

doi: 10.7690/bgzd.2013.08.008

基于 RcurDyn 的牵引火炮动力学建模与仿真

向飞飞, 陈学军, 孙华刚, 楼红伟

(军械工程学院军械技术研究所, 石家庄 050003)

摘要: 为研究牵引火炮行驶安全性, 针对目前内支撑轮胎实物试验危险系数高等问题, 提出一种利用虚拟试验的方法来实现牵引火炮在行驶过程中爆胎。利用 PRO/E 建模软件建立了火炮的牵引模型, 通过计算得到了模型中各部件的质量和转动惯量; 运用 RecueDyn 软件建立了火炮简化模型和路面模型, 并通过仿真计算得到了火炮以不同速度牵引时发生爆胎后的运动状态, 以及在行驶过程中发生爆胎后的侧偏位移曲线、侧偏加速度曲线和纵向加速度曲线。仿真结果表明: 在较大速度行驶时火炮轮胎发生爆胎, 火炮有较大的侧向位移和纵向加速度。该研究为评价火炮在牵引过程中的安全性提供了理论依据。

关键词: 多体动力学仿真; 爆胎; 安全性

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Dynamics Modeling and Simulation of Towed Gun Driving Based on RecurDyn

Xiang Feifei, Chen Xuejun, Sun Huagang, Lou Hongwei

(Ordnance Technology Research Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: For researching the towed gun driving safety, introduce a virtual simulation method to simulate tire burst in towed gun driving. Use PRO/E software to built the model of towed gun traction, acquire part quality and moment of inertia of mode by calculation. Use RecueDyn software to establish simplified gun model and road surface model. Through simulation calculation, acquire motion state, lateral displacement curve, lateral acceleration curve and longitudinal acceleration curve when occurs tire burst in different velocity. The simulation result shows that when occurs tire burst in high velocity, the gun has large lateral displacement and high longitudinal acceleration. The research provides a theoretical basis for the safety evaluation in gun driving.

Key words: multi-body dynamics simulation; tire burst; safety

0 引言

牵引火炮是由牵引车牵引行驶的列车系统。轮胎是火炮重要组成部分之一, 主要是对火炮起支撑作用, 与路面进行接触, 缓和火炮在牵引过程中受到的冲击。轮胎性能的好坏直接影响着火炮性能的发挥, 轮胎的结构和材质又影响着轮胎的使用性能和行驶性能^[1]。目前部队牵引火炮配用的轮胎大多数是外胎内腔中以弹性海绵代替压缩气体的海绵轮胎。海绵轮胎机动性差, 生热快, 充气轮胎在这方面优势比较明显。但是普通充气轮胎战场防护性较海绵轮胎逊色, 一旦刺穿胎冠或击破胎体, 轮胎立刻无法使用。目前我军研制了一种安全防护型轮胎——内支撑轮胎, 是一种基于弹性体的防爆轮胎, 既具有充气轮胎的缓冲性能以及行驶速度快, 生热低等特点, 又具有海绵轮胎在零气压下仍能安全使用的功能。

行驶安全性是牵引火炮的重要性能指标之一, 对于牵引火炮在战场上机动和火力的发挥至关重

要。传统研究火炮行驶安全性的方法一般分为 2 种: 一是从火炮和地面的接触模型着手, 主要考虑火炮在不同路面上的行驶平顺性; 二是从轮胎受力的模型着手, 主要考虑轮胎力的变化对火炮的影响。这 2 种方法都不能很好地反映火炮行驶安全性能, 笔者将 2 种方法相结合进行联合仿真, 得到更为符合实际的仿真结果^[2]。

目前对内支撑轮胎安全性能的评价, 往往需要完成实物试验之后才能得到, 时间长、经费多, 试验盲目性大, 危险系数高。随着科学技术的不断提高, 通过虚拟试验可以得到牵引火炮在虚拟环境下爆胎的情况^[3]。

1 轮胎力学模型

火炮在牵引行驶过程中, 轮胎与地面接触, 轮胎的机械特性对火炮的牵引过程影响很大。轮胎动力学的研究包括从稳态到非稳态和从线性到非线性 2 个过程。轮胎动力学模型分为理论模型、经验模型、半经验模型和自适应模型 4 类。笔者使用的是

收稿日期: 2013-02-16; 修回日期: 2013-03-18

作者简介: 向飞飞(1986—), 男, 陕西人, 硕士, 从事武器装备仿真研究。

轮胎理论模型中的 Fiala 模型, 该模型是在简化的轮胎物理模型的基础上建立的^[4]。轮胎受力情况如图 1。

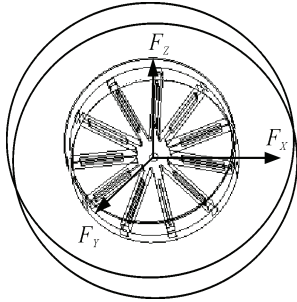


图 1 轮胎受力

1.1 轮胎垂直力

火炮轮胎的垂直力主要是由轮胎垂直刚度和垂直阻尼引起的。垂直力计算如下:

$$F_z = \min(0, \{F_{ZK} + F_{ZC}\}) \quad (1)$$

式中: \$F_{ZK}\$ 是轮胎垂直刚度引起的垂直力; \$F_{ZC}\$ 是轮胎垂直阻尼引起的垂直力。

$$F_{ZK} = -K \times \delta \quad (2)$$

式中: \$K\$ 是轮胎垂直刚度; \$\delta\$ 是轮胎偏转穿透系数。

$$F_{ZC} = \lambda \times F'_{ZC} \quad (3)$$

$$F'_{ZC} = -2.0 \times \sqrt{M \times |K|} \times C \times \delta \quad (4)$$

式中: \$M\$ 是轮胎的质量; \$C\$ 是轮胎垂向阻尼系数。其中 \$\lambda\$ 是穿透函数等级。

1.2 轮胎纵向力

火炮轮胎在运动过程中有自身的滚动和滑动 2 个过程, 首先得考虑轮胎的弹性变形。在滑动阶段: 滑移系数

$$S_{sa} = \sqrt{S_s^2 + \tan^2 \alpha} \quad (5)$$

纵向滑移阈值

$$S^*_s = \left| \frac{\mu \times F_z}{2 \times K_s} \right| \quad (6)$$

弹性变形阶段: \$|S_s| < S^*_s\$ 时

$$F_x = -K_s \times S_s \quad (7)$$

滑移阶段: \$|S_s| > S^*_s\$

$$F_x = -\text{sign}(S_s)(F_{x1} - F_{x2}) \quad (8)$$

式中: \$F_{x1} = \mu \times |F_z|\$, \$F_{x2} = \left| \frac{(\mu \times F_z)^2}{(4 \times |S_s| \times K_s)} \right|\$。\$F_z\$ 是垂

直力; \$\mu\$ 是摩擦系数; \$S_s\$ 是纵向滑移; \$\alpha\$ 是滑移角; \$K_s\$ 是轮胎纵向刚度。

1.3 轮胎侧向力

当轮胎处于弹性变形阶段时: \$\alpha \le \alpha^*\$

$$F_y = -\mu \times |F_z| \times (1 - H^3) \times \text{sign}(\alpha) \quad (9)$$

$$H = 1 - \frac{\eta \times |\tan \alpha|}{3 \times \mu \times |F_z|} \quad (10)$$

当轮胎处于滑移阶段时: \$\alpha > \alpha^*\$

$$F_y = -\mu \times |F_z| \times \text{sign}(\alpha) \quad (11)$$

\$\alpha\$ 是侧偏角, \$\alpha^*\$ 是侧偏角阈值, \$\eta\$ 是侧偏刚度系数。

1.4 回正力矩

当轮胎处于弹性阶段: \$|\alpha| \le \alpha^*\$

$$T_z = (2 \times \mu \times |F_z| \times r) \times (1 - H) \times H^3 \times \text{sign}(\alpha) \quad (12)$$

\$r\$ 为轮胎半径。

当轮胎处于滑移阶段: \$\alpha > \alpha^*\$

$$T_z = 0$$

2 火炮牵引模型的建立

2.1 火炮的实体模型

根据火炮设计图纸, 通过 PRO/E 三维建模软件建立的火炮实体模型, 如图 2 所示。

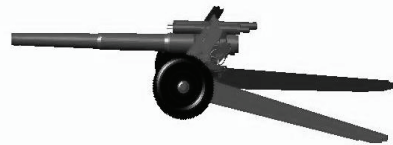


图 2 火炮三维模型

2.2 全炮模型的建立与简化

笔者主要研究轮胎的机械特性对火炮牵引过程中稳定性的影响。在不影响计算精度的情况下, 对模型进行适当简化, 可以缩短仿真计算的时间, 减少工作量。具体简化方法如下所述:

- 1) 研究火炮在牵引过程中的稳定性, 将牵引车车体简化为一个刚体;
- 2) 不考虑火炮发射过程, 省略反后座装置和平衡机;
- 3) 各连接件及螺栓在仿真过程中对仿真结果影响不大, 全部省略;
- 4) 各部件之间没有相对运动, 摩擦力忽略不计;
- 5) 不考虑驾驶员对牵引车的行驶速度影响, 速度保持恒速;
- 6) 忽略空气阻力对模型的影响。

为了提高计算精度, 将省略的零件质量平均加

到各部件上^[1]。

火炮牵引模型主要包括牵引车和火炮主体。为了研究火炮轮胎对火炮行驶稳定性的影响，将牵引车进行了简化，牵引车包括：转向系统、悬挂系统和操纵系统。火炮模型包括：左右 2 个轮胎，左右 2 个扭力杆(悬挂)，火炮身管，其他部分作为一个刚体。在 RecurDyn 软件中建立的火炮牵引模型如图 3 所示。

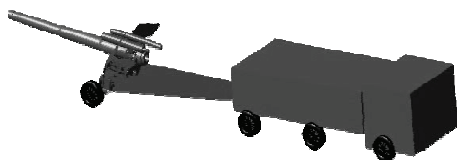


图 3 火炮牵引模型

2.3 轮胎模型

内支撑轮胎主要由胎体和轮辋组成。应用 RecurDyn 软件中的轮胎模块，选择 Fiala 轮胎模型，并设置适当的参数如表 1 所示。

表 1 轮胎参数

参数	数值
轮胎自由半径/mm	300
环形轮胎胎体半径/mm	60
轮胎垂直刚度	1 351
轮胎纵向刚度	1 200
轮胎侧偏刚度	1 000
轮胎外倾刚度	111
滚动阻力矩系数	5
轮胎径向阻尼率	0.75
无滑动摩擦系数	0.75
全滑动摩擦系数	1

2.4 路面模型

牵引车辆在路面上行驶时，路面的起伏对车辆的运动状态有重要的影响^[5-7]。根据 GB/T7031《车辆振动输入——路面不平度表示方法》的规定，将路面分为 8 个等级。根据某一等级路面不平度系数 $G_q(n_0)$ 的取值，采用有限个离散空间频率 n_k 的三角级数确定路面不平度 $q(l)$ ，再将 $q(l)$ 输入路面生成软件中，得到所需要的等级路面。

$$q(l) = \sum_{i=1}^n a_k \sin(2\pi n_k l + \beta_k) \quad (13)$$

$$a_k = \sqrt{G_q(n_0) n_0^w \left(\frac{1}{1-w}\right) (n_{ku}^{1-w} - n_{k1}^{1-w})} \quad (14)$$

式中： a_k 为路面幅值，m； l 为路面里程，m； β_k 为相角，在 $0 \sim 2\pi$ 之间随机分布变量； n 为空间频率， m^{-1} ； n_0 为参考频率， m^{-1} ； $G_q(n_0)$ 路面谱值， W 为

频率指数； n_{ku} 、 n_{k1} 为空间频率的上下限频率。

在 RecurDyn 中建立的 c 级路面模型如图 4。



图 4 路面模型

2.5 约束与驱动力的施加

根据牵引火炮各构件之间的拓补关系，为牵引火炮模型添加如下约束：轮胎与扭力杆之间添加转动副，牵引车与火炮之间添加球铰接，其他相对位置不发生变化的各构件之间添加固定副。

牵引车的驱动轮是前轮，所以在前轮与扭力杆之间的旋转副上定义驱动。该驱动的定义通过 RecurDyn 软件中的 STEP 函数来完成。STEP 函数的表达式为：

$$\text{STEP}(\text{time}, x_0, v_0, x_1, v_1)$$

该函数的含义是：在 x_0 时刻的速度为 v_0 ，在 x_1 时刻的速度为 v_1 。

轮胎爆胎采用减小轮胎自由半径的方法来实现，这需要利用 RecurDyn 软件中的 IF 函数。IF 函数的表达式为

$$\text{IF}(\text{TIME}-T: R_0, R_1, R_2)$$

该函数的含义是：当 $\text{TIME} < T$ 时，轮胎自由半径为 R_0 ；当 $\text{TIME} = T$ 时，轮胎自由半径为 R_1 ；当 $\text{TIME} > T$ 时，轮胎自由半径为 R_2 。

最终建立好的火炮牵引模型如图 5 所示。

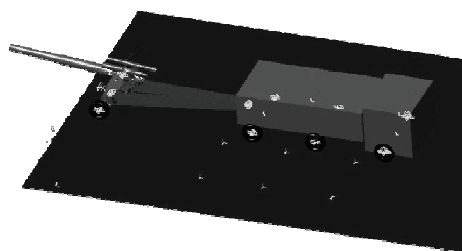


图 5 仿真模型

3 仿真与结果分析

通过仿真，得到了火炮在牵引过程中分别以 30 km/h、60 km/h、80 km/h 的速度行驶时，左边轮胎发生突然爆胎后的火炮侧滑位移曲线和侧向加速度曲线，如图 6~图 8 所示。

(下转第 42 页)