

欠驱动 AUV 基于干扰观测器的滑模控制

李广有^a,王娜^{a,b},尹庆华^a

(青岛大学 a. 自动化学院;b. 山东省工业控制技术重点实验室,山东 青岛 266071)

摘要:为了提高欠驱动自主水下机器人在外部干扰影响下的航向跟踪控制性能,设计一种基于非线性干扰观测器的滑模控制器。有条件地简化欠驱动自治水下机器人的水平面模型,建立简化模型的状态方程;构造非线性干扰观测器,设计基于干扰观测器的滑模控制器,根据 Lyapunov 稳定性理论确保闭环系统的稳定性。仿真结果表明:存在外界干扰的情况下,基于非线性干扰观测器的滑模控制器相比传统的滑模控制器,能够更好地实现水下机器人的航向跟踪控制,具有良好的抗干扰性能。

关键词:欠驱动自治水下机器人;航向跟踪;非线性干扰观测器;滑模控制

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0177-04

Underactuated AUV Sliding Mode Control Based on Disturbance Observer

LI Guangyou^a, WANG Na^{a,b}, YIN Qinghua^a

(a. College of Automation;b. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: To improve the course tracking control performance of an underactuated autonomous underwater vehicle under the influence of external disturbances, a sliding mode controller based on nonlinear disturbance observer is designed. The horizontal model of the underactuated AUV is simplified conditionally, and the state equation of the simplified model is established. A nonlinear disturbance observer is constructed, and a sliding mode controller based on the disturbance observer is designed to ensure the stability of the closed-loop system according to the Lyapunov stability theory. The simulation results show that the sliding mode controller based on the nonlinear disturbance observer can better realize the course tracking control of the underwater vehicle than the traditional sliding mode controller in the presence of external disturbances, and has good anti-interference performance.

Keywords: underactuated AUV; course tracking; nonlinear disturbance observer; sliding mode control

0 引言

自治水下机器人(AUV)是一种能够通过自主方式在水下环境中运动和操作的水下智能机器人。相对于遥控水下机器人而言,AUV不再受缆绳的约束,可以更加快速灵活地完成多种海洋作战和作业任务。AUV凭借其鲜明的特点被广泛用于多种领域,比如海图绘制、国防军事、海洋研究、海底资源探测等^[1]。由于AUV在完成多种水下任务过程中,易受到各种未知干扰的影响,如风、海浪和海流^[2],故设计具有抗干扰能力的运动控制器尤为重要。

当一种AUV模型运动自由度数目大于控制量数目时,可称之为欠驱动AUV。AUV水平面模型运动自由度数量多于控制量的数量,是一种标准的欠驱动AUV系统。

近年来,欠驱动AUV的控制研究工作主要集中在对系统本身引入智能控制、鲁棒控制、增益调节等。如文献[1]针对AUV垂直面模型,提出一种基于趋近律的姿态控制方法和一种基于等效控制切换模糊化滑模变结构姿态控制方法。文献[3]针对AUV在自动巡航任务中的

姿态控制问题,提出了一种神经网络与滑模控制相结合的鲁棒自适应姿态控制算法,提升了控制的鲁棒性和有效性。文献[4]针对AUV的深度控制,设计了一种反步滑模控制器。文献[5]针对AUV在六自由度下的跟踪控制问题,提出了一种基于DRFNN的自适应输出反馈控制器。文献[6]设计了一种AUV水下自平衡控制算法。文献[7]将AUV模型分解成三个相互作用较小的子系统,实现了对AUV系统的分解控制。文献[8]对水下机器人设计了一种离散时间下的时延控制。文献[9]用积分滑模控制方法分别实现了欠驱动AUV水平面轨迹跟踪控制和垂直面的深度跟踪控制。

部分学者在欠驱动AUV的控制方面关注了干扰对控制系统的影响。文献[2]针对复杂海洋环境中的海流干扰,设计了性能优良的鲁棒控制器,减少了干扰对控制的影响。文献[10]针对存在未知外部干扰影响下的AUV,设计了一种基于非线性干扰观测器的自适应控制方法,依靠对外部干扰的估计和抵消,实现了欠驱动AUV垂直面跟踪期望深度变化轨迹。

综上所述,近年来针对AUV系统面对外界干扰时的

基金项目:国家自然科学基金项目(61703221);山东省自然科学基金项目(ZR2016FP10)

第一作者简介:李广有(1996—),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为水下机器人抗干扰控制。

控制研究,大多数选择设计更为复杂的控制器来改善控制效果。然而针对欠驱动 AUV 水平面方向,尤其是基于干扰预测、估计和补偿设计控制器的研究较少。本文针对 AUV 水平面模型存在未知外部干扰的情况,设计基于干扰观测器的滑模控制器(NDOBSMC)。首先构造非线性干扰观测器估计 AUV 受到的外界干扰,然后基于干扰估计值设计复合滑模控制器补偿干扰影响,从而改善欠驱动 AUV 水平面航向跟踪控制性能。本文所设计的 NDOBSMC 与文献[1]中传统滑模控制器相比,能进一步提高跟踪精度,改善控制器的抗干扰能力。

1 欠驱动 AUV 水平面模型

采用牛顿-欧拉方法建立 AUV 六自由度运动学及动力学模型^[10]:

$$\begin{cases} B\dot{V}+C(V)V+D(V)V+g(\eta)=\tau+D_{\text{ext}} \\ \dot{\eta}=J(\eta)V \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V=[u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 为定义在刚体坐标系中的速度和角速度向量,其分量分别对应表示纵荡速度、横荡速度、垂荡速度以及横摇角速度、纵摇角速度、首摇角(航向角)速度; $\eta=[x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 为定义在惯性系中的位置和姿态向量,其姿态分量分别对应表示横摇角、纵摇角和首摇角(航向角); B 为矢量矩阵; $C(V)$ 为科氏力和向心力阵; $D(V)$ 为水动力流体阻尼阵; $g(\eta)$ 为重力、浮力等恢复力矩构成的向量; $J(\eta)$ 为 AUV 的控制输入; D_{ext} 为坐标系转换矩阵;AUV 为外部环境对 AUV 造成的外部干扰。

假设 AUV 水平面与垂直面的运动实现相互解耦,AUV 水平面运动不受横摇和纵摇运动的影响,即可得到欠驱动 AUV 水平面模型。AUV 水平面运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x}=u\cos\phi-v\sin\phi \\ \dot{y}=u\sin\phi+v\cos\phi \\ \dot{\phi}=r \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 和 y 分别为 AUV 在惯性系下的坐标分量; u 为 AUV 在刚体坐标系中的纵荡速度; v 为 AUV 在刚体坐标系中的横荡速度; r 为 AUV 在刚体坐标系中的首摇角速度; ϕ 为首摇(航向)角。

不考虑垂荡、横摇和纵摇运动的影响,欠驱动 AUV 完成航向跟踪主要依靠控制力矩 M ,即可得到由式(1)简化的 AUV 水平面运动的动力学方程:

纵荡:

$$m\dot{u}=X_u\dot{u}+X_{uu}u^2+F \quad (3)$$

横荡:

$$m(\dot{v}+ur)=Y_v\dot{v}+Y_{uv}uv+Y_{ur}ur+Y_{v|v|}v|v| \quad (4)$$

首摇:

$$I_z\dot{r}=N_r\dot{r}+N_{uv}uv+N_{ur}ur+N_{v|v|}v|v|+M+D_{\text{ext}} \quad (5)$$

式中: m 为 AUV 质量; I_z 为 z 轴方向上的转动惯量; X_u 、 X_{uu} 、 Y_v 、 Y_{uv} 、 Y_{ur} 、 $Y_{v|v|}$ 、 N_r 、 N_{uv} 、 N_{ur} 和 $N_{v|v|}$ 为水动力系数; F 为 AUV 的轴向推进力; M 为 AUV 在垂直舵面与推进器联合作用下产生的绕 z 轴的控制力矩。

假设 AUV 水平面模型满足 $v \approx 0$,且 $\dot{v} \approx 0$ 首摇角 ϕ 处

于比较小的范围内变化,基本满足 $\sin\phi=\phi$, $\cos\phi=1$,AUV 水平面模型式(2)-式(5)可简化为

$$\begin{cases} I_z\dot{r}=N_r\dot{r}+N_{ur}ur+M+D_{\text{ext}} \\ \dot{\phi}=r \\ \dot{y}=u\phi \end{cases} \quad (6)$$

令 $x_1=y$, $x_2=\phi$, $x_3=r$,则可以得到欠驱动 AUV 水平面模型的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1=ux_2 \\ \dot{x}_2=x_3 \\ \dot{x}_3=W_1ux_3+W_2M+d \end{cases} \quad (7)$$

式中: $W_1=\frac{N_{ur}}{I_z-N_r}$; $W_2=\frac{1}{I_z-N_r}$; $d=\frac{D_{\text{ext}}}{I_z-N_r}$ 。

2 非线性干扰观测器的设计

定义状态变量 $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$,为方便非线性干扰观测器(NDO)的设计,则状态方程(7)可以写成向量形式:

$$\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{F}(\mathbf{x})+\mathbf{Q}_1(\mathbf{x})M+\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})d \quad (8)$$

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{x})=[ux_3 \ x_3 \ W_1ux_3]^T$; $\mathbf{Q}_1(\mathbf{x})=[0 \ 0 \ W_2]^T$;

$\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})=[0 \ 0 \ 1]^T$ 。

构造 NDO 如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}}=m+T(\mathbf{x}) \\ \dot{m}=\mathbf{L}[-\mathbf{F}(\mathbf{x})-\mathbf{Q}_1(\mathbf{x})M-\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})(m+T(\mathbf{x}))] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $T(\mathbf{x})=T_1x_1+T_2x_2+T_3x_3$, T_1 、 T_2 、 T_3 均为常数,且 $T_1>0$, $T_2>0$, $T_3>0$; $\mathbf{L}=\frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}=[T_1 \ T_2 \ T_3]$ 。

定义 $\tilde{d}=d-\hat{d}$,本文假设干扰 d 是慢时变的,为了方便分析,可假设 d 的导数近似为0,即

$$\dot{\tilde{d}}=\dot{d}-\dot{\hat{d}}=-\mathbf{L}\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})\tilde{d}=-T_3\tilde{d} \quad (10)$$

构建 Lyapunov 函数 $\dot{V}_{\text{obs}}=\frac{1}{2}\tilde{d}^2$,求导得 $\dot{V}_{\text{obs}}=\tilde{d}\dot{\tilde{d}}=-T_3\tilde{d}^2 \leq 0$,故干扰估计误差最终可以收敛到0。

3 NDOBSMC 设计

本部分针对 AUV 受到外部干扰的情况,基于非线性干扰观测器设计 NDOBSMC,实现欠驱动 AUV 的航向跟踪控制。将首摇角 ϕ 近似看作 AUV 航向,为确保这一点,就要求 AUV 的横荡速度 v 越小越好,当 $v=0$ 时,首摇角与航向角相等。

根据系统状态方程(7),定义误差向量 $\mathbf{e}=[e_1 \ e_2 \ e_3]^T$,其中

$$\begin{cases} e_1=y-0=x_1 \\ e_2=\phi-\phi_d=x_2-\phi_d \\ e_3=r-0=x_3 \end{cases} \quad (11)$$

构造滑模切换面函数 $s=\mathbf{C}\mathbf{e}=c_1e_1+c_2e_2+c_3e_3$,其中 $\mathbf{C}=[c_1 \ c_2 \ c_3]$ 为待定系数。设计 NDOBSMC 如下:

$$M=U_s+U_d \quad (12)$$

式中:控制分量 $U_s = -k \operatorname{sgn}(s)$ 为滑模控制器的控制输出,其中 k 为待定常数, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数;控制分量 $U_d = -\frac{1}{w_2} \hat{d}$ 补偿外部干扰影响。

定理 1:考虑水下机器人水平面系统(式(6)),当 $c_1 > 0, c_2 > 0, c_3 > 0, k > 0$, 且参数满足 $0.12c_3k > 2.4c_1 + 0.6c_2 + 0.288c_3$ 时,在复合滑模控制器(式(12))作用下,能够保证 AUV 水平面闭环控制系统渐近稳定。

证明:选择 Lyapunov 函数 V 如下

$$V = \frac{1}{2} s^2 \geq 0$$

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + c_3 \dot{e}_3 = c_1 u \phi + c_2 r + c_3 (W_1 u r - k W_2 \operatorname{sgn}(s) - \\ \hat{d} + d) &= c_1 u \phi + c_2 r + c_3 W_1 u r - c_3 k W_2 \operatorname{sgn}(s) - c_3 \hat{d} \end{aligned}$$

由参考文献[1]类比可得, $|u| \leq 2 \text{ m/s}$, $|r| < 0.6 \text{ rad/s}$, $|\phi| < 1.2 \text{ rad}$, 则

$$\dot{s} \leq 2.4c_1 + 0.6c_2 - 0.288c_3 - 0.12c_3k \operatorname{sgn}(s) = R + O$$

式中: $R = 2.4c_1 + 0.6c_2 - 0.288c_3$; $O = -0.12c_3k \operatorname{sgn}(s)$ 。

因此式(13)可改写为

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(R + O) = sR + sO。$$

容易知道

$$sO = -0.12c_3k \operatorname{sgn}(s) = -0.12c_3k |s| \leq 0$$

若

$$|O| > |R|$$

即

$$0.12c_3k > 2.4c_1 + 0.6c_2 + 0.288c_3$$

则 $\dot{V}$ 的符号由 sO 的符号决定, $\dot{V} < 0$ 成立, 证毕。

因此当按照定理 1 选择参数来设计控制力矩

$$M = U_s + U_d = -k \operatorname{sgn}(s) - \frac{1}{W_2} \hat{d}$$

则可保证 AUV 水平面闭环控制系统渐近稳定。

4 仿真实验

仿真中 AUV 模型相关物理参数见文献[1], 因为干扰存在于第三通道, 则选取设计非线性干扰观测器(式(9))的参数 $T_1 = 0, T_2 = 0, T_3 = 9$ 。假设取 $C = [0.1 \ 0.73 \ 0.5]$, $k = 60$ 。设置 AUV 的水平推动力为 6.48 N , 控制力矩 M 和水平推动力 F 控制 AUV 使其跟踪目标航向, 在其运动过程中, 对 AUV 施加外部力矩干扰。设计的 AUV 目标航向 ϕ 幅值为 1 , 频率为 0.5 的正弦波形式。在系统运行的第 40 s 增加 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的常值外部干扰力矩 D_{ext} 。本部分通过仿真对比传统滑模控制器(SMC)和 NDOBSMC 的控制效果。

图 1 为 NDOBSMC 和 SMC 的 AUV 航向跟踪误差曲线。AUV 航向跟踪在第 40 s 受到干扰时, SMC 航向跟踪误差峰值达到 1.3 m , 无法实现完全跟踪目标深度, 会出现较大幅度跟踪误差; NDOBSMC 较大幅度地减小了航向跟踪误差, 误差峰值出现在系统刚运行阶段, 峰值仅为 0.3 m , NDOBSMC 在第 40 s 受到干扰时, 航向跟踪误差仅为 0.1 m , 较好地抵抗了干扰的影响。

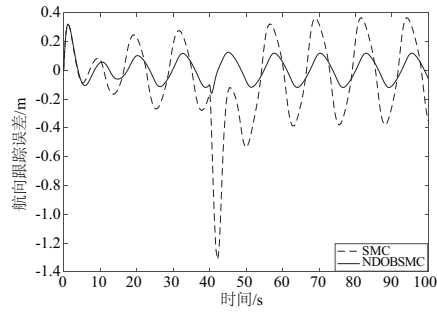


图 1 NDOBSMC 和 SMC 的 AUV 航向跟踪误差

图 2 为 NDOBSMC 和 SMC 控制 AUV 的航向跟踪曲线, 包含有 NDOBSMC 的 AUV 在受到外部干扰时, 目标航向跟踪运动完成效果良好; 而 SMC 控制时, 跟踪效果比较差, 在 40 s 出现大幅度的波动。

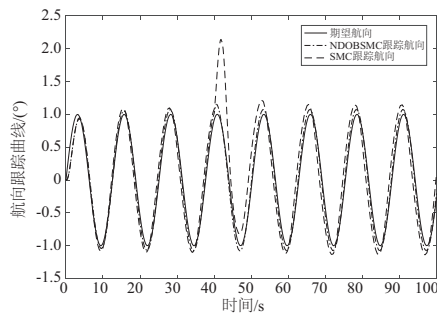


图 2 NDOBSMC 和 SMC 控制 AUV 的航向跟踪曲线

图 3 为含有 NDOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测值和干扰实际值。外部干扰力矩的实际值 d 与非线性干扰观测器得到的估计值 $\hat{d}$ 误差较小, 说明干扰观测器可以估计出实际干扰。另外, 将其外界干扰力矩提升至 $500 \text{ N} \cdot \text{m}$, NDOBSMC 仍能保证 AUV 完成航向跟踪。但是, 对于仅采用 SMC 的 AUV, 若添加外界干扰力矩超过 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 之后, 整个系统将失去控制。这说明 NDOBSMC 具有良好的抗干扰能力。

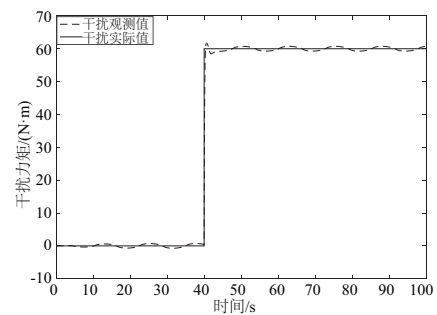


图 3 含有 NDOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测值和干扰实际值

为测试含有 NDOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测器的干扰估计能力, 将外部干扰设置成如图 4 实线所示的较为多样的形式。虚线为干扰估计值, 可以看出外部干扰力矩的实际值与非线性干扰观测器得到的估计值误差较小, 说明干扰观测器可以估计出实际干扰。

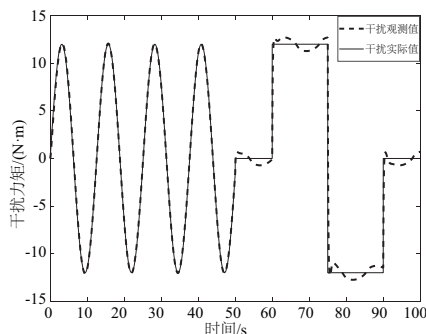


图4 含有 NDOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测值和干扰实际值(改变干扰形式后)

图5为纵荡速度 u 的响应曲线。分析式(3)可知,纵荡速度只和轴向推进力 F 有关,轴向推进力 F 直接决定纵荡速度 u 的大小。仿真结果说明,当选择 F 的值为6.48 N时,其控制 u 最终达到2 m/s。

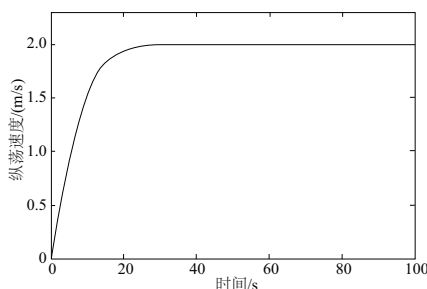


图5 水平面模型纵荡速度响应曲线

图6为横荡速度 v 的响应曲线。分析式(4)中横荡运动方程可知,首摇角速度 r 和纵荡速度 u 影响了横荡速度 v ,轴向推进力 F 和控制量 M 间接控制横荡运动。

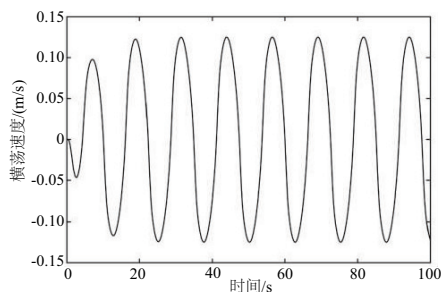


图6 水平面模型横荡速度响应曲线

图7为首摇角速度 r 的响应曲线。分析式(5)可知,控制量 M 、纵荡速度 u 和横荡速度 v 影响了首摇角速度 r 。也可以说控制量 M 和轴向推进力 F 直接决定首摇角速度。

因AUV在水平面内做正弦波形式的航向运动,图8所示的首摇角 ϕ 在一定范围内做规律变化,其峰值约束在一定范围内。

5 结语

通过有条件简化欠驱动AUV水平面运动学以及动力

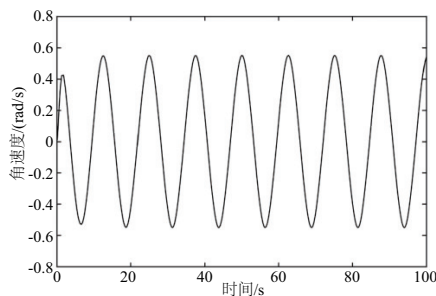


图7 水平面模型首摇角速度响应曲线

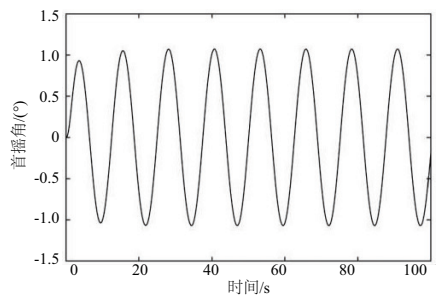


图8 水平面模型首摇角响应曲线

学方程,得到简化的欠驱动AUV模型。考虑实际过程中AUV会受到外部干扰的情况,引入非线性干扰观测器,并在此基础上,设计了NDOBSMC。通过仿真实验,得到外部干扰作用下,航向跟踪曲线、航向跟踪误差曲线、干扰估计曲线以及AUV系统其他状态变量曲线,仿真结果验证了所设计控制器具有良好的控制性能。

参考文献:

- [1] 郝阳. 自主水下航行器模糊滑模控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [2] 曲星儒. 海流干扰下欠驱动AUV航迹跟踪控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [3] 蒋云彪, 郭晨, 于浩森. 自主水下航行器的鲁棒自适应姿态控制算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(17): 266-270.
- [4] 贾鹤鸣, 何东旭, 林荣鹏, 等. 基于反步滑模的AUV深度控制研究[J]. 科技创新与生产力, 2018(6): 21-24, 27.
- [5] ZHANG L J, QI X, PANG Y J. Adaptive output feedback control based on DRFNN for AUV [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(9/10): 716-722.
- [6] 王雷. 水下机器人运动控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [7] JALVING B. The NDRE-AUV flight control system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(4): 497-501.
- [8] KUMAR R P, DASGUPTA A, KUMAR C S. Robust tracking control of underwater vehicles using time-delay control in discrete-time domain[C]//OCEANS 2006 - Asia Pacific. Singapore: IEEE, 2006: 1-5.
- [9] 蒋云彪. 欠驱动AUV自适应轨迹跟踪控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [10] 陈巍, 魏延辉, 曾建辉, 等. 基于干扰观测器的欠驱动AUV自适应反演控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 69-76.

收稿日期: 2021-04-12