

便携式自主水下机器人动力学建模方法研究*

曾俊宝^{1,2}, 李 硕¹, 刘鑫宇^{1,2}, 李一平¹, 王晓辉¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对 50 kg 级便携式自主水下机器人(AUV)的精确控制和研究,介绍了一种基于计算流体力学(CFD)和非线性最优化辨识的动力学建模方法,着重推导了便携式 AUV 动力学模型,并使用计算流体力学方法代替水池实验获取辨识所需数据和通过非线性最优化方法获得合适的模型结构和模型参数。最终建立了便携式 AUV 数学模型,并通过对比仿真数据与实验数据的对比,证明了该模型及方法的有效性。

关键词: 便携式自主水下机器人; 动力学建模; 计算流体力学; 非线性最优化辨识

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2018)06-1747-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.06.032

Research on dynamic modeling of portable autonomous underwater vehicle

Zeng Junbao^{1,2}, Li Shuo¹, Liu Xinyu^{1,2}, Li Yiping¹, Wang Xiaohui¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to accuracy control and study the 50 kg portable AUV (autonomous underwater vehicle), this paper presented a dynamic modeling method based on computational fluid dynamics (CFD) and nonlinear optimization identification. First, it derived the portable AUV dynamic model, and then instead of pool experiments, this paper used the data, which was required by parameters identification and obtained through CFD calculations, and nonlinear optimization to find the appropriate model structure and model parameters. Finally, it showed the results of dynamic modeling of portable AUV. The comparison of simulation data and test data verify the validity of the model and method.

Key words: portable AUV; dynamic modeling; computational fluid dynamics (CFD); nonlinear optimization identification

0 引言

随着陆地资源的日益枯竭,人们把目光投向了约占地球表面积 71% 并含有丰富资源的海洋。于是各种各样的海洋观测、开发工具不断涌现,其中水下机器人作为一种替代或者协助人类探索海洋、开发海洋的智能工具在本世纪受到了极大的重视^[1-3]。在近海、湖泊与水库等相对较浅的水域,便携式自主水下机器人(以下简称便携式 AUV)以其小体积、模块化、易用性、低成本等特点,在水文环境监测与水下侦察等方面具有广阔的应用前景,然而其控制性能的好坏直接影响它在很多方面的潜在应用,如水下摄像、目标跟踪等应用都要求 AUV 具有良好的控制性能。

目前 AUV 通过传统控制算法可完成简单的航行控制,但要完成高精度的跟踪、观测等作业,必须有先进的控制算法来支撑,但是先进的航行控制算法要以合理的动力学模型为基础。目前,建立 AUV 模型主要有两种方法:一种是基于 AUV 的物理结构、水动力分析、推进器布局与性能分析等要素,通过使用物理、数学等自然法则进行系统解析来产生数学模型的理论建模方法,该过程又称为解析法;另一种是利用系统的输入和输出数据直接推导系统模型的建模方法,该过程又称为系统

辨识。由于 AUV 的动态模型具有高度的非线性而且各个自由度之间的耦合性非常强,要精确地描述 AUV 的动力学模型,在很大程度上取决于其水动力参数的确定。传统确定水动力参数的方法是通过实验获得,如伍兹霍尔海洋研究所通过拖曳水池实验建立了 REMUS 水下机器人的运动方程^[4],也有一些水动力参数可通过理论方法或理论近似方法计算获得,如日本东京大学通过 CFD 计算了 TUNA-SAND 遥控水下机器人的水动力系数^[5]。但拖曳水池实验费用昂贵,且测得值未必完全可靠,同时理论计算获得的结果和实际航行情况也有相当差别。随着计算机技术的发展,通过计算流体力学(CFD)和参数辨识进行水动力建模的方法变得越来越重要,它能通过计算机软件计算出水下机器人在各种状态下所受到的水动力,并通过计算结果辨识出水动力参数和其他表征系统性能的结果,可以为控制系统设计,提供更真实的水动力参数,并节约时间和成本。

“十二五”期间,中国科学院沈阳自动化研究所在国家“863”计划的支持下,面向海洋环境探测和水下观测的需求,研制了具有自主知识产权的 50 kg 级便携式 AUV 产品样机,如图 1 所示。该便携式 AUV 为鱼雷状流线型外形,采用主推进器加 X 形舵的推进方式^[6]。为了对其进行精确控制,需要建立该便携式 AUV 的动力学模型。本文以这款最新研制的便

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-03-09 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2011AA09A105); 国家自然科学基金重点项目(61233013)

作者简介: 曾俊宝(1983-),男,甘肃白银人,副研究员,硕士,主要研究方向为水下机器人控制(zengjb@sia.cn); 李硕(1970-),男,辽宁沈阳人,研究员,博士,主要研究方向为水下机器人控制; 刘鑫宇(1989-),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,主要研究方向为水下机器人控制; 李一平(1963-),女,辽宁沈阳人,研究员,硕士,主要研究方向为水下机器人控制; 王晓辉(1967-),男,辽宁沈阳人,研究员,硕士,主要研究方向为水下机器人控制。

携式 AUV 为建模对象,从动力学模型推导和模型参数辨识两个方面阐述了整个建模过程,最后通过对仿真数据与实验数据对比来评测整个模型与建模方法的有效性。从评测结果来看,本文所建立的动力学模型可准确地描述该携式 AUV 的运动,满足系统仿真及实时控制的需求。

1 携式 AUV 动力学模型推导

选取坐标系如图 2 所示。设携式 AUV 载体的质量为 m ,重心 G 的速度为 $V(u, v, w)$ 为 V 在动系 $G-xyz$ 上的投影,角速度为 $\Omega(p, q, r)$,外力为 $F(K, M, N)$,假设动坐标系原点与水下机器人的重心重合。

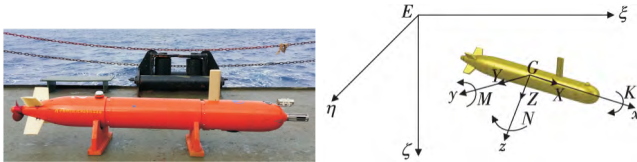


图 1 携式自主水下机器人 图 2 坐标系定义

由牛顿运动定律和动量矩定理,如式(1)所示。

$$\frac{dB}{dt} = F, \frac{dK}{dt} = M \tag{1}$$

其中: B 是载体的动量, K 是载体相对于重心(质心)的动量矩。又由向量的微分公式,如式(2)所示。

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d\dot{B}}{dt} + \Omega \times B \tag{2}$$

其中: $\frac{dB}{dt}$ 是向量 B 相对于定系的时间导数, $\frac{d\dot{B}}{dt}$ 是向量 B 相对于动系的时间导数,将微分式(2)代入式(1),结果如式(3)和(4)所示。

$$\frac{d\dot{B}}{dt} + \Omega \times B = F \tag{3}$$

$$\frac{d\dot{K}}{dt} + \Omega \times K + V \times B = M \tag{4}$$

动量 B 在动系三个坐标轴上的投影分别为 mu, mv, mw , 设动系的三个坐标轴是携式 AUV 载体的惯性主轴,动量矩在动系三个坐标轴上的投影分别为 $I_x p, I_y q, I_z r$, 其中 I 为转动惯量。根据向量积的计算法则,展开式(3)和(4)得到携式 AUV 空间运动方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} m(\dot{u} + qw - rv) = X \\ m(\dot{v} + ru - pw) = Y \\ m(\dot{w} + pv - qu) = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = N \end{cases} \tag{5}$$

一般作用于载体上的水动力和载体特性、运动特性、流体参数有关,是这些参数的函数,如果将螺旋桨单独处理,同时携式 AUV 不做横滚运动,可假设横滚角速度为零,且在携式 AUV 控制系统中也对横滚不作控制,所以动力学方程可简化为五自由度。综上所述,可得携式 AUV 所受水动力如式(6)所示。

$$\begin{cases} X = X_u \dot{u} + X_{uu} u^2 + X_{uv} v^2 + X_{ur} r^2 + X_{vr} vr + F_{X\delta} \\ Y = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + F_{Y\delta} \\ Z = Z_0 + Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} + Z_w w + Z_q q + F_{Z\delta} \\ M = M_0 + M_w \dot{w} + M_q \dot{q} + M_w w + M_q q + F_{M\delta} \\ N = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + F_{N\delta} \end{cases} \tag{6}$$

其中: $F_{X\delta}, F_{Y\delta}, F_{Z\delta}, F_{M\delta}$ 和 $F_{N\delta}$ 是携式 AUV 舵翼所受到的水动力; M_0 和 Z_0 为携式 AUV 浮力与重力差产生的流体静力矩与力。

2 模型参数辨识

本章将主要介绍携式 AUV 动力学模型中各参数的确定方法。

2.1 质量与转动惯量

通过三维设计软件 Solidworks 如图 3 所示,可以获得携式 AUV 运动方程左侧的质量及绕三轴的转动惯量参数如下:

$$m = 45.16 \text{ kg} \\ I_{xx} = 0.2245 \quad I_{yy} = 7.6438 \quad I_{zz} = 7.6297$$

2.2 加速度系数计算

在计算携式 AUV 加速度系数时,近似将其看做一个圆柱体,此时整个 AUV 载体前后对称,即绕 Z 轴方向的角加速旋转运动 \dot{r} 不会引起流体惯性力 Y ,即 $Y_r = 0$;沿 Y 轴方向的加速运动 \dot{v} 不会引起流体惯性力矩 N ,即 $N_v = 0$;同理可得, $Z_q = M_w = 0$;其余加速度系数可参照质量为 m ,长度为 L ,半径为 r 的圆柱体在水中加速运动时的经验公式进行计算^[7-8],如式(7)所示。

$$\begin{cases} X_u = -0.1 \text{ m} \\ Y_v = Z_w = -\pi r^2 L \\ M_q = N_r = -\frac{1}{12} \pi r^2 L^3 \end{cases} \tag{7}$$

对于携式 AUV $L = 1.628 \text{ m}$, $r = 0.1 \text{ m}$,在水中航行时, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,则由式(7)可计算出携式 AUV 的加速度系数如式(8)所示。

$$\begin{cases} X_u = -4.516 \\ Y_v = Z_w = -51.119 \\ M_q = N_r = -11.29 \end{cases} \tag{8}$$

2.3 速度系数辨识

为了获得携式 AUV 所受水动力的速度系数,本文采用计算流体力学软件来对其进行辨识。该软件可以仿真携式 AUV 在稳态下受到的流体阻力,将三维机械模型导入到 ANSYS CFX 中,并采用该软件模拟实现旋臂水池的功能,使用不同的流和姿态进行计算,如图 4 所示。

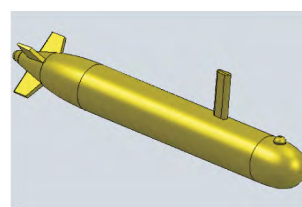


图 3 携式 AUV 三维模型

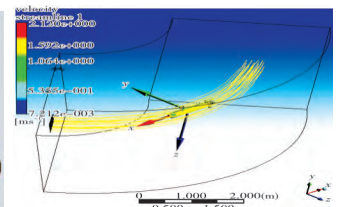


图 4 携式 AUV 旋臂水池流体阻力仿真计算

考虑到携式 AUV 的实际航行状况,设计如下仿真实验场景:

$$\begin{aligned} u &= 1 \text{ knot} \quad 2 \text{ knot} \quad 3 \text{ knot} \quad 4 \text{ knot} \quad 5 \text{ knot} \\ \phi &= 10 \text{ m} \quad 20 \text{ m} \quad 40 \text{ m} \\ \alpha &= 0^\circ \quad \pm 5^\circ \quad \pm 10^\circ \quad \pm 15^\circ \\ \beta &= 0^\circ \quad \pm 5^\circ \quad \pm 10^\circ \quad \pm 15^\circ \end{aligned}$$

其中: u 为携式 AUV 的航速; ϕ 为圆周航行轨迹的直径; α 和

β 为攻角和漂角。通过不同条件组合的 CFX 计算可获得多组不同的实验数据,通过这些实验数据可辨识出动力学模型中的速度系数。

为了获得在不同姿态下稳定的数学模型,采用非线性最优化方法对模型参数进行优化。对于 CFD 计算结果 m 中的任意一个以及任意 n 种参数组合中的一个,定义最优化函数 f_0 为

$$g_{nm} = f(\text{pram}_n, \text{CFD}_m)$$

$$f_0 = \|g\|_2 \quad (9)$$

其中: $f(\text{pram}_n, \text{CFD}_m)$ 是参数 pram_n 下流体动力学模型得到的力; CFD_m 是 u, v, ω, p, q 和 r 的第 m 个 CFD 计算结果。

使用 MATLAB 通过旋臂水池流体阻力仿真计算结果辨识得到相关的水动力参数如下:

$$X_{uu} = -11.852 \quad X_{vv} = -11.312 \quad X_{rr} = 18.854 \quad X_{vr} = -17.389$$

$$Y_v = -194.941 \quad Y_r = 114.287$$

$$Z_w = -143.746 \quad Z_q = -132.863$$

$$M_w = 22.105 \quad M_q = -48.621$$

$$N_v = -40.116 \quad N_r = -54.483$$

辨识过程中五个水动力方程的曲线拟合结果如图 5 所示。

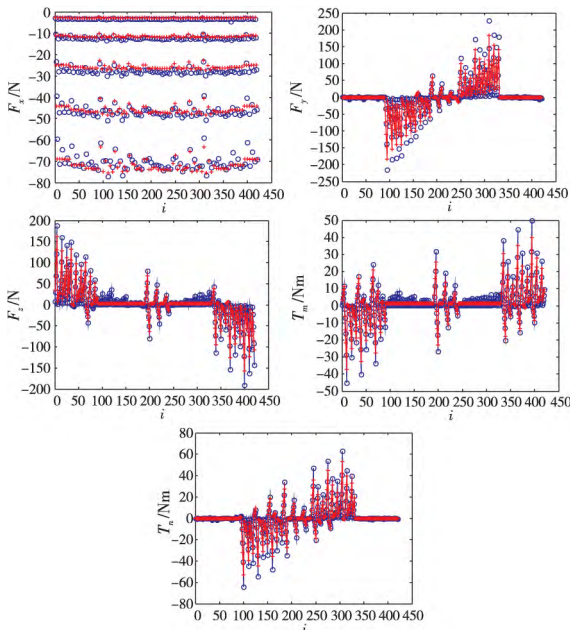


图 5 便携式 AUV 所受水动力速度系数曲线拟合结果

2.4 舵翼水动力系数辨识

对于便携式 AUV,在分析其舵翼所受水动力时, X 形舵对 AUV 本体的操控性影响较为复杂,存在水平面与垂直面之间的耦合。为了使分析更加清晰明了,本文在做舵翼水动力分析时,首先设定不同的方向舵角和升降舵角的组合,然后将其映射为 X 形舵的四个舵角转动值,映射关系如式 (10) 所示,其中 δ_e 和 δ_r 分别为十字形舵中的升降舵角和方向舵角, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 和 δ_4 分别为 X 形舵中的左上、左下、右上、右下舵角(从舰部向舰首看),推导过程见文献 [9, 10] 并在 CFX 中采用模拟实现拖曳水池的方式进行仿真计算,如图 6 所示。

$$\begin{cases} \delta_1 = (\delta_e + \delta_r) / \sqrt{2} \\ \delta_2 = (\delta_e - \delta_r) / \sqrt{2} \\ \delta_3 = -(\delta_e - \delta_r) / \sqrt{2} \\ \delta_4 = -(\delta_e + \delta_r) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (10)$$

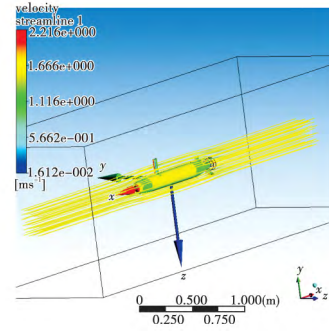


图 6 不同舵角时拖曳水池流体阻力仿真计算
分别设定方向舵角和升降舵角为 $-30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 五个值,并进行组合仿真。

通过多次曲线拟合结果对比,最终确定便携式 AUV 舵翼水动力模型结构如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} F_{X_\delta} = X_{uuae} u |u| \delta_e | + X_{uaar} u |u| \delta_r | + X_{uaear} u |u| \delta_e | \delta_r | \\ F_{Y_\delta} = Y_{uaar} u |u| \delta_r + Y_{uaear} u |u| \delta_e | \delta_r \\ F_{Z_\delta} = Z_{uuae} u |u| \delta_e + Z_{uaear} u |u| \delta_e | \delta_r | \\ T_{M_\delta} = M_{uuae} u |u| \delta_e + M_{uaear} u |u| \delta_e | \delta_r | \\ T_{N_\delta} = N_{uaar} u |u| \delta_r + N_{uaear} u |u| \delta_e | \delta_r \end{cases} \quad (11)$$

通过 MATLAB 将不同舵角下拖曳水池流体阻力仿真计算结果代入上式,辨识得到相关舵翼水动力参数如下:

$$X_{uuae} = -5.2391 \quad X_{uaar} = -5.3016 \quad X_{uaear} = -4.0964$$

$$Y_{uaar} = -15.1280 \quad Y_{uaear} = 15.205$$

$$Z_{uuae} = 15.1478 \quad Z_{uaear} = -15.2553$$

$$M_{uuae} = 10.7978 \quad M_{uaear} = -10.7536$$

$$N_{uaar} = 10.7908 \quad N_{uaear} = -10.7128$$

辨识过程中的曲线拟合结果如图 7 所示。

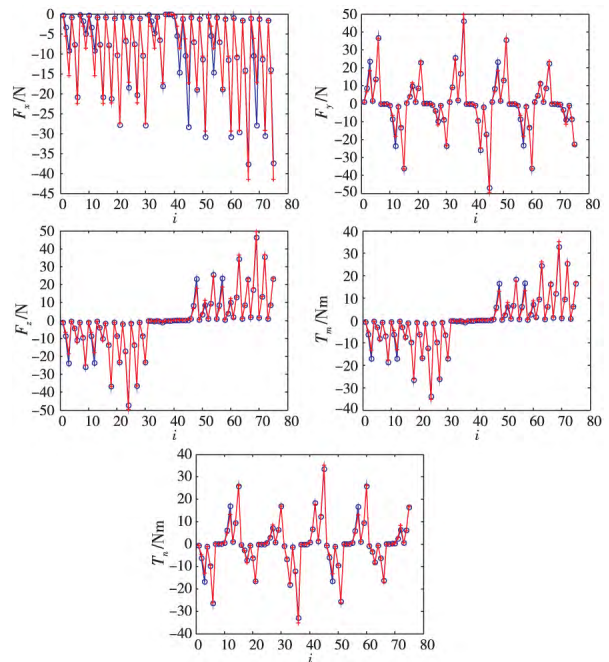


图 7 便携式 AUV 舵翼水动力参数曲线拟合结果

3 实验验证

为了验证本文所建立模型的精确性,对仿真结果和航试结果进行了对比。仿真与实际外场实验使用相同的控制器参数,

动力学计算频率为 50 Hz,分别对便携式 AUV 下潜、水平转向及固定舵角航行等动态过程进行了对比,由于实验海域水深 100 m 左右,结合实验现场流向,本文选择了便携式 AUV 从水面下潜 80 m 定深航行、水下定向 45° 航行并转为定向 225° 航行及固定舵角航行三个具有代表性的航行动态过程进行实验对比验证。实验结果显示,在下潜、转向及固定舵角航行等动态过程中,该水动力模型基本可描述真实环境中便携式 AUV 的运动情况。

1) 下潜深度仿真对比

令便携式 AUV 从水面下潜 80 m 定深航行,实航下潜曲线与仿真下潜曲线如图 8 所示。

2) 水平转向仿真对比

令便携式 AUV 在水下从定向 45° 航行转为定向 225° 航行,实航航向角变化曲线与仿真航向角变化曲线如图 9 所示。

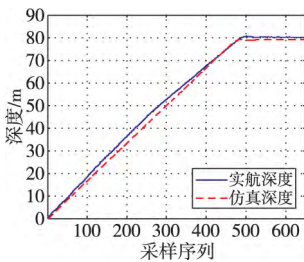


图 8 便携式 AUV 实航与仿真下潜深度曲线对比

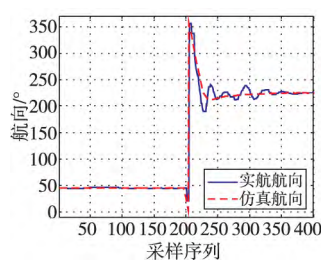


图 9 便携式 AUV 实航与仿真航向改变曲线对比

3) 固定舵角航行仿真对比

令便携式 AUV 在水下以固定舵角航行,实航轨迹曲线与仿真轨迹曲线如图 10 所示。

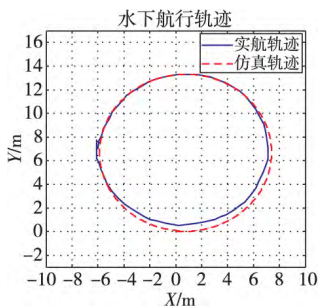


图 10 便携式 AUV 实航与仿真轨迹曲线对比

4 结束语

本文介绍了一种基于 CFD 和非线性最优化辨识的便携式 AUV 动力学建模方法,仿真结果和外场实验的结果对比表明,该模型具有良好的数值稳定性,并可精确描述便携式 AUV 的动力学特性。便携式 AUV 因其具有小体积、模块化、易用性、低成本等特点,在水下水文环境监测与水下侦察等方面具有广泛的市场,本文研究的动力学建模方法也将在未来便携式 AUV 研究及应用方面发挥很大的作用。

参考文献:

[1] 封锡盛,李一平,徐红丽. 下一代海洋机器人: 写在人类创造下潜深度世界记录 10912 米 50 周年之际 [J]. 机器人, 2011, 33 (1): 113-118.

[2] 徐玉如,李彭超. 水下机器人发展趋势 [J]. 自然杂志, 2011, 33 (3): 125-132.

[3] 刘芙蓉,陈辉. 自主式水下潜器研究开发综述 [J]. 舰船科学技术, 2008, 30(5): 20-23.

[4] Prestero T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the remus autonomous underwater vehicle [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.

[5] Tang Sulin, Ura T, Nakatani T, et al. Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2009, 14(3): 373-386.

[6] Zeng Junbao, Li Shuo, Li Yiping, et al. Performance of the portable autonomous observation system [C] // Proc of OCEANS. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014.

[7] Wang Chuanfeng, Zhang Fumin, Schaefer D. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle: the ecomapper [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(2): 199-212.

[8] 李殿璞. 船舶运动与建模 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1999.

[9] 曾俊宝,李硕,李一平,等. 便携式自主水下机器人控制系统研究与应用 [J]. 机器人, 2016, 38(1): 91-97.

[10] 林俊兴,戴余良,张涛. X 形舵和十字形舵操纵力等效关系的研究 [J]. 舰船科学技术, 2004, 26(5): 5-6, 13.

下期要目

- ◆ 深度学习相关研究综述
- ◆ 一种满足方向约束的动态航迹规划方法
- ◆ 医学知识图谱构建技术与研究进展
- ◆ 异构环境下自适应 reduce 任务调度算法的研究
- ◆ 基于差分隐私的不确定数据频繁项集挖掘算法
- ◆ 适用于即时翻译系统的改进仿射投影算法
- ◆ 面向设计产业链的需求服务映射及评价算法
- ◆ 多目标细菌觅食优化算法
- ◆ 不平衡数据集下特征词两面性的新型降维算法
- ◆ 基于云科学工作流调度的代价与能效优化算法
- ◆ 考虑相继故障的物流耦合网络节点重要度评估
- ◆ 基于多策略排序变异的多目标差分进化算法
- ◆ 软件定义的内容中心网络的分段路由策略
- ◆ 融合隐语义和邻域算法的兴趣点推荐模型
- ◆ 基于聚类与排序修剪的分类器集成方法
- ◆ 对精英加速的改进人工鱼群算法
- ◆ 基于转移变量的图文融合微博情感分析
- ◆ GPU 加速的差分进化粒子滤波算法
- ◆ 基于转移变量的图文融合微博情感分析
- ◆ 基于改进混合蜂群算法的非线性电路谐波平衡分析
- ◆ 基于等分符号化熵的情感脑电信号分析
- ◆ 基于 Bi-LSTM 的医疗事件识别研究
- ◆ 在线视频分享网络中的复杂网络特性研究
- ◆ 基于 FCM 的文本迁移学习算法
- ◆ 基于行为和社团的微博用户传播影响力分析
- ◆ 求解区间图上的罗马控制数的动态规划算法
- ◆ 轻量级 RFID 标签组证明协议