

潜空战术导弹纵向特性分析及控制系统设计

苗昊春¹, 马清华², 严宪军², 陈 韵², 江婷婷²

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072; 2. 中国兵器工业第二〇三研究所, 西安 710065)

摘要: 对潜空战术导弹的水下和空中运动分别建立了纵向质心运动方程, 分析了出水前后的弹体纵向特性并完成了经典方法的控制系统设计, 最后分别给出了 Simulink 质心弹道和六自由度弹道对比仿真验证; 结果表明, 潜空导弹质心运动方程可简便有效地设计期望弹道和分析弹体特性, 据此设计出的控制系统可以顺利实现对潜空导弹的全程控制, 提供了一套完整的潜空战术导弹纵向特性分析方法和控制系统设计方法。

关键词: 潜空战术导弹; 质心运动; 弹体特性; 控制系统设计; 弹道仿真

Longitudinal Characteristic Analysis and Control System Design of Submarine-to-air Tactical Missile

Miao Haochun¹, Ma Qinghua², Yan Xianjun², Chen Yun², Jiang Tingting²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: The longitudinal centroid motion equations for both underwater and air motion process of submarine-to-air tactical missile are established, and longitudinal characteristic is analyzed, then the control system is designed based on conventional methods. Finally, the centroid trajectory and 6-DOF trajectory model are respectively simulated and compared. The result indicated that the centroid motion equations of submarine-to-air tactical missile is efficient in simply designing the trajectory and analyzing the body characteristic, based on which the designed control system can accomplish the control of the missile in the whole process, thus a completed method of longitudinal characteristic analysis and control system design of submarine-to-air tactical missile is provided.

Keywords: submarine-to-air tactical missile; centroid motion; body characteristic; control system design; trajectory simulation

0 引言

潜空导弹对潜艇提升攻击、威慑反潜机的主动防御能力具有重大军事意义。国外现已研究或装备的潜空导弹有英国“斯拉姆”, 美国“西埃姆”, 法国“米卡”以及德国“IDAS”等。

在潜空导弹的建模、制导控制设计和出水前后的弹体特性对比等方面研究资料较少, 现有研究往往以水雷为主兼顾出水, 文献 [1] 对潜射导弹水下及出水运动进行建模并采用模糊 PID 控制方法进行了仿真分析, 文献 [2] 等对潜空导弹运载器建立了水下六自由度模型并进行了水弹道研究, 文献 [3-4] 对鱼雷出水攻击空中弹道进行了研究, 文献 [5-6] 对鱼雷出水过程建立了仿射非线性模型并设计提出滑模反演控制方法。

本文分别以鱼雷航空气力学^[7]和导弹飞行力学^[8]为基础, 对潜空战术导弹的水下和空中运动分别建立了纵向质心运动方程, 给出了弹体传递函数并计算了出水前后的弹体特征参数, 依据传统方法设计了控制回路, 最后分别给出了 Simulink 质心弹道和六自由度弹道仿真对比结果, 提供了一套完整的潜空战术导弹纵向特性分析方法和控制系统设计方法。

1 质心运动方程

潜空战术导弹的质心运动分为水下和空中两部分, 在水下时导弹相当于鱼雷, 其运动规律符合鱼雷航空气力学, 在空中, 其运动规律符合导弹飞行力学。

1.1 鱼雷纵向质心运动方程

鱼雷质心运动方程在半速度坐标系下建立, 原点位于鱼雷质心。假设鱼雷为刚体且处于全沾湿状态, 外形关于纵平面对称, 攻角较小, 令所有侧向运动参数为零, 即得鱼雷纵向质心运动方程:

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= P \cos \alpha - X - \Delta G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} &= P \sin \alpha + Y - \Delta G \cos \theta + \lambda_{22} \frac{d(V\alpha)}{dt} - \lambda_{26} \frac{d\omega_z}{dt} \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_z \\ \alpha &= \vartheta - \theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $m, V, P, \Delta G, X, Y$ 分别为质量、速度、推力、负浮力、阻力和升力, $\alpha, \vartheta, \theta, \omega_z, x, y$ 分别为攻角、俯仰角、弹道倾角、俯仰角速度、航程和深度。

由于附加质量 $\lambda_{22}, \lambda_{26}$ 的影响, 鱼雷质心运动受到绕质心

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-03-14。

作者简介: 苗昊春(1986-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事飞行器制导与控制方向的研究。

运动的影响, 但质心运动方程一般用来设计弹道形式, 水下运动给定的俯仰角一般恒定或为线性, 因此可认为 $\dot{\omega}_z$ 近似为零, 质心运动方程变为:

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= P \cos \alpha - X - \Delta G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} &= P \sin \alpha + Y - \Delta G \cos \theta + \lambda_{22} \frac{d(V \sin \alpha)}{dt} \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin \theta \\ \alpha &= \vartheta - \theta \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 导弹纵向质心运动方程

导弹质心运动方程在弹道坐标系 (与鱼雷半速度坐标系定义一致) 下建立, 质点位于导弹质心。与鱼雷类似, 假设导弹为刚体, 飞行任一瞬时都处于平衡状态, 且攻角较小, 令导弹侧向运动为零, 可得导弹纵向质心运动方程:

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= P \cos \alpha - X - G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} &= P \sin \alpha + Y - G \cos \theta \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin \theta \\ \alpha &= \vartheta - \theta \end{aligned} \quad (3)$$

式中, G 为重力, 其他符号含义同鱼雷质心运动方程。

方程组 (2) 和 (3) 组成了潜空战术导弹的质心运动方程组。尽管在形式上鱼雷比导弹仅多了附加质量一项, 但还要注意水和空气的密度差别、流体系数和气动系数的差别, 以及浮力的影响, 因此升力、阻力等计算值都差别很大。

2 弹体纵向特性

2.1 鱼雷纵向运动传递函数

根据鱼雷的纵向扰动运动线性方程组, 假设扰动量为小量, 未扰动运动为定常直线运动, 在运动参数初值为零的条件下, 进行拉氏变换后可得出鱼雷纵向舵偏角到角速度的传递函数, 并将其写成如下的标准形式

$$W_{\dot{\theta}_z}^{\vartheta}(s) = \frac{K_m(1 + T_1 s)}{T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1} \quad (4)$$

式中, K_m 、 T_m 、 ξ 、 T_1 分别代表传递系数、弹体时间常数、阻尼系数和水动时间常数, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{a_{25} a_{34} - a_{24} a_{35}}{a_{22} a_{34} - a_{24} a_{32}}, T_m = \sqrt{\frac{a_{21} a_{33} - a_{23} a_{31}}{a_{22} a_{34} - a_{24} a_{32}}} \\ \xi &= \frac{a_{21} a_{34} + a_{22} a_{33} - a_{23} a_{32} - a_{24} a_{31}}{2T_m(a_{22} a_{34} - a_{24} a_{32})} \\ T_1 &= \frac{a_{25} a_{33} - a_{35} a_{23}}{K_m(a_{22} a_{34} - a_{24} a_{32})} \end{aligned}$$

式中的系数 a_{ij} 为鱼雷纵向扰动运动方程式系数, 计算公式为^[7]:

$$\begin{aligned} a_{21} &= \frac{(\lambda_{26} + mx_c)}{(0.5\rho v^2 S)}, \\ a_{22} &= \frac{(\mu - C_{y^2}^{\omega_z})L}{v}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{23} &= \frac{-(m + \lambda_{22})}{(0.5\rho v S)} \\ a_{24} &= -C_y^{\omega_z}, a_{25} = -C_y^{\dot{\omega}_z} \\ a_{31} &= \frac{-(J_z + \lambda_{66})}{(0.5\rho v^2 SL)} \\ a_{32} &= \frac{(\mu \dot{x}_c - m_z^{\omega_z})L}{v} \\ a_{33} &= \frac{-(mx_c + \lambda_{26})}{(0.5\rho v SL)} \\ a_{34} &= -m_z^{\omega_z}, a_{35} = -m_z^{\dot{\omega}_z} \end{aligned}$$

相关变量和定义见参考文献 [7]。

2.2 导弹纵向运动传递函数

类似的, 将导弹纵向扰动线性方程组进行简化和推导后, 可得导弹的纵向舵偏角到角速度的传递函数:

$$W_{\dot{\theta}_z}^{\vartheta}(s) = \frac{K_m(1 + T_1 s)}{T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1} \quad (5)$$

式中, K_m 、 T_m 、 ξ 、 T_1 分别代表传递系数、弹体时间常数、阻尼系数和气动时间常数, 有:

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{a_{25} a_{34} - a_{24} a_{35}}{a_{24} + a_{22} a_{34}}, T_m = \frac{1}{\sqrt{a_{24} + a_{22} a_{34}}} \\ \xi &= \frac{a_{22} + a_{34}}{2\sqrt{a_{24} + a_{22} a_{34}}}, T_1 = \frac{a_{25}}{a_{25} a_{34} - a_{24} a_{35}} \end{aligned}$$

式中的 a_{ij} 为导弹纵向扰动运动线性化方程的动力系数, 计算公式为^[8]:

$$\begin{aligned} a_{22} &= \frac{m_z^{\omega_z} qSL^2}{(J_z V)}, \\ a_{24} &= \frac{m_z^{\dot{\omega}_z} qSL}{J_z}, a_{25} = \frac{m_z^{\ddot{\omega}_z} qSL}{J_z} \\ a_{33} &= \frac{g \sin \theta}{V}, a_{34} = \frac{(C_y^{\omega_z} qS + P)}{(mV)} \\ a_{35} &= \frac{(C_y^{\dot{\omega}_z} qS)}{(mV)}. \end{aligned}$$

相关变量和定义见参考文件 [8]。

2.3 出水前后纵向特性分析

潜空战术导弹在出水前后弹体特性差异很大, 其水下和空中某时刻的弹体特性参数如表 1 所示。

表 1 弹体特性参数

	含义	水下	空中
K_m	传递系数	97.2	2.41
T_m	弹体时间常数	12.99	0.104
ξ	阻尼系数	1.87	0.164
T_1	气动/水动时间常数	7.78	0.448
F	弹体频率	0.012	1.53

可以看出, 在水下, 导弹具有过阻尼特性, 弹体频率极低, 时间常数很大, 而在空中, 导弹是严重欠阻尼的, 弹体频率约为 1.5 Hz, 时间常数很小, 因此在设计控制器时要充分考虑两种情况下的差异。

3 控制系统设计

质心运动方程的特点在于将导弹当作一个可操纵质点, 在设计前期简单快捷的设计期望弹道, 获得弹体特性参数, 然后据此开展控制系统的设计。

3.1 质心弹道设计

对于潜空战术导弹，全段弹道自下而上可分为六段：水下巡航段、水下爬升段、出水段、空中爬升段、空中平飞段和末制导段。在质心运动过程中，认为水下爬升和空中爬升直接衔接，因此将质心弹道分为五段，分段情况及控制方案见表 2 所示。

表 2 潜空战术导弹质心弹道控制方案

序号	弹道段	控制方式	控制输入
1	水下巡航	深度控制	期望深度
2	水下爬升	姿态控制	期望角度
3	空中爬升	姿态控制	程序角度
4	空中平飞	高度控制	期望高度
5	末制导	比例导引	期望过载

质心弹道无需设计控制器，以攻角作为控制指令。首先计算平衡攻角，在空中可近似认为重力与升力平衡，在水下时需考虑浮力，故水下平衡攻角 α_{B1} 和空中平衡攻角 α_{B2} ：

$$\alpha_{B1} = \frac{G - B}{C_y^a q S}, \alpha_{B2} = \frac{G}{C_y^a q S} \quad (6)$$

各段弹道不同的控制输入最终都要转换为攻角输出，分别记为 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 。

水下巡航段，攻角指令可先采用固定值使导弹航行至期望深度后，再转换为平衡攻角，在空中平飞段，攻角指令为平衡攻角，即：

$$\alpha_1 = \alpha_{B1}, \alpha_4 = \alpha_{B2} \quad (7)$$

水下爬升段和出水爬升段，可以近似认为

$$\alpha_2 = \frac{V}{g} \cdot \alpha_{B1} \cdot (\vartheta^* - \theta) \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \frac{V}{g} \cdot \alpha_{B2} \cdot (\vartheta^* - \theta) \quad (9)$$

在末制导段，根据比例导引规律：

$$\dot{\theta} = K \dot{q} \quad (10)$$

于是有过载指令：

$$n_c = \frac{V}{g} \dot{\theta} + \cos\theta \quad (11)$$

从而攻角指令：

$$\alpha_5 = n_c \alpha_B = \frac{V}{g} K \dot{q} + \cos\theta \quad (12)$$

3.2 控制回路框图

质心弹道设计完成后，即可获得各不同飞行状态的弹体特性参数，据此可以开展各控制回路设计。

俯仰角控制回路角度反馈和角速率反馈形式，如图 1 所示。其中 $G_c(s)$ 为姿态控制器， $G_1(s)$ 为阻尼控制器。

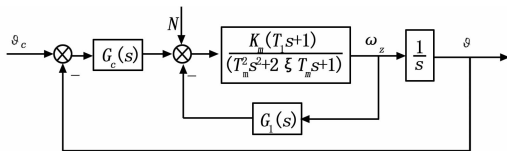


图 1 俯仰角控制回路

深度/高度控制采用位置反馈和角速率反馈形式，如图 2 所示。其中： $G_h(s)$ 为深度/高度控制器， $G_2(s)$ 为阻尼控制器，

$H(s)$ 为角速度到位置的转换传递函数：

$$H(s) = \frac{1}{s^2(T_1 s + 1)} \times \frac{V}{57.3 g}$$

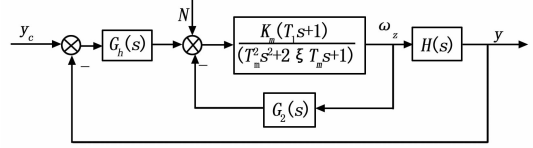


图 2 深度/高度控制回路

末制导回路采用过载反馈和角速率反馈的形式，如图 3 所示，过载输入如式 (11) 所示。

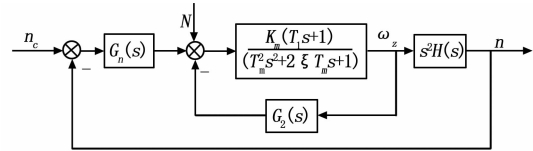


图 3 深度/高度控制回路

其中： $G_n(s)$ 为过载控制器， $G_2(s)$ 为阻尼控制器。各回路控制器均采用 PID 形式并适当选取参数。

3.3 6-DOF 验证

控制器设计完成后，以完整的鱼雷运动方程、鱼雷出水运动学和导弹运动方程进行六自由度方程验证。

简化的鱼雷纵向运动方程如下^[8]：

$$\begin{aligned} (\lambda_{11} + m) \dot{v}_x &= P - C_x q S - (G - B) \sin\vartheta \\ (\lambda_{22} + m) \dot{v}_y + (\lambda_{26} + m x_c) \dot{\omega}_z + m v_x \omega_z &= q S (C_y^a \alpha + C_y^{\delta} \delta_e + C_y^{\omega} \dot{\omega}_z) - (G - B) \cos\vartheta \\ (\lambda_{66} + J_{zz}) \dot{\omega}_z + (\lambda_{26} + m x_c) \dot{v}_y + m x_c v_x \omega_z &= q S L (m_z^a \alpha + m_z^{\delta} \delta_e + m_z^{\omega} \dot{\omega}_z) + G (y_c \sin\vartheta - x_c \cos\vartheta) \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z, \dot{x} = V \cos(\vartheta - \alpha), \dot{y} = V \sin(\vartheta - \alpha) \\ \alpha &= -\arctan(v_y/v_x), V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, q = \frac{1}{2} \rho V^2 \end{aligned} \quad (13)$$

从鱼雷头部顶端与水面接触开始，至鱼雷尾端穿过水面为止的出水纵向运动方程如下^[9]：

$$\begin{aligned} (\lambda_{11} + m) \dot{v}_x - (\lambda_{22} + m) v_y \omega_z - (\lambda_{26} + m x_c) \omega_z^2 &= P - X - \Delta G \sin\vartheta \\ (\lambda_{22} + m) \dot{v}_y + (\lambda_{26} + m x_c) \dot{\omega}_z + (\lambda_{11} + m) v_x \omega_z &= Y - \Delta G \cos\vartheta \\ (\lambda_{66} + J_{zz}) \dot{\omega}_z + (\lambda_{26} + m x_c) \dot{v}_y + (\lambda_{26} + m x_c) v_x \omega_z + & \\ (\lambda_{22} - \lambda_{21}) v_x v_y &= M_z - (G x_c - B x'_B) \cos\vartheta \end{aligned} \quad (14)$$

相关变量和定义详见文献 [9]。

导弹纵向运动方程如下^[10]：

$$\begin{aligned} m \dot{V} &= P \cos\alpha - C_x q S - G \sin\theta \\ m V \dot{\theta} &= P \sin\alpha + q S (C_y^a \alpha + C_y^{\delta} \delta_e) - G \cos\theta \\ J_z \dot{\omega}_z &= q S L (m_z^a \alpha + m_z^{\delta} \delta_e + m_z^{\omega} \dot{\omega}_z) \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z, \dot{x} = V \cos\theta, \dot{y} = V \sin\theta \\ \alpha &= \vartheta - \theta, q = \frac{1}{2} \rho V^2 \end{aligned} \quad (15)$$

根据以上 3 组运动方程，使用 Simulink 分别建立数字仿真模块进行验证。

4 数字仿真

以德国“交互式潜射防空武器系统 (IDAS)”为蓝本，采

用“裸弹发射出水”总体方案,正常式“X-X”气动布局,三级固体发动机,惯性中制导+图像末制导方案。

设定目标距离 4 km,高度 50 m,导弹水下航行深度 10 m,水下爬升俯仰角 30° ,空中爬升为程序俯仰角,平飞高度 360 m,末制导距离 1 km。

对潜空战术导弹 5 个质心弹道段和考虑绕质心运动后完整的 6 个弹道段分别使用 Matlab/Simulink 建立数字仿真模型,并进行仿真对比分析,仿真结果如图 4~8 所示。

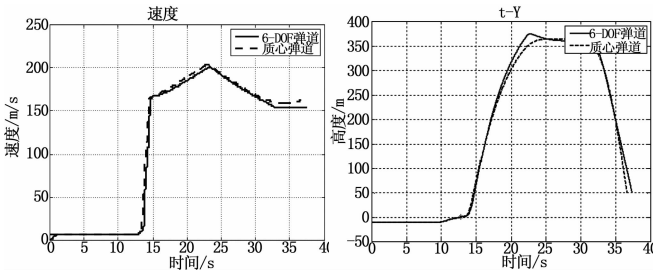


图4 速度曲线

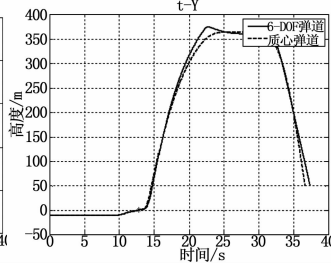


图5 高度曲线

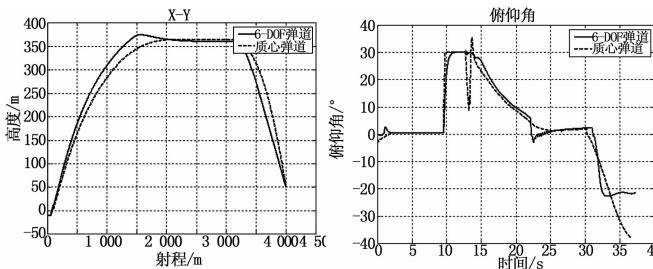


图6 射程-高度曲线

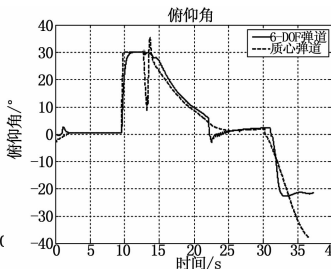


图7 俯仰角曲线

从仿真结果可以看出,质心弹道与六自由度弹道速度曲线基本一致,但因为质心弹道忽略了气动力矩和阻尼力矩的作用,其在空中爬升段和末制导段弹道形状较缓,同时俯仰角变化更快,两种情况导弹均能顺利命中目标。因此,依据质心弹道分析和设计控制回路合理可行,结果可信。

5 结论

本文以德国“IDAS”为背景,对潜空战术导弹的水下和空中运动分别建立了纵向质心运动方程,依据传统方法设计了

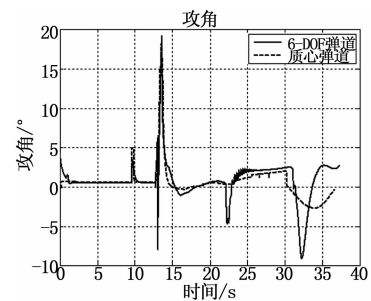


图8 攻角曲线

控制回路,提供了一套完整的潜空战术导弹纵向特性分析方法和控制系统设计方法,最后分别给出了 Simulink 质心弹道和六自由度弹道仿真对比验证,仿真结果表明;潜空导弹水下和空中的质心运动方程可以简单快捷的设计出期望弹道并获得弹体特征参数,以此为依据设计出的控制回路可以有效的实现对潜空导弹的全程控制。本文的工作对潜空导弹的跨介质制导控制系统研究提供了一个参考。

参考文献:

- [1] 崔乃刚,曹春泉,韦常柱. 潜射导弹水下运动过程仿真分析 [J]. 弹道学报, 2009, 21 (2): 98-99.
- [2] 顾文锦,雷军委,冯国虎. 基于积分滑模的导弹过载控制稳定性研究 [J]. 飞行力学, 2006, 24 (1): 33-36.
- [3] 李雨田,张宇文,张纪华,等. 水雷出水攻击空中弹道设计与分析 [J]. 鱼雷技术, 2012, 20 (3): 166-170.
- [4] 张纪华,张宇文,范辉. 水雷攻击直升机弹道设计与仿真 [J]. 鱼雷技术, 2011, 19 (3): 172-175.
- [5] 肖敏,史忠科. 水雷出水突变非线性滑模自适应反演弹道控制 [J]. 信息与控制, 2012, 41 (6).
- [6] 肖敏,史忠科. 水雷出水模型突变的控制方法 [J]. 自动化学报, 2012, 38 (10): 1609-1617.
- [7] 严卫生. 鱼雷航行力学 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2003.
- [8] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2000.
- [9] 张宇文,鱼雷弹道与弹道设计 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 1999.

(上接第 2108 页)

参考文献:

- [1] 戴文战,姜海川,杨爱萍. 非线性系统神经网络预测控制研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26 (5): 521-530.
- [2] 韩敏,韩冰. 一种通用学习网络自适应算法及其在预测控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23 (6): 900-907.
- [3] 段其昌,曾勇,段盼,等. 非线性系统的改进型自适应积分控制算法 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (12): 4492-4494.
- [4] Xi J, Wang H, Du J, et al. 基于改进 RBF 网络的多变量序列建模和预测 [J]. 信息与控制, 2012, 41 (2).
- [5] 阎博,江道灼,甘德强,等. 基于反馈线性化 H_∞ 方法的 UPFC 非线性鲁棒控制器 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46 (11):

1975-1980.

- [6] 夏国清,廖粤峰,王璐. 四旋翼无人飞行器混合控制系统研究 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (3): 858-861.
- [7] Liu Z, Yang Z, Gao P. Research on the short-term traffic flow prediction method based on BP neural networks [A]. World Automation Congress (WAC) [C], 2012, IEEE, 2012: 1-4.
- [8] Hou Y, Mai Y. Chaotic Prediction for Traffic Flow of Improved BP Neural Network [J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11 (3): 1682-1690.
- [9] Wang H B, Liu M. Design of robotic visual servo control based on neural network and genetic algorithm [J]. International Journal of Automation and Computing, 2012, 9 (1): 24-29.