

9-1-2020

Decoupling Control Research of Neutral Buoyancy Plant Based on CMAC

Peilong Li

School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Wang Lei

School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Gaofeng Li

School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Decoupling Control Research of Neutral Buoyancy Plant Based on CMAC

Abstract

Abstract: To solve the control problem of neutral buoyancy plant, a dynamic decoupling and multidimensional compound control algorithm was proposed. By the plant force situation analysis, its *six degree motion control model* was developed. Then a *dynamic decoupling neural network* was designed with the merit of adaptation of the dynamic changing coupling situation. *CMAC* (Cerebellar Model Articulation Controller) and *PID compound control* was adopted in single channel control, whose advantage is that it combines the rapidity of CMAC feedforward control and anti-interference of PID feedback control. MATLAB simulation results show that the algorithm can control the plant's position and posture effectively. The algorithm has short adjusting time and high stability precision, which outperforms PID control.

Keywords

neutral buoyancy, CMAC, PID, NNsdecoupling

Recommended Citation

Li Peilong, Wang Lei, Li Gaofeng. Decoupling Control Research of Neutral Buoyancy Plant Based on CMAC[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1003-1009.

基于 CMAC 的中性浮力实验体解耦控制研究

李佩龙, 王磊, 李高丰

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对中性浮力实验体控制问题, 提出一种动态解耦多通道复合控制算法。通过实验体受力分析, 建立了其六自由度运动模型。设计了一种动态解耦神经网络, 其优点在于能适应动态变化的耦合程度。采用 CMAC(Cerebellar Model Articulation Controller)和 PID 复合控制进行单通道控制, 其优点在于结合了 CMAC 前馈控制的快速响应性能和 PID 反馈控制的强抗干扰性。经 MATLAB 仿真验证, 提出的算法能有效控制实验体位置和姿态。调整时间短且稳态精度高, 效果优于 PID 控制。

关键词: 中性浮力; CMAC; PID; 神经网络解耦

中图分类号: TP273.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2015) 05-1003-07

Decoupling Control Research of Neutral Buoyancy Plant Based on CMAC

Li Peilong, Wang Lei, Li Gaofeng

(School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve the control problem of neutral buoyancy plant, a dynamic decoupling and multidimensional compound control algorithm was proposed. By the plant force situation analysis, its six degree motion control model was developed. Then a dynamic decoupling neural network was designed with the merit of adaptation of the dynamic changing coupling situation. CMAC (Cerebellar Model Articulation Controller) and PID compound control was adopted in single channel control, whose advantage is that it combines the rapidity of CMAC feedforward control and anti-interference of PID feedback control. MATLAB simulation results show that the algorithm can control the plant's position and posture effectively. The algorithm has short adjusting time and high stability precision, which outperforms PID control.

Keywords: neutral buoyancy; CMAC; PID; NNsdecoupling

引言

中性浮力模拟是指将被测试对象完全浸没在水中, 通过精确调整配重, 使对象重力和浮力大小相等, 重心和浮心重合, 从而让对象达到一种随遇平衡的漂浮状态, 以此模拟太空中的失重环境^[1]。

中性浮力下的实验体可以长时间进行六自由度运动, 非常类似于空间运动, 因此可用于模拟空间飞行器的运动状况, 包括机动变轨、轨道保持、姿态调整、空间站对接等。因此先在地面环境中模拟研究中性浮力下实验体控制尤为重要, 采用的控制策略和方法具有一定的借鉴意义^[2]。

与中性浮力环境下运动体类似的水下航行器包括鱼雷、深潜器、潜艇等。文献[3]基于牛顿-欧拉法和拉格朗日公式建立水下航行器矢量形式运动方程, 形式简洁通用, 便于进行理论分析。文献[4]根据单矢量推进式 AUV 的特点, 将 AUV 推力



收稿日期: 2014-04-11 修回日期: 2014-06-30;
基金项目: 国家 863 高科技计划(2012AA0392);
作者简介: 李佩龙(1987-), 男, 湖北荆门人, 博士生, 研究方向为智能控制、复杂系统建模与仿真; 王磊(1961-), 男, 陕西西安人, 教授, 博导, 研究方向为智能控制、导航与制导等。

视为螺旋桨转速及矢量推进器摆角的函数,建立了 AUV 运动学模型和动力学模型,并用四阶五级龙格库塔方法进行了求解。文献[5]采用欧拉角法和四元数法,基于牛顿第二定律和拉格朗日方法先后建立多矢量推进水下航行器的非线性动力学模型,并对比验证了模型的一致性和正确性。水下航行器一般采用 PID 控制,同时也存在其他复杂控制方法。文献[6]建立了飞艇的误差方程,采用 Lyapunov 方法设计自适应非线性控制器,实现了对飞艇的水平移动控制。文献[7]设计了一种模糊神经网络智能控制算法,其中神经网络补偿器以去中心化的方式拟合航行器的动态过程,模糊 PD 控制器的参数由模糊运算来动态调整,控制效果好,抗干扰性能强。文献[8]首先利用卡尔曼滤波估计水流和运动体的状态,设计了一种鲁棒模糊控制算法,重点用于消除不规则水流对航行器的影响,取得了良好效果。对多自由度实验体的控制,通常采用多通道独立设计的策略,例如将其分解为水平面和垂直面的运动。文献[9]根据微分几何控制理论,通过输入输出状态反馈线性化的方法实现航行器在升降和俯仰两个维度上的完全解耦,然后通过两套独立的执行机构分别实现对深度和纵倾角控制。文献[10]在建立鱼雷姿态运动子系统状态方程的基础上,采用滑模变结构控制策略,实现了子系统间的解耦控制,使得鱼雷姿态能稳定跟踪指定输入。

上述控制算法设计过程复杂,计算量大,产生的延迟效应会降低控制精度。同时,水动力参数和推进器间耦合程度的不断变化使得上述算法在自适应性能上不尽理想。此外,当 CMAC 面临高维输入问题时,权系数变得非常庞大,使得网络学习过程极为缓慢和困难。有鉴于此,提出基于动态解耦的多通道 PID 和 CMAC 复合控制算法。首先,解耦神经网络根据姿态的改变而不断调整权值以减小甚至消除耦合,从而简化多维控制为多个单维控制;然后在单维控制上,PID 采用反馈方式来有效抑制干扰,CMAC 采用前馈方式以利于快速计算和实时控制。

1 实验体动力学模型

1.1 坐标系及坐标系变换

如下图 1 所示,规定固定参考坐标系($E-\xi\eta\zeta$)的原点 E 取在测量零点, $E\xi$, $E\eta$ 和 $E\zeta$ 分别指向地理东、地理南和地心。运动坐标系($O-xyz$)固联在实验体上,其原点 O 取为实验体的质心, Ox 轴指向实验体正前方, Oy 轴指向实验体右侧, Oz 轴指向实验体底面。

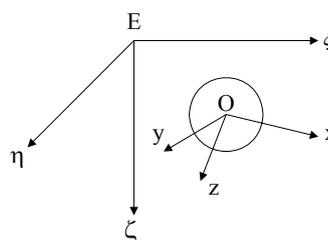


图 1 定坐标系和动坐标系

定系通过三次旋转即与动系重合,由此得到坐标变换公式如下。

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: 旋转矩阵 \mathbf{T} 为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi \\ & -\sin\psi\cos\varphi & +\sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi \\ & +\cos\psi\cos\varphi & -\cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: φ 为横滚角; θ 为俯仰角; ψ 为偏航角。

1.2 重力和重力矩

实验体的重力和重力矩投影到运动坐标系中,可表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}_B = G[-\sin\theta \quad \cos\theta \quad \sin\varphi \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (3)$$

1.3 浮力和浮力矩

实验体受到的浮力作用投影到运动坐标系中,可表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}_B = -B \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \cos \varphi \\ z_b \cos \theta \sin \varphi - y_b \cos \theta \cos \varphi \\ x_b \cos \theta \cos \varphi + z_b \sin \theta \\ -y_b \sin \theta - x_b \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: B 为实验体受到的浮力; $(x_b \ y_b \ z_b)^T$ 为浮心在运动坐标系上的投影。

1.4 水动力和力矩

一般的, 水动力特性及大小与多种因素相关, 包括: 实验体尺度和形状、实验体运动状态、流场物理和几何性质及推进器操纵要素等。考虑到实验体是对称球体, 且移动缓慢, 因此仅考虑占主导因素的流体惯性水动力, 以方便控制律设计。其六自由度的力和力矩表达式如下。

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ K_f \\ M_f \\ N_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{11} \dot{u} - \lambda_{33} wq + \lambda_{22} vr \\ -\lambda_{22} \dot{v} - \lambda_{11} ur + \lambda_{33} wp \\ -\lambda_{33} \dot{w} - \lambda_{22} vp + \lambda_{11} uq \\ -\lambda_{44} \dot{p} \\ -\lambda_{55} \dot{q} \\ -\lambda_{66} \dot{r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $(\lambda_{11} \ \lambda_{22} \ \lambda_{33})$ 是附加质量; $(\lambda_{44} \ \lambda_{55} \ \lambda_{66})$ 是附加转动惯量。

1.5 推进器推力和推力矩

六自由度实验体是对称球体, 装有 3 组共 6 个推进器, 每组推进器沿运动坐标系 3 轴对称布置于实验体表面, 如图 2 所示。

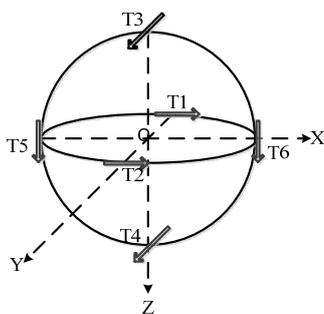


图 2 推进器安装位置及推力方向

推进器在运动坐标系中产生的合力与合力矩为:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 \\ T_3 + T_4 \\ T_5 + T_6 \\ R_3 T_3 + R_4 T_4 \\ R_5 T_5 + R_6 T_6 \\ R_1 T_1 + R_2 T_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: R_i 为第 i 个推进器和与之平行的坐标轴之间的垂直距离。

1.6 运动学方程

固定坐标系和运动坐标系下的速度和角速度变换公式如下。

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varepsilon} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + q \tan \theta \sin \varphi + r \tan \theta \cos \varphi \\ q \cos \varphi - r \sin \varphi \\ q \tan \varphi + r \\ u \cos \psi \cos \theta + v(\cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi) + w(\cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \sin \varphi) \\ u \sin \psi \cos \theta + v(\sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi) + w(\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi) \\ -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \varphi + w \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.7 动力学方程

按质心运动定理和动量矩定理, 及绝对导数和相对导数的关系, 得到动力学方程如下:

$$\begin{cases} m(\dot{u} + qw - rv) = X \\ m(\dot{v} + ru - pw) = Y \\ m(\dot{w} + pv - qu) = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = N \end{cases} \quad (8)$$

2 基于 CMAC 和 PID 的多通道复合控制器设计

Albus 于 1975 根据人类小脑的学习机理提出了小脑模型关节控制器 (Cerebellar Model Articulation Controller), 简称为 CMAC。CMAC 神经网络算法利用联想记忆和查表技术, 在线学习速度快, 非线性逼近能力强, 收敛迅速, 可有效的用于实时动力学控制^[1]。

2.1 整体控制方案

实验体总体控制结构如下图所示, 它是 1 个六回路闭环反馈控制系统。由实验体内惯性单元测得的位置和姿态信息, 与指定值比较后产生误差信号, 经过 6 个独立的 CMAC 和 PID 复合控制器得到控制信号, 再经过神经网络解耦器后驱动 6 个推进器, 从而调整实验体的姿态并移动到指定位置。

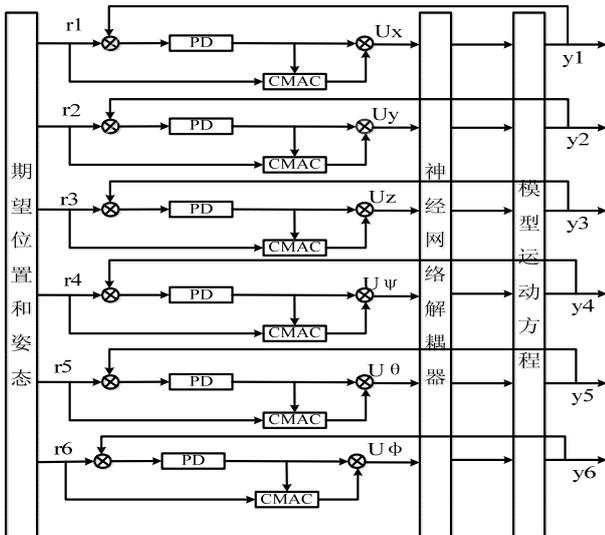


图 3 系统多通道复合控制结构

2.2 单回路 CMAC 和 PID 复合控制算法

如图 4 所示, 单回路控制采用 CMAC 和 PID 复合控制, 总输出为 CMAC 和 PID 的输出叠加。为了有效抑制外部扰动, PID 采用反馈控制方式; 为了取得实时的快速控制性能, CMAC 采用前馈控制方式。在控制的初始阶段, PID 为主要输出, CMAC 则以 PID 为导师信号进行在线学习并逐步

扩大在控制中的比重。经过快速的调整, CMAC 将取代 PID 成为主要控制器。

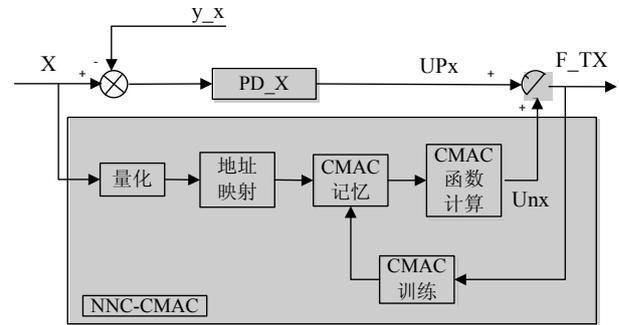


图 4 单回路控制器

CMAC 神经网络的设计主要包括: 输入空间的划分、输入层至输出层非线性映射的实现和输出层权值调整算法 3 个部分^[12]。

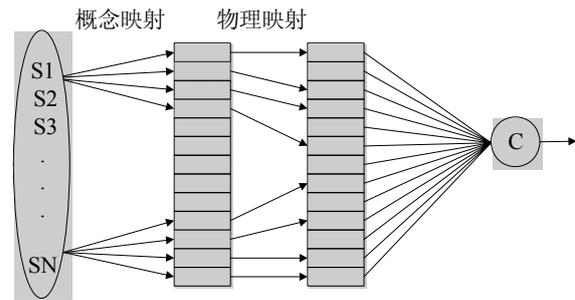


图 5 CMAC 神经网络结构

划分输入空间可以采用线性量化法、三角形量化法、正态分布法等。这里为了简化计算以提高实时控制性能, 采用线性量化方式把输入空间 S 在区间 $[S_{min}, S_{max}]$ 上分成 $N + 2c$ 个量化区间, 如下面公式所示:

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = \dots = v_c = S_{min} \\ v_i = v_{i-1} + \Delta v_i (i = c+1, c+2, \dots, c+N) \\ v_{N+c+1} = \dots = v_{N+2c} = S_{max} \end{cases} \quad (9)$$

其中: N 为量化级数; c 为泛化参数。

CMAC 实际映射方法如下所示:

$$a_i = \begin{cases} 1, S_i \in [v_i, v_{i+c}], i = c+1, c+2, \dots, c+N \\ 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: a 为具有 N 个元素的关联向量, 泛化参数 c 与量化参数 N 对 CMAC 性能影响比较大。

采用梯度下降法调整 CMAC 神经网络权值, 如下式所示:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u_n(k) - u(k))^2 \cdot \frac{a_i}{c}$$

$$\Delta w(k) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{c} a_i \quad (11)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha \cdot (w(k) - w(k-1))$$

其中: $\eta(0 < \eta < 1)$ 为网络的学习速率; $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 为惯性系数; $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ 为权值向量; CMAC 神经网络的输出为:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (12)$$

总的控制输出为 CMAC 神经网络和 PID 的叠加, 即:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (13)$$

3 神经网络解耦器设计

实验体 6 个控制通道间不仅存在耦合, 耦合程度会随着实验体姿态的改变而变化。结合解耦控制的思想 and 神经元的在线学习功能, 设计了一种简单易行的不依赖对象模型的神经网络优化补偿方法。

针对本实验体, 设计了包含 6 输入节点和 6 输出节点的两层线性神经网络解耦器。其中, CMAC 和 PID 复合控制器的输出信号作为神经网络的 6 个输入信号, 神经网络的 6 个输出节点的控制信号作为实验体的控制信号。通过实时权值调整, 使神经元解耦补偿器与实验体组成的广义系统成为无耦合或耦合程度较小的系统, 并满足动态解耦的要求, 其连接结构如图 6 所示。

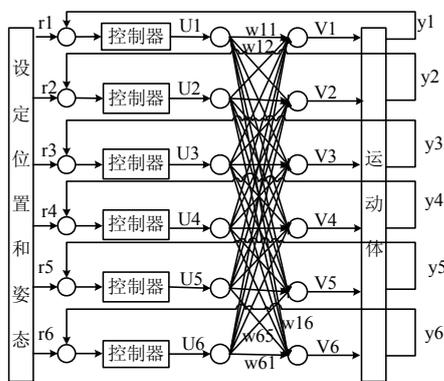


图 6 神经网络解耦器

这种神经网络的解耦原理分析如下。记神经网络解耦器的输入输出关系为:

$$\begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \\ v6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{61} & \cdots & w_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \\ u4 \\ u5 \\ u6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

记实验体的输入输出关系为:

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ y4 \\ y5 \\ y6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{61} & \cdots & g_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \\ v6 \end{bmatrix} \quad (15)$$

则神经网络解耦器和实验体组成的广义系统的输入输出关系为:

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ y4 \\ y5 \\ y6 \end{bmatrix} = \mathbf{GW} \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \\ u4 \\ u5 \\ u6 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{GW} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{61} & \cdots & g_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{61} & \cdots & w_{66} \end{bmatrix}$

这种采用神经网络串联在实验体之前的训练目标是, 把包含神经网络和实验体的广义对象的传递系数矩阵(即 \mathbf{GW})化为对角阵。但考虑到实验体的传递系数矩阵 \mathbf{G} 难以得到, 故以减小系统总误差为目标来调整权值。

每个控制回路的误差为:

$$e_s(k) = r_s(k) - y_s(k), s = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (17)$$

系统总误差定义为:

$$E(k) = \sum_{s=1}^6 e_s(k) \quad (18)$$

以减小系统总误差为目标, 采用梯度下降法调整 W 的权值:

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}(k) &= -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}(k)} = -\eta \sum_{s=1}^6 \frac{\partial e_s(k)}{\partial w_{ij}(k)} = \\ &= -\eta \sum_{s=1}^6 \frac{\partial (r_s(k) - y_s(k))}{\partial w_{ij}(k)} = \eta \sum_{s=1}^6 \frac{\partial y_s(k)}{\partial w_{ij}(k)} = \\ &= \eta \sum_{s=1}^6 \frac{\partial y_s(k)}{\partial v_i(k)} \frac{\partial v_i(k)}{\partial w_{ij}(k)} = \eta \sum_{s=1}^6 \frac{\partial y_s(k)}{\partial v_i(k)} u_j(k) \quad (19) \end{aligned}$$

由于具体参数未知，不能得到 $\frac{\partial y_s(k)}{\partial v_i(k)}$ 的值。

由于其值大小反映收敛速度，其正负号反映收敛方向，故可以用其符号来近似代替其本身，且不会影响收敛结果。所以：

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}(k) &= \eta \sum_{s=1}^6 \operatorname{sgn} \frac{y_s(k) - y_s(k-1)}{v_i(k) - v_i(k-1)} u_j(k) = \\ &= \eta u_j(k) \sum_{s=1}^6 \operatorname{sgn} \frac{y_s(k) - y_s(k-1)}{v_i(k) - v_i(k-1)} \quad (20) \end{aligned}$$

所以 W 的权值调整方法为：

$$\begin{cases} w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \\ \quad \eta u_j(k) \sum_{s=1}^6 \operatorname{sgn} \frac{y_s(k) - y_s(k-1)}{v_i(k) - v_i(k-1)}, i \neq j \\ w_{ij}(k) = 1, i = j \end{cases} \quad (21)$$

4 仿真分析

采用 MATLAB 进行仿真分析，把实验体简化为规则球体，质量 30 kg，直径 0.6 m，X Y Z 三个方向上浮心和重心的偏差为(0.01 m 0.01 m 0.01 m)。取实验体的初始位置和姿态为(0 m 0 m 0 m 0° 0° 0°)，初始速度和加速度均为 0，指定位置和姿态目标为(1 m 1 m 1 m 5° 5° 5°)。仿真时长 60 s，步长 1 ms。

首先，采用 PID 进行控制，所得仿真结果如下图 7 和图 8 所示。图 7 是实验体分别在 X，Y，Z 方向的位置变化曲线图。由图可知在 60 s 内，实验体不能同时在 3 个方向上都到达指定位置。图 8 是实验体姿态角变化曲线图。由图可知姿态角经过前期的调整，才缓慢趋近向指定值，在 60 s 内同样没达到指定姿态。除了过渡时间长，稳态误差大的缺点，另外由于存在耦合，各通道的 PID 参数整定相互影响，难以确定。

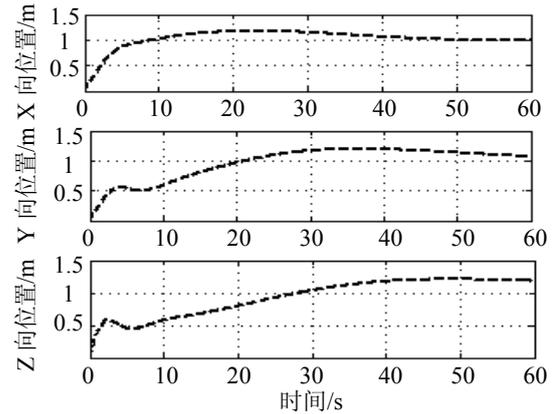


图 7 PID 控制位置变化曲线

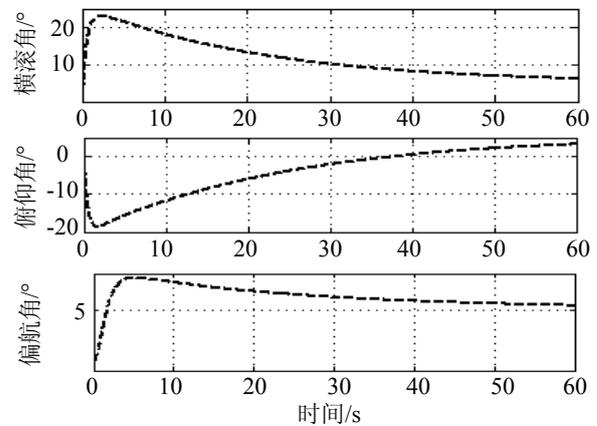


图 8 PID 控制姿态变化曲线

采用本文提出的控制算法，所得仿真结果如下。如下图 9 所示，从上到下分别是固定坐标系下的 E-ξ 方向、E-η 方向及 E-ζ 方向位置调整曲线图。从图中观察到经过数次调整后，实验体在 30 s 左右即达到指定位置，随后保持稳定且误差限制在 0.01 m 以内，效果明显优于 PID 控制。

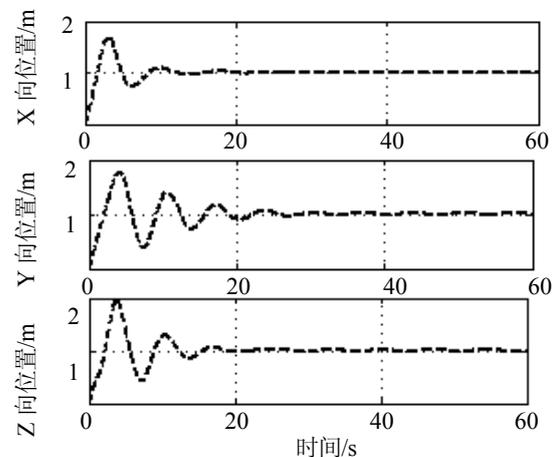


图 9 位置调整曲线

如下图 10 所示是姿态调整曲线图。从上到下分别是横滚角、俯仰角和偏航角调整曲线。由图可知, 姿态调整在 10 s 内即完成。究其原因, 在于姿态调整只需克服水的粘性阻力和重力浮力的偏差, 因此所需的力矩较小; 而位置调整要克服水的阻力, 因此所需推力较大。另外, 解耦神经网络的引入, 使得姿态调整时相互间的影响大为减小。

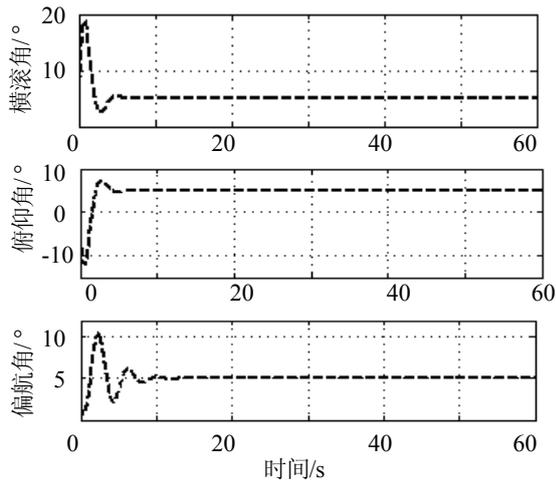


图 10 姿态调整曲线

如图 11 所示是计算过程中某一时刻解耦神经网络的权值矩阵。可以看到网络权值不再是单位阵, 而是动态调整以适应姿态的变化, 减小耦合程度。

$w =$

0.9580	0.1402	0.0014	0.0621	0.1216	-0.1104
0.1647	0.9857	0.0577	0.0339	0.0502	-0.1383
0.2257	0.0437	1.0000	0.0426	0.0652	-0.3328
0.1674	0.0409	0.0605	1.0000	0.0506	-0.0518
0.0499	-0.0039	0.0280	0.0202	1.0000	-0.1175
-0.1025	0.0353	0.1476	-0.3385	0.3886	0.9996

图 11 解耦神经网络的权值矩阵

5 结论

本文以中性悬浮水池中的六自由度球形实验体为控制对象, 首先根据牛顿定律建立其运动方程, 然后根据其运动特点设计基于神经网络解耦的多通道 CMAC 和 PID 复合控制算法。经 MATLAB 仿真分析, 发现提出的解耦方法能动态调整权值以

适应不断变化的耦合状况, 提出的控制算法能用于受力复杂的实验体控制, 且效果优于常规 PID 控制, 对航行器控制律设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 齐乃明, 张文辉, 高九州, 等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述[J]. 航天控制, 2011, 29(3): 95-99.
- [2] 陈诗瑜, 袁建平, 方群. 一种有效的中性浮力下实验体姿态机动模拟控制律设计[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(3): 314-319.
- [3] 沈建森, 朱书平, 周徐昌. 基于 Matlab/Simulink 的水下航行器建模与仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 24-27.
- [4] 王玉, 林秀桃, 宋诗军, 等. 矢量推进自主水下航行器动力学建模及仿真[J]. 天津大学学报, 2014, 47(2): 143-148.
- [5] 高富东, 潘存云, 杨政, 等. 多矢量推进水下航行器 6 自由度非线性建模与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 93-100.
- [6] Zhang Y, Qu Wd, Xi Yg, *et al.* Adaptive Stabilization and Trajectory Tracking of Airship with Neutral Buoyancy [J]. Acta Automatica Sinica (S1874-1029), 2008, 34(11): 1437-1441.
- [7] Bin X, Shunmugham R P, Norimitsu S, *et al.* Neuro-fuzzy Control of Underwater Vehicle-manipulator Systems [J]. Journal of the Franklin Institute (S0016-0032), 2012, 349(3): 1125-1138.
- [8] Ken T, Edgar A, Pierre P, *et al.* A Robust Fuzzy Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Docking Approach for Unknown Current Disturbances [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering (S0364-9059), 2012, 37(2): 143-155.
- [9] 杨永鹏, 赵玉新, 郝燕玲, 等. AUV 近水面悬浮解耦控制系统设计及仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(3): 572-577.
- [10] 张西勇, 李宗吉, 王树宗. 基于变结构控制的反鱼雷鱼雷姿态解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1501-1506.
- [11] Chun F H, Chao M C, Chih M L, *et al.* Adaptive CMAC Neural Control of Chaotic Systems with a PI-type Learning Algorithm [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2009, 36(9): 11836-11843.
- [12] 聂瑞, 章卫国, 李广文, 等. 基于 CMAC-PID 并行控制的阵风减缓控制系统[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 56-60.