

# 一种非线性优化控制方法及其在鱼雷控制中的应用\*

段富海 章卫国<sup>△</sup> 何长安  
(西北工业大学自动控制系·西安, 710072)

TJ 630-1

TP=73.1

**摘要:** 提出了一种带优化修正函数的非线性 PID 控制器设计方法, 通过对控制器参数离线寻优, 并对修正函数在线优化调整, 可用它设计出性能优良且易于工程实现的控制器。然后用该法为某型鱼雷非线性系统设计了弹道深度控制器并在各种入水条件下进行了仿真研究。仿真结果表明, 所设计的鱼雷非线性弹道深度控制系统具有良好的动、静态特性, 且对鱼雷入水条件的变化具有较强的适应性。

**关键词:** 非线性系统; 鱼雷; 非线性 PID 控制; 优化修正函数

文献标识码: A

优化控制 弹道深度控制

## A Nonlinear PID Control Method with Optimal Correction Function and Its Application in Torpedo Trajectory Control System

DUAN Fuhai, ZHANG Weiguo and HE Changan

(Northwestern Polytechnical University·Xi'an, 710072, P. R. China)

**Abstract:** A design method on nonlinear PID controller with optimal correction function is presented. By choosing parameters off-line and optimizing correction function on-line, an excellent controller can be designed which is liable to realize in engineering. Using this method, a nonlinear PID control system is designed for a torpedo with serious nonlinearity, and simulation studies are conducted under different initial conditions. The results show that the designed nonlinear torpedo trajectory control system not only possesses better dynamic and static properties, but also has strong adaptability to the changes of initial conditions.

**Key words:** nonlinear system; torpedo; nonlinear PID control; optimal correction function

### 1 引言 (Introduction)

鱼雷自飞机空投入水后, 经 1.3 秒左右时间, 动力系统才开始工作并提供推力, 此时控制系统开始控制。鱼雷初始弹道控制的难点: 一是由于鱼雷从飞机上投下到控制开始段, 存在很多随机干扰, 造成控制开始时初始条件变化范围很大; 二是鱼雷入水后, 由于初速和惯性, 其深度增加很快, 对有浅海作战要求的鱼雷, 深度可控时间极短, 控制的任务是保证在入水条件大范围变化的情况下, 使鱼雷入水袋深满足空投鱼雷入水袋深的要求, 并保证控制鱼雷尽快寻深并在设定深度上稳定航行。

文献[1]提出了一种带优化修正函数的规则自调整模糊控制方法, 虽然它采用控制器参数寻优的方法, 可使模糊控制规则自调整、自完善, 但它不能从本质上消除量化误差和调节死区给控制系统带来的稳态误差与颤振现象。本文从工程实用角度出发, 在文献[1]优化修正函数思想和控制器结构基础上

进行了改进, 取消了模糊控制的量化取整运算与推理合成运算, 使控制器的输入输出等信号均为连续变化量, 从而提出了一种带优化修正函数的非线性 PID 控制器设计方法。通过对控制器参数离线寻优, 并对修正函数在线优化调整, 可用它设计出性能优良且简单实用的控制器。该控制器可从本质上消除系统的稳态误差与颤振现象, 能对复杂非线性对象进行有效控制, 且对系统初始条件的变化具有较好的适应性。然后用带优化修正函数的非线性 PID 控制器设计方法为某型鱼雷非线性系统设计了弹道深度控制器, 并在不同入水条件下进行了系统仿真研究。仿真所涉及的水条件, 代表了鱼雷实战时的大多数情况。

### 2 带优化修正函数的非线性 PID 控制器设计方法 (Design method of nonlinear PID controller with optimal correction function)

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目专项经费(G1998030417)资助课题。

收稿日期: 1998-3-19; 收修稿日期: 1999-6-7。

## 2.1 非线性PID控制器结构 (Structure of nonlinear PID controller)

设系统误差为  $e(t)$ , 误差变化率为  $\dot{e}(t)$ , 若令

$$E = K_e e(t), \quad (1)$$

$$EC = K_{ec} \dot{e}(t), \quad (2)$$

则带优化修正函数的控制律可表示为

$$U = \beta E + (1 - \beta) EC. \quad (3)$$

式中,  $K_e$  为比例系数,  $K_{ec}$  为微分系数, 而修正函数

$$\beta = \beta_0 + K_\beta \frac{|E|}{|E|_{\max}}. \quad (4)$$

式中,  $\beta_0$  为  $|E| = 0$  时的修正因子,  $0 \leq \beta_0 \leq 0.5$ ,  $\beta_0 \leq \beta \leq 1$ ;  $K_\beta$  为一常数且  $0 \leq K_\beta \leq (1 - \beta_0)$ . (3) 式体现了按误差大小自动调整误差和误差变化对控制作用的权重. 带优化修正函数的非线性PID控制器方框图如图1所示.

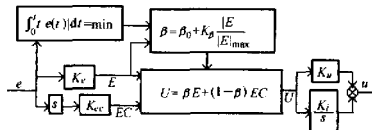


图1 带优化修正函数的非线性PID控制器

Fig. 1 Nonlinear PID controller with optimal correction function

在图1所示的控制器中, 由于修正函数  $\beta$  是在线自调整的, 所以误差  $e$  与  $U$  之间的控制律是非线性PD控制律; 为了消除系统的稳态误差, 再串入环节  $K_u + K_i/s$  后, 误差  $e$  与控制  $u$  之间的控制律就是一种非线性PID控制律.

## 2.2 控制器参数的优化 (Optimization of the controller parameters)

图1所示的控制器中有  $K_e$ ,  $K_{ec}$ ,  $K_u$  和  $K_i$  四个参数, 而修正函数  $\beta$  中又有  $\beta_0$  和  $K_\beta$  两个参数. 如果完全用人工的办法, 很难得到一组参数的最佳组合值. 因此必须考虑采用优化设计方法来确定这些参数的取值.

控制器参数的优化, 可采用时间乘绝对误差的积分 (ITAE) 作为性能指标函数, 即

$$J = \int_0^t |e(t)| dt = \min. \quad (5)$$

式中,  $J$  表示误差函数加权时间后的积分面积的大小. 该性能指标能够较好地反映出系统的响应速度、调节时间、稳态误差和超调量的大小, 可保证控制系统瞬态响应超调量较小, 且对振荡有足够的阻尼作用.

为减小在线寻优参数的个数, 我们采用 ITAE

指标离线进行控制器参数  $K_e$ ,  $K_{ec}$ ,  $K_u$  和  $K_i$  的寻优. 寻优过程按性能指标逐步减小的原则, 不断地校正四个参数的取值, 从而获得一组优选的取值. 若被控对象含有积分环节, 则令  $K_i = 0$ . 显然这样获得的一组取值不是最优的, 而是次优的, 但这样减小了计算量, 增强了算法的实时性, 易于工程实现.

对修正函数  $\beta$ , 我们采用 ITAE 指标在线自调整, 其中有  $\beta_0$  和  $K_\beta$  两个参数需优化. 在寻优过程中, 必须满足下列约束条件:

$$0 \leq \beta_0 \leq 0.5, 0 \leq K_\beta \leq (1 - \beta_0).$$

因此对修正函数  $\beta$  的寻优问题是一个具有不等式约束的多变量优化设计问题. 求解具有不等式约束的多变量优化方法较多, 本文采用梯度投影法<sup>[2]</sup>来对修正函数  $\beta$  进行寻优.

## 3 非线性鱼雷系统描述 (Description of nonlinear torpedo system)

### 3.1 鱼雷运动方程 (The motion equation of torpedo)

某型鱼雷非线性动力学系统可用下列状态方程组描述

$$\begin{cases} \dot{V} = (F_t + a_{16} V^2 + a_{17} \sin\theta + a_4 V \omega_z - a_9 \omega_z^2) / a_1, \\ \dot{\omega}_z = (a_{115} V^2 \alpha + a_{116} V \omega_z + a_{117} V^2 \delta_H + a_{118} \cos\theta + a_{119} \sin\theta) / c_1 - c_3 \cdot (a_{35} V^2 \alpha + a_{36} V \omega_z + a_{37} V^2 \delta_H + a_{38} \cos\theta) / c_2 + (-a_{104} V \omega_z + a_{108} V \omega_z \alpha) / c_1 + c_3 \cdot (a_{24} V \omega_z + a_{29} \omega_z^2) / c_2, \\ \dot{\alpha} = -(a_{35} V^2 \alpha + a_{36} V \omega_z + a_{37} V^2 \delta_H + a_{38} \cos\theta) / a_{21} / V - \alpha \cdot (F_t + a_{16} V^2 + a_{17} \sin\theta + a_4 V \omega_z - a_9 \omega_z^2) / a_1 / V + (a_{24} V \omega_z + a_{29} \omega_z^2 + a_{23} \omega_z) / a_{21} / V, \\ \dot{\theta} = \omega_z, \\ \dot{x} = V \cdot \cos(\theta - \alpha), \\ \dot{y} = V \cdot \sin(\theta - \alpha). \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $V$  为速度;  $\omega_z$  为俯仰角速度;  $\alpha$  为攻角;  $\theta$  为俯仰角;  $x$  为  $x$  方向坐标;  $y$  为深度; 其余系数, 如  $a_{16}$ ,  $c_1$  等, 均为常数.

在状态方程组(6)中, 有  $V^2$ ,  $\omega_z^2$ ,  $V^2 \alpha$  和  $V \omega_z \alpha$  大量非线性因子, 所以鱼雷系统呈现严重非线性.

### 3.2 推力函数 (Propulsive force function)

$$F_t = \begin{cases} 0, & t \leq t_1, \\ K \cdot K_f \cdot [1 - e^{-(t-t_1)/T_f}], & t > t_1. \end{cases}$$

式中,  $F_t$  为推力;  $t_t$  为产生推力时间;  $T_f$  为推力时间常数;  $K_f$  为推力调整系数;  $K$  为推力系数.

### 3.3 操纵机构方程 (Actuator equation)

$$T_d \cdot \delta''_H + \delta'_H = K_d \cdot u,$$

式中,  $\delta'_H(0) = 0$ ;  $\delta_H(0) = \delta_{H0}$ ;  $|\delta_{H_{max}}| \leq 10^\circ$ ;  $T_d$  为操纵机构时间常数,  $K_d$  为操纵机构放大系数.

### 3.4 鱼雷入水条件 (Initial conditions of torpedo)

$$V_0 = 21.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \theta_0 = -30^\circ \sim -35^\circ;$$

$$\alpha_0 = 0; \omega_{\alpha 0} = 0; x_0 = 0; y_0 = 0.$$

### 3.5 控制指标 (Control specifications)

在 3.4 节的入水条件下, 若设定值  $y_r = -7\text{m}$ , 则要求  $y_{\min} > -40\text{m}$ , 即最大允许袋深为  $-40\text{m}$ ; 同时要求调节时间  $t_s \leq 6\text{s}$  (到设定值的 95%).

## 4 鱼雷深度控制系统设计与仿真 (Design of torpedo depth control system and simulation)

### 4.1 说明与假定 (Illustrations and assumptions)

- 1) 设计中考虑了操纵机构的饱和特性.
- 2) 为了改善鱼雷的动态特性, 在控制系统的操纵机构前串入一个超前-滞后校正环节  $(\tau \cdot s + 1)/(T \cdot s + 1)$ , 并取  $\tau = 100, T = 0.01$ .
- 3) 在设计中考虑了从鱼雷入水到控制开始时 (1.3s) 鱼雷的运动情况, 即控制开始时鱼雷已下潜到一定深度.
- 4) 仿真中采样周期为 0.01s.
- 5) 假定鱼雷在航行过程中只有深度平面运动, 不发生滚动等交链影响.

### 4.2 系统设计与仿真 (Design of system and simulation)

下面应用第 2 节带优化修正函数的非线性 PID 控制器设计方法, 为第 3 节描述鱼雷系统设计深度控制器, 并在各种入水条件下, 对所设计的鱼雷深度控制系统进行仿真研究.

1) 在典型设计深度和典型入水条件下, 设计鱼雷深度控制器.

设定控制深度  $y_r = -7\text{m}$ , 选取鱼雷典型入水条件: 速度  $V_0 = 27\text{m/s}$ , 俯仰角  $\theta_0 = -60^\circ$ . 以此为设计状态, 为鱼雷设计深度控制器. 采用 ITAE 指标, 用离线寻优的办法, 可确定非线性 PID 控制器参数  $\{K_p, K_{\infty}, K_d, K_i\} = \{25, 40, 0.37, 0.1\}$ ; 采用 ITAE 指标, 用梯度投影法对修正函数  $\beta$  在线寻优, 优化前  $\beta_0 = 0.2, K_{\beta} = 0.42$ , 优化后  $\beta_0 = 0.4, K_{\beta} = 0.37$ . 系统响应曲线见图 2 中曲线 4, 有关数据见表 1 中状态 4 列, 可见, 控制开始时 (1.3s) 鱼雷已下潜到

-20.81m, 此刻鱼雷用最大舵角进行控制, 由于具有速度和惯性, 鱼雷仍要向下运动, 造成鱼雷袋深 -25.03m, 然后修正回设定值 -7m, 响应无超调, 调节时间为 4.37s. 图 4 给出了时间-修正函数  $\beta$  曲线, 可见, 从控制开始时刻起 (1.3s), 修正函数  $\beta$  在线调整, 系统响应稳定后, 修正函数  $\beta$  也趋于稳定.

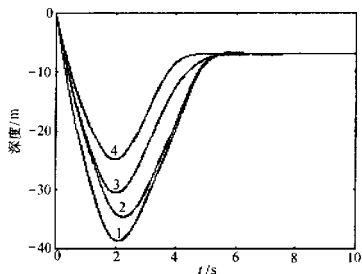


图 2 状态 1~4 下的响应曲线

Fig. 2 Response curves in states 1~4

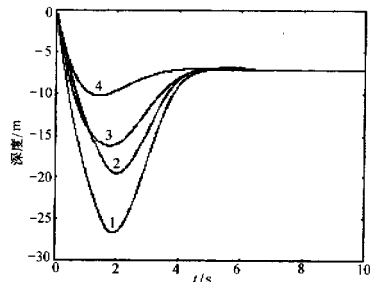


图 3 状态 5~8 下的响应曲线

Fig. 3 Response curves in states 5~8

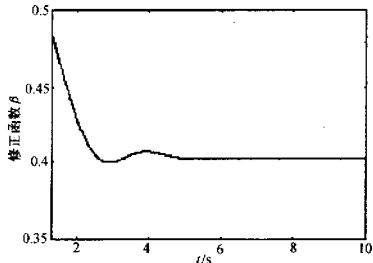


图 4 时间-修正函数  $\beta$  曲线

Fig. 4 Curve of time vs correction function  $\beta$

2) 保持设定深度和控制器参数不变, 在各种入水条件下仿真.

在 3.4 节所给的入水速度和俯仰角变化范围

内,选取典型入水状态如表1中状态1~8所示,这些状态代表了鱼雷实战时的多数状态,其中状态4为设计状态.保持设定深度和控制器参数不变,修正函数 $\beta$ 仍在线寻优,在表1所示状态下分别进行仿真.仿真曲线,控制开始时的深度、最大袋深和调节时间如表1所示.可见,在不同入水状态下,控制开

始时鱼雷下潜的深度、最大袋深及调节时间均不同.在状态1~3下,由于初始俯仰角较大且其对鱼雷深度影响最为严重,鱼雷袋深较设计状态4大,调节时间也较长.在状态6~8下,由于俯仰角较小,袋深也较小.状态5与设计状态4比较,由于初速较大,造成袋深略大,调节时间也略长.

表1 不同状态下的数据表

Table 1 Data in different initial states

状态	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta_0/\text{deg}$	-85	-85	-70	-60	-60	-52	-40	-30
$V_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	35	27	30	27	32	22	35	35
响应曲线(设定深度-7m)	图2中曲线1	图2中曲线2	图2中曲线3	图2中曲线4	图3中曲线1	图3中曲线2	图3中曲线3	图3中曲线4
控制开始时深度/m	-31.1	-26.1	-25.1	-20.8	-23.0	-16.1	-15.3	-9.1
最大袋深/m	-38.6	-34.6	-30.6	-25.0	-26.8	-19.7	-16.4	-10.2
调节时间(到95%)	5.31	5.25	5.20	4.37	4.67	4.43	4.43	3.53

从图2,图3和表1可知,用带优化修正函数的非线性PID控制器设计方法设计的非线性鱼雷弹道深度控制系统,在不同的入水条件下,都有良好的动、静态特性,都满足了控制指标要求.这说明所设计的系统对鱼雷入水条件变化具有较强的适应性.

## 5 结束语(Conclusion)

鱼雷本身是一个具有严重非线性的动力学系统,用线性控制方法对其控制,很难获得满意的控制效果,用非线性控制方案才有可能解决好其控制问题.本文用带优化修正函数的非线性PID控制方案对鱼雷弹道深度进行控制,结果表明,所设计的系统具有良好的动静特性,且对鱼雷入水条件的变化具有较强的适应性.因此,带优化修正函数的非线性PID控制方案比较好地解决了鱼雷从空投入水到设定深度上稳定航行的控制问题.

## 参考文献(References)

- [1] 章卫国,薛璞,肖顺达.带优化修正函数模糊控制规则自调整方法研究[J].西北工业大学学报,1996(增刊):160-162
- [2] 符曦.系统最优化及控制[M].北京:机械工业出版社,1995.418-422

## 本文作者简介

殷富海 1965年生,高级工程师.现为西北工业大学博士生.曾发表学术论文20余篇.研究方向:非线性控制理论和智能控制理论及应用.

章卫国 1956年生.现为西北工业大学自动控制系主任,博士,教授.曾发表学术论文50余篇和专著2本.研究方向:智能控制理论及其应用.

何长安 1937年生.教授,博士生导师.研究方向:液压控制理论和非线性控制理论及应用.