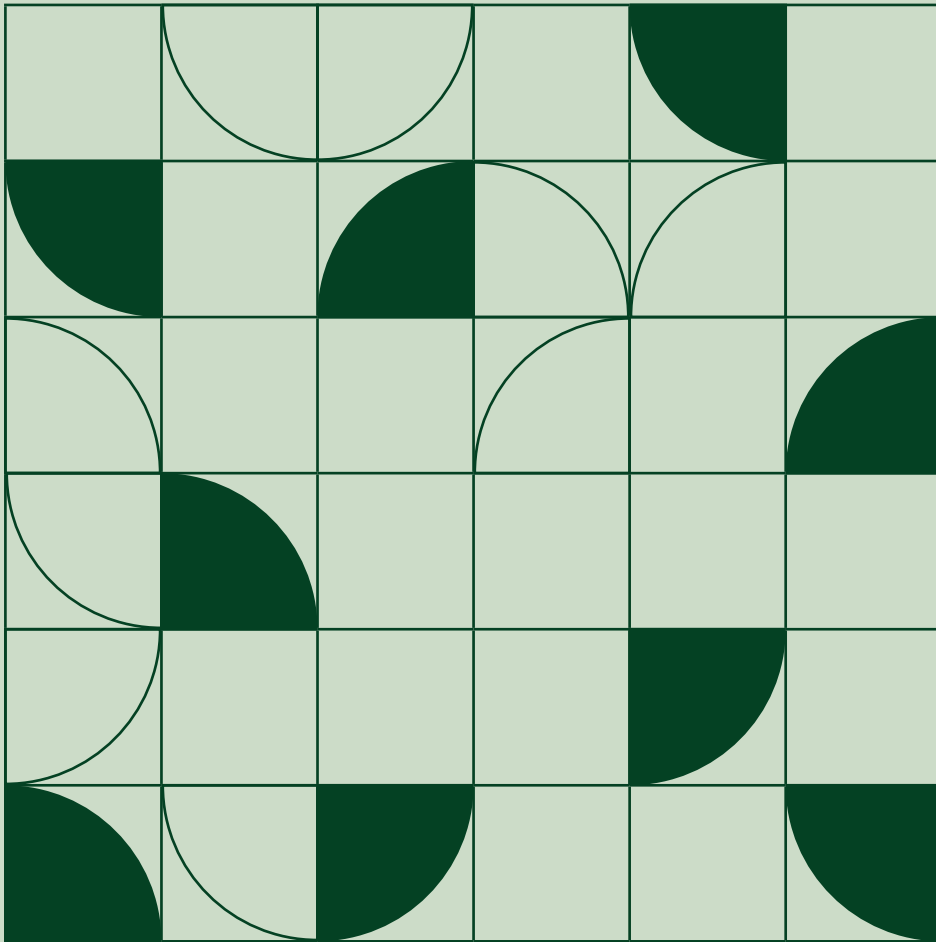


系统维护



02 简介
概念和定义

08 在设计中融入可维护性

10 维护策略

15 附录:维护成本

简介

在理想情况下,系统永远不会出现故障。我们只需要安装系统、打开系统、然后运行系统,之后就完全放任不管,直到10年、15年、20年甚至更长时间后将系统淘汰。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发生故障的风险,但我们可以降低这些风险。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拥有成本至关重要。在设计中融入可维护性的系统与完善的维护计划相结合,有助于:

- 保持系统的功能性和延长使用寿命,最大限度地提高资本投资收益
- 管理物流、调度和备件库存,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实现这一目标。

概念和定义

维护是指执行相关服务来保持系统正常运行并在系统出现故障时对系统进行修复的一种活动。维护分为三个方面:预测性维护、预防性维护和纠正性维护。

可维护性是指执行维护的难易程度。有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提前检测出系统故障,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,并避免计划外停机。预测性维护活动通常在检测到维护需求时

才会开展,并会导致计划内停机,而计划内停机的成本通常远远低于计划外停机的成本。计划内停机成本可以分摊到接受维护的许多其他系统。预测性维护的目标是在发生故障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,并尽可能减少计划外停机成本。随着物联网以惊人的速度向前发展,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(Big Analog Data™)分析等领域的技术进步使得预测性维护比以往更容易,也更具成本效益。预测性维护的衡量指标是引发的停机时间;这个时间称为平均预测性维护时间(MPdMT)。

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。

如今，大多数汽车都配有发动机自动健康监测系统，用于检测问题并使发动机检查灯闪烁，提醒维护人员在发动机永久损坏之前及时进行维修。测试系统可以监测温度、风扇转速、内存使用、测试时间、测量精度、计数继电器操作等。

- **维修系统组件**—这有助于减缓损坏速度并延长系统的使用寿命。

一些汽车轮胎会配有检查气压的传感器。如果气压不合适，会缩短轮胎的使用寿命并影响油耗性能。如果将

测试系统用于灰尘较多的环境，则可能需要清除空气过滤器和外壳内部的灰尘，以免系统过热，导致电子器件的使用寿命缩短。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理灰尘过滤器。

- **更换系统组件**—在组件发生故障之前更换组件，以免出现计划外停机。

测试系统可以使用继电器来开关信号，以测试待测设备。根据所开关的电气负载，继电器仅可持续预计的操作次数。因此，与等到发生故障并出现计划外停机后再采取措施相比，监测操作次数并在继电器模块发生故障之前予以更换，通常更具成本效益。

- **通过校准补偿漂移**—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，则系统运行不正常。

大多数测试系统的电子器件都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，建议通过监测测量漂移来了解何时适合安排校准维护。

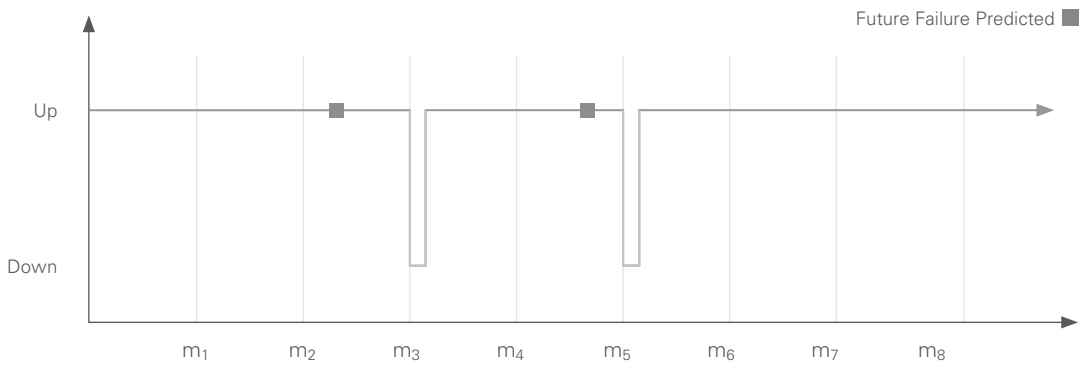


图 1 查看预测性维护的正常运行时间和停机时间随时间的变化。预测性维护可降低停机频率并将昂贵的计划外停机转换为成本较低的计划内停机，从而最大限度地利用您的资本投资并减少停机成本，但需要借助故障监测设备和预测软件

- **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，这并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。

预防性维护活动包括：

- **维修系统组件**—这有助于减缓损坏速度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。测试系统通常运行复杂的软件程序，这些程序可能存在隐藏的资

源泄漏和/或故障，最终导致系统故障。简单的系统重启可以将软件刷新到新状态。如果将测试系统用于灰尘较多的环境，则可能需要清除空气过滤器和外壳内部的灰尘，以免系统过热，导致电子器件的使用寿命缩短。如果不能监测温度和/或气流，则可能需要安排定期维护。

源泄漏和/或故障，最终导致系统故障。简单的系统重启可以将软件刷新到新状态。如果将测试系统用于灰尘较多的环境，则可能需要清除空气过滤器和外壳内部的灰尘，以免系统过热，导致电子器件的使用寿命缩短。如果不能监测温度和/或气流，则可能需要安排定期维护。

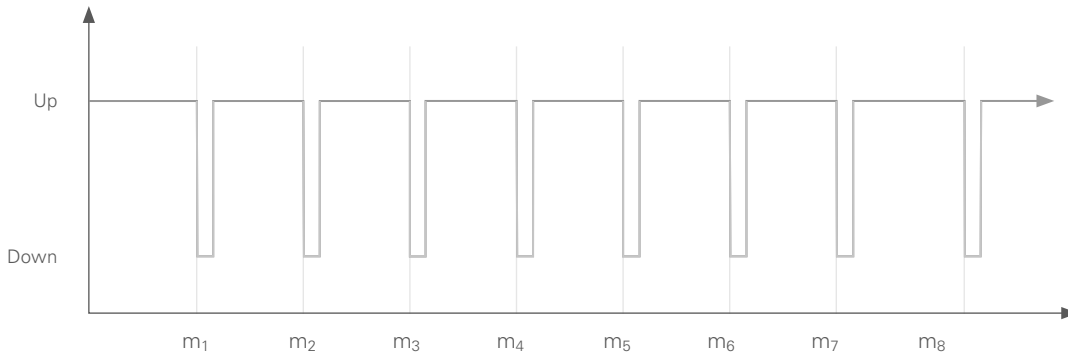


图 2 | 预防性维护并不总能最大限度地利用您的资本投资，但它有助于避免昂贵的计划外停机，从而最大限度地减少停机成本

- **更换系统组件**—在组件发生故障之前更换组件，以免出现计划外停机。

汽车上的轮胎或刹车片在汽车行驶一定里程后需要更换，以防出现故障，从而避免发生事故或汽车半路抛锚。测试系统可能配有测试该设备的连接器引脚，这些引脚往往会在100,000次连接之后就会出现损坏。按每小时测试50台设备计算，连接器应在持续使用约2,000小时或83天后才会出现损坏并发生故障。预防性维护应每隔约80天安排一次，以更换连接器。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后再采取措施更具成本效益。

- **通过校准补偿漂移**—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，则系统运行不正常。

大多数测试系统的电子器件都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，这并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。

纠正性维护是指修复故障系统以让其恢复到正常工作状态的活动。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。纠正性维护的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计划外停机成本。纠正性维护的衡量指标是故障引发的停机时间；这个时间称为平均修复时间(MTTR)。

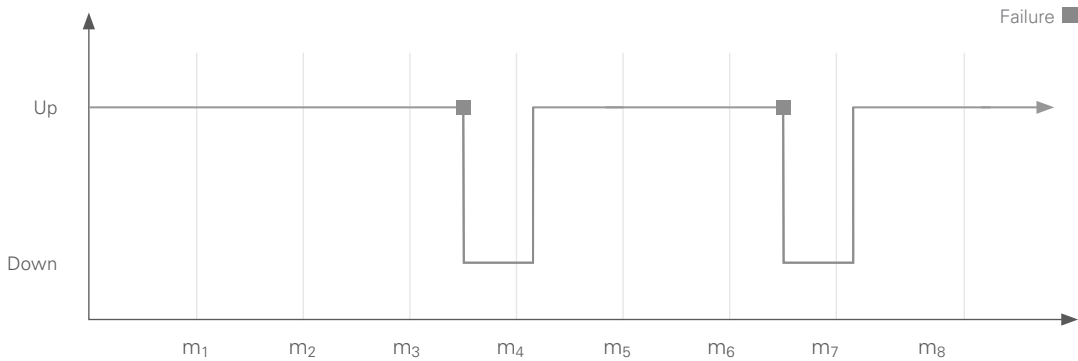


图 3 | 查看纠正性维护的正常运行时间和停机时间随时间的变化。纠正性维护可最大限度地利用您的资本投资，但由于会引发计划外停机，不会将停机成本最小化。您可以采取措施尽量缩短计划外停机时间或MTTR

纠正性维护活动包括：

- **检测**—尽快检测系统故障，可最大限度地减少成本高昂的计划外停机，并可能防止对系统中的其他组件和/或同一流程中使用的其他系统造成损坏。

汽车中的压力传感器可以尽快检测到油压下降，从而提醒驾驶员，防止对发动机造成永久性损坏。油压下降可能是油泵出现故障或漏油导致油位降低，而修理油泵或将泄漏处密封然后加油要比购买新的发动机便宜得多。对于ATE系统，电子器件可能会发生故障，从而影响关键测量并导致测试结果不正确。如果故障需要一段时间才能检测出来，则公司可能在不知情的情况下将不合格产品提供给客户，或者冷却风扇可能出现故障，导致机箱温度可能上升到会损坏部分电子器件的水平。

- **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故障组件，从而最大限度地减少计划外停机并节省成本。

汽车机械师可借助复杂的诊断设备来有效且高效地诊断问题。这可降低修错或换错部件的风险，从而节省时间和成本。对于复杂的ATE系统也是如此，如果没有适当的诊断工具，对问题进行诊断就可能花费数小时甚至数天时间。

- **维修**—通过维修或更换故障组件来修复系统。计划外停机时间在很大程度上受到有无备件的影响。根据应用、环境和人员技能水平的不同，就近提供备用系统或备用部件可能不一定具有成本效益，也不一定切实可行。

大多数人不会在车辆没有备胎的情况下开车穿越全国，但如果仅开几个街区，他们很可能会这么做。

备件战略对于控制成本至关重要。此时需要考虑以下问题：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。

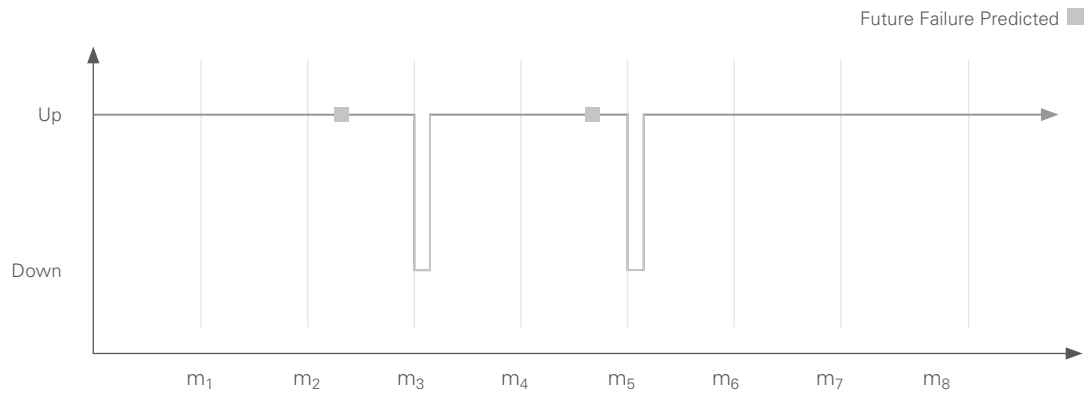
- **验证**—这可确保系统在重新联机之前正常工作。如果没有此步骤，系统可能仍然不能正常运行，只会导致更多的计划外停机。

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，而没有首先测试和验证刹车是否能够正常工作。

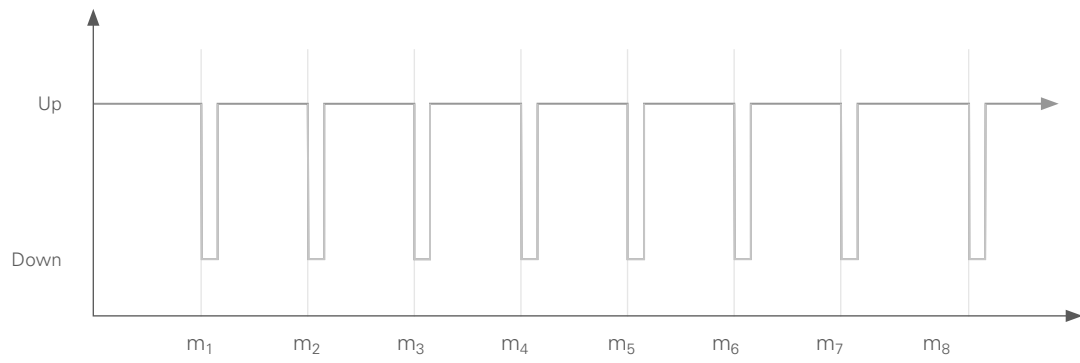
- **系统重新联机**—必须始终考虑这一点，因为对于某些应用，这并不是一项简单的任务。

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。

PREDICTIVE



PREVENTIVE



CORRECTIVE

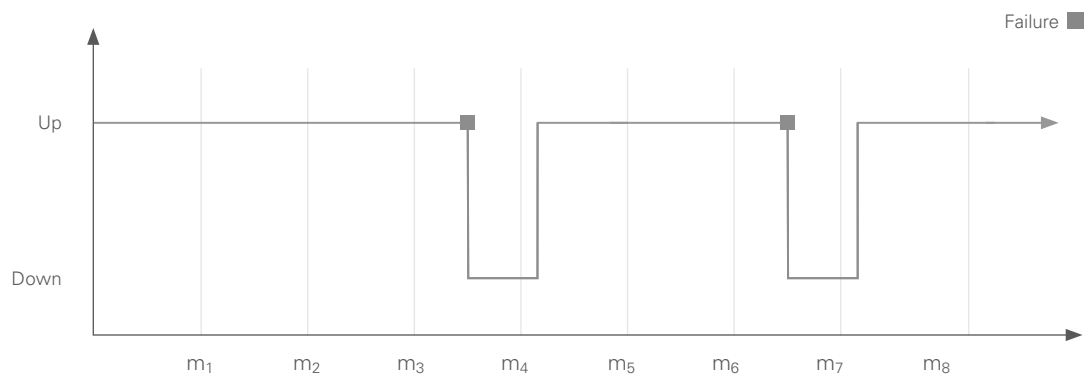


图 4 对比一下正常运行时间和停机时间,可以看出计划外的成本通常远远高于计划内停机的成本

在设计中融入可维护性

系统的设计极大地影响了能否部署有效、高质量和可控的维护计划。若要在设计自动化测试系统时就考虑提高系统可维护性，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。从开始设计时就应将自检和监测功能纳入系统中对于实现高效、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，同时还能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、所需维护工具和设备数量以及培训成本。

例如，有些航空公司使用10种甚至更多型号的飞机。然而，西南航空公司只使用一种型号的飞机—波音737。这有助于成本节省。机械师只需针对一种型号的飞机进行培训，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。机队中的飞机完全可以互换。所有机组人员和地勤人员都非常熟悉这种飞机。而且，飞机的存放方式和存放位置也不会有任何挑战，因为所有飞机都具有相同的形状和尺寸。

标准化对于控制维护过程具有很大帮助。控制良好的过程可以重复且可预测，因此我们设计的系统必须采用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，执行不同的维修任务，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

操作和维护应尽可能简单。换句话说，确保能够轻松完成所需的工作。这可减少所需的文档记述和培训量，提高工作的一致性，并缩短维护所需的时间。

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，则可能需要在通风口上安装滤尘器。维修滤尘器是否容易？系统是否需要脚轮，以便可以移动，方便维护？如果是这样，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？

设计原则	预测性维护	预防性维护	纠正性维护
自检和监测	<ul style="list-style-type: none"> 状态监测 功能验证 	<ul style="list-style-type: none"> 功能验证 	<ul style="list-style-type: none"> 故障检测 故障诊断和定位 功能验证
模块化设计	<ul style="list-style-type: none"> 状态监测 维护 更换 校准 功能验证 	<ul style="list-style-type: none"> 维护 更换 校准 功能验证 	<ul style="list-style-type: none"> 故障检测 故障诊断和定位 维修 功能验证
标准化	<ul style="list-style-type: none"> 状态监测 维护 更换 校准 功能验证 优化任务一致性 	<ul style="list-style-type: none"> 维护 更换 校准 功能验证 优化任务一致性 	<ul style="list-style-type: none"> 故障检测 故障诊断和定位 维修 功能验证 优化任务一致性
简易性	<ul style="list-style-type: none"> 降低文档记述和培训成本 优化任务一致性 	<ul style="list-style-type: none"> 降低文档记述和培训成本 优化任务一致性 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 降低预测性维护事件的频率和/或缩短MPdMT 减少人为失误 提高安全性 	<ul style="list-style-type: none"> 降低预防性维护事件的频率和/或缩短MPMT 减少人为失误 提高安全性 	<ul style="list-style-type: none"> 降低故障率和/或缩短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？预测性维护策略会在检测到潜在的未来故障后，在方便的时间安排维护或更换系统组件。预防性维护策略会按一定的时间间隔定期对系统组件进行主动维护、更换和/或校准，以最大限度地降低故障风险和计划外停机的成本。纠正性维护策略会等到某个组件发生故障以最大限度地利用资本投资，然后尽快进行维修以尽量减少意外停机的成本，或尽量缩短MTTR。对于每种策略，您可以自己执行或与供应商签订服务协议，也可以不采取任何措施，在发生故障时持乐观态度，当然我们并不建议这样做。

下文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的子系统或组件。此处讨论的方法包括状态监测可行性、基于可靠性的维护(RCM)和故障成本分析。RCM方法需要了解运行时间对系统组件故障率和组件故障成本的影响。以下三幅图显示了三种策略对应的故障率与运行时间的函数关系。每幅图描绘了不同类型组件的特性。实际应用当然不止这三种场景，但这三种最为常见，可帮助您理解RCM的工作原理。

图5显示了故障率随时间推移而升高的情况。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组件就开始出现损坏。换句话说，组件的使用寿命明显短于系统运行时长。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、电子器件校准系统等机械组件都会呈现这种趋势。在每次预防性维护事件发生之后，故障率都会重新降至出厂水平，从而恢复系统的可靠性。

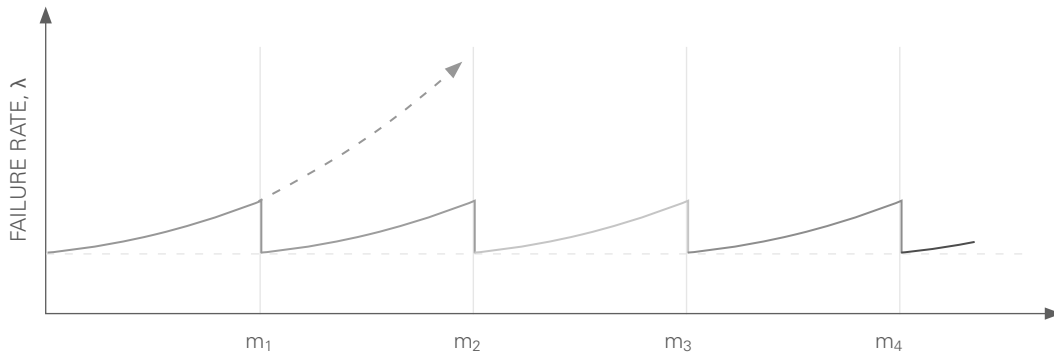


图 5 预防性维护会在故障率升高时启动维护事件，使故障率重新降至出厂水平

图6显示了故障率随时间保持恒定的情况，这种故障率有时称为稳态故障率。在这种情况下，组件会在远远超出系统预期使用寿命(不包括校准)后才开始出现损坏。换句话说，组件的使用寿命远远超过系统运行时长。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。现代电子器件的使用寿命通常远远超过10至15年。实际上，在测试系统淘汰之前，它们不会出现损坏。

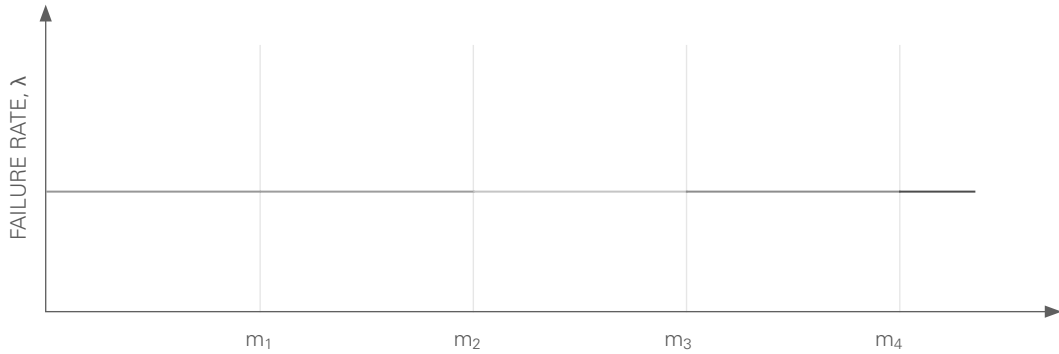


图 6 对于预防性维护，由于故障率随时间保持恒定，每个维护事件对故障率几乎没有影响或完全没有影响

在每次预测性维护事件发生之后，故障率不会发生改变，因此在组件发生故障之前更换组件并不会带来任何益处。从数学上来讲，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7显示了故障率随时间推移而降低的情况。这可能是最不直观的场景，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、新技术等可能会引入缺陷(错误)，从而增大系统发生故障的可能性。在每次预防性维护事件之后，故障率都会升高到更高的水平，降低系统的可靠性。但是，有些情况下我们必须升级软件，以应对操作系统更新或硬件过时等情况。

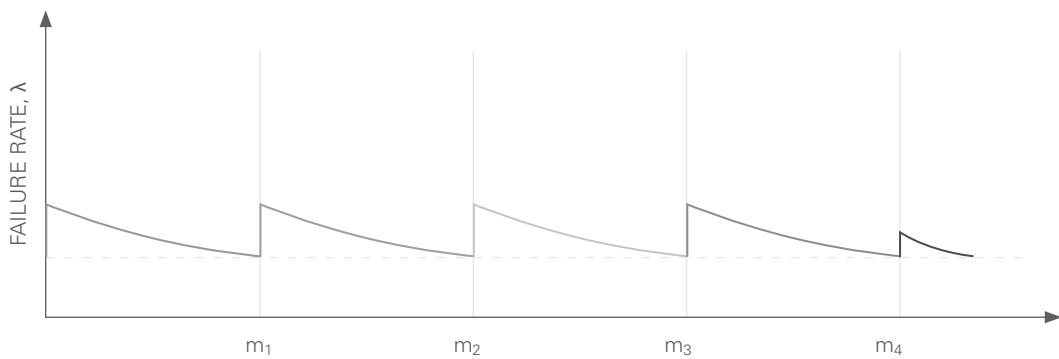


图 7 故障率随时间下降，预防性维护实际上在每次维护事件之后都提高了故障率

此外，在某些情况下，并无足够的数据来了解故障率是随时间升高、保持恒定还是降低。这常见于新产品、新技术或新设计。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。即使趋势尚未确定，预测性维护策略通常也会最大限度地提高资本投资收益，同时尽量降低停机成本。

使用此方法为整个系统制定维护策略时，可以将系统分解为多个子系统和/或组件，然后对每个组件进行评估，确定最佳的维护策略。

以下提供了一些有用的指导原则：

- 能否在组件故障导致系统故障之前就检测出故障的发生？
 - 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？
- 该组件的故障率是随时间升高、保持恒定还是降低，或者您对此是否了解？
 - 故障是否严重，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，这个流程图应根据实际需要进行调整。

ATE系统示例

基于PXI Express的ATE系统由基本组件或子系统组成，每个组件或子系统都可以分解为更小的组件，以实现自己的维护策略。

机箱

机箱背板可能难以通过监测来发现潜在故障。它的故障率恒定，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，最适合采用纠正性维护策略或“运行至故障”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，这些组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。

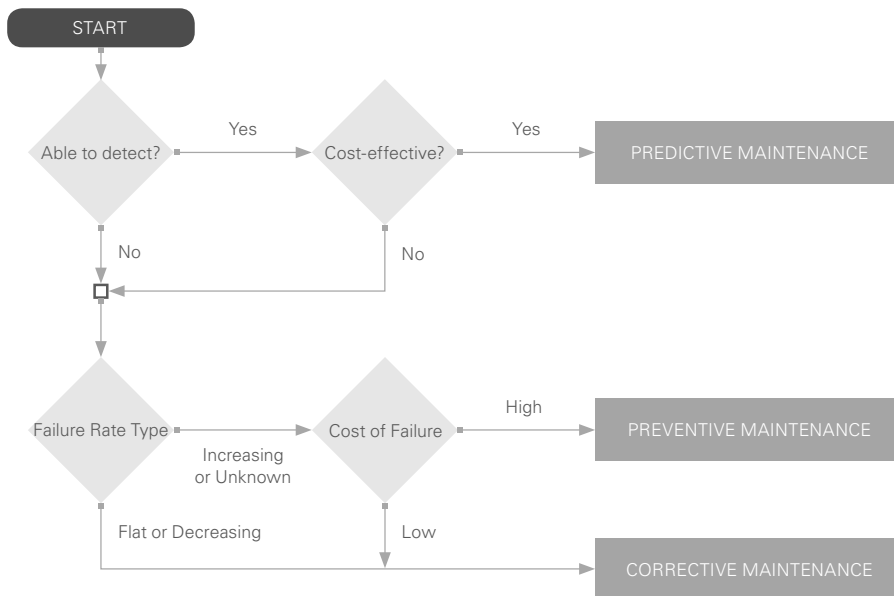


图 8 维护策略决策流程图

机箱风扇速度和机箱温度可以监测。如果速度开始减慢或者机箱温度开始升高，则会发出警告，可以在近期方便的时间安排维护。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。本例中，实现这些功能需要耗费大量的开发时间，并且不具有成本效益。此外，控制器的故障率恒定，典型的使用寿命为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，通常最适合采用纠正性维护策略或“运行至故障”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，最适合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寿命就会出现损坏。因此，当读写次数接近使用寿命时，应安排更换SSD。SSD不需要校准，最适合采用预测性维护策略。

软件具有一些独特的特性：它不会出现损坏，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出现损坏，只需重启系统就会正常工作。这样就解决了所有问题，直至错误再次导致软件崩溃。因此，采用预防性维护策略，每周或每月重启一次软件就可以解决许多问题。影响软件可靠性的一个更具挑战性的因素是软件升级。软件偶尔需要升级，因为需要安装新功能，需要与其他软件包兼容，或者可能需

要补丁来修复错误。问题是，每次引入新软件就会改变整个生态系统，从而可能会引入更多错误，但只有升级之后才会知道结果如何。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。软件最常用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。它们的故障率恒定，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。为解决漂移问题，需要采取预防性维护策略来进行校准。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。该测试可以有效地找出已发生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他故障模式，可能适合采用纠正性维护策略或“运行至故障”方法。此时，最适合采用组合策略。

开关模块

开关模块的基板主要由集成电路组成，这些集成电路通常不具备用于监测电子器件健康状况的工具。开关模块的故障率恒定，典型使用寿命为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，最适合采用纠正性维护策略或“运行至故障”方法。

开关的机电继电器具有监测操作次数的工具。继电器经过一定次数的操作后就会出现损坏，具体取决于所开关的电气负载。您可以使用制造商提供的数据和公式来估算开关的次数。因此，当操作次数接近使用寿命时，应安排更换开关模块。开关模块不需要校准，最适合采用预测性维护策略。

电缆

固定线缆基本上保持连接状态，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。固定电缆几乎不会出现故障，除非受振动干扰或人为滥用。其故障率恒定并且非常低。因为，最适合采用纠正性维护策略。

动态电缆经常连接和断开，在经过一定次数的重新连接后就会出现损坏。其故障率随时间推移而升高，并且检测出潜在故障可能并不容易，但故障率可以估计。所允许的重新连接次数可以询问制造商。如果重新连接的平均次数已知，并且了解每小时、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。在这种情况下，最适合采用预防性维护策略。

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	√	-	-
控制器主板	-	-	√
控制器RAM	√	-	-
控制器固态硬盘驱动器	√	-	-
控制器软件	-	√	-
仪器模块	-	校准	√
开关模块基板	-	-	√
开关模块继电器	√	-	-
固定线缆	-	-	√
动态线缆	-	√	-

表 2 | 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

预测性维护、预防性维护和纠正性维护各有其优势、挑战和适用情况。在大多数情况下，与维护相关的最大一项支出是计划外停机成本(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，因此行业趋向于采用更智能的设备和预测性能更高的维护策略。对于计划外停机无法避免的情况，有效的备件和维修策略是管理并最大限度地降低维护成本的关键。

在设计中融入可维护性的系统与完善的维护策略相结合，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，从而降低维护成本和总拥有成本。若要在设计阶段就考虑尽量提高系统可维护性，自检功能、模块化设计、标准化、简单性和环境/人为因素是基本的考量因素。

附录:维护成本

许多公司在采购测试设备时主要根据价格来作出决策,而不考虑部署、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。在测试系统的整个生命周期内,停机(或故障)和维护成本可能远高于购买价格,通常会高出两到三倍。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,可用于估算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可能会非常繁琐和复杂。该模型基于一定的复杂程度和详细程度进行了充分的估算,对于大多数应用来说都足以满足要求且易于管理。

总维护成本(TCM)

$$TCM = CD + M$$

CD = 计划外停机和计划内停机成本

M = 维护成本

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)。有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计划外停机和故障。每个公司可能有自己的方法来估算TCM和维护的ROI,具体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是“运气”钱,因为有些公司发现这种成本很难估算。但停机成本是真实存在的。停机有两种类型:计划内(安排的)和计划外(未安排的)停机。维护计划的目标是尽可能减少所有停机,并在经济上可行的条件下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,因为这种停机发生在您需要使用设备时。计划外停机永远不会在适当的时机发生,并且可能由于生产中断、产品损失、对其他设备的

附带损坏、劳动力损失(劳动力可能不得不“坐等”系统修复),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停机成本就更高了。计划外停机成本因产品、情况、公司和行业而异。时间就是金钱;所以我们需要采用包含适当备件策略的纠正性维护计划,最大程度地缩短故障系统的平均修复时间(MTTR)。

计划内停机的成本同样很高,但低于计划外停机成本,因为计划内停机安排在对生产影响最低的时段,可最大程度地减小产量损失及对其他设备造成的附带损坏风险,不会造成劳动力损失,并最大限度地降低物流成本(因为经过培训的人员、工具和部件都在现场,随时可进行维护)。计划内停机的持续时间相比计划外停机可能更短,并且其成本可以分摊到需要维护的许多其他系统。由于计划外停机的成本通常高于计划内停机,许多公司已经实施了预测性和预防性维护计划。

$$CD = UD + PD$$

UD = 计划外停机成本

PD = 计划内停机成本

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

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。稳态故障率阶段在系统生命周期中介于使用初期(系统老化)和寿命耗尽阶段之间, 在系统寿命耗尽时, 系统故障率预计将显著升高, 系统应退役。以下数学关系适用于系统生命周期中故障率达到稳定状态时的阶段。

$$\Lambda = \frac{1}{\text{MTBF}_{\text{系统}}}$$

$\text{MTBF}_{\text{系统}}$ = 系统故障平均间隔时间(小时)

T_U = 系统在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 = 平均修复时间(小时)

MTTR 不仅仅是维修或更换故障组件的时间。它还包括:

- 检测故障所需的时间
- 对系统进行诊断并确定哪些系统组件出现故障所需的时间
- 检查、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所需的时间
- 系统重新联机所需的时间

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。

$$\text{MTTR} = \frac{\sum(\Lambda_i T_i)}{\sum \Lambda_i}$$

Λ_i = 第*i*种故障模式的故障率

t_i = 发生第*i*种故障模式后的系统维修时间

故障模式定义为发生的故障类型或故障的根本原因。

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

预测性维护的频率应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，而是在检测到潜在故障条件之后，在故障发生之前的某个时间按计划执行。

MPdMT = 平均预测性维护时间(小时)

MPdMT包括：

- 检修所需时间
- 维修和/或更换组件所需的时间(在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响)
- 验证系统是否正常运行所需的时间
- 系统重新联机所需的时间

$$\text{MPdMT} = \frac{\sum(\lambda_i T_i)}{\sum \lambda_i}$$

λ_i = 第i种预测性维护活动的频率

t_i = 对系统执行第i种预测性维护活动所需的时间

f_{PM} = 预防性维护的频率(每小时)

MPMT = 平均预防性维护时间(小时)

MPMT包括：

- 检修所需时间
- 维修、更换和/或校准组件所需的时间(在很大程度上受到有无备件和/或多余组件的影响)
- 验证系统是否正常运行所需的时间
- 系统重新联机所需的时间

$$\text{MPMT} = \frac{\sum(f_i T_i)}{\sum f_i}$$

f_i = 第i种预防性维护活动的频率

t_i = 对系统执行第i种预防性维护活动所需的时间

维护成本(M)

$$M = PdM + PM + CM$$

PdM = 预测性维护成本

PM = 预防性维护成本

CM = 纠正性维护成本

预测性维护成本(PdM)

$$PdM = \Lambda \times T_U \times PdM \text{ 事件} + \text{工具成本}$$

PdM 事件 = PdM事件的平均成本

$$PdM \text{ 事件} = (MPdMT \times \text{每小时计划内停机的劳动力成本}) + \text{维护或更换成本} + \text{备件成本} + \text{物流成本}$$

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所需的劳动力成本以及按小时估算的劳动力培训成本。

工具成本 = PdM所需的软件和硬件工具成本

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
- 拆卸和更换组件所需的工具成本
- 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: 这些工具通常可用于预测性、预防性和纠正性维护。如果可以使用工具, 则工具成本只需计入一次, 而不是三种类型中每种维护都要计入一次。

如前文所述, 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。

预防性维护成本(PM)

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

$$f_{PM} = \text{预防性维护的频率(每小时)}$$

$$PM \text{ 事件} = \text{PM事件的平均成本}$$

$$PM \text{ 事件} = (MPMT \times \text{每小时计划内停机的劳动力成本}) + \text{校准、维护或更换成本} + \text{备件成本} + \text{物流成本}$$

系统的MPMT越小，预测性维护的成本就越低。如前文所述，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。许多系统供应商都提供各种校准选项。根据具体情况，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。一个标准的供应商校准项目一般就足以满足要求。

纠正性维护成本(CM)

$$CM = \Lambda \times T_U \times CM \text{ 事件} + \text{工具成本}$$

$$CM \text{ 事件} = \text{CM事件的平均成本}$$

$$CM \text{ 事件} = (MTTR \times \text{每小时计划外停机的劳动力成本}) + \text{维修或更换成本} + \text{备件成本} + \text{物流成本}$$

计划外停机的劳动力成本包括系统维修所需的劳动力成本和按小时估算的劳动力培训成本。

系统的MTTR越小，系统可用性就越高，计划外停机的成本也就越低。如前文所述，MTTR主要受位置、系统设计、是否有合适的设备/工具、人员技能水平和备件策略的影响。许多系统供应商都提供各种备件选项。根据具体情况，配备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，则可能就不需要配备备件，只需依赖供应商的标准维修服务可能就足以满足需求。

