

## 水下航行器网络控制系统仿真

张阳洋<sup>1</sup>, 高立斌<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 水下信息与控制重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** 传统控制系统的设计方法中忽略了通信网络中的时延和数据包丢失等问题, 仅通过传统方法设计的控制器来降低其对控制系统产生的不利影响, 严重影响了系统的稳定性; 对于水下航行器等对系统性能要求较高的水下控制平台, 突破传统使其在网络环境下能够稳定运行显得尤为重要; 在此背景下, 提出了网络控制系统的设计方案, 以水下航行器为控制平台, 进行系统建模, 设计反馈控制器, 使用 MATLAB 仿真工具 TrueTime, 研究分析了网络体系结构下时延和丢包对传统控制系统动态性能的影响; 仿真结果表明该设计方法优化了系统性能, 为系统在发生网络诱导时延和数据包丢失时能够稳定运行, 提供了可靠的参考依据; 该设计结果具有普适性, 也可以用于导弹、坦克等航行器。

**关键词:** 水下航行器; 网络控制系统; 时延; 丢包率

## Networked Control System Simulation of Underwater Vehicle

Zhang Yangyang<sup>1</sup>, Gao Lie<sup>1</sup>, Liu Weidong<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Underwater Information and Control Key Laboratory, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The problem of delay and packet loss in the communication network was neglected by the design method of the traditional control system. The traditional control method is adopted to reduce the adverse influence on the control system, which seriously affects the stability of the system. For underwater control systems, such as underwater vehicles, which require high system performance, it is very important to break through the tradition to make it run stably in the network environment. Under this background, the design of networked control system is proposed. Underwater vehicle is used as the control platform, the system is modeled and the feedback controller is designed, using TrueTime, the MATLAB simulation tool, we study and analyze the time delay and packet loss on the dynamic or static performance of the traditional control system under network architecture. The results of simulation show that the method can greatly optimize the performance of the system and provide a reliable reference for the system to run stably when the network induced delay and packet loss. The design results are universal, can also be used for missiles, tanks and other aircraft.

**Keywords:** underwater vehicle; network control system; time delay; packet loss rate

## 0 引言

网络控制系统与传统控制系统的主要区别在于<sup>[1]</sup>: 网络控制系统采用通信网络实现典型空间分布的传感器、控制器和执行器以及其他节点之间的信息交互。控制器通过网络与传感器和执行机构交换信息, 并实现对远程被控对象的控制。更广泛意义上的网络控制系统<sup>[2]</sup>, 还包括 Internet/企业信息网所能实现的对工厂车间、生产线以及工程现场设备的远程控制、信息传输以及优化等。

空间分布的器件通过网络的接入对控制系统的动态行为产生重大影响, 且通过网络形成的网络控制系统比传统的点对点控制系统要复杂的多, 网络传输的共享方式使得网络控制系统存在许多的不确定性, 主要问题有网络诱导时延、数据包丢失、数据包通信错乱和噪声干扰等<sup>[3]</sup>。由于网络控制系统结构的复杂性以及存在的上述问题, 传统的控制理论与控制方式已不能直接用到网络控制系统中。针对上述特殊问题, 在网络控制系统研究中, 一般方法是将控制系统性能和网络服务质量之

间的关系进行简化, 分别设计使其满足一定传输时延、数据包丢失率。建立其系统模型, 分析系统特性、重新评估和建立基于网络的控制理论和控制方法。

## 1 水下航行器运动模型

水下航行器在水中的运动, 在一般情况下可以看做是刚体在液体中的空间运动<sup>[4]</sup>。本文中水下航行器在空间中的运动是六自由度的运动, 即水下航行器体坐标系相对于地面坐标系的位置可以由六个参数来描述, 分别是水下航行器体坐标系原点相对地面坐标系下的位置参数  $x_0, y_0, z_0$ , 以及相对于地面坐标系的角度  $\theta, \psi, \varphi$  参数。 $\theta$  是俯仰角, 是水下航行器体纵轴  $ox$  与地平面的夹角;  $\psi$  是偏航角  $ox$  轴在地平面的投影与参考航向角之间的夹角;  $\varphi$  为横滚角, 是立轴  $oy$  与经过水下航行器纵轴的铅垂面之间的夹角。由于扰动外力及力矩对各自自由度的运动产生不同的影响, 同时水下航行器表现出很强的非线性。为了建立水下航行器的运动方程, 需要对复杂的系统进行必要的简化。水下航行器具有良好的均衡系统和浮力调整系统, 保持水下航行器质量和重心基本不变, 不计水下航行器的惯性积项, 不计水下航行器在航行过程中可能存在的质量及质量分布的变化。根据牛顿第一定律和动量定理, 结合水下航行器运动受到的外力作用, 水下航行器六自由度空间运动方程如下;

偏航方程:

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-02-27。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61473224); 水下信息与控制重点实验室基金(9140C230202150C23001)。

**作者简介:** 张阳洋(1991-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事网络化控制系统的方向的研究。

$$\begin{aligned}
& (J_{yy} + \lambda_{55})\dot{\omega}_y + m z_c \dot{v}_x - (m x_c - \lambda_{35})\dot{v}_z + m z_c (v_z \omega_y - v_y \omega_z) + \\
& m x_c (v_x \omega_y - v_y \omega_x) + (J_{xx} - J_{zz})\omega_z \omega_x = \\
& \frac{1}{2} \rho v^2 SL (m_y^\beta \beta + \frac{1}{4} m_y^{\delta_r} (\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4) + m_y^{\omega_x} \dot{\omega}_x + \\
& m_y^{\omega_y} \dot{\omega}_y) - G(x_c \cos \theta \sin \phi + z_c \sin \theta) \quad (1)
\end{aligned}$$

辅助方程:

$$\dot{\theta} = \omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi \quad (2)$$

$$\dot{\phi} = \omega_y \sec \theta \cos \phi - \omega_z \sec \theta \sin \phi \quad (3)$$

$$\dot{\varphi} = \omega_x - \omega_y \tan \theta \cos \phi + \omega_z \tan \theta \sin \phi \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= v_x \cos \theta \cos \phi + v_y (\sin \phi \sin \theta - \sin \theta \cos \phi \cos \varphi) + \\
& v_z (\sin \phi \cos \theta + \sin \theta \cos \phi \sin \varphi) \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\dot{y}_0 = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \cos \phi - v_z \cos \theta \sin \phi \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\dot{z}_0 &= -v_x \cos \theta \sin \phi + v_y (\cos \phi \sin \theta + \sin \theta \sin \phi \cos \varphi) + \\
& v_z (\cos \phi \cos \theta - \sin \theta \sin \phi \sin \varphi) \quad (7)
\end{aligned}$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\right) \quad (9)$$

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (10)$$

水下航行器运动模型参照潜艇的六自由度模型。为方便控制系统的设计、调试,保留起主导作用的水动力参数,忽略次要项,并作如下假设:航向运动是指水下航行器在水平面(地面坐标系的  $x_0 O y_0$  平面)内的运动。水下航行器的航向运动包括水下航行器浮心在水平面内运动和绕  $Ox$ 、 $Oy$  轴转动的合成运动。在水下航行器航向运动中  $v_y$ 、 $\omega_z$ 、 $y_0$  等于零,  $\theta$  是小量,可近似认为  $\sin \theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$ ,  $\alpha$  是小量,可近似认为  $\sin \alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ ,  $\Theta$  是小量,可近似认为  $\sin \Theta = 0$ ,  $\cos \Theta = 1$ 。如果水下航行器有性能良好的横滚控制,扰动引起的横滚能很可以得到如下简化的水下航行器运动方程:

简化后偏航方程:

$$\begin{aligned}
& (J_{yy} + \lambda_{55})\dot{\omega}_y - \frac{1}{2} \rho v^2 SL m_y^\beta \beta + \\
& (m z_c v_z + m x_c v_x - \frac{1}{2} \rho SL^2 m_y^{\omega_y} \dot{\omega}_y) \omega_y = \\
& \frac{1}{2} \rho v^2 SL m_y^{\delta_r} \delta_r + d_{\omega_y} (\dot{v}_x - \dot{v}_z) \quad (11)
\end{aligned}$$

运动参数:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{z}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\dot{\phi} = \omega_y \quad (13)$$

运动学方程 (11) - (13) 中没有系统未建模特性和不确定参数。其中  $d_{\omega_y} (\dot{v}_x \dot{v}_z)$  表示系统未建模特性,此处将其归纳为外界扰动,  $J_{yy} + \lambda_{55}$  为水下航行器绕坐标系  $y$  轴的转动惯量和附加质量产生的附加转动惯量之和,  $\omega_y$  为角速度,  $x_0$  和  $z_0$  为前向位移和侧向位移,  $\phi$  为航向角,上述参数可分别由相关传感器测量得到,为水下航行器速度及在坐标轴上的分量,其余为水下航行器流体动力和总体参数。

## 2 水下航行器控制系统仿真模型

根据水下航行器水下空间运动特点,设计了航向运动 PID 控制器,在 MATLAB/Simlink 下搭建非网络体系下控制系统的仿真模型<sup>[6]</sup>。使用 MATLAB/Simulink 环境下的 TrueTime 工具箱,搭建网络控制系统仿真模型。

### 2.1 传统水下航行器 PID 控制系统仿真

在众多的控制算法中,PID 控制是迄今为止最通用的控制方法,PID 控制器有结构简单,对模型误差具有一定的鲁棒性及易于操作等优点<sup>[6]</sup>。选取某航行器航向控制系统为例,分析时延对系统稳定性所造成的影响。航向控制系统的主要任务是稳定和控制航行器的航向,使航行器能够按设定航向运动,尽可能不受外界干扰的影响,消除航行器对设定航向的偏差。其原理图如图 1 所示。

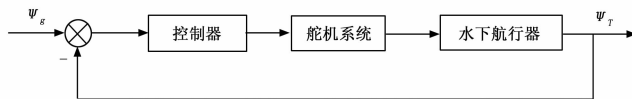


图 1 水下航行器航向控制系统原理图

其中:  $\phi_k$  为设定航向,  $\phi_T$  为实际航向。

舵机的传递函数为:

$$G_0(S) = \frac{10.29}{0.05S + 1}$$

航行器航向状态方程为:

$$\dot{X} = Ax + By$$

$$Y = Cx + Du$$

其中矩阵系数为:

$$\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.295 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0156 \end{bmatrix} \\
C &= [1 \quad 0] & D &= 0
\end{aligned}$$

PID 控制器的参数为:

$$K_P = 0.435 \quad K_I = 0.0001 \quad K_D = 0.2$$

给系统输入方向舵角指令输入为  $15^\circ$ , 观测输出信号的曲线, 仿真结果如图 2 所示。

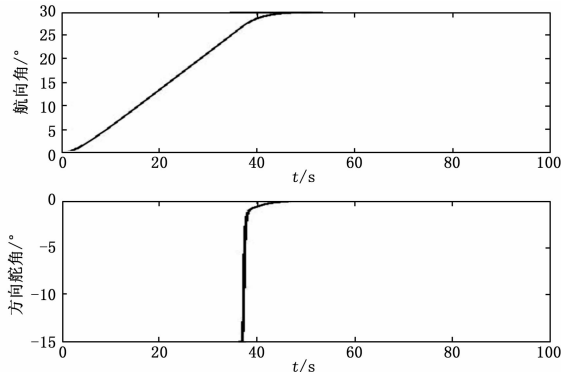


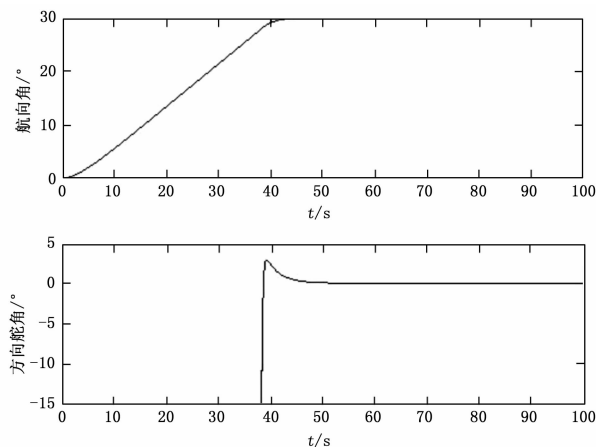
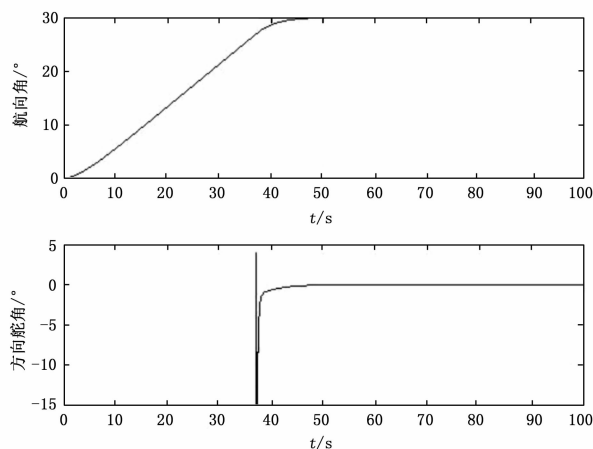
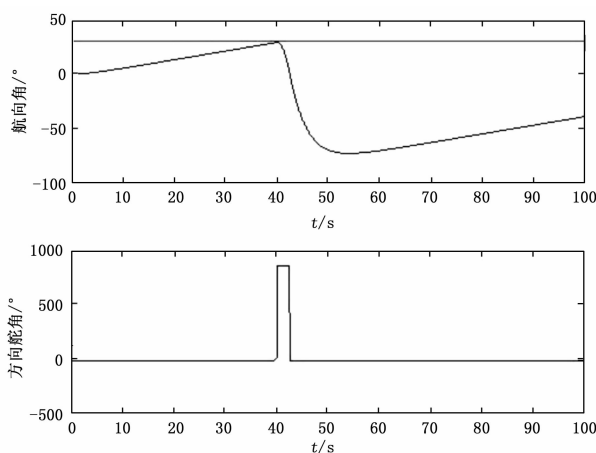
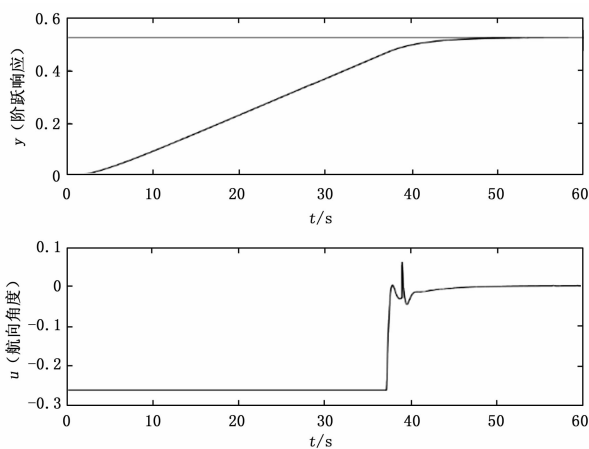
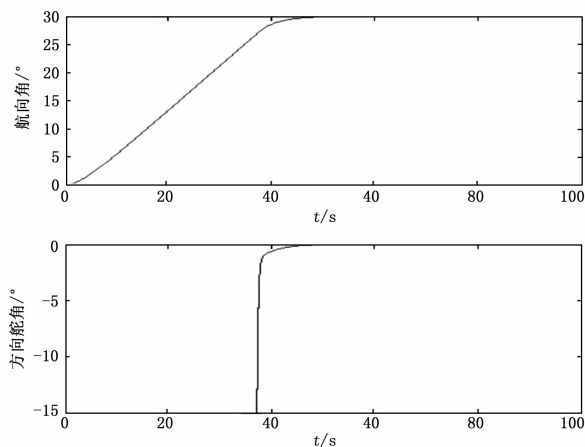
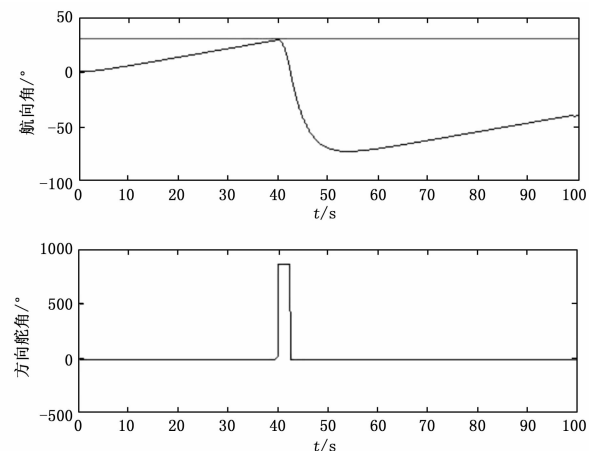
图 2 传统 PID 控制系统下仿真结果

由图可知,方向舵角指令为  $15^\circ$  时,系统调节时间为 42 s,控制系统性能稳定。

### 2.2 网络控制系统仿真模型

研究的网络化控制系统采用基于 CSMA/CD 技术的 CAN 通信<sup>[7]</sup>。在网络传输过程中,存在数据碰撞和节点竞争失败,很可能导致要传输的数据包丢失。虽然大多数网络具有重传机制,但重传受时间限制,超过限定时间,数据包仍会丢失。一个稳定运行的网络控制系统容许一定量的数据包丢失,但数据包丢失率超过一定值时,将会导致系统失稳。在水下航行器控制系统中,传感器采样测量水下航行器的航行状态数据后,定时周期性的传输给控制器,用以解算控制信号,然后将控制量



图5  $\tau=10$  ms 航向控制仿真曲线图8  $r=0.1$  航向控制仿真曲线图6  $\tau=11$  ms 航向控制仿真曲线图9  $r=0.02$   $\tau=3$  ms 航向控制仿真曲线图7  $r=0.02$  航向控制仿真曲线图10  $r=0.1$   $\tau=6$  ms 航向控制仿真曲线

由图7可以看出丢包率 $r < 0.02$ 时,控制系统响应变化比较小。当 $r=0.1$ 时,系统性能出现明显变化,控制系统变为不稳定。

### 3.3 同时具有时延和丢包对控制系统性能影响

将网络延时和数据包丢失同时加入控制系统,研究其对控制系统性能的影响。

对应系统响应如图9~10所示。

由图9可以看出当时延和数据丢包同时存在时,丢包率为0.02,时延为3ms时,系统响应变化不大,但当丢包率为0.1时,系统响应有了较明显的变化。所以为了保证系统的性能指标,则时延需小于一个周期,丢包率不超过0.1。

## 4 结论

本文分析了网络化环境给控制系统带来的时延及数据包丢失(下转第109页)

以上为测试前路段规则设定的准备阶段。此规则和信息都传递到系统的数据库当中,接下来,将出现此路段的违章现象的发生并且考察此系统对于出现违章现象时能否做到智能判定,将信息传递和储存在总体数据库当中。在检测当中出现某车辆此道路逆行状态,进行违章信息查询时进入到信息查询页面输入所查询的违章车辆车牌号。

为观察系统对于违章车辆的检测效果是否准确,以及对于当前违章图像的处理分析合理性,本文观察了对于检测中处于违章状态的车辆现场图像回放。如下图5所示。

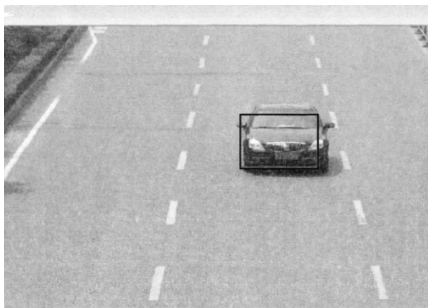


图5 违章现场回放

在图像中可以看出首先此违章车辆确实存在违章现象,为此可以保证此监控系统对于违章现场的辨识程度极高,可以准确的判断出行驶中的车辆是否属于违章现象。其次,该系统会自动标示出违章车辆,由于当前检测当中现场并没有其他车辆行驶的情况,但是系统都会对违章车辆进行自动画框提示,标示出违章车辆,供交通管理部门进行处理。最后图像清晰度较为完整,周遭的基本情况基本显示清楚,具备很好的违章辨

(上接第105页)

失等问题。运用 Truetime 网络仿真工具进行了系统仿真,以水下航行器航向控制系统为例,得出结论:以系统一个采样周期的时间为参照,在只存在时延的情况下,当时延小于一个采样周期时,控制系统稳定且动态性能变化不大;当时延大于一个采样周期时,系统性能相应明显变差。只存在数据包丢失时,丢包率达到 0.1 时,系统性能变差。而同时存在时延和数据丢包时,丢包率小于 0.1,时延小于一个周期时,系统特性基本满足性能指标要求。与传统控制系统采用点对点的信息无损传送方式相比,网络控制系统具有交互性好、减少系统布线、易于维护和扩展、增加系统的柔性和可靠性等诸多优点,这些都是传统控制系统无法比拟的。本设计中获得的结果作为水下航行器实际运行的可靠依据,也可以用于导弹、坦克等航行器。

#### 参考文献:

- [1] 王金云,杨在林,王孟军,等. 美军无人水下潜航器技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2015 (11): 54-58.
- [2] 凌强, 顾慧卉. 带宽约束下网络化控制系统的量化研究综述[J]. 控制工程, 2011 (6): 913-917.
- [3] Kim S W, Lee E, Choi M, et al. Design Optimization of Vehicle Control Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (7): 3002-3016.
- [4] Packard G E, Stokely R, Christenson R, et al. Hull inspection and

识度。

## 5 结论

本文通过对当前的交通环境进行分析,提出设计一种智能交通监控系统的必要性,并根据 THMR-V 平台,设计出一款以信息传递和自动辨识功能为主体,实现自动化监控和智能化信息处理的智能交通监控系统。通过对于此系统的基本结构和设计方向的研究提出此系统的总体设计理念。并且通过实践检测,得出基本路段上可以做到很完善的车辆行驶状况监控。此系统做到了很高的智能化、实时化、自动化的特点,提高了当前我国交通监控当中的效率和准确性,并且督促驾驶人员遵守交通法规。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏飞, 何克忠, 欧阳正柱, 等. 多功能室外智能移动机器人平台—THMR-V [J]. 机器人, 2002, 24 (2): 15-19.
- [2] 郑永康, 胡斌, 丁冬花. THMR-V 平台上基于 LINUX 的监控系统设计与实现 [J]. 计算机应用, 2004, 24 (8): 158-160.
- [3] 李超. 智能交通监控系统信息管理平台的设计与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [4] 李华, 丁冬花, 何克忠. THMR-V 导航控制算法研究 [J]. 机器人, 2001, 23 (6): 145-152.
- [5] 王晓东, 施海燕. 城市道路交通信息监测系统 [J]. ITS 通讯, 2002, 3 (1): 2562-2652.
- [6] 秦波, 刘颖, 亢红波. 城市道路交通智能照明系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (10): 256-263.
- [7] 张维. 基于单片机的可编程智能交通灯控制系统 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (4): 171-174.
- [8] confined area search capabilities of REMUS autonomous underwater vehicle [J]. Oceans. IEEE, 2010: 1-4.
- [5] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] Hoffmann C, Werner H. A Survey of Linear Parameter-Varying Control Applications Validated by Experiments or High-Fidelity Simulations [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 23 (2): 416-433.
- [7] Antsaklis P, Baillieul J. Special Issue on Technology of Networked Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 95 (1): 5-8.
- [8] 陈波, 孟朝明. Truetime 的网络控制系统仿真研究 [J]. 控制工程, 2008 (5): 501-503.
- [9] 吕志刚. 基于 CAN 总线的水下航行器分布式控制系统的设计 [J]. 舰船电子工程, 2015, 35 (4): 147-149.
- [10] Yoerger D R, Newman J, Slotine J J E. Supervisory control system for the JASON ROV [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 11 (3): 392-400.
- [11] Antsaklis P, Baillieul J. Special Issue on Technology of Networked Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 95 (1): 5-8.
- [12] 李乐, 刘卫东, 李娟丽. 网络化无人水下航行器 CAN 总线调度方法 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (2): 42-45.
- [13] Han Y, Antsaklis P J. Event-triggered real-time scheduling for stabilization of passive and output feedback passive systems [A]. American Control Conference (ACC) [C]. 2011: 1674-1679.