动能拦截器末制导启控点的 BP网络方法

朱 波 全 权 蔡开元

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了提高拦截精度并减少燃料消耗,研究了动能拦截器 KKV (Kinetic Kill Vehicle)比例末制导律下末制导启控点的选择问题. 定义了末段制导启控时的期望位置;通过 BP(Back Propagation)网络研究期望位置和目标弹道角之间的非线性关系;利用训练后的网络输出期望位置,仿真实验证实期望位置下启控末制导,可以有效地保证拦截精度并减少末制导过程的燃料总消耗. 利用该方法获得的期望位置可以实时指导 KKV 在中末制导交班段调整自身位置.

关 键 词: 动能拦截器; 末制导; BP网络; 拦截精度

中图分类号: TP 183; TJ 765

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0332-04

BP networks method of handing-over point of KKV

Zhu Bo Quan Quan Cai Kaiyuan

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To reduce the missing distance and lessen energy consumption, the handing-over point with regard to proportional guidance law was analyzed for KKV (kinetic kill vehicle). The expected position of handing-over point was defined; the approximate nonlinear relationship between the expected position and the trajectory angles of the target was investigated by a BP neural networks. The expected position was obtained by the trained network. Simulation experiments prove that starting terminal guidance at the expected position could lessen energy consumption effectively as well as assure the required interception accuracy. The expected position obtained by this means is a real-time reference standard for adjusting the position of KKV during handing-over phase.

Key words: kinetic kill vehicle (KKV); terminal guidance; BP networks; interception accuracy

KKV (Kinetic Kill Vehicle)是一种高速飞行器,利用其巨大动能,以直接碰撞的方式 (不是战斗部爆炸的方式)摧毁来袭的目标. 美国的打靶实验表明: KKV 可有效地拦截战术弹道导弹 TBM (Tactical Ballistic Missile),也是美国国家导弹防御体系和战区导弹防御体系中发展迅速的一种防御性武器. KKV 的这种作战特点对拦截精度提出了严格的要求,即期望获得较小的脱靶量. 此外,新一代智能 KKV 也具有质量轻、成本低的特点.

目前旨在提高 KKV 拦截精度和通过减少推进剂消耗来减小 KKV 总质量的研究很多. 文献[1-2]针对大机动目标,基于比例导引的基本框架,分别提出了所谓的"新古典主义方法"(neo-classical approach)和"仅仅基于视线角测量值的零脱靶量制导律"(zero-miss-distance guidance law based on line-of-sight rate measurement only). 通过 Monte Carlo 仿真和相关分析证实改进的这两种比例导引律具有较好的拦截性能. 文献[3-7]是把最优控制、神经网络、模糊控制、变结构控制等较新的控制方法或者这些方法的组合用到制导律的设计中,并与传统的比例导引律做了对比,获得了较小脱靶量或较少的燃料消耗. 而文献[8]针对拦截三维空间中来袭的高速弹道导弹问题,在中制导段、交接班段、末制导段分别采用不同的模

收稿日期: 2006-04-18

作者简介: 朱 波 (1982-),男,湖北襄樊人,博士生, chubo@asee.buaa.edu.cn.

糊规则来设计制导律,提出所谓的“基于模糊逻辑的集成制导律”,减少了控制过程中的燃料消耗,同时获得了满意的制导精度.可以看出这些方法都是围绕制导律展开,也提出了一些现代的制导律.但这些制导律结构复杂,需要测量的参数较多,求最优解具有一定的难度,也不具备比例导引律的工程易实现性和弹道平直的优点.

本文在比例导引律下,研究末制导启控位置的选择问题.针对不同的目标弹道角,利用训练后的 BP网络输出 KKV对应的期望位置.通过仿真实验证实期望位置下启动末段寻的制导可以提高拦截精度和减少末制导过程的燃料消耗.这是保证拦截精度和减少燃料消耗量的新方法,具有计算代价小、存储代价小的优点.在保留了比例导引律优点的同时,也回避了现代制导律的一些缺点和不足.文中先介绍网络 100个训练样本的生成过程;然后介绍网络的设计和训练,并用训练后的网络获取 200组新的初值数据;再利用末制导仿真平台对新的初值数据进行仿真检验,并给出实验结果和分析.

1　训练样本的获取

1.1　研究参数

末制导启控的必要条件之一就是目标导弹落入 KKV导引头的探测范围内.本文讨论末制导启控点的选择问题,涉及 KKV和 TBM(目标导弹)的物理参数共有 18个,其中三维空间位置参数 6个,速度矢量参数 6个(速度的大小、弹道倾角和弹道偏角),KKV的姿态参数 3个(俯仰角、偏航角和滚转角),角速参数 3个.根据研究背景提供的一些参数的已知信息和参数间的相互约束,取值不定的自由参数只剩下 6个位置参数和目标的 2个弹道角参数.分别为 KKV的 3个位置参数 x_{m0}, y_{m0}, z_{m0}; TBM的 3个位置参数 x_{t0}, y_{t0}, z_{t0};目标导弹 TBM的弹道倾角 θ_{t0}和弹道偏角 ϕ_{t0}.

处理时根据 6个位置参数来定义表示二者相对位置的 3个参数 x_{t0}, y_{t0}, z_{t0},其中 $x_{t0} = x_{t0} - x_{m0}$; $y_{t0} = y_{t0} - y_{m0}$; $z_{t0} = z_{t0} - z_{m0}$.这 3个参数满足等式约束 $x_{t0}^2 + y_{t0}^2 + z_{t0}^2 = a^2$ (a是给定常数)和不等式约束 $x_{t0} > 0, y_{t0} > 0$.本文研究相对位置坐标 (x_{t0}, y_{t0})和目标弹道角 (θ_{t0}, ϕ_{t0})之间的非线性映射关系,所以确定 4个研究参数为 $\theta_{t0}, \phi_{t0}, x_{t0}, y_{t0}$.

KKV这种精确制导武器一般安装小型被动式探测器,只能测量目标—导弹之间的相对视线角(或视线角速度),可以利用角度信息估计出相对距离、相对速度、目标加速度等信息.再结合弹上惯性元件测量的位置信息和速度信息,可以预测出启控时刻目标的位置信息和速度信息.文中假设启控点目标的弹道角信息 θ_{t0}, ϕ_{t0}和位置信息 x_{t0}, y_{t0}, z_{t0}可以通过这种方式得到,而通过 BP网络训练出期望的相对位置,从而得到 KKV期望的启控位置,以此为交接班过程中 KKV位置的调整提供指导.

1.2　参数的取值范围和相关定义

根据课题背景提供的拦截模型和相关的约束条件来确定 4个参数的取值范围.其中相对位置坐标 (x_{t0}, y_{t0})在 $(0, a)$范围内取值,同时必须满足约束条件: $x_{t0}^2 + y_{t0}^2 < a^2$; θ_{t0}在 [- 40°, - 20°]范围内取值; ϕ_{t0}在 (- 180°, - 140°)范围内取值.

文中针对拦截,把满足课题背景约束的拦截弹和目标的相对位置定义为“候选位置”,根据末制导仿真结果,把满足脱靶量小于 1 m和燃料总消耗小于 3 kg时的 KKV和 TBM的相对位置定义为“期望位置”.一组目标弹道角 (θ_{t0}, ϕ_{t0})和一组相对位置坐标 (x_{t0}, y_{t0})组合产生一组 $(\theta_{t0}, \phi_{t0}, x_{t0}, y_{t0})$,构成一组末制导启控时刻的初值,对应期望位置下的初值称为“期望初值”.

1.3　选取训练样本

本文就是利用 BP网络找到期望位置坐标 (x_{t0}, y_{t0})和目标导弹弹道角 (θ_{t0}, ϕ_{t0})之间的非线性映射关系(研究模型见图 1).在各参数的取值范围内,均匀产生 100组不同的 (θ_{t0}, ϕ_{t0})和 400组不同的 (x_{t0}, y_{t0}).组合产生初值数据,按照流程图 2获得 100个“输入—目标输出”训练样本

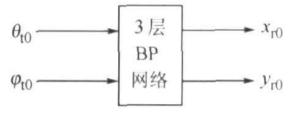

图 1　研究模型

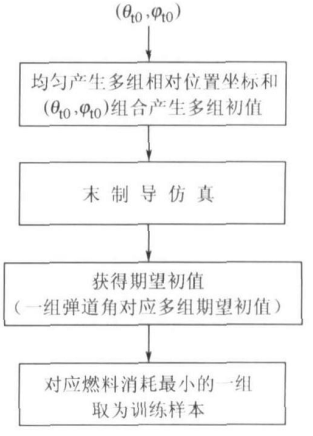

图 2　训练样本获取的流程图

$(\theta_{t0},\phi_{t0},x_{t0},y_{t0})$. 文中 P表示输入数据对 (θ_{t0},ϕ_{t0}), T表示对应的目标输出数据对 (x_{t0},y_{t0}).

1.4 训练样本预处理

网络的输入变量 P和输出变量 T相比,数量级相差较大. 为了提高网络的训练效率,文中对目标输出数据 T作归一化预处理,具体做法是令 $T^*=T/a$;而 $P^*=P$. 根据表 1中给出 a的具体含义,可知 $0<T^*<1$. 文中利用处理后的样本数据对 (P^*,T^*)来训练 BP网络.

2 BP网络

2.1 BP网络的设计

神经网络作为对人脑最简单的一种抽象和模拟,近几年来是人工智能领域中非常活跃的学科. 文献[9]指出神经网络的计算能力明显有两点:①大规模分布式结构;②神经网络的学习能力以及由此而来的泛化能力. 这两种处理能力让神经网络可以解决很多复杂的或大型的非线性问题. 在导航信息处理、模式识别、预测和控制中都有大量应用,而制导问题中也出现了各种各样的神经网络制导律.

3层 BP网络结构较为简单,且逼近性质也得到了很好的证明,所以应用最为广泛. 文中采用的 BP网络包括 3层:输入层、隐层(也称为中间层)和输出层,相关的设计参数见表 1.

表 1 BP网络的设计参数

网络参数	设定值
节点数目	[2,18,2]
隐层传递函数	$f(x)=2/(1+\exp(-2x))-1$
输出层传递函数	纯线性函数
性能函数	均方差函数(MSE)
训练算法	Levenberg-Marquardt反向传播算法
训练目标误差	0.001
训练步数	5000

注:①输入层、输出层神经元的个数由输入矢量和输出矢量的维数确定,都为 2;中间层神经元个数的选择没有理论指导,本文综合训练误差和时间的要求,通过反复实验,最终确定为 18. ②Levenberg-Marquardt反向传播算法基于 Levenberg-Marquardt优化理论对网络的权值和阈值进行调整,提高了网络的训练效率.

2.2 训练网络

随机产生各层神经元权值和阈值的初始值,根据获得的样本数据对 (P^*,T^*)来训练 BP网络. 图 3给出了训练过程中,随着训练次数的增加,网络训练误差的变化曲线. 误差定义为网络的实际输出与给定的理想输出之间的偏差. 从该图可以看出当训练次数达到 500次时,网络的输出误差已经小于设定的目标误差 0.001,记录此时网络各层的权值和阈值,网络训练结束.

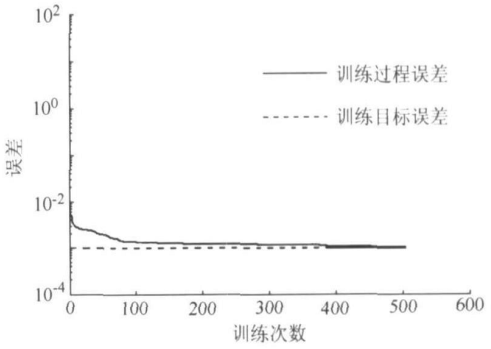

图 3 误差随训练次数变化过程

2.3 产生新的初值数据

通过改变步长的方法,均匀产生 200组新的弹道角 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}')$,作为网络的输入. 每组输入对应的网络输出值扩大 a倍得到一组 (x_{t0}',y_{t0}'),获得 200组新的初值数据 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}',x_{t0}',y_{t0}')$.

3 仿真检验

实验 1 对获得的 200组初值数据 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}',x_{t0}',y_{t0}')$进行末制导仿真;根据仿真结果把 200组初值数据对分成两类. 一类初值是有效的期望初值,共 182组,所占的比例为 91%. 对应这 182组不同的弹道角 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}')$,BP网络映射出的相对位置 (x_{t0}',y_{t0}')都是期望位置. 另一类初值是无效的期望初值,共 18组,所占的比例为 9%. 对应这 18组不同的弹道角 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}')$,BP网络映射出的相对位置 (x_{t0}',y_{t0}')都不是期望初值.

分析:实验 1说明对于 200组不同的弹道角,训练后的网络映射出期望位置的正确率是 91%. 可以证实:利用训练后的 BP网络的泛化能力,映射出 KKV末制导启控时刻的期望位置,进而获得期望初值的方法是有效的.

实验 2 针对实验 1中 182组不同的弹道角 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}')$,获得每组弹道角对应的候选位置,以此刻画候选初值点所在的初值空间. 然后对获取的大量候选初值进行末制导仿真,记录仿真结果. 设第 i组弹道角下,均匀生成的候选初值的组数设为 N_i,对应 N_i组仿真结果. 考察该组弹道角下,网络生成的初值 $(\theta_{t0}',\phi_{t0}',x_{t0}',y_{t0}')$的燃料消耗量在 N_i组燃料值中的升序排名情况(排名越靠前说明与候选初值相比,网络生成的期望初值的燃料消耗越少).

实验 2网络训练样本的特点是精度满足要求,而燃料消耗在众多的候选样本中是最小的. 这样提取样本的目的就是希望根据训练后的网络获

得的期望初值在达到拦截精度的要求下,最大限度地节省燃料.

182组数据的排名信息统计情况见表 2,排在前 5%的共有 65组,所占比例为 35%,排在前 20%共有 155组 (包括排在前 5%的组数),所占比例为 85%,排在前 50%的共有 179组,所占比例为 98%.

表 2　182组数据排名信息统计表

排名类型	总组数 n	所占比例 (n/182) /%
前 5%	65	35
前 20%	155	85
前 50%	179	98
后 50%	3	2

分析:实验 2的统计结果说明利用训练后的 BP网络获取的期望初值与众多的候选初值相比有效地减少了燃料消耗.

4　结 束 语

本文的研究对象是末制导启控点的 4个参数,目的旨在提高 KKV的拦截精度和减少燃料.借助 BP网络这种智能工具,研究了描述相对位置的两个坐标参数与 TBM两个弹道角之间的关系.

网络的输出结果证实了 BP网络方法的有效性;末制导的仿真结果显示了期望位置下启控在保证拦截精度和减少燃料消耗这两个方面的明显效果.可以看出这种初值产生方法计算代价小,实时应用中也只需很小的内存空间来保存训练好的网络的权值和阈值.在中末制导交接班段,利用获取的期望位置可实时指导 KKV调整自身位置,顺利完成交班任务.

虽然本文的仿真研究是在比例导引律下完成的,但从研究的机理可以看出,这种研究方法也可以与其他导引律结合,因此具有一定的推广性.

参考文献 (References)

[1] Pini Gurfil, Jodorkovsky M, Guelman M. Neoclassical guidance for homing missiles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(3): 452 - 459

[2] Pini Gurfil Zero-miss-distance guidance law based on line-of-sight rate measurement only[J]. Control Engineering Practice, 2003, 1(17): 819 - 832

[3] 李振营,沈毅,胡恒章.攻击机动目标的最优导引规律研究[J].哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(6): 56 - 58
Li Zhenying, Shen Yi, Hu Hengzhang An optimal guidance law for interception of maneuvering targets [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(6): 56 - 58 (in Chinese)

[4] 邱玲,沈振康. KKV小型化的神经网络制导规律研究[J].宇航学报, 2000, 21(4): 124 - 128
Qiu Ling, Shen Zhenkang Minimizing KKV size using neural networks [J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(4): 124 - 128 (in Chinese)

[5] 董朝阳,景韶光,王青,等.基于模糊神经网络的导弹最优寻的末制导律[J].北京航空航天大学学报, 2002, 28(4): 373 - 375
Dong Chaoyang, Jing Shaoguang, Wang Qing, et al Optimal terminal missile guidance law based on fuzzy neural networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(4): 373 - 375 (in Chinese)

[6] Lin C, Chen Y. Design of fuzzy logic guidance law against high speed target [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(1): 17 - 25

[7] 周荻, 幕春棣.被动式寻的导弹的运动跟踪变结构制导[J].航空学报, 1998, 19(2): 179 - 183
Zhou Di, Mu Chundi Motion tracking variable structure guidance for passive homing-missile[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(2): 179 - 183 (in Chinese)

[8] Lin Chunliang, Hung Haozhen, Chen Yungyue. Development of an integrated fuzzy-logic-based missile guidance law against high speed target [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, 12(2): 157 - 169

[9] Haykin S.神经网络原理[M].第 2版.叶世伟译.北京:机械工业出版社, 2004
Haykin S. Neural Networks: a comprehensive foundation[M]. 2nd edition. Translated by Ye Shiwei Beijing: China Machine Press, 2004

(责任编辑:张　婧)