



浙江工业大学

硕士学位论文

基于动态信道选择的
无线网络化控制系统设计和分析

作者姓名	郝小梅
指导教师	赵云波 教授
学科专业	控制科学与工程
学位类型	工学硕士
培养类别	全日制学术型硕士
所在学院	信息工程学院

提交日期：2022年06月

Design and Analysis for Wireless Networked Control Systems Based on Dynamic Channel Selection

Dissertation Submitted to
Zhejiang University of Technology
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Engineering



by

Xiao-mei HAO

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-bo ZHAO

Jun., 2022

浙江工业大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：郝小梅

日期：2022年5月

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于 1、保密 ，在一年解密后适用本授权书。

2、保密 ，在二年解密后适用本授权书。

3、保密 ，在三年解密后适用本授权书。

4、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：郝小梅

日期：2022年5月

导师签名：赵云波

日期：2022年5月

中图分类号 TP13

学校代码 10337

UDC 681.5

密级 公开

研究生类别 全日制学术型硕士研究生



浙江工业大学

工学硕士学位论文

基于动态信道选择的无线网络化控制系统设计与分析

Design and Analysis for Wireless Networked Control Systems
Based on Dynamic Channel Selection

作者姓名 郝小梅

第一导师 赵云波 教授

学位类型 工学硕士

学科专业 控制科学与工程

培养单位 信息工程学院

研究方向 无线网络化控制

答辩日期: 2022 年 5 月 13 日

基于动态信道选择的无线网络化控制系统设计和分析

摘 要

近年来,无线网络化控制系统由于其低成本、高灵活、易维护等诸多优点已成为学术研究的热点,相关成果被广泛应用于工业控制、智能家居、智能医疗等领域。由于无线网络化控制系统中资源有限的通信网络在不同用户中进行共享,若能在保证控制系统性能可靠的前提下节省无线网络化控制系统所用的通信网络资源,将能有效优化共享通信网络的资源分配和共享用户的性能提升,相关问题已经成为当前研究的热点问题之一。

本文研究无线网络化控制系统中的通信资源节省问题,提出了一种基于动态信道选择的网络资源调度策略。该策略可实时预测控制系统的传输需求,进而对数据传输信道进行动态选择,最终在保证控制系统性能的同时节省了大量的网络信道资源。本文的主要工作如下:

(1) 针对与其他用户共享通信网络的无扰无线网络化控制系统,设计了基于估计器的动态信道选择策略,在保证无扰无线网络化控制系统性能的同时节省了大量网络信道资源。该策略的实现由控制信号估计器、信道选择器和控制器三部分完成,其中控制信号估计器通过已知数据估计出未知的执行器实际使用数据,帮助进行信道选择。而信道选择器利用估计器得到的控制器实际使用数据和当前最新状态进行信道选择。最后给出了闭环系统渐近稳定的充分条件并通过数值仿真验证了策略的有效性。

(2) 针对与其他用户共享通信网络的有扰无线网络化控制系统,设计了改进的基于估计器的动态信道选择策略,在保证有扰无线网络化控制系统性能的同时节省了大量网络信道资源。该策略的实现同样由控制信号估计器、信道选择器和控制器三部分完成,其中估计器的实现引入了有界递归的思想,保证了有界扰动下估计控制信号误差有界。同样,给出了保证系统最终一致有界的充分条件并通过数值仿真验证了策略的有效性。

关键词: 无线网络化控制系统, 资源调度, 动态信道选择, 控制信号估计器

DESIGN AND ANALYSIS FOR WIRELESS NETWORKED CONTROL SYSTEMS BASED ON DYNAMIC CHANNEL SELECTION

ABSTRACT

In recent years, wireless networked control systems (WNCSs) have been a research focus owing to a series of advantages such as low cost, high flexibility and easy maintenance, and have been intensively applied in industrial control systems, smart homes, wise information technology of the med systems and other fields. In WNCSs, multiple users share communication networks with limited resources. If the communication network resources used by WNCSs can be saved under the premise of ensuring reliable performance, the resource allocation of the shared communication networks and the performance improvement of the shared users can be effectively optimized. Related issues have become one of the hotspots in current research.

This thesis studies the problem of communication resource saving in WNCSs, and proposes new network resource scheduling strategies based on the dynamic channel selection. The strategies select the data transmission channel dynamically based on the transmission requirement of control systems in real time, and finally save a lot of network channel resources on the premise of ensuring the performance of the control systems. The main work of this thesis is as follows:

(1) A dynamic channel selection strategy based on estimator is designed for the WNCSs without disturbance and the communication networks are shared with other users, which can save a lot of network channel resources while ensuring the performance of the undisturbed WNCSs. The implementation of this strategy consists of control signal estimator, channel selector and controller. The control signal estimator estimates real-time actuator data based on the known data to help select the channel. The channel selector performs channel selection based on the difference between the control signal estimation and the current state. Finally, sufficient conditions to ensure the closed-loop systems being asymptotic stability are given and the effectiveness of the proposed strategy is verified numerically.

(2) An improved dynamic channel selection strategy based on estimator is designed for the WNCSs with disturbance and the communication networks are shared with other users. The proposed strategy can save a lot of network channel

resources while ensuring the performance of the disturbed WNCSs. The implementation of this strategy also consists of control signal estimator, channel selector and controller. The realization of the estimator introduces the idea of bounded recursion to ensure that the control signal estimation error is bounded under the bounded disturbance. Also, sufficient conditions to ensure the systems being uniformly ultimate bounded are given and the effectiveness of the proposed strategy is verified numerically.

KEY WORDS: wireless network control systems, resources scheduling, dynamic channel selection, control signal estimator

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
插图清单.....	VII
表格清单.....	VII
符号说明.....	VIII
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 信道调度下的无线网络化控制系统研究现状.....	3
1.2.1 无线网络化控制系统研究现状.....	3
1.2.2 单一信道调度下的无线网络化控制系统研究现状.....	11
1.2.3 多信道调度下的无线网络化控制系统研究现状.....	13
1.3 本文主要研究内容.....	15
第二章 基于动态信道选择的无扰无线网络化控制系统设计与分析.....	17
2.1 问题描述.....	17
2.2 无扰 WNCSSs 的信道选择策略设计.....	19
2.2.1 控制信号估计器设计.....	19
2.2.2 信道选择器设计.....	21
2.2.3 控制器设计.....	22
2.3 控制系统稳定性分析和控制器求解.....	22
2.4 数值仿真.....	25
2.5 本章小结.....	29
第三章 基于动态信道选择的有扰无线网络化控制系统设计与分析.....	31
3.1 问题描述.....	31
3.2 有扰 WNCSSs 的信道选择策略设计.....	32
3.2.1 控制信号估计器设计.....	33
3.2.2 控制器设计.....	34
3.2.3 信道选择器设计.....	35
3.3 估计器求解.....	36
3.4 控制系统稳定性分析和控制器求解.....	37
3.5 数值仿真.....	42

3.6 本章小结.....	46
第四章 总结与展望.....	47
4.1 总结.....	47
4.2 展望.....	48
参考文献.....	49
致 谢.....	53
作者简介.....	54
1 作者简历.....	54
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	54
3 参与的科研项目及获奖情况.....	54
4 发明专利.....	54
学位论文数据集.....	55

插图清单

图 1-1	无线网络化控制系统框图	1
图 1-2	马尔可夫状态转移图	7
图 1-3	丢包下的无线网络化控制系统结构	8
图 1-4	共享通信网络的无线网络化控制系统	15
图 2-1	所研究的无线网络化控制系统	18
图 2-2	EBCS 策略流程图	19
图 2-3	x_1 和 x_2 轨迹图	26
图 2-4	x_3 和 x_4 轨迹图	26
图 2-5	控制信号估计器的估计效果	27
图 2-6	EBCS 策略下的信道调度情况	27
图 2-7	x_1 和 x_2 轨迹图	28
图 2-8	x_3 和 x_4 轨迹图	28
图 2-9	EBCS 策略下的信道调度情况	29
图 3-1	IEBCS 策略流程图	32
图 3-2	x_1 轨迹图	42
图 3-3	x_2 轨迹图	43
图 3-4	执行器使用的控制信号估计图	43
图 3-5	x_1 轨迹图	44
图 3-6	x_2 轨迹图	44
图 3-7	执行器使用的控制信号估计图	45

表格清单

表 2-1	无扰 WNCSs 中非竞争信道使用次数对比	29
表 3-1	有扰 WNCSs 中非竞争信道使用次数对比	45

符号说明

$\arg \min(t_i)$	——	使式 t_i 达到最小值时的变量 i 的取值;
CAP	——	竞争接入时期(Contention Access Period);
CFP	——	非竞争接入时期(Contention Free Period);
$col\{X_1, X_2\}$	——	元素为 X_1, X_2 的列矩阵;
$diag\{X_1, X_2\}$	——	对角元素为 X_1, X_2 的对角矩阵;
EBCS	——	基于估计器的信道选择策略(Estimation Based Channel Selection);
GTS	——	保证时隙(Guaranteed Time Slot);
I	——	合适维度的单位矩阵;
IEBCS	——	改进的基于估计器的信道选择策略(Improve Estimation Based Channel Selection);
LMI	——	矩阵线性不等式(Linear Matrix Inequality);
NCS	——	网络化控制系统(Networked Control Systems);
$\Pr(A)$	——	事件 A 发生的概率;
R^n	——	n 维欧几里得空间;
rank	——	矩阵的秩;
TCP	——	传输控制协议(Transmission Control Protocol);
Tr	——	矩阵的迹;
UDP	——	用户数据报协议(User Datagram Protocol);
WNCSs	——	无线网络化控制系统 (Wireless Networked Control Systems);
X^{-1}	——	矩阵的逆;
X^T	——	矩阵的转置。

第一章 绪 论

1.1 研究背景和意义

无线网络化控制系统(Wireless Networked Control Systems, WNCSs), 一般由被控对象、传感器、控制器、执行器以及无线通信网络五个部分组成。与传统控制系统不同的是, WNCSs 通过无线通信网络来进行传感器到控制器以及控制器到执行器之间的数据传输^[1-3]。WNCSs 的控制框图如图 1-1 所示。

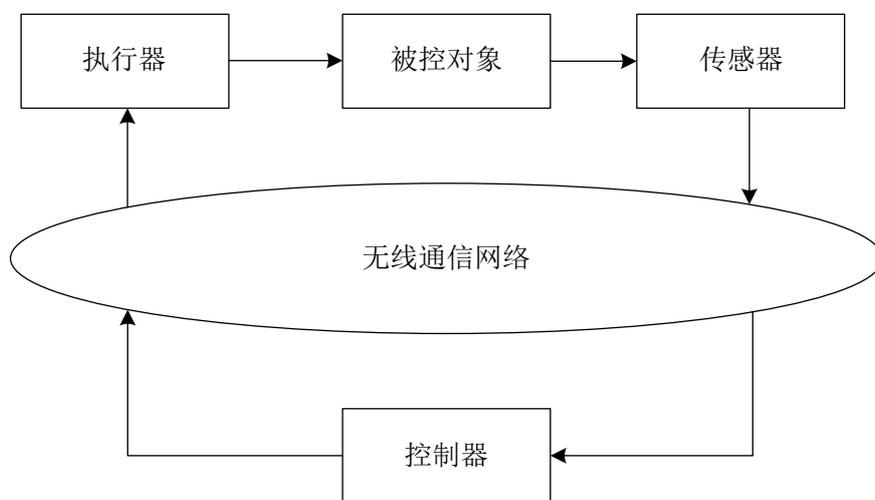


图 1-1 无线网络化控制系统框图

Figure 1-1. The structure diagram of wireless networked control systems

在传统的控制系统中, 传感器与控制器以及控制器与执行器之间的连接通常是通过端到端的布线来实现, 这可能会导致布线和维护困难、灵活性较低、不易于扩展等诸多问题。随着被控对象的复杂性日益增加, 分布区域的不断扩大, 许多自动化系统中也出现此类缺陷^[4]。在这种情况下, WNCSs 因其布线简单、通信灵活、设置和维护成本较低的优点^[5, 6], 另外随着近些年来无线通信、嵌入式计算、智能传感器等技术的长足发展, WNCSs 在当今社会应用越来越广泛^[7]。例如在智能家居^[8, 9]、智能交通^[10]、工业控制系统^[11, 12]、机器人和无人机控制^[13, 14]等领域。

然而无线通信网络的引入在给控制系统带来诸多便利的同时, 也不可避免地给控制系统设计与分析带来了许多挑战。由于网络带宽有限, 网络流量出现拥塞的情况不可避免, 导致网络数据传输会出现数据包传输延时、数据包丢失、数据包乱序以及有限的网络通信资源等等通信约束。这些约束均会对控制

系统的性能产生影响,严重时甚至会导致控制系统失稳,因此,如何缓解这些网络缺陷对网络化控制系统的影响一直受到学者们的关注^[15-17]。

网络引起的延时可以是恒定的、随时间变化的、甚至是随机的。数据包传输延时主要由排队延时、接入延时和传输延时三个部分组成^[3],其中排队延时是指从数据包到达节点处时到节点开始传输数据包所经历的时间。当数据包到达节点处时,可能需要在发送队列中等待节点将较早的数据包处理完成后再进行传输,这一时间与数据产生速率以及多跳网络路径中数据包的数量成正比。接入延时指的是数据包开始传输到实际被发送所经历的时间,接入延时主要受数据包接入信道的机制的影响,当采用随机接入方式时,网络负载将影响接入延时,负载越高,接入延时越大。当采用调度方式接入信道时,调度机制将对延时起到重要影响。另外,发送节点和接受节点的编码能力和解码能力将决定一次能发送和接受数据的数量,数量越多,接入延时越小。传输延时是指数据包在网络链路中传输所需的时间。由于信号的传输速度非常快,传输延时一般比较小,因此接入延时和排队延时是影响网络延时大小的主要因素^[18]。

数据包丢失是指数据包在传输过程中丢失,一般有网络引起的被动丢包和主动丢包两种情况^[16]。数据包丢失主要由通讯信道阻塞、数据包冲突等原因引起。当信道负载过高时,可能造成等待队列过长,网络将会去除一部分数据包以保证网络吞吐量,从而造成数据包丢失,当一个节点同时收到两个及以上数据包时,称为数据包冲突,冲突的数据包由于无法被接收节点解码,导致节点接受失败,当网络使用 UDP 协议(用户数据报协议, User Datagram Protocol)时,接收失败的数据不会重发,从而造成丢包^[19]。当网络使用 TCP 协议(传输控制协议, Transmission Control Protocol)时,数据包的重发次数一旦超过设定阈值,同样会造成丢包^[20]。另外丢包也可由传输的多径效应、多普勒频移等现象引起。这些都是网络引起的被动丢包。另一方面,过长的延时意味着数据包无法满足控制系统对实时性的要求,控制系统也会主动丢弃这些过期的数据包,而选择较新的数据包用于控制。此为控制系统的主动丢包^[21]。

数据包乱序是指数据包发送顺序与接收顺序不同的现象。出现数据包乱序的主要原因为多跳传播以及信道拥塞。数据包从节点先后发出,先发送的数据包延时较长,导致其到达接收端的时间落后于后发送的数据包^[22, 23]。

无线通信网络出现延时、数据包丢失和数据包乱序等约束的重要原因是无线通信网络有限的网络资源。所谓有限的网络资源,是指随着控制系统的被控对象越来越复杂,对控制系统的性能要求越来越高,需要传输的数据包的大小和数量也在不断增加,而且 WNCSSs 经常需要与其他用户,甚至是其他控制系统共享同一片通信网络,而网络的带宽是有限制的,所以 WNCSSs 性能对通信网络的依赖越来越大。

网络资源可以有很多种，比如带宽资源，信道资源等，本文具体考虑网络传输信道不足的问题。无线通信网络中存在竞争信道和非竞争信道，其中，竞争信道指各个用户之间通过竞争的方式来抢占信道资源，“竞争”的方式容易发生数据包的碰撞，数据包的碰撞会导致数据包传输的延时和丢失。非竞争信道指在某一段时隙中，信道提供给控制系统或其他用户专用^[24]，其数据传输延时和丢包特性可以得到保证，然而相较于竞争信道，非竞争信道的资源更加有限珍贵，例如在 IEEE 802.15.4 协议中每个周期内最多有 7 个用户使用非竞争信道传输数据^[25, 26]。并且在无线通信网络中，用户的加入和退出更加便捷，用户对数据传输的需求是随机的，甚至是突变的。所以根据时隙分配信道的非竞争信道接入相比于根据数据包的实际大小分配信道的竞争信道接入更容易造成信道资源浪费。

然而，在 WNCSS 中，不能仅仅考虑网络信道资源节省。由于控制系统实时性要求比较高，使用非竞争信道传输数据比使用竞争信道传输数据更能满足控制系统高实时性的要求。因为竞争信道传输数据产生的延时和丢包，会影响控制系统的性能，甚至会导致控制系统失稳^[27, 28]。

综上所述，网络引起的延时、数据包丢失、乱序以及有限的网络信道资源等通信约束的存在使得无线网络化控制系统中的数据包无法完美发送与接收，导致控制系统的状态数据和控制数据不能被及时更新，可能会对控制系统的性能造成比较恶劣的影响，甚至会使得控制系统失稳，这些问题在网络化控制系统中不可避免地会出现。因此对存在这些问题的网络化控制系统进行设计与分析具有重要的意义。

在传统的点对点控制系统中一般不存在或者可以忽略上述的问题，因此针对传统控制系统的研究成果无法直接用于 WNCSSs，因此必须要针对系统中存在这些通信约束问题的 WNCSSs 设计新的系统控制和分析的有效方法。并且若能在保证控制系统性能可靠的前提下节省 WNCSSs 所用的通信信道资源，从而有效优化共享通信网络的资源分配和共享用户的性能提升，这对 WNCSSs 的发展具有重要意义。

1.2 信道调度下的无线网络化控制系统研究现状

1.2.1 无线网络化控制系统研究现状

无线通信网络的引入在给控制系统带来诸多便利的同时，也给控制系统的设计与分析带来一些问题，其中网络引起的延时和丢包为无线网络化控制系统中最常见的两个问题，已有许多学者针对 WNCSSs 中的延时和丢包问题做了大量的研究。

针对延时的研究中，主要有两种延时建模方法。其一是假设延时具有上下界，可以将闭环系统分别建模成延时系统，不确定系统以及切换系统。例如，文献[29]考虑一个带扰动的线性连续系统如下：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_w w(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1-1)$$

其中， $x(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ 、 $w(t)$ 分别为系统的状态、控制输入、输出以及外部扰动， A 、 B 、 B_w 、 C 和 D 为对应维度的系统矩阵，定义 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 为控制输入恒定作用于被控对象的时间间隔，可以设计状态反馈控制输入如下：

$$u(t) = Kx(t_k - \tau_{sc}(k) - \tau_{ca}(k)) \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (1-2)$$

其中， K 为控制增益， τ_{sc} 和 τ_{ca} 分别为传感器到控制器和控制器到执行器之间的延时，存在上下界。闭环系统可以建模成延时系统如下：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - \tau(t)) + B_w w(t) \\ y(t) = Cx(t) + DKx(t - \tau(t)) \end{cases} \quad (1-3)$$

其中， $t \in [t_k, t_{k+1})$ ， $\tau(t) = t - t_k + \tau_{sc}(k) + \tau_{ca}(k)$ ，建模成延时系统以后，控制器增益可以通过最小化二次性能指标得到，可以进一步将其转换成标准线性矩阵不等式问题。该方法只需要延时的上界和下界来描述网络特性，并且该方法与系统的初始条件无关。文献[30]考虑具有短时变延时的网络化控制系统，其被控对象为线性连续系统，在每个采样间隔 $(t_k, t_{k+1}]$ 存在：

$$u(t) = \begin{cases} u(k-1) & t \in (t_k, t_k + \tau(k)] \\ u(k) & t \in (t_k + \tau(k), t_{k+1}] \end{cases} \quad (1-4)$$

其中， $\tau(k)$ 为闭环系统的延时，当系统采样间隔为 T 时，可以将系统进一步转换为时变离散系统如下：

$$x(k+1) = (A_d + B_{d0}(\tau(k))K)x(k) + B_{d1}(\tau(k))Kx(k-1) \quad (1-5)$$

其中， $A_d = e^{AT}$ ， $B_{d0}(\tau(k)) = \int_0^{h-\tau(k)} e^{As} B ds$ ， $B_{d1}(\tau(k)) = \int_{h-\tau(k)}^h e^{As} B ds$ ， A 和 B 为被

控对象的系统矩阵。可以写成如下形式：

$$x(k+1) = G(\tau(k)) \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

其中， $G(\tau(k)) = [A_d + B_{d0}(\tau(k))K \quad B_{d1}(\tau(k))K]$ 。根据式(1-6)可知，当延时为时变延时，需要使用鲁棒控制技术来求解系统控制增益。经过一系列变换，将式(1-6)的时变离散系统中的 $G(\tau(k))$ 用下面的式子描述：

$$G(\tau(k)) = G(\tau_{nom}) + D\Theta(\delta)E \quad (1-7)$$

其中, $E = [BK \quad -BK]$, $\Theta(\delta)$ 为上式中唯一时变的部分, 可以当作范数有界的不确定性处理, 从而将闭环系统建模成不确定系统, 利用不确定系统的方法来分析系统稳定性和求解控制器增益。文献[31]考虑线性连续系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u(t) \\ y(t) = C_p x(t) \end{cases} \quad (1-8)$$

其中, $x(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ 分别为系统的状态、控制输入以及输出, A_p 、 B_p 、 C_p 为对应维度的系统矩阵。系统的传感器和执行器均为时间驱动的, 周期分别为 T 和 T_s , 假设闭环系统的延时上界为 T , 将 $d_0(k)T_s$ 和 $d_1(k)T_s$ 分别表示控制输入 $u(k)$ 和 $u(k-1)$ 的作用时间, 文章通过延时将 $d_0(k)$ 和 $d_1(k)$ 映射成切换信号 $\sigma(k)$, 并且对每一个系统模态设计相应的状态反馈控制器如下:

$$u(k) = K_{\sigma(k)} x(k) \quad (1-9)$$

可以将闭环系统建模为切换系统如下:

$$x(k+1) = (A + B_{0\sigma(k)} K_{\sigma(k)}) x(k) + B_{1\sigma(k)} K_{\sigma(k-1)} x(k-1) \quad (1-10)$$

其中, $A = e^{A_p T}$, $A_0 = e^{A_p T_s}$, $B_0 = \int_0^{T_s} e^{A_p t} B_p dt$, $B_{0\sigma(k)} = \left(\sum_{i=0}^{d_0(k)-1} A_0^i \right) B_0$,

$B_{1\sigma(k)} = \left(\sum_{i=0}^{d_1(k)-1} A_0^{i+d_0(k)} \right) B_0$, $\sigma(k)$ 为映射过来的切换信号, 与闭环系统延时有关。

通过李雅普诺夫函数和切换系统的概念即可分析闭环系统的指数稳定性。以上方法都是考虑延时的上界和下界, 利用延时上下界的方法具有一定的保守性。为了降低保守性, 利用更多的延时信息, 其二是假设延时为具有已知的概率分布函数或者将延时考虑为一个马尔可夫过程, 从而将闭环系统建模成随机系统。例如文献[32]假设延时为已知概率分布的随机变量, 研究了线性连续系统的事件触发 H_∞ 控制, 系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 w(t) \\ y(t) = Cx(t) + Dw(t) \end{cases} \quad (1-11)$$

其中, $x(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ 、 $w(t)$ 分别为系统的状态、控制输入、输出以及外部扰动, A 、 B_1 、 B_2 、 C 和 D 为对应维度的系统矩阵, 系统状态是否发送由式(1-12)的触发机制决定:

$$s_{k+1} = \min_s \{s > s_k \mid e^T(s) \Phi e(s) \leq \delta x(s_k)^T \Phi x(s_k)\} \quad (1-12)$$

其中, s_k 为最近的触发时刻, s_{k+1} 为下一次触发时刻, Φ 为待设计的权重矩阵, $\delta \in [0,1)$ 为触发阈值, $e(k) = x(k) - x(s_k)$, 系统状态触发发送, 由于网络拥塞存在随机延时, 可以设计控制器如下:

$$u(t) = Kx(s_k) \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (1-13)$$

其中, $t_k = s_k + \eta(s_k) < t_{k+1} = s_{k+1} + \eta(s_{k+1})$, K 为控制增益。注意到时变延时满足关系如下:

$$\eta = \frac{t - t_{k+1}}{t_{k+1} - t_k} \eta(s_k) + \frac{t_k - t}{t_{k+1} - t_k} \eta(s_{k+1}) \quad (1-14)$$

通过延时之间的关系以及文章中的引理, 可以将闭环系统建模成延时系统, 充分利用延时特征, 并且通过李雅普诺夫函数证明系统的稳定性。

另外有学者们注意到在实际的无线网络中, 相邻延时之间可能存在某种联系, 部分文章假设延时满足马尔可夫过程, 从而将闭环系统建模成马尔可夫跳变系统, 再利用经典的马尔可夫跳变系统方法分析系统稳定性, 并且得到稳定控制器。例如文献[33]研究了一类具有不确定参数的离散时间系统的鲁棒有限时间随机稳定问题。被控对象如下式:

$$\begin{cases} x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (1-15)$$

其中, $x(k)$ 、 $u(k)$ 分别为系统的状态和控制输入, A 、 B 、 C 为对应维度的系统矩阵, ΔA 和 ΔB 为代表时变范数有界不确定性的未知矩阵。文章假设延时有界并且被建模成马尔可夫链如下:

$$\pi_{ij} = Pr(\tau_{k+1} = j | \tau_k = i) \geq 0 \quad (1-16)$$

其中, 对于 $\forall i, j \in S$, $S = \{0, 1, \dots, \tau_{max}\}$, τ_{max} 为已知的延时上界。并且针对不同的延时设计不同的输出反馈控制器如下:

$$u(k) = K(\tau_k)y(k - \tau_k) \quad (1-17)$$

通过将闭环系统建模成马尔可夫跳变系统, 利用马尔可夫跳变系统理论来对系统进行分析, 可以得到系统有限时间随机稳定的充分条件。

多数文章会假设延时上下界已知或者延时概率分布已知, 然后实际上, 无线网络十分复杂, 已知的假设合理性有待讨论。Liang 等人研究了具有未知延时特性的无线网络控制系统的控制设计和系统分析^[34]。文章假设闭环延时未知但是满足马尔可夫过程如下:

$$Pr(\tau_{k+1} = j | \tau_k = i) = \begin{cases} \pi_{ij} & j \leq i+1 \\ 0 & j > i+1 \end{cases} \quad (1-18)$$

其中, $\pi_{ij} > 0$, $\forall i, j = \{0, 1, \dots, \tau_{max}\}$, π_{ij} 未知。作者提出了一种改进的 Jeffery 区间估计方法, 引入学习率 σ , $\sigma < 1$, 减缓估计开始阶段区间收缩速度, 提高样本较少时估计区间的置信度。通过该估计器得到延时的估计区间为 $[\underline{\pi}'_{ij,k}, \bar{\pi}'_{ij,k}]$, 可以通过式(1-19)得到:

$$\begin{aligned}\underline{\pi}'_{ij,k} &= \beta\left(\frac{1-\alpha}{2}; X_{ij,k}, N_{i,k} - X_{ij,k} + a\right) \\ \bar{\pi}'_{ij,k} &= \beta\left(\frac{1+\alpha}{2}; X_{ij,k}, N_{i,k} - X_{ij,k} + b\right)\end{aligned}\quad (1-19)$$

其中, $\beta(h;d,e)$ 表示满足参数为 d 、 e 的贝塔分布的 h 分位点, a 、 b 为贝塔分布的初始值, 通常可取 0.5。 $X_{ij,k}$ 为延时对 $(\tau_l = j, \tau_{l-1} = i)$, $l \leq k - d_k$ 的数量。上式中的 $X_{ij,k}$ 、 $N_{i,k}$ 可用在线得到的延时对 $(\tau_{k-d_k}, \tau_{k-d_k-1})$ 迭代得到:

$$(X_{ij,k}, N_{i,k}) = \begin{cases} (X_{ij,k-1} + 1, N_{i,k-1} + 1) & \tau_{k-d_k} = j, \tau_{k-d_k-1} = i \\ (X_{ij,k-1}, N_{i,k-1}) & \text{其他} \end{cases} \quad (1-20)$$

上述估计方法将缓解传统 Jeffery 估计在样本较少时置信度不足的问题。当样本数量较少时, 估计区间式(1-19)接近保守的区间 $[0,1]$, 其置信度接近 1, 当样本数量逐渐增加时, 对区间 $[\underline{\pi}'_{ij,k}, \bar{\pi}'_{ij,k}]$ 的信赖程度也逐渐提升。最后, 文章给出了保证闭环系统均方一致最终有界的充分条件, 以及控制器增益设计方法, 解决了未知延时下的无线网络化控制系统的控制问题。

针对丢包的研究中, 研究人员们也提出了许多有意义的解决方法。例如文献[35]针对如下离散系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1-21)$$

其中, $x(k)$ 为系统状态, A , B 为合适维度的系统矩阵。定义 $v(k)$ 为丢包指数函数, $v(k)=1$ 和 $v(k)=0$ 分别表示数据包传输成功和失败。该方法将网络中的丢包过程建模为如图 1-2 所示的马尔可夫过程。

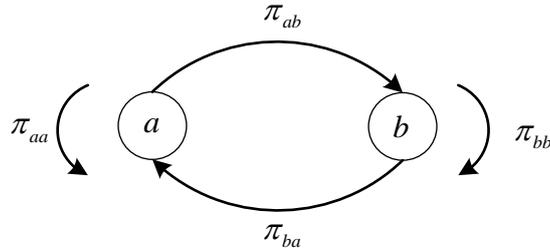


图 1-2 马尔可夫状态转移图

Figure 1-2. State transition diagrams of Markov chains

定义 $S = \{0, 1\}$ 从 k 时刻的 $a \in S$ 模式到 $k+1$ 时刻的 $b \in S$ 模式的转移概率可用下式表示:

$$\mathbb{P} = \{v(k+1) = b \mid v(k) = a\} = \pi_{ab} \quad (1-22)$$

其中, $\pi_{ab} \geq 0$, $\sum_{b \in S} \pi_{ab} = 1$ 。随后, 通过构建状态反馈控制得到闭环系统如下:

$$x(k+1) = v(k)[(A + BK)x(k)] + (1 - v(k))Ax(k) \quad (1-23)$$

其中, K 为合适维度的反馈增益矩阵。最后, 该文献提出定理1在已知状态转移矩阵的情况下, 通过李雅普诺夫定理和线性矩阵不等式证明了所提方法在均方意义下稳定。

值得注意的是, 上述方法直接考虑闭环丢包特性, 未将前馈通道和反馈通道分开考虑, 具有一定的保守性。文献[36, 37]分别考虑了前馈通道和反馈通道发生丢包时的情况, 并将其描述为如图 1-3 所示的切换系统。

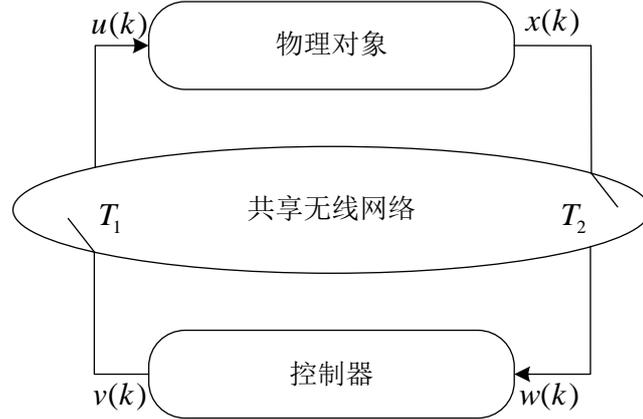


图 1-3 丢包下的无线网络化控制系统结构

Figure 1-3. Structure of WNCSSs with packet dropouts

其中, T_1 , T_2 分别为前馈通道和反馈通道的状态。当 T_1 闭合时, 表示前馈通道未发生丢包 $u(k) = v(k)$ 。反之, 则表示前馈通道数据包丢失, 控制信号维持上一时刻值 $u(k) = u(k-1)$ 。与之相同的是, 当 T_2 闭合时, 表示反馈通道未发生丢包, 即 $w(k) = y(k)$ 。反之, 则表示前馈通道数据包丢失, 控制信号维持上一时刻值 $w(k) = w(k-1)$ 。整合被控对象和控制器的状态向量得到:

$$z(k) = \begin{bmatrix} x^T(k) & w^T(k-1) & u^T(k-1) \end{bmatrix}^T \quad (1-24)$$

根据 T_1 , T_2 的不同, 在如下的状态反馈控制下:

$$v(k) = Kw(k) \quad (1-25)$$

闭环系统可被描述为如下四个子系统:

$$z(k+1) = \Phi_1 z(k) \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} A+BK & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 \\ K & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-26)$$

$$z(k+1) = \Phi_2 z(k) \quad \Phi_2 = \begin{bmatrix} A & BK & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & K & 0 \end{bmatrix} \quad (1-27)$$

$$z(k+1) = \Phi_3 z(k) \quad \Phi_3 = \begin{bmatrix} A & 0 & B \\ I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (1-28)$$

$$z(k+1) = \Phi_4 z(k) \quad \Phi_4 = \begin{bmatrix} A & 0 & B \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (1-29)$$

因此，闭环系统可用如下切换系统表示：

$$z(k+1) = \Phi_{\sigma(k)} z(k) \quad (1-30)$$

其中， $\sigma(k) \in M = \{i=1, 2, 3, 4\}$ 是分段常数切换信号。在这种建模下，文献[36]采用平均停留时间法，给出了闭环网络通信系统指数稳定性的充分条件，明确地建立了丢包率与闭环网络通信系统稳定性之间的关系。文献[37]采用异步动态系统方法和平均驻留时间法，从非线性矩阵不等式、丢包率与闭环稳定性的关系等方面给出了闭环 WNCSs 指数稳定性的充分条件。在文献[38]中，提出了一种滑模切换策略，系统在实际模型和标称模型之间切换并保证了滑模面可达性。

上述提及的方法都假设丢包过程的概率是已知的，并在这种情况下设计控制方法来维持系统稳定。但是，这种假设往往不符合实际，对于共享通信网络来说，数据传输的丢包率受到同一时间用户量的影响，即丢包率通常不是固定的。文献[39]考虑了丢包率突变的情况，即未知的丢包率将在未知时刻突变到另一个未知概率上并保持一段时间。考虑如下有扰线性离散系统：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + C\omega(k) \quad (1-31)$$

其中， $x \in \mathbb{R}^n$ ， $u \in \mathbb{R}^m$ ， $\omega \sim N(0, \sigma^2)$ 分别为系统状态、控制输入以及系统扰动，未知扰动满足 0 均值 σ^2 方差的高斯分布。 A ， B ， C 为合适维度的常数矩阵。定义 θ_k^{sc} ， θ_k^{ca} 分别为反馈通道和前馈通道是否发生丢包的指示函数，其值为 1 时，表示成功传输，为 0 时表示发生丢包。该文献将丢包建模为如下分段伯努利过程，即对 $\forall i \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \Pr(\theta_k^{sc} = 0) = \Pr(\theta_k^{ca} = 0) = p_i \quad t_i \leq k \leq t_{i+1}, \\ p_i \neq p_{i+1} \end{aligned} \quad (1-32)$$

其中， p_i 表示 $[t_i, t_{i+1})$ 时间内的丢包率， t_i 为丢包率发生第 i 次突变的时刻， t_i 和 p_i 的取值未知。定义 $\theta_k = \theta_k^{sc} \wedge \theta_k^{ca}$ ，由上可知 θ_k 满足如下分段伯努利过程：

$$\Pr(\theta_k = 0) = 1 - (1 - p_i)^2 = \rho \quad t_i \leq k \leq t_{i+1} \quad (1-33)$$

为应对未知的丢包率，该文献通过越来越精确的丢包率估计更新控制器，使之逐步逼近基于丢包真值的控制器。丢包率估计器在 k 时刻，通过时间戳得到

θ_k^{sc} ，从而得到置信度不小于 α 的估计区间 $\mathbb{P}_k = [\underline{\rho}_k, \bar{\rho}_k]$ ，即 $\Pr(\rho \in \mathbb{P}_k) \geq \alpha$ 。丢包估计器设计如下：

$$\begin{aligned}\underline{\rho}_k &= (1 - \mu^k)(1 - (1 - \underline{p}_k)^2) \\ \bar{\rho}_k &= \mu^k + (1 - \mu^k)(1 - (1 - \bar{p}_k)^2)\end{aligned}\quad (1-34)$$

其中

$$\begin{aligned}\bar{p}_k &= \beta((1 - \alpha)/2; k - X_k, X_k + a) \\ \underline{p}_k &= \beta((1 + \alpha)/2; k - X_k, X_k + b)\end{aligned}\quad (1-35)$$

$$X_k = \begin{cases} X_{k-1} + 1 & \theta_k^{sc} = 0 \\ X_{k-1} & \theta_k^{sc} = 1 \end{cases}\quad (1-36)$$

$\beta(c; d, e)$ 表示参数分布为 d ， e 的贝塔分布的上侧 c 分位点， a ， b 为贝塔分布参数的初始值，通常可取为 0.5。文献[40]证明了区间的收敛性。随后基于该估计器设计了状态反馈控制，并通过李雅普诺夫定理验证了其最终一致有界稳定。

使用经典线性系统理论设计的控制律对网络化控制系统进行控制已经到了一个相当成熟的阶段，而智能控制使得控制算法设计得到进一步改进，引来了众多学者的关注与研究。

其中模糊控制受到了极大的关注，并在许多领域被证明是成功的，模糊控制被认为是一种相对容易理解和清晰的非线性控制策略。Qiu 等人对网络化控制系统中基于模型的模糊控制进行了全面概述^[41]。文章使用了 T-S 模糊动态模型来描述一个复杂的多输入多输出的非线性系统如下：

$$\begin{cases} \delta x(t) = A(\mu)x(t) + B(\mu)u(t) + D(\mu)w(t) \\ y(t) = C(\mu)x(t) + M(\mu)w(t) \\ z(t) = L(\mu)x(t) + N(\mu)u(t) \end{cases}\quad (1-37)$$

其中

$$\begin{cases} A(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l A_l \\ B(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l B_l & C(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l C_l \\ D(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l D_l & L(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l L_l \\ M(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l M_l & N(\mu) = \sum_{l=1}^r \mu_l N_l \end{cases}\quad (1-38)$$

r 为模糊推理原则的数量， A_l ， B_l ， D_l ， C_l ， L_l ， M_l ， N_l 表示系统的第 l 个局部模型， $\mu_l[x(t)]$ 表示推断模糊集的归一化隶属函数。针对式(1-37)的动态模

糊模型加入了网络引起的丢包、延时和信号量化等，对各种控制和滤波设计问题进行了较为详细的研究。

模糊控制不再依赖被控对象的精确数学模型，并且简化了系统设计的复杂性，然而系统的设计方法更加依赖经验，模糊控制中关于稳定性和鲁棒性问题也有待进一步解决。

另外近些年来，强化学习技术蓬勃发展，很多学者也将其运用到了网络化控制领域。Fan 等人提出了一种新的无模型方法来解决网络化控制系统中的丢包问题^[42]，文章首先利用 Smith 预测器建立了一个重构的动态系统，然后开发了一种基于强化学习的 off-policy 算法，在丢包发生时仅使用测量数据计算反馈增益。基于反馈增益的解，提供了一种无模型解，用于使用调节器方程求解正向增益。仿真结果证明了所提出的方法对于具有未知动态和丢失的离散时间网络系统的有效性。Xu 等人推导了存在随机延迟和丢包等网络缺陷的线性网络控制系统的随机最优控制^[43]。所提出的随机最优控制方法使用自适应估计器和 Q-learning 的思想来解决具有时变系统矩阵的未知网络化控制系统的无限水平最优调节。接下来，引入了一种使用自适应估计器和 Q-learning 的随机次优控制方案来调节使用确定性等价性导出的未知线性时不变网络化控制系统。导出了在线调整自适应估计器未知参数以获得 Q 函数的更新律。仿真结果证明了所提出方案的有效性。

利用强化学习的方法在模型难以得到的情况下有较好的结果，且算法收敛性已得到较好证明。其缺点在于需要大量数据进行训练得到最优控制器，并且对模型已知信息的利用率较低。

1.2.2 单一信道调度下的无线网络化控制系统研究现状

网络的信道资源是有限的。近些年来，网络化控制系统中有限的信道资源和控制系统之间的协同设计问题一直是学者们最关心的问题之一^[44, 45]。在最开始的无线网络化控制系统研究中，通信网络一直认为是控制系统专用的，控制系统使用非竞争信道进行无损的数据传输，以满足闭环系统的实时性要求。然而随着无线通信技术的发展，多用户共享的通信网络逐渐占领市场，通信网络中的所有用户都使用非竞争信道传输数据变得困难，不仅经常出现信道资源不够用的情况，而且也会大大降低通信网络的总吞吐量。

后续的无线网络化控制系统研究中，非竞争信道的调度策略^[46-48]以及用户开始使用竞争信道传输数据^[49]一定程度上缓解了非竞争信道资源有限的问题，传统的非竞争信道调度策略主要有先来先服务、隐式保证时隙分配和自适应实时保证时隙分配。很多研究对传统的调度算法做出了改进。例如文献^[50]提出了一种节能流量调度算法，该算法通过最小化占空比找到合适的网络参数以提高能源效率。Chen 等通过网络演算理论分析非竞争信道利用率与相应的协议参

数之间的关系，随后针对车载网络设计了新的时间敏感加权循环调度器^[51]来提高多路访问的性能。

而利用竞争信道可以支持更多用户通过竞争来抢占数据传输信道，大大地提高了信道资源利用率和网络吞吐量。然而，这种“竞争”的方式导致数据传输会产生延时，丢包等网络约束，这些网络约束会严重影响控制系统的性能因而也被研究者们广泛关注。其中 Heemels 等人提出了包含网络延时、数据包丢失、采样间隔、通信限制、量化的通用 NCS 模型，并且进一步研究了网络延时、系统采样间隔对于系统性能的影响，提出了三者之间的权衡方案^[52]。大量文献对存在时延和丢包等通信约束下的 WNCSs 进行了研究，如 1.2 节所述。

为了进一步节省通信资源，近年来事件触发和自触发在网络化控制系统中被广泛应用。事件触发的系统是指只有在预先设计好的“事件”发生时才会触发一次系统采样发送数据，相较于时间触发，事件触发可以减少系统信息传输的次数从而节省信道资源。事件触发机制主要包括连续事件触发、离散事件触发、动态事件触发和李雅普诺夫触发等。连续事件触发指系统的状态数据连续被发送至事件触发器，事件触发器再通过预先设计好的触发条件来判断当前状态数据是否需要发送至控制器端，例如文献[53]针对受扰的线性连续系统设计连续事件触发机制如下：

$$\|x(t) - x(t_k)\| \leq \bar{e} \quad (1-39)$$

其中， $\bar{e} > 0$ 为设计的触发阈值， t_k 表示最近一次事件触发发送的时刻。 $x(t)$ 为系统的连续状态，需要事件触发器实时获取状态判断事件是否触发。离散事件触发减少了事件触发器的判断次数，在离散事件触发控制中，事件触发器只需要在每个离散采样的采样周期内判断一次即可。Chen 等人针对受扰的线性连续系统设计周期事件触发机制^[54]，下一个触发时刻可以通过式(1-40)判断，

$$t_{k+1}h = t_k h + \min_{\ell} \{ \ell h \mid e^T(i_k h) \Phi e(i_k h) \geq \delta x^T(t_k h) \Phi x(t_k h) \} \quad (1-40)$$

其中， t_k 表示最近一次事件触发发送的时刻， t_{k+1} 表示下一次事件触发发送的时刻， δ 为给定的阈值参数， $x(t_k h)$ 表示事件触发时刻的系统状态， Φ 为设计的加权矩阵， $e(i_k h) = x(t_k h + \ell h) - x(t_k h)$ 为当前状态与上一个触发时刻的状态误差， h 为采样周期。以上两种触发方式均是通过系统状态进行判断，文献[55]研究了利用系统李雅普诺夫函数作为触发条件判断的李雅普诺夫触发，文章中定义 $V: R^n \rightarrow R$ 为连续并且正定的李雅普诺夫函数，李雅普诺夫触发采样机制通过下式给出：

$$V(x(t_{i+1})) = \eta V(x(t_i)) \quad (1-41)$$

其中， $\eta > 0$ 为设计的触发参数，注意到对于较小的 η 值，采样周期反而较大。在事件触发机制中，需要专用硬件来永久监听被控对象，这增加了一定成本的

同时会持续消耗有限的能量。因此一种主动预测的自触发机制被提出，自触发机制利用被控对象的状态和系统模型主动预测下一次需要控制数据的时刻，在不需额外硬件设备的情况下，利用事件触发来节省网络资源^[56, 57]。

1.2.3 多信道调度下的无线网络化控制系统研究现状

以上提及的文献都是使用竞争或者非竞争中的一种信道进行数据传输，通过信道调度以及事件触发机制来节省信道资源。然而有些协议例如 IEEE 802.15.4 中，一个周期内同时存在竞争信道和非竞争信道，因此，通过合理利用竞争信道和非竞争信道可以在保证系统性能的同时有效提高网络信道资源利用率。

针对 WNCSs 中通信网络的多个信道进行调度从而节省网络资源的研究相对较少。Lin 等人针对网络节点可以通过多个信道传输设计了一种完全分布式的在线算法^[58]，利用数据队列和信道队列等解决了信道分配、调度和路由问题，该算法可以自动适应网络拓扑和被控对象的变化，并且仿真证明对实际系统性能是有效果的。Du 等人考虑多传感器的无线网络化控制系统，而多个传感器使用多包传输的方式将系统的状态数据发送至控制器端^[59]，而不同的无线信道传输延时有不同，对控制系统的性能影响也会有所不同。文章中采用了不同的马尔可夫链描述不同信道的不同延时特征，并且设计了 H_2 / H_∞ 滤波器以降低传感器输出信号的噪声干扰，给出了系统随机稳定的充分条件。Cao 等人利用了竞争和非竞争信道解决了大量设备接入基站对网络中有限的无线资源造成巨大压力的问题^[60]。文章提出了一种新的基于组的接入方法，群外网关设备采用竞争方式接入基站，而另一部分群内网关设备采用非竞争方式接入基站，有效降低设备的平均接入延时，缓解网络拥塞。Sun 等人对通信网络中存在多条信道调度的 WNCSs 进行建模和稳定性分析^[61]。考虑控制系统的状态数据和控制器的控制数据由不同的无线信道进行传输会产生不同延时，文章建模如下：

$$\dot{X} = AX + B \sum_{i=1}^n u(t - \tau_i) \quad (1-42)$$

其中， $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为系统的状态， $u = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ 为系统的控制输入。

A 和 B 为对应维度的系统矩阵，定义信道选择矩阵：

$$\Lambda_i = \text{diag} [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n] \quad (1-43)$$

其中，如果选择了第 i 个信道传输数据则 $\delta_i = 1$ ，否则 $\delta_i = 0$ 。建模完成以后文章利用李雅普诺夫函数分析了系统的稳定性。Ni 等人将博弈论和通信信道调度结合起来^[62]，文献考虑了网络化控制系统中的通信信道价值和选择问题，使用了博弈论并且制定了 Stackelberg 博弈框架，其中服务器首先确定信道的定价策略，客户端做出信道选择的决策。具体讨论了在单服务器单客户端和单服务器多客户端场景下客户端的最优策略。通信信道的价值制定标准并无确定，自然

也可以根据信道的稀缺程度考虑。文献[63]研究了多个控制系统共享通信网络时信道分配的问题。文章中 N 个控制回路共享同一片通信网络，然而每次通信网络只能让 κ 个控制回路成功通信，其中 $\kappa < N$ ，否则会发生数据包的冲撞导致数据包丢失，文章提出的信道分配算法首先基于每个控制回路都有一个计时器，在所有控制回路同步的时隙开始，所有计时器开始计时，计时器的值用 $t_{i,k}$ 表示，与每个控制回路信息丢失以后的损失 $m_{i,k}$ 成反比，即

$$t_{i,k} = \frac{\lambda}{m_{i,k}} \quad (1-44)$$

其中， λ 为一个给定常数。因此 $m_{i,k}$ 最大的控制回路，其计时器会首先到达 0，这时首先到 0 的控制回路会立即发送一个标志位，通知通信网络中的所有其他控制回路停止计时器计时并且退出。因此该控制回路可以在标志位之后开始无冲突的传输数据。数值仿真验证了该方法的有效性。

Zhao 等人研究了通过共享 IEEE 802.15.4 无线网络实现闭环控制的一类无线网络控制系统的调度与控制^[64]。文章考虑无线网络化控制系统中的传感器为电池供电，其能量消耗需要在系统设计中加以考虑，而 IEEE 802.15.4 中的竞争和非竞争两种信道接入方式中，竞争接入需要传感器一直对信道进行监听消耗过多传感器能量并且传输不完美，而非竞争信道不仅传输完美且不需要一直消耗传感器的能量持续监听信道。针对两种信道的特征与文章目标，文章第一步首先将所有数据使用非竞争信道传输，并且通过自触发和基于包的控制来减少不必要数据的发送，然后非竞争信道相对于竞争信道是更加珍贵的，所以文章中提出了三种改进方案，在使用非竞争信道传输的前一个时刻或者前两个时刻或者前一个时刻和前两个时刻使用竞争信道尝试发送数据，竞争信道如果发送成功则可以节省一次非竞争信道的使用，从而进一步节省信道资源。

上述文献中的信道调度策略没有与控制系统的实时性能和数据传输需求综合考虑，而注意到控制系统的性能和数据传输需求是可以提前预测的，因此本文将提出一个更加合适的策略，根据控制系统性能和数据传输需求动态选择合适的信道进行数据传输，控制系统性能在期望范围内，数据传输需求不大时，选择传输质量差但成本低的竞争信道，控制系统性能在期望范围之外，数据传输需求较大时，选择传输质量好但成本高的非竞争信道。在保证控制系统性能可靠的前提下节省 WNCSS 所用的通信网络资源，有效优化共享通信网络的资源分配和共享用户的性能提升。然而控制系统的性能如何动态并定量地评估，控制系统的传输需求如何预测并且定量地评估以及如何根据评估结果进行信道动态切换，这对于提高资源利用率具有重大的意义但是具有一定难度。

1.3 本文主要研究内容

本文针对通信网络为多用户共享的、通信网络中存在竞争和非竞争信道的无线网络化控制系统，如图 1-4 所示，设计一种合适的动态信道选择策略以及控制策略，使控制系统性能几乎不变的同时尽量节省宝贵的信道资源。其挑战在于在每个时刻如何动态选择信道以达到目的。

控制系统的传输需求其实是可以预测的，为了达到上述目的，一种较好的信道选择策略应该基于被控对象的传输需求，当被控对象急需传输新的状态计算最新的控制信号进行控制时，则应该使用宝贵的非竞争信道，而当被控对象的传输需求不大时，则应该使用竞争信道传输数据来节省信道资源，这是本文研究与其他研究的主要区别。本文提出了一种动态的基于估计器的信道选择策略。此策略主要由控制信号估计器、信道选择器以及对应的控制器组成，传感器端的控制信号估计器利用系统模型和收到的状态信息动态估计执行器端上一时刻实际使用的控制信号，帮助信道选择，信道选择器根据控制信号估计器估计出来的控制数据和当前收到的状态数据进行计算比较，确保最新的控制数据与执行器上一时刻使用的控制数据之间的误差始终在一定范围内，再设计状态反馈控制器更新控制增益发送至执行器端进行控制。本文通过理论证明和数值仿真说明了动态的基于估计器的信道选择策略能充分利用模型信息和系统的状态信息，预测被控对象的传输需求，动态选择对应的竞争或者非竞争信道传输数据，在保证控制系统性能可靠的同时尽量减少非竞争信道的使用次数。本文主要研究内容包括：

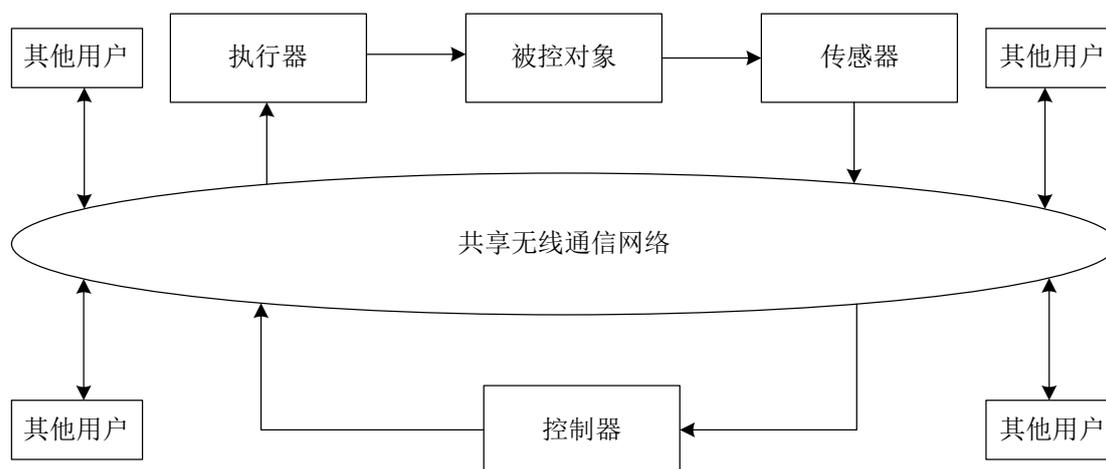


图 1-4 共享通信网络的无线网络化控制系统

Figure 1-4. Wireless networked control systems with shared communication network

第一章：绪论。首先介绍了对存在延时、丢包、有限的网络资源等通信约束的无线网络化控制系统的研究的重要意义。然后总结分析了现有的无线网络化控制系统研究以及基于信道调度的无线网络化控制系统的研究，发现现有的

无线通信网络的信道调度策略没有结合控制系统的实时性能和数据传输需求考虑。最后提出了本文的研究问题。

第二章：基于动态信道选择的无扰无线网络化控制系统设计与分析。针对无扰的无线网络化控制系统，其通信网络为多用户共享，且存在竞争信道和非竞争信道，设计了动态的基于估计器的信道选择策略。该策略评估控制系统的传输需求来动态选择数据传输的信道，在保证控制系统稳定的同时节省大量的网络资源，最后得到了控制系统渐近稳定的充分条件和控制器增益并且通过数值仿真验证了策略的有效性。

第三章：基于动态信道选择的有扰无线网络化控制系统设计与分析。针对有扰的无线网络化控制系统，其通信网络为多用户共享，且存在竞争信道和非竞争信道，设计了改进的基于估计器的信道选择策略，首先改进了控制信号估计器，确保在有扰情况下估计误差有界。然后，设计了状态控制器来维持系统稳定。最后，通过理论推导和数值仿真验证了所提算法的稳定性和有效性。

第四章：结论与展望。总结全文工作，分析工作的优势与不足，并展望未来可发展的方向。

第二章 基于动态信道选择的无扰无线网络化控制系统设计与分析

本章针对与其他用户共享通信网络的无扰无线网络化控制系统，设计了基于估计器的动态信道选择策略(Estimator Based Channel Selection, EBCS)，在保证无扰 WNCSSs 性能的同时节省了大量网络信道资源。无线通信网络中存在竞争信道与非竞争信道，并且可以通过协调器进行信道调度选择合适的信道进行数据传输，若能在保证控制系统性能几乎不变的前提下节省无线网络化控制系统所用的非竞争信道资源，将能有效优化共享通信网络的资源分配和共享用户的性能提升。针对这种情况，本章通过在传感器端比较执行器上一时刻实际使用的控制数据与当前控制数据之差设计信道选择器。特别的，当传感器与执行器无法直接通信时，即传感器端无法得知执行器上一时刻实际使用的控制数据，因此，本章设计了控制信号估计器，通过已知状态量测数据估计出未知的执行器实际使用数据，帮助进行信道选择。最后给出了闭环系统渐近稳定的充分条件并通过数值仿真验证了策略的有效性。

本章组织如下，2.1 节中详细描述了本章研究问题，2.2 节详细说明了 EBCS 策略，在 2.3 节中给出了闭环系统渐近稳定的充分条件以及信道切换参数和控制器的计算方法，第 2.4 节对所提方法做了数值仿真验证，最后在 2.5 节对本章做了小结。

2.1 问题描述

本章所考虑的 WNCSSs 总体结构如图 2-1 所示，图 2-1 中的无线通信网络与其他用户共享，传感器、控制器、执行器之间是时间同步的，传感器将测量的系统状态数据通过无线通信网络发送给控制器，控制器在收到数据包后计算控制增益并发送给执行器，执行器根据数据包的时间戳选择最新的数据包，并在执行时刻作用于被控对象。无线通信网络中包含竞争信道和非竞争信道，可以通过协调器进行信道调度，选择合适的信道进行数据传输。例如 IEEE 802.15.4 协议中的竞争接入时期(Contention Access Period, CAP)和非竞争接入时期(Contention Free Period, CFP)。

本章主要考虑无线通信网络引起的数据包丢失对系统造成的影响。这是由于无线通信下的网络化控制系统一般规模较小，延时在其中往往并不起决定性作用，又因控制系统高实时性的要求，通常超过一个采样周期未抵达的数据包

系统会主动丢弃。在这种情况下，通信网络引起的数据包丢失相较于延时对控制系统的性能影响更大。

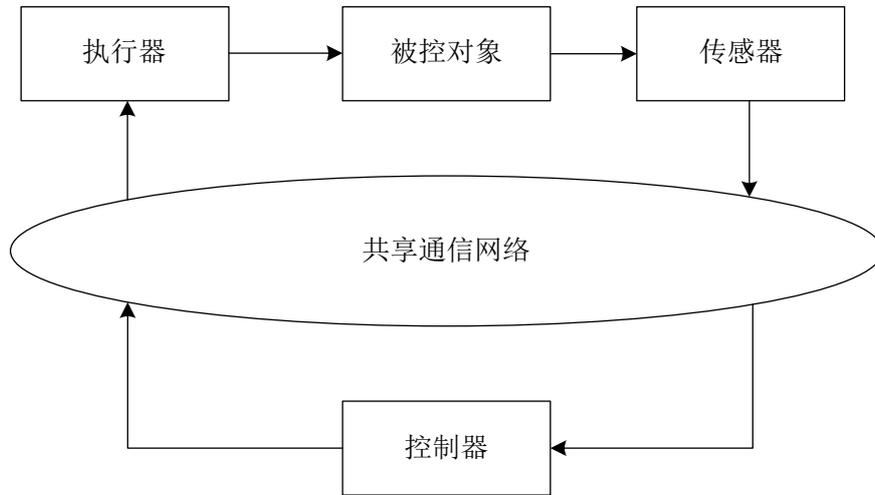


图 2-1 所研究的无线网络化控制系统

Figure 2-1. The framework of researched WNCSS

考虑如下线性离散系统的被控对象：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2-1)$$

其中， $x(k) \in R^n$ 是系统状态， $u(k) \in R^m$ 为系统的控制输入， $A \in R^{n \times n}$ 和 $B \in R^{n \times m}$ 分别为对应维度的常数系统矩阵。

当控制系统闭环回路使用非竞争信道传输数据时，可以认为数据完美传输无数据包丢失。使用竞争信道时，由于信道竞争和信道衰减等原因，闭环系统存在随机丢包。定义 $r(k)$ 表示闭环系统数据传输是否成功，即

$$r(k) = \begin{cases} 1 & x(k), u(k) \text{ 均传输成功} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2-2)$$

综上所述，本章要解决的问题可描述为：针对图 2-1 所示的 WNCSSs 和被控对象式(2-1)，在未知无线通信网络丢包特性的情况下，设计动态信道选择策略和控制器，使得控制系统在保证渐近稳定的前提下尽可能减少非竞争信道的使用次数，从而节省宝贵的信道资源。

本章的难点可归纳为如下两点：1) 如何预测以及定量描述控制系统的传输需求，并基于此需求设计合适的信道切换规则，在保证控制系统稳定的同时节省大量的非竞争信道资源。2) 当传感器与执行器无法直接通信时，即传感器无法得知执行器以往时刻的实际使用数据，如何设计控制信号估计器，帮助信道选择器约束执行器端所使用的控制信号的误差。

本章的创新点归纳如下：1) 本章注意到了无线通信网络中存在的竞争信道和非竞争信道，并设计了信道选择器，根据控制系统的性能和传输需求动态选择数据传输信道，在保证控制系统性能的同时尽量减少使用宝贵的非竞争信

道。2) 进一步, 本章考虑了当传感器无法得知执行器以往时刻的实际使用数据, 设计了控制信号估计器实时估计执行器上一时刻实际使用的控制数据, 帮助进行信道选择。

2.2 无扰 WNCSS 的信道选择策略设计

在本节中, 针对共享通信网络中存在竞争信道和非竞争信道的 WNCSS 设计了 EBCS 策略。该策略的主要思想如下: 1) 针对传感器与执行器无法直接通信, 即传感器端无法得知执行器上一时刻实际使用数据的问题, 设计控制信号估计器, 实时估计执行器上一个时刻实际使用的控制信号, 来帮助信道选择。2) 根据执行器上一时刻实际使用的控制信号和最新的控制信号设计信道切换规则, 动态约束闭环系统中执行器所使用控制信号的误差。3) 在所设计信道切换规则以及执行器端采用零阶保持(Zeros-Order Holder, ZOH)的情况下, 设计状态反馈控制器保证控制系统渐近稳定。根据上述思想, 设计了控制信号估计器、信道选择器和控制器三个部分, 控制框图如图 2-2 所示。接下来将分别对这三个部分做详细说明。

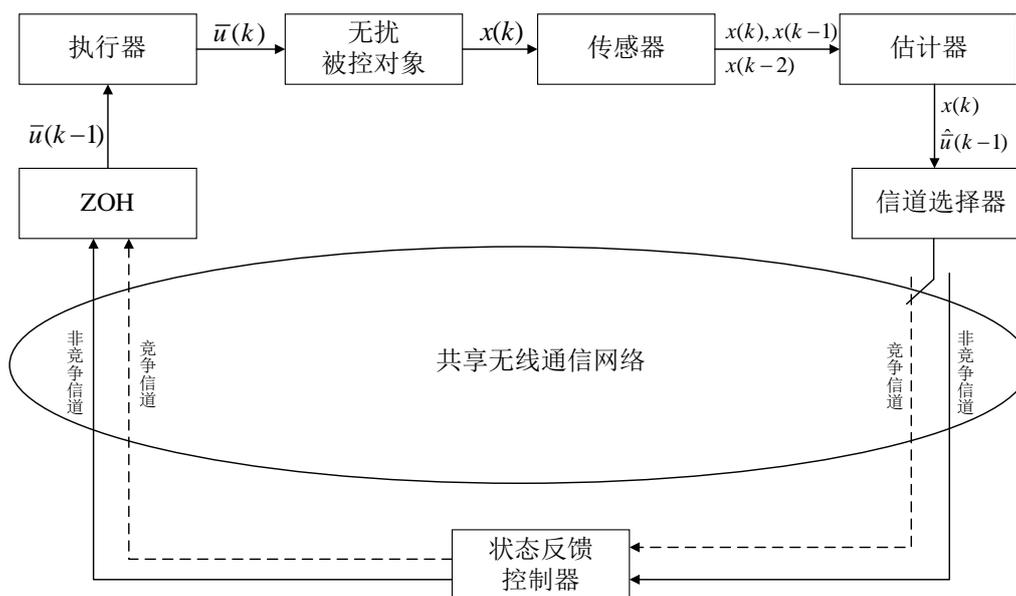


图 2-2 EBCS 策略流程图

Figure 2-2. The framework of EBCS strategy

2.2.1 控制信号估计器设计

首先定义 $\bar{u}(k)$ 为执行器在 k 时刻实际使用的控制信号。

传感器在 $k+1$ 时刻, 可以得到被控对象 $k+1$ 时刻以前的所有状态数据, 但由于无线网络传输数据过程中存在数据包的丢失, 传感器无法得到控制器

实际使用的控制信号。为了解决这一问题，本章首先在传感器端设计控制信号估计器来实时估计 $\bar{u}(k)$ ，由于引入了 $\bar{u}(k)$ ，式(2-1)被重写为：

$$x(k+1) = Ax(k) + B\bar{u}(k) \quad (2-3)$$

进行简单的代数运算可以得到：

$$B\bar{u}(k) = x(k+1) - Ax(k) \quad (2-4)$$

进一步可以得到：

$$B\bar{u}(k) = x(k+1) - A^2x(k-1) - AB\bar{u}(k-1) \quad (2-5)$$

为了得到 $\bar{u}(k)$ 的表达式，设计矩阵 G 使得 GB 非奇异，式(2-5)左右两边同时乘以 G 有

$$GB\bar{u}(k) = Gx(k+1) - GA^2x(k-1) - GAB\bar{u}(k-1) \quad (2-6)$$

同时乘以 $(GB)^{-1}$ 可以得到：

$$\bar{u}(k) = -(GB)^{-1}GAB\bar{u}(k-1) + (GB)^{-1}Gx(k+1) - (GB)^{-1}GA^2x(k-1) \quad (2-7)$$

定义 $\tilde{A} = -(GB)^{-1}GAB$ ， $\tilde{B} = (GB)^{-1}G$ ， $\eta(k-1) = x(k+1) - A^2x(k-1)$ 可得：

$$\bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \quad (2-8)$$

定义 $\tilde{y}(k) = x(k+1) - Ax(k)$ ， $\tilde{C} = B$ ，结合式(2-3)和式(2-8)可以得到：

$$\begin{cases} \bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \\ \tilde{y}(k) = \tilde{C}\bar{u}(k) \end{cases} \quad (2-9)$$

对式(2-9)构建估计器如下：

$$\hat{u}(k) = \tilde{A}\hat{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) + L(\tilde{y}(k) - \tilde{C}\hat{u}(k-1)) \quad (2-10)$$

其中。 $\hat{u}(k)$ 为 $\bar{u}(k)$ 的估计值， $L \in R^{m \times n}$ 为估计器增益，且满足 $\tilde{A} - L\tilde{C}$ 赫尔维兹稳定。

定义估计误差 $\hat{e}(k) = \hat{u}(k) - \bar{u}(k)$ ，根据所设计的估计器计算其估计误差如下：

$$\hat{e}(k) = (\tilde{A} - L\tilde{C})(\hat{u}(k-1) - \bar{u}(k-1)) = (\tilde{A} - L\tilde{C})^k (\hat{u}(0) - \bar{u}(0)) \quad (2-11)$$

因为 $\tilde{A} - L\tilde{C}$ 赫尔维兹稳定，所以当 $k \rightarrow \infty$ ， $\hat{u}(k) \rightarrow \bar{u}(k)$ 。

注 2-1： 本节所设计的控制信号估计器主要是为了解决在传感器一侧的信道选择器无法获取到执行器上一时刻实际使用控制信号的问题。导致该种情况的原因主要有两点：其一，并不是所有执行器都具有发送数据的能力，比如水箱的阀门，这种情况下，同在被控对象一侧的传感器和执行器之间无法通信；其二，执行器具有发送数据的能力时，传感器和执行器之间可以实现通信，主要有有线和无线两种通信方式，有线传输会增加一定的成本，并且实施难度依赖被控对象所处的环境，而无线传输可能会出现数据包的丢失，因此传感器端的信道选择器无法保证能一直获取到执行器实际收到的控制信号。

2.2.2 信道选择器设计

注意到，控制系统不同时刻对于数据传输的需求并不是相同的。当控制系统性能较差时，控制系统急需新的控制数据来防止系统性能进一步恶化。因此，反馈信道和前向信道同时选择非竞争信道以加快数据的传输，及时稳定控制系统。而当控制系统性能在可接受的范围时，系统对数据传输的需求相对较低。因此，反馈信道和前向信道同时选择竞争信道以节省更多的通信资源。本章在传感器和控制器之间设计一个信道选择器，如图 2-2 所示，来评估控制系统对数据传输的急迫性，从而实时选择数据传输信道。

首先定义

$$\theta(k) = \begin{cases} 1 & \text{闭环系统使用竞争信道} \\ 0 & \text{闭环系统使用非竞争信道} \end{cases} \quad (2-12)$$

在信道选择器端构建如下切换规则：

$$\begin{cases} e_s^T(k)\Phi e_s(k) < \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) & \theta(k) = 1 \\ e_s^T(k)\Phi e_s(k) \geq \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) & \theta(k) = 0 \end{cases} \quad (2-13)$$

其中， $e_s(k) = u(k) - \hat{u}(k-1)$ 为传感器约束误差， $\Phi = B^T P B$ ， P ， Ω 为待求的参数将在 2.3 节中做详细说明。

注 2-2：虽然一般情况下，估计误差是未知的，但是对于初值已知的情况下，即 $\hat{e}(0)$ 上界已知，估计误差也能够通过 $(\tilde{A} - L\tilde{C})^k \hat{e}(0)$ 来表示和计算。而信道选择器能使用 $u(k)$ 计算信道切换的判断规则，这是由于所提方法采用状态反馈控制器，其反馈增益矩阵 K 是提前求解出来的，因此在信道选择器端可以通过已知的状态计算得到所对应的 $u(k)$ 。

引理 2-1：对于任意的正定矩阵 P 和矩阵 E ， F ，存在如下不等式关系：

$$E^T P F + F^T P E \leq E^T P E + F^T P F \quad (2-14)$$

引理 2-2(舒尔补)：对于给定的对称矩阵， $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix} \in R^{m \times n}$ ，下列条件

等价：

- (1) $S < 0$ ；
- (2) $S_{11} < 0$ ， $S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ ；
- (3) $S_{22} < 0$ ， $S_{11} - S_{12}^T S_{22}^{-1} S_{12} < 0$ 。

引理 2-3：定义 $e(k) = u(k) - \bar{u}(k)$ ，根据式(2-13)构建的信道切换规则，可以得到：

$$e^T(k)\Phi e(k) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (2-15)$$

证明：根据式(2-13)，当闭环系统采用竞争信道传输数据时有：

$$e_s^T(k)\Phi e_s(k) < \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi \hat{e}(k-1) \quad (2-16)$$

通过简单的代数运算可得：

$$2e_s^T(k)\Phi e_s(k) + 2\hat{e}^T(k-1)\Phi \hat{e}(k-1) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (2-17)$$

通过引理 2-1 可得：

$$\hat{e}^T(k-1)\Phi e_s(k) + e_s^T(k)\Phi \hat{e}(k-1) < e_s^T(k)\Phi e_s(k) + \hat{e}^T(k-1)\Phi \hat{e}(k-1) \quad (2-18)$$

因此，联立式(2-17)和式(2-18)可以得到

$$(e_s(k) + \hat{e}(k-1))^T \Phi (e_s(k) + \hat{e}(k-1)) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (2-19)$$

而 $e_s(k) + \hat{e}(k-1) = u(k) - \bar{u}(k-1)$ ，由于执行器端采用零阶保持，所以有下式成立

$$e^T(k)\Phi \bar{e}(k) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (2-20)$$

综上，所以引理 2-3 成立，证毕。

注 2-3： 本节所设计的信道选择器通过在传感器端构建式(2-13)的信道切换规则，动态约束执行器端实际使用的控制信号误差始终在一个阈值之下。当满足 $e_s^T(k)\Phi e_s(k) < \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi \hat{e}(k-1)$ 时，采用竞争信道传输数据。

反之，采用非竞争信道传输数据。

2.2.3 控制器设计

闭环系统选择竞争信道传输数据时会出现随机丢包，在这种情况下执行器可能无法接收到当前时刻的控制数据。在大多数无线网络化系统的研究中，当执行器未接收到最新的数据包时，主要采取零输入或者零阶保持的方法。本章假设执行器端在未接收到数据包的时刻选择零阶保持。

设计如下状态反馈控制器 K 对系统进行控制：

$$u(k) = Kx(k) \quad (2-21)$$

执行器使用 ZOH 以后，执行器实际使用得控制数据 $\bar{u}(k)$ 为：

$$\bar{u}(k) = r(k)u(k) + (1-r(k))\bar{u}(k-1) \quad (2-22)$$

因此闭环系统可以写为：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\bar{u}(k) \\ &= Ax(k) + B\bar{u}(k) - Bu(k) + Bu(k) \\ &= (A+BK)x(k) - Be(k) \end{aligned} \quad (2-23)$$

2.3 控制系统稳定性分析和控制器求解

在接下来的系统分析中，需要用到以下定义。

定义 2-1: 若对于离散控制系统(2-1), 如果存在一个正定标量函数 $V(x(k))$, 其满足 $\Delta V(x(k)) = V(x(k+1)) - V(x(k)) < 0$, 则控制系统(2-1)的轨迹是渐近稳定的。

接下来将得到信道选择器根据式(2-13)的规则切换数据传输信道的情况下, 闭环系统(2-23)渐近稳定的充分条件。

定理 2-1: 若存在正定矩阵 P , Ω 和反馈控制增益 K , 在信道切换规则式(2-13)的约束下, 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}P^{-1} & 0 & A+BK \\ * & -\frac{1}{2}\Omega^{-1} & I \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (2-24)$$

则闭环系统(2-23)渐近稳定。

证明: 定义李雅普诺夫函数如下:

$$\begin{aligned} V(x(k)) &= x^T(k)Px(k) \\ \Delta V(x(k)) &= V(x(k+1)) - V(x(k)) \end{aligned} \quad (2-25)$$

其中, P 为正定对称矩阵, 将(2-23)的系统方程代入计算可得:

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &= V(x(k+1)) - V(x(k)) \\ &= x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)Px(k) \\ &= ((A+BK)x(k) - Be(k))^T P((A+BK)x(k) - Be(k)) \\ &\quad - x^T(k)Px(k) \\ &= x^T(k)((A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) \\ &\quad - e^T(k)B^T P(A+BK)x(k) + e^T(k)B^T PBe(k) \\ &\quad - x^T(k)(A+BK)^T PBe(k) \end{aligned} \quad (2-26)$$

通过引理 2-1 有以下不等式成立:

$$\begin{aligned} &-x^T(k)(A+BK)^T PBe(k) - e^T(k)B^T P(A+BK)x(k) \\ &\leq x^T(k)(A+BK)^T P(A+BK)x(k) + e^T(k)B^T PBe(k) \end{aligned} \quad (2-27)$$

将式(2-27)代入到式(2-26)可得:

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &\leq x^T(k)(2(A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) + 2e^T(k)B^T PBe(k) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (2-28)$$

通过信道切换规则的约束, 可以将上式重写为:

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &\leq x^T(k)(2(A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) \\ &\quad + 2x^T(k)\Omega x(k) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (2-29)$$

通过舒尔补引理可以得到式(2-24), 定理 2-1 得证。

定理 2-2: 若存在正定矩阵 X ， $\tilde{\Omega}$ 和矩阵 Y ，在式(2-13)的信道切换规则约束下，使得以下不等式成立：

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}X & 0 & AX + BY \\ * & -\frac{1}{2}\tilde{\Omega} & X \\ * & * & -X \end{pmatrix} < 0 \quad (2-30)$$

则闭环系统(2-23)渐近稳定。其中， $X = P^{-1}$ ， $\tilde{\Omega} = \Omega^{-1}$ ， $Y = KX$ 。控制器增益设计为：

$$K = YX^{-1} \quad (2-31)$$

证明： 根据定理 2-1 可知闭环系统渐近稳定的充分条件为：

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}P^{-1} & 0 & A + BK \\ * & -\frac{1}{2}\Omega^{-1} & I \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (2-32)$$

将上式分别左乘和右乘对角矩阵 $\begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ * & I & 0 \\ * & * & P^{-1} \end{pmatrix}$ 可以得到定理 2-2。

将 EBCS 策略总结为如下算法：

算法 2-1: EBCS 策略

- 1 通过定理 2-2 求解矩阵 P ， Ω ， K 。
 - 2 设计估计器的增益 L ，构建估计器。
 - 3 初始化系统状态 $x(0)$ ，估计器初值 $\hat{u}(0)$ 。
 - 4 在 0，1 时刻采用非竞争信道传输数据。
 - 5 通过式(2-10)估计器得到 $\hat{u}(k-1)$ 。
 - 6 通过式(2-21)得到 $u(k)$ ，从而计算出 $e_s(k)$ 。
 - 7 通过式(2-11)计算得到 $\hat{e}(k-1)$ 。
 - 8 信道选择器根据式(2-13)的切换规则来选择合适的信道进行数据传输。
 - 9 重复步骤 5，6，7，8。
-

注 2-4: 注意到，所提算法在初始 0，1 时刻需要采用非竞争信道传输，这是由于设计的控制信号估计器使用了 $k-2$ 时刻的系统状态数据，为了不失一般性，所以本算法在初始时刻选用非竞争信道传输保证数据的准确性。

注 2-5: 由于共享无线通信网络组网的复杂性、传输的不可靠性等原因，难以对通信网络的丢包特性进行精确建模。本章所提方法并未对丢包特性进行假设，而是通过采用竞争和非竞争信道切换的方式来保证控制系统稳定。

2.4 数值仿真

在本节将利用数值仿真的例子来验证所提 EBCS 策略的有效性。为了验证本章所提 EBCS 策略在竞争信道为任意丢包率下都能保证控制系统稳定以及在保证控制系统稳定的同时非竞争信道的使用次数较少，将本章所提 EBCS 策略与 LQR 控制和文献[64]策略进行对比。

考虑一个四阶倒立摆模型^[65]

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

其中，系统矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.0991 & 0.0136 & 0.0004 \\ 0 & 0.9818 & 0.2789 & 0.0136 \\ 0 & -0.0023 & 1.1598 & 0.1053 \\ 0 & -0.0474 & 3.2764 & 1.1598 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.0091 \\ 0.1822 \\ 0.0232 \\ 0.4743 \end{bmatrix}。$$

系统的初始状态 $x(0) = [0.98 \quad 0 \quad 0.2 \quad 0]^T$ 。根据定理 2-2 可以求解出：

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.0162 & 0.0004 & -0.0000 & 0.0002 \\ 0.0004 & 0.0121 & -0.0011 & -0.0013 \\ -0.0000 & -0.0011 & 0.0155 & 0.0019 \\ 0.0002 & -0.0013 & 0.0019 & 0.0055 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 206.01 & 68.75 & -156.19 & -30.38 \\ 68.75 & 25.02 & -56.49 & -11.17 \\ -156.19 & -56.49 & 129.72 & 25.36 \\ -30.38 & -11.17 & 25.36 & 5.02 \end{bmatrix}$$

$$K = [43.9715 \quad 21.1309 \quad -63.8711 \quad -12.5582]$$

给定矩阵 $G = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4]$ 使得 GB 可逆。设计估计器的增益为 $L = [-0.0258 \quad -0.5170 \quad -0.0658 \quad -1.3460]$ 。再根据式(2-10)构建估计器来实时估计执行器端使用的控制信号。

当闭环系统使用竞争信道传输数据下的丢包率为 0.2 时，仿真结果如图 2-3 到图 2-6 所示。图 2-3 和图 2-4 为系统在当前网络环境下，采用 LQR、文献[64]所提策略和本章所提 EBCS 策略的系统状态轨迹对比图。可以看出，三种策略都能保证系统稳定，但 LQR 控制下的系统状态存在较大抖动。图 2-5 给出了控制信号估计器的估计效果。由图可知，所采用的估计器能够渐近收敛到执行器

真实使用的控制信号。图 2-6 为所提 EBCS 策略每个时刻信道的使用情况。通过图 2-6 可知，本章所提 EBCS 策略在保证控制系统性能可靠的前提下，通过利用竞争信道一定程度上缓解了非竞争信道的压力，提高了信道资源利用率。

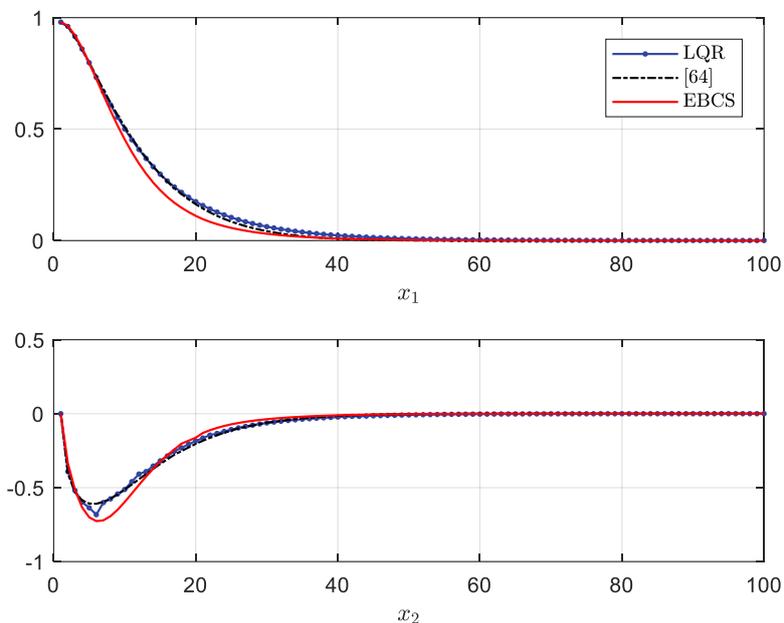


图 2-3 x_1 和 x_2 轨迹图

Figure 2-3. The trajectory of x_1 and x_2

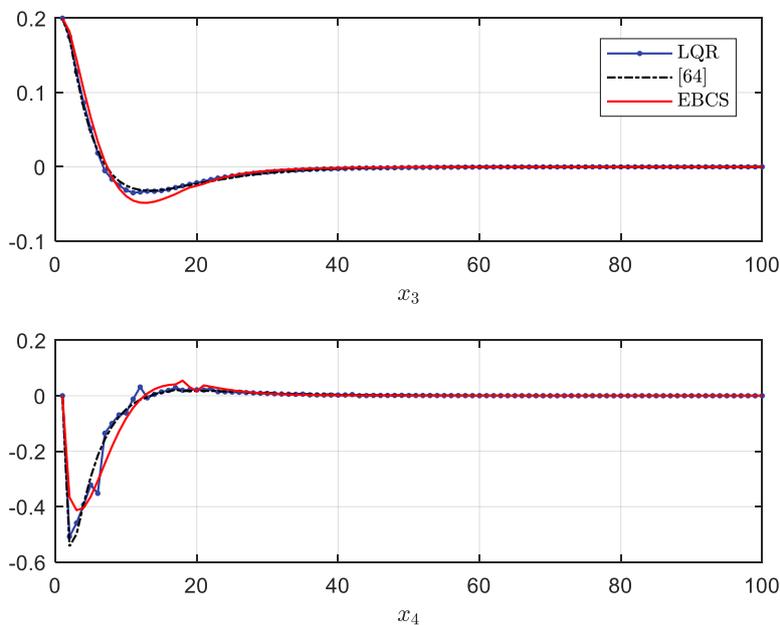


图 2-4 x_3 和 x_4 轨迹图

Figure 2-4. The trajectory of x_3 and x_4

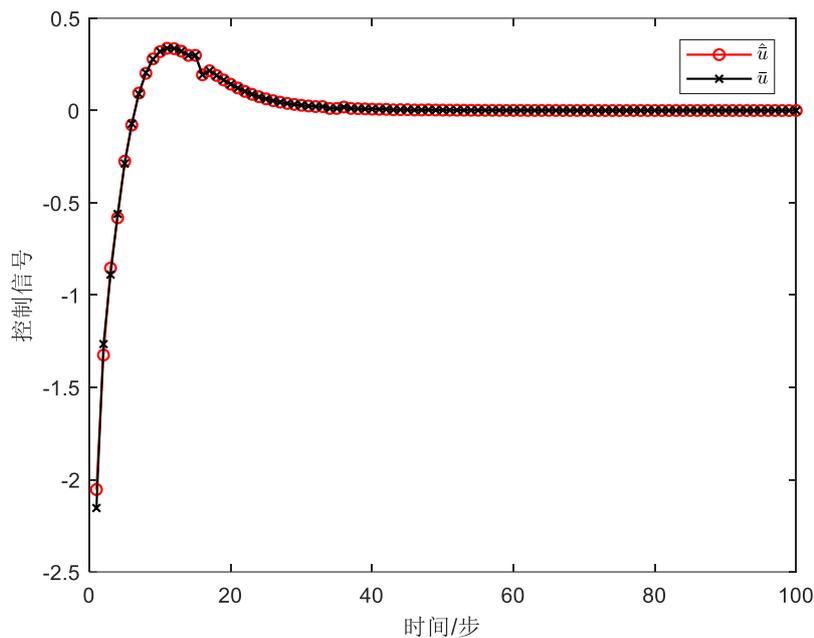


图 2-5 控制信号估计器的估计效果

Figure 2-5. The estimation result of the control signal estimator

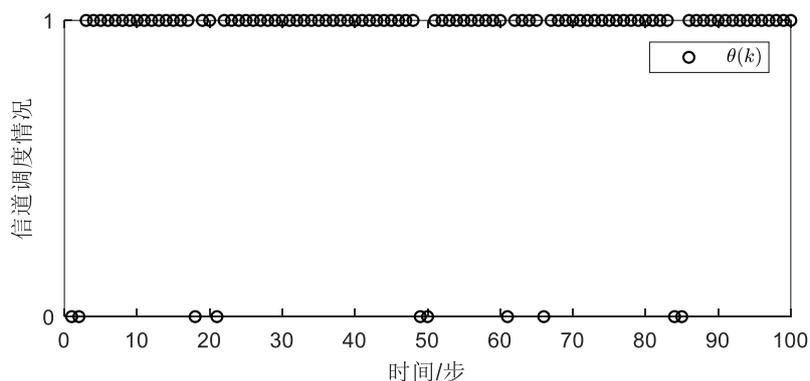


图 2-6 EBCS 策略下的信道调度情况

Figure 2-6. Channel scheduling result of EBCS strategy

当闭环系统使用竞争信道传输数据下的丢包率为 0.4 时，仿真结果如图 2-7 到图 2-9 所示。图 2-7 和图 2-8 为系统在当前网络环境下，LQR、文献[64]所提策略和本章所提 EBCS 策略的系统状态轨迹图。可以看出，在当前丢包率下，LQR 已经无法保证系统稳定，而本章所提 EBCS 策略和文献[64]策略都能保证系统渐近稳定。图 2-9 为丢包率为 0.4 时，本章所提 EBCS 策略每个时刻信道的使用情况。从图 2-7 和图 2-9 可知，本章所提 EBCS 策略在竞争信道丢包率较大时，仍然能在保证控制系统性能的前提下，通过使用竞争信道一定程度上减少非竞争信道的使用次数。

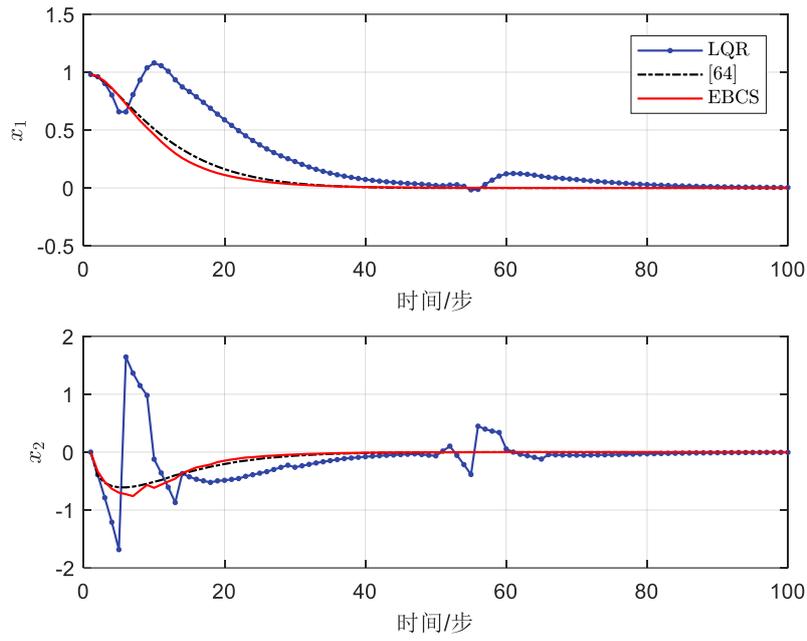


图 2-7 x_1 和 x_2 轨迹图

Figure 2-7. The trajectory of x_1 and x_2

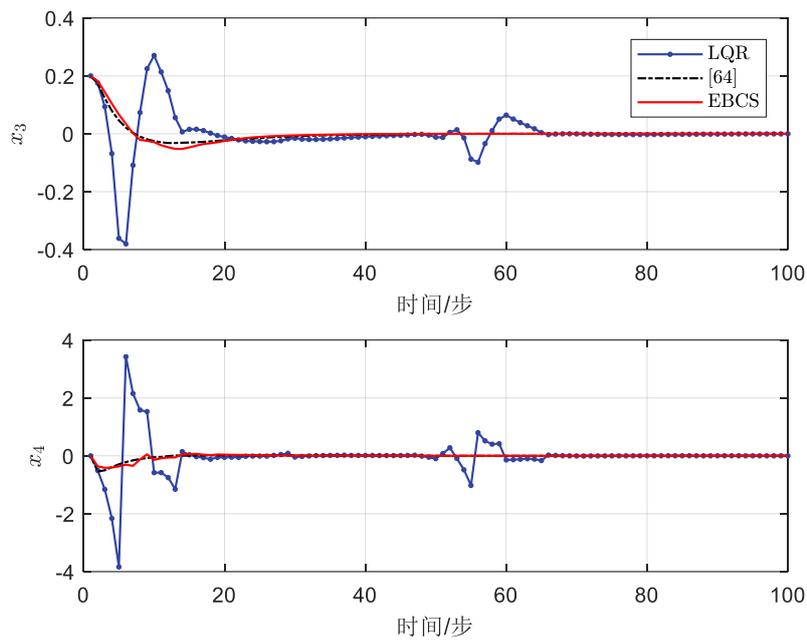


图 2-8 x_3 和 x_4 轨迹图

Figure 2-8. The trajectory of x_3 and x_4

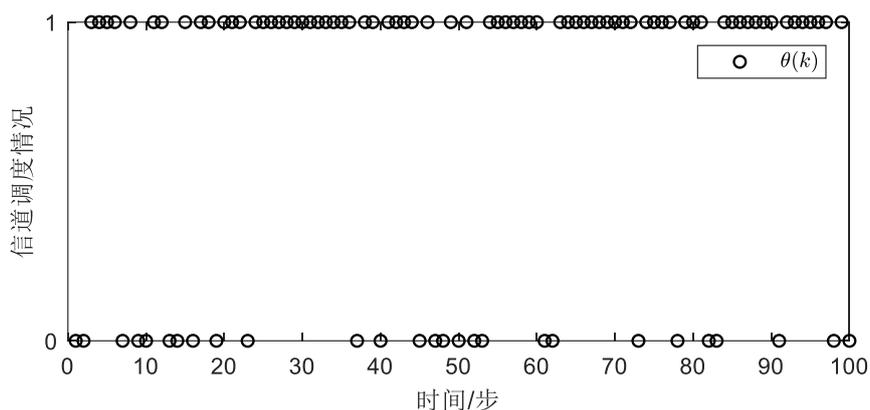


图 2-9 EBCS 策略下的信道调度情况

Figure 2-9. Channel scheduling result of EBCS strategy

由于本章所提 EBCS 策略和文献[64]策略在控制系统性能上表现较为接近，我们将进一步比较 EBCS 策略和文献[64]策略的信道资源利用率。本章在竞争信道闭环丢包率为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 时，分别运行 100 次，仿真步数为 100 步，得到非竞争信道使用次数的平均值，并总结为表 2-1。

表 2-1 无扰 WNCSS 中非竞争信道使用次数对比

Table 2-1. Comparison of non-contention channel usage times of undisturbed WNCSSs

非竞争信道使用次数	丢包率为0.2	丢包率为0.4	丢包率为0.6	丢包率为0.8
EBCS策略	13.33	27.09	37.36	45.88
文献[64]策略	36.65	44.08	51.57	57.06

观察表 2-1 可以发现，随着丢包率的增加，两种策略下的非竞争信道使用次数都在逐渐上升，但本章所提 EBCS 策略在每个丢包率下的非竞争信道使用次数平均值都低于文献[64]策略。由此可见，本章所提 EBCS 策略能在维持控制系统性能的同时节省了更多的网络信道资源。另外，文献[64]策略仅考虑反馈信道的信道调度问题，前向通道仍使用非竞争信道，而本章所提 EBCS 策略同时考虑了反馈信道和前向信道的信道调度。因此，本章所提 EBCS 策略能节省更多的通信资源并具有更广泛的应用价值。

2.5 本章小结

本章针对多用户共享的通信网络，并且网络中存在竞争信道和非竞争信道的无线网络化控制系统设计了基于估计器的信道选择策略。该策略包含控制信号估计器、信道选择器和控制器三部分，控制信号估计器通过已知数据实时估计执行器上一时刻实际使用的控制信号，信道选择器根据控制信号估计值和当

前状态进行信道选择，通过理论证明和仿真说明了所提策略在保证控制系统稳定性的同时，通过充分利用网络中存在的竞争信道来尽可能地节省珍贵的非竞争信道资源。基于估计器的信道选择策略能广泛应用于通过动态信道的选择来平衡控制系统性能和网络资源以及网络丢包特性无法建模的无线网络化控制系统中。在未来的工作中将进一步考虑系统状态方程存在不确定的情况，以更贴近工程实际情况。

第三章 基于动态信道选择的有扰无线网络化控制系统设计与分析

第二章针对无扰 WNCSSs, 提出了一种基于估计器的动态信道选择策略。然而, 在实际生活中, 扰动往往是无法避免的。例如: 在火车运行过程中, 会产生来自于轨道、空气和风力的随机扰动, 这种不确定扰动会一直影响火车运行的速度, 如果不考虑这些因素将会影响铁路局对火车行驶速度和行驶时间的判断。在水面无人艇的编队控制中, 会遭受到来自于洋流和风浪的外界扰动, 给无人艇的稳定编队控制带来了巨大的挑战。因此, 考虑带扰动的无线网络化控制系统的网络信道资源调度和稳定性控制更加具有实际价值。本章在第二章的基础上, 针对与其他用户共享通信网络, 并且网络中存在竞争和非竞争信道的有扰 WNCSSs, 提出了一种改进的基于估计器的信道选择 (Improved Estimator Based Channel Selection, IEBCS) 策略, 在保证有扰 WNCSSs 性能的同时节省了大量网络信道资源。所提 IEBCS 策略中的控制信号估计器的实现引入了有界递归的思想, 保证了有界扰动下控制信号估计误差有界。在此基础上, 给出了保证闭环系统最终一致有界稳定的充分条件并通过数值仿真验证了所提策略的有效性。

本章组织如下, 3.1 节中对关注的问题做了详细描述, 3.2 节详细说明了 IEBCS 策略, 在 3.3 节对估计器进行求解, 以估计有扰情况下系统的执行器上一时刻实际使用的控制信号, 在 3.4 节中分析了闭环系统的稳定性以及控制器求解, 在 3.5 节中通过数值仿真验证了 IEBCS 策略的有效性, 最后在 3.6 节中进行小结。

3.1 问题描述

本章所研究的 WNCSSs 总体结构与第二章的图 2-1 大体相同, 不同的是本章进一步考虑了被控对象存在未知扰动的情况。在这种情况下, 信道竞争、丢包和未知扰动共同影响控制系统性能。其中被控对象用如下有扰的线性离散系统描述:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ew(k) \quad (3-1)$$

其中, $x(k) \in R^n$, $u(k) \in R^m$ 分别为系统状态和控制输入, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $E \in R^{n \times q}$ 为对应维度的常数系统矩阵。扰动向量 $w(k) \in R^q$ 满足有界性, 即

$$\|w(k)\| = \sqrt{w(k)^T w(k)} \leq \sigma_w \quad (3-2)$$

本章依旧考虑无线网络引起的数据包丢失对系统造成的影响。当控制系统闭环回路使用非竞争信道传输数据时，可以认为数据完美传输，无数据包丢失。而使用竞争信道时，由于信道竞争和信道衰减等原因，闭环系统存在随机丢包。定义 $r(k)$ 表示闭环系统数据传输是否成功，即

$$r(k) = \begin{cases} 1 & x(k), u(k) \text{ 均传输成功} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-3)$$

综上所述，本章要解决的问题可描述为：针对有扰 WNCSS 在未知无线网络丢包特性的情况下，设计信道选择策略和控制器，使得控制系统在保证最终一致有界稳定的前提下尽可能减少非竞争信道的使用次数，从而节省宝贵的信道资源。

本章的难点可归纳为如下两点：1) 对于有扰被控对象，如何设计控制信号估计器和信道选择器来约束执行器端所使用的控制信号的误差。2) 如何在信道选择器的约束下设计控制器使得控制系统最终一致有界稳定。

本章的创新点归纳如下：1) 针对存在未知扰动的 WNCSSs，在第二章的基础上，设计了改进的基于估计器的信道选择策略，在保证有扰无线网络化控制系统性能的同时节省了大量的非竞争信道资源。2) 在所设计的信道选择器的约束下，设计控制器使得系统最终一致有界稳定。

3.2 有扰 WNCSSs 的信道选择策略设计

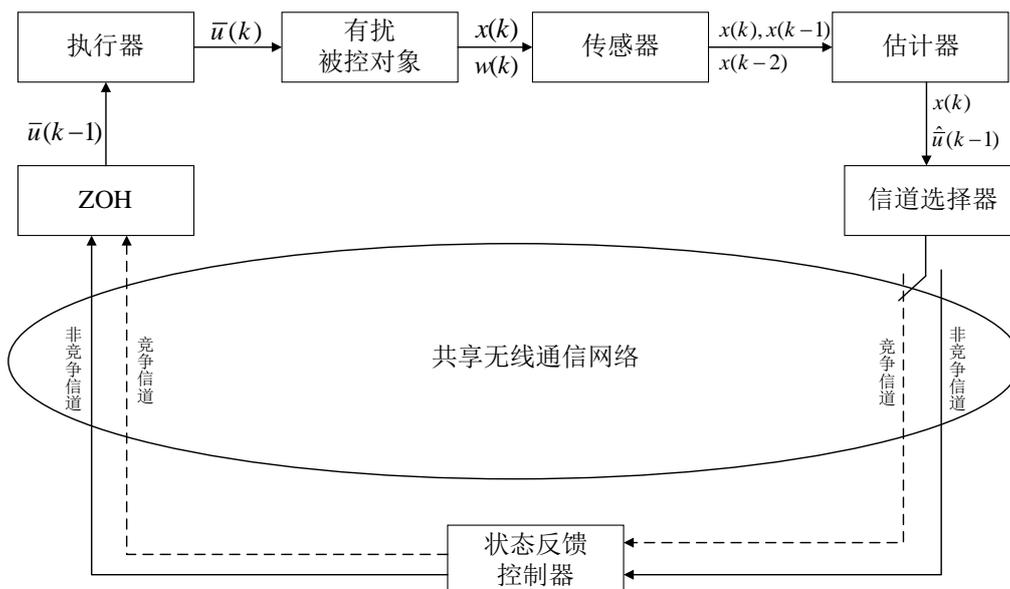


图 3-1 IEBCS 策略流程图

Figure 3-1. The framework of IEBCS strategy

在本节中，针对共享通信网络中存在竞争信道和非竞争信道的有扰 WNCSs 设计了 IEBCS 策略。该策略的主要思想如下：1) 由于网络的存在，传感器无法确定执行器实际使用的控制数据，为了应对这一问题，引入有界递归的思想，设计控制信号估计器实时估计执行器上一个时刻使用的控制数据，帮助信道选择。2) 跟第二章思想一样，设计合适的信道切换规则，动态约束闭环系统的数据如果完美传输执行器本应收到的控制信号与上一个时刻执行器实际使用的控制信号之间的误差。3) 在所设计信道切换规则以及执行器端采用零阶保持的情况下，设计了状态反馈控制器来保证控制系统的最终一致有界稳定。根据上述思想，设计了控制信号估计器、信道选择器、和控制器三个部分，控制框图如图 3-1 所示。接下来将对这三个部分做详细说明。

3.2.1 控制信号估计器设计

首先定义 $\bar{u}(k)$ 为执行器在 k 时刻实际使用的控制信号， $\hat{u}(k)$ 为控制信号估计器估计值， $\hat{e}(k) = \hat{u}(k) - \bar{u}(k)$ 为估计误差， $e(k) = u(k) - \bar{u}(k)$ 为控制器生成的控制信号和执行器使用的控制信号之差。

传感器在 $k+1$ 时刻，可以得到被控对象 $k+1$ 时刻以前的所有状态数据。但由于信号通过无线网络传输时可能发生数据包的丢失，导致传感器端无法得知执行器在 k 时刻实际使用的控制信号 $\bar{u}(k)$ 。为了解决这一问题，在传感器端设计控制信号估计器来实时估计 $\bar{u}(k)$ 。与第二章不同的是，本章所研究的被控对象存在有界扰动，借鉴常见的龙伯格观测器无法设计控制信号估计器。因此，本章引入有界递归的思想设计估计器，所提估计器能保证有界扰动下控制信号估计误差有界^[66]。由于引入了 $\bar{u}(k)$ ，式(3-1)重写为：

$$x(k+1) = Ax(k) + B\bar{u}(k) + Ew(k) \quad (3-4)$$

通过简单的代数运算之后可以得到：

$$B\bar{u}(k) = x(k+1) - Ax(k) - Ew(k) \quad (3-5)$$

而由系统模型可知 $x(k) = Ax(k-1) + B\bar{u}(k-1) + Ew(k-1)$ ，由此系统进一步转化为如下形式：

$$B\bar{u}(k) = x(k+1) - A^2x(k-1) - AB\bar{u}(k-1) - AEw(k-1) - Ew(k) \quad (3-6)$$

为了得到 $\bar{u}(k)$ 的表达式，设计矩阵 $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ，使得 CB 为非奇异矩阵。对式(3-6)左右两边同时乘以矩阵 C 有：

$$CB\bar{u}(k) = Cx(k+1) - CA^2x(k-1) - CAB\bar{u}(k-1) - CAEw(k-1) - CEw(k) \quad (3-7)$$

由于 CB 为非奇异矩阵，因此对式(3-7)两边同时乘以 $(CB)^{-1}$ 可得：

$$\begin{aligned} \bar{u}(k) = & (CB)^{-1}Cx(k+1) - (CB)^{-1}CA^2x(k-1) - (CB)^{-1}CAB\bar{u}(k-1) \\ & - (CB)^{-1}CAEw(k-1) - (CB)^{-1}CEw(k) \end{aligned} \quad (3-8)$$

定义

$$\begin{cases} \tilde{A} = -(CB)^{-1}CAB \\ \tilde{B} = (CB)^{-1}C \\ \eta(k-1) = x(k+1) - A^2x(k-1) \\ v(k-1) = AEw(k-1) + Ew(k) \end{cases} \quad (3-9)$$

可将式(3-8)简化为下式:

$$\bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) - \tilde{B}v(k-1) \quad (3-10)$$

定义 $\tilde{y}(k) = x(k+1) - Ax(k)$, $\tilde{C} = B$, 由式(3-4)可得:

$$\tilde{y}(k) = \tilde{C}\bar{u}(k) + Ew(k) \quad (3-11)$$

联立式(3-10)和式(3-11)可得如下形式:

$$\begin{cases} \bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) - \tilde{B}v(k-1) \\ \tilde{y}(k) = \tilde{C}\bar{u}(k) + Ew(k) \end{cases} \quad (3-12)$$

然后, 对式(3-12)设计如下估计器:

$$\hat{\bar{u}}(k) = \tilde{A}\hat{\bar{u}}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) + K_L(\tilde{y}(k) - \tilde{C}\hat{\bar{u}}(k-1) - \tilde{C}\tilde{B}\eta(k-1)) \quad (3-13)$$

其中, K_L 为估计器增益, 其求解方法将由定理 3-3 给出, 设计出来的控制信号估计器可以保证估计误差 $\hat{e}(k)$ 有界, 具体证明见 3.3 节估计器求解。

3.2.2 控制器设计

扰动系统下常见的控制方法有离散滑模控制、状态反馈控制等。和第二章相似, 假设控制信号或量测信号在网络传输中丢失时, 执行器端采用零阶保持的方法, 即

$$\bar{u}(k) = \begin{cases} u(k) & \text{执行器成功接收最新控制数据} \\ \bar{u}(k-1) & \text{执行器未接收到最新控制数据} \end{cases} \quad (3-14)$$

由于离散滑模控制的控制信号具有抖震的特点, 在这种情况下并不适用。因此, 本章采用如下状态反馈控制:

$$u(k) = Kx(k) \quad (3-15)$$

首先对系统模型做如下转换:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\bar{u}(k) + Ew(k) \\ &= Ax(k) + Bu(k) - Bu(k) + B\bar{u}(k) + Ew(k) \\ &= (A + BK)x(k) - Be(k) + Ew(k) \end{aligned} \quad (3-16)$$

当系统满足如下假设时:

$$\begin{aligned} \|w(k)\| &< \sigma_w \\ \|e(k)\| &< \sigma_e \end{aligned} \quad (3-17)$$

其中, σ_w , σ_e 为已知常数。可以设计状态反馈控制率 K 维持系统最终一致有界稳定。值得注意的是, 对于假设 $\|w(k)\| < \sigma_w$, 由于扰动有界式(3-2)可以得

到，而 $e(k)$ 为控制器生成的控制信号和执行器实际使用的控制信号之差， $\|e(k)\| < \sigma_e$ 需要通过信道切换规则来保证。

3.2.3 信道选择器设计

控制系统不同时刻对于数据传输的需求并不是相同的。当控制系统性能较差时，控制系统急需新的控制数据来防止系统性能进一步恶化。因此，反馈信道和前向信道同时选择非竞争信道以加快数据的传输。而当控制系统性能在可接受的范围时，系统对数据传输的需求相对较低。因此，反馈信道和前向信道同时选择竞争信道以节省更多的通信资源。本章在传感器和控制器之间设计一个信道选择器，如图 3-1 所示，来评估控制系统对数据传输的急迫性，从而实时选择传输信道。

在控制器设计部分有提到，当 $\|e(k)\| < \sigma_e$ 时，可以设计控制器使控制系统稳定。本节将介绍如何设计合适的信道选择器来保证该假设成立。根据控制器设计部分的假设可知，执行器端未接收到数据包时，采用零阶保持，即式(3-14)。

引理 3-1 定义 $\sigma_{\hat{e}(k-1)}$ 为估计误差 $\hat{e}(k-1)$ 的上界， $e_s(k) = u(k) - \hat{u}(k-1)$ 为传感器端约束误差， $\bar{e}(k) = u(k) - \bar{u}(k-1)$ 为 k 时刻生成的控制信号与执行器 $k-1$ 时刻使用的控制之差。通过构建如下信道切换规则：

$$\begin{cases} \|e_s(k)\| < \sigma_e - \sigma_{\hat{e}(k-1)} & \theta(k) = 1 \\ \|e_s(k)\| \geq \sigma_e - \sigma_{\hat{e}(k-1)} & \theta(k) = 0 \end{cases} \quad (3-18)$$

其中

$$\theta(k) = \begin{cases} 1 & \text{闭环系统使用竞争信道} \\ 0 & \text{闭环系统使用非竞争信道} \end{cases} \quad (3-19)$$

可以确保假设 $\|e(k)\| < \sigma_e$ 成立。

证明：通过观察 $\bar{e}(k)$ ， $e_s(k)$ 和 $\hat{e}(k)$ 可以得到：

$$\begin{aligned} \bar{e}(k) &= u(k) - \bar{u}(k-1) \\ &= u(k) - \hat{u}(k-1) + \hat{u}(k-1) - \bar{u}(k-1) \\ &= e_s(k) + \hat{e}(k-1) \end{aligned} \quad (3-20)$$

又由于 $\|\hat{e}(k-1)\| < \sigma_{\hat{e}(k-1)}$ ，当 $\theta(k) = 1$ 时，有：

$$\|e(k)\| = \|e_s(k) + \hat{e}(k-1)\| \leq \|e_s(k)\| + \|\hat{e}(k-1)\| < \sigma_e \quad (3-21)$$

当 $\theta(k) = 0$ 时，闭环系统使用非竞争信道传输，由式(3-14)可知有 $\bar{u}(k) = u(k)$ ， $\|e(k)\| = 0$ ，证毕。

注 3-1：本节所设计的信道选择器与第二章思路相同，通过在传感器端构建式(3-18)的信道切换规则，动态约束执行器端实际使用的控制信号误差始终在给

定阈值内。当满足 $\|e_s(k)\| < \sigma_e - \sigma_e(k-1)$ 时，采用竞争信道传输数据。反之，采用非竞争信道传输数据。

3.3 估计器求解

定理 3-1: 一个最优的估计器增益 K_L 可以通过解如下凸优化问题得到，

$$\min \text{Tr}\{N\} \quad (3-22)$$

当

$$\begin{bmatrix} -I & P\tilde{A} & Q \\ * & -M & 0 \\ * & * & -N \end{bmatrix} < 0$$

$$M - \alpha_L I < 0$$

$$\alpha_L < 1$$
(3-23)

其中， $P = I - K_L \tilde{C}$ ， $Q = [P\tilde{B} \quad K_L E]$ ， M 和 N 为对称正定矩阵。

证明: 估计误差 $\hat{e}(k) = \hat{u}(k) - \bar{u}(k)$ ，将式(3-13)代入可得：

$$\begin{aligned} \hat{e}(k) &= \tilde{A}\hat{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \\ &\quad + K_L(\tilde{y}(k) - CA\hat{u}(k-1) - CB\eta(k-1)) - \bar{u}(k) \end{aligned} \quad (3-24)$$

将式(3-12)代入上式可得：

$$\begin{aligned} \hat{e}(k) &= \tilde{A}\hat{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) - \tilde{A}\bar{u}(k-1) - \tilde{B}\eta(k-1) + \tilde{B}v(k-1) \\ &\quad + K_L(\tilde{C}\tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{C}\tilde{B}v(k-1) + Ew(k) - \tilde{C}\tilde{A}\hat{u}(k-1)) \\ &= \tilde{A}\hat{e}(k-1) + \tilde{B}v(k-1) + K_L(Ew(k) - \tilde{C}\tilde{B}v(k-1) - \tilde{C}\tilde{A}\hat{e}(k-1)) \\ &= (I - K_L\tilde{C})\tilde{A}\hat{e}(k-1) + (I - K_L\tilde{C})\tilde{B}v(k-1) + K_LEw(k) \end{aligned} \quad (3-25)$$

定义 $\xi(k-1) = \text{col}\{v(k-1), w(k)\}$ ，则估计器的估计误差式(3-25)可以进一步写成下面形式：

$$\hat{e}(k) = P\tilde{A}\hat{e}(k-1) + Q\xi(k-1) \quad (3-26)$$

定义如下性能参数：

$$J(k) = \hat{e}^T(k)\hat{e}(k) - \hat{e}^T(k-1)M\hat{e}(k-1) - \xi^T(k-1)N\xi(k-1) \quad (3-27)$$

将式(3-26)代入到上式可以得到：

$$\begin{aligned} J(k) &= \hat{e}^T(k-1)\tilde{A}^T P^T P\tilde{A}\hat{e}(k-1) + \xi^T(k-1)Q^T Q\xi(k-1) \\ &\quad + \hat{e}^T(k-1)\tilde{A}^T P^T Q\xi(k-1) + \xi^T(k-1)Q^T P\tilde{A}\hat{e}(k-1) \\ &\quad - \hat{e}^T(k-1)M\hat{e}(k-1) - \xi^T(k-1)N\xi(k-1) \end{aligned} \quad (3-28)$$

写成矩阵形式如下：

$$J(k) = \begin{bmatrix} \hat{e}(k-1) \\ \xi(k-1) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P^T P \tilde{A} - M & \tilde{A}^T P^T Q \\ * & Q^T Q - N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}(k-1) \\ \xi(k-1) \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

通过对 $\begin{bmatrix} \tilde{A}^T P^T P \tilde{A} - M & \tilde{A}^T P^T Q \\ * & Q^T Q - N \end{bmatrix} < 0$ 进行舒尔补可以得到式(3-23)中的第一个矩阵不等式，从而可以得到 $J(k) < 0$ ，因此有：

$$\hat{e}^T(k)\hat{e}(k) < \hat{e}^T(k-1)M\hat{e}(k-1) + \xi^T(k-1)N\xi(k-1) \quad (3-30)$$

通过式(3-23)中的第二个矩阵不等式可以得到 $\lambda_{\max}(M) < \alpha_L$ ，其中， λ_{\max} 为矩阵 M 的最大特征值。结合上式可以得到：

$$\begin{aligned} \hat{e}^T(k)\hat{e}(k) &< \alpha_L \hat{e}^T(k-1)\hat{e}(k-1) + \xi^T(k-1)N\xi(k-1) \\ \hat{e}^T(k)\hat{e}(k) &< \alpha_L^2 \hat{e}^T(k-2)\hat{e}(k-2) + \alpha_L \xi^T(k-2)N\xi(k-2) + \xi^T(k-1)N\xi(k-1) \\ &\dots \end{aligned} \quad (3-31)$$

即

$$\hat{e}^T(k)\hat{e}(k) < \alpha_L^k \hat{e}^T(0)\hat{e}(0) + \sum_{\kappa=0}^{k-1} \alpha_L^\kappa \xi^T(k-\kappa-1)N\xi(k-\kappa-1) \quad (3-32)$$

通过式(3-23)中的第三个不等式 $\alpha_L < 1$ 可知， $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_L^k = 0$ ，可知 $\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{e}^T(k)\hat{e}(k)$ 是有界的。

注意到 $\xi^T(k-1)N\xi(k-1) \leq \lambda_{\max}(\xi(k-1)\xi^T(k-1))\text{Tr}\{N\}$ ，所以有：

$$\hat{e}^T(k)\hat{e}(k) < \alpha_L \hat{e}^T(k-1)\hat{e}(k-1) + \lambda_{\max}(\xi(k-1)\xi^T(k-1))\text{Tr}\{N\} \quad (3-33)$$

在这种情况下，式(3-33)的右项可以看作是时刻 $\hat{e}^T(k)\hat{e}(k)$ 的上界。虽然估计误差 $\hat{e}(k)$ 由初始估计误差 $\hat{e}(0)$ 和有界噪声 $\xi(0)$ ， $\xi(1)$ ， \dots ， $\xi(k-1)$ 产生，但是通过上述推导可以得到当式(3-23)中的第三个不等式 $\alpha_L < 1$ 成立时，估计误差与初始误差无关。基于以上考虑，每次可以通过最小化 $\text{Tr}\{N\}$ 来最小化误差上界，从而估计器增益可以通过解定理 3-1 中的凸优化问题求得。

3.4 控制系统稳定性分析和控制器求解

本节将对所提状态反馈控制器的稳定性进行证明。在给出证明之前，先给出如下定义：

定义 3-1： 如果对任意初始状态 x_0 存在时间 $T(x_0)$ ，使得

$$x(k) \in \mathbb{S}, \quad \forall k \geq T(x_0) \quad (3-34)$$

则称系统(3-1)在包含其内部的原点的凸紧致集 \mathbb{S} 中一致最终有界 (UUB)。

定理 3-2: 给定正整数 $0 < \alpha < 1$ 和控制增益 K ，如果存在一个正定对称矩阵 P ，正整数 $\kappa_1 \geq 0$ ， $\kappa_2 \geq 0$ ， $0 \leq \kappa_3 \leq 1 - \alpha$ ，在信道切换规则式(3-18)约束下，使得如下不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \Xi_{1,1} & * & * & * \\ -B^T P(A+BK) & B^T PB - \kappa_1 I_n & * & * \\ E^T P(A+BK) & -E^T PB & E^T PE - \kappa_3 I_q & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_{4,4} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-35)$$

其中

$$\begin{aligned} \Xi_{1,1} &= (A+BK)^T P(A+BK) - (1-\alpha-\kappa_3)P \\ \Xi_{4,4} &= \kappa_1 \sigma_e^2 + \kappa_2 \sigma_w^2 - \kappa_3 \gamma^2 (\sigma_w^2 + \sigma_e^2) \end{aligned} \quad (3-36)$$

其中， I_m 为 m 维单位矩阵。则系统(3-1)在 IEBCS 策略下是最终一致有界稳定。

证明： 首先考虑 $x(k) \notin \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ ，定义李雅普诺夫函数 $V(k) = x^T(k)Px(k)$ ，则 $\Delta V(k) = V(k+1) - V(k)$ 。使 $\Delta V(k) \leq -\alpha V(k)$ ，可得：

$$\begin{aligned} \Delta V(k) + \alpha V(k) &= x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)Px(k) \\ &= x^T(k)(A+BK)^T P(A+BK)x^T(k) + x^T(k)(A+BK)^T PBe(k) \\ &\quad - x^T(k)Px(k) + x^T(k)(A+BK)^T PEw(k) + w^T(k)E^T PEw(k) \\ &\quad + e^T(k)B^T PBe(k) - e^T(k)B^T PEw(k) + w^T(k)E^T P(A+BK) \\ &\quad - w^T(k)E^T PBe(k) - e^T(k)B^T P(A+BK)x(k) \end{aligned} \quad (3-37)$$

定义 $\eta(k) = [x^T(k) \quad e^T(k) \quad w^T(k) \quad 1]^T$ ，式(3-37)可简化为如下：

$$\eta^T(k)P_1\eta(k) \leq 0 \quad (3-38)$$

其中

$$P_1 = \begin{bmatrix} (A+BK)^T P(A+BK) - (1-\alpha)P & * & * & * \\ -B^T P(A+BK) & B^T PB & * & * \\ E^T P(A+BK) & -E^T PB & E^T PE & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

通过式(3-2)和信道切换规则的 $\|e(k)\| < \sigma_e$ 可得如下不等式成立：

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma_w^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (3-40)$$

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma_e^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (3-41)$$

$x \notin \xi(P, \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2))$ 能被写为:

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2) \end{bmatrix} \eta(k) \geq 0 \quad (3-42)$$

通过 S-Procedure, 结合式(3-40)、式(3-41)、式(3-42)和式(3-38)可得式(3-35)成立。

其次, 考虑 $x(k+1) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$, $x(k) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 的情况, 可得:

$$\eta^T(k) P_2 \eta(k) \leq 0 \quad (3-43)$$

其中

$$P_2 = \begin{bmatrix} (A+BK)^T P(A+BK) & * & * & * \\ -B^T P(A+BK) & B^T P B & * & * \\ E^T P(A+BK) & -E^T P B & E^T P E & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

$x(k) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 可被写为:

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2) \end{bmatrix} \eta(k) \geq 0 \quad (3-45)$$

通过 S-Procedure, 结合式(3-40)、式(3-41)、式(3-44)和式(3-45)可得:

$$\begin{bmatrix} (A+BK)^T P(A+BK) - \bar{\kappa}_3 P & * & * & * \\ B^T P(A+BK) & B^T P B - \kappa_1 I_m & * & * \\ E^T P(A+BK) & E^T P B & E^T P E - \bar{\kappa}_3 I_q & * \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{4,4} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-46)$$

其中, $\Phi_{4,4} = \kappa_1 \sigma_e^2 + \kappa_2 \sigma_w^2 + (\bar{\kappa}_3 - 1) \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2)$ 。注意到当 $\bar{\kappa}_3 = 1 - \kappa_3$ 时, 式(3-35)包含了式(3-46)。因此式(3-35)即可保证当 $x(k) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 时, $x(k+1) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 。

当 $x(k) \notin \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 时, $V(k)$ 满足指数衰减 $\Delta V(k) \leq \alpha V(k)$ 。因此我们可以得到对于任意初始状态 $x(0) \notin \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$, 当 $k \geq T(x(0))$ 时, $x(k) \in \xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$, 其中

$$T(x(0)) = \frac{\log \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2) - \log x^T(0) P x(0)}{\log(1 - \alpha)} \quad (3-47)$$

因此, 系统最终一致有界稳定。证毕。

接下来将给出控制器的求解。

定理 3-3: 给定常数 $0 < \alpha < 1$, γ , 在信道切换规则式(3-18)约束下, 当存在正定矩阵 $S \in R^{n \times n}$, 参数 $\kappa_1 \geq 0$, $\kappa_2 \geq 0$, $0 \leq \kappa_3 \leq 1 - \alpha$, 矩阵 $G_1 \in R^{n \times n}$, $G_2 \in R^{m \times m}$, $\tilde{G} \in R^{m \times n}$ 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -(1-\alpha-\kappa_3)(G_1^T + G_1 - S) & * & * & * & * & * \\ 0 & -G_2^T - G_2 + \frac{1}{\kappa_1} I_m & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I_q & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_{4,4} & * & * \\ AG_1 + B\tilde{G} & -BG_2 & E & 0 & -S & * \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \sigma_e^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-48)$$

则称系统(3-1)通过 IEBCS 策略在 $\xi(P, \gamma^2(\sigma_e^2 + \sigma_w^2))$ 中是最终一致有界稳定。其中, $\Omega_{4,4} = \kappa_2 \sigma_w^2 - \kappa_3 \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2)$, 李雅普诺夫矩阵 $P = S^{-1}$, 控制器增益为 $K = \tilde{G}G_1^{-1}$ 。

证明: 对式(3-35)进行两次舒尔补可得下式:

$$\begin{bmatrix} -(1-\alpha-\kappa_3)P & * & * & * & * & * \\ 0 & -\kappa_1 I_m & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I_q & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \kappa_2 \sigma_w^2 - \kappa_3 \gamma^2(\sigma_w^2 + \sigma_e^2) & * & * \\ A + BK & -B & E & 0 & -P^{-1} & * \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \sigma_e^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-49)$$

对式(3-49)左右乘对角矩阵 $\text{diag}\{G_1^T, G_2^T, I_q, I_1, I_n, I_1\}$ 和 $\text{diag}\{G_1, G_2, I_q, I_1, I_n, I_1\}$ 可得:

$$\begin{bmatrix} -(1-\alpha-\kappa_3)G_1^T P G_1 & * & * & * & * & * \\ 0 & -\kappa_1 G_2^T G_2 & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I_q & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \kappa_2 \sigma_w^2 - \kappa_3 \gamma^2(\sigma_w^2 - \sigma_e^2) & * & * \\ AG_1 + BKG_1 & -BG_2 & E & 0 & -P^{-1} & * \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \sigma_e^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-50)$$

考虑如下不等式:

$$\begin{aligned}\kappa(\kappa^{-1}I - G)^T(\kappa^{-1}I - G) &\geq 0 \\ (P^{-1} - G)^T P(P^{-1} - G) &\geq 0\end{aligned}\quad (3-51)$$

通过简单的代数运算可得：

$$\begin{aligned}\kappa G^T G &\geq G^T + G - \kappa^{-1}I \\ G^T P G &\geq G^T + G - P^{-1}\end{aligned}\quad (3-52)$$

将式(3-52)代入式(3-50)，定义 $S = P^{-1}$ ， $\tilde{G} = \kappa G_1$ ，可得式(3-48)成立。证毕。

注 3-2：注意到式(3-48)中存在非线性项 $-(1-\alpha-\kappa_3)(G_1^T + G_1 - S)$ 。根据参考文献[67]可知，可以通过预先假定 κ_3 的值在一个区间内以一定的增量逐步递增，然后在每一步中尝试求解不等式(3-48)以得到可行解。例如：使 κ_3 在 $[0, 1-\alpha]$ 内递增 $\frac{1-\alpha}{N}$ ，其中 N 为总步长，这样使得式(3-48)转化为线性矩阵不等式 (LMI)，从而可以使用 MATLAB 中 LMI 工具箱对其进行求解。基于这一想法，可以总结为如下算法：

算法 3-1：求解(3-48)

初始化：给定总步数 N ，设置 $i=0$ ， $j=0$ ， $\kappa_3=0$ 。

- 1 判断 $i < N$ ，成立执行步骤 2，否则执行步骤 5。
- 2 判断式(3-48)是否有解，成立执行步骤 3，否则执行步骤 4。
- 3 求解矩阵 S 的迹 $t_j = \text{tr}(S)$ ， $\kappa_{3,j} = \kappa_3$ ， $j = j+1$ 。
- 4 设置 $\kappa_3 = \kappa_3 + (1-\alpha)/N$ ， $i = i+1$ 。
- 5 令 $k=k+1$ ，转到步骤 1。

输出： $j^* = \arg \min(t_j)$ ， $\kappa_3 = \kappa_{3,j^*}$ 。

IEBCS 具体流程如算法 4-2 所示：

算法 3-2：IEBCS 策略

初始化：置时间 $k=0$ ， $\sigma_w=0.03$ ， $\sigma_e=0.6$ ， $\alpha=0.001$ ， $\gamma^2=0.04$ 。通过定理 3-1 得到估计器增益 K_L 。通过定理 3-3 得到反馈控制器 K 。

- 1 通过观测器式(3-13)得出 $k-1$ 时刻执行器所使用的控制信号。
 - 2 通过信道切换规则式(3-18)选择合适的信道传输系统状态 $x(k)$ 。
 - 3 通过状态反馈得到控制信号 $u(k)$ ，发送给执行器。
 - 4 执行器收到通过网络传输的信号 $\bar{u}(k)$ 。
 - 5 执行器将最新的控制量作用于被控对象。
 - 6 令 $k=k+1$ ，转到步骤 1。
-

3.5 数值仿真

在本节将利用数值仿真的例子来验证所提 IEBCS 策略的有效性。同样地，本章所提 IEBCS 策略将与 LQR 控制和文献[64]策略进行对比。

考虑如下系统^[20]：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ew(k)$$

其中，系统矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 1.0018 & 0.01 \\ 0.36 & 1.0018 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.01 \\ -0.184 \end{bmatrix}, E = B$$

系统的初始状态 $x_0 = [-2 \quad -1]$ ，采样周期 $T = 0.01$ 秒。 $\sigma_w = 0.3$ ， $\sigma_e = 0.6$ ， $\alpha = 0.001$ ， $\gamma^2 = 0.04$ ， $\omega(k) = \sigma_w \sin(0.02k\pi)$ 。给定矩阵 $C = [5 \quad 1]$ 。根据定理 3-1 可求出所使用控制信号估计器的增益为 $K_L = [2.2873 \quad 5.7182]$ 。通过定理 3-3 可以得到状态反馈控制率 $K = [3.4473 \quad 5.1797]$ 。

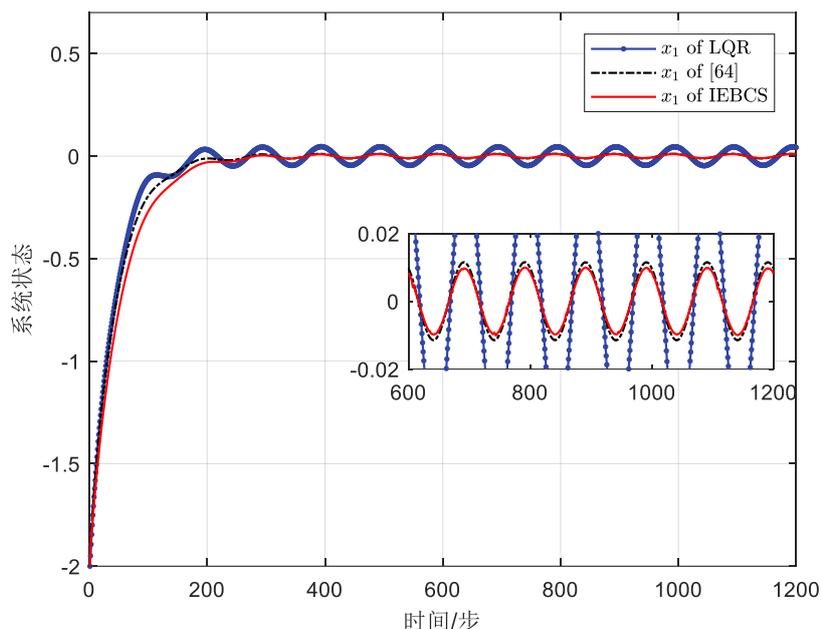


图 3-2 x_1 轨迹图

Figure 3-2. The x_1 trajectory diagram

当闭环系统使用竞争信道传输数据下的丢包率为 0.4 时，仿真结果如图 3-2 到图 3-4 所示。图 3-2 和图 3-3 为系统在当前网络环境下，LQR 策略、文献[64]策略和所提 IEBCS 策略下的轨迹图。可以看出三种策略都能保证系统最终一致有界稳定，但通过仔细对比可以发现 LQR 策略和文献[64]策略虽然可以保证闭环系统最终一致有界稳定，但是其状态的抖动范围大于所提 IEBCS 策略。图 3-

4 为所设计估计器的估计性能，可以看出该估计器在有扰情况下仍能估计出执行器所使用的控制信号，并保证其估计误差有界。

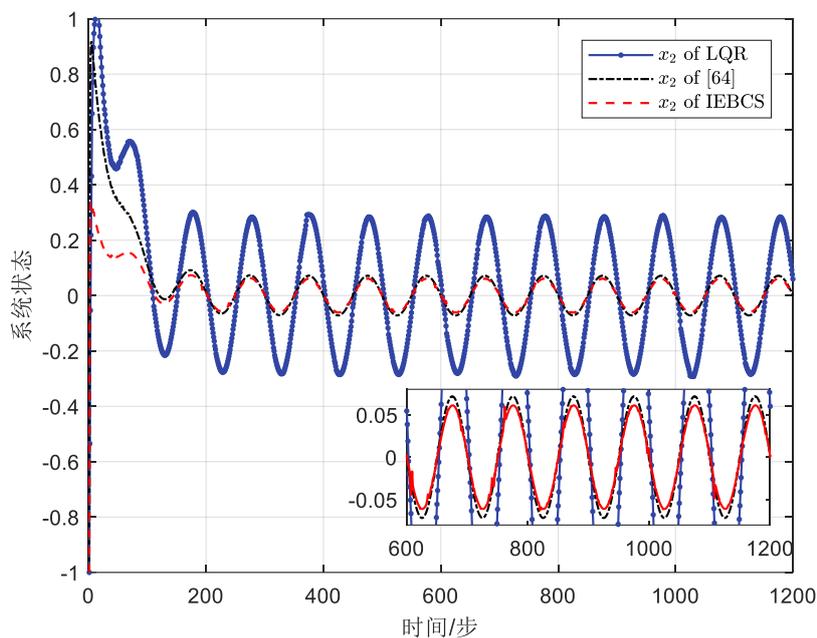


图 3-3 x_2 轨迹图

Figure 3-3. The x_2 trajectory diagram

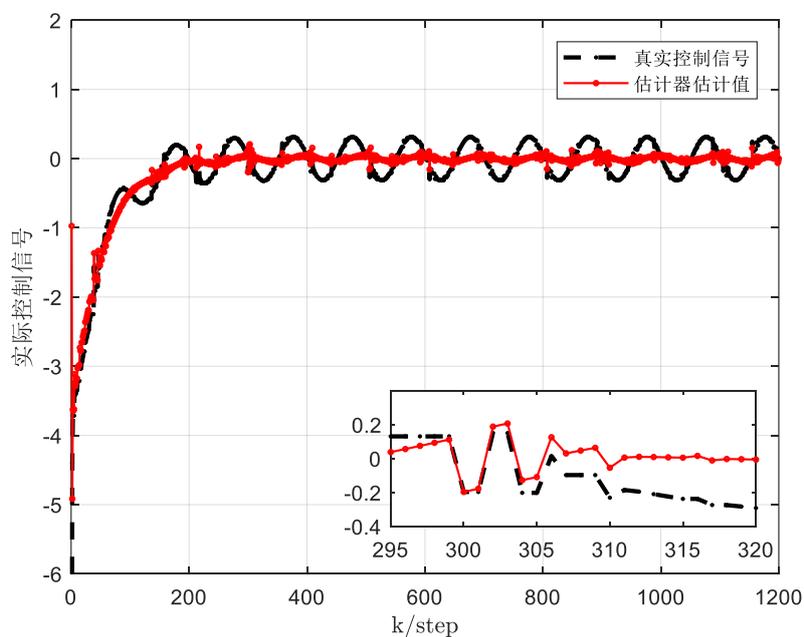


图 3-4 执行器使用的控制信号估计图

Figure 3-4. The diagram of the control signal estimation

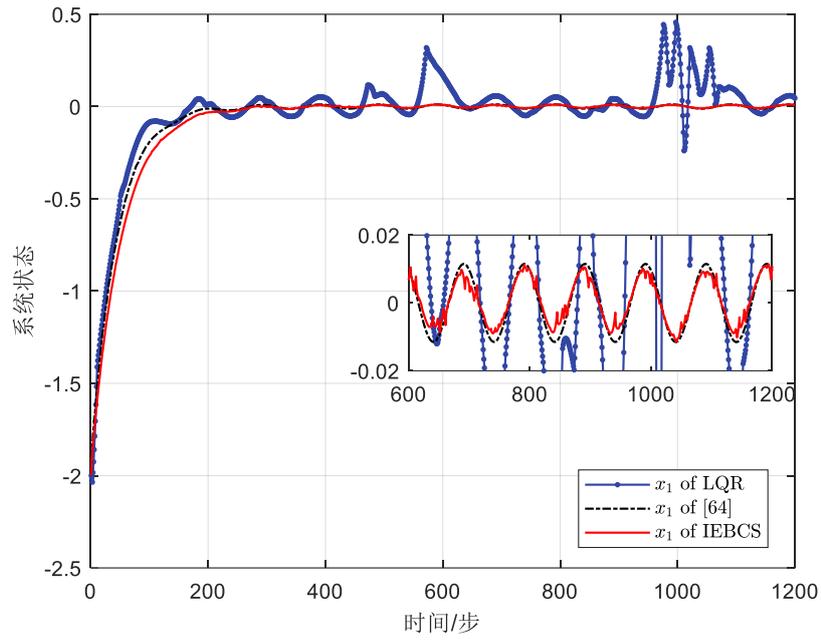


图 3-5 x_1 轨迹图

Figure 3-5. The x_1 trajectory diagram

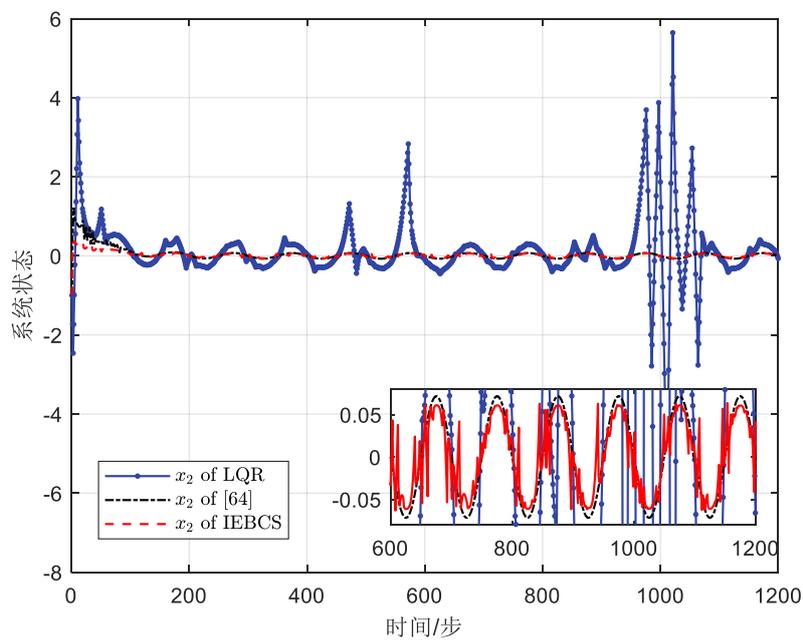


图 3-6 x_2 轨迹图

Figure 3-6. The x_2 trajectory diagram

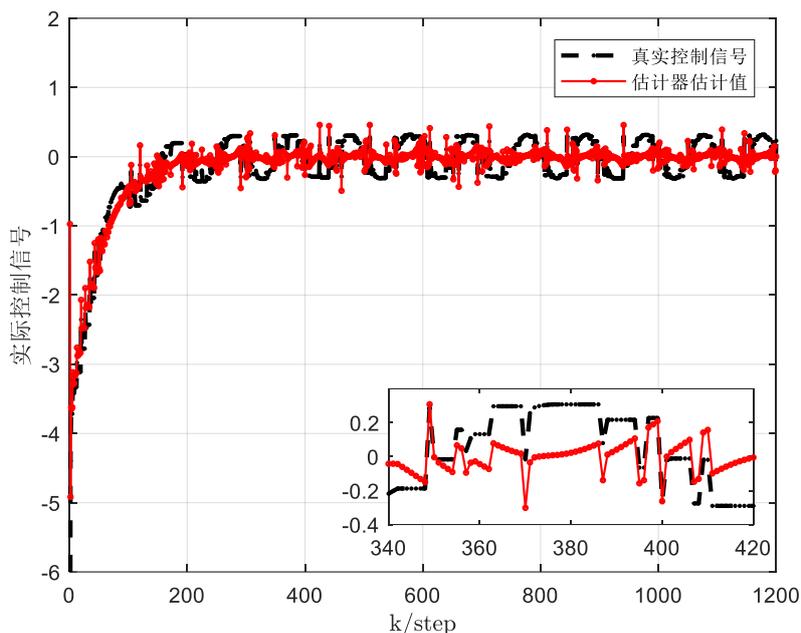


图 3-7 执行器使用的控制信号估计图

Figure 3-7. The diagram of the control signal estimation

进一步考虑闭环系统使用竞争信道传输数据下的丢包率为 0.8 的情况。在该种网络条件下，LQR 策略、文献[64]策略和本章所提 IEBCS 策略的系统轨迹如图 3-5 和 3-6 所示。对比图 3-5 与图 3-6 可知，LQR 控制策略在该场景下已经无法保证闭环系统的稳定性，但文献[64]策略和本章所提 IEBCS 策略通过合理切换竞争和非竞争信道在保证控制系统稳定的同时提高了资源利用率。图 3-7 为所设计估计器的估计效果图。可以看出，所提估计器能很好地适应控制信号的突变，且保证估计误差有界。

同样，文献[64]策略和本章所提 IEBCS 策略在保证控制系统性能上表现接近。我们将进一步比较两种策略下的信道调度情况。本章在竞争信道闭环丢包率为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 时，分别运行 100 次，仿真步数为 1200 步，得到非竞争信道使用次数的平均值，并总结为表 3-1。

表 3-1 有扰 WNCSSs 中非竞争信道使用次数对比

Table 3-1. Comparison of non-contention channel usage times of disturbed WNCSSs

非竞争信道使用次数	丢包率为0.2	丢包率为0.4	丢包率为0.6	丢包率为0.8
IEBCS策略	106.79	129.19	179.64	240.62
文献[64]策略	1013.99	1020.94	1022.91	1037.60

观察表 3-1 可以发现，在不同丢包率下，所提 IEBCS 策略的非竞争信道使用次数远低于文献[64]策略。由此可见，针对有扰无线网络化系统，本章所提

IEBCS 策略能够在保证控制系统稳定的同时节省更多的信道资源。值得注意的是，文献[64]策略并未针对存在扰动的无线网络化控制系统进行处理，因此其非竞争信道的使用次数远高于本章所提 IEBCS 策略。另外如第二章所述，文献[64]策略仅考虑反馈信道的调度问题，而本章所提策略同时考虑了反馈信道和前向信道的调度问题。因此，本章所提 IEBCS 策略效果更优。

3.6 本章小结

本章针对多用户共享的通信网络，并且网络中存在竞争信道和非竞争信道的无线网络化控制系统设计了改进的基于估计器的动态信道选择策略。该策略分为估计器设计、信道选择器设计和控制器设计三部分。改进的控制信号估计器引入了有界递归的思想，能保证在有扰情况下估计误差有界，并且得到了保证闭环系统最终一致有界稳定的充分条件以及相应的控制增益。通过理论证明和仿真实验验证了该算法在任意丢包率下均可以保证控制系统稳定，且在保证系统稳定的同时节省了大量的非竞争信道资源。改进的基于估计器的信道选择策略能广泛应用于通过动态信道的选择来平衡控制系统性能和网络资源以及网络丢包特性无法建模的无线网络化控制系统中，且考虑系统状态方程存在不确定的情况，更贴近工程实际情况。

第四章 总结与展望

4.1 总结

在无线网络化控制系统中，网络信道资源的有效利用十分重要。由于网络信道资源有限，一个不考虑信道资源利用率的控制策略可能会导致网络吞吐量降低和网络资源的浪费；而控制系统的实时性，所以无线网络化控制系统同时需要一个合理高效的信道调度和控制策略，在保证系统稳定运行的同时，尽量节省宝贵的网络资源。

注意到控制系统的传输需求是可以提前预知的，本文提出了基于动态信道选择的无线网络化控制系统的设计与分析。该方法根据控制系统的性能实时选择数据传输的信道，当控制系统性能较差时，其传输需求比较大，选择传输无损但成本较高的非竞争信道进行数据传输，否则使用成本较低的竞争信道进行数据传输。平衡了无线网络化控制系统中的信道资源和系统性能。本文的主要研究内容总结如下，

1. 针对与其他用户共享通信网络的无扰 WNCSSs，设计了基于估计器的动态信道切换策略。该策略包含控制信号估计器、信道选择器和控制器三部分，控制信号估计器利用已知数据和系统模型估计出未知的控制器实际使用的数据，将控制器实际使用的控制数据送入信道选择器，信道选择器根据已知的最新系统状态和执行器上一时刻实际使用的控制数据进行信道选择，确保当前时刻实际使用的控制数据与理想情况下的差值始终在一个合适的边界之下，在控制器采用了常见的状态反馈控制器。在稳定性分析中，得到了使系统渐近稳定的充分条件，对应的控制器增益和信道选择器的参数。数值仿真验证了动态信道选择策略的有效性。

2. 针对与其他用户共享通信网络的有扰 WNCSSs，设计了改进的基于估计器的动态信道选择策略，控制信号估计器采用了有界递归的思想，同样估计出执行器上一时刻实际使用的控制数据，并且保证估计误差有界。信道选择器根据已知的最新系统状态和执行器上一时刻实际使用的控制数据进行信道选择，确保当前时刻实际使用的控制数据与理想情况下的差值始终在一个合适的边界之下，控制器采用了更加合适的状态反馈控制器。在稳定性分析中，得到了系统最终一致有界稳定的充分条件，对应的控制器和信道选择器的参数。数值仿真验证了动态信道选择策略的有效性。

4.2 展望

在无线网络化控制系统的研究中，对通信网络的特征研究以及网络资源调度和控制系统的协同设计一直都是该领域的热点和难点。在本文提出的方法中，假设了控制系统在共享通信网络中具有最高优先级，控制系统申请非竞争信道一定能成功，而且非竞争信道下的数据传输为无损的，这种假设在实际系统中不一定合理；另外本文假设了扰动存在已知上界，然后现实生活中，扰动有可能是无界的；而在控制器设计上，本文采用了经典的状态反馈控制，并没有利用新兴的智能控制算法进一步改善控制策略，可能存在一定的保守性。针对这两点，还可以做如下工作：

- 1.考虑更贴合实际的系统。首先考虑控制系统和其他用户具有同样的优先级，控制系统在向协调器申请非竞争信道时，和其它用户之间也存在竞争关系，相应地，控制系统数据的成功传输不仅仅与选择的信道有关，还与通信网络中的其他用户有关系，如何合理地进行系统设计与分析需要做进一步研究。

- 2.考虑更一般的扰动。实际生活中，扰动往往是无法避免的，扰动的存在给无线网络化控制系统设计与分析带来了巨大挑战，并且现实生活中，扰动可能是无限大的，如何考虑无界扰动下控制系统性能和网络信道资源的协同设计需要进一步考虑。

- 3.考虑更智能的控制算法。近些年来，模糊控制和神经网络技术等在网络化控制领域得到了广泛的应用，进一步探索利用模糊控制和神经网络技术解决本文提出的问题，控制系统的性能或者网络资源的节省是否能够得到进一步改善。

参考文献

- [1] Zhang X M, Han Q L, Ge X, et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 7(1): 1-17.
- [2] Su X, Wang C, Chang H, et al. Event-triggered sliding mode control for networked control systems with Markovian jump parameters[J]. *Automatica*, 2021, 125: 109405-109417.
- [3] Peng C, Sun H. Switching-like event-triggered control for networked control systems under malicious denial of service attacks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(9): 3943-3949.
- [4] Sun J, Zeng Z. Periodic event-triggered control for networked control systems with external disturbance and input and output delays[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 1-9. DOI: 10.1109/TCYB.2022.3164214.
- [5] Wang Q, Yang H. A survey on the recent development of securing the networked control systems[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2019, 7(1): 54-64.
- [6] Bahraini M, Zanon M, Colombo A, et al. Optimal scheduling and control for constrained multi-agent networked control systems[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2022, 43(1): 23-43.
- [7] Cheng L, Yan H, Zhan X, et al. Performance limitation analysis of networked control systems under denial-of-service attacks[J]. *Asian Journal of Control*, 2022, 1-13. DOI: 10.1002/asjc.2703.
- [8] Chhetri C, Motti V. Identifying vulnerabilities in security and privacy of smart home devices[C]// *Proceedings of the National Cyber Summit*. Springer, Cham, 2020: 211-231.
- [9] Li M, Lin H. Design and implementation of smart home control systems based on wireless sensor networks and power line communications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62(7): 4430-4442.
- [10] Ji B, Zhang X, Mumtaz S, et al. Survey on the internet of vehicles: Network architectures and applications[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020, 4(1): 34-41.
- [11] Luvisotto M, Pang Z, Dzung D. High-performance wireless networks for industrial control applications: New targets and feasibility[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1074-1093.
- [12] Tramarin F, Mok A K, Han S. Real-time and reliable industrial control over wireless lans: Algorithms, protocols, and future directions[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1027-1052.
- [13] 张铁荟, 马新茹, 韩帆, 等. 网络化非完整约束多机器人系统协同控制分群一致性[C]// 第40届中国控制会议论文集(15), 中国上海, 2021: 640-644.
- [14] Asaamoning G, Mendes P, Rosário D, et al. Drone swarms as networked control systems by integration of networking and computing[J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2642-2665.
- [15] Mahmoud M S, Hamdan M M. Fundamental issues in networked control systems[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(5): 902-922.
- [16] Zhang X M, Han Q L, Yu X. Survey on recent advances in networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 12(5): 1740-1752.
- [17] Ge X, Yang F, Han Q L. Distributed networked control systems: A brief overview[J]. *Information Sciences*, 2017, 380: 117-131.

-
- [18] Zhang H, Shi Y, Wang J, et al. A new delay-compensation scheme for networked control systems in controller area networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(9): 7239-7247.
- [19] Lin H, Su H, Shu Z, et al. Optimal estimation in UDP-like networked control systems with intermittent inputs: Stability analysis and suboptimal filter design[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 61(7): 1794-1809.
- [20] Wang J S, Yang G H. Data-driven methods for stealthy attacks on TCP/IP-based networked control systems equipped with attack detectors[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 49(8): 3020-3031.
- [21] Zhang L, Gao H, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems: A survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 9(1): 403-416.
- [22] Liu A D, Zhang W A, Yu L, et al. New results on stabilization of networked control systems with packet disordering[J]. *Automatica*, 2015, 52: 255-259.
- [23] Zhao Y B, Kim J, Liu G P, et al. Compensation and stochastic modeling of discrete-time networked control systems with data packet disorder[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(5): 1055-1063.
- [24] Johari S, Krishna M B. TDMA based contention-free MAC protocols for vehicular ad hoc networks: A survey[J]. *Vehicular Communications*, 2021, 28: 100308-100325.
- [25] Gupta R, Biswas S. Priority based IEEE 802.15. 4 MAC by varying GTS to satisfy heterogeneous traffic in healthcare application[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(3): 2287-2304.
- [26] Tolani M, Sunny A, Singh R K. Energy-efficient adaptive GTS allocation algorithm for IEEE 802.15. 4 MAC protocol[J]. *Telecommunication Systems*, 2021, 76(3): 329-344.
- [27] Wang Z, Fukushima S. Control strategy for networked control systems with time delay and packet dropout using linear matrix inequalities[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 1-11.
- [28] Elahi A, Alfī A, Modares H. H_∞ consensus of homogeneous vehicular platooning systems with packet dropout and communication delay[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 1-12. DOI: 10.1109/TSMC.2021.3071994.
- [29] Millán P, Orihuela L, Bejarano G, et al. Design and application of suboptimal mixed H_2 / H_∞ controllers for networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 20(4): 1057-1065.
- [30] Zhang H, Zhang Z, Wang Z, et al. New results on stability and stabilization of networked control systems with short time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, 46(12): 2772-2781.
- [31] Li T X, Zhang W A, Yu L. Improved switched system approach to networked control systems with time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 27(6): 2711-2717.
- [32] Yan S, Shen M, Nguang S K, et al. Event-Triggered H_∞ Control of Networked Control Systems With Distributed Transmission Delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 65(10): 4295-4301.
- [33] Bahreini M, Zarei J. Robust finite-time stabilization for networked control systems via static output-feedback control: Markovian jump systems approach[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2018, 37(4): 1523-1541.

- [34] 梁启鹏, 朱巧慧, 康宇, 等. 基于估计的无线网络化控制系统逼近控制策略 (英文)[J]. 中国科学技术大学学报, 2021, 51(4): 327-334.
- [35] Qu F L, Guan Z H, Li T, et al. Stabilisation of wireless networked control systems with packet loss[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(15): 2362-2366.
- [36] Sun Y, Qin S. Stability of networked control systems with packet dropout: an average dwell time approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2011, 5(1): 47-53.
- [37] Zhang W A, Yu L. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1705-1710.
- [38] Ferrara A, Incremona G P, Stocchetti V. Switched sliding mode control strategy for networked systems[C]// Proceedings of the 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, 2014: 692-697.
- [39] 梁启鹏. 基于通信特征估计的无线网络化控制系统设计和分析[D]. 浙江工业大学, 2021.
- [40] Brown L D, Cai T T, DasGupta A. Interval estimation for a binomial proportion[J]. Statistical Science, 2001, 16(2): 101-133.
- [41] Qiu J, Gao H, Ding S X. Recent advances on fuzzy-model-based nonlinear networked control systems: A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63(2): 1207-1217.
- [42] Fan J, Wu Q, Jiang Y, et al. Model-free optimal output regulation for linear discrete-time lossy networked control systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 50(11): 4033-4042.
- [43] 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.
- [44] Kundu A, Quevedo D E. Stabilizing scheduling policies for networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 7(1): 163-175.
- [45] Sun L, Wu J. Schedule and control co-design for networked control systems with bandwidth constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(2): 1042-1056.
- [46] Tiberi U, Fischione C, Johansson K H, et al. Energy-efficient sampling of networked control systems over IEEE 802.15. 4 wireless networks[J]. Automatica, 2013, 49(3): 712-724.
- [47] Rao S, Keshri S, Gangwar D, et al. A survey and comparison of GTS allocation and scheduling algorithms in IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies. IEEE, 2013: 98-103.
- [48] Dinh T N, Ha P H. Advanced GTS scheduling in IEEE 802.15. 4 networks for industrial application[C]// Proceedings of the 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2019: 1-4.
- [49] Li J N, Su H Y, Wu Z G, et al. Modelling and control of Zigbee-based wireless networked control system with both network-induced delay and packet dropout[J]. International Journal of Systems Science, 2013, 44(6): 1160-1172.
- [50] Kim H S, Song J H, Lee S. Energy-efficient traffic scheduling in IEEE 802.15. 4 for home automation networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 369-374.
- [51] Chen C, Pei Q, Li X. A GTS allocation scheme to improve multiple-access performance in vehicular sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(3): 1549-1563.
- [52] Heemels W M H, Teel A R, Van de Wouw N, et al. Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1781-1796.

- [53] Lunze J, Lehmann D. A state-feedback approach to event-based control[J]. *Automatica*, 2010, 46(1): 211-215.
- [54] Peng C, Yang T C. Event-triggered communication and H_∞ control co-design for networked control systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(5): 1326-1332.
- [55] Linselmayer S, Dimarogonas D V, Allgöwer F. Periodic event-triggered control for networked control systems based on non-monotonic Lyapunov functions[J]. *Automatica*, 2019, 106: 35-46.
- [56] Anta A, Tabuada P. To sample or not to sample: Self-triggered control for nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(9): 2030-2042.
- [57] Heemels W P, Johansson K H, Tabuada P. An introduction to event-triggered and self-triggered control[C]// *Proceedings of the 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, 2012: 3270-3285.
- [58] Lin X, Rasool S. A distributed joint channel-assignment, scheduling and routing algorithm for multi-channel ad-hoc wireless networks[C]// *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2007: 1118-1126.
- [59] Du D, Zhan G, Qi B, et al. Based on H_2 / H_∞ filtering control for wireless network with multi-channel network-induced delays constraints[C]// *Proceedings of the 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*. IEEE, 2016: 1-6.
- [60] Cao X, Wang C, Ma W, et al. Research on M2M device access method based on packet combining competitive and non-competitive[C]// *Proceedings of the 2020 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*. IEEE, 2020: 229-233.
- [61] Sun H, Peng C, Zhang H, et al. Multi-delay over multipath channel in wireless networked control system: modeling and stability analysis[C]// *Proceedings of the 2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2016: 7246-7249.
- [62] Ni Y, Leong A S, Quevedo D E, et al. Pricing and selection of channels for remote state estimation using a Stackelberg game framework[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2019, 5(4): 657-668.
- [63] Farjam T, Charalambous T, Wymeersch H. A timer-based distributed channel access mechanism in networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(5): 652-656.
- [64] Zhao Y, Xu D, He J, et al. Model-based network scheduling and control for systems over the IEEE 802.15. 4 network[J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2021, 34(1): 281-297.
- [65] Yang H, Xu Y, Zhang J. Event-driven control for networked control systems with quantization and Markov packet losses[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(8): 2235-2243.
- [66] Chen B, Hu G, Ho D W C, et al. A new approach to linear/nonlinear distributed fusion estimation problem[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 64(3): 1301-1308.
- [67] Wu W, Reimann S, Görjes D, et al. Event-triggered control for discrete-time linear systems subject to bounded disturbance[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(9): 1902-1918.

致 谢

三年的硕士生活转瞬即逝，我的学生时代即将结束。三年的时间说长不长，说短不短，这段经历对我整个人生影响深远，毕生难忘。在毕业论文即将完成之际，借此机会感谢所有在硕士期间帮助过我、关心过我的人表达最诚挚的感谢。

首先感谢我的导师赵云波教授，赵老师求真务实，一丝不苟，是一位认真严谨的教授，给我们提供最好的实验室环境，给与我们自由生长的空间。在进入实验室初期，赵老师会定期组织组会带我们逐步适应研究生生活，这篇硕士论文也是在赵老师的耐心指导下完成，从初期的论文结构框架到后期的行文表达，赵老师层层把关。在此，对我的导师，赵云波教授致以最诚挚的谢意。

实验室的生活总是忙碌并快乐着，感谢实验室的梁启鹏师兄、朱巧慧师姐、王岭人师姐、潘晓康师兄、许德衡师兄，不管是在科研学习上还是在日常生活中，收到太多太多你们的善意，感谢实验室的同门闫文晓，吴芳，赵丽丽，花婷婷、卢帅领以及卢子轶，一起在网络化智能控制实验室度过了有意义的三年研究生生活，留下了许多愉快的回忆。感谢我的好朋友杨玲，李晶的陪伴，每次心情沮丧时，你们的话总能让我无比暖心。

另外还要感谢一个特别的人，谭雅雯同学，在科研上愿意花时间帮助我，在生活中更愿意花时间陪伴我，不管遇上多大的困难，都给予我最有力的支持，感谢。

最后，我要对我的家人表示深深的敬意和感谢，求学 20 多年，他们一直在背后默默支持着我，让我顺利完成学业。他们的爱是我最温暖的港湾。感谢我最爱的妈妈和姐姐，你们为我付出了太多，希望未来我不会让你们失望。

感谢每一个人！愿每一个人未来都万事胜意！

作者简介

1 作者简历

1996年9月出生于安徽省安庆市。

2019年9月—2022年6月，浙江工业大学信息工程学院控制科学与工程专业学习，攻读学术型硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

[1] 郝小梅, 赵云波. 基于动态信道切换的无线网络化控制系统的资源调度策略[J]. 高技术通讯.

3 参与的科研项目及获奖情况

[1] 基于资源调度和预测控制的无线网络化控制系统的联合设计. 中国国家自然科学基金项目(61673350).

[2] 基于数据驱动和联合设计的无线网络化控制系统的使能建模和设计. 中国国家自然科学基金委面上项目(62173317).

4 发明专利

[1] 赵云波, 郝小梅. 一种基于动态信道选择的资源调度方法, 中国, CN113242604A[P]. 2021-08-10.

[2] 赵云波, 卢帅领, 郝小梅, 梁启鹏. 一种基于XCOS和NS3的协同仿真时间同步方法. 中国, CN113139281A[P]. 2021-07-20.

学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP13	681.5	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类型*	学位级别*
浙江工业大学	10337	工学硕士	全日制学术型硕士
论文题名*	基于动态信道选择的无线网络化控制系统设计与分析		
关键词*	无线网络化控制系统, 资源调度, 动态信道选择, 控制信号估 计器		论文语种*
并列题名*	无		中文
作者姓名*	郝小梅	学 号*	2111903111
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮政编码
浙江工业大学 信息工程学院	10337	杭州市留和路 288 号	310032
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
控制科学与工程	无线网络化控制	3 年	2022 年
论文提交日期*	2022 年 06 月		
导师姓名*	赵云波	职 称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
盲评	杨东勇	刘毅, 杨智	
电子版论文提交格式: 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 ()			
电子版论文出版 (发布) 者	电子版论文出版 (发布) 地		版权声明
论文总页数*	66 页		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			