

DOI:10.13196/j.cims.2015.06.019

## 基于图论的数控机床故障诊断方法

盛 博<sup>1</sup>, 邓 超<sup>1</sup>, 熊 尧<sup>2</sup>, 王远航<sup>1</sup>, 罗志骏<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 机械学院制造装备数字化国家工程中心, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:**针对数控机床故障诊断问题的复杂性特点,研究了基于图论算法的数控机床故障诊断的方法。对故障传播关系的表征建立了多故障传播模型,并对其进行矩阵化和层次化处理,再利用基于全局风险影响度的故障原因定位算法对多故障进行排序,确定故障原因的优先级。以数控镗床 FB260 的滑枕进给子系统的故障诊断为例,论证了该方法的正确性及有效性。

**关键词:**数控机床;故障诊断;图论;多故障传播模型

**中图分类号:**TH17;TP206

**文献标识码:**A

### Fault diagnosis for CNC machine tool based on graph theory

SHENG Bo<sup>1</sup>, DENG Chao<sup>1</sup>, XIONG Yao<sup>2</sup>, WANG Yuanhang<sup>1</sup>, LUO Zhijun<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology, Huazhong University of

Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** According to the complex natures of fault diagnosis for CNC machine tool, the fault diagnosis based on graph theory was researched. The multi-fault propagating model was proposed to represent these complex natures by characterizing the relationships of fault propagation, and this model would be processed by the matrix algorithm and the hierarchy algorithm. The priority of source faults was sorted by the risk-based fault localization algorithm. The effectiveness and correctness of proposed method was proved by a case of ram feed system of CNC boring machine tool FB260.

**Keywords:** numerical control machine tool; fault diagnosis; graph theory; multi-fault propagating model

## 0 引言

随着中国制造业产业的不断升级,数控机床的综合保障成为当今我国制造业发展的瓶颈,而数控机床的故障诊断是其中重要的技术之一。许多学者对数控机床的故障诊断进行了研究,主要方法包括专家系统诊断法、图论诊断法、故障树诊断法和参数估计诊断法等。其中专家系统诊断方法将领域专家中所有关于某设备器材的故障都集中起来,通过数

据库和推理机的方法进行整合,该方法能直观地表达故障和进行诊断,但对未知故障的诊断缺乏依据,且二叉树的模式可能导致搜索的偏差;故障树诊断法的直观性强、通用性好、灵活性强,但建树过程繁杂,工作量很大并易错漏,因此仅适合于故障空间较小的诊断问题<sup>[1]</sup>;参数估计诊断法的测验时间较短、判断结果较准确,故障分离过程方便,算法也相对简单,能够诊断多处故障且计算量也不大,但是在应用时受到较大限制,即诊断非线性或时变的系统

收稿日期:2014-04-02;修订日期:2014-09-01。Received 02 Apr. 2014; accepted 01 Sep. 2014.

基金项目:国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(51121002);国家 973 计划资助项目(2011CB706803);国家自然科学基金资助项目(51375181)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51121002, 51375181), and the Major State Basic Research Development Program, China (No. 2011CB706803).

时机理建模比较困难<sup>[2]</sup>;图论诊断法不但能有效地避免上述缺点,而且有直观的图形表达方式,在故障模型建立的速度和识别新的故障等方面也有明显优势。此外,传统的图论诊断法多基于发生率进行故障定位,无法确定故障的轻重等级和检测难易程度,从而导致定位的故障不符合实际排查情况,因此本文在图论诊断方法的基础上引入全局风险影响度,以更准确有效地实现数控机床的故障诊断。

## 1 故障传播关系的表征

### 1.1 故障的含义

机械故障主要有以下两层含义:①机械系统偏离正常状态,主要是由于机械系统或零部件的工作状态不正常,但是通过修复零部件或调节各项参数即可恢复到正常状态;②机械功能失效,指机械系统不断地偏离正常功能,且该情况有不断加深的趋势,导致机械设备的基本功能无法得到有效保证。一般普通零部件的失效可能不会引起机械系统的故障,但是核心零部件的失效则很有可能使整机功能完全丧失<sup>[3]</sup>。从系统的观点来看,机械故障可用故障部件和故障模式的空间来表示<sup>[4]</sup>,即故障=故障部件+故障模式,如图 1 所示。

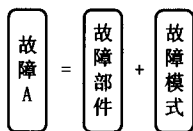


图1 机械故障分解图

此外,机械故障的特点主要包括以下两点:

(1)传播性 机械设备种类虽然很多,但是有一个共同特点,即大部分机械故障具有传播性,一个故障的发生往往是由其他故障引起的。这是由机械设备的复杂性导致的,不但同一部件的不同零件之间相互关联、密切耦合,而且不同部件之间也联系紧密,特别是一些大型数控机床,任何一个细微的故障,都可能通过零件、部件之间的耦合或关联作用而得到传播蔓延、累积放大,最终导致一些严重故障的发生。

(2)层次性 从系统特性来看,除了诸如模糊性、离散性、趋势性、随机性、缓变性、突发性、间歇性和连续性<sup>[3]</sup>等一般特性外,由于机械设备往往都是由许多零部件组装而成的,且各个零部件互相作用、互相耦合,从而产生了机械故障的层次性。一种故障往往可以由多种故障原因所导致,且故障与故障

间有相互对应的因果关系。

构造故障传播模型就是知识获取和表达的过程,将系统深层的知识通过一套标准化的处理方法转化为故障诊断可以使用的形式,即故障传播图。为了清晰快速地进行故障诊断,本文建立单故障传播模型和多故障传播模型来表征故障间的传播关系,并提出一种基于图论的多故障诊断方法。

### 1.2 单故障传播模型

单故障传播模型是指某故障只有一个故障原因,且该故障原因不会由其他故障所引起。

如图 2 所示,故障 A 表征已发生的故障,故障 1 是故障 A 的故障原因,带箭头的边表征故障传播的回溯方法(即故障 1 引起了故障 A 的发生)。但是这种类型的故障多在电子设备上发生,机械设备中发生较少。

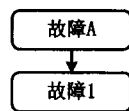


图2 单故障传播模型

### 1.3 多故障传播模型

一般地,多故障具有三方面含义:①一个机械故障可能由多个故障原因引起(又可以划分为多个故障原因共同引起或一个故障原因单独引起);②一个机械故障可能由一个故障原因引起,而这个故障原因又可能由其他故障原因所引起,从而形成一个层次性的故障传播关系;③以上两种情况的集合。不同的故障和故障原因构成了不同的集合域或影响域,这就使得多故障诊断成为一个复杂的问题。

本文建立四种多故障传播模型来表征上述多故障传播的机理。

(1)如图 3a 所示,三个故障原因同时发生才能导致故障 A 发生,即任何一个或者两个故障原因的发生是不能导致故障 A 发生的(与门型)。

(2)如图 3b 所示,三个故障原因只要发生一个就能引起故障 A 发生(或门型)。

(3)如图 3c 所示,故障 A 是由故障 1 引起的,而故障 2 又是故障 1 的故障原因,同理,故障 3 是故障 2 的故障原因,则经过层层追溯分析,可以判断故障 3 的故障原因就是诱发故障 A 的最根本的故障原因。

(4)如图 3d 所示,该故障传播模型结合了图 3b 和图 3c 的故障模式,即多层次和或门型故障同时发

生的情况。故障 A 的发生可以由故障 1、故障 2 和故障 3 中的任意一个引起,而故障 1 的故障原因有三个,其中原因 3 是故障 5,原因 1 是故障 4。同理,故障 4 也有 2 个故障原因,故障 7 是故障 4 的故障原因之一。

以此类推,最终得到一个多层次的多故障传播模型。因为与门型故障类型在机械故障中并不常见,所以不在本文讨论范围内,本文主要围绕图 3d 模型中的故障类型展开研究。

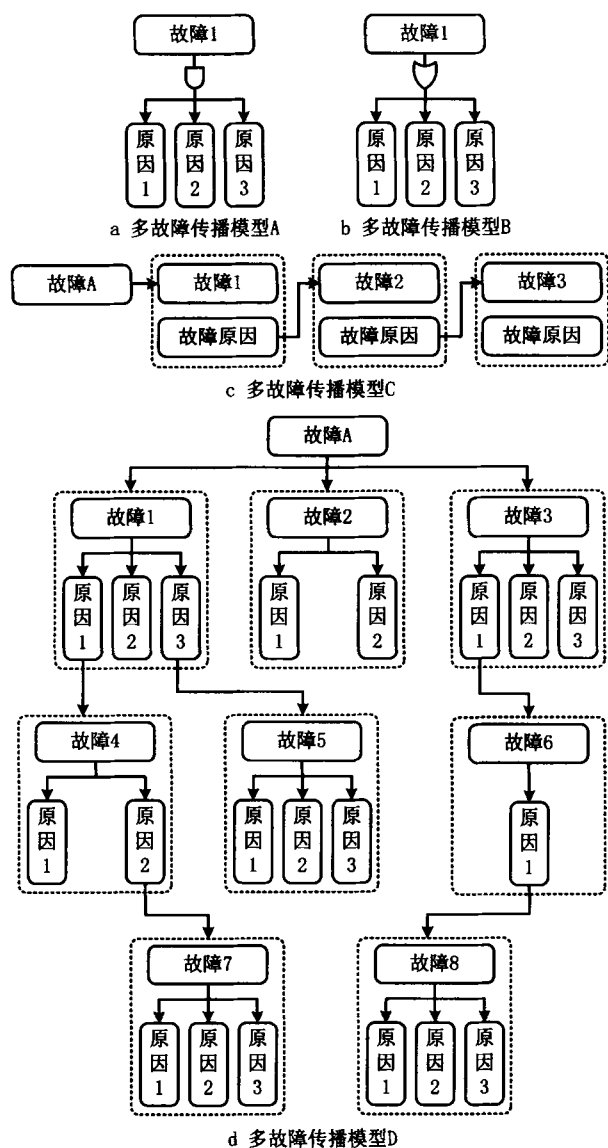


图3 多故障传播的机理

2 基于图论的多故障诊断方法

图论(graph theory)是数学的一个分支,它以图为研究对象,研究顶点和边组成的图形的数学理论和方法,而这种图形通常用来描述某些事物间的某

种特定关系,用顶点表示事物,用连接两顶点的边表示相应两个事物间具有这种关系。图论不但能直观地系统建模,而且对复杂系统的识别速度快、计算准确性高。如前所述,数控机床的故障非常复杂,故障与故障之间存在一些因果关系和关联关系,第 1 章所建立的多故障传播模型可以利用图论中的“图形”来表达,并通过图论算法求得最优结果,实现故障定位。从具体的物理系统得到初始的故障传播图之后,对其进行图论算法的处理,从而得到清晰直观的层次故障传播图,并在此基础上进行多故障的定位求解。多故障图论算法主要包括故障传播图矩阵化算法、故障传播图层次化算法和故障原因定位算法。如图 4 所示,使用图论算法进行故障诊断的步骤为:

步骤 1 根据具体的物理系统绘制系统部件的初始传播图,初步表达故障间的传播关系。

步骤 2 将初始传播图表示为矩阵形式,并进行矩阵化处理。

步骤 3 将初始传播图进行分层处理,得到层次传播图,表征故障间的层次传播结构。

步骤 4 对故障层次传播图进行故障定位处理并排序,并根据优先级定位故障。

可见,图论诊断算法可归纳为三步:①建立故障传播图;②对故障传播图运用图论算法进行处理;③基于处理后的故障传播图进行故障定位。其中建立故障传播图属于建模问题,而对故障传播图进行层次化处理、矩阵化处理和故障定位则属于诊断算法问题。矩阵化处理是将传播图进一步转化为计算机可识别的矩阵形式,而层次化处理则是利用一些算法将传播图进行再分层,从而减少计算和排序时间,有助于更快更准确地进行故障诊断。

3 基于图论的多故障诊断算法

3.1 矩阵化算法

通过故障传播图模型将抽象的故障关系转化为直观的故障传播图,从而得到系统各故障间相互的传播关系,但这种直观的表达却无法被计算机识别,因此需要进行矩阵化处理。矩阵化处理不仅是建模的一种方式,更重要的是能通过对矩阵的研究,得到传播图相应的一些性质,从而能够对传播图进行定性及定量的分析<sup>[5]</sup>。一般传播图的矩阵化处理需要建立连接矩阵和可达矩阵。

假设有  $n$  个节点,故障传播图可用  $n \times n$  阶矩阵  $M$  来表示,其元素定义如下:

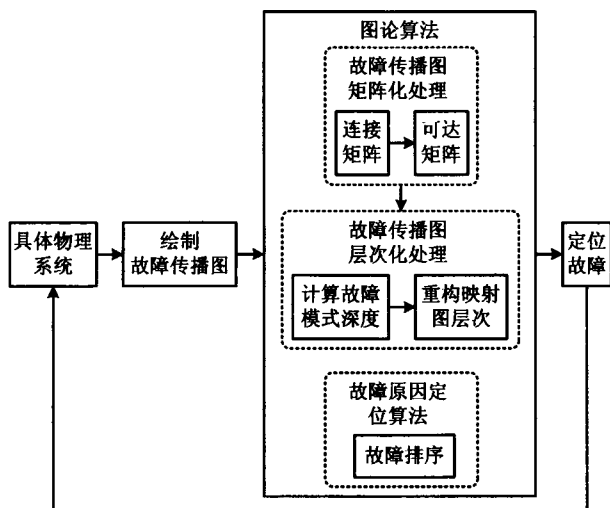


图4 一般系统的故障诊断流程图

$$M_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{存在从节点 } i \text{ 指向节点 } j \text{ 的边;} \\ 0, & \text{节点 } i, j \text{ 没有边相连。} \end{cases} \quad (1)$$

对于那些没有自回环的节点,其对角线的元素值为0。如图5所示的传播图用连接矩阵  $M$  表示为

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

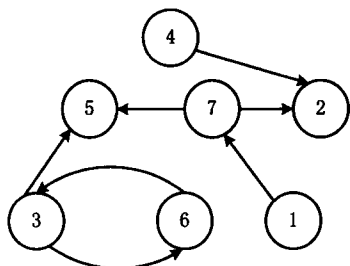


图5 传播图示例

虽然连接矩阵反映了传播图中各故障间的直接传播关系,但是从故障诊断的角度来看,更重要的是传播图中的某些故障能否引起另外一些故障,而这些故障又能再引起其他一些故障,从而得到类似多米诺式的效果。如果已知某个故障,则重要的是确定哪些故障有可能导致该故障的发生,这就涉及到“可达”这个概念<sup>[5-7]</sup>。将故障  $X_j$  可直接或间接导致故障  $X_i$  发生的情况称为  $X_j$  可达  $X_i$ 。则用于表达一个传播图中全部故障间的可达关系的矩阵,就称为可达性矩阵<sup>[5]</sup>,用  $C$  来表示,其中的元素  $C_{ij}$  必

须满足<sup>[7]</sup>:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & X_j \text{ 可达 } X_i; \\ 0, & X_j \text{ 不可达 } X_i. \end{cases} \quad (2)$$

按照式(2),图5传播图的可达矩阵  $C$  为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

对任一由  $n$  个故障模式所组成的传播图,如果其中任意两个故障  $X_i$  和  $X_j$  间存在可达关系,则能够在连接矩阵  $M$  的  $n-1$  次乘幂中正确地表达出来。假设每个故障均能够到达它的本身,则连接可达矩阵和矩阵间就存在以下关系<sup>[8]</sup>:

$$C = I \cup M \cup M^2 \cup \dots \cup M^{n-1}。 \quad (3)$$

通过矩阵连接和可达矩阵就可以对任何故障传播进行描述,它们分别从各自不同的角度解释了复杂传播图之间的关联关系,连接矩阵表达了故障之间的连接关系,可达矩阵说明了故障之间的可达关系<sup>[9]</sup>。设故障传播概率矩阵为  $P$ ,则其中元素  $P_{ij}$  定义如下:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ \text{故障发生概率}, & X_j \text{ 可达 } X_i; \\ 0, & X_j \text{ 不可达 } X_i. \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2 层次化算法

运用图论法可从具体的物理系统得到初始的故障传播图,但这些初始故障传播图往往十分复杂,特别是一些复杂系统的初始故障传播图更为复杂,因此有必要对这些初始故障传播图进行层次化分解,降低初始故障传播图的复杂程度和故障诊断求解过程的复杂程度。故障自身的层次关系可以通过故障传播图层次的分解来表达,即故障在任何层次内仅能影响或传播到比它本身层次更高的故障<sup>[5-6]</sup>。

目前,分层处理有基于可达性、连接性和循环性等方法,其中基于可达性的方法应用较多<sup>[6,10]</sup>。基于可达性的分层方法将故障集分成多个层次,故障在任何一层内都只能由其下层故障来到达,这种层次表明了系统故障传播本身的结构,即只能从低层的节点传播到高层的节点,或任何节点都不能到达。为便于分层处理和计算,本文引入节点深度的概念,用来表征任意节点的最大层数。如图6所示,故障1的节点深

度为1,故障4的节点深度为3,依次类推。其中,顶层故障是已发生的故障,其余层次的故障是已发生的顶层故障的故障原因;故障1到故障2的箭头表示故障2是故障1的故障原因,即故障传播方向是从故障2到故障1,依次类推。

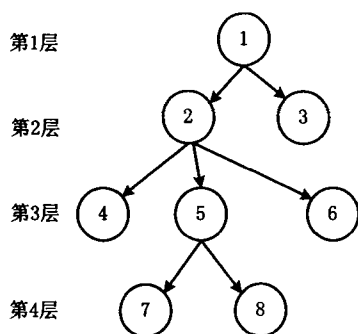


图6 节点深度示意图

多故障传播图进行分层的步骤如下:

**步骤1** 根据3.1节中的可达矩阵,对每一条分支进行节点深度的统计,其规则是:

- (1) 设已知故障的节点深度为1;
- (2) 每次向外传播一次(即找到最直接的故障原因),节点深度累计加1;
- (3) 重复节点的节点深度值取最大值。

**步骤2** 统计所得的每个故障的节点深度值,绘制故障深度表。

**步骤3** 根据故障深度表重新构建传播图的层次,得到故障层次传播图。

故障层次传播图结合了故障树的一些分层规则,因此在任何一层上的任何一对故障间是相互隔离的,且任何一个故障只能由低层传播至高层,不可能由高层传播至低层。因此,图6中第4层的故障不可能从其他层到达,第2层中的故障只可能由第3层或第4层到达,其他层亦然,最后形成层次等级结构。

### 3.3 基于风险的故障原因定位算法

传统的数控机床故障诊断方法大多基于故障发生的概率,并根据故障发生概率的大小定位故障原因,但是由于发生概率都是先验概率,并不能全面展现故障的各个信息,例如检测难易程度或全局危害程度等,本文结合数控机床故障诊断的特点,在传统潜在失效模式及后果分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)方法的基础上加入权重因素,提出全局风险影响度概念。全局风险影响度是用来表征单个故障的风险概率 $R_f$ 对全体故障的风

险概率总和 $R_f^+$ 的影响程度,并根据每个故障影响程度的大小对故障进行排序,从而更加准确地定位故障原因。相比传统的FMEA方法,全局风险影响度不但能通过对故障各种数据的分析来识别被诊断系统中最易发生故障的部件,为评价和改进系统的可靠性提供基本信息,而且还考虑了三个变量对于单个故障整体的影响,以及每个故障相对于整个整体的影响。因此全局风险影响度不仅能够避免风险系数(Risk Priority Number, RPN)方法的主观性,还能够克服其他传统方法定位不准确的缺陷。

全局风险影响度的算法流程如图7所示。

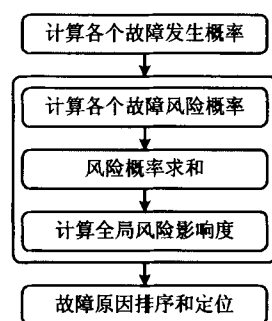


图7 故障原因定位算法流程图

**步骤1** 根据3.1节中的式(4)计算各个故障的发生概率 $P_{ij}$ 。

**步骤2** 配合步骤1中每个故障的发生概率 $P_{ij}$ ,并乘以自身的检测度( $D$ )和严酷度( $S$ ),得到风险概率 $R_f$ ,

$$R_f = P_{ij} \times D \times S. \quad (5)$$

**步骤3** 对所有风险概率 $R_f$ 进行求和,得到风险概率总和 $R_f^+$ ,再按照层次来计算每一个故障对全局的影响大小,得到全局风险影响度的值,具体计算逻辑如图8所示。

(1) 从第二层开始,选出这一层中的风险概率 $R_f$ 最大的故障 $X_i$ ,计算 $X_i$ 对全局的影响度 $F_i$ ,

$$F_i = \frac{R_f(X_i)}{R_f^+}. \quad (6)$$

(2) 根据故障层次传播图,计算与该故障所连接的下一层故障的全局的影响度 $F_i$ ,计算优先级根据风险概率大小来决定,优先级越大则越早进行计算,直至没有下层为止。

(3) 返回上一层再进行(2),直至计算出所有故障的全局风险影响度的值。

**步骤4** 根据每个故障的影响度值的大小进行排序,值越大,则为故障原因的概率就越大,从而进行故障原因的定位。

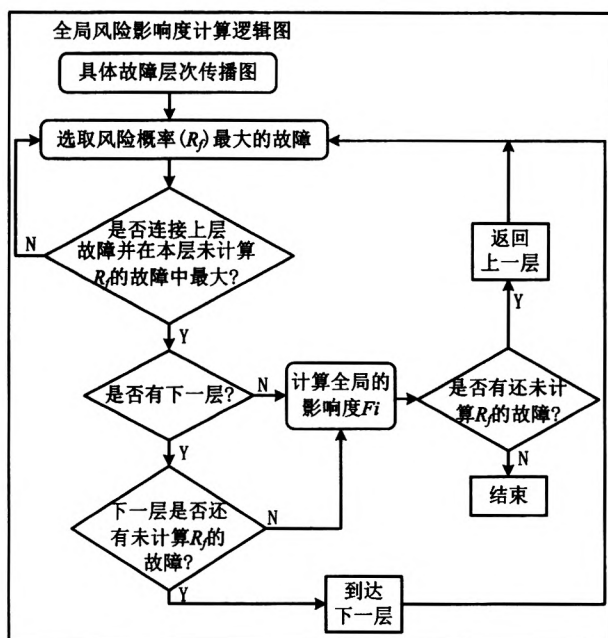
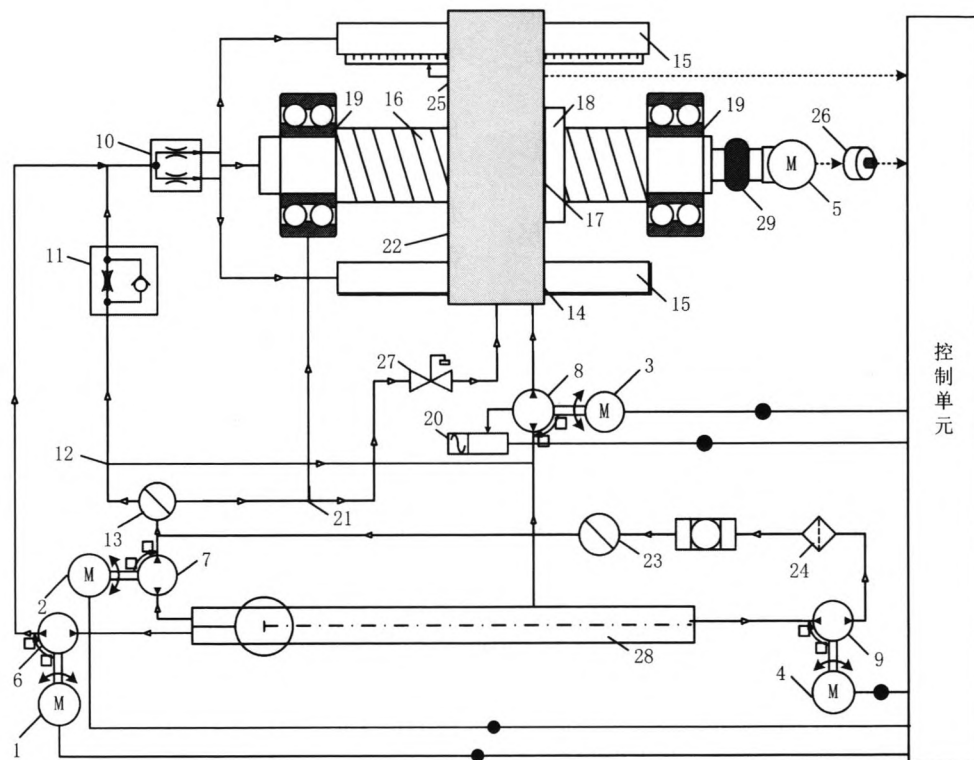


图8 全局风险度计算逻辑图

## 4 实例应用

### 4.1 滑枕进给子系统模型的建立

图9为数控镗床FB260的滑枕进给子系统的结构及功能示意图。其中直线度超差和定位精度超差是滑枕进给的重要故障模式，它们对主轴运动精度甚至加工精度都有重大影响。结合机床厂的维修统计数据，得到这两个故障的相关故障原因及各个故障原因对应的扩展FMEA信息(如表1)，同时根据QS9000中关于FMEA的相关评判准则<sup>[11]</sup>，并结合数控机床的故障特点，列出其严酷度和检查度的等级(如表2和表3)。其中序号1表示发生直线度超差故障，其严酷度和检测度分别为7和4，故障5(静压故障)、故障6(低头补偿故障)、故障11(镶条磨损)、故障21(导轨磨损)和故障28(支撑轴承故障)是它的故障原因，并且它们引起故障1(直线度超差)的概率分别为0.15、0.15、0.3、0.2和0.2，以此类推。



1-滑枕抽油电机M1;2-滑枕补偿和静压泵电机M2;3-滑枕静压多头泵电机M3;4-液压机M4;5-伺服电机M0;6.泵P1;  
7-液压泵P24;8-静压多头泵P0;9-液压泵P11;10-分油器;11-节流阀V0;12-接头L3;13-单向阀V20;14-斜镶条;  
15-导轨;16-滚珠丝杠;17-丝杠螺母;18-螺母座;19-支撑轴承;20-压力继电器;21-接头L2;22-滑枕;  
23-单向阀V15;24-过滤器;25-光栅尺;26-电机编码器;27-比例阀V5;28-油箱;29-联轴器

— 管路(带方向)    —●— 电源线    ..... 信号反馈

图9 数控镗床滑枕进给子系统

表 1 数控镗床滑枕进给子系统的扩展 FMEA 表格

序号	故障	严酷度	检测度	原因项序号	原因项概率
1	直线度超差	7	4	[5,6,11,21,28]	[0.15,0.15,0.3,0.2,0.2]
2	定位精度超差	7	4	[3,4,18,25]	[0.3,0.3,0.2,0.2]
3	反向间隙过大	7	3	[9,22,23]	[0.2,0.4,0.4]
4	螺距误差过大	7	4	[9,27]	[0.4,0.6]
5	静压故障	5	3	[11,12,30]	[0.2,0.2,0.6]
6	低头补偿故障	7	3	[13,24,29]	[0.6,0.2,0.2]
7	控制单元故障	5	3	*	*
8	编码器故障	5	3	*	*
9	NC 参数不准确	8	6	*	*
10	节流阀堵塞	4	2	*	*
11	镶条磨损	7	5	*	*
12	压力开关失效	5	3	*	*
13	比例阀失效	7	3	*	*
14	阀 20 失效	4	2	*	*
15	伺服电机故障	5	4	*	*
16	光栅光带故障	5	4	*	*
17	光栅读数头故障	5	4	*	*
18	测量误差过大	7	4	[7,16,17]	[0.2,0.4,0.4]
19	分流器故障	3	2	*	*
20	管路破裂	3	2	*	*
21	导轨磨损	7	5	*	*
22	滚珠螺母磨损	7	5	*	*
23	螺母座位置误差	7	5	*	*
24	零点设置不当	7	6	*	*
25	滑枕运行振动	8	4	[3,5,8,11,15,21,26,27,28]	[0.1,0.2,0.1,0.2,0.05,0.05,0.15,0.05,0.1]
26	静压润滑故障	4	3	[10,14,19,20,30]	[0.2,0.2,0.2,0.2,0.2]
27	滚珠丝杠磨损	7	5	*	*
28	支撑轴承故障	7	5	*	*
29	比例阀液压缸故障	8	4	[14,30]	[0.5,0.5]
30	液压故障	4	3	*	*

表 2 检测度评定标准

检测度描述	检测度
系统运行状态下,感官可确诊,少于 30 min	1
系统运行状态下,简易工具可确诊,1 h 内	2
系统停机状态下,简易工具可确诊,2 h 内	3
系统停机状态下,专用工具可确诊,4 h 内	4
系统拆卸状态下,24 h 内	5
专家才能解决的故障,48 h 内	6

表 3 严酷度评定标准

严酷度描述	等级
无明显后果	1

续表 3

操作者不适	2
消耗增大,废物增多	3
报警但仍可运行	4
报警并停机	5
不报警但停机	6
系统可操作,性能下降	7
系统可操作,但加工精度不满足	8
系统可操作,但丧失主要功能	9
系统不可操作	10
结构件损坏	11
操作员人身伤害	12





	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1					1	1					1	1	1	1							1							1	1	1
2			1	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1		1
3									1													1	1							
4								1																			1			
5											1	1																		1
6													1	1										1				1	1	
7																														
8																														
9																														
10																														
11																														
12																														
13																														
14																														
15																														
16																														
17																														
18							1									1	1													
19																														
20																														
21																														
22																														
23																														
24																														
25			1		1			1	1	1	1	1		1	1				1	1	1	1	1		1	1	1		1	
26										1				1					1	1										1
27																														
28																														
29														1																1
30																														

图12 可达矩阵C

响度依次是 11>4>9>28>21。

续表 5

表 4 故障节点深度表					
序号	节点深度	序号	节点深度	序号	节点深度
1	1	11	4	21	3
2	1	12	4	22	4
3	3	13	3	23	4
4	2	14	4	24	3
5	3	15	3	25	2
6	2	16	3	26	3
7	3	17	3	27	3
8	3	18	2	28	3
9	4	19	4	29	3
10	4	20	4	30	4

表 5 发生率排序表					
序号	节点深度	序号	节点深度	序号	节点深度
1	1.000	27	0.190	8	0.040
2	1.000	9	0.184	12	0.038

11	0.358	6	0.150	24	0.030
3	0.320	30	0.135	26	0.030
4	0.300	22	0.128	29	0.030
28	0.220	23	0.128	14	0.021
21	0.210	13	0.090	15	0.010
18	0.200	16	0.080	10	0.006
25	0.200	17	0.080	19	0.006
5	0.190	7	0.040	20	0.006

表 6 全局风险影响度排序表					
序号	全局风险影响度	序号	全局风险影响度	序号	全局风险影响度
1	0.179 9	25	0.036 0	7	0.005 4
2	0.179 9	22	0.028 8	8	0.005 4
11	0.080 5	23	0.028 8	29	0.005 4
4	0.054 0	5	0.025 6	12	0.005 1
9	0.049 7	6	0.020 2	26	0.004 0

续表 6

28	0.049 5	30	0.018 2	14	0.001 9
21	0.047 2	16	0.014 4	15	0.001 8
3	0.043 2	17	0.014 4	10	0.000 5
27	0.042 7	13	0.012 1	19	0.000 5
18	0.036 0	24	0.008 1	20	0.000 5

4.3 结果对比分析

对比图 14 和图 15 可以发现,基于故障全局风险影响度的故障原因定位与基于发生率的故障原因

定位的结果是不一致的。故障 3(反向间隙过大)的严酷度是 7(系统可操作,性能下降);故障 9(NC 参数不准确)的严酷度是 8(系统可操作,但加工精度不满足);故障 3 的检测度是 3(简易工具可确诊,2 h 内),故障 9 的检测度是 6(专家才能解决的故障,48 h 内)。从上两个数据的对比可以看出,故障 9 比故障 3 的危害程度更大,检测更不容易,导致故障排查也更困难。此外,根据实际生产经验,故障 3 通常是由 NC 参数补偿不完全所引起的,与本研究所得结论一致。

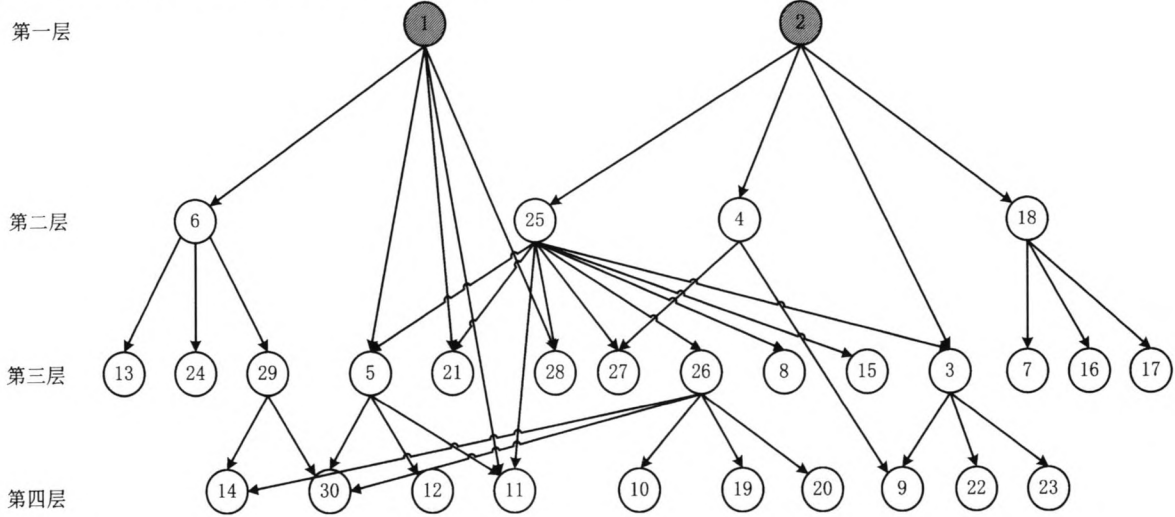


图13 故障层次传播图

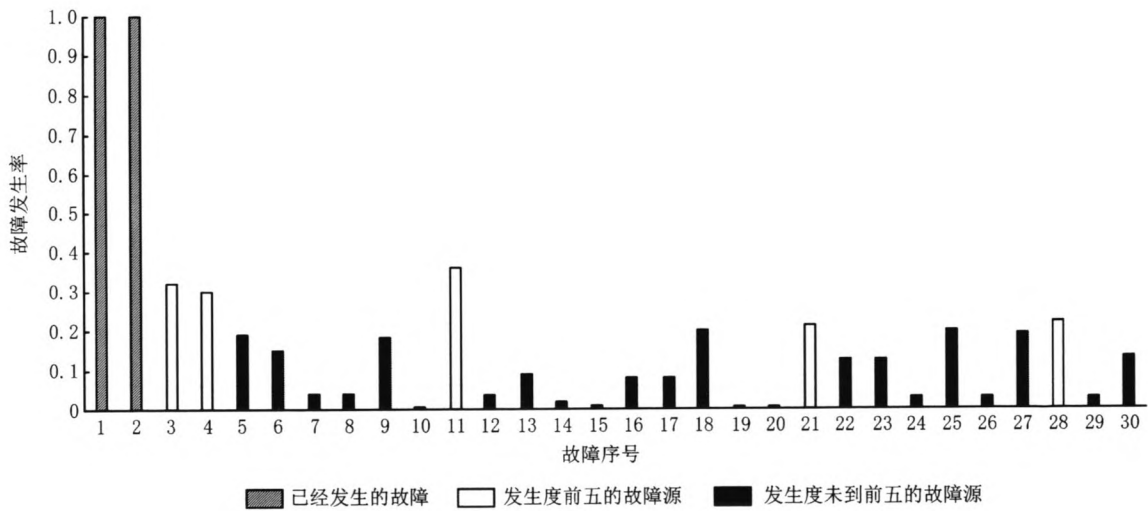


图14 故障发生率

图 16 是各故障按照传统的基于 FMEA 方法得到的风险排序:11>9>4>28>21。通过与图 15 的比较可以发现,两种排序方法基本相似,但是故障 9 (NC 参数不准确)在传统的基于 FMEA 排序(如表 7)中位列第二,而在本文的基于全局风险影响度中

排名第三。这是由于故障 9 的发生率太低,从而影响了它对于整体的风险影响度。反观故障 4(螺距误差过大),虽然严酷度和检测度都不高,但是其发生率较高,使其对于整体的风险影响度上升。与表 8 的年均故障发生历史统计数据表进行比较分析,

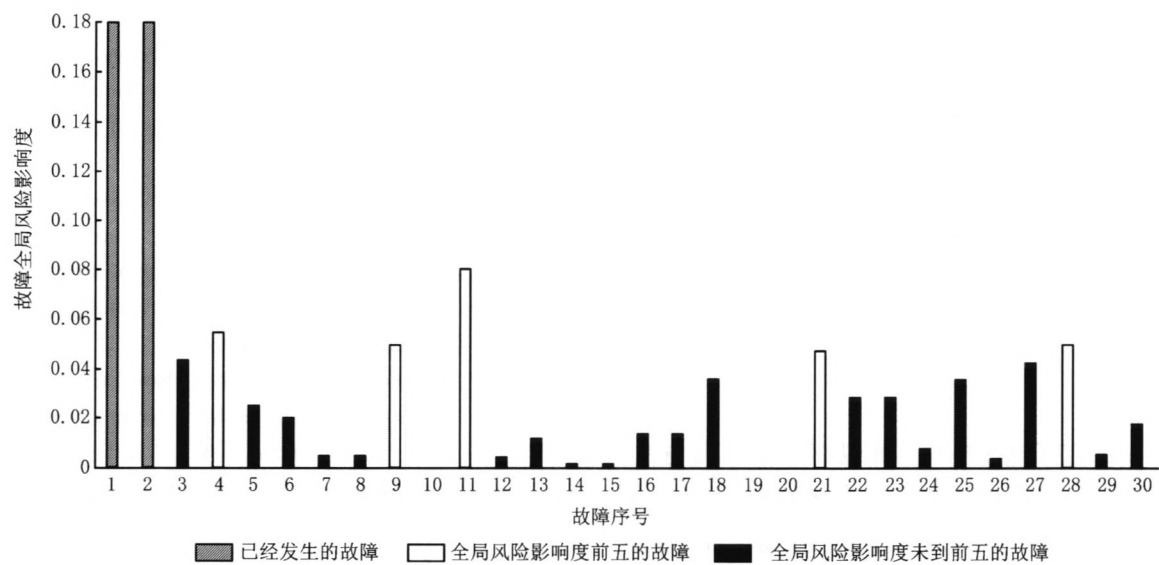


图15 故障全局风险影响度

结果显示本文的基于全局风险影响度排序与历史数据基本吻合。

表 7 传统 FMEA 排序表

序号	RPN	序号	RPN	序号	RPN
1	28.000	18	5.600	29	0.960
2	28.000	22	4.480	7	0.600
11	12.530	23	4.480	8	0.600
9	8.832	6	3.150	12	0.570
4	8.400	5	2.850	26	0.360
28	7.700	13	1.890	15	0.200
21	7.350	30	1.620	14	0.168
3	6.720	16	1.600	10	0.048

续表 7

27	6.650	17	1.600	19	0.036
25	6.400	24	1.260	20	0.036

表 8 年均故障发生历史统计数据表(前 10)

序号	故障名称	发生次数	序号	故障名称	发生次数
11	镗条磨损	16	4	螺距误差过大	15
9	NC 参数不准确	14	28	支撑轴承故障	12
21	导轨磨损	11	3	反向间隙过大	9
18	测量误差过大	8	27	滚珠丝杠磨损	8
25	滑枕运行振动	5	22	滚珠螺母磨损	4

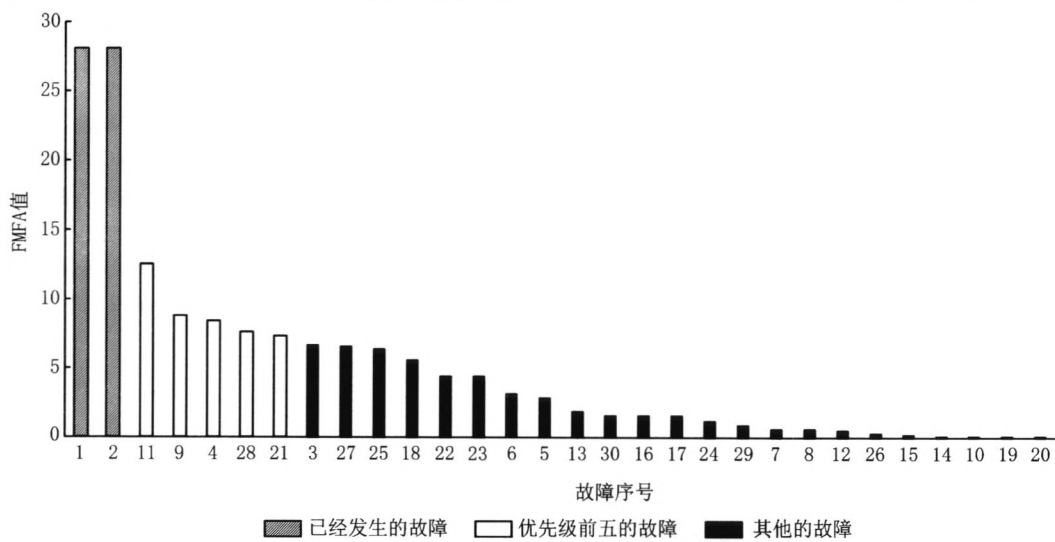


图16 传统FMEA的风险排序

综上所述,基于故障全局风险影响度的故障诊断方法,在定位故障原因的准确性上有更进一步的加

强。通过三个变量相对于全局的影响度来确定故障原因的优先级,不仅能够避免仅仅利用发生率来定

位故障原因时的缺陷,而且更符合实际生产中故障的排查顺序。

此外,相比于专家系统诊断法、故障树诊断法和参数故障诊断法等一些传统方法,基于图论的故障诊断方法不但能够克服对于未知故障缺乏依据的缺点,而且工作量不大,建模机理也不复杂。因此,基于图论的数控机床故障诊断方法具有广阔的研究前景和丰富的研究价值。

## 5 结束语

本文研究了基于图论诊断法的故障诊断方法,通过图论中的矩阵化处理和层次化处理,不但能够清晰表达各个故障模式之间的逻辑关系,而且能够更快速更准确地进行故障诊断,同时,本文对传统的图论诊断方法进行了改进,即层次化算法改进,与传统的故障诊断方法相比,在提升故障诊断速度和准确性方面都具有一定的优势。同时,引入了全局风险影响度,通过计算每个故障的全局风险度来定位故障原因,从而避免了传统 FMEA 方法在利用先验概率进行故障原因定位时不准的缺陷,提高了故障原因定位的准确性。最后,以数控镗床 FB260 的滑枕进给子系统为例,分析了本文的可行性及其优势,为数控机床的故障诊断提供了一个新的途径。在将来的研究中,需要将云故障库和本文所提出的基于图论的故障诊断方法进行整合,开发嵌入式故障诊断系统,从而提高诊断准确性及实现数控机床的自我故障诊断。

## 参考文献:

- [1] WANG Mianyu. Process fault diagnosis based on graph theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese). [王勉宇. 基于图论的过程故障诊断研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.]
- [2] GAN Yi. Heavy equipment fault diagnosis system and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2298-2304 (in Chinese). [甘屹. 重型装备故障诊断系统及其应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2298-2304.]
- [3] ZHONG Binglin, HUANG Ren. Introduction to machine fault diagnosis [M]. Beijing: China Machine Press, 2006 (in Chinese). [钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.]
- [4] ZHANG Jing, SONG Jianwu, KANG Zhanwu, et al. Reliability analysis of CNC machine tools [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2009, 27(2): 79-82 (in Chinese). [张静, 宋建武, 康占武, 等. 数控机床可靠性分析 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2009, 27(2): 79-82.]
- [5] SUN Yu. Fault diagnosis technology based on hybrid structure tree [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(7): 1031-1033 (in Chinese). [孙宇. 基于混合结构树的故障诊断技术研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(7): 1031-1033.]
- [6] REA Y K A, ANDREWS J D. A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 78(1): 45-56.
- [7] KANG Yating. Research on on-line monitoring and fault diagnosis system for locomotive electronic control cabinet [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (in Chinese). [康亚亭. 机车电子柜在线监测与故障诊断系统的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.]
- [8] SONG Qijiang, XU Minqiang, WANG Rixin. Research on fault diagnosis approach for spacecrafts based on fuzzy SDG model [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 2073-2077 (in Chinese). [宋其江, 徐敏强, 王日新. 基于模糊 SDG 模型的航天器故障诊断方法研究 [J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 2073-2077.]
- [9] LIU Weiliang. Research on power line fault diagnosis system based on locomotive control MVB [D]. Changsha: Central South University, 2009 (in Chinese). [刘伟良. 基于 MVB 的机车控制电源在线故障诊断系统的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.]
- [10] LI Xiaowei. Research on electric leakage faults diagnosis and realization of a rocket [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009 (in Chinese). [李晓伟. 某型号火箭漏电故障诊断研究与实现 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.]
- [11] WANG Yuanhang. A corrective maintenance scheme for engineering equipment [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 269-283.

## 作者简介:

盛博(1989—),男,浙江湖州人,硕士研究生,研究方向:故障诊断, E-mail: seraph1989@126.com;  
 邓超(1970—),女,湖南邵阳人,教授,博士生导师,研究方向:可靠性工程;  
 熊尧(1984—),男,湖北荆州人,博士研究生,研究方向:数控机床可靠性理论与技术、加工工艺参数优化;  
 王远航(1987—),男,福州平潭人,博士研究生,研究方向:故障诊断、维修和可靠性理论技术;  
 罗志骏(1990—),男,山西介休人,硕士研究生,研究方向:健康状态评估。