

# 第 1 章

## 绪论

### 1.1 引言

随着设备使用时间的增加,设备中的零部件会出现结构损伤或者功能故障。广义上讲,这些结构性损伤和功能故障均可以称之为故障。对设备进行维护可以在一定程度上修复或者避免故障的发生。根据英国设备维护工艺学使用的术语词汇和《中华人民共和国国家标准》GB/T 3187—94 中的相关定义,维护是指为保持或者恢复产品处于能执行规定功能的状态所进行的所有技术和管理,包括监督的活动。在工业生产中,对设备维护能够使设备安全运行,降低突发事件的可能性,避免人员伤亡和设备损失。维护计划已经成为企业运行计划的重要组成部分。经过多年的发展,维护理论经历了事后维修、定时维修、基于状态的维护和预测性维护等过程。各种维护方式的优缺点对比如表 1-1 所示。

表 1-1 各种维护方式的优缺点对比

维修/维护方式	优 点	缺 点
事后维修	能够最大化地使用零部件寿命	<ul style="list-style-type: none"><li>• 非计划停机次数多;</li><li>• 对安全、环境、生产、维修成本影响较大;</li><li>• 设备事故多、经济损失大;</li><li>• 设备管控具有不可控性</li></ul>
基于时间的预防维护	在一定程度上考虑设备的状态,一定程度上避免事故的发生	<ul style="list-style-type: none"><li>• 可能会产生“欠维护”和“过维护”;</li><li>• 维修成本浪费或缩短设备运行周期</li></ul>
基于状态的维护	根据设备的实时状态情况进行维护决策	<ul style="list-style-type: none"><li>• 一些微弱故障未能及时检修;</li><li>• 强调当前的设备状态,不强调未来设备状态</li></ul>
预测性维护	在状态维护的基础上,更具有前瞻性	<ul style="list-style-type: none"><li>• 预测结果可能不准确导致维护结果不合理;</li><li>• 软硬件成本比较高</li></ul>

智能运维是建立在故障预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)基础上的一种新的维护方式。它包含完善的自检和自诊断能力,包括对大型装备进行实时监督和故障报警,并能实施远程故障集中报警和维护信息的综合管理分析。借助智能运维,可以减少维护保障费用,提高设备可靠性和安全性,降低失效时发生的风险,在对安全性和可靠性要求较高的领域起着至关重要的作用。利用最新的传感检测、信号处理和大数据分析技术,针对装备的各项参数以及运行过程中的振动、位移和温度等参数进行实时在线/离线检测,并自动判别装备性能退化趋势,设定维护的最佳时机,以改善设备的状态,延缓设备的退化,降低突发性失效发生的可能性,进一步减少维护损失,延长设备的使用寿命。在智能运维策略下,管理人员可以根据预测信息来判断失效何时发生,从而可以安排人员在系统失效发生前某个合适的时机,对系统实施维护以避免重大事故发生,同时还可以减少备件存储数量,降低存储费用。

智能运维利用装备监测到的数据进行维修决策,基于设备当前运行信息,实现对装备未来健康状况的有效估计,并获得装备在某一时间的故障率、可靠度函数或剩余寿命分布函数。利用决策目标(维修成本、传统可靠性和运行可靠性等)和决策变量(维修间隔和维修等级等)之间的关系建立维修决策模型。目前,针对维修决策模型的理论研究较多,但工程应用效果不尽理想。智能运维的最终目标是减少对人员因素的依赖,逐步信任机器,实现机器的自判、自断和自决。智能运维技术已经成为新运维演化的一个开端。

### 1.1.1 PHM 技术

PHM 技术是 20 世纪 70 年代中期,从基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测,并呈现出蓬勃的发展态势。从概念内涵上讲,PHM 技术从外部测试、机内测试、状态监测和故障诊断发展而来,涉及故障预测和健康管理两大方面的内容。故障预测即 PHM 中的 P(prognostics)部分,主要是指根据系统历史和当前的监测数据诊断、预测其当前和将来的健康状态、性能衰退和故障的发生;健康管理即 PHM 中的 HM(health management),主要是指根据诊断、评估、预测的结果,结合可用的维修资源和设备使用要求等知识,对任务、维修与保障等活动做出适当规划、决策、计划与协调的能力。

PHM 技术的主要功能如图 1-1 所示,主要包括关键系统/部件的实时状态监控(传感器监测参数与性能指标等参数的监测)、故障判别(故障检测与隔离)、健康预测(包括性能趋势、使用寿命及故障的预测)、辅助决策(包括维修与任务的辅助决策)和资源管理(包括备品备件、保障设备等维修保障资源管理)、信息应需传输(包括故障选择性报告、信息压缩传输等)与管理等方面。

PHM 技术代表了一种理念的转变,是装备管理从事后处置、被动维护,到定期检查、主动防护,再到事先预测、综合管理不断深入的结果,旨在实现从基于传感器



的诊断向基于智能系统的预测转变,从忽略对象性能退化的控制调节向考虑性能退化的控制调节转变,从静态任务规划向动态任务规划转变,从定期维修到视情维修转变,从被动保障到主动保障转变。故障预测可向短期协调控制提供参数调整时机,向中期任务规划提供参考信息,向维护决策提供依据信息。故障预测是实现控制参数、任务规划和视情维修的前提,是提高装备六性(可靠性、安全性、维修性、测试性、保障性和环境适应性)和降低全寿命周期费用的核心。近年来,PHM 技术受到了学术界和工业界的高度重视,在机械、电子、航空、航天、船舶、汽车、石化、冶金和电力等多个行业领域得到了广泛的应用。

PHM 技术并不适用于所有的对象,是否采取 PHM 技术对设备进行管理需要同时考虑故障的频率和故障影响的大小,如图 1-2 所示。对于故障频率高、故障影响小的设备应准备更多的备件。对于故障频率高、故障影响大的设备主要是系统设计的问题,需要改进设计。对于故障频率低、故障影响小的设备采用传统的维护方式即可。对于故障频率低、故障影响大的设备应采用 PHM 技术对其进行管理。



图 1-2 维护方式的选择

### 1.1.2 国外 PHM 技术发展

随着系统和设备复杂性的增加以及信息技术的发展,国外的 PHM 技术发展

先后经历了外部测试、机内测试(Built-in Test,简称BIT)、智能BIT、综合诊断、PHM共5个阶段。与此同时,维修决策技术的发展也经历了事后维修、周期性预防维护、状态维护等阶段。目前,PHM技术已经得到美国、英国等军事强国的深度研究与推广应用,并正在成为新一代飞机、舰船和车辆等武器装备研制阶段与使用阶段的重要组成。代表性的PHM相关系统包括:F-35飞机PHM系统、直升机健康与使用监控系统(HUMS)、波音公司的飞机状态管理系统(AHM)、NASA飞行器综合健康管理(IVHM)、美国海军综合状态评估系统(ICAS)以及预测增强诊断系统(PEDS)。其中PHM技术在F-35战斗机上的应用最为典型,图1-3为F-35战斗机PHM系统工作流程。

根据美军的统计数据,F-35战斗机采用PHM技术后故障不可复现率降低82%,维修人力减少20%~40%,后勤规模减小50%,出动架次率提高25%,飞机的使用与保障费用比过去机种减少50%,使用寿命达8000飞行小时。基于上述指标,通俗地理解原来有100架飞机,实施PHM后可以当成125架飞机来用。

验证评价是确认PHM设计结果是否达到设计要求,从而对设计完善和改进提出反馈的重要手段,是PHM设计开发、成熟化部署应用的关键环节。国外已经公开的PHM验证系统如表1-2所示。

表 1-2 国外已经公开的 PHM 相关验证系统

开 发 商	验 证 系 统	现 状
Impact 公司、佐治亚理工学院	PHM 验证与评估虚拟测试台	用于 F-35 验证 PHM 技术方法的能力。F-35 系统供应商联合促成此平台,为设计提供反馈信息及建议
Impact 公司、Sikorsky 航空、佩恩实验室	波音公司 RITA HUMS 的度量评估工具(MET)	该工具用于评估检测相应算法的适用性。MET 利用带有注入故障数据的原型数据库进行验证
佐治亚理工学院	PEDS 系统 V&V 工具	利用大量数据,采用蒙特卡洛模拟法,产生足够的统计基准来评估诊断和预测算法的性能。对 PEDS 各主要模块单独进行验证评价
NASA Ames 研究中心	先进诊断预测测试台 ADAPT	针对航天电源系统及飞行控制作动系统进行半实物仿真验证,对可能造成安全威胁的故障采用仿真模拟;基于局域网的分布式架构,可实现人在回路的测试
NASA Ames 研究中心	Livingstone 符号模型及导航器模型检验	用于对基于模型诊断推理的验证。可嵌入到真实的 IVHM 开发环境,以论证和评估可能带给关键软件结构的影响
NASA、诺斯罗普格鲁曼公司	TA-5 IVHM 虚拟测试台(IVTB)	IVTB 将用于第二代可复用运载器风险降低计划飞行测试中所有综合健康管理试验的集成和验证
波音公司、史密斯宇航公司、华盛顿大学	波音健康管理工程环境 HMEE	OSA-CBM 的开放式结构,端到端的飞机健康管理系统测试环境,可实现半实物仿真,光纤网连接地理分布的多测试平台,机载对象和健康管理子系统/系统的联合运行

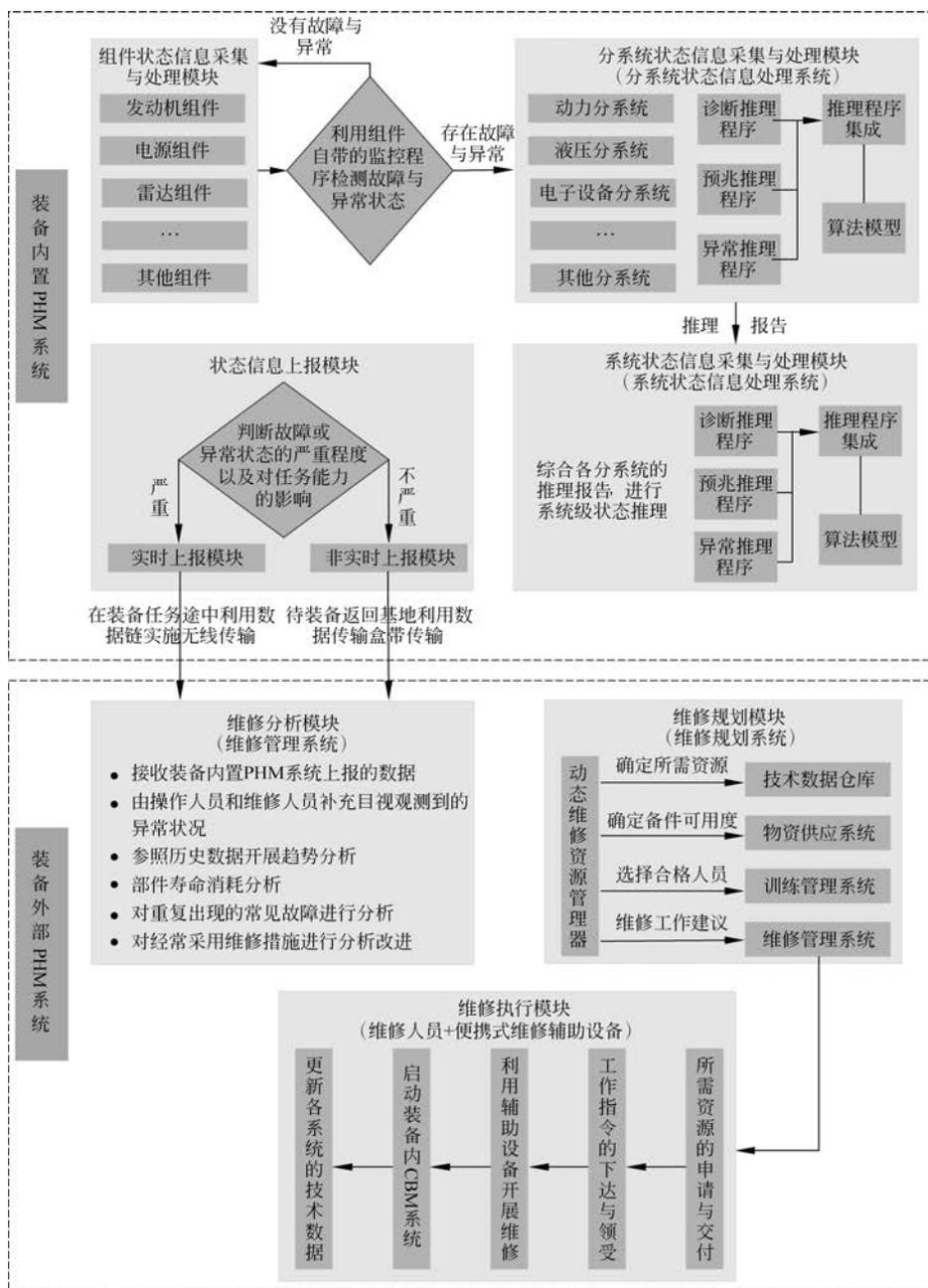


图 1-3 F-35 战斗机 PHM 系统工作流程

### 1.1.3 国内 PHM 技术发展

我国在 PHM 系统设计与验证基础理论与方法研究方面起步较晚,研究基础薄弱。近年来,国内相关院所主要在航空航天装备领域开展了一系列的 PHM 系统设计基础研究工作,并结合型号技术攻关,边研究边验证、迭代完善、双线并行,取得了一定的成果。目前,已初步构建了一套典型机电、电子、结构类产品的健康表征、健康度量与演化规律挖掘的方法体系,形成了相关的诊断与预测模型设计方法。此外,还开展了一定的 PHM 系统验证与评价、试验验证系统设计等技术方法研究,并形成了相关演示系统与辅助工具。

结合装备使用和维修保障情况,我国在航空、航天、船舶、兵器等领域正逐步开展相关工程技术研究。在 PHM 系统能力与需求分析基础上,从物理结构、综合诊断、信息处理以及功能结构等方面进行了 PHM 体系架构与集成的初步研究;与此同时,也开展了 PHM 系统参数指标体系、标准规范等研究。在上述研究基础之上,开发了相应的结构健康监测智能传感器、结构健康监测集成验证平台、机电 PHM 原型系统与案例库、系统测试性设计分析工具、嵌入式智能诊断原型系统,以辅助开展 PHM 系统设计。

PHM 技术在国内的研究起步较晚。虽然开展了大量的工作,并取得了显著的研究成果,但前期主要是跟踪国外工程应用,在相应基础理论与技术、系统综合集成等方面的研究还较少。作为 PHM 中的最为核心的技术之一——预测性维护,我国也与国外有着较大的差距。全球物联网知名研究机构 IoT Analytics 曾在 2016 年对全球 110 家从事预测性维护的技术性公司进行了调研和排名,具体情况如图 1-4 所示。

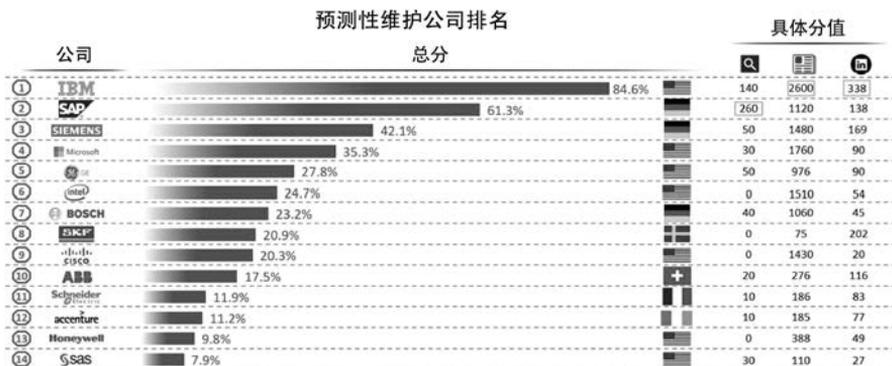


图 1-4 涉及预测性维护技术的公司排行榜(2016 年)

纵观整个 PHM 的框架,我国与国外的差距具体表现在:

(1) 在 PHM 系统集成与使能技术方面,国外已经开展了大量的相关研究和应

用工作,初期国内仅是跟踪国外的工程应用,设计方面相对落后,PHM系统集成与使能工具设计相关研究较少,工程应用亟待进一步深入研究。

(2) 在复杂系统健康管理方面,国外已开展了大量的基于 PHM 的维修决策研究工作和应用;同时,国外已在自愈材料、智能结构方面开展了大量的研究,部分技术已有应用。国内装备仍以周期性预防维护为主,基于 PHM 的装备任务规划与维修决策研究工作较少;我国在装备自愈研究方面开展较晚,自愈材料与智能结构研究方面以理论研究为主,而应用研究较少。

(3) 在复杂系统健康诊断与预测方面,国内外在此方面研究差距不大,某些方面已达到国际先进水平。在方法研究上,国内外均开展基于故障物理、数据驱动、模型、专家知识的诊断与预测技术研究。但是,在技术成熟度上与应用广度上,国外领先国内。尤其在应用于 PHM 的新型智能传感器技术及装置研发上,国外已远领先于国内。

(4) 在 PHM 能力试验验证方面,国外已开展了大量研究,国内在 PHM 设计验证方面,也开展了初步的研究工作,但目前还没有成熟的 PHM 体系综合建模、试验验证与能力评价技术方法体系,相关验证辅助工具与平台成果还较少。

国内外的 PHM 技术相关研究发展蓬勃,已形成不少的标准,近 10 年来与 PHM 相关的标准如表 1-3 所示。

表 1-3 PHM 相关标准

序号	标准号	标准名称	年份
1	SAE AIR6900-2019	Applicable Aircraft Integrated Vehicle Health Management (IVHM) Regulations, Policy, and Guidance	2019
2	IEEE 1856-2017	IEEE Standard Framework for Prognostics and Health Management of Electronic Systems	2017
3	SAE AIR5909-2016	Prognostic Metrics for Engine Health Management Systems	2016
4	SAE ARP5120-2016	Aircraft Gas Turbine Engine Health Management System Development and Integration Guide	2016
5	DS/ISO 13381-1-2012	Condition Monitoring and Diagnostics of Machines-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2012
6	ISO 13381-1-2015	Condition Monitoring and Diagnostics of Machines-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2015
7	ISO 16079-1-2017	Condition Monitoring and Diagnostics of Wind Turbines-Part 1: General Guidelines	2017
8	KS B ISO 13381-1-2016	Condition Monitoring and Diagnostics of Machines-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2016
9	BS ISO 13381-1-2015	Condition Monitoring and Diagnostics of Machines-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2015

续表

序号	标准号	标准名称	年份
10	AS ISO 13381.1-2014	Condition Monitoring and Diagnostics of Machines-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2014
11	ISO 13381-1-2015	Condition Monitoring and Diagnostics of Machine-Prognostics-Part 1: General Guidelines	2015

具体到 PHM 系统设计,其流程共分为以下 7 个步骤:

第 1 步:需求定义。

需求定义其实就是判断是否需要做 PHM。在设计 PHM 系统时首先要厘清问题的现状,做好问题的定义和问题的拆解。主要包括:在设备维护管理方面企业目前面临的挑战有哪些,如运维、质量、能效等;整个企业的预测性维护价值是多少;哪些设备或零部件可以确定为关键资产;是否有一些关键资产可以从预测性维护试点中受益;资产需要的可靠度和可用性的目标是什么。

第 2 步:监控层次定义。

确定监控层次主要是确定监控的对象,是产线、机器还是组件、部件。要选择哪些关键的组件、部件进行建模,以及需要关心哪些特定的故障模式等。在确定监控层次时需明确一点:并不是所有的设备或零部件都需要进行监测,只需要对故障发生频率不高,但故障发生后影响较大的设备或零部件进行监控。

第 3 步:模型选择。

根据监测的数量以及数据的质量,进行模型选择。模型主要包括数据驱动模型、机理式模型以及混合式模型。混合式的模型可以是不同的数据驱动式的模型混合,也可以是不同的机理式的模型混合,也可以是数据驱动模型和机理式的模型的混合。在建模时要考虑是强数据弱机理还是弱数据强机理,抑或数据和机理都强。如果机理较强而数据量较少则需要借鉴领域知识,应尽量采取机理式的模型。如果数据量较大而对机理不清晰,则适用于数据驱动模型。

第 4 步:关键参数选择。

选择关键参数与第 1 步和第 2 步密切相关,这一步主要是定义到底需要采集哪些数据。如果设备自身没有监测这些数据,则需要外加传感器。在使用传感器对设备进行状态监测时,需要考虑传感器的类型、数量,传感器的布局,传感器的大小、重量、成本、灵敏度、为有线传输还是无线传输、数据传输速率和其他特性。

第 5 步:部署策略和实验设计。

在此步骤开始采集一些能够进行可行性分析的数据,这些数据要能够尽量反映完整的工况,并且能够尽量覆盖不同的失效模式,要尽量能够支撑不同建模需求。最佳状态是可以采集设备或关键零部件的全寿命周期数据。所采集的数据具有典型的工业大数据“3B”特性,即质量差(Bad Quality)、碎片化(Broken)和背景性(Background)。

第6步：技术和经济性可行性研究。

验证整个系统从硬件到软件再到算法是否能够有机结合,算法能否闭环用户需求并实际传递给用户一些可执行的信息,同时对投资回报率等经济性的角度进行分析,判断上述方式能否在成本可控范围内最小程度定制化地推广。

第7步：技术开发与上线应用。

在确定技术和经济可行性之后,进行技术上线,并平行展开规模化的应用。

## 1.2 机械设备的故障诊断与预测

机械故障诊断与预测是借助机械、力学、电子、计算机、信号处理和人工智能等学科方面的技术对连续运行的机械装备的状态和故障进行监测、诊断和预测的一门现代化科学技术,并且已经迅速发展成为一门新兴学科。故障诊断是排除故障的基础。它可以做到以下几点:①能及时、正确地对各种异常状态做出诊断、预防或消除故障,对系统的运行进行必要的指导,提高系统运行的可靠性、安全性和有效性,从而把故障损失降低到最低水平。②保证系统发挥最大的设计能力,制定合理的检测维修制度,以便在允许的条件下充分挖掘系统潜力,延长服役期限和使用寿命,降低全寿命周期费用。③通过检测监视、故障分析和性能评估等为系统结构修改、优化设计、合理制造以及生产过程提供数据和信息。总之,故障诊断既要保证系统的安全可靠运行,又要获得更大的经济效益和社会效益。

广义的故障预测包括故障预测、失效预测、退化预测、剩余寿命预测和性能预测。预测的结果主要分为以下4类:模式、度量值、时间和概率。模式主要指即将发生的故障模式或失效模式。对于不可修复零部件来说,其失效模式即为故障模式。对于可修复零部件来说,一般而言,故障模式和失效模式略有区别。度量值主要是反映设备退化的状态监测量或健康指标,抑或是反映设备性能衰退的指标。时间主要是指从当前时刻到某一条件下的时刻,如从当前时刻到设备失效的时刻;从当前状态退化至某一状态所需的时间等。概率主要是指事件发生的概率,既包括故障发生的概率,也包括失效发生的概率。

无论是进行故障诊断还是进行故障预测,其基础是对设备进行状态监测,并采集能够反映设备性能退化的状态数据或者健康指标。这方面可以称之为信号获取与传感技术。可靠的信号获取与先进的传感技术是进行故障诊断和预测的前提,也是PHM技术中数据流动的基础。在PHM系统中的数据流动见图1-5。

传感技术是关于获取信息,并对之进行处理(变换)和识别的一门多学科交叉的现代科学与工程,它涉及传感器(又称换能器)、信息处理和识别的规划设计、开发、制/建造、测试、应用及评价改进等活动。获取信息靠各类传感器,传感器的功能与品质决定了传感系统获取自然信息的信息量和信息质量,是高品质传感技术系统的构造关键。

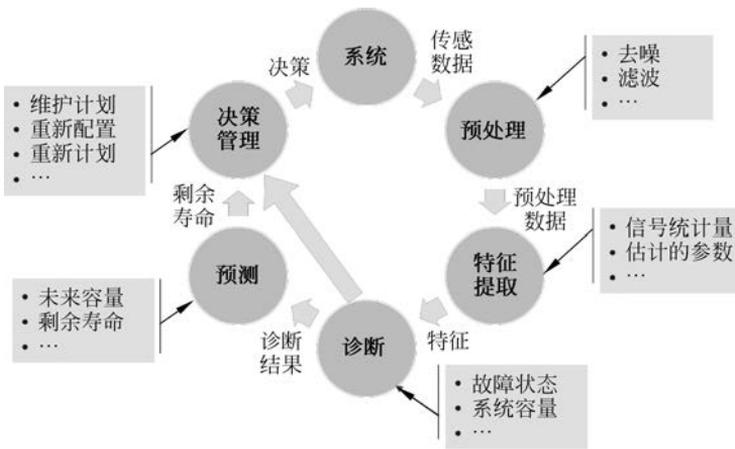


图 1-5 PHM 系统中的数据流动

通过传感系统获取信号,需采用恰当的处理方法,提取相关特征,才能准确获取所需要监测、分析或诊断的对象工作状态,做出正确的判断。需说明的是,监测的数据具有“3B”(Broken、Bad Quality、Background)特性,即数据分散在多个信息系统中,碎片化问题严重;工业现场环境恶劣,数据质量差;数据受到设备参数设定、工况、环境等背景信息的影响。因此,数据预处理主要是对状态监测数据进行“修正”,实现数据质量检测,降低异常数据的干扰;识别数据的背景信息,对不同工况下的数据分别进行标准化处理;整合碎片化数据,并准备建模和验证所需的数据集;通过数据变换强化“建模线索”。数据预处理主要包括:工况分割、数据清洗与平滑、数据质量检测、数据归一化、数据样本平衡和数据分割。

经过预处理之后的信号通常会进行信号处理或特征提取。常用的信号处理或者特征提取的方法有时域分析、频域分析、时频域分析等。①时域分析:时域分析作为信号处理方法中最为基础的一个部分,原理简单,表现直观,易于实现和理解,可反映瞬态特征。当频率比较低时,采用频域或者时频分析的方法效果可能不明显。信号不仅随时间变化,还与频率、相位等有关。时域分析只能简单地判断幅值是否超标,不能得出异常部位与原因。信号的时域参数相同,但不能说明信号就完全相同。②频域分析:此时需要进一步分析信号的频率结构,将时域信号变换至频域加以分析,在频率域中对信号进行描述,称为频域分析。频域分析反映的是信号的总体平均信息,不能体现一些特征信号分量随时间的变化情况。③时频域分析:时频分析方法可通过设计时间与频率的联合函数,提供时间域与频率域的联合分布信息,清楚地描述信号频率、幅值随时间变化的关系。

当前设备的故障诊断技术已逐步成为一门较为完整的新兴边缘综合工程学科,它大体上由3个部分组成:第1部分为故障诊断物理、化学过程的研究;第2部分为故障诊断信息学的研究,它主要研究故障信号的采集、选择、处理和分析过