

基于滑模理论的水下机器人定深控制算法研究

杨建华¹, 田守业²

(1. 西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710072; 2. 中国人民解放军 92474 部队, 海南 三亚 572018)

摘要: 水下机器人操控性能指标中对定深控制性能有较高要求, 而水下机器人的运动具有强的非线性和耦合性, 使得不同航速下的定深控制成为难点; 建立了水下航行器的运动学模型, 基于滑模理论设计了深度控制器和纵倾控制器, 在 MATLAB SIMULINK 环境下搭建了深度控制仿真系统, 数值仿真结果表明: 滑模变结构控制器对于不同航行条件具有较强的适应性, 同时深度的控制效果明显优于 PID 控制器。

关键词: 水下航行器; 滑模变结构控制; PID; 深度控制

Research on Depth Control Algorithm of Underwater Vehicle Based on Theory of Sliding Mode

Yang Jianhua¹, Tian Shouye²

(1. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710072, China;

2. Chinese People's Liberation Army 92474 Troops, Sanya 572018, China)

Abstract: Underwater vehicle control performance has the higher requirements for the depth control, but the movements of the underwater vehicle has strong nonlinear and coupling, which makes the depth control of different speed difficulty. The kinematics model of underwater vehicle is set up and the depth controller and trim controller are designed. The depth control simulation system is set in MATLAB SIMULINK. The numerical simulation results show that the sliding mode controller for different sailing conditions has strong adaptability, and the depth control effect is better than PID controller.

Keywords: underwater vehicle; sliding mode controller; PID; depth controlling

0 引言

水下机器人通常会在复杂的水下环境下进行长时间的航行与作业, 在航行期间既需要能稳定的保持航向、深度和航速, 又需要能快速的改变航向、深度和航速, 准确地执行各种机动任务, 这就对水下机器人的控制系统提出了较高的要求。水下机器人的运动是较复杂的耦合非线性运动^[1-7]。另外水下机器人在工作环境中存在各种随机性很大和不确定性的干扰, 这些干扰对水下机器人的运动状态产生影响, 这就需要鲁棒性较强的控制器^[2-3,8]。

早期的水下机器人都是应用 PID 原理进行控制器设计。PID 控制器取得了一定成果, 但是 PID 控制系统的参数优化整定比较麻烦, 因为这是由 PID 控制方法的特点决定的, 控制参数需要随着环境变化而改变。后来最优控制方法被用于航向控制系统和深度控制系统的设计中来。但是, 不管 PID 控制还是最优控制, 控制原理都是基于精确的数学模型的。为进一步提高控制系统的适应性, 自适应控制方法、鲁棒控制方法及变结构控制方法被应用到水下机器人的控制系统研究。这些控制方法的作用的优点是可以对不精确的数学模型进行控制器设计, 抗干扰性、鲁棒性较强。

滑模变结构控制算法简单, 对参数变化不敏感以及极强的

抗干扰能力使其在机器人控制, 电机控制, 水下机器人运动控制领域得到了广泛的应用^[4,9-12]。1980 年以来, 发达国家以及国内的水下机器人的研究中, 使用了很多的滑模变结构控制方法。但是, 由于滑模变结构控制的在本质上的不连续开关特性会引起系统的抖振, 抖振问题成为变结构控制的在实际系统中的应用突出障碍^[4]。因此, 关于如何削弱抖振成为滑模变结构控制研究的首要问题, 国内外许多学者从不同角度提出了很多解决方案。

本文研究水下机器人的深度控制系统设计, 针对不同航速下的深度控制规律, 基于滑模理论设计了水下航行器深度控制器, 和纵倾控制器, 并在 MATLAB SIMULINK 环境下搭建了深度控制仿真系统, 数值仿真结果表明: 滑模变结构控制器对于不同航行条件具有较强的适应性, 同时深度的控制效果明显优于 PID 控制器。

1 水下机器人运动学模型

水下机器人在空间中的运动是六自由度的运动。由于扰动外力及力矩对各个自由度的运动产生不同的影响, 同时水下机器人表现出很强的非线性。为了建立水下机器人的运动方程, 需要对复杂的系统进行必要的简化。需满足如下假设:

1) 水下机器人有良好的均衡系统和浮力调整系统, 保持水下航行器质量和重心基本不变。

2) 水下机器人除左右对称外, 上下、前后也基本对称, 坐标轴就是惯性轴。

3) 指令航速和实际稳定航速相差不大。

4) 水下机器人的运动环境为波浪不大的海面, 忽略波浪

收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-03-16。

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1372)。

作者简介: 杨建华(1980-), 男, 陕西延川人, 在读博士生, 讲师, 主要从事控制理论与控制工程和电子技术应用方向的研究。

力对水平面运动的影响。

根据牛顿第一定律和动量定理, 综合水下试验运动受到的粘性力、附加质量惯性力、操舵力、螺旋桨推力、复正力矩等外力作用, 并引入无因次水动力系数水下机器人六自由度空间运动方程^[5-6]如下:

轴向方程:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X'_{qq}q^2 + X'_{rr}r^2 + X'_{rp}rp + X'_{\dot{u}}\dot{u} + X'_{vr}vr + X'_{wq}wq + X'_{uu}u^2 + X'_{vv}v^2 + X'_{ww}w^2 + X'_{\delta_r\delta_r}\delta_r^2 + X'_{\delta_s\delta_s}\delta_s^2 + X'_{\delta_b\delta_b}\delta_b^2 + a_Tu^2 + b_Tuu_c + c_Tu_c^2 - (P - B)\sin\theta \quad (1)$$

横向方程:

$$m[\dot{v} - wp + wr - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{q}) + x_G(pq + r^2)] = Y'_r\dot{r} + Y'_p\dot{p} + Y'_{p|p}|p|p| + Y'_{pq}pq + Y'_{qr}qr + Y'_{r|r}|r|r| + Y'_v\dot{v} + Y'_rwr + Y'_pup + Y'_{vq}vq + Y'_{wp}wp + Y'_{wr}wr + Y'_{v|r}|\frac{v}{|v|}|(w^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}||r| + Y'_0u^2 + Y'_vuv + Y'_{v|v}|v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + Y'_{vw}vw + Y'_{r|r}\delta_r u|r|\delta_r + Y'_{\delta_r}\delta_r u^2\delta_r + (P - B)\cos\theta\sin\varphi \quad (2)$$

垂向方程:

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{q})] = Z'_q\dot{q} + Z'_{pp}p^2 + Z'_{rr}r^2 + Z'_{rp}rp + Z'_{q|q}|q|q| + Z'_{\dot{w}}\dot{w} + Z'_quq + Z'_{vr}vr + Z'_{vp}vp + Z'_{w|w}|\frac{w}{|w|}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}||q| + Z'_0u^2 + Z'_{wu}uw + Z'_{w|w}|w|w| + Z'_{w|w}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + Z'_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + Z'_{vv}v^2 + Z'_{|q|\delta_s}u|q|\delta_s + Z'_{\delta_s}u^2\delta_s + Z'_{\delta_b}u^2\delta_b + (P - B)\cos\theta\cos\varphi \quad (3)$$

横倾方程:

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + wr)] = K'_p\dot{p} + K'_r\dot{r} + K'_{p|p}|p|p| + K'_{qr}qr + K'_{pq}pq + K'_{r|r}|r|r| + K'_v\dot{v} + K'_pup + K'_rur + K'_{vq}vq + K'_{wp}wp + K'_{wr}wr + K'_0u^2 + K'_{vw}uv + K'_{v|v}|v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + K'_{vw}vw + K'_{\delta_r}u^2\delta_r + Ph\cos\theta\sin\varphi \quad (4)$$

纵倾方程:

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M'_q\dot{q} + M'_{pp}p^2 + M'_{q|q}|q|q| + M'_{rr}r^2 + M'_{rp}rp + M'_{\dot{w}}\dot{w} + M'_quq + M'_{vr}vr + M'_{vp}vp + M'_{w|w}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}||q| + M'_0u^2 + M'_{wu}uw + M'_{w|w}|w|w| + M'_{w|w}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + M'_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + M'_{\delta_s}u^2\delta_s + M'_{\delta_b}u^2\delta_b - Ph\sin\theta \quad (5)$$

偏航方程:

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + wr) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N'_r\dot{r} + N'_p\dot{p} + N'_{p|p}|p|p| + N'_{r|r}|r|r| + N'_{qr}qr + N'_{pq}pq + N'_v\dot{v} + N'_pup + N'_rur + N'_{vr}vr + N'_{wp}wp + N'_{vq}vq + N'_{v|r}|\frac{v}{|v|}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}||r| + N'_0u^2 + N'_vuv + N'_{v|v}|v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}|$$

$$(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| + N'_{vw}vw + N'_{r|\delta_r}u|r|\delta_r + N'_{\delta_r}u^2\delta_r \quad (6)$$

2 滑模变结构控制

变结构控制 (variable structure control, VAC) 本质上是一类特殊的非线性控制, 其非线性表现为控制的不连续性。这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定, 而是根据系统当前的状态有目的地不断变化, 迫使系统按照预定“滑模动态”的状态轨迹运动, 所以又称变结构控制为滑模态控制 (sliding mode control, SMC), 即滑模变结构控制。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数与扰动无关, 这就使变结构控制具有快速响应, 对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等特点。该方法的缺点在于当状态轨迹到达滑模面后, 难于严格地沿着滑面向着平衡点滑动, 而是在滑模面两侧来回穿越, 从而产生颤动。

对于一个理想的滑模变结构控制系统, 假设“结构”切换的过程具有理想开关特效, 系统转态测量精确无误。控制量不受限制, 则滑动模态总是降维的光滑运动而且渐进稳定于原点, 不会出现振抖。但是对于一个现实的滑模变结构控制系统, 这些假设是不可能完全成立的。特别是对于离散系统的滑模变结构控制系统, 都会在光滑的滑模面上叠加一个锯齿形的轨迹。于是, 在实际系统中, 抖振是必定存在的, 而且若消除了抖振, 也就消除了变结构控制的抗摄动和抗扰动的能力, 因此, 消除抖振是不可能的, 只能在一定程度上削弱它。

3 水下机器人定深滑模变结构控制

水下机器人操舵时, 舵力的作用与舵力矩相同, 操舵时转舵一开始时就能迅速改变速度方向, 水下机器人对舵的响应较快。所以变深机动时, 应先操舵, 用舵控制纵倾角的大小。操舵引起的纵倾角远比操舵小。因为水下机器人的水动力中心点偏于艏部, 舵的纵倾有效力臂远小于舵的纵倾有效力臂, 所以舵对纵倾的控制比舵有效的多, 通常情况下, 以舵控制定深, 用舵控制纵倾角, 进而控制深度变化的快慢。深度控制系统原理图如图 1 所示。

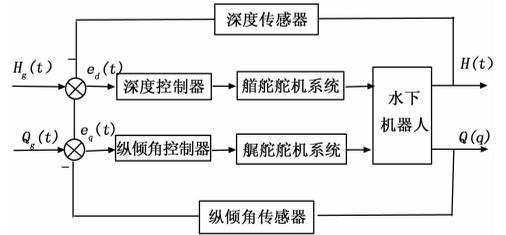


图 1 深度控制系统原理图

在进行深度滑模控制器设计时, 在控制由 w 引起的深度变化时, 将由纵倾引起的深度变化作为干扰; 在控制由纵倾引起的深度变化时, 将 w 引起的深度变化作为干扰。实现滑模控制在处理耦合现象上的灵活性和方便性, 简化了控制器的设计。

1) 深度滑模变结构控制控制器设计

取 $\dot{H} \approx w$, 将垂向方程变形为:

$$\dot{H} = \frac{1}{(m' - Z'_{ww})} [L^{-1}Z'_{wu}\dot{H} + \delta_2(t) + D_2(t)] \quad (7)$$

其中:

$$\delta_2(t) = L^{-1}Z'_{\delta_b}u^2\delta_b$$

$$D_2(t) = (m' + Z'_{\dot{q}})u\dot{q} + (Z'_{\dot{v}} - m')v\dot{p} + L^{-1}Z'_{\dot{0}}u^2 + L^{-1}Z'_{\dot{w}}v^2 + L^{-1}Z'_{\dot{w}|w}w | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + L^{-1}Z'_{\dot{w}}u^2\theta + L^{-1}Z'_{\dot{\delta}_s}u^2\delta_s$$

$$\delta_s = \frac{L^2(I'_y - M'_q)(\ddot{\theta}_d(t) + \varepsilon_2 \text{sat}(s_2) + k_2 s_2 + C_2(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t))) - LM'_{qu}\dot{\theta} + m'gh\dot{\theta} - D_3(t)}{M'_{\dot{\delta}_s}u^2} \quad (17)$$

选取:

$$e_1(t) = H_d(t) - H(t) \\ \dot{e}_1(t) = \dot{H}_d(t) - \dot{H}(t)$$

式中, $H_d(t)$ 为给定深度指令, $e_1(t)$ 为深度的偏差变量。

选取切换面:

$$S_1 = \dot{e}_1 + C_2 e_1 \quad (8)$$

选取指数趋近率:

$$\dot{S}_1 = -\varepsilon_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1 \quad \varepsilon_1 > 0 \quad k_1 > 0 \quad (9)$$

对式 (8) 求导, 得

$$\dot{S}_1 = \ddot{e}_1 + C_1 \dot{e}_1 = \ddot{H}_d(t) - \ddot{H}(t) + C_1(\dot{H}_d(t) - \dot{H}(t)) = \ddot{H}_d(t) - \frac{1}{(m' - Z'_{\dot{w}})}[L^{-1}Z'_{\dot{w}}u\ddot{H} + \delta_1(t) + D_1(t)] + C_1(\dot{H}_d(t) - \dot{H}(t)) \quad (10)$$

由式 (9) 和式 (10) 可得深度控制器的表达式:

$$\delta_b = \frac{(m' - Z'_{\dot{w}})[\ddot{H}_d(t) + C_1(\dot{H}_d(t) - \dot{H}(t)) + \varepsilon_1 \text{sat}(s_1) + k_1 s_1] - L^{-1}Z'_{\dot{w}}u\ddot{H} - D_2(t)}{L^{-1}Z'_{\dot{\delta}_b}u^2} \quad (11)$$

2) 纵倾滑模变结构控制控制器设计

取 $\dot{\theta} \approx q$, 由纵倾方程可得:

$$L^2(I'_y - M'_q)\ddot{\theta} = LM'_{qu}\dot{\theta} - m'gh\dot{\theta} + LM'_{\dot{w}}\dot{w}\dot{\theta} + L^2(I'_z - I'_x)pr + M'_0u^2 + M'_{\dot{w}}uw + M'_{\dot{w}}v^2 + LM'_{q|w} | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | q + M'_{\dot{\delta}_s}u^2\delta_s + M'_{\dot{\delta}_b}u^2\delta_b \quad (12)$$

将式 (12) 改写为以下形式:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{L^2(I'_y - M'_q)}[LM'_{qu}\dot{\theta} - m'gh\dot{\theta} + \delta_3(t) + D_3(t)] \quad (13)$$

式中:

$$\delta_3(t) = M'_{\dot{\delta}_s}u^2\delta_s$$

$$D_3(t) = LM'_{\dot{w}}\dot{w}\dot{\theta} + L^2(I'_z - I'_x)pr + M'_0u^2 + M'_{\dot{w}}uw + M'_{\dot{w}}v^2 + LM'_{q|w} | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | q + M'_{\dot{\delta}_b}u^2\delta_b$$

选取:

$$e_2(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$$

$$\dot{e}_2(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)$$

式中, $\theta_d(t)$ 为给定纵倾指令, $e_2(t)$ 为纵倾的偏差变量。

选取切换面:

$$S_2 = \dot{e}_2 + C_2 e_2 \quad (14)$$

选取指数趋近率:

$$\dot{S}_2 = -\varepsilon_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2 \quad \varepsilon_2 > 0 \quad k_2 > 0 \quad (15)$$

对式 (14) 求导, 得

$$\dot{S}_2 = \ddot{e}_2 + C_2 \dot{e}_2 = \ddot{\theta}_d(t) - \ddot{\theta}(t) + C_2(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)) = \ddot{\theta}_d(t) - \frac{1}{L^2(I'_y - M'_q)}[LM'_{qu}\dot{\theta} - m'gh\dot{\theta} + \delta_3(t) + D_3(t)] + C_2(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)) \quad (16)$$

由式 (15) 和式 (16) 得:

4 数值仿真研究

根据以上建立的运动学模型和控制系统, 本文采用 MATLAB SIMULINK 对水下机器人深度控制进行了仿真分析。系统水动力系数及其它参数来自于某型号产品。 a_T, b_T, c_T 的值通过阻力和推力的一组离散数据曲线拟合得到。设定航速为 7 kn, 深度从 0~10 m, 仿真结果如图 2 所示。

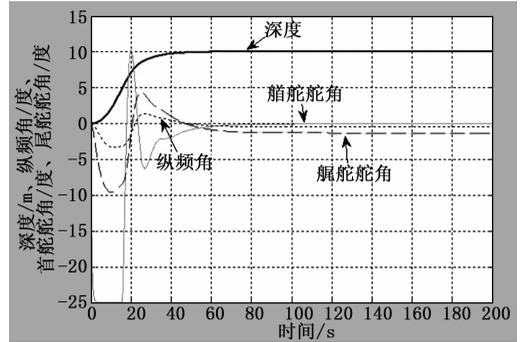


图 2 7 Kn 航速深度 PID 控制器仿真曲线

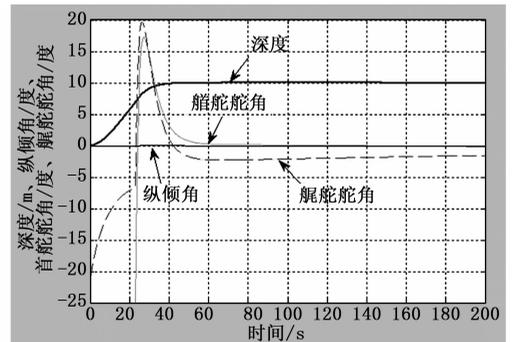


图 3 7 Kn 航速深度滑模控制器仿真曲线

从图 2, 图 3 中可以看出深度滑模控制器稳定时间更短, 最后稳态误差较小, 深度没有超调, 而且纵倾角一直保持在零度左右, 控制效果较 PID 控制器更为良好。

控制器参数不变, 取航速为 3 kn, 深度从 0~10 m, 仿真效果如图 4 所示。

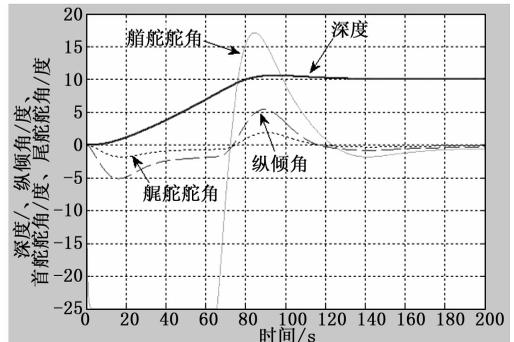


图 4 3 kn 航速深度 PID 控制器仿真曲线

标样模式是系统针对 2 个样品盘中间位置处的样品瓶单独设定的, 可满足用户大剂量的样品进样、配样、稀释等功能要求。该模式下用户可单独设定进样量和稀释量, 满足用户大剂量、任意稀释比例等的需求。

系统维护菜单则可实现用户的手动操作, 可对进样器所有动作单步控制, 包括控制抬针、落针、移动到任意瓶号、注射泵单独抽取、注射等, 大大提高了自动进样器使用的灵活性和应用性。单步控制还可方便查找故障位置, 增强了设备的可维护性。

系统设置界面则主要实现电机速度、落针距离、样品抽取总量、用户密码等的设定, 满足用户更换注射泵、调整针管长度、位置纠偏等的需求。

4 系统测试

系统测试主要包括系统整体性能和安全性两方面。测试样机进行至少 6 小时连续定位与进样, 同一个样品盘中随着检测样品瓶号的递增, 系统定位并未出现明显的偏差, 最末尾瓶号处, 针头偏离中心位置不足 1 mm, 但扎针位置的可重现性良好, 全部为同一针孔。当两个样品盘全部样品都经过测试时, 样品盘定位出现明显偏差, 最末尾瓶号处, 针头偏离中心位置约 2 mm, 但同样可重现性良好, 多次测试并未出现第二个针孔, 电机运行平稳。两个样品盘都使用时, 样品检测总量超过 100 位, 系统为了更快速定位并没有一瓶一校验位置, 所以累计误差会在最后一个样品瓶处达到最大, 但 2 mm 的误差对于半径 4 mm 的瓶盖属于可接受范围, 完全满足定位的精度需求。

其它方面, 系统设定自动抽样、稀释、混合、进样等命令后, 系统可正常完成全部命令, 无漏测样品, 漏运行既定步骤等现象出现。设定的紧急停止按钮拥有中断级别最高, 实现系统任何运行阶段的紧急停止操作。

安全性测试方面, 系统对超出最大瓶号的位置做出忽略处

(上接第 45 页)

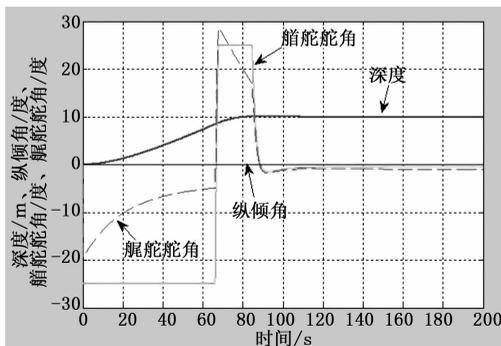


图 5 3 kn 航速深度滑模控制器仿真曲线

从图 5 中可以看出, 当航速改变时, 深度滑模控制器和纵倾滑模控制器也有同样良好的性能, 对比 PID 控制器具有较强的鲁棒性。

5 结论

本文通过对水下航行器数学模型的分析, 设计了滑模控制器, 计算机仿真结果表明滑模变结构控制器对于不同航行条件具有较强的适应性, 同时深度的控制效果明显优于 PID 控制器。

理。切断传感器后, 系统能在超出既定轨道位置后及时停止, 保证系统即便机械碰撞后仍能正常工作。

5 结束语

基于 3D 打印机控制结构的 X、Y、Z 三轴联动技术在雕刻机、3D 打印机等领域已经比较成熟, 本设计将该控制结构应用于液相自动进样器中, 并根据实际需求改进了系统的软硬件, 设计成本大大降低。使用现有成熟的驱动模块, 省去自行设计的繁琐, 不仅有利于系统调试, 还降低了研发成本, 缩短了研发周期。新型自动进样器在原有进样器功能的基础上增加了自动稀释、自动配样等功能, 进样效率等都得到了很好的提高。

与传统盘式自动进样器相比, 本设计定位精度更高, 若配以箱式外观, 则可大大缩小系统整体体积, 有效保护针架等精密仪器。

参考文献:

- [1] 张西威, 陈 莲, 李海洋, 等. 一种低成本的气相色谱仪液体自动进样器的设计 [J]. 现代科学仪器, 2007, 17 (3): 49-53.
- [2] 宏晶科技. STC 系列单片机器件手册 [Z]. 宏晶科技, 2009.
- [3] 周 峰, 朱宗玖. 电动汽车充电桩迪文 DGUS 触摸屏的实现 [J]. 科技视界, 2013 (3): 45-46.
- [4] 杨帮文. 新型接近开关和光电开关实用手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [5] 谭秀腾, 郭小定, 李小龙, 等. 基于 ARM 的桌面型 3D 打印机控制系统设计 [J]. 应用科技, 2014, 41 (5): 57-61.
- [6] 刘宝志. 步进电机的精确控制方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [7] 杨 猛. 3D 打印驱动电路设计及文件切片算法研究 [D]. 北京: 北京印刷学院信号与信息处理, 2014.
- [8] 吴 迪. 基于 DRV8825 的打印机电机驱动电路设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2013 (11): 62-62.

参考文献:

- [1] 边宇枢, 高志慧, 等. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (7): 87-92.
- [2] 唐旭东, 庞永杰, 李 晔. 水下机器人运动的免疫控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11 (6): 676-680.
- [3] 俞建成, 张艾群, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制 [J]. 自动化学报, 2007, 33 (8): 840-846.
- [4] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (3): 407-415.
- [5] 严卫生. 鱼雷航行力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [6] 李殿璞. 船舶的数学建模 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [7] 张良欣, 邢道奇, 等. 基于云模型的船舶航迹跟踪滑模控制 [J]. 计算机工程. 2012, 38 (10): 227-233.
- [8] 唐旭东, 庞永杰, 王建国. 基于单神经元的水下机器人 S 面自适应运动控制 [J]. 计算机应用, 2007, 27 (12): 2900-2905.
- [9] 王洪瑞, 冯玉东, 等. 基于反演设计的机器人自适应动态滑模控制 [J]. 计算机工程与应用. 2010, 46 (8): 211-213.
- [10] 张扬名, 刘国荣, 等. 基于滑模变结构的移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 计算机工程. 2013, 39 (5): 211-213.
- [11] 张 敏, 唐东成, 等. 基于微粒群算法的永磁同步发电机滑模控制 [J]. 计算机工程与应用. 2015, 51 (22): 266-270.
- [12] 王洪泉, 师五喜, 等. 基于终端滑模机器人模糊自适应路径跟踪控制 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (16): 36-40.