

管道金属磁记忆检测缺陷的判别分析模型

龚利红^{1,2} 李著信¹ 刘书俊¹

(1. 中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系, 重庆 401331; 2. 重庆通信学院军事电力工程系, 重庆 400035)

摘要 线性判别分析模型能较好地识别应力集中和宏观裂纹这两种缺陷, 通过计算机仿真分析, 100次模拟的平均诊断正确率达到了85.5%。经过改进的带切向梯度和法向梯度乘积的非线性判别模型的识别效果最好, 其100次模拟的平均诊断正确率达到了91.4%, 显著高于线性模型的识别效果。

关键词 金属磁记忆 应力集中 判别分析

中图分类号 TH865

文献标识码 A

文章编号 1000-3932(2012)03-0313-03

据统计, 现代工业设备中有80%以上的结构破坏都是由疲劳失效引起的^[1], 有效判别在役设备构件的应力变形缺陷状况, 特别是导致失效损伤的极限应力变形, 是评价该结构或设备的结构强度、寿命和可靠性的重要依据。由俄罗斯科学家 Doubov 教授提出的金属磁记忆诊断技术能有效地对铁磁构件的早期应力集中进行诊断, 成为一种评价金属损伤状态的新型无损检测技术^[2]。金属磁记忆检测出的法向分量过零点可以判定裂纹存在, 但无法通过单项指

标有效区分是应力集中还是宏观裂纹^[3]。笔者拟通过建立数学模型, 对检测出的管道缺陷进行有效识别。

1 管道缺陷的判别分析模型

本文数据来源于易方博士对 X60 管线钢材质管道进行的缺陷识别试验^[4]。在40组试验数据中, 应力集中21例, 宏观裂纹19例, 检测了每例的4项指标(图1), 分别记为: 小波包频带能量增量 X_1 (%)、峰峰值 X_2 (A/m)、切向梯度 X_3 和法向梯度 X_4 。

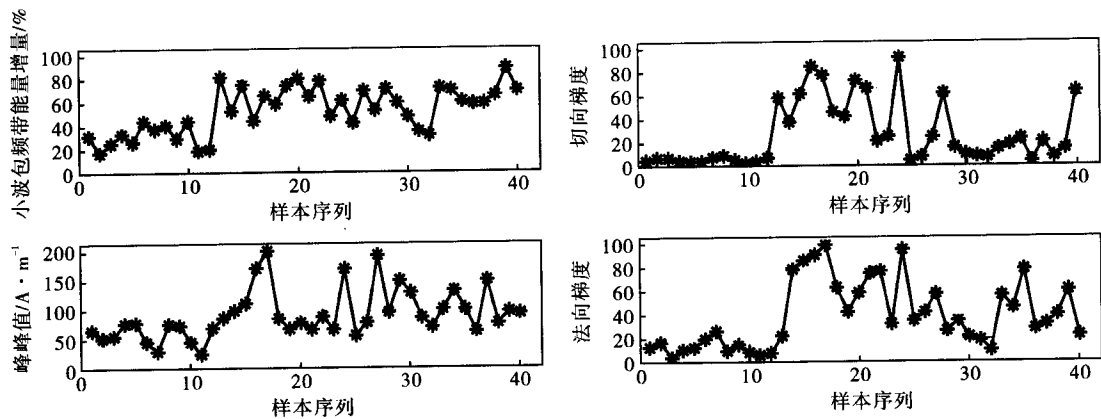


图1 试验样本的四项指标值

1.1 判别分析的基本原理

判别分析是根据判别对象若干个指标的观测结果判定其应属于哪一类的统计学方法。常用的判别分析称为 Fisher 线性判别模型, 其判别原则为总的平均错判率最低^[5]。记判别对象的类别为 G_1, G_2, \dots, G_r , 先验概率分别为 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_r$, 则第 i 类错判为其他类的概率为 $P_i = \sum_{j=1}^r P(j|i)$, 从

而总的平均错判率为 $P = \sum_{i=1}^r \pi_i P_i$ 。假定 X 服从多元正态分布, 且具有相同的协方差, 即具有密度函数:

收稿日期: 2011-11-29(修改稿)

基金项目: 中国人民解放军总后勤部项目(油 20040207)“输油管道剩余寿命预测技术及装备研究”资助

$$P_i(x) = \frac{|\Sigma^{-1}|^{1/2}}{(2\pi)^{m/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu_i)'\Sigma^{-1}(x-\mu_i)\right]$$

则构造线性函数:

$$f_i(x) = \ln\pi_i + \frac{1}{2}x'\Sigma^{-1}\mu_i + \frac{1}{2}\mu_i'\Sigma^{-1}x - \frac{1}{2}\mu_i'\Sigma^{-1}\mu_i, i = 1, 2, \dots, r$$

要使错判率最低,必须使得检测向量 x_0 满足 $f_n(x_0) = \max_i f_i(x_0)$, 从而判定 $x_0 \in G_n, n \in \{1, 2, \dots, r\}$ 。在判别分析的实际使用中,往往取先验概率为等概率^[6]。

1.2 管道缺陷的线性判别模型及仿真

按照 Fisher 线性判别分析,分别从 G_1 类(应力集中)和 G_2 类(宏观裂纹)中各随机抽取 10 个样本组成训练样本集,其余 20 个样本作为检测样本集,做 100 次计算机诊断模拟,得到最高诊断正确率为 100%,最低诊断正确率为 65%,100 次模拟的平均正确率为 85.5% (图 2)。

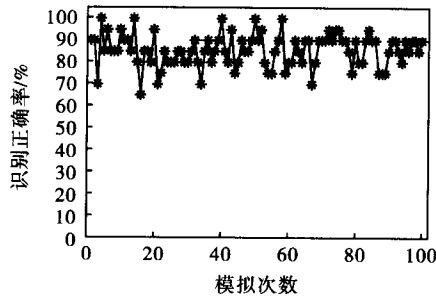


图 2 线性判别正确率的计算机模拟

选取了诊断正确率为 100% 的一组训练样本做判别分析,得到 $\Lambda = 0.4, \chi^2 = 14.665, p = 0.005$ 。判别函数为:

$$\begin{cases} f_1(X) = 0.175x_1 + 0.0376x_2 + 0.03137x_3 - 0.0726x_4 - 5.489 \\ f_2(X) = 0.188x_1 + 0.4038x_2 + 0.09779x_3 - 0.0183x_4 - 10.508 \end{cases}$$

在判别分析的过程中,各指标按贡献大小依次为切向梯度(0.916)、法向梯度(0.864)、能量增量(0.544)、峰峰值(0.34)。

2 管道缺陷判别模型的改进

虽然 Fisher 线性判别模型最高正确率能达到 100%,但 100 次模拟的平均正确率不是很高,因此考虑对模型进一步改进。由于切向梯度和法向梯度贡献率很高,自然想到增加其非线性项。

2.1 带平方项的非线性判别分析仿真

将原始试验数据中增加 x_3^2 和 x_4^2 的数据,按

照 Fisher 判别分析原理和 1.2 节中相同的计算机模拟诊断仿真方法,100 次模拟的平均正确率为 89.6% (图 3),其中最高正确率为 100%,最低正确率为 70%,平均正确率有较大提高。

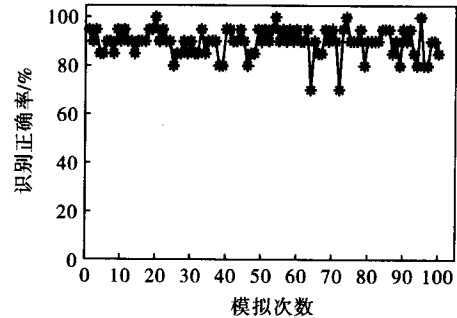


图 3 带平方项的判别正确率的计算机模拟

选取正确率为 100% 的一组做判别分析,得到 $\Lambda = 0.271, \chi^2 = 19.569, p = 0.003$,判别函数为:

$$\begin{cases} f_1(X) = 0.00201x_3^2 - 0.00429x_4^2 + 0.162x_1 + 0.0613x_2 - 0.165x_3 + 0.407x_4 - 9.113 \\ f_2(X) = -0.00175x_3^2 - 0.00498x_4^2 + 0.151x_1 + 0.06308x_2 + 0.298x_3 + 0.549x_4 - 19.931 \end{cases}$$

2.2 带平方项和交叉二次项的非线性判别分析仿真

进一步地,增加 x_3x_4 项,按照上述相同方法做计算机仿真,100 次模拟平均正确率为 88.6% (图 4),反而略有下降,最高正确率为 100%,最低正确率为 70%。

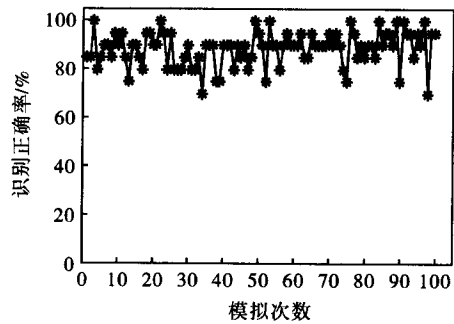


图 4 带完整二次项的判别正确率的计算机模拟

随机抽取其中正确率为 100% 的一组做判别分析, $\Lambda = 0.251, \chi^2 = 20.066, p = 0.005$ 。判别函数为:

$$\begin{cases} f_1(X) = -0.00254x_3^2 + 0.003465x_3x_4 - 0.00614x_4^2 + 0.04738x_1 + 0.04665x_2 + 0.132x_3 + 0.441x_4 - 7.3 \\ f_2(X) = -0.00625x_3^2 + 0.00274x_3x_4 - 0.00818x_4^2 - 0.0551x_1 + 0.0562x_2 + 0.68x_3 + 0.724x_4 - 18.175 \end{cases}$$

2.3 带交叉二次项的非线性判别仿真

为了取得更好的诊断效果,去掉 x_3^2 和 x_4^2 , 仅留下 x_3x_4 的非线性项,此时 100 次模拟的平均正确率达到了 91.4% (图 5),有较大幅度的提高,最高正确率为 100%,最低正确率为 80%。

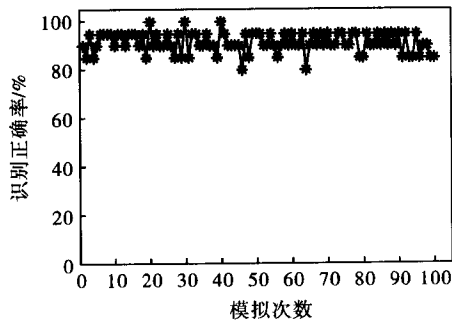


图 5 带交叉二次项的判别正确率的计算机模拟

为了进一步分析非线性模型与线性模型的差异,将图 2 所示的线性判别的 100 次模拟结果与图 5 所示的带交叉二次项的非线性判别的 100 次模拟结果作独立样本 t 检验,检验结果为方差不齐性, $t = -6.7, p = 2.54 \times 10^{-10} < 0.01$,说明后者的平均正确率显著高于前者^[7]。

随机抽取其中正确率为 100% 的一组样本做判别分析,得到 $A = 0.259, \chi^2 = 20.928, p = 0.001$,判别函数为:

$$\begin{cases} f_1(X) = -0.000585x_3x_4 + 0.185x_1 + 0.06017x_2 + \\ \quad 0.01288x_3 + 0.006144x_4 - 7.104 \\ f_2(X) = -0.00498x_3x_4 + 0.135x_1 + 0.07369x_2 + \\ \quad 0.398x_3 + 0.237x_4 - 18.608 \end{cases}$$

Discriminant Analysis Model for Defect Recognition of Metal Pipeline Magnetic Memory Detection

GONG Li-hong^{1,2}, LI Zhu-xin¹, LIU Shu-jun¹

(1. Department of Military Oil Supply Engineering, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401331, China; 2. Department of Military Electric Power Engineering, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract Linear discriminant analysis can easily distinguish two-type defects, and the average accuracy rate of 100 computer simulations reached 85.5%. The simulation result shows that the improved non-linear discriminant analysis which boasting of tangential gradient and normal gradient outperforms the linear model in defect recognition because of a 91.4% accuracy rate.

Key words metal magnetic memory, stress concentration, discriminant analysis

3 结论

3.1 Fisher 线性判别分析模型对于管道磁记忆的缺陷识别效果较好,通过模型的改进,提出了一种非线性判别模型。

3.2 从统计分析的角度来看,仅带切向梯度和法向梯度乘积项的二次判别函数的识别正确率仿真结果显著高于线性判别函数的识别正确率仿真结果,判别准确率非常高。

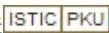
3.3 可通过收集更多的试验数据,建立带交叉二次项的管道磁记忆检测缺陷的判别模型,并构建自动识别系统应用于实际的管道检测工作。

参 考 文 献

- [1] 张立东,边境,刘贵民. 漏磁的磁记忆检测技术[J]. 检测技术,2005,24(1):79~80.
- [2] Doubov A A. Screening of Weld Quality Using the Metal Magnetic Memory[J]. Welding in the World, 1998,41(6):196~199.
- [3] 梁志芳,李午申,王迎娜,等. 金属磁记忆信号的零点特征[J]. 天津大学学报,2006,39(7):847~850.
- [4] 易方. 油气管道金属磁记忆检测信号处理与缺陷识别技术研究[D]. 重庆:后勤工程学院,2010.
- [5] 刘霞,刘继承,耿玉容. 基于自适应模糊推理的非线性系统辨识器设计[J]. 化工自动化及仪表,2009,38(5):29~33.
- [6] Richard A J, Dean W W 著,陆璇译. 实用多元统计分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [7] 陈果,孟彦京. 制浆蒸煮过程的模糊控制仿真研究[J]. 化工自动化及仪表,2009,36(1):46~48.

欢迎浏览我刊网站 www.hgzdh.cn

管道金属磁记忆检测缺陷的判别分析模型

作者: 龚利红, 李著信, 刘书俊, GONG Li-hong, LI Zhu-xin, =LIU Shu-jun
作者单位: 龚利红, GONG Li-hong (中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系, 重庆401331; 重庆通信学院军事电力工程系, 重庆400035), 李著信, 刘书俊, LI Zhu-xin, =LIU Shu-jun (中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系, 重庆, 401331)
刊名: 化工自动化及仪表 
英文刊名: Control and Instruments in Chemical Industry
年, 卷(期): 2012, 39(3)

参考文献(7条)

1. 张立东; 边境; 刘贵民 漏磁的磁记忆检测技术[期刊论文]-检测技术 2005(01)
2. Doubov A A Screening of Weld Quality Using the Metal Magnetic Memory 1998(06)
3. 梁志芳; 李午申; 王迎娜 金属磁记忆信号的零点特征[期刊论文]-天津大学学报 2006(07)
4. 易方 油气管道金属磁记忆检测信号处理与缺陷识别技术研究 2010
5. 刘霞; 刘继承; 耿玉容 基于自适应模糊推理的非线性系统辨识器设计[期刊论文]-化工自动化及仪表 2009(05)
6. Richard A J; Dean W W; 陆璇 实用多元统计分析 2001
7. 陈果; 孟彦京 制浆蒸煮过程的模糊控制仿真研究[期刊论文]-化工自动化及仪表 2009(01)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hgzdhjyb201203005.aspx