

船用低速柴油机轴承磨损监测系统工作原理的研究

姚 晶^{1,2}, 王俊英², 罗智晟²

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘 要: 随着船用低速柴油机轴承磨损监测系统的启用, 真正实现了轴承磨损状态的实时监测和开验轴承次数的减少。介绍了船用低速柴油机轴承磨损监测系统的一般工作原理、功能与特点, 对其关键技术, 下止点位置传感器的信号处理, 尤其是速度补偿技术进行了重点分析, 为更好地用好该系统提供参考。

关键词: 柴油机; 轴承磨损监测系统; 工作原理; 信号处理

中图分类号: TK424.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)03-0001-05

The Research of Bearing Wear Monitoring System's Working Principle for Marine Low-speed Diesel Engine

Yao Jing^{1,2}, Wang Junying², Luo Zhisheng²

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd, Shanghai 200129)

Abstract: With the introduction of Bearing Wear Monitoring (BWM) on low speed marine diesel engines, real-time monitoring of bearing wear condition are realized, open-and-inspection are less needed. BWM systems of low speed marine diesel engines are introduced from the aspects of working principles, function and characteristics. Moreover, its key technology, the signal processing of BDC position sensor, especially the speed compensation techniques are analyzed in detail, which offers reference for good application of this system.

Key words: diesel engine; Bearing Wear Monitoring system; working principle; signal processing

0 引 言

为了提升柴油机运行的安全性和可靠性, MAN 公司提出了一种轴承磨损监测系统 (Bearing Wear Monitoring System), 这是一种包含轴承磨损监测和应急响应的系统。主要监测二冲程十字头柴油机的三种重要轴承的磨损状况。这三种重要轴承分别是主轴承、曲柄销轴承和十字头轴承。

轴承磨损监测 (BWM) 系统的主要目的是提前发现轴承的故障以防止过度发热引起除了轴瓦之外其他部件的损坏, 如十字头销、曲拐或曲柄箱变形。当轴承套 (白合金或者锡铝合金) 被磨穿并且轴和轴瓦背面的钢衬发生接触摩擦, 就会发生这

样的损坏。

BWM 系统的另一个目的是尽可能地基于轴承状况进行开验检查而不是定时进行开验检查。开验轴承即耗时费力又有装复故障的风险。因此避免不必要的定时开验轴承已经成为一种趋势。

1 轴承磨损监测系统的基本原理

众所周知, 三种轴承的承载部分轴承壁厚的任意微小变化都会导致一个或者多个十字头的下止点 (BDC) 位置发生变化。本文研究的轴承磨损监测系统正是利用位置传感器探测出柴油机各缸十字头滑块下止点位置的细微变化, 并以此推断当前轴承的磨损状况。如果是曲柄销轴承或者是十字头轴承

磨损,那么该缸的下止点位置会发生变化,而如果是主轴承磨损,则临近该主轴承的两个缸的下止点位置都会发生变化。

1.1 轴承磨损监测系统的响应输出

基于上节轴承磨损监测系统的基本原理可知:测得实际的十字头下止点位置信号尤为重要。系统采用位置传感器记录主机每转时各缸前端和后端的下止点位置信号。该传感器可以安装在柴油机机架内部的导板上,并对向十字头滑块的下边缘。如果一段轴承发生磨损或是咬死的情况,那么该段轴承所对应气缸的下止点位置必然会发生变化,而系统的处理单元将会比如下止点的正常值和当下实测值,显示出异常数据,发出报警或者降速信号至主机的监测报警系统^[1]。

目前市场上主流的下止点位置传感器通常为电涡流式,其基于涡流效应原理进行工作^[2]。高频交流电流通过传感器内部的线圈产生磁场,当十字头滑块靠近传感器就会产生电涡流,位置传感器随之将其线圈阻抗的变化量转换成电流信号,并传送到信号处理模块。十字头滑块越接近位置传感器,传感器输出的电信号就会越大,这两者成线性关系。同时由于轴承套的厚度只有 1.0 ~ 1.5 mm,所以位置传感器信号的分辨率必须达到 ± 0.01 mm。

当然,传感器获取的信号中必然包含部分误差和干扰。去除传感器精度问题带来的干扰,滑块的 BDC 信号仍然会呈现出微小的差异,这是由主机参数的不规则变化,如气缸燃烧压力等引起的。

除了以上这些干扰,影响 BDC 位置信号精度最大的因素是主机转速。这是因为当主机转速上升时,活塞、十字头、连杆以及曲轴臂上的惯性力也会增加,并且,当气缸单元处于底部位置时,该惯性力增大了轴承向下的负荷,由此引起主机结构弹性形变导致 BDC 位置相应降低。如表 1 所示,MAN 各机型在不同转速下十字头下止点位置变化数据。

表 1 MAN 各机型不同转速下十字头下止点位置变化数据

机型(缸径)/dm	下止点位置变化(20%~110% RPM)/mm
80~90	-0.35
60~70	-0.25
50 及更小缸径	-0.15

因此,轴承磨损监测系统在处理轴承磨损阶段的 BDC 位置信号的过程中,必然包含速度补偿的部分:信号获取→主机转速补偿→去除其他干扰

(滤波)→偏差计算→信号分析和评估。

除了速度的影响,其他因素诸如船体不同吃水程度引起的船体变形,以及主机温度的变化,甚至海面波浪的变化都会引起 BDC 位置的变化。因此必须控制这些因素对 BDC 位置信号精度的影响,避免船舶在航行过程中发生误报警的现象。所以系统须对速度补偿后的 BDC 位置信号进行滤波,然后使用滤波后的信号值来计算单个传感器与其他传感器之间的偏差(称之为传感器偏差值),以及单缸与其他各缸的偏差(称之为气缸偏差值)。计算传感器偏差和气缸偏差的目的是去除温度、船体变形等因素对 BDC 位置信号的影响,同时分析同一缸前后端传感器信号值之间的差异。

轴承磨损系统除了上述的响应输出外,还必须能够记录存储轴承磨损过程中的磨损状况和各种数据,这样就能够直观地了解轴承以往运行的情况以及轴承磨损的趋势。

2 轴承磨损监测系统的速度补偿

如前文提到的那样,主机的转速对 BDC 位置信号的精度影响最大。如表 1 所述,速度对不同缸径主机的 BDC 位置信号影响最大可达 0.35 mm。因此系统必须对位置传感器产生的 BDC 信号进行速度补偿。主机转速对各位位置传感器的影响还与主机曲轴的布置和对中等情况相关,所以必须对每个位置传感器都进行单独的速度补偿。

轴承磨损监测系统是通过查表^[3]的方式进行速度补偿的,所以系统必须先建立一张包含有主机常规运行时不同转速下位置传感器获得的正常信号值(参考值)的查询表。这张查询表将主机的额定转速在 20%~110% 之间划分出至少 100 个转速区间,这样的转速区间在后文的描述中称之为“转速点”。

由此可见,主机转速补偿查询表就成为轴承磨损监测系统的基础,而系统则是通过一个“自我学习”的过程来建立这张查询表。当然,系统需要一定的时间来完成这个自我学习的过程。因此,MAN 将轴承磨损监测系统开始运行后的前 500 h 定义为系统的自我学习过程,这个过程称为“学习模式”,在整个 500 h 的学习过程中,轴承磨损系统将为每个下止点位置传感器建立起完整的速度补偿查询表。

2.1 学习模式

轴承磨损监测系统开启学习模式时,当主机在三个固定的速度点上运行至少 10 min 后,轴承磨

损监测系统就会建立起一条粗略的校准曲线。对于这三个固定转速点的选取遵循以下原则:

- (1) 20% ~ 50% 的额定转速区间内;
- (2) 50% ~ 80% 的额定转速区间内;
- (3) 80% ~ 100% 的额定转速区间内。

这三个转速点除了分别落在以上 3 个转速区间, 且其相互之间的间隔至少要有 20% 的主机额定转速的间隔。

当主机在每个转速点上运行时, 轴承磨损系统对主机转速信号和下止点位置传感器的信号进行采样, 并计算出平均主机转速和平均下止点位置值。当第一个速度点 (20% ~ 50%) 采样完成后, 根据采样点的数据以及表 1 中提供的各机型 20% 与 110% 额定转速之间下止点位置的差异值, 每个下止点位置传感器的第一条粗略校准曲线就产生了, 见图 1。

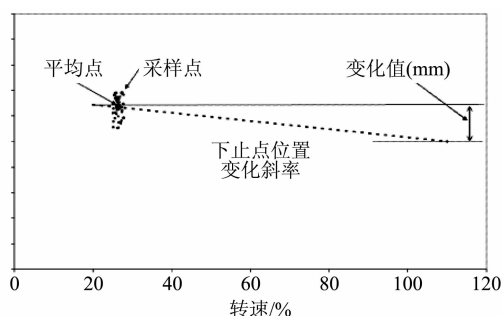


图1 初步的粗略校准曲线

当三个转速点采样完成之前, 系统以图2这条曲线作为下止点位置传感器在各转速下的信号参考值。而当三个转速点采样均完成后, 系统通过插值法或者外推法来推算覆盖 20% ~ 110% 主机额定转速区间内的下止点位置参考值, 并以此为每个下止点位置传感器建立起一条校准曲线, 如图3所示。

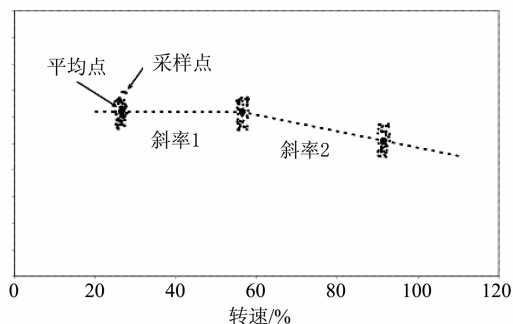


图2 粗略校准曲线

当如图2中的粗略校准曲线建立完成后, 轴承磨损监测系统开始进入学习模式的下一个阶段, 在这个阶段中, 主机可以跑在任意转速点下。当下止点位置传感器在某一转速点下获得了 1 000 个下止

点位置传感器信号后, 即主机在这个转速点下运转了 1 000 圈, 那么系统会计算这 1 000 个下止点位置信号的平均值, 并将该平均值定义为该转速下的下止点位置参考值。如此, 系统对主机在该转速下的下止点位置信号的速度补偿就完成了。

在整个学习模式的 500 h 中, 系统不断地采集下止点位置信号, 以尽可能多地计算出不同转速点下的下止点位置参考值。在这个过程中, 系统还会以每 50 h 为间隔, 以所有获取的数据重新计算每个转速点下的下止点位置参考值, 同时查询表也要相应更新。如果任一速度点下重新计算出来的下止点位置参考值与初始获得的参考值 (一开始的 1 000 个采样信号) 相差超过 0.2 mm, 那么系统就会释放报警信号。这样做的目的就是为了能够尽早地监测轴承的磨损状况, 防止轴承从一开始就过度磨损。

在这 500 h 的学习模式中, 由于主机的转速是可以任意控制的, 所以可能某些转速点下的下止点位置参考值系统无法获得 (没有得到 1 000 个采样信号)。那么在这期间, 速度补偿是通过最初由 $3 \times 10 \text{ min}$ 采样信号计算而来的粗略校准曲线 (图2) 来进行, 或是通过初始的粗略校准曲线 (图1) 来进行速度补偿。

2.2 完全补偿模式

当 500 h 的学习模式结束后, 某些速度点下的下止点位置参考值可能由于缺乏数据 (少于 1 000 个采样信号) 而没有计算出来。在这种情况下, 系统就会以现有已获取的数据来计算平均值并将其定义为下止点位置参考值。而如果主机在 500 h 的学习模式期间, 某些转速下一圈也没跑, 那么这些转速点下的下止点位置参考值就必须通过已有最近的转速点参考值之间插值获得, 或者通过由最初 $3 \times 10 \text{ min}$ 建立起来的粗略校准曲线外推获得。见图3。

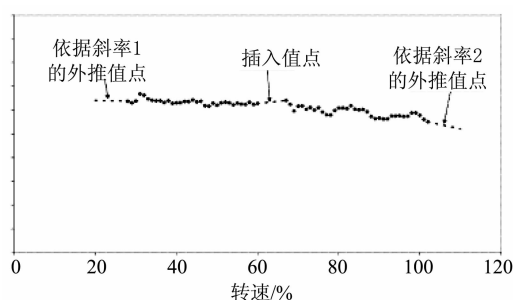


图3 最终校准曲线

轴承磨损系统完成学习模式后, 所有信号的处理都是建立在速度补偿完成后的传感器值上的, 即传感器获得的下止点信号值减去下止点参考值, 所

以轴承磨损系统会对每个下止点位置传感器在每个速度点下都建立起下止点位置参考值,以便对信号进行后续处理。

3 轴承磨损阶段的监测算法

为了能够实时地在线监测三种轴承的磨损情况,系统必须要将测得的数据和轴承套原始数据进行比对。图 4 展示了在学习模式中,针对轴承稳定磨损情况的数据处理流程。

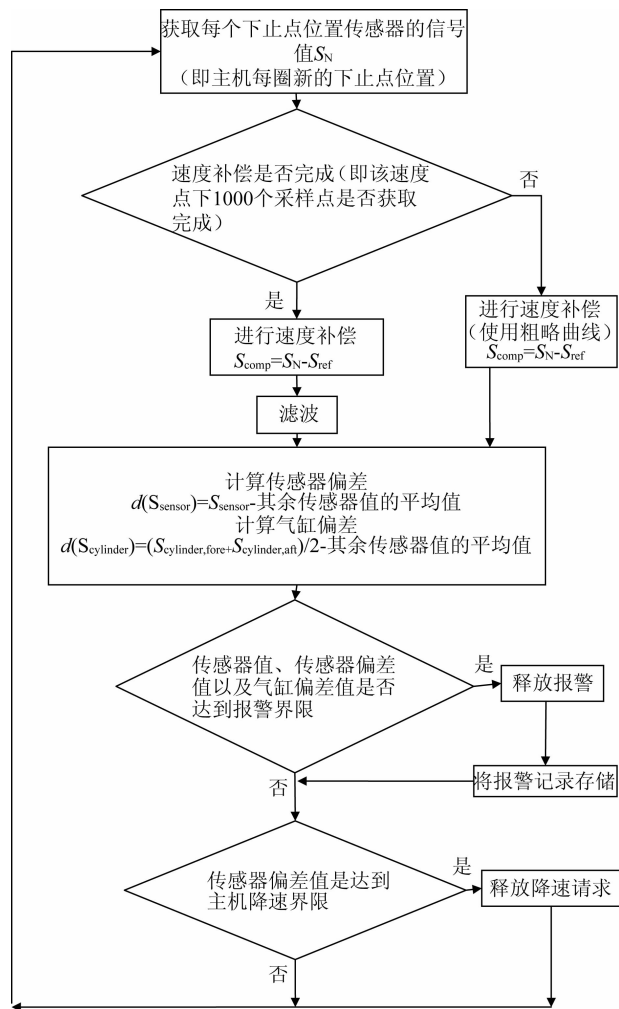


图 4 学习模式过程中信号处理流程

而当速度补偿曲线建立完成后,数据的处理流程则如图 5 所示。

轴承磨损系统会遵照以上的流程来获取和处理信号。当主机每转一圈时,就会产生一组新的下止点位置信号。而在实际处理信号的过程中,为了防止发生误报警,对下止点位置的评估以判断是否达到报警或降速界限不是每圈都进行的,其最大间隔可达到每 30 圈评估一次。

3.1 降噪处理

众所周知,柴油机内部的环境较为恶劣,其温

度、湿度、振动、电磁变化等因素都可能影响下止点位置信号的准确性。考虑到低速柴油机的转速通常在 $200(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 以下,为了能够将这些误差(高频信号)带来的影响降低到最小,轴承磨损监测系统必须具有低通滤波^[4]的功能。

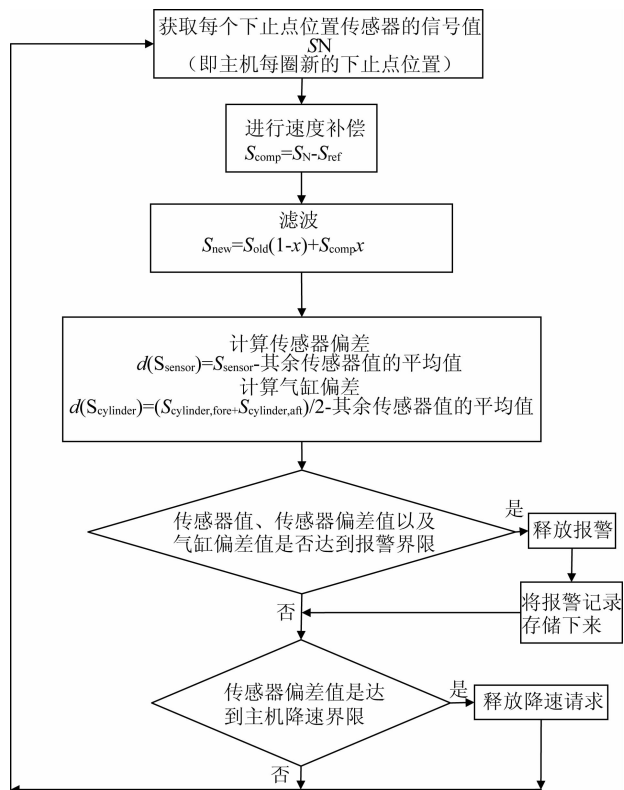


图 5 完全补偿曲线下数据处理流程

考虑到下止点位置传感器最近一次获得的信号对反应轴承近期状态的重要性,轴承磨损监测系统通常选择使用指数平滑滤波器来作为低通滤波的算法。即:

$$S_{\text{new, filtered}} = S_{\text{old, filtered}} (1 - x) + S_{\text{comp}} x$$

指数平滑法的关键是 x 的取值,但 x 的取值又容易受主观影响,因此合理确定 x 的取值方法十分重要。一般来说,如果数据波动较大, x 值应取大一些,可以增加近期数据对预测结果的影响;如果数据波动平稳, x 值应取小一些。

在实际应用中预测者应结合对预测对象的变化规律做出定性判断且计算预测误差,并要考虑到预测灵敏度和预测精度是相互矛盾的,必须二者一并考虑,采用折中的 x 值。

3.2 偏差计算

除了随机因素造成的误差,其他某些因素也会以某种常态的方式影响下止点位置传感器信号。如,主机气缸中温度的上升会导致所有的下止点位置信号产生几乎相同的变化量;而另一方面,某个

轴承的损坏则只会影响与之相关的位置传感器信号。为了排除这些影响下止点位置信号的因素, 轴承磨损监测系统引入了偏差计算。

3.2.1 传感器偏差计算

所谓传感器偏差就是指单个下止点位置传感器测得的活塞下止点位置值与其他传感器所获得的下止点位置平均值之间的差异。以 4 缸机为例 (4 缸机有五档主轴承, 相应配置 8 个下止点位置传感器, $S_1 \sim S_8$), 则 5 号位置传感器的偏差值如下式所示:

$$d(S_5) = S_5 - (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_6 + S_7 + S_8) / 7$$

3.2.2 气缸偏差计算

大量的经验表明: 在同一缸内分别装在前端和后端的位置传感器往往会产生反向差异的信号, 比如当前端的信号值增加, 则后端的信号值往往会降低。造成这种现象的原因可能是推力变化引起的主机结构在纵向上的剪切变形, 也可能是由船体的变形造成。

系统通过计算同一气缸前后端两个传感器信号的平均值来消除这种误差。还是以上文中提到的 4 缸机为例, 3 号缸 (位置传感器编号为 S_5 和 S_6) 的气缸偏差值如下式所示:

$$d(C_3) = (S_5 + S_6) / 2 - (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_7 + S_8) / 6$$

相比于传感器的偏差值, 气缸偏差的离散化程度大为降低。通过计算气缸传感器的平均值, 降低了系统的灵敏度, 从而避免了仅靠某一缸的某一个单独的传感器来判别轴承磨损情况, 降低了误报警的可能性。这也是系统引入传感器偏差和气缸偏差的重要原因。

3.3 数据评估

每个位置传感器滤波后的值, 以及传感器、气缸偏差计算值都会与报警、降速和预报警值相比较。该数据的评估工作也至少每 30 圈做一次。

如果某个气缸中的一个 (或所有) 下止点位置传感器在 6 h 内获取的平均“传感器补偿后”的信号值超过了预报警界限, 那么系统就会报告该气缸单元当下处于“预报警”状态。

预报警的作用是显示被监测轴承的状态已经开

始发生变化。如果预报警被触发, 只要报警和降速的界限还没达到, 那么船员可以不采取任何措施。预报警确认, 那么实际传感器预报警的界限就会增加 0.25 mm。当然, 任何预报警以及预报警参考值的重置行为都必须被记录在文档中。

除了预报警, 系统还能发出报警和减速的信号。这些信号引起即时动作。如果系统触发了报警界限, 那意味着发出报警信号的气缸轴承可能已经产生了较大的磨损量, 船员须尽快检查该气缸单元。

而如果轴承磨损监测系统发出了降速指令, 则意味着相应段轴承的磨损已经相当严重, 船员必须立刻做出检查。

4 总结

从以上针对二冲程柴油机的轴承磨损监测系统工作原理的介绍, 不难看出其中最关键的一点是下止点位置传感器的信号处理, 尤其是速度补偿。这些处理能够保证真实准确地反应各轴承的磨损情况, 并将主机和船舶的各类工况加以综合考虑, 避免特殊工况下的误报警。这就是 MAN 公司要求所有类型的轴承磨损监测系统必须具备“自我学习”的根本原因。

目前轴承磨损监测系统越来越多的应用到新造主机上, 其真正实现了实时监测轴承磨损状态, 同时减少开验轴承次数的目的, 受到广大船东的青睐。因此, 在未来很长一段时期内, 安装轴承磨损监测系统必然会成为低速机的一种主流趋势。

参考文献

- [1] 万曼影. 轮机自动化 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007: 147-154.
- [2] 郑华耀. 检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 122-126.
- [3] 丁元杰. 单片机原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 48-52.
- [4] 谢剑英, 贾青. 微型计算机控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 67-70.