & -Q_{\omega_j}^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (32)$$

令 $\hat{Q}_{\omega_j} = Q_{\omega_j}^{-1}$ , 结合式(32)可得

$$\begin{bmatrix} -Q_{\omega_j} & \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j})^T \\ \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j}) & -\hat{Q}_{\omega_j} \end{bmatrix} < 0. \quad (33)$$

采用锥补线性化方法<sup>[29]</sup>, 求解状态反馈控制器问题转化为以下带有约束的非线性最优化问题:

$$\text{minimize } \text{Tr}\left(\sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n} Q_{\omega_j} \hat{Q}_{\omega_j}\right).$$

条件: 式(12)–(13),  $\beta > \sqrt{\mu}$ 和

$$\begin{bmatrix} -Q_{\omega_j} & \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j})^T \\ \beta_{\omega_j}(A + BK\psi_{\omega_j}) & -\hat{Q}_{\omega_j} \end{bmatrix} < 0, \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{\omega_j} & I \\ I & \hat{Q}_{\omega_j} \end{bmatrix} \geq 0. \quad (35)$$

接下来, 结合定理1, 定理2和控制器设计方法, 描述协同设计算法, 该算法表示为算法1。如下算法1可实现控制器增益和最大重传次数的协同设计。

**步骤1** 选取参数 $\mu, \beta_{\omega_j}, \forall \omega_j \in Z_\sigma$ 。设置参数 $\mu_0 = \mu, \beta_{0\omega_j} = \beta_{\omega_j}$ 。寻找满足不等式(12)–(13)(34)和式(35)的可行解 $(Q_{\omega_j}^0, \hat{Q}_{\omega_j}^0, K^0)$ 。设置 $k = 0$ 。

**步骤2** 若获得可行解, 则转向步骤3; 否则, 调节参数 $\mu, \beta_{\omega_j}, \forall \omega_j \in Z_\sigma$ , 转向步骤1。

### 步骤3 求解最小化问题

$$\text{minimize } \text{Tr}\left(\sum_{\omega=0}^n \sum_{j=1}^{C_n} Q_{\omega_j}^k \hat{Q}_{\omega_j} + Q_{\omega_j} \hat{Q}_{\omega_j}^k\right)$$

条件: 式(12)–(13)(34)和式(35)。

获得可行解 $(Q_{\omega_j}, \hat{Q}_{\omega_j}, K)$ , 设置 $Q_{\omega_j}^{k+1} = Q_{\omega_j}$ ,  $\hat{Q}_{\omega_j}^{k+1} = \hat{Q}_{\omega_j}$ 和 $K^{k+1} = K$ 。

**步骤4** 如果条件 $\Phi_{\omega_j} < 0$ 满足, 转到下一步。如果 $\Phi_{\omega_j} < 0$ 不满足, 检查迭代次数 $k$ 是否达到规定值, 若达到, 系统无解, 否则, 令 $k = k + 1$ , 转到步骤3。

**步骤5** 选取足够小的 $\beta > \sqrt{\mu}$ , 如果存在满足条件(30)的 $r_{\max}$ , 则退出; 否则, 转到步骤1重新设置参数 $\mu, \beta_{\omega_j}, \forall \omega_j \in Z_\sigma$ 。

### 4 数值仿真

本节针对一个实际的网络化控制系统, 通过MATLAB仿真来验证本文所研究的理论结果的有效性。

考虑一个两轴磨粉机控制系统, 一个直流电机带动一个轴做旋转运动。安装在直流电机上的转速计测量转轴的角速度, 安装在转轴上的线性编码器测量转轴的位置, 两个转速计和两个线性编码器分别将测量的信息通过网络传输至控制器。两轴磨粉机控制系统的状态空间模型参数矩阵如下<sup>[30]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{bmatrix} 1 & 0.0461 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1642 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0466 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1676 \end{bmatrix}, \\ B = \begin{bmatrix} 0.7893 & 0 \\ 19.8711 & 0 \\ 0 & 0.7965 \\ 0 & 20.1075 \end{bmatrix}. \end{array} \right. \quad (36)$$

选取参数

$$\begin{aligned} \mu &= 1.4061, \beta_{0_1} = 0.0008, \beta_{1_1} = 0.0085, \\ \beta_{1_2} &= 0.0085, \beta_{1_3} = 0.0085, \beta_{1_4} = 0.0085, \\ \beta_{2_1} &= 0.0894, \beta_{2_2} = 0.0894, \beta_{2_3} = 0.0894, \\ \beta_{2_4} &= 10.0894, \beta_{2_5} = 0.0894, \beta_{2_6} = 0.0894, \\ \beta_{3_1} &= 0.9457, \beta_{3_2} = 0.9457, \beta_{3_3} = 0.9457, \\ \beta_{3_4} &= 0.9457, \beta_{4_1} = 10.000, \end{aligned}$$

可得状态反馈控制器增益为

$$K = \begin{bmatrix} -0.1216 & -0.0121 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1203 & -0.0123 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

依据定理1和引理2, 选取 $\beta = 1.2, r_{\max} = 16$ 。依据推论1, 可得丢包率需满足 $\alpha < 0.2163$ ; 依据推论2,

可得控制系统所需的吞吐率应满足  $S > 0.4082$ . 对于含有4个节点的通信系统, 其所提供的最大吞吐率  $S_{\max} = 0.4219 > 0.4082$ , 即通信系统可以提供两轴磨粉机控制系统所需的吞吐率; 可得平均驻留的采样周期数量满足  $\tau_a > \frac{\ln \mu}{2 \ln \beta} = 0.9346$ .

如果控制器不与通信协议协同设计<sup>[26]</sup>, 则网络中的丢包率满足  $\alpha < 0.1818$  时, 可设计得到反馈控制器使闭环网络化控制系统指数稳定. 然而此时两轴磨粉机控制系统所需吞吐率为  $S > 0.4738$ , 大于时隙 ALOHA 协议下通信系统所能支持的最大吞吐率, 此时通信系统并无法提供控制系统所需的吞吐率. 这个例子表明了控制器与通信协议进行协同设计的重要性.

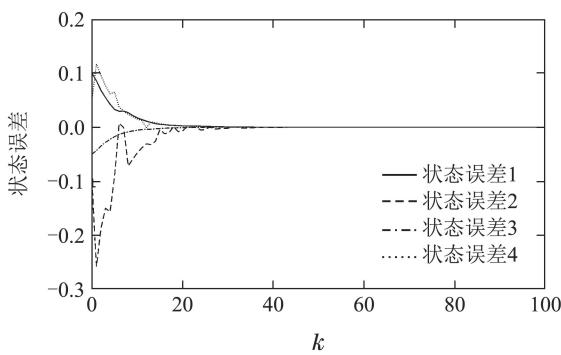


图2 状态误差

Fig. 2 The state errors

选取初始状态  $x = [0.1 \ -0.1 \ -0.05 \ 0.05]^T$ , 网络化控制系统的状态误差及传感器接入网络的状态随时间变化的曲线如图2和图3所示. 图3中, “1”代表传感器接入网络, “0”代表传感器未接入网络. 仿真结果显示子系统  $S_{\omega_j}$  发生的次数分别为

$$\begin{aligned} m_{0_1} &= 0, m_{1_1} = 1, m_{1_2} = 0, m_{1_3} = 1, m_{1_4} = 1, \\ m_{2_1} &= 0, m_{2_2} = 3, m_{2_3} = 2, m_{2_4} = 5, m_{2_5} = 1, \\ m_{2_6} &= 3, m_{3_1} = 5, m_{3_2} = 3, m_{3_3} = 18, m_{3_4} = 14, \\ m_{4_1} &= 43, \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} r_{0_1} &= 0, r_{1_1} = 1/99, r_{1_2} = 0, r_{1_3} = 1/99, \\ r_{1_4} &= 1/99, r_{2_1} = 0, r_{2_2} = 3/99, r_{2_3} = 2/99, \\ r_{2_4} &= 5/99, r_{2_5} = 1/99, r_{2_6} = 3/99, r_{3_1} = 5/99, \\ r_{3_2} &= 3/99, r_{3_3} = 18/99, r_{3_4} = 14/99, m_{4_1} = 43/99. \end{aligned}$$

可得丢包率为  $\alpha = 0.1925$ , 该丢包率的范围满足推论1. 进一步, 可以获得  $\prod_{\omega=0}^4 \prod_{j=1}^{C_4^\omega} \beta_{\omega_j}^{r_{\omega_j}} = 2.6997 > \beta$  满足条件(14),  $N_\sigma[0, 29] = 73$  和  $\tau_a = 49/34 = 1.3562$  满足条件(15).

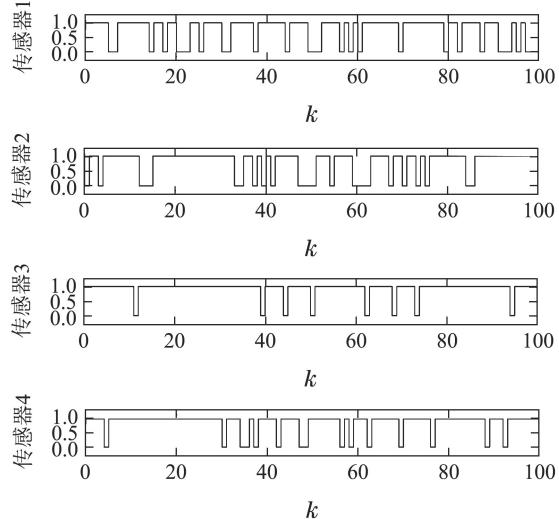


图3 传感器的接入状态

Fig. 3 The access states for all sensors

从图4可以看出丢包率、吞吐率和最大重传次数的关系. 增大重传次数可以减少控制系统对吞吐率的需求. 丢包率越小对吞吐率的需求越大.

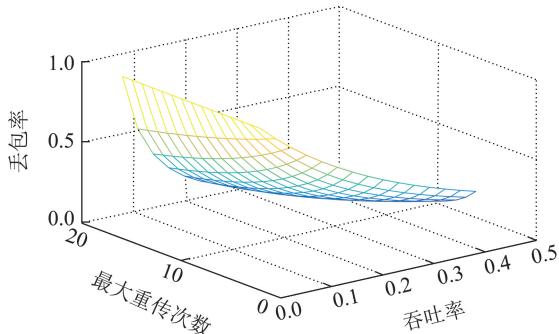


图4 丢包率与重传次数及吞吐率的相互影响

Fig. 4 The dropout rate versus the maximum retransmission number and throughput

## 5 总结

本文采用时隙ALOHA协议调度传感器分享网络资源, 利用李雅普诺夫函数方法和平均驻留时间方法得出系统指数稳定性条件, 同时获得通信系统吞吐率与指数衰减率的定量关系以及最大重传次数与指数衰减率的定量关系, 提出了一种控制器与时隙 ALOHA 协议协同设计的算法. 该算法不仅能保证系统的稳定, 而且更具有实用性.

在目前的方法中, 假设数据传输所需要的时间小于采样周期, 在接下来的研究中, 笔者考虑最大通信延时大于采样周期的情况, 进行此研究需要重新建立模型, 进一步考虑时滞对系统的影响.

## 参考文献:

- [1] FAN Jialu, JIANG Yi, CHAI Tianyou. Operational feedback control of industrial processes in a wireless network environment. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(8): 1166–1174.

- (范家璐, 姜艺, 柴天佑. 无线网络环境下工业过程运行反馈控制方法. 自动化学报, 2016, 42(8): 1166 – 1174.)
- [2] CLOETE N, MALEKIAN R, NAIR L. Design of smart sensors for real-time water quality monitoring. *IEEE Access*, 2016, 4: 3975 – 3990.
- [3] WANG Li, LI Dai, HE Zhonghe, et al. Urban traffic network control based on cluster consensus of multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1448 – 1456.  
(王力, 李岱, 何忠贺, 等. 基于多智能体分群同步的城市路网交通控制. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1448 – 1456.)
- [4] TANENBAUM A S. *Computer Networks*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003: 135 – 138.
- [5] TABBARA M, NESIC D, TEEL A. Input-output stability of wireless networked control systems. *Proceedings of the 44th IEEE Conference Decision and Control*. Seville, Spain: IEEE, 2005: 209 – 214.
- [6] NESIC D, TEEL A. Input-output stability properties of networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1650 – 1667.
- [7] WALSH G, YE H. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [8] WALSH G, BELDIMAN O, BUSHNELL L. Asymptotic behaviour of nonlinear networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093 – 1097.
- [9] CARLEIAL A, HELLMAN M E. Bistable behavior of ALOHA-type systems. *IEEE Transactions on Communications*, 1975, 23(4): 401 – 410.
- [10] ZAALOUL A, AATTAR M B and HANINI M, et al. Sharing channel in IEEE 802.16 using the cooperative model of slotted ALOHA. *International Journal of Computer & Organization Trends*, 2013, 3(9): 439 – 443.
- [11] GHEZ S, VERDU S, SCHWARTZ S. Stability properties of slotted ALOHA with multipacket reception capability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(7): 640 – 649.
- [12] TOBAGI F A. Multiaccess protocols in packet communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 1980, 28(4): 1 – 21.
- [13] KWAK B, SONG N, MILLER L E. Performance analysis of exponential backoff. *IEEE Transactions on Networking*, 2005, 13(2): 343 – 355.
- [14] LIU K, FRIDMAN E, JOHANSSON K H. Networked control with stochastic scheduling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(11): 3071 – 3076.
- [15] LIU K, FRIDMAN E, JOHANSSON K H. Networked control with a stochastic scheduling: a time-delay approach. *Proceedings of the 19th International Federation of Automatic Control*. Langford Lane, UK: Elsevier, 2014: 6484 – 6489.
- [16] SUI T, YOU K, FU M. Optimal sensor scheduling for state estimation over lossy channel. *IET Control Theory and Applications*, 2015, 9(16): 2458 – 2465.
- [17] FAROKHI F, JOHANSSON K H. Stochastic sensor scheduling for networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(5): 1147 – 1162.
- [18] HAN D, WU J, ZHANG H, et al. Optimal sensor scheduling for multiple linear dynamical systems. *Automatica*, 2017, 75(C): 260 – 270.
- [19] HAN D, MO Y, WU J, et al. Stochastic event-triggered sensor schedule for remote state estimation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(10): 2661 – 2675.
- [20] ZHANG C, JIA Y. Distributed estimation for stochastic hybrid systems with event-triggered sensor schedule. *IET Control Theory and Applications*, 2017, 11(2): 173 – 181.
- [21] TATIKONDA S, MITTER S. Control under communication constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(7): 1056 – 1067.
- [22] TATIKONDA S, MITTER S. Control over noisy channels. *IEEE Transactions on Networking*, 2004, 49(7): 1196 – 1200.
- [23] WEN S, GUO G, WONG W. Hybrid event-time-triggered networked control systems: scheduling-event-control co-design. *Information Sciences*, 2015, 305: 269 – 284.
- [24] LIN H, ANTSAKLIS P J. Stability and persistent disturbance attenuation properties for a class of networked control systems: Switched system approach. *International Journal of Control*, 2005, 78(18): 1447 – 1458.
- [25] YU M, WANG L, XIE G M, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout via switched system approach. *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Atlantis, Paradise Island, Bahamas: IEEE, 2004: 3539 – 3544.
- [26] ZHANG W, YU L. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1705 – 1710.
- [27] ROM R, SIDI M. *Multiple Access Protocols: Performance and Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1990: 47 – 74.
- [28] YANG Y. Delay distributions of slotted ALOHA and CSMA. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1846 – 1857.
- [29] GHAOUI L E, OUSTRY F, AITRAMI M. A cone complementarity linearization algorithm for static output feedback and related problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1171 – 1176.
- [30] LIAN F L. *Analysis, design, modeling and control of networked control system*. Michigan: Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, 2001.

### 作者简介:

李志慧 博士研究生, 目前研究方向为网络控制系统的控制及通信设计、智能车队系统, E-mail: lizihui1650@163.com;

刘中常 讲师, 目前研究方向为多智能体系统一致性分析、智能车队系统, E-mail: zcliu@foxmail.com;

郭戈 教授, 博士生导师, 目前研究方向为网络控制系统、智能交通系统, E-mail: geguo@yeah.net.