

基于灰色关联的因果图的基本事件重要度研究*

李 雨, 王洪春

(重庆师范大学 数学科学学院, 重庆 401331)

摘要:用因果图进行故障诊断时,对基本事件重要度进行定量的分析,可以在故障早期定位故障源,制定合理有效的故障应对方案。在传统重要度的基础上,引入灰色关联理论,寻求重要度之间的数值关系,根据灰色关联度的大小,建立了基本事件的关联序。此方法描述了各重要度之间的弱相关性,能直观地反映基本事件引起中间事件发生故障的重要程度。实例结果表明此方法的引入是合理的。

关键词:基本事件;重要度;灰色关联分析;故障分析

中图分类号:TP18;TP306.3

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)06-0102-04

故障诊断发展至今已经有很多方法,1994年张勤教授提出的动态因果图(DCD)^[1]是一种定性、定量分析相结合的实时故障诊断方法。为了比较因果图中各基本事件的重要性,文献[2]引入了“重要度”的概念。重要度是因果图故障诊断定量分析的一个重要指标,它不仅能够用于系统的可靠性分析,还可以用于指导系统进行诊断与维修^[3]。传统的因果图重要度有结构重要度、概率重要度和关键重要度等^[4]。文献[2]根据煤矿瓦斯爆炸的因果图结构和已知的基本事件概率值计算出基本事件的上述3种重要度,分别对基本事件进行排序,通过综合分析提出了预防重点和预防措施。

而灰色系统理论^[5]是我国著名学者邓聚龙教授于1982年提出的,它通过对部分已知信息的生成、开发实现对现实世界的确切描述和认识。灰色理论应用得最广泛的是关联度分析,它是一种相对性的排序分析,不仅可以作为优势分析的基础,而且也是进行科学决策的依据。

基于前面提到的3种重要度,本文运用灰色关联理论对因果图的基本事件重新进行分析,找出可能的故障源,为制定切实可行的预防措施和系统优化设计提供了更直观的理论依据。

1 灰色关联模型的建立

若系统有 n 个评价对象, m 个评价指标,第 i 个对象的 m 个指标构成向量 $\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}]$, $i = 1, 2, \dots, n$, 则 n 个评价对象可构成矩阵 $\mathbf{X} =$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix}。$$

1.1 确定最优参考数据列

设 $\mathbf{X}_0 = [X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0m}]$, 其中 X_{0k} ($k = 1, 2, \dots, m$) 为第 k 个指标在所有评价对象中的最优值。在指标中,若某一指标取最大值好,则取该指标在各对象中的最大值,若取最小值为好,则取各对象中的最小值。本文是为了在故障诊断中找出系统的薄弱环节、故障的原因,因此应当选择指标(重要度)最大值作为最优参考数据列。

1.2 数据的无量纲化处理

由于指标相互之间通常具有不同的量纲和数量级,不能直接进行比较,因此在进行灰色关联分析前,需要对原始数据进行无量纲化处理。常用的无量纲化处理方法有区间化方法、最大值方法、均值方法^[6]。本研究采用区间化方法,计算公式为:

* 收稿日期:2015-12-09 修回日期:2016-09-25 网络出版时间:2016-11-02 13:28

资助项目:国家社会科学基金(No. 13BTJ008)

作者简介:李雨,女,研究方向为人工智能, E-mail:447645242@qq.com;通信作者:王洪春,教授, E-mail:wanghc@cqnu.edu.cn

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20161102.1328.032.html>

$$C_{ik} = \frac{X_{ik} - X_{\cdot k}^{\min}}{X_{\cdot k}^{\max} - X_{\cdot k}^{\min}} \quad (1)$$

上式中 C_{ik} 表示第 i 个评价对象的第 k 个指标的无量纲化数值; $X_{\cdot k}^{\min}$ 表示第 k 个指标在所有评价对象中的最小值,即 $X_{\cdot k}^{\min} = \min\{X_{1k}, X_{2k}, \dots, X_{nk}\}$; $X_{\cdot k}^{\max}$ 表示第 k 个指标在所有评价对象中的最大值,即 $X_{\cdot k}^{\max} = \max\{X_{1k}, X_{2k}, \dots, X_{nk}\}$ 。

经无量纲化处理后得到矩阵 $C = \begin{bmatrix} C_{01} & C_{02} & \dots & C_{0m} \\ C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nm} \end{bmatrix}$ 。

1.3 关联系数的计算

经处理过后的评价对象指标集 $(C_i) = [C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{im}]$ 与最优指标 $(C_0) = [C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0m}]$ 在 k 点的关联系数表达式为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C_{0k} - C_{ik}| + \rho \max_i \max_k |C_{0k} - C_{ik}|}{|C_{0k} - C_{ik}| + \rho \max_i \max_k |C_{0k} - C_{ik}|} \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

其中 ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 引入它是为了减少极值对计算的影响, 提高关联系数之间的差异显著性。通常取 $\rho = 0.5$ [7]。

1.4 计算灰色关联度

关联系数只表示各点数据间的关联程度, 由于关联系数的数很多, 信息过于分散, 不便于比较, 求平均值便是作为这种信息集中处理的一种方法 [9]。一般表达式为:

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

1.5 根据关联度大小进行排序

由(3)式有关联度序列 $R = [r_1, r_2, \dots, r_n]$, 按从大到小的顺序对所有关联度进行排序, 来判断它们的接近程度。评价对象与最优指标集的关联度越大, 说明在因果图中该基本事件的重要度越大, 是最有可能的故障原因。

2 实例分析

根据文献[2]的瓦斯爆炸因果图, 基本事件的含义及它们的结构重要度、概率重要度、关键重要度的值如表 1。

表 1 基本事件的含义及各重要度的原始数据

Tab. 1 The meaning of the basic event and the importance of raw date

基本事件	含义	结构重要度	概率重要度	关键重要度	基本事件	含义	结构重要度	概率重要度	关键重要度
B1	风量不足	1.75	0.002 86	0.113 495	B15	分段放炮	1.375	0.002 305	0.023 004
B2	串联通风	1.75	0.002 494	0.024 283	B16	开关冒火	1.375	0.002 408	0.048 062
B3	瓦斯涌出量大	1.75	0.002 608	0.052 058	B17	电机车火花	1.375	0.002 255	0.010 981
B4	局扇停转	1.75	0.003 007	0.149 359	B18	带电检修	1.375	0.002 305	0.023 004
B5	局扇循环风	1.75	0.002 549	0.037 86	B19	矿灯引火	1.375	0.002 517	0.074 765
B6	放炮后瓦斯聚集	1.75	0.002 549	0.037 86	B20	电缆线短路	1.375	0.002 461	0.061 116
B7	盲巷积存瓦斯	1.75	0.002 608	0.052 058	B21	放炮母线短路	1.375	0.002 354	0.034 954
B8	老塘积存瓦斯	1.75	0.002 608	0.052 058	B22	接线盒失爆	1.375	0.002 354	0.034 954
B9	巷道不通风	1.75	0.002 443	0.011 894	B23	摩擦撞击火花	1.375	0.002 402	0.046 788
B10	排放瓦斯	1.75	0.002 496	0.024 916	B24	自燃花火	1.375	0.002 351	0.034 344
B11	巷道顶部无风	1.75	0.002 666	0.066 197	B25	吸烟明火	1.375	0.002 258	0.011 542
B12	封泥不足	1.375	0.002 709	0.121 327	B26	未采取措施	19.25	0.041 077	1
B13	抵抗线不足	1.375	0.002 408	0.048 062	B27	未及时处理	19.25	0.041 077	1
B14	炸药变质燃烧	1.375	0.002 305	0.023 004					

2.1 确定最优参考数据列

可以确定最优参考数据列为 $X_0 = (19.25, 0.041 077, 1)$ 。

2.2 数据的无量纲化处理

根据(1)式,对表 1 数据和 X_0 进行无量纲化处理得如表 2。

表 2 无量纲化后的各重要度
Tab. 2 Dimensionless after each important degree

基本事件	结构重要度	概率重要度	关键重要度	基本事件	结构重要度	概率重要度	关键重要度
B1	0.020 979	0.015 584	0.103 652	B15	0	0.001 288	0.012 156
B2	0.020 979	0.006 156	0.013 45	B16	0	0.003 941	0.037 493
B3	0.020 979	0.009 093	0.041 533	B17	0	0	0
B4	0.020 979	0.019 37	0.139 914	B18	0	0.001 288	0.012 156
B5	0.020 979	0.007 573	0.027 177	B19	0	0.006 749	0.064 492
B6	0.020 979	0.007 573	0.027 177	B20	0	0.005 306	0.050 692
B7	0.020979	0.009 093	0.041 533	B21	0	0.002 55	0.024 239
B8	0.020 979	0.009 093	0.041 533	B22	0	0.002 55	0.024 239
B9	0.020 979	0.004 843	0.000 923	B23	0	0.003 787	0.036 205
B10	0.020 979	0.006 208	0.014 09	B24	0	0.002 473	0.023 622
B11	0.020 979	0.010 587	0.055 829	B25	0	0.000 077	0.000 567
B12	0	0.011 694	0.111 571	B26	1	1	1
B13	0	0.003 941	0.037 493	B27	1	1	1
B14	0	0.001 288	0.012 156	最优	1	1	1

2.3 计算关联度并排序

以 B_1 与最优参考数据列的关联度计算为例,来说明其计算过程。类似可得其他关联度如表 3。

根据表 2,计算得 $\min_k |C_{0k} - C_{1k}| = 0, \max_k |C_{0k} - C_{1k}| = 1$ 。由(2)式,有:

$$\xi_1(1) = \frac{0+0.5 \times 1}{|1-0.020 979|+0.5 \times 1} \approx 0.338 061, \xi_1(2) = \frac{0+0.5 \times 1}{|1-0.015 584|+0.5 \times 1} \approx 0.336 832,$$

$$\xi_1(3) = \frac{0+0.5 \times 1}{|1-0.103 652|+0.5 \times 1} \approx 0.358 077.$$

关联度 $r_1 = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \xi_1(k) = \frac{1}{3} (0.338 061 + 0.368 332 + 0.358 077) \approx 0.344 324$ 。

同理可计算其他基本事件的关联度并进行排序,结果如表 3。

表 3 关联度及排序
Tab. 3 Correlation degree and sorting

基本事件	关联度	综合排序	基本事件	关联度	综合排序	基本事件	关联度	综合排序
B26	1	1	B8	0.338 751	8	B21	0.335 348	19
B27	1	1	B20	0.337 614	11	B22	0.335 348	19
B4	0.347 793	3	B5	0.337 523	12	B9	0.335 338	21
B1	0.344 324	4	B6	0.337 523	12	B24	0.335 295	22
B12	0.343 135	5	B13	0.336 474	14	B14	0.334 337	23
B11	0.339 995	6	B16	0.336 474	14	B15	0.334 337	23
B19	0.338 827	7	B10	0.336 425	16	B18	0.334 337	23
B3	0.338 751	8	B2	0.336 373	17	B25	0.333 381	26
B7	0.338 751	8	B23	0.336 363	18	B17	0.333 333	27

根据表 3 可以直观清晰地看出, B_{26}, B_{27} 的关联度比其他基本事件的关联度大得多, 触发中间事件的可能性最大, 对瓦斯爆炸的影响最大。其他基本事件的关联度相差较小, 但是数值大于 0.338 的基本事件还有 $B_4, B_1, B_{12}, B_{11}, B_{19}, B_3, B_7, B_8$, 与其余的基本事件相比较而言, 它们的发生对中间事件发生的影响程度更大, 显得更重要。在该瓦斯爆炸的故障分析中, 可以按表 3 中基本事件重要度的顺序进行检查、维修和发现故障, 并改进重要度较大的部件, 减少事故发生的可能性。

3 结束语

关联度是表征两个事物的关系程度,是因素之间关联性大小的度量^[9]。用来定量分析因果图基本事件发生对中间事件发生的影响的3种重要度之间的关系是灰色的,本文将灰色关联度分析引入,综合考虑基本事件的结构重要度、概率重要度、关键重要度3个因素,对基本事件影响中间事件发生的重要程度重新进行排序,对比文献[2]的结果,表明此方法的引入是合理的。但较文献[2],将基本事件按结构重要度、概率重要度、关键重要度分别排序,得到了3个不同的排序结果。在对系统故障的影响进行定性分析的时候,无法确定用哪一个排序作为依据,只能分别进行故障源分析。最终笼统的将故障源归为采取措施、瓦斯累积、引燃火源3种,不仅没能为瓦斯爆炸提出重点应对方案,也不能依此来检查、维修,进而对重要度较大的部件优化和改进。在引入灰色关联度后,只得到基本事件的一个排序,很直观、清晰的看出系统的薄弱环节、关键部件,为系统制定有效的预防措施,也以便改进设计和维修方案,为提高系统的可靠性提供了参考。

参考文献:

- [1] Zhang Q. Probabilistic reasoning based on dynamic causality tree/diagrams [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 46: 209-220.
- [2] 梁新元. 基于因果图基本事件重要度的故障分析方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(11): 121-124.
Liang X Y. Study on diagnosis approach based on basic event importance of causality diagram [J]. Microelectronics, 2004, 21(11): 121-124.
- [3] 冯庚, 张楠, 陈猛志, 等. 事故树分析与贝叶斯网络重要度在溃坝风险分析中的应用 [J]. 水电能源科学, 2013(4): 66-68.
Feng G, Zhang N, Chen M Z, et al. Application of FTA and BN importance factor in dam break risk assessment [J]. Water Resources and Power, 2013(4): 66-68.
- [4] 姚成玉, 张荧驿, 王旭峰, 等. T-S模糊故障树重要度分析方法 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1261-1268.
Yao C Y, Zhang Y Y, Wang X F, et al. Importance analysis method of fuzzy tree based on T-S model [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(11): 1261-1268.
- [5] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 1-7.
Deng J L. Grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002: 1-7.
- [6] 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, 28(7): 28-30.
Li Q Z, Hu G P, Zhao H Y. Research on the application of weighted grey relational analysis in fault diagnosis [J]. Microcomputer Information, 2012, 28(7): 28-30.
- [7] 赵红言, 张君, 张建强. 灰色关联分析在电子设备故障树中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(3): 21-24.
Zhao H Y, Zhang J, Zhang J Q. Application of grey relational analysis in fault tree analysis of electronic equipment [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(3): 21-24.
- [8] 刘静乐, 王恩茂. 基于灰色关联故障树的绿色建筑设计的风险研究 [J]. 工程管理学报, 2014, 4(2): 17-21.
Liu J L, Wang E M. Application of gray correlation fault tree on risks of green building design [J]. Journal of Engineering Management, 2014, 4(2): 17-21.
- [9] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 111-119.
Du D, Pang Q H, Wu Y. Modern comprehensive evaluation method and case selection [M]. 2nd Ed. Beijing: Tsinghua University, 2008: 111-119.

The Importance Study about the Basic Event of Causality Diagram by Grey Relation

LI Yu, WANG Hongchun

(College of Mathematics Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Quantitative analysis on basic event importance can locate the source of fault during the early fault and formulate reasonable and effective solutions to fault, when fault diagnosis in causality diagram. On the base of traditional importance, this article introduces Grey Relation Theory, then seeking the numerical relationship between the importances. According the size of the grey correlation degree to establish a link, which describes weak correlation among different importance? It can visually reflect the importance of breaking down of top events caused by basic events. Example results indicate it is reasonable to introduce this way.

Key words: basic events; importance; grey relation theory; fault analysis

(责任编辑 黄 颖)