

故障预测技术研究

文/赵正华

传统的产品、设备和系统的维护方式主要分为两大类：故障后维护(Corrective Maintenance)和定期维护(Time-based Maintenance)。故障后维护，即运行设备直到产生故障再维护，是使用历史最久的维护方式。实行故障后维护，设备发生故障的时间无法预测，关键零部件的故障可能导致整台设备的瘫痪，从而造成停机时间长，维护成本高等后果，甚至具有很大危险性。定期维护是定期检修设备，并可以根据需要更换和调整某些元件。实行定期维护的维护成本高，制定合理的检修间隔也很困难，并可能造成欠维护或过维护。在维护不当的情况下，甚至可能损坏设备。

状态检修(Condition-based Maintenance, CBM)也称为视情维护，它根据设备的当前状态来决定是否进行维护。状态检修自20世纪70年代提出以后，逐渐受到人们重视，90年代依靠信息技术的迅速发展，ISO和IEEE等国际组织已经为状态检修制定了、相应的标准。状态检修的开放系统结构(OSA-CBM)标准给出了组成状态检修系统的七大模块：传感器模块、信号处理模块、状态监控模块、性能评估模块、故障预测模块、决策支持模块和表示模块等，其中故障预测模块是状态检修系统关键的组成部分。

故障预测技术作为CBM的核心技术，是实现企业维修体制改革的基础。据报道，美国工业界在故障后维护和定期维护上每年的费用都在2000亿美元以上。如果能够在发展故障预测技术的基础上，使用CBM技术进行维护，不仅能够大幅度降低维护费用，而且对于提高生产安全、降低生产成本以及延长设备使用寿命，都具有重大意义。

故障预测技术目前的研究仍然不够充分，相应的研究成果也不多。现有的故障预测技术大致可以分为三类：基于经验的故障预测方法、基于特征的故障预测方法以及基于对象物理模型的故障预测方法，图1给出了三类故障预测方法的层次分析。

一、基于经验的故障预测方法

根据产品或设备使用情况的历史统计数据，对相同产品或设备的使用寿命或可能出现的故障做出预测，即是基于经验的故障预测方法。在缺少对象物理模型和设备状态监控数据的情况下，基于经验对故障进行预测是唯一的方法，实际应用中可以根据设备的某类故障的概率密度函数来预测故障。

用这种方法进行故障预测，所需代价小，但预测结果不够准确，对于可靠性和安全性要求较低的设备可以基于经验来进行维护规划。

二、基于特征的故障预测方法

“特征”可以是产品、设备和系统当前的一个或几个状

态，也可以是某些状态的变换。基于特征的故障预测方法主要是找到设备当前状态同未来故障之间的映射关系，并用某种方法证实这种映射。应用适当的传感系统对设备进行监控是该方法实现故障预测的前提。基于特征的故障预测方法不需要建立复杂的对象物理模型，具有较大的可实现性，是当前故障预测技术的主要部分。

1. 基于神经网络的方法

使用神经网络进行故障预测是当前应用较多的方法。神经网络具有极强的非线性映射能力，对噪声不敏感等众多优点，在模式识别、故障诊断等领域得到广泛应用，也受到了故障预测技术研究人员的重视。

程惠涛等人基于神经网络，结合专家系统对空间推进系统的气路部分进行故障预测。傅闯等研究人员利用神经网络实现了电液伺服机构的故障预报。Kwan和Haynes详细介绍了应用神经网络分析红外摄像仪得到的齿轮变速箱热图像从而实现故障预报的方案。Jay Lee借助神经网络评估PUMA机器手的性能退化，

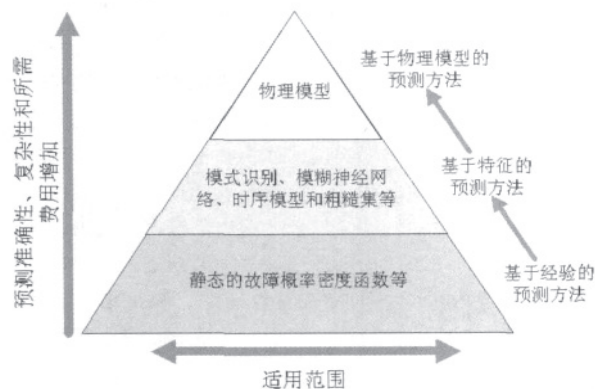


图1 故障预测方法的层次分析

并进行故障预报。李勇、叶荣学等人提出了基于时序递推神经网络(RMLP)的方法来预测汽轮发电机组的振动，并将预测结果同BP神经网络进行了比较。Garge利用确定的知识领域训练前馈神经网络，并结合混合推理进行故障预测。雷正伟等给出了概率神经网络进行故障预测的方法。此外还有研究人员对于模糊神经网络、动态小波神经网络和信息神经网络在故障预测中的应用进行了研究。

使用神经网络进行故障预测，必须首先使用已有的数据对神经网络进行训练。充分训练的神经网络对已有的数据序列有较高的拟合精度，但是对于训练中没有涉及的输入则不能给出令人满意的结果。另外，实际中使用的神经网络的结构也只能由经验确定。

2. 基于案例的方法

当具备同一产品、设备多个维护周期的大量历史数据，且各周期的状态数据具有一定的相似性时，可以使用历史数据同设备当前状态进行比较，并提取特征，从而达到故

障预测的目的, 这种方法称为基于案例的故障预测方法。Djurdjanovic将基于案例的故障预测方法(Match Matrix法)同ARMA预测法进行比较, 结果表明前者明显优于后者。

基于案例的故障预测方法简单实用, 在设备工作环境相同的情况下, 预测结果具有较高精度。但它要求具有大量的设备状态历史数据, 并且各维护周期中设备的性能退化和故障发展过程具有相似性, 这些都限制了该方法的使用范围。

3. 基于经典时序的方法

根据产品、设备或系统当前和过去的状态数据, 利用经典时序分析方法(如自回归滑动平均模型ARMA、自回归模型AR等)对未来的状态进行预测, 利用状态的预测结果判断是否有故障将要发生。利用该方法进行故障预测首先应根据状态的历史数据完成时序模型的结构辨识和参数辨识, 模型的正确辨识是实现故障预测的前提。基于经典时序分析的方法适用于平稳时间序列的预测, Jay Lee等人对使用ARMA模型预测转轴负载的变化进行了介绍。

4. 基于小波分析的方法

小波分解是在傅立叶分解的基础上提出的, 它非常适合检测信号的突变。小波分析不但在故障诊断领域中广泛应用, 在故障预测技术的研究中也受到人们的重视。

徐科等人通过小波分解将非平稳时间序列分解为多层近似意义上的平稳时间序列, 然后对各平稳时间序列使用相应的AR(n)模型进行预报, 再通过小波反变换达到原非平稳时间序列预报的目的。结果表明该方法相对于使用BP神经网络进行预报不仅精度高, 而且速度快。Zanarardelli详细研究了小波分析方法在分别同线性判别函数法、最近邻法和滤波器组(Filter Bank)结合使用时的故障预测方法。

5. 基于模糊理论的方法

Zadeh于1965年首次提出模糊理论以来, 模糊理论在控制、模式识别和决策等许多领域得到了广泛的应用, 模糊理论的建立大大提高了人类对于模糊信息的处理能力。模糊系统可以处理高度复杂和非线性的问题, 并能够依据人们容易理解的语句规则(Linguistic Rules)来作出决策。将模糊理论引入到故障预测当中, 为解决该问题提供了新的思路。

黄景德等人对预测知识采用模糊化描述方法, 在模糊综合评判原理的基础上, 建立了一种故障预测模糊推理机制, 并开发了故障模糊预测系统FFFS。汪云等研究人员应用离线模糊自学习故障诊断方法实现了电控柴油机的故障诊断与故障预测。

应用模糊理论进行故障预测, 需要事先建立故障和特征状态之间的模糊关系矩阵, 以及故障预测推理规则库, 这些工作都带有一定的主观性, 并且需要领域专家的参与。

6. 基于灰色理论的方法

灰色系统是区别于白色系统和黑色系统而言, 即部分信息明确、部分信息不明确的系统。邓聚龙教授于1982年提出灰色系统理论, 其理论简洁、思想新颖, 已在许多领域特别是社会经济系统中得到广泛的应用。该理论针对系统的状态特征数据采用独特的被称为累加生成(Accumulated Generating Operation, AGO)的数据处理方法。设某一状态原始数据序列为:

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (1)$$

进行一次累加生成(1-AGO)后, 得新数据序列:

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (2)$$

其中: $x^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k), i=1, 2, \dots, n$

根据灰色理论, 累加生成增加了序列的规律性, 使其呈指数增长, 对一次累加生成之后的数据应用灰色模型(Gray Model, GM)实现灰色预测。该模型为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \quad (3)$$

离散化后得到一个线性方程组, 根据已知的原始状态序列对方程组使用最小二乘进行估计参数a和u, 最后得到灰色预报结果:

$$x^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (4)$$

国内应用灰色理论进行故障预报的一些研究成果如表1所示。

表1 基于灰色理论的故障预测研究成果

文献	预测方法	应用
见注[1]	灰色理论结合专家系统	空间推进系统气路部分的故障预测
见注[2]	对灰色模型GM(1,1)拓展得到的GM(1,1,w)预测模型	合金20CrMnMo和20Cr13的使用寿命预测
见注[3]	灰色理论的关联度分析和灰色模型	旋转机械的故障诊断和预测
见注[4, 5]	将灰色模型和自回归模型结合使用	对工业现场某大型电机-水泵机组裂度趋势进行预测以及航空发动机磨损预测
见注[6]	灰色理论结合神经网络	某高炉鼓风机轴承状态的智能预测

[注]:

[1] 程惠涛, 黄文虎, 姜兴渭, 基于灰色模型的故障预报技术及其在空间推进系统上的应用. 推进技术, 1998. 19(3): p. 74-77.

[2] 陈举华, 郭毅之, GM模糊优化方法在小子样机械系统故障预测中的应用. 中国机械工程, 2002. 13(19): p. 1658-1661.

[3] 靳春梅, 樊灵, 邱阳, 段志善, 灰色理论在旋转机械故障诊断与预报中的应用. 应用力学学报, 2000. 17(3): p. 74-80.

[4] 徐小力, 徐勇, 王信义, 机器状态趋势分析及在注水机组上的应用. 北京理工大学学报, 1998. 18(4): p. 441-443.

[5] 周新立, 钟新辉, 李艳, 基于灰色时序的航空发动机磨损故障预测模型. 长沙航空职业技术学院学报, 2004. 4(1): p. 20-22.

[6] 董振兴, 史定国, 张东山, 杨汝清, 基于灰色理论的机械设备智能状态预测. 华东理工大学学报, 2001. 27(4): p. 392-394.

灰色预测模型根据研究对象的自身数据建立微分方程, 然后预测其状态的发展, 不需要对设备或系统的内在

工作机理进行研究，因此该方法特别适用于较为复杂的系统的故障预测。

7. 基于贝叶斯决策的方法

基于贝叶斯决策的方法把故障预测问题作为一个模式识别问题，并要求设备状态类别总体的概率分布已知。Hammerly介绍了分别使用标准监督型初级贝叶斯分类器（Standard supervised naïve Byes classifier）和初级贝叶斯子模型混合方法（Mixture of naïve Byes submodels）对硬盘进行故障预测，结果表明作者提出的方法明显优于传统硬盘故障预报使用的特定门限法。

8. 基于粗糙集的方法

粗糙(Rough) 集理论最先由波兰学者Pawlak提出，是一种处理不确定知识的重要工具。在知识发现领域，应用粗糙集理论能够有效地产生判别规则和特征规则。近年来，粗糙集理论在数据挖掘、机器学习和故障诊断等许多领域得到广泛的应用。

Letourneau等人使用粗糙集预测飞机的故障，针对所研究的飞机某零部件，根据传感器得到的状态数据。Pena首先对所选择的有用数据进行离散化和属性约简，然后利用监督学习方法一变精度粗糙集模型法(Variable Precision Rough Set Model, VPRSM)产生一组有效的飞机零部件故障预测规则集。这样的规则集经过后处理即可应用于飞机的故障预测。

9. 其他

一般的故障预测方法都是面向具体对象的方法，尽管该技术仍处于发展阶段，目前研究人员已经提出多种方法。除以上介绍的方法外，其他一些基于特征的故障预测方法列于表2。

表2 其它基于特征的故障预测方法

文献	故障预测方法	优缺点分析	应用领域
见注 [7]	免疫系统的反面选择算法	适用于传统诊断和预测方法所无法提取故障特征的复杂系统，操作简单且无变换误差	转动设备的故障诊断及预测
见注 [8]	运用Kolmogorov复杂性分析方法作为复杂性测度对电路进行分析	使用非接触方法进行电路故障征兆检测，快捷、简便、安全	高频逆变式等离子切割加工装置电源的故障预测
见注 [9]	对生产工序的合格率进行统计	可操作性强	半导体制造业的自动化机械设备的故障预测
见注 [10]	利用主元分析法(PCA)对多传感器收集的数据进行分析	利用PCA法减少噪声的干扰，简化数据处理	离心泵故障预测

【注】：

[7] 高俊峰，刘树林，王日新，反面选择算法在转动设备故障预测中的应用. 石油机械, 2002. 30(6): p. 33-36.

[8] 吴为麟，朱宁，复杂性测度分析在电力电子电路故障预测中的应用. 2003. 25(5): p. 677-682.

[9] 聂斌，齐二石，基于统计合格率管理自动化机械

设备故障预测方法. 机械设计, 2004. 21(6): p. 34-37.

[10] D.R.Lewin, Predictive maintenance using PCA. Control Eng.Practice, 1995. 3(3): p. 415-421.

三、基于物理模型的故障预测方法

在能够按一定要求建立对象物理模型的情况下，可以基于物理模型进行故障预测。相对于前述两类方法，基于物理模型进行故障预测结果更准确，但所付出的代价也更高。可以从两个角度使用物理模型进行故障预报：

1. 以残差作为特征进行故障预报

残差是指某时刻设备或系统的测量输出与对象物理模型输出之差。在正常运行的情况下，尽管存在扰动和建模误差，残差均维持在较小水平；而异常情况出现时，残差有增大趋势，由此即可进行故障预测。Jianhui Luo等人对某汽车建模的基础上，使用该方法实现了汽车性能退化和剩余寿命的预测。

2. 根据设备或系统的当前状态预测

基于对象物理模型，估计未来状态，并据此进行故障预测。有关的典型实例是基于Kalman滤波器进行故障预测，Kalman滤波器是对系统状态估计的一组线性、离散化递推方程。其估计准则为状态估计误差极小，不仅能够用于状态估计，同样也可以进行状态预报。S.K.Yang和T.S.Liu两人使用Kalman滤波器对直流电机工作状态进行预测，并通过长时间实验对方法的可行性进行验证。

从以上介绍的各种方法可以看到，故障预测技术在设计上能够做到通用，但在应用中却必须结合实际对象，这与故障诊断技术具有相似性。另外，随着各种各样的故障预测方法的不断提出，多故障预测方法的融合技术的研究也具有实际意义。

产品或设备的故障时间和寿命预测必须考虑预测的准确性，即预测结果的不确定度问题。故障发生时间或设备使用寿命不仅与当前状态有关，未来的使用情况和其它一些随机因素也会影响真正的使用期限。因此，即使得到的系统状态数据十分精确，并拥有理想的特征提取方法和寿命估计算法，在理论上仍然不能够完全准确地估计剩余寿命和故障时间。但是，随着设备使用时间的增长，剩余寿命的估计不确定度会越来越小，发展能够给出预测不确定度的故障预测方法是未来的研究方向之一。

研究预测算法有必要评估各种预测方法的优劣，这主要是对各种预测方法的预测结果进行比较。目前提出的有关评估方法还不多，主要是基于赤池信息准则（Akaike Information Criterion, AIC）、绝对误差均值、误差均方根和归一化均方根等。

对于前述三类故障预测方法，一般情况下基于经验的方法并不具有实用性。尽管当前故障和预测技术的主流是基于特征的故障预测方法，但是考虑到预测的准确性要求，未来的发展方向应着眼于利用对象的物理模型进行预测。在制造业领域，基于模型的设计技术的迅速发展也为基于模型的故障预测技术提供了有力支持。

（作者单位：浙江省建材技工学校）