

舰炮发射动力学模块化建模方法

何斌 芮筱亭 陆毓麒 于海龙

(南京理工大学弹道研究所, 南京 210094)

摘要 在舰炮元件动力学方程的基础上,使用数值积分方法,并推广振动理论传递矩阵法,形成了舰炮发射动力学模块化建模方法——舰炮发射动力学离散时间传递矩阵法。该方法可模拟得到舰炮多体系统动力响应,仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词 发射动力学,传递矩阵,多体动力学,舰炮

引言

随着时代的发展,技术的进步和对武器系统性能要求的不断提高,现代武器对火炮设计提出了愈来愈高的要求。为了设计高性能的火炮,人们对传统火炮设计理论和弹道学不能解决的诸如射击精度、工作可靠性和发射安全性等问题的研究愈加重视,研究者将目光投向了新兴的发射动力学^[1]。

通常可借鉴多体系统动力学方法来建立舰炮动力学模型^[2],而很多科学研究和工程设计人员也提出了形式多样的多体系统动力学理论和仿真建模方法^[3,4]。所有这些方法虽风格迥异,但所走道路有如下共同点:均需列写系统的总体动力学方程,这一点是所有这些方法带有各自印记的最精彩的部分,同时也是一般技术人员感到极为费神的部分;系统总体动力学方程所涉及的矩阵阶次高(通常不小于系统的自由度数)。

由于瞬态发射过程火炮动力学也可用振动理论建立数学物理模型^[1]。考虑到振动力学传递矩阵法(TMM)系统矩阵阶次仅由子系统的微分方程的最高阶数确定,因而具有比其它动力学方法得到的矩阵阶次低、计算规模小、建模灵活的特点^[5]。A. S. Kumar^[6]首先融合传递矩阵法和数值积分法的特点提出了处理非线性结构问题的离散时间传递矩阵法(DT-TMM)。文献^[7]扩展了DT-TMM的内涵,将其应用于多体系统动力响应求解问题,于是可利用该方法研究舰炮发射动力学性态。

首先利用柔体的浮动框架建模理论得到身管悬

臂弹性梁动力学方程^[8],并利用梁振动方程最终确定描述变形的广义坐标^[9],再根据文^[7]的思想得到梁传递矩阵。由于舰炮多体系统的结构特点,将海水对船体作用看成一种分布弹性阻尼铰,而身管的后坐运动则可用滑移铰来描述,结合数值积分方法,可得到分布弹性阻尼和滑移铰的传递矩阵。最终按TMM拼装各个元件的传递矩阵得到系统总体传递方程,结合边界条件,求得舰炮多体系统发射过程的动力响应。

1 舰炮多体系统动力学模型

图1是舰炮多体系统发射动力学模型。根据舰炮系统各部件的自然属性,将其从各铰点处“截断”,把舰炮系统划分成若干个力学元件。将炮尾连同身管在摇架上滑移的部分9、不包含后坐部分的起落部分6、不包含起落部分的回转部分4、舰体和炮座2视为刚体;剩余身管11视为弹性梁。9和6之间的作用以弹性阻尼及滑移铰7与8来等效,反后坐装置的质量影响在刚体9和6中考虑,而作用力和力矩视为外力和力矩。高低机和平衡机的作用以及6与4的联接弹性和阻尼效应,用联接6与4的弹性阻尼铰5来等效。方向机的作用以及4与2的联接弹性和阻尼效应,用联接4与2的弹性阻尼铰3来等效。舰体与海水的作用,以作用在舰体2上的分布弹性阻尼铰来等价。9与11之间为固结铰10。所以舰炮系统的发射动力学模型为:在火药气体、射弹和海水作用下的以各种铰接方式相联接的多个刚体和弹性梁的复杂多体系统。

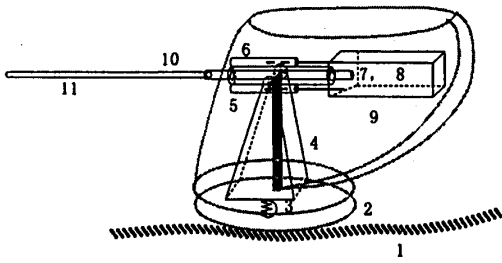


图 1 舰炮系统的发射动力学模型

Fig. 1 Shipboard gun system launching dynamics model

2 数值积分方法

根据数值积分方法, t_i 时刻的高阶运动参量 \ddot{z} 和 \dot{z} 可表示为

$$\ddot{z}(t_i) = \chi_{1..z} z(t_i) + \chi_{2..z}, \dot{z}(t_i) = \chi_{3..z} z(t_i) + \chi_{4..z} \quad (1)$$

其中 $\chi_{1..z}, \chi_{2..z}, \chi_{3..z}$ 和 $\chi_{4..z}$ 对于不同数值方法形式各异. 存在诸多广泛应用的数值积分程序可供选择^[10, 11]. 此外在对方程的离散化过程中, 对坐标转换矩阵应用 Taylor 展开理论进行了如下近似

$$A(t_i) = A\tilde{T}_1\theta_1 + A\tilde{T}_2\theta_2 + A\tilde{T}_3\theta_3 + \Phi \quad (2)$$

其中 A 为坐标转换矩阵, 具体形式和方位角定义参见文[12]. 对于方程中的高次项应用下面的差分微商代替近似公式

$$\begin{bmatrix} \theta_1^2 \\ \theta_2^2 \\ \theta_3^2 \end{bmatrix} \approx \kappa_1 \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}_{t_i} + \kappa_3, \quad \begin{bmatrix} \theta_1\theta_2 \\ \theta_2\theta_3 \\ \theta_1\theta_3 \end{bmatrix} \approx \kappa_2 \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}_{t_i} + \kappa_3 \quad (3)$$

应用上面的数值积分方法可直接对动力学方程和几何约束关系直接进行处理得到各个元件的传递方程, 该方程形式上只与元件特性和数值积分方法相关, 所以具有模块化建模的特点, 便于面向对象程序设计模式的应用, 可提高程序代码重用率. 对于不同的数值积分方法只需替换上面各式中诸如 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \chi_{1..z}, \chi_{2..z}, \chi_{3..z}$ 和 $\chi_{4..z}$ 等多项式系数即可兼容其他数值方法. 而这些系数都与当前时刻的运动参量无关, 所以可进行迭代计算.

3 典型元件传递矩阵

舰炮发射动力学离散时间传递矩阵法根据元件

(体和铰)动力学方程和约束关系, 利用数值积分方法建立各个元件的传递矩阵方程, 该方程是联系元件输入输出端状态矢量的代数线性方程组.

3.1 摇架到身管滑移铰传递矩阵

由于发射过程中与摇架接触的身管较为笨重, 将其看成刚体, 所以身管和摇架的连接关系可视为刚体到刚体的滑移铰. 该铰只有一个沿滑移方向的相对平移自由度, 连接两刚体的方位角相等, 两特征点在惯性系下的位置矢量及约束反力在垂直于滑移方向的平面内分量相等, 平行于滑移方向的约束反力都为零, 再根据对输出端力矩平衡方程即可得到联系滑移铰两端状态矢量 z_{I_1} 和 z_{O_1} 之间的 12 个关系式, 结合数值积分方法可得到摇架到身管的滑移铰传递方程

$$[U_1^{(1)}, U_1^{(2)}] \begin{bmatrix} z_{I_1} \\ z_{O_1} \end{bmatrix} = O_{12 \times 1} \quad (4)$$

从方程(4)可以看出, 由于滑移铰的连接特性使得输出端的状态矢量无法表示为输入端状态矢量的线性函数, 难以得到普遍意义下的传递矩阵. 但可得到 12 个联系两端状态矢量的线性方程组, 这里仍称之为传递矩阵.

3.2 水流到舰艇的分布弹性阻尼铰传递矩阵

根据水流对舰艇的作用特征, 舰艇移动时水流在铅锤方向对舰体的影响可视为分布弹性(浮力)和阻尼的双重效应, 而在水平面内则只有阻尼影响; 舰艇转动时航向转动考虑阻尼影响, 平摇和纵摇转动考虑分布弹性和阻尼的双重效应. 于是可得到模拟水流对舰艇作用的分布弹性阻尼铰传递方程

$$z_{O_1} = Uz_{I_1} \quad (5)$$

而水流冲击以及发动机驱动等作用可在舰艇上附加相应的力和力矩来模拟.

3.3 悬臂梁的传递矩阵

根据舰炮身管对发射弹丸的影响特性, 将其看成横向振动梁, 而忽略轴向的伸缩变形. 根据柔体一般运动的浮动框架建模理论^[8], 利用文献[9]的方法描述悬臂梁的变形位移, 状态矢量定义如下

$$z = [r_1, r_2, r_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, m_x, m_y, m_z, q_x, q_y, q_z, \varphi_1, \dots, \varphi_m, \varphi_1, \dots, \varphi_n, 1]^T \quad (6)$$

其中前 12 个分量的定义参见文[7], φ_i, φ_i 为描述变形的广义坐标. 再利用前面数值方法可得到如下形式的传递方程

$$z_{O_1} = Uz_{I_1} \quad (7)$$

其中 U 为 $(13+2n) \times (13+2n)$ 的传递矩阵.

3.4 悬臂梁输入端固接铰传递矩阵

由于悬臂梁输入铰的输入端为刚体,输出端为梁,它们之间以固结方式相联接,所以铰两端位置坐标、方位角、力和力矩都相等,而为了得到描述变形的广义坐标,将数值方法带入梁的振动方程,并用选择的形状函数可以得到悬臂梁输入端固接铰传递方程

$$z_0 = Uz_i \quad (8)$$

由于方程右边的刚体状态矢量 z_i 中不包含描述变形的广义坐标,所以最终得到悬臂梁输入端固接铰传递矩阵 U 为 $(13+2n) \times 13$ 的方阵。

对于组成舰炮系统的刚体和一般弹性阻尼铰传递矩阵可参见文[7]。

4 舰炮总体传递矩阵及动力响应求解步骤

由舰炮发射动力学模型可知刚体 2 和 4 可视为一端输入一端输出刚体,刚体 6 和 9 可视为两端输入一端输出刚体,11 为梁,1 分布弹性阻尼铰,3 与 5 为弹性阻尼铰,7 和 8 为光滑弹性阻尼复合铰,可视为弹性阻尼铰与滑移铰串联,10 为连接刚体和梁的固结铰。根据各个元件的传递方程

$$\begin{aligned} z_{0,1} &= U_{12}z_{2,1}, & z_{2,1} &= U_2z_{2,3}, & z_{2,3} &= U_3z_{4,3} \\ z_{4,3} &= U_4z_{4,5}, & z_{4,5} &= U_5z_{6,5} \\ z_{6,5} &= [U_{6,7}^1, U_{6,8}^1] \begin{bmatrix} z_{6,7} \\ z_{6,8} \end{bmatrix}, & [U_{6,7}^2, U_{6,8}^2] \begin{bmatrix} z_{6,7} \\ z_{6,8} \end{bmatrix} &= 0 \\ [U_7^{(1)}, U_7^{(2)}] \begin{bmatrix} z_{7,9} \\ z_{7,9,7} \end{bmatrix} &= 0, & [U_8^{(1)}, U_8^{(2)}] \begin{bmatrix} z_{7,9,8} \\ z_{7,9,8} \end{bmatrix} &= 0 \\ z_{9,10} &= [U_{9,7}^1, U_{9,8}^1] \begin{bmatrix} z_{7,9,7} \\ z_{7,9,8} \end{bmatrix}, \\ [U_{9,7}^2, U_{9,8}^2] \begin{bmatrix} z_{7,9,7} \\ z_{7,9,8} \end{bmatrix} &= 0 \\ z_{6,7} &= U_7z_{7,9,7}, & z_{6,8} &= U_8z_{7,9,8}, & z_{11,10} &= U_{10}z_{9,10} \\ z_{11,0} &= U_{11}z_{11,10} \end{aligned} \quad (9)$$

可得系统总体传递方程

$$U_{all}z = 0 \quad (10)$$

其中

$$z = [z_{0,1}^T, z_{7,9,7}^T, z_{7,9,8}^T, z_{9,7}^T, z_{9,8}^T, z_{11,0}^T]^T \quad (11)$$

结合系统边界条件,象 TMM 一样,可得到一组封闭的线性方程组,求解得到系统边界上的未知量,再利用各个元件的传递矩阵可求解系统动力响应。

5 舰炮多体系统发射动力学仿真

在计算机上进行求解舰炮多体系统发射动力响应,可按下面的步骤进行:

- 1) 确定系统的初始条件和边界条件,令 $i=1$;
- 2) 求得线性化方法中的各种系数;
- 3) 求出各元件的传递矩阵,并拼凑成系统总的传递矩阵;
- 4) 应用边界条件和总的传递矩阵,求得边界上状态矢量中的未知量;
- 5) 根据传递关系依次计算得到 t_i 时刻各个元件特征点上的状态矢量,进而可以通过简单的几何变换得到元件上其他点的动力学响应;
- 6) 利用 t_i 时刻的状态矢量计算位移和转角在此时刻的一阶、二阶导数;
- 7) 令 $i=i+1$,用上一时刻的计算结果作为此时的初始条件,从 2 开始重复上述步骤,直至全部分析所需的时间为止。

在选择合适的数值积分方法的基础上,以某型大口径舰炮为例成功模拟了平射下的系统动力响应,与文献[1]中方法的计算结果完全相同,证明了方法的有效性,图 2 为后坐位移。

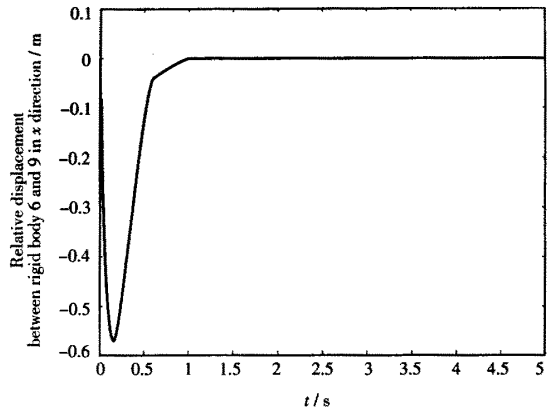


图 2 后坐位移
Fig. 2 Backlash displacement

6 结果分析

利用多体系统离散时间传递矩阵法建立了舰炮多体系统发射动力学模块化建模方法,仿真得到某大口径舰炮发射过程的动力响应。由于该方法综合了传递矩阵法和数值积分方法的特点,便于采用面向对象的设计方法,可提高代码重用率。当多体系统结构改变时,只需建立新元件的传递矩阵,再按拓扑结构拼装,即可得到总体系统传递矩阵,求解系统响应。但是由于将数值方法与动力学方程直接联系,使得传递矩阵与数值方法和动力学方程都相关,

方程物理意义不明确,所以该方法的优点在于分析拓扑结构复杂、元件性态简单的多体系统动力学问题.由于篇幅的限制,多体系统离散时间传递矩阵法计算精度及计算消耗量等相关问题将另文专门讨论.

参 考 文 献

- 1 芮筱亭. 自行火炮发射动力学研究. 兵工学报, 2000, 12: 38~40(Rui Xiaoting, Study for launch dynamics of self-propelled gun. *ACTA ARMAMENTARII*, 2000, 12: 38~40(in Chinese))
- 2 冯长根, 温波, 王茂林. 高炮发射动力学仿真技术研究. 兵工学报, 2001, 22(2): 145~149(Feng Changgen, Wen Bo, Wang Maolin, Study on simulation technology of launch dynamics for gun. *ACTA ARMAMENTARII*, 2001, 22(2): 145~149(in Chinese))
- 3 Schiehlen W. Multibody system dynamics: roots and perspectives. *Multibody System Dynamics*, 1997, 1: 149~188
- 4 Shabana AA. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments. *Multibody System Dynamics*, 1997, 1: 189~222
- 5 Pestel EC, Leckie FA. Matrix method in elastomechanics. New York: McGraw-hill, 1963. 375~410
- 6 Kumar AS, Sankar TS. A new transfer matrix method for response analysis of large dynamic systems. *Computers & structures*, 1986, 23: 545~552
- 7 Xiaoting Rui, Yuqi Lu, Ling Pan, Wenguang Lu. Discrete time transfer matrix method for multibody system dynamics. *EUROMOECH COLLOQUIUM*, 1999, 404: 93~108
- 8 Kane TR, Ryan RR, Banerjee AK. Dynamics of a cantilever beam attached to a moving base. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1987, 10(2): 139~151
- 9 Schwertassek Richard, Wallrapp Oskar, Shabana AA. Flexible multibody simulation and choice of shape functions. *Nonlinear Dynamics*, 1999, 20: 361~380
- 10 Dokainish MA, Subbaraj K. A study of direct time-integration methods in computational structural dynamics-I. Explicit methods. *J Computers & Structures*, 1989, 32(6): 1371~1386
- 11 Subbaraj K, Dokainish MA. A study of direct time-integration methods in computational structural dynamics-II. Implicit methods. *J Computers & Structures*, 1989, 32(6): 1387~1401
- 12 Kane TR, Likine PW, Levinson DA. Spacecraft dynamics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983. 530~535

A BLOCKING METHOD FOR LUNCHING DYNAMICS OF SHIPBOARD GUN

He Bin Rui Xiaoting Lu Yuqi Yu Hailong

(Trajectory Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Based on the dynamics equation of shipboard gun component, by using the numerical integral method and expanding the transfer matrix method of vibration mechanics, this paper established a blocking method for launching dynamics of shipboard gun, which was named the discrete time transfer matrix method for launching dynamics of shipboard gun. The method can simulate the dynamic responses of the multibody system of shipboard gun and the simulation results validated the method.

Key word launching dynamics, transfer matrix, multibody dynamics, shipboard gun