

# Intelligent Maintenance Systems (IMS) Technologies

Jay Lee

Director

NSF Industry/University Cooperative Research Center on  
Intelligent Maintenance Systems  
Univ. of Cincinnati  
[www.imscenter.net](http://www.imscenter.net)

## 需求

制造业是反映一个国家生产能力、国民经济水平和综合国力的基础性、支柱性产业。Internet 和 Web 技术的飞速发展，大大加快了产品的设计、制造和服务速度，速度和服务已成为影响制造企业核心竞争力的二大重要因素。制造业中的设备一旦发生故障和失效问题，将严重影响企业的市场竞争力。其主要表现在以下几点：

- 制造企业设备故障的突然发生，不仅会增加企业的维护成本，而且会严重影响企业的生产效率，使企业蒙受巨大损失。据调查，**设备的 60% 的维护费用是由突然的故障停机引起的**，即使在技术极为发达的美国，每年也要支付 2000 亿美金来对设备进行维护，而设备停机所带来的间接生产损失则更为巨大。
- 进口设备的维护问题则更为复杂和困难，而目前所采用的**远距离跨国维修 FAF ( Fly and Fix ) 的方式既费时又费用昂贵**，在大大增加企业运作成本的同时，也严重影响了企业的生产效率。
- 在“顾客至上”理念普及的今天，制造企业必须为客户提供产品的完整服务解决方案。由于**产品出现问题的不可预知性**，企业**无法预先制定服务和维护计划**。为了提高企业的服务效率和服务质量，制造企业必须**维持一支规模更为庞大的服务队伍**，其日常支出是非常巨大的。

因此，如何合理地制定维护计划，防止设备和产品因故障而失效，已成为制造企业降低运作成本、提高生产效率和市场竞争力的重要手段。而要保持设备和产品的稳定性，现在的制造企业多采用周期性检修的方式，但这种方式同样给企业带来了沉重的经济负担。新的观念是采用智能维护系统，不停地对设备和产品的性能状态进行监测、预测和评估，并按需制定维护计划，以防止它们因故障而失效。

## IMS Technologies

所谓智能维护系统 (Intelligent Maintenance System, *IMS*)，或称之为 E-maintenance，是采用**性能衰退分析和预测方法**，结合 *infotronics* 技术 (融合互联网、非接触式通讯技术、嵌入式智能电子技术)，使产品或设备达到**近乎零故障 (Near-Zero-Breakdown)** 的性能或生产效率的一种新型维护系统。

智能维护属于预测性维护，智能维护系统的采用将大大促进国家的经济发展。据统计，即使在美国，现今的工业运转能力只是其最大能力的 48.2% (1999 年 11 月，美国商业部门数据)，而据保守的估计，基于 Internet 的智能维护技术每年可以带动 2.5% 到 5% 的运转能力增长，这意味着：在价值 2 亿美金的设备上应用智能维护技术，每年就可以多创造 500 万美金的价值。有关资料也表明：运用智能维护技术可减少事故故障率 75%，降低设备维

护费用 25%~50%。以我国目前国有企业总固定资产约 10000 多亿元为例，每年用于大修、小修与处理故障的费用一般占固定资产的 3%~5%，可见采用智能维护，每年取得的经济效益可达数百亿元。

正是智能维护对世界经济的巨大推动作用，2002 年 7 月，智能维护技术被美国《财富》杂志列为当今制造业最热门的三项技术之一<sup>[1]</sup>。

## IMS 科学意义

在目前的制造企业，无论是维修还是定期的维护，其目的都是为了提高制造企业设备的开动率，从而提高生产效率。故障诊断技术的出现，大大的缩短了确定设备故障所在的时间，从而提高了设备的利用率。但故障停机给制造企业所带来的损失还是非常巨大的。如在新兴的 IC 产业，其生产线初期投资一般为 17 亿美金左右，而其有效生产周期只有 3—5 年，若生产线发生故障停机，不仅会使整个生产线上正在加工的半成品全部报废，而且会严重影响其投资回收速度。智能维护技术的出现进一步提高了企业设备的开动率，并且随着技术的发展，其可使企业的制造设备达到近乎零的故障停机性能。

智能维护与故障诊断有着密不可分的联系，其很多的技术基础起源于故障诊断，但他们之间又有很多区别。在传统的诊断维修领域，大部分的技术开发与应用集中在信号及数据处理、智能算法研究（人工神经网络、遗传算法等）、及远程监控技术（以数据传送为主）。这些技术基于的基础理念是被动的维修模式 **FAF ( Fail and Fix )**，对产品和设备的使用者而言，维修的要求是达到及时修复。而智能维护技术是基于主动的维护模式 **PAP ( Predict and Prevent )**，重点在于**信息分析、性能衰退过程预测、维护优化、应需式监测 ( 以信息传送为主 )**的技术开发与应用，产品和设备的维护体现了预防性要求，从而达

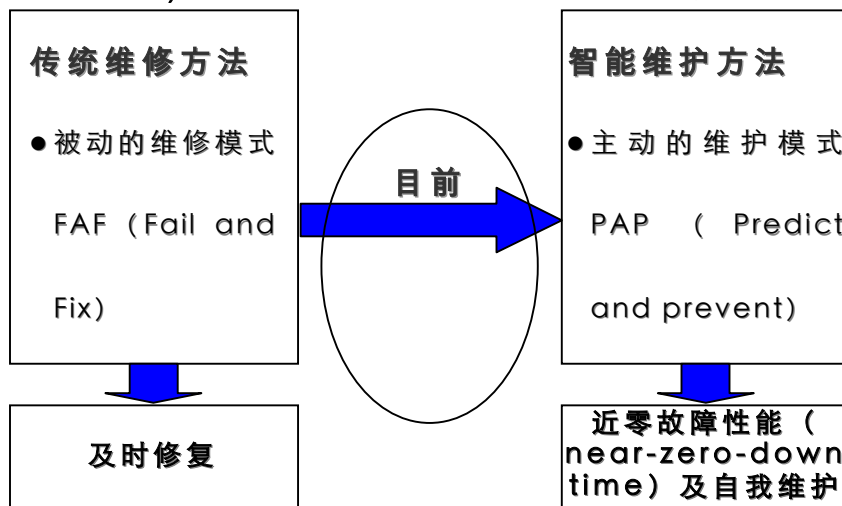


图 1 智能维护方法与传统维修方法的对比

到近乎于零的故障及自我维护（见图 1）。故障诊断技术在设备和产品的维修中虽然也发挥着重要的作用，但目前，由于工业界对预防性维护技术的需求，故障诊断领域的研究重点已逐步转向状态监测、预测性维修和故障早期诊断领域，其为智能维护技术的实现打下了扎实的基础。实际上，目前的故障诊断研究已经趋向于智能维护领域的初级阶段。

美国 KLA-Tencor 公司预测，半导体制造业将向智能化电子诊断的方向发展（即智能维护），从而实现实时地监测和调整设备的运行，而这一技术的采用将影响整个工业界，而不仅仅是半导体制造业。因此，目前有很多国际知名企业已把智能维护技术作为企业的主要发展战以促进维护策略从平均故障间隔 **MTBF ( Mean-time-between-failure )** 平均衰退间隔

MTBD ( Mean-time-between-degradation ) 的转变, 实现企业设备和产品在其生命周期中的近乎零的故障发生率, 从而大大提高国际市场的竞争力。

## 1 国内外相关领域研究现状及发展趋势

智能维护是一种全新的理念, 其由美国威斯康星大学李杰 ( Jay Lee ) 教授最先提出<sup>[2-3]</sup>。2001 年, 美国威斯康星大学和密歇根大学在国家自然科学基金的资助下, 联合工业界共同成立了“智能维护系统 ( IMS ) 中心”, 并规划了智能维护的蓝图 ( 图 2 )<sup>[4]</sup>。“IMS 中心”将作为一个创新和传播智能维护知识系统的重要角色, 并最终促进下一代的产品、制造和服务系统达到 6-sigma 的质量要求。目前, 中心的成员企业已达数十家, 其中也不乏世界知名企业, 如福特、Intel、东芝等。

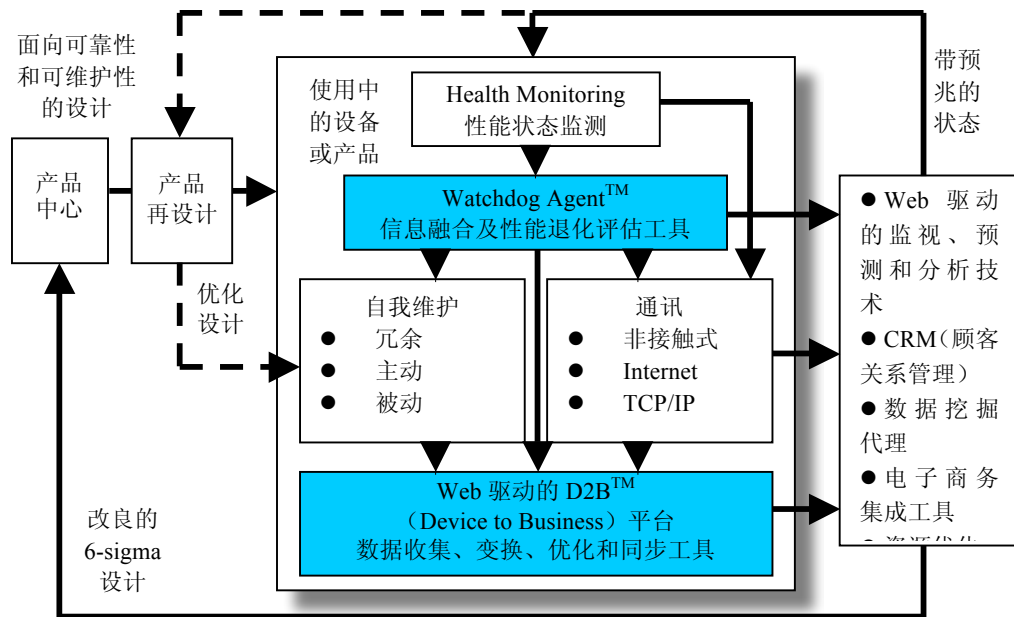


图 2 智能维护系统 (IMS) 构架

图 2 显示, 智能维护系统可通过 Web 驱动的电子信息 ( infotronics ) 平台对设备和产品进行不间断的监测诊断和性能退化评估, 并作出维护决策。同时, 智能维护系统还能通过 Web 驱动的智能代理与电子商务工具 ( 如客户关系管理 CRM, 供应链管理 SCM, 企业资源管理 ERP ) 进行整合, 从而获得高质量的全套服务解决方案。另外, 智能维护系统所得到的信息知识还可用于产品的再设计和优化设计, 从而使未来的设备和产品达到自我维护的境界。

图中亦显示, 智能维护系统的核心技术是对设备和产品的性能衰退过程的预测和评估, 围绕这一核心, 智能维护的应用基础研究主要包括以下几个领域:

- **设备和产品的性能衰退过程的预测评估算法、方法研究。** 要对设备或产品进行预测维护, 必须提前预测其性能衰退状态。与现有的故障早期诊断不同的是, 智能维护侧重于对设备或产品未来性能衰退状态的全过程走向预测, 而不在于某个时间点的性能状态诊断, 因此, 其不论在理念上, 还是在方法上, 都是有很大不同的。其次, 进行预测和决策时, 在分析历史数据的同时, 智能维护引入了与同类设备进行比较的策略 ( P2P: peer-to-peer ), 因而大大提高了预测和决策的准确度。P2P 是对传统故障诊断方法的一种超越。另外, 在采集设备和产品的信息时, 智能维护强调“相关信息” ( 包括人的反馈信息 ) 的采集和有效“融合” ( 包括低层次和高层次的融合 ), 并根据人脑的信息处理方式从中综合提取性能预测所需的信息。

- **按需式远程监测维护领域。**随着 Internet 和 Web 技术的发展，利用 Internet 和 Web 来进行实时监测数据的传输也已逐渐成为研究热点。按需式远程维护是指利用现代信息电子（infotronics）技术实现异地间设备和产品性能衰退的监测、预测，并提出维护方案等的一系列行为，其强调的是根据实际的需要传输所需的“**信息**”，即根据设备和产品在不同环境下的各种性能衰退过程的实际快慢程度，及时地调整相应信息的传输频度和数量，而不是传统意义上的简单的“**数据**”（采样信号等）传输。
- **决策的支持、数据的转换和信息的优化同步技术领域。**为了实现真正意义上的电子商务、电子化制造和电子化服务，智能维护系统必须与现有的企业商务系统（CRM、SCM、ERP、MES 等）进行信息交互，因此，智能维护强调的是“信息一次处理（O.H.I.O. Only Handle Information Once）”。为此，李杰教授提出 **D2B ( Device to Business )** 的理念。D2B 平台的建立不仅为维护决策提供了平台工具，而且第一次实现了设备层到商务层的直接对话，并为产品的再优化设计提供了原始数据。当然，在维护决策时，D2B 平台系统同样采用 P2P 技术，以加强决策的准确性。经过几年的努力，智能维护技术在国外得到了飞速发展。

从预测领域来说，传统的预测模型主要有三种：线形预测模型、非线性预测模型和人工神经网络预测模型。典型的线形预测模型有 1926 年 Yule 提出的 AR (Auto Regressive) 模型和 1976 年 Box、Jenkins 提出的 ARMA/ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) 模型，其局限条件是信号必须是线形的；典型的非线性模型有 Tong、Lim 提出的 TAR (Threshold Auto Regressive) 模型<sup>[5]</sup>，其是一个全局的非线性模型，当时间序列在不同的情况下具有非平稳性时，这一模型非常有用，但是，虽然它消除了线形模型的条件限制，它在模型构建时的复杂性也成倍增加；神经网络预测模型与前两种预测模型相比，其无论在短时预测，还是长时预测，都有着无比的优越性<sup>[6-8]</sup>。神经网络预测模型已成为了预测领域的研究热点。1992，Lee 率先把神经网络预测技术用于对设备性能衰退的预测分析上<sup>[2, 23]</sup>，由此，拉开了预测技术在智能维护领域的应用。自智能维护系统中心成立以来，在性能预测方法上已有不少成果。Tong 及 Lee 从控制理论出发，结合神经网络，在不改变原有控制系统的条件下，提出了基于控制系统规则的性能评估方法<sup>[9]</sup>，并在 ABS 刹车系统上得到了应用；Yan 及 Lee 利用逻辑回归算法对电梯的性能衰退状态作出了评估，并对残余寿命进行了预测，为电梯的维护决策提供了有力支持<sup>[10]</sup>；Wang 及 Lee 提出了小波神经网络性能评估预测算法，并对机床主轴和刀具的磨损情况进行了评估和预测<sup>[11]</sup>。不过，智能维护作为一种新型的维护技术，由于其还处于发展的起步阶段，许多的性能预测算法还处于理论研究阶段，特别是对设备或产品的残余寿命预测技术，以及如何利用 P2P 技术，尚处于空白阶段。

在远程维护领域，远程监测诊断最早是从远程医学开始的，随着 Internet/Intranet 技术的发展，利用计算机网络远程对设备和产品进行监测诊断已成为一个研究热点。在目前的远程监测诊断系统中，对数据的分析处理一般都在远程的诊断中心完成。Jay Lee 在文献<sup>[12]</sup>中，提出了远程服务系统框架及面临的关键技术和挑战机遇。其指出，由于设备和产品的数据监测量及其庞大，无法利用网络直接进行实时传输，因此，只有对原始监测数据在当地进行处理后，再根据实际情况传输诊断所需的信息，才具有更大的使用价值。为此，必须加强对数据到信息的转换、嵌入式智能代理和非接触式（如无线通讯）等技术的应用研究工作。在数据优化同步领域，D2B 技术尚处于理论研究阶段。D2B 平台系统的体系结构、信息的格式、与其它商务系统的连接，以及如何利用智能维护的信息进行产品再优化设计等问题都有待于进一步的研究。

在国外的工业界，智能维护技术也在逐步的得到应用。美国普惠（Pratt & Whitney）飞机发动机公司在最近生产的飞机发动机中，加入了很多新型的监测技术，并集成了自我诊

断系统，它们能够产生详尽的信息配合地面分析系统使用，从而提前几个月就可预测发动机是否需要维护。这为各航班安排发动机的维护计划提供了方便，从而降低了检查和维修成本，而以往发生故障时，仅确定故障原因就要很长的时间。发动机的自我监测/诊断系统与地面分析系统相结合，大大降低了意外事故的发生，如航班误点、航班取消和飞行中的发动机故障停机事故等。欧洲空中客车飞机制造公司也采用了类似的技术<sup>[13]</sup>。在运输行业，汽车制造厂商也在寻找一种利用远程通讯技术为汽车提供导向和故障停靠帮助的方法。通用汽车（GM）公司已经制定了一个利用卫星通讯服务的 OnStar 计划，即到 2005 年，给所有该公司生产的汽车装上经过改良的卫星通讯设施。在电梯制造业，OTIS 作为世界上最大的电梯制造公司，以其所采用的 REM（Remote Elevator Maintenance）技术，每年能节省 5 亿美金的维护费用。日本东芝电梯公司也与东京大学合作，在开发类似的维护系统。这都为智能维护技术的发展提供了良好的研究和应用平台。

## 2 智能维护重大发展机遇

智能维护作为一种新的理念，在科技极为发达的美国，其发展也不过几年时间。应该看到，智能维护技术即使在国外，也还研究得不够深入、不够成熟，如果我们能够在已开展的工作和已取得的成果的基础上，投入一定的人力和物力，集中优势兵力围绕三个技术领域有重点地开展攻关，达到国际领先水平是完全可能的。

参考文献：

1. S K. *Hot Technologies*. Fortune Magazine, June 24, 2002: 162[F-H].
2. Lee J, Kramer B M. *Analysis of Machine Degradation using a Neural Networks Based Pattern Discrimination Model*. J. Manufacturing Systems. 1992, 12(3): 379-387.
3. Lee J. *Measurement of machine performance degradation using a neural network model*. Journal of Computers in Industry. 1996, 30: 193.
4. IMS Center Web Site [www.imscenter.net](http://www.imscenter.net)
5. Tong H, Lim K S. *Threshold Autoregressive, Limit Cycles and Cyclical Data*. Journal of Royal Stat. society, 1980, series B, No.3.
6. Lapedes A, Farber R. *Nonlinear signal processing using neural networks: prediction and system modeling*. Technical Report LA-UR-87-2662, Los Alamos National Laboratory, 1987.
7. Tang Z, Almeida C, Fishwick P A. *Time Series Forecasting Using Neural Networks vs. Box-Jenkins Methodology*. Simulation, 1991, Vol. 57, No. 5.
8. Weigend A S, Rumelhart D E, Huberman B A. *Predicting the future: a connectionist approach*. International Journal of Neural System, 1990, No.3
9. Tong G F, Koc M, Lee J. *System Performance Assessment Based On Control System Criteria Under Operational Conditions*. Proceedings of MIM 2002: 5th International Conference on Managing Innovations in Manufacturing (MIM), Milwaukee, Wisconsin, USA, September 9-11, 2002: 418-426
10. Yan J H, Koç M, Lee J. *Predictive algorithm for machine degradation detection using logistic regression*. Proceedings of MIM 2002: 5th International Conference on Managing Innovations in Manufacturing (MIM), Milwaukee, Wisconsin, USA, September 9-11, 2002
11. Wang X, Yu G, Koc M, Lee J. *Wavelet neural network for machining performance assessment and its implication to machinery prognostic*. Proceedings of MIM 2002: 5th

International Conference on Managing Innovations in Manufacturing (MIM), Milwaukee, Wisconsin, USA, September 9-11, 2002: 150-156

12. Lee J. Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1998, 38: 901-910
13. Robert Pool. If It Ain't Broke, Fix It. <http://www.technologyreview.com/articles/pool0901.asp>, September 2001.
14. 袁小宏、赵仲生、屈梁生。粗糙集理论在机械故障诊断中的应用研究。西安交通大学学报, 2001, 35 (9) : 954-957。
15. 贾民平、钟秉林、黄仁。虚拟现实在旋转机械故障诊断中的应用。中国机械工程, 1997, 8 (2) : 90-93。
16. 张中民、卢文祥、杨叔子。基于小波系数包络谱的滚动轴承故障诊断。振动工程学报, 1998, 11 (1) : 65-69。
17. 姜鸣、陈进、秦恺。循环周期图在滚动轴承故障诊断中的应用。机械科学与技术, 2002, 21 (1) : 108-110。
18. 吴伟蔚、杨叔子。故障诊断 Agent 研究。振动工程学报, 2000, 13 (3) : 393-399。
19. 张雪江、何永勇、许飞云、钟秉林。汽轮发电机组故障诊断专家系统的研究。计算机工程与设计, 1996, 17 (2) : 3-9。
20. 韩西京、张锦萍、赵淳生、史铁林。汽轮发电机组状态监测与故障诊断系统。振动、测试与诊断, 1998, 19 (3) : 222-228
21. 李杰 (Lee, J.), 数字化服务技术及其与设计、制造的集成, 中国机械工程, 1998, Vol. 9
22. 李杰 (Lee, J.), 关于未来制造业的战略思考, 中国机械工程, 1999, Vol. 4
23. Lee, J. and Wang, B. Book on "Modern Computer-aided Maintenance: *Methodology and Practices*," Kluwer Academic Publishing, 1998.
24. Djurdjanovic, Dragan, Ni, J, Lee, J "Time-frequency Based Sensor Fusion in the Assessment and Monitoring of Machine Performance Degradation," *Proceeding of ASME IMEC&E 2002*, New Orleans, LA, Nov. 2002.
25. Lee, J. and Ni, J, "Infotronics Agent for Tether-Free Prognostics," *Proceeding of AAAI Spring Symposium on Information Refinement and Revision for Decision Making: Modeling for Diagnostics, Prognostics, and Prediction*, Stanford Univ., Palo Alto, CA, March 25-27, 2002.