



浙江工业大学

本科毕业设计论文

题目：基于 TrueTime 的事件触发无线网络化
控制系统设计与仿真

作者姓名 李信炜

指导教师 赵云波教授

专业班级 自动化 1604

学 院 信息工程学院

提交日期 2020 年 6 月 20 日

浙江工业大学本科毕业设计论文

基于 TrueTime 的事件触发无线网络化控制系统设计
与仿真

作者姓名：李信炜

指导教师：赵云波教授

浙江工业大学信息工程学院

2020 年 6 月

**Dissertation Submitted to Zhejiang University of Technology
for the Degree of Bachelor**

**Design and Simulation of Event-triggered Wireless
Networked Control System Based on TrueTime**

Student: Xinwei Li

Advisor: Professor Yunbo Zhao

**College of Information Engineering
Zhejiang University of Technology**

June 2020

浙江工业大学

本科生毕业设计(论文、创作)诚信承诺书

本人慎重承诺和声明：

1. 本人在毕业设计（论文、创作）撰写过程中，严格遵守学校有关规定，恪守学术规范，所提交的毕业设计（论文、创作）是在指导教师指导下独立完成的；

2. 毕业设计（论文、创作）中无抄袭、剽窃或不正当引用他人学术观点、思想和学术成果，无虚构、篡改试验结果、统计资料、伪造数据和运算程序等情况；

3. 若有违反学术纪律的行为，本人愿意承担一切责任，并接受学校按有关规定给予的处理。

学生（签名）：

年 月 日

浙江工业大学

本科生毕业设计（论文、创作）任务书

专业 自动化 班级 自动化 1604 学生姓名/学号 李信炜/201603080308

一、设计（论文、创作）题目：

基于 Truetime 的事件触发无线网络化控制系统设计与仿真

二、主要任务与目标：

1. 阅读相关文献，了解本领域研究现状；
2. 归类总结认知偏差类型，选择待研究认知偏差；
3. 选择合适方法进行认知偏差识别；
4. 撰写毕业论文。

三、主要内容与基本要求：

本课题旨在通过事件触发机制，设计高效的 WNCSS 控制方案，并使用 truetype 进行控制方案的仿真验证，最后编写对应的 truetype 仿真的说明文档。学生须具备的技能：1. 一定的英文科技文献阅读能力。2. 一定的理论公式推导能力；3. 熟悉 C++，Matlab 编程，以实现网络化控制系统的仿真编程

四、计划进度：

- 2019 开学前 收集相关资料文献，学习相关知识，完成外文翻译、文献综述；熟悉课题，做好开题准备 - 第 1-3 周 完成开题报告，参加开题交流 - 第 4-8 周 完成控制系统方案的设计和稳定性证明的推导，接受中期检查 - 第 9-14 周 完成基于 truetype 工具箱的控制方案仿真验证，撰写相应的仿真说明文档，并撰写毕业论文 - 第 15 周 修改毕业论文，参加毕业答辩，提交相关文档资料

五、主要参考文献：

[1] Wu W, Reimann S, G?rges 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. [2] 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. [3] 何莹, 孙剑. 矩阵实验室的仿真工具 TrueTime 设计[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(11): 70-74.

任务书下发日期 2019 年 12 月 31 日

设计（论文、创作）工作自 2020 年 01 月 01 日 至 2020 年 6 月 10 日

设计（论文、创作）指导教师 赵云波

系主任（专业负责人）_____

主管院长 _____

基于 TrueTime 的事件触发无线网络化控制系统设计与仿真

摘 要

近年来,随着无线通讯技术、嵌入式计算和智能传感器的高速发展,控制系统通过无线网络来实现传感器、执行器和控制器之间信息传输,形成了无线网络控制系统。无线网络控制系统具有构建及维护成本低、易于布设及故障诊断、扩展性和灵活性强,并且能够在恶劣甚至无法布线的环境中工作等优点,但同时也存在网络时延和丢包、通信中断、抗干扰性差、功率有限等问题,所以无线网络控制系统现已成为控制领域的研究热点之一。

本文的主要工作是针对无线网络控制系统存在的网络能量问题,设计事件触发机制以及功率控制任务的方式进行优化,减少网络中控制节点的能量消耗。并利用 TrueTime 工具箱对设计的方案进行仿真,验证了本文所提出的控制方法的有效性。另外,通过对工具箱内网络参数的调节,得到了在该控制方法下系统稳定的临界网络参数。本文主要工作如下:

1. 使用 MATLAB 的 Simulink 以及 TrueTime 工具箱对具有节点能量限制和丢包问题的无线网络控制系统建立特定的仿真模型。
2. 基于 PID 控制算法,对本文所建立系统的控制器进行设计,并同时在传感器/执行器节点和控制器节点中执行添加功率控制任务,以达到让系统节点以尽量小的发射功率进行数据发送,从而减少控制节点能量消耗的目的。
3. 对传感器采用事件触发机制,在满足系统稳定的前提下,减少传感器节点发送数据的次数,达到减少系统能量损耗的目的。
4. 对本文所建立系统中的无线网络模块的网络传输速率和丢包率进行调节,以确定在本文提出的控制方法下系统稳定的临界网络参数,验证本文提出的控制方法的有效性。

关键词: 无线网络控制系统, TrueTime 工具箱, 事件触发, 功率控制, PID 控制

Design and Simulation of Event-triggered Wireless Networked Control System Based on TrueTime

ABSTRACT

In recent years, with the rapid development of wireless communication technology, embedded computing and intelligent sensors, the control system realizes information transmission among sensors, actuators and controllers through wireless network, forming a wireless network control system. Wireless network control system has the advantages of low construction and maintenance cost, easy to set up and fault diagnosis, strong scalability and flexibility, and can work in harsh or even no wiring environment. However, wireless network control system also has network delay and packet loss, communication interruption, poor anti-interference, limited power and other problems, so wireless network control system has become one of the research hotspots in the field of control.

The main work of this paper is to solve the network energy problem in wireless network control system by designing event triggering mechanism and power control task. The purpose is to reduce the energy consumption of control nodes in the network. Then the TrueTime toolbox is used to simulate the designed scheme and the effectiveness of the proposed control method is verified. In addition, by adjusting the network parameters in the toolbox, the stable critical network parameters under the control method are obtained. The main work of this paper is as follows:

1. MATLAB Simulink and TrueTime toolbox are used to build a specific simulation model for wireless network control system with node energy limit and packet loss problem.

2. Based on PID control algorithm, the controller of the system established in this paper is designed, and power control tasks are added to sensor/actuator nodes and controller nodes at the same time, so as to make the system nodes send data with as

little transmitting power as possible, so as to reduce the energy consumption of control nodes.

3. The event triggering mechanism is adopted for the sensor to reduce the number of data sent by the sensor node on the premise of meeting the stability of the system, so as to reduce the energy loss of the system.

4. Adjust the network transmission rate and packet loss rate of the wireless network module in the system established in this paper to determine the critical network parameters of the system stability under the control method proposed in this paper, and verify the effectiveness of the control method proposed in this paper.

Keywords: wireless network control system, TrueTime toolbox, event trigger, power control, PID control

目 录

摘要	I
ABSTRACT	I
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.1.1 无线网络控制系统的概念	1
1.1.2 无线网络控制系统存在的问题	2
1.1.3 本课题研究的内容及意义	3
1.2 研究现状	3
1.2.1 无线网络控制系统的研究方向	3
1.2.2 无线网络控制系统基于 TrueTime 的仿真研究	4
1.2.3 基于事件触发机制的网络控制系统研究	5
1.2.4 关于无线网络控制系统时延与丢包问题的研究	6
1.3 论文组织结构	7
1.4 本章小结	8
第 2 章 基于 TrueTime 的无线网络控制系统设计与仿真	9
2.1 TrueTime 工具箱简介	9
2.2 系统建模	11
2.2.1 系统描述	11
2.2.2 模型建立	12
2.3 基于 PID 控制器设计	15
2.4 功率控制设计	15
2.5 基于事件触发的传感器设计	17
2.6 本章小结	18
第 3 章 仿真实验结果与分析	19
3.1 实验概况	19
3.2 实验结果与分析	19
3.3 本章小结	22
第 4 章 总结与展望	23
4.1 总结	23
4.2 未来展望	24
参考文献	25
附录	27

致谢29

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 无线网络控制系统的概念

随着人类生活与生产活动的不断发展，人们面对着控制对象越加丰富，控制系统越加复杂，控制环境越加特殊的现实，而传统的控制方式越来越难以满足现今的一些控制要求。随着通讯、控制和计算机等技术的不断进步，网络控制系统应运而生。网络控制系统是一种基于通信网络的控制系统，网络控制系统可通过公共的通信网络将控制器、传感器、执行器以及被控对象等连接起来。网络控制系统分为有线网络控制系统和无线网络控制系统，或者有线和无线两者相结合的网络控制系统。

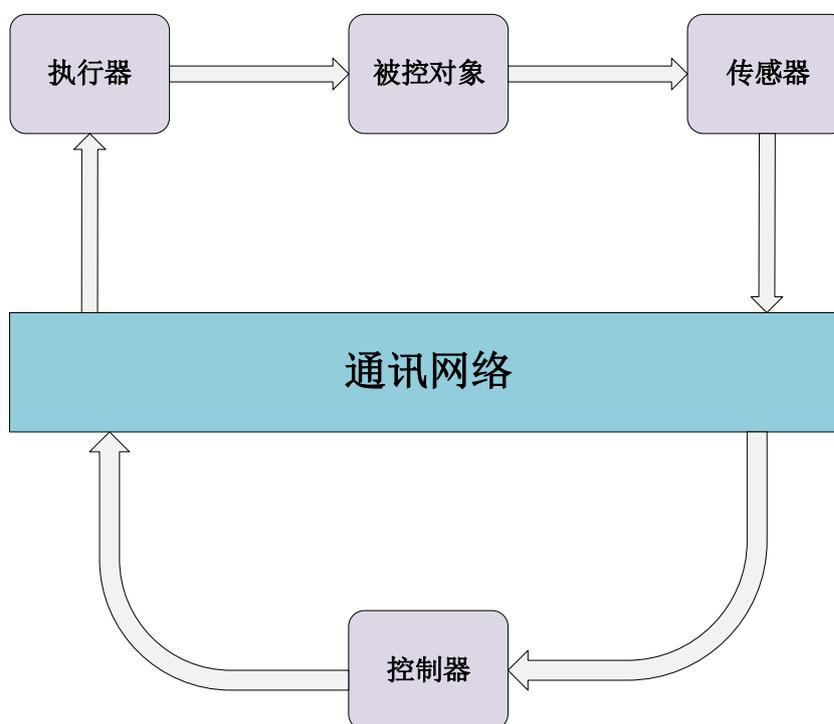


图 1-1 无线网络控制系统框图

无线网络控制系统是一种通过无线通信网络将控制系统的各个节点连接起来的分布式实时控制系统。相对于传统的布线式点对点有线控制方式，无线网络控制系统采用无线网络进行数据交互和实时控制，摆脱了传统控制方式存在的空间位置限制，使得控制系统的各节点能远程分布，从而实现远程控制。

无线网络控制系统具有建设成本低、无需布线、维护方便、易于故障诊断、扩展性好、灵活性强等优点，所以无线网络控制系统能满足一些特殊的控制需求，比如在控制对象可运动，控制对象处于人类难以忍受的甚至无法布线的恶劣环境的控制场合下，有着无法取代的作用。在现实的生活和生产活动中，无线网络控制系统在现场数据采集、工业控制、核反应堆监控、智能建筑、无人驾驶、医疗设备等领域的应用也在逐步深入。

1.1.2 无线网络控制系统存在的问题

无线网络控制系统具有很好的实际应用意义，但在拥有广大应用前景跟控制优点的同时，无线网络控制系统也具有一些问题有待优化解决。以下几点是无线网络控制系统目前面临的主要问题：

1. 随机时延及丢包。在网络环境中，由于控制系统的多个节点共享通信线路，通信过程中流量的不规则变化，以及系统中控制器、传感器以及执行器各节点的数据处理时延和各节点之间的传输时延等，组成了无线网络控制系统中的网络诱导时延。网络诱导时延的产生，会影响到系统的控制性能，严重的时延还会导致系统的不稳定。与有线网络相比，无线网络的传输特点意味着控制数据在无线网络中将遭受更多的数据包丢失，且丢包具有随机性，这会直接影响控制系统的性能。

2. 传输功率有限。数据包在接收及发送数据的过程中，节点是需要消耗一定能量的，由于各节点供应能量的电池容量是有限的，为了尽可能地延长能量节点的工作时间以及考虑网络带宽的限制，会对系统的传输功率进行一定的限制。

3. 网络带宽有限。目前的无线通信还无法彻底取代电缆或光缆通信，因为无线网络的带宽要比有线网络小得多，通信能力比不上有线通信。

4. 噪声干扰。因为无线网络控制系统通过无线通信网络进行信息交互，而无线信号的传输极易受到外界干扰，环境噪声会占用一部分无线带宽，同时各节点

间也互相干扰，这些噪声干扰会造成一部分数据丢失，影响控制性能。

5. 通信中断。由于无线网络控制系统中的网络节点是可移动的，且共享通信信道，当出现网络堵塞或者因节点间相互竞争发送数据而导致数据碰撞的现象时，会导致数据传输过程中数据包丢失，如果丢包率较高，通信过程中则会出现连接中断的现象，如果发生长时间的通信中断，会严重影响到控制系统的稳定性。

1.1.3 本课题研究的内容及意义

无线网络控制系统具有无需布线、易于搭建维护、易扩展以及可移动性强等优点，它能满足一些传统的点对点有线控制系统难以应对甚至是完全不能实现的控制需求。但无线网络控制系统存在的一些问题也影响了它本身的控制性能。

本课题旨在基于 PID 控制算法，通过对传感器使用事件触发控制，并同时在传感器/执行器节点和控制器节点设置功率控制任务，在保证系统基本性能的前提下，降低节点的发射功率，从而解决无线网络控制系统因节点能量有限而导致的功率控制问题。另外在建立的系统模型中设置不同的络传输速率以及丢包率，以观察存在网络干扰时的控制效果，以便了解干扰对系统的影响程度。

1.2 研究现状

1.2.1 无线网络控制系统的研究方向

无线网络控制系统起始于 20 世纪 80 年代末 Ray 和 Halevi 等人关于集成通信控制系统的研究，它是一种控制器、传感器和执行器空间分布的，横跨网络通信和控制领域的实时分布式控制系统。90 年代后期，随着无线网络技术的快速发展，基于无线网络进行通信的网络控制系统已渐渐成为国内外控制领域学者研究的重点。目前研究人员主要从控制策略、网络优化以及综合两者协同设计这三个方面对网络控制系统进行研究^[1]。由于网络节点能量有限、无线通信信道快速多变、通信协议和被控对象参数不确定等原因，导致无线网络控制系统存在网络时延、数据包丢失、多跳传输和节点失效等问题，传统的控制方式方法已经不能适用于无线网络控制系统控制器的分析设计。因此，研究无线网络控制系统的网络时延、数据包丢失、功率控制、多跳传输和噪声干扰等问题更具实际意义和挑

战性。

对网络控制系统的研究,主要是从控制策略和网络调度这两个大的方向进行。控制策略方面的研究是对控制器进行设计,以克服网络环境对控制系统造成的不良影响,或者针对网络时延、丢包这类问题做出补偿方案的研究,以满足系统对稳定性、准确性、快速性三大性能的要求;网络调度则是进行网络协议的设计,以解决控制系统面对的网络时延、丢包和网络冲突等问题,或者对网络动态调度方案进行选择。无线网络控制系统的设计亦是上述两个角度考虑。而相对于网络调度方面的研究,当前无线网络控制系统在控制策略方面的研究则较少。

1.2.2 无线网络控制系统基于 TrueTime 的仿真研究

在对无线网络控制系统进行研究时,经常需要在一些合适的仿真平台上建模进行仿真实验,以此来验证所提出的理论与控制方案的有效性。网络控制系统是一种对实时性有较高要求的系统,因为它的采样过程是周期性的,所以要求其采样的实时数据能够尽量地在一个采样周期内经过通信网络传输到控制器上,而由控制器输出的信号也要求能在同一个采样周期内经过通信网络传输到执行器上。上述的信号传输过程对实时性是有要求的,需要实时的系统以及实时网络来支持。因此,常用的 MATLAB 仿真对于研究网络控制系统具有一定的不足。随着对网络控制系统越发深入的研究,一些适合网络控制系统研究的仿真工具被相继开发,例如 TrueTime、Jitterbug、NS-2 等。文献^[2]对 TrueTime 和 Jitterbug 进行了详细的介绍分析,以及分别通过这两个平台进行了相关的仿真设计,对两者进行比较,体现出两者的优缺点。其中, TrueTime 工具箱是一种基于 MATLAB/Simulink 的功能强大的联合仿真工具,可用于研究网络传输过程中存在的时延、丢包等问题对系统控制性能造成的影响,也可用于动态调度方法的实验研究,还可以对基于事件触发机制的控制系统进行研究等。由于 TrueTime 工具箱包含有线网络模块和无线网络模块,因此对网络控制系统来说,它是一种理想的虚拟仿真工具。文献^[3-5]除了对 TrueTime 工具箱进行介绍,还通过结合详细案例来说明如何使用 TrueTime 仿真网络控制系统。

学者们对无线网络控制系统基于 TrueTime 的仿真设计进行了许多研究。文献^[6]采用经典的 PID 控制算法作为无线网络控制系统控制器节点的控制算法,利

用 TrueTime 工具箱建立给定对象模型的电阻炉温度控制系统仿真模型并进行仿真实验,通过设置调节无线网络的网络时延、丢包率、网络传输速率各参数,得到了保证该系统能稳定运行的各参数参考值,随后在实际的实验平台上进行了参数设置指导下的温度控制实验,得到了响应快速、目标值稳定的无线温度控制效果。文献^[7]通过使用 MATLAB/Simulink 以及 TrueTime 工具箱,构建了一个无线网络控制系统的仿真模型进行仿真实验。通过比较仿真结果发现,在无线网络控制系统中采用 Fuzzy-PD 控制算法,其运行速度比使用模糊算法更快,其鲁棒性亦优于采用常规 PD 控制算法的系统。Fuzzy-PD 控制算法结合了模糊控制与 PD 控制的优点,能够实现快速、稳定的控制。文献^[8]通过用 TrueTime 工具箱搭建以具体的直流电机为被控对象的网络控制系统仿真模型,分别对以太网和令牌网进行仿真,通过仿真结果对比发现以太网的传输时延小,响应速度快,而令牌网的延时比较长,其仿真结果验证了 TrueTime 工具箱能有效地对网络控制系统进行实时仿真以及网络控制系统在使用以太网和令牌网这两种不同的网络协议时具有不同的时延特性和响应特点。文献^[9]以直流电机为控制对象,基于 TrueTime 建立了一个无线网络控制系统的仿真模型。通过路径损耗函数对无线网络控制系统的功率路径损耗进行研究,经过仿真实验得出信号传输的最远距离。根据仿真实验的结果得出了在信号传输的最远距离内,降低网络节点收发数据时的发射功率,可实现对无线网络控制系统节点进行功率控制的结论。文献^[10]为解决无线网络控制系统中传输模型的问题,建立了无线网络传输中网络延时和数据丢包之间的数学模型,对无线通信网络特性进行研究,为无线网络控制系统的控制器设计提供了参考。即在对无线网络控制系统进行研究时,可将网络实时仿真技术应用到其中,基于如 TrueTime 等合适的仿真平台构建无线网络的仿真模型。该仿真模型中的节点具有可移动性,且设有干扰节点,采用了 AODV 路由协议进行路由的自主选择,用来实现系统节点间的互相通信。然后再进行仿真,记录两节点间收发数据的时间。

1.2.3 基于事件触发机制的网络控制系统研究

在实际的无线网络中,节点电源的容量有限以及网络环境的复杂性,使得网络控制系统的发展受到约束,而基于事件触发的无线网络传输机制可以有效地解

决这两个问题，因此引起了学者们的兴趣，人们对其进行了深入的研究。又因为网络环境的不理想与复杂性，基于事件触发机制的无线网络传输策略仍有许多问题有待解决。1999年,文献^[11]中首次提出了基于事件触发机制的PID控制，并通过仿真实验，研究讨论了事件触发机制的思想。事件触发控制的基本思想就是在保证闭环系统符合一定的性能指标的情况下，一旦预先设定好的事件触发条件不成立，就随即执行相应的控制任务的控制方法。也就是说，事件触发控制就是保证系统具有一定性能的情况下，按需执行控制任务。

文献^[12]则对离散时间随机系统的事件触发故障诊断问题进行了着重研究。其研究内容有离散时间随机系统事件触发的故障检测问题，事件触发通信机制下离散时间随机系统的故障估计问题以及基于估计器的马尔可夫跳变系统事件触发故障估计与容错控制问题。

文献^[13]主要研究了通信网络带宽有限的情况下线性网络控制系统的事件触发控制与滤波问题，提出通过事件触发机制来有效地减少网络中的数据传输量，从而达到节省带宽资源的目的。通过引入事件触发机制，可减少网络控制系统中传感器节点的数据发送量，从而减少系统中控制器节点的计算频率以及执行器节点的执行次数。基于该事件触发机制，针对线性网络控制系统，从理论上详细分析了基于事件触发机制的网络控制系统的鲁棒控制与鲁棒滤波问题，得到了控制器与滤波器的存在性条件。

1.2.4 关于无线网络控制系统时延与丢包问题的研究

对无线网络控制系统来说,网络随机时延和丢包问题是对其系统性能影响最大的因素，是无线网络控制系统存在的问题中最应受到重视的。近年来，控制领域的学者对无线网络控制系统的时延丢包问题进行了许多相关研究。这一控制方法能够很好地提高系统的控制性能，减少无线网络通信数据，改善了无线网络控制系统的网络服务质量。虽然 T-S 模糊 PID 算法在一定程度上改善了系统的控制效果，但控制系统超调量较大的问题仍未得到有效解决。因此，文献^[14]提到将改进后的重置算法与变死区采样相结合，这样能更有效地提高系统的控制性能，降低无线网络控制系统的通信负载。

文献^[15]从无线网络控制系统控制策略的方向出发，对无线网络控制系统的

时延和丢包问题进行预测补偿算法的研究。因自适应模糊 PID 控制和预测补偿算法各有缺点,为互补不足,将自适应模糊 PID 控制算法分别与 Smith 时延预估补偿法,变遗忘因子丢包补偿法相结合,以更好地解决时延丢包问题。即通过设计改进一种基于控制器的 Smith 时延预估补偿的自适应模糊 PID 控制方法来解决网络时延问题,这类控制方案无需建立精确的无线网络控制系统模型,也能够应对网络时延对无线网络控制系统造成的不良影响。该控制方案可以对网络时延进行较好的补偿,提高了系统的控制性能。而针对无线网络控制系统的丢包问题,则通过使用一种变遗忘因子法来解决。变遗忘因子法通过以时变的遗忘因子作为一些历史数据包的权重来预测能够替代当前的丢包,以达到补偿数据丢包的目的。

文献^[16]通过采用状态重构方法解决网络控制系统因多包传输引入的丢包问题。即通过状态重构对网络控制系统因多包传输而丢失的信息进行补偿。然后针对存在丢包问题的多包传输网络控制系统的控制器设计问题,提出了基于观测器的控制规则对控制器进行设计的控制方案。

文献^[17]提出综合系统控制策略和网络调度两个方向设计无线网络控制系统控制器的思想,将 T-S 模糊 PID 控制算法与变死区采样结合以实现对无线网络控制系统网络延时和丢包问题的解决。同时研究了利用 IEEE802.15.4 实现无线网络系统的可能性;首先对该无线网络控制系统中的延时结构进行了详细分析,在此基础上,通过建立实验装置,以实验方式探讨了传输路径、信道竞争、信道错误、通讯带宽、采样周期等因素对网络延时影响;其得到的结论对于进一步研究无线传感器网络和无线网络控制系统的结合具有重要意义。

文献^[18]为解决时延的相关问题,采用了鲁棒控制以及切换系统理论与方法。针对网络控制系统存在的时变短时延,通过不确定系统和切换系统两种方法解决了指时变项问题。针对网络控制系统的时变长时延,则是通过切换系统和鲁棒控制的设计和建模来解决。而对于丢包问题,采用了随机系统、切换系统和时滞系统理论与方法解决。

文献^[19]基于 TrueTime 工具箱进行仿真实验,对得到的时延数据进行统计并加以分析,得出时延服从正态分布的结论,从而给出一个较为合理的网络诱导延时上界。确定了系统时延的上界,就可以在控制器和执行器节点处加入缓冲区,使前向通道和反馈通道的时延称为固定值,控制器和执行器都采用时间驱动方式,

这样就简化了状态方程，使得建模和分析按固定时延来进行。

1.3 论文组织结构

本文的主要研究内容是针对无线网络控制系统存在的功率有限问题采用事件触发机制，以及设计控制器功率控制任务的方式进行优化，减少无线网络控制系统中能量节点的能源消耗，并利用 TrueTime 工具箱对设计的方案进行仿真，验证本文所提出控制方法的有效性。另外，通过对工具箱内网络参数的调节，得到了在该控制方法下系统稳定的临界网络参数。主要章节内容如下：

第 1 章 绪论。主要介绍了无线网络控制系统的概念及存在的问题，以及本课题的研究内容和意义，并有侧重地总结了相关的研究现状，最后介绍本文的行文安排。

第 2 章 基于 TrueTime 的无线网络控制系统设计与仿真。主要对 TrueTime 工具箱中几个与本课题工作相关的模块进行介绍。然后进行系统描述，提出存在的问题，再根据系统存在的问题提出相应的控制方案。同时对本课题的控制器设计、传感器事件触发设计以及功率控制设计进行介绍，解释其如何达到减少无线网络控制系统节点能量消耗的目的。

第 3 章 仿真实验及结果。将仿真实验的结果进行展示并做出分析，通过实验结果的对比判断本课题提出的控制方法的有效性。

第 4 章 总论与展望。对全文研究工作进行总结，并提出研究工作中存在的不足，以及给未来该课题研究方向的一些看法与建议。

1.4 本章小结

本章作为全文绪论部分，主要讲述了本课题的研究背景及意义，以及有所侧重地对无线网络控制系统的研究现状进行综述，总结与课题相关的内容。最后介绍本文主要研究内容安排。

第 2 章 基于 TrueTime 的无线网络控制系统仿真

2.1 TrueTime 工具箱简介

TrueTime 工具箱是瑞典隆德（Lund）大学自动化系的 Martin Ohlin, Dan Henriksson 和 Anton Cervin 于 2002 年推出的基于 MATLAB/Simulink 的无线网络控制系统仿真工具箱。该工具箱针对每一特定的网络协议，可以实现控制系统与实时调度的综合仿真研究，是目前为止无线网络控制系统比较理想的仿真工具之一。TrueTime 模块库（如图 2-1 所示）提供了四个具有不同功能的模块，分别为 TrueTime Kernel、TrueTime Network、TrueTime Wireless Network 和 TrueTime Battery 模块。

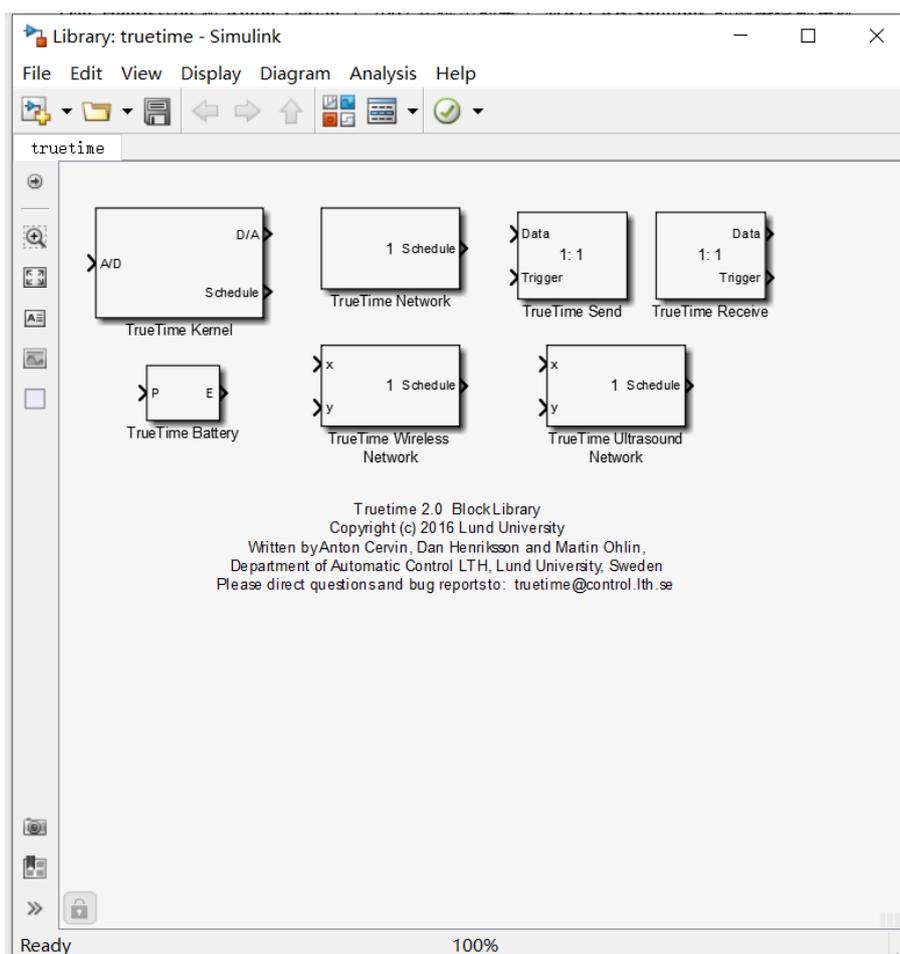


图 2-1 Library: TrueTime 窗口

1. TrueTime Kernel 模块

TrueTime Kernel 模块使用通用实时内核，A / D 和 D / A 转换器以及网络接口来模拟计算机节点，可被用作网络控制系统的网络节点，如传感器、控制器和执行器等。该模块是通过初始化脚本进行配置的。可以对脚本进行参数化，以使同一脚本可以用于多个节点。

在初始化脚本中，程序员可以创建对象，例如任务，计时器，中断处理程序，信号灯等，这些对象表示在计算机节点中执行的软件。在仿真过程中，内核会反复调用任务和中断处理程序的代码功能。代码函数可以依次包含任意函数调用，但是必须以指定每个代码段的执行时间的特殊格式编写。另一个限制是局部变量不会在代码段之间保留其值。

初始化脚本和代码功能可以用 MATLAB 代码或 C++编写。在 C++情况下，初始化脚本和代码功能是使用 MATLAB 的 MEX 工具编译的，从而加快了仿真速度。

TrueTime Kernel 模块支持各种抢先式调度算法，例如固定优先级调度和最早截止时间优先的调度，还可以指定自定义调度策略。

2. TrueTime Network 模块

TrueTime Network 模块模拟各种局域网的物理层和介质访问层。支持的网络类型为 CSMA / CD (以太网)，CSMA / AMP (CAN)，循环 (令牌总线)，FDMA，TDMA (TTP)，交换式以太网，WLAN (802.11b) 和 ZigBee (802.15.4)。这些模块仅模拟媒体访问(调度)，可能的冲突或干扰以及点对点/广播传输。诸如 TCP / IP 之类的更高层协议没有被仿真，但可以作为节点中的应用程序实现。

TrueTime Network 模块主要通过其模块对话进行配置。所有类型的网络的通用参数是比特率，最小帧大小和网络接口延迟。对于每种类型的网络，可以指定许多其他参数。例如，对于无线网络，可以指定发射功率，接收器信号阈值，路径损耗指数 (或特殊路径损耗函数)，ACK 超时，重试限制和错误编码阈值。

TrueTime 模型可能包含多个网络块，每个内核块可能连接到多个网络。每个网络由一个数字标识，并且连接到网络的每个节点由该网络唯一的数字寻址。

然后可以使用某些内核原语通过网络发送和接收任意的 MATLAB 结构数组。这种方法非常灵活，但是需要进行一些编程才能配置系统。第二种方法是使用独

立的网络接口模块。这些块消除了对内核块的需求，但是它们限制了网络数据包包含标量或矢量信号值。内核块和网络接口块可以在同一网络中混合使用。

3. TrueTime Wireless Network 模块

TrueTime Wireless Network 模块提供了无线网络传输信息的功能，目前支持的两种网络通信协议是 IEEE 802.11b/g(WLAN)和 IEEE 802.15.4(ZigBee)。

4. TrueTime Battery 模块

TrueTime Battery 模块为建立的仿真系统提供电源。

2.2 系统建模

2.2.1 系统描述

本文建立的是基于无线网络通信的，具有节点能量有限、时延和丢包问题的控制系统，系统结构图如图 2-2 所示。

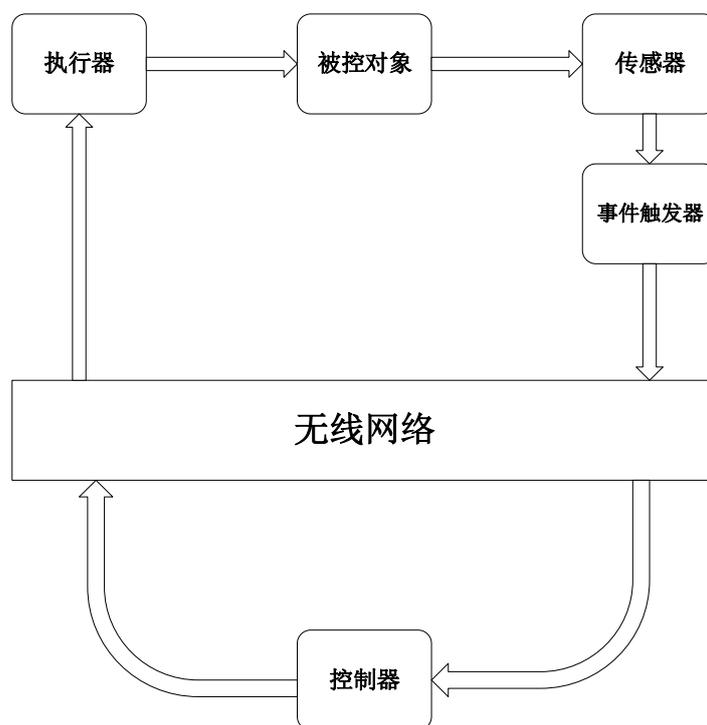


图 2-2 无线网络控制系统结构图

系统动态模型：
$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (2-1)$$

虽然对于控制系统来说数据发送得越多，系统控制性能越好，但因为系统节

点采用电池供电，能量有限，如果不对系统节点的数据发送频率和发送功率进行限制，会加速节点能量的耗尽，从而影响系统的控制效果。所有，在保证系统控制性能的前提下，应尽量减少系统节点的数据发送次数以及数据发送功率，以保证能量和系统性能之间的平衡。

2.2.2 模型建立

通过使用 MATLAB/Simulink 仿真环境，以及利用 TrueTime 工具箱中的 TrueTime Kernel 模块、TrueTime Wireless Network 模块以及 TrueTime Battery 模块，构建一个无线网络控制系统仿真模型，如图 2-3 所示。

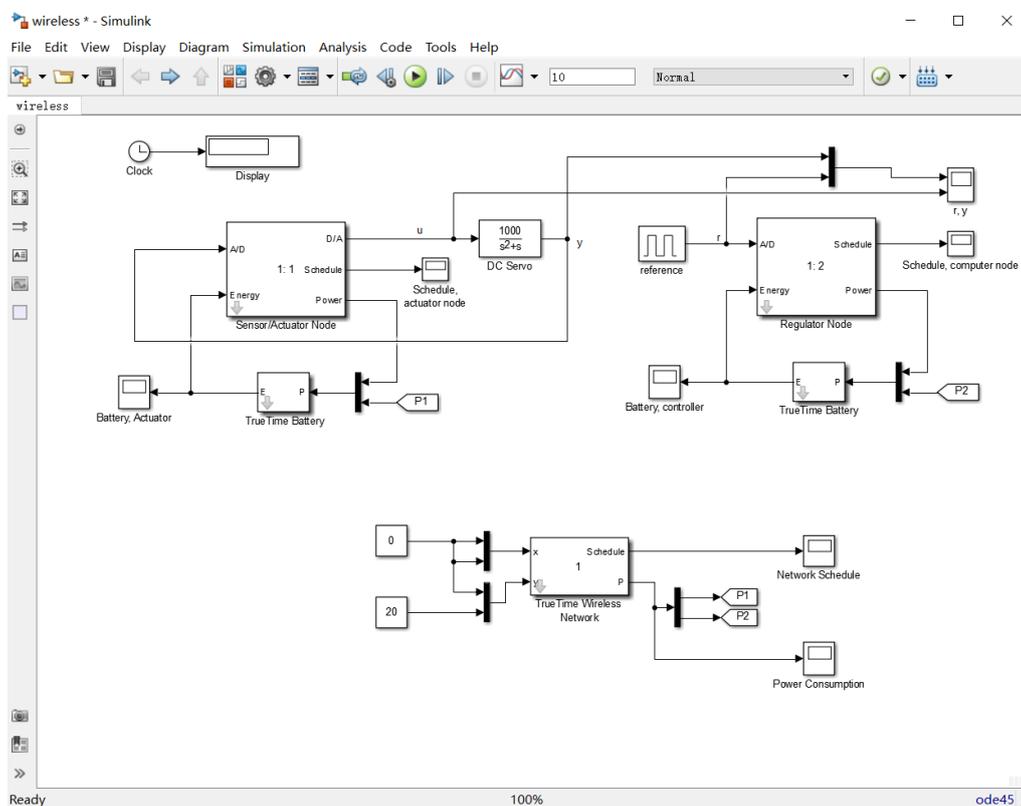


图 2-3 无线网络控制系统仿真模型

1. 执行器/传感器节点

执行器/传感器节点由 TrueTime Kernel 模块与 TrueTime Battery 模块组成。对执行器/传感器节点进行初始化，以及编辑其节点任务和网络中断程序，分别建立对应的 M 文件。

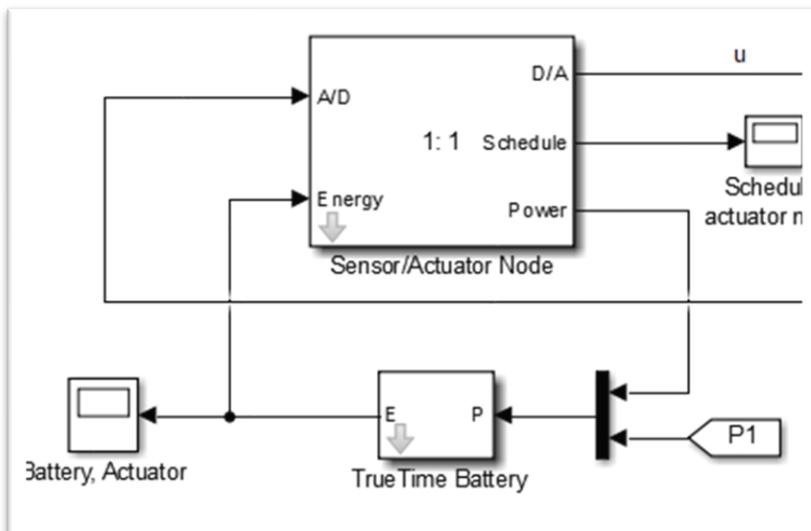


图 2-4 Node 1 传感器/执行器节点模型

2. 控制器节点

控制器节点由 TrueTime Kernel 模块与 TrueTime Battery 模块组成。对控制器节点进行初始化, 以及编辑其节点任务和网络中断程序, 分别建立对应的 M 文件。

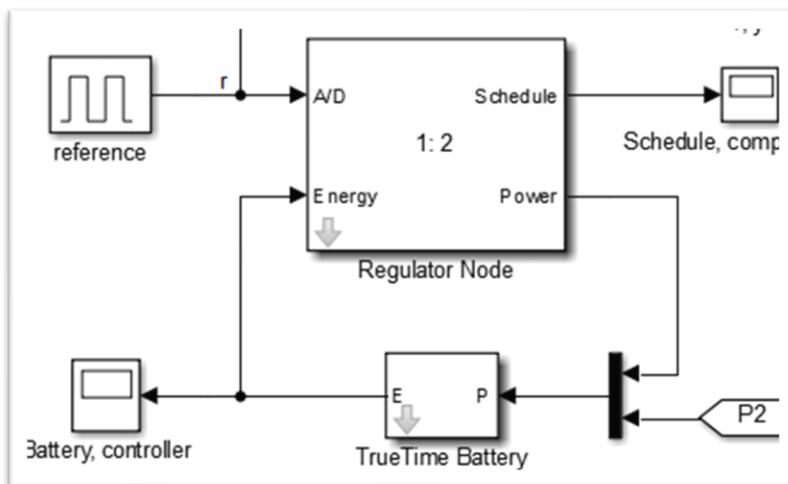


图 2-5 Node 2 控制器节点模型

3. 无线网络

无线网络部分由 TrueTime Wireless Network 模块组成, 并可设置各类网络参

数。

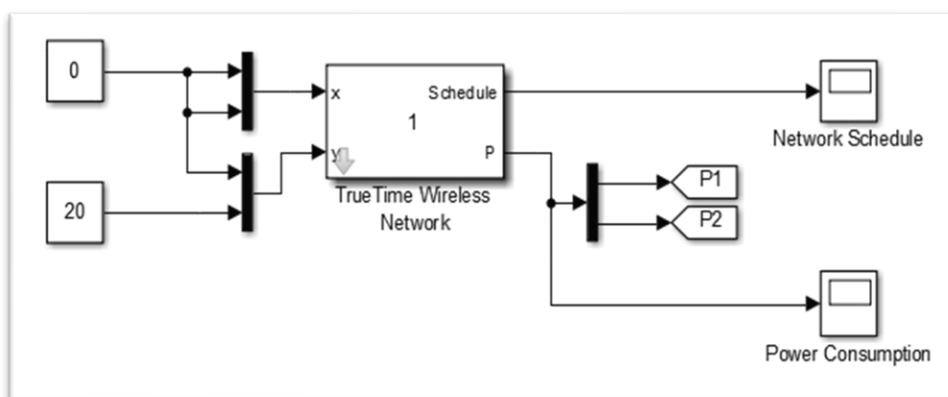


图 2-6 Wireless Network 模型

本文所建立系统的主要网络参数如下：

- (1) 网络速度 (Data rate) : 800000 bits/s
- (2) 发射功率 (Transmit power) : 30 dbm
- (3) 丢包率 (Loss probability) : 0
- (4) 网络协议 (Network type) : ZigBee

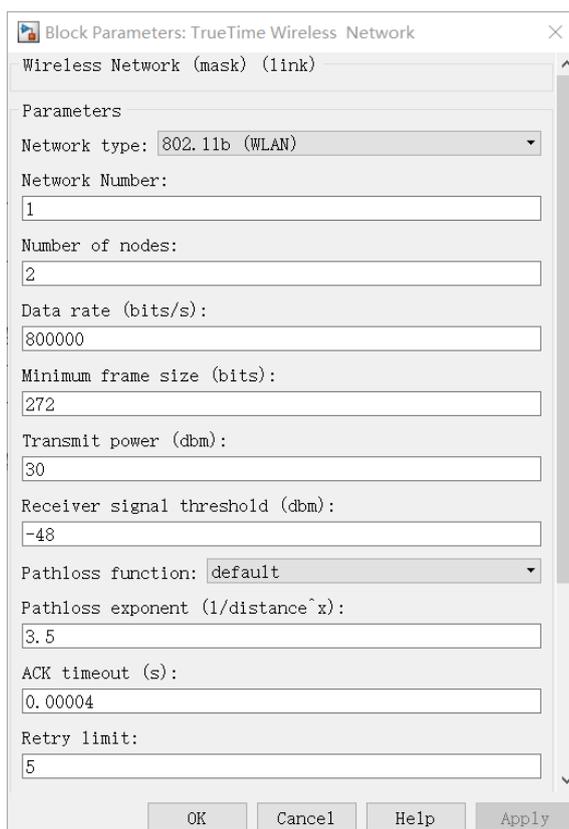


图 2-7 TrueTime Wireless 参数设置对话框

4. 被控对象

本课题拟将如下的直流伺服电机作为系统的被控对象：

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+1)} \quad (2-2)$$

2.3 基于 PID 的控制器设计

控制器采用 PID 控制，由以下方程实现：

$$P(k) = K \cdot (\beta r(k) - y(k)) \quad (2-3)$$

$$I(k+1) = I(k) + \frac{Kh}{T_i} (r(k) - y(k)) \quad (2-4)$$

$$D(k) = a_d D(k-1) + b_d (y(k-1) - y(k)) \quad (2-5)$$

其中， $a_d = \frac{T_d}{Nh+T_d}$ ， $b_d = \frac{NKT_d}{Nh+T_d}$ 。

控制器参数设置如下：

$$h = 0.010, N = 100000, T_d = 0.035, T_i = 0.14, K = 1.5$$

2.4 功率控制设计

本文将对控制系统设置功率控制任务。在系统进行无线通信的同时，功率控制任务同时在传感器/执行器节点和控制器节点中执行，通过周期性地将 ping 消息发送到各节点，以检测通信是否正常进行。如果收到答复，就假设系统通信正常且节点传输功率最小。若没有收到答复，传输功率则一直增加到最高值或再次收到答复。设计思路如下：

1. 在传感器/执行器节点初始化程序(`actuator_init.m`)中创建传感器/执行器任务、功率控制任务以及功率响应任务。在控制器节点初始化程序(`controller_init.m`)中创建控制器任务、功率控制任务以及功率响应任务。

2. 编辑功率响应程序(`powrespcode.m`)，其功能是若该节点收到确认信号，则发送 80bits 的信号给该确认信号的发送者，起到检测信道通畅的作用。

3. 编辑传感器/执行器节点网络中断程序(`msgRcvActuator.m`)，若获取的信号为控制器传过来的信号，则执行创建执行器任务；若获取的信号为确认信号，则执行功率响应任务。同理，编辑控制器节点网络中断程序(`msgRcvCtrl.m`)，若获取的信号为传感器传过来的信号，则创建控制器任务，执行 PID 控制；若获取的信号为确认信号，则执行功率响应任务。

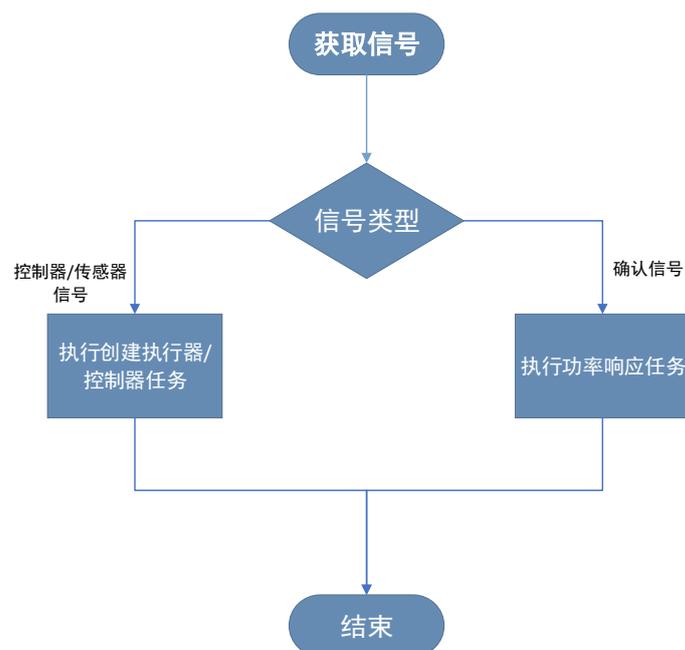


图 2-8 功率响应流程图

4. 编辑功率控制程序(powctrlcode.m), 将节点发射功率限制在 30dbm, 读取所有缓存信号, 然后判断是否收到功率确认信号。如果没有收到功率确认信号, 便逐步增大发射功率至最高发射功率, 如果收到确认信号, 则逐步减小发射功率。

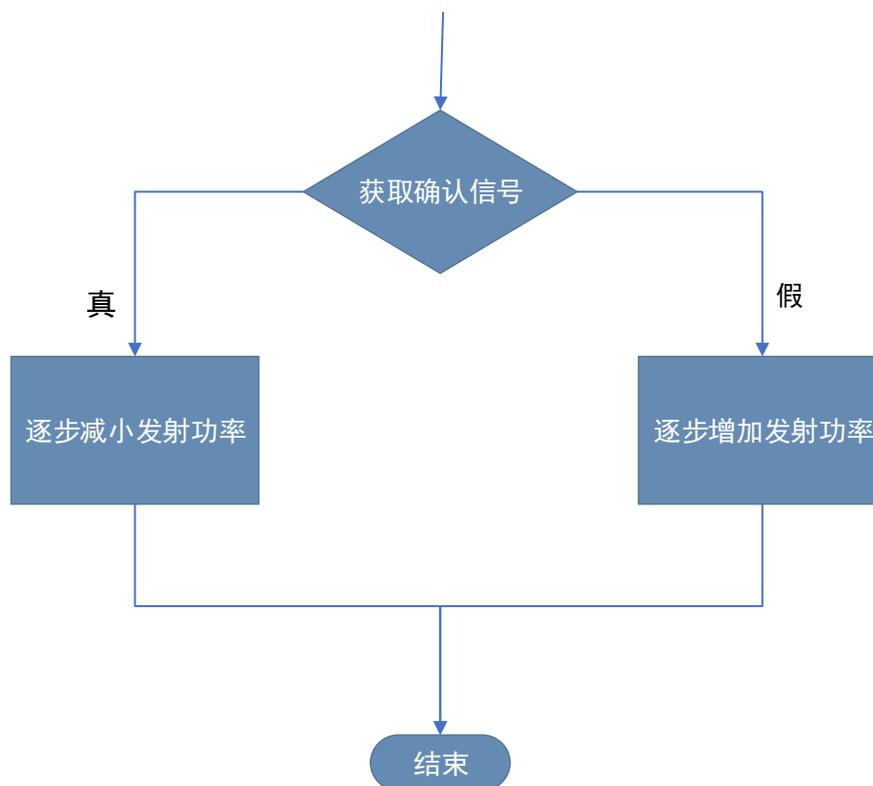


图 2-9 功率控制流程图

2.5 基于事件触发的传感器设计

一般来说, 无线网络控制系统中的传感器节点采用的是时间触发机制, 由时间触发的传感器节点会周期性地将所采样到的信号经由无线网络发送到控制器节点。但在无线网络控制系统中, 数据传输是各节点主要的能量消耗来源, 而数据传输在无线网络控制系统中成千上万的节点中进行, 这一过程需要消耗许多的能量。

本文将对传感器采用事件触发机制, 让其在满足一定的条件再进行数据传输, 减少不必要的传输次数, 可以一定程度地减少节点的能量损耗, 延长节点电池的使用时长。事件触发机制有三种不同类型的传输策略:

1. **Send-on-delta** 策略，通过对当前时刻获取的实时数据和上次传输时获取的数据求取差值，并将所求得的差值与事先确定好的阈值进行比较，以判断当前数据是否需要传输。

2. 输出误差对比策略，通过比较系统的实时数据与当前估计值的偏差，以判断当前获取的数据是否需要传输。

3. 误差协方差策略，基于估计误差的协方差，以决定数据是否需要传输。

本文采用的是 **Send-on-delta** 传输策略，采样周期为 h ，采样时刻记为 t_k ， $k \in \{1,2,3 \dots\}$ ， $j \in \{1,2,3 \dots\}$ ，样状态记为 $y(t_k)$ ，判断条件如下：

$$\left(y(t_{k+j}) - y(t_k) \right)^T \Phi \left(y(t_{k+j}) - y(t_k) \right) \leq \sigma y^T(t_k) \Phi y(t_k) \quad (2-6)$$

初始的发送时刻： $t_0 = 0$ ，当上面式子不满足的时候，传感器即发送数据。 Φ 是一个正定加权矩阵，事件触发的阈值 $\sigma = 0.2$ 。

2.6 本章小结

本章首先对 TrueTime 工具箱中几个与本课题工作相关的模块进行简单介绍。然后对所建立的具有节点能量有限、时延和丢包问题的无线网络控制系统进行问题描述，对所描述的系统建立模型，提出了解决系统问题的控制方案。然后介绍了本文所提出的控制方案的设计工作，即系统控制器的 PID 设计、功率控制设计和事件触发机制设计。

第 3 章 仿真实验结果与分析

3.1 实验概况

本文主要对基于 PID 控制，采用事件触发机制以及功率控制策略的无线网络控制系统进行建模仿真。实验分为以下两步：

1. 通过比较使用本文提出的控制方案前后的系统控制效果以及控制器节点的能量消耗情况，证明本文所提出的控制方案的有效性。

2. 在得出控制效果对比结果后，分别对系统无线网络模块的网络传输速率和丢包率两个网络参数进行调节，逐步调节至系统失控的数值。这样便能得到保证本文描述的控制系统稳定的网络参数临界值，以及了解到本文提出的控制方案的控制效果。

3.2 实验结果与分析

1. 首先对不采用事件触发机制以及不设置功率控制任务的模型进行仿真，图 3-1 为控制效果图(1)，图 3-2 为控制器节点电源消耗曲线图(1)。

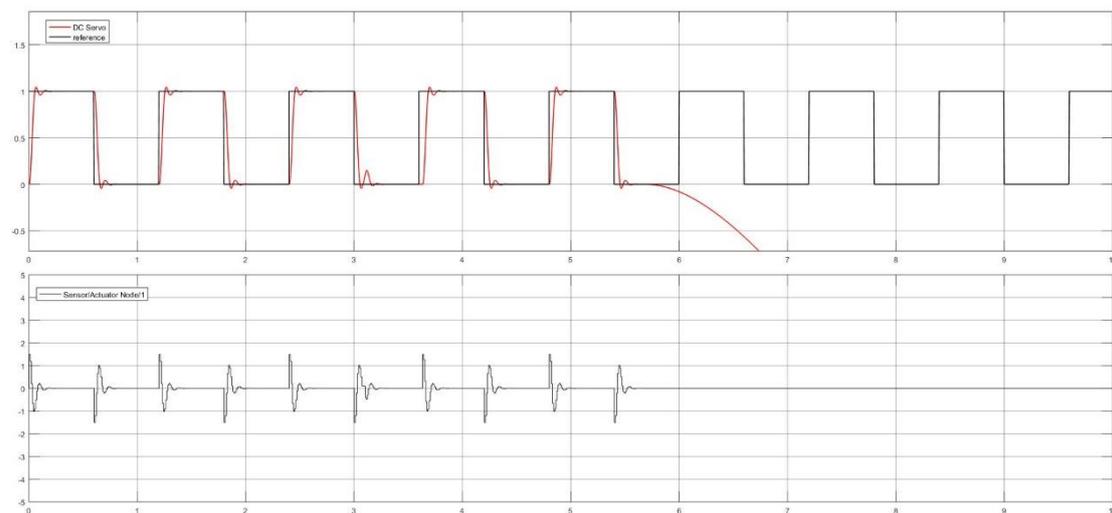


图 3-1 控制效果图(1)

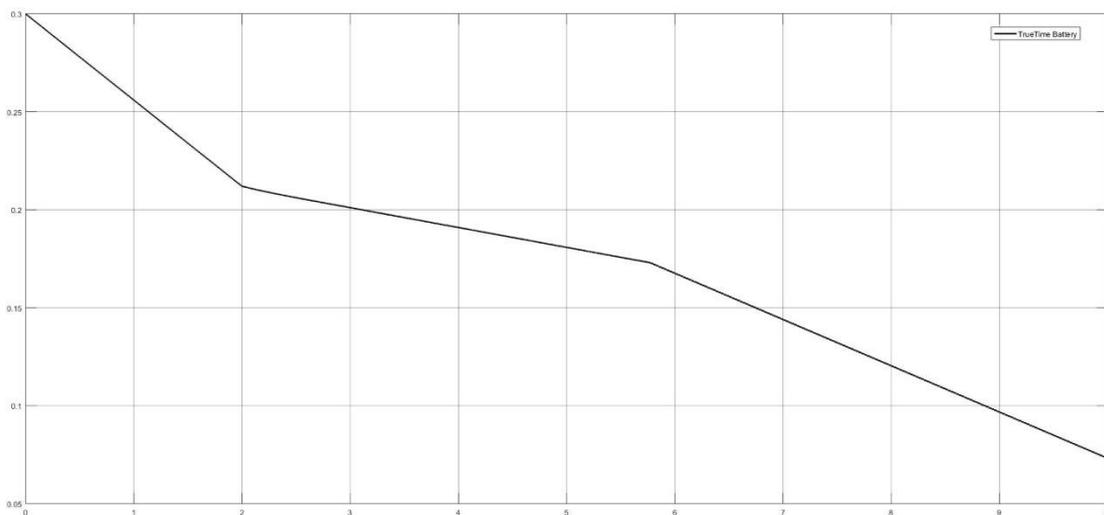


图 3-2 控制器节点电源消耗曲线图(1)

由仿真结果可知，在传感器不采用事件触发机制以及控制器不执行功率控制任务时，控制器节点中的电力消耗较快，在电池耗尽能量时系统失去控制。

2. 然后对采用事件触发机制以及设置功率控制任务的模型进行仿真，图 3-3 为控制效果图(2)，图 3-4 为控制器节点电源消耗曲线图(2)。



图 3-3 控制效果图(1)



图 3-4 控制器节点电源消耗曲线图(2)

由仿真结果可知,在传感器采用事件触发机制以及控制器执行功率控制任务时,控制器节点中的电力消耗比系统不采用事件触发以及功率控制时要慢,系统的控制效果较好。

3. 对 TrueTime Wireless Network 模块的网络传输速率以及丢包率进行调节,以至取得该控制方法下系统稳定的临界网络参数。

经调试,得出本实验模型的网络传输速率低于 290000 bits/s, 以及丢包率高于 0.42 时,系统控制效果变差以至失控的结果。见图 3-5, 图 3-6。

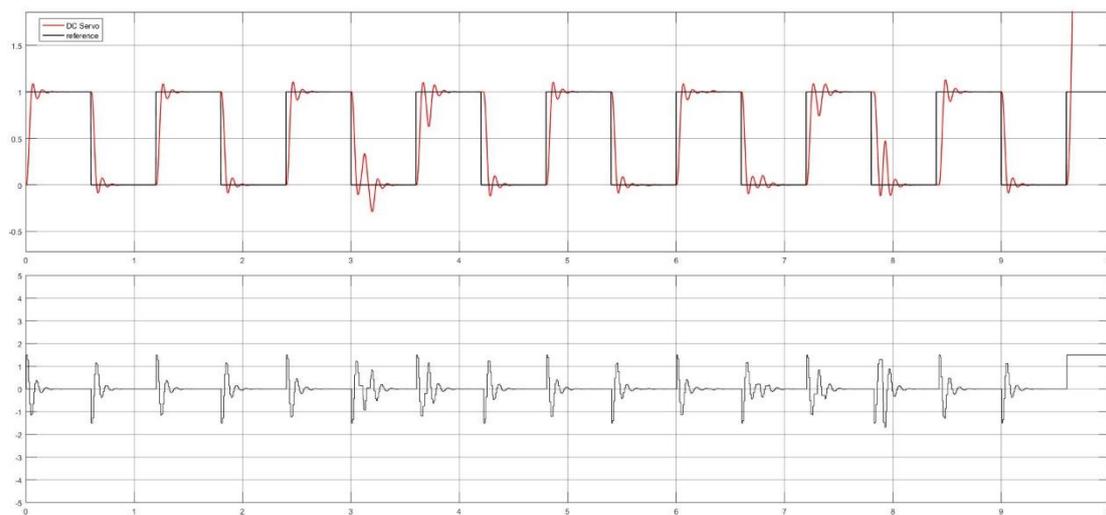


图 3-5 网络传输速率为 290000 bits/s 的控制效果

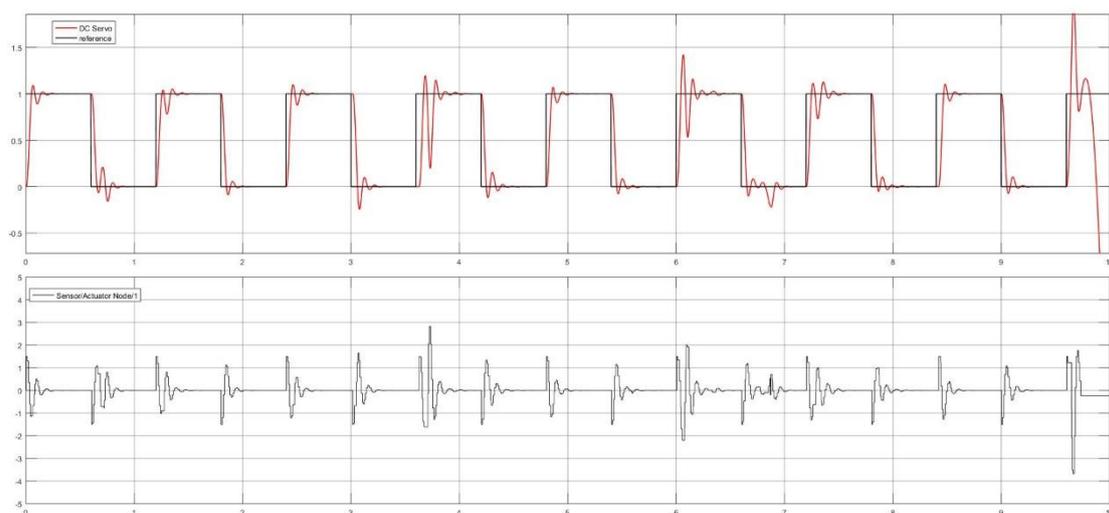


图 3-6 丢包率为 0.42 的控制效果

3.3 本章小结

本章主要对本文的实验方法进行概括，然后对仿真得出的结果进行分析。由实验结果可知，本文提出的控制方案对系统的节点能量消耗问题和丢包问题有较好的效果。在对系统采用事件触发机制以及功率控制后，系统的节点能耗速度得到放缓。同时通过逐步调节设置，得出了系统在该控制方法下保持稳定的临界网络参数，系统分别在丢包率为 0.42 和网络传输速率为 290000 bits/s 的情况下才逐渐失控直至失去控制，说明本文所描述的系统使用的 PID 控制具有较好的控制效果。

第 4 章 总结与展望

4.1 总结

本文的主要工作是基于 PID 控制算法，设计事件触发机制以及功率控制任务，解决无线网络控制系统的节点能量限制问题，即尽可能减小节点的传输功率以及减少节点发送数据的次数，以达到减少无线网络控制系统中节点的能量使用的目的。并利用 TrueTime 工具箱对设计的方案进行仿真，验证了本文所提出的控制方法的有效性。

同时对无线网络控制系统仿真模型中的 TrueTime Wireless Network 模块的网络传输速率和丢包率这两个参数进行调节，得到了在该控制方法下系统稳定的临界网络参数。本文主要工作如下：

1. 使用 MATLAB 的 Simulink 以及 TrueTime 工具箱对具有节点能量限制和丢包问题的无线网络控制系统建立特定的仿真模型。

2. 基于 PID 控制算法，对本文所建立系统的控制器进行设计，并同时在传感器/执行器节点和控制器节点中执行添加功率控制任务，以达到让系统节点以尽量小的发射功率进行数据发送，从而减少控制节点能量消耗的目的。

3. 对传感器采用事件触发机制，在满足系统稳定的前提下，减少传感器节点发送数据的次数，达到减少系统能量损耗的目的。

4. 对本文所建立系统中的无线网络模块的网络传输速率和丢包率进行调节，以确定在本文提出的控制方法下系统稳定的临界网络参数，验证本文提出的控制方法的有效性。

经仿真实验证明，本文所采用的控制方案具有减少系统节点能量消耗的效果。通过对比仿真结果可以发现，采用事件触发机制以及控制器执行功率控制任务时，控制器节点中的电力消耗比系统不采用事件触发以及功率控制时要慢，且系统的控制效果较好。

在设置网络传输速率和丢包率的仿真结果对比中，可以看出传输速率过低以及数据丢包率过高会对系统性能造成很大影响，使系统不再稳定。通过实验，也得到了本文提出的控制方法下系统稳定的临界网络参数，即网络传输速率低于 290000 bits/s，以及丢包率高于 0.42 时，系统控制效果即会变差以至失去控制，

证明本文提出的控制方案具有较好的控制效果。

4.2 未来展望

毕设工作开展前,本人通过阅读相关文献了解到无线网络控制系统具有广阔的发展前景,以及无线网络控制系统的一些研究热点。因为无线网络控制系统是基于无线网络进行通信的,与传统的布线式控制系统相比,稳定性较差。但无线网络控制系统能满足一些传统控制方式不能满足的控制需求,以及具有易于布设,不受空间限制的优点,所以无线网络控制系统具有很好的实际应用意义。本文只对无线网络控制系统的节点能量限制以及传输功率问题设计解决方案,以及简单地比较验证不同网络传输速率和丢包率对无线网络控制系统的影响。虽然本文提出的控制方案对解决系统的丢包问题起到一定作用,但本文并未对系统丢包问题提出更好的解决方案,而在无线网络控制系统中,时延和丢包是影响其控制效果的主要因素。在接下来的工作中,可考虑从控制策略方面,即对控制器进行进一步设计,以解决无线网络控制系统中存在的时延及丢包等问题。

参 考 文 献

- [1] 岳东, 彭晨. 网络控制系统的分析与综合[M]. 科学出版社, 2007.
- [2] Cervin, Henriksson, Lincoln, Eker, and Årzén. How Does Control Timing Affect Performance[J]. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
- [3] Cervin, A., Ohlin, M., & Henriksson, D. (2007). Simulation of Networked Control Systems Using TrueTime[J]. Paper presented at 3rd International Workshop on Networked Control Systems: Tolerant to Faults, Nancy, France.
- [4] 何莹, 孙剑. 矩阵实验室的仿真工具 TrueTime 设计[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(11):70-74.
- [5] Dan Henriksson, Anton Cervin, Martin Andersson, Karl-Erik Årzén. TrueTime: simulation of networked computer control systems[J]. 2006. Department of Automatic Control Lund University. Box 118, SE-22100 Lund, Sweden.
- [6] 田波, 周武能. 基于 Truetime 的无线网络温度控制系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(03):10-13.
- [7] 彭丽萍, 岳东. 基于 TrueTime 的无线网络控制系统仿真设计[J]. 现代电子技术(24): 116-119.
- [8] 隋树林, 朱孔阳, 翟伟, 庄国涛. 基于 TrueTime 的网络控制系统的仿真研究[J]. 微计算机信息. (测控自动化) 2010, 26(5-1): 38-39.
- [9] 赵贤林, 逢滨, 沈明霞. 基于 TrueTime 的无线网络功率控制系统[J]. 计算机工程. 2010, 36(10): 127-128.
- [10] 沈永增, 贾莲莲, 陈宣扬. 基于 TrueTime 的无线网络仿真模型研究[J]. 机电工程. 2011, 28(7): 856-858.
- [11] Karl-Erik Åarzén. A simple event-based PID controller[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1999, 32(2).
- [12] 刘旭. 基于事件触发机制的离散时间随机系统故障诊断研究[D]. 江南大学. 2019.
- [13] 胡松林. 基于事件触发机制的网络化控制系统的分析与综合[D]. 华中科技大学. 2012.

- [14] 唐国富. 无线网络控制系统延时补偿算法研究[D]. 北京交通大学, 2013.
- [15] 蒋蓉蓉. 无线网络化控制系统时延和丢包问题的研究[D]. 安徽工程大学, 2015.
- [16] 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.
- [17] 韩安太. 无线网络化控制系统中的时延分析及算法设计[D]. 浙江大学, 2007.
- [18] 张文安. 网络化控制系统的时延与丢包问题研究[D]. 浙江工业大学, 2010.
- [19] 张锋. 网络控制系统诱导时延分析及最大上界的确定[D]. 兰州大学, 2012.

附 录

毕设工作的主要代码

1. 功率控制程序:

```
function [exectime, data] = powctrlcode(seg, data)
switch seg,
case 1,
    msg = ttTryFetch('power_response');          %获取功率确认信号
    temp = msg;
    while ~isempty(temp),
        y = temp;
        temp = ttTryFetch('power_response');
    end
    if isempty(msg) & data.haverun ~= 0 %如果没有收到确认信号,可能是不能到达其他节点
        data.transmitPower = data.transmitPower + 10;      %逐步增加发射功率
        data.transmitPower = min(30, data.transmitPower);  %把发射功率限制在 30dbm
        ttSetNetworkParameter('transmitpower', data.transmitPower);
    else
        %如果有一个确认信号,证明有可到达的节点
        data.transmitPower = data.transmitPower - 0.5;      %减小发射功率
        ttSetNetworkParameter('transmitpower', data.transmitPower);
    end
    end
    exectime = 0.00002;
case 2,
    data.haverun = 1;
    msg.msg.sender = data.name;
    msg.type = 'power_ping';
    time = ttCurrentTime;
    ttSendMsg(data.receiver, msg, 80);                % Send 80 bits
    exectime = -1;
end
```

2. 功率响应程序:

```
function [exectime, data] = powrespcode(seg, data)
switch seg,
case 1,
    data.msg.msg = ttTryFetch('power_ping');
    data.msg.type = 'power_response';
    exectime = 0.00002;
case 2,
    % disp(['power ping received from node: ' num2str(data.msg.msg.sender) ', sending response'])
    ttSendMsg(data.msg.msg.sender, data.msg, 80); %      %回复 80bits 的信号给发送者
    exectime = -1;
```

```
end
```

3. 传感器事件触发程序:

```
global x1;
data.msg.msg = ttAnalogIn(1);
x1=data.msg.msg;
exectime = 0.0005;
if(abs(data.msg.msg-x1)>0.2)
    ttSendMsg(2, data.msg, 80);
    exectime = 0.0004;
else
    exectime = -1;
end
```

4. 基于 PID 算法的控制器程序:

```
function [exectime, data] = ctrlcode(seg, data)
switch seg,
case 1, % 执行 PID 控制
    temp = ttTryFetch('sensor_signal');
    while ~isempty(temp),
        y = temp;
        temp = ttTryFetch('sensor_signal');
    end
    r = ttAnalogIn(1); % 读取参考值
    P = data.K*(r-y);
    I = data.Iold;
    D = data.ad*data.Dold + data.bd*(data.yold-y);
    data.u = P + I + D;
    data.Iold =data.Iold+data.K*data.h/data.Ti(r-y);
    data.Dold = D;
    data.yold = y;
    exectime = 0.0005;
case 2, % 功率响应任务
    msg.msg = data.u;
    msg.type = 'control_signal';
    ttSendMsg(1, msg, 80); % 答复, 发送 80bits 的数据到节点 1 (执行器)
    exectime = -1;
end
```

致 谢

四年大学生涯转瞬即逝，转眼就到了走上社会的人生阶段。大学四年是人生中重要的四年，在这段时间里，我既有获得，也有失去，增长了见识，也学会了更多地思考。在这里，我由衷地想对我生活过四年的母校，教导过我的老师们，帮助过我的学长，和我共同成长的同学们以及辛苦养育我的父母表示感谢。

首先，我想感谢我的母校——浙江工业大学，它给我提供了很好的学习环境和 Learning 资源，给了我学习技能的机会。我会永远记住浙工大美丽的校园，永远热爱我的母校。

其次，我想感谢我的指导教师赵云波教授。在今年特殊的环境下，赵老师基本每周都召开视频会议，对我们的毕设工作进行指导。在遇到问题时，赵老师也给我提出了很多宝贵的指导意见，在修改毕设初稿时也很耐心地对我提供帮助，帮我理顺思路，解决困难。

然后，我想感谢给我毕设工作很大帮助的潘晓康学长。每次毕设遇到困难，学长都会不厌其烦地给我出谋划策，提供相应的学习资源，他富有热情的样子也给我很大的鼓励。

最后，我想感谢我的父母。他们一直以来都默默地支持着我，给了我好的生活环境，给了我面对困难的勇气，给了我解决困惑的建议等等。他们永远是我坚强的后盾。

在浙工大度过的四年大学生活是我最重要的一个人生阶段，我不仅学会了很多知识，而且个人思想观念也得到提高。在接下来的时光，我即将走上社会，我仍将以成为更好的自己为目标，虚心学习，勇敢面对生活。