

烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法研究

周江建,刘宇晨

(江苏中烟工业有限责任公司,江苏 南京 210009)

摘要:目前使用的烟草车间传送设备齿轮磨损预警方法筛选能力较弱,导致预警效率较低。为了解决上述问题,设计一种新的烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法,通过分析烟草车间传送设备内部结构,确定烟草车间传送设备齿轮之间的关联性,通过研究摩擦力、力矩、啮合力建立齿轮磨损振动力学模型,得到齿轮的受力状况。根据齿轮振动速度响应时域波形、齿轮振动速度频谱得到振动信号相平面,筛选齿轮振动磨损特征。利用烟草车间传送设备齿轮故障树发送预警信号,实现智能预警。实验结果表明:该方法能够有效提高筛选能力,增强预警效率。

关键词:烟草车间;传送设备;齿轮磨损;智能预警;预警方法

中图分类号:TP277.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0244-04

Research on Intelligent Early Warning Method for Gear Wear of Conveyor Equipment in Tobacco Workshop

ZHOU Jiangjian, LIU Yuchen

(Jiangsu Zhongyan Industry Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: To solve the lower early-warning efficiency due to weak screening capability by current early-warning methods for gear wear of transmission equipment in tobacco workshops, a new intelligent early warning method for gear wear of conveying equipment in the tobacco workshop is designed. By analyzing the internal structure of conveying equipment in the tobacco workshop, the correlation between the gears of conveying equipment in the tobacco workshop is determined. Through the study of the friction, moment and meshing, a gear wear vibration mechanics model is established to obtain the force condition of the gear. According to the gear vibration velocity response time-domain waveform and the gear vibration velocity spectrum, the vibration signal phase plane is obtained, and the gear vibration wear characteristics are screened. The gear fault tree of the transmission equipment of the tobacco workshop is applied to send early warning signals for the realization of intelligent early warning. The experimental results show that the designed method can effectively improve the screening ability and enhance the early warning efficiency.

Keywords: tobacco workshop; conveying equipment; gear wear; intelligent warning; warning method

0 引言

时代的进步不仅促进了烟草生产行业的发展,还增加了各个烟草生产商之间的竞争。在提升烟草产品质量的同时,企业也注意到烟草车间传送设备对于烟草质量的影响,因此对于烟草传送设备提出严格的要求^[1-2]。

烟草车间是生产烟草的重要场所,车间内的设备运行状态决定了烟草成品的质量,因此对于车间设备的要求很严格。烟草传送设备在运行过程中齿轮会出现磨损情况。一旦出现磨损,烟草设备的正常运行速度、效率都将降低,并且如果齿轮出现严重的磨损,会将磨损颗粒带入烟草的生产产品内,降低产品的合格率^[3]。

综上所述,本文主要通过分析烟草车间传送设备齿轮磨损的机理和传送设备运行时零件之间的受力,建立设备齿轮磨损特征指标,进一步完善烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警的方法,降低烟草车间传送设备齿轮磨损带来

的负面影响。

1 齿轮振动磨损力学模型及受力分析

烟草车间传送设备内部结构复杂,其中大部分零件都具有关联性,设备的齿轮振动磨损可能形成的原因有很多。齿轮振动运行的原理是:设备将发电机提供的电能转化为力矩,力矩推动齿轮不断地进入和退出啮合,带动齿箱的运转,完成传输装置的运行。齿轮振动磨损的主要原因是齿轮退出啮合过早或者过迟,导致下一周期的齿轮运行发生变化,影响齿轮的运行速度,导致齿轮间的摩擦力、力矩、啮合力发生变化,对齿间面形成不同程度的冲击和摩擦。设定齿轮传动装置,分析主动轮 Z_1 和从动轮 Z_2 ,设置主动轮的偏心质量为 m_1 ,从动轮的偏心质量为 m_2 ^[4-5]。因为齿轮振动具有非线性,根据物体振动守恒定理原理,构建简化的齿轮振动磨损的力学模型,齿轮振动磨损力学模型如图 1 所示。

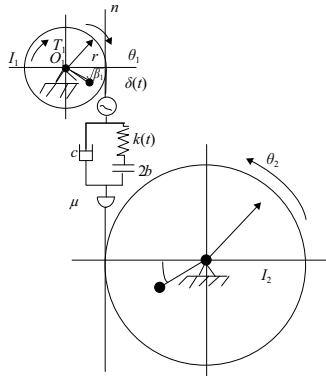


图1 齿轮振动磨损力学模型

观察图1,确定主动齿轮和从动齿轮的基圆半径,根据主动轮和从动轮的转动惯量分析驱动转矩和负载转矩。由线性阻尼、时变啮合刚度、齿轮偏心距得到齿轮的啮合线方向。模型数学公式如下:

$$F = \mu_a \times f + \frac{1}{3} F_n + T(t) \quad (1)$$

式中: f 表示齿轮振动运行的摩擦力; $T(t)$ 表示齿轮振动运行的力矩; F_n 表示齿轮振动运行的啮合力; μ_a 表示齿轮的摩擦系数^[6-7]。

设备的每对齿轮在啮合时,根据齿轮振动磨损力学模型,齿轮啮合过程的瞬时摩擦系数大小和齿轮啮合接触点有关系。正常的齿轮每一周期的接触点相同,但是受到振动磨损的齿轮,每一周期的啮合接触点不同,导致齿轮间的摩擦系数不同,齿轮的动能就会发生非周期的变化。具体的摩擦系数可以表示为

$$\mu_a = \frac{\mu_{2a} - \mu_{1a}}{p_a \times t_a} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_a \times v dx \quad (2)$$

式中: $\mu_{2a} - \mu_{1a}$ 表示齿轮接触点的瞬时摩擦系数; p_a 表示动态法向载荷; t_a 表示润滑油油膜厚度; v 表示啮合接触点的滑动速度; σ_a 表示齿轮的时变刚度^[8]。

齿轮在振动磨损状态时齿侧间隙的动态啮合力受到主动轮的运行角速度、线速度、啮合线的角度以及每对齿轮之间的角度影响,根据齿面摩擦力和库仑定律计算原理,计算啮合动态受力公式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} F_n &= F_k + F_c \times a \\ F_f &= \gamma \mu \times F_n \end{aligned} \quad (3)$$

式中: γ 表示齿轮摩擦方向系数; F_k 表示齿面间的摩擦力; a 表示齿面荷载; F_c 表示齿轮磨损表面的弹性啮合力; F_n 表示齿轮间的阻力; μ 表示齿轮间的动摩擦系数^[9]。

齿轮啮合示意图如图2所示。

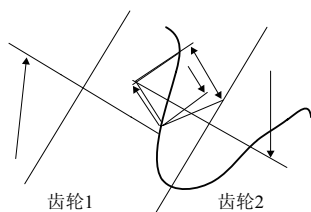


图2 齿轮啮合示意图

图2中,对齿轮1附加向上的应力,对齿轮2附加向下的应力,两个齿轮咬合部分形成顺时针旋转的应力,促使齿轮不断运转的是作用在主动轮和从动轮上的力矩。如果力矩过大,会使齿轮速度变大,增加齿轮的磨损;如果力矩过小,会导致齿轮不运转,影响设备的工作,所以齿轮的力矩要控制适当,力矩计算公式如下:

$$T(t) = T_m + T_{at} \sin(\omega_T t + \varphi t) \quad (4)$$

式中: ω_T 表示从动齿轮上的工作力矩的变化圆频率; φt 表示从动齿轮上工作力矩的初始相位角; T_m 是驱动力矩常数; T_{at} 表示齿轮转动恒量和幅值弦变量之和。

2 齿轮振动磨损特征分析

烟草车间的传送设备在运行过程中避免不了由于烟草质量或者其他原因出现振动磨损,这种振动会使设备的齿轮表面受到冲击,加速齿轮表面的磨损和齿轮变形,过度的齿轮磨损会造成齿轮的断裂和断齿^[10-11]。

齿轮振动磨损一方面是因为设备的齿轮在生产过程中很难保证设备的各个齿轮都是同样尺寸,所以对于全新的齿轮,需要一段磨合阶段,在磨合阶段,齿轮之间不断地摩擦和抗击,齿轮就会出现磨痕。另一方面,在运行过程中一旦齿轮内卷入颗粒或者其他小物品,伴随着齿轮的运行,相应的齿轮表面会产生划痕。齿轮和齿箱的振动特征也与正常的齿轮运行特征不同,齿轮的振动磨损特征为齿轮振幅变大、振动能量增加、齿轮咬合频率和倍率降低三方面^[12]。齿箱的振动磨损特征为运行频率降低,存在异常的波动幅度。齿轮相对振动速度响应时域波形如图3所示,齿轮相对振动速度频谱图如图4所示,振动信号相平面图如图5所示。

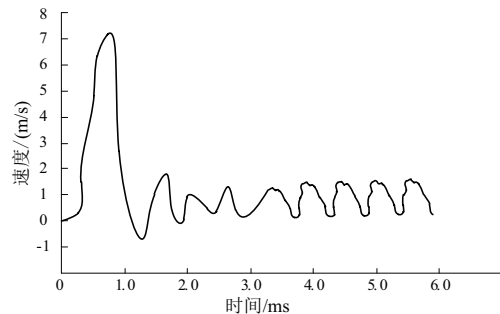


图3 齿轮振动速度响应时域波形

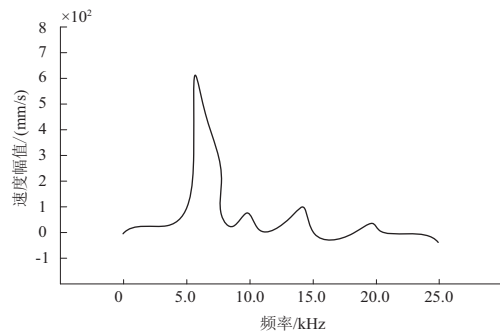


图4 齿轮振动速度频谱图

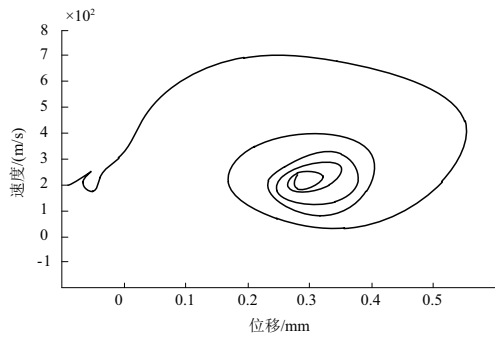


图5 振动信号相平面图

齿轮面发生磨损时,各个齿轮的运行阻力增加,运行的反阻力会加速齿轮的运行,导致齿轮运行速度为非规律的变速,最终齿轮振动的振幅增大。另外齿轮的振动能量也会增加,因为齿轮内如果发生非均匀磨损,局部的几个轮齿出现严重的磨损,或者全部轮齿都发生磨损,但部分轮齿的磨损程度更严重时,齿轮所在的转轴及其倍频的调制频率会出现啮合频率调制现象,频域上表现为在啮合频率及其倍频附近产生幅值小且稀疏的边频带^[13]。齿轮内部出现磨损,只有增加齿轮运行的动力才能保证齿轮正常工作完成相应的工作,所以齿轮必须提供比原先大得多的能量,这也会加速齿轮表面的磨损。齿箱和齿轮振动磨损特征具有连带关系,齿箱中一对齿轮发生振动磨损,整体的齿轮运行就会出现波动和异常,在磨损初期,受磨损阻力的影响,传送设备提供正常的动力无法使带有阻力的齿轮以正常的速度运行,齿轮整体的运行频率降低^[14]。

根据对烟草车间传送设备齿轮磨损特征的分析,本文通过提取齿轮的磨损特征指标,有利于对齿轮磨损程度的分析^[15]。烟草车间传送设备齿轮故障树分析如图6所示。

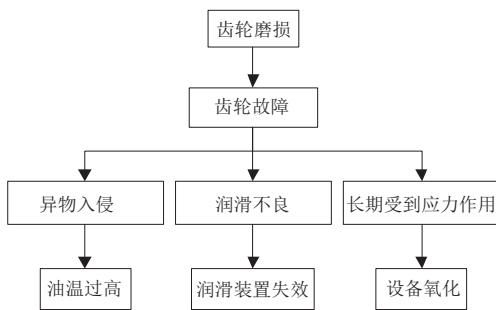


图6 烟草车间传送设备齿轮故障树

设备齿轮磨损指标的提取首先通过密度采样法将齿轮的运行相关数据参数进行采集,然后根据EMD技术对数据参数进行真实数据分化处理,预留齿轮振动运行的磨损信息。EMD技术首先将各个数据参数按照参数的来源分为若干个变量;然后将各个分量与正常齿轮运行数据的分量进行对比,提出所有不同的分量;最后对分量进行重构,排除齿轮运行参数的无效信息,可以得到齿轮振动磨损特征指标。对磨损特征指标进行分析,判断齿轮磨损的程度和齿轮磨损的结构,提高烟草车间传送设备齿轮磨损判断的效率。齿轮磨损分量程度的对比公式如下:

$$J(s, t) = \frac{1}{2N} \left[\sum_{i=0}^{N-1} (s(i)/\tau(i) - \tau(i)/s(i)) \right] \quad (5)$$

式中: s 表示齿轮参数的样本; i 表示采集的齿轮参数值; $J(s, t)$ 表示正常齿轮运行参数和磨损齿轮运行参数的散度值; N 表示参数的分量个数。

根据对烟草车间传送设备齿轮磨损力学的分析、模型构建以及齿轮磨损特征提取方法的研究,本文总结出传送设备齿轮磨损智能预警方法的工作流程,如图7所示。

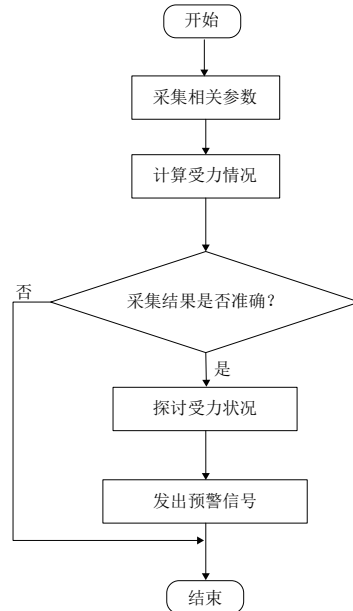


图7 烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法流程

1) 采集传送设备运行的摩擦系数、运行速度、频率等相关参数,根据本文构建的齿轮振动摩擦力学模型,分析齿轮振动磨损的受力情况,计算出齿轮运行过程中的摩擦力、力矩、啮合力,为齿轮磨损程度的分析奠定数据基础;

2) 对设备齿轮振动磨损的受力情况进行探讨,通过比样采样法提取出有效的振动信号参数并分解信号,完成传送设备齿轮磨损特征的提取。根据齿轮磨损分量程度的对比公式,得出齿轮运行磨损的状态和磨损结构位置点;

3) 根据齿轮磨损的结构位置和磨损程度,向设备管理人员提出最合理的预警方案,完成预警工作,保证烟草车间传输设备的正常工作。

3 实验分析

为了验证烟草车间传输设备齿轮磨损智能预警方法是否具有应用意义,本文进行对比试验分析,对比方法为烟草车间传送设备齿轮磨损模拟预警方法。为了保证试验的公平性,选择两台具有相同运行时间的烟草传送设备进行试验,并且两种预警方法在试验前1h选择相应的处理传送设备。因为烟草车间传送设备齿轮磨损情况通过肉眼无法鉴别,所以本文两台设备会连接两台计算机。计算机在实验前对传输设备齿轮的磨损情况进行检查,得出结果提交给工作人员。在试验结束后对比试验结果与计算机试验前的检查结果,通过结果的匹配度,得出烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法的准确性。设定实验

参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

故障模式	齿轮磨损
故障类型	失效型
故障位置	齿轮箱/齿轮
润滑油油温/°C	60
振动次数/次	10
操作系统	Windows10

在试验前,通过抽签选择两种预警方法工作的设备,然后辅助计算机检测设备齿轮的磨损度,计算机后台会全程记录两种预警方法的相关预警数据,用于最终的结果分析。当两种预警方法都提交预警结论后,终止试验,进行试验数据汇总,得出试验结论。本文在试验前和试验过程中,最大限度地剔除了外界因素对于试验的影响,保证试验的科学性和公平性,所以得出的实验结果具有可信性。

数据筛选结果如图 8 所示。

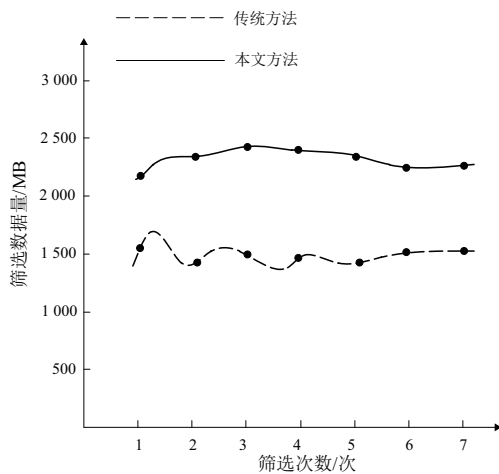


图 8 数据筛选结果

预警响应时间实验结果如表 2 所示。

表 2 预警响应时间实验结果 单位:s

实验次数	传统方法响应时间	本文方法响应时间
1	5.24	0.27
2	5.78	0.34
3	5.22	0.21
4	5.34	0.43
5	5.07	0.20
6	5.18	0.18
7	5.29	0.29
8	5.05	0.30
9	5.36	0.19
10	5.85	0.22

根据上述实验结果可知,本文研究的烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法比烟草车间传送设备齿轮磨损模拟预警方法的预警效率高,完成时间短。本文研究的预警方法构建了设备齿轮振动磨损模型,对于齿轮运行的受

力分析合理掌握,了解每个齿轮的受力情况,在准确的齿轮相关磨损数据基础上,可以快速地分析出齿轮磨损的原因和程度,然后根据齿轮的磨损程度,得出最合理有效的预警方案和结论。然而传统的预警方法对于齿轮磨损程度进行实时的测量和讨论,降低了齿轮磨损程度计算的效率,并延长预警的时间。除此之外,本文的预警方法对于齿轮磨损进行特征指标提取,根据指标反馈的数据,可以合理地推测出齿轮的磨损程度,为齿轮磨损预警方案提供准确的数据基础,确保预警结论的准确率。

综上所述,本文研究的烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法具有有效性和准确性,并有很好的实际应用效果。

4 结语

齿轮磨损预警可以防范风险、降低装备运营成本,本文提出烟草车间传送设备齿轮磨损智能预警方法。首先分析了烟草车间传输设备齿轮磨损机理,建立齿轮磨损的力学模型,为齿轮磨损的力学分析建立基础;然后根据以上分析提出传输设备齿轮磨损特征指标,完成烟草车间传输设备齿轮磨损智能预警方法的研究;最后通过对比试验分析得出本文研究的预警方法具有高效性和准确性,符合烟草车间传输设备齿轮磨损预警规范,可以投入使用。

参考文献:

- [1] 李晓燕. 中国企业“僵尸化”的 SMOTE-SVM 智能预警研究[J]. 软科学,2019,33(5):77-80.
- [2] 耿志强,景邵星,白菊,等. 基于 MWSPCA-CBR 的智能预警方法研究及其在石化工业中的应用[J]. 化工学报,2019,70(2):572-580.
- [3] 何成善,权芳民,贾昆. 金属磨损自修复技术在齿轮传动系统中的应用[J]. 化工机械,2019,46(1):54-57.
- [4] 贺妍,王宗彦. 基于 PSO-FC 优化 KPCA 的特征提取及行星齿轮磨损损伤程度识别[J]. 机械传动,2019,43(2):137-143.
- [5] 孙次锁,张玉华. 基于智能识别与周期检测的钢轨损伤自动预警方法研究[J]. 铁道学报,2018,40(11):140-146.
- [6] 周长江,汪红兵,雷玉英,等. 齿轮磨损计算与测试方法及抑制技术[J]. 北京工业大学学报,2018,44(7):987-1000.
- [7] 朱鹏飞,严宏志,陈志,等. 齿轮齿面喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术,2020,49(4):113-131,140.
- [8] 丁伟,张志刚,黄捷,等. 变速器齿轮故障特征模糊熵提取方法研究[J]. 制造技术与机床,2020(2):124-127.
- [9] 蒋光华,万红波,罗维超,等. 烟叶品质流动检测和在线监测的物联网设备研究[J]. 自动化与仪器仪表,2019(11):153-156,160.
- [10] 周雅宁. 烟梗加工处理技术与设备研究进展[J]. 中国烟草学报,2019,25(2):121-129.
- [11] 张立宁,安晶,张丽华,等. 一种建筑工程施工安全智能预警模型研究[J]. 数学的实践与认识,2019,49(17):196-202.
- [12] 张雪英,栾忠权,刘秀丽. 基于 IWT_sE 与 GA_sVM 的齿轮磨损检测[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(4):74-77.
- [13] 张雪嫣,黎晓东,孙洁香. 基于随机森林的烟草烘丝设备参数数据相关性分析研究[J]. 制造业自动化,2019,41(8):145-148.
- [14] 任望,刘杰,赵伟强. 齿面磨损对齿轮系统动态特性的影响[J]. 润滑与密封,2019,44(11):67-72.
- [15] 任帅,钱虹. 基于预警系统的反应堆非能动设备故障的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(4):29-35.

收稿日期:2021-01-13