第48卷 第4期 吉林大学学报(工学版) Vol.48 No.4
2018年7月 Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) July 2018

基于分层贝叶斯网络的车辆发动机系统电磁脉冲敏感度评估

孙晓颖,扈泽正,杨锦鹏

(吉林大学 通信工程学院,长春 130022)

摘 要:提出一种基于分层贝叶斯网络(HBN)的车辆发动机系统电磁脉冲(EMP)敏感度评估方法,从概率角度考虑电磁干扰源位置、极化角度、部件敏感度等参量的随机性,估计发动机系统在强电磁脉冲作用下的失效概率。该方法利用事件树分析(ETA)对电磁脉冲传播过程建模,确定系统周围电磁环境的风险概率,运用电磁拓扑(EMT)分析发动机系统电磁耦合途径。考虑同层单元失效的相关性,以分层贝叶斯网络为框架融合事件树和电磁拓扑理论建立发动机系统电磁脉冲敏感度评估模型,并推导了部件级至系统级的失效概率计算公式。最后以高空核电磁脉冲环境为例,说明了某型号发动机电磁脉冲敏感度评估模型的参数获取方法和模型计算过程,并以超宽带高功率微波为例,进一步说明了本文评估模型的适用性。

关键词:通信技术;系统评估与可行性分析;敏感度评估;分层贝叶斯网络;发动机系统;电磁脉冲;电磁拓扑

中图分类号:TN945 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2018)04-1254-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20170597

Assessment method of electromagnetic pulse sensitivity of vehicle engine system based on hierarchical Bayesian networks

SUN Xiao-ying, HU Ze-zheng, YANG Jin-peng

(*College of Communication and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China*)

Abstract: An assessment method of the Electromagnetic Pulse (EMP) sensitivity of vehicle engine system is proposed based on Hierarchical Bayesian Networks (HBN). Considering the randomness of the parameters such as the position of the electromagnetic interference source, the polarization angle, component sensitivity and so on, the proposed method can estimate the failure probability of the engine system under strong EMP. The EMP propagation model is established by Event Tree Analysis (ETA), and the risk probability of the electromagnetic environment is determined. The coupled path of the engine of the engine system is analyzed using the Electromagnetic Topological (EMT). By correlation of invalidation of the same layer cells, as well as HBN integrating ETA and EMT, the assessment model of engine system for EMP sensitivity is established, and the failure probability formula from the component level to system level is derived. A case study for the pulse susceptibility

收稿日期:2017-06-23.

基金项目:装备预先研究项目(30105030302).

作者简介:孙晓颖(1969-),男,教授,博士生导师.研究方向:汽车电磁兼容,无线定位技术及应用.

E-mail:sunxy@jlu.edu.cn

assessment of the vehicle engine against high — latitude EMP illustrates the model parameter acquisition method and calculation process. In addition, vulnerability of vehicle engine against Ultra Wide Band (UWB) high power microwave is also presented to demonstrate the applicability of the proposed model.

Key words: communication technology; systematic evaluation and feasibility analysis; susceptibility assessment; hierarchical Bayesian networks (HBN); engine system; electromagnetic pulse; electromagnetic topology

0　引　言

在未来战场中，高空核电磁脉冲、高功率微波等强电磁脉冲将严重威胁车辆的机动性与安全性[1]。发动机系统作为保障车辆动力性的核心，一旦受损将直接导致车辆丧失作战能力。确定发动机敏感部件及主要电磁耦合途径，评估发动机系统电磁脉冲敏感度，对指导车辆电磁防护设计，提高车辆复杂电磁环境适应性具有重要意义。

国内外的研究团队进行了大量的电子系统电磁脉冲效应的研究工作[2-7]，研究方法主要分为实验法和预测分析法。实验法通过试验手段获取样本数据，评估电子系统电磁脉冲敏感度。然而，受电磁干扰源位置、极化角度、部件敏感度等多种参量影响，发动机系统电磁脉冲敏感度评估中存在着大量的不确定性[8]，尤其是系统级试验往往受场地和成本的限制，样本数量有限，导致所得结论通用性差，发动机系统电磁脉冲敏感度评估困难。预测分析法为“少数据”、“贫信息”、“不确定性”的发动机系统电磁脉冲敏感度评估提供一种新的分析方法，是目前电磁脉冲敏感度评估的一种有效方式。

目前采用的预测分析方法主要包括故障树分析(Fault tree analysis，FTA)方法[9,10]和贝叶斯网络(Bayesian networks，BN)分析方法[11-15]。FTA 在系统可靠性、风险评估等方面具有广泛的应用，但用于车辆发动机系统电磁敏感度的评估时存在以下不足[9]：①发动机系统中同层单元存在关联失效，而故障树模型中同层事件满足独立性条件，无法描述系统同层单元失效的相关性；②发动机系统由众多子系统、部件组成，模型中基本事件较多，最小割集数量呈指数增长，导致模型的求解较为困难。贝叶斯网络是一种基于概率推理的图形化网络，具有较强的不确定性问题处理能力，能够克服故障树分析方法的不足。文献[11]提出了基于多层次信息融合的分层贝叶斯网络(Hierarchical Bayesian networks，HBN)模型，能够描述分层系统各单元间失效的相关性，提高了复杂系统可靠性评估的准确性。文献[12]在文献[11]的基础上增加了电磁拓扑(Electro-magnetic topology，EMT)分析，将分层贝叶斯网络用于电子系统电磁脉冲易损性评估中，但未考虑电磁干扰源位置、极化角度参数对系统的影响。文献[13]提出了基于贝叶斯网络的系统级电磁易损性评估方法框架，考虑电磁干扰源各参数对系统的影响，将事件树分析(Event tree analysis，ETA)、EMT 等工具有效融入 BN 评估模型中，为电子系统电磁易损性评估提供了新的分析方法。文献[14]将该分析方法成功应用到电子节气门电磁敏感度评估中，对高空核电磁脉冲(High-altitude ele- ctromagnetic pulse，HEMP)下电子节气门的失效概率进行了评估。然而，文献[13,14]仅考虑系统层级间的失效关系，未考虑同层单元失效相关性对系统失效概率的影响。发动机系统具有明显的分层特征，可依据功能结构分为系统层、分系统层、部件层，各层单元功能密切相关，单元的失效情况不仅依赖于低层单元工作状态，而且与同层单元的功能状态有关。因此，该方法并不适用于发动机系统电磁脉冲敏感度评估。

综合考虑发动机的结构功能与电磁脉冲干扰源的不确定因素，本文提出一种基于分层贝叶斯网络的车辆发动机系统电磁脉冲敏感度评估方法。同时考虑系统同层单元失效关系与层级间失效的关系，建立了融合事件树和电磁拓扑的发动机系统分层贝叶斯网络电磁脉冲敏感度评估模型，推导了部件级至系统级的失效概率计算公式。以高空电磁脉冲环境为例，说明了某型号发动机电磁脉冲敏感度评估模型的参数获取方法和模型计算过程，并以超宽带(Ultra wide band，UWB)高功率微波为例，进一步说明了评估模型的适用性。实现了强电磁脉冲作用下发动机系统失效概率的估计，解决了由于发动机系统级试验数据不

足导致发动机系统电磁脉冲敏感度评估困难的问题。

1 发动机系统电磁效应分析

电磁脉冲 $V_{0,0}$ 多以平面波的形式辐照车辆，经前门耦合（天线）或后门耦合（孔缝、线缆等）进入车辆内部 $V_{1,1}$，发动机系统的电磁耦合途径属于后者，如图 1 所示。电磁波通过散热器孔洞、车壳连接缝隙等后门耦合途径进入发动机舱 $V_{2,1}$，在金属表面或金属导线上感应形成强电流或高电压浪涌，干扰或损伤发动机的电控部分。

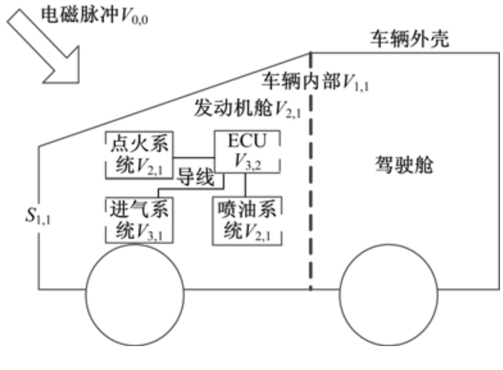

图 1 车辆发动机电磁耦合途径

Fig. 1 Electromagnetic coupling path of vehicle engine

从功能角度确定保障发动机系统正常运行的关键子系统和部件，将发动机系统分为点火、进气、喷油 3 个子系统[16]。依据分系统功能结构，分析各子系统受到电磁干扰对发动机系统的影响情况：

（1）点火子系统：控制器依据曲轴位置传感器、凸轮轴位置传感器的信号确定点火提前角并根据爆燃等传感器的信号进行修正，确定点火时刻，最终控制点火器点火。上述部件受到电磁干扰或损伤将导致实际的点火提前角与目标量不符。

（2）进气子系统：控制器根据加速踏板位置传感器和节气门位置传感器信号确定基本进气量，通过发动机转速、功率等参量修正进气量，并由节气门电机控制节气门开度最终控制进气量。上述部件受到电磁干扰或损伤将导致进气量与目标量不符。

（3）喷油子系统：喷油量是关于转速和进气压力的函数，可通过曲轴位置传感器和进气压力传感器的信号确定，并通过氧传感器信号控制混合气的空燃比以修正喷油量。上述部件受到电磁干扰或损伤将引发喷油量异常。

喷油量异常、点火提前角过小、进气量过小将导致混合气燃烧不充分、发动机功率下降，并出现喘震甚至熄火的现象。另外，进气量过大将导致急加速现象，点火提前角过大将导致爆燃的发生，甚至造成发动机系统的损伤。

2 分层贝叶斯网络评估模型

应用 HBN 对车辆发动机电磁效应的全过程进行建模，将作用过程分为电磁传播、耦合途径、系统效应 3 个阶段，分别运用 ETA、EMT、HBN 理论描述分析，后利用 HBN 融合 ETA、EMT 理论建立评估模型。

2.1 事件树分析

利用事件树分析有意电磁干扰源（Intentional electromagnetic interference source，IEMIS）对系统的威胁情况，确定系统周围电磁环境（Ambient electromagnetic environment，AEME）的风险概率，AEME 风险概率 $P(S_k)$ 表示为[17]：

$$P(S_k)=P(C_S)\left[\prod_{i=1}^{n}P(L_S(C_S,Z_i))\right]P(D(C_S,Z_n)) \tag{1}$$

式中：$P(C_S)$ 表示 IEMIS 存在的概率；$P(L_S(C_S,Z_i))$ 表示源 C_S 从区域 Z_{i-1} 渗透到区域 Z_i 的概率；$P(D(C_S,Z_n))$ 表示辐射能量在最终区域 Z_n 持续时间的概率。

2.2 电磁拓扑分析

AEME 通过传导耦合和辐射耦合进入车辆发动机系统内部，在部件上产生感应电压、电流，即电磁应力（Electromagnetic stress，EMS）。应用 EMT 理论分析车辆发动机系统的所有电磁耦合途径，将发动机系统按结构划分为若干相对独立的子区域，各区域间通过孔缝、线缆等途径相互作用，如图 2 所示。

图 2 中屏蔽面用 $S_{i,j}$ 表示，$i=1,2,\cdots,I$ 表示屏蔽层序列，$j=1,2,\cdots,J$ 表示屏蔽第 i 层的第 j 个屏蔽面，屏蔽面 $S_{i,j}$ 内部区域为 $V_{i,j}$。屏蔽面用实线表示，发动机舱用虚线表示；点火、喷油等子系统外部无壳体，用点划线表示子系统包含的部件。发动机子系统控制模块集成在 ECU 中，为分析方便，根据功能将 ECU 分为点火、进气、喷油控制子模块，用 $V_{3,2,n}(n=1,2,3)$ 表示。

2.3 分层贝叶斯网络分析及建模

依据功能结构将发动机系统自上而下分为系统层、子系统层、部件层，并增加引起部件失效的原

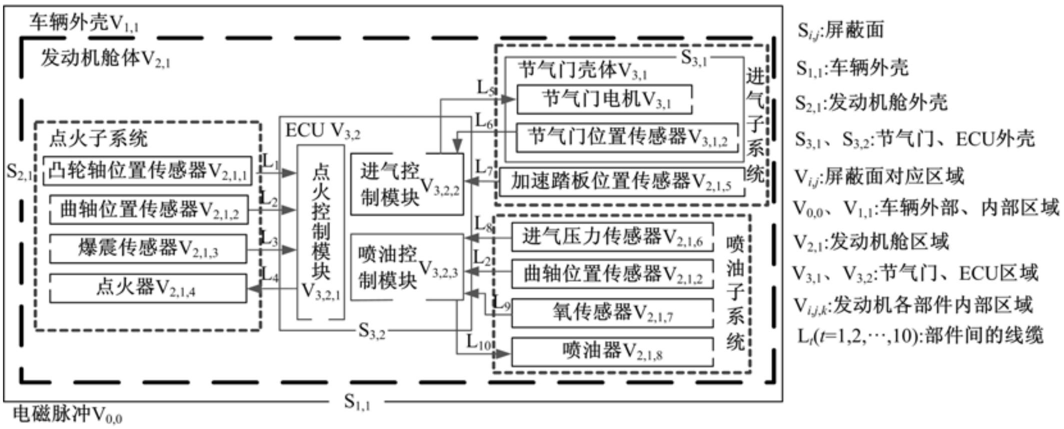

图 2　车辆发动机系统 EMT

Fig. 2　EMT of vehicle engine system

因层(电磁应力)。运用 HBN 理论描述发动机系统各单元间的失效关系，单元间的失效关系包括两种情况：①同层单元失效导致功能相关单元功能失效的同层失效关系；②下层单元失效导致上层单元失效的层级间失效关系。综合考虑两种失效关系建立了发动机系统故障网络模型，如图 3 所示。

图 3 中 V 表示发动机系统；$C_{1,1}$ 为点火子系统传感器；$C_{1,2}$ 为点火子系统控制器；$C_{1,3}$ 为点火器；$C_{2,1}$ 为进气子系统传感器；$C_{2,2}$ 为进气子系统控制器；$C_{2,3}$ 为节气门电机；$C_{3,1}$ 为喷油子系统传感器；$C_{3,2}$ 为喷油子系统控制器；$C_{3,3}$ 为喷油器；$C_{1,1,1}$ 为凸轮轴位置传感器；$C_{1,1,2}$ 为曲轴位置传感器；$C_{1,1,3}$ 为；爆震传感器 $C_{2,1,1}$ 为加速踏板位置传感器；$C_{2,1,2}$ 为节气门位置传感器；$C_{3,1,1}$ 为进气压力传感器；$C_{3,1,2}$ 为曲轴位置传感器；$C_{3,1,3}$ 为氧传感器；$V_{i,j,k}$ 表示部件 $C_{i,j,k}$ 经受的电磁应力。

ETA、EMT、HBN 均是基于因果逻辑和图形化模型的理论，可以用统一的图模型表示。HBN 能有效地进行多源信息的融合与表达，对车辆发动机系统电磁效应的全过程统一建模，如图 4 所示。

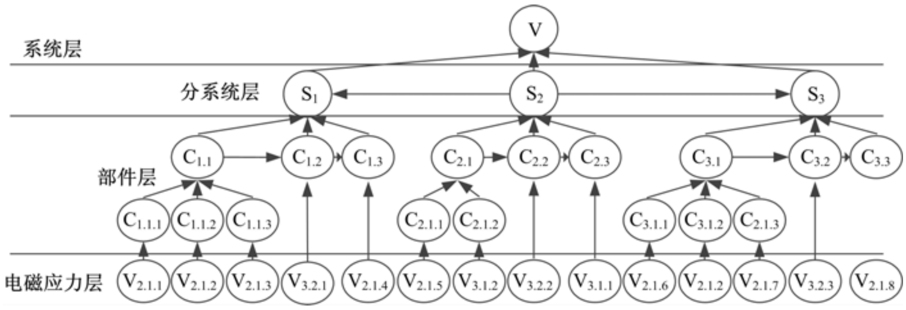

图 3　发动机故障网络模型

Fig. 3　Fault network model of engine

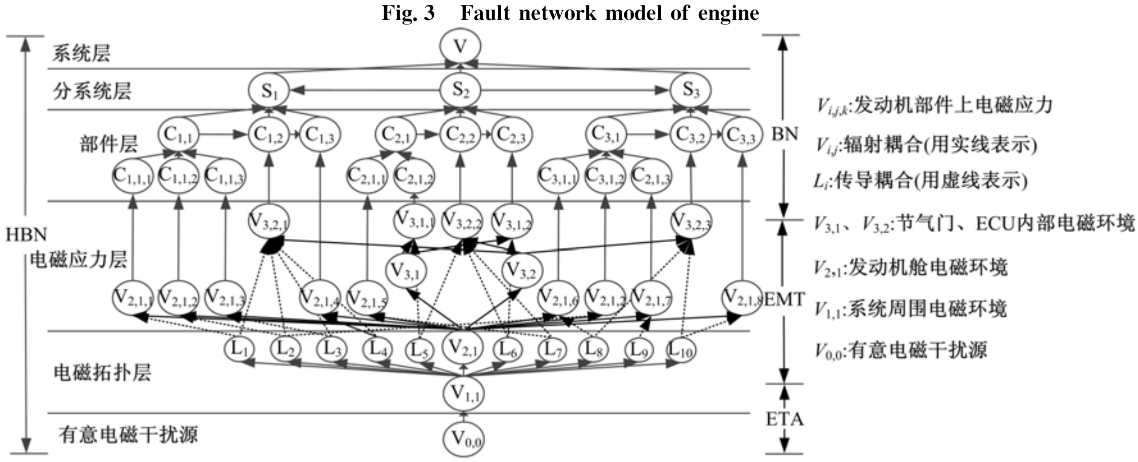

图 4　分层贝叶斯网络评估模型

Fig. 4　Hierarchical Bayesian network evaluation model

3 HBN评估模型计算方法

系统电磁效应是不确定性事件,如IEMIS的位置、极化角度、部件电磁敏感度阈值等参量都存在随机性,需从概率统计角度进行分析,发动机失效概率 P_V 为:

$$P_V = P(\mathrm{IEMIS}, \mathrm{AEME}, \mathrm{EMS}, \mathrm{Comp}, \mathrm{Sub}, \mathrm{V}) \tag{2}$$

分层贝叶斯网络各层级间存在因果关系,可以用条件概率表示。IEMIS穿过障碍在系统周围产生的电磁环境(AEME)将会在部件上感应形成电磁应力(EMS),当电磁应力大于部件电磁敏感度时部件(Comp)失效,进而导致分系统(Sub)失效和系统(V)失效。由此,P_V 可以表示为:

$$P_V = P(\mathrm{IEMIS})P(\mathrm{AEME}|\mathrm{IEMIS}) \times P(\mathrm{EMS}|\mathrm{AEME})P(\mathrm{Comp}|\mathrm{EMS}) \times P(\mathrm{Subs}|\mathrm{Comp})P(\mathrm{V}|\mathrm{Subs}) \tag{3}$$

下面将详细介绍各层参数的计算方法。

3.1 P(IEMI)

IEMIS包括高空核电磁脉冲、高功率微波等多种类型(C_S),考虑各种 C_S 间的相互独立性,集合{IEMIS}及 $P(\mathrm{IEMIS})$ 的表达式为:

$$\begin{cases} \{\mathrm{IEMIS}\} = \bigcup_{S=1}^{n} \{C_S\} \\ P(\mathrm{IEMIS}) = 1 - \prod_{S=1}^{n} (1 - P(C_S)) \end{cases} \tag{4}$$

3.2 P(AEME|IEMIS)

每种 C_S 形成AEME的风险概率用 S_k 表示,由前文事件树分析可知,AEME是 S_k 的集合,根据式(1)可推得 $P(S_k|C_S)$ 表达式为:

$$P(S_k|C_S) = [\prod_{i=1}^{n} P(L_S(C_S, Z_i))]P(D(C_S, Z_n)) \tag{5}$$

单个IEMIS攻击目标系统,$P(\mathrm{AEME}|\mathrm{IEMIS})$ 即为式(5)中的 $P(S_k|C_S)$。若有多个IEMIS攻击目标系统,考虑各种 S_k 间的相互独立性,可推得联合概率 $P(IEMIS, AEME)$ 表达式为:

$$P(\mathrm{IEMIS}, \mathrm{AEME}) = 1 - \prod_{k=1}^{n} (1 - P(S_k)) \tag{6}$$

3.3 P(EMS|AEME)

AEME耦合进入系统在部件上感应的电磁应力可以用概率密度函数 $g(y)$ 表示,电磁应力大于部件电磁敏感度 $f(x)$ 下限的部分反映了该耦合途径的威胁程度[13],记为 $P(\mathrm{EMS}|\mathrm{AEME})$,表达式为:

$$P(\mathrm{EMS}|\mathrm{AEME}) = \int_{x_{\min}}^{y_{\max}} g(y)\mathrm{d}y \tag{7}$$

3.4 P(Comp|EMS)

部件失效分为电磁应力导致的部件失效和功能密切相关部件失效引发的功能失效,前者失效概率用 $P(\mathrm{Comp}|\mathrm{EMS})$ 表示,二者共同作用下的失效概率用 $P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{EMS}_i, \mathrm{Comp}_j)$ 表示。

$P(\mathrm{Comp}|\mathrm{EMS})$:概率通过应力强度干涉理论[18]确定,表达式为:

$$P(\mathrm{Comp}|\mathrm{EMS}) = \int_{x_{\min}}^{y_{\max}} g(y)\left[\int_{x_{\min}}^{y} f(x)\mathrm{d}x\right]\mathrm{d}y \tag{8}$$

$P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{EMS}_i, \mathrm{Comp}_j)$:受扰部件为 Comp_i,电磁应力为 EMS_i,功能密切相关的部件为 Comp_j。假设 EMS_i 与 Comp_j 相互独立,二者共同作用下部件 Comp_i 的失效概率可表示为:

$$P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{EMS}_i, \mathrm{Comp}_j) = 1 - (1 - P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{EMS}_i)) \times (1 - P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{Comp}_j)) \tag{9}$$

式中:$P(\mathrm{Comp}_i|\mathrm{Comp}_j)$ 表示部件 Comp_j 失效导致 Comp_i 发生功能失效的概率,根据发动机知识和专家经验法确定,并用条件概率表给出。

3.5 P(Subs|Comp)与P(V|Subs)

参考3.4节分析方法确定 $P(\mathrm{Subs}|\mathrm{Comp})$ 与 $P(\mathrm{V}|\mathrm{Subs})$ 的值,并通过条件概率表给出。

4 算例分析

本节以高空核电磁脉冲为例,说明车辆发动机电磁脉冲敏感度评估模型的参数获取方法和模型计算的全过程,并以超宽带高功率微波为例,说明评估模型的适用性。IEMIS的位置 L_S、入射波极化角度、部件电磁敏感度都存在随机性,可结合仿真与试验确定,多IEMIS场景可参考3.1节和3.2节的分析。

4.1 发动机系统外部电磁环境分析

HEMP为唯一存在的IEMIS记为 C_S,故 $P(C_S) = 1$,根据式(4)可得:

$$P(\mathrm{IEMIS}) = P(C_S) = 1 \tag{10}$$

HEMP可通过散热器孔洞、车壳缝隙等途径进入发动机舱,故 $P(L_S(C_S, Z_i)) = 1$。一般车辆发动机中无特殊保护装置减少HEMP攻击发动

机的时间，故 $P(D(C_S,Z_n))=1$，根据 3.2 节的分析及式(5)得：

$$P(\mathrm{AEME}\mid\mathrm{IEMIS})=P(S_K\mid C_S)=1 \tag{11}$$

4.2　电磁耦合分析

电磁脉冲可通过散热器孔洞、车壳缝隙进入发动机舱内，根据实验经验，电磁能量主要以线缆传导耦合方式作用于部件，部件上的电磁应力也以传导干扰为主。各部件外连线缆上的传导电磁应力可根据激励源、线缆等参数确定，并通过 CST 软件仿真得到，仿真模型示意图如图 5 所示。

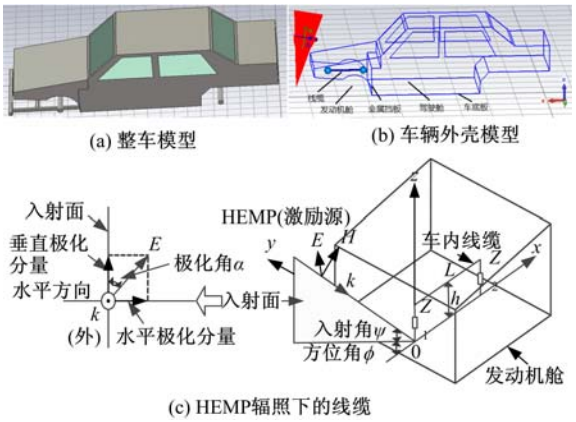

图 5　HEMP 辐照下的车辆线缆

Fig. 5　Car cable illuminated by HEMP

车辆模型：依据某车辆实际尺寸在 CST 软件线缆工作室建立车辆模型，如图 5(a)、(b)所示。车辆外壳模型考虑车窗、车壳缝隙等结构，其长宽高为 4 m×1.5 m×1 m。发动机舱与驾驶舱由竖直金属挡板隔开，发动机舱尺寸为：1.2 m×1.5 m×0.65 m。

激励源模型：根据 IEC 61000－5－9[19]可知，HEMP 为双指数函数 $E(t)=kE_0(\mathrm{e}^{-at}-\mathrm{e}^{-bt})$，具体参数为：$E_0=50$ kV/m，$k=1.3$，$\alpha=4\times10^7$，$\beta=6\times10^8$。考虑激励源入射方向的随机性：入射角 $\Psi\in[18°,90°]$、方位角 $\phi\in[0°,90°]$、极化角 $\alpha\in[0°,90°]$，采样步长为 18°，仿真样本总数为 180，如图 5(c)所示。

线缆模型：线缆置于发动舱内并与车底板平行，类型为单芯线，参数设置为：长度 $L=0.6$ m，高度 $h=0.3$ m，线缆导体半径 $r=0.5$ mm，终端阻抗 $Z_1=Z_2=30\ \Omega$。

将终端 Z_1 感应的电压峰值视为部件上的电磁应力值，最小值为 0.22 V，最大值为 341.95 V。假设电磁应力值分布符合平均值 $\mu_c=144.11$，方差 $\sigma_c=76.92$ 的正态分布 $N(\mu_c,\sigma_c^2)$。用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验被测分布函数的拟合度，当 $a=0.05$，$n=180$ 时，临界值为 0.101 22。电磁应力值与该正态分布的累积分布函数(Cumulative distribution function，CDF)的最大偏差为 0.059 5，小于临界值，认为电磁应力值符合该正态分布，累积分布函数如图 6 所示。

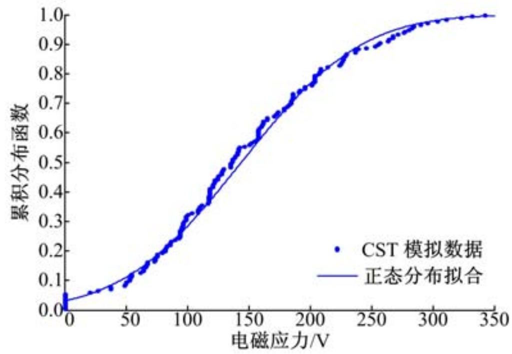

图 6　传输线终端电磁应力累积分布函数

Fig. 6　CDF of EMS at transmission line terminal

4.3　部件电磁敏感度阈值分析

发动机各部件的电磁敏感度阈值可以通过效应试验方式获得，测试方法依据 IEC 61000－4－4[20]中的电快速瞬变脉冲测试方法。利用脉冲群发生器产生电磁脉冲信号，通过电容耦合夹向部件信号线注入干扰，将注入脉冲干扰的幅值逐渐增加直到部件工作异常，并记录该试验数据。对于每个部件记录 20～30 组试验数据，采用与 4.2 节中相同的统计方法确定部件的敏感度阈值。

本课题组测试了点火器、进气压力传感器等部件的电磁敏感度。凸轮轴、曲轴、氧传感器实验数据参考文献[7]，节气门电机、节气门位置传感器实验数据参考文献[14]。以点火器为例，说明部件敏感度测试及部件失效概率计算的方法，试验布置如图 7 所示，敏感度阈值 CDF 如图 8 所示，点火器敏感度阈值和电磁应力的概率密度函数如图 9 所示。

图 7　点火器敏感度试验示意图

Fig. 7　Ignition sensitivity test

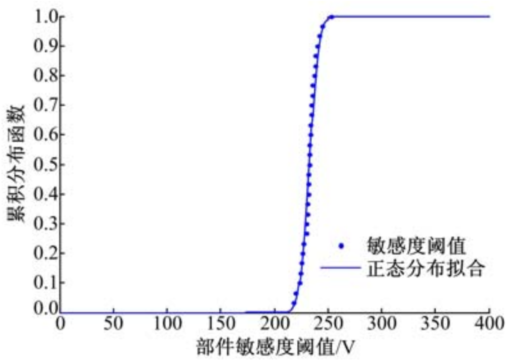

图 8　点火器敏感度阈值累积分布函数

Fig. 8　CDF of sensitivity thresholds of ignition

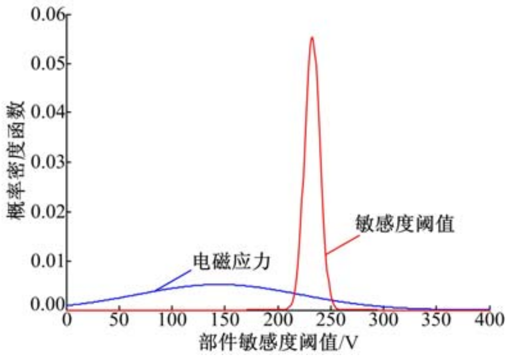

图 9　点火器失效概率

Fig. 9　Failure probability of ignition

点火器失效概率 P_c 可通过式(8)计算得到：

$$P_c = P(Comp \mid EMS) = \int_{x_{\min}}^{y_{\max}} g(y)\left[\int_{x_{\min}}^{y} f(x)\mathrm{d}x\right]\mathrm{d}y = 0.1241 \quad (12)$$

$f(x)$ 服从正态分布 $X \sim N(\mu_b, \sigma_b^2)$，参考正态分布 3σ 规则确定部件电磁敏感度的上、下限。于是 $[x_{\min}, x_{\max}] = [\mu_b - 3\sigma_b, \mu_b + 3\sigma_b]$，同理可得 $[y_{\min}, y_{\max}] = [\mu_c - 3\sigma_c, \mu_c + 3\sigma_c]$。

部件电磁应力大于部件敏感度阈值下限的部分 P_t 反映了相应耦合途径的威胁程度，点火器 P_t 可通过式(7)计算得到：

$$P_t = P(\mathrm{EMS} \mid \mathrm{AEME}) = \int_{x_{\min}}^{y_{\max}} g(y)\mathrm{d}y = 0.1906 \quad (13)$$

同理可计算其他部件的 P_c 和 P_t，将各部件的敏感度均值、方差、P_c、P_t 汇总在表 1 中。

表 1　高空核电磁脉冲下部件敏感度参数

Table 1　Sensitivity parameters of component under HEMP

部件	μ_b/V	σ_b/V	P_c	P_t
凸轮轴位置传感器	171.59	11.71	0.3599	0.5383
曲轴位置传感器	179.20	21.73	0.3280	0.6504
爆震传感器	210.16	23.23	0.2034	0.5175
加速踏板位置传感器	151.24	22.31	0.4621	0.7802
节气门位置传感器	104.93	4.12	0.6921	0.7472
进气压力传感器	62.65	2.26	0.8526	0.8730
氧传感器	574.14	17.53	<0.001	0.0013
点火器	232.71	7.21	0.1241	0.1906
节气门电机	328.90	29.79	0.0110	0.1060
喷油器	275.21	21.82	0.0489	0.1954

根据表 1 数据可知氧传感器具有较高的敏感度阈值，在电磁应力的作用下失效概率小于 1%，可认为该部件在电磁应力下工作正常。

需说明的是，ECU 外接端口处一般装有滤波器、限幅器等防护器件，能有效减少电磁脉冲对 ECU 的影响，因此本文假设 ECU 是不敏感部件。

4.4　发动机系统失效概率评估

4.4.1　分层贝叶斯网络精简

根据前文分析，ECU 等电磁敏感度阈值较高的部件及部分耦合效率低的耦合路径对发动机系统失效概率的贡献可以忽略不计。将这些安全节点和路径予以删除，以降低评估模型的复杂度，精简后的结构如图 10 所示。

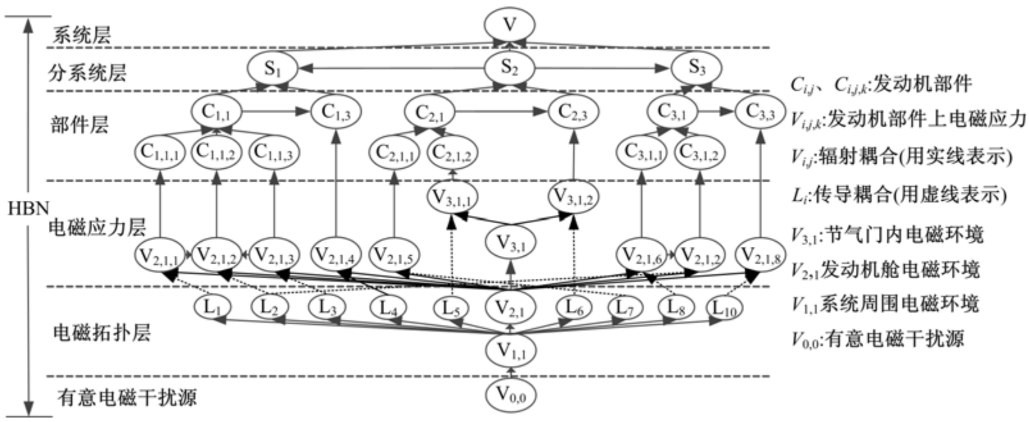

图 10　分层贝叶斯网络精简模型

Fig. 10　Modified HBN model

4.4.2　发动机系统节点条件概率

部件失效包括以下两种情况：①电磁应力大于部件电磁敏感度阈值导致部件损伤；②部件功能密切相关部件失效导致部件的功能失效。前者在 3.3 中已经讨论，后者可通过查阅文献[16]确定部件间的逻辑关系，并由专家经验法给出节点条件概率。同理可获得分系统、系统节点条件概率，建立发动机系统节点条件概率表见表 2。

表 2　发动机系统节点条件概率表

Table 2　Node conditional probability of engine system

CPT1	$m=0$	$m=1$
$P(C_{1,1}=m\mid C_{1,1,1}=0,C_{1,1,2}=0,C_{1,1,3}=0)$	1.0	0.0
$P(C_{1,1}=m\mid C_{1,1,1}=0,C_{1,1,2}=0,C_{1,1,3}=1)$	0.7	0.3
else	0.0	1.0
CPT2	$m=0$	$m=1$
$P(C_{2,1}=m\mid C_{2,1,1}=0,C_{2,1,2}=0)$	1.0	0.0
$P(C_{2,1}=m\mid C_{2,1,1}=0,C_{2,1,2}=1)$	0.8	0.2
else	0.0	1.0
CPT3	$m=0$	$m=1$
$P(C_{3,1}=m\mid C_{3,1,1}=0,C_{3,1,2}=0)$	1.0	0.0
$P(C_{3,1}=m\mid C_{3,1,1}=1,C_{3,1,2}=0)$	0.8	0.2
else	0.0	1.0
CPT4/CPT5/CPT6	$m=0$	$m=1$
$P(C_{i,3}=m\mid C_{i,1}=0),(i=1,2,3)$	1.0	0.0
$P(C_{i,3}=m\mid C_{i,1}=1),(i=1,2,3)$	0.1	0.9
CPT7	$m=0$	$m=1$
$P(S_1=m\mid S_2=0,C_{1,1}=0,C_{1,3}=0)$	1.0	0.0
$P(S_1=m\mid S_2=1,C_{1,1}=0,C_{1,3}=0)$	0.7	0.3
else	0.0	1.0
CPT8	$m=0$	$m=1$
$P(S_2=m\mid C_{2,1}=0,C_{2,3}=0)$	1.0	0.0
else	0.0	1.0
CPT9	$m=0$	$m=1$
$P(S_3=m\mid S_2=0,C_{3,1}=0,C_{3,3}=0)$	1.0	0.0
$P(S_3=m\mid S_2=1,C_{3,1}=0,C_{3,3}=0)$	0.8	0.2
else	0.0	1.0
CPT10	$m=0$	$m=1$
$P(V=m\mid S_1=0,S_2=0,S_3=0)$	1.0	0.0
else	0.0	1.0

注：表 2 中对部件、子系统、系统考虑二态情况，0 表示工作正常，1 表示失效。

4.4.3　发动机失效概率计算

基于车辆发动机系统结构的分层特性，依次求解 HEMP 环境下发动机部件层、子系统层、系统层的失效概率。

(1)部件层失效概率计算

求解电磁应力作用下传感器失效概率，根据式(3)，部件的失效概率 $P(C)$可表示为：

$$P(C)=P(\mathrm{IEMIS})P(\mathrm{AEME}\mid\mathrm{IEMIS})\times P(\mathrm{EMS}\mid\mathrm{AEME})P(\mathrm{Comp}\mid\mathrm{EMS})\qquad(14)$$

结合表 1 及式(14)，发动机各传感器失效概率计算结果见表 3。

表 3　高空核电磁脉冲下发动机各传感器失效概率

Table 3　Failure probability of engine sensors under HEMP

发动机各传感器	失效概率
凸轮轴位置传感器	$P(C_{1,1,1})=0.1937$
曲轴位置传感器	$P(C_{1,1,2})=P(C_{3,1,2})=0.2133$
爆震传感器	$P(C_{1,1,3})=0.1053$
加速踏板位置传感器	$P(C_{2,1,1})=0.3605$
节气门位置传感器	$P(C_{2,1,2})=0.5171$
进气压力传感器	$P(C_{3,1,1})=0.7443$

部件 $C_{1,1}$失效概率计算公式如下：

$$P(C_{1,1})=\sum_{C_{1,1,1},C_{1,1,2},C_{1,1,3}}P(C_{1,1}\mid C_{1,1,1},C_{1,1,2},C_{1,1,3})\cdot\prod_{i=1}^{3}P(C_{1,1,i})\qquad(15)$$

故 $P(C_{1,1})=0.3857$，同理可得 $P(C_{2,1})=0.4266$、$P(C_{3,1})=0.3304$。

计算执行器 $C_{i,3}(i=1,2,3)$失效概率需考虑电磁应力、传感器异常信号两方面因素，公式如下：

$$P(C_{i,3})=\sum_{C_{i,1}}(C_{i,3}\mid\mathrm{EMS}_{i,3},C_{i,1})P(C_{i,1})P(\mathrm{EMS}_{i,3})\qquad(16)$$

通过式(16)，计算可得 $P(C_{1,3})=0.3626$、$P(C_{2,3})=0.3847$、$P(C_{3,3})=0.3041$。

(2)子系统层失效概率计算

计算子系统失效概率需综合考虑下层部件失效和同层子系统功能异常两方面的影响，公式如下：

$$P(S_2)=\sum_{C_{2,1},C_{2,3}}P(S_2\mid C_{2,1},C_{2,3})P(C_{2,3}\mid C_{2,1})P(C_{2,1})\qquad(17)$$

故 $P(S_2)=0.4273$。

表 4 高空核电磁脉动冲下发动机子系统失效概率

Table 4 Failure probability of engine subsystem under HEMP

发动机子系统	失效概率
点火子系统	$P(S_1)=0.4771$
进气子系统	$P(S_2)=0.4273$
喷油子系统	$P(S_3)=0.3935$

$$P(S_1)=\sum_{S_2,C_{1,1},C_{1,3}} P(S_1\mid S_2,C_{1,1},C_{2,3})P(S_2)P(C_{1,3}\mid C_{1,1})P(C_{1,1}) \tag{18}$$

于是 $P(S_1)=0.4771$，同理可得 $P(S_3)=0.3935$，发动机子系统失效概率汇总为表 4。

(3)系统层失效概率计算

$$P(V)=\sum_{S_1,S_2,S_3} P(V\mid S_1,S_2,S_3)P(S_2)P(S_1\mid S_2)P(S_3\mid S_2)=\sum_{S_1,S_2,S_3} P(V\mid S_1,S_2,S_3)P(S_2)\times \sum_{C_{1,1},C_{1,3}} P(S_1\mid S_2,C_{1,1},C_{1,3})P(C_{1,3}\mid C_{1,1})P(C_{1,1})\times \sum_{C_{3,1},C_{3,3}} P(S_3\mid S_2,C_{3,1},C_{3,3})P(C_{3,3}\mid C_{3,1})P(C_{3,1}) \tag{19}$$

计算可得 $P(V)=0.7719$，故发动机在 HEMP 辐射下的失效概率为 0.7719。

4.5 高功率微波下发动机系统失效概率评估

以超宽带高功率微波为例，评估车辆发动机系统失效概率，进一步说明评估模型的适用性。发动机系统外部电磁环境分析可参考 4.1 节。

4.5.1 传导电磁应力计算

车辆线缆感应的电磁应力可通过 CST 软件仿真得到，车辆模型、线缆模型设置情况与 4.2 相同。

激励源模型：UWB 波形一般用高斯脉冲来定义，波形表达式[21]为 $E(t)=E_0\exp[-(t-t_0)^2/T^2]$，具体参数为：$E_0=50$ kV/m，$t_0=4$ ns，$T=1$ ns。考虑激励源入射方向的随机性：入射角 $\Psi\in[18°,90°]$、方位角 $\phi\in[0°,90°]$、极化角 $\alpha\in[0°,90°]$，采样步长为 18°，仿真样本总数为 180。

将线缆终端 Z_1 感应的电压峰值视为部件上的电磁应力值。其中，最小值为 0.46 V，最大值为 453.06 V。经过 KS 检验可知，电磁应力值符合平均值 $\mu_c=197.82$，方差 $\sigma_c=103.76$ 的正态分布 $N(\mu_c,\sigma_c^2)$，累积分布函数如图 11 所示。

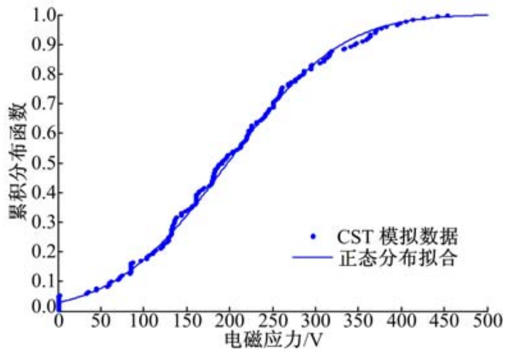

图 11 传输线终端电磁应力累积分布函数

Fig. 11 CDF of EMS at transmission line terminal

4.5.2 部件敏感度阈值确定

结合发动机各部件电磁敏感度阈值(见表 1)和电磁应力值(见图 11)，依据式(7)和式(8)可分别计算相应耦合途径电磁应力威胁程度 P_t 和电磁应力下部件失效概率 P_c。将各部件的敏感度均值、方差、P_c、P_t 汇总在表 5 中。

表 5 超高功率微波下部件敏感度参数

Table 5 Sensitivity parameters of component under UWB

部件	μ_b/V	σ_b/V	P_c	P_t
凸轮轴位置传感器	171.59	11.71	0.5968	0.7215
曲轴位置传感器	179.20	21.73	0.5673	0.789
爆震传感器	210.16	23.23	0.4515	0.7084
加速踏板位置传感器	151.24	22.31	0.6671	0.8617
节气门位置传感器	104.93	4.12	0.812	0.8434
进气压力传感器	62.65	2.26	0.9013	0.913
氧传感器	574.14	17.53	<0.001	0.0004
点火器	232.71	7.21	0.3667	0.4478
节气门电机	328.90	29.79	0.1105	0.3425
喷油器	275.21	21.82	0.2307	0.4529

根据表 5 数据可知氧传感器具有较高的敏感度阈值，在电磁应力的作用下失效概率小于 1%，可认为该部件在电磁应力下工作正常。

4.5.3 发动机系统失效概率评估

基于车辆发动机系统结构的分层特性，依次求解 UWB 环境下发动机部件层、子系统层、系统层的失效概率。

(1)部件层失效概率计算

结合表 5 及式(14)，计算 UWB 辐射下发动机各传感器的失效概率，结果见表 6。

依据式(15)(16)可计算各传感器 $C_{i,1}$、执行器 $C_{i,3}$ ($i=1,2,3$) 的失效概率如下：

$P(C_{1,1})=0.7156$；$P(C_{2,1})=0.6330$；

$P(C_{3,1})=0.5385$；$P(C_{1,3})=0.7025$；$P(C_{2,3})=0.5860$；$P(C_{3,3})=0.5385$。

表 6　发动机各传感器失效概率

Table 6　Failure probability of engine sensors

发动机各传感器	失效概率
凸轮轴位置传感器	$P(C_{1,1,1})=0.4306$
曲轴位置传感器	$P(C_{1,1,2})=P(C_{3,1,2})=0.4476$
爆震传感器	$P(C_{1,1,3})=0.3198$
加速踏板位置传感器	$P(C_{2,1,1})=0.5748$
节气门位置传感器	$P(C_{2,1,2})=0.6848$
进气压力传感器	$P(C_{3,1,1})=0.8229$

(2)子系统层、系统层失效概率计算

利用式(17)(18)可确定发动机各子系统的失效概率，计算结果汇总为表 7。

表 7　发动机子系统失效概率

Table 7　Failure probability of engine subsystem

发动机子系统	失效概率
点火子系统	$P(S_1)=0.8084$
进气子系统	$P(S_2)=0.6469$
喷油子系统	$P(S_3)=0.6402$

发动机系统失效概率可通过式(19)得到，经计算 $P(V)=0.9653$，故发动机系统在 UWB 辐射下的失效概率为 0.9653。

5　结束语

本文研究了强电磁脉冲作用下车辆发动机系统电磁脉冲敏感度评估问题，融合事件树和电磁拓扑理论建立发动机系统分层贝叶斯网络电磁脉冲敏感度评估模型，推导了部件级至系统级的失效概率计算公式。以高空电磁脉冲环境为例，说明了模型的参数获取方法和计算过程，并以超宽带高功率微波为例，进一步说明了评估模型的适用性。评估模型考虑了系统同层单元失效的相关性，能够准确描述发动机电磁耦合途径和各单元间的失效关系；考虑了电磁干扰源位置、极化角度、部件敏感度等随机参量，实现强电磁脉冲下发动机失效概率的估计，有效解决由于发动机系统级试验数据不足导致系统电磁脉冲敏感度评估困难的问题。同时，确定了发动机重要部件及主要耦合路径，评估了发动机系统电磁脉冲敏感度，为发动机的电磁防护设计提供依据，对提高车辆复杂电磁环境适应性具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 李慧梅，唐彦峰，刘祥凯，等. 电磁脉冲武器对车辆装备的损伤效应研究[J]. 装备环境工程，2010，7(3)：31-34.
Li Hui-mei，Tang Yan-feng，Liu Xiang-kai，et al. Study of destructive effects of electromagnetic pulse weapon on vehicle[J]. Equipment Environment Engineering，2010，7(3)：31-34.

[2] Radasky W A，Baum C E，Wik M W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetic (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2004，46(3)：314-321.

[3] 王建国，刘国治，周金山. 微波孔缝线性耦合函数研究[J]. 强激光与粒子束，2003，15(11)：1093-1099.
Wang Jian-guo，Liu Guo-zhi，Zhou Jin-shan. Investigations on function for linear coupling of microwaves into slots[J]. High Power Laser and Particle Beams，2003，15(11)：1093-1099.

[4] 王建国. 高空核爆炸效应参数手册[M]. 北京：原子能出版社，2010.

[5] Nitsch D，Camp M，Sabath F，et al. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2004，46(3)：380-389.

[6] Camp M，Gerth H，Garbe H，et al. Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2004，46(3)：368-378.

[7] 曾德龙. 汽车电子设备电磁损伤机理及损伤阈值研[D]. 长春：吉林大学汽车工程学院，2012.
Zeng De-long. Research on electromagnetic damage mechanisms and threshold values of electrical equipment on vehicle[D]. Changchun：College of Automotive Engineering，Jilin University，2012.

[8] Mao C，Canabero F. Uncertainty analysis in system-level vulnerability assessment for IEMI[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)，Dresden，2015：1073-1076.

[9] Genender E，Mleczko M，Doring O，et al. Fault tree analysis for system modeling in case of intentional EMI[J]. Advances in Radio Science，2011，9(9)：297-302.

[10] IEC 61025. Fault Tree Analysis[S].

[11] Li M，Liu J，Li J，et al. Bayesian modeling of multi-state hierarchical systems with multi-level information aggregation[J]. Reliability Engineering and System Safety，2014，124(4)：158-164.

[12] 刘钰,韩峰,陆希成,等. 电子系统电磁脉冲易损性评估的分层贝叶斯网络模型[J]. 电子学报,2016,44(11):2695-2703.
Liu Yu, Han Feng, Lu Xi-cheng, et al. EMP susceptibility modeling and assessment of electronic system based on hierarchical Bayesian networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 44(11): 2695-2703.

[13] Mao C G, Canavero F. System-level vulnerability assessment for EME: from fault tree analysis to bayesian networks—Part I: methodology framework [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 180-187.

[14] 孙晓颖,王震,杨锦鹏,等. 基于贝叶斯网络的电子节气门电磁敏感度评估[J]. 吉林大学学报:工学版,2018,48(1):281-289.
Sun Xiao-ying, Wang Zheng, Yang Jin-peng, et al. Electromagnetic susceptibility assessment of electronic throttle based on Bayesian networks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1):281-289.

[15] Li S, Tryfonas T, Russell G, et al. Risk assessment for mobile systems through a multilayered hierarchical Bayesian network[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(8): 1749-1759.

[16] 王绍銧. 汽车电子学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2011.

[17] Genender E, Garbe H, Sabath F. Probabilistic risk analysis technique of intentional electromagnetic interference at system level[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(1): 200-207.

[18] Modarres M. Risk Analysis in Engineering[M]. New York: Taylor& Francis, 2006.

[19] IEC 61000－5－9. Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 5－9: Installation and Mitigation Guidelines—System-Level Susceptibility Assessments for HEMP and HPEM[S].

[20] IEC 61000－4－4. EMC: Testing and measurement techniques-electrical fast transient/burst immunity test[S].

[21] Chen B, Yun Y, Cheng G, et al. Analysis of shielding effectiveness of reinforced-concrete in high power electro- magnetic environment[C]// Proceedings of Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Hangzhou, China, 2003: 547-553.