



浙江工业大学

硕士学位论文

DoS 攻击下无人水面艇故障检测滤波器和控制器协同设计

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

提交日期：2022 年 1 月

Fault Detection Filter and Controller Co-Design for Unmanned Surface Vehicles under DoS Attacks

Dissertation Submitted to

Zhejiang University of Technology

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Engineering



by

Lingren Wang

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-Bo Zhao

Jan., 2022

浙江工业大学学位论文原创性声明

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

作者签名：王吟人

日期：2021年12月

学位论文授权使用授权书

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：王吟人

日期：2021年12月

导师签名：王吟人

日期：2021年12月

中图分类号

学校代码 10337

UDC

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

DoS 攻击下无人水面艇故障检测滤波器和控制器协同设计

Fault Detection Filter and Controller Co-Design for Unmanned
Surface Vehicles under DoS Attacks

作者姓名 王岭人

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: 2021 年 12 月 8 日

DoS 攻击下无人水面艇故障检测滤波器和控制器协同设计

摘 要

近年来,无人水面艇在民用和军事领域广泛应用,主要原因在于无人水面艇在某些危险和极端环境下易于部署和操作,执行不适合人员的危险任务。目前我们通过无线网络和远程控制站控制无人水面艇的运动,将网络化控制系统引入到无人水面艇中带来一些好处,如灵活性高、降低成本、易于维护,但同时也存在一些问题,如网络诱导时延、网络攻击造成丢包、网络节点能量有限等。另外,网络化无人水面艇系统可能会发生故障影响系统安全,因此及时检测故障的发生非常重要。

本文针对网络化无人水面艇系统中的 DoS 攻击造成网络丢包和执行器发生故障问题展开研究。一方面,无线链路本身具有不可靠性,网络化无人水面艇控制系统存在网络时延且易受到 DoS 攻击影响,导致通信通道受阻,数据包无法正常传输,从而影响无人水面艇系统的航向控制性能;另一方面,执行器发生故障,降低无人水面艇系统可靠性,如若不能及时检测出故障则存在安全隐患。因此针对这样更复杂的网络化无人水面艇系统,设计一种有效的航向控制和故障检测方案具有现实意义。本文基于此提出了相应的故障检测滤波器和控制器协同设计方法,主要工作包括以下两个方面:

1.针对 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统,提出了一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。考虑采样器到控制站之间的网络通道中的网络时延和 DoS 攻击引起的数据包丢失,构建一个新的受风、浪等外部干扰和执行器故障影响的网络化无人水面艇系统,并基于此提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法,有效控制航向稳定,并及时检测故障的发生和位置。另外,这些设计标准可以保证残差信号对执行器故障具有一定的敏感性以及无人水面艇系统对外部干扰的鲁棒性。

2.针对网络节点能量受限和非周期 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统,提出了一种基于自适应事件触发机制的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。在该方法中,考虑更现实的网络节点能量受限问题,基于此在采样器和控制站之间的网络通道上设计自适应事件触发机制,动态更新触发阈值,有效减少触

发次数，提高网络资源利用效率，同时保证在 DoS 攻击下无人水面艇系统的航向控制稳定。

关键词：无人水面艇，网络化控制系统，航向控制，故障检测，事件触发机制

Fault Detection Filter and Controller Co-Design for Unmanned Surface Vehicles under DoS Attacks

ABSTRACT

In recent years, unmanned surface vehicle has been widely used in civil and military fields. The main reason is that unmanned surface vehicle is easy to deploy and operate in some dangerous and extreme environments and perform dangerous tasks that are not suitable for personnel. At present, we use wireless network and remote control station to control the movement of the unmanned surface vehicle. The introduction of networked control system into the unmanned surface vehicle brings some benefits, such as high flexibility, low cost and easy maintenance. But there are also some problems, such as network induced delay packet loss, packet loss caused by network attacks, limited energy of network nodes and so on. In addition, the networked unmanned surface vehicle system may occur fault, which will affect the stability of the system.

This thesis aims at networked unmanned surface vehicle system with DoS attack causes network packet loss and actuator fault. For one thing, the wireless link is unreliable. The networked unmanned surface vehicle system has network delay and is vulnerable to DoS attacks, which leads to the communication channel blocked and the data packet cannot be transmitted normally, thus affecting the heading control performance of the unmanned surface vehicle system. For another thing, the actuator fault will reduce the reliability of the unmanned surface vehicle system. If the fault cannot be detected in time, there will be security risks. Therefore, it is practical to design an effective heading control and fault detection method for such a more complex networked unmanned surface vehicle system. Based on this, this thesis proposes a design method of fault detection filter and controller. The main work is as follows:

1. A fault detection filter and controller co-design method based on observation is proposed for networked unmanned surface vehicle system under DoS attack. Considering the network delay in the network channel between the sampler and the control station and the packet loss caused by DoS attack, a new networked unmanned surface vehicle system affected by external interference such as wind and wave and actuator fault is constructed. Based on this, the fault detection filter and controller co-design method based on observer is proposed to effectively control the heading stability and detect the occurrence and location of the fault in time. In addition, these design

criteria can ensure the sensitivity of residual signals to actuator faults and the robustness of unmanned surface vehicle system to external disturbances.

2.A fault detection filter and controller co-design method based on adaptive event trigger mechanism is proposed for networked unmanned surface vehicle system with limited node energy and aperiodic DoS attack. In this method, considering the more realistic problems of node energy limitation, an adaptive event-triggered mechanism is designed on the network channel between the sampler and the control station to dynamically update the trigger threshold, effectively reduce the number of triggers, improve the utilization efficiency of network resources, and reduce the impact of aperiodic DoS attacks on the performance of unmanned surface vehicle system.

KEY WORDS: unmanned surface vehicle, networked control system, heading control, fault detection, event triggering mechanism

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
插图清单.....	VII
附表清单.....	VIII
符号清单.....	IX
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 网络化无人水面艇控制系统研究.....	2
1.2.2 无人水面艇系统的航向控制研究.....	5
1.2.3 无人水面艇系统的故障检测研究.....	6
1.3 本文组织架构.....	7
1.4 本章小结.....	8
第二章 DoS 攻击下无人水面艇基于观测的故障检测滤波器和控制器设计.....	9
2.1 问题描述.....	9
2.1.1 网络化无人水面艇控制系统.....	10
2.1.2 DoS 攻击.....	12
2.2 基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计.....	13
2.3 稳定性分析和控制器设计.....	14
2.3.1 稳定性分析.....	14
2.3.2 H_{∞} 性能分析.....	17
2.3.3 控制器设计.....	18
2.4 网络化无人水面艇仿真实例.....	19
2.5 本章小结.....	25
第三章 DoS 攻击下无人水面艇基于事件触发的故障检测滤波器和控制器设计.....	26
3.1 问题描述.....	26

3.1.1 网络化无人水面艇控制系统.....	27
3.1.2 非周期 DoS 攻击.....	27
3.2 基于事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计.....	28
3.2.1 自适应事件触发机制设计.....	28
3.2.2 故障检测滤波器和控制器协同设计.....	30
3.3 稳定性分析和控制器设计.....	32
3.3.1 稳定性分析.....	33
3.3.2 H_∞ 性能分析.....	34
3.3.3 控制器设计.....	37
3.4 网络化无人水面艇仿真实例.....	39
3.5 本章小结.....	47
第四章 总结与展望.....	48
4.1 总结.....	48
4.2 展望.....	49
参考文献.....	50
致 谢.....	54
作者简介.....	55
1 作者简介.....	55
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	55
3 参与的科研项目及获奖情况.....	55
4 发明专利.....	55
学位论文数据集.....	56

插图清单

图 1-1 网络化无人水面艇控制系统	1
图 2-1 DoS 攻击下的网络化无人水面艇控制系统结构	9
图 2-2 固体船身和固定地面参考系	10
图 2-3 外部干扰	20
图 2-4 DoS 攻击成功时丢包序列	21
图 2-5 偏航速度跟踪误差响应	21
图 2-6 偏航角响应	21
图 2-7 航向上的控制信号响应	21
图 2-8 前向速度响应	22
图 2-9 横向速度响应	22
图 2-10 故障 $f_1(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应	23
图 2-11 故障 $f_1(t)$ 下的偏航角响应	23
图 2-12 故障 $f_1(t)$ 下的残差信号响应	23
图 2-13 故障 $f_1(t)$ 下的残差评价函数	23
图 2-14 故障 $f_2(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应	24
图 2-15 故障 $f_2(t)$ 下的偏航角响应	24
图 2-16 故障 $f_2(t)$ 下的残差信号响应	25
图 2-17 故障 $f_2(t)$ 下的残差评价函数	25
图 3-1 DoS 攻击下基于事件触发的网络化无人水面艇控制系统结构	26
图 3-2 DoS 攻击序列	39
图 3-3 非周期 DoS 攻击下的偏航速度跟踪误差响应	40
图 3-4 非周期 DoS 攻击下的偏航角响应	40
图 3-5 非周期 DoS 攻击下航向上的控制信号响应	40
图 3-6 非周期 DoS 攻击下的前向速度响应	40
图 3-7 非周期 DoS 攻击下的横向速度响应	41
图 3-8 DoS 攻击下的动态触发阈值	41
图 3-9 DoS 攻击下的释放时间间隔	41
图 3-10 偏航方向的输出信号	41
图 3-11 故障 $f_3(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应	42
图 3-12 故障 $f_3(t)$ 下的偏航角响应	42
图 3-13 故障 $f_3(t)$ 下的残差信号响应	42
图 3-14 故障 $f_3(t)$ 下的残差评价函数	43
图 3-15 故障 $f_4(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应	43
图 3-16 故障 $f_4(t)$ 下的偏航角响应	43
图 3-17 故障 $f_4(t)$ 下的残差信号响应	44
图 3-18 故障 $f_4(t)$ 下的残差评价函数	44

图 3-19 不同控制方法的偏航速度误差	44
图 3-20 不同控制方法的偏航角	45
图 3-21 两种阈值的触发阈值	45
图 3-22 动态阈值的释放时间间隔	46
图 3-23 恒定阈值的释放时间间隔	46
图 3-24 两种阈值的偏航速度跟踪误差响应	46
图 3-25 两种阈值的偏航角响应	47

附表清单

表 3-1 不同控制策略下的控制效果比较	45
表 3-2 两种阈值方案的释放次数	46

符号清单

d_{\max}	——	DoS 攻击活动时间间隔的上界
J_{th}	——	残差评价函数阈值
\bar{p}	——	DoS 攻击成功的概率的数学期望
σ	——	DoS 攻击成功的概率的方差
$\delta(t)$	——	网络传输时刻 t 时网络通道上的网络时延
$\bar{\delta}$	——	网络时延上界
$\delta_{t_k, n}$	——	网络传输时刻 t_k 时的网络时延
δ_M	——	网络时延和采样周期相关的上界参数
Δ_{n-1}	——	DoS 攻击的睡眠时长
Δ_{\min}	——	DoS 攻击睡眠时间间隔的下界
$\Gamma_{1, n-1}$	——	不存在攻击信号且通信信号正常的第 n 次 DoS 攻击间隔
$\Gamma_{2, n-1}$	——	存在攻击信号且数据包无法传输的第 n 次 DoS 攻击间隔
τ_D	——	平均驻留时间
$\varepsilon(t)$	——	动态触发阈值参数
ε_{\max}	——	最大触发阈值

第一章 绪 论

1.1 研究背景和意义

无人水面艇是一种无需人驾驶而能在水面上实现自主航向的小型智能车辆，具有体积小、重量轻、航速快等优点。因此在过去几十年里，对无人水面艇航向控制的理论研究一直是热点，并广泛应用于实际中，成为国内外海洋智能设备的研究重点^[1]。目前无人水面艇在军事领域和民用领域都有涉及，主要用于执行不适合人类去做的危险任务，例如海洋环境监测^[2]、煤石油勘探^[3]、军事作战等，减少人员伤亡的同时提升任务执行效率。虽然无人水面艇的应用广泛且具有现实价值，但在实际中投放使用仍有顾忌，主要原因在于无人水面艇抗外部干扰能力弱^[4]。当无人水面艇在海上执行任务时，不可避免地会受到例如海浪、大风等海洋扰动影响，从而使无人水面艇偏离既定航向，带来安全隐患^[5]。因此，为受干扰的无人水面艇控制系统设计可靠有效的控制方案对无人水面艇控制系统由理论向实践的转化尤为重要。

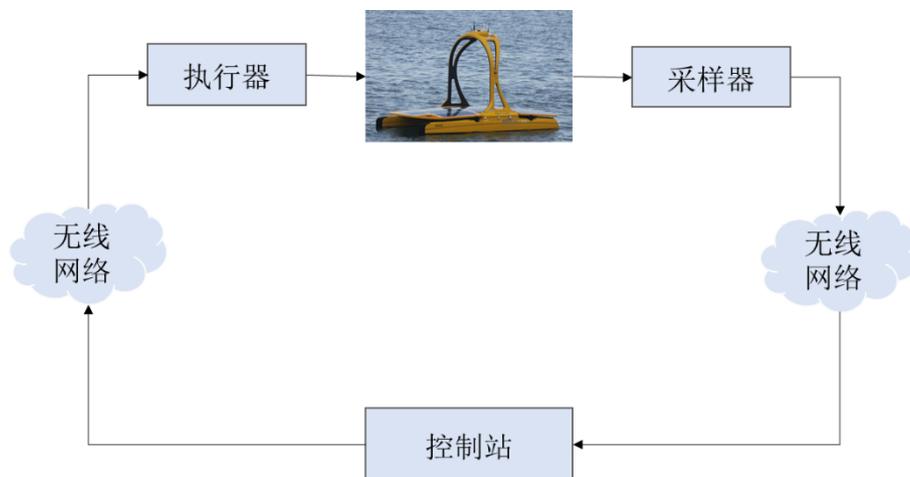


图 1-1 网络化无人水面艇控制系统

Figure 1-1. Structure of networked unmanned surface vehicle control system

另一方面，无线网络因为有低成本、高灵活、不易受地理条件限制的优点，常用来为无人水面艇和控制站之间提供信息通讯，组成网络化无人水面艇控制系统^[6,7]。在网络化无人水面艇控制系统中，无线网络连接着无人水面艇、采样器、控制站和执行器，如图 1-1 所示。但随之而来的，无线网络自身无线链路的不可靠性和有限的节点通讯能量也给网络化无人水面艇控制系统的设计带来挑战。

其一，无线链路本身存在不可靠性，无线网络传输过程中会产生数据包延迟和丢失，进而导致无人水面艇系统的性能下降甚至破坏系统稳定^[8]，主要原因在于网络诱导时延和网络攻击。共享网络环境中，受网络带宽限制、网络流量等因素影响，数据包传输过程中难免发生碰撞，引起数据包在节点排队等待，从而产生网络时延。又考虑到网络具有开放性，无线网络通道容易受到各种网络攻击，其中较为常见和易于实现的一种攻击方法是拒绝服务(DoS)攻击，攻击者恶意干扰网络通道，阻止信号正常传输，从而影响无人水面艇系统性能。因此在现实的无人水面艇控制系统设计中，需要考虑无线链路自身的不可靠性。且与传统的网络化控制系统相比，目前对 DoS 攻击下网络化无人水面艇系统的安全控制研究较少。

其二，对为无人水面艇提供无线通讯的无线网络而言，无人水面艇上的通讯节点的电池通常是受到限制的，因此在实际应用中尽可能有效地利用有限的节点能量一直是非常关键的问题。一般地，数据包传输越多，那么控制系统可靠性越高，但同时也意味着节点能量损耗越多越快。其实，在无线网络中有些数据包是无用的、不必要的，在传输过程中不仅占用了有限的网络资源，也容易造成网络通道堵塞^[9]。但众所周知，控制系统获取更实时的数据信息更有利，因此如何权衡能量消耗和系统性能这两者的关系至关重要。

此外，无人水面艇控制系统可能会发生故障、异常等不可抗情况，影响系统的鲁棒性和安全性^[10]。这种情况事先并不能避免，只能采取措施尽早地检测出故障的发生并及时处理故障，从而保证系统安全稳定。这对于无人水面艇存在故障的航向控制提出了进一步要求。因此在实际应用中，需要设计一种高效准确的故障检测滤波器，及时检测故障的发生并预警人们采取措施。

综上，考虑现实中 DoS 攻击，网络节点能量受限，以及系统发生故障等因素影响，针对这样更复杂的网络化无人水面艇控制系统，设计一种有效的航向控制和故障检测方案具有现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 网络化无人水面艇控制系统研究

网络化控制系统使用通信网络代替传统的电缆来传输信息，不再受电缆连接的限制，进一步提高了控制系统的灵活性，极大节省了系统在电缆上的成本，是一种新型的智能系统^[11]。由于网络化控制系统具有成本低、布线少、灵活性高、数据共享、维护方便等优点，在飞机、自动驾驶汽车等领域有着广泛的应用^[12]，同样在无人水面艇领域也十分普及。

通常地，人们通过一个完整的闭环系统对无人水面艇进行控制，如图 1-1 所示。采样器将无人水面艇的状态信号如偏航速度误差、偏航角等采集起来，通

过无线网络通道传输到控制站，控制站根据采集的状态信号输出相应的控制信号并通过无线网络通道传输到执行器，从而控制无人水面艇的航向。易知在信号传输过程中，都需要经过无线网络通道，而无线网络本身安全性低，且网络资源和节点能量有限，这些因素都可能影响到对无人水面艇的控制。已有研究学者们针对受无线网络环境影响的网络化无人水面艇可能面临的挑战做了许多研究工作，本小节就网络丢包和网络资源有限两部分展开。

1. 网络丢包

网络化控制系统的性能受网络因素影响，包括网络诱导的延时、数据包丢失等，其中数据包丢失对系统性能产生较大的影响^[8]。在无线通信网络中，可能会随时出现数据包延迟而破坏数据的实时性，或出现数据包乱序而造成数据的接收顺序紊乱，抑或出现数据包丢失而导致控制信号丢失，从而降低系统的控制性能，甚至破坏系统的稳定性。网络中数据包的丢失主要包括网络时延引起的丢包和网络攻击造成的丢包。

网络诱导时延引起的网络丢包会影响网络化无人水面艇系统的性能。共享的网络通道中，数据包受网络流量、带宽资源等影响传输不一定及时，传输过程也可能发生碰撞，从而使数据包从发送到接收的过程中产生一定的传输时延，因为网络原因进一步地造成数据包丢失。针对网络时延以及网络时延引起的丢包，有学者们做了一些研究工作。Liu 等人^[13]研究了多无人机在网络时延和丢包情况下的协同控制，提出了一种改进的增量预测控制方案来应对干扰、丢包和通信时延。王玉龙等人^[14]考虑网络化无人水面艇系统中采样器到控制站的丢包、网络诱导的延迟和包无序，首次建立基于此的网络化无人水面艇模型，并将该模型扩展到具有采样器-控制站和控制站-执行器的数据包丢失，网络诱导延迟和数据包无序的无人水面艇模型。Chen 等人^[15]考虑通信网络对无人水面艇系统带来的网络时延和数据包丢失问题，提出了一种新型的网络预测控制方法，通过把预测误差引入到控制方案中，提高系统对干扰的鲁棒性，并利用实验证明了方法具有有效性。陈丽丽等人^[16]考虑控制站和执行器之间的网络通道中存在的网络诱导的时延、数据丢包等，建立一种基于观测器的无人水面艇系统航向控制模型，以使无人水面艇航向控制稳定。

网络攻击造成的网络丢包也会影响网络化无人水面艇系统的性能^[17]。拒绝服务（DoS, Denial-of-service）攻击是网络攻击中比较常见也较容易实现的一种攻击手段^[19]，攻击者通过发送大量无效的数据包占据网络通道，从而阻止采样信号和控制信号正常传输，使得控制站和执行器无法及时接收到数据包，进而迫使网络化无人水面艇系统开环运行。针对 DoS 攻击下的系统控制问题，已有学者们做了相关研究。文献^[21,22,70]研究周期性 DoS 攻击，文献^[23,24]研究随机性 DoS 攻击，Yue 等人^[25]研究 DoS 攻击的队列模型方法，Guo 和 Su 等人^[23,26]研究 DoS 攻击的伯努利方程建模。Ye 等人^[18]针对 DoS 攻击下的网络化控制系统，

将攻击行为切换建模为马尔可夫跳跃过程，然后提出了基于马尔可夫跳跃系统方法的充分条件，其中攻击的发生概率和转移概率被允许部分未知和不确定，这种新的 DoS 攻击建模方法可以应用于更一般的攻击行为。对于具有 DoS 攻击的无人水面艇控制系统，Ma 等人^[27]提出一种事件触发通信方案以提高网络资源利用效率，同时抵消非周期 DoS 攻击对无人水面艇控制系统性能的影响，Yuan 等人^[20]基于无人水面艇系统的跟踪控制问题提出一种动态反馈控制(DOFC)算法，在 DoS 攻击下跟踪无人水面艇系统给定的偏航速度。

2.网络资源受限

网络化控制系统中，网络通道数量有限，节点能量有限，过多的通信资源占用会导致网络冲突，从而导致网络资源的浪费。无人水面艇体积小，所携带的无线设备节点能量有限，因此如何减轻网络负担的同时还能保证系统控制性能十分重要。有学者提出各种方法试图降低网络传输中的能耗^[28]，处理节点能量和网络通信限制^[29,30]。后来有研究发现事件触发控制可以减少系统数据传输，减少有限的共享网络资源的消耗，从而人们对事件触发机制在网络化控制系统中的应用进行了广泛的研究^[31,32]。一般情况下，控制系统发送数据越多，系统的动态性能越好，因此周期采样系统将比事件触发系统具有更好的性能，但同时也造成一定的资源浪费。在网络控制系统中，一些学者^[33,34]通过实验模拟，事件触发在网络控制系统的研究中事件触发可以通过减少数据传输方式的数量来减少网络负载，从而减少数据传输中的冲突，从而提高系统性能。Meng 等人^[35]在大量被控对象连入网络中对周期触发机制和事件触发机制的性能进行比较，事件触发控制具有确保发送时减少信息的系统性能，缓解网络冲突的能力。如果在满足事件触发系统的触发条件时，由于网络冲突导致控制数据的传输失败，将大大影响控制系统的性能。Baumann 等人^[69]提出一种结合了事件触发控制和深度强化学习方法的方法，考虑学习端到端的通信结构和控制器策略，利用深度强化学习算法从头开始同时学习控制输入和通信决策，而无需分析动力学模型，摆脱了以往控制方法设计对系统模型的过度依赖，不止可以直接在线性系统中使用，还可以在非线性系统中直接使用，更具多功能性和通用性。

为了更好地权衡系统性能和网络资源成本，有学者提出自适应事件触发机制，动态更新触发阈值。Zhang 等人^[36]针对具有切换拓扑的滤波网络提出自适应事件触发机制，可以根据估计和传输误差动态更新触发阈值。Wang 等人^[37]针对离散时间的网络化控制系统，提出一种自适应调整的事件触发参数的故障检测机制。Zhang 等人^[38]针对网络化无人水面艇系统的基于事件智能输出反馈控制，提出一种 Q 学习方法通过智能更新事件函数阈值的方式来减轻通信负担的同时对无人水面艇系统进行航向控制。通过进一步考虑通信延迟，建立一个时延系统模型，该模型能在一个框架中处理基于事件的传输和通信延迟。在事件触发的网络化控制系统中，作者引入了系统的强化学习方法，在这个框架下

也可以应用一些更高级的强化学习方法。另外,考虑状态可能无法完全测量,使用输出反馈控制来实现控制目标。在稳定性分析中,构造基于扩展的道凸矩阵不等式方法和合适的分段李雅普诺夫函数,使闭环跟踪误差系统在规定条件下渐近稳定且具有 H_∞ 干扰衰减指数。和现有成果比较,该控制算法确实可以提供更好的跟踪性能,有效控制航向稳定。

1.2.2 无人水面艇系统的航向控制研究

在无人水面艇航向控制研究中,更高的控制精度和更短的收敛时间是提高系统稳定性的发展趋势。当无人水面艇在海洋中执行任务时,不可避免地会遇到风、波浪等海洋扰动,可能会引起无人水面艇系统的偏航速度误差和偏航角振荡,而这会造成无人水面艇航向性能降低甚至无人水面艇系统不稳定。因此,研究无人水面艇在各种干扰下的航向控制就显得尤为重要。

目前,应用于无人水面艇系统的航向控制方法主要包括 PID 控制,反馈线性化控制,自适应控制,鲁棒控制和滑模控制等。Dong 等人^[39]采用基于 PID 控制的航向控制方法,利用两个螺旋桨的一侧控制航向,速度固定时另一侧则改变航向,从而实现无人水面艇系统的航向控制稳定,简单实用,功耗低,适应长时间的工作。欧阳子路等人^[40]利用改进后的遗传算法对无人艇航向 PID 控制器的控制参数进行调整,使得系统收敛速度更快,能更快地控制航向稳定。因为无人水面艇的航向控制系统是一个具有时变、非线性和多重干扰的复杂系统,尽管传统的 PID 控制结构简单易实现,但其参数的调整取决于人工经验,因此其自适应性能较差,因此 Fan 等人^[41]提出了一种无人水面艇过程控制的模糊自适应 PID 控制算法,通过模糊推理实现 PID 过程控制参数的在线设置。杨宇等人^[42]考虑海洋环境干扰对无人水面艇系统的影响,提出了一种基于非线性干扰观测器的轨迹线性化航向控制方法以提高无人水面艇系统航向控制的精度和鲁棒性。Li 等人^[43]考虑只有前向力和偏航矩阵可用的无人水面艇系统,与路径跟踪不同的是点对点航向不需要考虑非零位置误差,据此提出了一种非线性鲁棒的自适应控制方法,以实现无人水面艇系统的点对点航向控制。Yi 等人^[44]设计了一种基于卡尔曼滤波器的滑模控制方法,用于无人水面艇系统在水平面的航向控制,并为了进一步减轻滑模控制系统的抖振和控制过程的噪声干扰,引入 Sigmoid 函数来提高传统的指数逼近率。

无人水面艇要完成侦察、探测任务时,需要根据任务目标进行航向控制,进而实现无人水面艇的轨迹跟踪控制。学者们争先恐后地将各种先进的控制方法应用其中^[45-48]。Ravell 等人^[49]提出了一种用于船舶系统轨迹跟踪问题的建模和控制的混合控制方法,并设计一个过渡策略确保介质之间切换不会产生颤动。Xu 等人^[50]提出了一种基于自动识别系统历史数据的动态时间规整算法的路径跟踪方法,设计一个非线性控制器用于航向控制,使路径跟踪可以实现。Wang 等人^[51]利用模糊系统方法建模船舶动力学的非线性,提出了一种基于模糊系统的

自适应滑模跟踪控制方法。Wang 等人^[52]针对复杂未知欠驱动地船舶，提出了一种基于浪涌导向的有限时间路径跟踪控制方法。Yu^[69]等人针对存在未知动力学和外部干扰的无人水面艇系统，提出了一种基于有限时间预测器（LOS）的整体滑膜自适应神经的路径跟踪方法。作者设计了一种新的基于 LOS 的制导律，在有限时间内通过误差预测器来获取侧滑角，再通过神经网络技术和积分滑膜方法结合在一起设计路径跟踪控制律，以此确保无人水面艇系统收敛并且遵循已定义的路径。其中，引入的神经网络为径向基函数神经网络（RBFNN），设计的控制律在一定程度上可以解决在动力学水平上具有未知动力学的无人水面艇系统路径跟踪速度跟踪问题。

1.2.3 无人水面艇系统的故障检测研究

在网络化无人水面艇控制系统中，故障、异常的发生是不可避免的，可能会造成信号丢失、噪声过大等影响，从而降低系统的可靠性和鲁棒性，带来安全隐患，因此如果能在早期检测出故障并及时地采取一些有效措施来隔离故障，能极大地提升无人水面艇系统的安全性。另外，受外部干扰影响，早期故障检测可能伴随着错误预警，而造成检测误检率过高，影响系统的正常运行。因此设计能及时且准确地检测故障的故障检测器具有必要性。

近年来，用于故障检测的技术方法不断涌现，比如基于模糊技术的故障检测^[53]，自适应故障检测^[54]，基于非线性随机系统的故障检测以及基于观测器的故障检测等等。对于网络化控制系统，在故障检测方面已有一些较好的研究成果。例如，Qi 等人^[55]考虑具有随机数据包丢失和模型不确定性的网络化控制系统，提出一种基于观测器的鲁棒的故障检测滤波器，生成的残差对于模型的不确定性、故障敏感等均有鲁棒性。Wang 等人^[37]针对一类离散时间的网络化控制系统，考虑到故障发生的概率和故障检测进度，引入自适应调整的事件触发参数，提出了一种基于自适应事件触发机制的故障检测滤波器和控制器设计方法。Wang 等人^[56]针对一类带有事件传感器故障的连续时间网络化控制系统，提出一种同时考虑网络带宽利用率和基于故障发生概率的事件触发机制，并以此设计故障检测器和控制器。Pan 等人^[57]考虑更一般的非线性网络系统的基于事件触发的故障检测。

Wang 等人^[37]对基于离散时间的网络化控制系统，提出一种自适应调整的基于事件触发机制的故障检测，这种新颖的协调事件触发机制，可以检测故障发生的检测进度（即意味着是否检测到故障发生），故障发生的概率和自适应调整的事件触发参数，同时还兼顾了网络带宽的利用率。此外，作者考虑的无线网络存在网络时延影响的情况，且存在于双通道网络，基于这样构建的网络系统提出故障检测滤波器和控制器的协同设计方法。

在无人水面艇控制系统中，执行器起着重要的作用。当执行器发生故障时，输入到执行器中的控制信号和执行器实际产生的控制之间存在一定的误差，从

而影响系统的正常运行，严重地会直接破坏系统，极具危险性。Hou 等人^[58]提出一种通过扩展状态观测器（ESO）进行执行器故障的故障检测方法，采用执行器动力学的标准模型对扩展状态观测器进行修正，建立故障检测方法，并以修正后的 ESO 的输出作为残差评估函数的来源，建立检测逻辑。Zhang 等人^[59]根据建立的非线性垂直运动模型，提出一种基于区间观测器的自动执行器故障检测方法，通过来自区间观测器的信息，同时生成残差和阈值，以实现执行器故障检测。Park 等人^[60]针对无人水面艇系统中存在非线性不确定性的饱和和执行器，提出一种鲁棒的故障检测器和随时间变化的检测方法，以检测与非线性动力学和外部干扰的不确定性区分开的执行器故障，同时设计自适应故障适应方案以补偿检测到的故障。Hao 等人^[61]针对具有非线性和潜在执行器故障的无人水面艇系统，提出了一种动态量化参数调整策略和滑模控制器设计方法，以补偿执行器故障和量化误差的影响。Ma 等人^[27]针对无人水面艇系统设计一种基于事件触发的故障检测滤波器和控制器协同方法，考虑网络通道中同时存在通信延迟、干扰、故障和 DoS 攻击。Singh 等人^[67]提出一种用于无人水面艇系统稳定航向的故障检测方法，借助小波变换和支持向量机来实现故障分类，并采用模糊控制器对故障进行诊断，以更高的故障分类精度解决了无人水面艇系统的位置跟踪问题，从而实现了无人水面艇系统稳定运行。

Wang 等人^[66]考虑受波浪引起的外部干扰和执行器故障的无人水面艇检测系统，以往工作中的事件触发方案都直接取决于所测得的输出，而无人水面艇系统在噪声和干扰以及测量的干扰下可能会导致不必要的数据传输，因此引入了基于积分的事件触发器，提出了一种新型的无人水面艇故障检测框架，以节省通信资源。将在特定的时间间隔内测得的输出平均值当作基于积分的事件触发器和故障检测滤波器的输入，以此减少数据包传输并降低噪声和干扰的影响。对比传统基于瞬时值的事件触发机制和周期采样机制，可以在更有效地减少网络带宽占用的同时及时发现系统故障。

1.3 本文组织架构

本文主要针对 DoS 攻击下存在执行器故障的无人水面艇控制系统展开研究，设计故障检测滤波器和控制器有效控制无人水面艇系统航向稳定，保证无人水面艇系统的鲁棒性，并及时检测出故障的发生。

第一章是绪论部分，介绍了本课题的研究背景与意义、国内外研究现状。

第二章针对 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统，提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。构建一个 DoS 攻击和执行器故障的无人水面艇系统，考虑外部干扰影响和网络延时，基于这样一个闭环系统设计基于

观测的故障检测滤波器和控制器。通过仿真验证，本章提出的方法可以有效提升无人水面艇系统的航向控制性能，并检测出故障的发生和位置。

第三章针对网络节点能量有限和非周期 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统，提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。该方法考虑更现实的网络环境，其中设计的自适应事件触发机制可以动态更新触发阈值，减轻网络负担。并和恒定事件触发实验做比较，验证本章方法更具优势，且更具现实意义。

第四章是总结与展望，总结全文的研究工作，分析先前工作的优势与不足，并就 DoS 攻击更现实更全面的网络环境，网络时延引起的丢包，以及无人水面艇群的协同设计展望未来可发展的方向。

1.4 本章小结

本章首先介绍了 DoS 攻击下无人水面艇系统的故障检测滤波器和控制器协同设计的研究背景和意义，从网络化无人水面艇系统、无人水面艇系统的航向控制、无人水面艇系统的故障检测三个方面介绍了近年来国内外的研究现状。最后介绍了本文章节的组织架构。

第二章 DoS 攻击下无人水面艇基于观测的故障检测滤波器和控制器设计

根据第一章对网络化无人水面艇控制系统的研究概况，本章针对 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统，提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。首先，构建一个考虑 DoS 攻击、外部干扰和执行器故障同时存在的网络化无人水面艇控制系统。其次，针对网络化无人水面艇系统，通过构造一个分段 Lyapunov 函数，给出闭环系统均方指数稳定且具有指定 H_∞ 干扰衰减指数的充分条件，并设计基于观测的故障检测滤波器和控制器。最后，通过仿真验证方法的有效性。结果表明，该方法不仅能对无人水面艇系统航向进行有效控制，而且能及时检测到执行器故障的发生和位置。

2.1 问题描述

我们考虑遭受 DoS 攻击下的网络化无人水面艇控制系统，如图 2-1 所示，对无人水面艇系统进行故障检测滤波器和控制器协同设计。实际应用中，执行器往往会受到一些外部输入影响，包括故障和干扰。一般来说，没有故障和攻击的网络化无人水面艇控制系统是稳定的，如果系统存在执行器故障和 DoS 攻击，那么系统性能会下降甚至不再稳定，因此如何在受到 DoS 攻击的情况下还能有效控制无人水面艇系统航向稳定并检测故障至关重要。

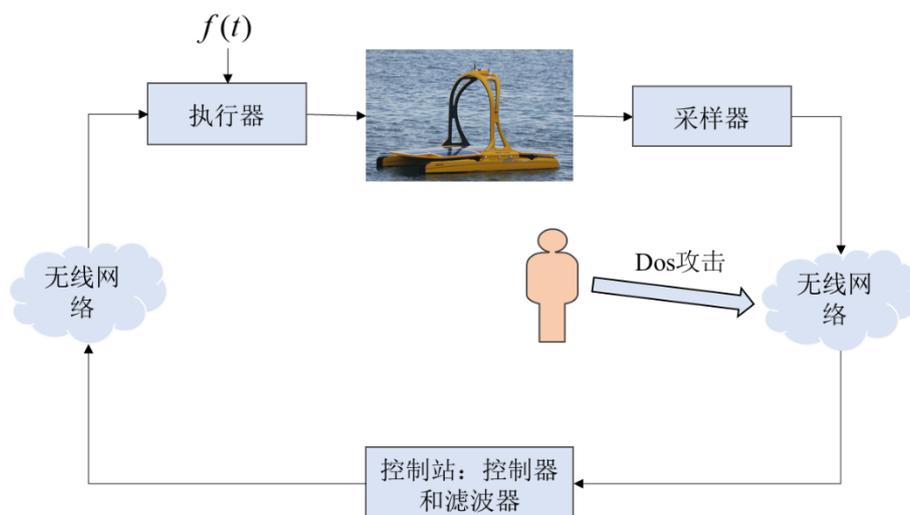


图 2-1 DoS 攻击下的网络化无人水面艇控制系统结构

Figure 2-1. Structure of networked unmanned surface vehicle control system under DoS attack

2.1.1 网络化无人水面艇控制系统

一般来说，无人水面艇在实际航行中运动比较复杂，包括 6 个自由度的运动：前向，横向，升沉，横摇，纵摇和偏航。若将 6 个自由度的运动全都予以考虑，无人水面艇的运动数学模型过于复杂，且对于本文的研究来说可以简化，一般选择一个 3 自由度的装有推进器的锚定无人水面艇作为目标对象模型^[62]，进而简化成 3 自由度，视升沉、横摇和纵摇的影响为干扰。

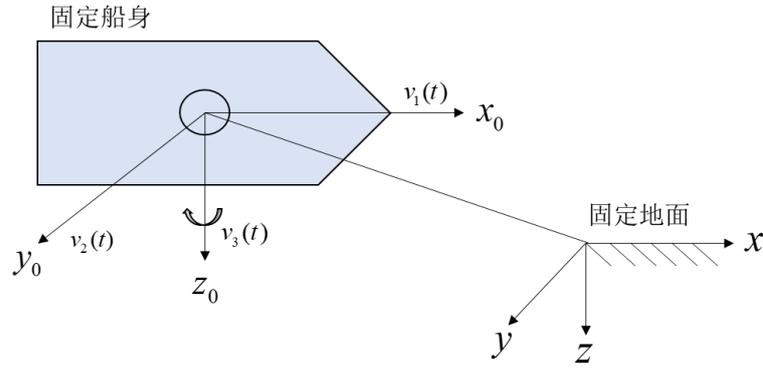


图 2-2 固体船身和固定地面参考系

Figure 2-2. Earth-fixed frame and body-fixed reference frame

考虑图 2-2 中固定船身和固定地面的参照系，其中， x_0 、 y_0 、 z_0 分别表示纵轴、横轴和法向轴， x 、 y 、 z 分别表示地面固定的参照系。

无人水面艇的固定船身的 3 自由度运动方程可被描述为：

$$M\dot{v}(t) + Nv(t) + G\eta(t) = u(t) \quad (2-1)$$

其中， $v(t) = [v_1(t) \ v_2(t) \ v_3(t)]^T$ 是速度向量， $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 、 $v_3(t)$ 分别表示前向、横向、偏航的速度向量； $\eta(t) = [x_p(t) \ y_p(t) \ \psi(t)]^T$ ， $x_p(t)$ 、 $y_p(t)$ 表示位置， $\psi(t)$ 表示偏航角； $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^T$ 是控制向量， $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 、 $u_3(t)$ 分别表示前向力、横向力和推进器系统提供的偏航力矩。 M 为可逆惯性矩阵满足 $M = M^T > 0$ ， N 为阻尼矩阵， N 通常为不对称矩阵，结构形式

$$\text{分别为 } M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ 0 & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}, \text{ 从 } M \text{ 和 } N \text{ 的定义可知前}$$

向和横向-偏航之间没有耦合关系。 G 为停泊力矩阵，可建模成弹性矩阵 $G(\eta - \eta_0)$ ，其中 η_0 是船的平衡位置，本文假设 $\eta_0 = 0$ 。 M 、 N 、 G 均为已知的常数矩阵。在动态船舶定位系统中，根据文献^[62]，运动方程可以表示如下：

$$\dot{\eta}(t) = J(\psi(t))v(t) \quad (2-2)$$

其中, $J(\psi(t)) = \begin{bmatrix} \cos(\psi(t)) & -\sin(\psi(t)) & 0 \\ \sin(\psi(t)) & \cos(\psi(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。假设偏航角 $\psi(t)$ 足够小时, 那么 $\cos(\psi(t))$ 趋向 1, $\sin(\psi(t))$ 趋向 0, 使得 $J(\psi(t))$ 近似于 I 。

定义 $x(t) = v(t)$, $A_1 = M^{-1}G$, $A = -M^{-1}N$, $B = M^{-1}$, 状态空间方程可转化成

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) - A_1g(t, x(t)) \quad (2-3)$$

其中, $g(t, x(t)) = \eta(t)$ 表示 $x(t)$ 的时变非线性向量函数。另外, 考虑到无人水面艇会受到海洋中风、海浪等外部影响, 我们加入 $\bar{D}(t)$ 表示海洋中未知的干扰, 式(2-3)可转化成

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \bar{D}(t) - A_1g(t, x(t)) \quad (2-4)$$

令 $\tilde{D}(t) = \bar{D}(t) - A_1g(t, x(t))$, 则式(2-4)可转化成

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \tilde{D}(t) \quad (2-5)$$

我们的目的是设计一个跟踪控制律, 因此设定一个参考的期望状态 $x_{ref}(t)$, 使得 $x(t)$ 能跟踪上, 且控制目标是使得跟踪误差尽可能得小。

令 $e(t) = x(t) - x_{ref}(t)$, 则

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + w(t) \quad (2-6)$$

其中, $w(t) = [w_1(t) \ w_2(t) \ w_3(t)]^T = Ax_{ref} + \tilde{D}(t)$ 。

控制输出向量 $y(t)$ 可描述为

$$y(t) = Ce(t) \quad (2-7)$$

其中, C 为输出矩阵。

结合(2-6)和(2-7), 误差动态方程可表示成

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Ce(t), e_0 = e(t_0) \end{cases} \quad (2-8)$$

其中, $e(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^s$ 分别表示系统误差状态和系统的控制输入, $w(t) \in \mathbb{R}^q$ 为未知扰动, 属于 $l_2[0 \ \infty)$, 初始状态 $e_0 \in \mathbb{R}^n$, A , B , C 分别对应已知的合适维度的常数系统矩阵。

另外，在网络环境下无人水面艇系统可能会发生故障，这是不可避免的，因此在构建误差动态方程时将故障直接考虑进去，本文考虑执行器端的故障。那么(2-6)可转化成

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t) \quad (2-9)$$

其中， $f(t) \in \mathbb{R}^l$ 表示执行器的故障信号。那么误差动态方程(2-8)可表示成

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t) \\ y(t) = Ce(t), e_0 = e(t_0) \end{cases} \quad (2-10)$$

本文不考虑数据包无序，并假设构造的网络不存在网络的随机丢包，且只考虑采样器和控制站之间的网络时延，记 δ_t ， $0 < \delta_t < \bar{\delta}$ 为传输时刻 t 的网络时延， $\bar{\delta}$ 为网络时延上界。以上即为存在执行器故障的网络化无人水面艇系统模型。

2.1.2 DoS 攻击

DoS 攻击是一种较为常见且易于实现的网络攻击手段，一般会影响数据包的正常传输，甚至造成数据包丢失，极大地降低系统的性能，因此有必要在网络化无人水面艇系统中考虑 DoS 攻击。本章假设采样器和控制器之间的网络通道存在 DoS 攻击，DoS 攻击服从伯努利随机分布，在此情况下数据包有一定概率无法到达控制站即丢包，从而会导致无人水面艇系统性能降低甚至不稳定。

$$p(t) = \begin{cases} 1, & \text{攻击失败} \\ 0, & \text{攻击成功} \end{cases} \quad (2-11)$$

其中，期望为 $E\{p(t) = 1\} = \bar{p}$ ，方差为 $E\{(p(t) - \bar{p})^2\} = \sigma$ 。由式(2-11)可知，DoS 攻击对无线网络通道进行持续攻击，有一定的概率攻击成功，其中，DoS 攻击成功造成数据包丢失时为 0，DoS 攻击失败则数据包正常传输时为 1。

令 $t_k = t - \delta(t)$ ， $t \in [t_k + \delta_k, t_{k+1} + \delta_{k+1})$ ，那么控制站接收到的输出信号为：

$$\begin{aligned} \tilde{y}(t) &= y(t_k) \\ &= y(t - \delta(t)) \\ &= Ce(t - \delta(t)) \end{aligned} \quad (2-12)$$

其中，我们假设时刻 $t_k, t_{k+1}, \dots, (k = 0, 1, 2, \dots)$ 成功传输数据到控制站，而 t_k 和 t_{k+1} 时刻之间的控制输入信号被丢弃。 $\delta(t)$ 为网络传输时刻 t 时采样器到控制站之间的网络通道上的网络时延， $\bar{\delta}$ 为网络时延上界。

2.2 基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计

针对第 2.1 节所描述的存在 DoS 攻击干扰和执行器故障的网络化无人水面艇系统, 本节提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法, 其中观测器, 故障检测滤波器和控制器组成控制站。

在 DoS 攻击干扰和执行器故障情况下, 本章采用以下基于观测的故障检测滤波器和控制器来产生残差信号和控制输入:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t) = A\hat{e}(t) + B\hat{u}(t) + L(p(t)\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{e}(t) \\ r(t) = V(p(t)\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{u}(t) = K\hat{e}(t) \end{cases} \quad (2-13)$$

其中, $\hat{e}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}^l$, $r(t) \in \mathbb{R}^r$, $\hat{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ 分别表示基于观测的故障检测滤波器和控制器的状态、输出、残差信号和控制输入。 L , V , K 分别为观测器增益, 故障检测滤波器增益和控制器增益。

无人水面艇的控制输入为

$$u(t) = \hat{u}(t) = K\hat{e}(t) \quad (2-14)$$

定义 $\varphi(t) = e(t) - \hat{e}(t)$, 结合(2-10), (2-12)和(2-13)可得

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) &= (A - LC)\varphi(t) + LCe(t) - p(t)LCe(t - \delta(t)) \\ &\quad + Bf(t) + w(t) \end{aligned} \quad (2-15)$$

定义 $\phi(t) = [\varphi^T(t) \ e^T(t)]^T$, $\omega(t) = [f^T(t) \ w^T(t)]^T$, $r_e(t) = r(t) - f(t)$, 结合(2-13), (2-14)和(2-15), 可以得到如下网络化无人水面艇的闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{\phi}(t) = \Pi_1\phi(t) + p(t)\Pi_2\phi(t - \delta(t)) + \Pi_3\omega(t) \\ r_e(t) = \bar{C}_1\phi(t) + \bar{C}_2\phi(t - \delta(t)) + \bar{C}_3\omega(t) \end{cases} \quad (2-16)$$

其中, $\Pi_1 = \begin{bmatrix} A - LC & LC \\ -BK & A + BK \end{bmatrix}$, $\Pi_2 = \begin{bmatrix} 0 & -LC \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\Pi_3 = \begin{bmatrix} B & I \\ B & I \end{bmatrix}$, $\bar{C}_1 = [VC \ -VC]$, $\bar{C}_2 = p(t)[0 \ VC]$, $\bar{C}_3 = [-I \ 0]$ 。

另外, 为了检测执行器故障, 构建残差评价函数如下所示:

$$J(t) = \left(\int_0^t r_e^T(s)r_e(s)ds \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-17)$$

残差评价函数阈值为:

$$J_{th} = \sup_{\omega(t) \in L_2, f(t)=0} J(t) \quad (2-18)$$

那么可以得到如下故障检测定律:

$$\begin{cases} J(t) > J_{th}, & \text{有故障} \\ J(t) \leq J_{th}, & \text{无故障} \end{cases} \quad (2-19)$$

当检测出存在故障，会触发执行器报警，此时可以采取一些措施保证无人水面艇系统在网络环境下的航向安全。

以上，网络化无人水面艇闭环系统已经构造完毕，下一节我们将对闭环系统进行稳定性分析，并进行控制器和滤波器设计。

2.3 稳定性分析和控制器设计

本节主要针对第 2.2 节构造的网络化无人水面艇闭环系统的稳定性进行分析，并在此基础上设计基于观测的故障检测滤波器和控制器。在此之前，需用到以下引理和定义。

引理 2-1^[27] 对于给定矩阵 $R > 0$ ，在 $[a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ 上的所有连续可微函数 ϕ 有以下不等式成立：

$$\begin{aligned} \int_a^b \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds &\geq \frac{1}{b-a} (\phi(b) - \phi(a))^T R (\phi(b) - \phi(a)) \\ &\quad + \frac{3}{b-a} \Omega^T R \Omega \end{aligned} \quad (2-20)$$

其中， $\Omega = \phi(a) + \phi(b) - \frac{2}{b-a} \int_a^b \phi(s) ds$ 。

引理 2-2^[68] 舒尔补定理的主要作用在于将一个 2 次矩阵不等式转化成线性矩阵不等式，或者至少是这个方向上的其中一步，其主要结论如以下式所示：

1. $\phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{12}^T & \phi_{22} \end{bmatrix} < 0$
2. $\phi_{22} < 0, \phi_{11} - \phi_{12} \phi_{22}^{-1} \phi_{12}^T < 0$
3. $\phi_{11} < 0, \phi_{22} - \phi_{12} \phi_{11}^{-1} \phi_{12}^T < 0$

定义 2-1^[69] 若对任意的初始状态，都有下列式子成立：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\|\phi(t)\|^2 | \phi_0) = 0 \quad (2-21)$$

则该系统均方稳定。

2.3.1 稳定性分析

定理 2-1 给定 DoS 攻击参数 \bar{p} , σ , 时延 $\bar{\delta} > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 考虑 DoS 攻击(2-11)下的 $\omega(t) = 0$ 的系统(2-16), 若存在正定对称矩阵 P , Q , R , 使下列不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \Theta & (\Pi_1 e_1 + \bar{p}\Pi_2 e_2)^T & (\Pi_2 e_2)^T \\ * & -(\bar{\delta}R)^{-1} & 0 \\ * & * & -(\bar{\delta}\sigma R)^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (2-22)$$

则系统(2-16)在所考虑的 DoS 攻击(2-11)下是均方稳定的。

其中,

$$\begin{aligned} \Theta = & 2e_1^T P (\Pi_1 e_1 + \bar{p}\Pi_2 e_2) + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 - (e_1 - e_2)^T R (e_1 - e_2) \\ & - (e_1 + e_2 - e_4)^T 3R (e_1 + e_2 - e_4) - (e_2 - e_3)^T R (e_2 - e_3) \\ & - (e_2 + e_3 - e_5)^T 3R (e_2 + e_3 - e_5) + \sigma (\Pi_2 e_2)^T R (\Pi_2 e_2), \end{aligned}$$

$$e_1 = [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 24}], \quad e_2 = [0_{6 \times 6} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 18}], \quad e_3 = [0_{6 \times 12} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 12}],$$

$$e_4 = [0_{6 \times 18} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6}], \quad e_5 = [0_{6 \times 24} \quad I_{6 \times 6}].$$

证明. 基于引理 2-1, 本文构造下列 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V(t) = & \phi^T(t) P \phi(t) + \int_{t-\bar{\delta}}^t \phi^T(s) Q \phi(s) ds \\ & + \bar{\delta} \int_{-\bar{\delta}}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds d\theta \end{aligned} \quad (2-23)$$

由此可以求得 $V(t)$ 导数的期望:

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}(t)\} = & E\{2\phi^T(t) P \dot{\phi}(t) + \phi^T(t) Q \phi(t) \\ & - \phi^T(t - \bar{\delta}) Q \phi(t - \bar{\delta}) + \bar{\delta}^2 \dot{\phi}^T(t) R \dot{\phi}(t) \\ & - \bar{\delta} \int_{t-\bar{\delta}}^t \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds\} \end{aligned} \quad (2-24)$$

其中,

$$\bar{\delta} \int_{t-\bar{\delta}}^t \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds = \bar{\delta} \left(\int_{t-\delta(t)}^t \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds + \int_{t-\bar{\delta}}^{t-\delta(t)} \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds \right)$$

根据引理 2-1, 可得以下不等式:

$$\begin{aligned} \int_{t-\delta(t)}^t \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds \geq & \frac{1}{\delta(t)} \left[(\phi(t) - \phi(t - \delta(t)))^T R (\phi(t) - \phi(t - \delta(t))) \right. \\ & \left. + \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right)^T \right. \\ & \left. \times 3R \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right) \right] \\ \geq & \frac{1}{\bar{\delta}} \left[(\phi(t) - \phi(t - \delta(t)))^T R (\phi(t) - \phi(t - \delta(t))) \right. \\ & \left. + \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right)^T \right] \end{aligned}$$

$$\times 3R \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right) \Bigg]$$

类似的, 我们可以得到下列不等式:

$$\begin{aligned} \int_{t-\bar{\delta}}^{t-\delta(t)} \dot{\phi}^T(s) R \dot{\phi}(s) ds &\geq \frac{1}{\bar{\delta} - \delta(t)} \left[\left(\phi(t - \delta(t)) - \phi(t - \bar{\delta}) \right)^T \right. \\ &\quad \times R \left(\phi(t - \delta(t)) - \phi(t - \bar{\delta}) \right) \\ &\quad + \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right)^T \\ &\quad \times 3R \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right) \Bigg] \\ &\geq \frac{1}{\bar{\delta}} \left[\left(\phi(t - \delta(t)) - \phi(t - \bar{\delta}) \right)^T \right. \\ &\quad \times R \left(\phi(t - \delta(t)) - \phi(t - \bar{\delta}) \right) \\ &\quad + \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right)^T \\ &\quad \times 3R \left(\phi(t) + \phi(t - \delta(t)) - \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right) \Bigg] \end{aligned}$$

对于 $\omega(t) = 0$ 的系统(2-16), 有下列等式:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}(t) &= \Pi_1 \phi(t) + p(t) \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \\ &= \Pi_1 \phi(t) + (p(t) - \bar{p}) \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \\ &\quad + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \end{aligned} \quad (2-25)$$

令 $l_1 = \Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t))$, $l_2 = (p(t) - \bar{p}) \Pi_2 \phi(t - \delta(t))$, 则有

$\dot{\phi}(t) = l_1 + l_2$, 于是不难得到

$$\begin{aligned} E\{\dot{\phi}^T(t) R \dot{\phi}(t)\} &= E\left\{ \left(l_1 + l_2 \right)^T R \left(l_1 + l_2 \right) \right\} \\ &= E\{l_1^T R l_1 + l_1^T R l_2 + l_2^T R l_1 + l_2^T R l_2\} \\ &= E\{l_1^T R l_1 + l_2^T R l_2\} \end{aligned} \quad (2-26)$$

其中, $E\{l_1^T R l_1\} = \left(\Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right)^T R \left(\Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right)$,
 $E\{l_2^T R l_2\} = \sigma \left(\Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right)^T R \left(\Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right)$.

另外, 我们定义 $\zeta^T(t) = \left[\phi(t) \quad \phi(t - \delta(t)) \quad \phi(t - \bar{\delta}) \quad \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds \right. \\ \left. - \frac{2}{\bar{\delta} - \delta(t)} \int_{t-\bar{\delta}}^{t-\delta(t)} \phi(s) ds \right]$, 那么式(2-24)可转化成如下不等式:

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}(t)\} &\leq E\{\zeta^T(t) \left[2e_1^T P \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 \right) + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (e_1 - e_2)^T R (e_1 - e_2) - (e_1 + e_2 - e_4)^T \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times 3R (e_1 + e_2 - e_4) - (e_2 - e_3)^T R (e_2 - e_3) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (e_2 + e_3 - e_5)^T 3R (e_2 + e_3 - e_5) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 \right)^T R \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 \right) \\
& + \sigma (\Pi_2 e_2)^T R (\Pi_2 e_2) \Big] \zeta(t) + \delta^2 \dot{\phi}^T(t) R \dot{\phi}(t)
\end{aligned}$$

根据舒尔补定理, 以及条件(2-22), 可知上式(2-27)中 $E\{\dot{V}(t)\} < 0$, 则系统(2-16)被证明在 $\omega(t) = 0$ 时是均方稳定的。

2.3.2 H_∞ 性能分析

根据定理 2-1, 下面给出闭环系统(2-16)的 H_∞ 干扰衰减指数 γ 的充分条件。

定理 2-2 给定 DoS 攻击参数 \bar{p} , σ , 时延 $\bar{\delta} > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 考虑 DoS 攻击(2-11)下的系统(2-16), 若存在正定对称矩阵 P , Q , R , 使式(2-22)成立, 以及下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ * & \Lambda_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (2-28)$$

则 DoS 攻击(2-11)下的系统(2-16)均方稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 γ 。

其中,

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \bar{\Theta} & e_1^T P \Pi_3 & e_1^T \Pi_1^T + \bar{p} e_2^T \Pi_2^T \\ * & -\gamma^2 I & \Pi_3^T \\ * & * & -(\bar{\delta} R)^{-1} \end{bmatrix}, \quad \Lambda_2 = \begin{bmatrix} e_2^T \Pi_2^T & e_1^T \bar{C}_1^T + p(t) e_1^T \bar{C}_2^T & e_1^T \bar{C}_2^T \\ 0 & \bar{C}_3^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Lambda_3 = \text{diag} \left\{ -(\sigma \bar{\delta} R)^{-1}, -I, -\sigma^{-1} I \right\},$$

$$\begin{aligned}
\bar{\Theta} & = 2e_1^T P \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 \right) + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 - (e_1 - e_2)^T R (e_1 - e_2) \\
& - (e_1 + e_2 - e_4)^T 3R (e_1 + e_2 - e_4) - (e_2 - e_3)^T R (e_2 - e_3) \\
& - (e_2 + e_3 - e_5)^T 3R (e_2 + e_3 - e_5) + \sigma (\Pi_2 e_2)^T R (\Pi_2 e_2).
\end{aligned}$$

证明. 基于式(2-23)构造的 Lyapunov 函数来分析 $\omega(t) \neq 0$ 的闭环系统(2-16)的 H_∞ 性能。

对于 $\omega(t) \neq 0$ 的系统(2-16),

$$\begin{aligned}
\dot{\phi}(t) & = \Pi_1 \phi(t) + p(t) \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \\
& = \Pi_1 \phi(t) + (p(t) - \bar{p}) \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) + \Pi_3 \omega(t) \\
& \quad + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t))
\end{aligned} \quad (2-29)$$

令 $\bar{l}_1 = \Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) + \Pi_3 \omega(t)$, $\bar{l}_2 = (p(t) - \bar{p}) \Pi_2 \phi(t - \delta(t))$, 则有 $\dot{\phi}(t) = \bar{l}_1 + \bar{l}_2$, 于是不难得到

$$\begin{aligned}
E\{\dot{\phi}^T(t) R \dot{\phi}(t)\} & = E\left\{ \left(\bar{l}_1 + \bar{l}_2 \right)^T R \left(\bar{l}_1 + \bar{l}_2 \right) \right\} \\
& = E\left\{ \bar{l}_1^T R \bar{l}_1 + \bar{l}_1^T R \bar{l}_2 + \bar{l}_2^T R \bar{l}_1 + \bar{l}_2^T R \bar{l}_2 \right\} \\
& = E\left\{ \bar{l}_1^T R \bar{l}_2 + \bar{l}_1^T R \bar{l}_2 \right\}
\end{aligned} \quad (2-30)$$

其中,

$$E\{\bar{l}_1^T R \bar{l}_1\} = \left(\Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) + \Pi_3 \omega(t) \right)^T R \left(\Pi_1 \phi(t) + \bar{p} \Pi_2 \phi(t - \delta(t)) + \Pi_3 \omega(t) \right),$$

$$E\{\bar{l}_2^T R \bar{l}_2\} = \sigma \left(\Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right)^T R \left(\Pi_2 \phi(t - \delta(t)) \right).$$

另外, 我们定义 $\zeta^T(t) = \left[\phi(t) \quad \phi(t - \delta(t)) \quad \phi(t - \bar{\delta}) \quad \frac{2}{\delta(t)} \int_{t-\delta(t)}^t \phi(s) ds - \frac{2}{\bar{\delta}-\delta(t)} \int_{t-\bar{\delta}}^{t-\delta(t)} \phi(s) ds \right]$, 那么式(2-24)可转化成如下不等式:

$$E\{\dot{V}(t)\} \leq E\{\zeta^T(t) \left[2e_1^T P \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 + \Pi_3 \omega(t) \right) + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 - (e_1 - e_2)^T R (e_1 - e_2) - (e_1 + e_2 - e_4)^T \times 3R(e_1 + e_2 - e_4) - (e_2 - e_3)^T R (e_2 - e_3) - (e_2 + e_3 - e_5)^T 3R(e_2 + e_3 - e_5) + \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 + \Pi_3 \omega(t) \right)^T R \left(\Pi_1 e_1 + \bar{p} \Pi_2 e_2 + \Pi_3 \omega(t) \right) + \sigma (\Pi_2 e_2)^T R (\Pi_2 e_2) \right] \zeta(t) + \bar{\delta}^2 \dot{\phi}^T(t) R \dot{\phi}(t) \}$$
(2-31)

接下来, 我们引入以下指标:

$$H = \int_0^T (r_e^T(t) r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t)) dt$$
(2-32)

考虑零初始条件下, 可得到下列等式:

$$H = \int_0^T (r_e^T(t) r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) + \dot{V}(t)) dt - V(T)$$

$$< \int_0^T (r_e^T(t) r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) + \dot{V}(t)) dt$$
(2-33)

条件(2-28)成立可以保证 $r_e^T(t) r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) + \dot{V}(t) < 0$, 进一步可以保证 $H < 0$ 。令 $T \rightarrow \infty$, 则有下列不等式成立:

$$\int_0^\infty r_e^T(t) r_e(t) dt < \gamma^2 \int_0^\infty \omega^T(t) \omega(t) dt$$
(2-34)

由此可知 $\|r_e(t)\|_2 \leq \gamma \|\omega(t)\|_2$, $\omega(t) \in l_2[0, \infty)$, 因此所考虑的 DoS 攻击(2-11)下的闭环系统(2-16)均方稳定, 且保证 H_∞ 性能。同时, γ 越小, 系统 H_∞ 性能越好。

2.3.3 控制器设计

接下来, 我们设计基于观测的故障检测滤波器和控制器。

定理 2-3 给定 DoS 攻击参数 \bar{p} , σ , 时延 $\bar{\delta} > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 考虑 DoS 攻击(2-11)下的系统(2-16), 若存在正定对称矩阵 \tilde{P} , \tilde{Q} , \tilde{R} , \tilde{U} , 使下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_1 & \tilde{\Lambda}_2 \\ * & \tilde{\Lambda}_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (2-35)$$

则 DoS 攻击(2-11)下的系统(2-16)均方稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 γ 。并且基于观测器的故障检测滤波器和控制器的增益由下式给出：

$$\begin{aligned} K &= \Sigma_1 U^{-1} \\ L &= \Sigma_2 U^{-1} C^T (C C^T)^{-1} \\ V &= \Sigma_3 U^{-1} C^T (C C^T)^{-1} \end{aligned} \quad (2-36)$$

其中，

$$\tilde{\Lambda}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta} & e_1^T \Pi_3 & e_1^T \tilde{\Pi}_1^T + \bar{p} e_2^T \tilde{\Pi}_2^T \\ * & -\gamma^2 I & \Pi_3^T \\ * & * & -\frac{1}{\delta} (\tilde{R} - 2U) \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Lambda}_2 = \begin{bmatrix} e_2^T \tilde{\Pi}_2^T & e_1^T \tilde{C}_1^T + \bar{p} e_2^T \tilde{C}_2^T & e_2^T \tilde{C}_2^T \\ 0 & \tilde{C}_3^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Lambda}_3 = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma \delta} (\tilde{R} - 2U), -I, -\sigma I \right\},$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta} &= \text{sym} [e_1^T (\tilde{\Pi}_1 e_1 + \bar{p} \tilde{\Pi}_2 e_2)] + e_1^T \tilde{Q} e_1 - e_3^T \tilde{Q} e_3 - (e_1 - e_2)^T \tilde{R} (e_1 - e_2) \\ &\quad - (e_1 + e_2 - e_4)^T 3\tilde{R} (e_1 + e_2 - e_4) - (e_2 - e_3)^T \tilde{R} (e_2 - e_3) \\ &\quad - (e_2 + e_3 - e_5)^T 3\tilde{R} (e_2 + e_3 - e_5) \end{aligned}$$

$$\tilde{\Pi}_1 = \begin{bmatrix} AU - \Sigma_2 & \Sigma_2 \\ -B\Sigma_1 & AU + B\Sigma_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Pi}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\Sigma_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_1 = [\Sigma_3 \quad -\Sigma_3], \quad \tilde{C}_2 = [0 \quad \Sigma_3], \quad \tilde{U} = \text{diag}\{U, U\},$$

证明. 令 $P = \text{diag}\{\tilde{P}, \tilde{P}\}$ ，定义 $U = \tilde{P}^{-1}$ ， $UQU = \tilde{Q}$ ， $URU = \tilde{R}$ 。式(2-28)左右分别乘以 $\text{diag}\{\tilde{U}, \tilde{U}, \tilde{U}, \tilde{U}, \tilde{U}, I, I, I, I, I\}$ ，再根据不等式 $-U\tilde{R}U \leq \tilde{R} - U^T - U$ ，就可以得到式(2-35)。证明完毕。

2.4 网络化无人水面艇仿真实例

本节以 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统为例，验证所设计的故障检测滤波器和控制器方法的有效性。本章目的是使偏航速度跟踪参考信号，抑制偏航速度误差和偏航角，同时检测故障的发生和位置。根据文献^[25]，无人水面艇系统参数如下：

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 1.0852 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0575 & -0.4087 \\ 0 & -0.4087 & 0.2153 \end{bmatrix} \\ N &= \begin{bmatrix} 0.0865 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0762 & 0.0151 \\ 0 & 0.0151 & 0.031 \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} 0.0389 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0266 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-37)$$

令 $A = -M^{-1}N$ ， $B = M^{-1}$ ，有

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -0.0797 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0818 & -0.0577 \\ 0 & -0.2254 & -0.2535 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0.9215 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7802 & 1.4811 \\ 0 & 1.4811 & 7.4562 \end{bmatrix} \\
 C &= I
 \end{aligned} \tag{2-38}$$

我们给定 DoS 攻击参数 $\bar{p} = 0.1$, $\sigma = 0.1$, $\bar{\delta} = 0.1s$, $h = 0.01s$, $\gamma = \sqrt{10}$ 。基于观测器的故障检测滤波器和控制器的增益可由定理 2-3 求解得到：

$$\begin{aligned}
 K &= \begin{bmatrix} -2.1320 & 0 & 0 \\ 0 & -4.0863 & 0.8613 \\ 0 & 0.8260 & -0.4233 \end{bmatrix} \\
 L &= \begin{bmatrix} 2.0909 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0949 & -0.0671 \\ 0 & -0.1369 & 2.0229 \end{bmatrix} \\
 V &= \begin{bmatrix} 0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0.0007 \\ 0 & 0.0005 & 0.0035 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-39}$$

前向、横向、偏航方向的扰动如图 2-3 给出。

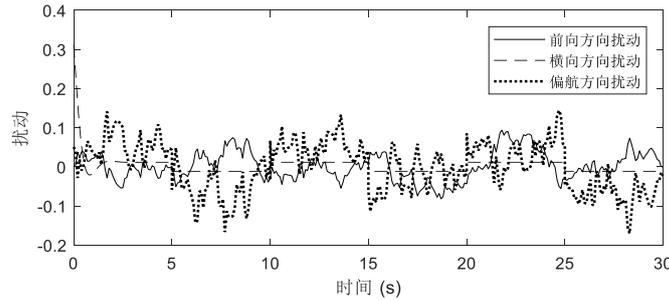


图 2-3 外部干扰

Figure 2-3. External disturbance

为了说明所提出的故障检测滤波器和控制器协同设计方法能够在网络环境下有效控制无人水面艇系统航向稳定，我们首先考虑不存在执行器故障的情况，网络化无人水面艇系统在航向中会受到外部干扰和 DoS 攻击，DoS 攻击服从伯努利随机分布。图 2-4 表示 DoS 攻击成功时的丢包序列，其中数字 1 表示 DoS 攻击发生时丢包，0 表示 DoS 攻击发生时不丢包。图 2-5 至 2-9 均为图 2-4 所示的 DoS 攻击下的响应。从图 2-5 和图 2-6 可以看出，偏航速度跟踪误差和偏航角幅值都得到了有效减少，图 2-7 表示航向上的控制信号，从图 2-8 和图 2-9 可以看出，前向速度和横向速度都得到了有效的控制。结果表明，本章所提出的方法确实能对受扰的无人水面艇系统进行有效的航向控制。

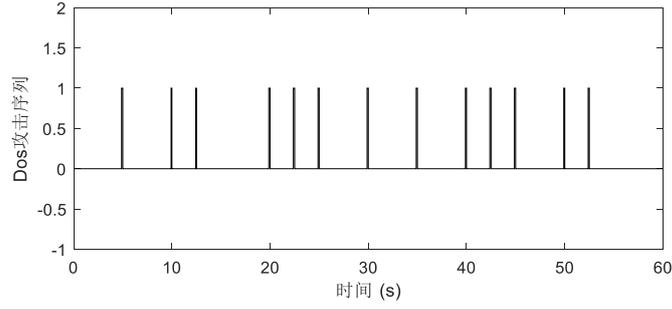


图 2-4 DoS 攻击成功时丢包序列

Figure 2-4. The sequence of packet dropout when DoS attack occurs

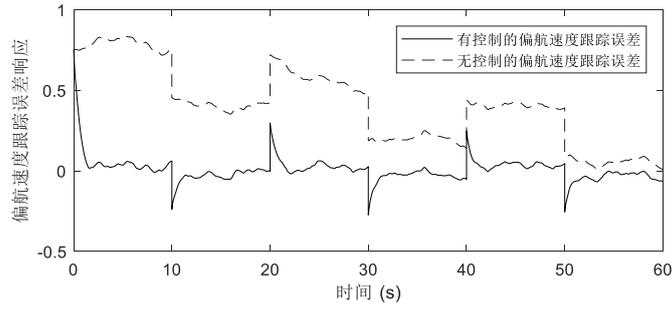


图 2-5 偏航速度跟踪误差响应

Figure 2-5. The response of yaw velocity error

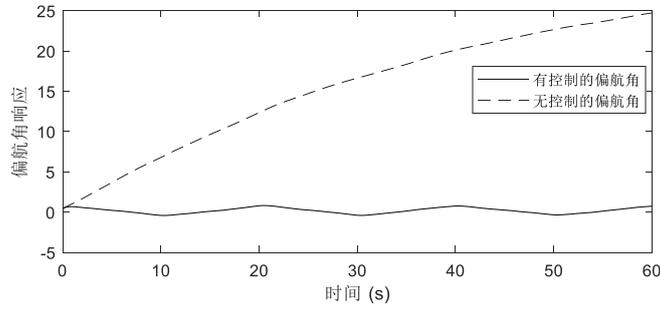


图 2-6 偏航角响应

Figure 2-6. The response of yaw angle

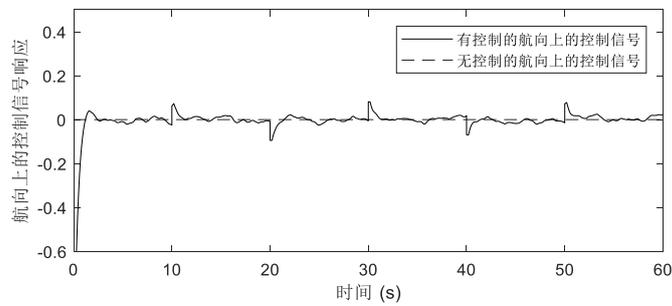


图 2-7 航向上的控制信号响应

Figure 2-7. The response of heading control signal

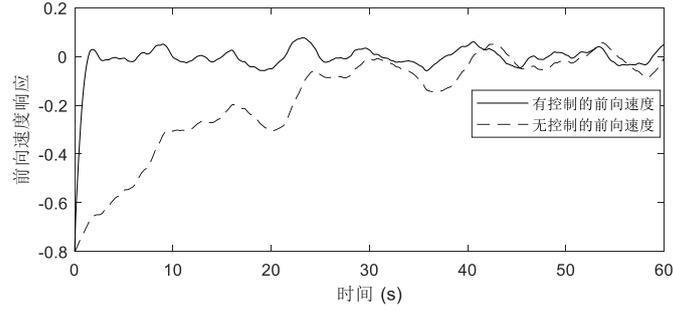


图 2-8 前向速度响应

Figure 2-8. The response of surge velocity

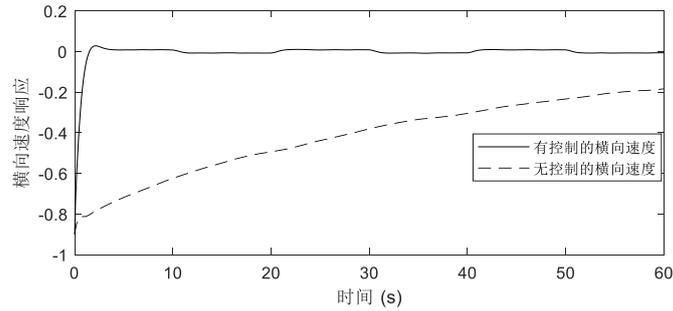


图 2-9 横向速度响应

Figure 2-9. The response of sway velocity

为了说明本章的方法可以检测执行器的故障，我们将执行器故障信号 $f_1(t)$ 描述为以下形式：

$$f_1(t) = \begin{cases} 0.01, & t \in [10s, 12.5s] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-40)$$

图 2-10 和 2-11 说明故障发生时无人水面艇系统仍能保证航向控制稳定。由图 2-12 可知执行器故障信号 $f_1(t)$ 的发生对残差信号有及时的影响，说明本章方法不仅可以检测出故障的发生，还能检测故障发生在哪个通道上，图 2-12 中的故障即为偏航方向上的。我们给定的故障是 10s 时发生的，由图 2-12 和 2-13 可以发现，故障检测时间基本也是 10s，能及时地检测故障的发生。由图 2-13 可知当残差评价函数超过阈值会立即触发执行器报警，此时可以采取一些措施保证无人水面艇系统在网络环境下的航向可靠性和安全性。

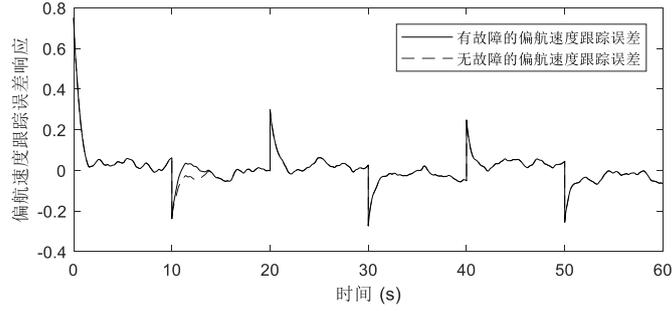


图 2-10 故障 $f_1(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应

Figure 2-10. The yaw velocity error response with $f_1(t)$

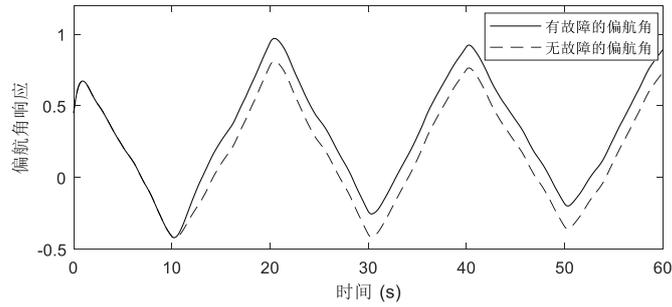


图 2-11 故障 $f_1(t)$ 下的偏航角响应

Figure 2-11. The yaw angle response with $f_1(t)$

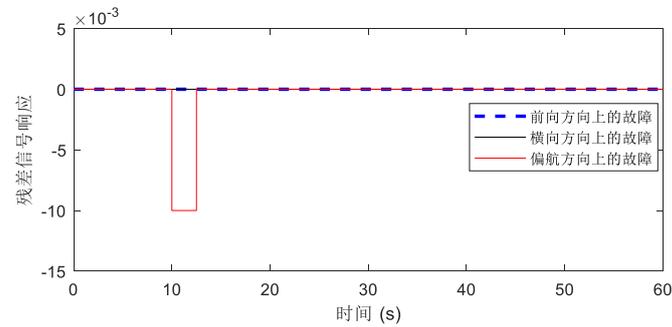


图 2-12 故障 $f_1(t)$ 下的残差信号响应

Figure 2-12. The residual response with $f_1(t)$

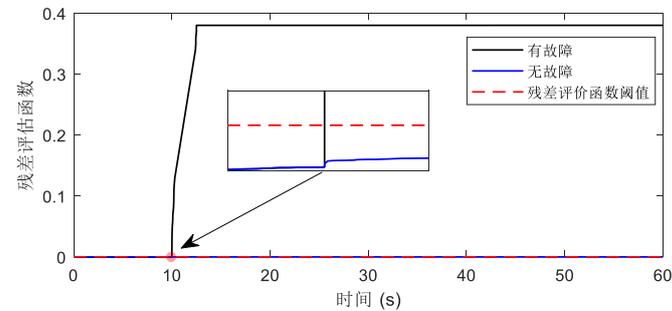


图 2-13 故障 $f_1(t)$ 下的残差评价函数

Figure 2-13. The residual evaluation with $f_1(t)$

为了进一步证明所提出的方法确实可以检测故障，我们设置如下执行器故障信号 $f_2(t)$ 并将故障信号加在横向方向上：

$$f_2(t) = \begin{cases} 0.03\sin(t), & t \in [20s, 24s] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-41)$$

由图 2-14 和 2-15 可以明显地发现当故障发生时无人水面艇系统仍能保证航向控制稳定，由图 2-16 和图 2-17 可知该方法能及时检测出故障并判断出是横向方向上的故障，当残差评价函数超过阈值立即触发执行器报警，且可以看出在 20s 时故障就被及时检测出来，证明该方法的可靠性。由上面分析可知，一旦执行器发生故障，即使网络通道中存在 DoS 攻击，基于观测的故障检测滤波器仍能及时准确地检测出故障信号，保证无人水面艇系统安全，且对外界干扰具有较强的鲁棒性。

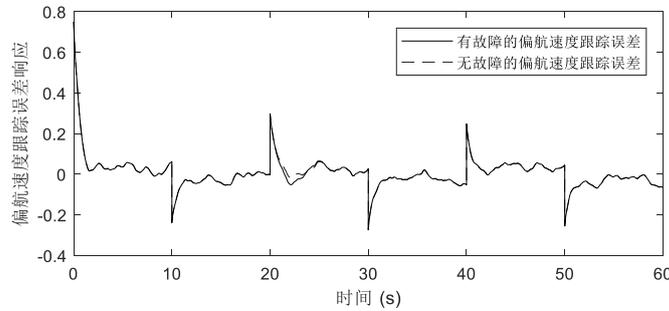


图 2-14 故障 $f_2(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应

Figure 2-14. The yaw velocity error response with $f_2(t)$

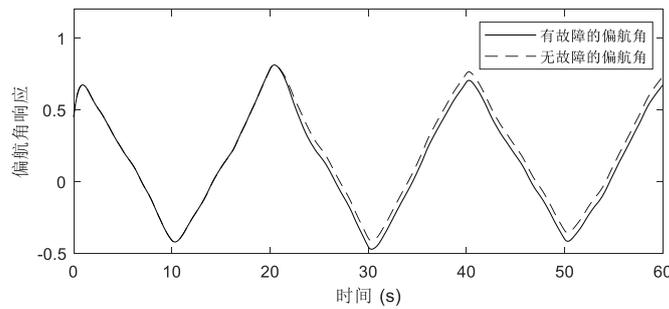
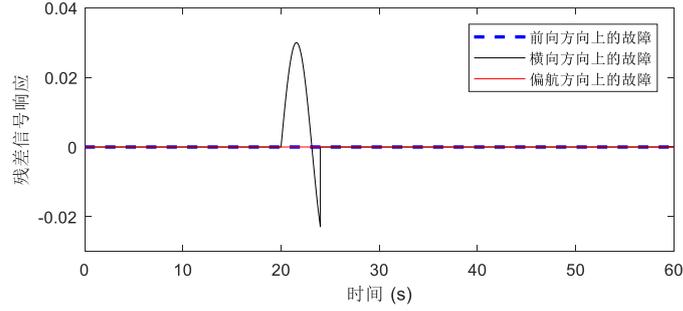
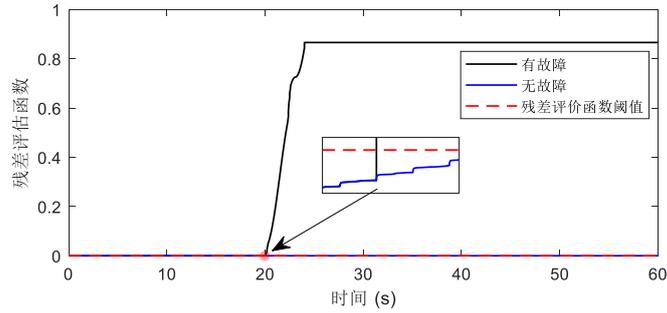


图 2-15 故障 $f_2(t)$ 下的偏航角响应

Figure 2-15. The yaw angle response with $f_2(t)$

图 2-16 故障 $f_2(t)$ 下的残差信号响应Figure 2-16. The residual response with $f_2(t)$ 图 2-17 故障 $f_2(t)$ 下的残差评价函数Figure 2-17. The residual evaluation with $f_2(t)$

综上所述，本章所提出的基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法，不仅可以对存在 DoS 攻击和执行器故障的网络化无人水面艇系统航向进行有效控制，而且可以及时检测出故障的发生和位置。

2.5 本章小结

本章构建了一个 DoS 攻击下存在执行器故障的网络化无人水面艇系统，DoS 攻击服从伯努利随机分布使得数据包存在概率丢包，影响无人水面艇系统的性能。基于此，提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法，有效控制无人水面艇系统航向稳定，并快速准确检测执行器故障的发生和位置。

第三章 DoS 攻击下无人水面艇基于事件触发的故障检测滤波器 和控制器设计

根据第二章对于 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统的研究，本章考虑更现实的网络环境，在网络化无人水面艇控制系统中，无人水面艇、采样器、控制站和执行器由共享的无线网络连接，其中无线网络的通讯节点电池通常是受到限制的。然而，传统的周期采样机制会采样过多不必要的数据，占用过多通信资源导致网络冲突，从而造成网络资源的浪费，提早耗尽节点能量。基于此，本章提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。首先构建一个非周期 DoS 攻击、外部干扰和执行器故障同时存在的网络化无人水面艇控制系统，并设计一种自适应事件触发机制，动态更新触发阈值，减少网络资源浪费。接着给出稳定性推导分析， H_∞ 性能证明分析以及基于事件触发的故障检测滤波器和控制器，并用 MATLAB 仿真验证方法的有效性。

3.1 问题描述

我们考虑节点能量受限和遭受 DoS 攻击下的网络化无人水面艇控制系统，如图 3-1 所示，对无人水面艇系统进行故障检测滤波器和控制器协同设计。可以发现，图 3-1 与图 2-1 的主要不同之处在于，采样器和控制站之间加入了事件触发器，关于事件触发的设计于 3.2 节会进行详细介绍。

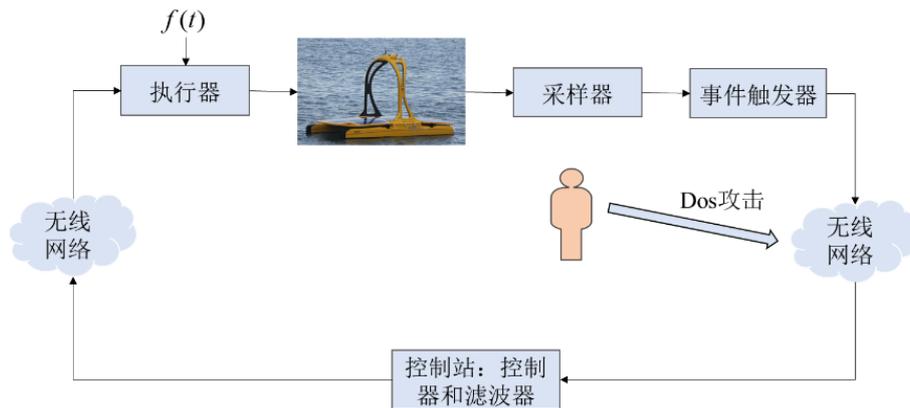


图 3-1 DoS 攻击下基于事件触发的网络化无人水面艇控制系统结构

Figure 3-1. Structure of networked unmanned surface vehicle control system based on event triggering under DoS attack

3.1.1 网络化无人水面艇控制系统

同第二章类似，为了简化无人水面艇的运动数学模型，同样选择一个 3 自由度的装有推进器的锚定无人水面艇作为目标对象模型。考虑无人水面艇会受到海洋中风、海浪等影响，引入海洋中未知的干扰 $\bar{D}(t)$ ，此外我们针对的是航向跟踪控制，目标在于使跟踪误差尽可能得小。误差动态方程可描述为下列方程，具体的过程可参照第二章内容：

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Ce(t), e_0 = e(t_0) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中， $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(t) \in \mathbb{R}^s$ 分别表示系统误差状态和系统的控制输入， $w(t) \in \mathbb{R}^q$ 为未知扰动，属于 $L_2[0, \infty)$ ，初始状态 $e_0 \in \mathbb{R}^n$ ， A, B, C 分别对应已知的合适维度的常数系统矩阵， $y(t)$ 为控制输出信号。

另外我们考虑无人水面艇系统中执行器端的故障。那么有下列不等式成立：

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t) \quad (3-2)$$

其中， $f(t) \in \mathbb{R}^l$ 表示执行器的故障信号。那么误差动态方程(3-1)可表示成：

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t) \\ y(t) = Ce(t), e_0 = e(t_0) \end{cases} \quad (3-3)$$

本文不考虑数据包无序，并假设构造的网络不存在网络的随机丢包，且只考虑采样器和控制站之间的网络时延，记 δ_t ， $0 < \delta_t < \bar{\delta}$ 为传输时刻 t 的网络时延， $\bar{\delta}$ 为网络时延上界。以上即为存在执行器故障的网络化无人水面艇系统模型。

3.1.2 非周期 DoS 攻击

假设采样器和控制站之间的通信通道在某一时刻被攻击者阻塞，在此情况下数据无法到达控制站。与第二章的 DoS 攻击不同，出于攻击能量攻击者的考虑，通常可以将 DoS 攻击假设成非周期 DoS 攻击这样更典型的攻击方式。假设采样器和控制器之间的网络通道存在非周期 DoS 攻击，其攻击形式可参考文献^[38]。为了简化后续的研究分析，非周期的 DoS 攻击信号的分段函数如下：

$$\mathcal{A}_{DoS} = \begin{cases} 0, t \in [h_{n-1}, h_{n-1} + \Delta_{n-1}) \triangleq \Gamma_{1,n-1} \\ 1, t \in [h_{n-1} + \Delta_{n-1}, h_n) \triangleq \Gamma_{2,n-1} \end{cases} \quad (3-4)$$

其中， $[h_{n-1}, h_{n-1} + \Delta_{n-1})$, ($n \in \mathbb{N}, h_{n-1} \geq 0$) 表示不存在攻击信号且通信信号正常的第 n 次 DoS 攻击间隔， $[h_{n-1} + \Delta_{n-1}, h_n)$, $n \in \mathbb{N}$ 表示存在攻击信号且数据包无法传输的第 n 次 DoS 攻击间隔， Δ_{n-1} 表示攻击的睡眠时长， $h_{n-1} + \Delta_{n-1}$ ， h_n 分别表示第 n 次 DoS 攻击开始和结束的时刻。对于 $n \in \mathbb{N}$ ，有 $h_n > h_{n-1} + \Delta_{n-1}$ 。另外，本文的攻击信号是非周期性的，即每个攻击的睡眠时长 Δ_{n-1} 不完全相同。

需要指出的是本章所考虑的 DoS 攻击能够造成百分百丢包，那么如果攻击的持续时间任意大的话，无人水面艇系统会一直处于开环状态，此时则无法达到控制目标。由此，我们有必要做出以下假设：

假设 3-1 对于时间间隔 $\Gamma_{1,n-1}$ 时，存在一个标量 Δ_{\min} 满足 $\Delta_{\min} \leq \inf_{n \in \mathbb{N}} \{\Delta_n\}$ ；对于时间间隔 $\Gamma_{2,n-1}$ 时，存在一个标量 d_{\max} 满足 $d_{\max} \geq \sup_{n \in \mathbb{N}} \{h_{n+1} - h_n - \Delta_n\}$ 。

假设 3-2 被时间间隔 $\Gamma_{2,n-1}$ 指定的攻击序列受到频率限制，即，在 $\forall t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ 下，对于给定的 $\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$ ， $\hat{t} \in \mathbb{R}_{>0}$ ，攻击信号序列满足

$$N(0, t) \leq \hat{t} + \frac{t}{\tau_D}$$

其中， τ_D 表示平均驻留时间， $N(0, t)$ 表示发生在时间区间 $[0, t)$ 上的 DoS 攻击开关的转换次数，即 $N(0, t) = \text{card}\{n \in \mathbb{N} | t > h_n + \Delta_n\}$ ， card 表示集合 $N(0, t)$ 中的元素个数，可参考文献^[27]。

基于上面的讨论，误差动态方程(3-3)可表示成

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t), & \text{无攻击} \\ \dot{e}(t) = Ae(t) + Bf(t) + w(t), & \text{存在攻击} \end{cases} \quad (3-5)$$

在上述假设下，DoS 攻击是非周期性的，在采样器到控制站的网络通道中造成连续的数据传输中断。假设 3-1 中，DoS 攻击的持续时间取决于 DoS 攻击睡眠间隔的下界 Δ_{\min} 和攻击活动间隔的上界 d_{\max} ，用于第 3.3 节的性能分析。一个较大的 Δ_{\min} 和一个较小的 d_{\max} 表示一个持续时间内较少的攻击。假设 3-2 中，我们使用平均驻留时间 τ_D 的概念来描述 DoS 攻击的频率。也有其他类似的措施包括网络带宽限制和高通过滤等，从本质上减少 DoS 攻击在通信通道上的成功入侵，从而限制 DoS 攻击的频率和持续时间。另外，由于无限制的 DoS 攻击会使得系统一直处于开环状态，破坏无人水面艇系统稳定性，因此对 DoS 攻击的频率和持续时间做出有界假设是必要的，且对于无人水面艇系统的应用具有实际意义。

3.2 基于事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计

针对第 3.1 节所描述的网络节点能量受限和 DoS 攻击干扰下的网络化无人水面艇系统，本节提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。

3.2.1 自适应事件触发机制设计

采样器采得输出信号通过无线网络发送到控制站，考虑到现实中网络节点能量的限制，本文引入自适应事件触发机制，当满足一定的事件触发条件即可

触发传输过程，可以减少采样器到控制器的无线网络中有限网络节点能量的不必要损耗，减轻网络负担，节省网络资源。

事件触发条件如下所示，数据包经过事件触发器判断条件是否满足，再通过网络传输到控制站。

$$\begin{aligned} & [y((t_k + m)h) - y(t_k h)]^T W [y((t_k + m)h) - y(t_k h)] \\ & > \varepsilon((t_k + m)h) y(t_k h)^T W y(t_k h) \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中， $h, 0 < h < \Delta_n$ 表示采样器的采样周期， $t_k, t \in \mathbb{N}_+$ 表示第 k 个发送的数据包的时间序列且 $t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots$ ， $\varepsilon((t_k + m)h) \in (0,1)$ 表示动态阈值参数， $W > 0$ 为权重矩阵。

式(3-6)表示通过与前一时刻发送的数据包 $y(t_k h), t_k \in l$ 进行比较，从而决定当前时刻采集的数据包 $y(t_k h + mh), m \in \{1, 2, \dots\}$ 是否传输。

本章提出如下动态阈值参数：

$$\varepsilon((t_k + m)h) = \frac{1}{1 + \|y(t_k h + mh)\| - \|y(t_k h)\|} \varepsilon_{\max} \quad (3-7)$$

其中， ε_{\max} 为给定的最大触发阈值，是一个常数。

式(3-7)不难看出如果当前采得的输出信号与最近一次释放的数据差距很大，那么阈值会降低，更低的阈值意味着更多的数据需要被传输；反之，若两者相差很小，这意味着阈值接近最大值，此时传输的数据达到最小，整个过程是动态自适应的，我们会在仿真部分进行更为直观的展示。

由于无线网络通道中存在 DoS 攻击会干扰网络通道，在 DoS 攻击时刻阻止滤波器的输入信号正常传输，事件触发条件(3-6)不能直接使用。因此本节重新设计释放序列如下：

$$t_{k,n}h = \{t_k h \text{ 满足式(3-6)}\} \cup \{h_n\} \quad (3-8)$$

其中， $t_{0,n}h = h_0$ 。

典型的无人水面艇系统可以描述为连续时间模型，如式(3-3)所示，随着在无人水面艇控制系统中引入网络，采样时间和触发时间必须采用离散时间法进行分析，然而，随后的系统稳定性分析和控制器设计都是基于连续时间框架的，因此我们将时间间隔分割，用控制输出信号的连续函数来表示离散时间下的控制输出信号。

记 $\delta_{t_{k,n}}$ ， $0 < \delta_{t_{k,n}} < \bar{\delta}$ 为网络传输时刻 $t_k h$ 的网络时延。控制站在 $t_k h + \delta_{t_{k,n}}$ 时刻接收数据包并一直使用至 $t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}}$ 时刻，那么控制站收到的输出信号可以描述为下列式子：

$$\tilde{y}(t) = y(t_{k,n}h) \quad (3-9)$$

其中, $t \in [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}})$ 。

定义 $\mathcal{T}_{k,n} = [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}})$, 并分割时间间隔 $\mathcal{T}_{k,n}$ 如下:

$$\mathcal{T}_{k,n} = \bigcup_{m=0}^{m_k} \theta_m \quad (3-10)$$

其中,

$$\begin{aligned} m_k &= t_{k+1,n}h - t_{k,n}h - 1, \\ \theta_0 &= [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + h), \\ \theta_m &= [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + mh, t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + (m+1)h), \\ \theta_{m_k} &= [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + m_k h, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}}). \end{aligned}$$

定义 $\delta_{k,n}(t)$ 和 $\eta_{k,n}(t)$ 分别为时延函数和误差函数, 则

$$\begin{aligned} \delta_{k,n}(t) &= t - t_{k,n}h - mh \\ \eta_{k,n}(t) &= y(t_{k,n}h) - y(t_{k,n}h + mh) \end{aligned} \quad (3-11)$$

由式(3-10)和(3-11)我们可以知道 $\delta_{k,n}(t)$ 为分段可微线性函数, 且满足下列不等式:

$$0 \leq \delta_{t_{k,n}} \leq \delta_{k,n}(t) \leq \max\{\delta_{t_{k,n}}, \delta_{t_{k+1,n}}\} + h \leq \bar{\delta} + h \triangleq \delta_M \quad (3-12)$$

其中, $\bar{\delta}$ 表示网络时延上界, δ_M 表示网络时延 δ 和采样周期 h 相关的上界参数。那么控制站接收到的输出信号可以描述为下式:

$$\tilde{y}(t) = y(t_{k,n}h) = y(t - \delta_{k,n}(t)) + \eta_{k,n}(t) \quad (3-13)$$

3.2.2 故障检测滤波器和控制器协同设计

在存在 DoS 攻击干扰和执行器故障的网络化无人水面艇系统中, 我们引入自适应事件触发机制, 并采用以下基于观测器的故障检测滤波器和控制器来产生残差信号和控制输入:

当 $t \in \mathcal{T}_{k,n} \cap \Gamma_{1,n-1}$ 时,

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t) = A\hat{e}(t) + B\hat{u}(t) + L(\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{e}(t) \\ r(t) = V(\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{u}(t) = K\hat{e}(t) \end{cases} \quad (3-14)$$

当 $t \in \Gamma_{2,n-1}$ 时,

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t) = A\hat{e}(t) + B\hat{u}(t) - L\hat{y}(t) \\ r(t) = -V\hat{y}(t) \end{cases} \quad (3-15)$$

其中, $\hat{e}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}^l$, $r(t) \in \mathbb{R}^r$, $\hat{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ 分别表示基于观测的故障检测滤波器和控制器的状态、输出、残差信号和控制输入。 L , V , K 为可设置参数。式(3-14)和(3-15)分别为无 DoS 攻击和有 DoS 攻击情况下的故障检测滤波器和控制器协同设计式子, 式(3-15)中的 $\hat{y}(t)$ 和 $\hat{u}(t)$ 和式(3-14)相同, 故不再赘述。

无人水面艇的控制输入可以描述为:

$$u(t) = \hat{u}(t) = K\hat{e}(t) \quad (3-16)$$

我们定义 $\varphi(t) = e(t) - \hat{e}(t)$, 结合上面的式(3-5), (3-14), (3-15)以及(3-16)可以得到下列式子:

当 $t \in \mathcal{T}_{k,n} \cap \Gamma_{1,n-1}$ 时,

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) &= (A - LC)\varphi(t) + LCe(t) - LCe(t - \delta_{k,n}(t)) \\ &\quad - L\eta(t) + Bf(t) + w(t) \end{aligned} \quad (3-17)$$

当 $t \in \Gamma_{2,n-1}$ 时,

$$\dot{\varphi}(t) = (A - LC)\varphi(t) + Bf(t) + w(t) \quad (3-18)$$

上式(3-17)和(3-18)分别表示无 DoS 攻击和有 DoS 攻击的情况下。

定义 $\phi(t) = [\varphi^T(t) \ e^T(t)]^T$, $\omega(t) = [f^T(t) \ w^T(t)]^T$, $r_e(t) = r(t) - f(t)$, 结合式(3-14), (3-15), (3-16), (3-17)和(3-18), 我们可以得到如下网络化无人水面艇的闭环系统:

$$\begin{cases} \begin{cases} \dot{\phi}(t) = \Pi_1\phi(t) + \Pi_2\phi(t - \delta_{k,n}(t)) + \Pi_3\eta_{k,n}(t) + \Pi_4\omega(t) \\ r_e(t) = \bar{C}_1\phi(t) + \bar{C}_2\phi(t - \delta_{k,n}(t)) + \bar{C}_3\eta_{k,n}(t) + \bar{C}_4\omega(t) \end{cases} & \text{无攻击} \\ \begin{cases} \dot{\phi}(t) = \Pi_1\varphi(t) + \Pi_4\omega(t) \\ r_e(t) = \bar{C}_1\phi(t) + \bar{C}_4\omega(t) \end{cases} & \text{存在攻击} \end{cases} \quad (3-19)$$

其中, $\Pi_1 = \begin{bmatrix} A - LC & LC \\ -BK & A + BK \end{bmatrix}$, $\Pi_2 = \begin{bmatrix} 0 & -LC \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\Pi_3 = \begin{bmatrix} -L \\ 0 \end{bmatrix}$, $\Pi_4 = \begin{bmatrix} B & I \\ B & I \end{bmatrix}$, $\bar{C}_1 = [VC \ -VC]$, $\bar{C}_2 = [VC \ -VC]$, $\bar{C}_3 = V$, $\bar{C}_4 = [-I \ 0]$ 。

另外, 为了检测故障, 构建如下的残差评价函数如下所示:

$$J(t) = \left(\int_0^t r_e^T(s)r_e(s)ds \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-20)$$

残差评价函数阈值表示为:

$$J_{th} = \sup_{\omega(t) \in L_2, f(t)=0} J(t) \quad (3-21)$$

那么可以得到如下故障检测定律:

$$\begin{cases} J(t) > J_{th}, & \text{有故障} \\ J(t) \leq J_{th}, & \text{无故障} \end{cases} \quad (3-22)$$

当检测出的残差评价函数超过一定的阈值 J_{th} 时, 即可以认为检测出执行器存在故障, 进而会触发执行器报警, 此时可以采取一些措施保证无人水面艇系统在网络环境下的航向安全。

在现实网络环境下, 外部干扰和网络攻击等因素会干扰故障信号的检测, 我们希望设计的故障检测器可以在这些因素的影响下还能准确及时地检测故障的发生。特别地, DoS 攻击干扰数据包的正常传输, 在这种情况下数据包的发送和接收都会受到影响, 而基于故障检测滤波器, DoS 攻击对残差信号值 $r_e(t)$ 的影响可以忽略不计。因此我们假设当不存在执行器故障时, 残差评价函数 $J(t)$ 不会超过阈值 J_{th} 。

以上, 网络化无人水面艇闭环系统已经构造完毕, 下一节我们将对闭环系统进行稳定性分析, 并进行控制器和故障检测滤波器设计。

3.3 稳定性分析和控制器设计

本节主要针对第 3.2 节构造的网络化无人水面艇闭环系统的稳定性进行分析, 并在此基础上设计基于事件触发的故障检测滤波器和控制器。在此之前, 需用到以下引理和定义。

引理 3-1^[63] 对于给定矩阵 $R > 0$, 在 $[a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ 上的所有连续可微函数 ϕ 有以下不等式成立:

$$\begin{aligned} \int_a^b \phi^T(s) R \phi(s) ds &\geq \frac{1}{b-a} (\phi(b) - \phi(a))^T R (\phi(b) - \phi(a)) \\ &\quad + \frac{3}{b-a} \Omega^T R \Omega \end{aligned} \quad (3-23)$$

其中, $\Omega = \phi(a) + \phi(b) - \frac{2}{b-a} \int_a^b \phi(s) ds$ 。

引理 3-2^[64] 若对于给定矩阵 $R = R^T > 0$, 存在矩阵 $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 使得 $\begin{bmatrix} R & * \\ S & R \end{bmatrix} \geq 0$ 。那么对 $\forall \tau \in (0, 1)$, 有下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\tau} R & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\tau} R \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} R & * \\ S & R \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

上述引理用于闭环系统的全局指数稳定性分析。

引理 3-3^[27] 给定 DoS 攻击参数 Δ_{\min} , d_{\max} , $\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$, 时延 $\delta_M > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 以及常数 $\alpha_i \in (0, \infty)$, $\varepsilon_{\max} \in (0, 1)$, 考虑非周期 DoS 攻击(3-4)下的 $\omega(t) = 0$ 的系统(3-19), 若存在正定对称矩阵 P_i , Q_i , R_i , $i \in \{1, 2\}$ 和合适维度的矩阵 W , 沿着闭环系统(3-19)的轨迹, 有

$$V(t) \leq \begin{cases} e^{-2\alpha_1(t-h_n)}V(h_n), & t \in \Gamma_{1,n} \\ e^{2\alpha_2(t-h_n-\Delta_n)}V(h_n + \Delta_n), & t \in \Gamma_{2,n} \end{cases} \quad (3-25)$$

定义 3-1^[27] 若对 $\forall t \geq 0$, 存在 $\sigma > 0$, $\beta > 0$ 使得 $\phi(t) \leq \sigma^{-\beta t} \|Y_0\|_\delta$ 成立, 则该系统指数稳定。其中, $\|Y_0\|_\delta = \sup_{-\delta \leq t \leq 0} \{\|\phi(t)\|, \|\dot{\phi}(t)\|\}$, β 为衰减率。

3.3.1 稳定性分析

定理 3-1 给定 DoS 攻击参数 Δ_{\min} , d_{\max} , $\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$, 时延 $\delta_M > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 以及常数 $\alpha_i \in (0, \infty)$, $\mu_i \in (0, \infty)$, $\varepsilon_{\max} \in (0, 1)$, 考虑非周期 DoS 攻击(3-4)下的 $\omega(t) = 0$ 的系统(3-19), 若存在正定对称矩阵 P_i , Q_i , R_i , $i \in \{1, 2\}$ 和合适维度的矩阵 W , 使下列不等式成立:

$$P_1 \leq \mu_2 P_2 \quad (3-26)$$

$$P_2 \leq \mu_1 e^{2(\alpha_1 + \alpha_2)\delta_M} P_1 \quad (3-27)$$

$$Q_i \leq \mu_{3-i} Q_{3-i} \quad (3-28)$$

$$R_i \leq \mu_{3-i} R_{3-i} \quad (3-29)$$

$$0 \leq 2\rho = \frac{2\alpha_1\Delta_{\min} - 2(\alpha_1 + \alpha_2)\delta_M - 2\alpha_2d_{\max} - \ln(\mu_1\mu_2)}{\tau_D} \quad (3-30)$$

则闭环系统(3-19)在所考虑的非周期 DoS 攻击(3-4)下是全局指数稳定的, 其中, ρ 是闭环系统(3-19)的衰减率。

证明. 基于引理 3-2, 本文构造下列分段 Lyapunov 函数:

$$V(t) \leq \begin{cases} V_1(t), & t \in \mathcal{J}_{k,n} \cap \Gamma_{1,n} \\ V_2(t), & t \in \Gamma_{2,n} \end{cases} \quad (3-31)$$

其中,

$$\begin{aligned} V_i(t) = & \phi^T(t)P_i\phi(t) + \int_{t-\delta_M}^t \phi^T(s)e^{2(-1)^i\alpha_i(t-s)}Q_i\phi(s)ds \\ & + \delta_M \int_{-\delta_M}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\phi}^T(s)e^{2(-1)^i\alpha_i(t-s)}R_i\dot{\phi}(s)d\theta ds \end{aligned}$$

由引理 3-1 和引理 3-2 计算我们可得到下列式子:

$$\begin{cases} V_1(h_n) \leq \mu_2 V_2(h_n^-) \\ V_2(h_n + \Delta_n) \leq \mu_1 e^{2(\alpha_1 + \alpha_2)\delta_M} V_2((h_n + \Delta_n)^-) \end{cases} \quad (3-32)$$

那么由(3-28)可计算出 $V(t)$ 的估计值:

当 $t \in \Gamma_{1,n}$ 时, 由假设 3-1, 假设 3-2 和式(3-30)可以得到

$$V(t) \leq V_1(0)e^{c_1}e^{-2\rho t} \quad (3-33)$$

其中, $c_1 = 2(\alpha_1 + \alpha_2)\delta_M\hat{t} + 2\alpha_2d_{\max}\hat{t} - 2\alpha_1\Delta_{\min}\hat{t} + \ln(\mu_1\mu_2)\hat{t}$ 。

当 $t \in \Gamma_{2,n}$ 时, 同上可得

$$V(t) \leq \frac{1}{\mu_2}V_1(0)e^{c_2}e^{-2\rho t} \quad (3-34)$$

其中, $c_2 = [2(\alpha_1 + \alpha_2)\delta_M\hat{t} + 2\alpha_2d_{\max}\hat{t} - 2\alpha_1\Delta_{\min}\hat{t} + \ln(\mu_1\mu_2)](\hat{t} + 1)$ 。

定义 $\mu = \max\left\{e^{c_1}, \frac{e^{c_2}}{\mu_2}\right\}$, $\varpi_1 = \lambda_{\min}(P_1)$, $\varpi_2 = \lambda_{\max}(P_1)$, $\varpi_3 = \varpi_2 + \delta_M\lambda_{\max}(Q_1) + \frac{\delta_M^3}{2}\lambda_{\max}(R_1)$, 结合式(3-33)和(3-34)可得下列式子:

$$V(t) \leq \mu e^{-2\rho t}V_1(0) \quad (3-35)$$

为了保证一个理想系统性能, 需要一个较大的衰减率 ρ 。根据 $V(t)$ 的定义可知

$$\begin{aligned} V(t) &\geq \varpi_1 \|\phi(t)\|^2 \\ V_1(0) &\leq \varpi_3 \|Y_0\|_h^2 \end{aligned} \quad (3-36)$$

那么结合式(3-37)和(3-38)可得

$$\|\phi(t)\| \leq \sqrt{\frac{\mu\varpi_3}{\varpi_1}}e^{-\rho t}\|Y_0\|_h, \quad \forall t \geq 0 \quad (3-37)$$

根据定义 3-1, 系统(3-19)被证明是具有衰减率 ρ 的全局指数稳定。

3.3.2 H_∞ 性能分析

根据定理 3-1, 下面给出闭环系统(3-19)的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$ 的充分条件。

定理 3-2 给定 DoS 攻击参数 Δ_{\min} , d_{\max} , $\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$, 时延 $\delta_M > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 以及常数 $\gamma \in (0, \infty)$, $\alpha_i \in (0, \infty)$, $\mu_i \in (0, \infty)$, $\varepsilon_{\max} \in (0, 1)$, 若存在正定对称矩阵 P_i , Q_i , R_i , $W > 0$ 和合适维度的矩阵 S_i , $i \in \{1, 2\}$, 使式(3-26)-(3-30)成立, 以及下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ * & \Lambda_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (3-38)$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_2 & e_1^T P_2 \Pi_4 & e_1^T \Pi_1^T & e_1^T \bar{C}_1^T \\ * & -\gamma^2 I & \Pi_4^T & \bar{C}_4^T \\ * & * & -(\delta_M R)^{-1} & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-39)$$

则非周期 DoS 攻击(3-4)下的系统(3-19)全局指数稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$ 。

其中,

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \begin{bmatrix} \Theta_1 & e_1^T P_1 \Pi_3 & e_1^T P_1 \Pi_4 \\ * & -W & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \\ \Lambda_2 &= \begin{bmatrix} e_1^T \Pi_1^T + e_2^T \Pi_2^T & e_2^T H^T C^T & e_1^T \bar{C}_1^T + e_1^T \bar{C}_2^T \\ \Pi_3^T & I & \bar{C}_3^T \\ \Pi_4^T & 0 & \bar{C}_4^T \end{bmatrix}, \\ \Lambda_3 &= \text{diag}\{-(\delta_M^2 R_1)^{-1}, -(\varepsilon_{\max} W)^{-1}, -I\}, \\ \Theta_1 &= e_1^T [\text{sym}(P_1 \Pi_1) + P_1 + Q_1] e_1 + \text{sym}(e_1^T P_1 \Pi_2 e_2) - e^{-2\alpha_1 \delta_M} e_3^T Q_1 e_3 \\ &\quad - e^{-2\alpha_1 \delta_M} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{R}_1 & S_1 \\ * & \hat{R}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \\ \Theta_2 &= e_1^T [\text{sym}(P_2 \Pi_1) - P_2 + Q_2] e_1 - e^{-2\alpha_2 \delta_M} e_3^T Q_2 e_3 - \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{R}_2 & S_2 \\ * & \hat{R}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \\ e_1 &= [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 24}], \quad e_2 = [0_{6 \times 6} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 18}], \\ e_3 &= [0_{6 \times 12} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 12}], \\ e_4 &= [0_{6 \times 18} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6}], \\ e_5 &= [0_{6 \times 24} \quad I_{6 \times 6}], \\ \xi_1 &= \begin{bmatrix} e_1 - e_2 \\ e_1 + e_2 - e_4 \end{bmatrix}, \quad \xi_2 = \begin{bmatrix} e_2 - e_3 \\ e_2 + e_3 - e_5 \end{bmatrix}, \\ H &= [0 \quad I], \\ \hat{R}_i &= \text{diag}[R_i \quad 3R_i], \\ \tilde{\gamma} &= \sqrt{\frac{F_1}{F_2}}, \\ F_1 &= \min\{\mu_2^{-1}, 1\}, \\ F_2 &= \max\{\mu_2^{-1} e^{2\alpha_1 \Delta_{\min}}, e^{2\alpha_1 d_{\max}}\}. \end{aligned}$$

证明. 基于式(3-31)构造的分段 Lyapunov 函数来分析 $\omega(t) \neq 0$ 的闭环系统(3-19)的 H_∞ 性能, 需满足以下不等式:

当 $t \in \mathcal{T}_{k,n} \cap \Gamma_{1,n}$ 时,

$$\dot{V}_1(t) + 2\alpha_1 V_1(t) + r_e^T(t) r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) \leq 0 \quad (3-40)$$

当 $t \in \Gamma_{2,n}$ 时,

$$\dot{V}_2(t) + 2\alpha_2 V_2(t) + r_e^T(t)r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) \leq 0 \quad (3-41)$$

根据式(3-31) 构造的分段 Lyapunov 函数, 可以得到下列不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= 2\phi^T(t)P_1\dot{\phi}(t) + \phi^T(t)Q_1\phi(t) - \phi^T(t - \delta_M) \\ &\quad \times e^{-2\alpha_1\delta_M}Q_1\phi(t) + \delta_M^2\dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t) \\ &\quad - \delta_M \int_{t-\delta_M}^t \dot{\phi}^T(s)e^{-2\alpha_1\delta_M}R_1\dot{\phi}(s)ds \\ &\quad - 2\alpha_1 V_1(t) + \phi^T(t)P_1\phi(t) \\ &\leq 2\phi^T(t)P_1(\Pi_1\phi(t) + \Pi_2\phi(t - \delta_{k,n}(t)) + \Pi_3\eta_{k,n}(t) \\ &\quad + \Pi_4\omega(t)) + \phi^T(t)Q_1\phi(t) - e^{-2\alpha_1\delta_M}\phi^T(-\delta_M) \\ &\quad \times Q_1\phi(t - \delta_M) + \delta_M^2\dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t) - e^{-2\alpha_1\delta_M} \\ &\quad \times [(\phi(t) - \phi(t - \delta_M))^T R_1(\phi(t) - \phi(t - \delta_M)) \\ &\quad + \left(\phi(t) + \phi(t - \delta_{k,n}(t)) - \frac{2}{\delta_M} \int_{t-\delta_M}^t \phi(s)ds\right)^T \\ &\quad \times \left(\phi(t) + \phi(t - \delta_{k,n}(t)) - \frac{2}{\delta_M} \int_{t-\delta_M}^t \phi(s)ds\right) \\ &\quad - 2\alpha_1 V_1(t) + \phi^T(t)P_1\phi(t) \end{aligned} \quad (3-42)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } l^T(t) &= \left[\phi(t) \quad \phi(t - \delta_{k,n}(t)) \quad \phi(t - \delta_M) \quad \frac{2}{\delta_{k,n}(t)} \int_{t-\delta_{k,n}(t)}^t \phi(s)ds \right. \\ &\quad \left. \frac{2}{\delta_M - \delta_{k,n}(t)} \int_{t-\delta_M}^{t-\delta_{k,n}(t)} \phi(s)ds \right], \text{ 根据引理 3-2, 有以下不等式成立:} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\dot{V}_1(t)r_e^T(t)r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) + 2\alpha_1 V_1(t) \\ &\leq l^T(t) \left[2e_1^T P_1 (\Pi_1 e_1 + \Pi_2 e_2 + \Pi_3 \eta_{k,n}(t) + \Pi_4 \omega(t)) \right. \\ &\quad \left. + e_1^T P_1 e_1 + e_1^T Q_1 e_1 - e^{-2\alpha_1\delta_M} e_3^T Q_1 e_3 \right] l(t) \\ &\quad - \delta_M^2 \dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t) - e^{-2\alpha_1\delta_M} l^T(t) \begin{bmatrix} \hat{\xi}_1 \\ \hat{\xi}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{R}_1 & S_1 \\ * & \hat{R}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \\ &\quad \times l(t) - \eta_{k,n}^T(t)W\eta_{k,n}(t) + \eta_{k,n}^T(t)W\eta_{k,n}(t) \\ &\quad + r_e^T(t)r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) \end{aligned} \quad (3-43)$$

另外, 根据式(3-5)和(3-8)可以得到下列不等式:

$$\begin{aligned} \eta_{k,n}^T(t)W\eta_{k,n}(t) &\leq \varepsilon_{\max} \left[\eta_{k,n}(t) + CH\phi(t - \delta_{k,n}(t)) \right]^T \\ &\quad \times W \left[\eta_{k,n}(t) + CH\phi(t - \delta_{k,n}(t)) \right] \end{aligned} \quad (3-44)$$

根据引理 2-2 (舒尔补引理) 和式(3-41), 条件(3-35)可以保证以下不等式 $\dot{V}_1(t) + 2\alpha_1 V_1(t) + r_e^T(t)r_e(t) - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) \leq 0$ 成立, 那么条件(3-40)成立。同样, 如果条件(3-39)成立, 那么条件(3-41)成立。

另外, 由式(3-30)可得,

$$\mu_2^{-1}e^{2\alpha_1\Delta_{\min}} - \mu_1e^{2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_{k,n}(t)+2\alpha_2d_{\max}} \geq 0 \quad (3-45)$$

定义 $\tilde{F}_1(n) = \mu_2^{-1}e^{2\alpha_1(t-h_n)}$, $\tilde{F}_2(n) = e^{2\alpha_2(t-h_{n+1})}$, 对于 $t \in [0, h_{n+1})$, 有下列式子成立:

$$\begin{aligned} & \sum_{l=0}^n \int_{h_l}^{h_l+\Delta_l} \tilde{F}_1(l)[\gamma^2\omega^T(t)\omega(t) - r_e^T(t)r_e(t)]dt \\ & + \sum_{l=0}^n \int_{h_l+\Delta_l}^{h_{l+1}} \tilde{F}_2(l)[\gamma^2\omega^T(t)\omega(t) - r_e^T(t)r_e(t)]dt > 0 \end{aligned} \quad (3-46)$$

那么显然, 对于 $t \in [h_k, h_k + \Delta_k)$,

$$\begin{aligned} 1 & \leq e^{2\alpha_1(t-h_k)} \leq e^{2\alpha_1\Delta_k} \leq e^{2\alpha_1\Delta_{\min}} \\ 1 & \leq e^{-2\alpha_2(t-h_{k+1})} \leq e^{-2\alpha_2(h_k+\Delta_k-h_{k+1})} \leq e^{2\alpha_2d_{\max}} \end{aligned} \quad (3-47)$$

考虑零初始条件下, 并结合式(3-40)和(3-41), 对于 $[0, h_{n+1}), n \rightarrow \infty$, 可以得到下列不等式:

$$\int_0^\infty r_e^T(t)r_e(t)dt \leq \tilde{\gamma}^2 \int_0^\infty \omega^T(t)\omega(t)dt \quad (3-48)$$

由此可知 $\|r_e(t)\|_2 \leq \tilde{\gamma}\|\omega(t)\|_2$, $\omega(t) \in l_2[0, \infty)$, 因此所考虑的非周期 DoS 攻击(3-4)下的闭环系统(3-19)指数稳定, 且保证 H_∞ 性能。同时, $\tilde{\gamma}$ 越小, 系统 H_∞ 性能越好。

3.3.3 控制器设计

接下来, 我们设计基于观测器的故障检测滤波器和控制器。

定理 3-3 给定 DoS 攻击参数 Δ_{\min} , d_{\max} , $\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$, 时延 $\delta_M > 0$, 反馈增益矩阵 K , 观测器增益矩阵 L , 故障检测滤波器增益矩阵 V , 以及常数 $\gamma \in (0, \infty)$, $\alpha_i \in (0, \infty)$, $\mu_i \in (0, \infty)$, $\varepsilon_{\max} \in (0, 1)$, 若存在正定对称矩阵 U_{11i} , U_{22i} , \tilde{Q}_i , \tilde{R}_i , $\tilde{W} > 0$ 和合适维度的矩阵 \tilde{S}_i , Σ_{ji} , $i \in \{1, 2\}$, $j \in \{1, 2, 3\}$, 使下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_1 & \tilde{\Lambda}_2 \\ * & \tilde{\Lambda}_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (3-49)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_4 & \tilde{\Lambda}_5 \\ * & \tilde{\Lambda}_6 \end{bmatrix} < 0 \quad (3-50)$$

则非周期 DoS 攻击(3-4)下的系统(3-19)全局指数稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$ 。并且基于观测器的故障检测滤波器和控制器的增益由下式给出:

$$\begin{aligned}
 K &= \Sigma_{11} U_1^{-1} \\
 L &= \Sigma_{21} \bar{U}_1^{-1} \\
 V &= \Sigma_{31} \bar{U}_1^{-1}
 \end{aligned} \tag{3-51}$$

其中,

$$\tilde{\Lambda}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_1 & e_1^T \tilde{\Pi}_3 & e_1^T \Pi_4 \\ * & -\tilde{W} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Lambda}_2 = \begin{bmatrix} e_1^T \tilde{\Pi}_1^T + e_2^T \tilde{\Pi}_2^T & e_2^T \tilde{H}^T C^T & e_1^T \tilde{C}_{11}^T + e_1^T \tilde{C}_2^T \\ \tilde{\Pi}_3^T & I & \tilde{C}_3^T \\ \tilde{\Pi}_4^T & 0 & \tilde{C}_4^T \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Lambda}_3 = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\delta_M^2} (\tilde{R}_1 - 2\tilde{U}_1), \frac{1}{\varepsilon_{\max}} (\tilde{W} - 2\bar{U}_1), -I \right\},$$

$$\tilde{\Lambda}_4 = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_2 & e_1^T \Pi_4 \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Lambda}_5 = \begin{bmatrix} e_1^T \tilde{\Pi}_{12}^T & e_1^T \tilde{C}_{12}^T \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Lambda}_6 = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\delta_M^2} (\tilde{R}_2 - 2\tilde{U}_2), -I \right\},$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Theta}_1 &= e_1^T [\text{sym}(\tilde{\Pi}_{11}) + \tilde{U}_1 + \tilde{Q}_1] e_1 + \text{sym}(e_1^T \tilde{\Pi}_2 e_2) - e^{-2\alpha_1 \delta_M} e_3^T \tilde{Q}_1 e_3 \\
 &\quad - e^{-2\alpha_1 \delta_M} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{R}_1 & \tilde{S}_1 \\ * & \tilde{R}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

$$\tilde{\Theta}_2 = e_1^T [\text{sym}(\tilde{\Pi}_{12}) - \tilde{U}_2 - \tilde{Q}_2] e_1 - e^{-2\alpha_2 \delta_M} e_3^T \tilde{Q}_2 e_3 - \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{R}_2 & \tilde{S}_2 \\ * & \tilde{R}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Pi}_{11} = \begin{bmatrix} AU_1 - \Sigma_{21}C & \Sigma_{21}C \\ -B\Sigma_{11} & AU_1 + B\Sigma_{11} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Pi}_{12} = \begin{bmatrix} AU_2 - \Sigma_{22}C & \Sigma_{22}C \\ -B\Sigma_{12} & AU_2 + B\Sigma_{12} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Pi}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\Sigma_2 C \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Pi}_3 = \begin{bmatrix} -\Sigma_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C}_{11} = [\Sigma_{31}C \quad \Sigma_{31}C], \quad \tilde{C}_{12} = [\Sigma_{32}C \quad \Sigma_{32}C], \quad \tilde{C}_2 = [0 \quad \Sigma_3 C], \quad \tilde{C}_3 = \Sigma_3,$$

$$U_1 = Z_1^T U_{111} Z_1 + Z_2^T U_{221} Z_2, \quad \tilde{U}_1 = \text{diag}\{U_1, U_1\}, \quad \bar{U}_1 = O^{-1} X^{-1} U_{111} X O,$$

$$U_2 = Z_1^T U_{112} Z_1 + Z_2^T U_{222} Z_2, \quad \tilde{U}_2 = \text{diag}\{U_2, U_2\}.$$

证明. 令 $P_i = \text{diag}\{\tilde{P}_i, \tilde{P}_i\}$, 定义 $U_i = \tilde{P}_i^{-1}$, $U_i Q_i U_i = \tilde{Q}_i$, $U_i R_i U_i = \tilde{R}_i$,

$U_i W U_i = \tilde{W}$, $U_i S_i U_i = \tilde{S}_i$. 对于 $U_i = Z \begin{bmatrix} U_{11i} & * \\ 0 & U_{22i} \end{bmatrix} Z^T$, 根据文献^[65]可知存在

$\bar{U}_i = O X U_{11i} X^{-1} O^{-1}$ 使得 $C U_i = \bar{U}_i C$, 其中, $\bar{U}_i^{-1} = O X U_{11i}^{-1} X^{-1} O^{-1}$, O , Z 为奇异值分解的正交矩阵, X 为非奇异值. 式(3-38)和(3-39)左右分别乘以

$\text{diag}\{\tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, I, I, I, I\}$ 和 $\text{diag}\{\tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, I, I, I\}$, 就可以分别得

到式(3-49)和(3-50). 证明完毕.

以上, 本章整体算法可总结为算法 1.

算法 1: 自适应事件触发的故障检测和控制算法

初始化: 给定参数 $\gamma \in (0, \infty)$, $\alpha_i \in (0, \infty)$, $\mu_i \in (0, \infty)$, $\varepsilon_{\max} \in (0, 1)$.

- 1 根据定理 3-3 离线算出观测器增益 L , 滤波器增益 V , 控制器增益 K .
 - 2 在当前时刻根据 (3-7) 求得动态阈值参数, 并根据触发条件 (3-6), 判断当前时刻采集的数据包是否发送.
 - 3 根据 (3-20) (3-21) (3-22) 判断执行器故障是否发生, 若存在故障则报警. 重复步骤 2 和 3.
-

3.4 网络化无人水面艇仿真实例

本节以非周期 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统为例，验证所提出的基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计方法的有效性。本章目的是使偏航速度跟踪参考信号，抑制偏航速度误差和偏航角，同时检测故障的发生和位置，并通过仿真对比来进一步展示自适应事件触发机制的优势。

根据文献^[57]，无人水面艇系统参数参考第二章，此处不再赘述。

我们给定 DoS 攻击参数 $\Delta_{\min} = 1.8s$ ， $d_{\max} = 0.5s$ ， $\tau_D = 1.15s$ ，参数 $\mu_1 = \mu_2 = 1.04$ ， $\alpha_1 = 0.018$ ， $\alpha_2 = 0.043$ ， $\delta_M = 0.1s$ ， $h = 0.01s$ ， $\gamma = \sqrt{10}$ ， $\varepsilon_{\max} = 0.15$ 。

基于观测器的故障检测滤波器和控制器的增益可由定理 3-3 求解得到：

$$\begin{aligned} K &= \begin{bmatrix} -8.0747 & 0 & 0 \\ 0 & -15.8615 & 3.3874 \\ 0 & 2.6006 & -1.5022 \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} 0.5828 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5745 & -0.0024 \\ 0 & 0.0007 & 0.5872 \end{bmatrix} \\ V &= 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 0.0205 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0147 & 0.0344 \\ 0 & 0.0261 & 0.1715 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-52)$$

前向、横向、偏航方向的扰动同第二章。

为了说明所提出的故障检测滤波器和控制器协同设计方法能够在网络环境下有效控制无人水面艇系统航向，我们首先考虑不存在执行器故障的情况，网络化无人水面艇系统在航向中会受到外部干扰和非周期 DoS 攻击。图 3-2 表示 DoS 攻击序列，其中数字 1 表示攻击发生，0 表示没有攻击的正常情况。图 3-3 至 3-7 均为图 3-2 所示的 DoS 攻击下的响应。如图 3-3 和图 3-4 所示，偏航速度误差和偏航角幅值都得到了有效减少，图 3-5 表示航向上的控制信号。如图 3-6 和图 3-7 所示，前向速度和横向速度都得到了有效的控制。另外，图 3-8 和图 3-9 分别为 DoS 攻击下的动态触发阈值和释放时间间隔，从图 3-10 可知经过事件触发后的输出信号极大减少，节省网络资源。结果表明，该方法确实能对无人水面艇系统进行有效的航向控制。

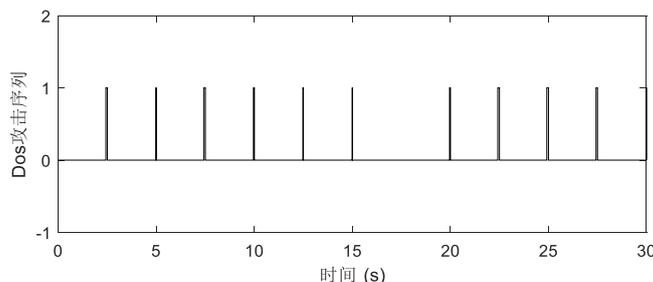


图 3-2 DoS 攻击序列

Figure 3-2. The sequence of DoS attack

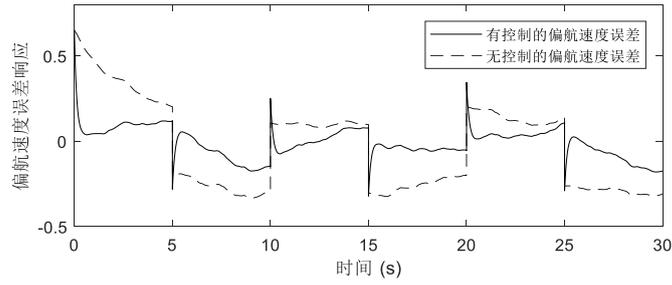


图 3-3 非周期 DoS 攻击下的偏航速度跟踪误差响应
Figure 3-3. The response of yaw velocity error under aperiodic DoS attack

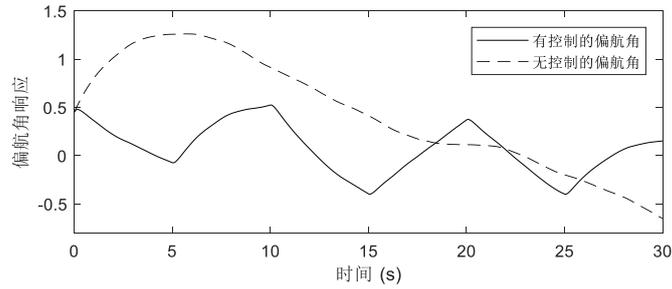


图 3-4 非周期 DoS 攻击下的偏航角响应
Figure 3-4. The response of yaw angle under aperiodic DoS attack

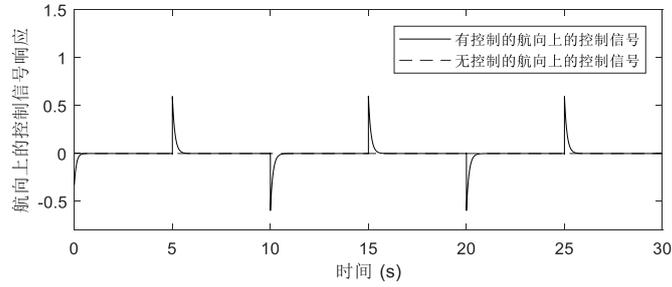


图 3-5 非周期 DoS 攻击下航向上的控制信号响应
Figure 3-5. The response of heading control signal under aperiodic DoS attack

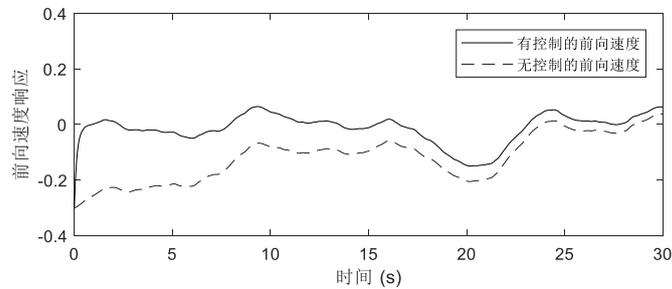


图 3-6 非周期 DoS 攻击下的前向速度响应
Figure 3-6. The response of surge velocity under aperiodic DoS attack

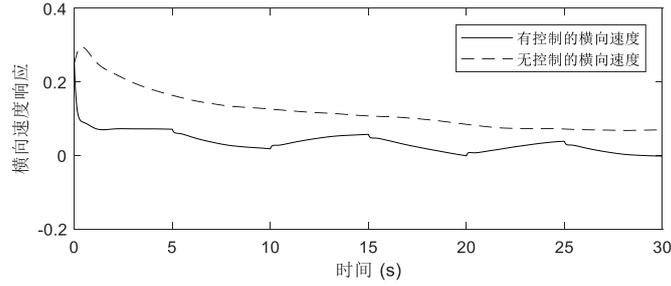


图 3-7 非周期 DoS 攻击下的横向速度响应

Figure 3-7. The response of sway velocity under aperiodic DoS attack

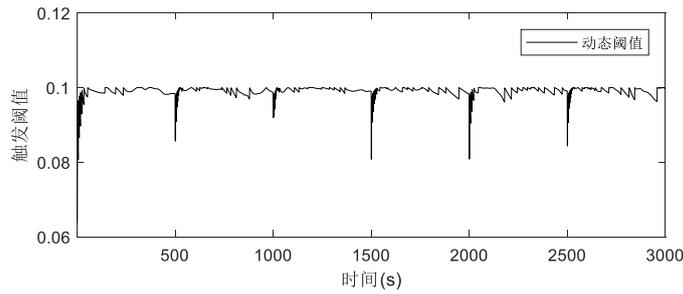


图 3-8 DoS 攻击下的动态触发阈值

Figure 3-8. The dynamic trigger threshold under DoS attack

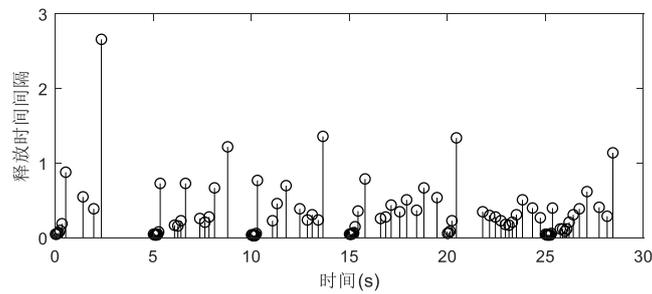


图 3-9 DoS 攻击下的释放时间间隔

Figure 3-9. The release time interval under DoS attack

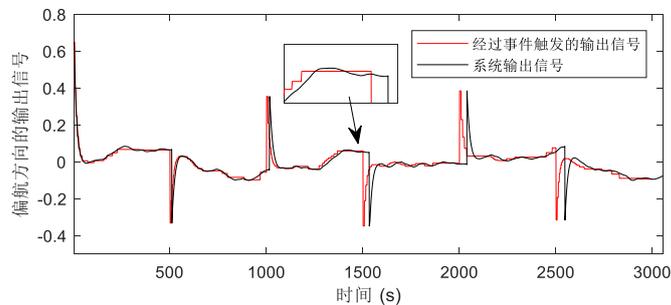
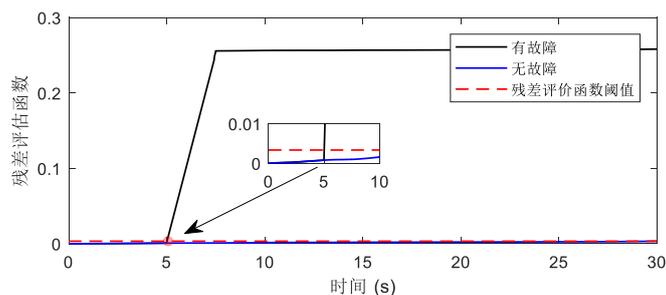


图 3-10 偏航方向的输出信号

Figure 3-10. The output signal in yaw direction

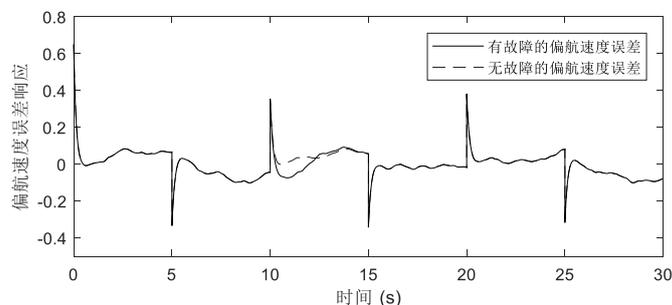
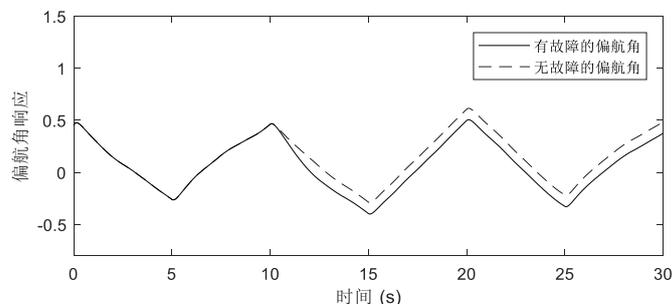
为了说明本章的方法可以检测执行器的故障，我们将执行器故障信号 $f_3(t)$ 描述为以下形式：

图 3-14 故障 $f_3(t)$ 下的残差评价函数Figure 3-14. The residual evaluation with $f_3(t)$

实际中执行器故障信号是复杂的，不单单是一种简单的方波信号，我们又设置如下执行器故障信号 $f_4(t)$ ，并放置于偏航方向：

$$f_4(t) = \begin{cases} 0.02\sin(t), & t \in [10s, 12.5s] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-54)$$

由图 3-15 和 3-16 可知故障发生时无人水面艇系统仍能保证航向控制稳定，由图 3-17 和图 3-18 可知该方法能及时检测出故障并判断出是偏航方向上的故障，当残差评价函数超过阈值立即触发执行器报警，说明该方法的及时性和可靠性。由此，一旦执行器发生故障，即使网络通道中存在 DoS 攻击，基于观测的故障检测滤波器仍能及时准确地检测出故障信号，保证无人水面艇系统安全。

图 3-15 故障 $f_4(t)$ 下的偏航速度跟踪误差响应Figure 3-15. The yaw velocity error response with $f_4(t)$ 图 3-16 故障 $f_4(t)$ 下的偏航角响应Figure 3-16. The yaw angle response with $f_4(t)$

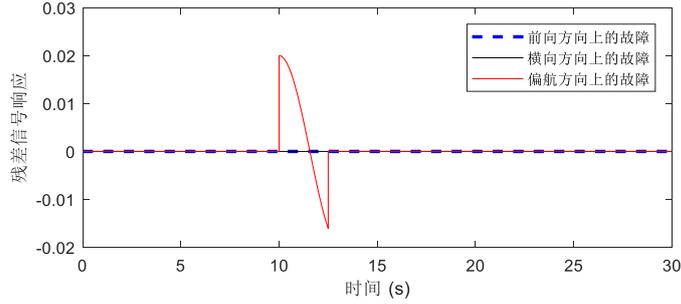


图 3-17 故障 $f_4(t)$ 下的残差信号响应
Figure 3-17. The residual response with $f_4(t)$

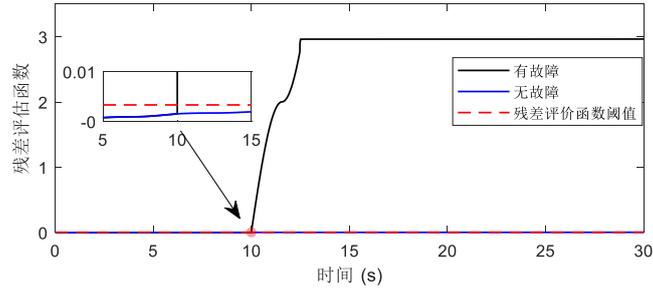


图 3-18 故障 $f_4(t)$ 下的残差评价函数
Figure 3-18. The residual evaluation with $f_4(t)$

为了更直观地展示本章所提出方法的优势，与动态输出反馈[15]方案进行比较，偏航速度误差和偏航角分别如图 3-19 和 3-20 所示，且偏航角和偏航速度误差减少的百分比可以定义为：

$$R_a = \left(1 - \frac{A_a(\text{有控制})}{A_a(\text{无控制})}\right) \times 100\%$$

$$R_v = \left(1 - \frac{C_v(\text{有控制})}{C_v(\text{无控制})}\right) \times 100\%$$

其中， A_a 表示偏航角幅值， C_v 表示偏航速度误差累计误差，比较结果如表 3-1 所示。从表 3-1 可以看出，本章方法下，偏航角的幅值和偏航速度误差相较于动态输出反馈方法都有所减少。

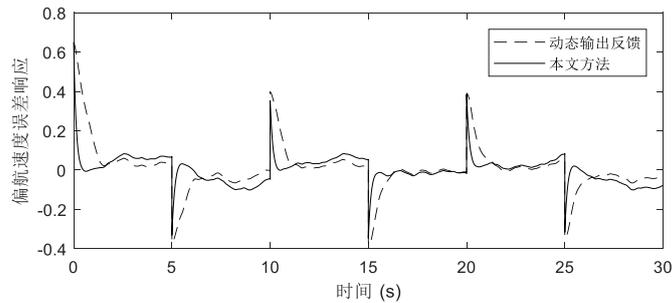


图 3-19 不同控制方法的偏航速度误差
Figure 3-19. The yaw velocity error response of different control methods

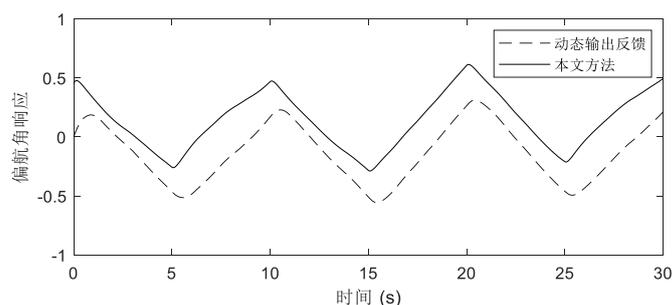


图 3-20 不同控制方法的偏航角

Figure 3-20. The yaw angle response of different control methods

表 3-1 不同控制策略下的控制效果比较

Table 3-1. Comparison of control effects under different control strategies

	A_a	R_a	C_v	R_v
无控制	1.91	-	7.09	-
动态输出反馈 ^[15]	0.86	55%	2.12	70%
本章方法	0.84	56%	1.45	79.5%

接下来, 为了证明本章提出的动态阈值事件触发机制能有效减少触发次数, 节省网络节点能量, 我们与文献^[27]的恒定阈值事件触发进行比较。图 3-21 比较了两种阈值方案的触发阈值, 恒定触发阈值为 0.13, 本章的动态触发阈值最大值设置为 0.15。图 3-22 和 3-23 分别展示了动态阈值和恒定阈值的释放时间间隔, 一般来说, 当触发阈值增加时传输的数据包会减少, 但控制性能也相对地略有降低, 表 3-2 展示了两种触发方式下不同触发阈值的释放次数, 从表 3-2 不难看出本文提出的动态阈值方案的释放次数比恒定阈值方案的要少。同时, 由图 3-24 和图 3-25 可以发现在故障发生时只有微小的控制性能差别, 甚至动态阈值方案还要更好。以上说明动态阈值方案在更少的触发次数下仍能保证对无人水面艇系统的控制性能。

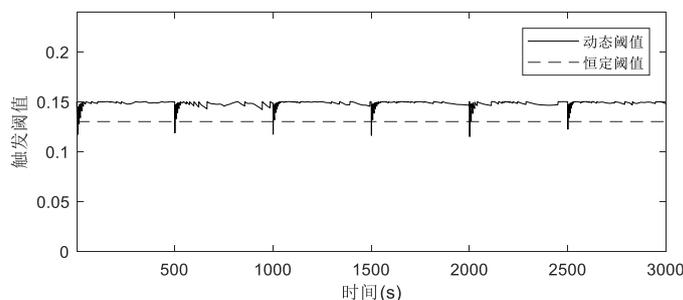


图 3-21 两种阈值的触发阈值

Figure 3-21. The trigger thresholds comparison of the two thresholds

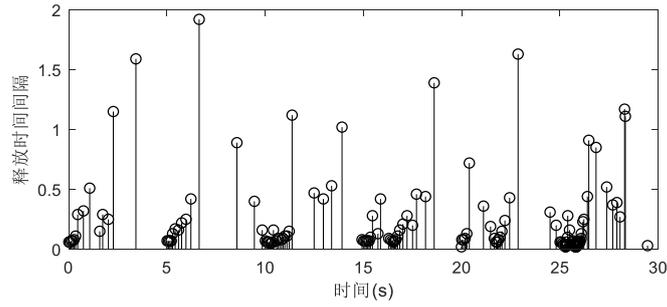


图 3-22 动态阈值的释放时间间隔

Figure 3-22. The release time interval of the dynamic threshold

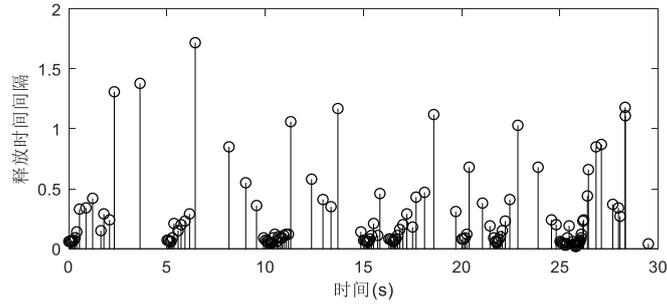


图 3-23 恒定阈值的释放时间间隔

Figure 3-23. The release time interval of the constant threshold

表 3-2 两种阈值方案的释放次数

Table 3-2. The release time interval of two thresholds

触发阈值	0.05	0.15	0.3	0.6
恒定 ^[27]	202	143	89	63
本文	192	125	85	62

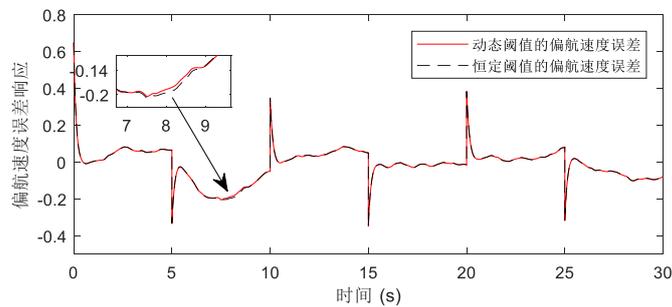


图 3-24 两种阈值的偏航速度跟踪误差响应

Figure 3-24. The yaw velocity error comparison of two thresholds

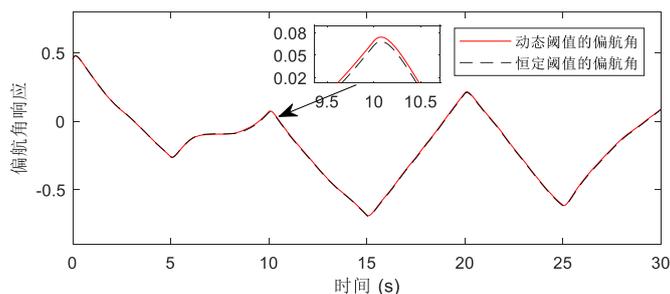


图 3-25 两种阈值的偏航角响应

Figure 3-25. The yaw angle comparison of two thresholds

综上，我们所提出的基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器方法，不仅可以对受 DoS 攻击和执行器故障的网络化无人水面艇系统进行有效控制，而且可以通过减少触发次数来节省网络资源。

3.5 本章小结

本章针对网络节点能量受限和非周期 DoS 攻干扰的网络化无人水面艇系统，提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。首先，构建一个考虑非周期 DoS 攻击、外部干扰和执行器故障同时存在的网络化无人水面艇控制系统。然后，针对网络化无人水面艇系统，提出一种自适应事件触发机制，动态更新触发阈值，减少网络资源浪费。其次，通过构造一个分段 Lyapunov 函数，给出闭环系统全局指数稳定且具有指定 H_∞ 干扰衰减指数的充分条件，并设计基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器。最后，通过仿真验证方法的有效性。结果表明，该方法在节省网络资源的情况下仍能对无人水面艇系统进行有效地控制，并快速检测执行器故障的发生和位置。

第四章 总结与展望

4.1 总结

在网络环境下控制无人水面艇系统的运动，虽然优势明显，但同时也存在一些问题亟待解决，主要原因在于网络化控制系统本身固有的挑战。本文重点关注 DoS 攻击下的网络化无人水面艇系统，并对这样一个闭环系统进行故障检测滤波器和控制器协同设计。DoS 攻击造成网络丢包，从而影响控制输出信号的正常传输，进一步影响无人水面艇系统的航向稳定，研究这样一个控制系统具有重要意义。另外，现实网络节点能量有限，在一定程度上数据包传输可能会造成网络通道堵塞，进而提早耗尽节点能量和网络资源。最后，网络化无人水面艇系统可能发生执行器故障，导致控制信号损坏、丢失等传输问题，从而也会影响无人水面艇系统的航向稳定。因此，网络化无人水面艇系统需要一个高效的控制策略来应对网络丢包问题和故障发生问题，并在此基础上实现网络资源和系统性能之间的平衡。

通过对 DoS 攻击的丢包假设，本文提出相应的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。主要工作在以下两个方面：

1.针对 DoS 攻击下的无人水面艇系统，提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器协同设计方法。首先构建一个受外部干扰、网络时延、DoS 攻击服从伯努利随机分布导致数据包丢失、执行器故障的网络化无人水面艇系统，并设计基于观测的故障检测滤波器和控制器；接着，在稳定性分析中，证明构建的闭环无人水面艇系统均方稳定且具有指定的 H_{∞} 性能干扰衰减指数，并使用公式求解得到无人水面艇系统对应的控制器增益。最后通过无人水面艇的仿真实例验证该方法确实能有效控制航向稳定，并检测执行器故障的发生以及故障发生在哪个方向轴上。

2.针对网络节点能量有限和 DoS 攻击下的无人水面艇系统，提出一种基于自适应事件触发的故障检测器和控制器协同设计方法。该方法考虑的 DoS 攻击是非周期性的，相对而言是更加典型的攻击方式，且假定一旦攻击成功就会造成百分百数据包丢失。在此基础上考虑更现实的网络环境，网络节点能量有限，网络带宽有限，控制站计算能力有限，因此提出一种自适应事件触发机制，在恒定阈值事件触发机制的基础上能更有效地减少数据包发送，节省网络资源。在稳定性分析中，证明该方法全局指数稳定且具有指定的 H_{∞} 性能干扰衰减指数，

并求解得到控制器增益。最后仿真证明该方法在保证无人水面艇系统航向控制性能和故障检测性能的基础上，节省了更多的网络资源。

4.2 展望

对于将网络化控制系统引入到无人水面艇中，已经有学者做过很多研究了，但大多数着眼于航向控制的方法上，结合考虑现实网络化环境中各种干扰因素影响文献不是很多，虽然本文针对 DoS 攻击下的无人水面艇系统进行研究设计，但仍有一些工作需要在未来的研究中做进一步探讨。

1.更全面地考虑 DoS 攻击在网络通道中的现实条件。目前大多数现有的文献都假定 DoS 攻击是有一定范围的，无论是在持续时间上，还是在频率上，或者其他指标上。这样的假设意味着 DoS 攻击下的无人水面艇系统的数据包传输并没有完全被阻止，因此可以提出各种控制方法来使无人水面艇系统稳定。另外，本文只考虑采样器和控制站之间的网络通道上的 DoS 攻击，未来的研究中可以考虑采样器到控制站以及控制站到执行器的网络通道上的 DoS 攻击，在控制站和执行器之间的网络通道上考虑 DoS 攻击时会直接影响输出数据包的丢失从而导致控制信号丢失。

2.考虑网络时延导致的丢包。本文绪论部分就提到了网络丢包的产生包括网络时延和 DoS 攻击，本文考虑 DoS 攻击下的数据包丢失，也考虑了网络时延，但是我们没有考虑网络时延产生丢包的情况。根据现实网络的丢包情况，应该同时假定 DoS 攻击和网络时延都会造成数据包丢失的情况，且使采样器-控制站和控制站-执行器的所有网络通道上均满足上述假定，构建的无人水面艇系统会更具现实意义，但也更复杂。

3.未来可以考虑无人水面艇群的协同控制和故障检测，将该方法更广泛地应用于实践中。

4.网络化控制系统具有较大的实用性，带来网络便利，而无人水面艇在军事、民用领域都具有一定的应用价值，但在实际应用中又易发生故障，因此未来对于网络化无人水面艇控制系统的故障检测和容错控制的研究有很大的前景。

5.本文提出了一种自适应事件触发机制，而目前神经网络十分热门也极具实用性，未来也可以运用到网络化无人水面艇控制系统中，通过训练学习智能地调整事件触发的阈值，降低通信负载，节省网络资源。

参考文献

- [1] Mario N H, Gallego A J, Pablo G, et al. Two stage convolutional neural network for ship and spill detection using SLAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5217–5230.
- [2] Ma H J, Smart E, Adeel A, et al. Radar image-based positioning for USV under GPS denial environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(1): 72-88.
- [3] Ohn S I, Oh J H, Lee Y S, et al. Design of a fuel-cell-powered catamaran-type unmanned surface vehicle[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(2): 388–396.
- [4] Wang N, Er M J, Sun J C, et al. Adaptive robust online constructive fuzzy control of a complex surface vehicle system [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(7): 1511-1523.
- [5] Liu L, Wang D, Peng Z H, et al. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 171: 625–632.
- [6] Zhou Z T, Zhong M Y, Wang Y Q, et al. Fault diagnosis observer and fault-tolerant control design for unmanned surface vehicles in network environments[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 173694-173702.
- [7] Wang R Q, Li D L, Miao K Y, et al. Optimized radial basis function neural network based intelligent control algorithm of unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(3): 210-223.
- [8] Sun Y, Qin S, et al. Stability of networked control systems with packet dropout: an average dwell time approach [J]. *IET Control Theory Applications*, 2011, 5(1): 47-53.
- [9] Ge X H, Han Q L, and Wang Z D, et al. A dynamic event-triggered transmission scheme for distributed set-membership estimation over wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 171–183.
- [10] Wang Y L, Han Q L, et al. Network-based fault detection filter and controller coordinated design for unmanned surface vehicles in network environments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1753-1765.
- [11] 庞中华, 骆文城. 基于观测器的网络化多智能体预测控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(09): 2290-2296.
- [12] 张英, 司瑞才, 曹伟. 网络化控制系统研究综述[J]. *电力科技与环保*, 2020, 36(02): 60-62.
- [13] Chen D L, Liu G Q, et al. Coordinated path-following control for networked unmanned surface vehicles[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(3): 3057-3070.
- [14] Liu Z Q, Wang Y L, Wang T B, et al. Incremental predictive control-based output consensus of networked unmanned surface vehicle formation systems[J]. *Information Sciences*, 2018, 457–458: 166–181.
- [15] Wang Y L, Han Q L, et al. Network-based modelling and dynamic output feedback control for unmanned marine vehicles in network environments[J]. *Automatica*, 2018, 91: 43–53.
- [16] 陈丽丽, 王玉龙. 网络环境下基于观测器的无人水面艇航向控制研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(03): 315-321+333.
- [17] Abdi F, Chen C Y, Hasan M, et al. Preserving physical safety under cyber attacks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6285–6300.

- [18] Ye Z H, Ni H J, et al. Sensor fault estimation of networked vehicle suspension system with deny-of-service attack[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(5): 455-462.
- [19] Ding D R, Han Q L, Xiang Y, et al. A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1674-1683.
- [20] Yuan H H, Xia Y Q, Yang H J, et al. Resilient state estimation of cyber-physical system with multichannel transmission under dos attack[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020: 1-12.
- [21] Tian E, Wang X M, Peng C, et al. Probabilistic-constrained distributed filtering for a class of nonlinear stochastic systems subject to periodic DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(12): 5369-5379.
- [22] Zhu Y Z, Zheng W X, et al. Observer-based control for cyber-physical systems with periodic DoS attacks via a cyclic switching strategy[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(8): 3714-3721.
- [23] Guo L, Yu H, Hao F. Event-triggered control for stochastic networked control systems against Denial-of-Service attacks[J]. Information Sciences, 2020, 527: 51-69.
- [24] 王江宁, 严怀成, 李郅辰, 等. 具有 DoS 攻击的网络控制系统事件触发安全控制[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学报), 2018, 10(06): 716-722
- [25] Yue M, Wu Z J, Wang J J, et al. Detecting LDoS attack bursts based on queue distribution[J]. IET Information Security, 2019, 13(3): 285-292.
- [26] Su L, Ye D, et al. A cooperative detection and compensation mechanism against denial-of-service attack for cyber-physical systems[J]. Information Sciences, 2018, 444: 122-134.
- [27] Ma Y, Nie Z Q, Hu S L, et al. Fault detection filter and controller co-design for unmanned surface vehicles under DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(3): 1-13.
- [28] 张涛, 张君, 唐洪莹, 等. 有限能量下的无人机辅助无线供电通信网络资源分配研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(07): 61-63+66.
- [29] Wang L, Guo G, Zhuang Y, et al. 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] Dong Y, Chen J, Xian J, et al. Event-triggered control for finite-time lag synchronisation of time-delayed complex networks[J]. IET Control Theory Applications, 2018, 12(14): 1916-1923.
- [32] 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, 33(6): 969-977.
- [33] 张国庆, 姚明启, 杨婷婷, 等. 考虑事件触发输入的船舶自适应动力定位控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(10): 1597-1606.
- [34] Chen Z R, Zhang B Y, Li Y M, et al. Design of event-triggered networked control systems via specific triggering quantizer[J]. International journal of robust and nonlinear control, 2020, 30(16): 6947-6960.
- [35] Meng X Y, Chen T W, et al. Optimal sampling and performance comparison of periodic and event based impulse control[J]. IEEE transactions on automatic control, 2012, 57(12): 3252-3259.

- [36] Zhang H, Wang Z P, Yan H C, et al. Adaptive event-triggered transmission scheme and H ∞ filtering co-design over a filtering network with switching topology[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(12): 4296-4307.
- [37] Wang L Y, Lim C C, Shi P, et al. Adaptively adjusted event-triggering mechanism on fault detection for networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8):2299-2311.
- [38] Zhang D, Ye Z H, Chen P C, et al. Intelligent event-based output feedback control with q-learning for unmanned marine vehicle systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 105: 104616-104628.
- [39] Dong L Y, Xu H L, et al. Design of heading control system for USV based on MOOS-IvP[C]. //2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2017, 2018: 68-71.
- [40] 欧阳子路, 余文墨. 基于改进遗传算法的船舶航向 PID 控制器[J]. *中国海洋*, 2017, 40(1):13-15.
- [41] Fan Y S, Ge Z L, Zhao Y S, et al. Design of information network and control system for USV[C]. //2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015: 1126-1131.
- [42] 杨宇, 范云生, 刘磊. 基于轨迹线性化的无人水面艇航向控制与验证[J]. *大连海事大学学报*, 2021, 47(01): 9-17.
- [43] Li J H, Lee P M, Jun B H, et al. Point-to-point navigation of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2008, 44(12): 3201-3205.
- [44] Yi G, Liu Z, Zhang J Q, et al. Research on USV heading control method based on kalman filter sliding mode control[C]. //2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2020: 1547-1551.
- [45] Lin X, Jouffroy J, et al. Modeling and nonlinear heading control of sailing yachts[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(2): 256-268.
- [46] Huang Q, Liu X G, Li T W, et al. On impulsive parametric perturbation control techniques for chaotic ship steering[C]. //Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, 2014: 679-683.
- [47] Wang N, Sun J C, et al. Tracking-error-based universal adaptive fuzzy control for output tracking of nonlinear systems with completely unknown dynamics[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(2): 869-883.
- [48] Wang N, Lv S, et al. Global finite-time heading control of surface vehicles[J]. *Neurocomputing*, 2016, 175: 662-666.
- [49] Ravell M, Diego A, Maia M, et al. Modeling and control of unmanned aerial/underwater vehicles using hybrid control[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 76: 112-122.
- [50] Xu H T, Rong H, et al. Use of AIS data for guidance and control of path-following autonomous vessels[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 194: 106635-106653.
- [51] Wang Y Y, Jiang B, Wu Z G, et al. Adaptive sliding mode fault-tolerant fuzzy tracking control with application to unmanned marine vehicles[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(11): 6691-6700.
- [52] Wang N, Sun Z, Jiao Y H, et al. Surge-heading guidance-based finite-time path following of underactuated marine vehicles[J]. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2019, 68(9): 8523-8532.
- [53] Sing K P, Shi P, et al. Fault detection for uncertain fuzzy systems: An LMI approach[J]. *IEEE Transactions Fuzzy System*, 2007, 15(6): 663-670.

- [54] Zhang X, Polycarpou M M, et al. Adaptive fault diagnosis and fault-torant control of MIMO nonlinear uncertain systems[J]. *International Journal Control*, 2010, 83(5): 1054-1080.
- [55] Qi X M, Wang C, Liu L N, et al. Robust fault detection for uncertain networked control systems with random data packet loss[C]. //2017 Chinese Automation Congress (CAC), 2017: 6296-6300.
- [56] Wang Y L, Shi P, Lim C C, Liu Y, et al. Event-triggered fault detection filter design for a continuous-time networked control system[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(12): 3414–3426.
- [57] Pan Y N, Yang G H, et al. Event-triggered fault detection filter design for nonlinear networked systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(11): 1851-1862.
- [58] Hou Y Z, Zhang M J, et al. Fault detection of actuators via extended state observer[C]. //2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), 2019: 651-655.
- [59] Zhang C M, Wang X H, et al. Actuator fault detection for autonomous underwater vehicle using interval observer[C]. // 2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), 2019: 449-453.
- [60] Park B S, Yoo S J, et al. Fault detection and accommodation of saturated actuators for underactuated surface vessels in the presence of nonlinear[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 85(2): 1067–1077.
- [61] Hao L Y, Zhang H, Guo G, et al. Quantized sliding mode control of unmanned marine vehicles: various thruster faults tolerated with a unified model[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(3): 1–15.
- [62] Nazli E, Petros A, et al. Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis[J]. *Automatica*, 2013, 49(3): 685-697.
- [63] Seuret A, Gouaisbaut F, et al. Wirtinger-based integral inequality: Application to time-delay systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(9): 2860–2866.
- [64] Park P G, Wan K J, et al. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. *Automatica*, 2011, 47(1): 235-238.
- [65] Chen P, Ma S D, Xie X P, et al. Observer-based non-PDC control for networked T–S fuzzy systems with an event-triggered communication[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8): 2279-2287.
- [66] Wang X D, Fei Z Y, et al. Integral-based event-triggered fault detection filter design for unmanned surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10):5626-5636.
- [67] Singh R, Bhushan B, et al. Condition monitoring based control using wavelets and machine learning for unmanned surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 7464-7473.
- [68] Yu Y L, Guo C, et al. Finite-time PLOS-based integral sliding-mode adaptive neural path following for unmanned surface vessels with unknown dynamics and disturbances[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(4): 1500-1511.
- [69] 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.
- [70] 黄玲, 郭婧, 张恒艳. 基于观测器的周期 DoS 攻击网络化系统动态事件触发控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(06): 851-861.

致 谢

研究生三年转瞬即逝，第一次来到实验室、第一次参加实验室组会、第一次实验室聚餐，所有的场景都历历在目，回想起来突然有些不舍，但是人生就是一段段旅程交织，去经历一次次相逢和告别。那么在告别研究生这段旅程之前，向所有帮助过我、关心过我的人表达我最诚挚的谢意。

首先，我要感谢我的导师赵云波教授。赵老师温文尔雅，治学严谨，对待事物都有自己独特的见解，这三年来我受益匪浅。赵老师在科研上给予我很大的帮助，教会了我如何读懂一篇文献，如何清楚地描述研究问题，如何做学问。遇到科研上的瓶颈不知如何下手时，赵老师会及时帮助我解决问题，让我更加明确下一步应该做什么；每次和赵老师探讨科研问题时总能让我意识到自己读文献的浅显，之后读文献当中自己也会多思考作者为什么这么写，用意是什么，而不是理所应当认为就是这样；平时赵老师也会远程指导，了解我们的进度，进而提供帮助。回顾这三年，在赵老师的指导下，我的独立思考能力得到进一步的提升，这对我今后的学习工作都大有裨益。还是想说一句，赵老师您辛苦了！

然后，要感谢 A305 的实验室小伙伴们和 413 的室友们，这三年与你们一起度过，我很幸运也很开心。实验室就像是另一个家，我们一起学习，一起火锅，一起跨年，数不清的快乐是与你们一起创造的。感谢师兄师姐对我的帮助和指导，感谢同届的唐敏、朱创对我的支持，感谢师弟师妹们对我的关心和鼓励，感谢回到宿舍能闹成一团的小仙女室友们。尤其感谢建武师兄、晓康师兄、叶泽华、梁启鹏在科研上对我的帮助，感谢巧慧、小岚岚、小鱼、慧、大师姐、小师妹们，研究生生活有你们才如此精彩，我们女孩子的天地就是无限大。还要感谢一直陪伴我的朋友们，老汤、JK、蕾子、波波等，友谊万岁！

最后，特别要感谢我的家人。你们是最坚实的后盾，偶尔也会遇到委屈遇到困难，但和你们交流之后，想想你们在身后，我就又有了动力和斗志。一直以来，你们给予了我很多很多的爱，让我幸福地成长着。爸爸，妈妈，妹妹，谢谢你们！

此外，还要感谢浙江工业大学，给我提供了更好的学习平台，让我这三年能不断汲取知识，提升自我。

这段旅程就要到站了，感谢遇见，江湖再见。

作者简介

1 作者简历

1996年10月出生於浙江省台州市。

2014年10月——2018年6月，浙江科技学院电气学院电气工程及其自动化专业学习，获得工学学士学位。

2018年9月——2022年1月，浙江工业大学信息工程学院控制科学与工程专业学习，攻读学术型硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 王岭人, 叶泽华, 赵云波. DoS 攻击下基于自适应事件触发的无人水面艇航向控制和故障检测[J]. 高技术通讯, 2021.
- [2] 花婷婷, 王岭人, 赵云波. 利用人的分歧介入增强珍珠自动分拣可靠性研究[J]. 计算机测量与控制, 2021.

3 参与的科研项目及获奖情况

- [1] 基于资源调度和预测控制的无线网络化控制系统的联合设计. 中国国家自然科学基金项目(61673350).
- [2] 人机系统中人与机器的自主性边界及其切换策略研究. 科技创新特区(18-163-11-ZT-004-009-01).

4 发明专利

- [1] 赵云波, 花婷婷, 王岭人等. 一种基于人的分歧介入的珍珠分拣方法. 中国, 202011210928.4[P].2020-11-04.
- [2] 赵云波, 花婷婷, 宋涛, 王岭人. 一种基于多源信息融合的细粒度图像分类方法. 中国, 202110393741.0[P].2021-04-13.

学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TH741	681.2	
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*	DoS 攻击下无人水面艇故障检测滤波器和控制器协同设计		
关键词*	无人水面艇, 网络化控制系统, 航向控制, 故障检测, 事件触发机制		论文语种*
并列题名*	无		中文
作者姓名*	王岭人	学 号*	2111803081
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	310023
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
控制科学与工程	网络化控制	3 年	2022 年
论文提交日期*	2022 年 1 月		
导师姓名*	赵云波	职 称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
盲评	杨东勇	石崇源、洪榛、阮中远、施朝霞	
电子版论文提交格式: 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 ()			
电子版论文出版 (发布) 者	电子版论文出版 (发布) 地		版权声明
论文总页数*	56 页		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			