

Survey on Sampling Period in the Networked Control Systems

Zhiwen Wang, Honghong Gao

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

#Email: wwwangzhiwen@163.com; gaohong08220542@163.com

Abstract

Sampling period of network control system (NCS) determines the frequency of the information exchange in the network and will influence the performance and utilization of NCS. In this paper, the impact of sampling period on the performance of NCS is introduced firstly. Then, some research results and the latest progresses of the sampling period in NCS in recent years are enumerated from three aspects: constant sampling period, variable-sampling period and multi-sampling. Finally, the scheduling method based on sampling period and some problems which need to be solved in the future study are summarized.

Keywords: Networked Control Systems (NCSs); Sampling Period; Variable-sampling; Multi-sampling

网络控制系统中采样周期问题研究综述*

王志文, 高红红

兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050

摘要: 网络控制系统(NCS)的采样周期决定了网络交换信息的频繁程度, 其选择会影响 NCS 的性能和网络的利用率, 本文首先介绍了采样周期对 NCS 性能的影响, 然后从定常采样周期、变采样周期和多率采样三个方面整理了近年来 NCS 中采样周期的研究成果和进展, 最后, 总结了 NCS 中采样周期的调度方法和 NCS 中关于采样周期研究方面需要继续解决的问题。

关键词: 网络化控制系统; 采样周期; 变采样; 多率采样

引言

网络控制系统^[1] (networked control system, NCS)是集通信网络和控制系统于一体的复杂控制系统, 它借助于网络将分布于不同地理位置的传感器、控制器和执行机构连接起来, 形成一种全分布实时反馈闭环控制系统。NCS 与传统的点对点直接相连的控制系统相比, 它减少了系统接线、实现了网络资源共享和远程控制等众多优点。但是, 由于通信机制和通信协议的原因, NCS 在带来诸多优点的同时, 也给控制领域带来了新的挑战: 对于传统的控制系统, 采样周期越小系统性能越好, 反之则越差; 而对于 NCS, 随着采样周期减小会使网络负载增多、网络调度繁忙、网络时延增大甚至导致网络拥塞产生数据包丢失等现象, 相反, 采样周期太大, 将不能保证实时数据的传送, 会降低 NCS 的控制性能, 因此, 采样周期对 NCS 性能具有至关重要的影响也引起了众多学者的关注。文献[2-3]分别提出了按系统的假频能量系数和时间常数选择采样周期的方法, 以及通过折中选择控制损失项和偏移损失的加权系数来选择采样周期的方法。针对存在时延的 NCS 文献[4-5]分别给出了采样周期的上限以及在保证系统稳定性、动态性能和避免空采样的条件下, 各控制环的采样周期。文献[6-7]分别讨论了采样频率的优化选取方法。文献[8]研究了在给定平均采样频率的情况下, 怎样设计混合采样周期使系统的动态性能最优。文献[9]研究了在不同采样频率下的各

*基金资助: 国家自然科学基金项目 (61263003); 中央高校基本科研业务费专项资金项 (2009JC11 及 2009QN120)。

种系统性能的比较。

1 采样周期对 NCS 性能的影响

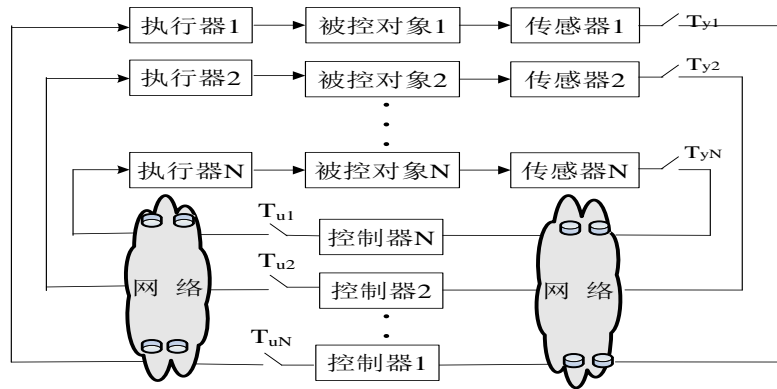


图 1 NCS 的原理图

NCS 是典型的多回路、多变量的计算机控制系统，其内部既有连续时间模拟信号，又有离散时间数字信号，在建模、分析和设计过程中，不可避免地要涉及到信号的采样和保持等问题。为了简化系统的分析和设计，在传统的计算机控制系统中，对采样器或保持器进行了如下假定：

- (1) 同时性。即整个系统各处的采样器和保持器都按相同的采样周期同时动作。
- (2) 等间隔采样。即系统的采样周期在整个控制过程中为恒定的。
- (3) 系统的采样周期满足香农采样定理。

从图 1 可以看出在 NCS 中，控制器接收到的反馈信号虽然仍是传感器周期采样数据得到的，但这些数据是借助于网络传输的，所以，当网络选定后，相应的网络通信协议、网络传输速率、带宽以及相应的数据结构也就确定了，此时 NCS 的运行性能直接受到采样周期的影响。当采样周期越短，数据传输速率就越快，控制器得到的反馈信息就越多，从而控制品质（Quality of Performance, QoP）就越好，但是，过快的数据传输会使得网络具有较高的吞吐率，导致网络拥塞，加重网络负载和时延使得网络服务质量（Quality of Service, QoS）变差；相反，采样周期太长，不能保证实时数据的传送，会降低 NCS 的 QoP，导致稳定性变差。因此，为了改善 NCS 的性能选取合适的采样周期是非常必要的，如图 2 所示反映了采样周期对 NCS 的整体性能和网络拥挤程度的影响。

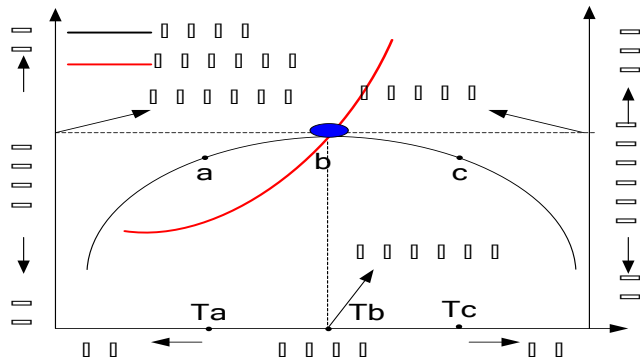


图 2 NCS 中采样周期对系统控制性能和网络负荷的关系

在图 2 中， T_a 为使系统满足期望性能的上限， T_b 为采样周期的最优点， T_c 为采样周期下限，文献[10]中给出了参数 T_a 、 T_b 、 T_c 的大致计算方法。

在 NCS 中，当采样周期小于时变的网络诱导时延时，则在某一采样周期内，控制器节点将会有不止一个采样数据到达，此时只有最新的数据被控制器使用，其他数据将被丢弃掉，这一现象称为数据滤除。当

NCS 出现数据滤除现象或由于控制信号在网络中发生丢失或冲突时，导致数据传输时延加大，这必然会导致在某一采样周期内可能出现没有采样数据到达的情况，这种现象称为空采样。数据滤除和空采样都会导致系统性能下降、控制信号失真和产生高频噪声等，因此，各个传感器节点的采样数据必须在下一个数据采样之前到达相应的控制节点，即各节点的截止期限为相应控制闭环的一个采样周期。

2 NCS 的采样周期

NCS 的采样周期决定了网络交换信息的频繁程度，所以采样周期太大或者太小都会影响 NCS 的性能，为了保证对网络资源的合理有效的利用，以及满足系统的稳定性、能控能观性等性能要求，需要对 NCS 的采样周期进行合理的选择，在 NCS 的研究中采样周期可分为定常采样周期、变采样周期以及多速率采样。

2.1 定常采样周期

定常采样周期是指对所有的信号以固定的常数采样周期进行采样，这是 NCS 的研究中最简单的也是最传统的方法。刘鲁源等^[11]提出了利用控制回路中的最大允许时延来确定控制系统的采样周期。文献[12]讨论了在传感器采样周期为常数的情况下系统的稳定性。文献[13]针对标量系统，采用遗传算法获得采样周期的优化解；文献[14]以系统的控制性能和网络资源的有限为约束条件，以网络利用率和采样周期抖动的加权和为目标，求取了采样周期的最优值。文献[13-14]虽然对采样周期进行了离线优化，但在系统运行的过程中采样周期仍然保持不变。

在采用定常采样周期采样时，采样周期应该选择尽可能的大，所以通常采样周期都取为最大允许传输时延（Maximum Allowable Delay Bound, MADB），这种处理虽然简化了研究过程，但导致了网络闲置时不能充分利用网络资源，并且对网络负荷变化的适应能力也比较差。

2.2 变采样周期

由于网络数据流、信息流的时变性以及在非周期性等故障时会导致采样器的采样周期发生抖动，使定常采样周期的假设并不成立，因此，引入了变采样周期的思想：即对信号进行统一采样，但采样周期随时间变化。文献[15-16]分别研究了时变采样数字反馈控制系统和非均匀采样时变 NCS 的稳定性。文献[17]针对具有任意数据丢包和非均匀采样的时变采样 NCS，研究了分布式采样系统的 H_∞ 滤波问题。文献[18]在有限的通信资和时变采样下，应用输入时延和选择带宽的方法，研究了具有时变采样周期的 NCS。

时变采样周期 NCS 中，根据网络繁忙或闲置时采用不同的采样周期进行采样的方法称为主动时变采样周期；在控制系统中由于负载的变化、网络的影响、设备老化和一些偶发事故导致的采样周期时变，称为被动时变采样周期。文献[19]从被动时变和主动时变采样两个方面对 NCS 进行了建模分析以及控制器设计等研究。文献[20]提出了网络控制系统的被动数字控制律。总之，在关于时变采样周期的 NCS 的研究中，采样周期一般假设为以下四类：

2.2.1 采样周期为时变不确定有界

由于网络中信息流、数据流的变化是时变不确定的，并且网络中采样周期同时受到控制性能和网络带宽的约束，所以采样周期的变化是时变不确定但有界的。

一般研究中取，在保证系统稳定、信号不失真和网络承载能力的限制下采样周期的上界为 T_{\max}^i ，下界为 T_{\min}^i 。错误！未找到引用源。，则传感器 i 第 k 次采样的采样周期 $T^i(k)$ 的变换范围： $T^i(k) \in [T_{\min}^i, T_{\max}^i]$ 。文献[21]给出了 T_{\max}^i 满足： $2D/R \leq T_{\max}^i \leq 2\pi/10\omega_c$ ，其中， R 为控制器与被控对象之间的网络最小吞吐量， D 为消息的总长度， ω_c 为 NCS 的最大工作频率。

文献[9,21-22]分别对忽略了时延、常数时延和时变时延的变采样周期 NCS 进行了建模。文献[23]基于 Lyapunov 理论分析了具有变采样周期和时延的 NCS 的稳定性。文献[24]针对 NCS 中采样周期时变不确定性

提出了采用网络资源利用率、截止期错过率和误差绝对值积分进行反馈控制的变采样周期动态调度策略。

2.2.2 采样周期在某个理想周期左右波动

在 NCS 中，负载的变化、时延、网络的影响以及器件故障等都会导致采样周期在某个理想的周期左右波动，假设系统的采样周期的理想值为 \bar{T}^i ，则传感器 i 第 k 次采样的采样周期 $T^i(k)$ 可表示为： $T^i(k) = \bar{T}^i + \Delta T^i(k)$ ， $\Delta T^i(k) \in [\Delta T_{\min}^i, \Delta T_{\max}^i]$ 为时变不确定项，记 $\Delta T_{\min}^i = T_{\min}^i - \bar{T}^i$ ， $\Delta T_{\max}^i = T_{\max}^i - \bar{T}^i$ ，其中 T_{\min}^i 、 T_{\max}^i 分别为使得系统保持稳定的采样周期的上下界。

文献[19]假定了采样周期在理想采样周期附近按 Markov 链随机切换，建立了被动时变采样周期与网络诱导时滞相互独立时的时变采样 NCS 数学模型。文献[9]将存在短时延和数据包丢失的非理想调度下的变采样周期 NCS 等效为具有参数不确定性的离散切换系统，并给出了状态反馈控制器的设计方法。文献[25]针对数据丢包数有界，采样周期时变且在理想周期上下波动的 NCS 进行了建模。

2.2.3 采样周期在有限集合内随机切换

假定 d_1 、 d_2 分别表示网络在闲置和繁忙时从传感器到执行器的网络传输时滞，当采用定常的采样策略时，应该选择 d_2 为定常的采样周期，来避免网络因为繁忙而出现的拥塞，但是这就对网络资源造成了浪费。如果把区间 $[d_1, d_2]$ 分成 l 个等长小区间（ l 为一个确定的正整数），采样瞬间 t_k 的下一个采样瞬间 t_{k+1}

$$\text{取为 } t_{k+1} = \begin{cases} a_1, & \bar{t}_k = a_1; \\ a_2, & \bar{t}_k \in (a_1, a_2]; \\ t_k + d_2, & \bar{t}_k > t_k + d_2. \end{cases}$$

其中， $a_1 = t_k + d_1 + p(d_2 - d_1)/l$ ， $a_2 = t_k + d_1 + (p+1)(d_2 - d_1)/l$ ， $p = 0, 1, \dots, l-1$ 。相应的采周期 T_k 为 $T_k = t_{k+1} - t_k = d_1 + b(d_2 - d_1)/l$ ， $b = 0, 1, \dots, l-1$ 。由于到达时刻 t_k 的随机性，因此采样周期 T_k 在有限集 $\theta = \{d_1 + i(d_2 - d_1)/l, i = 0, 1, \dots, l\}$ 内随机切换。

文献[26]利用 Lyapunov 方法给出了短时延下主动变采样周期 NCS 闭环稳定的充分条件和控制器设计方法。文献[27]基于主动变采样周期方法，将具有网络时延和丢包的 NCSs 建模为 Markov 跳变系统，研究了当转移概率部分已知时 NCSs 的控制问题。文献[28]同时考虑了随机采样、数据量化和随机丢包对系统性能的影响，定义了采样间隔的取值是一个给定的有限集合，给出了 H_∞ 性能的充分条件和滤波器的设计方法。其实，在实际应用中，假定采样周期在有限个等周期间隔的集合内取值，过于理想化。

2.2.4 采样周期随不确定因素变化

在网络资源受限的情况下，由于各个控制回路对网络需求的不同，文献[29]提出了一种基于 Levinson-Durbin 算法的多回路 NCS 的变采样周期调度器，通过预测下一时刻各控制回路的执行时间的预估计值和资源分配器得到的网络利用率的估计值来计算各控制回路的采样周期的估计值。文献[30]提出了根据当前网络的吞吐量和网络时延等状况确定 NCS 的采样周期。文献[31]给出了在网络空闲时缩短采样周期、网络繁忙时延长采样周期的主动的时变采样控制器设计方法。文献[32]针对不确定负载的 NCS，考虑了多回路采样周期之间的耦合关系，提出了基于 SVM 面向多输入多输出系统的变采样周期策略。

2.3 多速率采样

由于 NCS 具有节点分散化、控制回路复杂化和功能多样化的特点，多个采样器采用相同的采样周期进行采样，已不能满足系统功能的需求，也不符合实际情况，因此采用多采样率，即针对不同变化速率的信号采用不同的采样周期采样，这不但可以提高系统的控制性能，同时又节约硬件成本。文献[33]利用通信序

列的概念和提升技术,针对一类通信资源受限的多输入、多输出对象,根据不同信号的特点及约束条件,采用了非均匀采样的方法。文献[16]提出了基于鲁棒稳定性的多速率采样控制系统设计的方法。文献[34-35]分别研究了具有短时延的多速率 NCSs 的稳定性和可观测性。文献[36]对具有长时延的多速率 NCSs 在不同驱动方式下进行了建模分析。

根据多率采样系统中各采样器与保持器是否同步以及各采样周期之间的关系,将其分为输入多率采样控制系统(Multirate Input Control System, MRIC)、输出多率采样控制系统(Multirate Output Control System, MROC)和广义多率采样控制系统三类。

2.3.1 输入多速率采样

MRIC 是指在一定时间间隔内,对被控对象的输出采样一次,而对输入进行多次采样,即输入采样速率高于输出采样速率也称快-慢多率采样系统。这类系统由于加快了输入采样速率,相当于增加了有效的输入个数,使控制器对被控对象的控制能力得到了增强,从而给控制系统的设计带来更大的灵活性。从连续时间角度来看,单采样率 NCS 只在采样瞬间进行数据传输实现反馈控制作用,而对除采样瞬间以外的整个采样周期内是开环的,MRIC 则在包括采样点在内的另外一些点上同样实现了反馈控制,提高了控制器的控制能力。

文献[37]分别对基于模型状态反馈和输出反馈的输入多采样率网络控制系统(MRI-NCSs)进行了建模和分析。文献[38]基于模型的控制策略,考虑了通讯网络的有限带宽,研究了 MRI-NCSs 的稳定性、状态反馈和输出反馈控制问题。文献[39]基于输入多采样率控制系统,给出了系统静态输出反馈控制器的设计方法,并且与同等条件下的单采样率下的控制器进行了比较。

在 MRIC 的研究中通常有 $T_{ui} \leq T_0 (i=1,2,\dots,m)$, 并且假定 $T_0 = N_i T_{ui}, i=1,2,\dots,m$, 其中 $N_i (i=1,2,\dots,m)$ 为输入采样重数, $T_{ui} (i=1,2,\dots,m)$ 为输入采样周期, T_0 为基本输出采样周期。

2.3.2 输出多速率采样

与 MRIC 相对应,将 MROC 称为慢-快多率采样系统,即在一个循环周期内对系统输出进行数次检测,相当于扩展了系统的有效输出个数,增强了控制器的控制能力,并且使得系统在闭环特征值或闭环特征结构配置等方面具有类似直接状态反馈的能力,整个系统的结构相对简单,反馈控制也易于实现。

文献[40]针对具有时延的输出多采样率网络控制系统(MRO-NCSs)研究了它的稳定性;文献[41]采用输出多率采样策略,研究了 NCS 的控制与带宽的调度问题。文献[42-43]分别讨论了利用 MROC 实现强镇定问题和极点配置问题。文献[44]建立了具有任意时延的输入和输出多采样率 NCS 的模型。

在 MROC 的研究中通常有 $T_{yi} \leq T_0 (i=1,2,\dots,p)$, 且假定 $T_0 = N_i T_{yi}, i=1,2,\dots,p$, 其中 $T_{yi} (i=1,2,\dots,p)$ 为输出采样周期, T_0 为基本输入采样周期。

2.3.3 广义多速率采样

广义多率采样系统是最广泛意义下的多率采样系统,MRIC 和 MROC 可以认为是其特殊情形。在这类系统中,输入各分量的采样周期 $T_{ui} (i=1,2,\dots,m)$ 和输出各分量的采样周期 $T_{yi} (i=1,2,\dots,p)$ 都可以不同并且关系可以是任意的。同样,为了分析方便一般都假设 $T_{ui} = q_{ui} T, i=1,2,\dots,m; T_{yi} = q_{yi} T, i=1,2,\dots,p$ 其中, T 为基本采样周期。

文献[45-47]分别研究了广义多率采样系统的二次型最优控制问题、 H_∞ 控制和极点配置问题。文献[48-51]分别对时延广义 NCS 进行了建模分析和稳定性、能控性能观性、保性能控制以及状态反馈镇定的研究。文献[52]对同时具有时延和数据包丢失的广义 NCS 的稳定性进行了分析。

虽然,多率采样控制系统能够实现许多常规的线性时不变控制器所无法实现的功能,如多系统同时稳定控制、强镇定、分散控制等,但是这同时也加大了系统分析与设计的难度。目前,虽然有对广义多率采样系统和广义 NCS 单独的研究,但是关于广义多率采样 NCS 的研究非常少。

3 采样周期的调度方法

3.1 基于时间窗口的采样时间调度算法

基于时间窗口的采样时间调度的思想是将基本传输周期划分为多个时间段，其中的每个时间段为一个“时间窗口”，时间窗口的长度由数据信息的长度和网络的传输速率决定。Kim^[53]等针对循环服务型 NCS 提出了基于“时间窗”的调度算法。Hong 等^[54-55]利用基于时间窗口的环路采样时间算法，对 NCS 的各个控制回路的采样时间进行调度，使得每个控制回路的性能得到满足的同时提高了网络资源的利用率。

3.2 基于最大允许时延的采样时间调度

最大允许时延时间 (Maximum Allowable Delay Bound, MADB) 指网络延迟时间所允许达到的上限值，NCS 的 MADB 取决于被控对象、控制器的参数和配置，与网络协议等无关。MADB 的计算主要采用黎卡提方程、LMI、Lyapunov 理论等。文献[56]分析了 NCS 的稳定性，并采用计算黎卡提方程方法获得了 MADB，使系统的采样周期不超过 MADB，保证了系统的稳定性。文献[57]通过采用 LMI 方法分析了多输入多输出的 NCS 的时滞相关稳定性条件获得 MADB，并在基于 MADB 的基础上确定各个回路的采样周期。文献[58]从传统控制系统的角度出发研究了 MADB，其方法可以借鉴到 NCS 的研究中。

3.3 基于带宽管理的采样时间调度

基于带宽管理的控制回路采样时间调度算法的基本原理是：当控制回路受到扰动即状态误差较大时，分配较大的带宽（即较小的采样周期）以提高系统的控制性能；当控制回路的接近平衡点即状态误差较小时，分配较小的带宽（即较大的采样周期）以节省网络资源。文献[54-56]虽然通过采样时间决策算法求取了每个控制回路的采样周期，但对于每个控制回路自身还是固定的带宽分配方法，文献[59]基于带宽管理的采样时间调度算法动态求取各回路的采样周期，随着状态变量的更新，各个控制回路的采样周期和带宽也随之进行动态更新。文献[60]利用 PID 算法对每个控制回路的采样周期进行了动态调整。

4 总结与展望

NCS 的采样周期是联系网络 QoP 和 QoS 的纽带，采样周期的选择直接影响到系统的性能和网络利用率，本文分析和总结了采样周期对 NCS 的影响和采样周期在 NCS 中的研究现状。总之，目前关于 NCS 中采样周期的研究主要是从以下三个方面进行的：

(1) 从控制的角度出发，将现有的网络结构、协议等作为条件，设计控制系统结构和控制算法等来减小网络运行过程中存在的时延、时变采样周期等造成的不良影响，使系统满足适当的控制性能；

(2) 从网络的角度出发，通过设计网络协议和信息调度策略，减少采样周期对控制系统的不利影响，使网络运行性能得到改善；

(3) 同时兼顾网络运行性能和控制性能，协调设计控制算法和调度算法，优化选取合适的采样周期，提高 NCS 的综合性能。

虽然，现已有大量文献对 NCS 的采样周期进行了研究也取得一定的成果，但还是存在许多问题需要继续商榷和解决：

(1) 关于 NCS 多率采样已有的研究主要是针对 NCS 的输入和输出多率采样，而 NCS 是多回路、多变量的控制系统，其典型的结构应该属于广义多率采样系统，但目前涉及 NCS 的广义多率采样的研究很少。

(2) 针对 NCS 结构的复杂性、信息流的时变性、网络资源的有限性，NCS 的研究应该更多的去综合多率采样和变采样的思想即类似于多率采样下基于变采样的控制与调度协同设计的策略，这也应该是 NCS 未来研究中需要去完善的理论。

(3) 到目前为止，对采样周期的选择并没确定的计算公式，往往是根据香农采样定理结合一些经验公

式给定采样周期的一个大致选择范围，在实际应用中并不是很方便。针对 NCS 中采样周期的选择虽然已有一些考虑网络时延、带宽以及网络调度方法等影响下的优化方法，但是这些优化方法多是单独去考虑某些因素影响下的结果，因为在网络中这些因素可能是同时存在的，所以考虑这些因素综合影响的优化选择方法还需要更多的去研究。

REFERENCES

- [1] K Y You, L H Xie. "Survey of Recent Progress in Networked Control Systems.[J]" Automatic, 2013, 39(2): 101-118
- [2] S K Ma. "The new method of selecting the sampling period.[J]" Automatic, 1995.7, 21(4): 481-486
- [3] Z Q Sun, Qvarnstrom B.. "on the selection of sampling periods and weighting coefficients in time-discrete optimal control of time-continuous processes.[J]" Control theory and applications, 1984.4, 1(2): 87-102
- [4] L L Feng, James Moyne, Dawn Tilbury. "Network Design Consideration for Distributed Control Systems.[J]" IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(2): 297-307
- [5] S H Hong, W H Kim. "Bandwidth Allocation Scheme in CAN Protocol.[J]" IEEE Proceedings Control Theory Apply, 2000, 147(1): 37-44
- [6] J Q He, H C Zhang, Y Z jing. "Optimal sampling period selection method for networked control system.[J]" Journal of Jilin University, 2004.7, 34(3): 479-483
- [7] K Peng, X F Li, L Chen. "Determination of optimal sampling frequencies in multi-loop networked control systems.[J]" Control and Decision, 2004.10, 19(10): 1151-1154
- [8] G L Xu, Arben C, Silviu I N. "Optimization for Networked Control Systems under the Hyper-Sampling Period.[C]" 2014 European Control Conference, Strassbourg, France, 2014.6: 2868-2873
- [9] Y Wang. "Control and scheduling of networked control systems.[D]" PhD diss., Nanjing University of Science and Technology, 2006.9
- [10] L L Feng, James Moyne, Dawn Tilbury. "Time Delay Modeling and Sample Time Selection for Networked Control Systems.[J]" In Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control, 2001, 1265-1272
- [11] L Y Liu, W R Wan, B Li. "On static scheduling algorithm for networked control system based on TTCAN protocol.[J]" Control and Decision, 2004.7, 19(7): 813-816
- [12] L Q Zhang, Y Shi, T W Chen, et al. "A new method for stabilization Of networked control systems with random delays.[J]" IEEE Transactions on Automatic control, 2005, 50(8): 1177-1181
- [13] J Q He, H C Zhang. "The study on scheduling optimization in a network control system based on genetic algorithms.[J]" China Academic Journal Electronic Publishing House, 2004, (4): 37-41
- [14] T Bai. "Performance analysis and scheduling optimization of networked control systems[D]" PhD diss. Shanghai Jiao Tong University, 2005.6
- [15] B Hu, Michel A N. "Stability analysis of digital feedback control systems with time-varying sampling periods[J]" Automatic, 2000, 36: 897-905
- [16] Y L Wang, Q L Han, X H Yu. "Stabilization of Non-uniform Sampling Networked Control Systems[J]".2011 IEEE: 2624-2629
- [17] W A Zhang, H Dong, G Guo. "Distributed Sampled-Data H_{∞} Filtering for Sensor Networks With Non-uniform Sampling Periods[J]" IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014.5, 2(10): 871-881
- [18] Y Y Liu, Y K Chu, W W Che. "Guaranteed cost of control networked control systems under limited communication capacity and variable sampling[J]" China Academic Journal Electronic Publishing House. 2014, 21: 978-986
- [19] H L Zhang. "Stability analysis and synthesis of networked control systems based on time-varying sampling periods[D]" PhD diss. Northeastern University, 2008.10
- [20] Nicholas K, Senior M. "Design of Networked Control Systems Using Passivity [J]".IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013.5, 3(21): 649-665

- [21] E H Jung, H H Lee, Y S Suh. "LMI-based output feedback control of networked control systems [C]" In 2004 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004, 311-314
- [22] J R Fang. "Research on networked control systems with variable sampling intervals[D]" PhD diss. Huazhong University of Science and Technology, 2012.6
- [23] F H Liu, Y Yao, F H He, Chen S L. "Stability analysis of networked control systems time-varying sampling periods[J]". J Control Theory Appl. 2008.6, 6(1): 22-25
- [24] Y Shen, B Guo. "Variable-sampling period intelligent dynamic scheduling for networked control systems [J]" Journal of Sichuan university. 2010.1, 42(1): 162-167
- [25] Y Li, Q L Zhang, Z Z Qiu. "Strictly dissipative control for networked control systems with time-varying sampling periods [J]" Control Theory & Applications. 2013.9, 9(30): 1170-1177
- [26] Y Yao, Y P Dai, X Z Liu. "Active variable-period sampling in networked control systems [J]" Transactions of Beijing Institute of Technology. 2013.9, 9(33): 970-975
- [27] Y Li, P F Zhang, Q L Zhang. " H_{∞} control of networked control systems with time-varying sampling periods and partially known packet dropout information[J]" Journal of Northeastern University. 2014.3, 35(3):305-308
- [28] L Yu, R Y Ling, D Zhang. " H_{∞} filtering for a class of networked systems with stochastic sampling.[J]" Control and Decision, 2014. 6, 6(29): 1035-1040
- [29] X X Dai. "Researching of scheduling and control co-design based on variable sampling period in networked control system [D]" diss. Northeastern University, 2012.1
- [30] Yodyium Tipsuwan, Mo-Yusn Chow. "Network-based controller adaptation based on Qos negotiation and deterioration[C]" The 27th annual conference of the IEEE industrial electronics society, 2001: 1794-1799
- [31] Y L Wang. "Optimization Design of networked control systems based on LMI technique[D]" PhD diss. Northeastern University, 2008
- [32] X X Dai, A L Liu. "Application of a new variable sampling strategy in uncertain load NCS [J]" Journal of East China University of Science and Technology. 2012.2, 38(1): 95-101
- [33] H L Hu, Q K Shao. "Non-uniformly sampling control of networked control system with communication constraints [J]". Information and control. 2013.6, 3(42): 320-326
- [34] C Wei, Q Li. "Stabilization of networked control systems with multirate sampling [J]". Automatic. 2013.3, 49: 1528-1537
- [35] Q X Zhu. "Observability of multi-rate networked control systems with short time delay[J]". Communications in Computer and Information Science, 2011, Vol.144, 396-401
- [36] Q X Zhu, G G Xie. "Analysis and modeling of multi-rate networked control systems with long time delay[C]". 2012 24th Chinese Control and Decision Conference: 2978-2983
- [37] X Y Lin. "Research on model-based networked control system with multi-rate sampling [D]" diss. Lanzhou University of technology, 2005
- [38] Z W Wang, G Guo. "On Model-based Networked Control Systems with Multi-rate Input Sampling [J]". Int. J. Modeling, Identification and Control. 2010, 10(2): 160-166
- [39] C B Liu, C X Yang, P Y Sun. "Design of output feedback controller for input multirate sampling control systems [J]" Information and control. 2013.4, 42 (2): 168-174
- [40] T Bai, L Hu, P Shi. "Analysis and Design for Linear Singular Multirate Networked Control Systems[C]". Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008, San Francisco, USA
- [41] L Zheng, M Chow. "Adaptive Multiple Sampling Rate Scheduling of Real-time Networked Supervisory Control System – Part I[C]". 32nd IEEE Annual Conference on Industrial Electronics
- [42] Hagiwara T, Araki M. "Design of a stable state feedback controller based on the multirate sampling of the plant output[J]". IEEE Transactions on Automatic Control. 1988, Vol.33: 812-819
- [43] Y D Zeng, Y G Zhang, S B He. "Robust Pole Assignment of Digital Control System With Output Multirate Sampled[J]" Journal

of Southwest Jiangtong University,.2000.10, 8(2): 162-168

- [44] X Zhao, W Zhang, H Zhang. "Modeling of Multirate Input and Output Networked Control System[C]".Global Congress on Intelligent Systems.2009 IEEE: 258-263
- [45] Meyer David G. "Cost Translation and a Lifting Approach to the Multirate LQG Problem[J]".IEEE Transactions on Automatic Control, 1992.9, 35(9): 1411-1415
- [46] Q Li. "Multirate sampled-data systems: all H_{∞} suboptimal controllers and the minimum entropy controller[J]".IEEE Transactions on Automatic Control,1999, 44(3): 537-550
- [47] L Tang, J Xiao. "Pole assignment of digital control system [J]"Electric machines and control. 2001.6, 5 (2):88-91
- [48] L L Liu, Q L Zhang, Z P Du. "State feedback stabilization for switched singular networked control systems [J]"Journal of Northeastern University. 2014.2, 35(2):158-161
- [49] F Q Sun. "Controllability and observability of networked control system based on singular control system [J]"Journal of Jinlin University. 2008.9, 46(5): 853-859
- [50] L L Liu. "Stability analysis of singular networked control systems and singular time-delay systems[D]" PhD diss. Northeastern University, 2010
- [51] J Y Wang, C J Li, X Y Chen. "Guaranteed cost control for the singular networked control system with uncertain time-delay [J]". Journal of Northeastern University. 2012.1, 33(1): 25-29
- [52] Z P Du, Q L Zhan, L L Liu. "stability of singular networked control system with delay and data packet dropout[J]" Journal of Northeastern University. 2009.1, 30(1):17-21
- [53] Kim Y H, Park H S ,Kwon W H. "Scheduling method for network-based control systems[C]".Proceedings of the 1998 American Control Conference, Piscataway, NJ, IEEE, 1998: 718-722
- [54] Hong S H, Kim Y C. "Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing field-bus network[J]".Instrumentation and Measurement, 2002, 52(2): 246-251
- [55] Hong S H. "Bandwidth allocation scheme for cyclic-service field-bus networks[J]".IEEE Transactions on Mechatronics, 2001, 6(2): 197-204
- [56] Park H S, Kim Y H, Kim D S. "A scheduling method for network-based control systems[J]".IEEE Transactions on Control system Technology, 2002, 10(3): 318-330
- [57] Kim D S, Lee Y S, Kwon W H. "Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]".Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1301-1313
- [58] XU S Y, LAM J. "Improved delay-dependent stability criteria for time-delay systems [J]". IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(3): 384-387
- [59] Velasco M, Furies J M, Lin C. "A control approach to bandwidth management in networked control systems[C]",The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004: 2343-2348
- [60] F Xia, L P Liu, S B Li. "Integrated feedback scheduling of networked control systems[C]" Proceedings of ICSCA'06, Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems-Series B:Applications and Algorithms, Waterloo, Canada, 2006: 3274-3280

【作者简介】



王志文（1976-），男，汉，博士，教授，研究方向网络控制系统。
Email: wwwangzhiwen@163.com



高红红（1989-），女，汉，硕士，研究方向网络控制系统。
Email: gaohong08220542@163.com