

### 一种基于 ELMAN神经网络的最优中制导律

张强<sup>1</sup>, 雷虎民<sup>1</sup>, 张武森<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051)

**摘要:** 对于中远程导弹, 为得到最优中制导弹道, 提出了一种基于 ELMAN神经网络的最优中制导律。研究和仿真分析表明这种基于 ELMAN神经网络的最优中制导律与其它末制导律配合, 可有效提高导弹拦截机动目标的性能。

**关键词:** ELMAN神经网络; 中制导律; 线性二次型高斯

**中图分类号:** V448. 13; TP183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)03-0022-04

中远程导弹弹道由3段组成: 发射阶段, 中制导段和末制导段, 导弹在中制导段的最优弹道曲线可确保末段具有更多有利的状态, 以获得更小的脱靶量和更大的剩余速度。为得到最优弹道, 本文先使用线性二次型高斯(Linear Quadratic Gaussian, LQG)最优制导律<sup>[1]</sup>计算得到弹道数据, 然后选择适合的参数作为 ELMAN神经网络的输入输出变量进行训练, 训练好的神经网络即构成一个中制导律<sup>[2,3]</sup>, 它可产生近似的最优弹道<sup>[4,5]</sup>, 这种方法的优点是训练好的神经网络在执行工作时只需存储其权值和阈值。

## 1 制导系统数学模型

战术导弹制导系统的建模与仿真, 就是建立战术导弹制导系统各组成部分的数学模型, 用这个数学模型来表示原制导系统, 根据此模型和导弹的有关原始数据进行计算机仿真, 模拟导弹的全弹道运动过程, 以此为基础, 即可进行制导系统有关问题研究。

众所周知, 导弹是一个时变的、非线性的可操纵弹性结构体, 它的数学模型是很复杂的, 不便于制导系统设计使用。目前大家都公认把导弹作为一个可操纵刚体, 据此来推导数学模型。以铅垂平面拦截目标为例, 制导系统数学模型包括导弹运动数学模型、目标运动数学模型和导弹-目标相对运动数学模型, 可详见文献[1,2,6,7], 此处不再赘述。

## 2 线性二次型高斯(LQG)最优制导规律

所谓线性二次型高斯(LQG)问题是指系统动力学方程是线性的, 性能指标函数是二次型的, 而所研究问题的随机干扰具有高斯密度函数。LQG最优制导规律是一种最小化末端脱靶量和拦截周期内控制能量消耗的最优制导规律。与PN制导规律相比, LQG最优制导规律的弹道较为平直, 机动过载较小, 弹道倾角和姿态角变化范围较小, 导弹攻角和舵偏角变化范围也较小。因此, 我们选用LQG最优制导规律作为神经网络训练样本。

可工程实现的铅垂平面简化LQG最优制导规律<sup>[1]</sup>为

$$U_c = \frac{1}{2} \Delta V_c t_{go} \ddot{q}_y + \frac{\Lambda}{2} a_{my} - \frac{\Lambda}{t_{go}^2} a_{my} D(t_{go}, \omega_{ay}) a_{my} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-04-19

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2004F19)

作者简介: 张强(1973-), 男, 陕西汉中, 讲师, 硕士, 主要从事飞行器导航、制导与控制研究;

雷虎民(1960-), 男, 陕西合阳, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器导航、制导与控制研究。

式中 
$$A = T^2 (e^{-T} - 1 + T) / (-\frac{1}{2}e^{-2T} - 2Te^{-T} + \frac{1}{3}T^3 - T^2 + T + \frac{1}{2}) \quad (2)$$

$$T = \omega_{ay} t_{go} \quad (3) \quad V_c = -\dot{R} \quad (4)$$

$$a_{my} = 2V_c = \dot{q}_y \quad (5) \quad D(t_{go}, \omega_{ay}) = \frac{1}{\omega_{ay}^2} (e^{-T} - 1 + T) \quad (6)$$

上式中:  $U_c$  为制导指令;  $\dot{R}$  为导弹-目标相对速度;  $\dot{q}_y$  和  $\ddot{q}_y$  分别为导弹-目标视线角速度和视线角加速度;  $\omega_{ay}$  为导弹制导系统通频带;  $t_{go}$  为导弹剩余飞行时间。

### 3 基于 ELMAN 神经网络的最优中制导律

ELMAN 神经网络能在有限的时间内以任意精度逼近任意函数,还能够存储信息以备未来使用,所以它不仅能够学习空域模式,也能够学习时域模式。基本的 ELMAN 网络结构见图 1 所示。它的主要结构是前馈连接,包括输入层、隐层、输出层,其连接权可以进行学习修正;反馈连接由一组“结构”单元构成,称为上下文层或状态层,用来记忆前一刻的输出值,其连接权值是固定的,上下文层内的神经元输出被前(正)向送至隐含层。如果只有正向连接是适用的,而反馈连接被预定为恒值,那么这些网络可视为普通的前馈网络,而且可以采用 BP 算法进行训练。否则,可采用遗传算法。

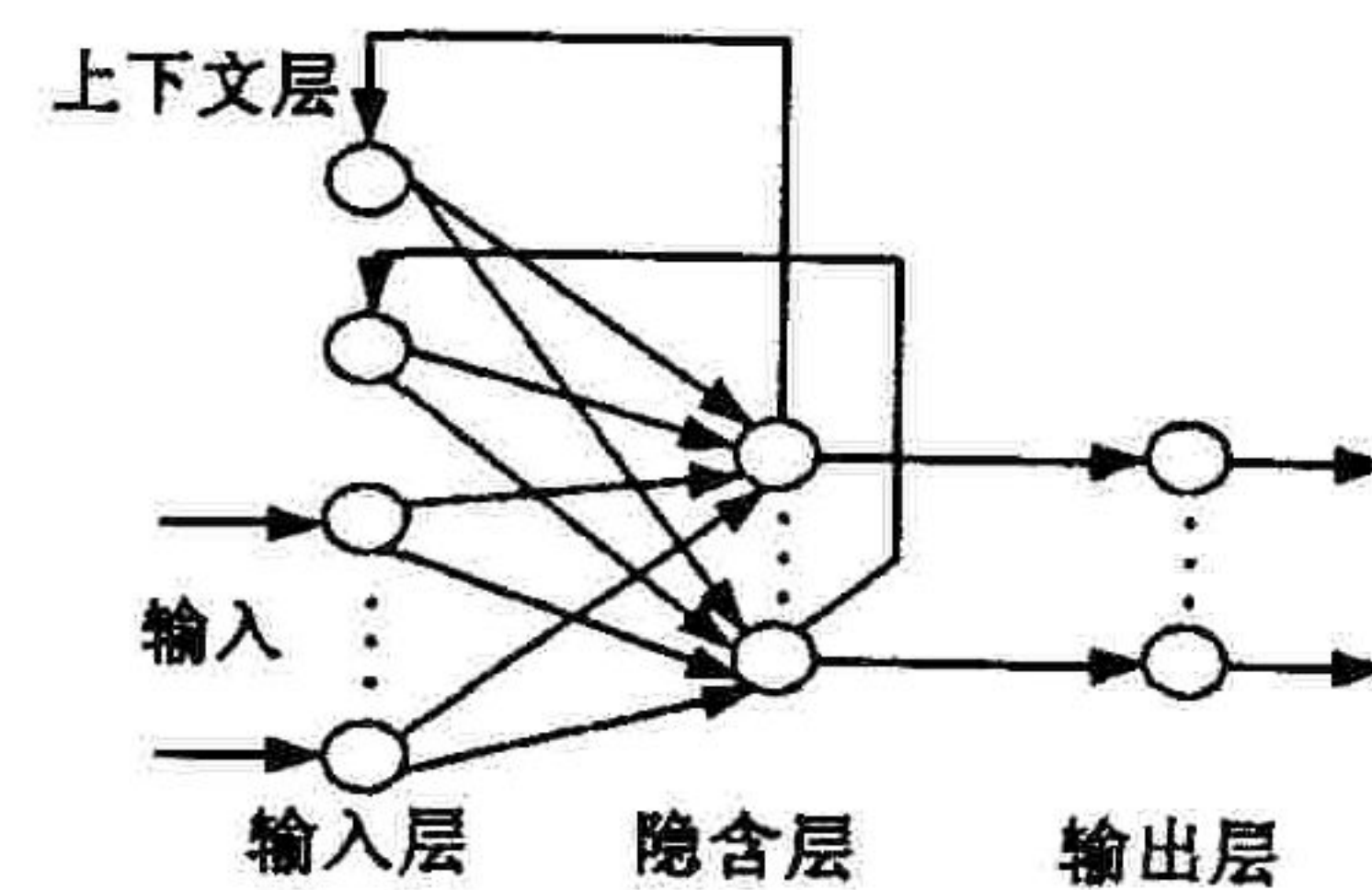


图 1 ELMAN 神经网络结构

使用 LQG 最优制导律得到中远程导弹制导的数据,取出神经网络的输入项和输出项,经训练后即得到一个训练好的网络,保存网络结构,即得到了基于神经网络的最优中制导律。使用时实时输入神经网络所需的导弹及目标状态,则神经网络会直接输出中制导指令。

基于神经网络的中制导律设计过程如下:

1) 准备训练数据。在铅垂平面制导系统数学模型中,使用 LQG 最优制导律进行中远程导弹最优弹道的计算,取导弹速度  $V_m$ 、导弹倾角  $\theta_m$ 、导弹-目标  $X$  轴位置差  $(X_m - X_t)$ 、导弹-目标  $Y$  轴位置差  $(Y_m - Y_t)$  作为神经网络的输入变量,LQG 最优制导指令  $U_c$  作为神经网络的输出变量,即构成了神经网络训练数据组  $(V_m, \theta_m, X_m - X_t, Y_m - Y_t, U_c)$ 。

2) 确定制导律的函数形式。确定基于神经网络的最优中制导律为

$$U_c = g(V_m, \theta_m, X_m - X_t, Y_m - Y_t) \quad (7)$$

由上式直接可实时得到制导指令。

3) 用最优弹道数据训练神经网络。神经网络将  $[V_m, \theta_m, X_m - X_t, Y_m - Y_t]$  作为输入变量,以  $U_c$  为输出变量来训练。最优弹道的信息被存储在训练好的神经网络的权值和阈值中。

4) 仿真计算测试神经网络性能。性能测试分为两步。第一步检测神经网络的训练程度。第二步测试神经网络的综合能力。训练好的网络经过测试和综合比较后,选取 4-10-9-1 结构的网络,目标误差为 0.000 1。

### 4 仿真及分析

对同一初始状态分别用 PN 制导规律、LQG 最优制导规律、ELMAN 神经网络中制导/PN 末制导 (NN/PN) 和 ELMAN 神经网络中制导/LQG 末制导 (NN/LQG) 4 种制导规律进行仿真计算,以导弹飞行时间  $t_f$ 、导弹终端速度  $V_f$  和终端脱靶量  $R_{Miss}$  作为衡量的性能指标。取目标初始速度为 1.2 Ma,目标初始倾角为  $0^\circ$ ,导弹初始状态的选择是任意的,更接近实际情况。仿真初试条件取导弹-目标的相对距离  $R$ ,导弹-目标视线角  $q$ ,导弹倾角  $\theta_m$  和导弹飞行高度  $Y_m$ ,机动 1 为目标不机动,机动 2 为目标作“S”型圆弧机动,机动 3 为目标作破裂“S”型圆弧机动,如表 1 所示。

全弹道数字仿真计算结果如表 2 所示。情况 1、2 为目标不机动时的仿真结果,4 种制导律都能获得比较满意的性能指标。情况 3、4 为目标作“S”型圆弧机动时的仿真结果,可发现情况 4 中 NN/PN 制导律和 NN/LQG 制导律相对于 PN 制导律和 LQG 制导律,大幅提高了导弹末段剩余速度,缩短了导弹飞行时间。情况 5、6 为目标作破裂“S”型圆弧机动时的仿真结果,同样可发现 NN/PN 制导律相对于 PN 制导律和 NN/LQG 制导律相对于 LQG 制导律在性能指标上都有了一定的提高和改善。特别是情况 5,NN/PN 制导律和 NN/LQG 制导律相对于 PN 制导律和 LQG 制导律,显著地减小了导弹脱靶量,大幅提高了导弹末段剩余速度,缩短了导弹飞行时间。分析表明应用基于 ELMAN 神经网络的最优中制导律的复合制导规律有效提高了导弹拦截机动目标的性能。

表 1 仿真初始条件

| 情况 | 机动   | 初始条件 |       |                |                 |
|----|------|------|-------|----------------|-----------------|
|    |      | R/km | q/(°) | $\theta_m/(°)$ | $Y_m/\text{km}$ |
| 1  | 机动 1 | 16.0 | 135.0 | 135.0          | 3.0             |
| 2  | 机动 1 | 18.7 | 156.4 | 159.0          | 2.6             |
| 3  | 机动 2 | 15.8 | 29.6  | 36.0           | 3.2             |
| 4  | 机动 2 | 11.3 | 192.0 | 186.0          | 6.1             |
| 5  | 机动 3 | 12.5 | 10.0  | 5.0            | 9.0             |
| 6  | 机动 3 | 15.0 | 151.0 | 159.0          | 4.6             |

表 2 仿真计算结果

| 情况 | PN      |                        |              | LQG     |                        |              | NN/PN   |                        |              | NN/LQG  |                        |              |
|----|---------|------------------------|--------------|---------|------------------------|--------------|---------|------------------------|--------------|---------|------------------------|--------------|
|    | $t_f/s$ | $V_f/(m \cdot s^{-1})$ | $R_{Miss}/m$ | $t_f/s$ | $V_f/(m \cdot s^{-1})$ | $R_{Miss}/m$ | $t_f/s$ | $V_f/(m \cdot s^{-1})$ | $R_{Miss}/m$ | $t_f/s$ | $V_f/(m \cdot s^{-1})$ | $R_{Miss}/m$ |
| 1  | 15.82   | 697.187                | 0.414 8      | 16.05   | 674.288                | 1.001 8      | 16.33   | 663.641                | 0.835 5      | 16.35   | 655.907                | 1.246 4      |
| 2  | 41.99   | 444.699                | 0.955 7      | 39.82   | 472.972                | 0.963 0      | 40.08   | 467.089                | 0.997 0      | 39.31   | 478.370                | 0.906 0      |
| 3  | 22.21   | 374.588                | 52.221 6     | 21.88   | 485.497                | 4.159 2      | 20.97   | 393.502                | 4.942 1      | 20.94   | 530.346                | 1.289 0      |
| 4  | 14.69   | 669.417                | 1.154 0      | 15.28   | 657.631                | 0.728 9      | 12.66   | 765.109                | 0.859 9      | 13.36   | 722.775                | 0.695 4      |
| 5  | 28.80   | 482.701                | 13.170 2     | 33.28   | 422.115                | 43.691 5     | 27.76   | 434.990                | 8.549 7      | 27.56   | 445.164                | 4.398 2      |
| 6  | 16.80   | 663.797                | 11.811 7     | 16.87   | 619.388                | 6.703 0      | 17.44   | 633.645                | 4.094 9      | 17.35   | 635.614                | 2.176 4      |

图 2 所示为情况 6 的制导指令、导弹状态及导弹 - 目标飞行弹道。图 2(a) 中 NN/PN 和 NN/LQG 制导指令比 PN 和 LQG 制导指令更加平稳。图 2(b) 中 NN/LQG 制导指令比 LQG 制导指令的导弹末速度有一定提高。图 2(c) 中 4 种指令制导下导弹攻角差异不太大。图 2(d) 中 NN/PN 和 NN/LQG 制导指令均能成功引导导弹拦截目标,脱靶量较 PN 和 LQG 制导指令更小。

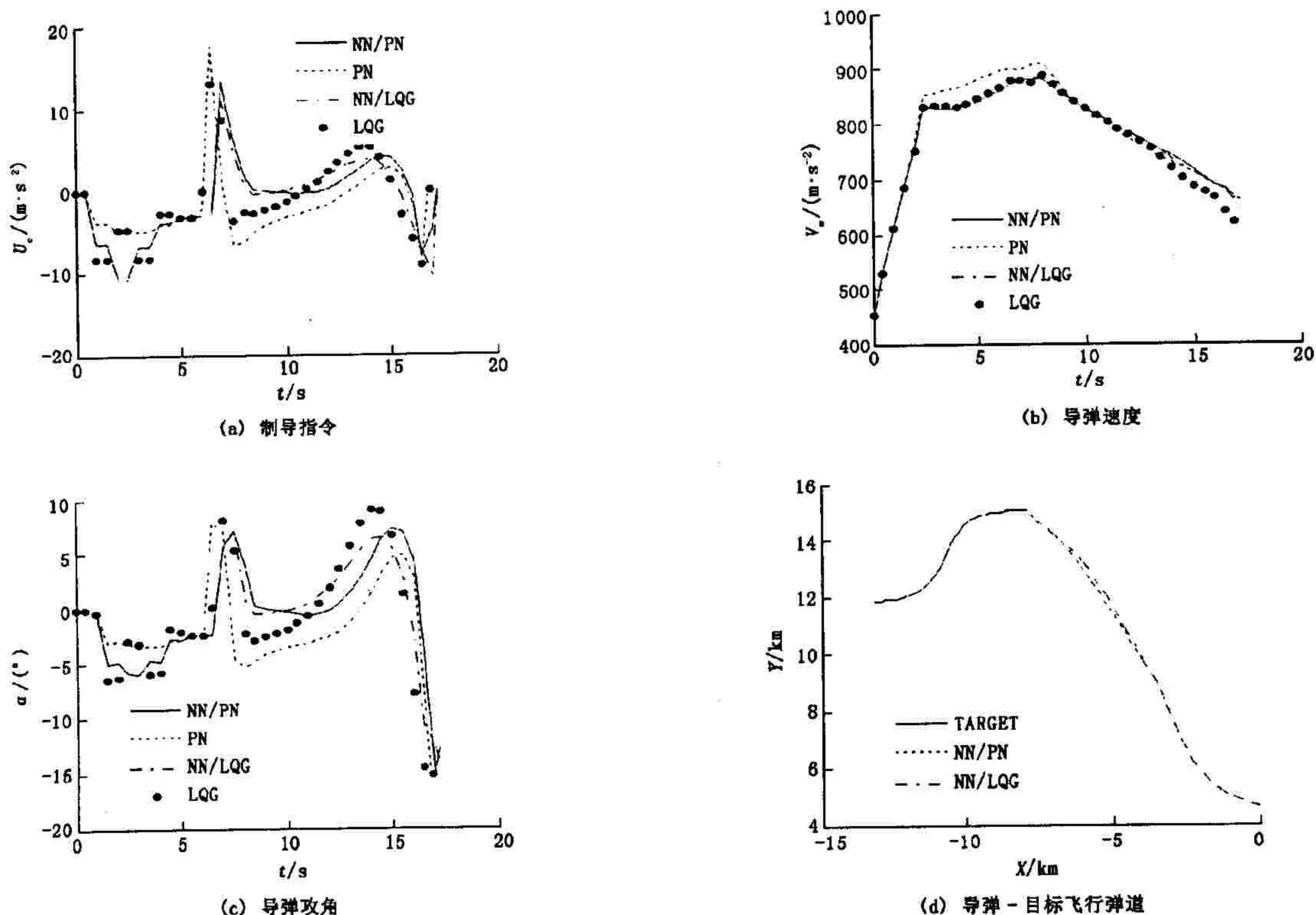


图 2 情况 6 的制导指令,导弹状态及导弹 - 目标飞行弹道

## 5 结论

通过以上分析可以看到神经网络在中远程导弹中制导律的应用前景,并得出以下结论:

1) 这种基于 ELMAN 神经网络的最优中制导律可以提高中远程导弹拦截机动目标的性能,并可在线实时工作;

2) 与基于 BP 神经网络<sup>[2]</sup>和基于 RBF 神经网络的最优中制导律相比,ELMAN 神经网络最优中制导律的训练用目标误差小,网络结构较简单,训练速度快,运算速度也较快,性能指标介于基于 BP 神经网络<sup>[2]</sup>和基于 RBF 神经网络的最优中制导律之间。

### 参考文献:

- [1] 雷虎民,梁颖亮,杨强国. 基于线性二次型高斯(LQG)理论的最优制导规律[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(2):27-30
- [2] 张强,雷虎民. 一种基于神经网络的最优中制导律[J]. 弹道学报,2004,16(2),86-91.
- [3] Song Eun - Jung, Tahk Min - Jca. Real - time Neural - Network Midcourse Guidance[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(9):1145-1154.
- [4] Lin C F, Tsai L L. Analytical Solution of Optimal Trajectory - Shaping Guidance[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1987, 10(1):61-66.
- [5] Menon P A K, Briggs M M. Near - Optimal Midcourse Guidance for Air - to - Air Missiles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1990, 13(4):596-602.
- [6] 吕学富. 飞行器飞行力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.
- [7] 雷虎民,楼顺天,陈新海. 一种攻击大机动目标的 PID 型比例导引律[J]. 西北工业大学学报(自然科学版),1999,17(1):98-102.

(编辑:田新华)

An Optimal Midcourse Guidance Law Using ELMAN Neural Network

ZHANG Qiang<sup>1</sup>, LEI Hu - rain<sup>1</sup>, ZHANG Wu - sen<sup>2</sup>

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract: This paper presents an optimal midcourse law using ELMAN neural network for midcourse phase of long - range missile. The study and simulation results show that this guidance law cooperated with others terminal guidance law can increase the performance of missile in intercepting maneuvering target.

Key words: ELMAN neural network; midcourse guidance law; linear quadratic Gaussian

### 学报自然版 2000 - 2004 年文章引用情况

学报自然版 2000 年创刊以来,刊登文章的学术质量不断提高,总被引频次增加幅度较大。他引频次不断上升。科技论文的他引频次是衡量论文学术水平和价值的一个重要标志。根据科技部信息所 2005 年的统计分析(统计截止到 2004 年),我们整理了学报自然版被引用情况。其中被其他期刊引用频次较多的作者和文章是(按被引频次排序):凌永顺,等离子体隐身及其用于飞机上的可能性;高彦奎,某型飞机起飞航迹计算分析;贺席兵,多传感器中传感器配准技术发展综述;莫卫东,Zemike 多项式拟合干涉波面的基本原则;田昌会,振动离心复合环境下科里奥利力的计算及分析;吴娟,某型飞机拦阻系统建模分析及仿真实现;蔡良才,高原机场飞机起飞着陆滑跑距离测试与分析;白渭雄,便携导弹抗击巡航导弹作战效能研究;陈绍顺,受时间约束的运输问题表上作业法;高虹霓,基于模糊 AHP 的道路选优评价方法研究;雷虎民,基于线性二次型高斯(LQG)理论的最优制导规律;李教,多平台传感器多源信息融合中的时空对准研究;李鸣,一种基于 XML 和 ADO 的异构数据库访问中间件的设计;刘昌云,多尺度小波变换在自适应滤波中的应用;刘铭,基于改进 BP 算法的装备效能评估;刘晓东,飞机可靠性与研制费用相关关系研究;邱浪波,一种应用神经网络技术的威胁估计算法;申卯兴,防空战略作战的势战模型研究;沈燕良,大孔径限流装置损失特性分析;王景,战术分组无线网分群与管理;王强,某型飞机维修备件储备量决策分析;杨增选,双曲柄机构设计的急回运动特性研究;岳韶华,基于面向对象方法的雷达航迹模拟系统设计;张克实,正交各向异性弹塑性材料拉伸径缩的数值模拟;张丽,模糊综合评价管理信息系统;张水平,数据仓库技术研究;朱绒霞,硫酸盐还原菌的腐蚀机理。

此外,学报自然版的社会影响也不断扩大,大量作者认真阅读学报发表的文章,并在其他期刊发表论文时积极引用学报已经发表的文章,其中引用学报文章较多的作者有(按引用次数排序):蔡良才,李悦,白渭雄,董杰,韩继光,刘昌云,刘少斌,陆阿坤,莫卫东,宁伟华,王强,王声,徐岩。为鼓励作者将更多优秀的稿件投送学报,提高学报的社会影响和学术质量,我们将根据以上引用情况,不断跟踪统计分析结果,适时调整发文的学科方向。对以上作者将来投给学报的文章,在保证学术质量的前提下(或与其他作者文章同等学术水平下),我们将考虑优先发表或提前发表。