



浙江工业大学

硕士学位论文

主动丢包的多包无线网络化控制系统的
分析和设计

作者姓名	闫文晓
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

Analysis and Design of Multi-packet Wireless Networked Control Systems with Active Packet Dropout

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



by

Wen-xiao YAN

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： 闫文晓

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： 闫文晓

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

主动丢包的多包无线网络化控制系统的

分析和设计

Analysis and Design of Multi-packet Wireless Networked
Control Systems with Active Packet Dropout

作者姓名 闫文晓

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 网络化控制

答辩日期 2022 年 05 月 13 日

主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计

摘要

随着无线通信、嵌入式计算和传感器网络等技术的快速发展，无线网络化控制系统成为了近些年研究的热点。该类系统具有高灵活、易维护和低成本的特点，在车联网、无人机编队等领域有广泛的应用价值。无线网络化控制系统一个显著的特点是往往需要多个传感器采集并以无线方式传输相关数据，由于通信网络中数据传输的不完美，这一特点引发了传统网络化控制系统不多见的多包传输问题，需要新的方法加以解决。

本文研究多包无线网络化控制系统中的主动丢包问题，提出了一种基于预测器的动态传输策略，该策略能够在几乎不增加无线网络信道资源占用的同时，减少主动丢包给无线网络化控制系统带来的影响，提升系统的整体性能。具体研究工作包括以下两个方面：

(1) 针对无扰动情况下的多包无线网络化控制系统的主动丢包问题，设计了基于优先级预测器的动态传输策略，减小了主动丢包的影响，提升了系统性能。该策略包含优先级预测器、传输调节器和控制器三部分：优先级预测器每一时刻预测下一时刻各传感器数据对系统稳定性的重要性，从而帮助传输调节器进行决策；在此基础上，传输调节器设计合理的传感数据动态传输规则，降低高优先级数据的退避时间，提高低优先级数据的退避时间；进一步设计了保证系统稳定的控制器，并通过数值仿真验证了策略的有效性。

(2) 针对有外部扰动的多包无线网络化控制系统的主动丢包问题，改进了基于优先级预测器的动态传输策略，使策略在有界扰动下能减少主动丢包的影响，提高了策略的抗干扰能力。为了处理干扰，在前述 PBDT 基本设计之上，加入了预测偏差估计器，根据历史图窗数据估计因外界扰动造成的预测器的预测偏差，并可以检测系统的突变扰动对其进行补偿，保证策略的鲁棒性；进一步在此改进的策略下给出了相应的 H_{∞} 控制器设计方法，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，多包传输，主动丢包，预测器，动态传输

ANALYSIS AND DESIGN OF MULTI-PACKET WIRELESS NETWORKED CONTROL SYSTEMS WITH ACTIVE PACKET DROPOUT

ABSTRACT

With the rapid development of wireless communication, embedded computing and sensor networks, wireless networked control systems has become a research hotspot in recent years. This kind of system has the characteristics of high flexibility, easy maintenance and low cost, and has a wide application value in the field of vehicles, UAV formation and so on. A remarkable feature of wireless networked control systems is that it often needs multiple sensors to collect and transmit relevant data in a wireless way. Due to the imperfect data transmission in the communication network, this feature leads to the problem of multi-packet transmission rarely seen in the traditional networked control systems, which needs a new method to solve.

This thesis studies the problem of active packet dropout in multi-packet wireless networked control systems, and proposes a dynamic transmission strategy based on predictor. This strategy can reduce the influence of active packet dropout on wireless networked control systems and improve the overall performance of the system without increasing the occupation of wireless network channel resources. The specific research work includes the following two aspects:

(1) Aiming at the problem of active packet dropout in multi packet wireless networked control systems without disturbance, a dynamic transmission strategy based on priority predictor is designed to reduce the impact of active packet dropout and improve the system performance. The strategy consists three parts: priority predictor, transmission regulator and controller: the priority predictor predicts the importance of each sensor data to the system stability in real time, so as to help the transmission regulator make decisions; On this basis, the transmission regulator designs reasonable dynamic transmission rules of sensing data to reduce the backoff time of high priority data and improve the backoff time of low priority data; The controller to ensure the stability of the system is further designed, and the effectiveness of the strategy is verified by numerical simulation.

(2) Aiming at the problem of active packet dropout in multi packet wireless networked control systems with external disturbance, the dynamic transmission

strategy based on priority predictor is improved, the anti-interference ability of the strategy is improved, and the influence of active packet dropout can be reduced under bounded disturbance. In order to deal with the interference, based on the above basic design, a predictor added with the prediction deviation estimator is designed. According to the historical window data, the prediction deviation of the predictor caused by external disturbance is estimated, and the sudden disturbance of the system is detected to ensure the robustness of the strategy. Under this improved strategy, the corresponding design method of H_∞ controller is given, and the effectiveness of the strategy is verified by numerical simulation.

KEY WORDS: wireless networked control systems, multi-packet transmission, active packet dropout, predictor, dynamic transmission

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
插图清单.....	VII
符号说明.....	IX
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 无线网络化控制系统的基本问题.....	2
1.2.2 多包无线网络化控制系统丢包问题研究现状.....	4
1.3 本文研究内容和组织架构.....	8
1.4 本章小结.....	9
第二章 无扰下主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计.....	11
2.1 问题描述.....	11
2.2 基于预测器的动态传输策略设计.....	13
2.2.1 优先级预测器设计.....	14
2.2.2 传输调节器设计.....	16
2.2.3 控制器设计.....	18
2.3 稳定性分析和控制器求解.....	19
2.4 数值仿真.....	21
2.5 本章小结.....	25
第三章 有扰下主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计.....	27
3.1 问题描述.....	27
3.2 有扰情况下基于预测器的动态传输策略设计.....	28
3.2.1 预测偏差估计器设计.....	30
3.2.2 优先级预测器设计.....	31
3.2.3 传输调节器设计.....	32
3.2.4 控制器设计.....	32
3.3 稳定性分析和控制器求解.....	33
3.4 数值仿真.....	37
3.5 本章小结.....	40
第四章 总结与展望.....	43

4.1 总结.....	43
4.2 展望.....	44
参考文献.....	45
致 谢.....	49
作者简介.....	50
1 作者简历.....	50
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	50
3 参与的科研项目及获奖情况.....	50
4 发明专利.....	50
学位论文数据集.....	51

插图清单

图 1-1 无线网络化控制系统应用场景	1
图 1-2 无线网络化控制系统的丢包、时延和乱序	3
图 1-3 多传感器采样传输的网络化控制系统结构图	4
图 1-4 传感器采样数据较大传输的网络化控制系统结构图	5
图 2-1 多包传输的无线网络化控制系统图	11
图 2-2 随机退避方式示意图	12
图 2-3 基于优先级预测器的多包无线网络化控制系统图	14
图 2-4 PBDT 策略设计思想	13
图 2-5 传统控制器下的系统状态轨迹图	22
图 2-6 PBDT 策略下的系统轨迹状态图	22
图 2-7 系统丢包情况示意图	23
图 2-8 无策略下的系统状态轨迹图	23
图 2-9 PBDT 策略下的系统状态轨迹图	24
图 2-10 李雅普诺夫函数导数指标下的 PBDT 策略	24
图 2-11 李雅普诺夫函数不同策略轨迹对比图	25
图 3-1 有扰多包传输的无线网络化控制系统图	27
图 3-2 PBDT 策略的改进思路	28
图 3-3 有扰多包无线网络化控制系统动态传输策略图	29
图 3-4 0.2 丢包率下无策略下的系统状态轨迹图	38
图 3-5 0.2 丢包率下 PBDT 策略的系统状态轨迹图	39
图 3-6 0.33 丢包率下无策略下的系统状态轨迹图	39
图 3-7 0.33 丢包率下 PBDT 策略的系统状态轨迹图	40

符号说明

\mathbb{R}	——	实数空间
\mathbb{R}^m	——	m 维实向量空间
$\mathbb{R}^{m \times n}$	——	$m \times n$ 维实矩阵空间
A^T	——	矩阵 A 的转置
A_{ij}	——	第 i 行第 j 列的元素
$P > 0$	——	P 为正定矩阵
I	——	单位矩阵
$\min(a, b)$	——	a 和 b 的最小值
$\max(a, b)$	——	a 和 b 的最大值

第一章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着计算机技术和无线通信技术的发展与成熟，以及远程控制和无人操控的应用越来越广泛，无线网络化控制系统（Wireless Networked Control Systems, WNCSs）在现代工业中越来越受欢迎。无线网络化控制系统一般是传感器、控制器、执行器、被控对象和无线网络组成的系统^[1-3]。与传统控制系统不同，无线网络化控制系统通过无线通信网络组成闭合的信息传输链路，其系统结构如图 1-1 所示。无线通信正逐步取代传统控制系统中的有线通信，无线网络化控制系统克服了传统控制系统的局限性，具有结构灵活机动、布线少和成本低以及方便维护等优点^[4]。这也使控制系统更容易实现和部署，从而产生了广泛的应用和广阔的前景，例如工厂自动化^[5]、智能电网^[6]、智能家居^[7]、无人设备控制^[8]等。因此，无线网络化控制系统的理论研究在当今的信息时代中具有十分重要的研究意义。

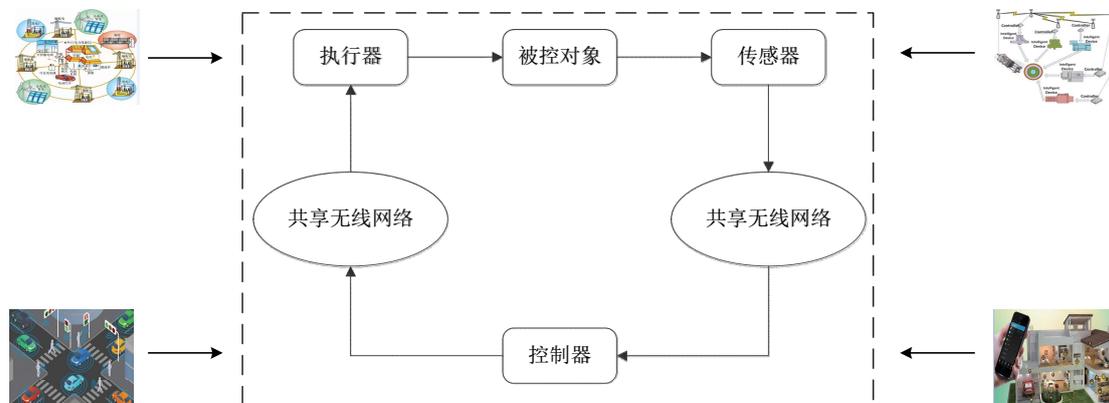


图 1-1 无线网络化控制系统应用场景

Figure 1-1. Application scenarios of Wireless network control systems

虽然无线网络化控制系统打破了一些传统控制系统的局限性，具有一定的优势，但是无线通信网络的引入也给控制系统的设计带来一些具有挑战性的问题。由于无线链路的不可靠性、网络易拥塞和通信信号易受影响等因素，加上将多包传输方式引入无线网络化控制系统中，常常会引发多包传输问题，常见的有数据包丢失、网络时延、数据包乱序和量化等问题^[9,10]，这些问题会在不同程度上影响控制系统的相关性能，严重时甚至可能会造成系统失稳的后果，于是这些问题受到了诸多研究学者的广泛关注。因此，多包传输问题成为了无线

网络化控制系统近几年来研究热点之一。

所谓多包传输是指每一步的传感数据或控制数据通过多个单独的数据包传输^[11]。多包传输的通信方式是无线网络化控制系统发展的必然产物。随着无线通讯技术和大规模网络化控制系统的应用,这种传输方式成为了近几年新的研究热点。无线网络化控制系统中“多包传输”的通信方式越来越普遍,尤其是在一些大型的分布式系统中,这通常是由于这些系统的传感器在地理位置上分布十分广泛,数据难以集成一个数据包进行发送。相比于网络化控制系统中传统的数据包丢失的情况,无线网络化控制系统中多包传输方式的丢包现象更为复杂,这使得先前研究处理丢包的方法并不能直接适用于多包传输的无线网络化控制系统,并且很多有意义的研究问题未充分地挖掘以及解决。

其中,多包无线网络化控制系统中部分数据包主动丢失的问题就是一个常见的问题^[12]。造成主动丢包问题的原因有:第一,是由于多包传输的无线网络化控制系统与传统的网络化控制系统相比,无线网络化控制系统中常常采用多包传输的通信方式;第二,是无线网络通信协议与有线网络通信协议大不相同,由于隐蔽站的问题无线网络通信协议增加了基于随机退避算法的冲突避免机制,同时这也占用了部分通信时间。传感器接入无线网络信道需要进行随机退避,这使得不同传感器数据接入信道都要随机等待一段时间才能发送;第三,无线网络通信速率容易受到信号强度等因素的干扰,因此相比有线网络通信方式传输速率更容易收到限制,在一定程度上增大了网络拥塞的概率。尤其对于实时性要求较高的控制系统,控制器或执行器收到过期后数据就会直接丢弃,正如使用 UDP 协议 (User Datagram Protocol, UDP) 的一些系统一样,它们更关注系统实时的数据,对于收到过大延迟的数据会直接丢弃。无线网络化控制系统因主动丢包所带来的问题也是工业控制网络、信息物理融合系统和物联网等领域要解决的问题之一,于是如何减小主动丢包对控制系统带来的影响成为了本文主要研究内容。综上所述,研究多包传输的无线网络化控制系统中主动丢包问题具有一定的理论意义和实际应用价值,且具有一定的挑战性。由于无线网络通信的特性,本文提出的策略对于其他因素造成的丢包也有一定的借鉴意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无线网络化控制系统的基本问题

自 1980 年以来,随着自动化技术和计算机科学的进步,出现了无线网络化控制系统。迄今为止,有大量的学者研究了无线网络化控制系统并做出卓越的贡献。随着无线网络化控制系统的广泛使用,其面临的问题也随之出现。例如,丢包、网络诱导的时延、数据包乱序等多包传输问题广泛存在于网络化控制系统中,其具体的问题细节如图 1-2 所示。接下来将对以上提到的问题分别进行讨

论和分析。

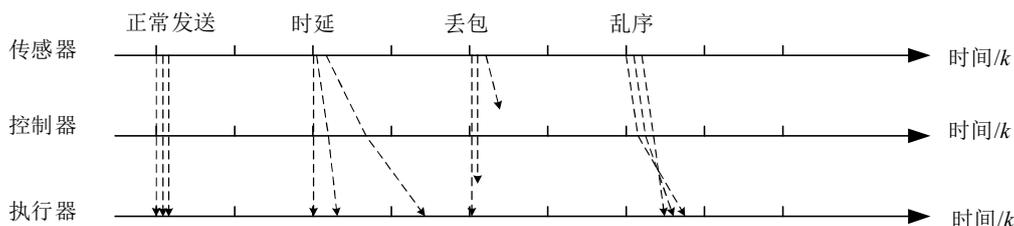


图 1-2 无线网络化控制系统的丢包、时延和乱序

Figure 1-2. Packet dropout, transmission delay and packet disorder of WNCSS

在无线网络化控制系统中，数据包丢失主要由有限的网络带宽，通讯网络阻塞以及数据碰撞等原因引起的^[13]。在无线通信网络中，高频的周期性采样不可避免地给网络带来沉重的负担，可能导致网络拥塞，通信网络的有限比特率通常会导致网络诱导的时延；当多用户竞争地接入信道时，以及数据包在传输时收到一些不确定的因素引起数据包的丢失，例如，信道的衰减，外界的干扰以及多普勒频移等^[14]。通常有两种类型的数据包丢失，即网络导致的数据包丢失和主动丢包。当网络处于某些恶劣的环境条件下，由通信网络因素导致的数据包丢失较为常见，例如，网络流量过载、通信网络中发生传输超时和传输错误时，即使网络协议配备了传输重试机制，也可能发生数据包丢失的现象。数据包丢失是在通信途中发生的，可称为“网络导致的数据包丢失”。另一种是因为系统对数据的实时性要求较高，而一些数据包因较大的传输时延不能满足系统的实时性，系统丢弃这种过期的数据包称为主动丢包^[15]。主动丢包在某些情况下，同时发送的数据包有些较晚到达时，传输过程中过长的延迟意味着数据包无法满足控制系统对实时性的需求在远程游戏等对实时性要求高的场景下较为常见。

网络诱导的时延主要是在无线网络化控制系统运行时，数据的传输受网络带宽以及外部环境的影响而导致的。时延可以是恒定的、随机的、有界的或不确定的。网络诱导的时延由传输时延、信息处理时延、排队时延、数据处理与计算时延四种时延组成^[16-18]。其中，排队时延是影响网络时延大小的主要原因，传输时延是指系统的节点进行数据处理的过程中所消耗的时间。信息处理时延是指发送端将数据信息封装成数据包以及进入排队序列所花费的时间。排队时延指从数据产生到开始进行传输所需要的时间，节点产生数据包后可能需要等待一段时间，即在发送队列中等待早到的数据包处理完成。数据处理与计算时延是指系统节点对数据进行采样，编码和量化等处理中所花费的时间。

数据包乱序是指数据包发送顺序与接收顺序不同的现象。主要原因是网络时延可能大于一个系统采样周期，数据包从节点先后发出，可能会有多个数据包到达执行器端，先发送的数据包由于延迟较长，导致其到达接收端的时间落

后于后发送的数据包^[19]。在无线网络化控制系统中，一般采取主动丢包的方式处理数据包乱序的现象。此外，在无线网络化控制系统中，信号在通过通信网络传输前要经过量化器量化，但由于字长是有限的，不可避免的会发生量化误差，对控制系统产生一定的负面影响。为了克服上述描述的这些挑战，本领域的许多学者已经做出了巨大的努力和贡献，并且各种控制理论和技术已经被应用 NCS，例如，NCS 鲁棒控制理论^[20-22]，预测控制^[23-25]，基于马尔可夫跳变系统的方法^[26-29]，以及通信与控制之间的联合设计方案^[30-32]等。

1.2.2 多包无线网络化控制系统丢包问题研究现状

伴随着无线通信技术的飞速发展，控制系统的规模逐渐扩大，系统中传感器的数量越来越多，从而形成了多包无线网络化控制系统。形成这类系统的原因主要有以下两个^[33]：

(1) 无线网络传输的方式越来越普遍，大型系统中含多个具有单一功能的传感器，因为多个无线传感器地理因素分布较为广泛^[34]，这些传感器难以把采集到的各部分的采样信息汇集并整合成单个数据包去传输，如图 1-3 所示。这也是本文考虑的地理上分散的多个无线传感器采样系统产生的多包传输问题。

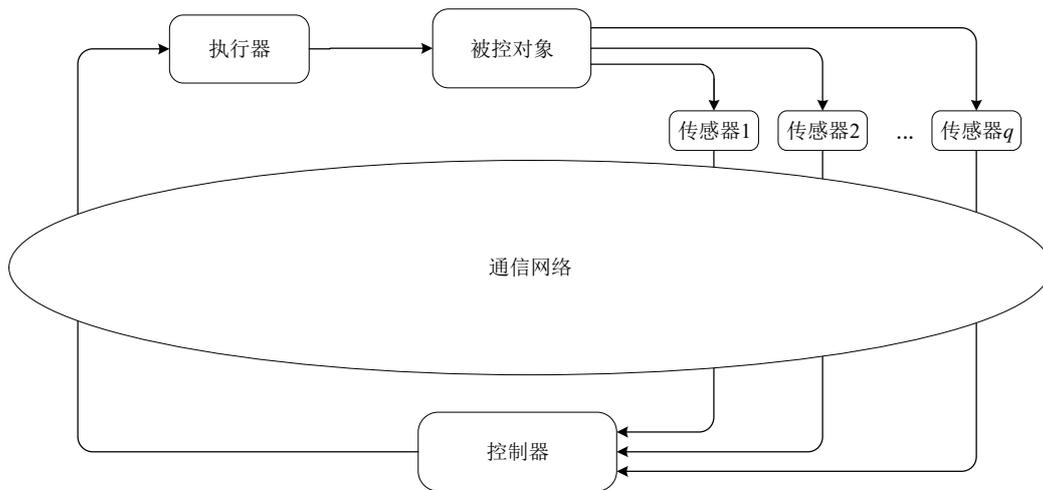


图 1-3 多传感器采样传输的网络化控制系统结构图

Figure 1-3. Structure diagram of networked control systems for multi-sensor sampling

(2) 在网络化控制系统中，当控制器或传感器节点的待处理数据超出网络的允许范围时，必须按照一定的规则将数据打包成多个数据包分别传输。在早些年间这种情况时有发生，但在如今的实际无线网络情况下，这种现象出现的可能性十分小，如今大多数协议已经允许发送的足够大的数据包。例如，无线局域网 IEEE 802.11 协议如今提供的最大数据域为 2296 字节，已经远远大于传感器的单个数据包的大小。以上两种情况均称为“多包传输”，如图 1-4 所示。

随着大规模控制系统的发展需求，多包传输无线网络化控制系统成为分布

式无线网络化控制系统和大规模无线网络化控制系统的必然需求，例如在电力系统、化学工艺、污水处理等工业生产中应用广泛^[35]。多包传输的方式带来了诸多便利，随之而来的丢包问题也成为无线网络化控制系统的研究热点问题之一。无线网络化控制系统的丢包问题是指在多包传输的无线网络化控制系统中，传感器把采样得到的传感数据包全部通过无线网络发送，而控制器端只收到了部分的传感数据包，或只有部分的控制信息到达执行器端，通常数据包在传输途中丢失造成的原因较为常见，而另一种因数据时延过大不能满足系统的实时性，导致系统主动丢弃过时无用的数据，这也是一个不可忽略的问题。

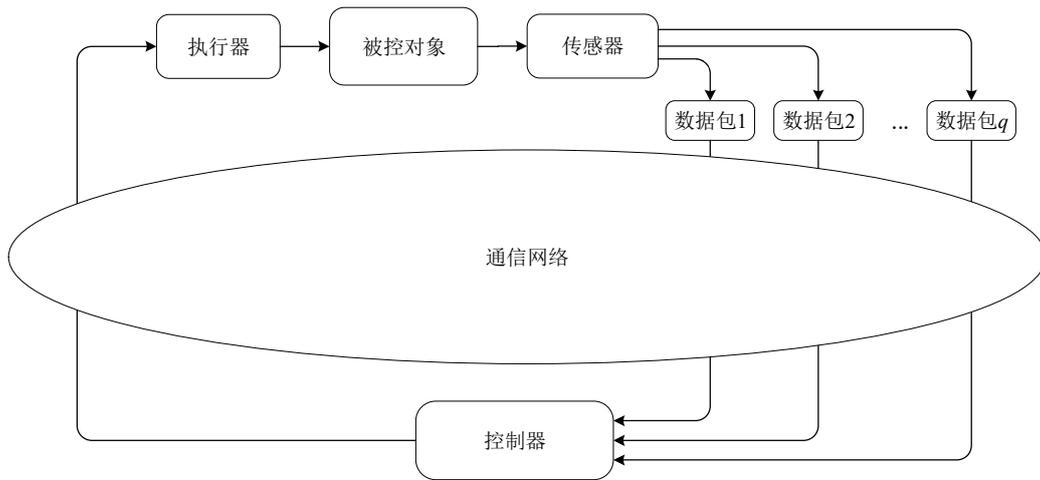


图 1-4 传感器采样数据较大传输的网络化控制系统结构图

Figure 1-4. Structural diagram of networked control systems with large transmission of sensor acquisition data

首先介绍一下无线网络化控制系统中单数据包丢失的研究现状，因为某些单数据包丢失问题是解决多包丢包的基础。单数据包丢失问题也是网络化控制系统中备受关注的重要问题之一。最早处理丢包的方法是研究人员研究数据包丢失对无线网络化控制系统的影响，传统的处理方法是用上一时刻的值或用数值 0 来代替^[36]，但这种方法具有一定的保守性。后来其中最常见的是利用随机系统，将无线网络化控制系统的丢包过程建模为伯努利过程和马尔可夫链，进一步对控制系统进行分析和设计。例如，文献[37]分别将传感器到控制器通道以及控制器到执行器通道的丢包过程建模为伯努利过程，来研究系统丢包率和系统性能之间的关系，是用于提高系统稳定性的有效手段之一，该文献给出了无线网络化控制系统处于丢包下的最优控制器设计方法；文献[38]在文献[37]的基础上，考虑双通道存在丢包的网络化控制系统，同样基于随机伯努利建模的方法建立了丢包模型，并提出了一种鲁棒滑模控制算法，这种方法能有效减弱双通道丢包对系统性能的影响。文献[39]通过马尔可夫跳变线性系统的方法研究了多个马尔可夫丢包通道上的状态估计问题；文献[40]针对丢包情况将系

统建模为由四个子系统组成的切换系统，利用平均驻留时间技术，得到系统指数稳定的充分条件，并建立丢包率与系统性能之间的关系。文献[41]采用了预测补偿控制策略，有效地解决了数据丢失、时延导致的统性能下降问题，给出了一种数据丢失和时延情况下的滤波及融合算法。文献[42]对控制器两侧同时存在丢包的网络化控制系统的状态估计问题进行了研究，提出了一个新的滚动时域估计器来处理丢包带来的不确定性问题。文献[43]中考虑了有限随机丢包和信道不确定性的系统的控制器设计问题。如今，大量研究人员对无线网络化控制系统的数据包丢失问题有了大量有效的控制方法。

尽管取得了上述的成就，但是大多数用于单数据包丢失的方法并不直接适用于多包传输的研究中。在先前丢包问题研究中，对多包传输的丢包问题有了一定的探索，最常见的处理多包丢包的方法也是基于随机伯努利过程或将其建模为马尔可夫链。文献[44]和文献[45]讨论分析了出现多包传输的几个原因，并指出丢包是多包传输中重要的问题。在文献[46]中，同时考虑了丢包和系统稳定性的因素，指出了无线网络化控制系统丢包问题的发展方向。在文献[47]中提出了 WNCS 中单数据包和多数据包丢失的状态和描述方法，然后介绍了一种应用的补偿和控制方法，其中包括数据丢失补偿器、丢失实时修复和改进。在文献[48]中通过将丢包过程建模为马尔可夫链并给出了随机稳定性条件并设计了控制器增益；文献[49]将丢包过程建模为相互独立的伯努利过程，并设计了状态反馈控制器。

以上这些研究已经明确地考虑了多包传输的独特特征，但是它们中的大多数都集中在控制器方面，而忽略了通过主动补偿丢失的部分数据来改善系统性能的可能性。文献[50]在基于包的网路控制框架下，针对多包传输的负面影响，采用基于包的控制方法，对控制器端的传感数据进行重构，并对通信约束进行补偿，从而有效地解决了这个问题。文献[51]基于文献[50]的基础上，通过状态重构方法对丢失的部分丢失信息进行重构，进一步分析了闭环系统的随机稳定性。在此基础上，文献[52]又考虑到了重建的系统状态和实际观察到的系统状态的准确度是不同的，将系统设置转换为切换系统，对重构部分和系统状态的最新接收部分，分别设计了反馈增益。文献[53]提出一种新的交换线性系统模型来描述具有网络诱导的时延和丢包的网络化控制系统，在此模型下推导出了指数稳定性的充分条件，并给出了丢包率与网络化控制系统稳定性的定量关系。文献[54]研究了网络引起的时延和丢包下的稳定性问题。为了处理完整的状态向量不可全部获取的问题，构建了基于预测观测器的控制器设计方法，解决了此类情况下的相应的控制器设计问题。文献[55]提出了一种利用基于 EWMA（指数加权移动平均线）的估计器的补偿技术，以表示数据包丢失对整体无线网络化控制系统行为的影响，并用实验仿真验证了所提估计方法相对于以往方法的优越性。文献[56]同时考虑了多包无线网络化控制系统的时延和丢包问题，

该文献给出了均方稳定性的充分条件，同时设计了相应的状态反馈控制器，并结合 CSMA-CA 协议，给出一种参数值设定的方法。文献[57]推导出了在丢包情况下，保持系统渐进稳定性下连续数据包丢失的最大允许次数。文献[58]研究了时延和数据丢失同时发生的多包无线网络化控制系统的均方稳定性问题。由于随机控制的特性，此类网络化控制系统的随机控制稳定仍然具有挑战性。首先，我们根据延迟依赖性代数里卡提方程（DARE）或延迟依赖性李雅普诺夫方程（DLE）的唯一正解，提出了必要稳定条件和充分的稳定条件。其次文献还给出了如何使用优化算法计算最大丢包率。最后，文献研究了 DARE 的存在稳定解的条件和存在唯一稳定解的条件，并用 Lyapunov 算子和不可观测的均方特征值来显示存在条件，文献指出了在此条件下，一般 DARE 具有唯一的稳定解。文献[59]研究了网络化非线性控制系统，并存在传感器到控制器和控制器到执行器通道中都有随机数据包丢失，利用基于数据包的传输、时间戳技术以及智能传感器和执行器等网络化控制系统的特点，提出一种基于数据的网络化预测控制（DBNPC）方法，主动补偿双通道丢包，其中只需要非线性系统输入和输出数据，给出了闭环系统的稳定性设定了充分条件。文献[60]在文献[59]基础上，提出了针对非线性系统的基于数据的网络控制问题。该文献把网络通信中的约束重新定义为往返时间（RTT）时延。利用基于数据包的传输机制和自适应控制算法，提出一种基于数据的网络化预测控制方法，对随机 RTT 时延进行主动补偿。该文献所提出的方法不需要任何关于系统模型的信息，仅依赖于系统的输入和输出数据，并给出了稳定性与 RTT 时延上限关系。文献[61]针对多包无线网络化控制系统的随机丢包问题，提出一种改进的模型预测跟踪控制方法。在所提出的控制策略中，引入了一种新的状态空间模型。基于改进的状态空间模型，与传统的模型预测控制方法（MPC）作为比较，证明了所提策略有更好的控制性能。文献[62]研究了丢包对多包传输无线网络化控制系统的影响，提出了基于 EDF 调度算法，提高了传统调度算法对改善丢包影响的效率。文献[63]基于马尔可夫跳变系统，证明了存在丢包的多包无线网络化控制系统的均方二次稳定可以转化为等效不确定系统的鲁棒稳定。提出了一种线性矩阵不等式的最优量化器/控制器设计方法。

大量的学者也研究了如何通过传输策略提高数据传输成功率减小丢包给系统带来的影响，文献[64]在有无线网络中，基于通过传输同一数据的多个副本，可以显著提高数据成功的概率的基础理论。其通过动态地分配相同数据传输副本数量的传输策略，并将其应用到通信协议中，以提高网络控制系统的控制性能，而传输的总数量只会略有增加。本质上其使用了平均代价最优性准则，得到了一系列适用于不同计算能力网络的最优策略，即动态地复制副本的传输策略，期望达到稳定性或者估计性能与通信速率的平衡。与文献[64]类似，文献[65]其考虑在有丢包网络的网络控制系统中，其通过独立信道动态地分配相同

数据传输副本数量的传输策略，并将其应用到通信协议中，结果表明可以显著提高控制性能，而传感器数据传输的总数量只会略有增加。同时其还分析了当多个节点使用此传输策略时，网络竞争下的稳定性结果。文献[66]考虑传感器的测量数据需要经通信网络传输过程中，可能因为有限的网络带宽导致数据发生碰撞与拥堵，导致丢包问题的出现，进而可能会影响系统的估计性能。该文献以网络化控制系统为研究对象，在通信带宽受限的条件下，分别分析了几类数据传输调度策略，进而降低丢包现象发生的可能性。并且研究几类数据传输策略下的网络化系统状态估计方法。并且基于李雅普诺夫稳定性理论及线性矩阵不等式技术，设计了切实可行的状态估计器。与文献[66]的研究方向相似，文献[67]考虑如何合理设计网络控制系统并结合数据传输策略以应对时延和丢包对控制性能的影响，研究了基于信息新鲜度的网络控制系统，设计了数据传输过程中的静态链路调度策略对其进行优化，在传输功率受约束的情况下有效降低系统中断概率和控制成本。

1.3 本文研究内容和组织架构

本文针对多包无线网络化控制系统的主动丢包问题展开研究，按照无外部扰动和有外部扰动两种情况分别对系统进行相应的分析和设计，并提出了相应的数据传输策略。具体创新性体现为：

(1) 以往的研究大多未涉及到数据对于系统稳定性的重要性标准，本文以此为出发点，提出了一种数据对系统稳定性的标准；

(2) 本文结合通信协议从数据传输的角度减小丢包对无线网络化控制系统的影响，而非仅仅从控制角度对丢包进行补偿；

(3) 本文所提出的策略中，传输调节器等距地补偿随机退避时间，策略几乎不会改变丢包率，即策略不会增加无线网络信道资源的占用，策略的实现与应用可以集成到特定的通信协议或者通信硬件。因此本文研究也具有较强的实际应用意义。

本文整体结构如下：

第一章：绪论。首先介绍了无线网络化控制系统的研究背景和重要性，引出本文要研究的问题，然后简要概括了国内外关于多包无线网络化控制系统丢包问题的相关研究现状；最后，给出了本文的章节架构和组织安排。

第二章：针对无外部扰动下的多包无线网络化控制系统，考虑因无线网络拥塞而主动丢包的问题，设计了一种基于预测器的动态传输策略，确定了数据对系统性能得重要性，并且等距地分配退避时间，来减小系统主动丢包对系统性能的影响。并且给出了控制器的设计方法，最后，通过数值仿真证明了上述策略的有效性。

第三章：研究了受外部扰动的多包无线网络化控制系统的主动丢包问题，首先采用偏差估计器估计下一时刻的预测器偏差，并检测扰动的突变，配合优先级预测器和传输调节器完成动态传输策略。同时给出了控制器的设计方法，最后，通过数值仿真验证了本文策略在受外部扰动下的有效性。

第四章：结论与展望。总结全文工作，并展望未来可发展的方向。

1.4 本章小结

本章首先介绍了基于多包传输的无线网络化控制系统的背景，引出了本文研究问题及其研究意义。然后介绍了无线网络化控制系统的研究现状，其中简要概述了无线网络化控制系统中常研究的丢包、时延和数据包乱序等问题；接着介绍了多包无线网络化控制系统及其丢包问题的研究现状，并总结了控制系统相关数据传输策略；最后简要介绍了本文的研究内容以及文章的组织架构。

第二章 无扰下主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计

通过第一章中对问题背景的介绍，我们已经了解到无线网络的信道资源有限性是造成无线网络化控制系统主动丢包的重要原因。本章针对无线网络信有限性导致无线网络化控制系统产生主动丢包的问题，从无线网络通信协议出发，设计了基于预测器的动态传输策略，减少系统受主动丢包的影响。具体而言：通过设计合理的传感器动态传输规则，降低高优先级数据的退避时间上限，提高低优先级数据的退避时间上限，使对系统更重要的数据优先传输。最后，在上述基础上，设计相应的状态反馈控制器保证系统稳定性。

2.1 问题描述

本章所考虑的具有多个无线传感器采样的无线网络化控制系统，如图2-1所示，其中控制器到执行器端可靠传输数据，而传感器到控制器之间的无线网络通信采用多包传输的方式，即： n 个独立的传感器单独采样于被控对象，通过通信通道独立发送传感数据到控制器端，控制器根据收到的传感数据信息计算出相应的控制量发送给执行器，并作用于被控对象。

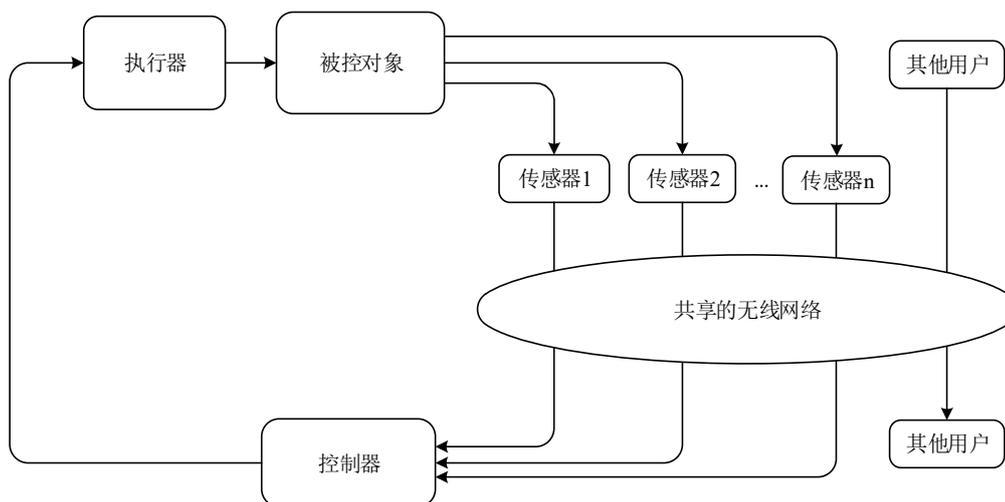


图 2-1 多包传输的无线网络化控制系统图

Figure 2-1. Diagram of WNCSSs for multi-packet transmission

图 2-1 的系统模型可被描述为线性离散系统：

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

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 分别为控制输入别为控制系统的系统状态和控制输入， $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是适应维数的常数矩阵。

可将每个传感器采集到的状态信息记为：

$$x(k) = [x^1(k), x^2(k), \dots, x^n(k)]^T \quad (2-2)$$

其中， n 为传感器的数量。

在图 2-1 中，传感器到控制器通过无线网络竞争地发送数据到控制器端，假设所有传感器使用同一信道。但由于无线网络与其他应用或用户共享，传感数据接入信道很可能造成信道拥塞。假设无线通信网络不能完美地传输所有数据，有一些传感器数据要经过较大延迟后，控制器端才能收到，系统会主动丢弃超过一个系统采样周期才收到的数据。具体而言，传感器数据是因为其等待时间 t_w 过长，从而导致其数据无法在一个系统采样周期内传输到控制器。而决定传感器数据能否及时发送的一个关键，是以随机退避的方式来竞争信道时所分配的随机退避时间的大小，拿常见的通信标准 IEEE 802.11 来说，它使用带有冲突避免的载波侦听多路访问（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid, CSMA/CA）协议，由于无线网络通信中特有的“隐蔽站”问题，为了避免发送数据的碰撞，CSMA/CA 协议规定了接入信道时，站点会随机分配退避时间。如图 2-2 所示，可看作为四个传感器 A、B、C 和 D，若传感器的退避时间（图中黑色部分）越长，其发送数据所等待的时间越久，反之，则等待时间越短。图 2-2 中传感器 C 随机退避时间最长，传感器 D 的随机退避时间最短。因此，相比传感器 D 而言，传感器 C 要经过更长的等待时间才能开始发送，对于系统来说传感器 C 的采样数据发送主动丢包的概率是最大的。

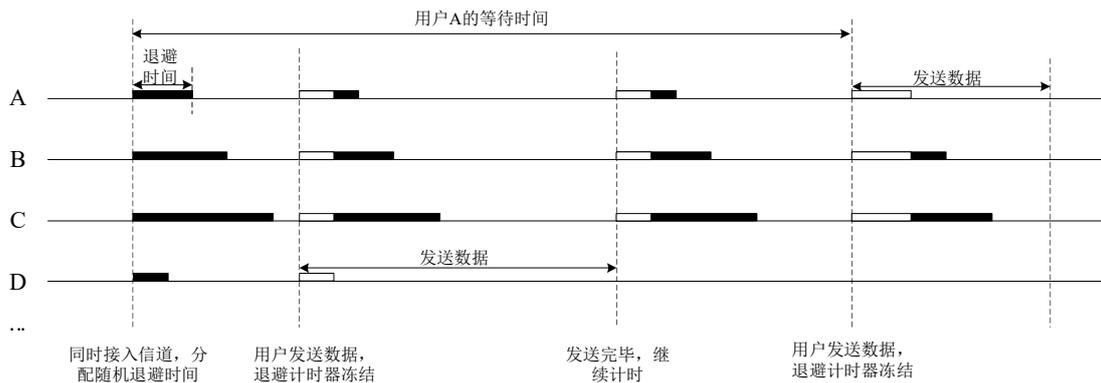


图 2-2 随机退避方式示意图

Figure 2-2. Schematic diagram of random backoff mode

在本章中将仅考虑只有主动丢包情况的多包无线网络化控制系统。本文假设分析使用的无线网络系统规模比较小以及实时性比较高，并且受其传输能力的限制，所以丢包是研究的主要问题，系统采样周期内的小时延本文忽略不计。

在无线网络化控制系统其他环节里使用的有线网络可当作完美传输处理。而在传感器到控制器之间的数据包传输中，因为通信信道中存在着通信资源受限的情况，并非所有的采样数据都能成功到达控制器端，在此传输过程中会发生部分数据包主动丢失的现象。假设每个传感数据在传输过程中发生的丢包现象相互独立，且丢包过程服从独立的伯努利分布，则可用 α_k^i 来描述 k 时刻传感器 r 的数据是否传输成功：

$$\alpha_k^r = \begin{cases} 1, & x^r(k) \text{ 传输成功} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-3)$$

其中， $r=1,2,\dots,n$ 表示传感器的编号， $x^r(k)$ 表示 k 时刻传感器 r 的采样数据， α_k^i 是 k 时刻传感器 r 的数据是否传输成功的权重。

2.2 基于预测器的动态传输策略设计

本节针对共享无线网络中的主动丢包的无线网络化控制系统设计了 PBDT (Predictor Based Data Transfer, PBDT) 策略，在 PBDT 策略设计思想中，如图 2-3 所示，我们期望得到某时刻传感器数据对系统稳定性的重要性指标，然后以此重要性指标为依据确定传感器数据对系统的重要性，数据重要性越高对应的传感器传输优先级应越高。设计中数据的重要性应是优先级预测器来给出，越重要的数据对应其传输的优先级越高，具体传输的细节应由传输调节器来执行优先级分配。

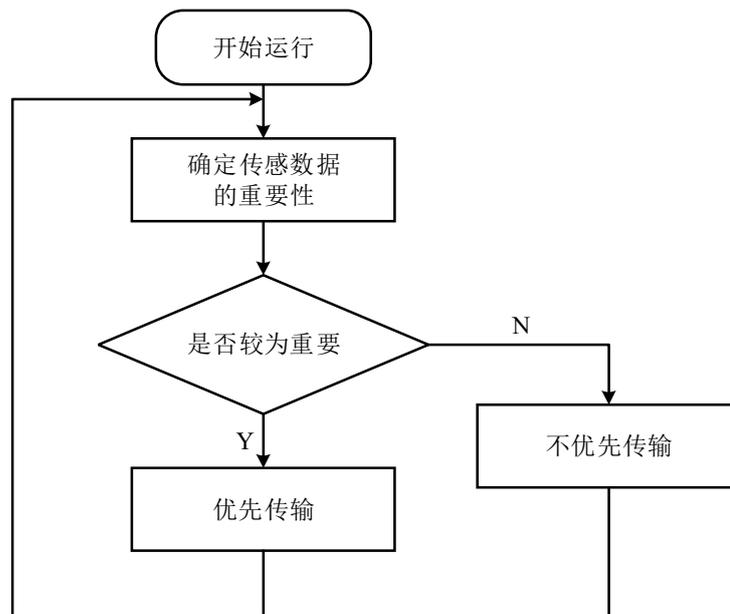


图 2-3 PBDT 策略设计思想
Figure 2-3. PBDT strategy design idea

依据上述思想，本文 PBDT 策略的主要思路如下：1) 为了尽可能的减少主动丢包对系统所造成的负面影响，本节设计优先级预测器，在当前时刻预测下一时刻各传感器数据对系统的重要性，从而设定不同传感器的传输优先级，帮助传输调节器进行决策；2) 设计合理的传感器动态传输调节规则，降低高优先级数据的退避时间上限，提高低优先级数据的退避时间上限，让对系统更重要的数据优先传输，并在此前提下，不增加总的退避时间；3) 在上述的基础上，设计合适的状态反馈控制器来保证闭环控制系统的稳定性。根据上述思路，分别设计了优先级预测器，传输调节器和控制器，如图 2-4 所示。接下来，本文将分别对这三个部分做详细的说明。

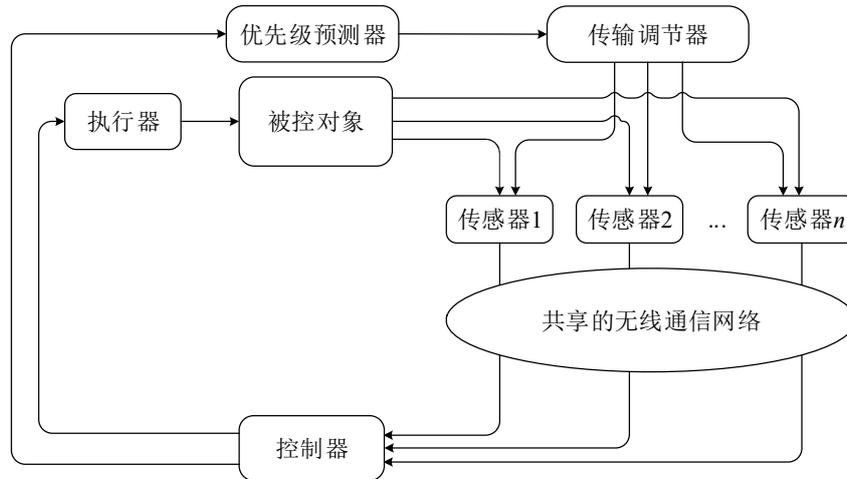


图 2-4 基于优先级预测器的多包无线网络化控制系统图

Figure 2-4. Diagram of wireless networked control systems for multi-packet transmission based on priority predictor

2.2.1 优先级预测器设计

各个传感器对被控对象进行采样后，在传输过程中会独立地发生丢包现象，控制器端将可能收到部分的状态信息，控制器在 k 时刻也可能只获得部分的状态信息，可记为 $\Theta_k x(k)$ 。所以，系统的控制输入可记为：

$$u(k) = K\Theta_k x(k) \quad (2-4)$$

其中，

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} \alpha_k^1 & & * \\ & \alpha_k^2 & \\ & & \dots \\ * & & \alpha_k^n \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Θ_k 为 k 时刻系统传感数据是否成功收到的权重矩阵。控制器把收到的信息转发到优先级预测器，所以，在 $k+1$ 时刻系统状态为：

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Theta_k u(k) \quad (2-6)$$

引理 2-1^[68]: 对于稳定的离散系统, 如果存在一个标量函数 $V(x(k))$ 满足:

$$\begin{cases} V(x(k)) > 0 \\ \Delta V(x(k)) = V(x(k+1)) - V(x(k)) \leq 0 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} V(x(k)) \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2-7)$$

则系统(2-6)满足大范围渐近稳定, 且满足条件的标量函数为系统的李雅普诺夫函数。

引理 2-1 给出了李雅普诺夫函数的差分函数与系统稳定性之间的关系。线性离散系统满足大范围渐近稳定的情况下, 若在 k 时刻传感器 r 的数据丢失, 使 $\Delta V(x(k))$ 变大, 则可能导致系统失稳, 进而说明系统稳定性越依赖于 $x^r(k)$ 。

在线性系统中, 每个传感器数据对系统的控制作用满足叠加性:

$$x(k+1) = Ax(k) + BK(\Lambda_1 + \Lambda_2 \dots + \Lambda_n)x(k) \quad (2-8)$$

其中 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n$ 均为对角矩阵, 且其加和为单位矩阵, 满足:

$$(\Lambda_r)_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j = r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-9)$$

优先级预测器在 k 时刻计算 $k+1$ 时刻传感器 r 的数据丢失对系统的影响。定义 $\tilde{u}^r(k+1)$, 其表示在传感器 r 数据丢失时的系统控制输入, 如下:

$$\tilde{u}^r(k+1) = K\Gamma(r)x(k+1) \quad (2-10)$$

其中, $\Gamma(r) \in \Lambda^{n \times n}$, $\Gamma(r)x(k+1)$ 表示在 $k+1$ 时刻传感器 r 的数据丢失,

$$\Gamma_{ij}(r) = \begin{cases} 1, & i = j \neq r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-11)$$

进一步的, 优先级预测器计算受 $k+1$ 时刻传感器 r 数据 $x^r(k+1)$ 丢失影响的系统状态 $\tilde{x}^r(k+2)$, 所以有:

$$\tilde{x}^r(k+2) = Ax(k+1) + BK\Gamma(r)x(k+1) \quad (2-12)$$

定理 2-1: 若离散系统 (2-6) 在线性反馈控制输入 $u(k) = Kx(k)$ 下能够保持稳定, $V(x(k))$ 是系统的一个李雅普诺夫函数,

$$V(x(k)) = x^T(k)Px(k) \quad (2-13)$$

其中, P 是正定对称矩阵, 当 $h(k+1, r)$ 值越大时, 若 $k+1$ 时刻传感器 r 数据丢失, 系统的稳定性越差。

$$h(k+1, r) = (BK\Gamma(r)x(k+1))^T P(2A + BK\Gamma(r))x(k+1) \quad (2-14)$$

证明: 根据李雅普诺夫大范围稳定定理 $\Delta V(x(k))$ 决定了系统的收敛速度, 其值越小则表明系统稳定性越好。

$$\Delta V(k) = V(x(k+1)) - V(x(k)) \quad (2-15)$$

在 $k+1$ 时刻系统 $x^r(k+1)$ 发生丢包，其他数据传输成功的情况下， $k+2$ 时刻李雅普诺夫函数为：

$$V(\widetilde{x}^r(k+2)) = (\widetilde{x}^r(k+2))^T P(\widetilde{x}^r(k+2)) \quad (2-16)$$

进一步有，

$$\Delta \widetilde{V}^r(x(k+1)) = V(\widetilde{x}^r(k+2)) - V(x(k+1)) \quad (2-17)$$

则 $k+1$ 时刻传感器 r 发生丢包对系统收敛速度的变化有：

$$\begin{aligned} & \Delta \widetilde{V}^r(x(k+1)) - \Delta V(x(k+1)) \\ &= V(\widetilde{x}^r(k+2)) - V(x(k+1)) - (V(x(k+2)) - V(x(k+1))) \\ &= x^T(k+1)(A+BK\Gamma(r))^T P(A+BK\Gamma(r))x(k+1) \\ & \quad - x^T(k+1)(A+BK)^T P(A+BK)x(k+1) \\ &= x^T(k+1)A^T PBK\Gamma(r)x(k+1) + x^T(k+1)A^T PAx(k+1) + \\ & \quad x^T(k+1)\Gamma^T(r)K^T B^T PAx(k+1) + x^T(k+1)\Gamma^T(r)K^T B^T PBK\Gamma(r)x(k+1) + c \\ &= (BK\Gamma(r)x(k+1))^T P(2A+BK\Gamma(r))x(k+1) + c \\ &= h(k+1, r) + c \end{aligned} \quad (2-18)$$

其中， $c \in R$ 为任意常数。

定理 2-1 表示， $h(k+1, r)$ 越大时， $k+1$ 时刻由传感器 r 丢失对系统稳定性破坏越大，传感器 r 在 $k+1$ 时刻重要性越高。综上，定理 2-1 得证。

本章设计的优先级预测器如下：

$$J(r, k+1) = \text{sort}\{h(k+1, r) \mid r = 1, 2, \dots, n\} \quad (2-19)$$

其中， $\text{sort}(\cdot)$ 表示从大到小的排序，即最大值排名为 1，最小值排名为 n 。则 $J(r, k+1)$ 为优先级预测器给出的 $k+1$ 时刻传感器 r 的传输优先级。

定理 2-1 表明， $k+1$ 时刻传感器 r 数据的重要性不仅与控制量有关，还与开环输出有关。仅仅根据控制量变化来预测传感器数据的优先级，效果可能不够理想；

备注 2-1： 关于 $x^r(k)$ 对系统的重要性，有学者提出 $\frac{\partial V(x(k))}{\partial x^r(k)}$ 作为标准，但是，若使用 $\frac{\partial V(x(k))}{\partial x^r(k)}$ 作为系统优先级指标，当数据丢失时，其变化方向可能为正也可能为负：当数据大于零时，数据丢失造成的变化方向是负的，反之当数据小于零时，数据丢失导致的变化方向是正的。由此李雅普诺夫函数变化方向也是不定的，进而某些时刻性能可能会下降，具体效果在第 2.4 节中给出，所以本文使用李雅普诺夫函数的差分函数为基准设计重要性指标。

2.2.2 传输调节器设计

假设 2-1： 传感器 r 以随机退避的方式接入无线网络信道时，信道已发生拥

塞，传感器 r 需要随机等待一段时间 t_w 后才能发送数据。对于系统的等待时间有：

$$0 < t_w = t_\tau + t_{tr} + t_{ISF} + t_{other} < t_w^{\max} \quad (2-20)$$

其中 t_w 称为随机等待时间， t_τ 表示随机退避时间， t_{tr} 表示等待其他数据传送的时间， t_{ISF} 表示数据帧间的间隔引起的等待时间， t_w^{\max} 表示随机等待时间上限， t_{other} 表示 t_w 包含的其他因素造成的等待时间。通常在一次通信过程中， t_τ 的增大也会几乎线性地引起 t_{tr} 、 t_{ISF} 和 t_{other} 的增大，即 t_τ 、 t_{tr} 、 t_{ISF} 和 t_{other} 的变化近似满足线性关系，进一步有：

$$t_w = \lambda t_\tau \quad (2-21)$$

其中， $\lambda > 1$ ， $\lambda \in \mathbb{R}$ 为退避时间系数。

假设 2-2: 通常随机退避时间 t_τ 是在随机退避时间上限 t_τ^{\max} 内随机取值，所以随机退避时间满足如下平均分布：

$$t_\tau \sim U(0, t_\tau^{\max}) \quad (2-22)$$

进一步地，由于网络资源受限导致的系统发生主动丢包，对于系统在随机退避方式下的传输成功率有：

$$\Pr(\alpha_k^r = 1) = \Pr(t_\tau < T) = \min\left(\frac{T}{t_w^{\max}}, 1\right) \quad (2-23)$$

其中， T 为系统采样周期。

从系统角度看，系统主动丢包概率取决于随机等待时间 t_w 的上限 t_w^{\max} ，而通信协议规定的随机退避时间上限 t_τ^{\max} 又由公式(2-21)决定了 t_w^{\max} ，所以传输调节器需要对不同传感数据的 t_τ^{\max} 进行随时间的动态分配。

对每个传感器根据式(2-19)和式(2-23)设计等距地补偿随机退避时间上限规则，本文期望 PBDT 策略分配退避时间上限后满足：1) 相邻优先级的传感器其等待时间上限的差相等，也就是说等待时间上限和传感器数据发生优先级是线性关系；2) 同时期望优先级最高的数据传输成功期望为 1，即最高优先级的传感器的随机等待时间上限等于系统采样周期；3) 并且优先级最高的传感器和优先级最低的传感器，它们随机等待时间上限的加和在调节随退避时间上限后不变。设计为以上规则的目的是希望施加 PBDT 策略前后总体的等待时间上限不发生改变，达到 PBDT 策略几乎不会额外增加信道资源占用的目的，且能够依据传输优先级对不同优先级的传感器丢包率有一定的补偿，优先级高的传感器可以获得更少的等待时间，反之优先级低的传感器则会增加其随机等待时间。则 r 传感器数据在 k 时刻分配后的等待时间上限 $\widetilde{t}_w^{\max}(k, r)$ 有：

$$\tilde{t}_w^{\max}(k, r) = t_w^{\max} + \frac{2(t_w^{\max} - T)}{n+1} \left(J(k, r) - \frac{n+1}{2} \right) \quad (2-24)$$

根据式(2-21)对传感器 r 的退避时间上限 \tilde{t}_τ^{\max} 的设置如下，则传输调节器调节的随机退避时间上限可表示为：

$$\tilde{t}_\tau^{\max}(k, r) = \frac{\tilde{t}_w^{\max}(k, r)}{\lambda} \quad (2-25)$$

则根据式(2-24)，系统依据优先级分配随机退避时间上限后，有新的丢包率与新的随机等待时间上限：

$$\Pr(\tilde{\alpha}_k^r = 1) = \min\left(\frac{T}{\tilde{t}_w^{\max}(k, r)}, 1\right) \quad (2-26)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^n \tilde{t}_w^{\max}(k, r)}{n} = t_w^{\max} \quad (2-27)$$

公式(2-27)表明系统采用动态随机退避时间上限后，系统平均等待时间上限不会增加，这说明 PBDT 在低丢包率下，几乎不会增加系统的信道资源占用，而在高丢包率下，系统可能会额外占用一些通信资源。

2.2.3 控制器设计

对系统闭环系统(2-6)，采用线性状态反馈控制：

$$u(k) = K(\Theta_k x(k) + (I - \Theta_k)\hat{x}(k)) \quad (2-28)$$

若某传感数据发生丢包，则使用上一时刻的开环响应进行反馈控制，这样做的好处是：1)补偿数据缺失带来的影响，2)降低某个传感器连续丢包带来的影响。构造变量 $\hat{x}(k+1)$ 和 $\bar{x}(k)$ ，

$$\hat{x}(k+1) = A\bar{x}(k) \quad (2-29)$$

$$\bar{x}(k) = \Theta_k x(k) + (I - \Theta_k)\hat{x}(k) \quad (2-30)$$

定义：

$$\eta^T(k) = [x^T(k), \hat{x}^T(k)] \quad (2-31)$$

则闭环控制系统可以改写为如下形式：

$$\eta(k+1) = \Phi \eta(k) \quad (2-32)$$

其中，

$$\Phi = \begin{bmatrix} A + BK\Theta_k & BK(I - \Theta_k) \\ A\Theta_k & A(I - \Theta_k) \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

2.3 稳定性分析和控制器求解

在接下来的系统分析中，将会使用到以下定义。

引理 2-2^[69]: 对于线性离散系统 $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$ ，如果系统的状态解 $x(k)$ 满足 $\|x(k)\| \leq \sigma^k \|x(0)\|$ ，其中 $0 < \sigma < 1$ ，则该系统是指数稳定的，并且 σ 为系统的衰减率。

引理 2-3^[70]: 对于给定的正定对称矩阵 X, Y, Z ，并且他们有合适的维度，如果存在标量 $\gamma > 0$ 满足不等式：

$$\begin{bmatrix} -X & \gamma Y^T & 0 \\ \gamma Y & -2\gamma I & Z^T \\ 0 & Z & -Z \end{bmatrix} < 0 \quad (2-34)$$

则有：

$$\begin{bmatrix} -X & Y^T \\ Y & -Z^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (2-35)$$

引理 2-3^[71]: 对于给定的对称矩阵， $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix} \in R^{n \times n}$ ，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) $S_{22} < 0$ ， $S_{11} - S_{12}^T S_{22}^{-1} S_{12} < 0$ 。

定理 2-2: 对于给定的控制增益矩阵 K ，如果存在标量 $s \in (0, 1)$, $\beta > 0$ 和对称正定矩阵 $Q \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 满足：

$$\begin{cases} \beta I < Q < I \\ \begin{bmatrix} -Q + sI & \Phi^T \\ \Phi & -Q \end{bmatrix} < 0 \end{cases} \quad (2-36)$$

则系统(2-31)是指数稳定的，并且衰减率为 $\sqrt{1-s}$ 。

证明: 设无线网络化控制系统的李雅普诺夫函数为：

$$V(k) = \eta^T(k) P \eta(k) \quad (2-37)$$

假设 $\lambda_1 = \min \lambda(P)$, $\lambda_2 = \max \lambda(P)$ 分别为 P 的最大特征值和最小特征值有：

$$\lambda_1 I < P < \lambda_2 I \quad (2-38)$$

$$\lambda_1 \|\eta(k)\|^2 < V(k) < \lambda_2 \|\eta(k)\|^2 \quad (2-39)$$

李雅普诺夫函数的差分方程为：

$$\begin{aligned}
 -\Delta V(x(k)) &= V(x(k)) - V(x(k+1)) \\
 &= \eta^T(k)P\eta(k) - \eta^T(k)\Phi^T P\Phi\eta(k) \\
 &= \eta^T(k)(P - \Phi^T P\Phi)\eta(k) \\
 &\geq v\|\eta(k)\|^2
 \end{aligned} \tag{2-40}$$

令 $v = \min \lambda(\Phi^T P\Phi - P)$ ，根据(2-37)(2-38)可得：

$$\lambda_1 \|\eta(k)\|^2 - \lambda_2 \|\eta(k+1)\|^2 > v\|\eta(k)\|^2 \tag{2-41}$$

$$\|\eta(k+1)\|^2 \leq \frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2} \|\eta(k)\|^2 \tag{2-42}$$

进一步有，

$$\|\eta(k+1)\|^2 \leq \left(\frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2}\right)^k \|\eta(0)\|^2 \tag{2-43}$$

由 $0 \leq \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \leq 1$ ，令衰减率为 $\mu = \sqrt{\frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2}}$ ，将约束条件(2-37)(2-39)改写成：

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} I < \frac{P}{\lambda_2} < I \tag{2-44}$$

$$\begin{bmatrix} -P + vI & \Phi^T \\ \Phi & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \tag{2-45}$$

两边同时乘以 $\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \\ \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix}$ ，令 $s = \frac{v}{\lambda_2}$ ， $\beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ ， $Q = \frac{P}{\lambda_2}$ 可得：

$$\begin{bmatrix} -Q + sI & \Phi^T \\ \Phi & -Q \end{bmatrix} < 0 \tag{2-46}$$

上式即为定理中的约束条件，证明完毕。

推论 1: 若存在标量 $0 < v < 1, 0 < \beta < 1, \gamma > 0$ 以及满足合适维度的矩阵 Q 和 \hat{K} ，满足下列优化的约束：

$$\begin{aligned}
 &\max \quad s \\
 &s.t. \quad \begin{cases} \beta I < Q < I \\ \begin{bmatrix} -Q + sI & \gamma\Phi^T & 0 \\ \gamma\Phi & -2\gamma I & Q^T \\ & Q & -Q \end{bmatrix} < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2-47}$$

其中，

$$\gamma\Phi = \begin{bmatrix} \gamma A + B\hat{K}\Theta_k & B\hat{K} \\ \gamma A\Theta_k & \gamma A(I - \Theta_k) \end{bmatrix} \tag{2-48}$$

则闭环系统(2-32)是指数稳定的，且控制增益矩阵有，

$$K = \frac{\hat{K}}{\gamma} \quad (2-49)$$

上述的 PBDT 策略可总结为表 2-1。

表 2-1 PBDT 策略
Table 2-1. PBDT strange

算法 1: PBDT 策略	
1	通过推论 1 求解系统控制增益 K ;
2	初始化系统状态 $x(0)$, 和初始随机退避时间上限 t_r^{\max} ;
3	0,1 时刻传感器 $r(r=1、2\dots n)$ 使用初始随机退避时间的接入信道;
4	控制器根据式(2-28)生成控制量, 并把最新状态转发到优先级预测器;
5	通过式(2-14)预测下一时刻传感器 r 的重要性 $h(k+1, r)$;
6	通过式(2-19)得到传感器 r 数据发送优先级 $J(k+1, r)$;
7	传输调节器通过式(2-24)对传感器 r 的随机退避时间进行调节;
8	传感器使用调节后的动态随机退避时间上限接入信道, 发送数据, 转到步骤 4。

2.4 数值仿真

本小节中将用一个数值仿真的例子用来验证 PBDT 策略的有效性。

考虑如下三阶离散的不稳定系统^[72]:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2-50)$$

其中系统矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.100 & 0.24 \\ 0.002 & 0.3681 & 0.707 \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2-52)$$

系统初始状态为 $x(0)=[-13 \ 9 \ 16]^T$, 系统采样周期为 $T=0.015s$ 。设置超参数系统退避时间系数为 $\lambda=100$, 原始随机退避时间上限为 $t_r^{\max}=0.25ms$, 无策略下主动丢包率为 $\Pr(\alpha=0)=0.4$ 。依据本文的方法所求得控制增益矩阵为:

$$K = \begin{bmatrix} -1.0455 & 0.735 & 0.4536 \\ -0.7978 & 0.230 & 0.606 \end{bmatrix} \quad (2-53)$$

使用传统随机系统方法^[73]求得控制器增益为:

$$K' = \begin{bmatrix} 0.1075 & -0.1376 & -0.0523 \\ 0.0812 & -0.1390 & -0.1834 \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

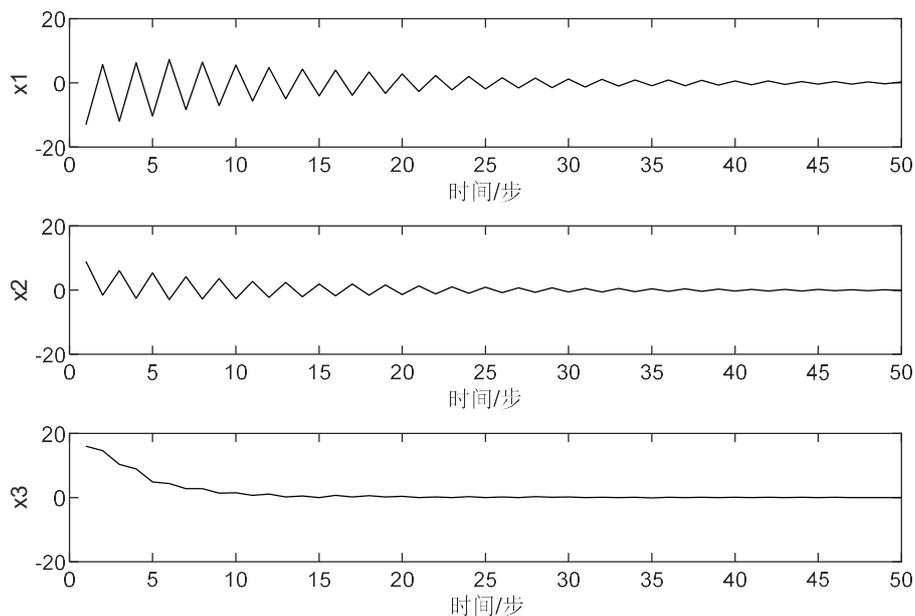


图 2-5 传统控制器下的系统状态轨迹图

Figure 2-5. System state diagram under traditional controller

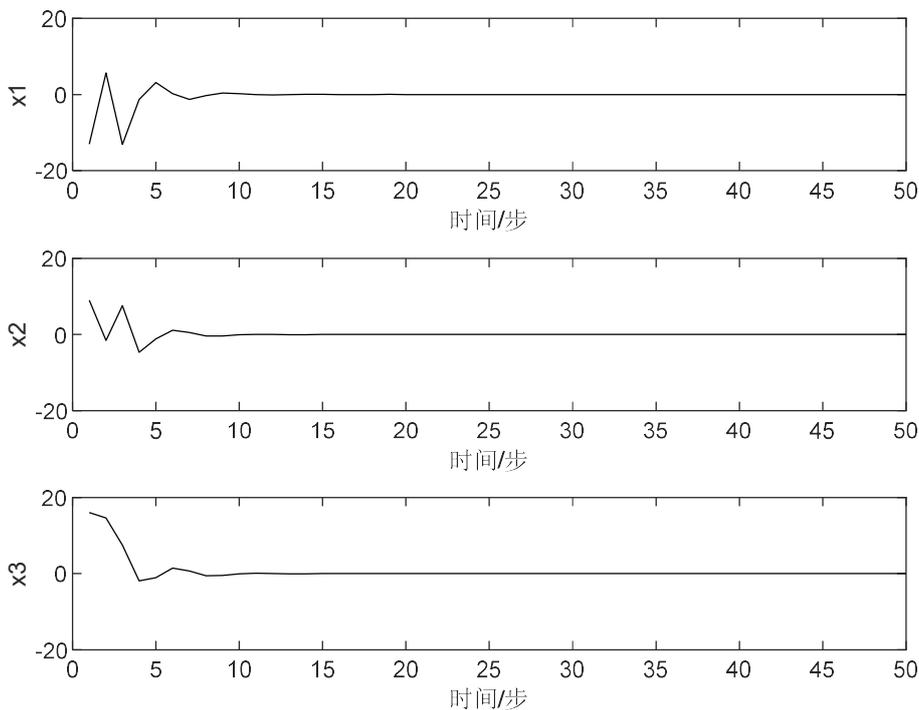


图 2-6 PBDT 策略下的系统轨迹状态图

Figure 2-6. System status trajectory diagram under PBDT policy

系统仿真结果如图 2-5 到图 2-11 所示。图 2-5 和图 2-6 分别是在丢包率为 20% 情况下的使用不带补偿的控制器和 PBDT 策略控制器的系统轨迹图，其中传统的随机稳定控制器未施加策略。从实验结果可以看出，随机稳定控制器控

制下，由于系统主动丢包作用系统状态震荡收敛，而本文设计的控制器和 PBDT 策略在几次震荡后就快速的收敛，这也说明了本文策略能够对主动丢包给系统带来的影响进行一定的补偿，并能提高系统的稳定性。

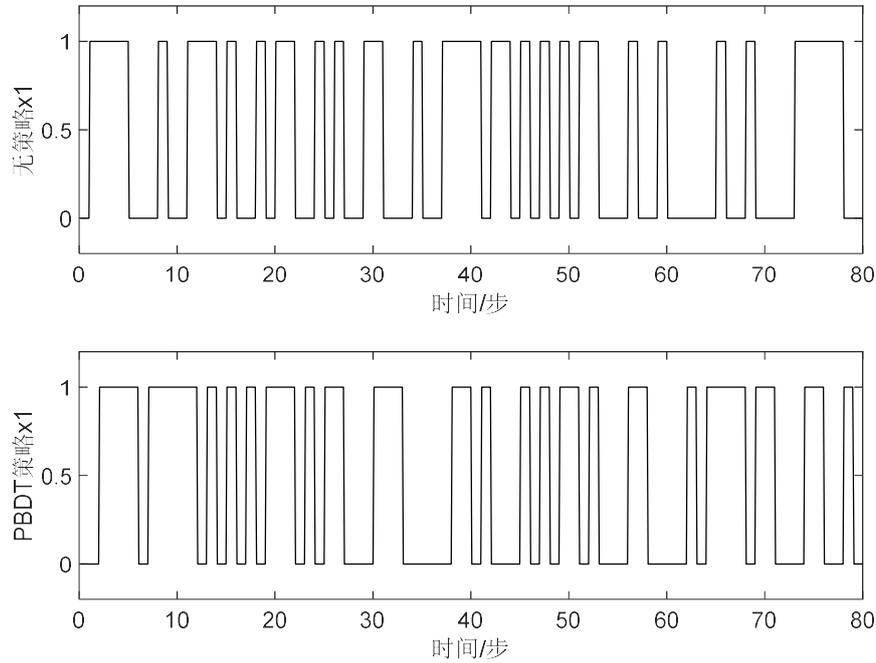


图 2-7 系统丢包情况示意图

Figure 2-7. Schematic diagram of system packet dropout

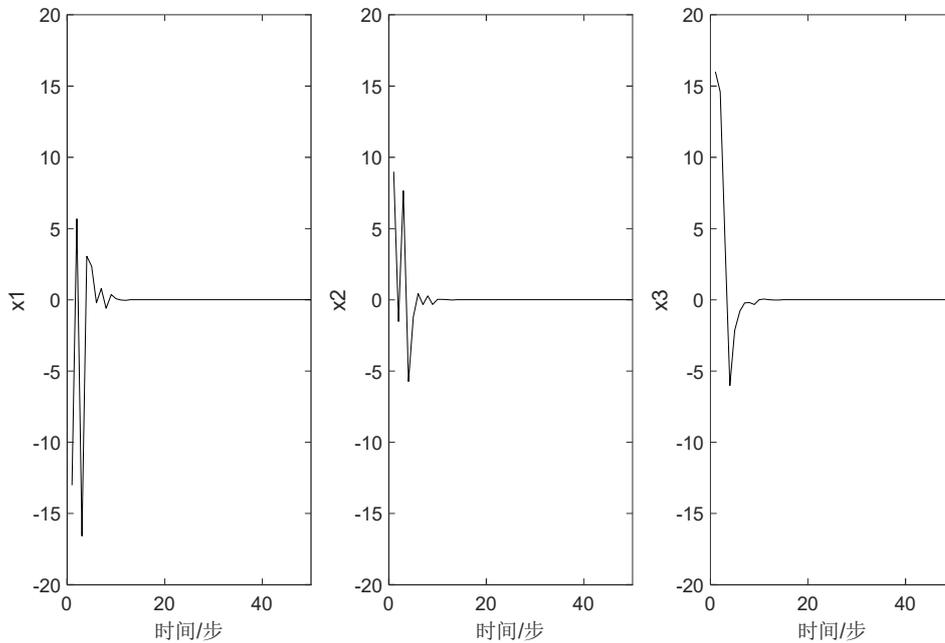


图 2-8 无策略下的系统状态轨迹图

Figure 2-8. System status trajectory without policies

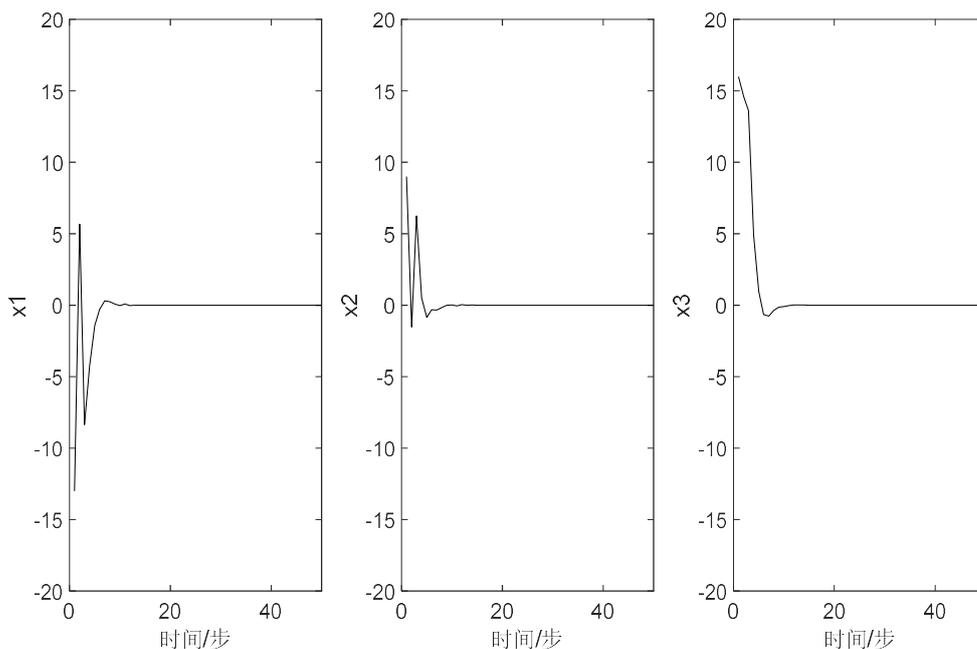


图 2-9 PBDT 策略下的系统状态轨迹图

Figure 2-9. System status trajectory diagram under PBDT policy

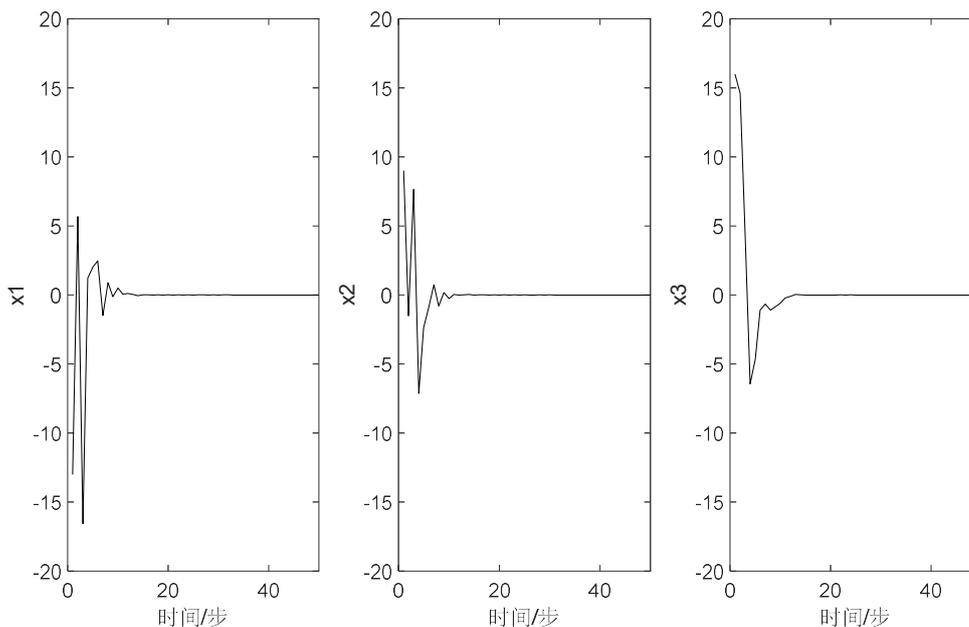


图 2-10 李雅普诺夫函数导数指标下的 PBDT 策略

Figure 2-10. PBDT strategy under derivative index of Lyapunov function

图 2-7 为上述参数下的系统丢包情况示意图。采用 PBDT 策略后，图中可以看出数据传输成功的概率几乎没有改变，即系统平均丢包率几乎没有改变，这表明本文设计的 PBDT 策略几乎不会额外增加对无线信道资源的占用。

图 2-8 到 2-11 均在使用本文设计的控制器下的效果图，图 2-8 为仅仅使用本文 PBDT 策略中控制器的效果图，其控制器使用开环响应来补偿丢包数据，经过一段时间的波动后系统可达到稳定。图 2-9 为图 2-8 相同设置下加入 PBDT 策

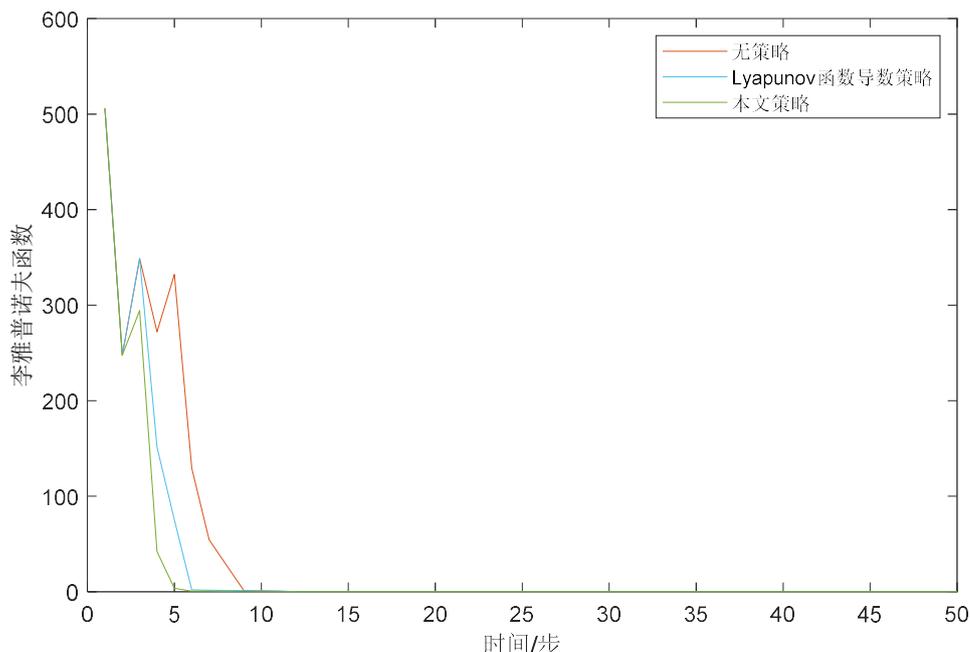


图 2-11 李雅普诺夫函数不同策略轨迹对比图

Figure 2-11. Trajectory comparison diagram of different strategies of Lyapunov function

略中的优先级预测器和传输调节器后的系统状态轨迹图，可以看出加入优先级预测器和传输调节器后系统状态的收敛速度更快，几乎以没有波动的轨迹趋于稳定，即系统在 PBDT 策略下有了更好的性能。图 2-10 为在图 2-9 的相同设置下，把优先级预测器中传感器 r 的重要性指标替换为 $\frac{\partial V(x(k))}{\partial x^r(k)}$ 的系统状态轨迹图，结果表明在相同实验设置下，对比图 2-8 对系统稳定性有一定的提升，但效果比图 2-9 策略差，这也验证了备注 2-1 的理论解释。

图 2-11 是图 2-8、图 2-9 和图 2-10 这三个实验设置下的李雅普诺夫函数的轨迹对比图。从图 2-11 中可以看出，无传输策略时系统李雅普诺夫函数收敛最慢，李雅普诺夫函数导数指标下的 PBDT 策略次之，完整的 PBDT 策略下的李雅普诺夫函数下降的最快。所以，PBDT 策略能在在一定程度上提升控制系统的稳定性能。

2.5 本章小结

本章针对无线网络中存在主动丢包的多包传输无线网络化控制系统分析并设计了 PBDT 策略，策略中包含优先级预测器、传输调节器和控制器。优先级预测器中通过设计重要性指标区分传感器数据的优先级，在传输调节器中对优先级高的传感器减少其退避时间上限，对优先级低的传感器增加其退避时间上限，以达到重要的传感器优先发送的目的；且设计了带丢包补偿的状态反

馈控制器。最后用数值仿真验证了该策略的有效性。验证了本章策略在不消耗额外信道资源的情况下，在一定程度上减小主动丢包带来的影响，可提升系统性能表现。

第三章 有扰下主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计

虽然第二章的 PBDT 策略在理想条件下表现良好，但在实际中，被控对象常常会受到扰动，这可能导致优先级预测器所给出的优先级有所偏差，进而可能导致第二章的 PBDT 策略失效。因此只有我们设计的策略有一定的鲁棒性才可以更加符合实际的需要。本章在第二章的基础上，本章考虑系统受到的外部扰动下改进了 PBDT 策略并设计了 H_∞ 控制器，提升了策略的鲁棒性。

3.1 问题描述

现实中的无线网络化控制系统中，被控对象常会受到外部的扰动，这也是无线网络化控制系统实际应用的难点之一。在本章中，本文的假设更符合实际，本章考虑了多包无线网络化控制系统的被控对象受到外部有界扰动的情形，且扰动会发生突变；同时假设系统的无线网络信道处于拥塞的情况下，系统会发生主动丢包的问题。本章旨在改进第二章的 PBDT 策略以提升系统在外部扰动下的控制效果，同时结合 H_∞ 控制器使系统具有一定的抗干扰能力。

考虑具有多个无线传感器采样的多包无线网络化控制系统，如图 3-1 所示，假设控制器到执行器端可靠传输，而传感器到控制器之间通过无线网络采用“多包传输”的方式进行数据传输，即 n 个独立的传感器单独采样于被控对象，通过无线网络信道独立地发送传感数据到控制器端。控制器根据收到的传感数据信息计算出相应的控制量发送给执行器，并作用于被控对象。

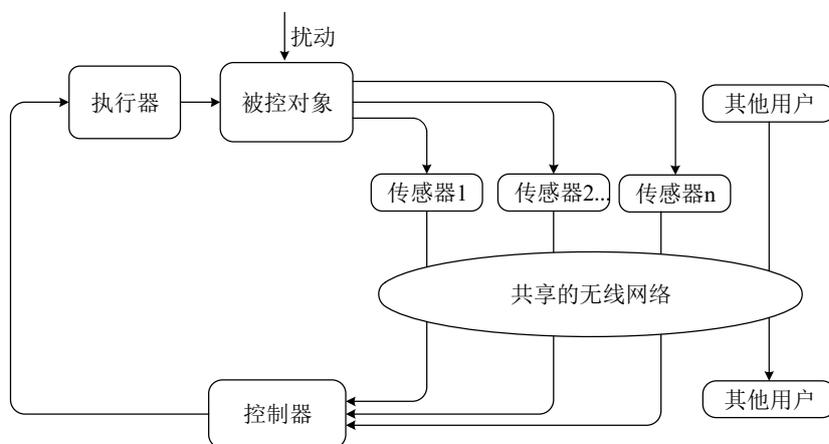


图 3-1 有扰多包传输的无线网络化控制系统图

Figure 3-1. Diagram of a wireless networked control systems for perturbed multi-packet transmission

该被控对象模型可用线性离散系统描述：

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_1w(k) + B_uu(k) \\ z(k) = Cx(k) + D_uu(k) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 分别为控制输入别为控制系统的系统状态和控制输入， $w(k)$ 是外部扰动， $z(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统被调性能输出。 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $B_u \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为系统矩阵， C 和 D_u 是适应维数的常数矩阵。

将每个传感器采集到的状态信息记为：

$$x(k) = [x^1(k), x^2(k), \dots, x^n(k)] \quad (3-2)$$

3.2 有扰情况下基于预测器的动态传输策略设计

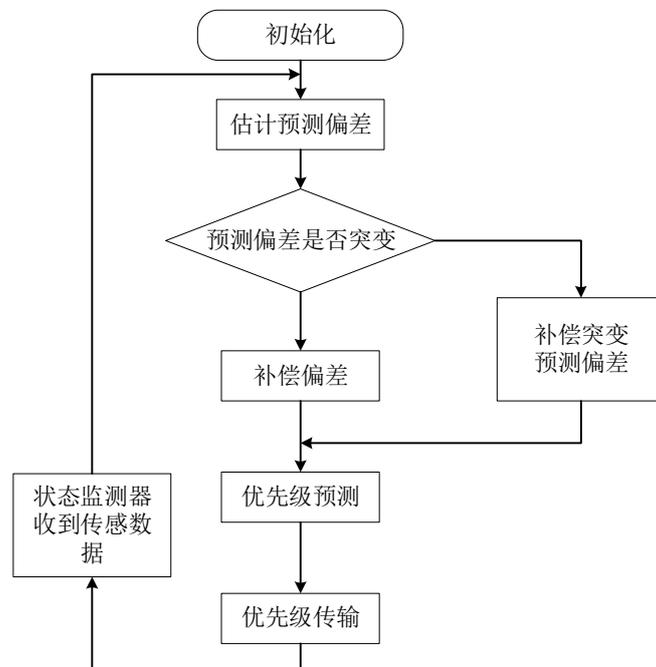


图 3-2 PBDT 策略的改进思路

Figure 3-2. Improvement ideas of PBDT strategy

本章针对共享无线网络中主动丢包的无线网络化控制系统，在第二章设计的基础之上，改进了 PBDT 策略，该策略能够在被控对象受到外部有界扰动下满足系统性能要求，改进策略的主要思想如图 3-2 所示。考虑到系统扰动对优先级预测器的破坏性，本章在上一章基础之上增加了预测偏差估计器作为缓冲，降低扰动对预测偏差估计其的影响。本章通过对过去一些时刻的偏差取平均值补偿下一时刻的偏差，来补偿优先级预测器，使其不跟随随机的扰动发生较大的偏差。这需要过去时刻的一些真实信息，所以我们在系统中加入了网络状态检测器来转发真实收到的系统状态信息；同时预测偏差估计器检测预测偏差是

否发生了突变，如果发生突变，将用突变后的预测偏差来补偿优先级预测器，而非用过去时刻的平均值。

策略的具体设计思路描述如下：1) 为了尽可能的减少主动丢包对系统所造成的负面影响，设计了优先级预测器，在当前时刻预测下一时刻各传感器数据对系统的重要性，从而设定不同数据信息的优先级，进一步帮助传输调节器进行决策；2) 为了应对外界扰动给预测器带来的预测偏差，在策略设计中加入了预测偏差估计器，来估计预测器下一时刻的预测偏差，并且能检测外界扰动的突变，提升策略的抗干扰能力；3) 设计合理的传感器动态传输调节规则，降低高优先级数据的退避时间，提高低优先级数据的退避时间，让对系统更重要的数据优先传输；4) 在上述的基础上，设计合适的 H_∞ 控制器来保证闭环控制系统的稳定性并提升系统的鲁棒性。根据上述思想，分别设计了预测偏差估计器，优先级预测器，传输调节器和控制器，如图 3-3 所示。接下来，本文将分别对这四部分做详细的说明。

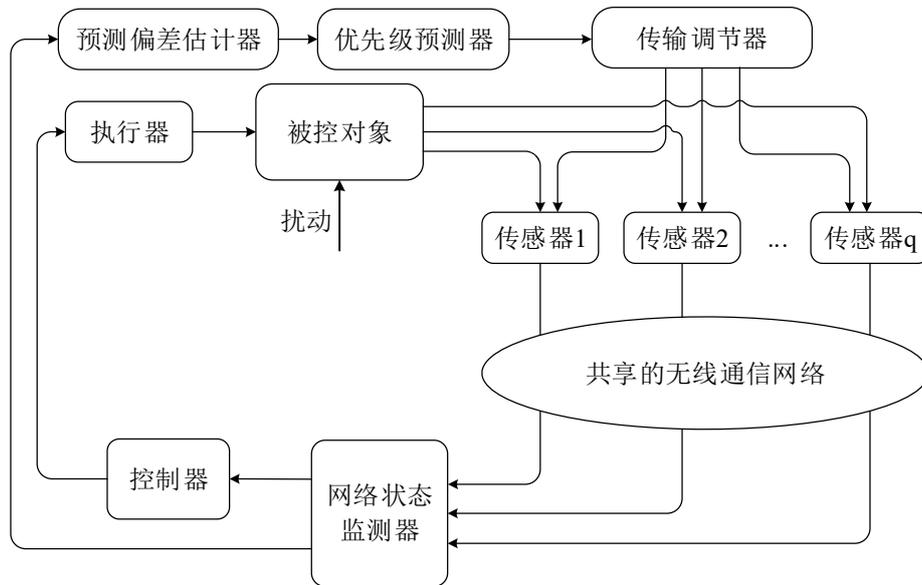


图 3-3 有扰多包无线网络化控制系统动态传输策略图

Figure 3-3. Dynamic transmission strategy diagram of perturbed multi-packet wireless networked control systems

假设系统仅在被控对象受到外部的加性扰动且扰动有界。与上章类似，本章将仅考虑只有主动丢包情况的多包无线网络化控制系统，这是因为多包无线网络化控制系统规模较小，且受其网络信道资源的限制，丢包是系统的主要研究问题，时延可忽略不计，所以不考虑系统采样周期之内的小时延，即将控制器在一个系统采样周期内收到的数据看作完美传输。将传感器采样数据是否成功到达控制器端，建模为随机伯努利过程，如式(3-3)。假设传感数据在此传输过程中发生独立丢包现象，可用 α_k^r 进行描述：

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

3.2.1 预测偏差估计器设计

各个传感器对被控对象进行采样后，在传输过程中会发生独立的丢包的现象，控制器端将可能收到部分的状态信息，网络状态监测器在 k 时刻获得部分的状态信息，可记为 $\Theta_k x(k)$ ，反馈控制输入为：

$$u(k) = K\Theta_k x(k) \quad (3-4)$$

其中，

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} \alpha_k^1 & & & * \\ & \alpha_k^2 & & \\ & & \ddots & \\ * & & & \alpha_k^n \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Θ_k 为系统传感数据是否成功传输的权重矩阵。在 $k+1$ 时刻，系统的输出为：

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Theta_k u(k) + B_1 w(k) \quad (3-6)$$

根据上章的描述，PBDT 策略中优先级预测器的预测下时刻的系统状态为：

$$\tilde{x}(k+1) = Ax(k) + B\Theta_k u(k) \quad (3-7)$$

从系统模型(3-1)可以看出，由于无线网络化控制系统的被控对象受到外部扰动，优先级预测器的预测输出 $\tilde{x}(k+1)$ 和系统真实输出 $x(k+1)$ 会有一定的偏差：

$$\tilde{e}(k) = x(k) - \tilde{x}(k) = B_1 w(k) \quad (3-8)$$

由此，本章希望估计因外部扰动造成的预测器的预测偏差，在优先级预测器中对优先级的计算给予补偿，进而确定下一时刻的传感器优先级。具体而言，预测偏差估计器在 k 时刻，可使用 $k-m, k-m+1, \dots, k$ 时刻的窗口数据，可记为集合：

$$D = \{\Theta_{k-m} x(k-m), \Theta_{k-m+1} x(k-m+1), \dots, \Theta_k x(k)\} \quad (3-9)$$

于是本章希望估计过去时刻预测器平均偏差，将这些不同时刻的平均偏差序列记为 $\{g(i) | m = k-m, k-m+1, \dots, k\}$ ，则 m 时刻有 $g(m)$ ：

$$g(m) = \frac{\sum_{i=1}^n (\Theta_{k-m})_{ii} (\Theta_{k-m+1})_{ii} [x(k-m+1) - \tilde{x}(k-m)]}{\sum_{i=1}^n (\Theta_{k-m})_{ii} (\Theta_{k-m+1})_{ii}} \quad (3-10)$$

其中， $\tilde{x}(k-m)$ 是预测器的预测输出，可得到过去 $k-m$ 时刻到 k 时刻每一时刻的平均预测偏差：

$$l = \{g(m), g(m+1), \dots, g(k)\} \quad (3-11)$$

进一步可以用线性函数 $f(x) = ax + b$ 来估计下一时刻的预测器偏差，其中 a 和 b 满足：

$$\min \sum_{i=m}^{k-1} [g(i) - (ai + b)]^2 \quad (3-12)$$

1) 当公式(3-14)不成立时，预测偏差近似地满足线性关系 $f(x)$ ， $g(k)$ 没有发生突变，此时可认为外部扰动也没有发生突变，则预测偏差估计器的输出为：

$$\tilde{g}(k+1) = a(k+1) + b \quad (3-13)$$

2) 当公式(3-14)成立时，此时 $g(k)$ 与 $f(x)$ 的差距过大，不适合再用线性函数 $f(x)$ 来估计预测偏差，可认为 $g(k)$ 发生了突变，此时外界扰动很可能发生了突变时，所以不再使用式(3-13)来补偿优先级预测器。具体来说， $g(k)$ 满足 $f(x)$ 的离群点特征时，则 $g(k)$ 与 $f(x)$ 的差距过大，可用如下公式检验：

$$\frac{g(k) - (ai + b)}{\sqrt{\sum_{i=\lambda}^{k-1} [g(i) - (ai + b)]^2}} \geq 3 \quad (3-14)$$

系统扰动发生了突变时，为了防止优先级预测器失效，所以仍然需要补偿优先级预测器。此时可直接用 k 时刻的预测偏差 $g(k)$ 在 $k+1$ 时刻补偿优先级预测器，即此情况下预测偏差估计器的输出为：

$$\tilde{g}(k+1) = g(k) \quad (3-15)$$

3.2.2 优先级预测器设计

定义 $\tilde{u}^r(k+1)$ ，其表示在 $k+1$ 时刻传感器 r 数据丢失时的系统控制输入：

$$\tilde{u}^r(k+1) = K\Gamma(r)x(k+1) \quad (3-16)$$

其中， $\Gamma(r) \in \Lambda^{n \times n}$ ，且满足：

$$\Gamma_{ij}(r) = \begin{cases} 1, & i = j \neq r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-17)$$

式中 $\Gamma(r)x(k+1)$ 即表示在 $k+1$ 时刻传感器 r 的数据丢失。

进一步地，优先级预测器计算受 $k+1$ 时刻传感器 r 数据 $x^r(k+1)$ 丢失影响的系统状态 $\tilde{x}^r(k+2)$ ，所以有：

$$\tilde{x}^r(k+2) = Ax(k+1) + BK\Gamma(r)x(k+1) + \tilde{g}(k+1) \quad (3-18)$$

根据定理 2-1，我们优先级指标函数选择：

$$h(k+1, r) = (BK\Gamma(r)x(k+1))^T P(2A + BK\Gamma(r))x(k+1) \quad (3-19)$$

根据优先级指标函数，本章设计优先级预测器如下：

$$J(r, k+1) = \text{sort}\{h(k+1, r) \mid r = 1, 2, \dots, n\} \quad (3-20)$$

其中 $sort(\cdot)$ 表示从大到小的排名，最大值排名为 1，最小值排名为 n ， $J(r, k+1)$ 为优先级预测器给出的 $k+1$ 时刻传感器 r 的传输优先级。

3.2.3 传输调节器设计

假设等待时间 t_w 满足平均分布：

$$t_w \sim U(0, t_w^{\max}) \quad (3-21)$$

假设传感器 r 以随机退避的方式接入无线网络信道时，信道已发生拥塞， t_r 表示随机退避时间， t_w^{\max} 表示随机等待时间上限， t_r 和 t_w 近似满足线性关系：

$$t_w = \lambda t_r \quad (3-22)$$

其中 $\lambda > 1$ ， $\lambda \in \mathbb{R}$ 为退避时间系数。一般而言，由于网络资源受限，传感数据在随机退避方式下的传输成功率为：

$$\Pr(\alpha_k^r = 1) = \Pr(t_r < T) = \min\left(\frac{T}{t_w^{\max}}, 1\right) \quad (3-23)$$

其中， T 为系统采样周期。对每个传感器根据(3-20)等距地补偿等待时间，则等待时间上限 $\tilde{t}_w^{\max}(k, r)$ 有：

$$\tilde{t}_w^{\max}(k, r) = t_w^{\max} + \frac{2(t_w^{\max} - T)}{n+1} \left(J(k, r) - \frac{n+1}{2} \right) \quad (3-24)$$

根据(3-22)对传感器 r 的退避时间上限 \tilde{t}_r^{\max} 的设置如下，则传输调节器设计可表示为：

$$\tilde{t}_r^{\max}(k, r) = \frac{\tilde{t}_w^{\max}(k, r)}{\lambda} \quad (3-25)$$

3.2.4 控制器设计

对系统闭环系统(3-1)，采用线性反馈控制有：

$$u(k) = K(\Theta_k x(k) + (I - \Theta_k)\hat{x}(k)) \quad (3-26)$$

若数据丢包使用上一时刻的开环响应进行反馈控制，这样做的好处有：1)补偿数据缺失带来的影响，2)能降低某个传感器连续丢包带来的影响。构造变量 $\hat{x}(k+1)$ 和 $\bar{x}(k)$ ：

$$\hat{x}(k+1) = A\bar{x}(k) \quad (3-27)$$

$$\bar{x}(k) = \Theta_k x(k) + (I - \Theta_k)\hat{x}(k) \quad (3-28)$$

定义：

$$\eta^T(k) = [x^T(k), \hat{x}^T(k)] \quad (3-29)$$

则闭环控制系统可改写为如下形式：

$$\begin{cases} \eta(k+1) = \Phi \eta(k) + Bw(k) \\ z(k) = D\eta(k) + Fw(k) \end{cases} \quad (3-30)$$

其中,

$$\Phi = \begin{bmatrix} A + B_u K \Theta_k & B_u K (I - \Theta_k) \\ A \Theta_k & A (I - \Theta_k) \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

3.3 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 3-1^[74]: 对于任意给定常数 γ , 使闭环系统满足:

- (1) 当外部干扰输入 $w(k)=0$, 闭环系统是指数稳定的;
- (2) 当系统的初始状态 $x(k)=0$ 时, 下属不等式对于所有的非零向量 $w(k) \in L_2[0, T], 0 \leq T < \infty$ 成立:

$$\|z(k)\|_2 \leq \gamma \|w(k)\|_2 \quad (3-32)$$

则线性系统是具有 H_∞ 干扰抑制水平 γ 的指数稳定。

引理 3-1: 如果 $Q(x), R(x), S(x)$ 仿射依赖于变量 x , 且 $Q(x)$ 和 $R(x)$ 是对称的, 则 LMI,

$$\begin{pmatrix} Q(v) & S(v) \\ S^T(v) & R(v) \end{pmatrix} > 0 \quad (3-33)$$

等价于:

$$Q(v) > 0, \quad R(v) - S^T(v)Q(v)^{-1}S(v) > 0 \quad (3-34)$$

或者

$$R(v) > 0, \quad R(v) - S(v)R(v)^{-1}S^T(v) > 0 \quad (3-35)$$

引理 3-2^[75]: 设 $F_0, F_1, \dots, F_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称矩阵, 如果存在 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_p \geq 0$ 使得:

$$F_0 - \sum_{i=1}^p \lambda_i F_i > 0 \quad (3-36)$$

成立, 则 $\xi^T F_0 \xi > 0$ 对所有满足 $\xi^T F_i \xi \geq 0, i=1, 2, \dots, p$ 的 $\xi \neq 0$ 均成立。

对于 $p=1$, 如果至少存在一个 ξ_0 使得 $\xi_0^T F_1 \xi_0 > 0$ 成立, 则上述结论是充分必要的。

引理 3-3 (线性化引理)^[76]: 假设 A, C, M 常数矩阵, $B(v), Q(v) = Q(v)^T S$ 是依据变量 v 仿射的且 $R(v)$ 能分解 $TU(v)^{-1}T^T$, 其中 $U(v) > 0$ 是依变量 v 仿射的, 则非线性不等式为:

$$\begin{pmatrix} A \\ B(v) \\ C \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Q(v) & * \\ [M \ S(v)]^T & R(v) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B(v) \\ C \end{pmatrix} < 0 \quad (3-37)$$

等价下面的 LMI:

$$\begin{pmatrix} A^T Q(v) A + A^T (M B(v) + S(v) C + (M B(v) C)^T A & * \\ T^T \begin{bmatrix} B(v) \\ C \end{bmatrix} & -U(v) \end{pmatrix} < 0 \quad (3-38)$$

定理 3-1: 对于给定的控制器增益矩阵 $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 存在标量 $s \in (0, 1), \beta > 0$ 和对称正定矩阵 $Q \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 满足:

$$\begin{cases} \beta I < Q < I \\ \begin{bmatrix} -Q + sI & \Phi^T \\ \Phi & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \end{cases} \quad (3-39)$$

则系统(3-1)是指数稳定的, 且衰减率为 $\mu = \sqrt{1-s}$ 。

证明: 系统的李雅普诺夫函数为:

$$V(k) = \eta^T(k) P \eta(k) \quad (3-40)$$

假设 $\lambda_1 = \min \lambda(P), \lambda_2 = \max \lambda(P)$ 分别为 P 的最小特征值和最大特征值, 我们有:

$$\lambda_1 I < P < \lambda_2 I \quad (3-41)$$

$$\lambda_1 \|\eta(k)\|^2 < V(k) < \lambda_2 \|\eta(k)\|^2 \quad (3-42)$$

李雅普诺夫函数的差分方程为:

$$\begin{aligned} -\Delta V(x(k)) &= V(x(k)) - V(x(k+1)) \\ &= \eta^T(k) P \eta(k) - \eta^T(k) \Phi^T P \Phi \eta(k) \\ &= \eta^T(k) (P - \Phi^T P \Phi) \eta(k) \\ &\geq v \|\eta(k)\|^2 \end{aligned} \quad (3-43)$$

令 $v = \min \lambda(\Phi^T P \Phi - P)$, 根据(3-41)(3-43)得:

$$\lambda_1 \|\eta(k)\|^2 - \lambda_2 \|\eta(k+1)\|^2 > v \|\eta(k)\|^2 \quad (3-44)$$

$$\|\eta(k+1)\|^2 \leq \frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2} \|\eta(k)\|^2 \quad (3-45)$$

进一步有:

$$\|\eta(k+1)\|^2 \leq \left(\frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2} \right)^k \|\eta(0)\|^2 \quad (3-46)$$

由 $0 \leq \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \leq 1$ 所以, 令衰减率为 $\mu = \sqrt{\frac{\lambda_1 - v}{\lambda_2}}$ 将约束条件(3-41)(3-43)改写成:

$$\begin{bmatrix} -P + vI & \Phi^T \\ \Phi & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3-47)$$

两边同时乘以 $\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \\ \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix}$, 令 $s = \frac{v}{\lambda_2}$, $\beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, $Q = \frac{P}{\lambda_2}$ 可得:

$$\begin{bmatrix} -Q + sI & \Phi^T \\ \Phi & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3-48)$$

得到约束条件, 证明完毕。

定理 3-2: 对于给定的常数 $\gamma > 0$, $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 存在适应维度的对称正定矩阵 Q 满足不等式:

$$\begin{bmatrix} -Q + D^T D + \Phi^T Q \Phi & D^T F \\ * & F^T F - \gamma^2 \end{bmatrix} < 0 \quad (3-49)$$

则闭环系统具有给定的 H_∞ 干扰抑制水平 γ 。

证明: 选取系统李雅普诺夫泛函:

$$V(k, \eta(k)) = \eta^T(k) Q \eta(k) \quad (3-50)$$

对于系统有:

$$\begin{aligned} & z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \Delta V(k) \\ &= [D\eta(k) + Fw(k)]^T [D\eta(k) + Fw(k)] - \\ & \gamma^2 w^T(k)w(k) + V(k+1, \eta(k+1)) - V(k, \eta(k)) \\ &= \eta^T(k) D^T D \eta(k) + \eta^T(k) D^T F w(k) + w^T(k) F^T D \eta(k) + w^T(k) F^T F w(k) \\ & - \gamma^2 w^T(k)w(k) + V(k+1, \eta(k+1)) - V(k, \eta(k)) \\ &= \eta^T(k) D^T D \eta(k) + \eta^T(k) D^T F w(k) + w^T(k) F^T D \eta(k) + w^T(k) F^T F w(k) \quad (3-51) \\ & - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \eta^T(k) (\Phi^T Q \Phi - Q) \eta(k) \\ &= \eta^T(k) (D^T D + \Phi^T Q \Phi - Q) \eta(k) + w^T(k) (F^T F - \gamma^2 I) w(k) \\ & + \eta^T(k) D^T F w(k) + w^T(k) F^T D \eta(k) \\ &= \xi^T \Omega \xi \end{aligned}$$

其中,

$$\xi = [\eta^T(k), w(k)]^T, \quad \Omega = \begin{bmatrix} -Q + D^T D + \Phi^T Q \Phi & D^T F \\ * & F^T F - \gamma^2 I \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

$\Omega < 0$, 成立, 则有:

$$z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \Delta V(k) < 0 \quad (3-53)$$

零初始条件下, 对上式左边 $k = k_0 = 0$ 到 $k = \infty$ 求和有:

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} (z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)) + \sum_{k=k_0}^{\infty} (\Delta V(k)) < 0 \quad (3-54)$$

因为定理 3-1 中证明了系统是满足指数稳定的，则无穷大时刻，李雅普诺夫函数是趋于零的，所以有：

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} (z^T(k)z(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)) < -\sum_{k=k_0}^{\infty} (\Delta V(k)) = 0 \quad (3-55)$$

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} z^T(k)z(k) < \sum_{k=k_0}^{\infty} \gamma^2 w^T(k)w(k) \quad (3-56)$$

由此 $\|z(k)\|_2^2 < \gamma \|w(k)\|_2^2$ 成立。

则闭环控制系统具有给定的 H_∞ 干扰抑制水平 γ ，综上定理 3-2 得证。

下面主要考虑求解控制器增益矩阵 K 的相关问题，基本思想是保证系统指数稳定的前提下，使系统有较好的干扰抑制水平。

定理 3-3: 若存在标量 $0 < \nu < 1, 0 < \beta < 1, \gamma > 0, \tau > 0$ ，以及满足合适维度的矩阵 Q 和 \hat{K} ，满足：

$$\begin{bmatrix} -Q & Q\Phi^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & -QI & 0 & D^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & F^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -Q + VI & \tau\Phi_i^T & 0 \\ * & * & * & * & * & -2\tau I & Q \\ * & * & * & * & * & * & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (3-57)$$

其中 $\tau\Phi = \begin{bmatrix} \tau A + B\hat{K}\Theta_k & B\hat{K} \\ \tau A\Theta_k & \tau A(I - \Theta_k) \end{bmatrix}$ ，则 K 可由满足上述约束的矩阵不等式求出。

证明: 首先将式(3-52)展开得，

$$\begin{bmatrix} \Phi^T Q \Phi - Q & 0 \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D^T \\ F^T \end{bmatrix} [D \quad F] < 0 \quad (3-58)$$

利 Schur 补引理可得：

$$\begin{bmatrix} \Phi^T Q \Phi - Q & 0 & D^T \\ * & -\gamma^2 I & F^T \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-59)$$

再展开：

$$\begin{bmatrix} -Q & 0 & D^T \\ * & -\gamma^2 I & F^T \\ * & * & -I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Q [\Phi \quad 0 \quad 0] < 0 \quad (3-60)$$

再次利用 Schur 补引理有：

$$\begin{bmatrix} -Q^{-1} & \Phi & 0 & 0 \\ * & -QI & 0 & D^T \\ * & * & -\gamma^2 I & F^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-61)$$

分别左乘和右乘 $\text{diag}\{Q, I, I, I\}$ 有:

$$\begin{bmatrix} -Q & Q\Phi^T & 0 & 0 \\ * & -QI & 0 & D^T \\ * & * & -\gamma^2 I & F^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-62)$$

利用 Schur 补引理可以将式(3-40)得到:

$$\begin{bmatrix} -Q+VI & \Phi_i^T & 0 \\ * & -2I & Q \\ * & * & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (3-63)$$

由式(3-62)和(3-63)得:

$$\begin{bmatrix} -Q & Q\Phi^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & -QI & 0 & D^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & F^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -Q+VI & \Phi_i^T & 0 \\ * & * & * & * & * & -2I & Q \\ * & * & * & * & * & * & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (3-64)$$

得到约束条件, 定理 3-3 得证。对于上式中非线性的项, 可用换元法或线性化法间接地求出控制增益 K 。

3.4 数值仿真

本章使用系统(3-1)的模型验证本章策略的有效性, 其中系统矩阵分别如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.8187 & 0 & -0.0955 \\ 0.1722 & 0.9048 & -0.0094 \\ 0 & 0 & 1.1052 \end{bmatrix} \quad (3-65)$$

$$B_u = [-0.0097 \quad -0.0006 \quad 0.2103]^T \quad (3-66)$$

$$B_1 = [1 \quad 1 \quad 1]^T \quad (3-67)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-68)$$

$$D_u = 0 \quad (3-69)$$

系统初始状态为 $x(0) = [-7 \ 6 \ 4]^T$ ，系统的采样周期为 $T = 0.01s$ 。假设参数系统退避时间系数为 $\lambda = 100$ ，且系统不加策略前因共享无线网络信道资源的局限性已经发生了主动丢包问题。系统被控对象所受扰动满足高斯分布，但在 $k=100$ 至 $k=110$ 时刻系统扰动突变满足：

$$w(k) = \begin{cases} 5, & 100 < k < 110 \\ 2y, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-70)$$

其中 $y \in N(0,1)$ ，依据本文的方法所求得控制增益矩阵为：

$$K = [-0.4440 \quad -0.0641 \quad 2.7185] \quad (3-71)$$

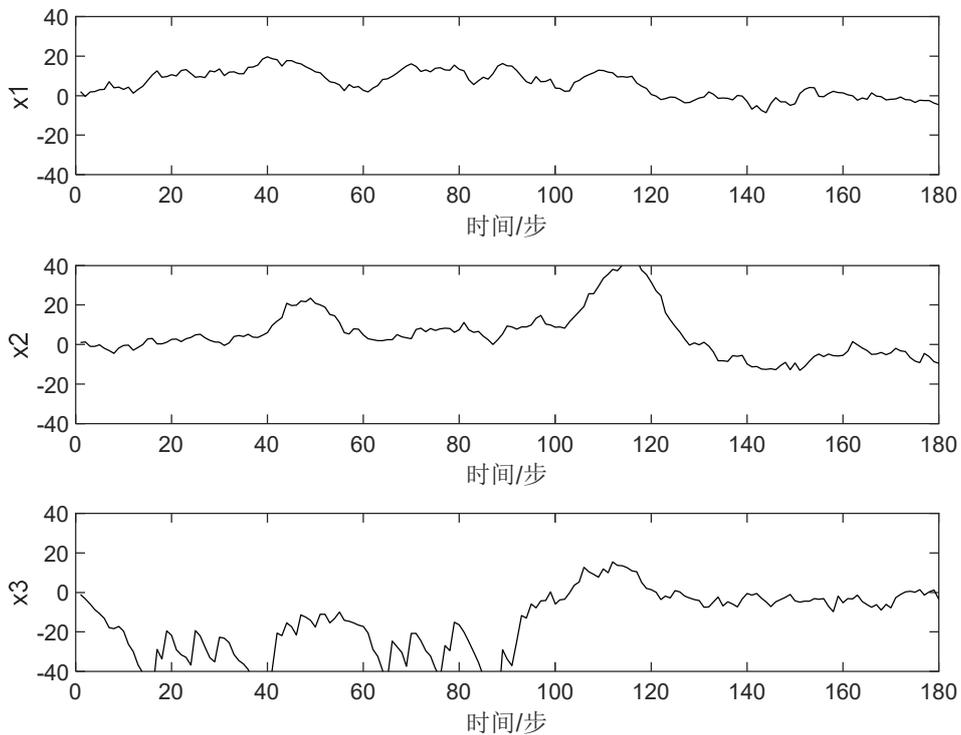


图 3-4 0.2 丢包率下无策略下的系统状态轨迹图

Figure 3-4. System state trajectory without policy at 0.2 packet dropout rate

图 3-4 和图 3-5 分别为相同控制器下的无策略和有策略的系统状态轨迹图。在图 3-4 和图 3-5 的实验设置中，控制系统在不加策略前的原始随机退避时间上限为 $t_r^{\max} = 0.125ms$ ，即无策略下主动丢包率为 0.2。从图 3-4 中可以看出，在前述的实验设置下，无策略时系统发生了较为剧烈的状态波动，当 $k = 100$ 时，系统被控对象受到的外部扰动发生突变，系统出现了更大的波动。相比图 3-4，图 3-5 在加入 PBDT 策略后，系统状态轨迹相对更加平缓，在扰动发生突变时，也对系统状态的波动有一定的缓解作用。

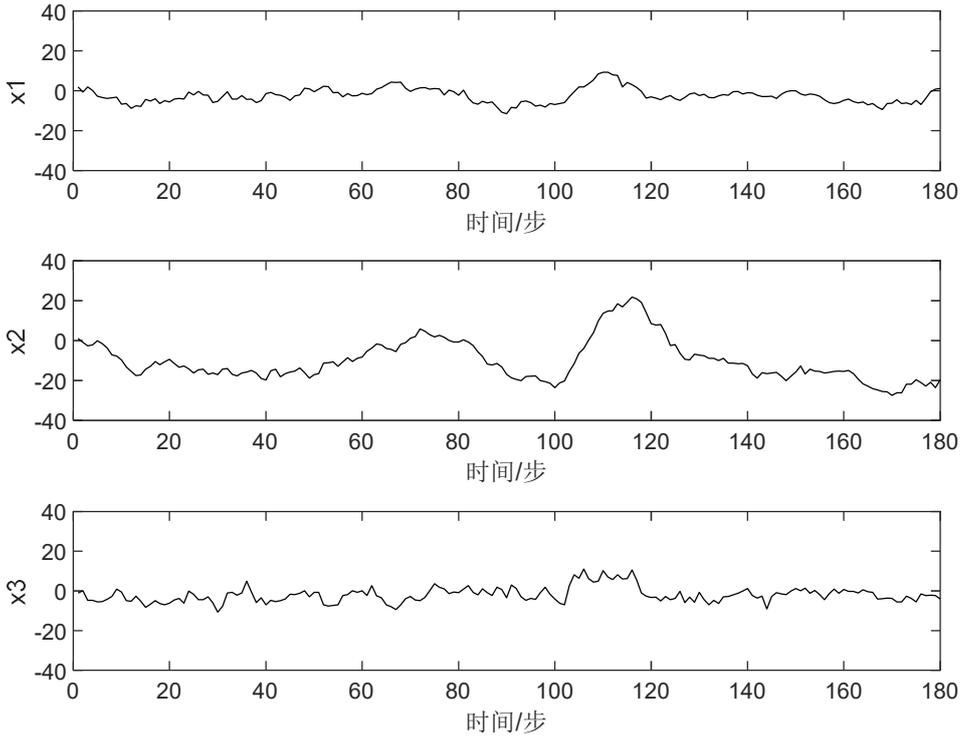


图 3-5 0.2 丢包率下 PBDT 策略的系统状态轨迹图

Figure 3-5. System state trajectory of PBDT strategy at 0.2 packet dropout rate

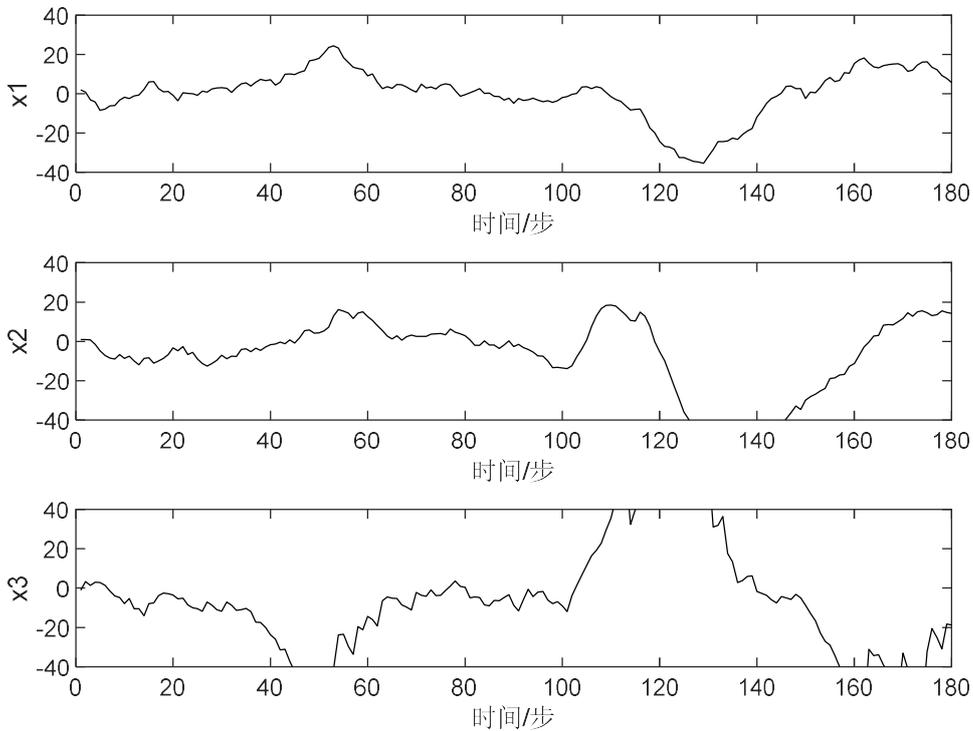


图 3-6 0.33 丢包率下无策略下的系统状态轨迹图

Figure 3-6. System state trajectory without policy at 0.33 packet dropout rate

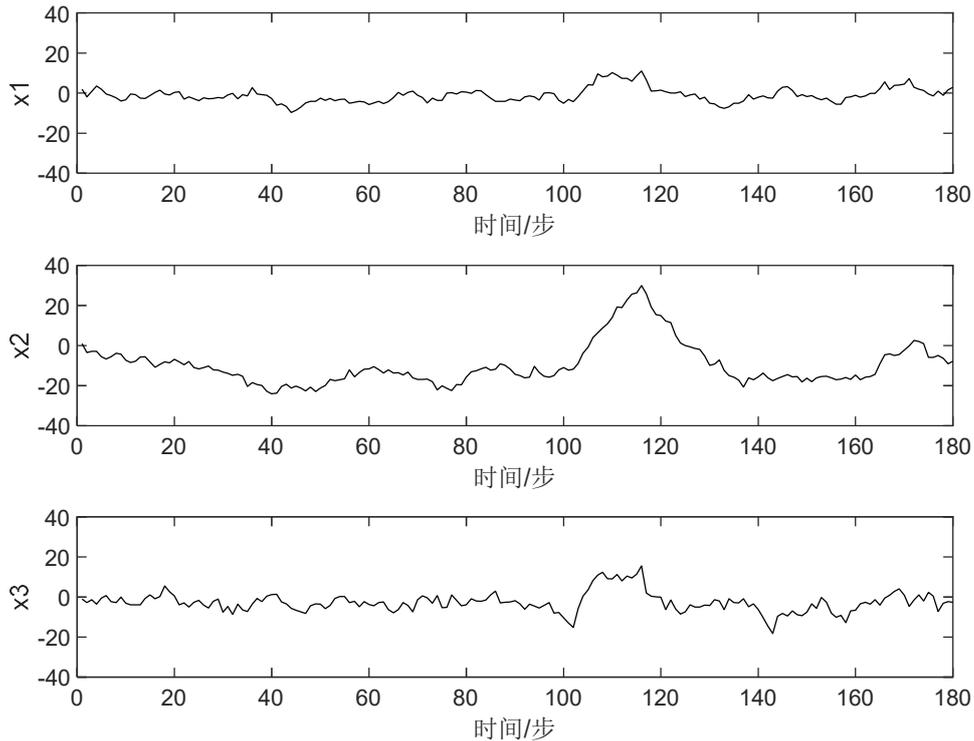


图 3-7 0.33 丢包率下 PBDT 策略的系统状态轨迹图

Figure 3-7. System state trajectory of PBDT strategy at 0.33 packet dropout rate

在图 3-6 和图 3-7 的实验设置中，无线网络化控制系统的原始随机退避时间上限为 $t_r^{\max} = 0.15ms$ ，即无策略下主动丢包率为 0.33。由图 3-6 和图 3-7 可以看出，在上述实验设置下，无线网络化控制系统加入改进后的 PBDT 策略使系统表现出了更好的性能。无策略的情况如图 3-6 所示，系统因受到外部扰动的影响，系统状态出现了较大的震荡，尤其在受到扰动突变时，系统状态出现了较大的一段波动；而加入改进后的 PBDT 策略能在一定程度上减少系统受到的影响，如图 3-7 所示；相比图 3-6，在加入改进后 PBDT 策略，系统状态减少了震荡，在 $k = 100$ 时刻，外部扰动发生突变，PBDT 能显著地减少扰动突变的影响，图 3-7 中系统状态的波动相对更加平缓。由此可以表明改进后的 PBDT 策略在有扰动的情况下，可减少主动丢包和系统扰动的影响，在一定程度上提升了系统的稳定性。

3.5 本章小结

本章针对受扰动的多包传输无线网络化控制系统的主动丢包的情况，改进了 PBDT 策略。本章在 PBDT 策略中加入预测偏差估计器，缓解系统外部扰动作用对预测器的影响，并在预测偏差估计器中设置了偏差突变检测，减小系统外部扰动的突变对策略的冲击，提高了策略的鲁棒性。然后给出了 H_∞ 控制器的

设计方法，最后通过数值仿真表明本章方法在一定程度上能够在有扰动的情況下缓解因主动丢包带来的影响。

第四章 总结与展望

4.1 总结

本文对多包无线网络化控制系统的主动丢包问题展开研究，从无外部扰和有外部扰动两种情况对系统进行相应的设计和分析，分别提出了有效的传感器数据的动态传输策略。多包无线网络化控制系统是分布式无线网络化控制系统和大规模无线网络化控制系统的必然需求，在无线网络化控制系统中，多包传输的通信方式越来越普遍。在先前大多数已有的多包传输问题研究中，把超过系统采样周期的数据当作时延问题处理，而本文从主动丢包的角度研究这一问题，这使本文区别于大多数已有研究。其难点在于，如何在网络信道资源限制的丢包情况下，从通信和控制联合分析，确定数据重要性的标准以及设计相应的动态传输策略，并且设计相应的状态反馈控制器，提高系统的稳定性。因此，本文的研究问题具有一定的挑战性。

针对多包无线网络化控制系统的主动丢包问题，本文设计了一种提出了基于预测器的动态传输策略，该策略能减少主动丢包给多包无线网络化控制系统带来的影响，并提升系统的整体性能。本文的主要研究内容可总结如下两点：

(1) 研究了无扰动情况下的多包无线网络化控制系统的主动丢包问题。本文提出了基于预测器的动态传输策略，该策略由优先级预测器、传输调节器和状态反馈控制器三部分组成，该策略的主要思想如下：为了尽可能的减少随机丢包对系统所造成的影响，设计优先级预测器在当前时刻预测下一时刻各传感器数据对系统的重要性，帮助传输调节器进行决策。设计合理的传感器动态传输调节规则，降低高优先级数据的等待时间，提高低优先级数据的等待时间，让对系统更重要的数据优先传输。在上述基础上，设计了状态反馈控制器。在上述策略的设计下，针对主动丢包的无线网络化控制系统建模得到闭环控制系统，给出了系统的指数稳定性的条件和相应的控制增益。最后通过仿真实验验证了本文所提策略的有效性。

(2) 研究了受扰动情况下多包无线网络化控制系统的主动丢包问题，在预测器无法预测系统下一时刻真值的情况下，改进了基于优先级预测器的动态传输策略，提高了策略的抗干扰能力。该策略通过设置预测偏差估计器，根据历史图窗数据实时的估计系统所受扰动，并设置了突变检测算法，使系统在丢包的情况下通过基于优先级预测器的动态传输策略也能表现出良好的鲁棒性，并且给出了控制器设计方法，最后通过仿真验证了有扰动情况下该策略的有效性。

4.2 展望

无线网络化控制系统是一个复杂且趋向智能化的系统。丢包、网络诱导时滞和通信约束等问题都是无线网络化控制系统中常研究的基本问题。近些年，随着无线网络通信技术、控制技术以及计算机技术的成熟，控制系统的规模逐渐扩大，加之各种智能算法的涌现，势必会给无线网络化控制系统带来新的活力。本文针对多包传输的无线网络化控制系统的部分数据包丢失的问题展开了研究，由于自身能力与时间的限制，仍存在很多问题去深入发掘与研究。之后，还可以从以下角度开展研究工作：

(1) 本文研究多包传输的无线网络化控制系统的丢包问题，仅考虑了传感器到控制器之间的动态传输发生了丢包现象。假如同时也考虑系统中具有多个控制器到执行器的无线通信传输链路，且在多包传输的通信方式下发生了主动丢包情况，此时控制器将如何设计，传输策略将如何改进。这种情况下，无线网络化控制系统的双侧通信如果存在信道竞争，传输策略将如何进行改进。这将是一个很有挑战性的问题。

(2) 本文仅考虑了系统中主动丢包的情况。但由于一些实际情况，控制系统规模相对较大，多包传输还会造成在控制器侧没有统一的时延的现象，这也是多包传输问题与其他主要问题的主要不同。一部分研究人员在这方面做出了一定的研究贡献，常见的处理方法是将时延最大归一化，等待一定时间使得所有的分量都是基于同一时间的，或者采用预测分量方法。那么，针对这种情况下，同时考虑到系统的网络诱导时延带来的影响，如何设计数据传输策略与相应的状态反馈控制器，也将是一个好的研究点。

(3) 对于多包传输的无线网络化控制系统可联合通信网络协同设计，这是近些年的一个研究热点。例如：IEEE 802.15.4 协议，在此协议中数据包允许有两种不同接入模式，一种是基于竞争的，一种是非竞争的。这种情况下如何更高效的数据传输策略，让一部分数据使用非竞争信道发送，另一部分使用非竞争信道发送，提高系统的性能；进一步还可以考虑到如果在竞争信道中发生网络诱导问题时，如何让系统的性能损失最小，这也是一个值得探究的问题。

(4) 本文的研究中仅考虑了外部的扰动，但是在控制系统中，无线网络化控制系统中还又可能受到内部参数的扰动的影响，因此后续可以增加对系统参数摄动影响的研究，如何在此情况下设计一种更有普适性的传输策略，是一个很有研究意义的问题。

参考文献

- [1] Wang F Y, Liu D. Networked Control Systems [J]. Lecture Notes in Control & Information Sciences, 2008, 52(9): 318-323.
- [2] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [3] 张英, 司瑞才, 曹伟. 网络化控制系统研究综述 [J]. 电力科技与环保, 2020, 36(02): 60-2.
- [4] 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.
- [5] Bai J, Wang Y, Zhao L Y. Event-triggered H_∞ control for NCS with time-delay and packet losses[J]. IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2020, 37(3): 918-934.
- [6] Gavriluta, Catalin, Boudinet, et al. Cyber-physical framework for emulating distributed control systems in smart grids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 114(1): 105375.1-105375.11.
- [7] Farias C D, Soares H, Pirmez L, et al. A control and decision system for smart buildings using wireless sensor and actuator networks[J]. European Transactions on Telecommunications, 2014, 25(1): 120-135.
- [8] Chakma R, Emon I S, Mostafizur R, et al. Navigation and tracking of AGV in ware house via wireless sensor network[C]// 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference. IEEE, 2019: 1686-1690.
- [9] Huijun Gao, Tongwen Chen. H_∞ Estimation for Uncertain Systems with Limited Communication Capacity[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(11): 2070-2084.
- [10] Wang Z, Dong H, Shen B, et al. Finite-horizon H_∞ filtering with missing measurements and quantization effects[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(7): 1707-1718.
- [11] Lješnjanić M, Quevedo D E, Nešić D. Packetized MPC with dynamic scheduling constraints and bounded packet dropouts[J]. Automatica, 2014, 50(3): 784-797.
- [12] Wen D L, Yang G H. State feedback control of continuous-time networked control systems in multiple-packet transmission[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. IEEE, 2009: 582-587.
- [13] Burbank J L, Andrusenko J, Everett J S, et al. Wireless networking: Understanding internetworking challenges[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wang S, Yu M, Sun X. Robust H_∞ control for time-delay networked control systems with probability constraints[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(16): 2482-2489.
- [17] Zhu Q, Xie G. Analysis and modeling of multi-rate networked control systems with long time delay[C]//2012 24th Chinese Control and Decision Conference. IEEE, 2012: 2978-2983.
- [18] Liu H, Zhu Q. Analysis and modeling of multi-rate networked control systems with short time delay[J]. Advanced Science Letters, 2012, 11(1): 745-750.

- [19] 刘安东, 季鹏, 张文安, 等. 具有时延和乱序网络化系统的动态矩阵控制[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(7): 1555-1565.
- [20] Wang Z, Yang F, Ho D W C, et al. Robust H_∞ Control for Networked Systems with Random Packet Losses[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(4): 916-924.
- [21] Shi Y, Yu B. Robust mixed H_2/H_∞ control of networked control systems with random time delays in both forward and backward communication links[J]. Automatica, 2011, 47(4): 754-760.
- [22] Elahi A, Alfi A. Finite-time H_∞ control of uncertain networked control systems with randomly varying communication delays[J]. ISA Transactions, 2017, 69(1): 65-88.
- [23] Dinh T Q, Ahn K K, Marco J. A novel robust predictive control system over imperfect networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(2): 1751-1761.
- [24] Liu G P. Predictive control of networked multiagent systems via cloud computing[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8): 1852-1859.
- [25] Tan C, Yin X, Liu G P, et al. Prediction-based approach to output consensus of heterogeneous multi-agent systems with delays[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(1): 20-28.
- [26] Xiong J, Lam J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J]. Automatica, 2007, 43(1): 80-87.
- [27] Zhang X M, Han Q L. Network-based H_∞ filtering using a logic jumping-like trigger[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1428-1435.
- [28] Gao H, Meng X, Chen T. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2142-2148.
- [29] Henriksson E, Quevedo D E, Peters E G W, et al. Multiple-loop self-triggered model predictive control for network scheduling and control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(6): 2167-2181.
- [30] Peters E G W, Quevedo D E, Fu M. Controller and scheduler codesign for feedback control over IEEE 802.15. 4 networks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2617-2629.
- [31] Zhao Y B, Kim J, Liu G P. Error bounded sensing for packet-based networked control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(5): 1980-1989.
- [32] Zhu X L, Yang G H. State feedback controller design of networked control systems with multiple-packet transmission[J]. International Journal of Control, 2009, 82(1): 86-94.
- [33] Yang S H, Liang T H, Wu J L. Output feedback multiple-packet transmission networked control systems[C]//2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE, 2013: 615-620.
- [34] Wu D, Wu J, Chen S. Separation principle for networked control systems with multiple-packet transmission[J]. IET Control Theory & Applications, 2011, 5(3): 507-513.
- [35] 魏永松, 郑毅, 李少远, 等. 面向大规模网络化系统的分布式预测控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 997-1007.
- [36] Hu S, Yan W Y. Stability of networked control systems under a multiple-packet transmission policy[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(7): 1706-1711.
- [37] Imer O C, Yüksel S, Başar T. Optimal control of LTI systems over unreliable communication links[J]. Automatica, 2006, 42(9): 1429-1439.
- [38] Zhang Y, Ren L, Xie S, et al. Robust sliding mode control for uncertain networked control system with two-channel packet dropouts[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(4): 881-892.
- [39] Xu J, Gu G, Gupta V, et al. Optimal stationary state estimation over multiple Markovian packet

- drop channels[J]. Automatica, 2021, 128: 109561.
- [40] 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.
- [41] Xia Y, Liu G P, Rees D. H_∞ control for networked control systems in presence of random network delay and data dropout[C]//2006 Chinese Control Conference. IEEE, 2006: 2030-2034.
- [42] Xue B, Li S, Zhu Q. Moving horizon state estimation for networked control systems with multiple packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(9): 2360-2366.
- [43] Na X, Zhan Y, Xia Y, et al. Control of networked systems with packet loss and channel uncertainty[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(17): 2251-2259.
- [44] Song H. Design and Stability Analysis of Uncertain Networked Predictive Control Systems with Multiple Forward Channels[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 1-11.
- [45] Sun Z, Xiao L, Zhu D. Analysis of networked control systems with multiple-packet transmission[C]//Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2004, 2: 1357-1360.
- [46] Zhang D, Luan Y. H_∞ Fault Detection of Networked Control Systems with Multi-packet Transmission and Random Delay using Delta Operator[C]//2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2020: 5091-5096.
- [47] Wu C. Practical models and control methods with data packets loss on NCS[C]//2006 IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IET, 2006: 1-4.
- [48] Song H, Liu G P, Yu L. Networked predictive control of uncertain systems with multiple feedback channels[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(11): 5228-5238.
- [49] Wu J, Chen T. Design of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(7): 1314-1319.
- [50] Zhao Y B, Kim J, Yang G H, et al. Model-based compensation for multi-packet transmission in networked control systems[C]//2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. IEEE, 2011: 3136-3141.
- [51] Zhao Y B, Huang T, Kang Y, et al. Stochastic stabilisation of wireless networked control systems with lossy multi-packet transmission[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(4): 594-601.
- [52] Zhao Y B, He J T, Zhu Q H, et al. Classification - Based Control for Wireless Networked Control Systems with Lossy Multipacket Transmission[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(11): 1667-1672.
- [53] Zhang W A, Yu L. Modelling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout[J]. Automatica, 2008, 44(12): 3206-3210.
- [54] Li H, Sun Z, Liu H, et al. Predictive observer - based control for networked control systems with network - induced delay and packet dropout[J]. Asian journal of control, 2008, 10(6): 638-650.
- [55] Choi R H, Lee S C, Yoo J H. Robust real-time wireless control platform compensating for packet loss[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2012, 18(8): 768-773.
- [56] Li J, Su H, Wu Z, 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.
- [57] Peng C, Yang T C. Event-triggered communication and H_∞ control co-design for networked control systems[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1326-1332.
- [58] Tan C, Zhang H. Necessary and sufficient stabilizing conditions for networked control systems

- with simultaneous transmission delay and packet dropout[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 62(8): 4011-4016.
- [59] Pang Z H, Liu G P, Zhou D, et al. Data-based predictive control for networked non-linear systems with two-channel packet dropouts[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(7): 1154-1161.
- [60] Pang Z H, Liu G P, Zhou D, et al. Data-based predictive control for networked nonlinear systems with network-induced delay and packet dropout[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 63(2): 1249-1257.
- [61] Lu R, Xu Y, Zhang R. A new design of model predictive tracking control for networked control system under random packet loss and uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 6999-7007.
- [62] Tran T V. Analysis of packet loss on scheduling over wireless real-time control system[C]//2017 seventh international conference on information science and technology (ICIST). IEEE, 2017: 29-31.
- [63] Qu F L, Hu B, Guan Z H, et al. Quantized stabilization of wireless networked control systems with packet losses[J]. *ISA transactions*, 2016, 64: 92-97.
- [64] Mesquita A R, Hespanha J P, Nair G. Redundant data transmission in control/estimation over wireless networks[C]//2009 American Control Conference. IEEE, 2009: 3378-3383.
- [65] Mesquita A R, Hespanha J P, Nair G N. Redundant data transmission in control/estimation over lossy networks[J]. *Automatica*, 2012, 48(8): 1612-1620.
- [66] 李佳慧. 几类数据传输策略下的网络化系统状态估计[D]. 东北石油大学, 2021.
- [67] 黄逸霄. 面向实时控制的无线通信传输策略研究[D]. 电子科技大学, 2021.
- [68] Gao H, Chen T. New Results on stability of discrete-time systems with time-varying state delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(2): 328-334.
- [69] Gao H, Meng X, Chen T. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2142-2148.
- [70] Peng C, Yue D, Tian E, et al. A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2009, 346(4): 349-365.
- [71] 俞立. 线性不确定系统的最优保性能控制——线性矩阵不等式处理方法 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(03): 423-428.
- [72] Hu S, Yan W Y. Stability of networked control systems under a multiple-packet transmission policy[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(7): 1706-1711.
- [73] 黄涛. 多包传输网络化控制系统的设计和分析[D]. 浙江工业大学, 2020.
- [74] Song H, Yu L, Zhang W A. H_∞ filtering of network-based systems with random delay[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(4): 615-622.
- [75] BOYD S. History of linear matrix inequalities in control theory[C]//Proc. of the American Control Conference, 1994: 31-34.
- [76] Scherer C W, Weiland S. Linear matrix inequalities in control[M]//The Control Systems Handbook, Second Edition: Control System Advanced Methods. CRC Press, 2011: 1-30.

致 谢

三年的时光飞逝而过，悄无声息，我的研究生生涯即将画上一个完美的句号。回顾研究生生活中的点点滴滴，期间的美好回忆都将永远珍藏我心底，再次感谢三年来慷慨帮助和支持过我的人。

首先，非常感谢我的导师赵云波教授。在我读研究生期间，赵老师认真负责，教会我看待问题要深入思考，不能只理解表面，并且培养了我举一反三的能力。赵老师在指导我的研究问题时，不仅会引导我去思考，也会一阵见血地指出问题以及提出一些有效的解决路线，而且老师在非工作日期间也会安排时间跟我讨论科研问题，我真的十分感谢我的导师赵云波教授。这三年，赵老师给予我很大的帮助，不仅是科研方面，还有做事方面也有一定的启发，我相信这对我今后的工作和生活都是很宝贵的财富。

其次，我要感谢跟我一起生活和学习的同学以及实验室的同门。在这里我要特别感谢我的男朋友朱振强，他鼓励陪伴我，我成长了很多。感谢我的实验室的梁启鹏师兄、朱创师兄、唐敏师兄、朱巧慧师姐、王岭人师姐、吴芳、赵丽丽、花婷婷和卢子轶学习和生活上的帮助，感谢好姐妹陈佳雯和刘睿的关心，感谢好朋友学霸、豆儿和大哥的关心，感谢我的好兄弟领子哥和佳弟，感谢谭老师和小梅夫妇给予的帮助。由于他们的存在，使我的研究生生活多姿多彩。

然后，我要感谢我亲爱的爸爸妈妈，对我学业的大力支持和对我的培养，感谢我帅气的弟弟对我的关心和鼓舞，感谢我美丽温柔的好闺蜜范学敏的陪伴和鼓励，感谢读研期间帮助过我的每一个可爱的人。

最后，十分感谢各位专家和老师们在百忙之中抽出宝贵的时间对我硕士毕业论文的评阅。

作者简介

1 作者简介

1996年06月出生于河南省封丘县。

2015年10月——2019年06月，洛阳信息学院物理与电子信息学院电气工程及其自动化（过程控制方向）专业学习，获得工学学士学位。

2019年09月——2022年06月，在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] 闫文晓, 赵云波. 基于优先级预测器的无线网络化控制系统的动态传输策略[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, 卢帅领, 梁启鹏, 闫文晓. 一种基于TCP套接字的SCILAB与NS3协同仿真接口方法:, CN112699515A[P]. 2021.

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	全日制学术型研究生
论文题名*	主动丢包的多包无线网络化控制系统的分析和设计		
关键词*	无线网络化控制系统,多包传输,主动丢包,预测器,动态传输		论文语种*
并列题名	无		中文
作者姓名*	闫文晓	学 号*	2111903103
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	杭州市潮王路 18 号	310032
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
控制科学与工程	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*	69 页		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 25 项。			