



浙江工业大学

硕士学位论文

无线网络化控制系统的预测事件触发设计和分析

| | |
|------|----------|
| 作者姓名 | 潘晓康 |
| 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：2020年06月

Predictive Event-Triggered Control Design and Analysis for Wireless Networked Control Systems

Dissertation Submitted to

Zhejiang University of Technology

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Engineering



by

Xiaokang Pan

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-Bo Zhao

Jun., 2020

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：潘晓康

日期：2020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：潘晓康

日期：2020年5月

导师签名：赵洪

日期：2020年5月

中图分类号 TH273

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

无线网络化控制系统的预测事件触发设计与分析

Predictive Event-Triggered Control Design and Analysis for
Wireless Networked Control Systems

作者姓名 潘晓康

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: 2020 年 5 月 17 日

无线网络化控制系统的预测事件触发设计和分析

摘 要

无线通讯技术和嵌入式计算技术在近些年的高速发展使得传统控制系统中的有线通信逐步被无线通信所取代，形成了所谓的无线网络化控制系统。该类系统具有低成本、高灵活、易实施等优点，为各类新型智能系统如物联网、车联网、信息物理系统等提供了重要的理论基础模型，但同时无线通信所带来的不可靠无线链路、多用户接入调度、有限节点能量等问题也给无线网络化控制系统的设计和分析带来了全新的挑战，对其研究和分析具有较大的理论和应用价值。

本文针对无线网络化控制系统中的节点能量的有效利用和网络丢包问题展开研究。一方面，无线网络化控制系统的网络节点通常使用电池代替线缆供电，因此节点能量限制成为无线网络化控制系统的一个本质特点；另一方面，无线通信就通信质量而言相比较有线通信更为不可靠，更为严重的数据丢包是无线网络化控制系统设计中的一个重大挑战。面向上述问题，本文在节点能量和丢包限制下研究有效的控制策略和系统分析方法。主要工作如下：

1. 面向受扰的无线网络化控制系统，提出了一种基于状态反馈的预测事件触发控制，实现了网络丢包下系统性能和能耗消耗之间的平衡，方法在性能上拥有较强的鲁棒性。其中，特别设计的触发阈值能够保证传感器端状态估计和真实状态的差值始终小于某一边界；基于包的预测控制器能够动态补偿网络丢包，保证系统性能。为该方法下的控制系统建立闭环模型，并得到了系统最终一致有界的充分条件和对应控制器增益设计。

2. 面向状态不能直接测得的无线网络化控制系统，提出了基于观测的预测事件触发控制方法。在该方法中，基于状态观测的触发器能减少系统数据传输，而基于观测反馈的前向预测控制器能动态补偿控制信号丢失。并且，在该方法下得到的控制器增益和观测器增益在求解时是相互独立的，降低了计算时的复杂性。

关键词：无线网络化控制系统，事件触发，预测补偿，基于包的控制

Predictive Event-Triggered Control Design and Analysis for Wireless Networked Control Systems

ABSTRACT

In recent years, with the rapid development of wireless communication technology and embedded computing technology, the wired communication in traditional control system is gradually replaced by wireless communication, forming the so-named wireless networked control systems. This kind of systems has the advantages of low cost, high flexibility, easy implementation and so on. It provides an important theoretical basis model for all kinds of new intelligent systems such as Internet of things, Internet of vehicles, cyber physical systems and so on, and has great theoretical and application value for its research and analysis. In the meanwhile, however, the problems of unreliable wireless link, multi-applications access and limited node energy introduced by wireless network also bring new challenges to the design and analysis of wireless networked control systems.

This thesis mainly focuses on the efficient utilization of the node power and packet dropout problems in the wireless networked control systems. On the one hand, the network node of wireless networked control systems usually use batteries to take place cables for power supply. Hence, the node power constrain is an essential characteristic of wireless networked control systems. On the other hand, wireless communication is more unreliable than wired communication in terms of communication quality, and more fiercely packet dropout is a major challenge in the design of wireless networked control systems. For the above challenges, this thesis studies the effective control strategy and system analysis method under the limitations of node energy and packet dropout. The main work is as follows:

1. For disturbed wireless networked control systems, a state feedback based Predictive Event-Triggered control approach is proposed to achieve the balance between energy consumption and system performance under packet-dropout, also, it has strong robustness in performance. In this approach, the specially designed trigger threshold ensure that the difference between the state estimation and the current one can be bounded by a proper boundary at the sensor side. The packet-based predictive controller can compensate for packet loss actively, guaranteeing the system performance. The closed-loop model is established, and the sufficient condition for the system uniformly ultimate bounded is obtained with corresponding controller gain.

2. For the wireless networked control systems whose state cannot be measured directly, an observation-based predictive event trigger control approach is proposed. In this approach, the observation-based trigger is designed to reduce the data transmissions, and the observation-feedback-based forward prediction controller can compensate for the absence of control signal actively. Moreover, the controller gain and observer gain obtained by this method are independent of each other when solving, which reduces the complexity of calculation.

KEY WORDS: wireless networked control systems, event-triggered, predictive, packet-based control

目 录

| | |
|---------------------------------|-----|
| 摘 要 | I |
| ABSTRACT | III |
| 插图清单 | VII |
| 符号清单 | IX |
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.2 事件触发控制概述..... | 3 |
| 1.3 事件触发网络化控制系统研究现状..... | 6 |
| 1.4 研究内容..... | 9 |
| 第二章 受扰无线网络化控制系统预测事件触发方法 | 11 |
| 2.1 无线网络化控制系统的预测事件触发控制方法设计..... | 11 |
| 2.1.1 受扰无线网络化控制系统描述..... | 11 |
| 2.1.2 预测事件触发控制方法设计..... | 12 |
| 2.2 稳定性分析与控制器设计 | 15 |
| 2.2.1 稳定性分析..... | 16 |
| 2.2.2 控制器增益设计 | 18 |
| 2.3 数值仿真..... | 20 |
| 2.4 小结..... | 24 |
| 第三章 基于观测的无线网络控制系统预测事件触发方法..... | 26 |
| 3.1 问题描述..... | 26 |
| 3.2 基于观测的预测事件触发控制方法设计 | 28 |
| 3.2.1 基于观测的事件触发器设计..... | 28 |
| 3.2.2 前向预测控制器设计 | 29 |
| 3.2.3 闭环系统建模..... | 30 |
| 3.3 稳定性分析与增益设计 | 31 |
| 3.4 数值仿真..... | 33 |

| | |
|------------------------|----|
| 3.5 小结..... | 37 |
| 第四章 总结与展望..... | 39 |
| 4.1 总结..... | 39 |
| 4.2 展望..... | 39 |
| 参考文献 | 41 |
| 致 谢 | 45 |
| 作者简介 | 46 |
| 1 作者简历..... | 46 |
| 2 攻读硕士学位期间发表的学术论文..... | 46 |
| 3 参与的科研项目及获奖情况..... | 46 |
| 学位论文数据集..... | 47 |

插图清单

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 图 1-1 | 无线网络化控制系统框图..... | 1 |
| 图 1-2 | 事件触发网络化控制系统框图..... | 3 |
| 图 1-3 | 使用共享网络的无线网络化控制系统框架..... | 9 |
| 图 2-1 | 无线网络化控制系统框架图..... | 12 |
| 图 2-2 | 无线网络化控制系统预测事件触发控制框架描述..... | 12 |
| 图 2-3 | 系统状态对比图..... | 21 |
| 图 2-4 | 传感器传输间隔..... | 22 |
| 图 2-5 | 不同阈值调节参数下系统状态 x_1 的对比..... | 23 |
| 图 2-6 | 系统动态对比..... | 24 |
| 图 3-1 | 使用共享网络的无线网络化控制系统结构图..... | 27 |
| 图 3-2 | 基于观测的预测事件触发控制结构图..... | 28 |
| 图 3-3 | 系统控制量..... | 34 |
| 图 3-4 | 观测偏差值的范数..... | 34 |
| 图 3-5 | 基于观测的预测事件触发控制与本地 LRQ 控制的状态响应对比..... | 35 |
| 图 3-6 | 基于观测的预测事件触发与本地 LQR 的输出对比..... | 36 |
| 图 3-7 | 触发情况图..... | 36 |
| 图 3-8 | 不同阈值调节参数下的状态相应对比..... | 37 |

符号清单

| | | |
|------------------------------------|----|--|
| d_k | —— | k 时刻时, 控制系统已经遭受的环路连续丢包数 |
| d_{max} | —— | d_k 的上界, 满足 $d_k \leq d_{max}$ |
| h_k^s | —— | k 时刻时, 传感器连续不发送数据的步数 |
| h_k^{sa} | —— | k 时刻时, 执行器连续未接收到数据的步数 |
| h_{max} | —— | 传感器连续不发送的最长时间间隔 |
| \mathbb{R}^n | —— | n 维向量 |
| $\mathbb{R}^{n \times n}$ | —— | $n \times n$ 维矩阵 |
| $U(k)$ | —— | k 时刻的控制序列 |
| $\delta_s(k)$ | —— | 表示传感器在 k 时刻是否发送数据的事件函数 |
| $\delta_{sc}(k)$ | —— | 表示控制器在 k 时刻是否接收到数据的事件函数 |
| $\delta_{sa}(k)$ | —— | 表示执行器在 k 时刻是否接收到数据的事件函数 |
| λ | —— | 触发阈值 |
| σ | —— | $\sigma > 0$, 触发阈值的调节参数 |
| ω_{max} | —— | 系统外界扰动上界 |
| $\xi(P, \gamma^2, \omega_{max}^2)$ | —— | 凸集, $\xi(P, \gamma^2, \omega_{max}^2) = \{x \in \mathbb{R}^n x^T P x \leq \gamma^2 \omega_{max}^2\}$ |
| $\ \cdot\ $ | —— | 欧几里得范数 |

第一章 绪论

1.1 研究背景

网络化控制系统一般由空间分布的被控对象、传感器、控制器、执行器组成^[1-3]。在传感器和控制器之间、控制器和执行器之间，网络化控制系统用通讯网络代替传统的线缆来传递信息，从而构成闭环^[4-6]。近些年来，伴随着无线通讯技术的高速发展、传感器的智能化和嵌入式计算技术的进步，传统网络化控制系统中的有线通讯正逐步被无线通讯网络所取代，形成了新一代所谓的无线网络化控制系统^[7-10]，其结构框架如图 1-1 所示。无线通讯网络的使用使得在部署控制系统时各部件不再受到线缆的连接约束，进一步地提高控制系统的灵活性，大大节约了系统在线缆上成本支出，并为各类新型智能系统如物联网、车联网、信息物理系统等提供了重要的理论基础模型。许多无线网络化控制系统的实际应用可以在智能家居^[11]，车联网^[12]，可穿戴设备和工业 4.0^[13]等场景中看到。可以预见，无线网络化控制系统的理论研究将在在即将到来的下一个信息时代中充满意义且至关重要。

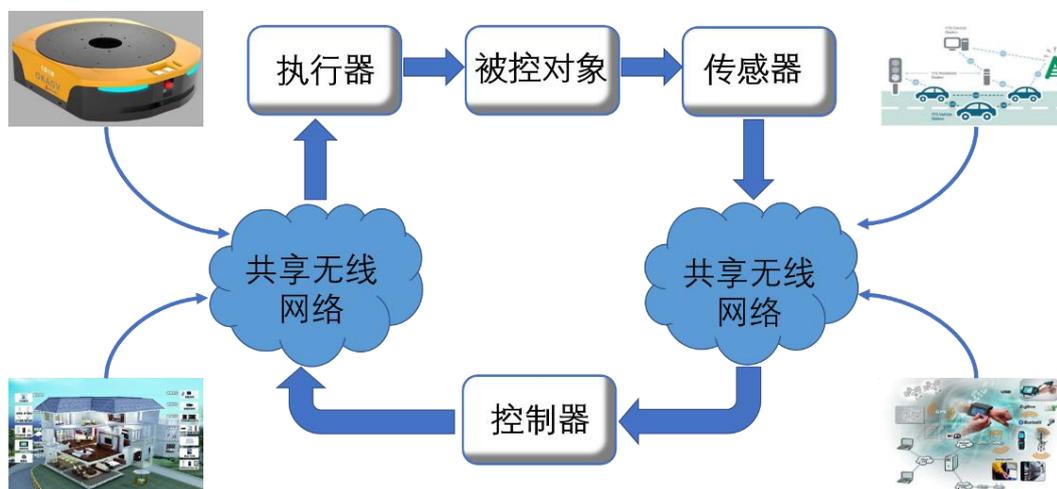


图 1-1 无线网络化控制系统框图

Figure 1-1. Structural block diagram of wireless networked control systems

无线网络化控制系统具有传统控制系统没有的优势，但无线网络的使用也会带来不可靠的无线链路、多用户情况下的网络接入调度和有限的节点能量等新的挑战^[3, 14, 15]。特别地，本文面向更为严重的网络丢包对和网络节点能量限制问题展开研究。

对无线网络化控制系统而言, 由于无线链路本身的不可靠性, 无线网络的数据包丢失对系统性能有着较大的影响^[16-18]。在无线通讯网络中, 用户在接入时存在相互之间的信道竞争, 而且数据包在传输时会受到信道衰减、多普勒频移和外界信号干扰的影响, 因此有线通讯网络相比, 数据包更容易因为传输失败而形成丢包^[19, 20]。虽然在无线网络化控制系统中, 传统网络化控制系统中的随机的数据包时延(破坏数据实时性)、数据包丢失(使得控制信号缺失)、数据包乱序(打乱数据接收顺序)等通讯限制依旧存在, 但控制数据的丢失将直接降低系统的控制性能, 甚至破坏系统稳定性, 因此在无线网络化控制系统中, 数据包丢失对系统的影响较大^[21]。另一方面, 有限节点能量的有效利用在无线网络化控制系统的设计中是一个重要问题^[13, 22, 23]。无线网络的使用能够解放线缆对控制系统的约束, 网络中的通讯节点通常会用电池代替传统线缆为器供电, 这也使得网络节点的能量变得有限。众所周知, 一般控制数据发送地越多, 系统得到的控制性能越好。但是一个贪婪的、未考虑资源有效利用的控制策略会占用过多的通讯资源, 加速节点能量的消耗, 直接影响网络内其他共享应用的使用, 提高系统的维护难度和成本。所以, 在无线网络化控制系统中通讯资源消耗和控制系统性能之间存在着一个权衡。另外, 无线网络中的丢包概率和节点能量也有一定的权衡。数据包成功传输概率的提高可以通过增大发射功率来实现, 但是从能量的角度来看, 无线网络的节点能量是有限的; 而且从信道角度看, 单纯提高发射功率还会增加对网络内其他应用的干扰, 影响其他应用的数据传输。因此, 无线网络化控制系统需要有一个高效的控制策略实现下节点能量消耗和控制系统性能之间的平衡^[24-26]。

迄今为止, 研究学者们针对这些挑战做了许多研究工作。在无线网络中, 节点主要的能量消耗来自于数据包的发送, 因此, 有的研究人员尝试从降低节点的总体发射功率的角度减少无线网络化控制系统的能量消耗^[27, 28]; 也有学者尝试能量调度方案和控制器的联合设计来应对节点能量受限和网络通讯限制问题^[29, 30]。特别的, 在系统采样间隔没有事先确定的情况下, 事件触发控制是用来减少系统信息传输次数的主要方法^[31-35]。事件触发的系统只有当预先设计的“事件”(例如系统的状态偏差大于某一阈值)发生时才会触发采样发送。一个精心设计的事件触发控制策略能够通过特别设计的触发器和控制器在保证系统的性能的同时减少发送次数, 从而达到减少通讯资源消耗的目的。但另一方面, 由于发送数据的减少, 事件触发系统的性能更容易受到网络丢包的影响。目前, 许多学者面向受通讯限制的事件触发网络化控制系统展开研究, 但能够充分利用通讯网络特性的文献不在多数^[22, 36-38]。因此, 针对节点能量受限和受网络丢包影响的无线网络化控制系统, 该如何利用网络特性设计一个高效的事件触发控制方法, 实现能量消耗和系统性能之间的平衡? 这具有一定的研究意义和实际价值。

1.2 事件触发控制概述

事件触发控制最早由 Åström 提出，并在文献中介绍了事件触发采样（或者说 Lebesgue 采样）^[32]。如图 1-2 所示，事件触发的控制系统一般含有两个部件，即一个特别设计的用来决定信息是否要发送的事件触发器，和一个生成控制信号的控制器，而触发机制的设计能够直接影响系统信息的传输次数，从而影响系统整体性能。下面介绍几种典型的事件触发机制。

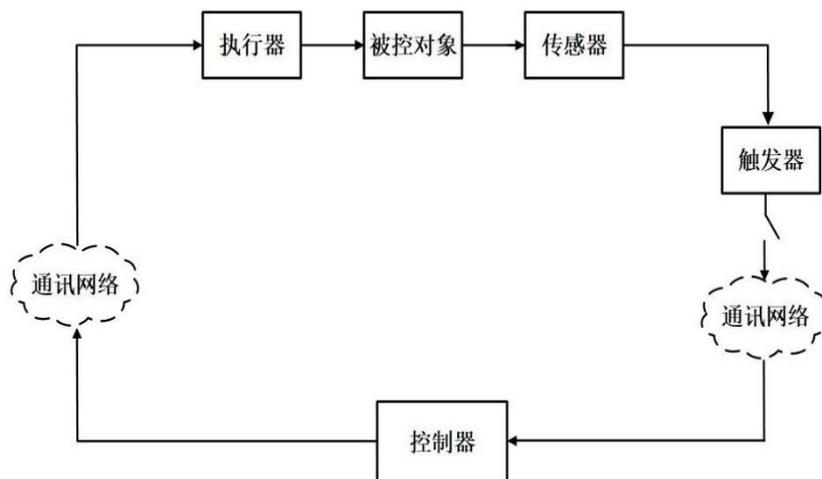


图 1-2 事件触发网络化控制系统框图

Figure 1-2. Block diagram of event-triggered networked control systems

(1) 连续事件触发

系统数据被连续传递至事件触发器，触发器通过事先设计的触发条件来判断是否需要发送数据。在此类方法中，需要额外硬件支持对系统状态进行连续采样。假设系统的状态量 $x(t)$ 是可获得的，其中一种传统的事件触发机制的目标是为了在系统运行过程中，满足以下不等式条件（即事件触发器）^[39]：

$$\|x(t) - x(t_k)\| \leq \delta \quad (1-1)$$

其中， $\delta > 0$ 是可调节的触发阈值， $t_k \leq t$ 满足 $\|x(t_k) - x(t_{k-1})\| > \delta$ ，表示最近一次触发发送的时刻。下一个事件触发时刻可以表示为：

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid \|x(t) - x(t_k)\| > \delta\} \quad (1-2)$$

因为传感器采样都是连续的，在实际部署时需要额外的硬件来实现对连续的系统状态 $x(t)$ 的获取。

(2) 离散事件触发

在离散事件触发中，触发器每隔一个事先确定的时间周期进行判断是否发送信息。通常事件触发的判断周期等同于传感器的采样周期，因此离散事件触发和连续触发相比，它不需要额外的硬件去支持连续采样。其中一种典型的离散触发机制的形式如下^[37]：

$$e^T(i_k h) \Phi e(i_k h) \leq \delta x^T(t_k h) \Phi x(t_k h) \quad (1-3)$$

其中 Φ 是可调节的权重矩阵, $\delta > 0$ 是可调节参数, h 是传感器的采样时间间隔, $i_k h = t_k h + l h$, $l \in N$, $t_k h$ 是数据成功发送的时刻, t_k 满足 $t_k \in \{0, t_1, t_2, \dots\} \subset N$, $e(i_k h) = x(i_k h) - x(t_k h)$ 是采样得到的状态和最近一次被发送的状态之差。下一个触发时刻可以被定义为:

$$t_{k+1} h = t_k h + \min_l \{l h \mid e^T(i_k h) \Phi e(i_k h) > \delta x^T(t_k h) \Phi x(t_k h)\} \quad (1-4)$$

可以看到, 系统触发的间隔一般会随着阈值 δ 的减小而变短。特别地, 当 $\delta = 0$ 时, 触发器将一直触发, 此时事件触发将等同于周期触发。

(3) 动态事件触发

在上述提到的触发器 (1-1), (1-3) 中, 可调节参数 δ 的选取能够直接影响触发阈值, 从而影响系统性能。但 δ 的选取通常缺少显式的理论指导依据, 对于具体的不同系统, 可能需要不断尝试 δ 的取值以选取一个较为合适的值, 因此这类方法存在一定的特殊性和局限性。为了减少阈值参数 δ 不恰当选取带来的控制系统设计上的保守性, 研究人员提出了阈值参数随系统状态动态变化的动态事件触发, 具体形式如下^[40]:

$$\dot{\eta} = -\beta(\eta) + \sigma\alpha(\|x\|) - \gamma(\|e\|), \quad \eta(0) = \eta_0 \quad (1-5)$$

其中局部李普希兹连续的 K_∞ 函数 β , 实数 $\sigma \in (0, 1)$, $\eta_0 \in \mathbb{R}^+$ 是提前选定的参数。系统的触发时刻定义为:

$$t_0 = 0,$$

$$t_{i+1} = \inf\{t \in \mathbb{R} \mid t > t_i \wedge \eta(t) + \theta(\sigma\alpha(\|x(t)\|) - \gamma(\|e(t^-)\|)) \leq 0\} \quad (1-6)$$

其中 $\theta > 0$ 是调节参数。以上(1-5)的设计确保了(1-6)的触发阈值 $\eta(t)$ 随系统运行动态变化, 减少了确定阈值参数选取带来的保守性。除此之外, 还有类似的动态事件触发机制被研究发掘^[41]。

(4) 李雅普诺夫触发

上述提到的三种触发机制均采用状态量的差值作为触发条件的依据, 不同于以上机制, 李雅普诺夫触发以系统李雅普诺夫函数值作为触发条件。在系统运行过程中, 状态量的差值可以用来反映系统运行情况, 进而作为触发器的设计依据, 即公式(1-1)、(1-3)、(1-6)。实际上李雅普诺夫函数的值也可以反映系统的动态情况。由此, 一种基于李雅普诺夫函数值的事件触发机制被提出^[42]。定义 $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 为李雅普诺夫函数, 定义系统的采样时刻的集合由以下触发机制决定:

$$V(x(t_i + 1)) = \eta V(x(t_i)), \quad \eta \in \mathbb{R}^+ \quad (1-7)$$

其中 η 是事先设计大于 0 的正数。根据(1-7), 一个小的 η 对应着一个大的采样间隔。事实上, 一个小的 η 意味着对系统运行保持乐观态度, 下一个采样时刻会在一个较大的时间间隔之后发生。

(5) 自触发

在事件触发机制中，需要硬件（一般是传感器）去监听系统运行过程中是否激活了触发条件，这会持续消耗一定的能量。而在无线网络化控制系统中，网络能量是有限的，额外的监听开销将加大能量的开销，增加系统运行成本。为此，一种主动预测的自触发（self-triggered）机制被提出^[43]。自触发机制会根据系统的模型去预测下一个有必要进行触发的时刻，是事件触发的一种系统自我预测。典型的事件触发形式如下：

$$t_{k+1} = t_k + \beta(t_k) \quad (1-8)$$

其中 $\beta(t_k)$ 是关于系统 t_k 时刻状态的函数。函数 $\beta(t_k)$ 的求取和系统模型有关。

Tiberi 在他的研究中，通过基于系统模型的方法并使用比较引理（Comparison Lemma）求得该函数^[22]，

$$\beta(t_k) = \min\left(\gamma\left(x_{k-1}, x_k, \hat{d}_{k-1}, \hat{d}_k, \tau_k\right), h_{max}\right) \quad (1-9)$$

其中 γ 是关于 k 时刻和 $k - 1$ 时刻系统状态 (x_k, x_{k-1}) ，扰动 $(\hat{d}_{k-1}, \hat{d}_k)$ 和 k 时刻时延 τ_k 的函数。 h_{max} 是事先设计的最大允许传输间隔，即满足 $t_{k+1} - t_k \leq h_{max}$ 。自触发不需要像上述的事件触发机制那样去监听系统的状态、判断触发条件是否被触发，因此它能够节约相当一部分的系统部署开销。但相对的，自触发一般需要一个相对比较精确的系统动态模型，并且对系统的外界扰动更加敏感。因此，它们之间各有优势。

(6) 事件触发与周期触发的比较

在一般情况下，控制系统发送的数据越多，系统的动态性能越好，因此周期触发系统会比事件触发系统有着更好的性能表现。但在网络化控制的背景下，情况出现了一些反转。在当前的关于事件触发网络化控制系统的研究中，一些学者通过实验仿真验证，事件触发能够通过减少数据传输次数的方式减轻网络负载，从而减少数据传输中的冲突，提升系统性能^[10, 44]。然而，这些研究均是在网络负载较少（往往是网络中仅有一个控制回路、或者少量控制回路共享使用统一网络）的情况下进行的。当网络中回路较多时，出现了不一样的情况：在一个使用纯 ALOHA 协议的网络化控制系统中，当大量被控对象连入网络中的情况下，研究人员比较了事件触发和周期触发两种不同机制下，控制系统的性能^[45]。作者指出，当事件触发系统的触发条件得到满足发送数据时，如果此时的控制数据因为网络冲突而传输失败，那么控制系统的性能将受到很大的影响。分析结果表明，在这种相同系统设置中，基于周期触发的系统性能要优于基于事件触发的系统性能。但需要指出的是，作为较早的网络协议，纯 ALOHA 协议存在相当大的不可靠性，若将该网络协议替换为一个现今更加可靠的网络协议，如 IEEE 802.15.4，可能会出现不同的结果。因此，事件触发和周

期触发孰优孰劣难以有一个统一的答案，需要在具体网络设置以及具体的网络负载情况下进行讨论和分析。

1.3 事件触发网络化控制系统研究现状

在使用共享网络通讯的网络化控制系统中，网络信道数量本是有限的，过多地占用通讯资源会引发网络冲突影响其他应用的正常使用。因此设计时需要在资源消耗和系统性能中寻找平衡。而事件触发控制具有在保障系统性能的同时减少信息发送，减轻网络中的冲突的作用，这恰好匹配了网络化控制系统的设计需求，也使得这两个领域结合成为了近年来的研究热点。然而事件触发有着非周期性的特点，这给系统的建模，稳定性分析增加了难度。另外，时变的网络诱导时延，丢包，乱序等网络通讯限制进一步增加了研究的难度。为了应对这些问题挑战，研究人员做了许多方面的研究。

(1) 事件触发本身的研究

事件触发机制本身的设计对系统有很大的影响，因此，有一部分研究将注意力集中在事件触发本身，为了简化理论分析，他们假设网络信道状况是理想的。这其中，以 Heemels 和 Donkers 为代表的学者们分别采用脉冲系统，分段系统，摄动系统三种建模方式将事件触发这一非周期性的特点纳入系统建模之中^[46]。基于以上的理论成果，他们对线性系统的周期事件触发（Periodic Event-Triggered）控制进行了数学上的研究分析，并利用分段系统和摄动系统方法为系统的稳定性提供了证明^[47]。

在事件触发系统有界性的研究方面，Wu 等人针对在有界扰动下的离散线性系统，设计了基于线性矩阵不等式求解的控制器以保证系统的状态始终位于一个事先定义的有限集内^[48]。在现实中，系统反馈可能是基于输出的。针对这类系统，一种输出反馈和事件触发联合设计的方法被提出并应用于线性系统。在研究分析中，该方法确保了系统的渐进稳定，并可以证明存在一个严格大于 0 的最小传输间隔，有效避免了触发器当系统状态达到平衡点时持续触发的问题^[49]。

正如前文 1.2 节所提到的“触发器的选择能直接影响系统的控制效果”，但触发器阈值参数的选取并没有显式的理论指导，触发器参数的选择存在一定的随机性和局限性，所以在事件触发系统中采用单一触发器可能会显得保守。由此，有学者将两种触发机制结合到一个触发器中，触发器根据控制器控制信号的大小在两种事件触发通讯之间进行切换选择。同时，作者为该触发机制特别设计了自适应控制器，该方法能够有效地在减少了发送次数的同时保证了系统性能^[50]。

(2) 通讯限制下的事件触发控制

在网络化控制系统中，时延和丢包是影响系统性能的重要因素。在网络化控制的背景下，事件触发机制的优点是能够减少系统数据的发送，减少有限的共享网络资源的消耗。但事物总是有两面的，因为数据的减少，网络时延和丢包对它的影响相较于周期触发也更加严重。因此，在事件触发机制与网络化控制相结合的研究中，如何应对通讯限制、保证系统性能成为了研究热点。这其中，时延系统理论方法能够在统一框架下综合地处理事件触发非周期采样、网络时延和丢包，得到了广泛使用^[37, 51, 52]。例如，当离散事件触发下执行器端采用零阶保持器（ZOH）时，被控对象可以通过以下式子描述，

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_\omega \omega(t) \\ z(t) = Cx(t) + Du(t) \\ u(t) = Kx(t_k h), \quad t \in [t_k h + \tau_{t_k}, t_{k+1} h + \tau_{t_{k+1}}) \end{cases} \quad (1-10)$$

其中， τ_{t_k} 表示 t_k 时刻的网络的传输时延。通过对时间的切片划分，令时间集合 $\Omega_l = [i_k h + \tau_{i_k}, i_k h + h + \tau_{i_{k+1}})$ ，定义符号： $\eta(t) := t - i_k h$ ，控制量，控制量 $u(t)$ 可以写为：

$$u(t) = K \left(x(t - \eta(t)) - e(i_k h) \right), \quad t \in \Omega_l \quad (1-11)$$

这样，结合(1-10)，(1-11)，闭环系统可以写为：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BK \left(x(t - \eta(t)) - e(i_k h) \right) + B_\omega \omega(t) \\ z(t) = Cx(t) + DK \left(x(t - \eta(t)) - e(i_k h) \right) \end{cases} \quad (1-12)$$

其中其他符号的定义可以参见公式(1-3)。通过这样的转换，为系统建立系统闭环模型，然后利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法对系统进行稳定性分析，进而能得到控制器增益的具体设计。

除时延系统之外，其他方法也广泛应用于网络限制下事件触发网络化控制系统的设计。其中，切换系统是一种有效的方法。针对网络中的数据包丢失，Wu 等人进一步丢包的的网络环境下，研究了一种特殊的基于李雅普诺夫的事件触发控制设计。通过为正常传输和丢包情况下的系统建立模型，闭环系统可以以切换系统的方式进行建模，在丢包和正常传输两个模型之间切换运行。在理论分析中通过引入切换系统平均逗留时间（dwell-time）概念，为传输间隔方面提供了充分的条件，保证了在存在传输中断的情况下闭环系统的稳定性^[53]。分布式系统中，在时延和丢包同时存在的网络环境下，Wang 和 Lemmon 对基于事件触发的分布式网络化控制系统做了研究^[38]。在设计的事件触发控制方案中，子系统能够使用其本地采样数据进行广播决策。它还可以局部预测最大允许连续丢包数和传输延迟基于状态的截止时间（state-based deadline for transmission, SDT）。分析中表明，若连续丢包数小于最大允许连续丢包数且传输时延为 0（即仅有丢包的情况下），整体系统是 Lp 稳定的；当网络诱导时延小于 SDT 时，系统是渐进稳定的。另外，有研究人员将基于包的控制与事件触发结合

^[54]。在该控制框架中，模型预测控制器会生成一系列预测控制量并打包成前向控制序列。当前后两个时刻的控制量偏差大于触发阈值时，控制器发送前向控制序列。该方案在保持系统性能良好的同时，减少了控制系统对通讯资源的使用。

(3) 触发控制和网络的联合设计。

网络化控制系统同时涉及通讯领域和控制领域，因此系统设计能从两个方面进行：一部分是控制方面，一部分是网络部分。在之前所提及的研究中，有的假设网络情况是理想的，抑或是对针对网络通讯限制设计事件触发控制保证系统性能，对通讯网络本身特点的抽象并不充分。出于以上原因，有学者对网络和触发控制两部分进行联合设计。其中，针对有损网络，一种事件触发算法被设置在控制器端^[55]。作者通过将数据包重传的通信模型与闭环性能分析模型相结合，提出了一个理论框架来权衡通讯成本与控制性能，并用此框架来调整触发阈值以获得更好的系统性能。有学者对多个控制回路共享使用同一个通讯网络情况下的事件触发数据调度问题进行了研究，一种同时包含确定性和概率的调度策略被提出^[56]。它的基本思想是，当偏差低于触发阈值时，该策略确定性地拒绝发送请求，并将此时网络访问权以概率方式授予网络中其余控制回路的传输请求。数值结果表明，与周期调度和纯随机调度策略相比，该系统在性能方面有明显的提高。

Tirebi 研究了使用 IEEE 802.15.4 无线网络协议的自触发控制系统，提出的控制方法能够确保系统的全局一致最终有界^[22]。并且，作者在设计的自触发机制的基础上进一步推导，得到了 IEEE 802.15.4 的网络参数 SO_k , BO_{k+1} 的显式表达和 GTS 的调度方法，实现了控制和网络参数的联合设计。在这基础上，有研究人员对该策略进行了改进。自触发是根据模型进行的预测，相较于事件触发可以节约监听成本，但却更易受外界扰动、网络时变时延和丢包的影响。由此，Peng 等人将自触发和事件触发两种机制进行了结合^[36]。其思路是在控制器接收到传感信息时利用相对保守的自触发预测下一次触发时刻。当来到这个时刻之后，启动事件触发器启动监听。与典型的事件触发采样相比，传感器不需要对系统进行持续监听；与纯自触发采样相比，由于事件触发的使用提高了系统的抗扰动能力，减少了保守性。

另外，Baumann 将深度强化学习与事件触发控制相结合，提出了基于深度强化学习的事件触发控制^[57]。传统的事件触发控制的设计依赖于系统的动态模型，通常线性系统的方案不能直接用于非线性的情况下。在该研究中，作者将系统状态和通讯决策（发送或者不发送）作为单步单价函数的组成部分，利用端到端的深度强化学习方法直接学习控制系统下一时刻的控制输入和通讯决策，摆脱了控制方法设计对系统模型的依赖，可以直接在线性和非线性系统中直接使用。

1.4 研究内容

面向如图 1-3 所示的使用共享网络的无线网络化控制系统，本文将研究的注意力集中在高效的事件触发控制方案的设计上，提出了预测事件触发控制方法，实现了有限的节点能量和系统性能之间的平衡。

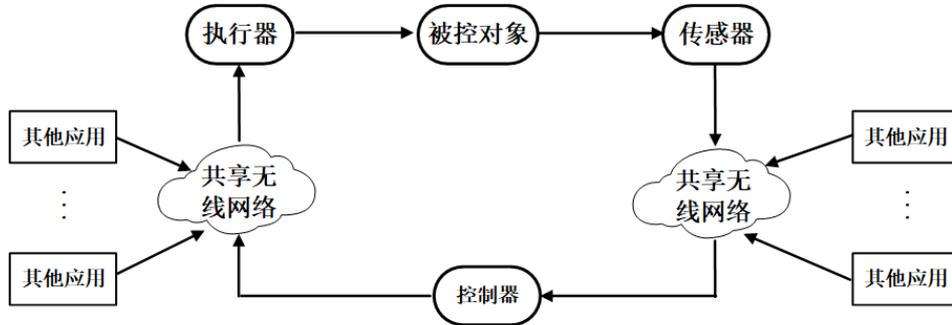


图 1-3 使用共享网络的无线网络化控制系统框架

Figure 1-3. Illustrating wireless networked control systems with shared network

预测事件触发控制方法利用了网络中数据基于数据包传输的特点以及状态量的前向预测，能够在保证系统性能的同时减少发送次数。在传感器端，事件触发器被设置来决定状态量是否被发送，以此减少数据传输次数。每当控制器收到传感数据后就生成一系列的未來控制量，打包发送给执行器。执行器根据数据包内的时间戳选取合适的预测控制量作用于被控对象。在先前的研究中，当执行器在 k 时刻没有收到实时的控制信号 u_k ，即触发器未触发或在数据传输失败时，执行器端多采用零阶保持策略 ($u_k = u_{k-1}$) 或者置零控制 ($u_k = 0$)。这样系统的实际上并没有充分利用网络的特征，尤其是一些可以利于控制系统的特征，设计存在一定的保守性。而本文提出的方法能够主动补偿网络丢包，减少了控制方案设计的保守性。本文主要的研究内容包括：

第一章是绪论部分，介绍了该课题的研究背景和意义并简要概括了国内外关于事件触发机制与事件触发网络化控制系统的研究现状，并对本文研究的预测事件触发控制方法做了简要的描述。

第二章针对状态可测和受扰的无线网络化控制系统，设计基于状态反馈的预测事件触发方法。通过基于状态估计的触发器和采用基于包的控制的预测控制器设计，该方法能动态地补偿数据包丢失并减少数据的传输。此外，一种新的触发阈值设计保障了状态估计和真实状态的偏差始终能小于某一边界。仿真结果显示，该方法比传统事件触发机制更加鲁棒。

第三章针对状态不可直接测得的无线网络化控制系统，提出了基于状态观测的预测事件触发控制方法。通过状态观测器的使用，将原有方法进行扩展，适用于状态观测反馈的系统。这一方法通过基于观测的触发器的设计减少了数据的传输，通过前向预测控制器的设计补偿了数据包丢失，保证了性能。同

时，在这一方法下，控制器增益和观测器增益能单独求解，减少了计算复杂度。

最后，第四章总结了全文的研究工作，并对能量优化、强化学习与事件触发无线网络化控制系统相结合方面的研究做出了展望。

第二章 受扰无线网络化控制系统预测事件触发方法

本章针对使用共享网络的受扰无线网络化控制系统，提出了一种基于状态反馈的预测事件触发方法。从先前的研究看，在现有的事件触发控制方法中，有的没有充分考虑网络传输特性和通讯约束，使得系统设计存在一定保守性；有的则缺乏考虑外部干扰。这两个因素对无线网络化控制系统设计和分析至关重要。针对这一问题，本章研究了具有外部干扰的网络控制系统，提出了基于状态反馈的预测事件触发框架来平衡系统性能和网络节点能量使用。这种方法结合了传感器端的动态依赖的、基于模型的事件触发机制来减少数据传输，以及基于包的控制器来获得更好的控制性能^[58]。特别设计的触发阈值能够使状态估计和实际状态之差保持在适当的边界下。在上述框架下对系统进行分析，得到了系统在外界干扰下一致最终有界的一个充分条件。该方法考虑了外部干扰，具有较强的鲁棒性。

2.1 无线网络化控制系统的预测事件触发控制方法设计

本节首先对感兴趣的研究问题进行描述，之后再详细介绍提出的基于状态反馈的预测事件触发控制方法。

2.1.1 受扰无线网络化控制系统描述

本章考虑的无线网络化控制系统总体结构如图 2-1 所示，其中传感数据通过反馈信道传输（从传感器到控制器的信道），控制数据通过前向信道传输（从控制器到执行器），两条信道都是共享使用的，即除了控制系统之外，还会有其他用户连入网络，与控制系统竞争使用有限的通讯资源。反馈信道和前向信道可能是同一个无线通讯网络，但因为两条信道通常来说不会直接竞争，所以假设他们之间是独立的。同时，对于无线通讯网络来说其规模一般不会太大，数据包时延通常可以被忽略，而主要问题是信道竞争和信道衰减产生的数据包丢失问题。另外，处于控制系统数据实时性的要求，对丢失的控制系统数据不进行重传。

考虑如下的受外界扰动的离散被控对象，

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

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 分别是系统状态和系统的控制输入。 A ， B ， E 是对应适应维度的常数系统矩阵，扰动向量 $\omega(k) \in \mathbb{R}^q$ 满足有界性，即

$$\|\omega(k)\| = \sqrt{\omega(k)^T \omega(k)} \leq \omega_{max} \quad (2-2)$$

令 $d_{sc,k}$ 、 $d_{ca,k}$ 分别表示传感器侧、控制器侧在 k 时刻已经连续丢失的数据包数量，那么令 $d_k := d_{ca,k} + d_{sc,k}$ 表示整个控制回路在 k 时刻已经连续丢失的数据包数量。若连续丢失的数据过大（极端地考虑无穷），将导致控制系统开环，所以假设 d_k 存在一个某一上界 d_{max} ，即

$$d_k \leq d_{max}, \quad \forall k \quad (2-3)$$

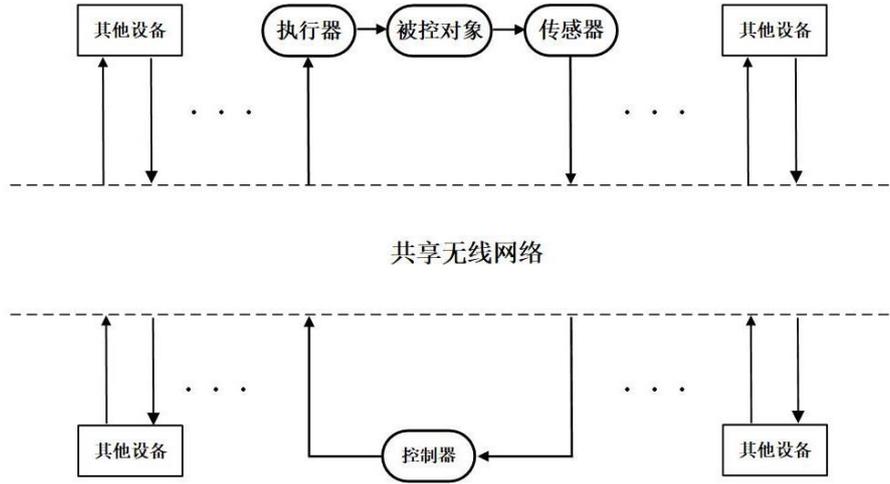


图 2-1 无线网络化控制系统框架图

Figure 2-1. The frame of wireless networked control systems

针对图 2-1 所示的无线网络化控制系统和被控对象(2-1)，本章的目的是在网络节点能量共享且有限的情况下，设计高效的控制方法去处理网络丢包，保障控制系统性能。而这一目的是通过使用在下一小节中详细介绍的预测事件触发控制实现的。

2.1.2 预测事件触发控制方法设计

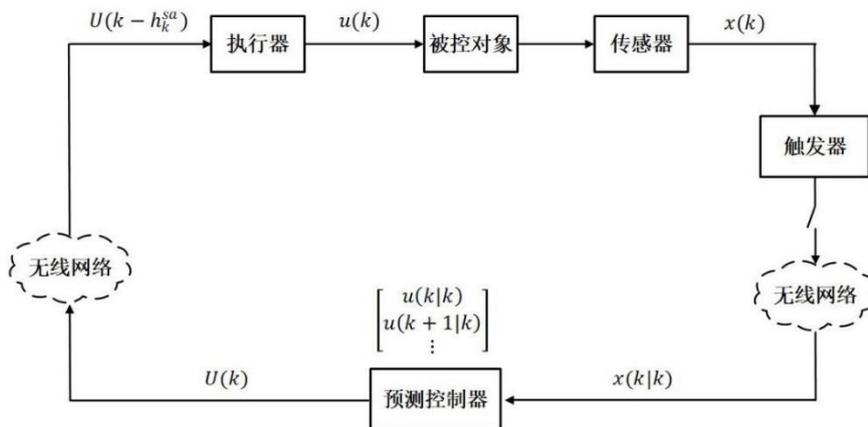


图 2-2 无线网络化控制系统预测事件触发控制框架描述

Figure 2-2 Illustrating the predictive event-triggered control frame for wireless networked control systems

本章提出的预测事件触发控制框架如图 2-2 所示。不同于传统的控制方法，预测事件触发控制框架特别在传感器端设计了一个事件触发器来决定实时的传感数据是否要发送，以此来减少控制系统数据的总体传输次数。然后，每当预测控制器收到传感数据之后生成一系列未来控制量并发送给执行器，执行器在每个执行时刻选取恰当的控制量作用于被控对象。这样，在减少数据传输的同时，又能主动地补偿实时控制数据因为触发器未发送，或者传输失败而出现的丢失。

用事件函数 $\delta_s(k)$ 表示事件触发器是否允许发送实时的系统状态 $x(k)$ ，即当 $x(k)$ 被发送时， $\delta_s(k) = 1$ ；否则， $\delta_s(k) = 0$ 。在预测事件触发控制中， $\delta_s(k)$ 由以下式子定义：

$$\delta_s(k) = \begin{cases} 1, & \|e(k)\| > \lambda \text{ 或者 } h_k^s \geq h_{max} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2-4)$$

其中 $e(k) := \hat{x}(k) - x(k)$ 代表估计偏差， $\hat{x}(k)$ 是实时状态 $x(k)$ 的估计，通过以下式子产生，令 $\hat{x}(0) = x_0$ ，

$$\hat{x}(k+1) = \delta(k)(A+BK)x(k) + (1-\delta(k))(A+BK)\hat{x}(k) \quad (2-5)$$

其中的函数 $\delta(k)$ 将在后边的公式中描述。 λ 是触发器的触发阈值，它的定义如下所示：

$$\lambda = \frac{\sigma\omega_{max} - \sqrt{d_{max}}\|\Phi_{d_{max}}\tilde{E}\|\omega_{max}}{\|A^{d_{max}}\|} \quad (2-6)$$

其中 σ 是一个大于 0 设计的调节参数， $\tilde{E} := \text{diag}(E, E, \dots, E)$ 是对角线上元素都是 E 的对角矩阵， $\Phi_{d_{max}}$ 是由矩阵 A 组成的，满足 $\Phi_{d_{max}} := [A^{d_{max}-1}, \dots, A, I]$ 。 h_{max} 是提前设计的正整数，表示触发器最大允许的连续未触发发送的次数。同时定义 h_k^s 表示在 k 时刻之前，触发器连续未触发发送的次数，即满足

$$h_k^s = k - k^s \quad (2-7)$$

其中， $k^s \leq k$ 表示离 k 时刻最近一次触发的时刻，满足 $\delta_s(i) = 0, \forall k^s < i < k$ ， $\delta_s(k^s) = 1$ ，同时 $\delta_s(0) = 1$ 。以上一系列的描述可以总结为，事件触发器主要使用实时状态和状态估计的差值作为触发条件，但是如果连续未触发的此处达到了正数 h_{max} ，那么即使下一时刻的估计偏差没有达到触发阈值传感器数据将被触发器强制发送以更新控制器端的数据。

定义如下的事件函数 $\delta_{sc}(k)$ 表示 $x(k)$ （如果 $x(k)$ 被触发器允许发送， $\delta_s(k) = 1$ ）是否有因为网络丢包而丢失，即

$$\delta_{sc}(k) = \begin{cases} 1, & x(k) \text{ 被控制器收到} \\ 0, & x(k) \text{ 丢失} \end{cases} \quad (2-8)$$

当预测控制器收到最新的系统状态 $x(k)$ ，它产生一组由前向预测控制量组成的控制序列，表示为 $U(k)$ ，并将该组控制序列发送给执行器。若预测控制器没有收到来传感数据，那么保持静默什么都不做，即

$$U(k) = \begin{cases} [u(k|k), \dots, u(k + d_{max}h_{max}|k)], & \delta_s(k)\delta_{sc}(k) = 1 \\ \emptyset, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-9)$$

其中前向控制信号 $u(k + i|k)$ 用以下式子表示，

$$u(k + i|k) = Kx(k + i|k) \quad (2-10)$$

其中 $x(k + i|k)$ 是基于 $x(k)$ 的未来预测状态量，由以下式子产生，

$$x(k + i|k) = \begin{cases} (A + BK)x(k + i - 1|k), & 0 < i < d_{max}h_{max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-11)$$

在执行器端，执行器遵循基于包的控制原则，即它只存储最新的控制序列。并且，在每个执行时刻，执行器根据数据包的时间戳从控制序列中选取对应的控制信号来确保可以补偿丢包。

定义如下的事件函数 $\delta_{ca}(k)$ 来表示控制序列 $U(k)$ 是否被执行器收到，即

$$\delta_{ca}(k) = \begin{cases} 1, & U(k) \text{ 被执行器收到} \\ 0, & U(k) \text{ 丢失} \end{cases} \quad (2-12)$$

定义 h_k^{sa} 表示在 k 时刻之前连续的 i 时刻之和，使得 $\delta(i) = 0$ ，即

$$h_k^{sa} = k - k^{sa} \quad (2-13)$$

其中 $\delta(k) := \delta_s(k)\delta_{sc}(k)\delta_{ca}(k)$ 。 $k^{sa} < k$ ，是执行器最近一次收到控制序列的时刻，满足 $\delta(i) = 0, \forall k^{sa} \leq i < k, \delta(k^{sa}) = 1$ 。

根据之前的设计，执行器端在 k 时刻存储的控制序列是 $U(k - h_k^{sa})$ ，因此实际作用在被控对象上的控制信号为

$$u(k) = u(k|k - h_k^{sa}) = Kx(k|k - h_k^{sa}) \quad (2-14)$$

根据假设 $d_k \leq d_{max}$ 和提前设计的 h_{max} ，执行器在 $d_{max}h_{max} + 1$ 个时间间隔内至少能够收到一个控制序列。注意的是控制序列 $U(k)$ 的设计可以保证执行器在任意时刻都能够有合适控制信号。在实际中，网络丢包具有随机性， d_{max} 的精确值可能难以获得。为此，可以先对网络进行测量，得到一个 d_{max} 的测量值。在设计确定控制序列 U 的长度时，可以选取一个比 d_{max} 的测量值大的保守值带入计算。这样能够保证执行器端每时每刻都有合适的预测控制信号。实际上，单一的控制信号所占位数不大，所以适当地使 U 有一定冗余在实际中是可行的。

可以注意到和传统的事件触发控制策略相比，通过吸收结合基于包的控制方法和事件触发的优点，预测事件触发方法的保守性更小。实际上，对传统的事件触发控制来说，当实时的控制信号缺失时常采用零阶保持器（ $u(k) = u(k - 1)$ ）或者置零控制（ $u(k) = 0$ ），没有充分利用网络特性，特别是一些对控制系统有利的网络特性。而基于包的控制策略的使用，预测控制器会将控制序列打包发送给执行器。当执行器在 k 时刻没有收到数据时，预测控制量会被使用去补偿实时数据的缺失，执行器也会一直有合适的控制输入。因此，在该方法下可以期望一个更好的控制性能。同时，因为预测事件触发方法特别考虑

了扰动，会更加的鲁棒。保证系统一致最终有界的充分条件和控制器设计将在 2.2 节中给出。

下面的引理将表明根据式子(2-6)中 λ 的设计， $e(k)$ 存在上界 $\sigma\omega_{max}$ 。

引理 2-1 对于给定的正常数 $\sigma > 0$ ， λ 设计满足(2-6)，那么 $e(k)$ 满足

$$\|e(k)\| \leq \sigma\omega_{max}, \quad \forall k \quad (2-15)$$

证明. 首先假设 k 时刻 $\delta_s(k) = 1$ ， $\delta_{sc}(k)\delta_{ca}(k) = 0$ ，并且 k 时刻之后又 d 步连续丢包，即 $\delta_{sc}(k+1)\delta_{ca}(k+1) = \dots = \delta_{sc}(k+d)\delta_{ca}(k+d) = 0$ 。根据式子(2-11)和(2-5)，当 $\delta_{sc}(k)\delta_{ca}(k) = 0$ 时 $x(k|k-h_k^{sa})$ 和 $\hat{x}(k)$ 有相同的值。将这个特征与 $e(k)$ 的定义相结合，有

$$e(k+1) = (1 - \delta(k))Ae(k) - E\omega(k) \quad (2-16)$$

然后有

$$e(k+d) = (1 - \delta(k))^d A^d e(k) - \Phi_d \tilde{E} W_d \quad (2-17)$$

其中 $W_d = [\omega(k)^T, \omega(k+1)^T, \dots, \omega(k+d-1)^T]^T$ 。根据(2-17)， $1 - \delta(k) \leq 1$ ，有

$$\|e(k+d)\| = \|A^d\| \|e(k)\| + \|\Phi_d \tilde{E} W_d\| \quad (2-18)$$

注意到使用矩阵放缩可以得到， $\|\Phi_d \tilde{E} W_d\| \leq \sqrt{d} \|\Phi_d \tilde{E}\| \omega_{max}$ 。

再令 $\|A^d\| \|e(k)\| + \|\Phi_d \tilde{E} W_d\| \leq \|A^d\| \|e(k)\| + \sqrt{d} \|\Phi_d \tilde{E}\| \omega_{max} \leq \sigma\omega_{max}$ ，

若 $\|e(k)\|$ 满足

$$\|e(k)\| \leq \frac{\sigma\omega_{max} - \sqrt{d} \|\Phi_d \tilde{E}\| \omega_{max}}{\|A^d\|} \quad (2-19)$$

那么 $\|e(k+d)\| \leq \sigma\omega_{max}$ 。现在考虑最差的情况，触发器在 k 时刻发送了 $x(k)$ ，但却从 k 时刻开始遭受了 d_{max} 步连续丢包，那么可以得到

$$e(k) \leq \frac{\sigma\omega_{max} - \sqrt{d_{max}} \|\Phi_{d_{max}} \tilde{E}\| \omega_{max}}{\|A^{d_{max}}\|} \quad (2-20)$$

这表明如果触发阈值 λ 满足(2-6)，那么对任意的 k 有 $\|e(k)\| \leq \sigma\omega_{max}$ 成立。

证明完毕。 \square

从引理 2-1 中可以注意到，触发阈值 λ 的大小主要由 ω_{max} 和 d_{max} 。事实上， $e(k)$ 值的大小反映了外界扰动和网络丢包对系统运行时动态性能的影响。而阈值这样的选取可以保证 $e(k)$ 始终有一个和外界扰动相关的上界 $\sigma\omega_{max}$ 。所以，选取和扰动上界及回路连续丢包上界相关的触发阈值是合理的。

2.2 稳定性分析与控制器设计

定义 2-1^[59] 在预测事件触发控制方法下，如果系统(2-1)在一个内部包含原点的凸紧集 \mathcal{S} 中，对每一个初始状态 x_0 存在一个正数 $T(x_0)$ ，满足：

$$x(k) \in \mathcal{S}, \quad \forall k \geq T(x_0) \quad (2-21)$$

那么说系统(2-1)是一致最终有界的 (uniformly ultimately bounded, UUB)。

2.2.1 稳定性分析

下面的引理第一次介绍来表述上述方法中 $x(k|k - h_k^{sa})$ 和 $\hat{x}(k)$ 之间的关系。

引理 2-2 基于式子(2-10)、(2-11)的设计和状态估计(2-5), 有以下式子成立,

$$x(k|k - h_k^{sa}) = \delta(k)x(k) + (1 - \delta(k)) \hat{x}(k) \quad (2-22)$$

证明. 根据式子(2-11), 有

$$x(k|k - h_k^{sa}) = (A + BK)^{h_k^{sa}} x(k - h_k^{sa}) \quad (2-23)$$

根据(2-5), 如果 $\delta(k) = 0$

$$\hat{x}(k) = (A + BK)^{h_k^{sa}} x(k - h_k^{sa}) \quad (2-24)$$

如果 $\delta(k) = 1$, 那么

$$\hat{x}(k) = \delta(k - 1)(A + BK)x(k - 1) + (1 - \delta(k - 1))(A + BK)\hat{x}(k - 1) \quad (2-25)$$

根据(2-25), 那么有

$$\hat{x}(k) = \begin{cases} (A + BK)^{(h_{k-1}^{sa}+1)} x(k - 1 - h_{k-1}^{sa}), & \delta(k - 1) = 0 \wedge \delta(k) = 1 \\ (A + BK)x(k), & \delta(k - 1) = 1 \wedge \delta(k) = 1 \\ (A + BK)^{h_k^{sa}} x(k - h_k^{sa}), & \delta(k) = 0 \end{cases} \quad (2-26)$$

对比(2-27)和(2-25), 可以得到当 $\delta(k) = 0$ 时, $x(k|k - h_k^{sa})$ 和 $\hat{x}(k)$ 的值相等; 当 $\delta(k) = 1$ 时, $x(k - h_k^{sa}) = x(k)$ 。由此可以得到引理 2-2 中的结论。

证明完毕。 \square

根据引理 2-2, 闭环系统可以写成,

$$x(k + 1) = (A + BK)x(k) + (1 - \delta(k))BKe(k) + E\omega(k) \quad (2-28)$$

引理 2-3 (S-Procedure) ^[60] 令 F_1, F_2 为对称矩阵, g_1 和 g_2 是向量, $h_1, h_2 \in \mathbb{R}$ 是实数。假设存在某些 x 使得 $x^T F_1 x + 2g_1^T x_0 + h_1 < 0$ 成立。那么以下不等式关系

$$x^T F_1 x + 2g_1^T x + h_1 \leq 0 \Rightarrow x^T F_2 x + 2g_2^T x + h_2 \leq 0$$

成立, 当且仅当存在非负的数 $\kappa \geq 0$, 使得

$$\kappa \begin{bmatrix} F_1 & g_1 \\ g_1^T & h_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_2 & g_2 \\ g_2^T & h_2 \end{bmatrix}$$

是半正定的。

定理 2-1 当给定正常数 $\sigma \geq 0$, $0 < \alpha < 1$, 和控制器增益 K , 正常数 γ , $\Delta_i = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ 1, & i = 1 \end{cases}$, 系统(2-1)在预测事件触发控制框架下并且触发阈值采用(2-6), 如果存在一个正定对称矩阵 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 正参数 $\kappa_1 \geq 0$, $\kappa_2 \geq 0$, $0 \leq \kappa_3 \leq 1 - \alpha$, 满足以下的矩阵不等式,

$$\begin{bmatrix} \Xi_{1,1} & * & * & * \\ \Delta_i K^T B^T P A_{cl} & K^T B^T P B K - \kappa_1 I & * & * \\ E^T P A_{cl} & \Delta_i E^T P B K & E^T P E - \kappa_2 I & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_{4,4} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

其中,

$$\Xi_{1,1} = A_{cl} P A_{cl} - (1 - \alpha - \kappa_3) P \quad (2-30)$$

$$\Xi_{4,4} = \kappa_1 \sigma^2 \omega_{max}^2 + \kappa_2 \omega_{max}^2 - \kappa_3 \gamma^2 \omega_{max}^2 \quad (2-31)$$

那么系统在凸紧集 $\xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 中是一致最终有界的 (UUB), 其中

$$\xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2) := \{x \in \mathbb{R}^n | x^T P x \leq \gamma^2 \omega_{max}^2\}.$$

证明. 定义李雅普诺夫函数 $V(k) = x^T(k) P x(k)$, 和 $\Delta V(k) = V(k+1) - V(k)$. 当 $x(k) \notin \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$, 令 $\Delta V(k) \leq -\alpha V(k)$, 有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) + \alpha V(k) &= \\ x^T(k) [A_{cl}^T P A_{cl} - (1 - \alpha) P] x(k) &+ 2x^T(k) A_{cl} P E \omega(k) + \\ 2(1 - \delta(k)) e^T(k) K^T B^T P E \omega(k) &+ 2(1 - \delta(k)) x^T(k) A_{cl}^T P B K e(k) + \\ (1 - \delta(k))^2 e^T(k) K^T B^T B K e(k) &+ \omega^T(k) E^T P \omega(k) \leq 0 \end{aligned} \quad (2-32)$$

其中 $A_{cl} = A + B K$.

令 $\eta(k) = [x^T(k) \quad e^T(k) \quad \omega^T(k)]^T$, 然后(2-32)可以被重写为

$$\eta^T(k) P_{1,i} \eta(k) \leq 0 \quad (2-33)$$

其中,

$$P_{1,i} = \begin{bmatrix} \Xi'_{1,1} & * & * & * \\ \Delta_i K^T B^T P A_{cl} & K^T B^T P B K & * & * \\ E^T P A_{cl} & \Delta_i E^T P B K & \Xi'_{3,3} & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

其中 $\Xi'_{1,1} = A_{cl} P A_{cl} - (1 - \alpha) P$, $\Xi'_{3,3} = E^T P E$. 根据引理 2-1, (2-15)等价于,

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sigma^2 \omega_{max}^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (2-35)$$

$\|\omega(k)\| \leq \omega_{max}$ 可以被重写为

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_{max}^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (2-36)$$

$x(k) \notin \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 可以被重写为,

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 \omega_{max}^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (2-37)$$

通过使用 S-Procedure 引理, 结合(2-35)-(2-37)到公式(2-34)中, 可以得到(2-29)成立。

现在考虑当 $x(k) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 时, $x(k+1) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 的情况。首先, $x(k+1)^T P x(k+1) \leq \gamma^2 \omega_{max}^2$ 可以被重写为

$$\eta(k)^T P_{2,i} \eta(k) \leq 0 \quad (2-38)$$

其中,

$$P_{2,i} = \begin{bmatrix} A_{cl} P A_{cl} & * & * & * \\ \Delta_i K^T B^T P A_{cl} & K^T B^T P B K & * & * \\ E^T P A_{cl} & \Delta_i E^T P B K & E^T P E & * \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 \omega_{max}^2 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

$x(k) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 可以被重写为,

$$\eta^T(k) \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma^2 \omega_{max}^2 \end{bmatrix} \eta(k) \leq 0 \quad (2-40)$$

通过使用 S-Procedure, 结合(2-35)、(2-36)、(2-40)到公式(2-34)中, 可以得到,

$$\begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & * & * & * \\ \Delta_i K^T B^T P A_{cl} & \Phi_{2,2} & * & * \\ E^T P A_{cl} & \Delta_i E^T P B K & \Phi_{3,3} & * \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{4,4} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2-41)$$

其中 $\Phi_{1,1} = A_{cl}^T P A_{cl} - \bar{\kappa}_3$, $\Phi_{2,2} = \Xi_{2,2}$, $\Phi_{3,3} = \Xi_{3,3}$, $\Phi_{4,4} = \kappa_1 \sigma^2 \omega_{max}^2 + \kappa_2 \omega_{max}^2 + (\bar{\kappa}_3 - 1) \gamma^2 \omega_{max}^2$ 。注意到, 如果令 $\bar{\kappa}_3 = 1 - \kappa_3$, (2-29)是(2-41)的充分条件。因此(2-29)在保证当 $x(k) \notin \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 时李雅普诺夫函数指数衰减的同时, 也保证了当 $x(k) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 时, $x(k+1) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 。

当 $x(k) \notin \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 时, $V(k)$ 满足 $\Delta V(k) \leq -\alpha V(k)$ 这样的指数衰减。这样可以推出, 对初始状态 $x_0 \notin \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 在任意时间 $k \geq T(x_0)$, 有 $x(k) \in \xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$, 其中

$$T(x_0) = \frac{\log \gamma^2 \omega_{max}^2 - \log x_0^T P x_0}{\log(1-\alpha)} \quad (2-42)$$

证明完毕。 \square

定理 2-1 给出了系统(2-1)在预测事件触发方法下 UUB 的充分条件, 即当系统状态位于集合 $\xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 中时, 该方法能够保证系统状态始终位于该集合内; 当初始状态位于集合 $\xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 外部时, 系统状态具有指数衰减的特性, 可以在一个有限时间 $T(x_0)$ 内收敛到集合内。同时注意到, 当没有外界扰动的时候, 系统也是指数稳定的。

2.2.2 控制器增益设计

引理 2-4 (舒尔补) ^[61] 舒尔补引理的主要作用是将 2 次矩阵不等式转化线性矩阵不等式, 或者至少是这个方向上的其中一步。其主要结论为以下表述是等价的

$$1. \quad \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} \end{bmatrix} < 0$$

2. $\Phi_{22} < 0, \Phi_{11} - \Phi_{12}\Phi_{22}^{-1}\Phi_{12}^T < 0$
3. $\Phi_{11} < 0, \Phi_{22} - \Phi_{12}\Phi_{22}^{-1}\Phi_{12}^T < 0$

定理 2-2 当给定正常数 $\sigma \geq 0$, $0 < \alpha < 1$, 和正常数 γ , $\Delta_i = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ 1, & i = 1 \end{cases}$,

系统(2-1)在预测事件触发控制框架下并且触发阈值采用(2-6), 如果存在一个正定对称矩阵 $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 正参数 $\kappa_1 \geq 0$, $\kappa_2 \geq 0$, $0 \leq \kappa_3 \leq 1 - \alpha$, 矩阵 $G \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 矩阵 $\tilde{G} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 满足以下的矩阵不等式,

$$\begin{bmatrix} \Omega_{1,1} & * & * & * & * & * \\ 0 & \Omega_{2,2} & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_{4,4} & * & * \\ AG + B\tilde{G} & \Delta_i B\tilde{G} & E & 0 & -S & * \\ 0 & 0 & 0 & \sigma & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \omega_{max}^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2-43)$$

那么系统在凸紧集 $\xi(P, \gamma^2 \omega_{max}^2)$ 内是 UUB 的, 李雅普诺夫函数 $P = S^{-1}$. 其中, $\Omega_{1,1} = (1 - \alpha - \kappa_3)(-G - G^T + S)$, $\Omega_{2,2} = -G^T + G + \frac{1}{\kappa_1} I$, $\Omega_{4,4} = -\gamma^2 \omega_{max}^2 + \kappa_2 \omega_{max}^2$. 控制器增益设计为,

$$K = \tilde{G}G^{-1} \quad (2-44)$$

证明. 考虑定理 2-1 中的(2-29), 对其使用两次舒尔补引理, 可以得到以下式子,

$$\begin{bmatrix} -(1 - \alpha - \kappa_3) & * & * & * & * & * \\ 0 & -\kappa_1 I & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Omega'_{4,4} & * & * \\ A_{cl} & \Delta_i BK & E & 0 & -P^{-1} & * \\ 0 & 0 & 0 & \sigma & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \omega_{max}^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2-45)$$

其中 $\Omega'_{4,4} = -\gamma^2 \omega_{max}^2 + \kappa_2 \omega_{max}^2$. 在这之后, 对上述式子左乘、右乘对角矩阵 $diag(G^T, G^T, I, I, I, I)$, 可以得到以下式子。

$$\begin{bmatrix} \Omega'_{1,1} & * & * & * & * & * \\ 0 & -\kappa_1 G^T G & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\kappa_2 I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Omega'_{4,4} & * & * \\ A_{cl} G & \Delta_i BKG & E & 0 & -P^{-1} & * \\ 0 & 0 & 0 & \sigma & 0 & -\frac{1}{\kappa_1 \omega_{max}^2} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2-46)$$

其中 $\Omega'_{1,1} = -(1 - \alpha - \kappa_3)G^T P G$. 考虑如下两条必定成立的不等式,

$$\kappa(\kappa^{-1}I - G)^T(\kappa^{-1}I - G) \geq 0 \quad (2-47)$$

$$(P^{-1} - G)^T P (P^{-1} - G) \geq 0 \quad (2-48)$$

与下面两条不等式等价,

$$\kappa G^T G \geq G^T + G - \kappa^{-1}I \quad (2-49)$$

$$G^T P G \geq G^T + G - P^{-1} \quad (2-50)$$

将上述两条不等式带入(2-46)中，并令 $S := P^{-1}$ ， $\tilde{G} := KG$ ，那么就可以得到(2-45)，且 $K = \tilde{G}G^{-1}$ 。

证明完毕。 \square

注意到定理 2-1 矩阵不等式(2-29)中的 $\Xi_{1,1}$ ，和定理 2-2 矩阵不等式(2-45)中的 $\Omega_{1,1}$ 是双线性的。为了解决双线问题，一般可以令其中一个变量在一个区间内以一定的增量逐步递增，然后再每一步中尝试求解不等式以得到可行解。以求解(2-45)为例，可以尝试让 κ_3 在 $[0, 1 - \alpha]$ 区间内以一定的增量逐步递增，这样能使得(2-45)转换成线性矩阵不等式 (LMI)，这样可以使用 MATLAB 中的 LMI 工具箱对其进行求解。基于这一想法，可以使用下面的算法 1 去求解(2-45)。类似的，通过将算法 1 中的“ $t_j = \text{tr}(S)$ ”替换为“ $t_j = \text{tr}(P)$ ”，(2-29)式也可以使用算法 1 进行求解。更多关于算法 1 具体的讨论可以在算法 1 的参考文献中找到^[48]。

下面算法可用于求解(2-45)中的 LMI。

算法 1 求解(2-45)

输入： 总步数 N ， $i = 0$ ， $j = 0$ ， $\kappa_3 = 0$

while $i < N$ **do**

if (2-45) 有解， **then**

$t_j = \text{tr}(S)$; % 求矩阵 S 的迹

$\kappa_{3,j} = \kappa_3$;

$j = j + 1$;

endif

$\kappa_3 = \kappa_3 + \frac{1-\alpha}{N}$;

$i = i + 1$;

end while

$j^* = \text{argmin}(t_i)$;

输出： 当 $\kappa_3 = \kappa_{3,j^*}$ 时不等式的解。

2.3 数值仿真

对于事件触发类的控制策略，触发阈值的选取将直接影响方法的控制效果。注意到在引理 2-1 中，触发阈值 λ 的设计能够保证估计偏差 e 始终在 $\sigma\omega_{max}$ 之下。另外，引理 2-1 中的证明中同时隐含了 $\lambda \geq 0$ 的条件，其等价于 $\sigma \geq \sqrt{d_{max}} \|\Phi_{d_{max}} \tilde{E}\|$ 。当 σ 的取值等于或者小于这个值时，事件触发将等价于时间周期触发。这为方法实施时参数 σ 的选取提供了一定的参考。这一节将通过两个数值仿真来验证先前方法设计的有效性。

例 1

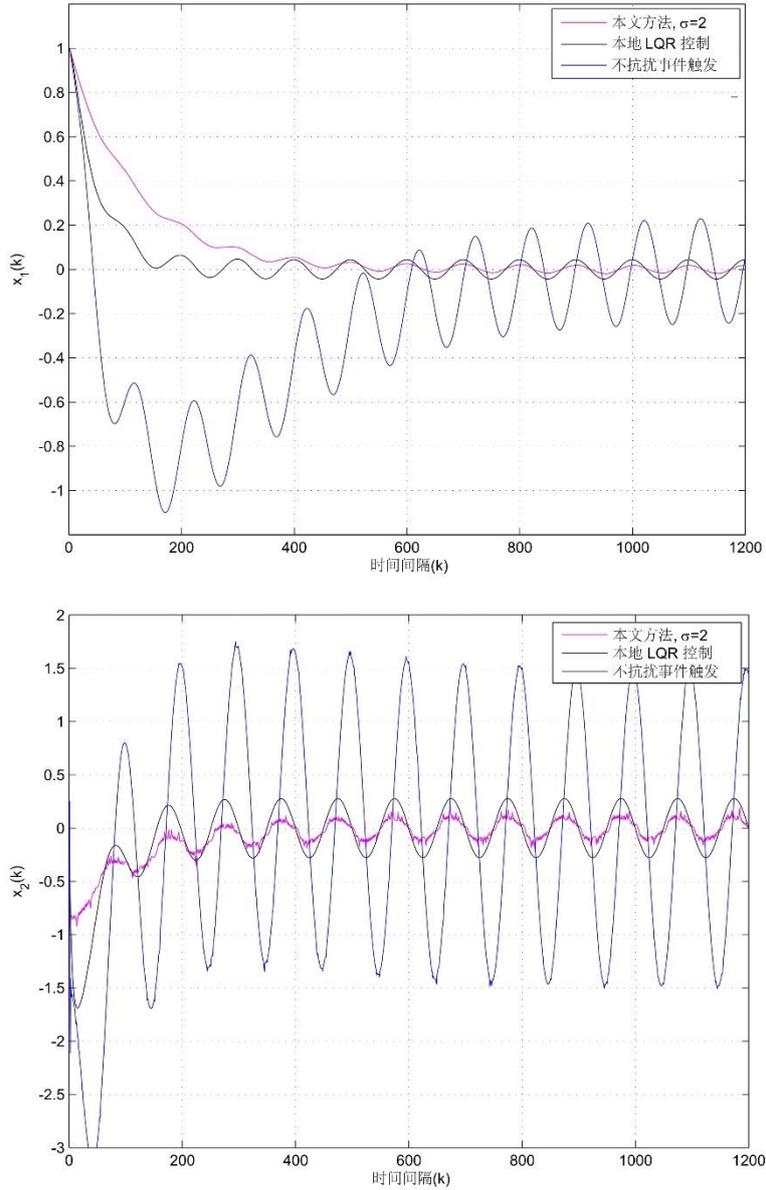


图 2-3 系统状态对比图

Figure 2-3. The comparison of system dynamic

考虑如下以下离散被控对象，

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) + E\omega(k) \quad (2-51)$$

其中的状态分量 x_1 ， x_2 分别表示摆的角度位移以及角速度，系统的离散采样周期为 0.01s，系统参数如下，

$$A = \begin{pmatrix} 1.0018 & 0.01 \\ 0.36 & 1.0018 \end{pmatrix}, \quad B = E = \begin{pmatrix} -0.001 \\ -0.184 \end{pmatrix}$$

系统通过无线网络传递控制信息。假设系统环路（信息从传感器→控制器→执行器）的丢包概率为 0.2，并且假设环路中最大连续丢包数 $d_{max} = 4$ 。设计触发器连续两次的发送间隔不大于 $h_{max} = 14$ 。在仿真中，常使用服从正弦函数的白

噪声模拟系统的外部扰动^[46-48]，因此在该数值仿真中令系统外部扰动 ω 服从： $\omega(k) = 0.3 \sin(0.02\pi k)$ 。选取系统衰减系数 $\alpha = 0.001$ ，阈值调节参数 $\sigma = 2$ ，系统初始状态 $x_0 = [1 \ 0]^T$ 。将上一参数带入算法 1 中求解(2-45)中的 LMI，可得到系统控制增益 $K = [7.0600 \ 3.8924]$ 。

基于以上参数设计，系统的动态仿真如图 2-3 所示。在对比图中，本文方法有较好的性能表现。一方面，在外界扰动不可忽略的情况下，本文的方法与未考虑扰动的事件触发控制方法^[35]相比表现的更好，具有一定的抗扰动能力；另一方面，与本地 LQR 控制相比，（即不存在网络通讯约束的 LQR 控制），本文方法也能有令人满意的性能。

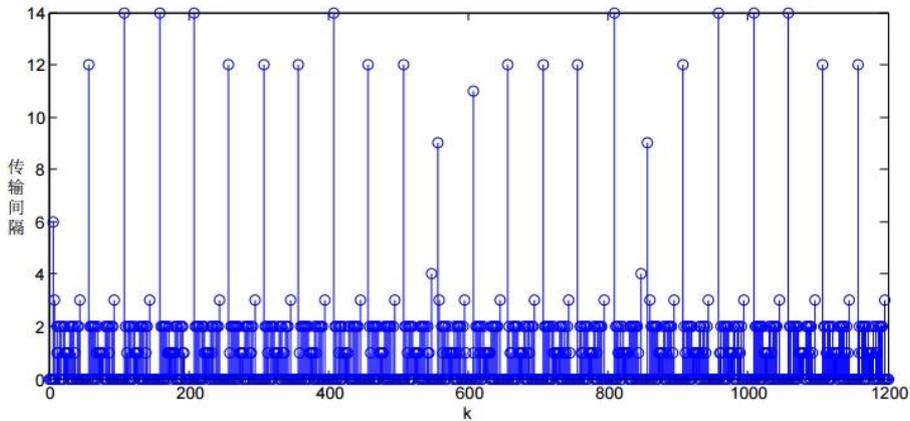


图 2-4 传感器传输间隔

Figure 2-4. The transmission interval for sensor

仿真运行中传感器端的发送间隔（公式(2-4)中的 h_k^s ）如图 2-4 所示。图中标出了传感器每次发送数据时距离上一次触发发送的时间间隔（当触发器未触发发送时，将其传输间隔标为 0）。可以看到相较于使用时间触发（传感器在每个时刻都会发送数据，即 h_k^s 恒为 1），本文方法能够增加传感器的数据发送间隔，仿真中实际最大传输间隔可以达到设计的最大传输间隔 14，能够有效减少对通讯资源的消耗。

表 2-1 不同 σ 下，1200 步仿真中的触发率和控制器增益

Table 2-1. The triggering rates and controller gains in 1200 steps simulation under different σ

| σ | 触发率 | K |
|----------|-------|-----------------|
| 1.5 | 76.3% | [7.1512 3.7865] |
| 2 | 48.8% | [7.0600 3.8924] |
| 2.5 | 40.3% | [6.9719 3.9352] |

阈值调节参数 σ 不同的取值将对传感器发送次数，系统性能造成不同的影响。不同 σ 的取值所对应的触发率（触发发送的步数/总运行步数）和对控制器增益如表格 2-1 所示。总体上，随着 σ 的增大，会使得触发阈值增大，传感器端触发发送的次数减少，消耗的通讯资源也随之减少。可以看到，在 $\sigma = 2$ 时，触发率为 48.8%，较 $\sigma = 1.5$ 时明显下降。

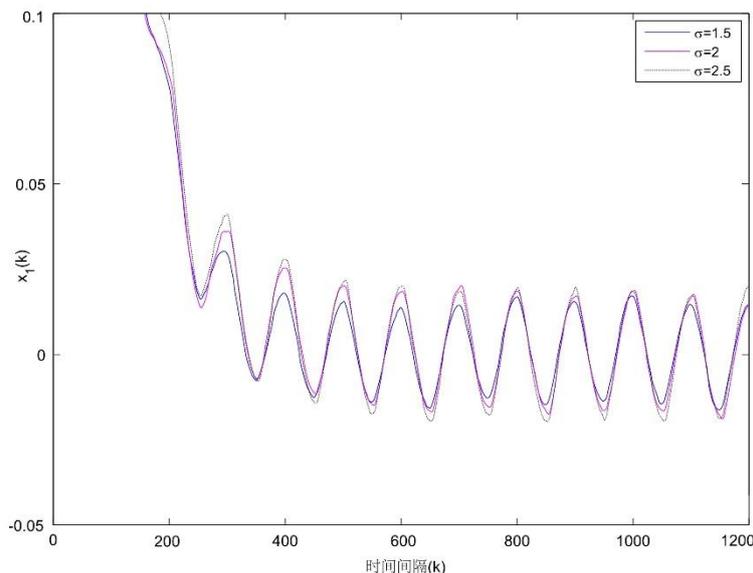


图 2-5 不同阈值调节参数下系统状态 x_1 的对比

Figure 2-5. The comparison of dynamic of x_1 with different threshold adjustment parameter

正如所本章开始所说的，通讯资源消耗和控制系统性能之间存在权衡，较小的 σ 对应较多的数据量发送次数，一般会有更好的系统性能，但也会消耗更多的节点能量。不同 σ 取值下的系统动态对比如图 2-5 所示。可以看到在三个不同的 σ 中， $\sigma = 1.5$ 的蓝色曲线在收敛过程中具有更小的振幅，有着三者中较好的动态。

例 2

离散系统动态描述如例 1 中的(2-51)，系统参数的选取如下，

$$A = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.01 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.9982 & 0.0267 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 1.0016 & 0.01 \\ 0 & -0.0296 & 0.3119 & 1.0016 \end{pmatrix}, \quad B = E = \begin{pmatrix} 0.0001 \\ 0.0182 \\ 0.0002 \\ 0.0454 \end{pmatrix}$$

系统的离散采样间隔取为 0.01s，环路丢包概率，环路最大连续丢包数，传感器最大传输间隔和外部扰动的设置和例 1 一致。令 $\alpha = 0.02$ ， $\sigma = 0.3$ ， $\gamma^2 = 6.8$ ，以及初始系统状态 $x_0 = [0.98 \ 0 \ 0.2 \ 0]^T$ ，求解(2-45)可以得到控制器增益

$K = [18.0855 \ 26.8057 \ -90.2683 \ -17.9167]$ 。在 1200 步仿真中的触发率为 42.7%。从状态对比图 2-6 来看，预测事件触发控制方法与设计中不考虑扰动的事件触发控制（ETC）方法^[35]相比，表现地更加鲁棒。

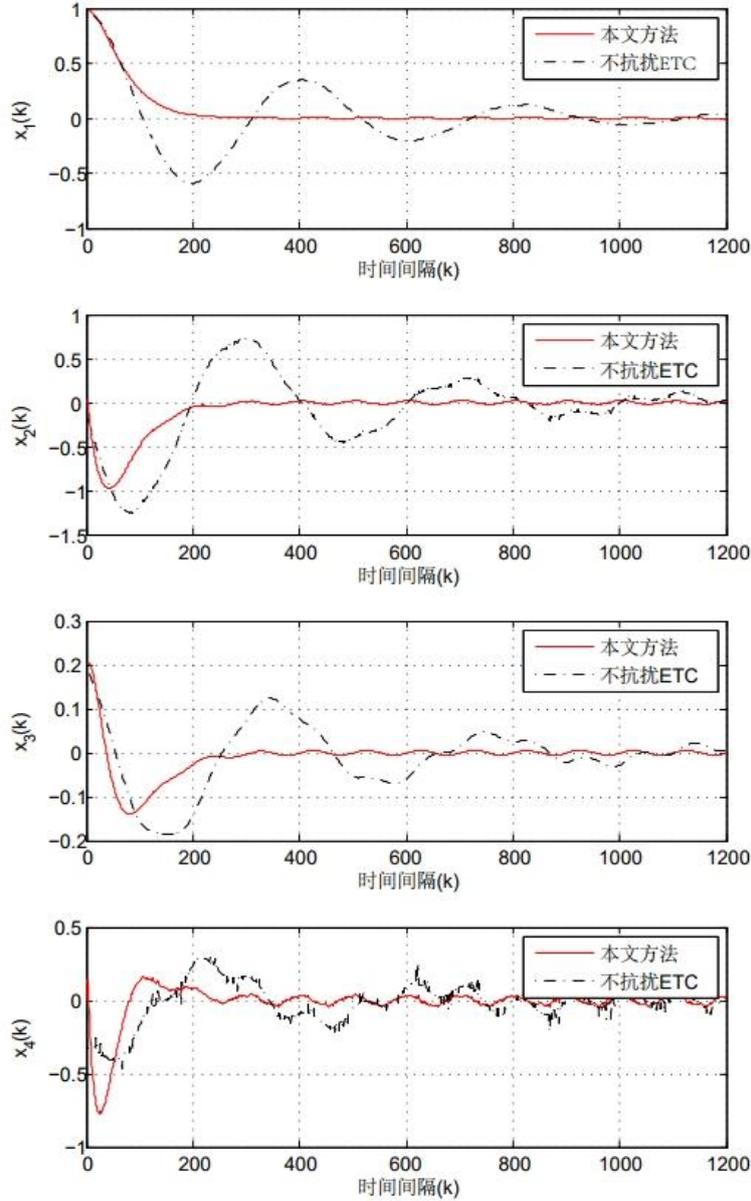


图 2-6 系统动态对比

Figure 2-6. The comparison of system dynamics

2.4 小结

本章针对受外界扰动的无线网络化控制系统，为了在保证系统性能的同时减少系统数据传输次数，设计了一种基于状态反馈预测事件触发控制方法。在

该方法中，设计了能使估计偏差小于某一上界的触发机制，减少传感器的信息传输次数。同时又设计了结合了基于包的控制方法和基于模型迭代的预测控制器，能够主动地补偿实时控制信号的缺失，保障系统性能。利用李雅普诺夫稳定性分析得到了能使系统一致最终有界的充分条件和控制器增益，并利用一个算法求解矩阵不等式。最后，两个数值仿真验证了本章方法的有效性。

第三章 基于观测的无线网络控制系统预测事件触发方法

第二章针对受扰动的无线网络化控制系统，提出了一种基于状态反馈的预测事件触发控制方法。本章主要讨论当系统状态不直接可测时，基于状态观测反馈的预测事件触发控制方案设计。

在本章中，针对状态不可直接测量但能观能控的离散系统，提出了基于状态观测反馈的预测事件触发控制方案。该方法在传感器端采用事件触发机制来减少系统数据的传输。在控制器端设计了基于系统模型的前向预测控制方案并采用基于包的控制框架^[58]，能够有效补偿系统运行过程中执行器端实时控制信号的缺失。在该框架下对系统进行稳定性分析，得到了使得系统渐进稳定的充分条件。获得的控制器增益和观测器增益在计算时可以独立求解，减轻了实际系统设计时的复杂度。最后，本章通过数值仿真和与理想状态下的 LQR 控制进行对比，验证了方法的有效性。

3.1 问题描述

本章考虑的无线网络化控制系统结构如图 3-1 所示，传感器到控制器的传感数据，控制器到执行器的控制数据，分别无线通讯网络进行传递。这两条信道是与其他用户共享使用的，也就是说这个无线网络可能除控制系统之外，可能还存在其他设备共享使用有限的通讯资源。与第二章类似，传感器和控制器之间(反馈信道)，控制器和执行器之间(前向信道)可能使用同一个无线网络，但实际上两条信道一般来说不会发生冲突。为了简化分析，假设两条信道独立互不干扰。同时，无线网络的规模通常并不会很大，无线网络中的传输时延通常可以被忽略。但是因为无线网络运行在一个开放的环境中，信道衰减，多普勒频移和信号噪声带来的数据包丢失难以忽略^[21]。因此，在本章接下去的分析中将仅考虑网络丢包，忽略网络时延的影响。另外，出于控制系统对控制数据的实时性要求，并考虑到数据丢失后的重传会给网络带来额外的开销，发送方在数据包丢失之后不进行重传。

考虑被控对象的动态离散模型如下，

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

其中， $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(k) \in \mathbb{R}^m$ ， $y(k) \in \mathbb{R}^q$ 分别是系统的状态量，控制输入和输出量。 A ， B ， C 是有着各自对应维度的系统参数矩阵。在该系统中，假设系统(3-1)的内部状态量 $x(k)$ 不可直接测得。虽然系统状态可不测，但系统输出

$y(k)$ 是可测的，且离散系统模型 (A, B) 是可控的， (A, C) 是可观的。在无线网络中，如果连续数据包丢失数过于庞大，可能会导致控制系统彻底开环，任何控制设计都将不起作用，这样的网络并不适合控制系统使用。因此，在任意的 k 时刻，假设从传感器到控制器的连续丢包数目不超过某一正整数 $d_{sc,max}$ ，且控制回路的连续丢包数目 d_k 不超过一个整数 d_{max} ，即

$$d_k \leq d_{max} \tag{3-2}$$

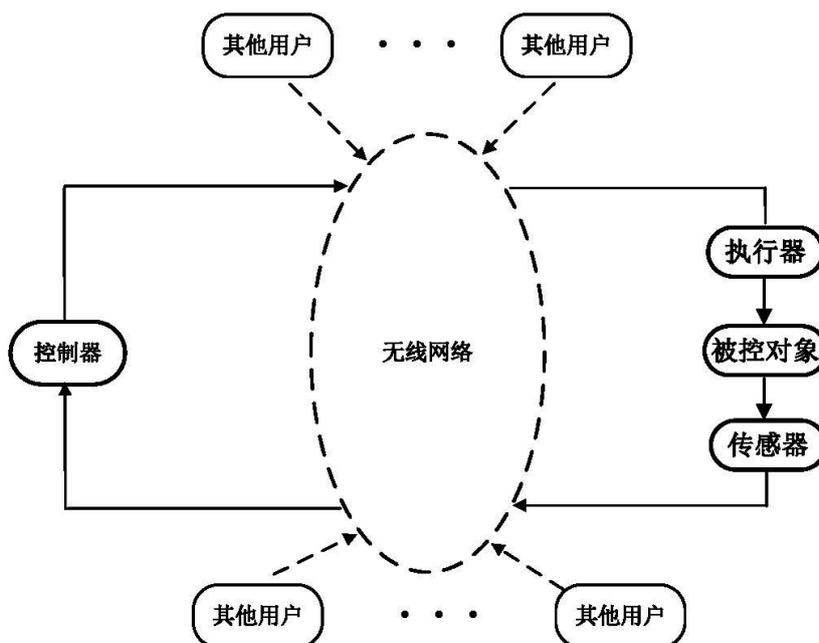


图 3-1 使用共享网络的无线网络化控制系统结构图

Figure 3-1 The frame of wireless networked control systems with shared network

本章的目的是针对具有(3-1)式动态的无线网络化控制系统，设计基于状态观测反馈的高效控制策略来应对数据包丢失，实现有限的节点能量和系统控制性能之间的平衡。正如在第二章中的描述，在使用共享网络的无线网络化控制系统中，有限的网络节点能量和系统性能之间存在一定的权衡，因此需要一个高效的控制策略在保证性能的同时减少网络节点能量的消耗。而事件触发机制能在保证系统性能的同时减少数据传输，契合系统设计需求。在现有的事件触发研究中，当执行器没有收到实时控制信号时大多采用零阶保持器 ($u_k = u_{k+1}$) 或者置零控制 ($u_k = 0$)，并没有充分利用网络的特性。另一方面，实际中大量存在着基于状态观测反馈的控制系统，这类系统也需要高效可靠的控制方案来保障系统的性能。因此，本章将对第二章中的基于状态反馈的预测事件触发进行扩展，设计基于观测的事件触发器和基于包的控制的前向预测控制器，提出了基于状态观测的预测事件触发控制方法。

3.2 基于观测的预测事件触发控制方法设计

基于观测的预测事件触发控制框架（Observation-based Predictive Event-triggered Control, OPEC）的设计如图 3-2 所示。和传统的基于状态反馈的事件触发机制不同，OPEC 包含一个在传感器端的事件触发器和一个基于模型前向预测控制器。在每个给定的执行时刻 k ，事件触发器决定是否发送观测信号，由此来减少数据的发送次数，节约有限的通讯资源。当控制器收到来自传感器端的观测数据之后，预测生成一系列的前向预测控制量，并打包成控制序列发送给执行器。执行器存储来自控制器最新的控制序列。在每个时刻 k 从序列中根据时间戳选取合适的控制量作用于被控对象，主动地补偿数据包的丢失。

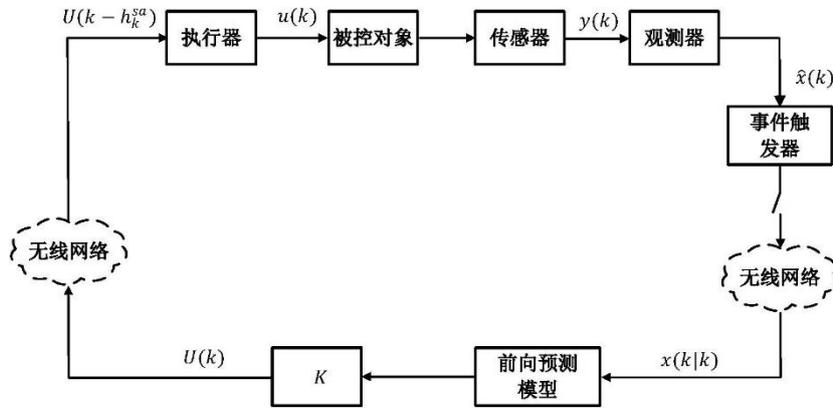


图 3-2 基于观测的预测事件触发控制结构图

Figure 3-2 The framework of observation-based predictive event-triggered control

3.2.1 基于观测的事件触发器设计

系统的观测器设计如下：

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

定义状态观测的偏差， $e(k) := x(k) - \hat{x}(k)$ ，那么可以有

$$\begin{aligned} e(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= (A - LC)e(k) \end{aligned} \quad (3-4)$$

在传感器端，事件触发器被设计来决定传感器端的观测数据是否被发送，以此来减少系统的数据发送次数，减少有限通讯资源的使用。在这里，使用一个事件函数 $\delta_s(k)$ ，来表示 k 时刻的观测数据 $\hat{x}(k)$ 是否出发了的发送条件被发送。即当 $\hat{x}(k)$ 被发送时， $\delta_s(k) = 1$ ；否则 $\delta_s(k) = 0$ ， $\delta_s(k)$ 的表述如下：

$$\delta_s(k) = \begin{cases} 1, & f(k, h_k^s) \geq 0 \text{ 或 } h_k^s \geq h_{max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-5)$$

其中触发函数，

$$f(k, h_k^s) = (x(k) - \hat{x}(k^s))^T \Phi (x(k) - \hat{x}(k^s)) - \sigma \hat{x}^T(k) \Phi \hat{x}(k) \quad (3-6)$$

在这之中， $\Phi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $\sigma > 0$ 分别是一个可调节的权重矩阵和可调节的正参数。 k^s 表示在 k 时刻之前，最近的一次发送时刻，满足有 $k^s \leq k$ ，对任意的满足 $k^s \leq i \leq k$ 的 i ，有 $\delta_s(i) = 0$ 且 $\delta_s(k^s) = 1$ 成立，且 $\delta_s(0) = 1$ 。 h_{max} 是提前设计的正数，表示触发器允许的最大连续不触发次数。根据上面的描述， h_k^s 表示 k 时刻之前触发器连续不发送的次数，由以下式子定义：

$$h_k^s = k - k^s \quad (3-7)$$

在事件触发中可能出现长时间不触发的情况，这样执行器将长时间收不到实时控制信号，不利于系统性能。因此在大多数情况中，触发器发送数据与否取决于触发函数 $f(k, h_k^s)$ 值的大小。当函数值大于 0 时发送观测器数据，并且，当连续不发送的次数超过实现设计的正参数 h_{max} 时，也将触发发送以保证控制器的数据更新；而在其他的情况，不发送数据。在式子(3-6)中，调节参数 Φ 和 σ 的选取将直接影响系统运行过程中的触发次数。在某一范围内，系统的数据发送次数将随着 Φ 的增大而增多，随着 σ 的增大而减小。而当 $\sigma = 0$ ， $\Phi \neq 0$ 时，触发器将失去作用，事件触发将等同于周期触发；而当 $\sigma \neq 0$ ， $\Phi = 0$ 时，不等式左端将恒小于等于 0，触发器将一直保持静默，控制系统将开环。

3.2.2 前向预测控制器设计

首先定义事件函数 $\delta_{sc}(k)$ 表示从传感器到控制器的数据是否因为丢包而丢失，即当控制器收到时 $\delta_{sc}(k) = 1$ ；否则 $\delta_{sc}(k) = 0$ ，

$$\delta_{sc}(k) = \begin{cases} 1 & \hat{x}(k) \text{ 被控制器收到} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-8)$$

当观测数据 $\hat{x}(k)$ 达到控制器端的时候，前向预测控制器根据得到的当前的观测数据 $\hat{x}(k)$ 以基于模型迭代的方法生成一系列的预测控制量 $u(k|k), \dots, u(k + d_{max}h_{max}|k)$ ，并将这些控制量打包生成控制序列 $U(k)$ 。需要强调的是，前向预测控制器生成预测控制量的过程仅仅发生在控制器端成功收到观测数据 $\hat{x}(k)$ 的时刻，即 $U(k)$ 有以下表达，

$$U(k) = \begin{cases} [u(k|k), \dots, u(k + d_{max}h_{max}|k)], & \delta_s(k)\delta_{sc}(k) = 1 \\ \emptyset, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-9)$$

预测控制量 $u(k + i|k)$ 由以下式子生成，

$$u(k + i|k) = \begin{cases} K\hat{x}(k), & i = 0 \\ K\hat{x}(k + i|k), & i > 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

在这之中的前向预测状态 $\hat{x}(k + i|k)$ 由下面的式子得到，

$$\hat{x}(k + i|k) = A\hat{x}(k + i - 1|k) + Bu(k + i - 1|k) \quad (3-11)$$

$i = 1$ 时， $\hat{x}(k + 1|k)$ 为

$$\hat{x}(k + 1|k) = A\hat{x}(k) + Bu(k|k) \quad (3-12)$$

其中 $u(k|k) = u(k)$ 。

根据假设 $d_k \leq d_{max}$ 和触发器(3-5)中 h_{max} 的设计, 执行器相邻两次接收到控制序列 U 的最大时间间隔为 $d_{max}h_{max} + 1$, 也就是说必定存在一个时刻 i , $i \in [k, k + d_{max}h_{max}]$, 执行器在 i 时刻收到控制序列 $U(i)$ 。根据以上的分析, 可以得到结论: 控制序列 $U(k)$ 的设计可以保证执行器在任意时刻都能够有合适控制信号。在实际中 d_{max} 的精确值可能难以获得, 可以先通过网络测量获得一个 d_{max} 的测量值, 再为 d_{max} 选取一个大于该测量值的保守值, 并将其带入计算得到控制序列 $U(k)$ 的长度。因为单个控制量占有的存储空间很小, 所以使 $U(k)$ 长度有一定的冗余在实际中是可行的。

3.2.3 闭环系统建模

首先, 令事件函数 $\delta_{ca}(k)$ 表示控制序列 $U(k)$ 是否被成功接收, 即当成功接收时 $\delta_{ca}(k) = 1$; 否则 $\delta_{ca}(k) = 0$,

$$\delta_{ca}(k) = \begin{cases} 1, & U(k) \text{ 被成功传输} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-13)$$

令 k^{sa} 表示 k 时刻之前, 执行器最近一次收到控制序列的时刻, 满足 $k^{sa} \leq k$, 对任意的时刻 i , $k^{sa} \leq i \leq k$, 有 $\delta_{ca}(i) = 0$ 并且 $\delta_{ca}(k^{sa}) = 1$ 。再令 h_k^{sa} 表示 k 时刻之前, 执行器连续没有收到新的控制序列的次数, 根据以上的描述,

$$h_k^{sa} = k - k^{sa} \quad (3-14)$$

在 OPEC 中, 执行器服从基于包的控制策略。即执行器存储的控制序列是最新的, 在每个执行时刻 k , 执行器从控制序列中选取根据时间戳选取适当的预测控制量来补偿因为触发器未发送数据或网络丢包造成的实时控制信号的缺失。当有更新的控制序列到来时, 执行器使用新的控制序列覆盖旧的。根据以上的描述, 考虑到可能存在的实时信号的缺失, k 时刻执行器端的控制序列具有 $U(k - h_k^{sa})$ 的形式。并且, 在 k 时刻执行器选取的控制量为,

$$u(k) = u(k|k - h_k^{sa}) = K\hat{x}(k|k - h_k^{sa}) \quad (3-15)$$

将控制量(3-15)带入被控对象(3-1)中, 有以下式子成立,

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + BK\hat{x}(k|k - h_k^{sa}) \\ &= (A + BK)x(k) - BK(x(k) - \hat{x}(k|k - h_k^{sa})) \end{aligned} \quad (3-16)$$

然后对 $x(k) - \hat{x}(k|k - h_k^{sa})$ 进行化简, 有

$$\begin{aligned} &x(k) - \hat{x}(k|k - h_k^{sa}) \\ &= Ax(k-1) + Bu(k-1|k-1 - h_{k-1}^{sa}) - A\hat{x}(k-1|k-1 - h_{k-1}^{sa}) \\ &\quad - Bu(k-1|k-1 - h_{k-1}^{sa}) \\ &= A(x(k-1) - \hat{x}(k-1|k-1 - h_{k-1}^{sa})) \\ &\quad \vdots \\ &= A^{h_k^{sa}} e(k - h_k^{sa}) \end{aligned} \quad (3-17)$$

再将(3-17)带入(3-16)中, 有

$$x(k+1) = (A + BK)x(k) - BA^{h_k^{sa}} e(k - h_k^{sa}) \quad (3-18)$$

另外根据(3-4)，有下面式子成立，

$$\begin{aligned}
 e(k+1-h_k^{sa}) &= x(k+1-h_{k+1}^{sa}) - \hat{x}(k+1-h_{k+1}^{sa}) \\
 &= (A-LC)^{k+1-h_{k+1}^{sa}-(k-h_k^{sa})} e(k-h_k^{sa}) \\
 &= (A-LC)^{-h_{k+1}^{sa}+h_k^{sa}+1} e(k-h_k^{sa})
 \end{aligned} \tag{3-19}$$

令 $\eta(k) := [x^T(k), e^T(k-h_k^{sa})]$ ，由(3-18)和(3-19)，闭环系统动态模型可以写成以下形式：

$$\eta(k+1) = \Pi(h_k^{sa}, h_{k+1}^{sa})\eta(k) \tag{3-20}$$

$$\text{其中，} \Pi(h_k^{sa}, h_{k+1}^{sa}) = \begin{bmatrix} A+BK & -BKA h_k^{sa} \\ 0 & (A-LC)^{-h_{k+1}^{sa}+h_k^{sa}+1} \end{bmatrix}.$$

注意到和传统的基于状态观测反馈的事件触发机制相比，OPEC 由于采用了基于包的控制框架，它的保守性更小。对于传统的基于观测反馈的事件触发机制中，在执行器端多采用零阶保持器。而 OPEC 继承了来自预测事件触发控制的优点，即能够利用基于包的控制方法去生成预测控制量，主动地补偿执行器端实时控制量的缺失，因此可以期望更好的控制性能。此外，从闭环特征来看， $\Pi(h_k^{sa}, h_{k+1}^{sa})$ 斜对角线下方元素为 0，且在设计中需要求取的控制器增益 K 和观测器增益 L 都处于不同的矩阵元素之中，有着比较简单的形式，利于系统的后续系统控制器增益及观测器的设计。

3.3 稳定性分析与增益设计

在这一小节中，我观测器增益 L 的设计方法将会在定义 3-1 中给出。在这之后，闭环系统(3-20)渐进稳定的充分条件和对应的控制器增益 K 的设计方法将会通过切结线性矩阵不等式 (LMI) 的方式在定理 3-2 中给出。并且从结论中可以看到，观测增益 L 的设计和控制器增益 K 设计两者并没有直接关系，可以分开求解。

定理 3-1 给定给一个正常数 α ， $\alpha < 1$ ，如果存在正定对称矩阵 $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $S > 0$ ，矩阵 $G \in \mathbb{R}^{n \times q}$ ，有以下矩阵不等式成立，

$$\begin{bmatrix} -(1-\alpha)S & * \\ SA - G^T C & -S \end{bmatrix} \leq 0 \tag{3-21}$$

那么观测偏差系统(3-4)是渐进稳定的，即观测器能够收敛，并且观测器增益满足，

$$L = S^{-1}G \tag{3-22}$$

证明. 首先，令观测偏差系统的李雅普诺夫函数 $V_e(k) = e^T(k)Se(k)$ ，其中 S 是正定对称矩阵， $S > 0$ 。定义 $\Delta V_e(k) = V_e(k+1) - V_e(k)$ ，根据(3-4)可以得到以下式子，

$$\Delta V_e(k) = e^T(k+1)Se(k+1) - e^T(k)Se(k)$$

$$= e^T(k)((A - LC)^T S(A - LC) - S)e(k) \quad (3-23)$$

为了得到渐进稳定的结论，令 $V_e(k)$ 以 α ($0 < \alpha < 1$) 的速率下降，则需要满足 $\Delta V_e(k) \leq -\alpha V_e(k) < 0$ ，那么

$$e^T(k)((A - LC)^T S(A - LC) - S)e(k) + \alpha e^T(k)S e(k) \leq 0 \quad (3-24)$$

即等价于

$$(A - LC)^T S(A - LC) - (1 - \alpha)S \leq 0 \quad (3-25)$$

注意到上述式子在使用舒尔补引理^[61]后，可以得到下面式子，

$$\begin{bmatrix} -(1 - \alpha)S & * \\ A - LC & -S^{-1} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-26)$$

在(3-26)中，同时存在 S 和 S^{-1} 这样的非线性依赖，所以不能直接使用 LMI 工具箱求解。为了处理这一问题，在矩阵两端同时乘上对角线上元素为 I 和 S 的对角矩阵 $diag(I, S)$ ，(3-26)等价于

$$\begin{bmatrix} -(1 - \alpha)S & * \\ SA - SLC & -S \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-27)$$

令矩阵 $G = SL$ ，式子(3-27)等价于(3-21)，并且

$$L = S^{-1}G$$

证明完毕。 \square

下面的定理将对闭环系统(3-20)进行稳定性分析，并给出闭环系统渐进稳定的条件以及控制器增益设计。

定理 3-2 给定一个小于 1 的正常数 β ， $0 < \beta < 1$ ，如果存在一个对称正定矩阵 $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $Q > 0$ ，符号不定的矩阵 $H \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 使得以下线性矩阵不等式成立，

$$\begin{bmatrix} -(1 - \beta)Q & * \\ AQ + BH & -Q \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-28)$$

那么，闭环系统(3-20)是渐进稳定的，且控制器增益满足

$$K = HQ^{-1} \quad (3-29)$$

证明. 根据闭环系统(3-20)中第二行第二列元素，如果

$$-h_{k+1}^{sa} + h_k^{sa} + 1 = 0, \quad (3-30)$$

则 $h_{k+1}^{sa} - h_k^{sa} = 1$ 。由 h_k^{sa} 定义式(3-14)可得，在这种情况下 $k^{sa} = (k + 1)^{sa}$ ，即 k 时刻与 $k + 1$ 时刻对应的最近一次执行器收到数据的时刻时一致的，即在 $k + 1$ 时刻执行器没有收到实时数据（发生了丢包或者触发器没有发送）。此时闭环系统(3-20)的特征矩阵为，

$$\Pi(h_k^{sa}, h_{k+1}^{sa}) = \begin{bmatrix} A + BK & -BKAh_k^{sa} \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

观察到矩阵(3-31)有特征值在单位圆上，并不是舒尔的。如果执行器一直没有收到控制序列，那么(3-31)的状态一直维持，即使矩阵 $A + BK$ 是镇定的，系统也会处于临界稳定的状态。然而，根据之前最大连续环路丢包数目 d_{max} 的假设和正参数 h_{max} 的设计，并结合考虑控制序列 U 的长度设计，可以知道执行器

至少能在长度为 $d_{max}h_{max} + 1$ 的时间间隔内收到一个来自前向预测控制器的控制序列 U 。所以上述这种临界稳定的情况不会一直发生。所以，闭环系统的稳定性将归结于当 $-h_{k+1}^{sa} + h_k^{sa} \neq 1$ 时的情况。

实际上，当执行器在 $k + 1$ 时刻收到控制序列时， $h_{k+1}^{sa} = 0$ ；否则， $h_{k+1}^{sa} = h_k^{sa} + 1$ 。因此有， $-h_{k+1}^{sa} + h_k^{sa} + 1 \leq h_k^{sa} + 1 \leq d_{max}h_{max} + 1$ 。要使得闭环系统渐进稳定，则有

$$\Pi(h_k^{sa}, h_{k+1}^{sa}) \leq \Psi(h_k^{sa}) \leq 0 \quad (3-32)$$

其中 $\Psi(h_k^{sa}) = \begin{bmatrix} A + BK & -BKA^{h_k^{sa}} \\ 0 & (A - LC)^{\theta(k)} \end{bmatrix}$ ，而 $\theta(k)$ 是大于 0 的整数，满足： $\theta(k) = -h_{k+1}^{sa} + h_k^{sa} + 1 \leq d_{max}h_{max} + 1$ 。

根据定理 3-1 能够得到使得观测偏差系统(3-4)渐进稳定，即能够使得矩阵 $A - LC$ 舒尔的观测器增益 L 。因此，由矩阵 $\Psi(h_k^{sa})$ 的形式可得，要使得 $\Psi(h_k^{sa}) \leq 0$ ，等价于找到一个控制器增益 K ，使得矩阵 $A + BK$ 舒尔即等价于设计控制器使得有参数矩阵 (A, B) 的系统渐进稳定。

定义对称正定李雅普诺夫函数 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $P > 0$ ， $A + BK$ 舒尔性等价于

$$(A + BK)^T P (A + BK) - P \leq -\beta P \leq 0 \quad (3-33)$$

对其使用舒尔补引理^[61]，上述式子等价于

$$\begin{bmatrix} -(1 - \beta)P & * \\ A + BK & -P^{-1} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-34)$$

对(3-34)分别左乘和右乘对角矩阵 $diag(P^{-1}, I)$ ，有以下式子成立，

$$\begin{bmatrix} -(1 - \beta)P^{-1} & * \\ AP^{-1} + BKP^{-1} & -P^{-1} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-35)$$

最后，令矩阵 $Q := P^{-1}$ ， $H := KQ$ ，那么就能得到 LMI (3-28)，并且控制器增益 $K = HQ^{-1}$ 。

证明完毕。 \square

实际上，在定理 3-1 和定理 3-2 中的结论中可以看到，在 OPEC 方法下，无线网络化控制系统中的控制器增益和观测器增益能够独立分离求解，这将减小设计控制系统时控制器观测器之间存在的耦合，降低系统的复杂度。下一小节将给出 OPEC 的稳定性分析及控制器增益和观测器增益的设计。

3.4 数值仿真

在这一节中，一个离散系统的数值仿真被用来验证 OPEC 方法的有效性。考虑如下离散被控对象，

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2-52)$$

系统的离散采样周期 $T = 0.02s$ ，系统矩阵选取参考文献中的矩阵^[62]，如下：

$$A = \begin{pmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.100 & 0.240 \\ 0.002 & 0.368 & 0.707 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

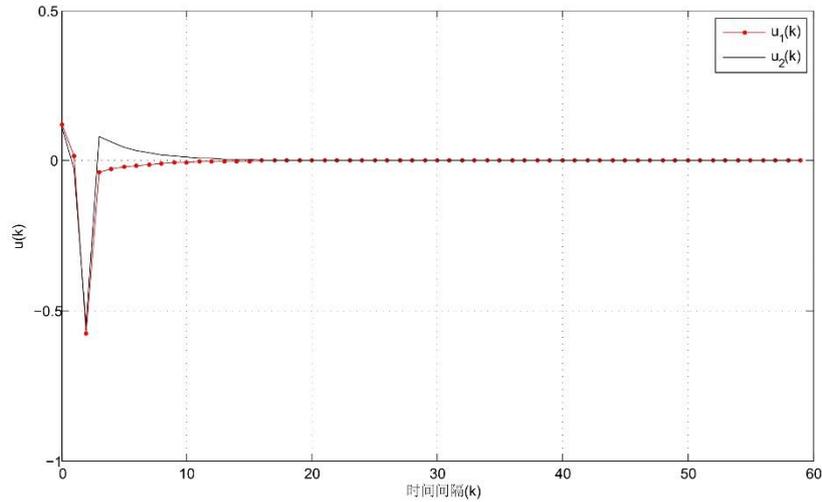


图 3-3 系统控制量

Figure 3-3 The control input of system

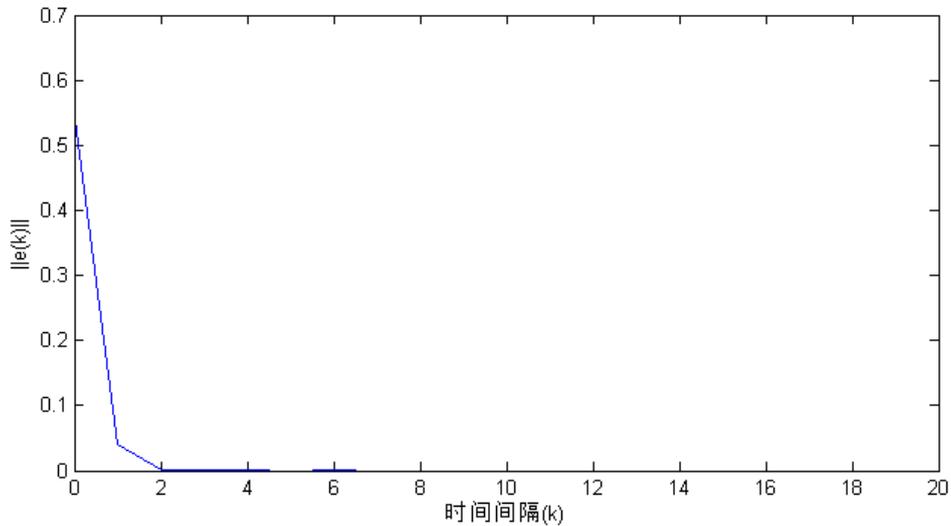


图 3-4 观测偏差值的范数

Figure 3-4 The norm of observation deviation of system

系统通过无线网络传递控制信息。假设系统环路（信息从传感器→控制器→执行器）的丢包概率为 0.2，并且假设环路中最大连续丢包数 $d_{max} = 4$ 。设计触发器两次发送的最大间隔 $h_{max} = 10$ 。选取系统衰减系数 $\alpha = 0.12$ ， $\beta = 0.1$ ，阈值调节参数 $\sigma = 1.1$ ，触发权重矩阵 $\Phi = I$ 。选取系统初始状态 $x_0 =$

$[-0.4 \ 0.1 \ 0.2]^T$ ，初始系统观测值 $\hat{x}_0 = [0.1 \ 0 \ 0]^T$ 。将以上参数带入公式(3-21)-(3-22)和(3-28)-(3-29)中分别求取控制器增益与观测器增益，得

$$K = \begin{bmatrix} 1.1965 & -0.5255 & 0.6667 \\ 1.0798 & -0.2952 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

$$L = \begin{bmatrix} -0.2477 & -2.8996 \\ 0.1123 & 1.4223 \\ 0.7348 & -0.4233 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

根据以上参数进行系统的数值仿真，得到的系统控制输入变化如图 3-3 所示，可以看到在 OPEC 下系统的控制输入很快能够收敛到平衡点位置。另外，系统的观测偏差也能够快速收敛，即观测状态能够快速跟踪到真实状态，如图 3-4 所示。

考虑将以上系统与本地 LQR 控制进行对比。本地 LQR 控制指控制系统处于理想环境状态中。具体来说，系统状态可以直接测量得到，可以直接利用测量数据设计状态反馈控制方案。并且，可以使用理想的本地专线传输控制信息，控制系统的信息传输时实时可靠的。在上述的系统参数条件下，求得的本地 LQR 控制器增益为

$$K_{LQR} = \begin{bmatrix} 0.4210 & -0.3288 & 0.0077 \\ 0.3864 & -0.2344 & -0.1511 \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

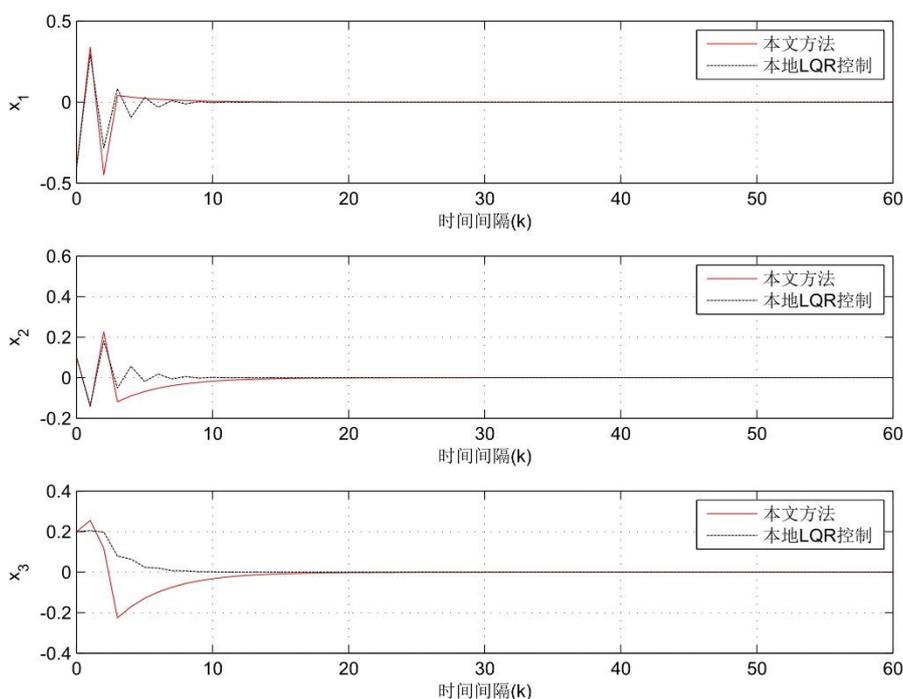


图 3-5 基于观测的预测事件触发控制与本地 LRQ 控制的状态响应对比

Figure 3-5 The state comparison between observation-based predictive event-triggered control and local LQR control

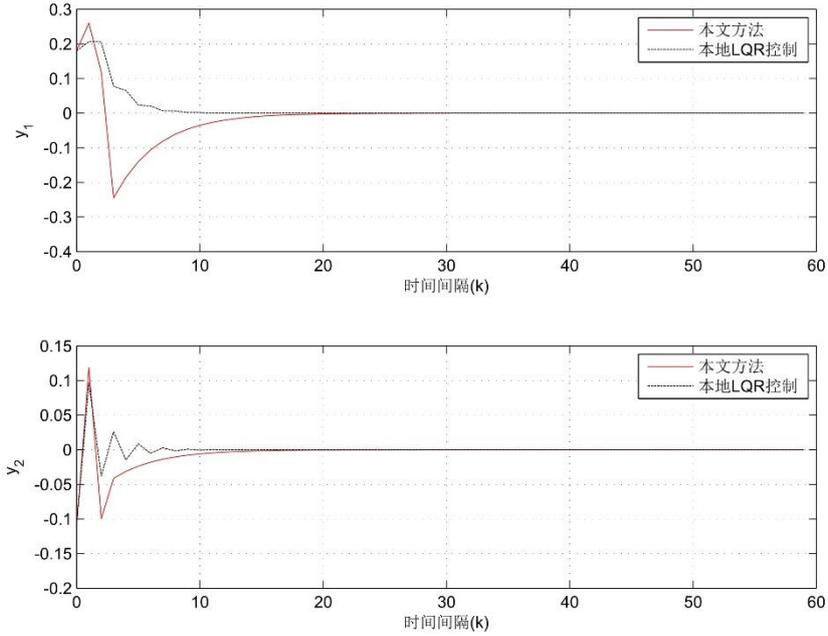


图 3-6 基于观测的预测事件触发与本地 LQR 的输出对比

Figure 3-6 The output comparison between OPEC and local LQR

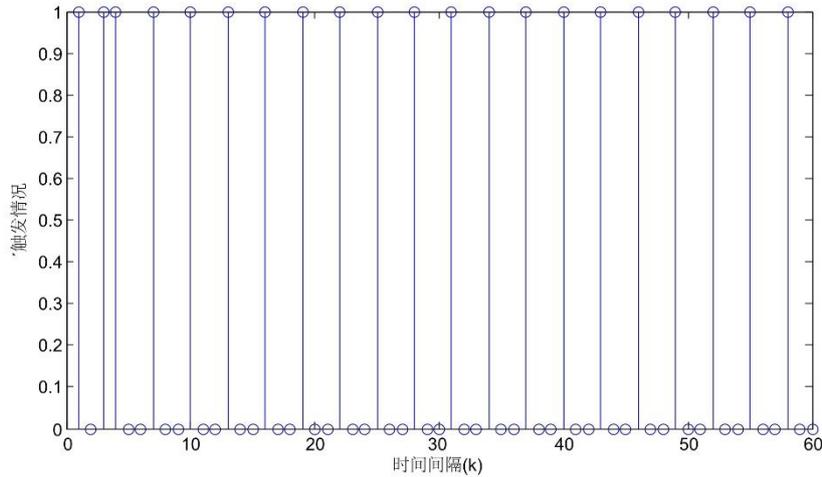


图 3-7 触发情况图

Figure 3-7 Triggering condition

两种控制获得的系统状态响应对比图和输出量对比图分别如图 3-5 和图 3-6 所示。可以看到，单单从性能角度上看，在无线网络通讯约束下的 OPEC 和理想状态下的本地 LQR 相比稍显逊色，但考虑到网络丢包和系统状态本身的不可测，这样的性能对比依旧是可以令人接受的。另外，如果从资源利用的角度上看，理想状态下的 LQR 控制在每一执行时刻都会发送数据，而 OPEC 因为使用了事件触发机制，控制系统发送数据的次数大大减少，在 60 步的仿真中，系统的触发率（发送步数/总的仿真步数）仅为 33.2%，明显节约了网络中有限的节

点能量。系统的发送情况如图 3-7 所示，触发器大部分时间是处于不发送的状态。

不同阈值调节参数 σ 的取值将对系统中的数据传输次数和系统性能造成直接的影响。整体上来说，一个较大的 σ 对应较少的系统数据传输，但随之相应的系统性能也较差。如图 3-8 所示，分别为 σ 选取 1.1, 1.4 和 0.5，对应的系统在 60 步仿真中的发送次数分别是 21, 15 和 31。从得到的系统状态 x_1 响应曲线上看， $\sigma = 0.5$ （三者最小）的曲线性能最好， $\sigma = 1.1$ 的性能次之而 $\sigma = 1.4$ 的性能最差（阈值调节参数最大）。实际上，在仿真中当 σ 增大到 1.8 时，系统将因为控制序列长时间未更新而失去了稳定出现震荡；另一方面，在仿真中当 σ 降至 0.2 时，触发率达到了 100%，触发器失去减少数据传输的作用，此时系统性能接近于理想状态下的 LQR 控制。通过以上的仿真实验，进一步验证了在通讯资源的使用和系统性能之间存在权衡，在设计时需要根据实际不同的系统选取恰当的事件触发参数。

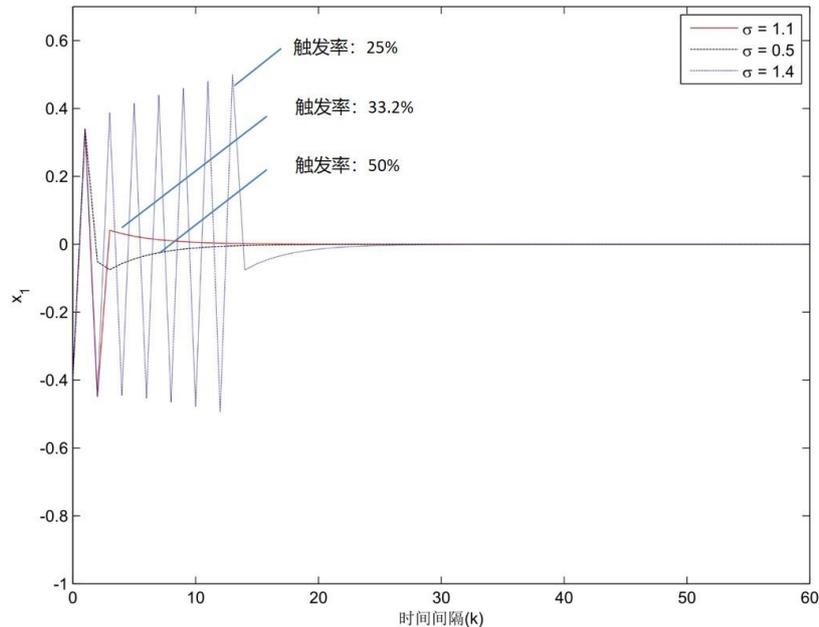


图 3-8 不同阈值调节参数下的状态相应对比

Figure 3-8 The comparison of state with different threshold adjustment parameter

3.5 小结

本章针对状态不可直接测量但是能观能控的线性系统，将预测事件触发控制方法进行扩展，提出了基于状态观测反馈的预测事件触发方法。该方法在传感器端结合了状态观测和基于模型动态的方法设计了事件触发器，以此来减少系统的数据传输。而在控制器端，一个前向预测控制器被设计来生成一系列的预测控制量打包并发送给执行器，来补偿系统运行过程中实时控制量的缺失。

通过稳定性分析，系统渐进稳定的充分条件以及观测器，控制器增益通过 LMI 的形式给出。此外，在该方法中，观测器增益和控制器增益可以独立求解，减小了系统设计过程中的耦合。最后通过数值仿真验证了该方法的有效性。

第四章 总结与展望

4.1 总结

在无线网络化控制系统中，有限节点能量的有效利用和相较于有线网络更加严重的丢包对系统影响较为重要。由于网络节点的能量有限，一个不考虑能源利用效率的控制方案可能会提早耗尽节点，提高系统维护成本；而控制数据的丢包则会直接影响系统性能。所以，无线网络化控制系统需要一个高效的控制策略来应对网络丢包，实现节点能量使用和系统性能的平衡。

通过挖掘通讯网络特性，本文提出了无线网络化控制系统的预测事件触发控制方法。该方法通过结合事件触发机制与基于包的控制方法的优点，在无线网络化控制系统中实现了节点能量使用和系统性能之间的平衡，能够保障系统性能的同时减少了数据传输。本文的主要研究内容总结如下，

1. 针对受扰无线网络化控制系统，本文提出了一种基于状态反馈的预测事件触发控制。在传感器端采用了基于状态估计的触发器来减少数据传输，特别设计的触发阈值可以确保状态估计和真实状态之间的差值中始终在一个合适的边界之下。在控制器端采用了基于包和动态模型的控制方法，能补偿控制信号的缺失。在稳定性分析中，得到了使得系统一致最终有界的充分条件和对应的控制器增益，并使用算法解决了不等式求解时的双线性问题。数值仿真表明该方法比传统事件触发更加鲁棒。

2. 针对状态不可直接测得的无线网络化控制系统，提出了基于观测反馈的预测事件触发控制方法。该方法在传感器采用基于观测状态的事件触发以减少系统的数据传输。在控制器端，基于包的前向预测控制器和控制序列的设计能够保证执行器端实时有合适的预测控制器去补偿网络丢包。为该方法下的控制系统建立闭环模型，在稳定性分析中求得的控制增益和观测器增益在求解时是相互独立的。最后通过一个数值仿真验证了方法的有效性。

4.2 展望

在无线网络化控制系统的研究中，对通讯网络的特性抽象以及接入调度和控制方案的联合设计一直都是该领域的热点和难点。在本文提出的方法中，网络丢包仅仅采用最大连续丢包上界作为网络特征的描述，并没有充分地抽象网

络通讯限制特性；而在事件触发的形式上，仅采用发送和不发送两种情况，并没有充分利用硬件设计（发射器）功率可调的特性，因此存在一定的保守性。在将来的研究中，可以更加深入地挖掘通讯网络的特性来优化控制系统设计，可以将事件触发的概念进行扩展，即当某一系统或网络中的“事件”发生时，触发器采用对应的功率发送数据（也可以不发送），以此减少控制方案的保守性。具体来说

1. 在无线链路中，信道中数据的成功传输不仅仅和发射功率有关，与信道质量，即信噪比也有关系。通常来说，一个信道质量较好的链路对应使信号必定成功传输的发射功率也越小。而通讯学科中，实际上可以通过信道测量得到无线链路的信道质量参数^[19, 63, 64]。由此，可以假设在每一操作时刻链路的质量参数可以获得，并在原有事件触发机制设计的基础上加入能量消耗约束。另一方面，考虑信号发射器有多种发射功率可选，当基于系统状态的事件触发发生时，对应当前信道质量信息选取何种发射功率使得保持系统性能的同时能量消耗最小。

2. 基于以上对网络特性提取，可以将无线网络化控制系统的事件触发控制与强化学习进行结合，利用强化学习得到系统的接入调度和控制量。近年来，强化学习理论得到蓬勃发展，而云控制的提出和 5G 通讯的商用也给强化学习与控制系统结合带来了契机^[65, 66]。当传感器向基于强化学习的控制器发送数据时，同时将信道质量信息封装进数据包内传输。在控制器生成控制输入之后，将当前的状态量、信道质量信息作为强化学习框架的输入，利用强化学习算法学习得到 k 时刻的控制输入和 $k + 1$ 时刻合适的发送功率，实现系统性能和能量的平衡。

参考文献

- [1] QIN J, MA Q, GAO H, et al. On Group Synchronization for Interacting Clusters of Heterogeneous Systems [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47 (12): 4122-4133.
- [2] QIN J, ZHANG G, ZHENG W X, et al. Adaptive Sliding Mode Consensus Tracking for Second-Order Nonlinear Multiagent Systems With Actuator Faults [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49 (5): 1605-1615.
- [3] HEEMELS W P M H, TEEL A R, VAN DE WOUW N, et al. Networked Control Systems With Communication Constraints: Tradeoffs Between Transmission Intervals, Delays and Performance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55 (8): 1781-1796.
- [4] 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.
- [5] MA C, LI T, ZHANG J. Consensus control for leader-following multi-agent systems with measurement noises [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2010, 23 (1): 35-49.
- [6] MA C, ZHANG J. On formability of linear continuous-time multi-agent systems [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2012, 25 (1): 13-29.
- [7] 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.
- [8] XIA Y-Q, GAO Y-L, YAN L-P, et al. Recent progress in networked control systems --- A survey [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2015, 12 (4): 343-367.
- [9] 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.
- [10] ARAUJO J, MAZO M, ANTA A, et al. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 10 (1): 175-184.
- [11] LI M, LIN H-J. Design and implementation of smart home control systems based on wireless sensor networks and power line communications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62 (7): 4430-4442.
- [12] DEMIR U, ERGEN S C. ARIMA-based time variation model for beneath the chassis UWB channel [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016 (1): 178.
- [13] PARK P, ARA JO J, JOHANSSON K H. Wireless networked control system co-design [C]. //2011 International Conference on Networking. Sensing and Control, 2011: 486-491.
- [14] PANG Z, LIU G, 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*, 2016, 63 (2): 1249-1257.
- [15] ZHAO Y, LIU G P, REES D. Improved predictive control approach to networked control systems [J]. *IET Control Theory Applications*, 2008, 2 (8): 675-681.
- [16] 王顺. 网络化线性切换系统有限时间控制问题研究 [D]; 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 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.
- [18] 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): 108-118.

- [19] AKYILDIZ I F, VURAN M C. Wireless sensor networks [M]. John Wiley & Sons, 2010.
- [20] BURBANK J L, ANDRUSENKO J, EVERETT J S, et al. Wireless networking: Understanding internetworking challenges [M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [21] 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, 2018, 13 (4): 594-601.
- [22] 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.
- [23] MAZO M, TABUADA P. Decentralized Event-Triggered Control Over Wireless Sensor/Actuator Networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56 (10): 2456-2461.
- [24] WANG L, GUO G, ZHUANG Y. Stabilization of NCSs by random allocation of transmission power to sensors [J]. Science China Information Sciences, 2016, 59 (6): 067201.
- [25] WANG X, LEMMON M D. Event design in event-triggered feedback control systems [C]. //2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2008: 2105-2110.
- [26] XIE X, LI S, XU B. Output-based event-triggered control for networked control systems: tradeoffs between resource utilisation and robustness [J]. IET Control Theory Applications, 2018, 12 (15): 2138-2147.
- [27] SHI L, CHENG P, CHEN J. Sensor data scheduling for optimal state estimation with communication energy constraint [J]. Automatica, 2011, 47 (8): 1693-1698
- [28] HAN D, CHENG P, CHEN J, et al. An online sensor power schedule for remote state estimation with communication energy constraint [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59 (7): 1942-1947.
- [29] WANG L, GUO G, ZHUANG Y. Networked control of battery-powered systems with communication scheduling and power allocation [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27 (17): 3488-3507.
- [30] WEN S, GUO G, CHEN B, et al. Transmission power scheduling and control co-design for wireless sensor networks [J]. Information Sciences, 2018, 442: 114-127.
- [31] HEEMELS W, JOHANSSON K H, TABUADA P. An introduction to event-triggered and self-triggered control [C]. //2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2012: 3270-3285.
- [32] ASTROM K J, BERNHARDSSON B. Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1999, 32 (2): 5006-5011.
- [33] DONG Y, CHEN J, XIAN J. Event-triggered control for finite-time lag synchronisation of time-delayed complex networks [J]. IET Control Theory Applications, 2018, 12 (14): 1916-1923.
- [34] 杨飞生, 汪璟, 潘泉. 基于事件触发机制的网络控制研究综述 [J]. 控制与决策, 2018, 6: 969-977.
- [35] YANG H, GUO X, DAI L, et al. Event-triggered predictive control for networked control systems with network-induced delays and packet dropouts [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28 (4): 1350-1365.
- [36] PENG C, YUE D, FEI M R. A Higher energy-efficient sampling scheme for networked Control systems over IEEE 802.15.4 wireless networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12 (5): 1766-1774.

- [37] PENG C, YANG T C. Event-triggered communication and H_∞ control co-design for networked control systems [J]. *Automatica*, 2013, 49 (5): 1326 - 1332.
- [38] WANG X, LEMMON M D. Event-triggering in distributed networked control systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56 (3): 586-601.
- [39] LUNZE J, LEHMANN D. A state-feedback approach to event-based control [J]. *Automatica*, 2010, 46 (1): 211-215.
- [40] GIRARD A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60 (7): 1992-1997.
- [41] GU Z, YUE D, TIAN E. On designing of an adaptive event-triggered communication scheme for nonlinear networked interconnected control systems [J]. *Information Sciences*, 2018, 422: 257 - 270.
- [42] VELASCO M, MART P, BINI E. On Lyapunov sampling for event-driven controllers [C]. //Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference. IEEE, 2009: 6238-6243.
- [43] ANTA A, TABUADA P. To sample or not to sample: self-triggered control for nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55 (9): 2030-2042.
- [44] CERVIN A, HENNINGSSON T. Scheduling of event-triggered controllers on a shared network [C]. //2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2008: 3601-3606.
- [45] BLIND R, ALLGWER F. Analysis of networked event-based control with a shared communication medium: Part i—pure aloha [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44 (1): 10092-10097.
- [46] HEEMELS W P M H, DONKERS M C F, TEEL A R. Periodic event-triggered control for linear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58 (4): 847-861.
- [47] HEEMELS W P M H, DONKERS M C F. Model-based periodic event-triggered control for linear systems [J]. *Automatica*, 2013, 49 (3): 698 - 711.
- [48] WU W, REIMANN S, GORGES D, et al. Event-triggered control for discrete-time linear systems subject to bounded disturbance [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26 (9): 1902-1918.
- [49] ABDELRAHIM M, POSTOYAN R, DAAFOUZ J, et al. Co-design of output feedback laws and event-triggering conditions for linear systems [C]. //53rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2014: 3560-3565.
- [50] XING L, WEN C, LIU Z, et al. Event-Triggered Adaptive Control for a Class of Uncertain Nonlinear Systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62 (4): 2071-2076.
- [51] YUE D, TIAN E, HAN Q. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58 (2): 475-481.
- [52] PENG C, ZHANG J. Event-triggered output-feedback H_∞ control for networked control systems with time-varying sampling [J]. *IET Control Theory Applications*, 2015, 9 (9): 1384-1391.
- [53] WU D, SUN X, TAN Y, et al. On Designing Event-triggered schemes for networked control systems subject to one-step packet dropout [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12 (3): 902-910.
- [54] 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*, 2009, 18 (5): 1057-1067.

- [55] DEMIREL B, GUPTA V, JOHANSSON M. On the trade-off between control performance and communication cost for event-triggered control over lossy networks [C]. //2013 European Control Conference (ECC). IEEE, 2013: 1168-1174.
- [56] MAMDUHI M H, TOLIĆ D, MOLIN A, et al. Event-triggered scheduling for stochastic multi-loop networked control systems with packet dropouts [C]. //53rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2014: 2776-2782.
- [57] BAUMANN D, ZHU J-J, MARTIUS G, et al. Deep reinforcement learning for event-triggered control [C]. //2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2018: 943-950.
- [58] ZHAO Y, LIU G, REES D. Modeling and Stabilization of Continuous-Time Packet-Based Networked Control Systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2009, 39 (6): 1646-1652
- [59] BLANCHINI F. Ultimate boundedness control for uncertain discrete-time systems via set-induced Lyapunov functions [J]. IEEE Transactions on automatic control, 1994, 39 (2): 428-433.
- [60] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge university press, 2004.
- [61] BOYD S, EL GHAOU L, FERON E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Siam, 1994.
- [62] FU W, YANG S X, HUANG C, et al. Predictive triggered control for networked control systems with event-triggered mechanism [J]. Cluster Computing, 2017: 1-11.
- [63] GATSIS K, RIBEIRO A, PAPPAS G J. Optimal power management in wireless control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59 (6): 1495-1510.
- [64] GATSIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic control over shared wireless channels [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60 (12): 3140-3155.
- [65] 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.
- [66] DEMIREL B, RAMASWAMY A, QUEVEDO D E, et al. DeepCAS: A Deep Reinforcement Learning Algorithm for Control-Aware Scheduling [J]. IEEE Control Systems Letters, 2018, 2 (4): 737-742.

致 谢

硕士研究生阶段即将画上句号，借此文感谢所有在硕士阶段帮助我，支持我的人。

首先感谢我的导师赵云波教授，赵老师求真务实，一丝不苟的治学态度深深影响着我。在期刊论文的撰写过程中，赵老师不断地引导我的写作，指出工作的不足，并在文章的创新点的表达上提出许多建设性意见，令我受益匪浅。生活中，赵老师关心学生，平易近人，能给予学生最需要的帮助。

研究生的实验室生活总是丰富充实的，但也不总是一帆风顺，感谢在 3 年来一起努力的同学们。特别感谢李鹏飞师兄在科研上的指点和迷茫时的引导。感谢 16 级各位师兄师姐在 2 年中对我科研上的帮助，感谢 2017 级小伙伴在论文上对我的启发，感谢实验室师弟师妹们的鼓励，难忘这些年与你们共同努力的时光。

最后感谢我的父母和亲人们。每通电话都能感受到你们的关切，每次返校前都能感受到你们的不舍，这些年在家的时间不多，感谢你们一直以来的支持和理解。

作者简介

1 作者简历

1994年12月生于浙江省温州市。

2013年9月——2017年6月，就读于浙江科技学院自动化与电气工程学院自动化系，获得工学学士学位。

2017年9月——2020年6月，就读于浙江工业大学信息工程学院控制科学与工程专业，攻读工学硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] Zhao Y-B, Pan X, Yu S. Predictive Event-Triggered Control for Disturbanced Wireless Networked Control Systems [J]. Journal of System Science and Complexity.
- [2] Li P, Kang Y, Zhao Y B, X Pan. Channel-Aware Scheduling for Multiple Control Systems with Packet-Based Control over Collision Channels[C]. //2019 American Control Conference (ACC). IEEE, 2019: 810-815.

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).

学位论文数据集

| | | | |
|---|--|---------------|------------|
| 密 级* | 中图分类号* | UDC* | 论文资助 |
| 公开 | TH273 | 621.3 | |
| 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* | 无线网络化控制系统的预测事件触发设计和分析 | | |
| 关键词* | 无线网络化控制系统,事件触发,预测补偿,基于包的控制 | | 论文语种* |
| 并列题名* | Predictive Event-Triggered Control Design and Analysis for Wireless Networked Control Systems | | 中文 |
| 作者姓名* | 潘晓康 | 学 号* | 2111703041 |
| 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 | 310014 |
| 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 | 2020 年 |
| 论文提交日期* | 2020 年 6 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 | 石崇源 | 宣琦、赵云波、陈晋音、黄亮 | |
| 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* | 46 页 | | |
| 注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。 | | | |