基于自回归模型的轴承故障诊断方法设计

朱飞

(霍尼韦尔中国有限公司 上海 200120)

摘要: 为了提高轴承故障诊断效果,提出基于自回归模型的轴承故障诊断方法。构建了轴承动力学模型,分析了在接触面材料阻尼系数作用下轴承内圈和外圈之间的力学关系;在自回归模型中引入边界延拓参数,实现对轴承状态边界效应的准确判断;将轴承的应力数值进行 Hilbert 变换,计算自回归模型中数据的分量瞬时频率以及同步波动幅值范围,完成对轴承状态的诊断。测试结果表明,设计方法对直径为 0.175mm、0.250mm 以及 0.500mm 的故障诊出率均可达到 90.00% 以上,具有较高的有效性。

关键词: 自回归模型; 轴承故障; 轴承动力学模型; 材料阻尼系数; 边界延拓参数; Hilbert 变换后

0 引言

与其他类型设备的故障诊断相比,轴承故障的特征更加隐蔽,故障诊断难度较大。对此,文献 [4] 结合 VBEM 的 ARFA 模型,计算设备的参数阈值,实现对轴承故障的准确检测。当设备无法达到额定状态时,该方法诊断结果不理想;文献 [5] 结合 EEMD-AR 与 DBN 算法,设计风机轴承故障诊断方法,该方法的诊断准确性不高。

为此,本文提出基于自回归模型的轴承故障诊断方法。借助自回归模型分析轴承动力学特征,创新性地引入边界延拓参数,准确判断轴承状态数据的边界,通过Hilbert 变换完成对轴承状态的有效诊断。测试结果验证了设计方法的有效性,可以为轴承故障检测提供帮助。

1 构建轴承动力学模型

在对轴承的故障进行分析诊断之前,首先构建了轴承动力学模型。在整个摩擦过程中,摩擦力的传递通过接触的形式进行。结合 Hertz 接触理论,本文将滚动体之间的弹性作用关系描述为力度传导与转换。以此为基础建立的轴承动力学模型将不再受误差和结构的微小形变的干扰。即便在轴承运行过程中出现摩擦力方向发生偏移的情况,偏移量的规模和程度与轴承内圈轴颈摩擦力作用相比也是微乎其微的,因此忽略对其的计算。通过这样的方式,将轴承内部两个轴颈之间的摩擦作用关系简化为两个质体之间的碰撞关系。

结合上述内容,本文假设轴承内圈与轴颈之间的摩擦力方向与基础的摩擦线方向相同,二者之间对应的接触面法向为 n。在材料阻尼的作用下,利用广义的 Hertz 公式计算轴承轮接触面的应力大小,其可以表示为:

$$F = K_{s}B_{s}^{n} + D_{s}b_{s} \tag{1}$$

式中: b_s 一在接触面积为 s 的情况下,轴承运行时接触面的变形量大小;

 D_s - 在弹性力学中,接触面的 Hertz 刚度参数;

 B_s'' - 接触面法向作用下,大小为 s 接触面产生的摩擦作用强度:

 K_s - 接触面材料对应的阻尼系数值,该值主要取决于材料自身的特性以及轴承的曲率半径大小。其计算方式可以表示为:

$$K_{s} = \frac{1}{3\pi(\frac{v}{e})} \left[\frac{r_{1}r_{2}}{r_{1} + r_{2}} \right]$$
 (2)

式中: r_1 和 r_2 -分别表示轴承内圈和外圈的半径;

v-轴承材料的泊松比;

e-轴承材料的弹性模量。

本文结合 hunt 假设理论,轴承的材料阻尼会储存部分在碰撞期间产生的能量,那么在该期间轴承内部产生的能量损耗可以表示为:

$$\Delta E = (m_1 - m_2)\sqrt{(V_1 - V_2)^2 (1 - \lambda)^2}$$
 (3)

式中: ΔE —一个运行周期中,轴承内部产生的能量损耗;

 m_1 -轴承内圈的质量;

 m_0 - 轴承外圈的质量;

 v_1 - 轴承内圈的运行速度;

v₂ -轴承外圈的运行速度;

λ - Newton 恢复系数。

通过这样的方式构建的轴承动力学模型可以表示为:

$$Z(K) = \frac{F - \Delta E}{s} \tag{4}$$

式中: Z(K) - 材料阻尼系数值为 K 的轴承动力学模型。 利用构建的模型,即可以对轴承的实际运行状态进

- 78 -

行分析诊断。

2 轴承故障诊断方法设计

现有诊断工作最大的难点在于对轴承状态边界效应的判断。为此,本文在自回归模型中引入了边界延拓参数,在此基础上对轴承的应力数值进行 Hilbert 变换处理,计算出对应的分量瞬时频率以及同步波动幅值范围,最大限度降低边界效应问题对诊断结果带来的影响。

2.1 轴承运行数据边界延拓处理

在对轴承的运行参数进行向前或向后延拓的处理时,本文执行的原则是处理后的信号波形与原信号边界点在斜率上保持一致,以此确保延拓后信号的发展趋势与原信号相同,不会影响诊断结果。本文采用同一组自回归系数执行延拓操作,在保留原信号谱特征的基础上,突出其现有的频率特性。自回归模型在边界处向前延拓得到的轴承运行数据可以表示为:

$$x_q = c_i x(n-i) \tag{5}$$

式中: x_q — 自回归模型在边界处向前延拓得到的轴承运行数据:

 c_i -延拓范围;

x - 原轴承运行数据;

i-向后延拓方向信号波形斜率;

n - 向前延拓方向信号波形斜率。

对应地,自回归模型在边界处向后延拓得到的轴承运行数据可以表示为:

$$x_h = c_i x(n+i) \tag{6}$$

式中: x_h 一自回归模型在边界处向前延拓得到的轴承运行数据。

通过这样的方式,完成对轴承运行数据的边界延拓 处理,提高数据的可靠性。

2.2 Hilbert 变换

应用上述自回归模型边界延拓处理后的轴承运行数据,利用 Hilbert 变换检查轴承运行的瞬时属性,包括频率、相位以及振幅。对于任一连续的轴承运行数据,进行 Hilbert 变换可以表示为:

$$H(x(t)) = \frac{x_q + x_h}{a(1+g)^{-1}}$$
 (7)

式中: H (*) - Hilbert 变换结果;

a-变换系数;

g - 变换衰减值。

以此为基础,对轴承运行的瞬时属性进行计算,其可以表示为:

$$P(x) = H(x(t))\cos\alpha\tag{7}$$

$$T(x) = H(x(t))\sin\alpha \tag{8}$$

$$U(x) = H(x(t)) \tan \alpha \tag{9}$$

式中:P(x) -轴承运行的瞬时频率参数;

T(x) -轴承运行的瞬时相位参数;

U(x) -轴承运行的瞬时振幅参数;

a-轴承运行数据的相位角。

因为在上文已经对在自回归模型中对数据进行了边界延拓处理,因此 Hilbert 变换对数据首尾的去除作用不会缩短原始数据的长度,可以最大限度保留数据的完整性。

2.3 轴承故障诊断

结合构建的轴承动力学模型,对轴承运行的瞬时属性参数值的阈值范围进行计算,从式(3)中可以看出,轴承稳定运行的基础是 $F>\Delta E$,其中, ΔE 取决于轴承构件设置,因此其为定值,因此约束轴承运行的瞬时属性参数值的指标即为 F ,则有:

$$F \geqslant \frac{P(x)U(x)}{T(x)} \tag{11}$$

以此为基础,当计算出的轴承运行瞬时属性参数值存在 $F = \frac{P(x)U(x)}{T(x)}$ 时,则认为轴承处于临界状态;当计算出的轴承运行瞬时属性参数值存在 $F < \frac{P(x)U(x)}{T(x)}$ 时,则认为轴承处于故障状态。以此实现对其状态的初步判断。

当确定轴承处于故障状态时,对P(x)、T(x) 以及U(x) 分别进行分析。当P(x) 超出额定标准时,则为滚动体故障,当T(x) 超出额定标准时,则为内环故障,当U(x) 超出额定标准时,则为外环故障。

通过这样的方式,可以实现对轴承故障的准确诊断, 降低由于边界状态判断失误造成的错误诊断概率。

3 试验测试与分析

为了验证本文方法的应用效果,测试文献 [4] 方法、文献 [5] 方法和本文方法诊断结果。

3.1 测试环境准备

在测试阶段,本文将美国 Case Western Re-serve 大学滚动轴承数据中心的数据作为基础测试数据,具体的测试对象如图 1 所示。

图 1 所示的测试装置是三相交流电机装置,对应的



图 1 测试装置实物图

轴承类型为轴承为深沟轴承,型号为 6025-2RSJME20 SK4515。在测试阶段对其植入单一局部故障缺陷主要利用了放电加工技术。设置故障点的直径大小分别为1.75mm、2.50mm、5.00mm,对应的深度均为1.00mm。在采集轴承的数据信号时,利用加速度传感器按照45.00kHz 的采样频率采集正常状态、滚动体故障状态、内环故障状态、外环故障状态的数据。设置不同的电机运行工况,对应的工作负载分别为 0N、1.0N、2.0N。

3.2 测试结果与分析

在上述测试环境的基础上,分别统计了三种方法对轴承状态的诊断结果,具体如图 2、图 3 以及图 4 所示。

通过观察图 2、图 3 以及图 4 中的信息可以看出,故障直径为 1.75mm 时,文献 [4] 方法故障诊出率为 85.00% 左右,文献 [5] 方法诊出率为 87.00% 左右,本文诊出率为 90.00% 以上。随着故障直径的逐渐增加,三种方法对故障的诊出率均实现了一定程度的提升,其中,文献 [4] 方法达到了 90.00% 以上,最大值为对内环故障的诊断,结果为 91.45%,文献 [5] 方法达到了 92.00% 以上,最大值为对外环故障的诊断,结果为

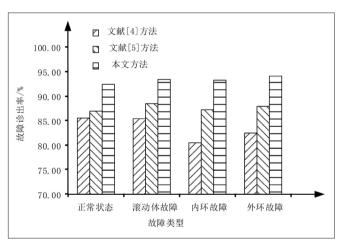


图 2 故障直径为 1.75mm 状态下不同方法故障诊断结果

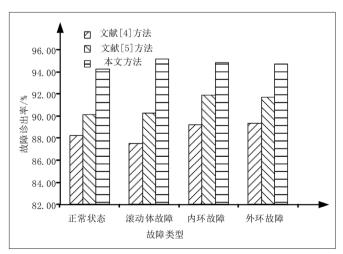


图 3 故障直径为 2.50mm 状态下不同方法故障诊断结果

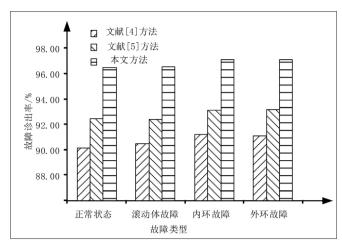


图 4 故障直径为 5.00mm 状态下不同方法故障诊断结果

93.66%,本文方法达到了96.00%以上,最大值为对内环故障的诊断,结果为96.89%。由此可以看出,本文设计的轴承故障诊断方法可以实现对不同工况下故障状态的准确诊断。

4 结语

轴承运转的稳定性以及可靠性直接关系到对应设备的实际应用效果,对其故障进行准确的诊断不仅可以降低其带来的影响,同时也可以提高故障修复的效果及效率。本文提出基于自回归模型的轴承故障诊断方法,实现了对不同类型故障的准确判断。通过本文的研究,以期为实际工作中轴承的维护管理工作提供有价值的参考。

参考文献:

[1] 贺东风,官竹林,胡正彪.基于分类和ARIMA-WT-LSTM模型的高炉煤气产生量预测[J].冶金自动化,2022,46(2):103-109.

[2] 申童,刘复秋宣,高学亮,等.基于 MCKD 和 VMD 关联维数的轴承故障特征提取 AR 模型 [J]. 机电工程技术,2021,50(6):18-21+125.

[3] 卢锦玲, 张祥国, 张伟,等. 基于改进辅助分类生成对抗网络的风机主轴承故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7):148-154.

[4] 李 吉 俊 , 章 智 杰 , 李 其 操 , 等 . 基 于 VBEM 的 ARFA 模 型 参 数 推 导 和 故 障 检 测 [J]. 现 代 信 息 科 技 ,2020,4(24):1-5+9.

[5] 韩欣宏, 郑洋, 吴定会. 基于改进 EEMD-AR 和 DBN 的风机轴承故障诊断 [J]. 传感器与微系统,2020,39(11):126-129+133.

作者简介: 朱飞(1988-),男,汉族,江苏淮安人,硕士,高级数据科学家,研究方向:工业大数据分析。

- 80 -