

System Design of a Fluid Flow Velocity Simulation Platform

Jianhua Xu, Hu Wang, Zhengshi Liu, Yong Wang*

School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: 710777335@qq.com, *simenkouwang@sina.com

Received: Sep. 5th, 2018; accepted: Sep. 22nd, 2018; published: Sep. 29th, 2018

Abstract

The current is one of the three major elements of ocean hydrology, and the simulation and measurement of current velocity is the basis of studying ocean, which is of great significance to the national ocean strategy. In order to simulate the flow of seawater in experimental environment, a device to imitate the upwelling and horizontal flow of seawater is designed by changing the slope angle of slide guide of velocity detector on the frame; First, the working principle of the platform is introduced, and the finite element analysis of key components is performed. Then, based on the fuzzy PID control method, the servo control system of the platform is determined, and the response to the step signal using fuzzy PID algorithm is compared with those using the traditional PID one through Simulink simulation. Finally, experiments were conducted on a linear motor in horizontal state. Finite element analysis shows that the maximum relative displacement of the main support plate is 0.1196 mm, which satisfies requirements of the linear motor on the main support plate. The motor experiment shows that the linear motor with fuzzy PID controller is capable of sliding at velocity of 10 mm/s with speed fluctuation less than 0.17 mm/s (within 2%), which confirms advantages of the fuzzy PID algorithm and validates the capability of the device to simulate the flow of seawater well.

Keywords

Fluid Velocity Simulation Platform, Finite Element Analysis, Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, Fuzzy PID, Simulink Simulation

一种流体流速模拟平台的系统设计

徐剑华, 王 虎, 刘正士, 王 勇*

合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥
Email: 710777335@qq.com, *simenkouwang@sina.com

*通讯作者。

收稿日期：2018年9月5日；录用日期：2018年9月22日；发布日期：2018年9月29日

摘要

海流是海洋水文的三大要素之一，海流流速的模拟和测量是研究海洋的基础，对国家的海洋战略具有重大意义。为了能够在实验环境下模拟海水的流动，文章设计了一种基于速度分解原理的海水垂直流和水平流的模拟平台。首先，介绍了平台的工作原理，对关键部件进行了强度计算与有限元仿真分析。其次，基于模糊PID控制方法设计了平台的伺服控制系统，并通过Simulink仿真比较了采用传统PID和模糊PID控制器的直线电机模型对于阶跃信号的响应。最后，对水平状态下的直线电机进行实验。有限元分析表明主支撑板的最大相对形变量为0.1196 mm，满足直线电机对主支撑板的形变要求，电机实验则表明，对采用模糊PID控制器的直线电机进行速度为10 mm/s的等速引导时稳态误差为0.17 mm/s，验证了模糊PID的有效性，稳态时电机的速度波动在2%以内，能够满足模拟海水流动的要求。

关键词

流体流速模拟平台，有限元分析，永磁同步直线电机，模糊PID，Simulink仿真

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海流是海洋水文的三大要素之一，是海洋调查和物理学海洋的基础[1]，海流流速测量对海洋渔业[2]，航海[3]，海洋资源探索[4]都具有重要的意义。海流按照空间分布可分为水平流和垂直流[5]，一般海洋表层海水的水平流速为1~300 cm/s，而其垂直流速度为 10^{-3} ~ 10^{-1} cm/s，维间差异较大，如何在实验环境下实现对维间差异较大的速度模拟及实际测量是研究海流的关键问题。合肥工业大学研制了三维海流传感器标定平台[6]，通过三个电机的配合运动，实现了传感器三个方向的移动，其重复定位精度为0.05 mm，但未对三轴联动的情况进行分析；韩国首尔大学基于宏/微结合的原理研制了一种宏微两级定位纳米平台[7]，宏动台是滚珠丝杆螺母传动方式，微动台采用柔性铰链结构，定位精度可达10 nm；南京航空航天大学研究的三坐标移动平台[8]，位移测量范围可达0~40 mm，位移分辨率为0.001 mm；哈尔滨工业大学研发了一套基于宏微驱动的纳米定位系统[9]，宏动台是气动悬浮平台，微动台采用压电陶瓷驱动，重复定位精度达到174.73 nm。

上述实验装置均采用多个电机相互配合运动，存在多轴间的耦合问题，且在运动过程中速度波动较大。为模拟维间差异较大的水平流和垂直流，本文设计了一种基于速度分解原理的流速模拟平台，该平台通过改变流速探测器[10]运动导轨的倾角实现对水平流和垂直流的模拟。

流体流速模拟平台最终测量精度主要取决于运动单元的速度平稳性，为避免流速探测器在运动过程中出现速度波动过大、上升时间太长等问题，需要在伺服控制系统中加入速度控制环节。工业中常用的速度控制器有PID，模糊PID[11]，滑模PID[12]等，模糊PID是建立在模糊控制概念的基础之上，可以根据被控对象的时滞、非线性和时变性具有一定适应能力的特点来弥补传统PID的不足。因此本文以模糊PID控制器作为模拟平台控制系统的速度环，改善了系统的动态性能和稳态性能，实现了对海流的模拟。

2. 结构方案

2.1. 结构原理

流速模拟平台结构如图 1 所示, 通过改变平台运动导轨的角度可以使探测器获得沿斜面方向的运动速度, 当运动导轨的倾角较小时, 探测器沿斜面的速度可分解为数值相差较大的水平速度和垂直速度, 以此来模拟水平流和垂直流。改变高度调整模组的高度差, 主支撑板会绕着中间固定支撑点的轴线旋转一个角度, 永磁同步直线电机固定在主支撑板上。为了使流速探测器在运动过程中始终保持竖直状态, 在直线电机的动子与流速探测器连接处安装一个分度盘。当固定在主支撑板上的直线电机旋转一个角度时分度盘沿着相反的方向旋转一个相同的角度, 流速探测器便可始终保持在竖直状态。将整个装置置于水环境中, 调节水位使水位超过探测器运动轨迹的最高点, 低于直线电机的底部。分度盘与流速探测器通过一个不可压缩的连杆连接, 理想条件下可认为直线电机的动子与流速探测器的运动相同。

直线电机动子的运动是沿特定角度所成斜面的直线运动, 其速度可分解为水平速度和垂直速度。由牛顿第三定律可知, 流速探测器对水流的力和水流对探测器的力互为作用力与反作用力。流速探测器自身可以测量流体的水平流速和垂直流速, 在理想条件下, 认为水流是静止状态, 流速探测器是运动的。将工字钢倾斜角度调节到一个合适的值, 流体流速探测器便可获得一个和海流水平流与垂直流流速比相同的速度, 这样便可模拟海流的运动。

2.2. 主支撑板的静力学分析

直线电机的稳定运行需要支撑平面具有一定的平面度, 故对底部主支撑板的最大形变提出了要求。本课题采用 HIWIN 的 LMSA21 型直线电机, 其基座的安装平面度要求为 0.01/300 mm, 总长为 4370 mm, 宽为 408 mm, 高为 231 mm。为加工方便本项目选择主支撑板支撑面尺寸为 5000 × 500 mm, 参考工字钢的结构设计中主支撑板的结构, 横截面如图 2 所示。上支撑板 1, 下支撑板 4 与中间支撑板 2,3 通过焊接连接在一起, 上表面和下表面磨削加工, 采用焊后加工, 保证主支撑板的平面度。图 2 中, $l_1 = 150$ mm, $l_2 = l_3 = 20$ mm, $l_4 = 260$ mm, $l_5 = 300$ mm。

由平行轴定理可计算出主支撑板的惯性矩 I 为:

$$I = I_1 + \left(\frac{l_3 + l_4}{2}\right)^2 \times A_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \left(\frac{l_3 + l_4}{2}\right)^2 \times A_4 = 2.26 \times 10^8 \text{ mm}^4 \quad (1)$$

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 分别为板 1、板 2、板 4 及板 4 的惯性矩; A_1 、 A_4 为板 1、板 4 的面积。

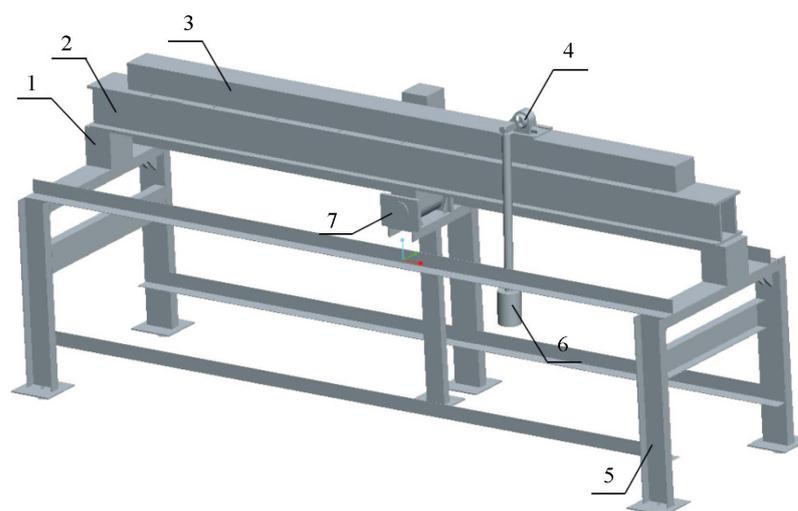
主支撑板的受力表现为梁的受压变形, 直线电机与主支撑板是由八组螺钉连接的, 可近似认为直线电机的重力均匀分布在主支撑板上表面上, 流速探测器随直线电机的动子一起运动, 可以看作一个移动的向下的力; 由材料力学知当动子带动探测器运动到两支撑点中点时支撑板形变最大。

由叠加原理[13]知最大形变量 w 为

$$w = \frac{5ql^4}{384EI} + \frac{Fl^3}{48EI} \quad (2)$$

其中: l 为两支撑点之间的距离; q 为支撑板所受均布载荷; F 为支撑板上所受的力; E 为主支撑板的弹性模量; I 为主支撑板的惯性矩。

设支撑点总数为 n , 采用均匀分布的形式, 直线电机重 315 kg, 动子和探测器共重 50 kg。由于主支撑板的转动需要一个中间支撑点, 故 n 取奇数, 材料为 45 钢。当 $n = 3$ 时最大形变量为 0.01 mm, 当 $n = 5$ 时最大形变量为 0.84×10^{-3} mm。



1.高度调整模组 2.主支撑板 3.直线电机 4.分度盘 5.支架 6.流速探测器 7.固定支撑点

Figure 1. Overall structure scheme

图 1. 整体结构方案

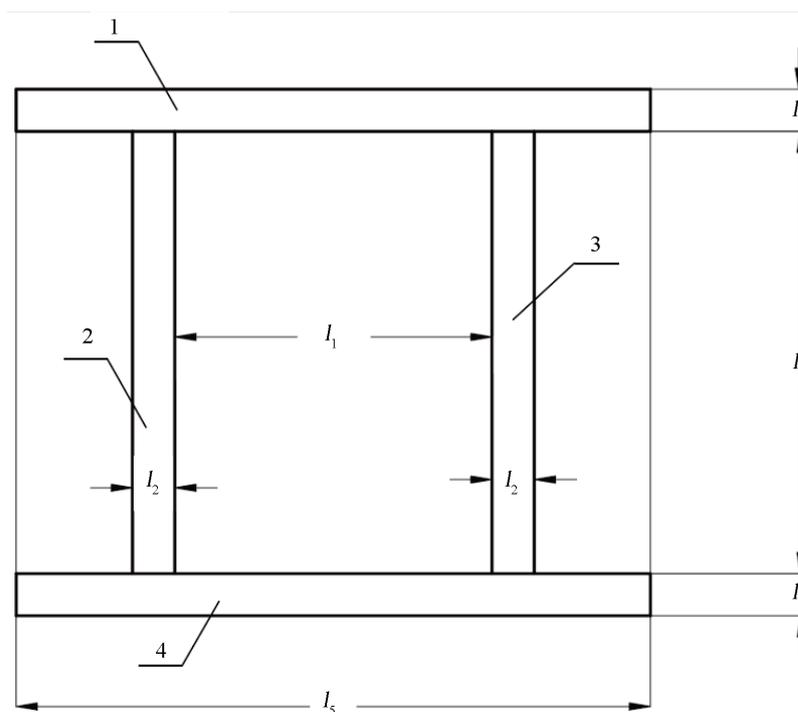
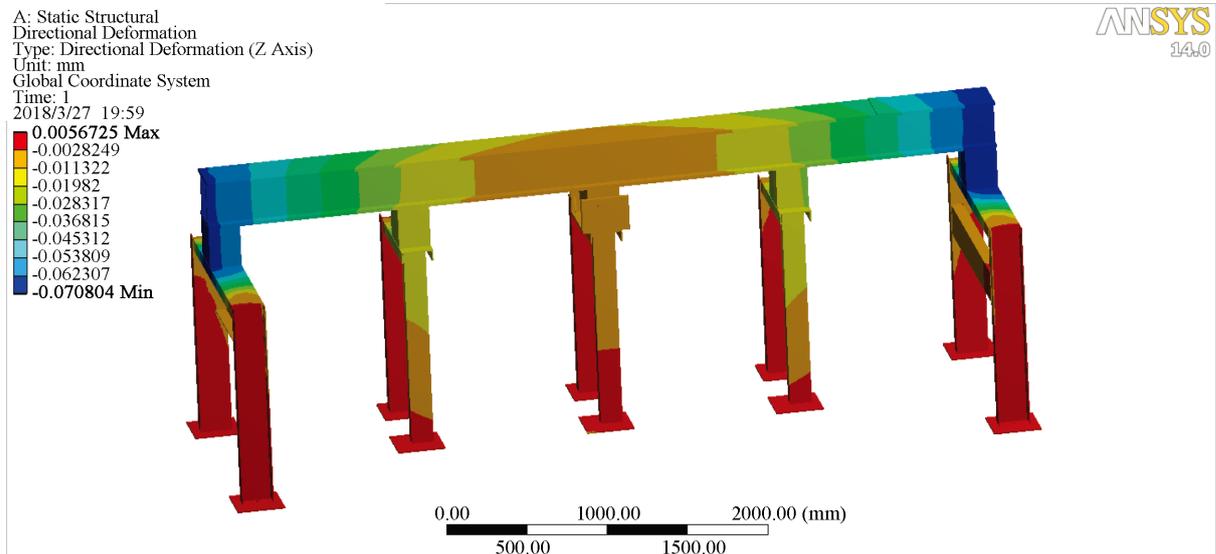


Figure 2. Cross section of main support plate

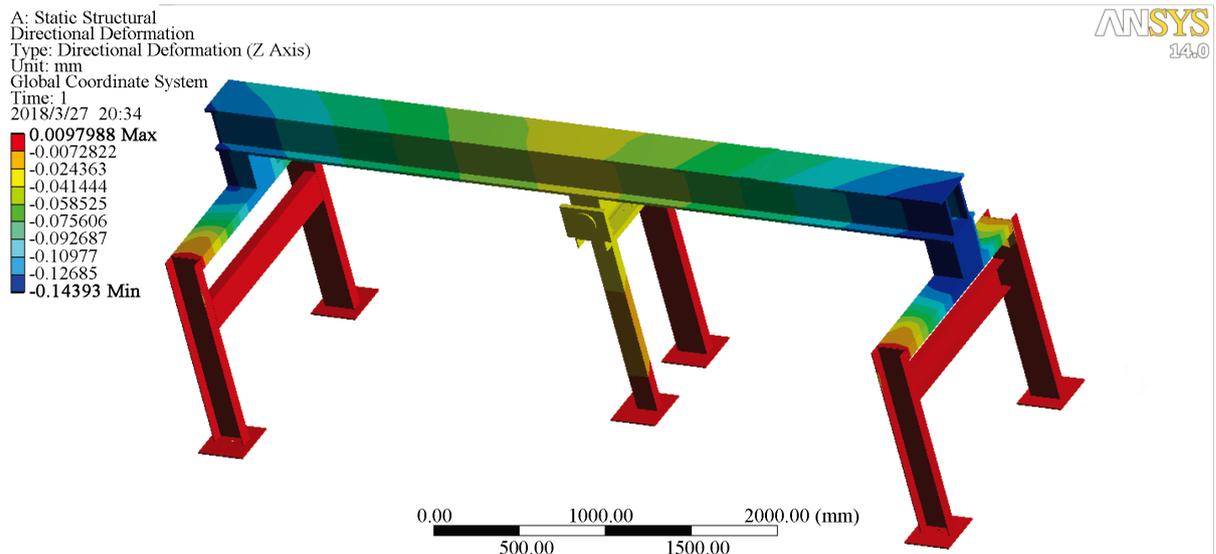
图 2. 主支撑板横截面

2.3. 支架整体有限元分析

为了验证主支撑板的最大形变满足项目要求，在重力场下对不同支撑点数的支架整体进行有限元分析；主支撑板和底部支架的材料选用 45 钢，屈服极限为 355 MPa，抗拉强度为 600 MPa，杨氏模量为 209 GPa，泊松比为 0.3，定义单元类型为 solid185。分别采用三点支撑和五点支撑对支架整体进行静力学分析，此时主支撑板的倾斜角度为 0° ，受力情况如 2.2 节所述。结果如图 3 所示。



(a) 五点支撑



(b) 三点支撑

Figure 3. Strain cloud of bracket along gravity direction**图 3.** 支架沿重力方向的应变云图

由图 3 可以看出三点支撑时主支撑板沿重力方向的最大相对形变量为 0.1196 mm，五点支撑时主支撑板沿重力方向的最大相对形变量为 0.0649 mm，差异为 45.7%，分析结果表明三点支撑的支撑板相对变形量满足直线电机对支撑面的形变要求，本项目采用三点支撑。

3. 平台控制系统设计

流体流速模拟平台主要由直线电机的动子带动流速探测器进行运动，设计平台的控制系统如图 4 所示。由上位机发出速度指令经由速度控制器进行计算后发送到 DSP 运动控制卡中，运动控制卡可根据接受到的指令转换成脉冲信号发送到直线电机伺服驱动器中。伺服驱动器根据接受到的不同频率的脉冲信号控制伺服电机产生相应速度的运动。动子带动流速探测器运动，信号采集系统对流速探测器的输出信

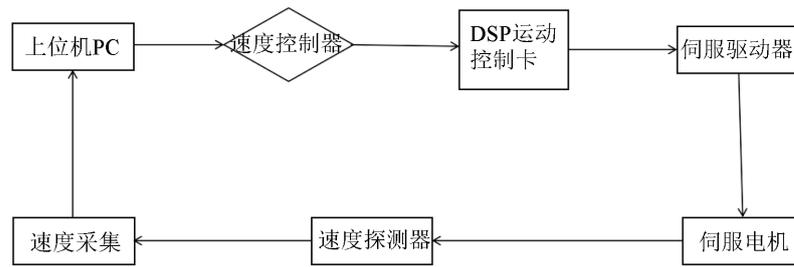


Figure 4. Control system flow chart
图 4. 控制系统流程图

号进行采集。上位机根据采集到的速度和预设的速度进行计算得到误差。速度控制器根据误差和预设速度计算得出调节后的速度，再次发送到 DSP 运动控制卡中，循环往复直至误差减小到允许范围之内。

流速探测器测量速度的精确度取决于直线电机运行的平稳性，为了能使直线电机运行速度更加平稳，且不依赖于被控对象模型的精确性，本文采用模糊 PID 作为直线电机速度环的控制器。模糊 PID 控制器是将模糊控制规则存入计算机中作为知识库，误差 e 及其变化率 ec 作为输入， Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 作为输出。模糊控制器根据 e 和 ec 的变化利用模糊规则选择对应的策略计算得出 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d ，并根据式(3)计算控制系统 K_p ， K_i 和 K_d ，最后利用 PID 控制器控制被控对象。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + G_p \times \Delta k_p \\ K_i = K_{i0} + G_i \times \Delta k_i \\ K_d = K_{d0} + G_d \times \Delta k_d \end{cases} \quad (3)$$

其中： K_{p0} ， K_{i0} ， K_{d0} 为常规 PID 调节之后的参数，作为初始预设值； G_p ， G_i ， G_d 为 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 的比例因子； K_p ， K_i ， K_d 为最终作用于控制系统的参数； Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 为模糊控制器根据 e 和 ec 模糊推理获得的 PID 参数调节量。

在模糊控制算法中，从控制规则的灵活性和细致性综合考虑，将输入/输出量用七个语言变量值来描述 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}，即 {负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}。在模糊运算中，语言变量要根据相应的隶属关系以模糊集的形式表示出来。本文各个模糊语言变量的隶属函数采用均匀分布的三角分布型隶属函数，相邻模糊语言变量值之间存在交集，可保证输出的平滑性。通过模糊推理得到的输出量 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 仍然是一个模糊集合，而控制系统的 PID 控制器所需要的三个增益系数 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 为确定的值，需要对 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d 进行解模糊，本文解模糊采用的是工程中最常用的加权平均法[14]。

4. 直线电机的仿真与实验

4.1. 基于模糊 PID 的电机 MATLAB/Simulink 仿真

为了验证模糊 PID 对系统的控制效果，在 MATLAB /Simulink 环境下对直线电机进行建模仿真。本课题采用单轴直线电机，电机模型可简化为一个单轴模型，电机模型主要包括 3 个部分：

dq 轴模型。因为电机的励磁磁场和转矩磁场存在耦合[15]，为了实现线性解耦工业中常采用矢量控制，令 d 轴电流为 0，得到：

$$u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + K_e v \quad (4)$$

推力模型。直线电机的推力和电流成正比，得到：

$$F_m = K_f i_q \tag{5}$$

系统的机械运动模型。方程为：

$$m \frac{d^2x}{dt} + B \frac{dx}{dt} = F_m - F_f \tag{6}$$

其中： u_q 、 i_q 分别为 q 轴的电压和电流； R 、 L 分别为电机的电阻和电感； K_e 为电机的反电动势常数； v 为电机动子的速度； F_m 、 F_f 分别为电机的推力和系统的扰动阻力； K_f 为电机的推力常数； x 为电机动子的位移； B 为摩擦系数。

永磁同步直线电机的参数见表 1 所列，其中负载质量和摩擦系数可用正交实验法测量出来，电流环增益采用 PI 控制器，建立对应的直线电机仿真模型[16]如图 5(a)所示。

首先采用传统 PID 用等幅震荡法[17]调试出 K_p0 、 K_i0 、 K_d0 三个值，并将这三个值作为模糊 PID 的初始值，之后根据文献[18]建立 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊规则，建立基于模糊 PID 的直线电机模型如图 5(b)所示。为了便于观察，将传统 PID 和模糊 PID 两个仿真程序合并，通过同一个示波器显示出来。用单位阶跃信号作为输入信号。得到两者的结果如图 6 所示。

由结果可以得出两者的上升时间(t_r)和超调量($\sigma\%$)，调节时间(t_s)和稳态误差(ess)见表 2 所列， t_s 取达到稳态值的 3%以内。由表 2 可知模糊 PID 的上升时间比普通 PID 要小 57.9%，超调量也要小 29.4%。仿真结果说明对于直线电机的速度环，采用模糊 PID 控制器，系统的上升时间更小，超调也更小，系统鲁棒性更好。

Table 1. Linear motor parameters
表 1. 直线电机参数

推力常数/(N·A ⁻¹)	反电动势常数/(V·s ⁻¹)	电感/mH	电阻/ Ω	质量/kg	摩擦系数	电流环增益
92.5	53.4	64	13.8	50	1.2	0.02

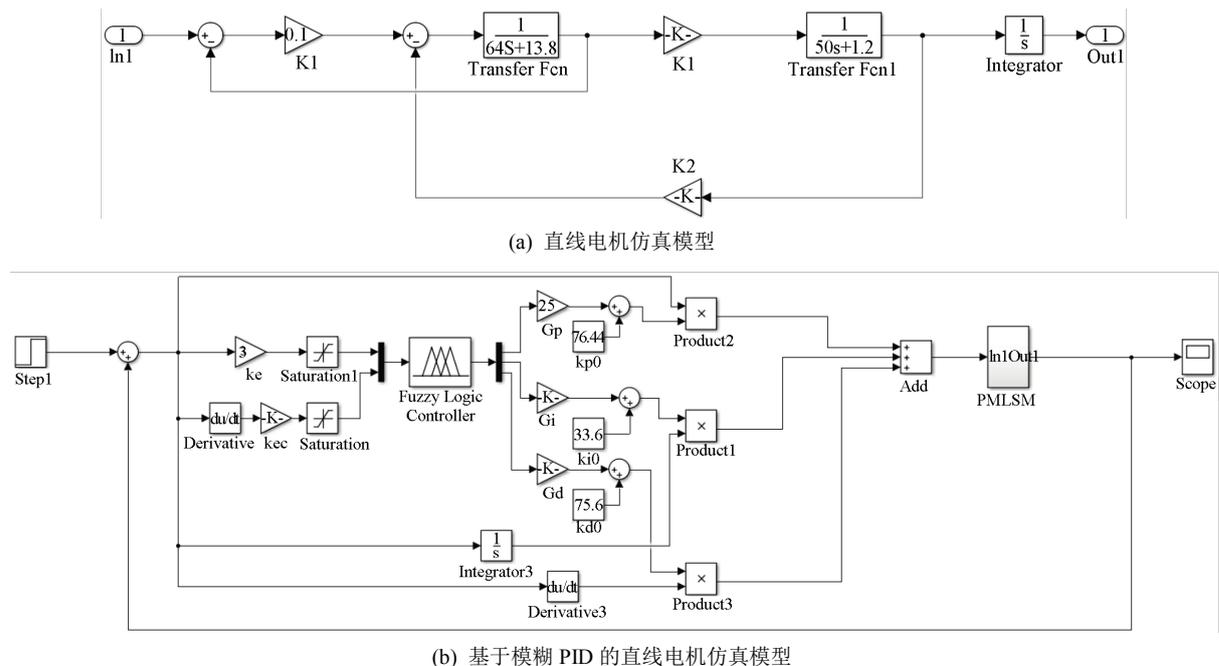


Figure 5. Fuzzy-PID linear motor simulation model
图 5. 采用模糊 PID 直线电机仿真模型

Table 2. The response of the model to the step signal in PID and fuzzy PID control
表 2. PID 和模糊 PID 控制时模型对阶跃信号的响应

控制方法	t_r/ms	$\sigma\%$	t_s/ms	e_{ss}
传统 PID	32.23	1.495	43.25	0.001
模糊 PID	13.56	1.056	25.36	0.001



Figure 6. Experiment Diagram of linear motor
图 6. 直线电机实验图

4.2. 直线电机的等速实验

为了进一步验证模糊 PID 的效果, 本文分别采用传统 PID 和模糊 PID 作为直线电机速度闭环控制算法进行实验, 将直线电机水平放置如图 6。控制器采用凌华科技基于 DSP 的 4/8 轴高阶运动控制卡, 实验设定速度 10 mm/s, 采样时间为 10 ms, 直线电机动子速度曲线如图 7(a)所示。在流体流速模拟实验中, 探测器与直线电机动子采用刚性连接, 故可认为探测器速度与直线电机动子速度相同, 图 7(b)为采用模糊 PID 控制器, 速度为 10 mm/s 稳态时直线电机动子的速度响应曲线。

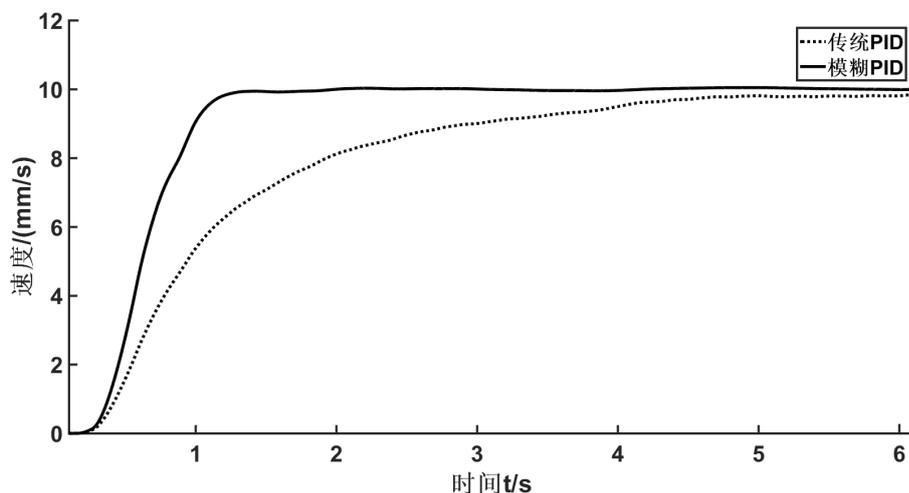
由图 7 可知当设定的速度为 10 mm/s 时两者的速度响应曲线上升时间(t_r), 超调量($\sigma\%$), 调节时间(t_s)和稳态误差(e_{ss})见表 3 所列。由表 3 可以看出采用模糊 PID 作为直线电机的速度控制器得到的速度曲线调节时间更短, 稳态误差更小, 稳态时速度波动在 2%以内。实验证明采用模糊 PID 控制器直线电机速度的稳态特性更好, 鲁棒性更好。

5. 结论

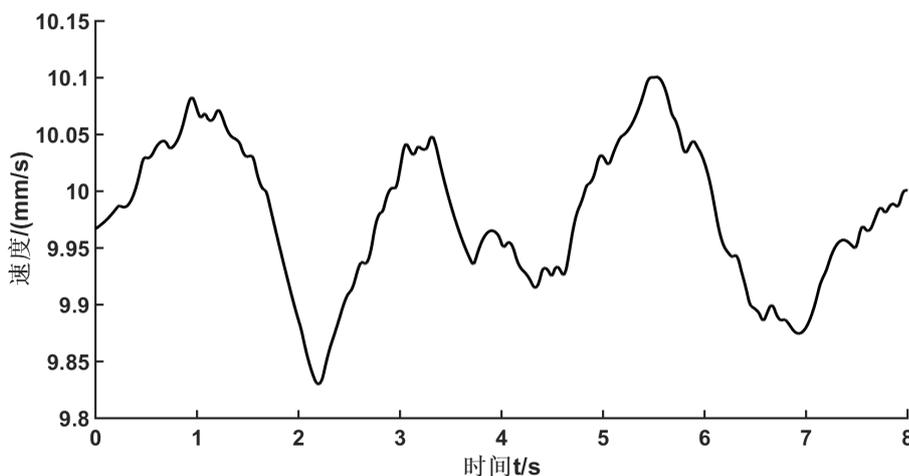
本文介绍了流体流速模拟平台的结构及工作原理, 并对其中的主支撑板进行了受力分析, 分析结果表明主支撑板的最大相对形变量为 0.1196 mm, 满足直线电机对主支撑板的精度要求; 设计了平台的速度控制系统并用 MATLAB/Simulink 对直线电机进行建模仿真, 比较了直线电机速度环采用常规 PID 控制器和模糊 PID 控制器对于阶跃信号的响应情况, 进一步用实验进行验证。仿真和实验结果表明采用模糊 PID 控制器, 可以有效提高系统的稳态特性, 直线电机稳态时速度波动在 2%以内。分解后的水平速度和垂直速度的稳态速度波动和电机动子速度波动一致, 能够很好地模拟海水的流动。

致 谢

感谢王老师在项目中对我的指导, 感谢师兄师弟在项目中对我的帮助。在这个项目中, 我学到了很多关于机械结构和电机控制的相关知识。若没有你们, 这个项目不可能完成, 在此再次感谢在项目中给予我帮助的老师 and 同学!



(a) 模糊 PID 和传统 PID 控制时电机的速度



(b) 模糊 PID 控制时电机的稳态速度

Figure 7. Fuzzy PID and traditional PID control of motor speed**图 7.** 分别采用模糊 PID 和传统 PID 控制电机的速度**Table 3.** Speed response of motor with PID and fuzzy PID control**表 3.** PID 和模糊 PID 控制时电机速度响应

控制方法	t_r/s	$\sigma\%$	t_s/s	$e_{ss}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
模糊 PID	1.63	无	2.12	0.17
传统 PID	2.61	无	4.51	0.23

基金项目

国家自然科学基金资助项目:可测上升流的三维瞬时海流传感器的研究(No.41076061)。

深海环境下传感器压力平衡及压力探测的研究(No.51279044)。

参考文献

- [1] Wang, S., Li, Z., Han, X., *et al.* (2018) Lipid Accumulation and CO₂ Utilization of Two Marine Oil-Rich Microalgal Strains in Response to CO₂, Aeration. *Acta Oceanologica Sinica*, **37**, 119-126.

<https://doi.org/10.1007/s13131-018-1171-y>

- [2] Ding, Q., Chen, X., Chen, Y., *et al.* (2017) Estimation of Catch Losses Resulting from Overexploitation in the Global Marine Fisheries. *Acta Oceanologica Sinica*, **36**, 37-44. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1096-x>
- [3] Han, Y., Wang, B., Deng, Z., *et al.* (2018) Point Mass Filter Based Matching Algorithm in Gravity Aided Underwater Navigation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, **29**, 152-159.
- [4] Tianyun, S.U., Liu, B., Zhai, S., *et al.* (2007) Marine Engineering Geological Exploration Information System (MEGEIS): A GIS-Based Application to Marine Resources Exploitation. *Journal of Ocean University of China*, **6**, 226-230.
- [5] 杨鲲. 海洋调查技术及应用[M]. 武汉大学出版社, 2009.
- [6] 姜礼杰. 可测上升流的三维海流传感器标定平台的研制[D]. 合肥工业大学, 2013.
- [7] Pahk, H.J., Dong, S.L. and Park, J.H. (2001) Ultra Precision Positioning System for Servo Motor-Piezo Actuator Using the Dual Servo Loop and Digital Filter Implementation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **41**, 51-63. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00061-4)
- [8] 吉爱红, 汪炜, 黄国平. 容栅传感器在三坐标精密移动平台上的应用[J]. 传感器与微系统, 2005, 24(4): 76-78.
- [9] 陈伟男. 基于宏微驱动的纳米定位系统的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] Hu, S.S., Wang, Y., Liu, Z.S., *et al.* (2016) Exploration of Measurement Principle of a Three-Dimensional Current Sensor for Measuring the Upwelling. *Ocean Engineering*, **127**, 48-57.
- [11] 孙航, 韩红霞, 曹立华, 等. 大型光电经纬仪速度环 PID 参数模糊自整定研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2388-2394.
- [12] 司玉洁. 基于终端滑模的航天器姿态跟踪及协同控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [13] 顾志荣, 吴永生. 材料力学.1 [M]. 同济大学出版社, 1998.
- [14] 朱飞辉. 基于模糊 PID 控制的永磁同步直线电机伺服控制系统研究与实现[D]. 南华大学, 2014.
- [15] 卢少武. 永磁同步直线伺服系统的参数自整定与抗扰动策略研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 电子工业出版社, 2011.
- [17] 刘玲玲. PID 参数整定技术的研究及应用[D]. 郑州大学, 2010.
- [18] 于世杰. 基于定量反馈的直线电机高精度控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-6980, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: iae@hanspub.org