

Artesis – 简化预测维修

Ahmet Duyar, Artesis, ahmet.duyar@artesis.com

Andy Bates, Artesis, andy.bates@artesis.com

Caner Kuzkaya, Artesis, caner.kuzkaya@artesis.com

Tim Chang, BPDM, timchang@bpdm.com.cn

摘要

尽管预测维修的益处是公认的，但是充分利用这个方法的公司比例相对很小，对于很多潜在用户，传统的状态监测系统的复杂性和代价仍是主要障碍。针对由三相电动机驱动的所有类型机器，以及发电机，Artesis 系统不需要专门的传感器，其基于模型的方法使它能够只测量电源导线的电流和电压就可以检测和诊断电气和机械问题。这使得安装较传统的系统要简单和快捷的多。系统自学习几天，然后就可以提供给用户关于任何发展的故障、推荐的行动、和可能的失效时间的简明信息。通过简化预测维修的实施，Artesis 系统被日益公认为从石油和天然气到公用设施等工业中很多类型设备的首选方法。

1. 背景

当代维修是一个关键的管理问题。维修的成本可占固定生产成本的 20%，降低维修成本对企业利润具有重要效果。并且，落后的维修惯例导致频繁的停机和不必要的维修干预，可能会使设备生产率减半。预测维修最初的引入正是面向这两方面的挑战，通过利用状态监测系统对设备故障提供提前预警。

且不论预测维修在某些行业的成功应用，估计只有 1% 的潜在用户能够成功的应用它。其主要原因是现有的状态监测系统对大部分人来说太复杂和太昂贵。Artesis 基于先进的专利技术成功开发了一个新的方法，第一次使广大用户从预测维修中受益。

当 Artesis 团队第一次遇到找到解决这个问题的方法的挑战时，用户说它需要采取创新的方法来避免传统系统的缺点。因此解决方案肯定是非常简单，便宜的，容易安装，并对现有系统提供

灵活的链接。重要的是，必须避免对繁忙的维修人员增加繁重的设置和分析负担。

Artesis 的答案是将主要研发精力聚焦在最常见的机器形式 – 由三相对电机驱动的所有设备。结果 Artesis MCM (电动机状态监测器)，一个内在复杂外在容易使用的仪器出现了，它将预测维修的益处带给最可能广泛的用户。

Artesis MCM 采用的“基于模型的故障检测”方法在状态监测领域既是创新也是唯一的，产品中使用的先进算法最初是在一个 NASA 合同 (1, 2, 3, 4) 下研发的并且得到专利保护。将这个数学方法转化为一个实际的工具需要大量的实验和研发努力，包括对数百万台电动机的测试，验证诊断的准确度和重复性。

Artesis 成功利用创新的 (5)，先进的技术提供更简单的，更有效的和更便宜的状态监测解决方案，引起了一场预测维修革命。

2. 概述

预测维修的传统技术依赖于观察一系列关键测量值的时间趋势，通过仔细选择测量的范围，有经验的分析人员能够发现有意义的变化，并分析引起这些变化的故障原因。当测量的变化是由于操作（工况）改变导致时，分析人员常常感到困惑，例如转速或负荷改变，而不是故障的发展。系统的建立和分析成本一般使这种系统为许多潜在用户力所不能及。

Artesis MCM 采取完全不同的方法，基于利用被监测设备的数学模型。它只使用电压和电流测量信号，可安装在电动机控制柜中而不需长电缆敷设。一旦安装，它自动启动一个自学习阶段，建立参考数学模型。这个模型包括关于电动机及

其驱动系统的所有电气和机械特征的信息。它根本不需要操作者的任何输入，但包含了学习阶段经历的所有运行状态，如不同的转速和负荷。

当建立了参考模型，Artesis MCM 切换到监测模式，在监测模式每 90 秒钟创建一个新的系统模型，用这个新的模型与参考模型进行统计比较，并识别潜在的故障及特征。然后，系统能够评价问题的严重性并产生一系列的本地指示，建议应当采取的行动。诊断信息也可以发送到连接的计算机，为维修团队展现详细的信息 – 包括特定的故障、推荐的行动、和预计的失效时间。电气和机械问题被诊断，包括常见的故障如绝缘击穿、转子铜条损坏、不平衡、和轴承故障。

Artesis MCM 成功研发的关键是保证采用的先进技术对使用者来讲是看不见的。事实上，一旦系统被安装，使用者除了对系统提供的信息响应之外根本不需要做任何事情。这些沟通的信息包括本地红绿灯指示，控制系统输入，计算机显示，或电子邮件，可覆盖任何地点。

事实证明 Artesis MCM 监测电动机驱动的系统非常成功，现在其核心技术已经扩展到发电机和逆变器的监测，引入了 Artesis PCM (工厂状态监测器)。

3. 挑战

在今天竞争的商业环境下，制造厂面临增长生产同时减少生产成本的需求，而由于停机和不必要维修干预导致的低资产有效性是降低生产率的渗透性成本。仅在美国由于过剩维修和生产率损失产生的合并成本估计在\$7400 亿，因此应用更好的方式的潜在效益是巨大的。

预测维修方式一直被认为能够减少这个成本，并发展了广泛的状态监测技术使之能够在工业环境实施。这些技术通过分析从设备采集的数据，以便足够提前识别故障特征，从而减少故障和非计划生产停顿。

振动分析是最常见的状态监测方法，占有销售的系统的 85% ，其它技术包括红外(IR)热成

像用于检测轴承和轴的温度变化；摩擦学或润滑油分析；电动机电流特征分析；和轴承磨损的超声分析等。

这些传统方法已经成功应用于众多基础行业，但是它们受到重大局限，使其不能为大多数应当获取预测维修效益的组织所用。事实上行业评估表明，到目前为止百分之一至千分之一的用户能够开展状态监测。尽管普遍认知状态监测的益处，但是很少有公司达到了成功实施，为什么？

首先，状态监测成分的多样性使很多人掌握起来很困难，正确选择不同类型的传感器、敷设电缆、数据采集和处理仪器、以及软件从来是复杂和令人生畏的过程，即使只有一个供应商参与。对于多个供应商，这个任务需要的付出水平很少有公司愿意和能够达到。

其次，这种系统的实施远不是直接了当的。在线系统要求传感器安装、常常涉及长距离电缆敷设、以及数据处理系统的复杂集成，即使便携式离线系统一般也需要固定安装许多传感器以取得效果。建立状态监测软件系统也是繁复的工作，它通常需要大量人工输入资产设备、传感器、和数据处理信息，并测取和建立“基线”水平代表被监测设备的正常行为，然后允许对每个测量辛苦地设置报警限。当要求基线和报警限必须对一定范围的转速、负荷或运行工况设定时，这个大量的人工工作过程变得更加繁重 – 大部分安装所遇到的情况确实如此。

第三，即使完成了所有这些任务，系统需要相当多的时间和努力得出结果。从使用者的角度来说要求的输出是相当简单的：明确指示设备的哪些部分有故障，故障的类型，应该采取什么行动，以及行动的日程。然而，获得这些结果需要时间监测上升趋势，用户需做大量的分析和解释，这项工作需要的经验和人工时间对一般维修组织来说通常是不具备的。

系统的成本一般高的不能接受，便携式系统相对便宜，但是使用成本令人望而却步。在线系统避免了离线系统的高人员成本，但是购置和安

装非常昂贵。自动化的“智能”系统寻求减小分析负担，但是一直是极其昂贵的并难以建立起来。

由于存在这些难题，越来越需要简单的、有效的和便宜的状态监测系统，允许广大用户从实施预测维修中受益，并且不牺牲诊断能力。满足这个要求一直是 Artesis 系统研发的基石。

4. 答案

Artesis MCM 的研发满足了市场对提供简单和准确的维修计划日程信息，而不依赖于获得很高等级培训专业人员的状态监测系统的需求。它的目标是安装、设置和操作非常简单，在设备故障被检测到之前几乎不需要用户的参与。

Artesis 方法的优势可以通过比较上述描述的传统技术的三方面的问题体现出来。



图 1. Artesis MCM 单元

首先，Artesis 系统极其容易配置，Artesis MCM 监测器单元（见图 1）分为固定或变速驱动，以及高压或低压型号。对于低压安装，只需要电流互感器或传感器；对于高压系统，需要增加合适的电压互感器。然后通过一个标准的接口将每个单元连接到计算机软件包，一般使用网络或无线装置。

其次，安装时每个 Artesis MCM 单元只需连接到电动机的供电电缆，因此没必要接近被监测

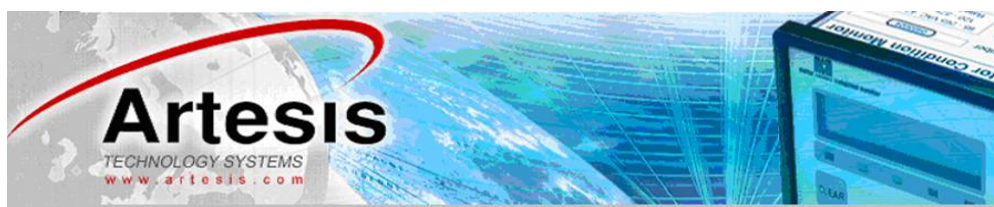
的设备去安装，它们可能位于危险环境或远程位置。其优势在于具有一个在线系统而没有长距离



图 2. MCM 按照于 MCC 控制柜前面板

电缆带来的成本和复杂性。Artesis MCM 单元一般安装在电动机控制中心（见图 2），通过在前面板上开一个方孔安装，然后连接传感器、电源和通讯装置。它也具有继电器输出控制声光报警设备，或对工厂数据采集系统提供简单的输入。一旦 Artesis MCM 单元启动，它只需最小限度的用户组态，然后进入自动“学习”模式，建立起被连接系统的全部正常运行状态。这个过程自动适应系统经历的所有转速和负荷范围，覆盖电动机的电气、机械、和运行特性，连轴器和任何类型的被驱动设备（典型包括泵，风机，压缩机和传送皮带）。几天以后这个过程完成，Artesis 系统对连接的设备创建一个完整的状态评估报告，如图 3，这个报告识别任何现存的机械、电气或运行问题，推荐校正行动和采取行动的日程。不像传统的系统，这些信息即时提供给用户，而无需等待采集和分析长期的数据趋势。从此，Artesis 系统对连接的设备提供自动状态监测。

第三，Artesis 系统在正常运行时几乎是完全自动的，每 90 秒钟它将设备的当前运行状态与在学习模式建立的正常状态相比较，如果检测到故障，在 Artesis MCM 监测器的前面板上指示灯改变颜色，指示故障的类型和严重性。更加详细的信息通过 Artesis MCMSCADA 软件包显示，它提供给用户关于任何发展的故障的简明准确的描述，推荐的维修行动，失效时间，以及广泛的电气特征。如图 4 所示。



MCM/PCM 状态评估报告

公司 : Sinopec Yueyang
协调人 : Tim Chang
设备 : K6101 – 压缩机(492rpm – 50Hz)

分析人 : Gokhan Guven
日期 : 30.06.08

性能摘要

- ☐ Motor and machine status is working as expected.
- ☐ WATCH LINE. Temporary changes in supply voltage cause this alarm. If alarm is persistent check; harmonic levels, capacitor, isolation of cables, motor connector or terminal slackness, contacts of the contactor.
- ☐ WATCH LOAD. If the process is not altered deliberately, check; leakages, valve & vane misadjustments, pressure gauge fault manometer, filters getting dirty (fans, compressors). If the process is altered deliberately, MCM/PCM should be updated.
- ☒ PERFORM MAINTENANCE. There are indications of mechanical and/or electrical developing faults as shown below. Maintenance should be scheduled as per severity level.

严重性

- ☐ Caution ☐ Low ☐ Medium ☐ High ☒ Urgent

能量功效

- ☒ Power factor (CosPhi) is below 0.80.

电流和电压

- ☐ The average RMS value of the current phases exceed 5% of the nominal current values. Monitor for increased hot spot temperature.
- ☐ Voltage variation is beyond normal limits. Its source should be determined and corrected.

电流谐波畸变

- ☐ There is evidence of harmonic distortion. If Total Harmonik Distortion (THD) is more than 10%, this causes heating, and vibration. Increase of third harmonic causes heating in stator winding. If the fifth harmonic increases, this causes vibration. Harmonic filters can be used for very high values if it is proper and economical.

电流和电压不平衡

- ☐ Current unbalance is more than 5%. Motor or machine should be checked and remedied for regards stator, short circuit, isolation, partial discharge etc. faults.
- ☐ Voltage unbalance is more than 5%. Voltage unbalance causes heating by increasing the current unbalance more. It should be checked and remedied.

电气故障指示

- ☐ There is evidence of internal electrical fault. Motor or machine should be checked for rotor, stator, short circuit, isolation, winding slackness etc. faults.
- ☐ There is evidence of external electrical fault. Cables, contactor, compensation system, and motor connection should be
- ☐ Stator, short circuit, slackness, isolation, and partial discharge etc. faults should be checked.
- ☐ Rotor and rotor bars (slackness, crack etc.) should be checked.
- ☐ Indications of static eccentricity exist.

机械故障指示

- ☒ There is evidence of misalignment/unbalance. Motor or machine should be checked for misalignment, unbalance, bearing, coupling, and motor shaft etc. faults.
- ☐ Transmission element; coupling, driven equipment, belt, pulley, gear box, and propeller of fan and pump etc. should be checked.
- ☐ Bearing(s) should be checked.
- ☐ Loose motor foundation and loose motor component should be checked.

气穴指示

- ☐ If the machine is pump, cavitation should be watched.

其它故障

- ☐ There are abnormalities at PSD (Power Spectral Density). The faults should be identified by checking trend of datum, PSD, and MCMSCADA + Diagnostics Help part.

图 3. 学习模式后, 对连接的设备产生的状态评估报告

SL	FAULT STATUS	EQUIPMENT INFORMATION
OK	Loose Components	Nominal Voltage 3464
OK	Loose Foundation / Oil Whirl	Nominal Current 25
OK	Unbalance / Misalignment / Coupling / Bearing	Rotation Speed 1480
OK	Transmission Elements	Equipment Type Pump
OK	Bearing	
OK	Eccentricity	
OK	Rotor	
OK	Stator / Short Circuit	
Low	Internal Electrical Fault	
OK	External Electrical Fault	
OK	Other	
EQUIPMENT STATUS		
	NORMAL	
	WATCH LINE	
	WATCH LOAD	
X	EXAMINE 1	
	EXAMINE 2	
WORK ORDER REQUEST		
1- Check for rotor, stator, short circuit, isolation, winding slackness etc. faults.		Start Date 02/02/2007 18:33:54
2- Current imbalance is more than 5%. Motor or machine should be checked for stator, short circuit, isolation, partial discharge etc. faults.		End Date 02/12/2007 08:44:12
		REPORT LOAD
Low	Abnormalities should be noted and watched. They should be checked for verification and remedy of the problem in one of the scheduled maintenance but within no later than nine (9) months.	PSD HELP CLOSE

图 4. MCMSCADA 软件的诊断画面

这个诊断显示包括系统基于严重性等级的评价推荐的进行维修干预日程，参见表 1，这个推荐基于现场许多相似评价的结果 (6)，代表相似类型设备的平均行为。由于应用于每一个设备的可能的特定条件，这个信息是建议性的，用户当然应当尽快检查异常。

严重性等级 (量级)	行动和日程
OK (1-3)	设备运行正常
低 (3-4)	应当注意、证实并于 9 个月内或下一次计划维修校正故障
中 (4-5)	应当注意、证实并于 6 个月内或下一次计划维修校正故障
高 (5-6)	维修干预应尽快进行，不超过 3 个月
紧急 (>6)	维修干预应尽快进行

表 1. 基于严重性等级推荐的行动日程

Artesis 系统的很多使用者大部分时间离开办公室工作站，在现场工作，为了使他们得到最新的设备状态，当检测到一个新的故障时 MCMSCADA 可以发送电子邮件或 SMS 消息，这些消息包含状态报告摘要，提示用户到 MCMSCADA 上详细检查。MCMSCADA 可以安装在与系统数据库有网络连接的任何计算机上。

尽管 MCMSCADA 在以简明实用的形式提供给使用者行动信息方面表现优异，一些高级使用者可选择利用软件提供的更复杂的显示，例如，趋势图可用于显示故障是如何随时间发展的，功

率谱密度(PSD)显示指示系统利用测量信号的频率分量信息的方式。

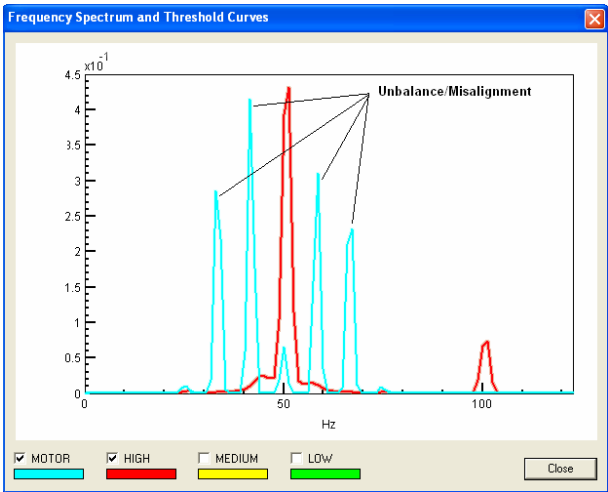


图 5. MCMSCADA 的 PSD 图显示

5. 技术

尽管 Artesis 系统实施和操作简单，其隐含的技术是精密复杂和唯一的，系统将先进的基于模型的故障检测和智能诊断相结合，在最小的用户干预条件下提供优异的结果。

Artesis 方法的基本原理是：建立连接的电动机的数学模型（见图 6），然后将这个模型的动态行为与实际的、测量的动态性为进行比较（见图 7）。这个模型由一组微分方程式组成，描述电动机驱动系统的电气机械行为，全面覆盖机械、电气和运行特征。

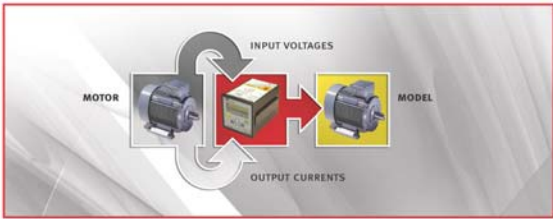


图 6. MCM 在学习模式建立模型

在学习模式 Artesis MCM 从物理设备上采集实时数据，然后利用先进的系统识别算法计算一组模型参数。这个数学模型考虑学习阶段经历的所有转速和载荷变化，而不需要人工设置多元报警限。完成以后这个模型代表被连接设备的正常运行状态，在正常运行时 Artesis MCM 产生一系列新的系统数学模型，通过将这个新模型的参数与参考模型的参数进行比较，可以准确检测和诊

断发展的故障。这个基于模型的方法有效地允许电动机本身作为一个先进的状态监测传感器，并且不会与设备中预先存在的问题相混淆。

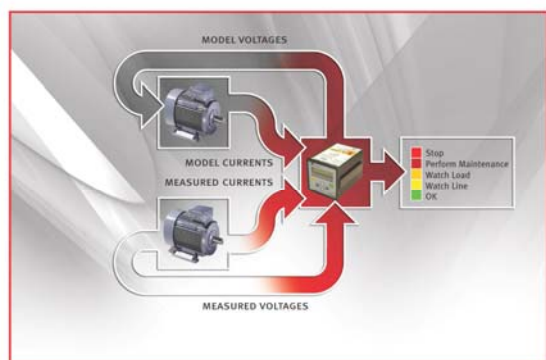


图 7. MCM 将模型的动态行为与实际测量的电动机动态行为进行比较，指示电气、机械和运行故障

Artesis MCM 监测和比较 22 不同的模型参数，它们代表广泛的电气、机械和运行故障。除了识别电源供电的问题，内部电气问题如绝缘击穿也被监测。系统识别的机械故障包括基础和连接松动，不平衡和不对中，轴承劣化。导致载荷或电气特性变化的运行故障也被监测。实践证明基于模型的方法对早期故障非常敏感，但不易产生错误报警。

Artesis MCM 除了具备诊断能力之外，还可以提供给用户广泛的电气参数，包括有功和无功功率，允许系统用于能源消耗评估。总谐波畸变、电源谐波、和电压不平衡等参数也提供有价值的电能质量分析能力。

6. 案例

Artesis MCM 已经成功应用到世界上广泛的行业，这里介绍几个应用案例，以解释系统实际上是如何工作的。

第一个案例，系统应用于汽车零件工厂的压缩机。绘图显示了与轴承问题相关的机械参数的变化，为清楚起见加了注释（见图 8）。重要的是需要知道用户一般不观察这个信息，它是被系统用来提供简明的故障诊断的，因此，对这个案例，我们可以看到在 9 月 13 日第一次警告用户可能存在轴承故障，但是处于相对较低的严重性等级。推荐在 1 月初采取行动，因此 1 月 5 日更换

了轴承，确认了诊断。正是 3 个月的预警区间提供了及时维修干预所需要的内容。实际上，趋势图显示系统已经在产生初始报警一个月之前检测到故障的早期征兆，这表明这个方法既灵敏、又避免过分报警的能力。

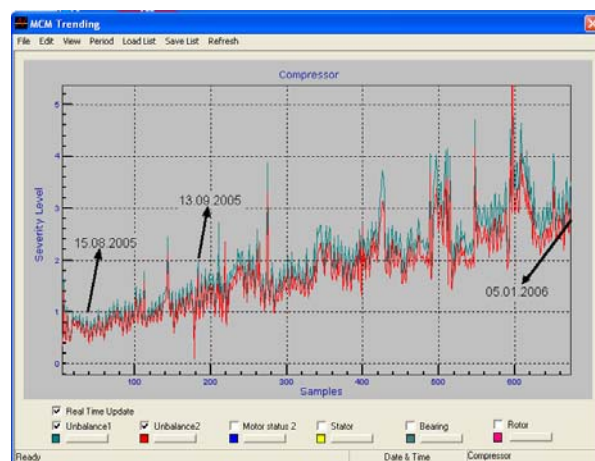


图 8. 一台压缩机轴承故障引起的机械参数趋势

第二个案例说明 Artesis MCM 管理两个同时发展的故障状态的能力。这里系统被用于监测汽车制造厂的冷却塔风机，是为了避免连到这些不可接近的机器的长距离传感器电缆的成本。如图 9，红色趋势线表示 10 月份一个事件之后，其中一台风机的支撑完整性劣化倾向，尽管那时系统推荐用户监控这个状态，直到二月份它才建议维修干预。那时维修人员检查风机，发现了一个螺丝松动并立即校正。在这期间系统也展现了逐步增加的不平衡故障，由蓝色和绿色趋势表示，并且它比支撑问题严重性程度较低，支撑问题解决后，通过清理即很容易解决这个不平衡问题，从而避免了这些问题通常会引起的轴承问题。

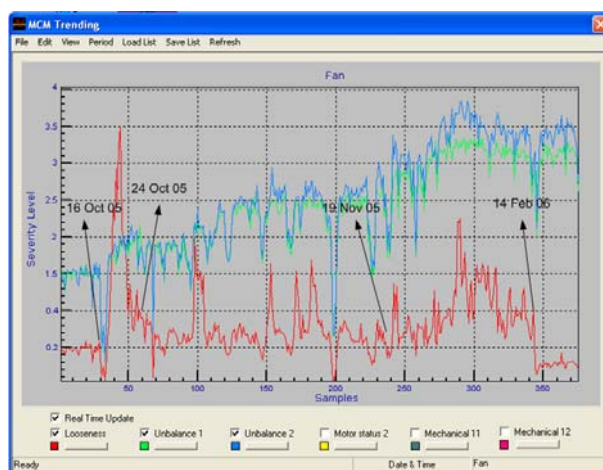


图 9. 趋势（红色）指示冷却塔风机的支撑完整性问题，蓝色和绿色指示转子不平衡

第三个案例证明 Artesis MCM 帮助维修管理人员确认维修干预的有效性。这个案例中系统用于监测石化设施的大型泵 (另一个非常典型的应用), 7 月份例行维修之后, 系统报告非常严重的不对中并推荐立即采取行动。维修管理团队对这个校正行动发了工作单, 本地团队迅速执行。然而, Artesis MCM 提供的分析清楚地表明, 这个维修的精度不足, 因此发出了返工的工作单, 第二次精确的维修干预成功地使设备回到其正常运行状态。如图 10 所示。

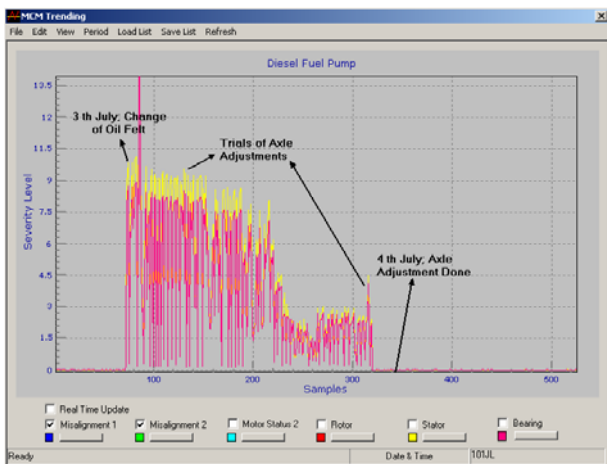


图 10. 反映泵对中状态的趋势图

7. 结束语

在过去的几年里, Artesis MCM 被那些之前晓得预测维修益处、但发现它太复杂和昂贵的许多公司所采用。早期的用户与 Artesis 公司紧密合作完善这个系统, 对于现在高度可靠和强大的解决方案贡献良多。

现在从 Artesis 系统中获益的用户遍及各个行业, 包括公用设施、能源、石化、和制造业。他们将系统成功应用于许多不同类型的设备, 包括所有类型的泵、风机、压缩机、和传送设备, 新的应用也总是出现, 例如自动扶梯和移动走道, 涡轮和柴油发电机组, 以及钻孔系统。很多人以有益的怀疑开始, 这样一个便宜的自动的系统是否能够如对其他用户一样很好地产生效果? 但是, 对于每一次新的实施, 这个方法的有效性就被更广泛的接受。

由于 Artesis 系统容易安装, 避免了接近设备安装和长距离布线, 它被逐步指定为新设备供应

的一部分, 这也导致与设备制造厂商合作开发项目, 将 Artesis 技术嵌入到他们自己的产品中。

参考文献

- [1] A. Duyar and W. C. Merrill, 'Fault Diagnosis For the Space Shuttle Main Engine', *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 15, no. 2, pp. 384-389, 1992.
- [2] A. Duyar, V. Eldem, W. C. Merrill, and T. Guo, 'Fault Detection and Diagnosis in Propulsion Systems: A Fault Parameter Estimation Approach', *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 17, no. 1, pp. 104-108, 1994.
- [3] J. Litt, M. Kurtkaya, and A. Duyar, 'Sensor Fault Detection and Diagnosis of the T700 Turboshift Engine', *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 18, no. 3, pp. 640-642, 1995.
- [4] J. L. Musgrave, T. Guo, E. Wong, and A. Duyar, 'Real-Time Accommodation of Actuator Faults on a Reusable Rocket Engine', *IEEE Trans. Cont. Syst. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 100-109, Jan. 1997.
- [5] Innovation Award for 'Simplifying Predictive Maintenance', The Institute of Engineering and Technology, United Kingdom, Dec 2007.
- [6] Duyar A., 'Time to Failure Assessment of Electric Motor Driven Equipment', Artesis Report 2007-3, May. 2007.

中国联系人: 常英杰

北京普迪美科技有限公司

北京市海淀区大柳树 17 号富海大厦 B 座 1108 室

邮编: 100081

电话: +86-10-62154664, 传真: +86-10-62150234

电子邮箱: timchang@bpdm.com.cn

www.bpdm.com.cn