

基于 Delphi-模糊 Petri 网的航空发动机故障诊断

张光宇, 张福光, 程继红

(海军航空大学 岸防兵学院, 山东烟台 264001)

摘要: 针对航空发动机故障诊断的实际问题, 给出了模糊 Petri 网的定义, 同时在各类模糊式规则的基础上, 建立了故障诊断推理方法及故障原因判断准则。通过对航空发动机滑油系统最小滑油压力信号灯燃亮故障的实例分析, 将 Delphi 法与模糊 Petri 网结合, 综合 2 种方法的优点, 采用反向故障诊断, 用 Delphi 法计算出所有可能的故障原因的置信度, 验证了 Delphi-模糊 Petri 网在故障诊断方面的有效性与所建立模型的可行性, 为航空发动机的故障定位与故障原因推理提供了 1 种可行方法。

关键词: 故障诊断; Delphi-模糊 Petri 网; 置信度; 航空发动机

中图分类号: V233.4+4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.06.001

Aeroengine Fault Diagnosis Based on Delphi-fuzzy Petri Net

ZHANG Guang-yu, ZHANG Fu-guang, CHENG Ji-hong

(Coast Defence College, Naval Aeronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the practical problem of aeroengine fault diagnosis, the definition of fuzzy Petri net was given, and on the basis of various fuzzy rules, the reasoning method of fault diagnosis and the judgment criterion of fault cause were given. By analyzing light up fault of minimum oil pressure signal lamp of aeroengine lubricating system, the Delphi method and the fuzzy Petri nets were combined. By integrating the advantages of two methods using backward fault diagnosis, the confidence coefficients of all possible fault causes were calculated by Delphi method. The results show that the Delphi - fuzzy Petri net is effective in fault diagnosis, and the established model is feasible for aeroengine fault location and fault cause reasoning.

Key words: fault diagnosis; Delphi-fuzzy Petri net; confidence coefficient; aeroengine

0 引言

航空发动机为飞机或其他航空器提供动力来源, 具有高度复杂与精密的特点。飞机整体的可靠性和经济性与航空发动机息息相关^[1-2], 未来的发动机还将使用综合智能化的数字电子控制系统^[3], 更会增加其复杂性。如何准确定位发动机的故障部位, 判断故障原因, 一直是其维修保障过程中的关键问题^[4]。目前国内发动机故障诊断方法有神经网络法、深度学习法、模糊粗糙集法、支持向量机方法、软件仿真法等, 针对不同类型故障有着各自特点。

Petri 网方法是德国科学家 Carl Adam Petri 提出的 1 种建模方法。对于进程或部件的顺序、冲突以及

同步等关系, Petri 网方法比其他方法的描述更方便, 并且其独有的运算方法的修改与改进更为便捷^[5]。将 Petri 网理论用于故障诊断目前在电网系统、工程液压系统、航空航天、高铁运输等领域中有很多应用实例, 基于模糊 Petri 网(Fuzzy Petri Net)的故障诊断方法将 Petri 网与模糊理论相结合, 将运算规则、置信度及变迁等模糊化, 把知识表示和诊断推理融为一体^[5]。Delphi 法是 1 种传统的定性与定量相结合的研究方法, 具有较好的综合性。

本文将模糊 Petri 网的理论与 Delphi 法相结合, 用于航空发动机的故障诊断, 讨论其故障诊断模型的建立及运算规则, 并进行了实例验证。

收稿日期: 2019-08-28

作者简介: 张光宇(1992), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为航空装备综合保障; E-mail: 466106597@qq.com。

引用格式: 张光宇, 张福光, 程继红. 基于 Delphi-模糊 Petri 网的航空发动机故障诊断[J]. 航空发动机, 46(6): 1-5. ZHANG Guangyu, ZHANG Fuguang, CHENG Jihong. Aeroengine fault diagnosis based on Delphi-fuzzy Petri net[J]. Aeroengine, 46(6): 1-5.

1 针对故障诊断的模糊 Petri 网

模糊 Petri 网可以用来描述系统不确定性知识,是 1 种较好的图形化建模工具^[6],而故障诊断过程就是充满着模糊性及不确定性的过程,用模糊 Petri 网来处理这种模糊规则的故障诊断事件,解决了传统 Petri 网只能处理精确知识,无法处理现实事件中不确定性知识的问题^[7]。

1.1 模糊 Petri 网

在 Petri 网中,有以下几个基本的构成要素^[8]:

(1)用库所(Place)来表示状态,一般用圆表示。

(2)用变迁(Transition)表示事件或者转换过程,一般用矩形来表示。

(3)用流关系(Flow Relation)表示事件发生的条件,或者用弧(Arc)来表示库所与变迁之间的关系。

(4)标志(Token)一般用库所里的点来表示,或者直接写成数字,表示系统中的数据、状态或者资源。

以上要素构成了网(Net)的基本结构,如图 1 所示。

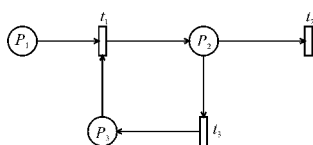


图 1 基本 Petri 网的结构

不同的文献在不同的应用背景下,对模糊 Petri 网给出过多种定义,将模糊式产生规则与基本 Petri 网的定义相结合,那么模糊 Petri 网就有了如下的 8 元组^[9]定义

$$FN=(P,T,\alpha,\beta,I,O,\mu,\theta)$$

式中: $P=\{p_1,p_2,\dots,p_n\}$ 为所有库所节点的有限集合; $T=\{t_1,t_2,\dots,t_m\}$ 为变迁节点的有限集合; $\alpha\subseteq(P\times T)$ 和 $\beta\subseteq(T\times P)$ 分别为库所到变迁和变迁到库所的流关系,在模型中也就是有向弧; I 和 O 分别为变迁到库所的输入函数和库所到变迁的输出函数; $\mu\in[0,1]$ 为库所为真或变迁发生规则的置信因子; θ 为变迁规则发生的阈值,当变迁的置信度 $\mu>\theta$ 时,变迁才会发生。

不同于传统 Petri 网,模糊 Petri 网并不存在并发与冲突的问题;库所内的标志的个数也只有 0 或 1 这 2 种状态,这是因为在模糊 Petri 网中,库所代表的是故障模式,只有故障不发生和故障发生 2 种模式;同时在变迁上也多了 1 个介于 0 和 1 之间的可信度。

1.2 模糊式产生规则

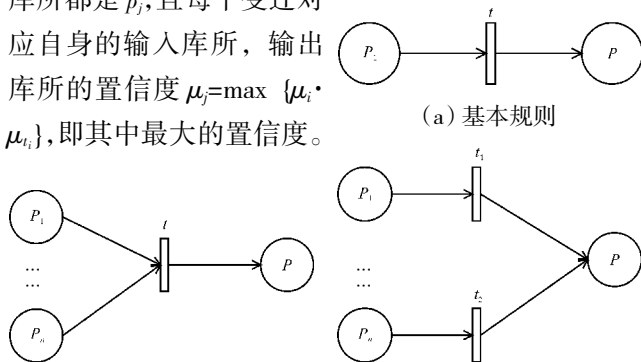
模糊式产生规则表示的是输入库所与输出库所的模糊关系,在故障诊断模型中即为故障事件与故障

原因的 1 种模糊关系,在这里采用在 MYCIN 专家系统中的 1 种推理方法,即基于可信度的不精确推理^[8],主要包括以下几种^[10-11]:

(1)基本型。如图 2(a)所示。 R_i :if p_i , then p_j ($CF_{p_i}=\mu_i$),在该型规则下,变迁 t 的前与后只有 1 个输入库所与输出库所,输出库所的置信度 $\mu_j=\mu_i\cdot\mu_t$,即输入库所的置信度 μ_i 与变迁的置信度 μ_t 的乘积。

(2)“与”型。如图 2(b)所示。 R_i :if p_1 and p_2 and... and p_n , then p_j ($CF_{p_i}=\mu_i$),在该型规则下,变迁有多个输入库所,但是只有 1 个输出库所,输出库所的置信度 $\mu_j=\overline{\mu_i}\cdot\mu_t$,其中 $\overline{\mu_i}$ 为 $\mu_1,\mu_2,\dots,\mu_n$ 的均值($i=1,2,\dots,n$)。

(3)“或”型。如图 2(c)所示。 R_i :if p_1 or p_2 or... or p_n , then p_j ($CF_{p_i}=\mu_i$),在该型规则下,变迁 t_1 到 t_n 的输出库所都是 p_j ,且每个变迁对应自身的输入库所,输出库所的置信度 $\mu_j=\max\{\mu_i\cdot\mu_{t_i}\}$,即其中最大的置信度。



(b) “与”规则

(c) “或”规则

图 2 模糊式产生规则

以上 $CF=\{\mu_1,\mu_2,\dots,\mu_n\}$ 为有限的规则置信度集合,置信度 $\mu_i\in[0,1]$,在此范围内 μ_i 的值越大,表示库所代表的故障事件或者变迁代表的故障行为越有可能发生。

1.3 基于 Delphi-模糊 Petri 网故障诊断的推理过程

Delphi 法适用于没有精确资料的问题研究^[12],综合性较强,常被用在预测及评价领域,但该方法具有主观性,将其与模糊 Petri 法相结合,进行故障诊断问题的推理。

故障诊断的过程一般是对故障现象进行分析,推理出故障的具体原因及故障结论,也就是所谓的反向推理^[13],找出所有可能导致故障发生的输入库所以及传播路径,并比较置信度大小,从而判断故障起始原因。

在 Delphi-模糊 Petri 网故障诊断方法中的推理

过程^[14]如下:

- (1)根据实际故障情况进行分析,确定故障模式。
- (2)采用 Delphi 法,通过调查问卷的形式综合分析专家的观点及日常工作经验,确定置信度等定量数据。
- (3)对库所的权重进行赋值。
- (4)根据置信度 μ 与阈值 θ 的比较,选出导致最终故障的变迁规则置信度最大的库所。
- (5)依次计算所有库所的概率,根据预先设定的初始置信度与模糊规则计算每个初始库所到最终库所的置信度,并与阈值 θ 进行比较,若大于阈值,则命题成立。
- (6)比较所有命题成立的库所置信度大小,按照置信度越大越优先的顺序排列,推理过程结束。

2 基于 Delphi-模糊 Petri 网的航空发动机故障诊断实例模型

在进行故障诊断时,如何尽快定位故障原因,减少不必要的冗余推理,并将各类故障的可能性尽可能排列出来,是 Delphi-模糊 Petri 网故障诊断方法要解决的问题。

2.1 航空发动机故障诊断实例描述

某型军用教练机现单发装备某型涡扇发动机。根据部队实际工作调研,在日常飞行过程或地面检查试车中,会出现最小滑油信号灯燃亮、滑油压力摆动过大、滑油压力超规定值等故障。由于滑油系统部件较多,滑油工作条件恶劣,发动机对滑油系统的要求又较为严格,给地勤维护保障人员的排故工作带来一定的挑战。

结合保障一线的实际情况,选取某型发动机滑油系统故障中的 1 种:最小滑油信号灯燃亮,进行基于模糊 Petri 网的模型构造。该故障关系如图 3 所示。

从图中可见,造成最小滑油信号灯燃亮的 3 个主要原因是滑油压力异常、压力传感信号异常和其他非典型故障(此类故障出现可能性小,多为意外故障)。滑油压力异常是指滑油在工作过程中压力确实超过了规定值,其原因主要包括滑油油量不足、滑油系统存在气塞、调压活门故障、滑油泵故障、滑油箱损坏;压力传感信号异常是指仅为信号问题,而滑油压力正常,其原因主要包括最小滑油压力信号器故障、温度与金属屑信号器故障、磁性堵塞或滑油滤有金属屑。

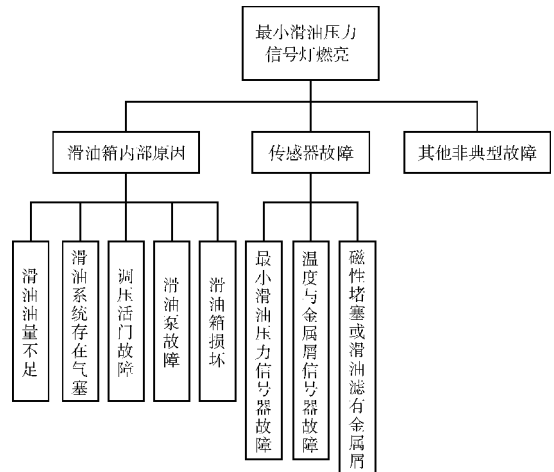


图3 故障关系

2.2 故障诊断模型建立与分析

在模型分析中,阈值的选取很关键,阈值定得过大,故障可能无法被检出,造成漏诊;而阈值定得过小,系统又容易产生误诊。根据该型发动机在实际使用过程中的滑油系统故障报告统计及 FMECA 方法^[15],结合 Delphi 方法,按照文献[16]中的单因素确定方法的计算流程,制定出合理的故障检测阈值,选取故障阈值 $\theta=0.6$,其他各初始库所的置信度以及各变迁的置信度皆可由以上方法得出。

根据之前的故障分析与故障关系,结合模糊 Petri 网,用库所来表示故障模式,变迁表示故障行为,按照各类故障的从属关系建立起的故障诊断模型如图 4 所示。

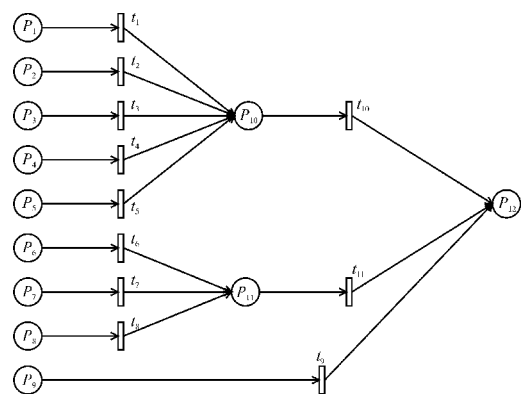


图4 最小滑油信号灯燃亮故障诊断模糊 Petri 网模型

模型中库所、变迁的含义以及置信度等见表 1。

根据建立起来的模糊 Petri 网模型,分析计算过程如下:

- (1) p_{12} 为最终库所,也就是最小滑油压力信号灯燃亮,可知引发 p_{12} 发生的路径有 3 条,分别为 $p_{10} \rightarrow$

表 1 库所、变迁含义及置信度

库所	故障模式	置信度	变迁	故障行为	置信度
p_1	滑油油量不足	0.83	t_1	滑油压力异常	0.80
p_2	滑油系统存在气塞	0.78	t_2	滑油压力异常	0.80
p_3	调压活门故障	0.72	t_3	滑油压力异常	0.80
p_4	滑油泵故障	0.65	t_4	滑油压力异常	0.80
p_5	滑油箱损坏	0.52	t_5	滑油压力异常	0.80
p_6	最小滑油压力信号器故障	0.65	t_6	出现虚警	0.75
p_7	温度与金属屑信号器故障	0.63	t_7	滑油压力信号异常	0.78
p_8	磁性堵塞或滑油滤有金属屑	0.81	t_8	滑油压力信号异常	0.85
p_9	其他非典型故障	0.2	t_9	其他意外问题	0.60
p_{10}	滑油箱内部原因		t_{10}	滑油压力异常	0.90
p_{11}	传感器故障		t_{11}	滑油压力信号异常	0.80
p_{12}	最小滑油压力信号灯燃亮				

$p_{12}, p_{11} \rightarrow p_{12}, p_9 \rightarrow p_{12}$; 属于它们的变迁规则的置信度里最大的为 $\mu_{t_{10}}=0.9$, 故优先选择路径 $p_{10} \rightarrow p_{12}$ 。

(2)再分别计算路径 $p_1 \rightarrow p_{10}, p_2 \rightarrow p_{10}, p_3 \rightarrow p_{10}, p_4 \rightarrow p_{10}, p_5 \rightarrow p_{12}$ 的置信度分别为: $\mu_1 = \mu_{p_1} \cdot \mu_{t_1} = 0.664, \mu_2 = \mu_{p_2} \cdot \mu_{t_2} = 0.624, \mu_3 = \mu_{p_3} \cdot \mu_{t_3} = 0.576, \mu_4 = \mu_{p_4} \cdot \mu_{t_4} = 0.52, \mu_5 = \mu_{p_5} \cdot \mu_{t_5} = 0.416$, 可知 $\mu_1 > \mu_2 > \theta$, 故变迁 t_1 与 t_2 会发生。

(3)再选择 $p_{11} \rightarrow p_{12}$ 路径, 分别计算出 $p_6 \rightarrow p_{11}, p_7 \rightarrow p_{11}, p_8 \rightarrow p_{11}$ 路径的置信度为: $\mu_6 = \mu_{p_6} \cdot \mu_{t_6}, \mu_7 = \mu_{p_7} \cdot \mu_{t_7}, \mu_8 = \mu_{p_8} \cdot \mu_{t_8}$; 可以看到 $\mu_8 > \theta$, 故变迁 t_8 会发生。

(4)路径 $p_9 \rightarrow p_{12}$ 的置信度为: $\mu_9 = \mu_{p_9} \cdot \mu_{t_9} = 0.12$, 远小于 θ 。

经过推理分析可知, 导致最终库所 P_{12} 发生的起始库所为 P_1, P_2, P_8 , 如图 5 所示。根据置信度的大小排序, P_8 最有可能发生, 也就是磁性堵塞或滑油滤有金属屑最有可能是故障原因; 其次是 P_1 , 滑油油量不足; 然后是 P_2 , 滑油系统存在气塞。因此, 以上 3 种故障原因要优先排查。

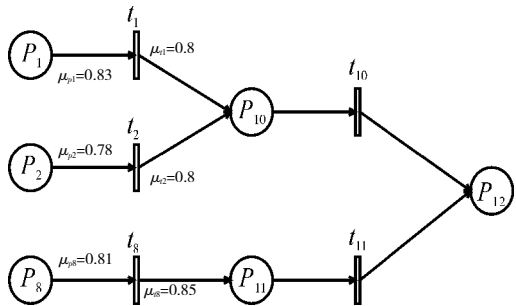


图 5 可能的故障原因路径

在实际工作中, 一线机务人员的排故过程是先检查磁性堵塞与滑油滤以及信号故障, 再检查滑油箱内部, 在油箱内部先检查油量与气塞情况, 基本与推理分析的结果一致。目前此种检查模式已经在一线机务排故手册中采用。该方法有效减少了在故障诊断过程中的冗余推理, 节省故障诊断时间, 提高故障诊断效率。

3 结束语

本文通过对故障诊断的建模计算与分析, 得到与实际情况一致的推理结果。将 Delphi 法与模糊 Petri 网的应用优势结合在一起, 采用反向推理, 在推理计算过程中只需考虑与目标库所有联系的路径, 逻辑关系简单清晰, 减少了故障诊断中的冗余推理, 并且能够在推理过程中通过计算将所有故障可能性自动排列清楚, 提高了故障诊断效率, 能较好地处理故障事件中的模糊信息, 为航空发动机故障诊断提供了 1 种可行方法。

在下一步的研究工作中将重点解决阈值与置信度选取、加入时间因素等问题, 以求更直观地反映故障诊断效率。

参考文献:

- [1] 赖少将. 考虑摩擦热效应的转子叶片可靠性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
LAI Shaojiang. Reliability analysis of rotor blade considering the friction thermal effect[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [2] 梁磊, 徐洪志, 安学利, 等. 航空发动机故障特征仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4): 60–63, 224.
LIANG Lei, XU Hongzhi, AN Xueli, et al. Fault analysis and simulation for aeroengine [J]. Computer Simulation, 2012, 29 (4): 60–63, 224. (in Chinese)
- [3] 张传超, 史永胜, 宋云雪. 航空发动机健康管理技术进展及趋势[J]. 航空发动机, 2008, 34(4): 51–53, 58.

- ZHANG Chuanchao, SHI Yongsheng, SONG Yunxue. Development and trend of health management technology for aeroengine [J]. Aeroengine, 2008, 34(4): 51-53, 58. (in Chinese)
- [4] 马星远. 可视化信息界面中用户认知行为及生理特征研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- MA Xingyuan. Research on users' cognitive behavior and physiological characteristics in visual information interface[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [5] 李厦, 乌建中. 模糊 Petri 网在液压同步提升系统故障诊断中的应用[J]. 中国工程机械学报, 2006(1): 68-71.
- LI Xia, WU Jianzhong. Application of fuzzy Petri nets in hydraulic synchronizing system fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006(1): 68-71. (in Chinese)
- [6] Rajeev R K, Amarjit K S, Tiwari M K. A fuzzy based algorithm to solve the machine-loading problems of a FMS and its neuro fuzzy Petri net model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(5-6): 318-341.
- [7] 张超, 晁鹏军, 张接信. 基于模糊 Petri 网的混凝土泵液压系统故障诊断[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(5): 87-91.
- ZHANG Chao, CHAO Pengjun, ZHANG Jiexin. Fault diagnosis of hydraulic system of concrete pump based on fuzzy Petri network[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2015, 32(5): 87-91. (in Chinese)
- [8] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- WU Zhehui. Introductory theory of Petri net[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Jianfeng Z, Genserik R, Aobing Z. A weighted fuzzy Petri-net based approach for security risk assessment in the chemical industry [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 174(31): 136-145.
- [10] 赵佳, 吕弘, 刘宝, 等. 基于模糊 Petri 网的卫星导航接收系统故障诊断[J]. 测试技术学报, 2017, 31(5): 438-442.
- ZHAO Jia, LYU Hong, LIU Bao, et al. Fault diagnosis for GNSS receiver based on fuzzy Petri net [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2017, 31(5): 438-442. (in Chinese)
- [11] 陈克伟, 李丹, 董利霞. 模糊 Petri 网在车电系统总线故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(6): 1513-1514, 1517.
- CHEN Kewei, LI Dan, DONG Lixia. Fault diagnosis of bus in integrated avionics system using fuzzy Petri net [J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(6): 1513-1514, 1517. (in Chinese)
- [12] Dalkey N, Helmer O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts [J]. Management Science, 1963, 9(3): 458-467.
- [13] 程学珍, 朱晓林, 杜彦宾, 等. 基于神经模糊 Petri 网的高压断路器故障诊断研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2535-2544.
- CHENG Xuezhen, ZHU Xiaolin, DU Yanbin, et al. High voltage circuit breaker fault diagnosis based on neural fuzzy Petri nets [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2018, 33(11): 2535-2544. (in Chinese)
- [14] 孔岱, 李红伟. 模糊 Petri 网在压缩机故障诊断中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(1): 271-275.
- KONG Dai, LI Hongwei. Fuzzy Petri nets and its application in fault diagnosis of compressor [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(1): 271-275. (in Chinese)
- [15] 孙宝琛, 贾希胜, 程中华. 基于 FMEA 和模糊 Petri 网推理的装备保障过程诊断研究 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2973-2977, 2984.
- SUN Baochen, JIA Xisheng, CHENG Zhonghua. Study on diagnosis model for support process based on FMEA and fuzzy reasoning Petri nets [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(8): 2973-2977, 2984. (in Chinese)
- [16] 谢倩, 乐晓波, 周恺卿, 等. 模糊 Petri 网库所集中 token 初始值的确定方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(12): 49-52, 62.
- XIE Qian, YUE Xiaobo, ZHOU Kaiqing, et al. Determination of token in initial places of fuzzy Petri nets [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(12): 49-52, 62. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)