

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 07. 023

# 石化装置 BN 拓扑结构节点态势分析模型与应用

汤规成<sup>1</sup>, 许开立<sup>1</sup>, 李德顺<sup>1 2 3</sup>, 刘家喜<sup>1</sup>

( 1. 东北大学 资源与土木工程学院 , 辽宁 沈阳 110819 ; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司 安技环保部 , 辽宁 沈阳 110425 ;  
3. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院 , 辽宁 沈阳 110159 )

**摘 要 :** 针对石化装置运行过程中危险瞬息万变的特点 , 给出了一种将广义集对分析理论与 BN 集成的石化装置 BN 拓扑结构节点状态联系度表达形式 , 提出了石化装置 BN 拓扑结构节点态势计算模型 , 讨论了石化装置 BN 拓扑结构节点态势等级 , 并在同一态势中进行了进一步划分 . 应用表明 : 在构建的反应器火灾爆炸 BN 拓扑结构中 , 叶节点“ 反应器火灾爆炸 ” 处于同势 , 以反应器火灾爆炸事件发生态势为主 , 同时 , 得到了其他中间节点状态联系度及其态势等级 , 且节点联系度中的差异性变化会对其节点态势及其等级产生一定的影响 , 甚至发生节点态势逆转现象 , 为分析石化装置 BN 拓扑结构节点状态及其态势提供了依据 .

**关 键 词 :** 广义集对分析 ; 贝叶斯网络 ; 联系度 ; 叶节点 ; 节点态势

中图分类号 : X 913. 4      文献标志码 : A      文章编号 : 1005 - 3026( 2016 ) 07 - 1017 - 05

## Node State Trend Analysis Model and Its Application of Petrochemical Device BN Topological Structure

TANG Gui-cheng<sup>1</sup>, XU Kai-li<sup>1</sup>, LI De-shun<sup>1 2 3</sup>, LIU Jia-xi<sup>1</sup>

( 1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China ; 2. Department of Safety Technology and Environment Protection, Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110425, China ; 3. School of Environmental & Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China. Corresponding author : TANG Gui-cheng, E-mail : guicheng\_tang@126. com )

**Abstract :** For the changing risk of the petrochemical device , the node state trend expression form of the petrochemical device BN( Bayesian network ) topological structure is given based on general set pair analysis( GSPA ) theory and BN , the node state trend calculation model of the petrochemical device BN topological structure is proposed , the node state trend grade of the petrochemical device BN topological structure is discussed , and the node state trend grade is divided in the same situation. Application results show that the leaf node “ the reaction fire explosion ” belongs to the same situation , and the reactor fire explosion event occurrence is major in the BN topological structure of the reactor fire explosion. The intermediate node connection degree and its state trend level are obtained , and the difference change of the connection degree will have some certain impact on the corresponding node situation and the node level , even the situation is reversed , and provides the basis for the node state and its state situation analysis of BN topological structure.

**Key words :** general set pair analysis( GSPA ) ; Bayesian network( BN ) ; connection degree ; leaf node ; node state trend

高温、高压等条件下运行的石化装置故障频发 , 极易由此触发火灾、爆炸、中毒等事故 . 在研究石化装置及其构件故障问题时 , 通常认为仅存在故障与可靠两种状态 , 这种假设过于简化 , 构件往往具有多种故障模式 , 例如装置电子控制系统线

路除了正常之外 , 还有短路或断路故障模式 , 这就迫切需要研究、发展多状态系统故障分析方法 . 文献 [ 1 ] 针对典型的二态系统可靠性数学模型存在的缺陷 , 提出了一种求解多态系统的可靠性方法 ; 文献 [ 2 ] 以串联系统、并联系统等基本模型为例 ,

建立基于随机故障序列的可靠性分析模型;文献[3]提出了基于模块分解的多态故障树分析方法,并基于多态多值决策图方法对子故障树进行建模,递归综合子故障树可靠性结果计算整个系统的可靠性,解决了底事件非统计独立的多态故障树模块分解问题。然而,现阶段对多态系统故障研究主要集中在概率计算、建模分析、故障结构分解等方面,对多态系统各种状态演变,尤其是各构件态势之间的比较未做深入研究。因此,利用广义集对分析(general set pair analysis, GSPA)理论解决多态系统不确定性问题的优势,针对石化装置 BN 拓扑结构,分析节点状态分布、节点联系度变化及节点态势等问题,为掌握石化装置各种状态分布情形,以及各状态下引发火灾、爆炸等事故概率问题提供了理论依据。

# 1 BN 拓扑结构与 GSPA 理论

## 1.1 BN 拓扑结构

计算石化装置状态概率时,需要构建关系错综复杂的结果事件与原因事件之间的石化装置 BN 拓扑结构。BN 是由随机变量和具有概率依赖关系的连接节点组成的有向无环图<sup>[4-5]</sup>,表示为  $N = \langle \langle V, E \rangle, P \rangle$ 。其中,  $\langle V, E \rangle$  表示一个具有  $n$  个节点的有向无环拓扑结构(或称有向无环图);  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$  表示 BN 节点变量集合,仅有父节点没有子节点的节点为叶节点,没有父节点仅有子节点的节点为根节点,这些节点代表原因事件或结果事件,有向边  $E$  连接具有因果关系的根节点、中间节点与叶节点,  $P$  表示各节点概率。

计算石化装置 BN 拓扑结构节点状态时,可通过条件概率链<sup>[6-8]</sup>来求解,即

$$P(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^N P(V_i | V_{i-1}, \dots, V_1). \quad (1)$$

同时,依据式(1)表征的节点逻辑关系,可得到包含所有节点的联合概率分布。其中,条件概率分布<sup>[9]</sup>(conditional probability distribution, CPD)表征节点间的逻辑定量关系。

## 1.2 GSPA 理论

GSPA<sup>[10]</sup>是解决不确定性问题的理论,可分析石化装置 BN 拓扑结构状态分布情形。在石化装置 BN 拓扑结构中,节点状态信息在一定条件下可互相转化,并通过联系度  $\mu$  从同一性  $a$ 、差异性  $b$ 、对立性  $c$  三方面加以描述,即  $\mu = a + bi + cj$ ;其中  $i$  表示差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ ,取值不同会影响最终分析结果,  $j$  表示对立。

# 2 石化装置 BN 拓扑结构节点态势分析

## 2.1 石化装置 BN 拓扑结构节点状态联系度

定义1 在石化装置 BN 拓扑结构节点  $V_k$  状态概率分布中,故障一定发生记作  $P(V_k^a)$ ,故障一定不发生记作  $P(V_k^c)$ ,故障不能确定是否发生记作  $P(V_k^b)$ ,则节点  $V_k$  状态联系度为

$$\mu_k^V = P(V_k^a) + P(V_k^b)i + P(V_k^c)j. \quad (2)$$

式中  $P(V_k^a) + P(V_k^b) + P(V_k^c) = 1$ 。

## 2.2 贝叶斯网络拓扑结构节点态势及其分级

定义2 如果石化装置 BN 拓扑结构节点  $V_k$  状态联系度为  $\mu_k^V = P(V_k^a) + P(V_k^b)i + P(V_k^c)j$ ,则节点  $V_k$  态势为

$$SH(H)_G^{V_k} = e^{P(V_k^a)} / e^{P(V_k^c)}. \quad (3)$$

石化装置拓扑结构中,节点态势可对节点各种状态发展趋势进行动态地分析,具体等级划分见表1。

表 1 节点态势等级划分  
Table 1 Grade division of node state trend

态势名称	广义集对势等级	$P(V_k^a), P(V_k^b), P(V_k^c)$ 关系	含义
均势	微均势	$P(V_k^a) = P(V_k^c), P(V_k^b) > P(V_k^a)$	均势微弱
	弱均势	$P(V_k^a) = P(V_k^c), P(V_k^a) = P(V_k^b)$	均势较弱
	强均势	$P(V_k^a) = P(V_k^c), P(V_k^a) > P(V_k^b)$	均势为主
	准均势	$P(V_k^a) = P(V_k^c), P(V_k^b) = 0$	均势确定
同势	准同势	$P(V_k^a) > P(V_k^c), P(V_k^b) = 0$	同一趋势确定
	强同势	$P(V_k^a) > P(V_k^c), P(V_k^c) > P(V_k^b)$	同一趋势为主
	弱同势	$P(V_k^a) > P(V_k^c), P(V_k^a) > P(V_k^b) > P(V_k^c)$	同一趋势较弱
	微同势	$P(V_k^a) > P(V_k^c), P(V_k^b) > P(V_k^a)$	同一趋势微弱
反势	准反势	$P(V_k^a) < P(V_k^c), P(V_k^b) = 0$	对立趋势确定
	强反势	$P(V_k^a) < P(V_k^c), P(V_k^a) > P(V_k^b)$	对立趋势为主
	弱反势	$P(V_k^a) < P(V_k^c), P(V_k^c) > P(V_k^b) > P(V_k^a)$	对立趋势较弱
	微反势	$P(V_k^a) < P(V_k^c), P(V_k^b) > P(V_k^c)$	对立趋势微弱

3 实例应用

3.1 反应器 BN 拓扑结构模型

反应-再生系统是石油化工有限公司重要的一个部分,以下将反应器作为一个系统,构建反应器火灾爆炸 BN 拓扑结构,应用 BN 与 GSPA 理论集成模型对反应器火灾爆炸进行分析.

其中  $T$  为反应器火灾、爆炸,  $E_1$  为反应器超压,  $E_2$  为反应器内进入空气,  $E_3$  为沉降器超压,  $E_4$  为提升管超压,  $E_5$  为系统堵塞,  $E_6$  为沉降器超压,  $E_7$  为油气分离器液面超高,  $E_8$  为分馏塔底液面超高.

根据企业反应器故障数据,得到了各根节点状态联系度,见表 2.

节点  $x_1$ ,  $E_5$ ,  $E_2$  之间的条件概率分布见表 3, 节点  $x_9$ ,  $x_{10}$ ,  $E_5$  之间的条件概率分布见表 4, 其他节点之间条件概率分布可以参照表 4. 其中“ $a$ ”

表示节点事件发生;“ $b$ ”表示节点事件是否发生不能确定;“ $c$ ”表示节点事件不发生. 对于条件概率,“1”表示发生;“0”表示不发生.

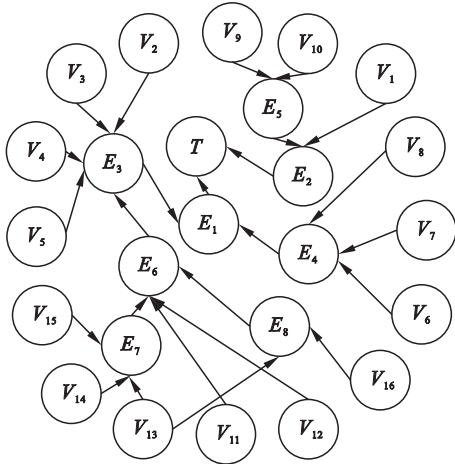


图 1 反应器火灾爆炸 BN 拓扑结构  
Fig. 1 BN topological structure of the reactor fire explosion

表 2 根节点状态联系度  
Table 2 Root node state connection degree

符号	根节点名称	节点状态联系度
$V_1$	差压超限自保系统故障	$\mu_{R(V_1)}=0.015+0.016i+0.969j$
$V_2$	仪表失灵	$\mu_{R(V_2)}=0.012+0.103i+0.885j$
$V_3$	汽提蒸汽带水量大	$\mu_{R(V_3)}=0.005+0.015i+0.980j$
$V_4$	单级旋风分离器故障	$\mu_{R(V_4)}=0.051+0.082i+0.867j$
$V_5$	分馏塔冲塔	$\mu_{R(V_5)}=0.013+0.069i+0.918j$
$V_6$	反应压力突然上升	$\mu_{R(V_6)}=0.021+0.023i+0.956j$
$V_7$	原料油带水	$\mu_{R(V_7)}=0.019+0.016i+0.865j$
$V_8$	粗旋风分离器故障	$\mu_{R(V_8)}=0.025+0.033i+0.942j$
$V_9$	两器差压调节阀故障	$\mu_{R(V_9)}=0.022+0.043i+0.935j$
$V_{10}$	开工时未关闭放空阀	$\mu_{R(V_{10})}=0.012+0.027i+0.961j$
$V_{11}$	大油气管线结焦	$\mu_{R(V_{11})}=0.012+0.017i+0.971j$
$V_{12}$	分馏塔顶冷却器堵塞	$\mu_{R(V_{12})}=0.008+0.012i+0.980j$
$V_{13}$	液位计失灵	$\mu_{R(V_{13})}=0.024+0.151i+0.825j$
$V_{14}$	调节阀故障	$\mu_{R(V_{14})}=0.064+0.023i+0.913j$
$V_{15}$	冷却器内漏	$\mu_{R(V_{15})}=0.011+0.022i+0.967j$
$V_{16}$	反应进料量突增	$\mu_{R(V_{16})}=0.051+0.042i+0.907j$

表 3  $x_1$ ,  $E_5$ ,  $E_2$  之间的“逻辑与”条件概率分布  
Table 3 CPD of “logic and” on  $x_1$ ,  $E_5$ ,  $E_2$

$x_1$	$E_5$	$P(E_2=a x_1,E_5)$	$P(E_2=b x_1,E_5)$	$P(E_2=c x_1,E_5)$
$a$	$a$	1	0	0
$a$	$b$	0	1	0
$a$ 或 $b$	$c$	0	0	1
$b$	$a$ 或 $b$	0	1	0
$c$	$a$ 或 $b$ 或 $c$	0	0	1

表 4  $x_9, x_{10}, E_5$  之间的“逻辑或”条件概率分布  
Table 4 The CPD of “logic or” on  $x_9, x_{10}, E_5$

$x_9$	$x_{10}$	$P(E_5 = a   x_9, x_{10})$	$P(E_5 = b   x_9, x_{10})$	$P(E_5 = c   x_9, x_{10})$
$a$	$a$ 或 $b$ 或 $c$	1	0	0
$b$ 或 $c$	$a$	1	0	0
$b$	$b$ 或 $c$	0	1	0
$c$	$b$	0	1	0
$c$	$c$	0	0	1

3.2 叶节点与中间节点态势分析态势等级,见表 5.

根据式(3),计算得到节点状态联系度及其

表 5 叶节点与中间状态联系度与态势  
Table 5 Connection degree and situation of leaf node and intermediate node

节点	节点状态联系度	态势	态势名称	广义集对势等级
$T$	$\mu_{R(T)} = 0.2932 + 0.4288i + 0.2780j$	1.0153	同势	广义微同势
$E_1$	$\mu_{R(E_1)} = 0.2928 + 0.4283i + 0.2789j$	1.0140	同势	广义微同势
$E_2$	$\mu_{R(E_2)} = 0.0005 + 0.0026i + 0.9969j$	0.3692	反势	广义弱反势
$E_3$	$\mu_{R(E_3)} = 0.2448 + 0.3972i + 0.3580j$	0.8930	反势	广义微反势
$E_4$	$\mu_{R(E_4)} = 0.0636 + 0.1574i + 0.7790j$	0.4890	反势	广义弱反势
$E_5$	$\mu_{R(E_5)} = 0.0337 + 0.0677i + 0.8985j$	0.4211	反势	广义弱反势
$E_6$	$\mu_{R(E_6)} = 0.1798 + 0.3015i + 0.5186j$	0.7126	反势	广义弱反势
$E_7$	$\mu_{R(E_7)} = 0.0965 + 0.1751i + 0.7284j$	0.5316	反势	广义弱反势
$E_8$	$\mu_{R(E_8)} = 0.0738 + 0.1779i + 0.7483j$	0.5094	反势	广义弱反势

3.2.1 叶节点  $T$  态势分析

由表 5 可知,叶节点状态联系度为  $\mu_{R(T)} = 0.2932 + 0.4288i + 0.2780j$ ,态势  $SHI(H)_G^{V_T} = 1.0153$ ,则表明叶节点处于“广义微同势”,以叶节点“反应器火灾爆炸”发生为主.当相关人员定期关注、维护反应器及其构件时, $i$ 取  $-1$  ;“ $b$ ”向“ $c$ ”转化,叶节点状态联系度  $\mu_{R(T)} = 0.2932 + 0i + 0.7068j$ ,态势  $SHI(H)_G^{V_T} = 4.1530$ ,叶节点处于“广义准反势”,对立趋势确定,叶节点“反应器火灾爆炸事件”发生态势小于不发生态势;当相关人员未定期关注、维护反应器及其构件时, $i$ 取  $1$  ;“ $b$ ”向“ $a$ ”转化  $\mu_{R(T)} = 0.7220 + 0i + 0.2780j$ , $SHI(H)_G^{V_T} = 2.5971$ ,叶节点处于“广义准同势”,同一趋势确定,叶节点“反应器火灾爆炸”发生态势高于不发生态势,发生态势升高.

3.2.2 中间节点态势分析

节点  $E_1$  处于“广义同势”,说明其均以“反应器超压发生态势”为主,但这种态势仅仅是暂时的,其态势会随着根节点状态变化而变化.例如,当  $i$  取  $-1$  时,“ $b$ ”向“ $c$ ”转化,即其状态联系度变为  $\mu_{R(E_1)} = 0.2928 + 0i + 0.7072j$ ,此时,态势  $SHI(H)_G^{E_1} = 0.4140$ ,节点  $E_1$  态势由“广义微同势”变为“广义准反势”,说明节点不确定性部分

经过变化,反应器超压发生态势减少,对立趋势确定,以反应器超压不发生态势为主.

4 结 论

- 1) 针对石化装置 BN 拓扑结构节点状态不确定性特点,充分利用 GSPA 理论联系度优势,从同、异、反 3 个角度提出了其节点状态联系度表示方法,更加客观地反映了其节点状态实际分布情形,避免了二态系统瓶颈问题.
- 2) 针对节点状态联系度的同一性、对立性确定情形,提出了 BN 拓扑结构节点态势概念,并给出了其定义,分析了石化装置 BN 拓扑结构各节点状态分布及其变化,为石化装置故障、可靠状态倾向分析提供了方向.
- 3) 根据催化裂化反应再生系统的反应器火灾爆炸发生的可能原因,构建了反应器火灾爆炸 BN 拓扑结构,讨论了各节点之间的逻辑关系,针对节点联系度中的不确定性,讨论了不确定性状态变化对节点态势及其等级的影响.结果表明:反应器各根节点状态分布情形会影响反应器火灾爆炸等事件的发生程度,尤其是引发节点态势变化,甚至发生逆转现象,此分析为动态了解反应器火

灾、爆炸等事件态势发展奠定了基础。

参考文献：

[ 1 ] 唐良忠 程礼. 求离散多态系统可靠性的矩阵分析法[ J ]. 空军工程大学学报( 自然科学版 ) 2004 ,5( 2 ) 92 – 94.  
( Tang Liang-zhong ,Cheng Li. Matrix analysis method for calculating reliability of discrete multiform system[ J ]. *Journal of Air Force Engineering University( Natural Science Edition )* 2004 ,5( 2 ) 92 – 94. )

[ 2 ] 赵熙. 基于随机故障序列的多态系统可靠性分析[ J ]. 装备制造技术 2014( 3 ) 59 – 61.  
( Zhao Xi. The multi-state reliability analysis based on stochastic failure sequence[ J ]. *Equipment Manufacturing Technology* 2014( 3 ) 59 – 61. )

[ 3 ] 李淑敏 孙树栋 ,司书宾 ,等. 基于模块分解的多态故障树可靠性分析方法[ J ]. 西北工业大学学报 ,2014 ,32( 2 ) : 251 – 255.  
( Li Shu-min ,Sun Shu-dong ,Si Shu-bin ,et al. A modular method for multi-state fault tree reliability analysis[ J ]. *Journal of Northwestern Polytechnical University* ,2014 ,32( 2 ) 251 – 255. )

[ 4 ] Larranaga P ,Karshenas H ,Bielza C ,et al. A review on evolutionary algorithms in Bayesian network learning and

inference tasks[ J ]. *Information Sciences* 2013 233 109 – 125.

[ 5 ] De Stefano C ,Folino G ,Fontanella F ,et al. Using Bayesian networks for selecting classifiers in GP ensembles [ J ]. *Information Sciences* 2014 258 200 – 216.

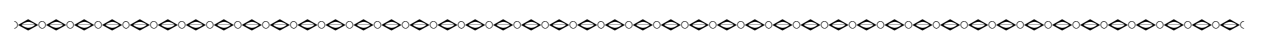
[ 6 ] Feng G ,Zhang J D ,Shao S ,et al. A novel method for combining Bayesian networks ,theoretical analysis ,and its applications [ J ]. *Pattern Recognition* 2014 47( 5 ) :2057 – 2069.

[ 7 ] Troldborg M ,Aalders I ,Towers W ,et al. Application of Bayesian belief networks to quantify and map areas at risk to soil threats using soil compaction as an example[ J ]. *Soil & Tillage Research* 2013 132 56 – 68.

[ 8 ] Sucar L E ,Bielza C ,Morales E F ,et al. Multi-label classification with Bayesian network-based chain classifiers [ J ]. *Pattern Recognition Letters* 2014 41 :14 – 22.

[ 9 ] Flores M J ,Gómez J A ,Martínez A M. Domains of competence of the semi-naive Bayesian network classifiers [ J ]. *Information Sciences* 2014 260 :120 – 148.

[ 10 ] 李德顺. 基于广义集对分析理论的系统危险性评价[ D ]. 沈阳 :东北大学 2010.  
( Li De-shun. Research on system risk assessment based on general set pair analysis [ D ]. Shenyang : Northeastern University 2010. )



( 上接第 1012 页 )

参考文献：

[ 1 ] Shin H J ,Choi J Y ,Park H I ,et al. Vibration analysis and measurements through prediction of electromagnetic vibration sources of permanent magnet synchronous motor based on analytical magnetic field calculations[ J ]. *IEEE Transactions on Magnetics* ,2012 48( 11 ) :4216 – 4219.

[ 2 ] Shaltout A A. Analysis of torsional vibration in starting of large squirrel cage induction motors[ J ]. *IEEE Transaction on Energy and Conversion* ,1994 9( 1 ) :135 – 138.

[ 3 ] Lundström N L P ,Aidanpää J O. Dynamic consequences of electromagnetic pull due to deviations in generator shape [ J ]. *Journal of Sound and Vibration* ,2007 ,301 ( 1/2 ) : 207 – 225.

[ 4 ] Jason D E ,Zhu Z Q ,Howe D. Rotor resonances of high-speed permanent magnet brushless machines [ J ]. *IEEE Transaction on Industry Applications* 2000 ,38( 6 ) :1542 – 1548.

[ 5 ] Pennacchi P. Computational model for calculating the dynamical behavior of generators caused by unbalanced magnetic pull experimental validation [ J ]. *Journal of Sound and Vibration* 2008 312( 1/2 ) 332 – 353.

[ 6 ] Guo D ,Chu F ,Chen D. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor[ J ]. *Journal of Sound and Vibration* ,2002 ,254( 2 ) : 297 – 312.

[ 7 ] 邱家俊 杨志安. 发电机组转子轴系扭振双重共振的理论 与实验研究[ J ]. 应用力学学报 ,1999 ,16( 3 ) 33 – 38.  
( Qiu Jia-jun ,Yang Zhi-an. A theoretical and experimental investigation of double resonances of a rotor-shafting torsional vibration system of a generator set[ J ]. *Chinese Journal of Applied* 1999 ,16( 3 ) 33 – 38. )

[ 8 ] Niu X Z ,Qiu J. Investigation of torsional instability , bifurcation , and chaos of a generator set [ J ]. *IEEE Transaction on Energy Conversion* 2002 ,17( 2 ) :164 – 168.

[ 9 ] 杨志安 李文兰 ,邱家俊. 发电机轴系电磁激发扭振主共振与奇异性[ J ]. 天津大学学报 2007 40( 7 ) 864 – 868.  
( Yang Zhi-an ,Li Wen-lan ,Qiu Jia-jun. Primary resonance of generator set shafting torsion vibration excited by electromagnetism and its singularity[ J ]. *Journal of Tianjin University* 2007 40( 7 ) 864 – 868. )

[ 10 ] 邱家俊. 机电耦联动力系统的非线性振动[ M ]. 北京 :科学出版社 ,1996.  
( Qiu Jia-jun. Nonlinear vibration of coupled mechanical and electric dynamic systems[ M ]. Beijing :Science Press ,1996. )

[ 11 ] 冯霏 李凌轩 ,陈亚哲 ,等. 汽车非线性悬架系统共振特性的研究[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ) ,2010 ,31( 2 ) : 415 – 417.  
( Feng Fei ,Li Ling-xuan ,Chen Ya-zhe ,et al. Research on resonance characteristics of nonlinear suspension[ J ]. *Journal of Northeastern University( Natural Science )* 2010 31( 2 ) : 415 – 417. )