

MCM: 基于模型的状态监测诊断系统

Dr. Ahmet Duyar, Artesis 土耳其
常英杰, 北京普迪美科技有限公司, 中国

[摘要]

本文介绍电动机状态监测器(MCM), 应用于三相系统的预测维修, 包括电动机、发电机、变压器, 以及它们驱动的机械设备或过程。MCM 只测量电压和电流, 它通过连续监测, 在故障发展的早期阶段, 检测潜在的机械和电气失效, 具有维修日程计划的能力, MCM 同时提供给用户诊断信息。MCM 的首要功能是提供日益恶化的机器和过程状态的早期警告, 预防非计划停机和提供生产率。获得专利的MCM 核心技术来源于十几年的研究成果, 最先应用于美国航天飞机主发动机, 直升飞机发动机和气体透平。MCM 是获得精确维修决策信息的低价格仪器, 可以被非专业和较少专业知识的人员使用, 比振动分析和电流特征分析更容易应用于生产工厂。

1. 引言

在今天竞争的商业环境和低利润空间条件下, 企业面临增加生产和减少维修成本的压力。工厂过程和机械意外停机是不受欢迎的, 当这些过程非常关键时, 意外停机可能导致生产损失和昂贵的维修。状态监测用于获得对潜在设备故障的早期警告, 防止高代价的停机和过程设备的损坏, 状态监测的基本概念是分析设备上获得的数据特征, 有足够的时间使故障和非计划生产停顿最小化。当前越来越广泛的趋势是具有预测维修能力的连续状态监测集成到工厂自动化系统中。

有两个主要的状态监测领域 - 振动和腐蚀, 振动分析占很大的比重 (85%)。其它技术包括红外热成像(IR)检测轴承和轴的温度变化; 机器的磨粒分析或润滑油分析; 轴承磨损超声波分析; 等等。状态监测的主要应用对象是电动机和电动机驱动系统例如泵、压缩机、风机、压延等, 这些设备在工业现场普遍存在, 电动机功率从几瓦至几千千瓦。振动分析需要在电动机上安装传感器, 使用一个外部数据采集和分析仪器, 一般是一个PC或手持式仪器, 测量振动能量频谱。加速度、速度和位移是振动分析最常测量的量, 基本原理是系统中的机械故障发展表现为特定频率范围的振动能量的变化, 一个受过培训的工程师可以从仪器的输出检测这些变化。一般情况下, 在一段时间内(通常一年或更长)周期性采集的数据用于绘图观察可能故障的趋势指示。振动状态分析可能非常昂贵, 很难使用, 结果难以解释, 原因如下:

- 成本: 传感器和相关电子是昂贵的。
- 安装: 加速度传感器在电动机上的安装位置必须认真选择, 以便获得最大灵敏度。另外在难以接近的位置安装传感器是一个问题。
- 易用性: 数据采集和分析是费时的, 对数据的解释需要专业技能和培训
- 重复性: 用于振动分析采集的数据不是可重复的, 另外背景振动可能干扰测量信号
- 全面覆盖: 振动分析对检测机械故障是有效的, 但是不适用于大部分电气故障

- 早期报警：使用的阈值受设备的运行状态影响，因此，连续振动监测系统使用较高的阈值可能减少报警时间
- 集成到工厂自动化系统：大量的振动系统是便携式的，不能集成到工厂自动化系统中。

振动分析是工业中应用的传统技术，它是高价的，有名的难以使用，在采集数据和解释结果中都需要专家，而工厂需求的是低价的、易于使用的状态监测技术和产品，可以集成到工厂自动化系统，具有维修计划能力。

电流特征分析可以克服振动系统的部分缺点，这个方法从电动机的电流中提取信息，定子间的气隙变化通过气隙磁通影响到电动机的电流，从而电流携带与机械和电气故障有关信息。因此故障表现在电流频谱特定频率上的变化。

由于只采集电流，电流特征分析的数据采集是简单的，它也提供全面覆盖，可检测机械和电气故障。然而对数据的解释需要专业人员并且费时，正如振动分析那样。电流特征分析同样也是对输出的评价，它分析受电压影响的电流数据，因此区分一个异常特征是由于电动机的问题还是由于电压中意外谐波引起的是很困难的。

基于模型的技术消除了振动和电流特征分析系统的缺点，它所遵循的基本原理与振动和电流特征分析有着根本的不同。**MCM** 利用基于模型的故障检测和诊断技术，确定三相系统在变化条件（如负荷）下的预期动态行为，并与测量的动态行为相比较来监测异常状态。**MCM** 首先通过采集和处理实时数据学习被监测系统一段时间，利用系统识别的方法来处理数据，计算出预期动态行为和模型参数。系统参数的变化将指示系统的异常状态发生，对这些参数的进一步处理将用于诊断。

与传统的振动和电流特征分析相反，这个方法利用原因-结果（输入-输出）关系，因此不受环境噪声或输入噪声影响。另外，预期的和实际的行为差别过滤出和增强的仅仅是系统产生的异常，提供更早期和准确地报警。**MCM**的专家系统方法不需要数据库或历史数据，不需要专家人员以及耗时的数据采集和分析，它提供全面的（机械和电气以及被驱动系统）故障覆盖，尽管它只测量电压和电流。

MCM 将设备的电动机部分作为一个传感器，因此设备系统中影响电动机或三相系统的任何故障，也会被 **MCM** 检测到。

MCM 解决了基于振动和电流分析的系统引起的诸多缺点：

- 成本：**MCM** 及其附件是便宜的
- 易安装：工业标准的电流和电压互感器可用作传感器，这些传感器是便宜的，易于安装，并且电气维护人员非常熟悉它们。**MCM** 可用于任何由电动机驱动的系统，

由于传感器和主机单元通常安装在控制柜，MCM不需要接近被监测的系统。

- 易于使用：专家系统的方法使得 MCM 可以自动建立一个模型数据库，并监测模型参数的变化。故障的严重程度由仪器给出简单直接的结论，因此它不需要培训和专业工程师的专家知识。
- 重复性：MCM 数据是高度可重复的，没有外界或背景影响能干扰MCM对系统的监测能力。
- 全面的故障覆盖：使用一台仪器就可以监测电气和机械故障。
- 提前报警：由于采用专家系统的方法，门限值不受系统运行状态的影响。因此 MCM 提供早期和准确的报警。
- 集成到工厂自动化系统：MCM 单元很容易通过标准网络电缆连接到外部采集系统进行连续监测，结合其简单的故障指示方法，使得 MCM 成为一个理想的工厂自动化系统单元。

因此，MCM 将成为电动机和三相系统在线状态监测的理想选择。MCM 与振动和电流特征分析的比较如表1中所示。

特 性	MCM	电流特征分析	便携式振动分析系统	在线振动分析系统
便宜的？	是	否	是	否
容易安装/采集数据？	是	是	否	否
容易使用？	是	否	否	是
可用被非专业人员使用？	是	否	否	是
全面故障覆盖，机械和电气？	是	是	否	否
较低的阈值/提前报警？	是	是	是	否
维修计划能力？	是	否	否	是
工厂自动化系统集成？	是	否	否	是

除了维修计划之外，MCM 还提供诊断信息，很多情况下MCM 提供的信息可用于矫正存在的问题。然而，对多重故障或不同种类的驱动配置情况，不同类型的故障可能表现为相似的特征，在这些情形下，需要结合其它信号（如转速、扭矩、振动等）进行分析诊断。

2. 电动机和三相系统驱动的设备的过程之监测

MCM 满足了工厂对一种状态监测产品的需要，它提供简单和准确的维修日程计划信息，而不需要由高级技术人员提供解释。这项用于探测即将发生的机械和电气故障的技术是一个被验证的专利技术，已经应用在航天和航空领域，曾被控制工程杂志评为2000年40个最好的产品之一并获奖。下面描述MCM 运行用一个基于电动机的系统。

MCM 利用基于模型的故障检测和诊断技术，这个方法的主要原理，如图1 所示，是将机械或过程的数学模型的动态行为与测量的动态行为相比较。

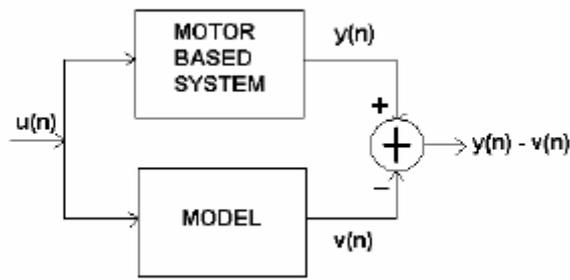


图 1 数学模型与实际系统的比较

图1中， $u(n)$ 是对数学模型和实际基于电动机的系统的输入电压，它是测量的电压。 $y(n)$ 对应基于电动机的系统的输出，它对应测量的电流。 $v(n)$ 是由模型计算出的电流。 $y(n)-v(n)$ 是测量的和计算出的电流的差。模型由一组微分方程式组成，描述电动机的电动机机械行为。从系统中采集的实时数据用系统识别算法进行处理，计算模型参数。驱动机械或过程的电动机被当作一个传感器，电动机以及基于电动机的系统发生的故障，或影响系统运行的异常状态，也影响模型参数。

MCM 首先通过采集和处理电动机数据对系统学习一段时间，处理数据的结果被存储在数据库中，建立一个参考模型，这个参考模型基本上由模型参数、它们的均值及其标准方差组成。当进行正常监测时，MCM 处理采集的电动机数据并将结果与存储在内部数据库中的数据比较，如果从采集的数据得到的结果与参考模型差别较大，MCM 指示一个故障等级。等级是由差别的幅值和持续时间确定的。

MCM 监测和比较 22 个不同的模型参数，这些参数分为三组，第一组中有8个参数，叫做电气参数；它们是等效网络参数，与电动机的物理参数有关，如电感、电阻，等；它们对电动机的电气故障敏感。MCM 监测和分析任何时刻的模型参数与在学习阶段获得的相同参数的均值之间的差别，这些差别按照学习阶段获得的标准方差进行归一化，因此，评价数值指示其偏离学习阶段获得的均值的标准方差数，如果超过门限值，就产生报警。将数值的变化追溯到系统中发生的故障，例如绕线的绝缘问题将影响与电阻有关的参数，它们的变化允许 MCM 早期检测到绝缘问题。尽管最先主要用于检测电气问题，它们也可以指示机械问题，例如，一个不平衡或齿轮问题可能引起气隙动态偏心，这个偏心将导致电感参数因而模型参数的变化，通过监测这些模型参数的变化，可以早期检测到不平衡。这个不平衡最终影响轴承并将最终损坏轴承，因此早期检测到它可防止进一步损坏。

电气参数被进一步分为两组，电器参数1-4指示与电动机转子、定子、绕组等有关的问题，而参数5-8指示电源供电问题如电压不平衡、电缆的绝缘问题、电容、电动机连接器、端子松动、有缺陷的接触器等等。

第二组参数对机械故障敏感，如负荷不平衡、不对中、联轴器和轴承问题，被称为机械

参数1-12，这些参数从电气信号的频谱中获得，类似电流特征分析。然而，MCM 利用从模型的预期电流与实际测量电流的差获得的频谱进行分析，这些差值只含有电动机的异常状态因素。因此，它们不受电源电压中存在的噪声或谐波影响。机械参数对应12个从频谱中获得的最大值，这些参数也被用作诊断目的。与振动和电流分析技术类似，其发生的频率指示故障类型，例如不平衡、基础松动、油膜震荡、风机叶片、轴承内圈或外圈等等，这些参数及其频率用于趋势和诊断目的。

第三组参数对系统行为的变化敏感，叫做匹配参数，有两个参数，它们是实际电流（d相和q相）与模型计算电流之间的偏差。如果这些参数超过阈值，系统被确定以与学习阶段不同的方式运行，从而指示系统中故障在发展。

除了上述参数外，MCM 还监测供电电压及负荷状态，如果电压不正常改变，不平衡或非常高的谐波成分，它将发出一个 Watch Line 报警。同样，如果负荷状态与学习阶段获得的状态不匹配，它将发出一个 Watch Load 报警。Watch load 报警意味着负荷状态有变化，或者系统中有故障发生，如果确定生产过程中有变化，可以通过给 MCM一个更新命令将这个新的负荷状态学习增加基准模型库中。

使用测量的三相电压和电流信号，还计算一组电气参数如三相电压和电流的 rms-值，功率因数等，这组参数也包括总谐波畸变，输入信号的谐波成分，和电压不平衡，它们给出供电电源质量的数据，有功功率和无功功率可用于能量消耗估算。因此，在一个仪器中给出了生产和维修人员感兴趣的多个物理参数



图 2 MCM: 电动机状态监测器

MCM 适用于安装在电动机控制面板上（图2），选择的电气量可在仪器的 LCD 屏幕显示，基于电动机的系统的状态即可显示于 LCD 也显示于仪器前面板 LED。

3. MCMSCADA : MCM 的图形用户界面

仪器可以利用 Modbus 通讯协议集成到工厂自动化和维修管理系统，也可以将 MCM 与其配套的 PC 应用程序 MCMSCADA 一起使用进行趋势分析和诊断，MCMSCADA 还提供给用户报告，综述故障状态，诊断，以及在选择时间内的有关运行的参数。除了趋势，MCMSCADA 还得到机械参数的频率并确定对应的故障，例如轴承、不平衡、松动、等等并

呈现给用户。也提供电能监测 (电压, 电流, 有功功率, 无功功率和功率因数) 以及电源质量监测(THD, 谐波, 电压不平衡和电流不平衡), 如图 4 所示。MCM 可以在报警产生时通过 e-mail 按一定的时间间隔自动发送这个报告。可以从远程几个不同的计算机监测工厂中基于电动机的机器、设备和过程的利用, 状态和参数。

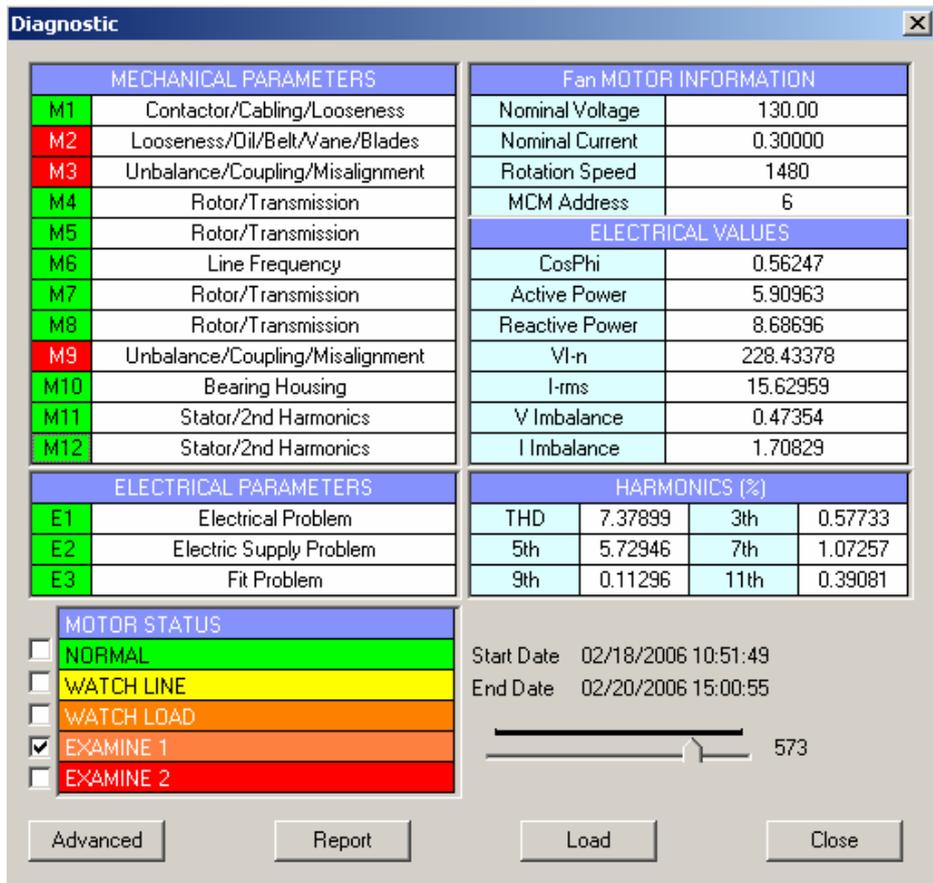
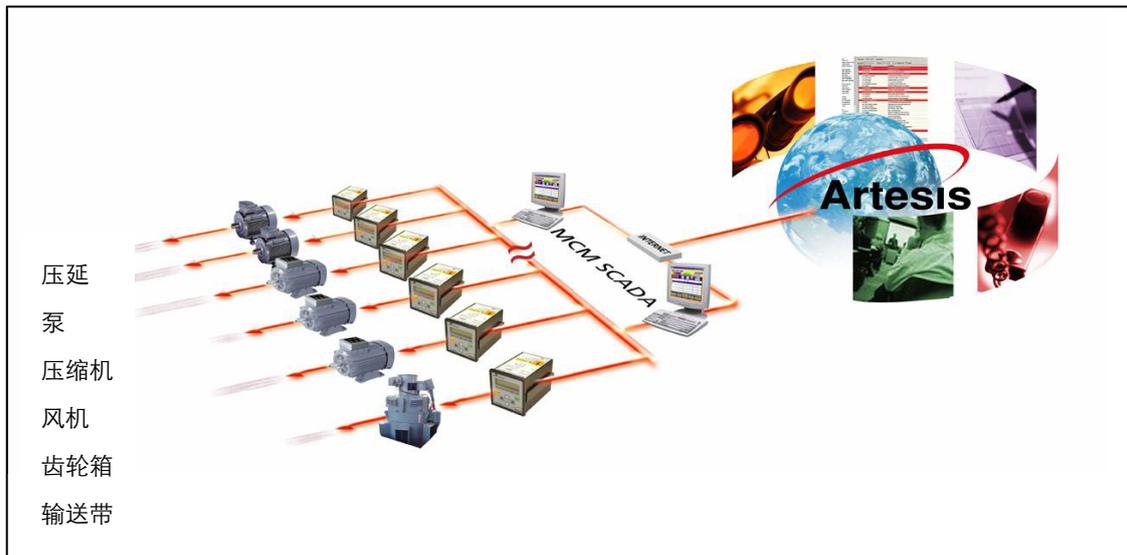


图 4 MCM SCADA 诊断和报告



4. MCM 的应用案例

MCM 在不同的工业领域有许多成功的应用，下面列举 MCM 的四个应用。

第一个案例是电池制造厂的压缩机，MCM 在 2005 年 9 月 13 日开始给出断断续续的报警，到 2006 年 1 月报警继续增加频度和持续时间，如图 6 所示。机械参数 10 和 11 随时间持续增加，MCMSCADA 包含 2005 年 12 月 12 日至 2006 年 1 月 6 日的诊断报告表明，这些机械参数对应轴承座故障的频率，随后的维修和修理由验证了的诊断评价。

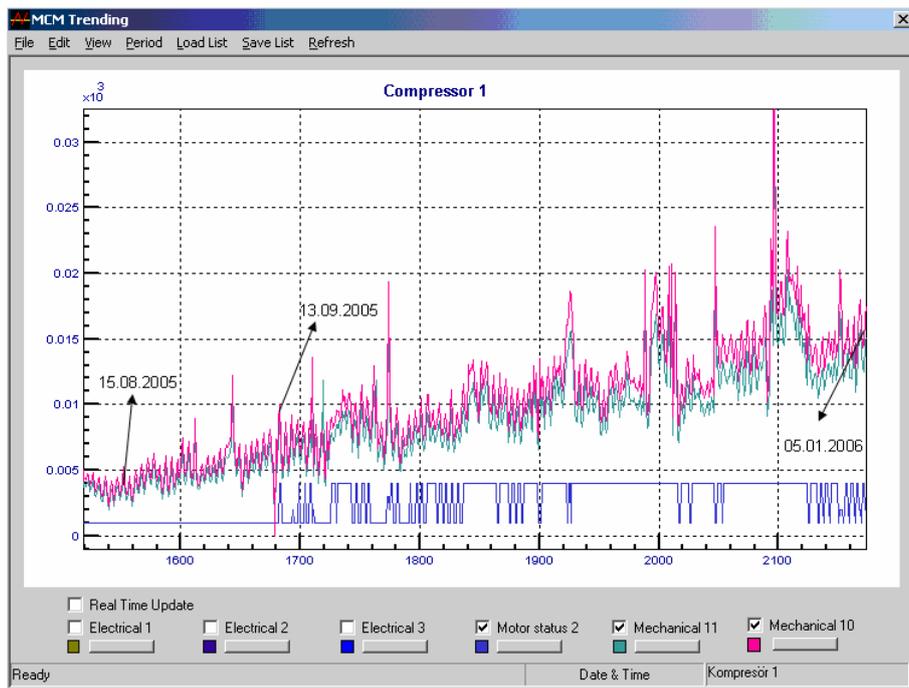


图 6 机械参数 10, 11 和电动机故障状态趋势图

图.6 的趋势表明参数开始增加的时间甚至更早，但直到 9 月 13 日没有达到阈值水平，这也证明了 MCM 在非常早的阶段就可指示发生的故障，因此，利用 MCMSCADA 的连续监测和趋势能力，可以很早检测到故障，并且可以在适当的时间计划维修日程，防止对设备的进一步损坏和非计划停机。

下一个案例是示范 MCM 检测到某汽车制造厂一个喷淋泵的接手故障，这里监测喷淋泵的 MCM 给出一个“Perform Maintenance”报警等级，检查 MCMSCADA 参数发现对应不平衡/接手机械参数 2, 5 正在增加，如图 7 所示，表明已经发生机械故障。监测喷淋泵的 MCM 给出 Perform Maintenance 报警，报警与电动机无关，而是与电动机和被驱动设备的之间的接手有关。应当注意图 7 中电流没有明显的变化，但 MCM 只是利用电流和电压测量，就检测到发生的机械故障，不仅在电动机，而且在接手和电动机驱动的设备。

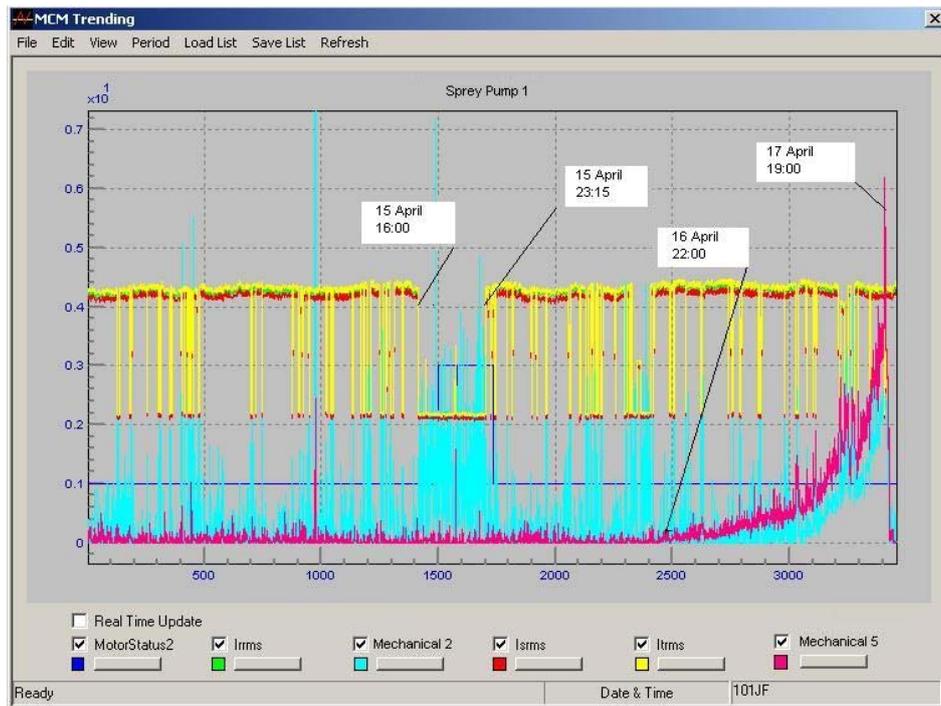


图 7 喷淋泵的机械参数 2, 5 趋势图

第三个例子是用在德国农场的的一个发电机 (720 A, 380 V, 1500 RPM) , 如图 8 所示。这个发电机已经有一个对潜在故障预警的监测系统, 除了现有监测系统外, 也安装了 MCM 用于实验目的。这里当学习阶段完成不久, MCM 给出报警, 首先在二级 (load change) 后来在四级水平 (examine), 图 9 和 10 表明机械和电气参数都有变化。然而这时, 原有发电机的监测系统没有给出任何报警, 因此用户继续运转这个发电机。继续运行导致了发电机故障, 利用 MCMSCADA 检查诊断报告指示如下可能故障之一: 偏心/不平衡/接手/齿轮箱。检查表明是不平衡引起了报警, 不平衡最终引起转子接触定子, 导致多重故障, 既有不平衡也有电气故障。业主现在用 150 万欧元更换了这台发电机。

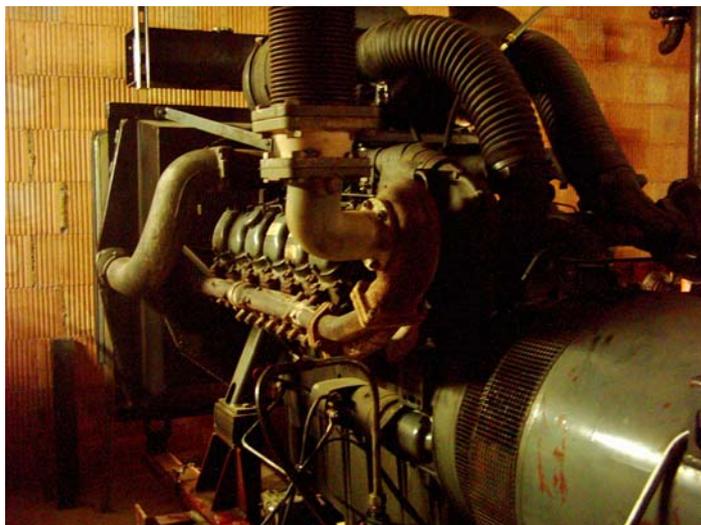


图 8 , 350 kW 发电机



图 9 发电机的机械参数趋势图

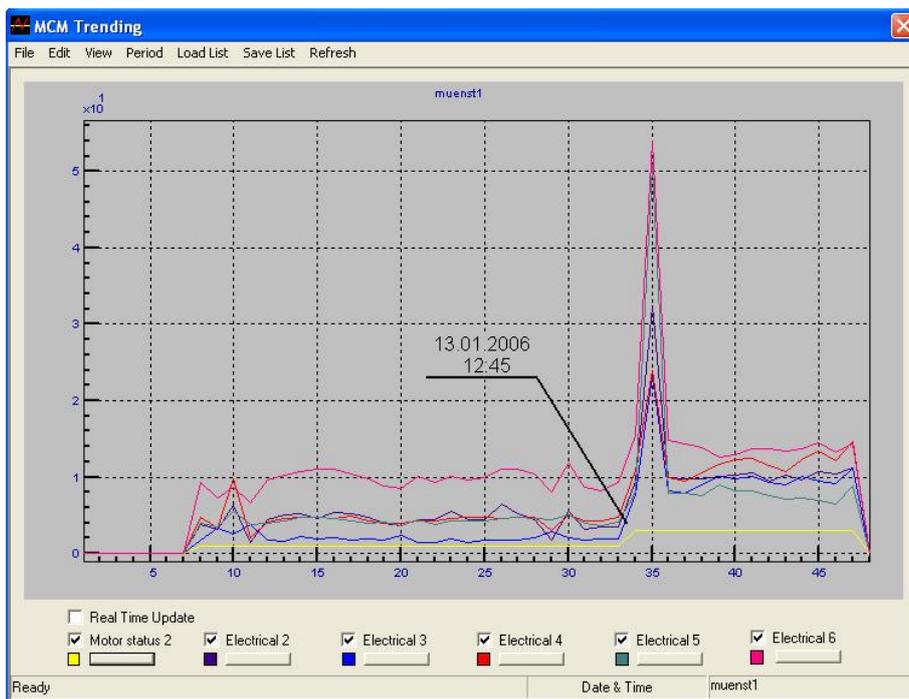


图 10 发电机的电气参数趋势图

第四个案例说明绝缘故障，MCM 仪器用于监测一个砂冷却过滤器电动机，从 2004 年 10 月 7 日起随着电流和功率的减小，电气参数逐渐增加，如图 11 所示。仪器开始给出间断的‘Load Change’报警，随着电气参数的增加，11 月 ‘Load Change’报警变得更加频繁。三相电流中的一相相对其它二相的增加是绝缘问题的指示。12 月 5 日对电动机进行修理。

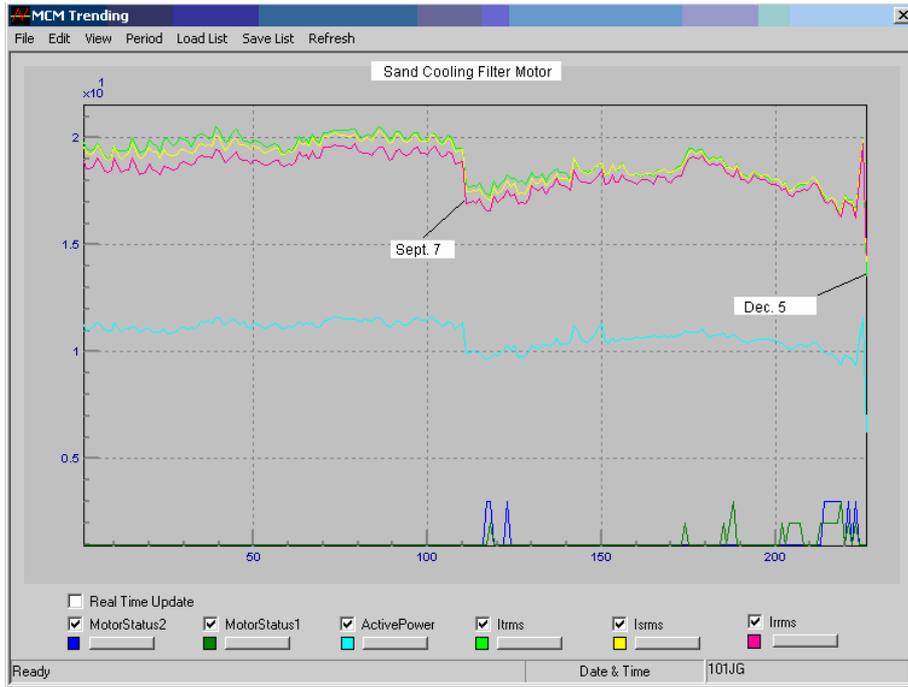


图 11 电流，功率和电动机状态趋势

图 12 说明故障发展过程中电气和适用参数的增加，这个案例表明 MCM 的早期报警能力，仪器可以在进行实际维修约两个月之前指示绝缘劣化。

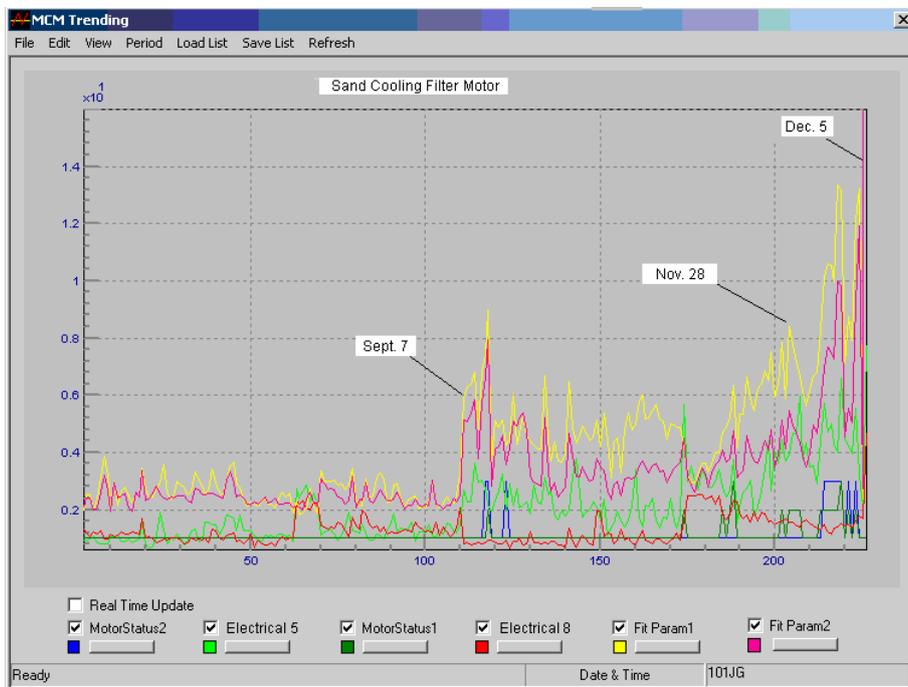


图 12 电气和适用参数的趋势图