

文章编号: 2095-2163(2020)08-0206-06

中图分类号: TP399

文献标志码: A

基于PID算法的水下机器人路径及轨迹规划研究

Abdou Yahouza M. Sani, 王京

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: AUV(自动水下航行器)是当前海洋勘探研究中最重要工具之一。为了应对复杂多变的海洋环境,智能水下机器人必须是安全且自主的。自主性体现在水下机器人与水下环境相互作用的能力上,而实时控制,自主轨迹和路径规划是相互作用的重要方面之一。本文设计基于PID算法水下机器人的轨迹及几何路径跟踪控制器。通过研究水下机器人的动态模型方程获取的模型参数,并使用Matlab进行控制器模拟实验及分析。

关键词: PID; Matlab; 水下机器人轨迹和几何路径跟踪

Research on path and trajectory planning of underwater robot based on PID algorithm

Abdou Yahouza M. Sani, WANG Jing

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

[Abstract] AUV (autonomous underwater vehicle) is one of the most important tools for current marine exploration research. In order to cope with the complex and varied marine environment, intelligent underwater robots must be safe and autonomous. Autonomy is reflected in the ability of AUVs to interact with the underwater environment, while real-time control and autonomous trajectory and path planning are one of the important aspects of interaction. The core technology to ensure AUV security and autonomy is intelligent control technology, including autonomous planning, control and status monitoring. This paper designs the trajectory and geometric path tracking controller of underwater robot based on PID algorithm. The model parameters obtained by studying the dynamic model equations of the underwater robot, and using Matlab to conduct controller simulation experiments and analysis. From the Matlab simulation experiment results, it can be seen that the designed controller has a very clear effect.

[Key words] PID; Matlab; underwater robot; trajectory and geometric path tracking

0 引言

水下机器人日益增长的应用,要求水下机器人具有用于海洋开发和军事应用的智能^[1]。期望AUV能够感知运动中的周围环境并及时调整其运动状态,并且可以规划运动路径以避免碰撞。由于AUV无法完成紧急停车,必须在控制系统中执行地形观察和轨迹规划^[2]。轨迹规划的实现不仅要考虑运动控制,还要考虑机器人要遵循的几何自由碰撞路径。

轨迹规划的基本任务是解决AUV如何在水下环境中有效地自主导航,并完成任务的问题。在导航过程中必须实时计划轨迹,这意味着轨迹计划算法会采用给定的几何路径并赋予其时间信息。AUV使用速度输入进行运动控制,并根据传感器数据或环境信息规划最短路径,然后沿平滑路径到达目标位置。

1 轨迹规划跟踪控制器设计

1.1 动态模型方程与PD跟踪控制器算法

机器人的动态模型不仅可用于制定控制算法,还可用于执行仿真。本节使用动力学模型^[3]提出水下机器人模型。

$$M \dot{V} + D(V) V + G = T. \quad (1)$$

AUV的计算转矩控制律是:

$$T = \alpha T' + \beta. \quad (2)$$

其中, α 被选为 M , β 被选为 $D(V) V$ 。例如,为 T' 首先选择合适的线性控制器:

$$T' = -k_v V - k_p P. \quad (3)$$

结合方程式(1)和(2),可得出系统方程式如下:

$$\dot{V} + k_v V + k_p P = 0. \quad (4)$$

参数 k_v 和 k_p 分别是速度和位置状态向量的控制增益。

公式(3)说明速度状态向量 V 将减小为零,如果所需的状态向量不是零向量,实际上是无用的。

1.2 PD控制器设计

为了解决上述问题,可以使用期望的状态向量 P_d 和误差状态向量 ε_d ,将计算出的转矩控制器扩展到跟踪控制器。选择 T' 为:

$$T' = \dot{V}_d + k_v \varepsilon + k_p \varepsilon. \quad (5)$$

计算出转矩控制器扩展到PD跟踪控制器。其

作者简介: Abdou Yahouza M. Sani (1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:水下机器人;王京(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:真空吸铸、铝基复合材料。

收稿日期: 2020-03-25

中, \dot{V}_d 代表所需的加速度矢量, 而 ε 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别代表位置和速度的跟踪误差矢量。

(1) 位置状态向量的误差向量为:

$$\varepsilon = P_d - P. \quad (6)$$

其中, P_d 代表所需的位置矢量; P 代表当前位置矢量。

(2) 速度状态向量的误差向量为

$$\dot{\varepsilon} = \dot{V}_d - \dot{V}. \quad (7)$$

其中, V_d 代表所需的位置矢量; V 代表当前位置矢量。类似于位置矢量, 速度矢量不仅包括线速度, 还包括角速度。

(3) 加速度的误差向量为:

$$\ddot{\varepsilon} = \ddot{V}_d - \ddot{V}. \quad (8)$$

加速度误差矢量是通过将 (2) 和 (5) 与 AUV 的动力学模型相结合而得出的。系统误差方程式参考公式如式 (9) 所示。该方程式用于跟踪所有自由度的 AUV 位置、速度和加速度。也就是说, 控制器将本质上提供轨迹跟踪反馈。

$$\ddot{\varepsilon} + k_v \dot{\varepsilon} + k_p \varepsilon = 0. \quad (9)$$

1.3 PID 跟踪控制器

当准确地知道系统模型时, 公式 (5) 中的线性控制器则可以很好地工作。但是, 由于系统模型通常是近似的, 公式 (2) 中的 β 无法消除系统中的非线性。而在 PD 跟踪控制器中使用积分可以帮助最小化跟踪误差。积分用于。通过在公式 (5) 中插入位置和速度误差矢量, 使 PD 跟踪控制器转为 PID^[4-5] 跟踪控制器。

$$T' = \dot{V}_d + k_v \dot{\varepsilon} + k_{vi} \int \dot{\varepsilon} + k_p \varepsilon + k_{pi} \int \varepsilon. \quad (10)$$

PID 跟踪控制器如图 1 所示。

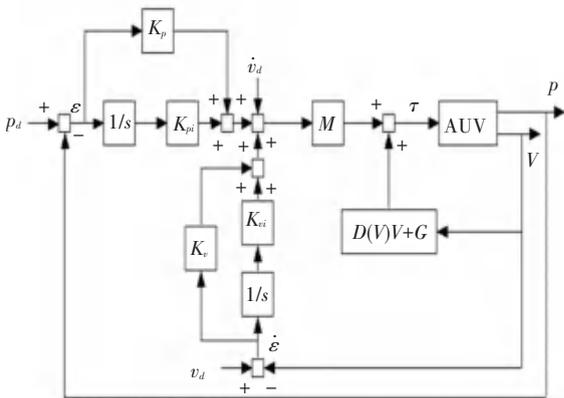


图 1 PID 跟踪控制器框图

Fig. 1 Tracking controller block diagram

通过将上述力和转矩矢量输入到 AUV, 然后获得位置矢量和速度矢量作为输出。位置和速度状态

矢量是从 AUV 的机载传感器获得的, 然后将位置和速度反馈到控制器中, 以保持 AUV 的跟踪误差。速度也被反馈到流体动力阻尼矩阵中, 因为该矩阵取决于 AUV 的当前速度。

2 轨迹及路径规划仿真实验

2.1 轨迹规划生成速度的输入的标准

PID 跟踪控制器需要所需的位置, 速度和加速度输入矢量, 必须为 AUV 生成某种形式的轨迹, 以便不断更新速度和加速度矢量。

如图 2 所示, 一个简单的梯形轨迹足以使车辆的速度从零增加到某个所需的恒定值, 然后将其降低回零。轨迹包括三部分:

- (1) 恒定的加速度。在该加速度中不断更新所需的速度, 并将其反馈到控制器中;
- (2) 零加速度, 因此是恒定的期望速度。
- (3) 一个减速, 其期望速度被更新, 直到达到零为止。由于生成轨迹时, 加速度和速度都必须小于等于 AUV 的最大能力。

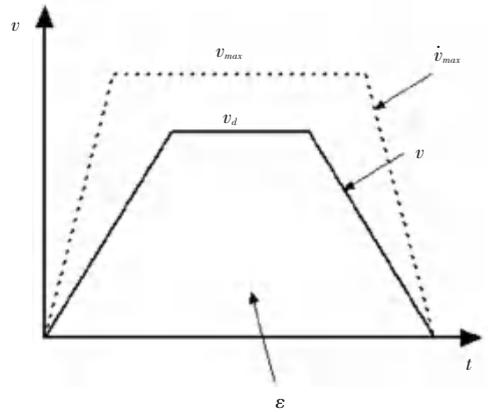


图 2 用于轨迹生成的速度标准

Fig. 2 Velocity standard used for trajectory generation

2.2 几何路径生成

所有段均由参数方程式表示, 以便可以轻松计算任何时间范围内的路径和轨迹。如, 螺旋段曲线路径的计算。

螺旋段曲线: 对螺旋曲线段进行参数化, 以生成航路点, 在进行插值时会形成螺旋路径。螺旋路径空间定义为:

$$\begin{cases} \dot{x}_d = 10\sin(0.01t), \\ \dot{y}_d = 10\cos(0.01t), \\ \dot{z}_d = t, \\ \dot{\Psi}_d = \pi/3. \end{cases} \quad (11)$$

图 3 显示了所需和匹配之间的关系。图 3 (a) 和 (b) 说明了所需与跟踪的螺旋, 在空间和 XYZ 平

面中跟踪 AUV 的路径。从这些数字可以清楚地看出,拟议的控制法确保精确跟踪路径。

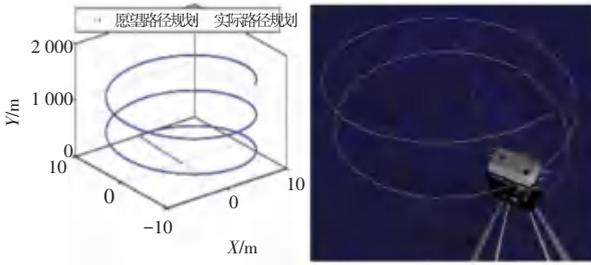


图 3 AUV 3D 路径跟踪螺旋路径
Fig. 3 AUV spiral path following

2.3 仿真实现

本工作的仿真是通过动态模型研究及 ROS GAZEBO Simulator 中执行仿真获取 AUV 的模型参数。由于采用模拟数据,因此误差的参数选取估算

表 1 动态模型参数

Tab. 1 Dynamic model parameters

自由度	体质量/kg m_{RB}	加质量/kg m_A	阻力系数(N_s / m)	二次阻力参数 $d_u u $
Positive Surge	35.3	[3.53,35.3]	$d_u^+ = 16.8$	$d_u^+ u = 67.7$
Negative Surge	35.3	[3.53,35.3]	$d_u^- = 0$	$d_u^- u = 0$
Positive Heave	35.3	[3.53,35.3]	$d_w^+ = 26.0$	$d_w^+ w = 196.7$
Negative Heave	35.3	[3.53,35.3]	$d_w^- = 0$	$d_w^- = 0$
Positive Yaw	3.9	[0.39,3.9]	$d_r^+ = 3.4$	$d_r^+ r = 1.9$
Negative Yaw	3.9	[0.39,3.9]	$d_r^- = 3.2$	$d_r^- r = 2.0$

(2)模拟研究:本节介绍了从已实现的 PID 跟踪控制器获得的仿真结果。进行了涉及各种动作的几种模拟。这里给出的模拟结果包括将 AUV 操纵到 180°航向,然后向前移动 5 m,向下移动 3 m。也就是说,AUV 的初始位置设置为:

$$P = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

最后的位置为:

$$P_d = [-5 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ \pi]^T.$$

用于仿真的 PID 系数如下,摇摆、侧倾和俯仰的系数都设置为零。

$$k_p = [0.02 \ 0 \ 1.5 \ 0 \ 0 \ 0.01],$$

$$k_v = [0.05 \ 0 \ 2.0 \ 0 \ 0 \ 0.5],$$

$$k_{pi} = [0.25 \ 0 \ 1.5 \ 0 \ 0 \ 0.4],$$

$$k_{vi} = [0.02 \ 0 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0.25].$$

3 仿真结果分析与控制器实施

3.1 仿真结果分析

模拟控制器的响应如图 4—图 10 所示。图 4 和图 5 显示了相对于车架的速度,而图 6 显示了相对于机器人架的位置。图 7 和图 8 显示了不同的位

值。添加的质量参数设置为其相应的刚体惯性参数值的 50%。在没有负向波动和升沉阻尼参数的情况下,其值与正向波动和升沉的参数相同。

为了验证所提出的规划路径的有效性,表 1 列出了用于数值模拟的 AUV 参数。本实验采用 Matlab 软件仿真轨迹规划及路径。

(1)轨迹生成器:为仿真而实现的轨迹生成器相对简单,使用位置误差来确定何时更新所需的速度和加速度。位置误差在 100%和 80%之间,也就是说,当车辆尚未行驶其期望距离的 20%时,加速度设置为恒定值。当位置误差达到 80%时,在设置了恒定的期望速度的情况下,期望加速度变为零。当位置误差达到 20%时,也就是说,当车辆行驶了总距离的 80%时,将设置恒定的期望减速度。

置超调程度和不同速度的过冲度,图 9 和图 10 显示了各电机的推力输出。

由于速度必须保持在可达到的值之内,因此从图 4 和图 5 中可以明显看出,存在轻微的过冲。图 6 显示位置几乎没有过冲。

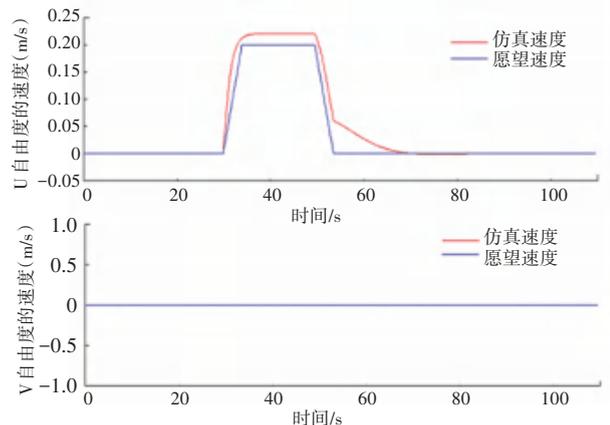


图 4 U 或者 x 轴自由度的速度和 V 或者 y 轴自由度的速度
Fig. 4 Velocity simulation results for all U and V degrees of freedom

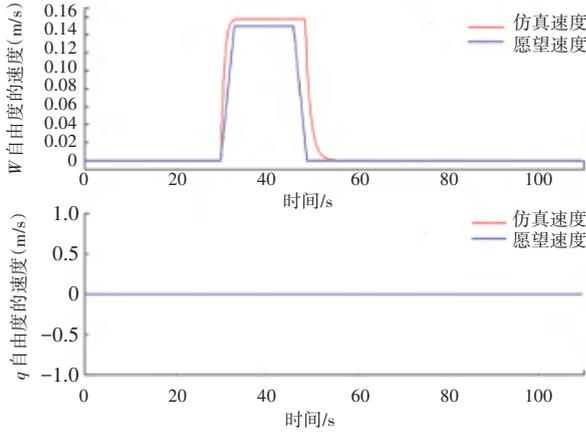


图 5 q 或者 y 轴旋转自由度的速度和 W 或者 z 轴自由度的速度
Fig. 5 Velocity simulation results for q and W degrees of freedom

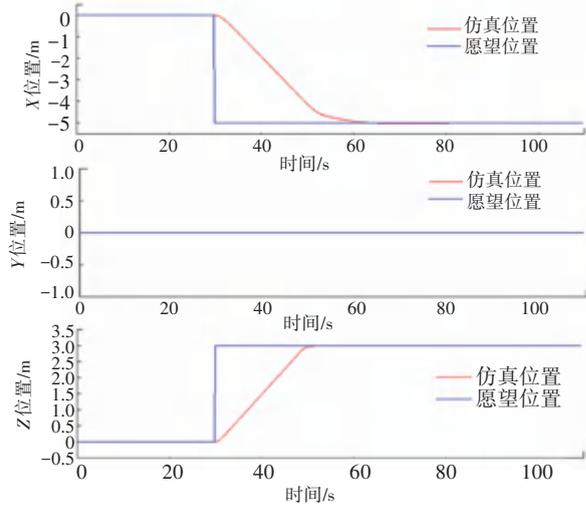


图 6 所有自由度的位置仿真结果

Fig. 6 Position simulation results for all degrees of freedom

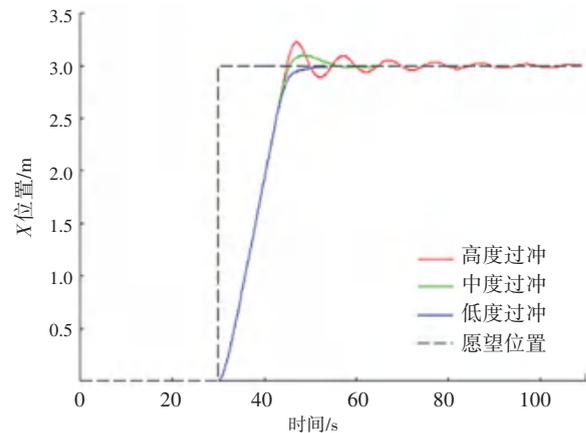


图 7 不同的位置超调程度

Fig. 7 Different degrees of overshoot for position

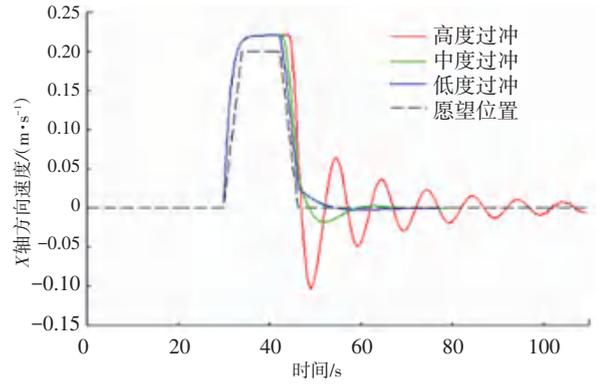


图 8 不同速度的过冲度

Fig. 8 Different degrees of overshoot for velocity

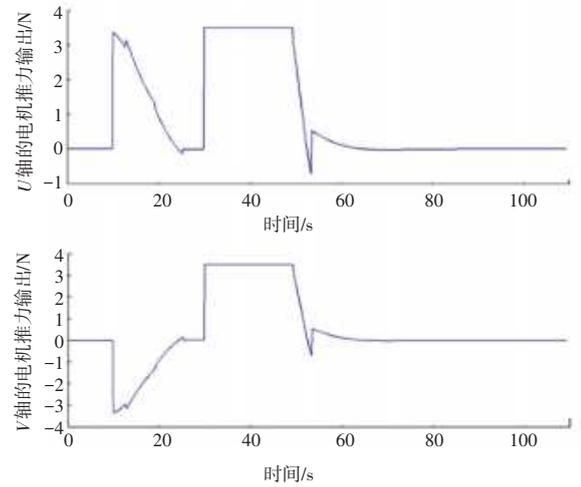


图 9 U 或者 X 轴自由度的推力和 V 或者 Y 轴自由度的推力仿真结果

Fig. 9 Simulation results for X and Y axis thrust output

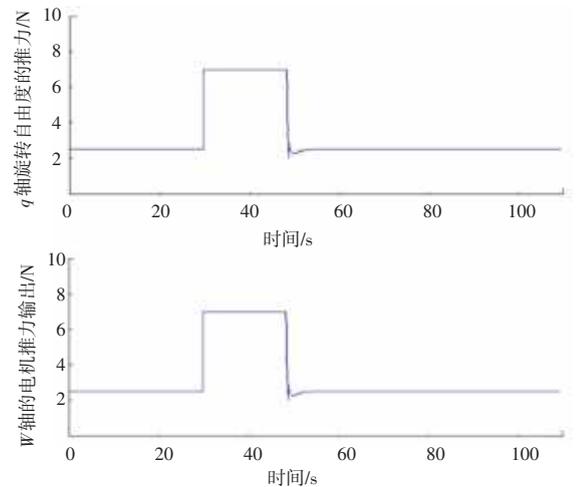


图 10 q 或者 y 轴旋转自由度的推力和 W 或者 z 轴自由度的推力仿真结果

Fig. 10 Simulation results X and z axis thrust output

图 7 显示了在跟踪控制器中使用不同的 PID 系数引起的过冲。可以看出,蓝线相对于位置表现出最理想的轨迹。因此,不需要显著地反转其运动方向即可达到所需位置。红线显示了高度过冲的不良

轨迹,这也会导致速度波动,如图 8 所示。因此,必须选择适当的 PID 系数,以使过冲和车辆达到其所需位置时间的最小化。

推力输出:左舷和右舷马达的推力输出被认为是相同的,除了右舷马达的推力输出在 AUV 自身与所需航向对齐时为负。由于需要产生一个力矩来使 AUV 绕 z 轴旋转,因此需要将一个电动机设置为反向,将另一个电动机设置为正向模式。对于船首和船尾的发动机推力输出相同,表示车辆的对称性。值得注意的是,开始和结束推力输出为 2.5 N。这表明有效的浮力或等效的保持车辆浸入水中所需的总推力为 5 N,而不是为 AUV 确定的 15.1 N。因为,在仿真中有效浮力降低了,从而为车辆提供了更快的升沉响应时间。实际上,将压载物添加到 AUV 中,以尽可能降低残余浮力。推力输出图中出现的尖峰表示电机方向在短时间内反转。例如,当水平电动

机控制喘振,在接近 5 m 的所需位置时,这些电动机会迅速设置为反向模式,然后再次设置为正向模式,并且推力会随时间减小至零。这一系列事件有助于使车辆减速并将其稳定在所需位置。

3.2 控制器实施

仿真实验提供了对控制器性能的深入了解,并为 AUV 的未来实现提供了有价值的参考经验。图 8 中演示了在适当的传感器套件下控制器将工作情况。仿真中使用的框图传感器套件负责将当前位置和速度值分别反馈到轨迹生成器和跟踪控制器,然后使用轨迹生成器为跟踪控制器计算所需的速度和加速度,之后跟踪控制器将推力值输出到电动机。系统的总输入是车辆的期望位置。对于传感器套件,需要速度反馈传感器来进行浪涌、起伏和偏航。对于车辆的 x, z 以及偏航位置都需要位置反馈传感器,而 x 轴位置不易由传感器确定。

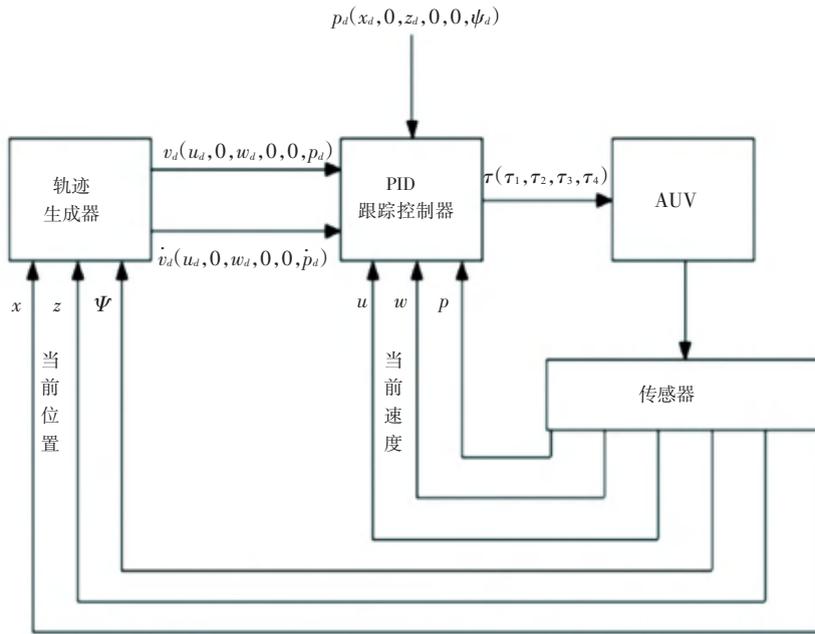


图 11 本文 AUV 控制系统框图

Fig. 11 Our AUV control system block diagram

尽管理论上可以在墙壁上使用位置感应传感器,但是在水下环境中,墙壁通常相距很远,很难沿 x 轴跟踪位置。另一方面,确定车辆的喘振是使用沿 x 轴定位的速度计。可以根据时间对速度读数进行积分,以找到位置,该位置实质上是车辆纵向位置的状态估计。与 x 轴不同,可以使用压力传感器来跟踪垂直位移。与喘振一样,为了获得当前的升沉速度,可以使用沿车辆 z 轴定位的测速仪。偏航角和偏航速度的确定可以使用磁罗经来完成。尽管可以通过相对于时间区分偏航角来间接确定偏航速

度,但更希望具有直接形式的传感器反馈以用于该读数。正确放置在车辆上的陀螺仪可用于提供横摆速度。

4 结束语

本文设计完成了一个简单的梯形轨迹生成器,该生成器可以将速度,加速度更新传输到控制器和最后三维轨迹规划。使用在 Gazebo-ROS 模拟器中获得的 Rexrov 动力学模型参数,在 MATLAB 软件中对跟踪控制器进行了仿真。该仿真基本达到预期效果,即 PID 跟踪控制器最终在本文的 AUV 上实现了

执行水下轨迹计划的能力。

参考文献

[1] 李一平, 李硕, 张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 217-222.

[2] 任伟, 江明, 孙龙龙, 等. SCARA 机器人运动学及轨迹规划研究[J]. 新乡学院学报, 2019(3).

[3] 朱胜庭, 朱大奇, 邓志刚. Identification of Underwater Vehicle

Dynamic Model Using Multi - Innovation Least Squares Algorithm%多新息最小二乘法辨识水下机器人动力学模型[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6): 1399-1404.

[4] LI H J, HE B, YIN Q Q, et al. Fuzzy Optimized MFAC Based on ADRC in AUV Heading Control[J]. Electronics, 8(6), 32.

[5] 王雷, 杨庆喜, 程勇, 等. 基于 STM32 的水下机器人设计[J]. 自动化与仪表, 2018.

(上接第 205 页)

表 3 N=14 最小节拍下各工位组合表

Tab. 3 N=14 minimum beats for each station combination table

工位序号	作业单元序号	工位作业时间合计/s
1	1,2,3,4,5	375.8
2	7,8	347.7
3	6,9,10,11,12,14	539.8
4	13,17,21	521.8
5	15,20,22	552.1
6	19,23,24,25,26	539.9
7	16,18,27,32	553.3
8	28,29,30,37	536.0
9	33,35,40	533.7
10	31,34,36,41	555.2
11	38,42,43	542.8
12	39,44,47	516.1
13	46	433.2
14	45,48,49	486.2

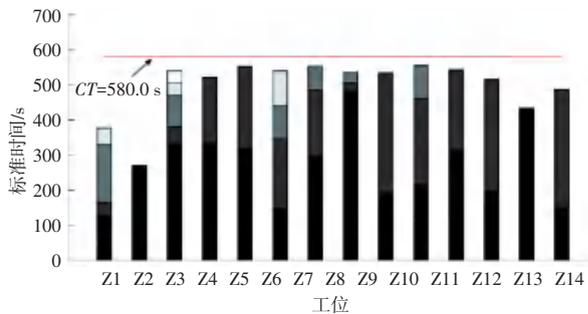


图 4 0-1 规划改善后的各工位作业时间山积图

Fig. 4 0-1 programming of improved working time after planning improvement

将优化后各工位的作业时间代入公式(1)和公式(3)可得

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{P \cdot N} \times 100\% = \frac{7\ 033.6}{14 \times 555.2} = 90.49\%$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C - T_i)^2}{N}} = 84.09$$

根据装配线平衡率的评价标准,当平衡率为 90.49%时处于良好状态。此时平滑性指数 SI 也降为 84.09,处于比较平稳的水平,说明了改善效果良好。改善前后关键评价指标对比,见表 4。

表 4 改善前后关键评价指标对比

Tab. 4 Comparison of key evaluation indicators before and after improvement

评价指标	改善前	0-1 规划改善后
节拍 CT/s	895.9	555.2
装配线平衡率 LB	63.20%	90.49%
平滑性指数 SI	355.97	84.09
工位数 N	14	14
作业人员数	15	14
工序数	49	49
日生产能力	62	97

5 结束语

发动机装配线面临的主要问题就是平衡率低和产能不足,从改善结果来看,0-1 规划的模型较好地解决了装配线面临的主要问题。即分解瓶颈工位,在约束条件下重新组合优化工序。减少一个作业人员,降低了节拍,平衡了各工位作业人员的劳动负荷,减少了不公平感,提高了产品质量和装配效率。另外 0-1 规划数学模型和 LINGO 程序对于广大的工程技术人员有一定的实用价值,对于装配线企业有重要借鉴意义。

参考文献

[1] 张鸣鹤,周炳海. S 公司车辆装配线生产效率的改善[J]. 机械制造,2016,54(5): 85-88+96.

[2] 彭慧杰,李成松,李玉林,等. 穴播器装配线平衡与优化研究[J]. 机械设计与制造,2019(7): 226-229.

[3] 赵晶,苏东楠. 多目标混合装配线平衡方法优化[J]. 计算机仿真,2019,36(2): 145-148.

[4] 何烽屹,罗亚波. 考虑工人移动和物料取用的双边装配线平衡[J/OL]. 工业工程与管理: 1-11 [2020-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.T.20200511.1409.004.html>.

[5] 李爱平,赵亚西,张家骅,刘雪梅. 考虑装配关系复杂性的多目标装配线平衡优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(7): 1665-1675.

[6] Juan Rada-Vilela, Manuel Chica, Óscar Cordon, Sergio Damas. A comparative study of Multi-Objective Ant Colony Optimization algorithms for the Time and Space Assembly Line Balancing Problem[J]. Applied Soft Computing Journal,2013,13(11).

[7] Alena Otto, Olga Battaia. Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey[J]. Computers & Industrial Engineering,2017,111.

[8] 陆雄文. 管理学大辞典[M]. 上海辞书出版社,2013.

[9] 易树平,郭伏. 基础工业工程(第 2 版)[M]. 机械工业出版社,2014.