三维真比例导引律大气层外拦截真任意机动目标的性能分析

黎克波¹, 梁彦刚¹, 苏文山¹, 陈磊^{2*}

1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073;

2. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071

* E-mail: chenl@nudt.edu.cn

doi: 10.1360/N092018-00306

大气层外动能拦截技术是弹道导弹防御技术研究的重难点问题. 由于外层空间可以忽略气动力影响, 动能拦截器通常采用真比例导引律(true proportional navigation, TPN)进行制导控制. TPN指令加速度方向垂直于当前弹目视线(line-of-sight, LOS), 大小与视线转率成正比, 具有结构简单、易于实现、鲁棒性好等优点. TPN的制导目的是控制视线转率使其不分散, 从而使拦截器具有较小的脱靶量, 以实现目标的直接碰撞.

对TPN拦截性能的研究已经持续了数十年, 所采用的分析方法主要包括线性和非线性两种. 线性方法通常假设弹目接近速度为常数, 使弹目相对运动方程线性化, 以得到视线转率、指令加速度、脱靶量等关键性能参数的解析解. 线性方法无法保证分析结果的全局有效性. 非线性方法主要通过直接求解弹目相对运动方程, 以获得关键性能参数的闭合解; 或者采用不等式分析方法, 以求得关键性能参数的边界. 非线性方法具有全局有效性, 因而更有理论指导意义.

当前大气层外拦截的目标仍然是不具有机动能力的弹道导弹弹头, 所针对的突防手段主要是诱饵. 然而弹道导弹弹头正在向主动机动突防的方向发展, 这给动能拦截器带来了很大威胁. 针对三维空间中机动加速度方向任意、大小任意但有限的目标(本文称为“真

任意机动目标”), 使用三维TPN的动能拦截器是否还满足要求, 或者其关键性能指标需要提高到何种程度才能满足要求, 成为刻不容缓的重点研究方向.

由于弹目相对运动方程的高度非线性特性, 目前学界仅取得了TPN拦截非机动目标或机动加速度形式特定的目标的闭合解^[1,2]. 对真任意机动目标, 理论上只能通过不等式分析的方法, 推导关键性能参数的理论边界. 本文作者基于类李雅普诺夫方法(Lyapunov-like approach)^[3]和不等式分析方法, 对三维TPN拦截真任意机动目标的性能进行了深入研究. 英文刊的全文中, 首先通过定理1给出了视线转率和指令加速度的理论边界. 然后在此基础上, 通过定理2给出了三维TPN的捕获区域. 论文的研究成果可用于指导动能拦截器制导控制系统的实际工程设计工作.

英文全文中定理1指出, 当动能拦截器与目标在相向飞行(即弹目接近速度 $\dot{r} < 0$)时, 如果使三维TPN的比例导引系数 N 满足如文中式(14)所示的要求, 那么对真任意机动目标, 无论动能拦截器最终是否能拦上目标, 三维视线转率和指令加速度都存在上限(即文中式(16)和(17)). 如此, 如果能预先估计出弹道导弹弹头具有的机动能力上限, 而 N 通常取3~5, 则可推算出动能拦截器至少应具有的机动过载大小. 再取一定的工程系数因子, 则可提出可信的动能拦截器机动能力需求.

英文全文见: Li K B, Liang Y G, Su W S, et al. Performance of 3D TPN against true-arbitrarily maneuvering target for exoatmospheric interception. Sci China Tech Sci, 2018, 61: 1161–1174, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9310-5>

图 1 三维TPN的捕获区域. (a) 示意图; (b) 仿真结果

英文全文中定理2给出了三维TPN拦截真任意机动目标的捕获区域. 即: 在拦截过程中(或者说当弹目相对距离 r 大于容许脱靶量 r_{Miss} 且弹目接近速度的绝对值 $|v_r|$ 大于容许碰撞速度 $v_{r\text{Imp}}$ 时), 如果动能拦截器与目标的相对运动状态处于捕获区域内(文中式(30)所描述的相对速度平面上的区域), 并且比例导引系数 N 满足文中式(31)所示的要求, 则一定存在拦截终点时刻 t_f 使 $r(t_f) \leq r_{\text{Miss}}$ 且 $|v_r| > v_{r\text{Imp}}$.

定理2给出的三维TPN拦截真任意机动目标的捕获区域可由下式表示:

$$v_{r0} < 0, \quad v_{r0}^2 - v_{\theta0}^2 \left[1 - \left(\frac{r_{\text{Miss}}}{r_0} \right)^2 \right] > 2\alpha_r(r_0 - r_{\text{Miss}}) + v_{r\text{Imp}}^2,$$

其中, v_r 为弹目接近速度, v_θ 为视线瞬时旋转平面内垂直于视线的弹目相对速度, 下标“0”代表初始时刻, α_r

为目标沿视线方向的机动加速度的上限. 对大气层外拦截而言, $v_{\theta0} = r_0 \omega_{s0}$ 代表动能拦截器的初始对准偏差, 与 v_{r0} 相比其值为小量, 因此上式很容易满足. 由定理2可知, 一旦弹目初始相对条件位于捕获区域内, 则可根据文中式(31)选择合理的 N , 以保证动能拦截器对目标的捕获.

图1给出了三维TPN捕获区域的示意图和仿真结果, 其边界为双曲线, 顶点为

$$v_{r0} = -\sqrt{2\alpha_r(r_0 - r_{\text{Miss}}) + v_{r\text{Imp}}^2}.$$

根据论文理论分析和数值仿真结果可知, 实际上三维TPN对真任意机动目标具有较强的捕获能力, 可以通过目标机动能力的先验信息, 对动能拦截器的容许过载和初始拦截几何进行设计, 以实现对其机动目标的拦截捕获.

参考文献

- 1 Guelman M. The closed-form solution of true proportional navigation. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1976, AES-12: 472–482
- 2 Yuan P J, Chern J S. Solutions of true proportional navigation for maneuvering and nonmaneuvering targets. *J Guidance Control Dyn*, 1992, 15: 268–271
- 3 Oh J H, Ha I J. Capturability of the 3-dimensional pure PNG law. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1999, 35: 491–503