



浙江工业大学

硕士学位论文

论文题目： 多包传输网络化控制系统的设计
和分析

作者姓名	黄涛
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：2019年06月

Design and Analysis of Networked Control Systems with Multi-packet Transmission

Dissertation Submitted to

Zhejiang University of Technology

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Engineering



by

Tao HUANG

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-Bo Zhao

Jun. 2019

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：黄涛

日期：2019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：黄涛

日期：2019年5月

导师签名：赵明

日期：2019年5月

中图分类号 TP273

学校代码 10337

UDC 621.3

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

多包传输网络化控制系统的设计和分析

Design and Analysis of Networked Control Systems with
Multi-packet Transmission

作者 黄涛

第一导师 赵云波教授

申请学位 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 网络化控制系统

答辩委员会主席 赵云波

答辩日期: 2019 年 5 月 15 日

多包传输网络化控制系统的设计和分析

摘 要

随着通信技术、控制理论和计算机技术的飞速发展，网络化控制系统在学术界和工业界中引起了强烈的关注。网络化控制系统是通过通信网络将传感器、控制器和执行器互联的控制系统。与传统控制系统相比，网络化控制系统有着更低廉的布线成本、更灵活的配置和更便利的维护性等优点。目前随着先进技术和生产要求的提高，对多传感器通过通信网络独立传输数据并由控制器处理分发控制信号的控制系统的需求越来越多。因此，如何对采用此通信方式的网络化控制系统进行建模、分析和控制器设计是热点研究课题。

然而，利用此通信方式给网络化控制系统带来了许多不可避免的问题，例如部分包丢失、多时延、传感器多采样率和通信信道竞争等，这些问题将会导致控制系统的性能下降，甚至影响系统的稳定性。我们把这些问题统称为多包传输问题，特别在无线网络化控制系统中，该问题是一个亟待解决的核心问题，同时也是物联网、信息物理融合等系统中需要解决的重要问题。

本文在基于国内外研究现状的基础上针对多包传输网络化控制系统中的丢包问题给出了相应的解决方案，具体的工作内容如下：

(1) 针对网络化控制系统中存在由多包传输引入的部分包丢失问题，提出了基于状态重构方法的状态反馈控制方案。首先采用状态重构方法对部分丢失信息进行重构，进一步将随机稳定的概念引入到此闭环控制系统中，从而得出了闭环控制系统的稳定性结论以及给出了闭环控制系统状态反馈控制器的设计方法。

(2) 针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的基于观测器的控制器设计问题，提出了基于输出重构的观测器和控制器设计规则。首先采用输出重构方法补偿多包传输网络化控制系统丢失的信息；进一步采用基于观测器的控制规则来进行控制器的设计，得到闭环控制系统；然后证明了闭环控制系统的随机稳定以及给出了相应的控制增益矩阵和观测增益矩阵的联合设计。

(3) 针对 (1) 中的问题, 该解决方案并没有考虑由于重构信息引入的系统误差, 对此提出一种基于重构信息的分类补偿控制规则。首先采用状态重构方法来重构部分丢失信息, 并对重构信息和接收到的信息分别设计反馈矩阵; 进一步得到闭环控制系统指数稳定的充分条件以及通过最小化衰减率来进行求解控制器设计的约束条件, 从而得到控制增益矩阵。

论文通过 MATLAB 软件和 TrueTime 工具箱对一些实例进行仿真研究, 验证所提出设计方法的有效性。最后, 对全文进行了总结, 并对下一步的研究进行展望。

关键词: 网络化控制系统, 多包传输, 状态重构, 随机镇定, 分类补偿控制

DESIGN AND ANALYSIS OF NETWORKED CONTROL SYSTEMS WITH MULTI-PACKET TRANSMISSION

ABSTRACT

With the rapid development of communication technology, control theory and computer technology, networked control systems have been attracted attention in the academic and industrial communities. Networked control systems are control systems whose control links are closed via some form of communication networks. Compared with the traditional control systems, there are some advantages such as lower wiring costs, more flexible configurations, more convenient maintenance and so forth in the networked control system. As the development of advanced technologies and the improvement of production requirements, there is an increasing demand for the control systems in which multiple sensors transmit data independently through the communication network and control signals are transmitted by the controller. Therefore, how to carry out networked control systems with multi-package transmission modeling, analyzing and controller designing is the hot research topic in the control community.

However, the use of this communication method brings unavoidable problems to the networked control system, such as partial packet loss, multiple delays, multi-sampling rates and communication channels competition and so forth. These problems will lead to the performance degradation of the control system, even affect the stability of the system. We refer to these problems as multi-packet transmission problems, which are urgent to be solved in the systems such as the wireless control systems, the Internet of Things and the information physical fusion system.

Based on available literatures, this thesis has proposed corresponding solutions for networked control systems with lossy multi-packet transmission. The specific works are as follows:

(1) The reconstruction-based state feedback control scheme is proposed for the networked control systems with lossy multi-packet transmission. The state reconstruction method is used to reconstruct part of the lossy information, and the concept of stochastic stability is further introduced into the closed-loop control system. The stability conclusion of the closed-loop control system is obtained and the controller design is given.

(2) The observer-based control rule is proposed for the networked control systems with lossy multi-packet transmission. Firstly, the output reconstruction method is used to reconstruct the lossy information in networked control systems with multi-packet transmission. The observer-based control rules are used to design the controller and the closed-loop control system is obtained. Then the stochastic stability of the closed-loop control system is obtained. Finally, A joint design of the corresponding control gain matrix and the observed gain matrix is given.

(3) For the problem in (1), there is a disadvantage the systematic error introduced by the reconstruction state method is not considered. The classification control rule based on reconstruction information is proposed. Firstly, state reconstruction method is used to reconstruct lossy information and then the feedback matrices are designed respectively for the reconstruction information and the received information. Further, the sufficient conditions for the exponential stability of the closed-loop control system are obtained. Finally, the control gain matrices is obtained by minimizing the decay rate to solve the constraints of linear matrices inequality of the control design rule.

A number of illustrative examples, which are carried out by the MATLAB software and the TrueTime toolbox, are given to show the effectiveness of the proposed design methods. Finally, the conclusion and future works are presented.

KEY WORDS: Networked control systems, Multi-packet transmission, State reconstruction, Stochastic stabilization, Classification-based control

目 录

摘要	I
ABSTRACT.....	III
插图清单	VII
列表清单	VIII
符号说明	IX
第一章 绪论	1
1.1 网络化控制系统的研究背景和意义.....	1
1.2 网络化控制系统概述和研究现状	2
1.2.1 网络化控制系统的发展历程及其特点.....	2
1.2.2 网络化控制系统的基本问题	4
1.2.3 网络化控制系统在国内外的研究现状.....	6
1.3 本文的主要研究内容	8
1.3.1 网络化控制系统中的多包传输.....	8
1.3.2 本文的主要工作	10
第二章 多包传输网络化控制系统的随机镇定	11
2.1 问题描述	11
2.1.1 处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统.....	12
2.1.2 系统变换.....	12
2.1.3 基于状态重构的闭环控制系统.....	13
2.2 稳定性分析和控制设计.....	15
2.2.1 稳定性分析	15
2.2.2 控制器设计	18
2.3 数值仿真和 TrueTime 仿真	20
2.3.1 数值例子.....	20
2.3.2 TrueTime 例子	22
2.4 本章小结	24

第三章 多包传输网络化控制系统的基于观测器控制方案	25
3.1 问题描述	25
3.1.1 多包传输网络化控制系统设置	25
3.1.2 基于观测器控制规则的闭环控制系统	27
3.2 稳定性分析和基于观测器的控制器设计	28
3.2.1 稳定性分析	28
3.2.2 观测器和控制器设计	31
3.3 数值仿真	34
3.4 本章小结	35
第四章 多包传输网络化控制系统的分类补偿控制	37
4.1 问题描述	37
4.1.1 多包传输网络化控制系统设置	37
4.1.2 多包传输网络化控制系统设计分析	38
4.2 分类补偿控制策略	39
4.3 稳定性分析和控制器设计	41
4.3.1 稳定性分析	41
4.3.2 控制器设计	43
4.4 数值仿真	45
4.5 本章小结	46
第五章 结论与展望	47
5.1 结论	47
5.2 展望	48
参考文献	49
致谢	53
作者简介	55
1 作者简介	55
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文	55
3 参与的科研项目及获奖情况	55
4 发明专利	55
学位论文数据集	57

插图清单

图 1-1: DDCS 系统结构图	2
图 1-2: DCS 系统结构图	3
图 1-3: NCSs 系统结构图	4
图 1-4: 网络化控制系统多传感器结构图	8
图 1-5: 网络化控制系统传感器采集数据较大的传输结构图	9
图 2-1: 网络化控制系统多包传输结构图	11
图 2-2: 使用文献 ^[61] 中的控制方法所产生的状态响应	20
图 2-3: 本文提出的方法所产生的系统状态响应	21
图 2-4: 基于 TrueTime 仿真结构图	23
图 2-5: 在 TrueTime 中使用两种方法产生的状态响应曲线	23
图 3-1: 网络化控制系统多包传输结构图	26
图 3-2: 两个传感器发送数据包分别丢失的情况 (“1”表示数据成功传输到控制器中, 而“0”表示数据包在通信信道中丢失)	32
图 3-3: 本文提出的方法所产生的系统状态响应	33
图 3-4: 使用文献 ^[50] 中的控制方法所产生的状态响应	34
图 4-1: 网络化控制系统多包传输结构图	38
图 4-2: 多包传输网络化控制系统分类补偿控制结构图	40
图 4-3: 三个传感器发送数据包分别丢失的情况。(“1”表示数据成功传输到控制器中, 而“0”表示数据包在通信信道中丢失。)	44
图 4-4: 两种方法的状态轨迹比较图	46

列表清单

表 2-1: 使用大量的数值例子来比较系统性能 (针对每种参数都进行了 50 次仿真).....	22
---	----

符号说明

\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
$diag\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$	——	由矩阵块 A_1, A_2, \dots, A_m 组成的分块对角阵
$\mathbb{E}\{\cdot\}$	——	求取期望
I_n	——	维度为 n 的单位矩阵
$P > 0$	——	P 为正定阵
$\lambda_{max}\{\cdot\}$	——	求取矩阵的最大特征值
$\lambda_{min}\{\cdot\}$	——	求取矩阵的最小特征值
\prod	——	矩阵求积
$rank(\cdot)$	——	矩阵的秩

第一章 绪论

1.1 网络化控制系统的研究背景和意义

随着科学技术的飞速发展,各个学科之间的交叉融合成为一种流行的方向。飞速发展的通讯技术、计算机技术(特别是嵌入式技术)以及传感器技术对控制系统产生了巨大的影响。从计算机技术的发展角度看,随着材料技术的发展以及集成电路的出现和发展,计算机所占用的空间体积经历着从巨大位置空间向小位置空间的转变,这种变化使得计算机技术在控制领域中产生的数字控制系统在现实的物理世界中发挥着举足轻重的作用,特别是嵌入式控制系统在人们生活中随处可见。从通信技术的发展角度看,从专线数字控制系统,现场总线(例如 CAN 总线)控制系统,远程控制系统系统(通过以太网来连接受控对象和控制器),发展到现在的无线控制系统。当现场总线应用到控制系统中,标志着网络化控制系统(Networked Control Systems, NCSs)的出现。正是由于通信技术的发展,网络化控制系统中的更低廉的布线成本、更灵活的配置和更便利的维护性等优势才能够发挥出来^[1]。从传感器技术的发展角度看,正是由于传感器技术的发展,传感器的精度才能够提高以及传感器的成本才能够降低,从而才能够将网络化控制系统广泛的应用在现实的物理世界中。例如现在的物联网(Internet of Things, IoT)领域的一些应用场景(例如智能家居、可穿戴设备、自动驾驶、楼宇自动化等)已经产生了较大的应用价值^[2,3]。由于上述这些新技术的引入形成的新控制系统具有传统控制系统无法比拟的优点,因此通讯技术、计算机技术、传感器技术和控制技术的交叉领域所形成的网络化控制系统已经成为国际控制领域的一个热门课题。

从通讯技术和控制技术结合的角度看,与传统的控制系统相比,这类控制系统最大区别在于其控制系统中的传感器、控制器和执行器之间的连接通过某种通信技术来实现。网络化控制系统中最关键的是在于把通信网络引入到控制系统中,可以达到通过远程来对系统进行控制以及在非局部区域执行多个任务,而在传统的控制系统中反馈通道通过专线来连接传感器和控制器。因此,网络化控制系统具有无可比拟的优势。一方面,网络化控制系统可以消除各个部件之间不必要的物理连接,这也意味着在设计和实现此控制系统时,网络化控制系统可以降低布线成本以及占用空间成本。另一方面,正因为布线的减少(例如通过无线网络来连接控制系统的各个部分),系统的耦合性才得以降低。从而系统维护更加容易以及配置更加灵活,例如:可以不用对整个控制系统进行重大

的改善前提下可以额外添加或者删除目前不必要的一部分系统部件^[4]。因此，网络化控制系统广泛应用于工业控制领域中。在早期，网络化控制系统在汽车行业中有着成熟地运用，通过 CAN 总线引入到控制系统中，极大地减少了布线成本以及可以更灵活的控制；而现在网络化控制系统被广泛应用在智能交通、智能制造、工业自动化等诸多新兴领域^[5]。

但事物总存在两面性。正是网络化控制系统中运用到相关的通信技术，而通信网络的本身不可靠给控制系统的性能造成了严重的影响。因此有无数的研究者们投入到此方向中，为网络化控制系统的发展做出了巨大的贡献。而现在随着技术的发展和产品的需求不断增加，工业控制系统的规模越来越大，例如：电力系统、污水处理系统等^[6]，这些系统的传感器或执行器广泛地分布在空间各地。此类系统与传统的网络化控制系统相比，存在着大量的理论问题尚未解决，其中一个最基础的问题就是多个传感器通过资源受限的通信网络独自发送自己采集的信息到控制器，这种传输方式对控制系统产生了怎样的影响？网络化控制系统中的这种传输方式带来的问题也是物联网、信息物理融合系统等需要解决的核心问题^[7]。因此多传感器的网络化控制系统问题研究具有现实理论意义和应用价值。

1.2 网络化控制系统概述和研究现状

1.2.1 网络化控制系统的发展历程及其特点

控制系统的发展很大程度上受计算机技术和通信技术的影响。在早期，主要是对连续时间系统进行反馈控制器的设计，控制领域的专家贡献出了他们的

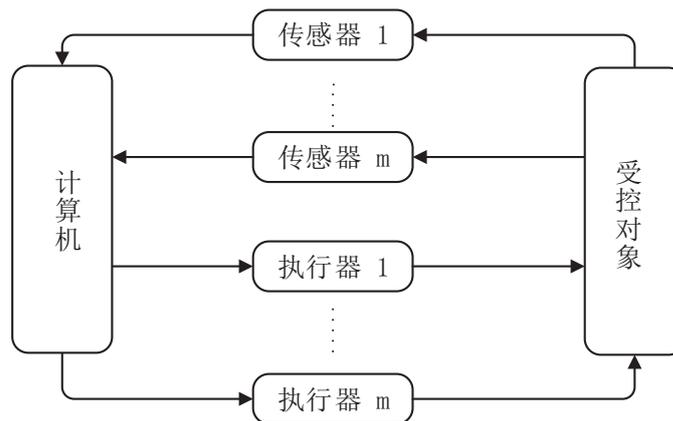


图 1-1 DDCS 系统结构图

Figure 1-1 the structure diagram of Direct Digital Control Systems

智慧，特别是奈奎斯特^[8]提出了一般的设计和分析方法，此方法可以几乎应用

到任何反馈控制系统中。到上个世纪 50 年代以后，随着计算机技术的发展，工程师和学者们越来越关注数字计算机作为控制系统中的反馈控制器。在上个世纪 60 年代初，出现了由计算机来代替反馈控制器的控制系统，这种类型的控制系统一般被称为直接数字控制系统 (Direct Digital Control Systems, DDCS)，如图 1-1 所示。随着工艺的复杂度上升，以及计算机技术的发展，到 70 年代中期，出现了以微处理器为计算基础的分散式计算机控制系统，此控制系统一般称为集散控制系统 (Distributed Control System, DCS) 的到来，如图 1-2 所示。集散控制系统的特点是各个子模块的计算机可以独立进行工作，让每个控制系统模块设计变得简单；各个计算机再与中央控制单元进行交互，从而中央控制单元起到监视以及总体控制要求的作用，例如开关、报警等控制。

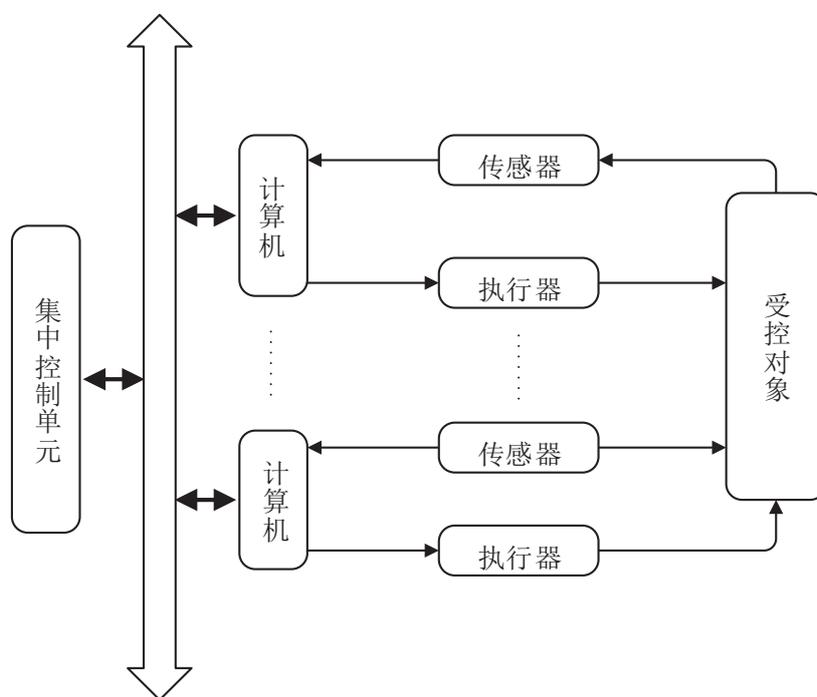


图 1-2 DCS 系统结构图

Figure 1-2 the structure diagram of Distributed Control Systems

随着通信技术中的总线技术出现和发展，工程师们逐步开始将总线技术应用到控制系统中，这种控制系统一般称为现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS)，现场总线控制系统的出现标志着网络化控制系统的诞生。与集散控制系统相比，正是由于现场总线控制系采用了总线技术，这种控制系统不仅降低了设备的安装成本而且也提高了系统的扩展性与灵活性等。虽然现场总线控制系统有上述等许多优点，但从结构上说它仍然是一个封闭式的控制系统，即通信技术采用专用的工业通信网络。随着工业控制系统的规模越来越大，通过 Internet 等异构网络对控制系统的各个部件互连成为一种趋势，网络化控制系统

得到进一步的发展。到目前,工程师和学者们开始关注通过无线信道而非有线信道来对控制系统的各个部件进行互联,这类系统一般被称为无线网络化控制系统^[9]。正是由于该系统的各个部件采用无线信道进行互联,则它很容易在难以布线区域或危险区域等运转起来、避免了昂贵的成本(电线材料和人工劳动力)、降低了系统的出错率(人为导致错误接线)以及提高了系统的容错性(可以避免电线的老化)等^[10]。虽然网络化控制系统与传统控制系统相比有着无可比拟的优势,特别是无线网络化控制系统,但正是由于通信网络本身不可靠的问题为网络化控制系统设计和分析带来了巨大挑战。因此,需要大量的学者们贡献出自己新的思想来解决网络化控制系统的相关问题。

1.2.2 网络化控制系统的基本问题

一般网络化控制系统的结构如图1-3所示,即该控制系统的传感器与控制器或控制器与执行器通过通信网络进行互连。众所周知,数据要经过编码后打成

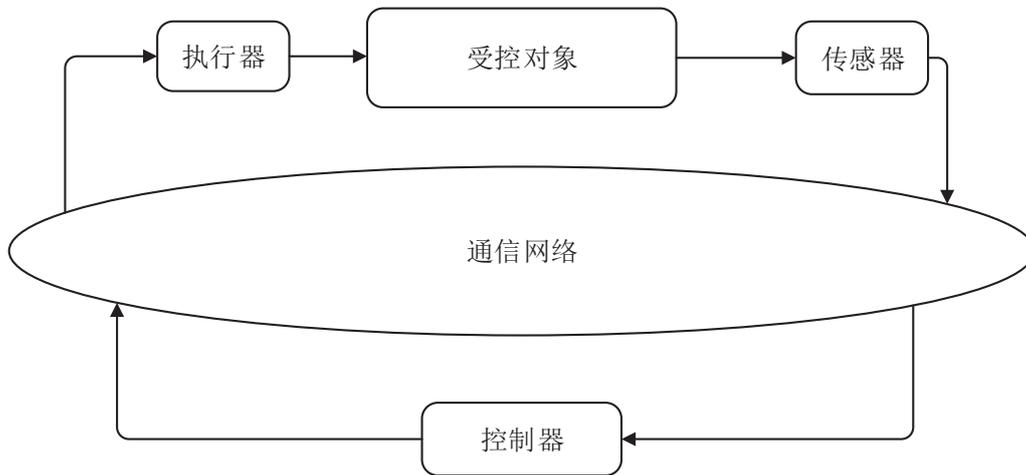


图 1-3 NCSs 系统结构图

Figure 1-3 the structure diagram of Networked Control Systems

数据包才能通过通信网络来进行传输,故数据必然存在着量化误差等问题,以及数据包在传输过程中不可避免的受到网络带宽、网络负载等因素的影响,这些负面影响会导致数据包有着传输时延、数据包丢失、数据包时序错乱等问题^[11]。而特别是在无线网络化控制系统中,无线网络中的节点一般采用电池供电^[10]以及无线信道资源有限,故需要考虑功耗^[12, 13]和信道接入^[9]等问题。下面将对网络化控制系统涉及的问题进行进一步讨论。

1) 网络诱导延时。在网络化控制系统中,数据包的传输时间引起网络化控制系统的网络诱导时延,它严重影响网络化控制系统的性能。根据网络时延发生的情况可以将其分为两类^[14, 15]: τ_{sc} (网络化控制系统中传感器到控制器通道的传输时延)和 τ_{ca} (网络化控制系统中控制器到执行器通道的传输时延)。虽然这两

类网络诱导时延可能有着不同的特点，但在大多数情况下，不会采用分别处理各个时延的方法，只会关注控制系统的往返时延。依据网络化控制系统中使用的通信网络类型，网络诱导时延有着不同的特征^[16, 17]：(1) 循环服务网络 (例如 Toking-Ring, Toking-Bus) 可以认为是有限延时，但在大多数场合都被认为延时是固定的；(2) 随机接入网络 (例如 Internet 和 CAN) 的时延是随机的或无限的；(3) 优先顺序网络 (例如 DeviceNet)，对于数据包的优先权较高时时延是有界的，而对优先权较低的数据包来说时延是无界的。

2) 数据包丢失。通信网络中的数据传输错误是不可避免的，在网络化控制系统中产生一种叫做“数据包丢失”的情况。数据包丢失可以发生在传感器到控制器信道或控制器到执行器信道中，数据包丢失意味着传感器数据或控制信号无法被网络化控制系统获取，进一步显著降低了网络化控制系统的性能^[18, 19]。在通信网络中，有两种不同的策略来处理数据包丢失的情况，即要么再次发送该数据包要么丢弃该数据包。这两种策略被称为传输控制协议 (TCP) 和用户数据报协议 (UDP)。很容易看出，通信信道使用 TCP 协议，控制器或执行器将会接收到所有相关的数据，但有可能需要相当长的时间才能接收到该数据包。而 UDP 协议而言，一些数据包将丢失后不会存在重传机制。由于控制系统一般是一个实时控制系统，故网络化控制系统一般采用类似 UDP 协议进行数据包的传输。

3) 数据包乱序。在大多数通信网络中，不同的数据包到达控制器或执行器有着不同的时延，这就有可能造成发送比较早的数据包比发送比较晚的数据包后到达控制器或执行器，这种情况通常被称为数据包乱序^[20, 21]。由于大多数网络化控制系统采用了类似 UDP 协议，若系统中的控制算法没有明确考虑数据包的无序性，则网络化控制系统的性能将会不可避免的降低。因此需要在控制器或执行器端比较数据包的先后次序，一般会在数据包中添加时间戳。一般来说，控制器可以利用过时的数据包来对现在的信息可以达到一定程度的纠正。因此在网络化控制系统中，当对系统的分析和设计时有时也需要考虑此类现象产生过时的数据如何使用。

4) 多包传输问题。在网络化控制系统中，通信网络采用多包传输是一种更一般的传输方式。所谓多包传输是指在传感器到控制器信道中，每步传感器采集的数据不能打成单个数据包进行传输，或在控制器到执行器信道中，每步控制器计算的控制信息也不能打成单个包进行传输。随着控制系统的结构越来越复杂、对受控对象的要求日益增多，多包传输网络化控制系统变得越来越常见。网络化控制系统中的多包传输也带来了一些新的问题，把这些问题称为多包传输问题，这些问题包含了部分信息丢失、时延不匹配、传感器优先级接入、控制信号优先级发送、传感器多采样率等^[22, 23]。所谓部分信息丢失是指每步每个传感器通过传感器端到控制器端的信道向控制器独立发送数据包，或者每步控制器通过控制器端到执行器端的信道向执行器独立发送较多的信息，控制器只接

收到部分信息或只有部分控制信息被执行器接收到；时延不匹配是指在上述情形中，数据包到达控制器或执行器的时延一般不相等；而传感器优先级接入问题以及控制器向其中一个执行器先发送问题都是在通信资源受限的情况下需要考虑的问题，一般而言，影响控制系统的性能较大的信息需要优先接入到网络中，特别在无线通信网络中控制系统与 MAC 层进行联合设计是现在研究的趋势^[24]；以及传感器多采样率指多个传感器采样周期不一致或是时变的^[25]，如何进行控制器的设计？

5) 能源效率。尽可能减少无线网络化控制系统中无线网络节点的电池更换，这是无线网络化控制系统部署的关键问题，因此工程师们开始考虑能源效率的基本概念。众所周知，数据包高可靠性和低延时的无线网络消耗能量明显高于一般的无线网络，从而导致了高可靠性和低延时的无线网络的使用寿命大大降低^[26]。因此无线网络化控制系统的可靠性与无线网络的能耗问题需要工程师和学者们构思出一种折中的方法^[12]。一般来说，控制器通常可以允许一定量的数据包丢失和时延，从而为学者们提供了最大化丢包率和最大化时延与最小化电池能耗的最佳控制设计策略^[27]。而对于通信领域的专家们，往往关注的是如何设计能耗较小的通信协议。例如，目前 IEEE 802.15.4、ZigBee 等协议广泛应用在现实的物理世界中^[28]。

6) 信道接入。单独的网络化控制系统仅占用了通信网络的部分有效负载，故为了有效利用通信资源，该网络化控制系统可以与其它应用程序共享通信网络^[29, 30]。特别是其它程序也可以是网络化控制系统，即多个网络化控制系统共享通信网络。在这种情况下，网络的有限带宽意味着某些子系统由于没有竞争到网络资源而无法进入到网络中，进一步该子系统的性能显著降低。因此，需要工程师们设计一种调度算法(子系统接入到网络中)在时间线上分别为子系统设定占用网络资源的初始时间，同时在满足各个子系统的性能前提下，最小化各个子系统的网络资源的使用，从而通信网络可以对其它应用程序产生的作用更大。

1.2.3 网络化控制系统在国内外的研究现状

从近些年发表在 *Automatica* 和 *IEEE Journals & Magazines* 等期刊上的网络化控制系统的文献上来看，主要分为两类方法来研究网络化控制系统，即第一类是网络化控制系统的控制理论研究；第二类是将控制和通信结合起来，进行联合设计。下面将对此两类方法对网络化控制系统的影响进行讨论。

从控制理论角度来看，学者们关注的是网络化控制系统的控制性能理论研究，其中将网络化控制系统中的网络通过预定参数建模到控制系统中。这种类型的研究简化了网络化控制系统的建模和分析，进一步可以将现有的控制理论方法很容易应用到网络化控制系统中。本文调查了用于网络化控制系统的常规控制理论和方法。

(1) 时延系统。针对网络引起的网络化控制系统的诱导时延问题而言, 很容易想到将网络化控制系统建模为一类特殊的时延系统。该类方法涵盖了大量关于网络化控制系统的研究^[31, 32]。在这个方向中存在一个很有意义的问题——确定网络化控制系统的最大允许时延上界问题^[33]。它是传输时延的上界, 以及必须要确保网络化控制系统的控制性能问题。最大时延上界问题不仅在理论上很重要, 而且在实际应用中有着指导作用。

(2) 随机系统。通信网络的约束本质是随机的, 例如: 通信网络中采用的随机退避算法, 因此能够将传统的随机控制方法应用到网络化控制系统中。早期的研究可以在 Nilsson^[34] 中找到, 在该文献中陈述了网络诱导时延的特征, 并获得了网络化控制系统的较粗略的随机稳定结论。Shousong^[35] 将随机最优控制理论扩展到网络化控制系统中, 并给出了随机最优状态反馈和输出反馈控制器。Zhang^[36] 将马尔科夫跳变系统理论应用到网络化控制系统中, 并得到了网络化控制系统随机稳定的充分必要条件。有关更多随机系统理论应用到网络化空系统中, 可以查看综述文献^[37, 38]。

(3) 最优控制。最优控制作为在理论和实际中的一个非常理想的观念, 故研究者也找到了将最优控制的相关理论应用到网络化控制系统中。毫无疑问, 可以针对网络化控制系统使用传统的最优控制方法来设计相应的最优控制器, 例如文献^[39, 40]。作为一类特殊的最优控制方法, 模型预测控制一般更适用于网络化控制系统, 原因在于网络化控制系统的模型预测控制的底层优化问题采用分布式解决方案。例如在 Wang 和 Mayne^[41, 42] 所做的贡献中可以看到模型预测控制在网络化控制系统的应用实例。

(4) 切换系统。网络化控制系统研究中的另外一个重要工具是切换系统理论, 该理论通常用于将网络化控制系统的不同网络条件建模为不同的系统模态。这种方法很容易处理网络化控制系统中的网络诱导时延和数据包丢失问题, 但该方法存在着非常大的局限性——不能反映出网络状况变化的特性。对于该领域的研究可以参考文献^[43, 44, 45]。

虽然网络化控制系统的理论研究能保证控制系统的性能, 但正是由于这类方法假设通信的特性是给定的参数, 因此网络化控制系统的设计和分析面临着很大的保守性。在网络化控制系统中各个子控制系统共享有限的网络资源, 为了更好的设计网络化控制系统, 近年来学者和工程师们开始关注控制和通信进行联合设计, 即各个子系统之间的调度是有必要的。Peters^[46] 提出了在低功耗 IEEE 802.15.4 协议中控制器既要利用该协议的基于竞争接入网络又要保证部分可调度问题, 并设计了一种独特的控制器和调度器联合设计的一种算法。Al-Areqi^[47] 针对网络化嵌入式控制系统设计了一种基于事件的控制器和调度器的联合设计方法, 从而提高了网络资源的利用率。更多的有关控制器和调度器联合设计方法可以查看文献^[48, 9]。

1.3 本文的主要研究内容

在本节中主要讨论本文研究的主要内容。具体的内容如下：给出了网络化控制系统的多包传输问题的定义、以及多包传输的现实意义等；给出了本文的结构说明。

1.3.1 网络化控制系统中的多包传输

本小节中主要讨论了本文的主要研究内容——网络化控制系统的丢包问题。在网络化控制系统中，存在着更一般的通信方式——多包传输。所谓多包传输^[49, 50]是指在传感器到控制器信道中，每步传感器采集的数据不能打成单个

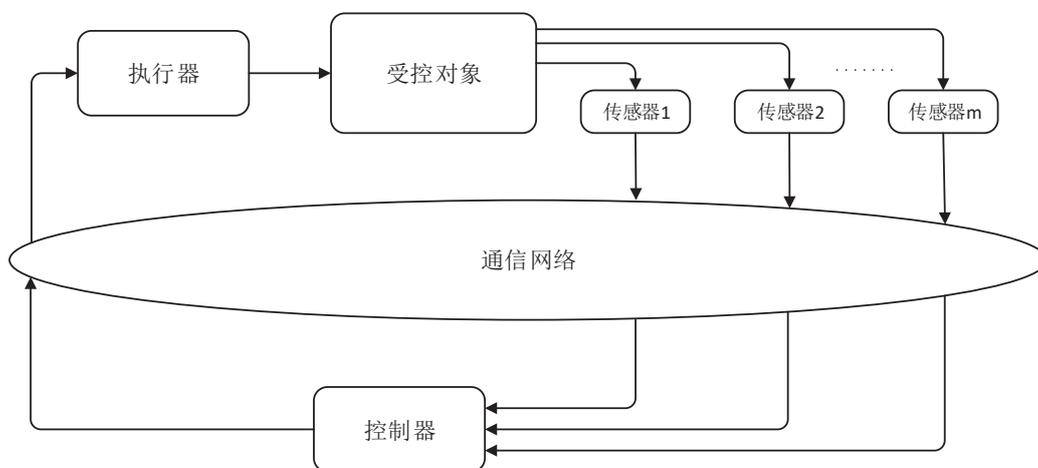


图 1-4 网络化控制系统多传感器结构图

Figure 1-4 the structure diagram of Networked Control Systems with multi-sensors

数据包进行传输，或在控制器到执行器信道中，每步控制器计算的控制信息也不能打成单个包进行传输。现实世界中出现多包传输的情况如下：(1) 随着先进技术和生产要求的提高，控制系统的规模将变得越来越大，例如化学工艺、电力系统、污水处理等工业生产^[6]。这些控制系统有很多传感器或执行器单元，它们广泛分布在受控对象的周围，如图1-4。由于地理环境因素的影响，所有传感器采集的信息不可能汇总在一起整合成单个数据包进行传输或单个控制器不能同时向各个执行器发送控制信息。(2) 在网络化控制系统中，假设每步传感器采集的信息量或控制器计算的信息量非常大，必须将信息进行分解成多个包传输，如图1-5。在现实中，此情形的出现几率较小。由于较多的网络协议规定每次发送有效的数据区域都比较大，以以太网 IEEE 802.3 协议为例，最大数据区为 1500 个字节，远远超过了控制系统中单个数据包信息量的大小^[51]。

随着无线网络化控制系统的应用和发展，网络化控制系统的丢包问题成为一个核心问题^[45]。因此本文主要是针对多包传输网络化控制系统中的丢包问

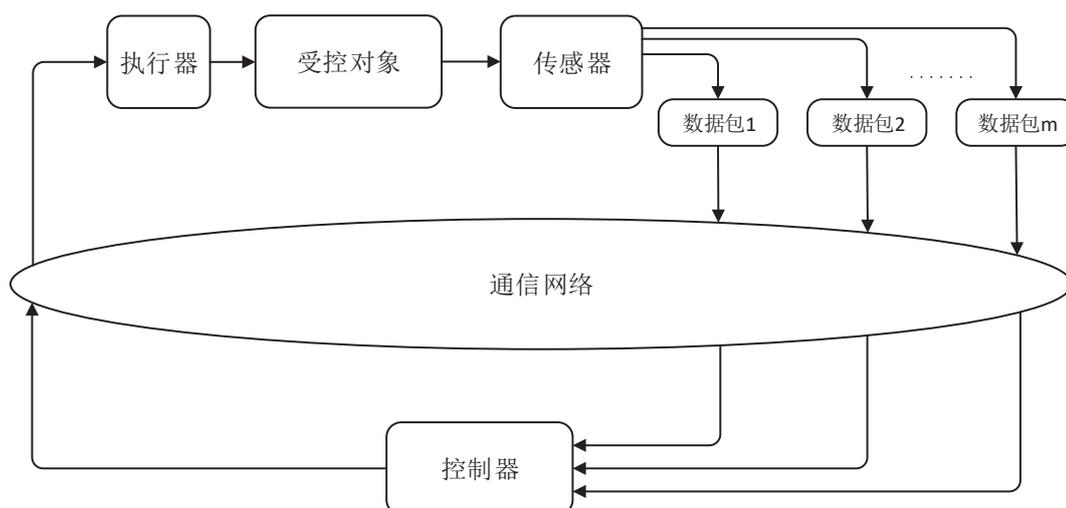


图 1-5 网络化控制系统传感器采集数据较大的传输结构图

Figure 1-5 the structure diagram of Networked Control Systems with the sensor sensing massive information

题进行研究。虽然网络化控制系统发展有十几年的时间，但基本上所有的学者都关注的是单包传输网络化控制系统的问题研究，然而多包传输网络化控制系统与单包传输网络化控制系统有着本质的区别，故于网络化控制系统中研究单包问题所提出的方法很难直接应用到多包传输问题中。因此需要大量的学者涌入到此问题研究，为多包传输网络化控制系统的发展贡献出自己的智慧。到目前，学者们对多包传输网络化控制系统研究贡献出了很多不错的想法。Song 和 Liu^[52, 53] 考虑通过在执行器端设计合适的选择器、在传感器端增加缓冲器等方法将网络化预测控制用于解决多包传输问题中的时延不匹配问题。Wang^[54] 考虑为了减少模型预测控制方法的计算复杂性，对传感器端到控制器端信道中产生的多包传输问题研究中，提出了鲁棒分布式模型预测控制方法。Yang^[55] 考虑多条通信信道空闲情况下，为了提高控制系统的实时性，采用多包传输方式充分利用通信信道，进而进一步通过 H_∞ 性能分析来设计控制器。Hu^[56] 将丢包过程描述成独立且同分布的伯努利过程，并利用反馈来设计控制器，给出了闭环控制系统稳定的充要条件。Gupta^[23] 考虑了多个受控子对象分别采用不同的采样率的情形，利用分布式模型预测控制策略，考虑受控对象执行过程中的操作、安全、物理限制等因素，来优化系统的预测信息的性能。

目前多包传输网络化控制系统对丢包的问题研究主要集中在如何设计状态反馈控制器或输出反馈控制器^[57, 58, 59]。但这些控制器设计方法存在着很大的保守性——在控制器端对丢失的部分信息（某些传感器采集的信息发生丢失）要么用 0 替代要么用上时刻对应的值来替代。因此本文就是在此基础上来解决在控制器端出现部分信息丢失的问题，进一步再设计控制器。针对这个思路，本

文提出了随机镇定控制方法和分类补偿控制两种控制方法来解决多包传输网络化控制系统的丢包问题。

1.3.2 本文的主要工作

本文接下来的具体内容和行文结构可以归纳如下：

第二章主要描述的是用随机镇定控制方法来解决多包传输网络化控制系统的丢包问题。主要的内容是：针对网络化控制系统中存在的由多包传输引入的部分包丢失问题，提出了基于重构的状态反馈控制方案。通过状态重构方法对部分丢失信息进行重构；进一步将随机稳定的概念引入到此闭环控制系统中，从而得出了闭环控制系统的稳定性结论以及给出了闭环控制系统状态反馈控制器的设计方法；最后通过 MATLAB 的数值仿真和 TrueTime 仿真来验证该控制方法的有效性。

第三章主要描述的是采用基于观测器控制方案来解决多包传输网络化控制系统的丢包问题。主要内容是：针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的基于观测器的控制器设计问题，提出了基于输出重构的观测器和控制器设计规则。通过输出重构方法补偿多包传输网络化控制系统丢失的信息；进一步采用基于观测器的控制规则来进行控制器的设计，得到闭环控制系统；然后证明了闭环控制系统的随机稳定以及给出了相应的控制器增益矩阵和观测增益矩阵的联合设计；最后通过数值例子来验证了该控制方法的有效性。

第四章主要描述的是用分类补偿控制方法来解决多包传输网络化控制系统的丢包问题。主要内容是：针对 (1) 中的问题，该解决方案并没有考虑由于重构信息引入的系统误差，对此提出一种基于重构信息的分类补偿控制规则。依据第二章节的重构方法得到的重构信息，并在控制器端对重构信息和最新接收到的信息设计相应的控制器；进一步证明闭环控制系统的渐进稳定以及通过最小化衰减率来进行求解控制器设计的约束条件；最后通过 MATLAB 的数值仿真来验证该控制方法的有效性。

最后总结了全文的工作以及对以后的工作进行了展望。

第二章 多包传输网络化控制系统的随机镇定

文章节主要讨论的是处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的控制器设计问题，针对此问题本章节提出了一种基于状态重构方法来处理多包传输网络化控制系统中部分信息丢失的问题，进一步将闭环网络化控制系统转换为离散时间随机系统。利用控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵泛函方法给出了闭环控制系统的充分稳定性条件，以及提出了求解反馈增益矩阵相应的求解方法。

本章节结构组织如下。第一节主要是对处于丢包情形下网络化控制系统的问题进行描述，并提出了一种基于状态重构方法的状态反馈控制方案来处理多包传输网络化控制系统中的部分信息丢失的问题；第二节主要是对闭环控制系统的稳定性进行分析以及相应的控制器进行设计；在第三节中通过数值例子和 TrueTime 例子来验证本文提出的方法的有效性；在第四节中得出本章节的结论。

2.1 问题描述

本节中描述了多包传输网络化控制系统的丢包问题，然后使用状态重构方法来处理多包传输中的丢包问题，进一步得到闭环控制系统的数学描述。

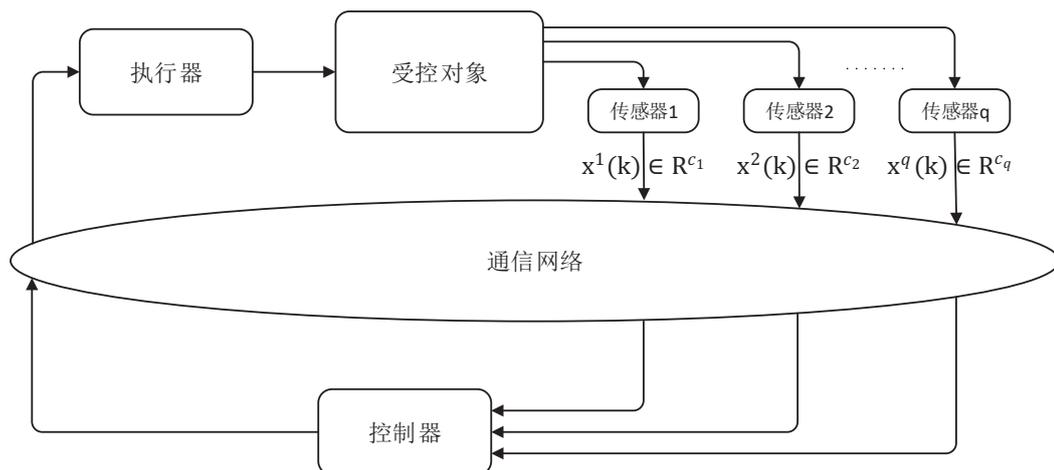


图 2-1 网络化控制系统多包传输结构图

Figure 2-1 the structure diagram of Networked control systems with multi-packet transmission

2.1.1 处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统

本文考虑的多包传输网络化控制系统结构如图2-1所示，其中控制器到执行器通信通道中的数据包传输是完美的，而传感器到控制器通信通道遭受着所谓的“多包传输”，即多包传输网络化控制系统存在 q 个独立的传感器对受控对象进行采样，然后各个传感器独立地通过传感器到控制器信道发送相应的采集数据到控制器端。

受控对象被描述成如下模型：

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

其中 $\tilde{x}(k) \in \mathbb{R}^n$, $u(k) \in \mathbb{R}^m$, $\tilde{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $\tilde{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 分别是受控对象的状态向量，控制输入，系统矩阵和输入矩阵。

正如图2-1所描述的多包传输网络化控制系统，存在着多个传感器以及各个传感器采集受控对象的部分信息，所有传感器采集完受控对象的完整信息。但存在着一种现象——传感器排列的顺序所产生的系统状态的顺序与原受控对象所描述的系统状态顺序不同。我们意识到如果从传感器排列的顺序所产生的系统状态的顺序考虑，后续更有助于闭环控制系统的稳定性分析和控制器设计。也就是说通过按顺序组织由每个传感器贡献的状态信息，从而获得了新的状态向量 $x(k)$ ，而不是选择原始的状态向量 $\tilde{x}(k)$ ，

$$\begin{aligned} x(k) &= [(x^1(k))^T, (x^2(k))^T, \dots, (x^q(k))^T]^T \\ &= [x_1(k) \square \square \square \square \square \square x_2(k) \dots x_n(k)]^T \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中 $x^i(k)$ 是由传感器 i 采集的信息以及传感器 i 的维度为 c_i ， $\sum_{i=1}^q c_i = n$ ，以及 $x_i(k)$ 是 $x(k)$ 中的元素。

2.1.2 系统变换

值得注意的是， $\tilde{x}(k)$ 中的 n 个元素实际上是 $x(k)$ 中元素的排列。假设 $\tilde{x}(k)$ 中的第 i 个元素是 $x(k)$ 中的第 p_i 个元素，则 $\tilde{x}(k)$ 可以以 $x(k)$ 的形式重写成如下形式，

$$\tilde{x}(k) = [x_{p_1}(k) \square \square \square \square \square \square x_{p_2}(k) \dots x_{p_n}(k)]^T \quad (2-3)$$

从(2-2)和(2-3)看出， $\tilde{x}(k)$ 经过有限次行交换从而形成 $x(k)$ ，即存在一个特定的序列 $\mathcal{P} = \{[i_1, i_2]\}$ ，其中 $[i_1, i_2]$ 表示在第 i 步交换中交换 $\tilde{x}(k)$ 中的第 i_1 和第 i_2 个元素。值得注意的是每次交换记录都可以用一个行交换矩阵来记录，即在 $\tilde{x}(k)$ 完成 $[i_1, i_2]$ 交换操作之后，新的状态向量为 $S_{i_1, i_2} \tilde{x}(k)$ ，其中交换矩阵 S_{i_1, i_2} 是通过交换 n 维度的单位矩阵中的第 i_1 行和第 i_2 行得到的。进一步我们有 $\tilde{x}(k)$ 到 $x(k)$ 的变换，

$$x(k) = S\tilde{x}(k) \quad (2-4)$$

其中 $S = \prod_{[i_1, i_2] \in \mathcal{P}} S_{i_1, i_2}$ 。

由线性系统理论知识可知, (2-4)中的线性变换不会改变系统的任何行为, 例如系统的稳定性和鲁棒性。因此在本章节后续的讨论中我们考虑系统的状态已按照传感器排列的顺序而排列的。即受控对象模型转为如下形式,

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2-5)$$

获取有限交换序列 \mathcal{P} 的关键方法是不断对 $p_i, i = 1, 2, \dots, n$, 进行变换次序, 而大多数的排序算法可以进行解决。例如使用冒泡排序算法, 我们可以从序列 p_1 处开始, 不断的调整相邻元素的位置, 让较小的指标在前面, 直到执行到 p_n 指标处。从而完成了序列的转换。其它算法也类似进行处理。这些算法保证了从 $\tilde{x}(k)$ 到 $x(k)$ 变换是可逆变换, 这在后续讨论中是有必要的。另一方面, 我们感兴趣的是从 $\tilde{x}(k)$ 到 $x(k)$ 的变换, 有以下简单的形式,

$$x(k) = [I_n \square \square \square \square \square \square I_n] \prod_{i=1}^n S_{i, n+p_i} [\tilde{x}^T(k) \square \square \square \square \square \square 0_n]^T \quad (2-6)$$

其中 I_n 是维度为 n 的单位矩阵, 0_n 是维度为 n 的零向量, $S_{i,j}$ 是维度为 $2n$ 的交换矩阵。

由于传感器到控制器端通信信道存在着通信资源受限的情况, 即传感器发送相应的数据包到控制端可能存在着数据包丢失。正如^[56]所假设一样, 传感器 i 通过传感器到控制器信道发送采集的数据 (即 $x^i(k)$) 到控制器是否成功可以建模为独立的伯努利过程, 我们用 α_k^i 表示。即

$$\alpha_k^i = \begin{cases} 1 & x^i(k) \text{ 成功传输到控制器} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2-7)$$

其中

$$\mathbb{E}\{\alpha_k^i\} = \alpha_i \quad (2-8a)$$

$$\mathbb{E}\{(\alpha_k^i - \alpha_i)^2\} = \sigma_i^2 \quad (2-8b)$$

2.1.3 基于状态重构的闭环控制系统

在上述讨论中, 由于数据包存在着丢失, 故控制器很难接收到系统完整的状态信息, 即存在着系统部分状态丢失。传统的方法解决系统部分状态丢失的问题一般用 0 取代或者用上时刻接收到的值取代^[60, 61, 62], 虽然这类设计方法能够保证得到多包传输网络化控制系统的稳定性条件, 但它忽略了更复杂控制方法带来控制性能提升的可能性。因此, 在本文中使用了^[50]中提出的状态重构方法用于补偿多包传输网络化控制系统的部分丢失信息。

多包传输网络化控制系统正如图2-1所示, 考虑系统中有 q 个传感器, (2-5)中的系统矩阵 A 和输入矩阵 B 可以分别被分割成 $q \times q$ 和 $q \times 1$ 的块矩阵, 即有如

下形式

$$A = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1q} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{q1} & A^{q2} & \dots & A^{qq} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^q \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

其中 $A^{ij} \in \mathbb{R}^{c_i \times c_j}$, $i = 1, 2, \dots, q$, $j = 1, 2, \dots, q$, 和 $B^i \in \mathbb{R}^{c_i \times m}$, 进一步我们有

$$x^i(k+1) = \sum_{j=1}^q A^{ij} x^j(k) + B^i u(k) \quad (2-10)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, q$ 。

由于多包传输网络化控制系统中的各个传感器都是独立地向控制器发送相应的采集数据, 故通常情况下并非所有的 $x^j(k)$, $j = 1, 2, \dots, q$ 供控制器使用。为了处理这个部分状态丢失的问题, 我们使用如下技术: 第 $k+1$ 时刻控制器重建传感器 i 的状态信息, 用 $\hat{x}^i(k+1)$ 表示,

$$\hat{x}^i(k+1) = \sum_{j=1}^q A^{ij} \bar{x}^j(k) + B^i u(k) \quad (2-11)$$

其中 $\bar{x}^i(k) = \alpha_k^i x^i(k) + (1 - \alpha_k^i) \hat{x}^i(k)$ 。重构的部分状态仅用于实际系统状态信息丢失的部分。

我们定义 $\bar{x}^T(k) = [(\bar{x}^1(k))^T, (\bar{x}^2(k))^T, \dots, (\bar{x}^q(k))^T]$, 从而有

$$\bar{x}(k) = \Theta_k x(k) + (I - \Theta_k) \hat{x}(k) \quad (2-12)$$

其中

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} \alpha_k^1 I^{c_1 \times c_1} & & & \\ & \alpha_k^2 I^{c_2 \times c_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_k^q I^{c_q \times c_q} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

从而(2-11)能够进一步被写成如下形式,

$$\hat{x}(k+1) = A \bar{x}(k) + B u(k) \quad (2-14)$$

现我们将状态反馈控制器设计成 $u(k) = K \bar{x}(k)$, 即

$$u(k) = K \Theta_k x(k) + K (I - \Theta_k) \hat{x}(k) \quad (2-15)$$

其中 $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 反馈增益矩阵。

我们定义新的状态向量 $\eta^T(k) = [x^T(k), \hat{x}^T(k)]$, 从(2-5), (2-14) 和 (2-15)中我们可以得到闭环控制系统的描述,

$$\eta(k+1) = \Phi_k \eta(k) \quad (2-16)$$

其中

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} A + BK\Theta_k & BK(I - \Theta_k) \\ (A + BK)\Theta_k & (A + BK)(I - \Theta_k) \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

2.2 稳定性分析和控制设计

在本章节中，我们主要分析了闭环控制系统的稳定性，并进一步得到了闭环控制系统稳定的充分条件。最后利用闭环系统稳定的充分条件给出了状态反馈增益矩阵 K 设计的结论。

2.2.1 稳定性分析

我们先引入随机稳定的概念，

定义 2.1 如果对任意初值 $\eta(0)$ 满足

$$\mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\eta(k)\|^2\right\} < \infty \quad (2-18)$$

则闭环控制系统(2-16)是随机稳定的。

定理 2.1 对于给定反馈增益矩阵 K ，如果存在标量 $\gamma_1, \gamma_2 > 0$ 和正定矩阵 P, Q 满足

$$(BK)^T P B K < \gamma_1 I \quad (2-19a)$$

$$(A + BK)^T Q (A + BK) < \gamma_2 I \quad (2-19b)$$

$$M_1^T P M_1 + M_2^T Q M_2 + M_3^T M_3 + M_4^T M_4 - \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} < 0 \quad (2-19c)$$

则闭环控制系统(2-16)是随机稳定的。其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} A + BK\Xi & BK(I - \Xi) \end{bmatrix} \quad (2-20a)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} (A + BK)\Xi & (A + BK)(I - \Xi) \end{bmatrix} \quad (2-20b)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i \end{bmatrix} \quad (2-20c)$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i \end{bmatrix} \quad (2-20d)$$

这里 α_i 和 σ_i 分别被定义在 (2-8a) 和 (2-8b)， $\mathbb{E}\{\Theta_k\} = \Xi = \text{diag}\{\alpha_1 I^{c_1 \times c_1}, \dots, \alpha_q I^{c_q \times c_q}\}$ 和 $E^i = \text{diag}\{0, \dots, 0, I_i^{c_i \times c_i}, 0, \dots, 0\}$ 。

证明. 我们证明此定理主要分为三步,首先我们定义下列控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数

$$V(k) = x(k)^T P x(k) + \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \quad (2-21)$$

从(2-17)中,我们能够得到

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ &= \mathbb{E}\{x(k+1)^T P x(k+1) + \hat{x}(k+1)^T Q \hat{x}(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ &= \mathbb{E}\{[(A + BK\Theta_k)x(k) + BK(I - \Theta_k)\hat{x}(k)]^T P \times [(A + BK\Theta_k)x(k) \\ &\quad + BK(I - \Theta_k)\hat{x}(k)] + [(A + BK)\Theta_k x(k) + (A + BK)(I - \Theta_k)\hat{x}(k)]^T Q [(A \\ &\quad + BK)\Theta_k x(k) + (A + BK)(I - \Theta_k)\hat{x}(k)]\} - x(k)^T \times P x(k) - \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \\ &= \mathbb{E}\{[(A + BK\Xi)x(k) + BK(\Theta_k - \Xi)x(k) + BK(I - \Xi)\hat{x}(k) + BK(\Xi - \\ &\quad \Theta_k)\hat{x}(k)]^T P [(A + BK\Xi)x(k) + BK(\Theta_k - \Xi)x(k) + BK(I - \Xi)\hat{x}(k) + BK \\ &\quad (\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)] + [(A + BK)\Xi x(k) + (A + BK)(\Theta_k - \Xi)x(k) + (A + BK) \\ &\quad (I - \Xi)\hat{x}(k) + (A + BK)(\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)]^T Q [(A + BK)\Xi x(k) + (A + BK) \\ &\quad (\Theta_k - \Xi)x(k) + (A + BK)(I - \Xi)\hat{x}(k) + (A + BK)(\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)]\} \\ &\quad - x(k)^T P x(k) - \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \end{aligned} \quad (2-22)$$

其次我们逐步考虑控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数的每项表达式,注意到 $\mathbb{E}\{\Theta_k - \Xi\} = 0$, 因此我们有

$$\mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) = V_1(k) + \mathbb{E}\{V_2(k)\} - V_3(k)$$

其中

$$V_1(k) = \eta(k)^T \Lambda_1 \eta(k)$$

$$V_3(k) = \eta(k)^T \Lambda_3 \eta(k)$$

这里 $\Lambda_3 = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix}$, $\Lambda_1 = M_1^T P M_1 + M_2^T Q M_2$ 。 M_1 和 M_2 分别由(2-20a) 和 (2-20b)给出。我们定义

$$\mathbb{E}\{V_2(k)\} = \mathbb{E}\{V_{21}(k) + V_{22}(k)\}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{V_{21}(k)\} &= \mathbb{E}\{[BK(\Theta_k - \Xi)x(k) + BK(\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)]^T \\ &\quad \times P [BK(\Theta_k - \Xi)x(k) + BK(\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)]\} \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{V_{22}(k)\} &= E\{[(A+BK)(\Theta_k - \Xi)x(k) + (A+BK)(\Xi \\ &\quad - \Theta_k)\hat{x}(k)]^T Q[(A+BK)(\Theta_k - \Xi)x(k) + (A \\ &\quad + BK)(\Xi - \Theta_k)\hat{x}(k)]\}\end{aligned}\quad (2-24)$$

令 $y(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 。从(2-13)和随机变量 $\alpha_k^1, \dots, \alpha_k^q$ 是彼此独立的这个事实可以看出

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{V_{21}(k)\} &= \sum_{i=1}^q y(k)^T \sigma_i^2 E^i (BK)^T P (BK) E^i y(k) \\ &\leq \gamma_1 \sum_{i=1}^q (\sigma_i E^i y(k))^T (\sigma_i E^i y(k)) \\ &= \gamma_1 \sum_{i=1}^q (\sigma_i E^i y(k))^T (\sigma_i E^i y(k)) + \gamma_1 \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^q (\sigma_i E^i y(k))^T (\sigma_j E_j y(k)) \\ &= \gamma_1 \left(\sum_{i=1}^q \sigma_i E^i y(k) \right)^T \left(\sum_{i=1}^q \sigma_i E^i y(k) \right)\end{aligned}\quad (2-25)$$

其中 $\gamma_1 = \lambda_{\max}((BK)^T P BK)$ 表示矩阵 $(BK)^T P BK$ 的最大特征值, 并且有 $\lambda_{\max}((BK)^T P BK) > 0$ 。进一步我们有

$$\mathbb{E}\{V_{21}(k)\} \leq \eta(k)^T \Lambda_{21} \eta(k) \quad (2-26)$$

其中 $\Lambda_{21} = M_3^T M_3$, 以及 M_3 由 (2-20c) 给定。

类似的我们也有如下不等式成立

$$\mathbb{E}\{V_{22}(k)\} \leq \eta(k)^T \Lambda_{22} \eta(k) \quad (2-27)$$

其中 $\Lambda_{22} = M_4^T M_4$, M_4 由 (2-20d) 给定, $\gamma_2 = \lambda_{\max}((A+BK)^T Q (A+BK))$ 表示矩阵 $(A+BK)^T Q (A+BK)$ 的最大特征值, 并且有 $\lambda_{\max}((A+BK)^T Q (A+BK)) > 0$ 。

最后我们回归到控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数, 从第二步中我们得到

$$\mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \leq \eta(k)^T \Lambda \eta(k) \quad (2-28)$$

其中

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_{21} + \Lambda_{22} - \Lambda_3$$

依据(2-19c)我们可以知道 $\Lambda < 0$, 因此

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ \leq \eta(k)^T \Lambda \eta(k) \leq -\beta \eta(k)^T \eta(k)\end{aligned}\quad (2-29)$$

$$\begin{bmatrix} -\gamma_2 I & * \\ PA + BM & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (2-34c)$$

则由 (2-15) 所设计的控制器形成的闭环控制系统(2-16)是随机稳定的。

进一步控制器的状态反馈增益矩阵由下列等式给出

$$K = V \Sigma^{-1} P_1^{-1} \Sigma V^T M \quad (2-35)$$

证明. 首先我们可以利用 Schur 补将 (2-19c) 重写成如下形式

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * & * \\ A + BK \Xi & BK(I - \Xi) & -P^{-1} & * & * & * \\ (A + BK) \Xi & (A + BK)(I - \Xi) & 0 & -Q^{-1} & * & * \\ \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & 0 & 0 & -I & * \\ \sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (2-36)$$

然后我们在 (2-36) 中分别左乘和右乘 $\text{diag}\{I, I, P, Q, I, I\}$, 进一步得到

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * & * \\ PA + PBK \Xi & PBK(I - \Xi) & -P & * & * & * \\ (QA + QBK) \Xi & (QA + QBK)(I - \Xi) & 0 & -Q & * & * \\ \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & 0 & 0 & -I & * \\ \sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & -\sqrt{\gamma_2} \sum_{i=1}^q \sigma_i E^i & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (2-37)$$

类似的我们可以将定理 1 的约束条件 (2-19a) 和 (2-19b) 分别转换成(2-34b) 和 (2-34c) 的形式。

依据引理 1, 存在一个满足(2-33)结构的正定矩阵 P , 进一步有 $PB = BP_1$ 。令 $M = P_1 K$ 和 $Q = P$, 因此我们可以将(2-37)转换成(2-34a)形式。我们可以利用 MATLAB 中 LMI 工具箱来求解约束条件(2-34a), (2-34a)和(2-34a), 从而我们可以根据(2-35)来计算出控制器反馈增益矩阵。证明完毕。 \square

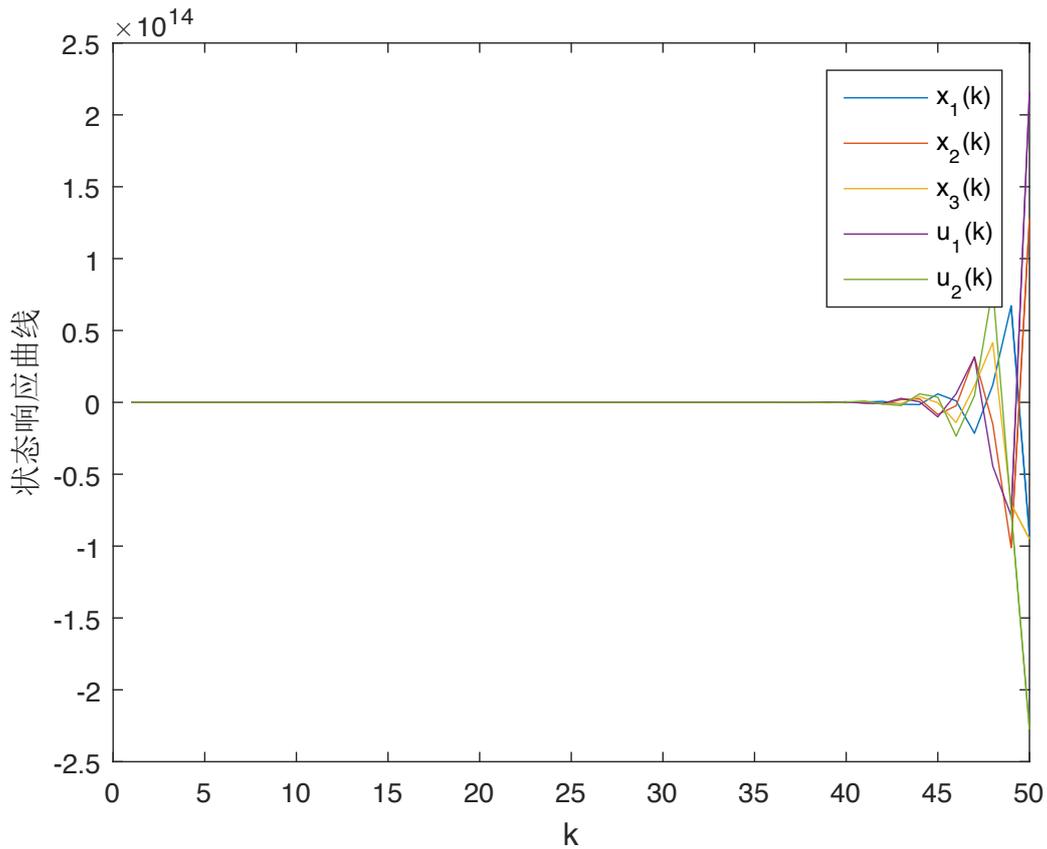


图 2-2 使用文献^[61] 中的控制方法所产生的状态响应
Figure 2-2 System responses using control method from ^[61]

2.3 数值仿真和 TrueTime 仿真

本章节中采用了两个例子来说明本文提出的方法的有效性。一个是数值仿真例子，主要是为了验证明确定义的闭环控制系统的有效性，另一个是基于广泛使用的 TrueTime 工具箱，用在相对更现实的环境中进行验证网络化控制系统，具有更多的不确定性。

2.3.1 数值例子

考虑受控对象描述成(2-5)形式并添加噪声的系统

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \quad (2-38)$$

借用文献^[61] 的仿真例子，此系统的系统矩阵和输入矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 1.7 & 0.4 & 1.8 \\ -2 & -0.8 & -3.1 \\ -3.2 & -1.5 & -1.2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \\ 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

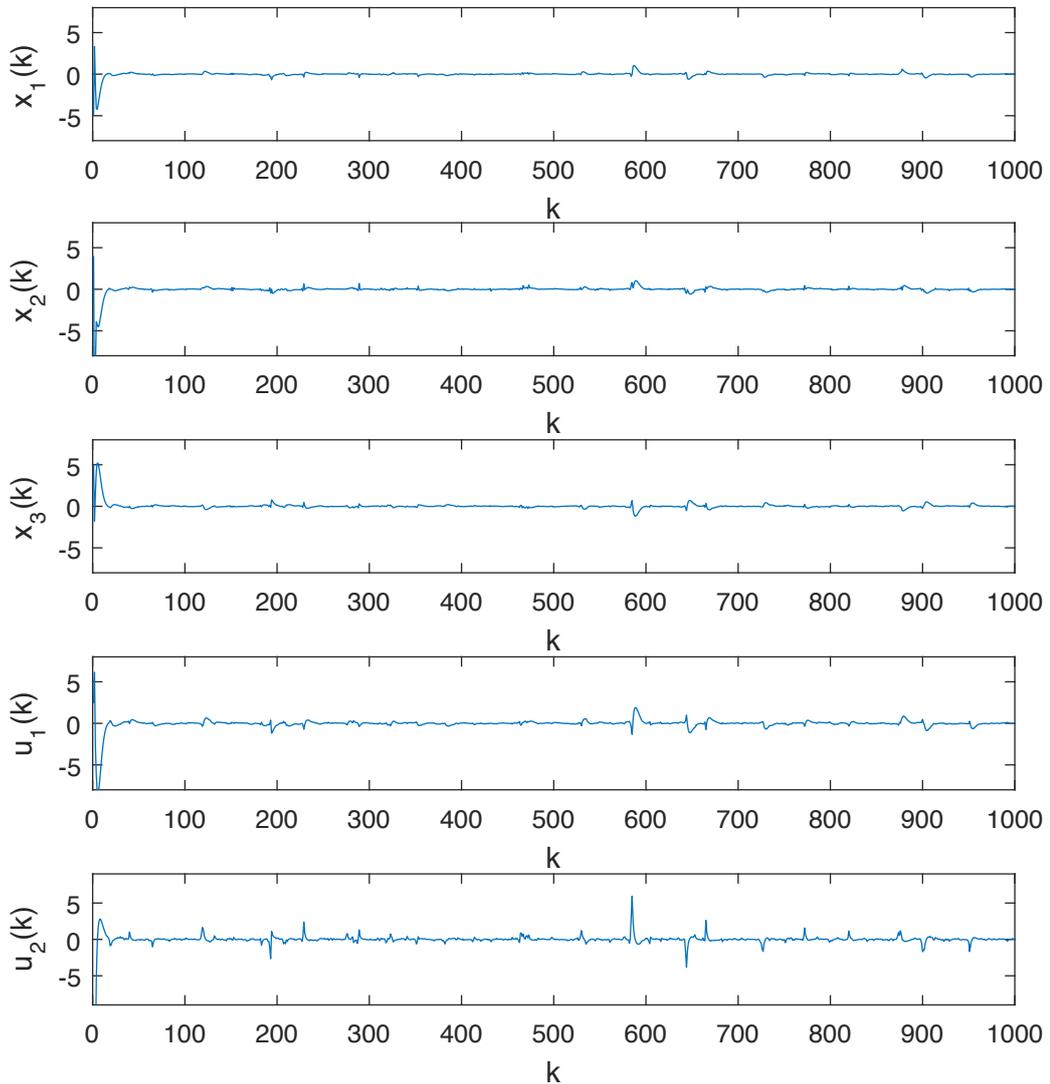


图 2-3 本文提出的方法所产生的系统状态响应

Figure 2-3 System responses using our proposed approach

其中 $w(k)$ 均值为 0 方差为 0.01 的高斯白噪声。

在我们的系统设置中，三个系统状态分别由三个传感器进行采集，并通过传感器到控制器信道独立地发送到控制器。假设每个传感器发送数据包的丢包率都为 0.25，设系统的初始状态为 $x(0) = [-5, 4, 5]^T$ 。

使用定理 2 我们可以得到本文提出方法产生的状态反馈增益矩阵

$$K = \begin{bmatrix} -0.4673 & 0.0169 & -1.9479 \\ 5.0939 & 2.2630 & 5.8885 \end{bmatrix}$$

针对传统的状态反馈设计控制方法，控制器对未收到的部分状态信息将会采用上一时刻得到的状态信息进行替代，采用文献^[61]中控制器设计方法作为本文的对比，产生的状态反馈增益矩阵如下

$$K_C = \begin{bmatrix} -1.0990 & 0.4548 & -0.5830 \\ 1.8160 & 0.7814 & 1.6750 \end{bmatrix}$$

系统的状态响应曲线和控制器产生的控制信号曲线如图2-2和2-3所示。从两幅图我们可以进行对比，通过我们设计的控制方法生成的状态响应曲线是收敛的，而传统的控制方法生成的响应曲线是发散的。

为了进一步说明我们提出的方法的有效性，利用上述系统结构，我们对三个传感器传输的丢包率的五个参数集进行分组模拟。结果总结在表2-1中。可以清楚地看到，即使在统计意义上，我们的方法通常能够得到稳定的闭环系统。

表 2-1 使用大量的数值例子来比较系统性能 (针对每种参数都进行了 50 次仿真)

Table 2-1 Performance comparison using a large number of simulations. 50 simulations are performed for each parameter set.

三个传感器对应的丢包概率 [α_1 α_2 α_3]	产生稳定曲线的百分比	
	本文提出的方法	传统的控制方法
[0.1 0.1 0.1]	100%	84%
[0.2 0.2 0.2]	100%	64%
[0.25 0.25 0.25]	100%	42%
[0.3 0.3 0.3]	100%	28%
[0.35 0.35 0.35]	98%	14%

2.3.2 TrueTime 例子

本小节将采用 TrueTime 例子来验证本文提出方法的有效性。TrueTime^[64] 是基于 MATLAB/Simulink 的工具箱，可以模拟大多数通信网络，并支持生活中常见的通信协议。我们可以将 TrueTime 工具箱与 MATLAB/Simulink 结合起来用于动态系统，以更逼真的方式模拟网络化控制系统。因此，TrueTime 工具箱在网络化控制系统社区中非常流行。

在此仿真例子中，受控对象模型(2-5)将借用文献^[65]中的例子，其受控对象的数学模型描述为如下形式

$$A = \begin{bmatrix} 0.9850 & -0.0348 & -0.0248 \\ 0.0050 & 0.9999 & -0.0001 \\ 0.0001 & 0.0050 & 1.0000 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0050 \\ 0.0001 \\ 0.0002 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

在我们的系统设置中，三个系统状态分别由三个传感器进行采集，并通过传感器到控制器信道独立地发送到控制器。设系统的初始状态为 $x(0) = [-1, -1, -1]^T$ 。

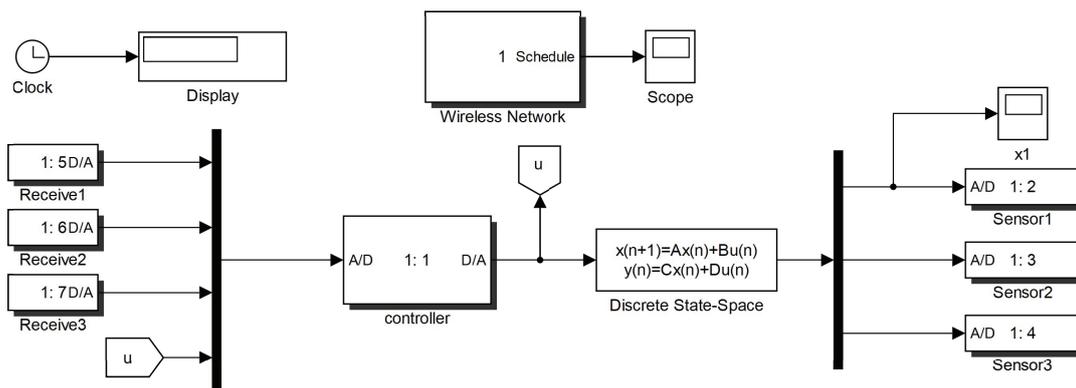


图 2-4 基于 TrueTime 仿真结构图
Figure 2-4 The TrueTime-based simulation diagram

无线网络使用 TrueTime 2.0 工具箱实现，其系统图如图 2-4 所示。我们使用 IEEE 802.11b (WLAN) 协议，数据速率为 80000 位/秒，最小帧大小为 20 位。丢包率设置为 0.2。使用本章节中的定理 2 我们得到状态反馈增益矩阵为

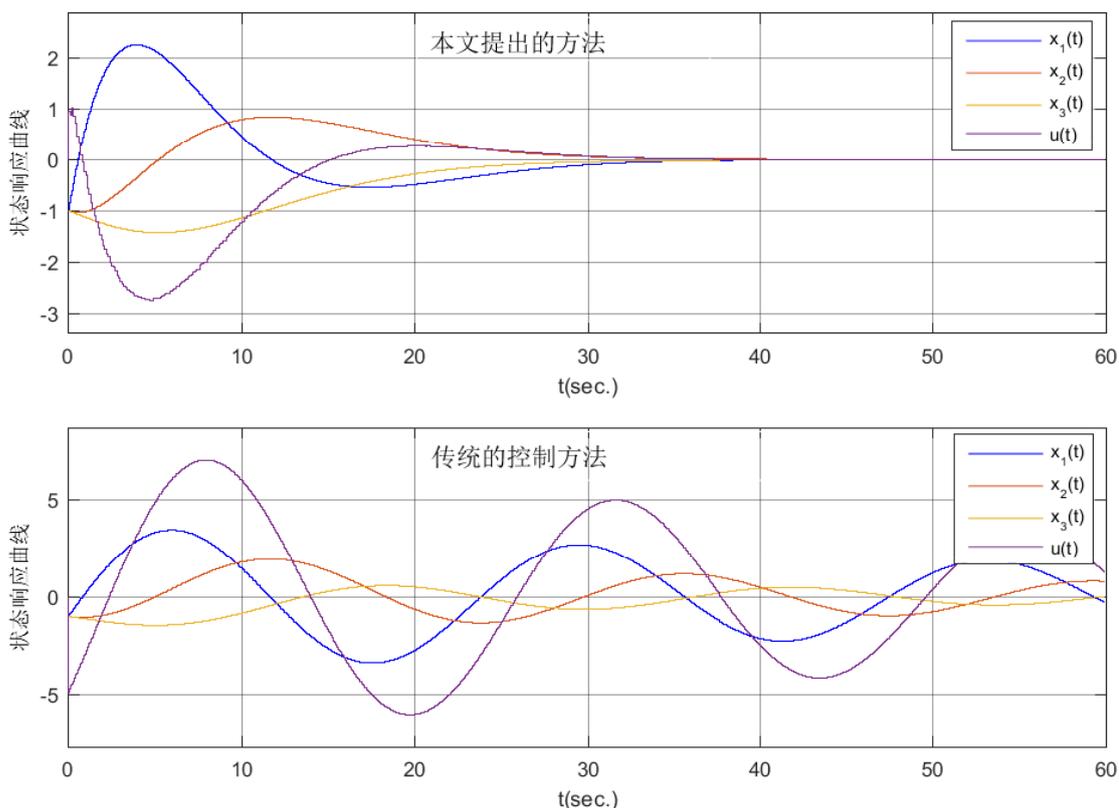


图 2-5 在 TrueTime 中使用两种方法产生的状态响应曲线
Figure 2-5 The state responses using both approaches in TrueTime

$$K = \begin{bmatrix} -1.0322 & -0.3377 & 0.3454 \end{bmatrix}$$

本文将采用基于预测控制方法^[66]作为本文方法的对比，在对比方法中，针对多包传输网络化控制系统出现部分信息丢失时将会采用预测值进行替代。其方法的反馈增益矩阵为

$$K_{PC} = \begin{bmatrix} 1.8441 & 2.2036 & 0.8488 \end{bmatrix}$$

使用本文提出的控制方法和采用文献^[66]中的控制方法产生的状态轨迹图如图2-5所示，从图中我们可以看出我们提出的方法可以使系统快速稳定，而文献^[66]采用的方法导致系统剧烈的波动。

在上述两个例子中，本文所提出的控制方法明显优于传统的控制方法。这应该主要是因为本文所提出的方法在控制器端重构了多包传输网络化控制系统中部分丢失信息，并依据丢包的特性给出了相应的控制器设计。

2.4 本章小结

本章节针对网络化控制系统中存在的由多包传输引入的部分包丢失问题，提出了基于状态重构方法的状态反馈控制方案。通过状态重构方法对部分丢失信息进行重构；进一步将闭环网络化控制系统转换为离散时间随机系统。利用控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵泛函方法给出了闭环控制系统的充分稳定性条件，以及提出了求解反馈增益矩阵相应的求解方法；最后通过 MATLAB 的数值仿真和 TrueTime 仿真来验证该控制方法的有效性。

第三章 多包传输网络化控制系统的基于观测器控制方案

在第二章节里讨论了基于状态反馈控制的多包传输网络化控制系统，而本章节主要讨论处于丢包情形下多包传输网络化控制系统中的基于观测器控制器设计问题。

本章节结构组织如下。第一节主要是对处于丢包情形下网络化控制系统的问题进行描述，并提出了一种基于输出重构方法来重构出多包传输网络化控制系统中部分丢失的信息，进一步采用基于观测器控制方案来进行控制器设计；第二节主要是针对闭环控制系统的稳定性进行分析以及相应的控制器进行设计；在第三节中通过数值例子来验证本文提出的方法的有效性；在第四节中得出本章节的结论。

3.1 问题描述

本节中描述了多包传输网络化控制系统的丢包问题，然后提出了基于输出重构的方法来重构出多包传输网络化控制系统中部分丢失的信息，进一步采用改进的基于观测器的控制方案来进行控制器设计；最后得到闭环控制系统的数学描述。

3.1.1 多包传输网络化控制系统设置

本章节考虑的多包传输网络化控制系统如图3-1所示，其中 p 个传感器各自对受控对象输出信息进行采集，并通过通信资源受限的通信信道将相应的采集数据发送到控制器，同时控制器通过理想的通信信道将对应的控制量发送到执行器。

受控对象的模型被描述成如下形式，

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y = Cx(k) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入， $y(k) \in \mathbb{R}^q$ 为输出向量， $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统矩阵， $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为输入矩阵以及 $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ 为输出矩阵。

我们注意到系统状态 $y(k)$ 来自 p 个传感器的数据，但 $y(k)$ 中元素的顺序不一定与传感器从 1 到 p 的顺序相同。幸运的是，无论 $y(k)$ 中的元素以何种形式进行排列，我们都可以对 $y(k)$ 中的元素进行有限次的交换达到与传感器顺序相

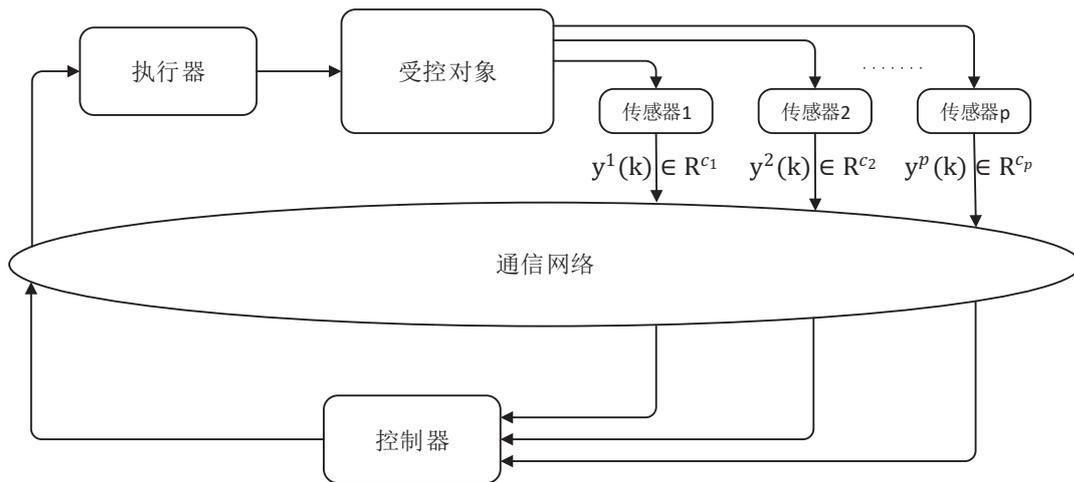


图 3-1 网络化控制系统多包传输结构图

Figure 3-1 Networked control systems with multi-packet transmission

同的目的，即这种交换对应着可逆的线性变换。由线性系统理论知识可知，线性变换不会改变系统的任何性能，例如稳定性和鲁棒性等。因此，我们假设 $y(k)$ 中的元素顺序看成以传感器从 1 到 p 排列顺序，即

$$y(k) = [(y^1(k))^T, (y^2(k))^T, \dots, (y^p(k))^T]^T$$

其中 $y^i(k) \in \mathbb{R}^{c_i}, i = 1, 2, \dots, p$ 表示第 i 个传感器在第 k 时刻采集的数据，并且有 $\sum_{i=1}^p c_i = q$ 。

由于传感器到控制器端通信通道存在着通信资源受限的情况，即传感器发送相应的数据包到控制端可能存在着数据包丢失。正如^[56]所假设一样，传感器 i 通过传感器到控制器信道发送采集的数据（即 $y^i(k)$ ）到控制器是否成功可以建模为独立的伯努利过程，我们用 α_k^i 表示。即

$$\alpha_k^i = \begin{cases} 1 & y^i(k) \text{ 成功传输到控制器} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3-2)$$

其中

$$\mathbb{E}\{\alpha_k^i\} = \alpha_i \quad (3-3a)$$

$$\mathbb{E}\{(\alpha_k^i - \alpha_i)^2\} = \sigma_i^2 \quad (3-3b)$$

3.1.2 基于观测器控制规则的闭环控制系统

针对处于丢包情形下的单包传输网络化控制系统，传统的输出反馈控制器设计如下，

$$\begin{cases} \hat{x}(k) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ u(k) = K\hat{x}(k) \end{cases} \quad (3-4)$$

其中反馈增益矩阵 K 是时不变的。

然而，考虑通信资源受限的多包传输网络化控制系统，基于观测器的控制器的设计不能简单定义为(3-4)，我们面临着完全不同的情况，即 $y(k)$ 在第 k 时刻的全部信息很难用于控制器（即只有部分传感器采集的数据才能成功发送到控制器中）。这意味着若采用上述传统的控制方法处理数据包丢失问题，则会让控制器设计变得很保守，即忽略了控制器可用的许多信息。

为了控制器能够使用更多信息，在本文中使用了^[50]中提出的状态重构方法用于补偿多包传输网络化控制系统的部分丢失信息，进一步用来设计输出反馈控制规则。

多包传输网络化控制系统正如图3-1所示，考虑系统中有 p 个传感器，(3-1)中的输出矩阵 C 被分割成 $p \times 1$ 的块矩阵，即有如下的形式

$$C = \begin{bmatrix} C^1 \\ C^2 \\ \vdots \\ C^p \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

其中 $C^i \in \mathbb{R}^{c_i \times 1}, i = 1, 2, \dots, p$ 。

进一步我们可以根据(3-1)可以把各个传感器采集的信息表示为如下形式

$$y^i(k+1) = \sum_{j=1}^p C^j x(k) \quad (3-6)$$

正如实际无线网络，各个传感器都是独立地向控制器发送相应的采集数据，故通常情况下并非所有的 $y^j(k), j = 1, 2, \dots, p$ 供控制器使用。为了更好地设计基于观测器控制器，我们需要对丢失的部分信息进行处理，在本文中我们使用如下技术：第 $k+1$ 时刻控制器重建传感器 i 的输出信息，用 $\hat{y}^i(k+1)$ 表示，

$$\hat{y}^i(k+1) = \sum_{j=1}^p C^j \hat{x}(k+1) \quad (3-7)$$

其中 $\hat{x}(k)$ 是基于观测器观测得到的观测向量，我们稍后进行设计。

我们考虑重构出来的部分输出信息仅用于实际系统中信息丢失的部分，因此我们定义 $\bar{y}^i(k) = \alpha_k^i y^i(k) + (1 - \alpha_k^i) \hat{y}^i(k)$ ，以及 $\bar{y}^T(k) = [(\bar{y}^1(k))^T, (\bar{y}^2(k))^T, \dots,$

$(\bar{y}^p(k))^T]$, 从而我们进一步有

$$\bar{y}(k) = \Theta_k y(k) + (I - \Theta_k) \hat{y}(k) \quad (3-8)$$

其中

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} \alpha_k^1 I^{c_1 \times c_1} & & & \\ & \alpha_k^2 I^{c_2 \times c_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_k^p I^{c_p \times c_p} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

我们对控制系统中部分丢失的输出信息进行补偿, 进一步与最新接收到的输出信息进行结合, 从而得到了 $\bar{y}(k)$ 。因此本文设计观测器方程是依据 $\bar{y}(k)$ 而得到的, 即观测器方程为如下形式

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(\bar{y}(k) - C\hat{x}(k)) \quad (3-10)$$

其中 $L \in \mathbb{R}^{n \times q}$ 为观测器矩阵。

现基于观测器的控制器设计为如下形式

$$u(k) = K\hat{x}(k) \quad (3-11)$$

其中 $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 为反馈增益矩阵。

我们定义新的状态向量为 $\eta^T(k) = [x^T(k), \hat{x}^T(k)]$, 从(3-1), (3-8), (3-10)以及(3-11), 我们可以得到闭环控制系统方程为如下形式

$$\eta(k+1) = \Phi_k \eta(k) \quad (3-12)$$

其中

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} A & BK \\ L\Theta_k C & A + BK - L\Theta_k C \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

3.2 稳定性分析和基于观测器的控制器设计

在本节中, 我们分析了闭环控制系统(3-13)的稳定性, 进一步给出了控制器增益矩阵和观测器增益矩阵的联合设计结论。

3.2.1 稳定性分析

我们首先引入随机稳定的概念来处理闭环网络化控制系统(3-12)和(3-13)中的 Θ_k 的参数。

定义 3.1 如果对任意初值 $\eta(0)$ 满足

$$\mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\eta(k)\|^2\right\} < \infty \quad (3-14)$$

则闭环控制系统(3-12)是随机稳定的。

定理 3.1 对于给定反馈增益矩阵 K 和观测器矩阵 L ，如果存在标量 $\gamma_1 > 0$ 和正定矩阵 P, Q 满足

$$L^T Q L < \gamma_1 I \quad (3-15a)$$

$$M_1^T P M_1 + M_2^T Q M_2 + M_3^T M_3 - \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} < 0 \quad (3-15b)$$

其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} A & BK \end{bmatrix} \quad (3-16a)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} L \Xi C & A + BK - L \Xi C \end{bmatrix} \quad (3-16b)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C \end{bmatrix} \quad (3-16c)$$

则闭环控制系统(3-12)是随机稳定的。这里 α_i 和 σ_i 分别被定义在 (3-3a) 和 (3-3b), $\mathbb{E}\{\Theta_k\} = \Xi = \text{diag}\{\alpha_1 I^{c_1 \times c_1}, \dots, \alpha_p I^{c_p \times c_p}\}$ 和 $E^i = \text{diag}\{0, \dots, 0, I_i^{c_i \times c_i}, 0, \dots, 0\}$ 。

证明. 我们证明此定理主要分为三步，首先定义下列控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数

$$V(k) = x(k)^T P x(k) + \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \quad (3-17)$$

从(3-13)中，控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数差分方程为如下形式

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ &= \mathbb{E}\{x(k+1)^T P x(k+1) + \hat{x}(k+1)^T Q \hat{x}(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ &= \mathbb{E}\{(Ax(k) + BK\hat{x}(k))^T P (Ax(k) + BK\hat{x}(k)) + (L\Theta_k C x(k) + (A + BK - L\Theta_k C)\hat{x}(k))^T Q (L\Theta_k C x(k) + (A + BK - L\Theta_k C)\hat{x}(k))\} \\ &\quad - x(k)^T P x(k) - \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \\ &= (Ax(k) + BK\hat{x}(k))^T P (Ax(k) + BK\hat{x}(k)) - x(k)^T P x(k) - \hat{x}(k)^T Q \hat{x}(k) \\ &\quad + \mathbb{E}\{(L\Xi C x(k) + (A + BK - L\Xi C)\hat{x}(k) + L(\Theta_k - \Xi)C(x(k) - \hat{x}(k)))^T Q (L\Xi C x(k) + (A + BK - L\Xi C)\hat{x}(k) + L(\Theta_k - \Xi)C(x(k) - \hat{x}(k)))\} \quad (3-18) \end{aligned}$$

其次我们逐步考虑控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数的每项表达式，注意到 $\mathbb{E}\{\Theta_k - \Xi\} = 0$ ，因此我们有

$$\mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) = V_1(k) + \mathbb{E}\{V_2(k)\} - V_3(k)$$

其中

$$V_1(k) = \eta(k)^T \Lambda_1 \eta(k)$$

$$V_3(k) = \eta(k)^T \Lambda_3 \eta(k)$$

这里 $\Lambda_3 = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix}$, $\Lambda_1 = M_1^T P M_1 + M_2^T Q M_2$ 。 M_1 和 M_2 分别由(3-16a) 和 (3-16b)给出, 以及

$$\mathbb{E}\{V_2(k)\} = \mathbb{E}\{(L(\Theta_k - \Xi)C(x(k) - \hat{x})(k))^T Q (L(\Theta_k - \Xi)C(x(k) - \hat{x})(k))\} \quad (3-19)$$

令 $y(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 。从(3-9)和随机变量 $\alpha_k^1, \dots, \alpha_k^p$ 是彼此独立的这个事实可以看出

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{V_2(k)\} &= \sum_{i=1}^p (Cy(k))^T \sigma_i^2 E^i L^T Q L E^i Cy(k) \\ &\leq \gamma_1 \sum_{i=1}^p (\sigma_i E^i Cy(k))^T (\sigma_i E^i Cy(k)) \\ &= \gamma_1 \sum_{i=1}^p (\sigma_i E^i Cy(k))^T (\sigma_i E^i Cy(k)) \\ &\quad + \gamma_1 \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^p (\sigma_i E^i Cy(k))^T (\sigma_j E_j Cy(k)) \\ &= \gamma_1 \left(\sum_{i=1}^p \sigma_i E^i Cy(k) \right)^T \left(\sum_{i=1}^p \sigma_i E^i Cy(k) \right) \end{aligned} \quad (3-20)$$

其中 $\gamma_1 = \lambda_{\max}(L^T Q L)$ 表示矩阵 $L^T Q L$ 的最大特征值, 并且有 $\lambda_{\max}(L^T Q L) > 0$ 。进一步我们有

$$\mathbb{E}\{V_2(k)\} \leq \eta(k)^T \Lambda_2 \eta(k) \quad (3-21)$$

其中 $\Lambda_2 = M_3^T M_3$, 以及 M_3 由 (3-16c)给定。

最后我们回归到控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数, 从第二步中我们得到

$$\mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \leq \eta(k)^T \Lambda \eta(k) \quad (3-22)$$

其中

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 - \Lambda_3$$

依据(3-15b)我们可以知道 $\Lambda < 0$, 因此

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{V(k+1)|x(k), \hat{x}(k)\} - V(k) \\ \leq \eta(k)^T \Lambda \eta(k) \leq -\beta \eta(k)^T \eta(k) \end{aligned} \quad (3-23)$$

其中 $\beta = \lambda_{\min}(-\Lambda)$, $\lambda_{\min}(-\Lambda)$ 表示 $-\Lambda$ 的最大特征值。从(3-23)中, 我们可以得出对任意 $t > 0$, 有

$$\mathbb{E}\{V(\eta(k))\} - \{V(\eta(0))\} \leq -\beta \sum_{k=0}^t \mathbb{E}\{\eta(k)^T \eta(k)\} \quad (3-24)$$

进一步有

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^t \mathbb{E}\{\eta(k)^T \eta(k)\} &\leq \frac{1}{\beta} (\{V(\eta(0))\} - \mathbb{E}\{V(\eta(k))\}) \\ &\leq \frac{1}{\beta} \{V(\eta(0))\} < \infty \end{aligned} \quad (3-25)$$

证明完毕。 \square

3.2.2 观测器和控制器设计

本节中主要讨论控制器增益矩阵 K 和观测器增益矩阵 L 的设计问题, 在给出设计规则之前, 我们先引入下列引理^[63]。假设 $\varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, m$ 是输入矩阵 B 的非零奇异值, 通过奇异值分解存在正交阵 $\mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $V \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 满足

$$B = U \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T \quad (3-26)$$

其中 $\Sigma = \text{diag}\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\}$ 。

引理 3.1 对于 (3-26)中给定的矩阵 B , 若存在矩阵 P 满足下列结构

$$P = U \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} U^T \quad (3-27)$$

则有 $PB = BZ$, 其中 $Z \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 以及 $Z = V \Sigma^{-1} P_1 \Sigma V^T$, 这里 $P_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 和 $P_2 \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$ 。

定理 3.2 如果存在标量 γ_1 和满足 (3-27)结构的正定矩阵 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 以及满足合适维度的矩阵 M, N , 若它们满足

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * \\ 0 & -P & * & * & * \\ PA & BN & -P & * & * \\ M \Xi C & PA + BN - M \Xi C & 0 & -P & * \\ \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-28a)$$

$$\begin{bmatrix} -\gamma_1 I & * \\ M & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (3-28b)$$

则由 (3-11)和(3-10)所设计的控制器形成的闭环控制系统(3-12)是随机稳定的。

进一步我们得到相应的控制器增益矩阵和观测器增益矩阵

$$K = V \Sigma^{-1} P_1^{-1} \Sigma V^T N \quad (3-29)$$

$$L = P^{-1} M \quad (3-30)$$

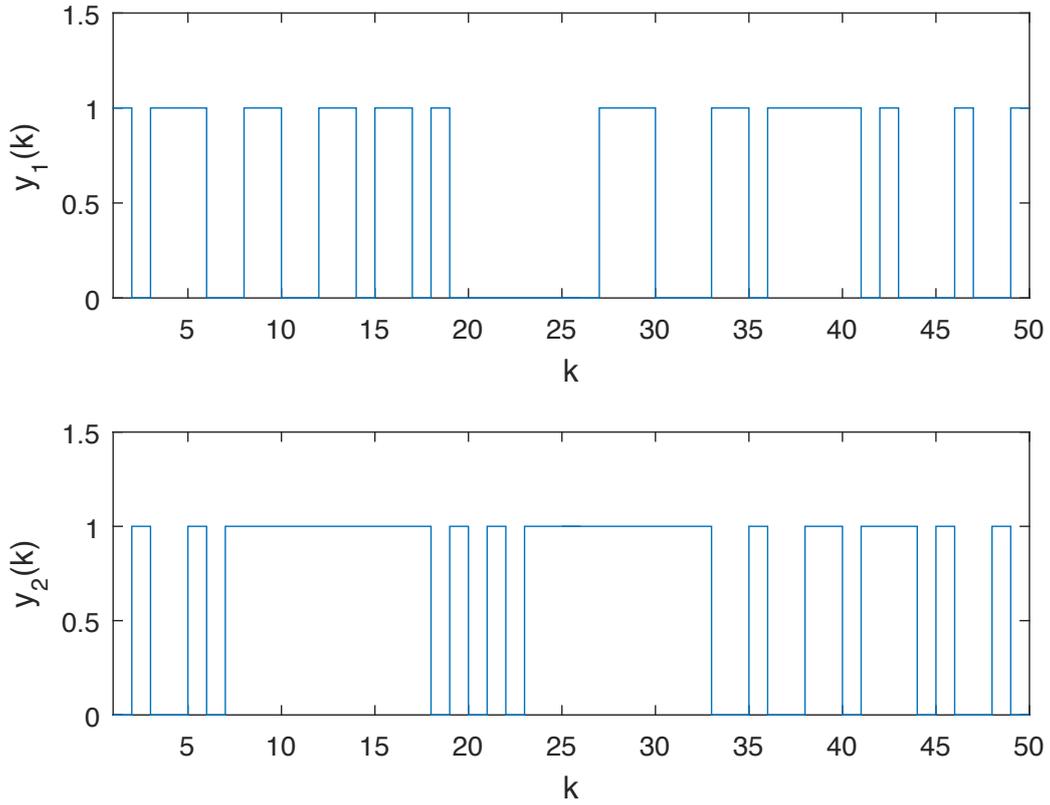


图 3-2 两个传感器发送数据包分别丢失的情况 (“1”表示数据成功传输到控制器中，而“0”表示数据包在通信信道中丢失)

Figure 3-2 Typical packet dropouts of the sensors. (“1” indicates a successful transmission, and “0” vice verse)

证明. 首先我们可以利用 Schur 补将 (3-15b) 重写为如下形式

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * \\ A & BK & -P^{-1} & * & * \\ LEC & A + BK - LEC & 0 & -Q^{-1} & * \\ \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-31)$$

然后我们在 (3-31) 中分别左乘和右乘 $diag\{I, I, P, Q, I\}$, 进一步得到

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * \\ PA & PBK & -P & * & * \\ QL\Xi C & Q(A+BK-L\Xi C) & 0 & -Q & * \\ \sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & -\sqrt{\gamma_1} \sum_{i=1}^p \sigma_i E^i C & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-32)$$

类似的我们可以将定理 1 的约束条件 (3-15a) 转换成 (3-28b) 的形式。

依据引理 1, 存在一个满足 (3-27) 结构的正定矩阵 P , 进一步有 $PB = BP_1$ 。令 $N = P_1K, Q = P$, 以及 $M = QL$ 。因此我们可以将 (3-32) 转换成 (3-28a) 形式。我们可以利用 MATLAB 中 LMI 工具箱来进行求解约束条件 (3-28a), (3-28a) 和 (3-28a), 从而我们可以根据 (3-29) 和 (3-30) 来计算出控制器反馈增益矩阵和观测器增益矩阵。证明完毕。 \square

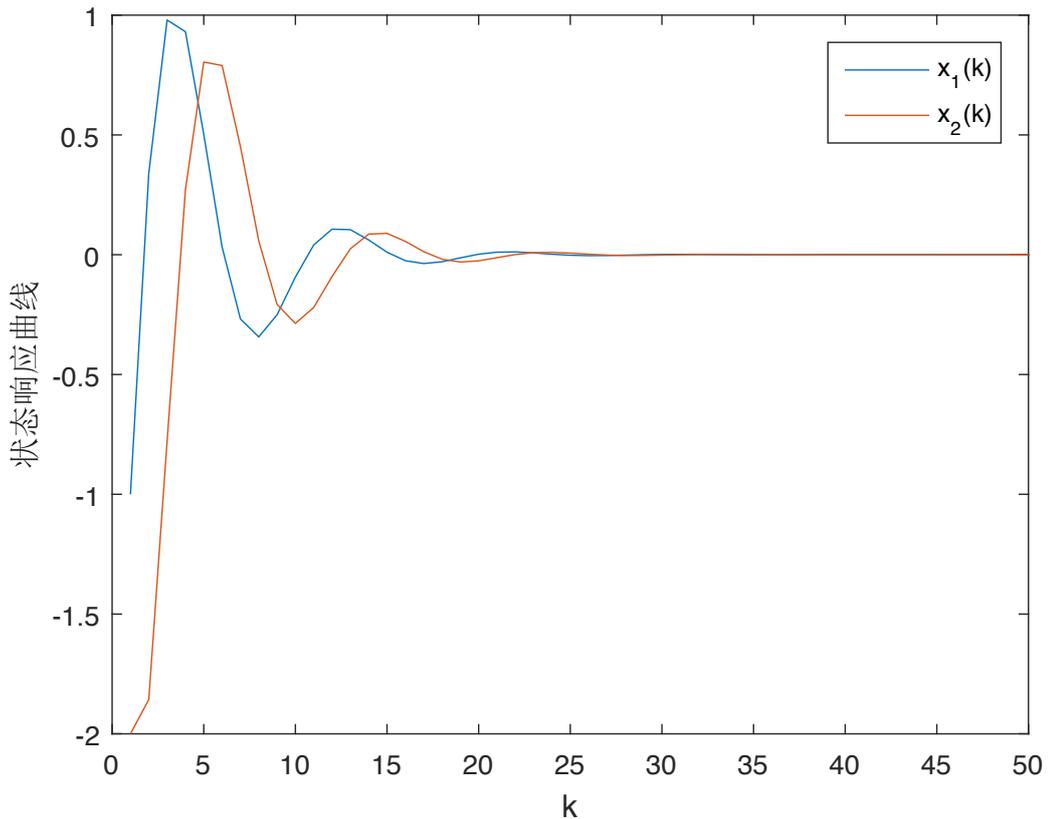


图 3-3 本文提出的方法所产生的系统状态响应
Figure 3-3 System responses using our proposed approach

3.3 数值仿真

在本节中采用数值例子来验证文本提出的方法的有效性。本章考虑开环二阶离散系统，其数学描述如下

$$\begin{cases} x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.417 & -0.378 \\ 0.789 & 0.534 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -0.123 & 0.218 \\ 0.312 & 0.123 \end{bmatrix} u(k) \\ y = \begin{bmatrix} 0.201 & 0.123 \\ 0 & -0.326 \end{bmatrix} x(k) \end{cases} \quad (3-33)$$

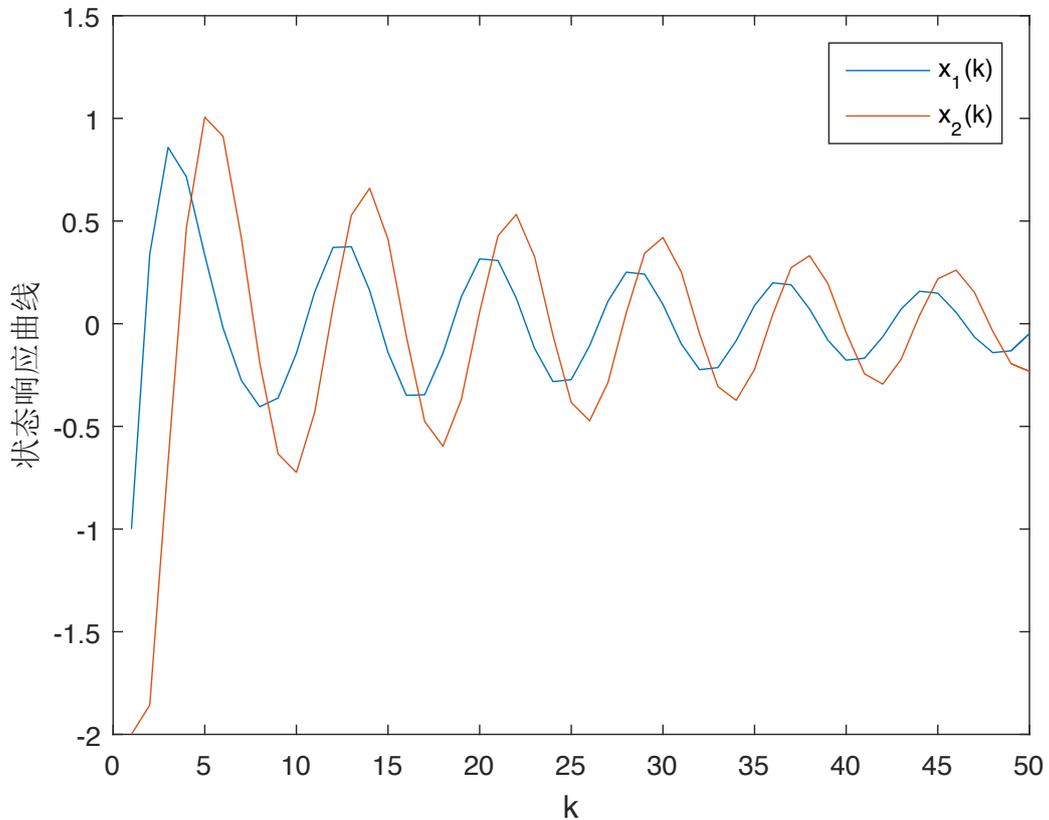


图 3-4 使用文献^[50]中的控制方法所产生的状态响应

Figure 3-4 System responses using control method from^[50]

在本次仿真中，我们假设(3-33)中的系统输出信息分别被两个传感器独立采集，并且各个传感器通过传感器到控制器信道将对应的采集数据发送到控制器中，以及各个传感器发送数据包丢失的概率为 0.35。并设置系统的初始状态为 $x(0) = [-1, -2]^T$ 。

使用本文提出的方法得到的控制器增益矩阵和观测器增益矩阵如下

$$K = \begin{bmatrix} 0.0702 & -0.5569 \\ -0.5836 & 0.7090 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.1402 & 0.007 \\ -0.1946 & 0.8240 \end{bmatrix}$$

在本文中使用基于模型补偿的预测控制方案^[50]作为比较方案，使用该方法得到的控制器增益矩阵和观测增益矩阵如下

$$K_{PC} = \begin{bmatrix} -0.1567 & 0.1516 \\ -0.7528 & -0.7482 \end{bmatrix}$$

$$L_{PC} = \begin{bmatrix} -1.097 & -1.4461 \\ 0.6167 & 0.8445 \end{bmatrix}$$

在仿真结果中，数据包丢失的一种情况如图3-2所示，以及两种方法对应的状态轨迹图如图3-3和3-4所示。从图中我们可以看出本文提出的方法可以让闭环系统快速稳定，而传统的控制方法存在着剧烈的波动情况。这主要是因为我们所提出的方法在控制器端重构了多包传输网络化控制系统中部分丢失信息，并依据丢包的特性给出了相应的控制器设计。

3.4 本章小结

本章节针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的基于观测器的控制器设计问题，提出了输出重构方案来补偿多包传输网络化控制系统的部分丢失信息，进一步采用改进的基于观测器控制器设计方法，再将闭环网络化控制系统转换为离散时间随机系统。利用控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵泛函方法给出了闭环控制系统的充分稳定性条件，以及提出了求解控制器增益矩阵和观测器增益矩阵相应的求解方法。最后，通过数值例子来验证本文提出的控制方法的有效性。

第四章 多包传输网络化控制系统的分类补偿控制

第三、四章节针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的控制器设计问题提出了基于时不变的反馈增益矩阵的控制器设计。虽然基于状态重构方法能够重构出处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统的部分丢失信息，但重构信息与对应的传感器采集的信息存在着误差。正是由于这种误差存在，故重构信息对控制量的影响应该小于控制器最新接收到的采集信息对控制量的影响，即控制器对收集到的最新采集信息和重构的信息采用同一个反馈增益矩阵的控制器设计方法是很保守的。因此，为了提高闭环控制系统性能，需要设计一种新的控制算法应用于处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统。

本章节结构组织如下。第一节主要是针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的问题进行描述；第二节针对处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统提出了分类补偿控制方法；第三节主要是针对闭环控制系统的稳定性进行分析以及相应的控制器进行设计；在第四节中通过数值例子来验证本文提出的方法的有效性；在第五节中得出本章节的结论。

4.1 问题描述

本节中描述了多包传输网络化控制系统的丢包问题，并分析了基于时不变的反馈增益矩阵的控制器设计缺陷。需要进一步设计一种新的控制算法应用于处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统。

4.1.1 多包传输网络化控制系统设置

本章节考虑的多包传输网络化控制系统如图4-1所示，其中 p 个传感器各自对受控对象进行采集数据，并通过通信资源受限的通信信道将相应的采集数据发送到控制器，同时控制器通过理想的通信信道将对应的控制量发送到执行器。

受控对象模型考虑为线性离散时不变系统，即

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4-1)$$

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入， $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统矩阵以及 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为输入矩阵。

我们注意到系统状态 $x(k)$ 来自 p 个传感器的数据，但 $x(k)$ 中元素的顺序不一定与传感器从 1 到 p 的顺序相同。幸运的是，无论 $x(k)$ 中的元素以何种形式

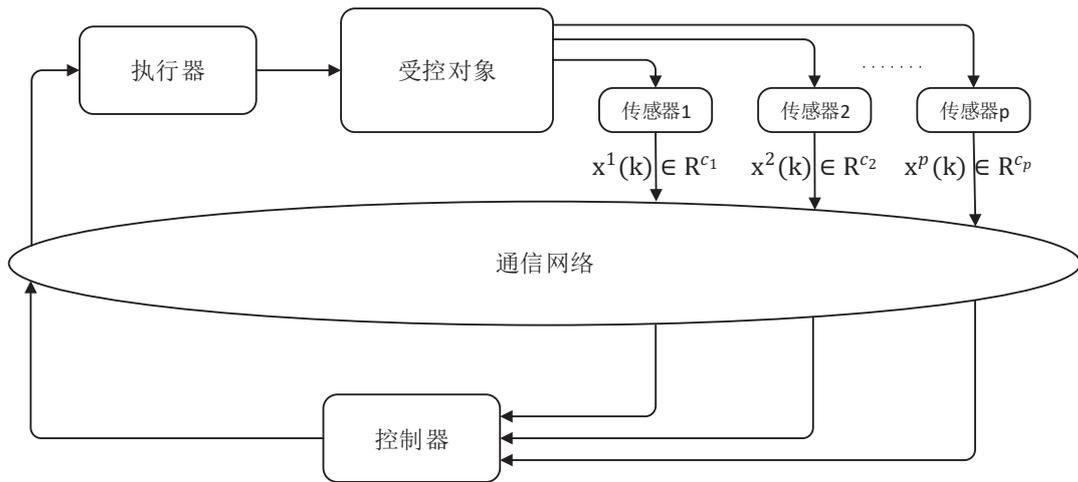


图 4-1 网络化控制系统多包传输结构图

Figure 4-1 Networked control systems with multi-packet transmission

进行排列，我们都可以对 $x(k)$ 中的元素进行有限次的交换达到与传感器顺序相同的目的，即这种交换对应着可逆的线性变换。由线性系统理论知识可知，线性变换不会改变系统的任何性能，例如稳定性和鲁棒性等。因此，我们假设 $x(k)$ 中的元素顺序看成以传感器从 1 到 p 排列顺序，即

$$x(k) = [(x^1(k))^T, (x^2(k))^T, \dots, (x^p(k))^T]^T$$

其中 $x^i(k) \in \mathbb{R}^{c_i}, i = 1, 2, \dots, p$ 表示第 i 个传感器在第 k 时刻采集的数据，并且有 $\sum_{i=1}^p c_i = n$ 。

假设各个传感器通过传感器到控制器信道发送数据包存在着包丢失的情况，我们用 α_k^i 表示控制器在第 k 时刻是否接受到第 i 个传感器发送的数据，

$$\alpha_k^i = \begin{cases} 0 & x^i(k) \text{ 传输失败} \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \quad (4-2)$$

依据各个传感器是否成功将数据包发送到控制器中，故在第 k 时刻 $(\alpha_k^1, \alpha_k^2, \dots, \alpha_k^p)$ 表示元素只能为 0 或 1 的确定性序列，以及这个序列可以确定唯一一个整数 $q \in \mathbb{I} = \{0, 1, \dots, m\}, m = 2^p - 1$ 。

4.1.2 多包传输网络化控制系统设计分析

针对处于丢包情形下的单包传输网络化控制系统，传统的状态反馈控制器设计如下，

$$u(k) = Kx(k) \quad (4-3)$$

其中反馈增益矩阵 K 是时不变的。

然而，考虑通信资源受限的多包传输网络化控制系统，状态反馈控制器的设计不能简单定义为(4-3)，下面将主要分析对处于丢包情形下的网络化控制系统进行反馈控制器设计造成的影响。

依据图4-1，针对在传感器到控制器信道存在丢包的情况，以前主要采用两种方式来处理。即要么使用上一时刻的值^[56]

$$x^i(k) = \begin{cases} \tilde{x}^i(k) & x^i(k) \text{成功传输到控制器} \\ x^i(k-1) & \text{否则} \end{cases}$$

要么使用 0 值^[57]

$$x^i(k) = \begin{cases} \tilde{x}^i(k) & x^i(k) \text{成功传输到控制器} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

上述两种控制方法使用于处于丢包情形下的单包传输网络化控制系统，但是处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统，我们面临着完全不同的情况，即 $x(k)$ 在第 k 时刻的全部信息很难用于控制器（即只有部分传感器采集的数据才能成功发送到控制器中）。这意味着若采用上述传统的控制方法处理数据包丢失问题，则会让控制器设计变得很保守，即忽略了控制器可用的许多信息。

为了解决这个问题，在本文工作中，我们利用系统状态重构方法来重构部分丢失的信息（见 4.2 中），这是一种将所有可用信息用于控制器的有效方法^[50]。

虽然基于系统的状态重构方法可以解决部分信息丢失问题，但是重构的部分丢失信息与相应的传感器采集的信息存在着误差。正是由于误差存在，故重构出来的部分丢失信息对控制量的影响应该小于控制器最新接收到的传感器采集的数据对控制量的影响。即对重构出来的部分丢失信息和控制器最新接收到的传感器采集的数据使用相同的反馈增益矩阵的控制器设计方法是很保守的。因此为了提高闭环控制系统的性能，我们需要进一步设计更高级的控制算法应用于处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统。

4.2 分类补偿控制策略

本节提出的基于分类补偿的策略分为三个模块：网络状态检测器，传感数据重构器和基于分类控制器，其控制方法如图4-2所示。首先有网络状态监测器监测各个传感器发送到控制器的数据包是否丢失，从而指定了(4-2)中的 $\alpha_k^i, i = 1, 2, \dots, p$ ；针对网络状态监测器监测出来的数据包已经丢失的情况，传感器数据重构器采用状态重构的方法对丢失的部分信息进行重构；最后一个模块是基于分类控制器的设计。

针对系统状态重构过程，我们可以把(4-1)中系统矩阵 A 和输入矩阵 B 分别

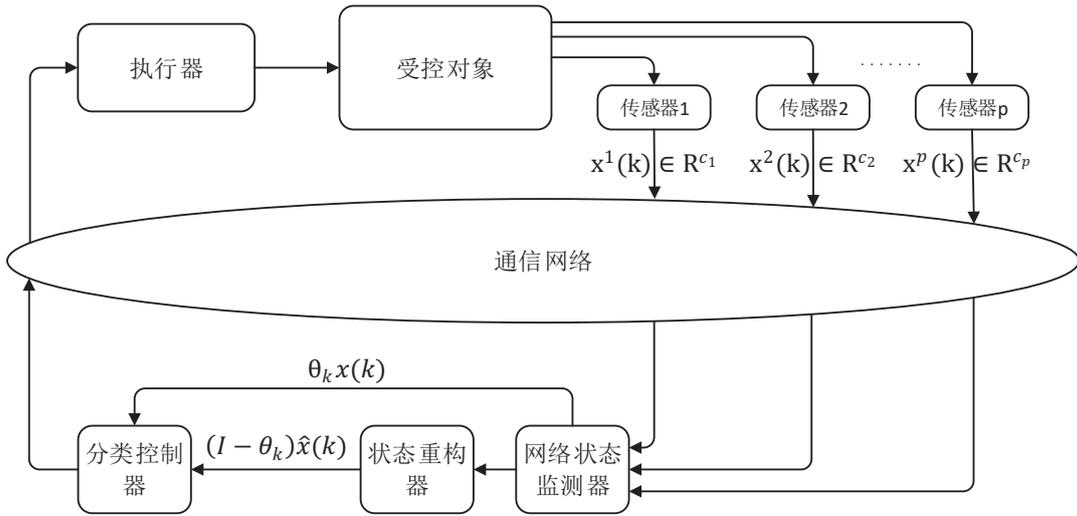


图 4-2 多包传输网络化控制系统分类补偿控制结构图

Figure 4-2 The diagram of the classification control law for NCSs with multi-packet transmission

切割成 $p \times p$ 和 $p \times 1$ 的分块矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1p} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{p1} & A^{p2} & \dots & A^{pp} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^p \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

其中 $A^{ij} \in \mathbb{R}^{c_i \times c_j}$, $i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, p$, 以及 $B^i \in \mathbb{R}^{c_i \times m}$ 。因此我们进一步有

$$x^i(k+1) = \sum_{j=1}^p A^{ij} x^j(k) + B^i u(k) \quad (4-5)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, p$ 。

正如实际通信网络, 针对一些传感器不能成功将数据发送到控制器中的情况, 即有传感器 i , $x^i(k)$ 将不能被控制器接收到, 因此我们需要重构出这部分信息。让 $\hat{x}^i(k+1)$ 表示在第 $k+1$ 时刻重构第 i 个传感器的采集信息, 则有如下公式

$$\hat{x}^i(k+1) = \sum_{j=1}^p A^{ij} \bar{x}^j(k) + B^i u(k) \quad (4-6)$$

其中 $\bar{x}^i(k) = \alpha_k^i x^i(k) + (1 - \alpha_k^i) \hat{x}^i(k)$ 。

定义 $\bar{x}^T(k) = [\{\bar{x}^1(k)\}^T, \{\bar{x}^2(k)\}^T, \dots, \{\bar{x}^p(k)\}^T]^T$, 进一步我们有

$$\bar{x}(k) = \Theta_{\sigma(k)} x(k) + (I - \Theta_{\sigma(k)}) \hat{x}(k) \quad (4-7)$$

其中 $\sigma(k) \in \mathbb{I}$ 以及

$$\Theta_{\sigma(k)} = \begin{bmatrix} \alpha_k^1 I^{c_1 \times c_1} & & & & \\ & \alpha_k^2 I^{c_2 \times c_2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \alpha_k^p I^{c_p \times c_p} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

根据 (4-6)，我们进一步有

$$\hat{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + Bu(k) \quad (4-9)$$

根据系统的实时性要求，控制系统通常仅使用最新的系统状态信息和控制信号信息。而上述的基于模型的状态重构方法可以重构多包传输引起的部分丢失信息，但得到的重构信息仍然是基于传感器的旧数据。因此重构的部分信息对控制量的影响不能像对应传感器采集的最新数据对控制器的影响一样大。即我们对重构信息和接收到的最新采集信息分别使用不同的反馈增益矩阵，即控制器设计规则如下，

$$u(k) = K_1 \Theta_{\sigma(k)} x(k) + K_2 (I - \Theta_{\sigma(k)}) \hat{x}(k) \quad (4-10)$$

其中 $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是不同的控制器增益矩阵。

定义 $\eta^T(k) = [x^T(k), \hat{x}^T(k)]$ ，则从(4-1)，(4-9)和(4-10)中我们得到闭环控制系统为

$$\eta(k+1) = \Phi_{\sigma(k)} \eta(k) \quad (4-11)$$

其中

$$\Phi_{\sigma(k)} = \begin{bmatrix} A + BK_1 \Theta_{\sigma(k)} & BK_2 (I - \Theta_{\sigma(k)}) \\ (A + BK_1) \Theta_{\sigma(k)} & (A + BK_2) (I - \Theta_{\sigma(k)}) \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

4.3 稳定性分析和控制器设计

本章节主要对闭环控制系统(4-11)和(4-12)的稳定性进行研究，进一步给出相应的控制器增益矩阵的设计方法。

4.3.1 稳定性分析

在闭环控制系统稳定性分析之前，我们先引入指数稳定的概念。

定义 4.1 对于切换系统 $\eta(k+1) = \Phi_{\sigma(k)} \eta(k)$ ，如果此系统的状态解 $\eta(k)$ 满足 $\|\eta(k)\| \leq c\mu^k \|\eta(0)\|$ ，其中 $c > 0$ 以及 $0 < \mu < 1$ ，则该系统是指数稳定的，把 μ 称为衰减率。

定理 4.1 对于给定的控制器增益矩阵 $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 如果存在标量 $0 < v < 1, \beta > 0$ 以及有着 $\beta I < P_i < I, P_i \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 约束的正定矩阵满足如下矩阵不等式,

$$\begin{bmatrix} -P_i + vI & \Phi_i^T \\ \Phi_i & -P_j^{-1} \end{bmatrix} < 0, \forall (i, j) \in \mathbb{I} \times \mathbb{I} \quad (4-13)$$

则由(4-11)和(4-12)决定的闭环控制系统是指数稳定的, 其中衰减率 $\mu = \sqrt{1 - v}$ 。

证明. 定义指标函数 $\varepsilon^T(k) = [\varepsilon_0(k), \varepsilon_1(k), \dots, \varepsilon_m(k)]$, 其中

$$\varepsilon_i(k) = \begin{cases} 1 & \sigma(k) = i \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4-14)$$

则控制系统 (4-11)可以进一步转换为

$$\eta(k+1) = \sum_{i=0}^m \varepsilon_i(k) \Phi_i \eta(k) \quad (4-15)$$

对于切换系统(4-15), 则它相应的控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数为如下形式,

$$\begin{aligned} V(k, \eta(k)) &= \eta^T(k) P(\varepsilon(k)) \eta(k) \\ &= \eta^T(k) \left(\sum_{i=0}^m \varepsilon_i(k) Q_i \right) \eta(k) \end{aligned} \quad (4-16)$$

从(4-14)中, 我们进一步有

$$V(k, \eta(k)) = \eta^T(k) Q_i \eta(k)$$

令 $\beta_1 = \min_{i \in \mathbb{I}} \lambda(Q_i)$ 以及 $\rho_1 = \max_{i \in \mathbb{I}} \lambda(Q_i)$, 其中 $\lambda(Q_i)$ 表示矩阵 Q_i 的最大特征值, 从而我们可以得到

$$\beta_1 I < Q_i < \rho_1 I \quad (4-17)$$

$$\beta_1 \|\eta(k)\|^2 < V(k, \eta(k)) < \rho_1 \|\eta(k)\|^2 \quad (4-18)$$

考虑控制器增益矩阵 Lyapunov 控制器增益矩阵函数差分方程

$$\begin{aligned} \Delta V &= V(k+1, \eta(k+1)) - V(k, \eta(k)) \\ &= \eta^T(k+1) P(\varepsilon(k+1)) \eta(k+1) - \eta^T(k) P(\varepsilon(k)) \eta(k) \\ &= \eta^T(k) (\Phi_i^T P(\varepsilon(k+1)) \Phi_i - P(\varepsilon(k))) \eta(k) \\ &= \eta^T(k) (\Phi_i Q_j \Phi_i - Q_i) \eta(k) \end{aligned} \quad (4-19)$$

令 $v_1 = \min_{(i,j) \in \mathbb{I} \times \mathbb{I}} \lambda(Q_i - \Phi_i^T Q_j \Phi_i)$, 进一步我们有

$$V(k, \eta(k)) - V(k+1, \eta(k+1)) > v_1 \|\eta(k)\|^2 \quad (4-20)$$

依据(4-18)和(4-20), 我们可以得到

$$\beta_1 \|\eta(k)\|^2 - \rho_1 \|\eta(k+1)\|^2 > v_1 \|\eta(k)\|^2$$

从而我们进一步有

$$\|\eta(k+1)\|^2 < \left(\frac{\beta_1}{\rho_1} - \frac{v_1}{\rho_1}\right) \|\eta(k)\|^2$$

依据不等式 $0 < \frac{\beta_1}{\rho_1} < 1$, 我们可以得到下列不等式

$$\|\eta(k+1)\|^2 < \left(1 - \frac{v_1}{\rho_1}\right) \|\eta(k)\|^2$$

令 $\mu = \sqrt{1 - \frac{v_1}{\rho_1}}$, 我们进一步可以得到

$$\|\eta(k)\|^2 < \mu^{2k} \|\eta(0)\|^2$$

从而得到它的等价形式 $\|\eta(k)\| < \mu^k \|\eta(0)\|$ 。

不等式(4-17)和(4-20)我们可以重写成如下形式

$$\frac{\beta_1}{\rho_1} I < \frac{1}{\rho_1} Q_i < I$$

$$\begin{bmatrix} -Q_i + v_1 I & \Phi_i^T \\ \Phi_i & -Q_j^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (4-21)$$

对不等式(4-21)我们进行左乘和右乘如下矩阵

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\rho_1} \end{bmatrix}$$

进一步我们将(4-21)转换为如下形式

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{\rho_1} Q_i + \frac{v_1}{\rho_1} I & \Phi_i^T \\ \Phi_i & -\rho_1 Q_j^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (4-22)$$

定义新的变量 $v = \frac{v_1}{\rho_1}$, $\beta = \frac{\beta_1}{\rho_1}$ 和 $P_i = \frac{1}{\rho_1} Q_i$ 。因此我们可以得到(4-13)和 $\beta I < P_i < I$ 约束条件。证明完毕。 \square

4.3.2 控制器设计

在本小节中, 主要考虑的是(4-10)中的控制器增益矩阵 K_1, K_2 的相关设计问题。其基本思想是通过优化闭环控制系统的衰减率 μ , 从而获得不同的控制器增益矩阵, 在给出控制器增益矩阵设计之前, 我们先引入如下引理^[68]。

引理 4.1 对于给定矩阵 X, Y, Z 并且它们有合适的维度, 以及 $X = X^T > 0, Y = Y^T > 0$, 如果存在标量 $\gamma > 0$ 满足如下不等式

$$\begin{bmatrix} -X & \gamma Y^T & 0 \\ \gamma Y & -2\gamma I & Z \\ 0 & Z & -Z \end{bmatrix} < 0 \quad (4-23)$$

则有

$$\begin{bmatrix} -X & Y^T \\ Y & -Z^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (4-24)$$

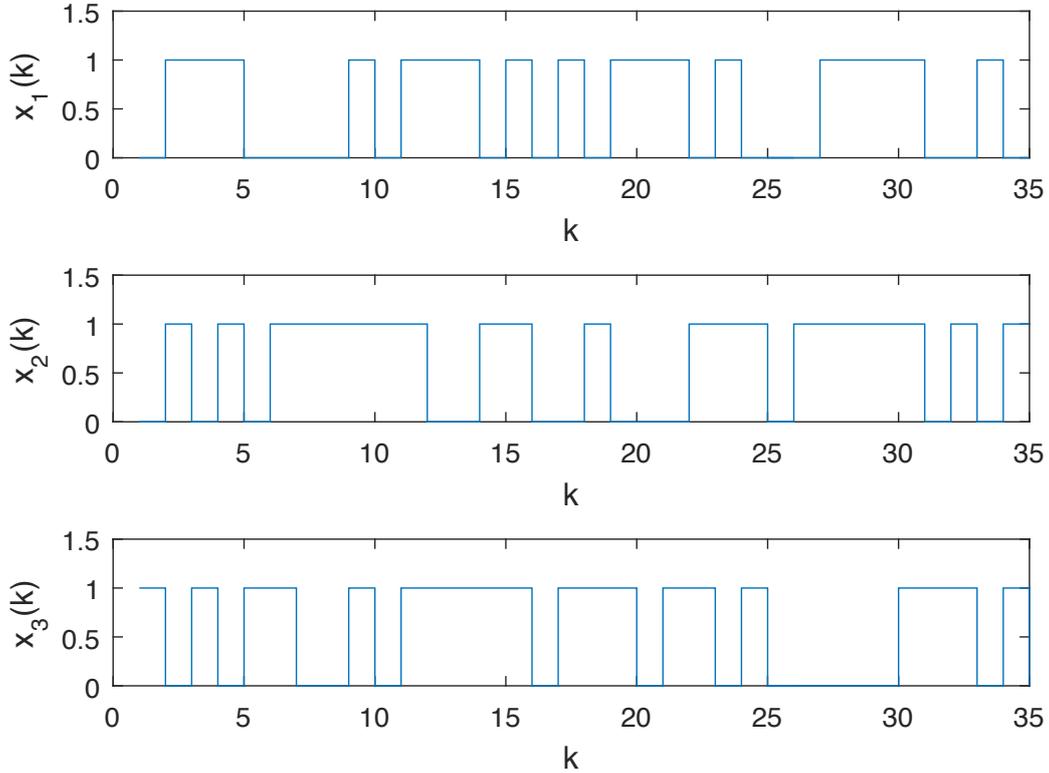


图 4-3 三个传感器发送数据包分别丢失的情况。（“1”表示数据成功传输到控制器中，而“0”表示数据包在通信信道中丢失。）

Figure 4-3 Illustrating a typical case of data packet dropout. (“1” indicates a successful transmission, and “0” vice verse.)

定理 4.2 若存在标量 $0 < v < 1, 0 < \beta < 1, \gamma > 0$ ，以及满足合适维度的矩阵 $P_i, i = 1, 2, \dots, m$ 和 \hat{K}_i 满足下列优化问题中的约束条件

$$\max \quad v$$

Subject to

$$\beta I < P_i = P_i^T, P_j = P_j^T < I$$

$$\begin{bmatrix} -P_i + vI & \gamma \Phi_i^T & 0 \\ \gamma \Phi_i & -2\gamma I & P_j \\ 0 & P_j & -P_j \end{bmatrix} < 0, \forall (i, j) \in \mathbb{I} \times \mathbb{I}$$

其中

$$\gamma\Phi_i = \begin{bmatrix} \gamma A + B\hat{K}_1\Theta_i & B\hat{K}_2(I - \Theta_i) \\ (\gamma A + B\hat{K}_1\Theta_i) & (\gamma A + B\hat{K}_2)(I - \Theta_i) \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

则由(4-10)所设计的控制器形成的闭环控制系统(4-11)是指数稳定的。进一步控制器的控馈增益矩阵由下列等式给出

$$K_i = \frac{\hat{K}_i}{\gamma}, i = 1, 2 \quad (4-26)$$

通过使用引理 1 我们很容易可以证明出定理 2。

4.4 数值仿真

借用文献^[67]中开环三阶不稳定的离散系统，其系统矩阵和输入矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} -0.850 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.100 & 0.2400 \\ 0.002 & 0.3681 & 0.7070 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

在本次仿真中，我们假设(4-27)中的三个系统状态分别被三个传感器独立采集，并且各个传感器通过传感器到控制器信道将对应的采集数据发送到控制器中，以及各个传感器发送数据包丢失的概率为 0.35。并设置系统的初始状态为 $x(0) = [-1, -1, 1]^T$ 。

使用本文提出的方法得到相应的控制器增益矩阵如下

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0.8445 & -0.5877 & 0.1826 \\ 0.5410 & -0.4863 & -0.7082 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 0.1036 & -0.1547 & 0.0272 \\ 0.1154 & -0.0185 & -0.1766 \end{bmatrix}$$

在本文中使用第二章提出的控制方案作为比较方案，使用该方法得到的控制器增益矩阵如下

$$K = \begin{bmatrix} 0.1075 & -0.1376 & -0.0523 \\ 0.0812 & -0.1390 & -0.1834 \end{bmatrix}$$

在仿真结果中，数据包丢失的一种情况如图4-3所示，以及两种方法对应的状态轨迹图如图4-4所示。从图中我们可以看出本文提出的方法可以让闭环系统快速稳定，而传统的控制方法存在着剧烈的波动情况。这种优势体现在了我们提出的基于分类补偿的控制方法，即对重构的部分信息和最新接收到的采集信息选择不同的控制器增益矩阵，从而对控制量的影响程度不一样。

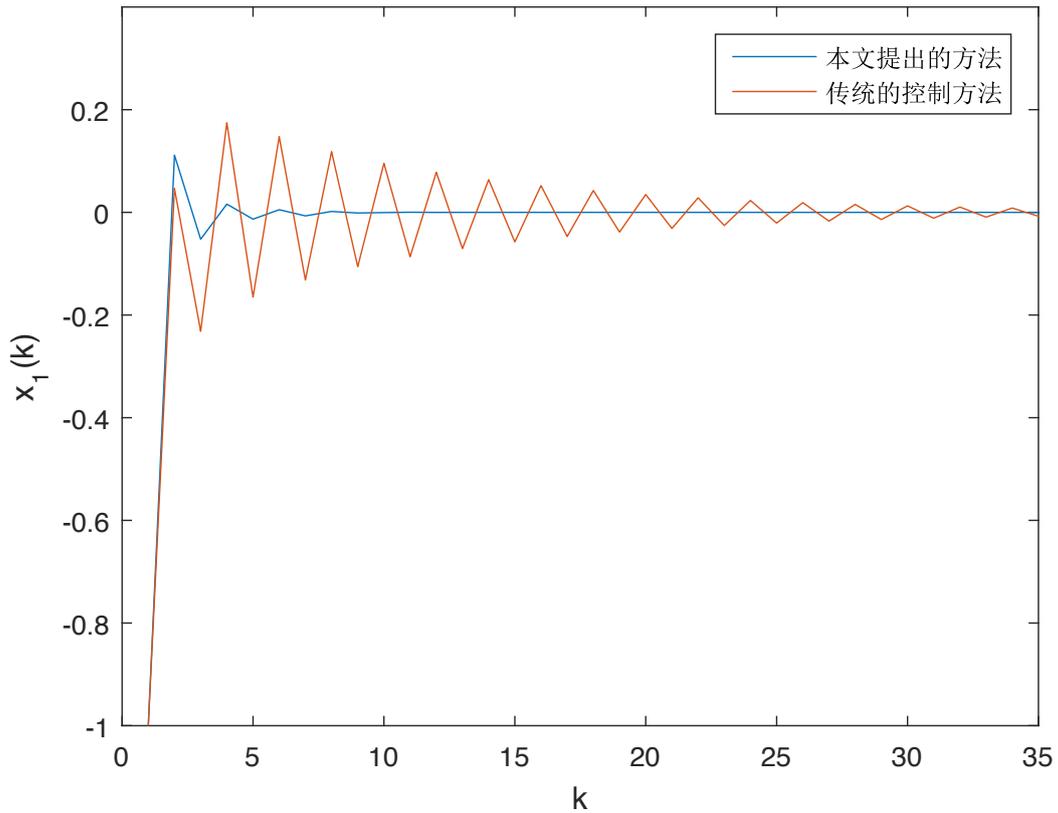


图 4-4 两种方法的状态轨迹比较图

Figure 4-4 Trajectory comparison of the two approachers

4.5 本章小结

多包传输是无线网络化控制系统中的一个很常见的特征，对此系统中存在着部分信息丢失问题，这个问题给控制器的设计带来了很大的挑战。本文针对这个问题提出了一种基于分类补偿控制方法。通过状态重构方法来重构部分丢失信息，并对重构信息和接收到的信息分别设计反馈矩阵；进一步得到闭环控制系统指数稳定的充分条件以及通过最小化衰减率来进行求解控制器设计的约束条件，从而得到控制器增益矩阵。从仿真的结果中可以看出该方法相比于传统方法有着很好的控制性能，从而验证了本文提出的方法的有效性。

第五章 结论与展望

5.1 结论

在网络化控制系统中，存在着更一般的通信方式——多包传输。所谓多包传输是指在传感器到控制器信道中，每步传感器采集的数据不能打成单个数据包进行传输，或在控制器到执行器信道中，每步控制器计算的控制信息也不能打成单个包进行传输。考虑现实世界的场景——控制系统中多个传感器由于地理上的隔离不得不使用多包传输，针对这个现实的物理环境，本文重点研究了处于丢包情形下的多包传输网络化控制系统的控制器设计和分析问题。本文的主要研究成果可总结为如下：

(1) 针对网络化控制系统中存在的由多包传输引入的部分包丢失问题，提出了基于状态重构方法的状态反馈控制方案。首先采用状态重构方法对部分丢失信息进行重构，进一步将随机稳定的概念引入到此闭环控制系统中，从而得到了闭环控制系统的稳定性结论以及给出了闭环控制系统状态反馈控制器的设计方法；最后从仿真结果看在一定程度上解决了通信受限情况下网络化控制系统的部分信息丢失问题。

(2) 针对处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的基于观测器的控制器设计问题，提出了基于输出重构的观测器和控制器设计规则。首先采用输出重构方法补偿多包传输网络化控制系统丢失的信息；进一步采用基于观测器的控制规则来进行控制器的设计，得到闭环控制系统；然后证明了闭环控制系统的随机稳定以及给出了相应的控制器增益矩阵和观测增益矩阵的联合设计；最后从仿真结果看在一定程度上解决了处于丢包情形下多包传输网络化控制系统的基于观测器的控制器设计问题。

(3) 针对(1)中的问题，该解决方案并没有考虑由于重构信息引入的系统误差，对此提出一种基于重构信息的分类补偿控制规则。首先采用状态重构方法来重构部分丢失信息，并对重构信息和接收到的信息分别设计反馈矩阵；进一步得到闭环控制系统指数稳定的充分条件以及通过最小化衰减率来进行求解控制器设计的约束条件，从而得到控制器增益矩阵；最后从仿真结果来看，该方案的控制性能明显优于(1)中的解决方案。

5.2 展望

随着物联网浪潮的到来和云计算技术的日趋成熟,控制系统的规模越来越大,而这些控制系统的传感器或执行器广泛地分布在空间各地。此类系统与传统的网络化控制系统相比,存在着大量的理论问题尚未解决,其中一个最基础的问题就是多个传感器通过资源受限的通信网络独自发送自己采集的信息到控制器。网络化控制系统中的多包传输带来的问题也是物联网、信息物理融合系统等需要解决的核心问题。本文针对多包传输网络化控制系统的丢包问题进行了研究,并取得了一定的成果。但是总的来说,多包传输网络化控制系统仍然还存在着许多问题需要进一步深入研究。

(1) 对多包传输网络化控制系统来说,若传感器到控制器信道和控制器到执行器信道都考虑通信资源受限,控制器很难知道受控对象的实时演化过程,因此对该控制系统如何设计控制器是一个值得研究的课题。

(2) 对多包传输网络化控制系统来说,特别是无线网络化控制系统,若进一步想提高闭环控制系统的性能,需要考虑传感器的接入问题,即控制与通信联合设计问题。而如何对这类多包传输网络化控制系统进行建模和分析是一个很值得研究的课题。

(3) 对多包传输网络化控制系统来说,若各个系统采用了不同的采样周期,例如为了节省通信资源,各个子系统采用事件触发。而针对这类多包传输网络化控制系统如何进行建模,分析和控制器设计是一个很富有挑战性的研究课题。

我们现在正在目睹无线通信逐渐应用到控制系统中,而这些系统已经在工业 4.0 时代中实现了许多重要的应用。而在无线网络化控制系统中,存在着一个基本问题——多包传输问题。我们认为如何处理网络化控制系统中的多包传输问题在未来将会受到更多的关注,为无线网络化控制系统的发展和进一步用在现实物理世界中作出奋斗。

参考文献

- [1] Wang Y, Ding S X, Xu D, et al. An H_∞ Fault Estimation Scheme of Wireless Networked Control Systems for Industrial Real-Time Applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(6): 2073–2086.
- [2] Bello O, Zeadally S. Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(3): 1172–1182.
- [3] Sztipanovits J, Koutsoukos X, Karsai G, et al. Toward a Science of Cyber-Physical System Integration[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 29–44.
- [4] Gungor V C, Hancke G P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4258–4265.
- [5] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述 [J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 101–118.
- [6] 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 (英文) [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 997–1007.
- [7] 夏元清. 云控制系统及其面临的挑战 [J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 1–12.
- [8] Nair G N, Evans R J. Stabilizability of Stochastic Linear Systems with Finite Feedback Data Rates[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2004, 43(2): 413–436.
- [9] Park P, Ergen S C, Fischione C, et al. Wireless Network Design for Control Systems: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 978–1013.
- [10] Pajic M, Sundaram S, Pappas G J, et al. The Wireless Control Network: A New Approach for Control Over Networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(10): 2305–2318.
- [11] Zhao Y-B, Sun X-M, Zhang J, et al. Networked Control Systems: The Communication Basics and Control Methodologies[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [12] Ploennigs J, Vasyutynskyy V, Kabitzsch K. Comparative Study of Energy-Efficient Sampling Approaches for Wireless Control Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(3): 416–424.
- [13] Park P, Fischione C, Bonivento A, et al. Breath: An Adaptive Protocol for Industrial Control Applications Using Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(6): 821–838.
- [14] Pang Z, Liu G, Zhou D, et al. Input Design-Based Compensation Control for Networked Non-linear Systems With Random Delays and Packet Dropouts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(3): 299–303.
- [15] Peng C, Song Y, Xie X P, et al. Event-Triggered Output Tracking Control for Wireless Networked Control Systems with Communication Delays and Data Dropouts[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(17): 2195–2203.
- [16] Tipsuwan Y, Chow M-Y. Control Methodologies in Networked Control Systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(10): 1099–1111.
- [17] Lian F-L, Moyne J R, Tilbury D M. Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(1): 66–83.
- [18] Tang Z, Park J H, Lee T H. Dynamic Output-Feedback-Based H_∞ Design for Networked Control Systems with Multipath Packet Dropouts[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 275: 121–133.
- [19] Xiao X, Park J H, Zhou L. Event-Triggered Control of Discrete-time Switched Linear Systems with Packet Losses[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 333: 344–352.
- [20] Pang Z, Liu G, Zhou D, et al. Output Tracking Control for Networked Systems: A Model-Based Prediction Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4867–4877.

- [21] Pang Z, Liu G, Zhou D. Design and Performance Analysis of Incremental Networked Predictive Control Systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(6): 1400–1410.
- [22] Andreasson M, Dimarogonas D V, Sandberg H, et al. Distributed Control of Networked Dynamical Systems: Static Feedback, Integral Action and Consensus[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 59(7): 1750 – 1764.
- [23] Roshany-Yamchi S, Cychowski M, Negenborn R R, et al. Kalman Filter-Based Distributed Predictive Control of Large-Scale Multi-Rate Systems: Application to Power Networks[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(1): 27–39.
- [24] Lješnjanić M, Quevedo D E, Nešić D. Packetized MPC with Dynamic Scheduling Constraints and Bounded Packet Dropouts [J]. *Automatica*, 2014, 50(3): 784–797.
- [25] Mazo M, Tabuada P. Decentralized Event-Triggered Control Over Wireless Sensor/Actuator Networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(10): 2456–2461.
- [26] Chang J H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(4): 609–619.
- [27] Sadi Y, Ergen S C, Park P. Minimum Energy Data Transmission for Wireless Networked Control Systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(4): 2163–2175.
- [28] Park P. Modeling, Analysis and Design of Wireless Sensor Network Protocols[D]. [S.l.]: KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [29] Araújo J, Mazo M, Anta A, et al. System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless Control Systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 175–184.
- [30] 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.
- [31] Zhang X, Han Q, Yu X. Survey on Recent Advances in Networked Control Systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1740–1752.
- [32] 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.
- [33] Ma C, Chen S, Liu W. Maximum Allowable Delay Bound of Networked Control Systems with Multi-Step Delay[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15(5): 513–520.
- [34] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic Analysis and Control of Real-Time Systems with Random Time Delays[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57–64.
- [35] Shousong H, Qixin Z. Stochastic Optimal Control and Analysis of Stability of Networked Control Systems with Long Delay[J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877–1884.
- [36] Zhang L, Shi Y, Chen T, et al. A New Method for Stabilization of Networked Control Systems with Random Delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1177–1181.
- [37] Antsaklis P, Baillieul J. Special Issue on Technology of Networked Control Systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5–8.
- [38] Zhang D, Shi P, Wang Q-G, et al. Analysis and Synthesis of Networked Control Systems: A Survey of Recent Advances and Challenges[J]. *ISA Transactions*, 2017, 66: 376 – 392.
- [39] Wei Q, Liu D, Lin H. Value Iteration Adaptive Dynamic Programming for Optimal Control of Discrete-Time Nonlinear Systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(3): 840–853.
- [40] Ge X, Yang F, Han Q-L. Distributed Networked Control Systems: A Brief Overview[J]. *Information Sciences*, 2017, 380: 117 – 131.
- [41] Wang T, Gao H, Qiu J. A Combined Adaptive Neural Network and Nonlinear Model Predictive Control for Multirate Networked Industrial Process Control[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(2): 416–425.
- [42] Mayne D Q. Model Predictive Control: Recent Developments and Future Promise[J]. *Automatica*, 2014, 50(12): 2967 – 2986.
- [43] Sun X-M, Wu D, Liu G-P, et al. Input-to-State Stability for Networked Predictive Control with Random Delays in both Feedback and Forward Channels[J]. *IEEE Transactions on Industrial*

- Electronics, 2014, 61(7) : 3519–3526.
- [44] Li H, Wu C, Jing X, et al. Fuzzy Tracking Control for Nonlinear Networked Systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8) : 2020–2031.
- [45] Wang Y, Li C, Liu X. Consensus-Based Filter Designing for Wireless Sensor Networks with Packet Loss[J]. ISA Transactions, 2014, 53(2) : 578–583.
- [46] 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) : 2016–2030.
- [47] Al-Areqi S, Görges D, Liu S. Event-Based Networked Control and Scheduling Codesign with Guaranteed Performance[J]. Automatica, 2015, 57 : 128–134.
- [48] Al-Areqi S, Görges D, Liu S. Event-Based Control and Scheduling Codesign: Stochastic and Robust Approaches[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(5) : 1291–1303.
- [49] Long Y, Xu C. Fault Detection in Finite Frequency Domain for Constrained Networked Systems under Multi-Packet Transmission[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(13) : 5110–5130.
- [50] Zhao Y, Kim J, Yang G, et al. Model-based Compensation for Multi-Packet Transmission in Networked Control Systems[C]. Orlando: 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. 2011 : 3136–3141.
- [51] Zhao Y B, Liu G P, Rees D. Packet-Based Deadband Control for Internet-Based Networked Control Systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(5) : 1057–1067.
- [52] Song H, Liu G, Zhang W. Predictive Control of Uncertain Networked Systems with Distributed Forward Delays[C]. Shenyang: Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2014 : 2047–2052.
- [53] Song H, Liu G, Yu L. Networked Predictive Control of Uncertain Systems With Multiple Feedback Channels[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11) : 5228–5238.
- [54] Wang J, Zhang L, Wang B, et al. Robust Distributed Model Predictive Control for Uncertain Networked Control systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 8(17) : 1843–1851.
- [55] Wang Y , Yang G . Multiple Communication Channels-Based Packet Dropout Compensation for Networked Control Systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2008, 2(8) : 717–727.
- [56] Hu S, Yan W. Stability of Networked Control Systems Under a Multiple-Packet Transmission Policy[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(7) : 1706–1711.
- [57] Gupta V, Hassibi B, Murray R M. Optimal LQG Control across Packet-Dropping Links[J]. Systems & Control Letters, 2007, 56(6) : 439–446.
- [58] Wang D, Wang J, Wang W. H_∞ Controller Design of Networked Control Systems with Markov Packet Dropouts[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(3) : 689–697.
- [59] Li Z, Alsaadi F, Hayat T, et al. New results on Stability Analysis and Stabilisation of Networked Control System[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(16) : 1707–1715.
- [60] Zhu X-L, Yang G-H. Stability Analysis and State Feedback Control of Networked Control Systems with Multi-Packet Transmission[C]. Washington: 2008 American Control Conference. 2008 : 3133–3138.
- [61] Jianning L, Hongye S, Zhengguang W, et al. Stabilization of Wireless Networked Control System with Multi-Packet Transmission Policy[C]. Guangzhou: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. 2012 : 5770–5774.
- [62] Guo G. A Switching System Approach to Sensor and Actuator Assignment for Stabilisation via Limited Multi-Packet Transmitting Channels[J]. International Journal of Control, 2011, 84(1) : 78–93.
- [63] Sun J, Chen J. Networked Predictive Control for Systems with Unknown or Partially Known Delay[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(18) : 2282–2288.
- [64] Cervin A, Henriksson D, Ohlin, M. TrueTime 2.0 beta 5-Reference Manual[M]. Lund, Swe-

- den: Automatic Control Dept., Lund Univ. Press, 2010.
- [65] Chen C-T. Linear System Theory and Design[M], 3rd edn. New York, America: Oxford University Press, 1998.
 - [66] Liu G-P. Consensus and Stability Analysis of Networked Multiagent Predictive Control Systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(4) : 1114–1119.
 - [67] Sun X, Wu D, Wen C, et al. A Novel Stability Analysis for Networked Predictive Control Systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2014, 61(6) : 453–457.
 - [68] Alessandri A, Bedouhene F, Kheloufi H, et al. Output Feedback Control for a Class of Switching Discrete-Time Linear Systems[C]. Los Angeles: 53rd IEEE Conference on Decision and Control. 2014 : 1533 – 1538.

致 谢

在论文完成之际，我要特别感谢我的导师赵云波教授，赵老师是一位严谨谦和的教授，在读研期间，赵老师耐心地指导我开展科研工作，并教会我做人、做事的道理和方法，带给我很多关于对未来规划的启示和思考。赵老师朴素的生活作风、淡泊的生活态度、严谨的治学态度和渊博的知识，让我如沐春风、受益匪浅。从论文的选题到后续工作的开展，赵老师都一直严格把关，并给予指导，使我收获颇多。赵老师每周都组织周会，不仅让我们接触到一些新的知识，了解实验室各位同学的研究方向，便于交流，同时，针对我们研究过程中的瓶颈问题，总是能指点迷津，拨云见日。赵老师严谨的科学态度以及严格守时的工作方式，成为了学生的榜样，带动了学生的科研积极性，为课题组营造了良好的学术氛围。在此，对我的导师，赵云波教授致以最诚挚的谢意。

在实验室的日子总是紧张而充实的，感谢实验室的同门韩康、李天舒、袁征、何江涛以及姚俊毅，我们一起见证了网络化智能控制实验室的建立和发展，在此留下了许多愉快的回忆；感谢实验室朱巧慧，吴芳，吴宇平等同学对我的论文仔细评审；特别感谢中国科学技术大学的李鹏飞师兄对我的指导和启发，使我少走了很多弯路；感谢2016级硕士3班的全体同学，与你们共度的三年时光，开阔了我的视野，丰富了我的人生，收益良多。

最后，我要对我的家人表示深深的敬意和感谢，学多年，他们给予我始终如一的支持与关爱，使我能够顺利完成学业，并不断地突破自己，迎接生命里的每一个挑战。疲惫时，他们的爱是温暖的港湾；气矮时，他们的爱是动力的源泉。我深深地爱着他们，愿他们健康长寿，幸福平安！愿天下所有的父母、老师幸福平安！

作者简介

1 作者简介

1993年08月出生于四川巴中。

2016年09月—2019年06月，浙江工业大学信息工程学院院（系）控制科学与工程专业学习，获得工学硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

[1] Yun-Bo Zhao, Tao Huang, Yu Kang, Xugang Xi. Stochastic Stabilization of Wireless Networked Control Systems with Lossy Multi-packet Transmission, IET Control Theory and Applications. (DOI:10.1049/iet-cta.2018.5255)

[2] Yun-Bo Zhao, Jiangtao He, Tao Huang, Qiaohui Zhu. Classification-Based Control for Wireless Networked Control Systems with Lossy Multi-Packet Transmission, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. (已录用)

3 参与的科研项目及获奖情况

[1] 赵云波. 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, 国家自然科学基金面上项目. 编号: 61673350

4 发明专利

[1] 赵云波, 韩康, 黄涛. 一种针对多传感器网络化控制系统的主动时延补偿方法. 中国, 受理. 编号: 201811196434.8

[2] 赵云波, 韩康, 黄涛. 一种针对多传感网络化控制系统的数据包丢失的补偿方法. 中国, 受理. 编号: 201811196447.5

学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP273	621.3	国家自然科学基金
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*	多包传输网络化控制系统的设计和分析		
关键词*	网络化控制系统, 多包传输, 状态重构, 随机镇定		论文语种*
并列题名*	Design and Analysis of Networked Control Systems with Multi-packet Transmission		中文
作者姓名*	黄涛	学 号*	2111603113
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮政编码
浙江工业大学信息学院	10337	杭州市西湖区留和路 288号	310023
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	全日制	2019
论文提交日期*	2019.05.20		
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	
	赵云波	夏永祥、宣琦、陈晋音、翔云	
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*	56		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			

