

文章编号: 1004-7182(2012)02-0030-05

# 考虑局部段非线性的导弹整体动力响应计算

刘玉标, 封一鸣, 刘维玮

(中科院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京, 100190)

**摘要:** 潜射导弹高速弹射出水时, 空泡溃灭产生较大的冲击载荷, 对导弹的结构强度提出了挑战。同时现代导弹的设计要求对结构进行优化设计, 对弹体的厚度、质量均提出了要求, 因此更加精确地计算导弹出水过程中的结构响应能够为设计人员提供更准确的参考。基于导弹局部段细致有限元模型得出的非线性刚度参数, 将局部段等效为一具有非线性刚度的梁单元, 并入建立的导弹出水全过程虚拟样机模型进行计算仿真, 将结果与之前线性刚度模型的计算结果进行对比, 最后对该局部段非线性因素对全弹整体响应的影响进行讨论。

**关键词:** 导弹; 刚度非线性; 出水过程

中图分类号: V414.5 文献标识码: A

## Dynamic Response Calculations of the Whole Missile when Considering the Local Nonlinearities of the Cabin

Liu Yubiao, Feng Yiming, Liu Weiwei

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

**Abstract:** Large bending moment is produced due to bubble collapse when submarine-launched missile is ejected to pierce the water with high speed, which challenges the strength of the missile structure. At the same time the structures of the missile should be optimized according to the design principles of the contemporary missiles with the requirements of shell thickness and mass. Therefore, more accurate calculations of the dynamic response in the process of missile piercing water are needed for designers. This article simplifies the local cabin of the missile to a beam element with nonlinear stiffness matrix which is derived from the detailed FE model, and then it is incorporated in the virtual prototype of the missile which can simulate the dynamic response in the process of piercing water. The results will be compared with that derived from linear beam model. At last, the impact of these local nonlinearities on the whole body of the missile is discussed.

**Key Words:** Missile; Stiffness nonlinearities; Process of piercing water

### 0 引言

潜射导弹在出水过程中会经历环境界面变化、空泡溃灭等各种复杂的物理过程, 这些过程会导致弹体迎背水面受到幅值较大且形式复杂的脉动载荷作用<sup>[1]</sup>, 从而引起弹体结构较大的内力弯矩<sup>[2]</sup>, 对其结构强度提出了挑战。同时为了保证在一定动力条件下得到最大的运载能力, 在保证强度、刚度及使用要求的条件下, 必须使结构质量最小<sup>[3]</sup>, 这就对导弹的设计载荷值提出了更高精度的要求。设计载荷值可以由试验或者各种仿真计算得到, 仿真计算能大量减少试验的次数和成本, 是工程人员非常重视的一个领域。如何在现有的

水动力载荷数据下精确地计算结构的动力响应(尤其是横向内力响应)变得至关重要。目前许多导弹的仿真计算模型都近似采用线性模型, 能较好地模拟弹体响应趋势, 但实际结构存在一些非线性因素造成计算结果有时并不能精确反映结构的动力响应。

横向水动力载荷是潜射导弹发射过程中对结构的最大挑战, 本文仅对横向弯曲刚性非线性进行考察。基于导弹局部段三维有限元模型得出的该段整体非线性弯曲刚度参数, 提出了一种考虑局部段非线性因素的等效梁模型, 并与建立的导弹出水全过程仿真虚拟样机联合进行计算。

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-06-01

作者简介: 刘玉标(1961-), 男, 副研究员, 主要研究方向为结构动力学和多体动力学

## 1 导弹局部段有限元模型的建立与验证

### 1.1 有限元模型的建立

该局部段由上、下两个舱段组成，均为薄壁加强筋结构。相互之间通过两个“L”形端框对接，两端框之间通过若干螺栓和抗剪销连为一体。模型采用 ANSYS 软件建立，采用 Shell 181 单元模拟局部段壳体、端框和加筋结构，局部段端框之间的抗剪销采用轴向刚度及 3 个转动刚度均释放的 Beam 44 单元，此梁单元只承受横截面两个方向的剪力。连接两端框的螺栓采用三维非线性弹簧单元 Combin 39 单元模拟，并且通过自定义的加载曲线设置 Combin 39 的单元特性（本文将 Combin 39 单元设置为双线性特性弹簧，用以模拟螺栓载荷超过材料的屈服极限，进入塑性），同时将 Combin 39 设置为只承受拉力而不能抵抗压力，与实际加载时情况相同。两对接端框之间的接触行为采用 Conta 174 和 Targe 170 单元模拟。最终建立的有限元模型如图 1 所示。该局部段非线性因素主要来源于端框之间的接触行为，因接触力和接触区域事先未知，需要计算时迭代求解。其中一放大的端框部位见图 2。

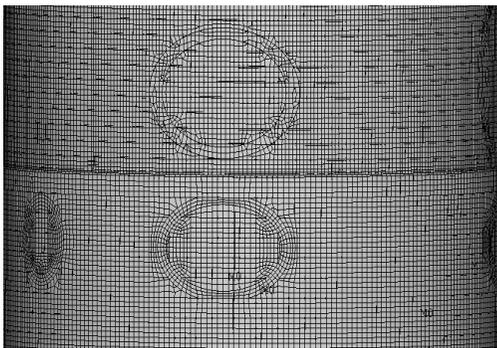


图 1 局部段整体有限元模型

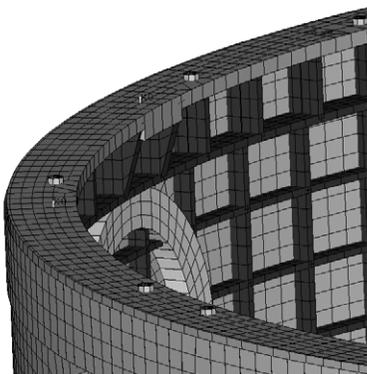


图 2 端框部位放大图

### 1.2 有限元模型的验证

为了验证本文所建立的有限元模型的正确性，模型需要与实验条件下测得结果数据进行对比验证。对该导弹局部段进行静力试验测试，加载条件为：局部段其中一舱段端面（本文称上端面）为刚性面，另一舱段端面（本文称下端面）完全固定；上端面加载弯矩 1574 kN·m，横向剪力 592 kN，方向与实际发射工况中测得的最大合力值方向相同（为了模拟此最大受载方向的刚度特性，此方向与导弹出水时迎背水面方向近似相同）；最后通过测量得到连接两端框的 12 个爆炸螺栓的拉力以及两个舱段壳体端框外沿一圈的开缝间隙随角度位置的变化值。

本文有限元模型采用 MPC 184 刚性梁单元连接刚性面中心节点和其他端面节点来模拟上端面为刚性面的特性。模型的下端面通过施加约束条件将其完全固定。模型加载与实验条件完全相同的载荷且方向一致。通过 ANSYS 计算可以得到 12 个 Combin 39 单元的载荷值，即为 12 个爆炸螺栓的拉力。图 3 为螺栓拉力的计算值与试验测得的数据进行对比，其中螺栓载荷进行了无量纲化处理  $\bar{F} = F/P_0L^2$ ，其中  $P_0$  为大气压强， $L$  为局部段长度。通过计算得到的两舱段壳体外沿开缝间隙与试验测得值的对比（见图 4），其中壳体外沿开缝间隙进行了无量纲化处理  $\bar{D} = D/L^2$ 。

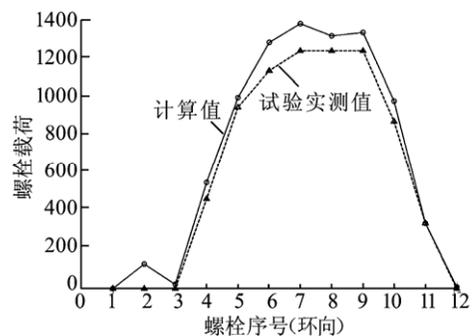


图 3 螺栓力计算值与实测值对比

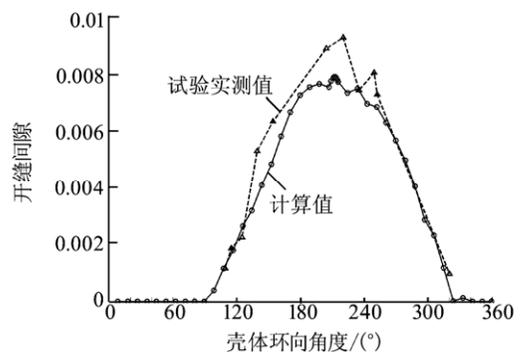


图 4 壳体外沿开缝间隙随角度变化计算值与实测值对比

由图3、图4可见,计算值与实测值总体趋势吻合得较好,鉴于工程计算中的误差,此模型在误差考虑的范围内,故可以采用本模型进行进一步仿真计算,对其刚度特性进行考察。

## 2 局部段刚度特性分析

由于该型号导弹受到较大横向水动力载荷作用,容易造成较大的弯矩,故本文针对其整体弯曲刚度的非线性特性进行考察。

对模型下端面所有自由度完全固定,将上端刚性面中心点转角作为局部段整体变形后的转角(由于局部段上、下两个端面在实际发射工况下的边界条件比较复杂,各节点的位移将有所差异,此处得出弯曲刚度时将局部段边界条件作了近似,以便于将此局部段等效为一段梁模型,接入建立的全弹线性梁模型)。对上端刚性面加载纯弯矩载荷,得出刚性面中心点转角与弯矩的关系曲线,如图5中实线所示,其中对弯矩作了无量纲化处理 $\bar{M} = M/P_0L$ 。图中还给出了按模型初始刚度给出的转角弯矩关系曲线(图中虚直线表示)。从图5中可以看到弯矩与转角的非线性关系。

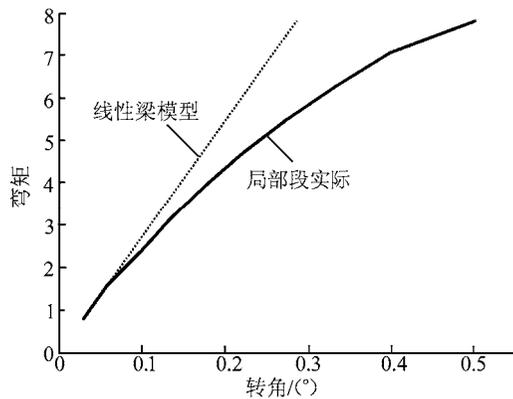


图5 局部段弯矩转角关系与线性模型对比

## 3 局部段等效梁模型的建立

第2节中得出了局部段模型在一端固定,另一端在纯弯矩载荷作用下由于整体变形引起的转角与弯矩的关系。将此边界条件下的局部段模型等效为一悬臂梁模型。利用材料力学中悬臂梁在纯弯矩载荷作用下的变形公式<sup>[4]</sup>:

$$\theta = \frac{Ml}{E \times I} \quad (1)$$

式中  $\theta$  为转角;  $M$  为弯矩;  $l$  为梁的长度;  $E, I$  分别为均匀梁的弹性模量和截面惯性矩。可以得到弯曲刚度:

$$EI = \frac{Ml}{\theta} \quad (2)$$

对于弯曲刚度不随载荷大小变化的梁来说,  $EI$  为常量,  $M-\theta$  也为线性关系。而在本模型中  $M-\theta$  为非线性关系,则对应某个弯矩或者转角的  $EI$  即为  $M-\theta$  曲线在该点坐标下的斜率,故局部段等效梁模型的非线性刚度可以通过定义  $EI$  与  $\theta$  的关系得到。

本文通过拟合  $M-\theta$  曲线,得出  $M$  与  $\theta$  的关系函数。考虑该局部段模型的弯矩与转角关系曲线,对  $M-\theta$  作了3次函数的近似拟合,即:

$$M = a \times \theta^3 + b \times \theta^2 + c \times \theta + d \quad (3)$$

进而得出  $EI$  与  $\theta$  的关系:

$$EI = \frac{Ml}{\theta} = (a \times \theta^2 + b \times \theta + c + d/\theta) \times l \quad (4)$$

式中  $a, b, c, d$  均为常系数。

为了结合下文中对全弹虚拟样机模型的结构动力学计算,需要得出该段等效梁的刚度矩阵。本文采用修改经典的纯弯欧拉-伯努利梁单元刚度矩阵得到<sup>[5]</sup>。对于仅考虑横向弯曲刚度非线性的梁来说,只需要修改刚度矩阵中的  $EI$  一项。结合 ADAMS 中对梁单元刚度矩阵的定义和自由度顺序的编排,可以得到如下  $6 \times 6$  的刚度矩阵:

$$K_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $EI$  使用式(4)替换。

至此,通过修改线性梁单元刚度矩阵中弯曲刚度  $EI$  一项,可以得到局部段等效的非线性梁单元刚度矩阵。

## 4 导弹出水全过程虚拟样机介绍

采用商用多体系统软件 MSC.ADAMS 建立导弹全过程仿真虚拟样机,样机中导弹弹体质量分布及几何外形由刚性圆环模型模拟,固接在节点上,彼此由弹性无质量梁连接,模拟弹体的频率特性。弹性体内部作用力通过无质量梁传递。导弹整体划分为  $N$  个节点,采用  $N-1$  段梁单元连接。这些梁单元均采用经典的欧拉

-伯努利线性梁模型，每一段截面均为等效的均壁圆环。此模型通过引入修正刚度的乘子，以使数字样机模型的模态与试验结果一致，在此不作详述。模型加载实际测量的外载荷数据，或者加载根据以往发射时实测的外载荷数据库人工建立的载荷模型化数据。

该模型可以计算导弹发射过程中任一时刻任一段弹体的内力以及位置、速度、加速度等各种参数。根据之前多组载荷数据计算的结果，与一些导弹实测数据的对比，该模型已经能较好地反映弹体内力响应的趋势以及弹体最大弯矩出现的位置及时刻。

## 5 局部段非线性刚度对整体响应的影响

采用非线性刚度矩阵的局部段等效梁模型替换导弹虚拟样机中对应位置的线性梁模型，保持其他段线性梁不变，样机中原有质量分布均不变化，加载某一次发射时实测的载荷数据，计算全弹出水过程动力学响应，将结果与线性梁模型样机结果进行对比。

由于原有导弹虚拟样机中该段线性梁模型的刚度与本文通过有限元模型得出的初始刚度有差异，为了对比非线性刚度对响应的影响，而不是该段梁线性刚度大小造成的差异，本文将用于对比的该段线性梁模型的刚度调为局部段有限元模型计算得出的初始刚度，即图5中虚线所示之线性梁模型。

对计算结果进行了无量纲化处理，其中无量纲化弯矩  $\bar{T} = T/P_0 L^2$ ，时间  $\bar{t} = t/t_{\text{发射}}$ ，加速度为  $\bar{a} = a/(L/t_{\text{发射}}^2)$ ， $t_{\text{发射}}$  为导弹出水过程所用时间。

图6为采用局部段等效非线性梁模型后该段本身的弯矩随时间变化曲线与线性梁模型计算结果对比，图中实线均表示为采用局部段等效非线性梁模型后的响应，虚线均表示为线性梁模型的计算结果。可以看到最大弯矩计算结果比线性梁模型要小，且最大值过后，幅值衰减得比线性模型快。

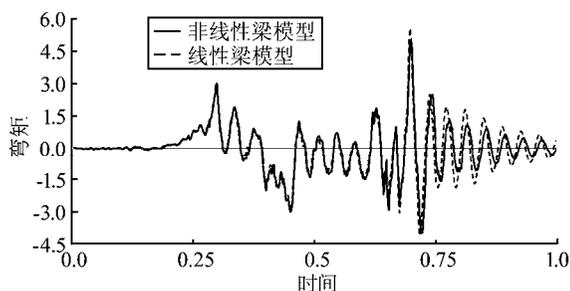


图6 局部段弯矩时程曲线对比

分别选取局部段上方和下方其中的一段梁进行对比，结果如图7、图8所示。可以发现结果与线性模型

的差异与局部段本身类似。通过观察所有位置段的弯矩，发现弹体中承受较大载荷的位置段（主要集中在弹体中部2/3弹长位置）弯矩计算结果均有所下降，与局部段本身类似，说明线性模型高估了内力弯矩值。

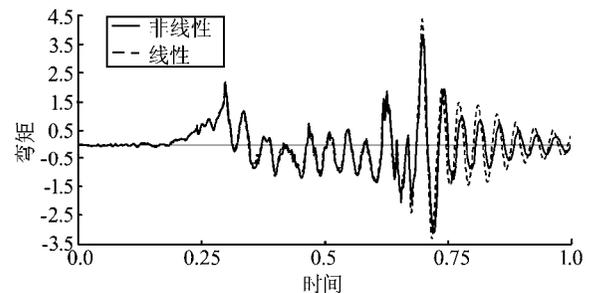


图7 局部段上方某段弯矩时程曲线对比

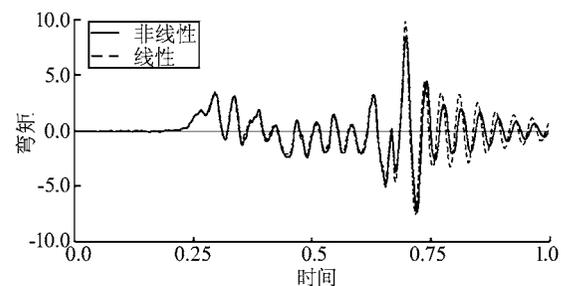


图8 局部段下方某段弯矩时程曲线对比

因弹体振动加速度的大小将影响弹体内各种精密仪器设备的工作状况，当振动加速度超过一定范围时，仪器设备将被破坏，或者导致测量不准确。所以振动加速度是评价振动特性的一个重要指标。本文对比了弹体各位置处加速度结果的差异，图9为局部段加速度结果的对比。

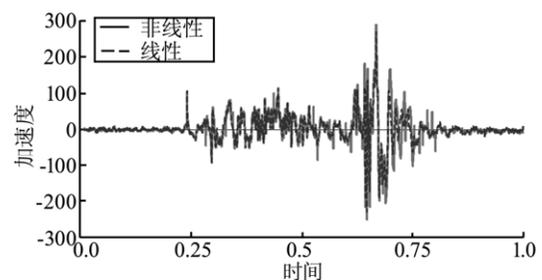


图9 局部段加速度时程曲线对比

从图9中可以看到局部段本身的最大振动加速度以及最大峰值过后的时间内加速度均比线性模型的计算结果要大，说明线性模型低估了局部段本身的振动加速度，这在设计时需要重新评估该影响。

图10、图11为局部段上方和下方某位置处的振动

加速度对比,可以发现结果与线性模型差异不大。本文观察了其他所有位置段的振动加速度,发现结果与线性模型均无大的差异,说明局部段的刚度非线性只对其本身造成了影响,而其他位置段并不敏感。

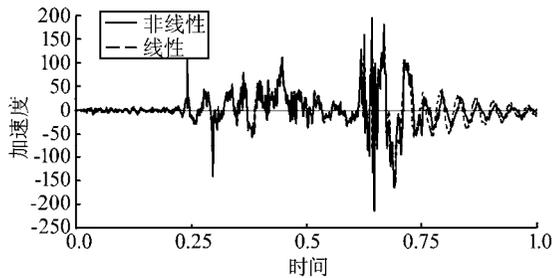


图10 局部段上方某处加速度时程曲线对比

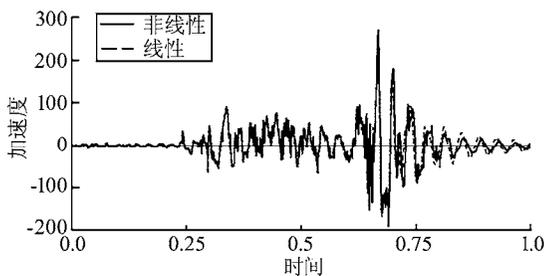


图11 局部段下方某处加速度时程曲线对比

## 6 结论

本文通过建立局部段细致有限元模型,得出了该段的整体非线性刚度特性,并将其等效为一具有非线性

性刚度的梁模型,并入导弹发射全过程仿真虚拟样机中进行计算。通过计算结果与线性模型虚拟样机进行对比,发现相比于线性模型弹体各处弯矩最大值均有所下降,且最大峰值过后的时间段内,幅值衰减得较快。另外,在振动加速度对比中,局部段非线性因素只对其本身加速度结果产生较大影响,而其他段则不是很敏感。

从文中结果可以看到,其中某一段的局部非线性对整体造成的影响并不是太大,但是导弹本身由许多这样的局部段组成,如果考虑每一段的非线性效应,同样可按照本文提出的方法进行计算。

实际导弹结构复杂,非线性特性的计算精度取决于建立的有限元模型与实际结构特性的逼近程度。局部段的等效也是一种近似。本文在对如何处理导弹连接段部位产生的非线性因素作了一种新的尝试,提出了一种新的简化的解决办法,可以作为参考。

## 参考文献

- [1] 权晓波,李岩,魏海鹏,等. 航行体出水过程空泡溃灭特性研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(4): 545-549.
- [2] 尹云玉,吕海波,李宁,等. 潜射火箭出水过程横向响应载荷研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(6): 12-16.
- [3] 王心清,李兴泉. 结构设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [5] 曾攀. 有限元分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(上接第19页)

外形、质量等参数与设计预期参数相同,目的是为了考核各系统的设计协调性、可靠度和精度,验证缩比试验和仿真试验的结果。

### 4.3 性能鉴定弹试验

性能鉴定弹试验一般采用不装战斗部导弹进行真实水下潜艇发射,侧重于导弹整个系统的发射、出水、空中飞行的各个阶段的考核。随着反导技术的不断进步,如何考核评估导弹的突防性能也日益成为重点。

## 5 结论

通过分析美国、俄罗斯、法国现役潜射战略导弹的发展历程和总体性能参数,总结出了其具有代表性的射程、精度、环境参数、发射条件等设计依据。在当前的武器装备中,美国的三叉戟 D5 的总体设计具有很强的代表性,其弹体头型设计保证了其出水载荷处于较低的水平,增加了发射的可靠性;俄罗斯的现

役潜射导弹目前仍以液体导弹为主,其突防能力和弹头当量都有着一定的技术基础;法国的 M51 具有旋转变轨、抗激光加固、突防弹头设计等特性,具有很高的突防能力。试验模式中,美国、法国开展的水下发射基础理论研究,也为其装备战斗力的形成,打下了坚实的基础。吸取这些方法中的有益因素,能为武器装备建设提供指导,为新装备的顶层设计提供支撑,形成加快发展、快速提升战斗力的局面。

## 参考文献

- [1] 李芳. 2009年国外弹道导弹发展综述[J]. 中国航天, 2010(4): 43-45.
- [2] 杨玉堃. 俄罗斯潜射战略弹道导弹的发展与前景[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2): 57-61.
- [3] 马溢清,李欣. 潜射导弹水下垂直发射方式综述[J]. 战术导弹技术, 2010(5): 124-128.
- [4] 李芳. 2008年国外战略弹道导弹发展综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(3): 60-62.
- [5] 董月娟. 美法导弹水下发射试验分析[J]. 飞航导弹, 1995(2): 4-10.