测试系统构建基础知识

系统维护

目录

引言

概念和定义

可维护性设计

维护策略

附录：维护成本

引言

理想的系统永远不会出现故障。安装系统、打开系统，然后运行系统，之后就不需要去管它们，直到10年、15年或20年或更长时间后淘汰系统。 不幸的是现实并非如此，或者说至少还没有实现。 系统故障和突发的意外故障可能会带来高额的损失。 即使有最周全的计划，我们也不能完全消除故障的风险，但我们可以减少这些风险。 维护策略可以帮助您管理此成本并降低故障风险。

维护计划对于确保自动测试设备(ATE)系统在整个生命周期内具有最低总体拥有成本至关重要。 具有可维护性的系统与完善的维护计划相结合，有助于：

- 通过维护功能和延长使用寿命来最大化资本投资收益
- 通过管理物流、计划表和备件库存来最大限度地减少停机成本

任何维护计划的目标都是保持系统尽可能长时间地正常工作，而且在系统停机时尽快使其恢复正常工作。 另外，还要以尽可能低的成本达到这一目的。

概念和定义

维护是执行服务来维持系统正常运行并在系统故障时维修系统的活动。 维护分为三个方面：预测性维护、预防性维护和纠正性维护。

可维护性是指进行维护的容易性。 一些行业将其称为可服务性。 可维护性越高，控制维护成本就越容易。

预测性维护通过状态监测在系统故障发生之前进行检测，在工业中称为基于状态的维护。当预测到潜在故障时，就会安排维护活动来对系统进行维护。这些活动可以延长系统使用寿命，并避免意外停机。只有在检测到维护需要时，预测性维护活动才会开展，有计划地安排停机，这通常比计划外停机的成本低。计划内停机成本可以分摊到接受维护的许多其他系统。目标是在故障发生前尽可能长时间地使用系统/组件，从而最大限度地提高资本投资收益，并尽可能减少意外停机成本。随着物联网以令人难以置信的步伐前进，智能机器的概念已经深入人心，智能机器可以自我监控，并在需要维护时与其他机器组成的网络进行通信。传感器、嵌入式控制器、FPGA、网络和大模拟数据分析等领域的技术进步使得预测性维护更加容易，并且比以往更具成本效益。预测性维护的衡量指标是停机时间；这个时间称为平均预测维护时间(MPDMT)。

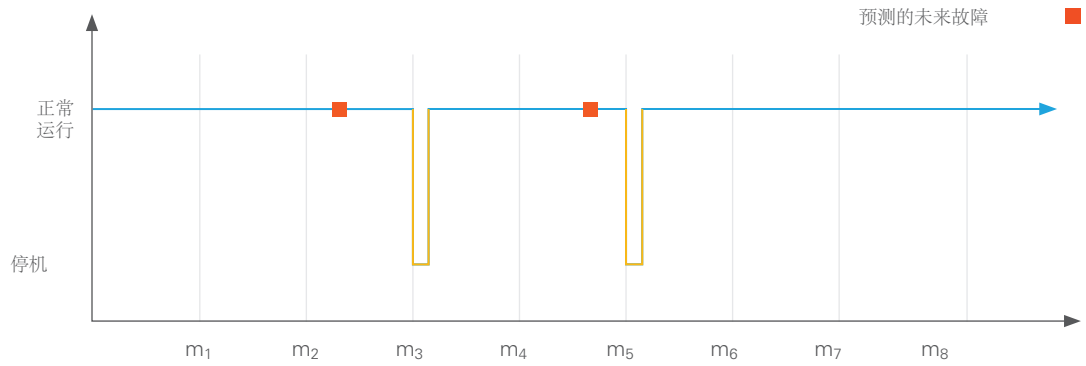


图1.查看预测性维护的正常运行时间和停机时间随时间的变化。预测性维护可最大限度地利用您的资本投资，并通过降低停机频率以及将昂贵的计划外停机时间转换为传播较低的计划内停机时间，从而最大限度地减少停机成本，但需要故障监测设备和预测软件。

预测性维护活动包括：

- **状态监测** —这可确保系统正常运行、检测故障的发生，并识别可能导致系统故障的组件隐患或性能退化。基于经济高效的嵌入式微处理器和FPGA技术，内置自检和状态监测技术已经得到广泛应用。 这有时被称为预测和健康管理(PHM)或系统健康监测。 该概念是指检测系统中的性能变化和隐藏故障，防止出现更严重的系统故障。

  今天，大多数汽车都配有发动机自动健康监测系统，用于检测问题并及时闪烁发动机检查灯，让发动机在永久损坏之前得到维修。测试系统可以监测温度、风扇速度、内存使用、测试时间、测量准确度、继电器操作计数等。

- **维修系统组件** — 这有助于减缓磨损并延长系统的使用寿命。

  一些汽车轮胎会配有检查空气压力的传感器。不正确的气压会缩短轮胎的使用寿命，影响油耗性能。如果测试系统在灰尘较多的环境中使用，则可能需要清洁空气过滤器和外壳内部的灰尘，以免其过热，导致电子设备的使用寿命缩短。监测系统的内部温度或气流可以帮助您了解何时可能需要清洁灰尘过滤器。

- **更换系统组件** - 在组件故障之前更换组件，以避免意外停机。

  测试系统可以使用继电器来开关信号，以测试待测设备(DUT)。 取决于所切换的电负载，继电器仅可持续预计的操作次数。 因此，监测操作次数并在继电器故障之前更换继电器模块通常比等到发生故障并出现计划外停机再采取措施更具成本效益。

- **校准以补偿漂移** - 测量系统的目的是提供可信的测量数据。 如果测量数据不可信，则系统处于不正常运行状态。

  大多数测试系统的电子器件需要以一定时间间隔进行校准。 但是，如果使用的是尖端技术，可能我们还不能很好地把握校准间隔。 因此，可通过监测测量漂移来了解何时适合需要安排校准维护。

- **验证**- 这可确保系统在重新联机之前正常工作。 如果在故障情况下联机，只会增加停机时间。

- **系统重新联机** - 必须始终考虑这一点，因为对于某些应用，这不是一个简单的任务。

  例如，如果测试是制造过程的一部分，则让系统重新联机可能需要停止生产线并且使测试装置与生产流程重新同步。

预防性维护是维护系统以防止系统故障和延长使用寿命的活动。 预防性维护活动通常需要进行安排，并导致计划内停机。 计划内停机成本可以在接受预防性维护的许多其他系统中共享。 目标是最大限度地减少意外停机成本。 预防性维护的措施是发生的停机时间; 这一时间称为平均预防保持时间（MPMT）。

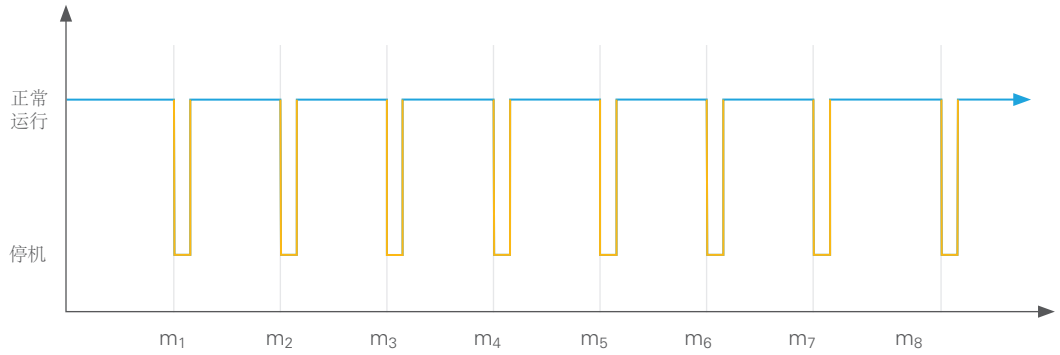


图2.预防性维护并不能总是最大限度地利用您的资本投资，但通过避免昂贵的计划外停机时间来最大限度地减少停机成本。

预防性维护活动包括：

- **维修系统组件** - 这有助于减缓磨损并延长系统的使用寿命。

  这就是为什么汽车机油需要定期更换的原因。 测试系统上运行的复杂软件程序可能存在最终导致系统故障的潜在资源泄漏和/或故障。 简单的系统重启可以将软件刷新到新状态。 如果测试系统在灰尘较多的环境中使用，则可能需要清洁空气过滤器和外壳内部的灰尘，以免其过热，导致电子设备的使用寿命缩短。 如果不能监测温度和/或气流，则可能需要安排定期维护。

- **更换系统组件** - 在组件故障之前更换组件，以避免意外停机。

  汽车上的轮胎或刹车片在汽车行驶一定里程后需要更换，以避免出现故障，导致事故发生或停在半路。 测试系统可能配有测试该设备的连接器引脚，可能在100,000次连接之后磨损。 如果每小时测试50个设备，则连接器应该在磨损发生故障之前持续工作大约2,000个小时或83天。 预防性维护应该每隔约80天安排一次，更换连接器。 在发生故障之前更换通常比等到故障发生并出现计划外停机再采取措施更具成本效益。

- **校准以补偿漂移** - 测量系统的目的是提供可靠的测量数据。 如果测量数据不可靠，则系统处于不正常运行状态。

  大多数测试系统的电子器件需要以一定时间间隔进行校准。

- **验证**- 这可确保系统在重新联机之前正常工作。 如果在故障情况下联机，只会增加停机时间。

- **系统重新联机** - 必须始终考虑这一点，因为对于某些应用，这不是一个简单的任务。

  例如，如果测试是制造过程的一部分，则让系统重新联机可能需要停止生产线并且使测试装置与生产流程重新同步。

纠正性维护是修复故障系统以让其恢复到工作状态的活动。 纠正性维护活动通常不会事先安排，因而 会导致计划外停机。目标是在故障发生前尽可能长时间地使用系统/组件，从而最大限度地提高资本投资收益，并在故障发生之后尽可能减少意外停机成本。纠正性维护的衡量指标是发生故障后的停机时间；这个时间称为平均预测维护时间(MPDMT)。

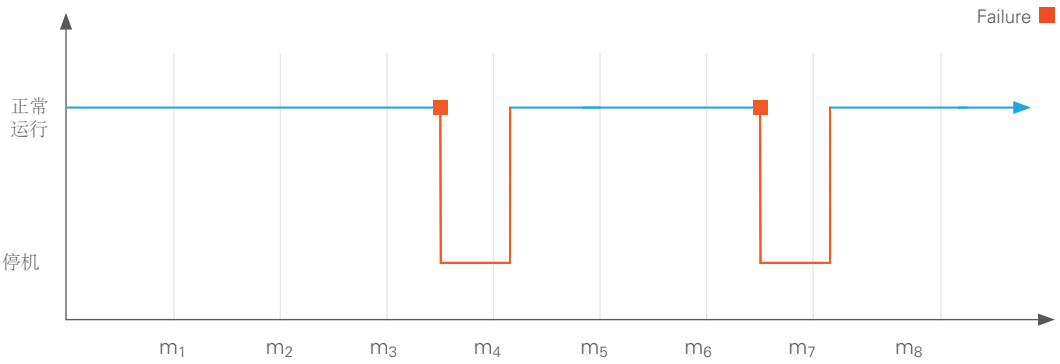


图3.查看纠正性维护的正常运行时间和停机时间随时间的变化。 纠正性维护可最大限度地利用您的资本投资，但不会将停机成本最小化，因为它是计划外的。 您可以采取措施将计划外停机时间或MTTR的持续时间最小化。

纠正性维护活动包括：

- **检测** - 尽可能快地检测系统故障，最小化昂贵的计划外停机时间，并且尽可能防止对系统中的其它组件和/或同一流程中使用的其他系统的损坏。

  汽车中的压力传感器可以尽快检测到油压下降，向驾驶员发出警告并防止对发动机的永久损坏。 如果油泵出现故障或油位由于泄漏而变得很低， 修理油泵或将泄漏处密封然后加油要比购买新的发动机要便宜得多。 对于ATE系统，电子元件可能会故障，从而影响关键测量并导致测试结果不正确。 如果故障需要时间来检测，则公司可能在不知情的情况下将不合格产品提供给客户，或者如果冷却风扇故障，机箱温度可能升高到会损坏部分电子设备的水平。

- **诊断和隔离** - 在检测到故障后进行正确诊断和故障隔离可以帮助操作人员和维护人员快速找到并维修正确的组件，从而最大限度地减少意外停机时间并节省成本。

  汽车机械系统拥有复杂的诊断设备来有效且高效地诊断问题。 这通过降低修理或更换故障部件的风险来节省时间和金钱。 对于复杂的ATE系统也是如此，如果没有适当的诊断工具，光是诊断问题，就可能花费几小时甚至几天。

- **维修** - 通过维修或更换发生故障的组件来修复系统。 计划外停机时间很大程度上受到备件可用性的影响。 取决于应用、环境和人员的技能水平，就近提供备用系统或备用部件可能不一定具有成本效益或切实可行。

  大多数人不会在没有备胎的情况下开车穿越全国，但很可能他们只需要开车去几个城市街区。

  备件战略对于控制成本至关重要。需要考虑以下问题：备件是否应存放在现场或附近的服务中心？如果要求供应商提前从工厂发出替换件，是否需要支付费用，或者只能等到设备故障再返给供应商维修？答案取决于计划外停机的成本。组件的数量、组件的平均故障间隔时间（MTBF）和补充备件所需的时间决定了所需备件的数量。一些公司提供不同级别的备件服务来帮助评估所需备件的数量、物流和备件管理成本。

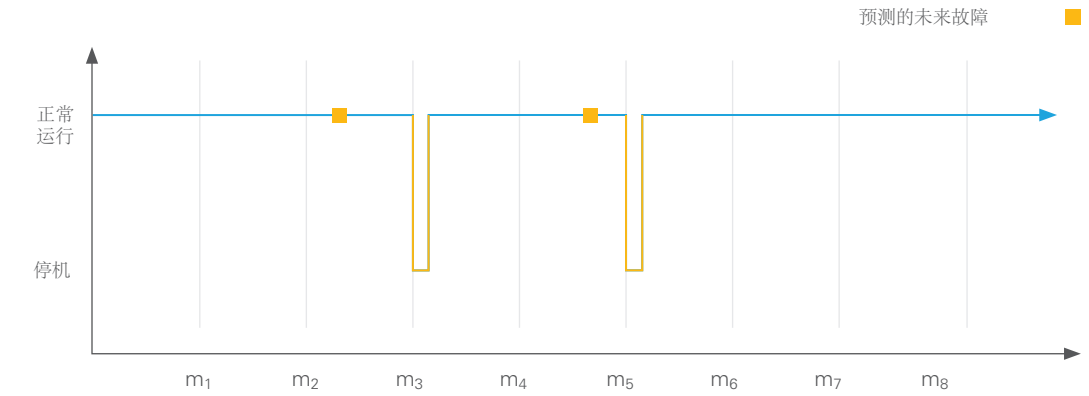
- **验证** - 这可确保系统在重新联机之前正常工作。 如果没有此步骤，系统可能仍然不正确运行，只会导致更多的计划外停机。

  这就好比汽车的刹车修好了之后，直接在高速公路上高速驾驶汽车，而没有先测试和验证刹车是否能够正常工作。

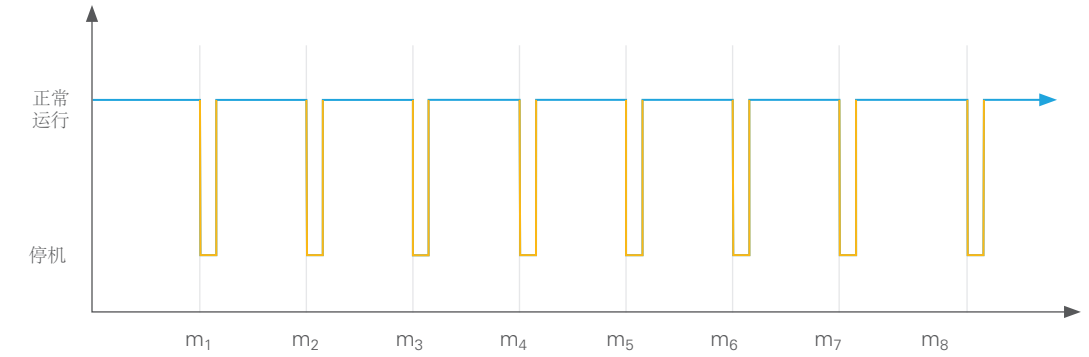
- **系统重新联机** - 必须始终考虑这一点，因为对于某些应用，这不是一个简单的任务。

  例如，如果测试是制造过程的一部分，则让系统重新联机可能需要停止生产线并且使测试装置与生产流程重新同步。

预测性



预防性



纠正性

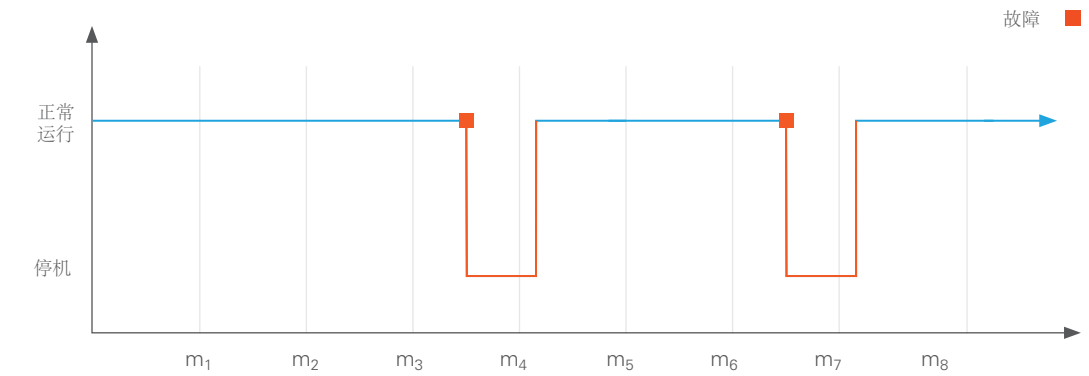


图4. 对比一下正常运行时间和停机时间，可以看出计划外停机的成本通常比计划内停机时间要高得多。

可维护性设计

系统的设计极大地影响了部署有效、高质量和可控维护计划的能力。 在设计高维护性的自动化测试系统时，建议考虑以下最佳实践和指南。

自检和监测

自检和监测对于减少计划内和计划外停机非常重要。 从头开始设计自检和监测功能对于实现高效、有效的健康监测、故障检测、故障诊断和隔离以及系统验证至关重要。

模块化设计

模块化设计可简化维护、更换、维修和校准系统组件相关的活动，减少相关的时间，同时还优化系统诊断和故障隔离，并在计划外停机期间节省宝贵的时间。 此外，模块化设计还可降低与备件相关的成本。您无需在库存中备用几台完整的系统，只需备用一些组件、子系统或模块。 组件通常具有不同的故障率 - 故障率较低的组件需要较少的备件，而故障率较高的组件需要较多的备件。

标准化

标准化可以大大降低成本，因为它简化了物流，减少了备件数量、所需的维护工具和设备数量以及培训成本。

例如，一些航空公司使用了10种甚至更多类型的飞机。然而，西南航空公司只使用一种飞机——波音737。这有助于成本节省。机械师只需针对一种类型的飞机进行培训，而且库存 也只需准备一种飞机的备件。他们可以在最后一刻换出飞机进行维修。机队的飞机是完全可互换的。所有飞行员和地勤人员都非常熟悉这种飞机。而且，在飞机的存放方式和存放位置方面完全没有任何挑战，因为所有飞机都具有相同的形状和尺寸。

标准化极大地简化了控制维护过程。良好控制的过程是可重复且可预测的，因此我们设计的系统必须采用一种统一的方式来完成各种维护任务。如果西南航空公司的维修人员使用不同的工具以及进行不同的维护任务，则每个维修人员所交付的成果质量各不相同，完成任务所花费的时间也各不相同，这使得维护成本难以控制和管理。

简易性

保持操作和维护尽可能简单。 换句话说，让正确的事情简单做。 这减少了所需的文档记述和培训量，提高了工作的一致性，并减少了进行维护所需的时间。

环境和人为因素

始终考虑环境和人为因素。 例如，如果系统在多尘环境中使用，则其可能需要在通风口上安装灰尘过滤器。 维护过滤器是否容易？ 系统是否需要脚轮，可以移动来方便维护？ 如果是，请确保它们具有合适的重量且适合所处的地形。 操作人员和维护人员的技能水平如何，需要多少培训？是否能以用户友好的方式设计硬件和软件接口吗？

设计原则	预测性	预防性	纠正性
自检和监测	▪ 状态监测 ▪ 功能验证	▪ 功能验证	▪ 检测故障 ▪ 诊断和定位故障 ▪ 功能验证
模块化设计	▪ 状态监测 ▪ 维护 ▪ 更换 ▪ 校准 ▪ 功能验证	▪ 维护 ▪ 更换 ▪ 校准 ▪ 功能验证	▪ 检测故障 ▪ 诊断和定位故障 ▪ 维修 ▪ 功能验证
标准化	▪ 状态监测 ▪ 维护 ▪ 更换 ▪ 校准 ▪ 功能验证 ▪ 优化任务一致性	▪ 维护 ▪ 更换 ▪ 校准 ▪ 功能验证 ▪ 优化任务一致性	▪ 检测故障 ▪ 诊断和定位故障 ▪ 维修 ▪ 功能验证 ▪ l优化任务一致性
简易性	▪ 降低文档记述和培训成本 ▪ 优化任务一致性	▪ 降低文档记述和培训成本 ▪ 优化任务一致性	▪ 降低文档记述和培训成本 ▪ 优化任务一致性
环境和人为因素	▪ 降低预测性维护事件的频率和/或MPdMT ▪ 减少人为失误 ▪ 提高安全性	▪ 降低预防性维护事件的频率和/或MPMT ▪ 减少人为失误 ▪ 提高安全性	▪ 降低故障率和/或MTTR ▪ 减少人为失误 ▪ 提高安全性

表1. 该表格简要概括了每个设计原则在每种维护方法上的具体体现。

维护策略

应该使用哪种方法？ 预测策略会等到检测到潜在的未来故障，然后在方便的时间安排维护或替换。 预防策略在定期计划的时间间隔主动维护、更换和/或校准系统组件，以最大限度地降低故障风险和计划外停机时间的成本。 纠正策略会等到某个组件故障来最大限度地利用资本投资，然后尽快进行维修，以最大限度地减少意外停机的成本，或最小化MTTR。 对于每个策略，您可以自己执行、与供应商制定服务协议，也可以什么也不做，在发生故障时持乐观态度，当然这是不推荐的。

以下介绍了不同的技巧组合，并解释了哪种维护策略最适合用于不同子系统或组件。 此处讨论的方法是状态监测可行性、基于可靠性的维护(RCM)和故障成本分析。 RCM基于运行时间对系统组件故障率和组件故障成本的影响。以下三个图显示了三种策略的故障率与运行时间的函数关系。 每个图描绘了不同类型的组件的特性。 实际应用当然不止这三种场景，但这些是最常见的，可帮助您理解RCM的工作原理。

图5显示了故障率随时间而增加。在这种情况下，组件的故障率可能一开始表现为恒定，但在系统达到预期使用寿命之前开始进入磨损。换句话说，部件的使用寿命明显短于系统使用的时间长度。这可能是最直观的场景，因为风扇、连接器、机电继电器、固态硬盘驱动器、电池、电子校准等机械组件都有这种趋势。在每次预防性维护事件发生之后，故障率会降低回到出厂水平，从而恢复系统的可靠性。

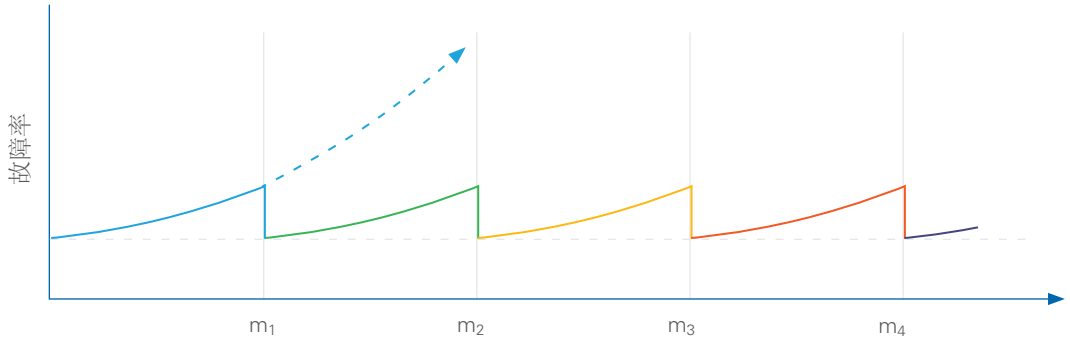


图5. 预防性维护会在故障率升高时启动维护事件，使故障率降低回出厂水平。

图6显示了故障率随时间保持恒定，有时称为稳态故障率。 在这种情况下，组件仅在超出系统的预期使用寿命（这不包括校准）才开始磨损。 换句话说，部件的使用寿命远远超过系统使用的时间长度。 这一场景常见于电子器件，比如IC、电阻器、陶瓷电容器、二极管、电感器等。 现代电子通常具有远远超过10至15年的使用寿命。 实际上它们在测试系统淘汰之前不会磨损。

在每个预测性维护事件之后，故障率不会改变，因此在组件发生故障之前更换组件没有任何好处。 从数学上来说，这种故障率被视为“随机机会”。 因此，使用新组件替换正在运行的旧组件并不能提高系统可靠性。

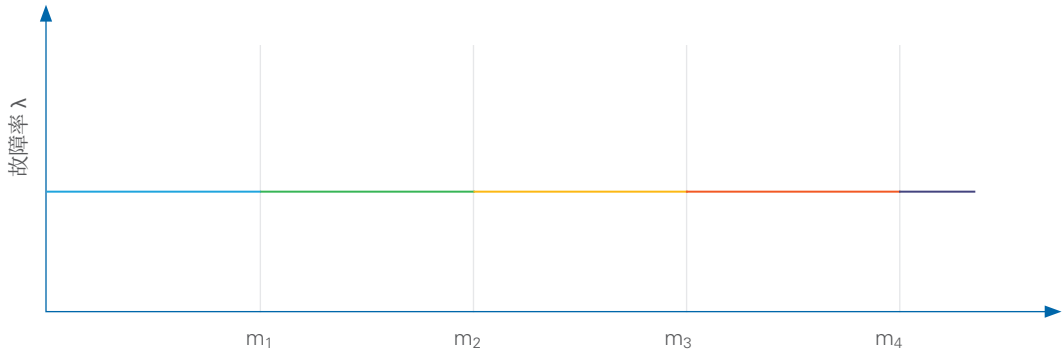


图6.对于预防性维护，由于故障率随时间保持恒定，每个维护事件对故障率几乎没有影响或完全没有影响。

图7显示了故障率随时间而降低。 这可能是最不直观的情况，常见于软件和复杂的计算机系统。 对软件和固件进行重大升级或添加新功能、新技术等可能会导致缺陷（错误），增加系统故障率。 在每次预防性维护事件之后，故障率升高到更高的水平，从而降低系统的可靠性。 但是，有些情况下我们必须升级软件，例如操作系统更新或硬件过时。

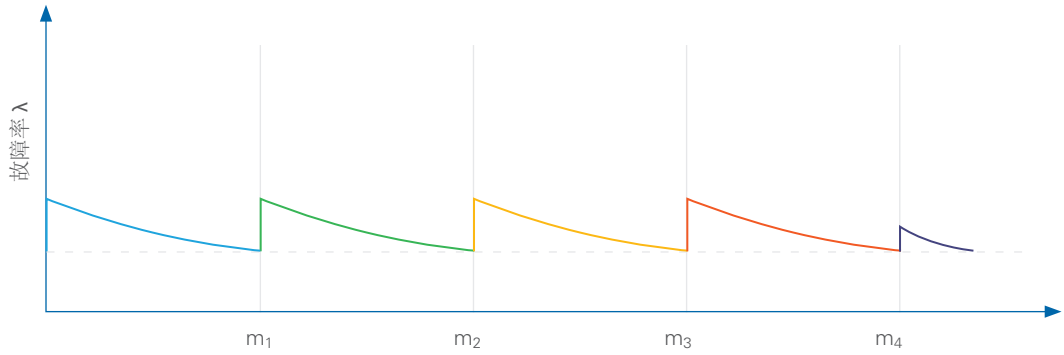


图7. 故障率随时间下降，预防性维护实际上在每次维护事件之后提高了故障率。

此外，有时候我们没有足够的数据来知道故障率是随时间增加、保持不变还是减小。 这常见于新产品、技术或设计。使用预测性维护策略来监测故障随时间的变化有助于了解组件的情况，前提是监测的成本相比故障的成本更具效益。 即使未建立趋势，预测性策略通常会最大化您的资本投资收益，同时最大程度降低停机成本。

使用此方法为整个系统开发维护策略时，可以将系统分解为多个子系统和/或组件，然后评估每个组件，确定最佳的维护策略。 以下提供了一些推荐的指导：

- 在引起系统故障之前，是否可以在一开始就检测到组件故障？

  考虑到纠正性维护事件的故障成本和预测性维护事件的额外计划停机时间，对该组件故障进行状态监测是否具有成本效益？

- 该组件的故障率是否随时间增加、保持恒定或减少，或者存在其他趋势，您知道吗？
  - 故障是否重要，故障成本是否很高？

下图显示了一个决策流程图，可帮助您为系统的每个组件和故障模式选择最佳策略。 当然，这个流程图应该根据实际需要进行调整。

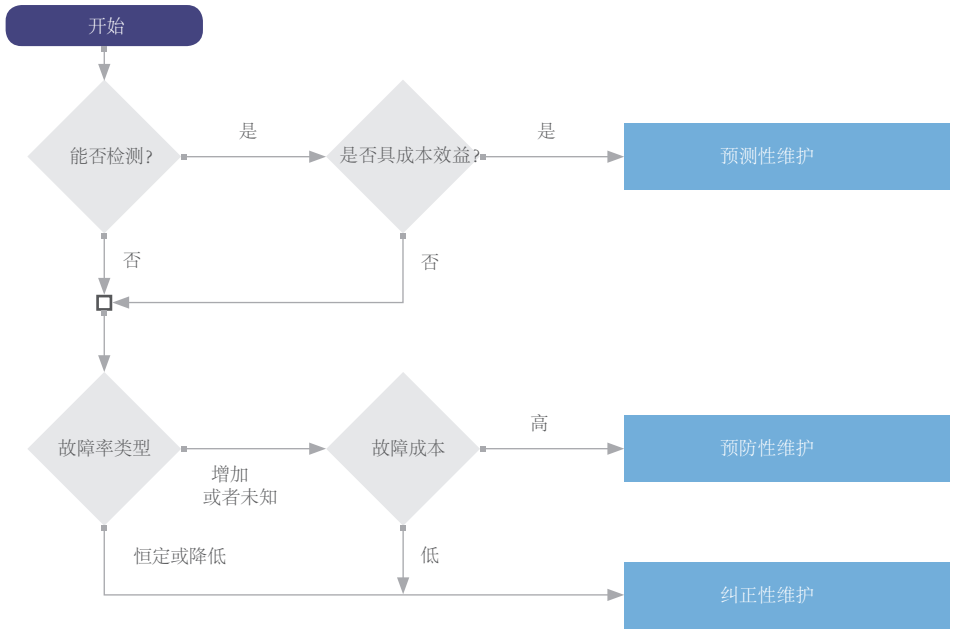


图8. 维护策略决策流程图

ATE系统示例

基于PXI Express的ATE系统由基本组件或子系统组成，每个组件或子系统可以根据其维护策略分为较小的组件。

机箱

机箱背板可能难以通过监测来发现潜在故障。 它具有恒定的故障率，使用寿命为10至15年甚至更长。 电子器件基本上都是数字的，不需要校准。 纠正性维护策略或“运行至故障”是最好的方法。

此示例中的机箱电源不提供监测功能。 电源通常使用较大的液体电容器，有些还配有冷却风扇。 根据负载和环境条件，这些部件的典型使用寿命约为7至10年。采用预测性或预防性维护策略较为合适。

我们可以监测机箱风扇速度和机箱温度。如果速度开始减慢，或者如果机箱温度开始增加，则会发送警告并且在不久的将来在合适的时间安排维护。 这一场景适合采用预测性维护策略。

控制器

控制器的集成电路和电子部件（不包括硬盘和RAM）可以提供监测工具来识别潜在故障。在本例中，实现这些功能需要大量的开发时间，并且不具有成本效益。 控制器还具有恒定的故障率，应具有10至15年或更长的典型使用寿命。 电子器件基本上都是数字的，不需要校准。纠正性维护策略或“运行至故障”通常是最好的方法。

控制器的RAM具有可自动运行的错误校正码(ECC)，可以通过监测找到并纠正错误。 如果这些错误的频率持续增加，则可能需要安排时间对RAM进行更换。RAM不需要校准，适用于采用预测性维护策略。

在此示例中，控制器的硬盘驱动器是一个固态硬盘驱动器(SSD)，可监测读写次数。SSD经过一定次数的读写后就会发生损耗。因此，当读写次数接近损耗值时，应当安排更换SSD。SSD不需要校准。 预测性维护策略是最好的方法。

软件具有一些独特的特性 - 它不会磨损，并且不受环境的影响，只会因为设计缺陷或错误而出现故障。我们可以监测资源泄漏，如内存使用和碎片化；然而，许多故障在崩溃之前是无法发现的。软件的一个优点是不会磨损，只需重启系统就会正常工作。这解决了所有问题，直至漏洞再次导致软件崩溃。因此，每周一次或每月一次重启软件的预防性维护策略可以解决许多问题。软件可靠性一个更具挑战性的方面是升级。由于需要新的功能或与其他软件包的兼容性或者可能需要补丁来修复漏洞，软件需要偶尔进行升级。问题是，每次引入新的软件就会改变整个生态系统，从而可能会引入更多的漏洞。只有这样做之后才会知道结果。这种动态变化使得软件升级后软件故障风险立即上升，然后在运行一段时间后稳定下来。最常用于软件的升级维护方法是延迟升级，需要时才升级。

仪器模块

仪器模块上的集成电路可能难以通过监测来发现潜在故障。 它们具有恒定的故障率，使用寿命为20年或更长。 模拟电子器件可能随时间发生漂移，因此需要校准。 解决漂移问题需要采取预防性维护策略来进决校准。 许多校准实验室可以在校准后对模块进行最终验证测试，以证明一切正常。 这个测试可以有效地捕获故障或濒临故障的其他电子元件。 但是没有测试是完美的，对于电子器件的部分其它故障模式，可能适合采用校正维护策略或运行到故障方法。 此时，组合策略是最好的方法。

开关模块

开关模块的基板主要由集成电路组成，通常没有合适的工具来监测电子器件的健康。开关模块具有恒定的故障率，典型使用寿命为10至15年或更长。 电子器件基本上都是数字的，不需要校准。 纠正性维护策略或运行到故障方法是最佳方法。

开关的机电继电器可使用工具来监测操作次数。 继电器经过一定次数的操作后会磨损，这取决于所切换的电负载。 您可以使用制造商提供的数据和公式来估算开关的数量。 因此，当操作的数量接近磨损值，应安排更换开关。 开关模块不需要校准。 预测性维护策略是最好的方法。

电缆

固定电缆基本上是连接的，从不断开，或者在极少情况下需要重新连接，不会产生任何影响。固定电缆几乎不会故障，除了振动或人为滥用。 其故障率是恒定且非常低的。 纠正性维护策略是最好的方法。

动态电缆经常连接和断开，且经过一定次数的重新连接后会发生磨损。 故障率随时间增加并且检测潜在故障可能没那么容易，但可以估计。 可允许的重新连接次数需要询问制造商。 如果重新连接的平均次数已知，并且知道每小时、每天、每个单元需要多少次重新连接，那么就可以安排预防性维护。 此时，预防性维护策略是最好的方法。

子组件	预测性维护	预防性维护	纠正性维护
机箱背板	—	—	√
机箱电源	—	√	—
机箱风扇	√	—	—
控制器母板	—	—	√
控制器RAM	√	—	—
控制器固态驱动器	√	—	—
控制器软件	—	√	—
仪器模块	—	校准	√
开关模块羁绊	—	—	√
开关模块继电器	√	—	—
固定电缆	—	—	√
动态电缆	—	√	—

表2. 使用此维护策略适用于基于PXI Express的ATE的每个主要组件。 请注意，每个组件的最佳策略因应用的具体情况而异。

结论

预测性、预防性和纠正性方法各有其优势、挑战和适用情况。在大多数情况下，与维护相关的最大费用是计划外停机成本（故障成本）。通过状态监测和预测将计划外停机转换为计划内停机通常是有好处的。

每年，状态监测设备、网络、服务器和大模拟数据（Big Analog Data™）分析都会不断降低成本并提高性能，因此工业趋向于采用更智能的设备和预测性能更高的维护。对于意外停机不可避免的情况，有效的备件和维修策略是最小化和管理维护成本的关键。

具有可维护性的系统与完善的维护计划相结合，将帮助您管理故障成本和降低故障风险，避免昂贵的计划外停机，从而降低了维护成本和总体拥有成本。自检、模块化设计、标准化、简单性和环境/人为因素是设计可维护性的基本组成部分。

附录：维护成本

许多公司主要根据测试设备的价格来做出采购决策，而没有考虑部署、操作和维护设备的成本。 他们甚至很少考虑设备停机的成本。测试系统整个生命周期内的停机（或故障）和维护成本远高于购买价格，通常达到两到三倍。 最大的罪魁祸首是停机或故障成本。 这就是为什么我们需要制定维护计划以及系统的可维护性变得越来越重要的原因。

本附录提供了一个简单的总维护成本(TCM)模型，可用于估计系统在其使用寿命内的潜在停机和维护成本。 计算测试系统的TCM可能非常乏味和复杂。 该模型提供了一定复杂度的详细估算，对于大多数应用来说是足够且可管理的。

总维护成本 (TCM)

$$TCM = CD + M$$

CD = 计划外和计划内停机成本

M = 维护成本

通过将投资的维护费用(M)与在系统生命周期内减少的停机成本(CD)或者TCM成本的总减少量进行比较，就可以衡量维护计划的投资回报率(ROI)。 一些公司将计划内停机的成本与维护成本相结合，并将其与计划外停机时间的成本进行比较，因为他们的主要重点是避免意外停机和故障。 每个公司可能有自己的方法来估算TCM和维护的ROI，取决于公司想要跟踪的指标。

停机成本 (CD)

停机成本有时看起来像“运气”钱，因为一些公司发现他们很难估计该成本。但是停机成本是实实在在的。停机有两种类型：计划内（安排的）和计划外（未安排的）。维护计划的目标是尽可能减少所有停机时间，并将尽可能多的计划外停机转换为计划内停机。

计划外停机的成本始终是最高的，因为它发生在您需要设备的时候。计划外停机永远不会在好时机时发生，并且可能由于生产中断、产品损失、对其他设备的附带损害、劳动力损失（劳动力可能必须坐着等待系统维修好），以及其他依情况而定的物流成本而造成巨额的利润损失。一些制造公司估计其计划外停机的成本约为每小时8,000美元。石化、电力和运输公司估计的每小时成本就更高了。这一成本因产品、情况、公司和行业是不同的。时间就是金钱；所以我们需要采用具有合适备件策略的纠正性维护计划来最小化故障系统的平均修复时间（MTTR）。

计划内停机的成本也很高，但比计划外停机要便宜，因为计划内停机对生产影响最小，可最大程度减小产量损失、对其他设备的附带损坏风险和物流成本，避免劳动力损失（因为经过培训的人员、工具和部件都在现场准备好进行维护）。计划内停机可能比计划外停机的时间短，并且可以分摊到需要维护的许多其他系统。由于计划外停机通常比计划内停机昂贵，许多公司已经实施了预测性和预防性维护计划。

$$CD = UD + PD$$

UD = 计划外停机的成本

PD = 计划内停机的成本

$$UD = \lambda \times MTTR \times T_U \times \text{每小时成本}$$

λ = *稳态故障率（每小时故障次数）*

系统的稳态故障率是指在系统的生命周期或使用寿命内预期的故障率。 该生命阶段介于使用初期（系统老化）和磨损阶段之间，到了磨损阶段，系统故障率预期将显着增加，系统是时候退休了。 以下数学关系适用于故障率达到稳定状态时的系统生命阶段。

$$\lambda = \frac{1}{MTBF_{系统}}$$

$MTBF_{系统}$ = *系统平均故障时间间隔（小时）*
T_U = *系统整个生命周期的总运行时间（小时）*

电子器件的运行时间通常包含系统在执行工作和处于空闲状态时的上电时间。

MTTR = 平均维修时间（小时）

MTTR 不仅仅是维修或更换故障组件的时间。 它还包括：

- 检测故障的时间
- 诊断系统以了解哪个/哪些组件出现故障的时间（在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响）
- 靠近和维修或更换故障组件所需的时间（在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响）
- 验证系统恢复正常工作的时间
- 系统重新联机的时间

显然，MTTR在很大程度上取决于备件可用性、系统位置、设计和通常发生的故障类型。

$$MTTR = \frac{\Sigma(\lambda_i t_i)}{\Sigma \lambda_i}$$

λ_i = *第i个故障模式的故障率*
t_i = *第i个故障模式的系统维修时间*
故障模式定义为发生的故障类型或故障的根本原因。

$PD = (\lambda \times MPdMT + f_{PM} \times MPMT) \times T_U \times$ *每小时的计划内停机时间*

预测性维护发生的频率与系统的故障率相关。预测性维护不是在发生故障之后执行维护，而是在检测到潜在故障条件之后但在故障发生之前的某个时间安排维护。

MPdMT = 平均预测维护时间（小时）

MPdMT包括：

- 访问时间
- 维护或更换组件的时间（在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响）
- 验证系统是否正常运行的时间
- 系统重新联机的时间

$$MPdMT = \frac{\sum(\lambda_i t_i)}{\sum \lambda_i}$$

λ_i = *第i次预测性维护活动的频率*

t_i = *对系统进行第i次预测性维护活动的时间*

f_{PM} = *预测性维护的频率（每小时）*

MPMT = 平均预测性维护时间（小时）

MPMT包括：

- 访问时间
- 维护或更换组件的时间（在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响）
- 验证系统是否正常运行的时间
- 系统重新联机的时间

$$MPMT = \frac{\sum(f_i t_i)}{\sum f_i}$$

f_i = *第i次预防性维护活动的频率*

t_i = *对系统进行第i次预防性维护活动的时间*

维护成本 (M)

$$M = PdM + PM + CM$$

PdM = 预测性维护的成本
PM = 预防性维护的成本
CM = 纠正性维护的成本

预测性维护的成本 (PdM)

$$PdM = \lambda \times T_U \times PdM事件 + 工具成本$$

PdM事件 = 一次PdM事件的平均成本

PdM事件= （MPdMT x 每小时计划内停机的劳动力成本）+ 维护或替换 + 备件 + 物流成本

计划内停机的劳动力成本包括对系统执行预测性或预防性维护的劳动力成本以及每小时估算的劳动力培训成本。

工具成本 = PdM所需的软硬件成本

工具成本通常为一次性支出，包括：

- 状态监测软件和硬件成本
- 拆卸和替换组件的工具成本
- 测试设备和软件验证成本（可能与纠正性维护一样）
- 设备和软件维护成本

注意：这些工具通常用于预测性、预防性和纠正性维护。如果可以使用工具，则工具成本只需要考虑一次，而不需要三种类型的维护都考虑一遍。

如上所示，MPdMT主要受到是否有合适的设备/工具以及操作人员的技能水平的影响。

预防性维护的成本 (PM)

$$PM = f_{PM} \times T_U \times PM事件 + 工具成本$$

f_{PM} = 预防性维护的频率（每小时）

PM事件 = 一次PM事件的平均成本

PM事件 =（MPMT x 每小时计划内停机的人力成本） + 校准、维护或更换 + 备件 + 物流成本

系统的MPMT越小，预测维护的成本就越低。 如上所示，MPMT主要受到是否有合适的设备/工具、操作人员技能水平以及校准策略的影响。 许多系统供应商提供了不同的校准选项。 根据情况，现场校准服务或向系统供应商购买校准服务协议可能更具成本效益。 标准的供应商校准项目一般就足够了。

纠正性维护成本 (CM)

$$CM = \lambda \times T_U \times CM事件 + 工具成本$$

CM事件 = 一次CM事件的平均成本

CM事件 =（MTTR x 每小时计划外停机的人工成本） + 维修或更换 + 备件 + 物流成本

计划外停机的人工成本包括系统维修的人工成本和按每小时估计的劳动力培训成本。

系统的MTTR越小，系统可用性就越大，计划外停机的成本也就越低。综上所述，MTTR受位置、系统设计、正确设备/工具可用性、人员技能水平和良好的备件策略的极大影响。许多系统供应商提供备件选项。 根据情况，现场备件或向系统供应商购买服务协议以提供备件或购买两者兼具的一些混合协议可能更具成本效益。 如果计划外停机的成本足够低，则可能就不需要现场备件，只需依赖标准供应商修理可能就足够了。

©2016 National Instruments. 版权所有。大模拟数据(Big Analog Data)、National Instruments、NI和ni.com均为National Instruments的商标。此处提及的其他产品和公司名称均为各自公司的商标或商业名称。