

文章编号: 1674-8085(2015)05-0079-05

基于灰色关联与故障树分析法的汽车制动系统故障诊断

*潘亚威, 喻全余

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

摘 要: 为了提高汽车制动系统的故障诊断能力和效率, 在传统的故障树模型的基础上, 引入灰色关联分析方法, 建立了基于灰色关联度的故障模式分析模型。依据故障树底事件的重要度, 计算出各故障模式之间关联度, 并按大小进行排列, 从而确定导致汽车制动系统失效因素发生的优先顺序。该方法在实践中不仅可以提高诊断工作的效率, 也为汽车可靠性设计提供理论依据。

关键词: 汽车制动系统; 灰色关联分析; 故障树分析

中图分类号: U27

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2015.05.015

FAULT DIAGNOSIS OF AUTOMOBILE BRAKE SYSTEM BASED ON GREY CORRELATION AND FAULT TREE ANALYSIS

*PAN Ya-wei, YU Quan-yu

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of automobile brake system fault diagnosis ability, a method of failure analysis based on grey theory was proposed. Gray relational analysis was introduced to failure mode analysis on the basis of the traditional fault tree model to build the new failure analysis model based on grey correlation analysis. Correlation between various failures modes was calculated depend on bottom event importance of the fault tree. The occurrence of factors which lead to the failure of automobile brake system was determined by ranking according to the correlation degree. In practice, the method can not only improve the efficiency of diagnosis, but also provide a theoretical basis for the reliability design of the automobile.

Key words: automobile brake system; grey correlation analysis; fault tree analysis

针对部分系统信息的不完整性、不确定性的特点, 我国学者在 1982 年提出了灰色系统理论的概念。灰色理论的关键点是研究系统内部的关联性, 找出系统内各环节的潜在规律。由于它从系统的角度揭示了信息之间存在的不可见关系, 所以其一诞生便在社会、经济等预报决策系统中得到了广泛的应用^[1]。汽车的制动系统由于长时间和高频率的工作, 常常会出现的许多故障。但是其中部分病症及

其相对应的故障因素之间没有确定的映射关系和明确的作用原理, 因此, 可以将制动系统视为一个复杂的灰色系统。所以理论上把灰色理论的概念和方法引入到汽车制动系统的故障诊断领域, 并对未来发展趋势进行预报和决策是完全可行的。

目前, 应用于机械故障的诊断和识别的理论方法最多的是灰色关联分析法和故障树分析法 (FTA)^[3]。FTA 法能够判定系统的基本故障, 确定

收稿日期: 2015-06-11; 修改日期: 2015-07-18

作者简介: *潘亚威(1990-), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 主要从事机械可靠性工程方面研究(E-mail: 1274558856@qq.com);

喻全余(1964-), 男, 安徽和县人, 副教授, 硕士, 主要从事机械可靠性工程方面研究(E-mail: yqy@ahpu.edu.cn)。

故障的原因、影响和发生的概率。灰色关联分析法能够表明多种因素之间的大小、强弱和次序,分析各个组成因素与整体的关联大小^[4]。本文讨论了灰色关联分析法在汽车故障诊断的应用,运用灰色关联理论对制动系统故障树中各种故障模式进行分析,研究其系统的故障特征与内部特征之间的相关性,得出各病症因素的等级和优先顺序。

1 灰色关联分析

1.1 灰色关联分析基本原理

表征系统因子之间关联程度的指标称为灰色关联度,而灰色关联分析就是运用这种指标来描述系统之间或者系统中各因子之间关联程度的一种量化的方法。根据灰色理论,关联度越大则发展变化态势越接近,表明两者关系越紧密;反之亦然^[5]。灰色关联分析主要分析因子间的影响程度或因子对主行为的贡献程度,选取参考数列^[6]和若干比较数列,通过理论计算得若干比较数列与参考数列的关联系数和关联度。

1.2 灰色关联分析一般步骤

设有存在2个比较数列 $\{X_i(t)\}, \{X_0(t)\}$,在 $t=k$ 时刻,则可以定义二者之间的关联度为

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m r(x_0(k), x_i(k)) \quad (1)$$

计算步骤如下:

(1) 确定参考数列 x_0 和比较数列 x_i 为:

$$\begin{aligned} x_0 &= \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}, \\ x_i &= \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 计算 x_i 对于 x_0 的关联系数 $z_i(k)$

$$z_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + r \times \Delta_{\max}}{|x_0(k) - x_i(k)| + r \times \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: r 为分辨系数, $\Delta_{\min}$ 为两级最小差, $\Delta_{\max}$ 为两级最大差。

(3) 求 x_i 对于 x_0 的关联度

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_i(k) \quad (4)$$

依据关联度值大小排序来分析系数序列间影响程度的大小。

2 故障模式识别模型建立

2.1 构造特征矩阵

将灰色关联分析中的参考数列转化为故障诊断中标准故障模式向量,假设系统对应建立的标准故障模式特征向量有 m 个,即有 m 种故障种类。每种标准模式特征向量中包含的元素个数为 n ,则可建立相应的故障标准模式特征矩阵

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

在故障树分析中导致顶事件发生的底事件的有很多不同的组合,将这种组合称之为割集。而最小割集是导致故障树顶事件发生的最少数量底事件的集合,它代表引起正规故障树中顶事件发生的一种故障模式^[7]。如果用 $X_{i_i}(i=1,2,\dots,L,m)$ 表示最小割集,底事件为 $X_j(j=1,2,\dots,L,n)$ 。若顶事件发生,则其结构函数为

$$j(x) = j(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{顶事件发生} \\ 0, & \text{顶事件不发生} \end{cases} \quad (6)$$

假设最小割集 X_i 由 n 个底事件组合而成,那么在最小割集 X_i 中,令 n_i 个底事件全为“1”,其余 $(n-n_i)$ 个底事件为“0”,由此类推 m 个最小割集就构成了一个典型的标准故障模式矩阵。

2.2 建立待检模式向量

将灰色关联分析中的比较数列转化为故障诊断中待检故障模式向量,另外为了寻求表示各种故障模式(即 m 个最小割集)发生的可能性,可以从底事件的重要度入手来加以分析。底事件重要度体现了底事件对顶事件影响程度,其中结构重要度表示底事件在故障树结构中所占地位对顶事件发生造成的影响程度,数学表达式为

$$Q_{ki} = \frac{\sum_{j \in k_i} Q_j}{Q_s} \quad (7)$$

式中: Q_s —顶事件发生概率, $\sum_{j \in k_i} Q_j$ —包含第 j 个事件所有的最小割集发生概率之和。

因此，底事件的结构重要度就构建成了一组待检模式向量，即

$$Q_k=[Q_k(1),Q_k(2),\cdots,Q_k(n)] \tag{8}$$

最后通过灰色关联分析法计算出关联度大小，得出故障模式可能性的大小，并确定将其划入对应故障模式。

3 汽车制动系统故障模式分析

本文以某型汽车制动系统为例，该车采用气压双管路传动系统。该型汽车的制动功能有前后轮的四个制动器共同完成，把两个或两个以上的制动器不能正常工作定义为系统故障^[8-10]。根据上述描述特点以制动系统失效为顶事件建立该型汽车制动系统故障树图，经过简化后的故障树如图 1 所示。其中图 2 表示故障树事件编号与含义。因为右前轮、左后轮、右后轮执行系统失常与 A 轮相同，所以在图示故障树中只给出了 A、B 两轮。

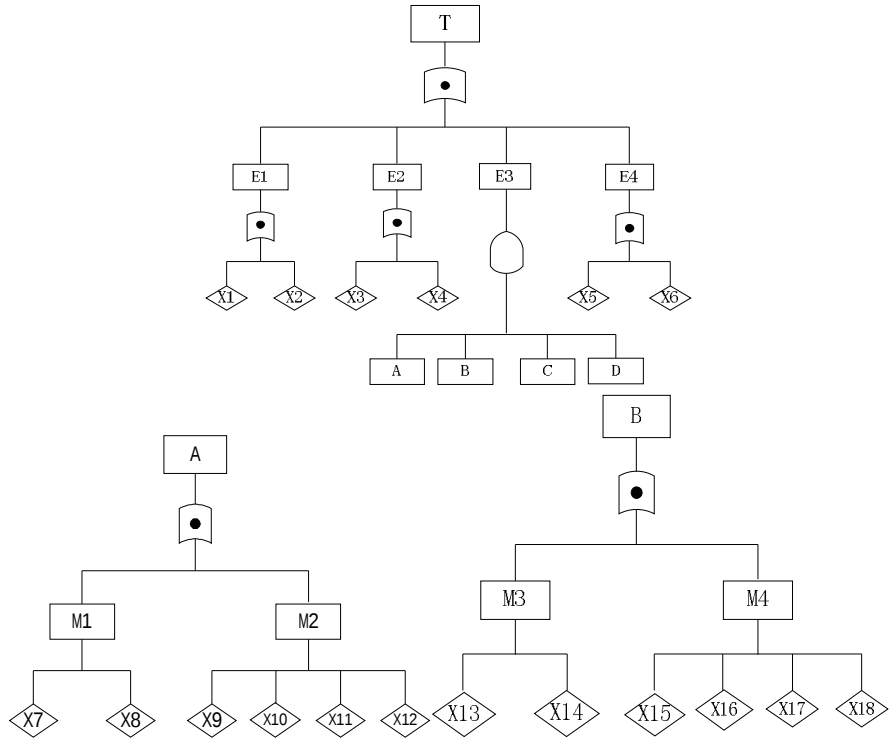


图 1 汽车制动系统故障树简图
Fig.1 Automobile brake system fault tree diagram

代号	含义	代号	含义
T	制动功能失效	X7	A 轮制动气室组件漏气
E1	操纵机构失常	X8	A 轮制动气室工作失常
E2	动力机构失常	X9	A 轮制动器摩擦片油污
E3	执行机构失常	X10	A 轮刹车动作失常
E4	传动机构失常	X11	A 轮凸轮轴不回位
M1	制动气室组件工作失常	X12	A 轮回位运动失常
M2	车轮制动器工作失常	X13	B 轮制动气室组件漏气
X1	制动阀漏气	X14	B 轮制动气室工作失常
X2	制动阀动作失常	X15	B 轮制动器摩擦片油污
X3	储气筒组件失常	X16	B 轮刹车动作失常
X4	压缩机供气失常	X17	B 轮凸轮轴不回位
X5	前刹车管路输气失常	X18	B 轮回位运动失常
X6	后刹车管路输气失常		

图 2 故障树事件编号与含义表

Fig.2 Number and implication of fault tree event

3.1 求出最小割集

对制动系统功能失常故障树进行化简之后，按“下行法”求出制动系统功能失常故障树的最小割集

一共有 222 个。该故障树的结构相对较大，全部计算各个最小割集的关联度比较困难。另外通过定性分析可以知道，在可能性方面一阶割集的大于二阶割集，因此本文一共选取 6 个一阶最小割集和 4 个二阶割集，即 $m=10$ ，如下所示：

$$\{x_1\},\{x_2\},\{x_3\},\{x_4\},\{x_5\},\{x_6\},$$
$$\{x_7,x_{14}\},\{x_7,x_{15}\},\{x_8,x_{14}\},\{x_8,x_{17}\}$$

3.2 构造标准故障模式特征矩阵

通过上述分析能知道故障树底事件为 12 个，最小割集为 10 个，即 $n=12$ ， $m=10$ 。我们定义每个最小割集对应一种故障模式，故得到 10 种故障模式，即

$$\begin{aligned} X_{r1} &= \{x_1\}, X_{r2} = \{x_2\}, X_{r3} = \{x_3\}, X_{r4} = \{x_4\}, \\ X_{r5} &= \{x_5\}, X_{r6} = \{x_6\}, X_{r7} = \{x_7, x_{14}\}, \\ X_{r8} &= \{x_7, x_{15}\}, X_{r9} = \{x_8, x_{14}\}, X_{r10} = \{x_8, x_{17}\} \end{aligned}$$

根据标准故障模式特征矩阵构建的原理, 最小割集中的底事件取值全为“1”, 则剩余的全为“0”, 由此可以建立一个 12×10 的典型故障特征矩阵 X_T

$$X_T = \begin{Bmatrix} X_{r1} \\ X_{r2} \\ X_{r3} \\ X_{r4} \\ X_{r5} \\ X_{r6} \\ X_{r7} \\ X_{r8} \\ X_{r9} \\ X_{r10} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 建立待检模式向量

通过对该型号的汽车进行跟踪试验及相关数据的采集, 总结计算出该汽车制动系统部分部件的失效概率。其它底事件的发生概率则通过查阅文献进行分析, 并依据专家意见及经验确定。根据公式(7)计算出所需底事件的结构重要度, 由此可以建立待检模式向量 Q_i

$$Q_i = \begin{pmatrix} Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, \\ Q_8, Q_9, Q_{10}, Q_{11}, Q_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.035, 0.039, 0.038, 0.040, 0.033, \\ 0.0330, 0.013, 0.014, 0.014, 0.016, \\ 0.029, 0.018 \end{pmatrix}$$

3.4 关联度计算与分析

1) 对待检向量无量纲化

由于关联度分析的各特征参数具有不同的量纲, 因此在计算之前, 要先对参数进行无量纲化。比较常用的无量纲化处理方法有区间化方法、最大值化方法以及方法^[11]。本文采用均值化对 Q_i 进行无量纲化可得

$$Q_i' = \begin{pmatrix} \frac{Q_1}{Q_1}, \frac{Q_2}{Q_1}, \frac{Q_3}{Q_1}, \frac{Q_4}{Q_1}, \frac{Q_5}{Q_1}, \frac{Q_6}{Q_1}, \\ \frac{Q_7}{Q_1}, \frac{Q_8}{Q_1}, \frac{Q_9}{Q_1}, \frac{Q_{10}}{Q_1}, \frac{Q_{11}}{Q_1}, \frac{Q_{12}}{Q_1} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

2) 求差序列

$$\Delta_i = |Q_i'(k) - X_r(k)| (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

得出各个序列差

$$\Delta_1 = \begin{pmatrix} 0, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} 1, 0.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 0.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_4 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 0.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_5 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.057, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_6 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.057 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_7 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.629, 0.4, 0.6, 0.457, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_8 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.4, 0.4, 0.543, 0.829, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_9 = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.6, 0.4, 0.457, 0.171, 0.514 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{10} = \begin{pmatrix} 1, 1.114, 1.086, 1.143, 0.943, 0.943 \\ 0.371, 0.6, 0.4, 0.457, 0.829, 0.486 \end{pmatrix}$$

3) 求两级最大差和最小差

$$\Delta_{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \left[\min_{1 \leq k \leq n} |Q_i'(k) - X_r(k)| \right],$$

$$\Delta_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \left[\max_{1 \leq k \leq n} |Q_i'(k) - X_r(k)| \right] \quad (10)$$

可得两级最小差和最大差, 即 $\Delta_{\min} = 0$,

$$\Delta_{\max} = 1.143。$$

4) 求关联系数

取 $r = 0.5$, 将两级最大差和最小差代入公式

$$(3) \text{ 得 } z_i(k) = \frac{0 + 0.5 \times 1.143}{\Delta_i(k) + 0.5 \times 1.143}, \text{ 计算得出各序}$$

列的关联系数, 如表 1 所示。

5) 计算关联度

由公式(4)得出标准模式和待检模式的关联度, 如表 2 所示。

3.5 结果分析

由表 2 可以看出各故障模式的关联度大小，将它们从大到小排列得出

$r_1 > r_5 = r_6 > r_3 > r_2 > r_4 > r_9 > r_{10} > r_8 > r_7$ 根据上述关联度的大小关系可以知道造成制动系统失效的部分故障模式的可能性大小如下所示：
 $\{x_1\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_3\}, \{x_2\}, \{x_4\},$
 $\{x_8, x_{14}\}, \{x_8, x_{17}\}, \{x_7, x_{15}\}, \{x_7, x_{14}\}$

即 {制动阀漏气}，{前刹车管路输气失常}，{后刹车管路输气失常}，{储气筒组件失常}，{制动阀动作失常}，{压缩机供气失常}，{A 轮制动气室工作失常，B 轮制动气室工作失常}，{A 轮制动气室工作失常，B 轮凸轮轴不回位}，{A 轮制动气室组件漏气，B 轮刹车动作失常}，{A 轮制动气室组件漏气，B 轮制动气室工作失常}。

表 1 关联系数表
Table 1 Correlation coefficient table

i	k											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.339	0.345	0.333	0.377	0.377	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
2	0.364	0.834	0.345	0.333	0.377	0.377	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
3	0.364	0.339	0.869	0.333	0.377	0.377	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
4	0.364	0.339	0.345	0.8	0.377	0.377	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
5	0.364	0.339	0.345	0.333	0.909	0.377	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
6	0.364	0.339	0.345	0.333	0.377	0.909	0.606	0.588	0.588	0.556	0.408	0.526
7	0.364	0.339	0.345	0.333	0.377	0.377	0.476	0.588	0.488	0.556	0.408	0.526
8	0.364	0.339	0.345	0.333	0.377	0.377	0.476	0.588	0.588	0.513	0.408	0.526
9	0.364	0.339	0.345	0.333	0.377	0.377	0.606	0.488	0.588	0.556	0.77	0.526
10	0.364	0.339	0.345	0.333	0.377	0.377	0.606	0.488	0.588	0.556	0.408	0.54

表 2 关联度表
Table 2 Correlation degree table

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
0.6043	0.5902	0.5931	0.5874	0.5939	0.5939	0.5177	0.5234	0.5669	0.5321

4 结语

本文讨论了灰色关联分析发在故障分析中的运用，根据底事件的重要度之间的关联度大小来判别故障模式发生的可能性的。通过故障模式识别模型建立与分析，获得了导致汽车制动系统失效的各部位的可靠性大小，提高了诊断工作的效率。此外，为了简便计算过程本次选取的数据不够准确，所以精确的模式分析结果有待进一步努力获得。

参考文献：

[1] 李尔国,俞金寿. 基于灰色关联度分析法的压缩机故障诊断研究[J]. 上海海运学院学报,2001,22(3):294-297.
[2] 赵韩,张彦,方良海,等. 灰色关联分析法在汽车零部件故障分析中的应用[J]. 农业机械学报,2005, 36(8): 125-128.
[3] 王书庆,林延青. 采用灰色 B 型关联度分析进行设备故障诊断的方法[J]. 机械科学与技术,1998,17(6):135-137.

[4] 芮延年,傅戈雁. 现代可靠性设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
[5] 向宇,黄大荣,黄丽芬. 基于灰色关联理论AGREE方法的BA系统可靠性分配[J]. 计算机应用研究,2010, 27(12):4489-4490.
[6] 胡明,黄丹敏,陈文华,等. 基于灰色关联法的空间铰接式伸展臂故障模式分析与预测[C].中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会论文集,2013.
[7] 吴冉.基于灰色关联法分析吊车的机械故障[J].煤矿机械,2008,29(8):195-197.
[8] 柳卫东,徐颖强,高西亚.基于故障树的汽车制动系故障分析[J].机械设计制造,2007(6):118-120.
[9] 洪强,梁亮. 基于动态故障树的汽车制动系统可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(S1): 206-212.
[10] 黄伟中,郭立书,杨雄. 汽车制动系统故障诊断与性能优化方法[J]. 汽车工程师,2012(11):59-61.
[11] 黎奇志,胡国平,赵红言.加权灰色关联分析在故障诊断中的应用研究[J].微计算机信息,2012(7):28-30.