doi:10.11887/j.cn.202302024 http://journal.nudt.edu.cn

多轴特种车辆轮胎系统抗毁伤能力等毁线表征方法*

黄 通[1],高钦和[1],刘志浩[1],王 冬[1],马 栋[1],朱家萱[2]
(1. 火箭军工程大学 导弹工程学院,陕西 西安 710025;2. 中北大学 军民融合协同创新研究院,山西 太原 030051)

摘 要:为了探究战场威胁下多轴特种车辆轮胎系统的生存概率,对轮胎系统的抗毁伤能力进行量化表征,提出了一种基于等毁线的轮胎系统抗毁伤能力表征方法。针对轮胎毁伤状态下对整车的影响,基于车辆动力学对轮胎系统的力学特性进行量化表征,建立了轮胎系统功能毁伤的计算模型;采用毁伤理论对冲击波超压场进行弹目交会和量化分析,建立了轮胎系统物理毁伤的计算模型;根据爆心与车辆的位置关系,采用面向车辆全面域的计算特征线,建立了轮胎系统等毁线计算模型。以某型五轴特种车辆为例,进行了表征方法验证。研究结果表明:该表征方法可应用于战场威胁下多轴特种车辆轮胎系统的抗毁伤能力表征,为后续机动规避和防护能力提升奠定模型基础。

关键词:抗毁伤能力;物理毁伤;功能毁伤;计算特征线;等毁线
中图分类号:E92 **文献标志码**:A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:
文章编号:1001-2486(2023)02-208-07

听语音 聊科研 与作者互动

Isodamage curves characterization methods of anti-damage capability for multi-axle special vehicle tire system

HUANG Tong[1], *GAO Qinhe*[1], *LIU Zhihao*[1], *WANG Dong*[1], *MA Dong*[1], *ZHU Jiaxuan*[2]
(1. College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. Research Institute of Collaborative Innovation of Military-Civilian Integration, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to explore the survival probability of multi-axle special vehicle tire system under battlefield threat and quantitatively characterize the anti-damage capability of tire system, a new method based on isodamage curves was proposed to characterize the battlefield anti-damage capability of the tire system. Aiming at the influence of tire damage on the whole vehicle, the mechanical characteristics of tire system were quantitatively characterized based on vehicle dynamics, and the calculation model of tire system functional damage was established. Based on the damage theory, the collision and quantitative analysis of shock wave overpressure field were carried out, and the calculation model of tire system physical damage was established. According to the position relationship between the burst core and the vehicle, the calculation model of the tire system isometric line was established by using the characteristic line for the vehicle in the whole area. A five-axle special vehicle was taken as an example to verify the characterization method. Results show that this characterization method can be applied to the characterization of the anti-damage capability of the multi-axle special vehicle tire system under battlefield threat, which lays a model foundation for the improvement of maneuvering avoidance and protection ability in the future.

Keywords: anti-damage capability; physical damage; functional damage; calculate characteristic line; isodamage curves

多轴特种车辆轮胎系统作为车辆与地面唯一接触的部件,是多轴特种车辆完成大型武器系统承载和运输发射任务,实现在复杂道路工况和恶劣运行环境下高机动性和可操作性的重要保障[1-3]。与普通车辆相比,多轴特种车辆的轮胎系统具有结构尺寸大、数量多,防护能力薄弱的特点,在战场环境中极易遭受敌方各种类型的打击破坏,进而影响机动作战任务的完成。

如果能够合理表征多轴特种车辆轮胎系统的抗毁伤能力,则在进入战场环境前,就可以预先给出作战力量的生存概率,为指挥员决策提供参考。然而,目前国内外相关研究学者主要在目标毁伤评估方面进行了深入的研究,重点研究了武器装备的毁伤度[4-5],而针对武器装备的抗毁伤能力评估和表征领域的研究还相对较少。

基于此,本文采用如图1所示的研究流程,根

* **收稿日期**:2021-04-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905541);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2020JQ487);陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20190412)
作者简介:黄通(1995—),男,陕西咸阳人,博士研究生,E-mail:tongh201@126.com;
刘志浩(通信作者),男,山东德州人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:zhliu201@126.com

据多轴特种车辆面临的实际打击威胁，以大当量爆炸冲击波毁伤为作用背景；基于轮胎系统结构毁伤对整车系统的功能影响，建立轮胎系统冲击波毁伤概率模型；考虑到战场环境中，车载定位设备与来袭战斗部轨迹跟踪和爆心位置估计，提出了一种基于等毁线的抗毁伤能力表征方法，多轴特种车辆轮胎系统的等毁线表征如图 2 所示。

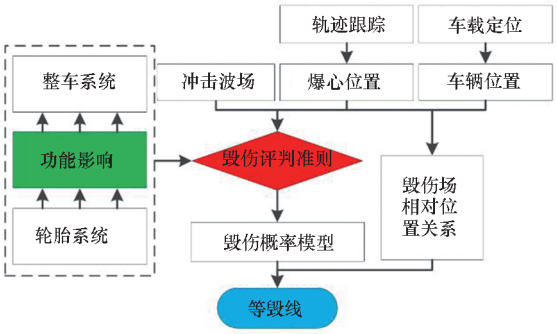


图 1　轮胎系统等毁线研究流程

Fig. 1　Research process of isodamage curves for tire system

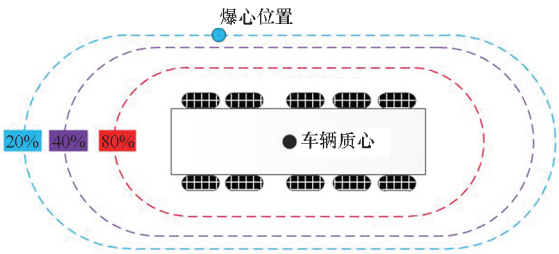


图 2　等毁线表征示意图

Fig. 2　characterization of Isodamage Curves

等毁线是把车辆周围造成轮胎系统毁伤概率相等的爆心位置连接起来的闭合曲线，基于等毁线的抗毁伤能力表征方法能够根据车辆与来袭战斗部爆心的相对位置关系，估计出车辆可能遭受的毁伤概率。本文以爆炸冲击波超压毁伤准则[6-9]为基础，基于轮胎 - 整车功能影响关系[10-12]，引入功能毁伤程度[13-14]，建立了轮胎系统毁伤评判准则，进而采用等毁线对轮胎系统的抗毁伤能力进行表征。

1　轮胎系统毁伤评判准则

1.1　轮胎系统功能毁伤程度量化

1.1.1　承载能力

设某型多轴特种车辆的轮胎系统共有 n 个轮胎，各轮胎的接地位置坐标为 $Q_i(x_{qi}, y_{qi}, z_{qi})$，车辆的质心 M 的坐标为 $M(x_m, y_m, z_m)$，则各轮胎接地位置至车辆质心的距离矢量为：

$$\boldsymbol{r}_i = (x_{qi} - x_m, y_{qi} - y_m, z_{qi} - z_m) \tag{1}$$

由于运动状态下会产生附加的动载荷，大于静止状态的轮胎力，因此采用静止状态下的轮胎即可进行计算。设静止状态下各轮胎力的作用力分别为各轮胎纵向摩擦力 f_{xi}，侧向摩擦力 f_{yi} 和垂向力 F_{zi}，则各轮胎的矢量力为：

$$\boldsymbol{F}_i = (f_{xi}, f_{yi}, F_{zi}) \tag{2}$$

即有各轮胎力对车辆质心的力矩为：

$$\boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{r}_i \times \boldsymbol{F}_i \tag{3}$$

则建立轮胎系统承载能力计算模型为：

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n} F_{zi} = mg \\ \sum_{i=0}^{n} F_{yi} = 0 \\ \sum_{i=0}^{n} F_{xi} = 0 \\ \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{0} \end{cases} \tag{4}$$

式中，m 为簧载质量。

若轮胎系统中各轮胎垂向力大于轮胎的标准最大承载力，轮胎出现爆胎，此时轮胎系统失效。即：

$$F_{zi} > F_{zmax} \tag{5}$$

式中，F_{zmax} 为轮胎的标准最大承载力。

1.1.2　驱动能力

设运动状态下各驱动轴的轮胎纵向力为 F_{xi}，各驱动轮的纵向摩擦力、非驱动轮的摩擦力以及车辆风阻等阻力总和为 f_{Fx}，即有：

$$m\dot{v} = \sum_{i=1}^{n} F_{xi} - f_{Fx} \tag{6}$$

式中，v 为车辆行驶速度，$\dot{v}$ 为速度求导。

其中，各轮胎纵向力可由轮胎魔术公式（magic formula，MF）进行求解[15]：

$$F_{xi} = f(\alpha, \lambda, F_{zi}) \tag{7}$$

式中，α 为轮胎侧偏角，λ 为轮胎滑动率。

若轮胎系统中各轮胎纵向力总和所提供的车辆行驶速度小于车辆作战所需的最小机动速度，此时轮胎系统失效。即：

$$v < v_{xmin} \tag{8}$$

式中，v_{xmin} 为车辆作战所需的最小机动速度。

1.1.3　转向能力

针对多轴特种车辆在轮胎系统毁伤状态下，可能会出现的转向侧翻现象，一般是由于车辆的一侧车轮同时离地发生的失稳，因此可以采用车辆横向载荷转移率进行侧翻分析。

目前相关研究中主要使用的侧翻评价指标为车辆横向荷载转移（lateral load transferrate，

LTR)、静态稳定因子(static stability factor, SSF)、侧翻稳定性判断(rollover stability advisor, RSA)等评价指标,本文选用 LTR 作为侧翻评价指标:

$$V_{\mathrm{LTR}}=\frac{F_{\mathrm{l}}-F_{\mathrm{r}}}{F_{\mathrm{l}}+F_{\mathrm{r}}} \tag{9}$$

式中:F_{l} 为左侧轮胎垂向力总和;F_{r} 为右侧轮胎垂向力总和;V_{LTR} 为 LTR 值,取值范围为[-1, 1]。在理想稳定状态,两侧轮胎垂向力相等,LTR 值为 0。

运动转向状态时,还应当考虑到侧倾动态作用力的影响,设 G 为车辆质心,C 为车辆侧倾中心,h 为侧倾中心到地面的高度,φ 为侧倾角,a_y 为侧向加速度,e 为侧倾中心到质心的距离,B 为车轮轴距。即有:

$$\begin{cases}F_{\mathrm{l}}\dfrac{B}{2}+ma_y e\cos\varphi+mge\sin\varphi-F_{\mathrm{r}}\dfrac{B}{2}=0\\ F_{\mathrm{l}}+F_{\mathrm{r}}=mg\end{cases} \tag{10}$$

由于侧倾角较小,可有:

$$e\cos\varphi\approx e(1-\varphi) \tag{11}$$

$$e\sin\varphi\approx e\varphi \tag{12}$$

且侧向加速度可由侧向力求解,各轮胎侧向力可由 MF 轮胎魔术公式进行求解,设运动状态下各驱动轴的轮胎侧向力为 F_{yi},则有:

$$ma_y=\sum_{i=1}^{n}F_{yi} \tag{13}$$

$$F_{yi}=f(\alpha,\lambda,F_{zi}) \tag{14}$$

结合式(10) ~ (12)可得:

$$V_{\mathrm{LTR}}=\frac{2(\varphi-1)a_y e-2g\varphi e}{gB} \tag{15}$$

若轮胎系统中 LTR 值大于车辆侧翻临界 LTR 值,此时轮胎系统失效。即:

$$|V_{\mathrm{LTR}}|>V_{\mathrm{LTR}}^{\mathrm{t}} \tag{16}$$

式中,$V_{\mathrm{LTR}}^{\mathrm{t}}$ 为车辆侧翻临界 LTR 值。

1.2 轮胎系统物理毁伤量化

1.2.1 爆心位置

多轴特种车辆的毁伤度受来袭战斗部的爆心影响较大,一般采用蒙特卡罗法(Monte-Carlo)来模拟打击威胁爆心的随机性。其计算模型为:

$$\begin{cases}x=x_0+\xi\cdot C_{\mathrm{EP}}\cdot\sqrt{(-2\ln\xi_1)}\cdot\cos(2\pi\xi_2)\\ y=y_0+\xi\cdot C_{\mathrm{EP}}\cdot\sqrt{(-2\ln\xi_1)}\cdot\sin(2\pi\xi_2)\\ z=h_0\end{cases} \tag{17}$$

式中:(x,y,z) 为来袭战斗部的爆心坐标;(x_0,y_0,h_0) 为来袭战斗部的初始瞄准坐标;ξ 为与来袭战斗部相关的经验系数,通常核打击为 1,常规打击为(0,1)、C_{EP} 为圆概率偏差;ξ_1;ξ_2 为相互独立的随机变量。

1.2.2 冲击波毁伤模型

与静态爆炸相比,来袭战斗部高速运动产生的动态爆炸冲击波的峰值超压更大,同时考虑到战斗部外壳对爆炸冲击波的影响,现有研究多采用理论公式将运动的有壳装药等效为 TNT 裸装药:

$$c_i=c\left[\frac{\chi}{\chi+1-\alpha\chi}+\frac{(a+1)(1-\chi)}{\chi+1-\alpha\chi}\left(\frac{d_0}{d_{\mathrm{m}}}\right)^{b(\gamma-1)}\right] \tag{18}$$

$$\chi=c/(c+M) \tag{19}$$

式中,a、b 为弹壳形状系数,d_0 为弹壳初始半径,d_{m} 为弹壳破裂半径,γ 为多方指数。

根据 Heenrych 公式计算爆炸冲击波超压为:

$$\Delta p_{\mathrm{m}}=\begin{cases}1.379\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}+0.543\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^2-0.035\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^3+\\ 0.000\,6\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^4,0.05\leqslant\dfrac{r}{\sqrt[3]{c_i}}<0.3\\ 0.607\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}-0.032\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^2+0.209\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^3,\\ 0.3\leqslant\dfrac{r}{\sqrt[3]{c_i}}<1\\ 0.065\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}+0.397\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^2+0.322\left(\dfrac{\sqrt[3]{c_i}}{r}\right)^3,\\ 1\leqslant\dfrac{r}{\sqrt[3]{c_i}}\leqslant10\end{cases} \tag{20}$$

式中,r 为爆心与目标的距离。

根据超压计算冲击波对目标的毁伤概率为:

$$P_{\mathrm{kc}}=\begin{cases}\dfrac{\Delta p_{\mathrm{m}}}{p_{\mathrm{t}}},\Delta p_{\mathrm{m}}\leqslant p_{\mathrm{t}}\\ 1,\Delta p_{\mathrm{m}}>p_{\mathrm{t}}\end{cases} \tag{21}$$

式中,p_{t} 为目标的抗力。

2 毁伤场相对位置关系

2.1 计算特征线的建立

由于来袭战斗部的爆心位置随机性较强,分布域较广,如果不对爆心位置进行约束,就很难获得较为准确的量化等毁线。为了能够全面地反映毁伤场的相对位置关系,考虑到多轴特种车辆轮胎系统以及整车系统的结构特点,以五轴特种车辆为例,建立了如图 3 所示的多轴特种车辆轮胎系统毁伤场计算特征线模型。

图 3 所示多轴特种车辆轮胎系统毁伤场计算

特征线分为前后左右四个区域,由两种类型组成:

1)在车辆左右区域,以车辆各轴中心线延伸建立左右区域计算特征线;

2)在车辆前后区域,以车辆纵向中心线延伸,以及两侧轮胎纵向中心线外偏 45°延伸建立前后区域计算特征线。

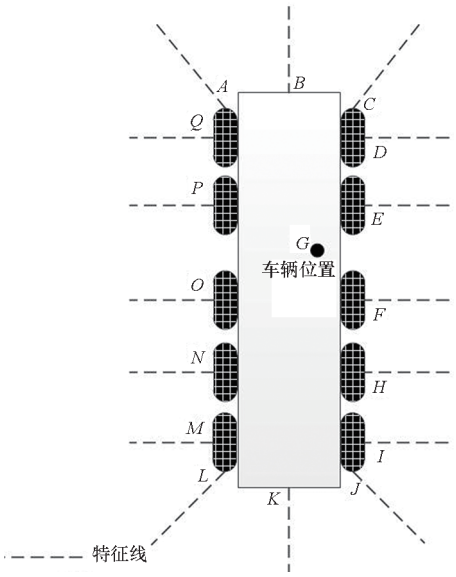


图 3　计算特征线

Fig. 3　Calculate characteristic line

2.2　位置转换

毁伤场的相对位置主要由车辆位置和爆心位置构成,其中车辆位置由车载定位设备提供,爆心位置由预警雷达提供。因此需要将车辆与爆心的相对位置转换为计算特征线起点($A,B,C,\cdots,Q$)与爆心的相对位置。

如图 4 所示,假设某型五轴特种车辆车载定位设备提供的车辆位置点为 $G(x_g,y_g,z_g)$,则根据车辆结构信息,可以得到各计算特征线起点与车辆位置点的相对关系:

$$\boldsymbol{r}_{gi}=\boldsymbol{w}_i-G \tag{22}$$

式中,$\boldsymbol{w}_i$ 为各计算特征线起点位置坐标。

则各计算特征线起点与爆心的相对位置为:

$$\boldsymbol{r}_{bi}=\boldsymbol{r}_{bg}+\boldsymbol{r}_{gi} \tag{23}$$

式中,$\boldsymbol{r}_{bg}$为爆心与车辆位置点的相对关系。

可建立表示毁伤场相对位置关系的计算特征线矩阵:

$$\boldsymbol{R}=[\boldsymbol{r}_{bA},\boldsymbol{r}_{bB},\boldsymbol{r}_{bC},\cdots,\boldsymbol{r}_{bQ}]$$

3　基于等毁线的抗毁伤能力表征方法

3.1　方法描述与假设

基于等毁线的抗毁伤能力表征方法是通过计算出特定域内(计算特征线)毁伤概率随爆距(爆心与计算特征线起点的距离)的变化规律,并将特定域内造成轮胎系统毁伤概率相等的爆心位置连接起来,形成一个闭合的曲线,然后根据车辆与来袭战斗部爆心的相对位置关系,估计出车辆可能遭受的毁伤概率,进而表征出轮胎系统的抗毁伤能力。

设各毁伤概率的等毁线形成的闭合曲线所围成的面积为 S_i,多轴特种车辆轮胎系统外边界所形成的面积为 S_0,则轮胎系统的抗毁伤能力即可采用 S_i 与 S_0 的归一化无量纲比值与相对应的等毁线概率进行表征:

$$Z=1-\sum_{i=1}^{n}(P_{kci})^{*}\left(\frac{S_i}{S_0}\right)^{*} \tag{24}$$

式中,上标“ * ”为线性归一化符号,P_{kci}为 S_i 对应的等毁线毁伤概率。

显然对于不同车辆的轮胎系统,在同概率等毁线内,Z 值越大,抗毁伤能力越强。此外,针对毁伤概率随爆距的变化规律的计算是以超压物理毁伤准则为基础,引入了多轴特种车辆轮胎系统功能毁伤程度的判断,从而建立轮胎系统毁伤评判准则。为便于开展研究,做出以下 3 点假设:

假设 1　轮胎系统独立存在,忽略车辆其他部件对轮胎系统的毁伤影响;

假设 2　轮胎系统中各轮胎规格一致,忽略毁伤对轮胎之间互换安装的影响;

假设 3　不同轮胎的毁伤作用是独立的。

3.2　方法计算流程

根据 3.1 节方法描述和相关假设,建立多轴特种车辆轮胎系统抗毁伤能力表征方法计算流程如图 4 所示,主要的计算步骤有:

步骤 1:根据车辆相关参数和轮胎结构功能参数生成完整的轮胎系统坐标矩阵 $\boldsymbol{S}_T$ 和计算特征线矩阵 $\boldsymbol{R}$,将轮胎系统进行数字化表征。

步骤 2:基于轮胎系统的损失对整车系统功能的影响,从承载能力 F_Z、驱动能力 v 和转向能力 LTR 三方面对轮胎系统功能毁伤程度进行量化计算。

步骤 3:根据来袭战斗部相关参数和轮胎系统超压 – 冲量防护性能,对轮胎系统物理毁伤程度 Δ 进行量化计算。

步骤 4:基于已建立的计算特征线矩阵和轮胎系统功能或物理的综合毁伤概率,生成轮胎系统的等毁线,计算出轮胎系统的抗毁伤能力 Z 无量纲表征。

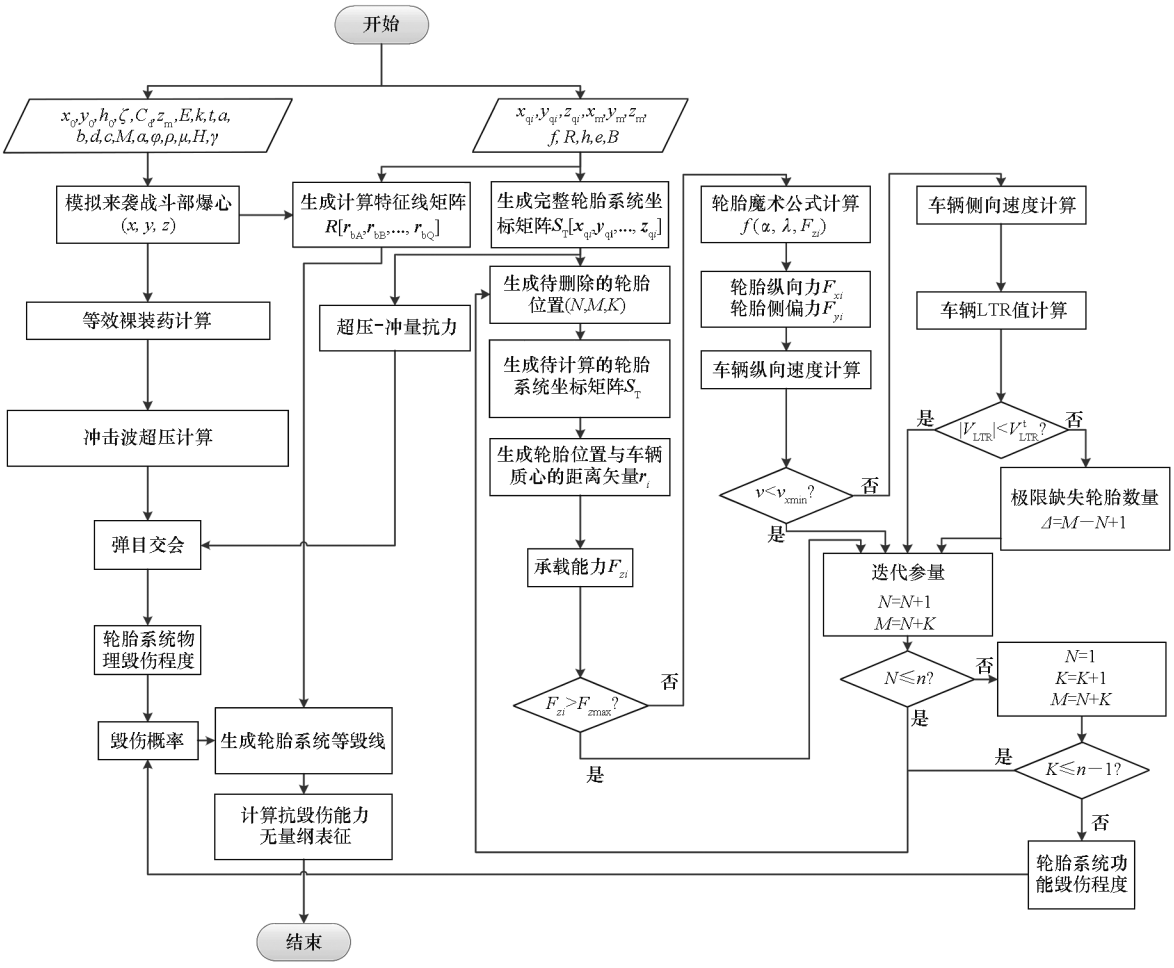


图 4　抗毁伤能力表征方法计算流程

Fig. 4　Calculation process of characterization methods for tire system

3.3　算例分析

3.3.1　输入参数

为了上述多轴特种车辆轮胎系统抗毁伤能力表征方法模型的可用性，以某五轴特种车辆为例进行计算分析。按照车辆一轴中心线为 y 轴，车辆纵向中轴线为 x 轴，垂直轮胎系统平面向上为 z 轴建立坐标系如图 5 所示，各相关输入参数如下：

特种车辆相关参数：$n=10$，$Q_1(0,1.2,0)$，$Q_2(2.2,1.2,0)$，$Q_3(6.4,1.2,0)$，$Q_4(8.6,1.2,0)$，$Q_5(10.8,1.2,0)$，$Q_6(0,-1.2,0)$，$Q_7(2.2,-1.2,0)$，$Q_8(6.4,-1.2,0)$，$Q_9(8.6,-1.2,0)$，$Q_{10}(10.8,-1.2,0)$，$m=50t$，$M(6.3,0,1.6)$，$R=0.53$，$B=2.4$，$h=1.09$，$e=0.57$，$F_{zmax}=6\ 500$ kg，$V_{LTR}^{t}=0.85$。

来袭战斗部参数：非预制自然破片杀爆战斗部，毁伤半径 80 m，$M=100$ kg，$c=154$ kg，$\gamma=1$，$V_{c}=8\ 000$ m/s，$d_0=320$ mm，$d_m=400$ mm，$\alpha=40°$，$L=1.8$ m，$d=300$ mm，$t=20$ mm，$\varphi=60°$。

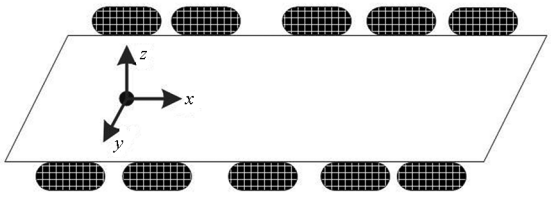


图 5　车辆坐标系

Fig. 5　Vehicle coordinate system

3.3.2　结果分析

由于车辆左右的对称性，为减少计算数据，只计算前、后域和右侧域，即计算 B、C、D、E、F、H、I、J、K 计算特征线上的毁伤概率，运算得到各计算特征线上的毁伤概率如图 6、图 7、表 1 所示。

图 6 和图 7 结果表明：

1）该型五轴特种车辆，在此类来袭战斗部的打击作用下，在距离车辆位置 25 m 以内的范围中，轮胎系统的毁伤概率为 1，即一定被摧毁；与车辆前侧毁伤概率相比，在车辆后侧和两侧毁伤概率为 1 的范围扩展到了 27 m 以内。

2）轮胎系统的毁伤概率为 10% 时，车辆前

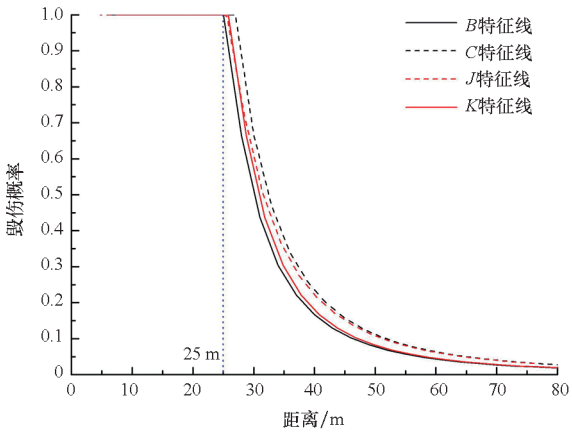


图 6　车辆前、后域计算特征线毁伤概率

Fig. 6　Damage rate of the front and rear domains

侧和后侧的距离范围为 46 m 以内;车辆两侧的范围为 60 m 以内。显然,相同爆炸距离时,车辆前侧和后侧的毁伤概率要低于车辆两侧的毁伤概率。

3)在毁伤概率为 1 所对应的最大范围之外,随着爆炸范围的增大,轮胎系统的毁伤概率快速下降;该型五轴特种车辆,在此类来袭战斗部的打击作用下,在 46 ~60 m 的范围内就可以将毁伤概率降为 10%。

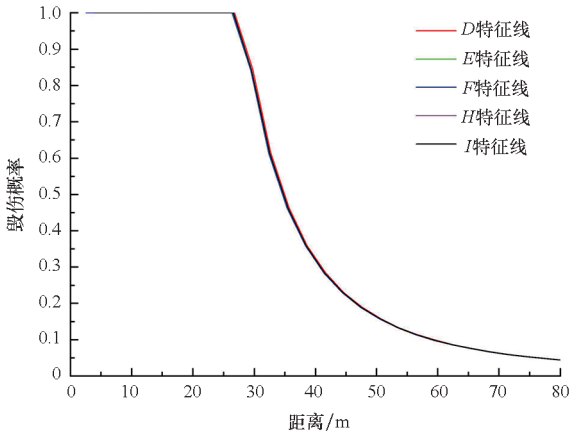


图 7　车辆右侧域计算特征线毁伤概率

Fig. 7　Damage rate of the right side domains

轮胎系统的等毁线分布如表 1、图 8 所示。根据表 1 数据,计算该型五轴车辆在此类来袭战斗部打击下的毁伤概率分布面积比如图 9 所示。

表 1　各计算特征线上的毁伤概率分布

Tab. 1　Damage probability distribution of characteristic lines

单位:m

特征线	毁伤概率					
	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
B	25.0	26.8	28.7	31.6	38.3	46.1
C	27.0	28.5	30.9	34.4	42.5	52.7
D	27.7	29.8	33.1	37.6	46.9	60.5
E	27.5	29.7	32.9	37.3	46.4	60.4
F	27.2	29.5	32.4	37.2	46.2	60.5
H	27.4	29.5	33.0	37.2	46.3	60.5
I	27.6	29.7	33.3	37.4	46.4	60.3
J	27.1	29.8	33.7	36.8	46.7	59.6
K	26.5	26.9	29.2	32.4	39.6	48.8

图 8 和图 9 结果表明,来袭战斗部爆心与车辆相对位置的分布范围,主要集中在毁伤概率为 1 和毁伤概率为 0.2、0.1 的区域,这也对应了图 7 和图 8 所示的随着爆炸范围的增大,轮胎系统的毁伤概率快速下降的现象,中度毁伤概率的爆心相对位置分布范围较小。同时计算可得该型五轴特种车辆在此类来袭战斗部的打击下,轮胎系统的抗毁伤能力为 0.277 8。按照以上计算流程,对不同型号的多轴特种车辆轮胎系统进行抗毁伤能力计算,即可对不同型号车辆的轮胎系统抗毁伤能力进行对比分级。

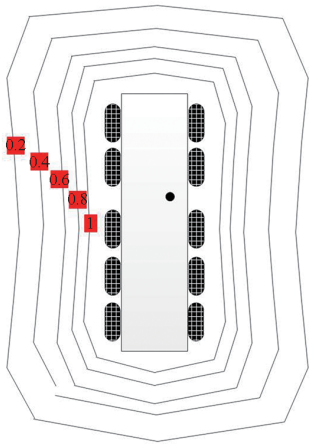


图 8　等毁线

Fig. 8　Isodamage curves

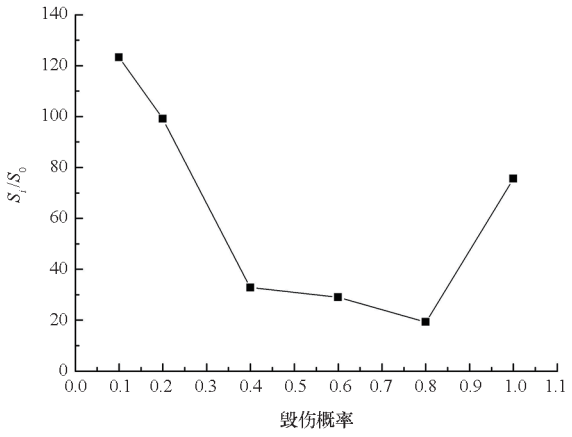


图9 抗毁伤能力表征

Fig. 9 Characterization of anti-damage capability

4 结论

1)根据多轴特种车辆面临的实际战场威胁环境,以大当量爆炸冲击波毁伤为作用背景,基于轮胎系统结构毁伤对整车系统的功能影响,以爆炸冲击波超压毁伤准则为基础,引入功能毁伤程度,建立轮胎系统冲击波毁伤概率模型。

2)根据车载定位设备与来袭战斗部轨迹跟踪和爆心位置估计,提出了一种基于等毁线的抗毁伤能力表征方法。通过以某型五轴特种车辆为例,进行了表征方法验证和算例分析,结果表明该方法可应用于战场打击威胁下多轴特种车辆轮胎系统的抗毁伤能力表征,为后续多轴特种车辆战场机动规避和防护能力提升优化奠定模型基础。

参考文献(References)

[1] 王兴东. 提高多轴重型越野车制动性能的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
WANG X D. Research on improvement of braking performance for multi-axle heavy duty off-road vehicle by theoretical and experimental methods[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)

[2] 刘志浩, 高钦和, 于传强, 等. 重载轮胎面内欧拉梁模型及耦合振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 107 – 119.
LIU Z H, GAO Q H, YU C Q, et al. In-plane Euler beam tire model and coupling vibration analysis of heavy loaded radial tire[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 107 – 119. (in Chinese)

[3] 刘志浩, 高钦和. 考虑充气压力效应的重载轮胎面内振动模态建模及参数辨识[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 184 – 192, 235.
LIU Z H, GAO Q H. Analytical modelling of in-plane vibration modes and structural parameters identification of heavy-loaded radial tires with different inflation pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(18): 184 – 192, 235. (in Chinese)

[4] 马春茂, 孙卫平, 李炎, 等. 武器装备毁伤评估研究进展[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 96 – 101.
MA C M, SUN W P, LI Y, et al. Research progress in damage assessment of weapon equipment[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(4): 96 – 101. (in Chinese)

[5] 刘飞, 汪剑辉, 周松柏, 等. 数值计算在武器效应与毁伤评估研究中的应用简析[J]. 爆破, 2021, 38(1): 153 – 158.
LIU F, WANG J H, ZHOU S B, et al. Brief application analysis of numerical computation in weapon effects and damage assessments[J]. Blasting, 2021, 38(1): 153 – 158. (in Chinese)

[6] 任辉启, 黄魁, 吴祥云, 等. 地面目标空气冲击波动压毁伤研究进展[J]. 防护工程, 2021, 43(1): 1 – 9.
REN H Q, HUANG K, WU X Y, et al. Research progress of dynamic pressure damage to ground targets by air shock wave[J]. Protective Engineering, 2021, 43(1): 1 – 9. (in Chinese)

[7] 翟成林, 陈小伟. 导弹战斗部打击下目标毁伤评估的研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(2): 166 – 180.
ZHAI C L, CHEN X W. A review on damage assessment of target hit by missile warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 166 – 180. (in Chinese)

[8] ZHAI C L, CHEN X W. Damage assessment of the target area of the island/reef under the attack of missile warhead[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 18 – 28.

[9] GU H, SONG B F. Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 106 – 111.

[10] 路永婕, 于静, 张航星, 等. 三轴重载车辆模型垂向和侧向联合动力学研究[J]. 力学与实践, 2020, 42(6): 708 – 716.
LU Y J, YU J, ZHANG H X, et al. Vertical and lateral dynamics of three-axle heavy-duty vehicle model[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(6): 708 – 716. (in Chinese)

[11] VELENIS E, TSIOTRAS P, CANUDAS-DE-WIT C, et al. Dynamic tyre friction models for combined longitudinal and lateral vehicle motion[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(1): 3 – 29.

[12] 卢荡, 卢磊, 吴海东, 等. 磨损对轮胎侧偏刚度和回正刚度影响的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(12): 174 – 183.
LU D, LU L, WU H D, et al. Study on influence of wear on tire cornering stiffness and aligning stiffness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(12): 174 – 183. (in Chinese)

[13] 李磊, 石全, 张宁, 等. 目标毁伤效果建模系统设计与实现[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 53 – 58.
LI L, SHI Q, ZHANG N, et al. Design and realization of target damage effect modeling system[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(4): 53 – 58. (in Chinese)

[14] MOBARAKI B, VAGHEFI M. Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 114 – 122.