

网络故障预测与健康管理的综述

温祥西, 孟相如, 李明迅

(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

摘 要 分析了故障预测与健康管理的 (PHM) 技术在网络维护保障中的重要意义, 重点讨论了当前网络 PHM 所采用的关键技术的研究现状, 包括网络管理机制、健康评估、故障预测、故障定位、故障识别以及健康管理等。总结了目前网络 PHM 关键技术存在的问题, 展望了未来发展的趋势, 并在此基础上提出了基于移动代理 (MA) 的分层分布式 PHM 体系结构和综合型 PHM 管理框架。

关键词 网络; 故障预测与健康管理的; 分层分布式; 移动代理

Survey on key technologies of network prognostic and health management

WEN Xiang-xi, MENG Xiang-ru, LI Ming-xun

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract This thesis analyzed the significance of prognostic and health management (PHM) in network maintenance support. The key technologies of network PHM: management mechanism, health evaluation, prognostic, fault localization, fault recognition and health management were emphatically discussed. Problems in key technologies of recent network PHM were summarized while the future developing trends were introduced. Based on these analyzes, the thesis proposes a hierarchical distributed structure on mobile agent and an integrated management framework for the network PHM system.

Keywords network; prognostic and health management; hierarchical distributed; mobile agent

1 引言

随着信息技术的飞速发展, 网络已逐渐成为 21 世纪全球最重要的基础设施, 其可靠性备受人们关注。人们应用需求的不断扩大带来了网络规模的不断扩大和网络结构的复杂化、综合化, 使得网络的维护和保障成本越来越高。同时, 由于网络组成和影响因素的增加, 其发生故障和功能失效的几率逐渐加大, 网络故障诊断和维护逐渐成为研究者关注的焦点。在军事领域, 人类战争已经进入信息化战争时代, 信息的掌控以及在战时的可靠传输成为左右现代战争胜负的关键, 近二十年世界发生的几次重要的局部战争无不在揭示这样一个道理: 网络保障已经成为战场综合实力的倍增器。考虑网络可靠性、安全性、经济性等问题, 在此引入以预测技术为核心的故障预测和健康管理 (PHM)^[1] 方法来提高网络保障的能力, 以实现网络的自主式保障。

2 PHM 概述

PHM 包含两方面的内容, 即故障预测 (prognostics) 和健康管理 (health management): 故障预测是指根据系统现在或历史性能状态预测性地诊断部件或系统完成其功能的状态 (未来的健康状态), 包括确定系统的剩余寿命或正常工作的时间长度; 健康管理是根据诊断/预测信息、可用维修资源和使用要求对维修活动做出适当决策的能力。它是从医学检查和诊断中受到启发, 并随着系统工程、信息论、控制论、电子技术、计算机技术、信息处理、人工智能等现代科学技术的发展而发展起来的一门新兴综合性交叉学科, 它的演变过程是人们认识和利用自然规律过程的一个典型反映, 即从对故障和异常事件的被动反应, 到主动预防, 再到事先预

收稿日期: 2011-03-13

资助项目: 陕西省自然科学基金 (SJ08F14, 2009JQ8008); 空军工程大学创新基金 (201105)

作者简介: 温祥西 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向: 人工智能和网络健康管理; 孟相如 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 宽带通信网络技术; 李明迅 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 网络故障预测。

测和综合规划管理^[2]。PHM 是一种全面故障检测、隔离和预测及健康管理技术, 它的引入不仅仅是为了消除故障, 更是为了了解和预报故障何时可能发生, 使得系统在尚未完全故障之前人们就能依据系统的当前健康状态决定何时、何处、采用哪种方式维修, 从而实现自助式保障, 降低使用和保障费用的目标。PHM 代表的是一种方法的转变, 一种维护策略和概念上的转变, 即从传统的诊断转向基于智能系统的预测; 从由事件主宰的维修 (即事后维修) 或时间相关的维修 (即定期维修) 向基于状态的维修 (condition based maintenance, CBM) 转变。PHM 技术对网络的维护保障具有重要意义, 主要表现在以下几个方面:

1) PHM 技术是推动网络管理维护制度改革、实行视情维修的必要手段。现行网络的管理维护方式还一直沿用事后维修和定期强制维修, 这就带来了一系列问题。事后维修、不坏不修, 这种方式隐含着较大的安全隐患; 定期强制维修、好坏都修, 往往造成盲目修理或失修现象。而基于网络 PHM 的视情维修方式可以很好地解决这些问题。

2) 发展网络 PHM 技术是提高网络维护效率和完好率、降低维护保障费用的迫切需要。PHM 系统可依靠其强大的状态监控和故障预测能力, 事先做出维修决策, 减少维护次数, 缩短维修时间, 可降低维护保障费用, 并提高网络的维护保障效率和完好率。

3) 应用网络 PHM 技术是提高网络 QoS 的有力保障。通过对网络状态的健康评估, 实时掌握其运行状况, 及时处理存在的问题, 可极大地降低由于网络故障引起的风险, 提供高质量的网络服务。

4) PHM 技术是实现统一调度资源和各部门协同保障的高效平台。在故障预测和健康管理的基础上, 通过 PHM 系统中的决策支持系统可协同各个相关部门, 优化资源配置, 简化工作流程, 解决传统网络维护保障模式“小而散”和保障效率低下等问题。

3 网络 PHM 关键技术研究现状

随着计算机、人工智能等技术的发展, PHM 已经由传统的人工方式向着以知识处理为核心的自动化、智能化方向快速跃进。一个完整的网络 PHM 系统具备如下功能: 网络健康评估、故障预测、故障诊断、故障定位、健康管理和寿命追踪^[3]。下面就网络 PHM 系统的几个关键环节的研究现状进行介绍。

3.1 网络管理机制

在构建网络 PHM 系统时, 首先需要考虑现在网络跨多个自治域的特点。到目前为止, 关于多域环境下网络管理的研究相对较少。Löb 等^[4]研究了分布式故障管理系统, 比较了集中式、非集中式和分布式诊断机制的准确性和可行性。Steinder 等^[5]提出了能够处理不确定性的跨多个自治域的分布式故障诊断模型, 将全局故障传播模型划分到各个自治域, 故障定位在所有自治域内进行, 以寻找最有可能的故障假设。然而, 在实际的网管系统中, 这将是非常耗时和低效的。因此, 多域环境下的网络管理需要首先缩小可能发生故障的范围, 然后再在该范围内启动网络管理程序, 以达到实时高效的目的。文献 [6] 基于主动网络提出一种多 Agent 的分布式智能网络管理模型, 采用证据理论实现不确定性推理, 通过组合不同的故障征兆, 以提高网络故障诊断的准确性。现在网络管理的另一个重要特点是涉及协议栈的多个层次以及跨层异构设备的协作, 文献 [7] 指出跨层信息交互能够提高网络管理的效率。Goldszmidt 等^[8]提出一种可在多个层次上进行事件相关性分析的网络管理方案。文献 [9] 根据通信网功能分层结构的思想, 建立了不同网络层次间的故障传播模型, 以及分布式告警相关性的实现框架。

总的来说, 跨层跨域传播是网络故障的重要特征, 而分层分布式诊断技术能够解决异构网络环境下的管理信息交互问题, 具有良好的扩展性和适应性, 并为其它智能技术以及诊断方法的应用提供集成框架, 是目前比较好的方法。

3.2 网络健康评估

网络的健康状态描述的是当前网络状态与期望的正常状态相比较的性能下降或偏差程度, 在 PHM 中它可用于指导后续的网络的故障管理和维护工作。

对于网络健康状况的评估, 主要的思想是通过反映网络性能状态的各个参数分别进行评估打分, 将各个评估结果加权融合得到最终的评估结果, 研究的难点是如何确定各个参数在网络性能评估中的权重。目前应用的方法主要包括: 模糊层次分析法、线性加权法、主成分分析法、模糊综合评价法、熵权法、BP 神经网络法和支撑向量机 (support vector machine, SVM) 法。其中, 模糊层次分析法和线性加权法都以主观方法确定权重^[10], 可能会由于人的主观因素而形成偏差; 主成分分析法^[11]解决了评估权重确定的问题, 但是其

中的用户关注度确定仍然是通过主观判断的;模糊综合评价法^[12]不能解决评估过程中模糊性和随机性关联的评估问题;熵权法^[13]采用信息熵的方法依据各个参数变化率确定其熵并以此作为各个参量在评估中的权重;神经网络法^[14]和 SVM 法^[15]都是采用模糊综合评价法取得评估值后进行训练建立模型,其模型的好坏受限于模糊综合评估方法.可以看出如何减弱甚至排除人为因素在评估过程中的影响,提高评估结果的客观性是现在评估方法探讨的重点.

3.3 网络故障预测

网络故障预测以当前系统的状态为起点,结合网络的近期健康度、特征参量及历史数据,通过相应的预测算法对网络健康状况进行分析,对系统未来时刻的运行状态进行预测、分析与决策,以便及时在故障发生之前采取有效措施保证网络的顺利运行.

对于网络故障,根据其性质可以分为突变故障和渐变故障.突变故障出现故障前无明显征兆,靠早期测量和监控很难预测,一般带有破坏性质,如由于战争或者自然灾害造成的路由器损坏、链路破坏等;渐变故障是指在网络运行中,某些链路节点因为不当的操作、设备老化等导致的网络拥塞等故障,这一类故障发展带有渐变性,可以通过前期对网络状态参量的测量和监控预测出来.网络故障预测研究工作主要是针对渐变故障,同时希望能够快速跟踪发现突发故障.

网络故障预测是 PHM 系统的核心部分,在某种意义上它是一种推理过程,目前的研究方向主要包括两个:通过基于时间窗口的告警相关性分析预测以及网络流量等网络特征的预测来预报故障.其中通过网络告警相关性分析预测网络故障^[16-18]的思想是:通过对告警进行合并和转化,将多个告警合并成一条具有更多信息量的告警,并根据历史告警同故障的对应关系预测出当前告警可能预示的故障.这种方法将故障预测问题转化为一个模式识别问题,问题的关键转变成为如何去构建知识库.由于网络的时延,故障的告警、征兆往往不能实时到达网管系统,同时,时间窗口的确定也是获取知识的难点.这种方法的研究重点落在如何处理网络时延、窗口的确定以及模式识别方法上.另一种方法是通过对流量等特征的预测来预测网络故障,这种方法可以很直观的得到未来网络的运行状况.目前,对于网络流量等特征的预测方法主要有:ARIMA、ARMA、指数平滑等显式线性方法^[19];基于神经网络、灰色模型、粒子滤波、SVM 以及组合方式的隐式非线性方法^[20-22].显式方法建立线性模型实现预测,简单但精度差.隐式方法能够较好的适应网络各状态参数高维、非线性等特点,具有较好的预测效果.以神经网络等学习方法为代表的隐式方法采用的是经验风险最小化原则,需要有足够大的样本数据数量,可能还会出现过学习问题导致模型推广能力较差的缺陷.基于结构风险最小化原则的 SVM 从理论上保证模型最大泛化能力,较好解决了小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,是现在较为先进、预测效果较好的方法^[22].

3.4 网络故障定位

为了尽量减小故障对于网络的影响,保证网络业务的高可用性和高可靠性,需要高效实用的故障定位算法.由于网络的互联性和开放性,网络故障之间存在着一定的关联关系,单一的网络故障可能导致大量的故障现象.这种故障的传播特性给故障准确定位带来了很大的困难,我们不能独立的看待这些事件,需要将事件联系起来才能找到故障真正的源头.网络故障定位就是要根据事件关联关系,从多个故障事件中定位故障源.

当前的故障定位算法主要包括两种:基于时间窗口的告警相关性分析方法和基于故障传播模型的方法^[23].网络故障定位可表示为: $A \Rightarrow F_{root}$, 即当前的告警集 A 是由根故障 F_{root} 引发的,经过告警关联^[24]则可以由 A 找出根告警 F_{root} .这种方法具有很高的处理效率,但是和基于时间窗口的告警相关性分析的故障预测方法一样,这种定位方式同样存在着难以处理时延以及时间窗口的确定等问题.基于故障传播模型的故障定位方法,通常建模对象包括对网元的故障状态建模、对告警之间的关系建模、对故障与告警之间关系建模.通常采用的模型有 Petri 网模型、FSM 模型、依赖图模型、因果图模型、贝叶斯网模型、二分图模型.尽管依赖图模型、因果图模型以及贝叶斯网模型,具有良好的建模能力,但由于模型的计算复杂度较高,在实际研究中采用的相对较少.二分图可以视为这些模型的简化,因其既保持了一定的建模能力,又具有较低的计算复杂度,而被大量采用.故障定位的求解算法包括:Yemini 等人提出了基于代码簿的故障定位方法^[25];Steinder 等人引入了贝叶斯网作为故障传播模型,并提出了 4 种近似推理算法^[26-28]:BE 算法、IBU 算法、IMPE 算法、IHU 算法;以及张成等人提出的 BSD^[29]算法等.但是,在网络规模大的情况下故障传播模型建立所需的先验知识将很难获取,同时计算复杂度也将呈指数增长,因此这种方式在大规模网络的故障定位中应用存在

瓶颈。

3.5 网络故障识别

网络的故障识别技术能够根据网络的状态参数快速确定网络故障的类别, 为降低网络故障的影响, 实现故障的快速恢复提供有力保证。网络故障识别本质上是多源异类小样本信息条件下的不确定性模式识别问题, 其核心问题包括两个: 知识库的建立和识别的方法。对应这两个问题, 现在的主要研究重点包括故障特性研究和识别方法研究。

对网络故障特性的研究, 包括故障样本的监测、分析、建模等, 它是网络故障识别以及方法测试的基础。Maxion 等^[30]区分了网络服务的正常与异常, 通过建立网络相关参数基线, 给出一定容许范围, 利用异常检测方法检测应用层故障。Hauck 等在文献^[31]中总结比较了现有的应用程序监测方法, 包括对网络流量的监测、对系统参数的监测(如 CPU、内存使用率、端口情况等)、基于 Client 的模拟事务监测等。Markopoulou 等^[32]对 7 个月内在 Sprint IP 网络中收集到的 ISIS 路由更新信息进行了分析, 认为 IP 网络故障的分布具有幂律特性。在文献^[33]中, David 等定量研究了 3 类大规模 Internet 服务的故障成因, 证明了在线测试和组件故障检测将会降低服务故障率, 并能缩短故障平均修复时间。Giorgi 等^[34]验证了“网络行为可以通过流量的随机过程模型来合理表征”这一基本假设, 提出一种多域分析的建模方法。对故障诊断方法的验证需要从原型系统中收集故障和症状信息, 但对实际网络进行故障注入的代价较大, 研究人员通常采用建模和仿真的方法以降低研究成本。在现在复杂的网络环境下, 上述对特定系统故障特性的研究虽然具有一定的借鉴意义, 但其通用性还有待检验。

在故障识别的方法研究中, 随着计算机和人工智能技术的迅速发展, 特别是知识工程、专家系统和人工神经网络在故障诊断领域的成功应用, 以智能技术为核心的故障识别方法成为当前业界的研究热点。专家系统(expert system, ES)通过模仿人类专家在解决特定领域时的行为来解决问题, 是目前研究最多、应用最广的一类智能故障诊断技术。在 ES 框架下, 根据知识表示方法的不同具体实现有: 基于案例的推理(case based reasoning, CBR), 基于规则的推理(rule based reasoning, RBR)和基于模型的推理(model based reasoning, MBR)^[35]。专家系统易于理解, 设计简单, 以及认知、推理、学习和记忆等特性, 为智能诊断的发展奠定了基础。但其在实际应用中存在可扩展性差、知识获取难等问题, 使得智能网络管理中必须引入有效的知识发现机制。机器学习具有预测一般非线性动态系统性能和模式辨识的能力, 能够从输入数据中找出模式、规律和关联性, 并通过输出对其进行解释, 从而能够克服传统专家系统知识获取的不足。以神经网络^[35-36]、决策树^[37]为代表的传统机器学习方法已被引入故障诊断中, 这些方法具有良好的容错性, 支持并行计算, 能够突破专家系统的知识获取瓶颈。但是, 这些方法往往存在过学习以及陷入局部最小等问题, 同时, 网络的故障和症状间的不确定性和故障样本的缺乏, 使其需要引入可行的基于小样本的不确定性模式识别方法。SVM 在处理小样本、非线性以及高维问题中显示出了优于其它机器学习方法的泛化性能, 是一种极具潜力的故障诊断方法^[38]。但 SVM 也存在一些局限, 如故障诊断中客观存在大量不确定信息, 其处理效果将大受影响。近年来, 学术界将模糊理论在处理不确定性上的优势与 SVM 相结合, 开始研究模糊支持向量机(fuzzy support vector machine, FSVM)^[39], 为故障识别领域的研究开辟了新的思路^[40-42]。

3.6 网络健康管理

网络的健康管理指的是根据预测和诊断信息、可用维修资源和使用要求对维修活动做出适当决策的能力。当节点或链路产生故障时, 互联网通过 IP 层的路由查找算法确定替代路径实现自愈。但是随着网络规模的不断扩大, 故障数量增加, 且各种业务对网络实时性要求加大, 传统的 RIP (routing information protocol)、OSPF (open shortest path first)、ISIS (intermediate system to intermediate system) 等路由算法存在收敛慢、收敛过程中分组丢失或延迟等问题, 无法适应网络的发展。整个路由收敛过程包括: 故障检测时间、链路状态通告 LSA (link-state advertisements) 的传播时间和最短路由的重新计算时间等多个阶段。在确定故障的情况下, 主要的问题集中在 LSA 的传播和路由的重计算上。

传统的 LSA 传播是将 LSA 洪泛到整个网络, 但是实际上网络中有一些结点可能不会受到故障的影响, 因而全域洪泛会增加传播时间并且造成一定的网络资源浪费。限制洪泛就是选择性的向故障区域洪泛 LSA, 从而加快路由收敛, 提高网络资源利用率。Miyaxnura 提出了一种通过计算可靠子网 (reliable sub-network, RSN) 进行洪泛^[43]; Narvaez 设计了两种限制洪泛算法: 枝更新算法 (branch-update algorithm, BUA) 和向量权值算法 (vector-metric algorithm, VMA)^[44]。Korkmarz 等提出了基于单广播树 (single broadcast tree,

SBT) 和多广播树 (multiple broadcast trees, MBT) 的洪泛方法 [45].

当检测到失效时, 可以通过重路由实现一些网络故障恢复, 确保网络提供服务的能力. 重路由技术将部分流量切换到合适的下一跳, 可以缩短网络转发不连续的时间, 它的关键是去除环路. 文献 [46] 提出了无环路收敛 (loop free convergence, LFC) 思想, 证明了在一个稳定的网络中, 将一条链路 A-B 的权值加 1 所触发的路由收敛过程中不会出现环路. 文献 [47] 提出了故障不敏感路由 FIR 实际上就是一种本地重新路由的策略, 以网络进口和目的节点作为参照自动切换流量, 避免环路的产生. 除此之外, 典型的重路由技术还有 U-turns[48], Notvia 地址 [49] 等.

从目前研究现状来看, 网络 PHM 的研究仍处于起步阶段, 尚未形成完整的理论体系, 在其关键技术研究中存在以下几个问题: 缺乏灵活、有效、可扩展的管理信息交互机制; 网络健康状态的评估主观性强; 面对高维、非线性的网络特征缺少精度高、泛化性好的预测和诊断方法; 关于健康管理的研究较少, 缺乏有效的健康管理方法. 这些问题也是当前网络 PHM 研究的热点和难点.

4 网络 PHM 系统实现

现有网络由一系列不同位置 and 不同功能的自治域组成, 各自治域管理系统的异构性使得管理信息的交互存在很大困难, 难以获得网络运行实际情况的全局视图. 因此, 网络 PHM 的首要问题是解决管理信息一致性的问题. 此外, 对于具有一定规模的网络, 将所有的故障分析、管理功能集中于网络管理中心会增大管理服务器的处理负荷和管理信息的传输流量, 不利于提供快速有效的故障诊断建议. 因此需要选择一种可移植、易扩展的智能化技术, 采用分层与分割的思想来构建一个灵活的分布式网管系统, 让分布在网络中的多个代理与管理者共同承担网络故障管理功能.

4.1 网络 PHM 体系结构设计

为了解决网络 PHM 中的信息交互问题, 文章提出一种基于移动代理 (mobile agent, MA) 技术构造的分层分布式网络 PHM 体系结构. 该体系结构中存在 3 个管理层次: 处于最高层的网络管理中心 (network management center, NMC) 负责整个网络的管理信息调度、跨域的故障诊断以及域管理代理的加入退出; 域管理代理 (domain management agent, DMA) 是仅次于 NMC 的管理层次, 对应部署于网络各自治域的管理节点, 负责本域内网络状态信息的采集、MA 的指派和回收、本域故障资料库的维护、故障状态的监测计算、上报故障信息以及域间咨询协作; 最基础的故障管理层次由以代码形式嵌入各域关键节点的 MA 构成, 执行基本的监控、交互、预测和诊断等操作. 具体结构如图 1 所示.

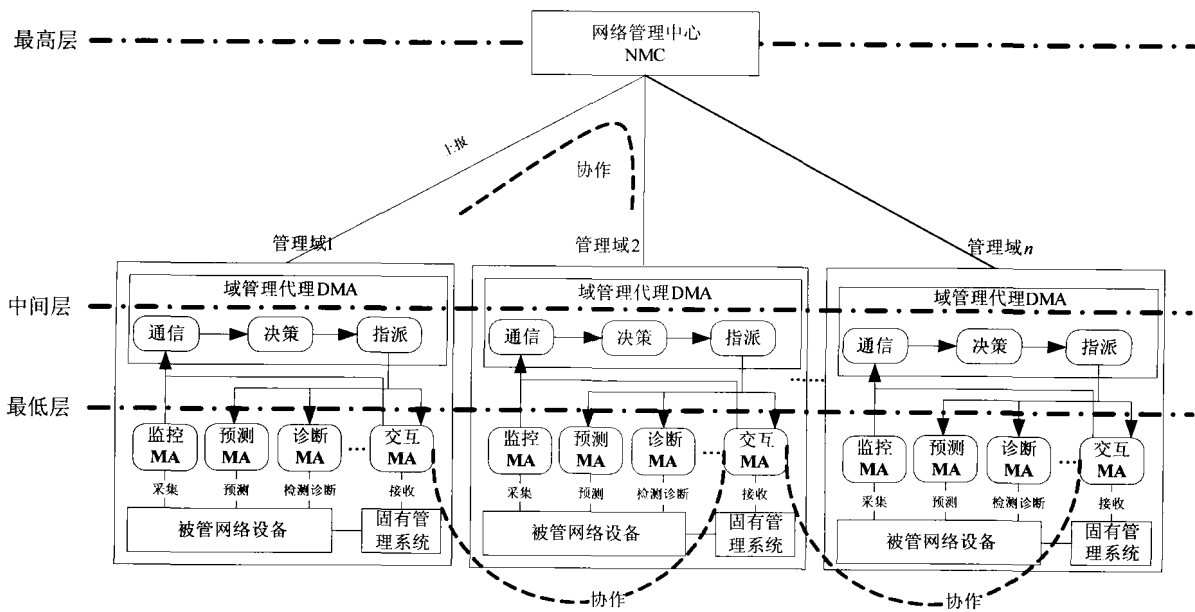


图 1 基于 MA 的分层分布式网络管理体系结构

在网络管理任务中, NMC 只负责涉及多域的服务级故障管理任务并担负着维护和传递诊断模型库的任

务, 接受 DMA 的查询和组织协作. 子网内的低层管理任务分派给更为熟悉本域的 DMA 自主执行. DMA 是根据各管理域具体特征定制的管理程序, 按照预定策略动态生成 MA 采集本域网络状态, 决策诊断级别, 对域内低层次的故障预测和诊断任务生成预测和诊断 MA 在本地执行; 对于域间高层次的故障通过交互 MA 完成信息的迁移, 进行协同诊断. DMA 完成诊断任务后, 对本域释放的预测和诊断等 MA 进行回收, 节约管理资源. 分层分布式 PHM 结构具有紧内聚、松耦合、弱中心控制的特点, 主要的处理计算在各域完成, 简化了管理信息的传输, 能够适应网络的管理特点, 并且易于扩充和调整.

4.2 网络 PHM 框架设计

在基于 MA 的分层分布式网络管理体系结构下,采用 SVM 等机器学习方法完成网络健康评估、故障预测、识别、定位以及健康管理等任务.以网络 PHM 过程为主线,文章设计了如图 2 所示的综合型 PHM 框架.

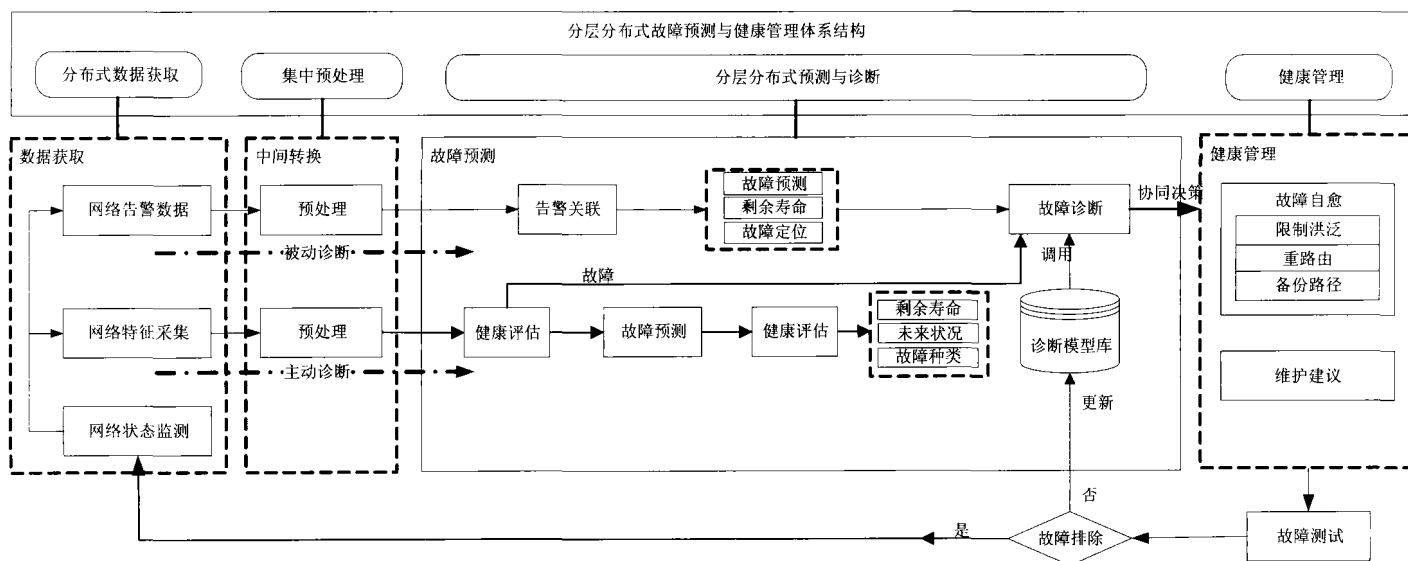


图 2 综合型故障预测和健康管理框架

综合型故障预测和健康管理框架以分层分布式的网络管理体系结构为基础,采用模块化设计,通过4个功能层次(即数据获取、中间转换、故障预测和健康管理)组织融合被动诊断和主动诊断两条主线,实现网络监测、健康评估、故障预测、故障定位以及健康管理等网络管理任务。

其中, 被动诊断流程以网络各子管理域固有管理系统所提供的告警信息为基础, 代理程序通过数据交互接口接收本地告警, 将来自不同设备的告警信息经中间转换为标准格式, 存储于告警数据库中, 触发故障预测与诊断过程; 主动诊断流程是域代理根据一定的轮询策略, 指派移动代理对所辖区域内的网元设备以及网络性能关键参数进行主动采集, 对采集到的参数预处理后, 进行网络评估, 然后通过 SVM 等机器学习方法对网络各参数进行预测, 实现网络故障预测. 主动和被动相结合的诊断方法互为补充, 能够提高网络 PHM 系统的对故障预测的可靠性和准确性, 节省管理资源, 为后续的健康管理提供更为全面的故障视图. 一次故障预测和诊断过程结束后, 将相应的诊断结果通知健康管理模块, 健康管理模块根据这些信息实时的采取备份路径、重路由等方法避免故障的发生或者将网络从故障状态恢复, 保证网络的服务质量, 若无法实现故障自愈则给出维护建议. 最后进行故障测试, 检验诊断结果, 对新故障以及误诊、漏诊的样本重新学习, 修正和完善诊断模型. 在如图 1 所示的往复检测、修正的闭环过程下, 最终达到视情维修, 保障网络正常通信的目的.

5 结束语

由于网络故障自身的复杂性、传播性和不确定性等特点,使得网络 PHM 在管理、健康评估、故障预测、故障定位、故障识别以及健康管理等环节的处理上存在一些困难。从当前的研究来看,使用单一的方法、从单一的角度进行故障管理已不能满足网络 PHM 的需要,其发展趋势呈现如下特点:

- 1、分布式: 现有的网络维护管理系统大多面向单一设备, 其可扩充性、灵活性、通用性较差, 也不能进

行有效的信息交互和共享,造成巨大的资源浪费.分布式网络管理能充分发挥各专家的特点,做到资源共享、协调诊断和容错控制.

2、集成化:由于网络设备的复杂性和故障的不确定性,用一种方法进行故障诊断已不能满足网络的要求,因此必须集成多种方法对故障进行综合诊断管理,才能充分发挥各方法的优点,克服其局限性,以提高网络 PHM 的智能化水平.

3、机器学习:知识获取与知识表示一直是制约智能 PHM 的瓶颈,而目前解决知识智能化获取问题的最佳途径是机器学习.通过机器学习,自动获取故障相关知识,实时更新故障库,实现 PHM 的智能化.

文章在分析总结网络 PHM 关键技术研究现状之后提出了基于 MA 的分层分布式网络 PHM 体系结构,解决网络信息一致性的问题;并构建了综合型网络 PHM 框架,以机器学习为基础,通过被动和主动相结合的方式提高网络 PHM 系统预测、定位、识别以及健康管理的精确性和高效性.网络 PHM 技术的应用不仅可以提高网络的安全性和可靠性,提升网络预警能力,加速网络故障恢复,提高网络整体的一致性和可用性,而且能够提高现代大规模网络的管理水平,控制网络运营成本,延长网络持续服务时间,减少网络故障带来的损失,更好的发挥网络效能,满足日益增长的网络业务需求.

参考文献

- [1] Keith M J, Raymond R B. Diagnostics to prognostics: A product availability technology evolution[C]// The 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2007), Orlando, FL, USA, 2007: 113-118.
- [2] Zhang S N, Kang R, He X F, et al. China's efforts in prognostics and health management[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(2): 509-518.
- [3] Sheppard J W, Kaufman M A, Wilmering T J. IEEE standards for prognostics and health management[J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2009: 34-41.
- [4] Löb H P, Buchty R, Karl W. A network agent for diagnosis and analysis of real-time ethernet network[C]//CASES, 2006, 4: 65-73.
- [5] Steinder M, Sethi A S. Multi-domain diagnosis of end-to-end service failures in hierarchically routed networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 18(3): 1036-1046.
- [6] 沈明玉, 张佑生. 一种基于主动网络的分布式智能管理模型 [J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(2): 266-271.
Shen M Y, Zhang Y S. Distributed intelligent management model based on active network[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(2): 266-271.
- [7] Mas C, Thiran P. A review on fault location methods and their application to optical networks[J]. Optical Network Magazine, 2001, 2(4): 73-87.
- [8] Goldszmidt A, Yemanja S. A layered event correlation system for multi-domain computing utilities[J]. Journal of Network and System Management, 2004, 10(2): 171-194.
- [9] 邓歆, 孟洛明. 基于贝叶斯网络的通信网告警相关性和故障诊断模型 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1182-1186.
Deng X, Meng L M. Bayesian networks based alarm correlation and fault diagnosis in communication networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1182-1186.
- [10] 陶洋, 张静, 周霞. 基于三角模糊层次分析法与网络仿真的网络整体性能评价研究 [J]. 计算机应用, 2005, 25(10): 2238-2240.
Tao Y, Zhang J, Zhou X. Research of network performance evaluation based on TFAHP and network simulation[J]. Computer Applications, 2005, 25(10): 2238-2240.
- [11] 罗枫, 宋梅, 任志军. 移动网管中多指标综合评估研究 [J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(4): 97-101.
Luo F, Song M, Ren Z J. An improved evaluation method in mobile network management system[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunication, 2004, 27(4): 97-101.
- [12] 张靖. 模糊综合评判的校园网性能评价研究 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(6): 998-1000.
Zhang J. Campus network performance assessment based on the fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(6): 998-1000.
- [13] 罗赞寿, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和熵权的网络性能综合评估模型 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21(6): 771-775.
Luo Y Q, Xia J B, Chen T P. Network performance comprehensive evaluation model based on cloud model and entropy weight[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2009, 21(6): 771-775.
- [14] 徐海东, 李治文, 江峰. 基于神经网络的 UTRAN 网络质量综合评价 [J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 41-44.
Xu H D, Li Y W, Jiang F. 3G UTRAN quality evaluation based on neural network[J]. Journal of Beijing University

- of Posts and Telecommunication, 2005, 28(4): 41–44.
- [15] 于艳华, 宋梅, 潘阳发, 等. 改进的基于支持向量机的网络综合评价策略 [J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(6): 85–88.
Yu Y H, Song M, Pan Y F, et al. An improved network performance evaluation method based on support vector machines[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunication, 2007, 30(6): 85–88.
- [16] Weiss G M, Hirsh H. Learning to predict rare events in events sequences[C]// Proceeding 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1998: 359–363.
- [17] Vilalta R, Ma S, Hellerstein J. Rule Induction of Computer Events[M]. IBM T J Watson Research Centre, 2001.
- [18] Vilalta R, et al. Predictive algorithms in the management of computer systems[J]. IBM Systems Journal, 2002, 41(3): 461–474.
- [19] Zare M H, Masnadi-Shirazi M A. Arima model for network traffic prediction and anomaly detection[C]// ITSIm 2008, Kuala Lumpur: IEEE Press, 2008: 1–6.
- [20] Cao J H, Liu Y, Dai Y. Network traffic prediction based on error advanced DGM(1, 1) model[C]//WiCom 2007, Shanghai, IEEE Press, 2007: 6353–6356.
- [21] Mirza M, Sommers J, Bardford P, et al. A machine learning approach to TCP through put prediction[C]//Proc of ACM SIGMETRICS'07, San Diego, USA, 2007: 97–108.
- [22] Paola B, Dario R. Support vector regression for link load prediction[J]. Computer Networks, 2009, 53(2): 191–201.
- [23] Steinder M, Sethi A. A survey of fault localization techniques in computer networks[J]. Science of Computer Programming, Special Edition on Topics in System Administration, 2004, 53(2): 165–194.
- [24] Reali G, Monacelli L. Fault localization in data networks[J]. IEEE Communication Letters, 2009, 13(3): 161–163.
- [25] Yemini S, Kliger A, Mozes S, et al. High speed and robust event correlation[J]. Communications Magazine, 1996, 34(5): 82–90.
- [26] Steinder M, Sethi A S. Probabilistic fault localization in communication systems using belief networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2004, 12(5): 809–822.
- [27] Steinder M, Sethi A S. End-to-end service failure diagnosis using belief networks[C]// Proc of the Network Operations and Management Symp (NOMS), Florence, 2002: 375–390.
- [28] Steinder M, Sethi A S. Probabilistic event-driven fault diagnosis through incremental hypothesis updating[C]// Proc of the IFIP/IEEE Int'l Symp on Integrated Network Management(IM), Colorado Springs, 2003: 635–648.
- [29] 张成, 廖建新, 朱晓民. 基于贝叶斯疑似度的启发式故障定位算法 [J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2610–2621.
Zhang C, Liao J X, Zhu X M. Heuristic fault localization algorithm based on Bayesian suspected degree[J]. Journal of Software, 2010, 21(10): 2610–2621.
- [30] Maxion R A, Feather F E. A case study of ethernet anomalies in a distributed computing environment[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 39(4): 142–146.
- [31] Hauck R, Radisic I. Service oriented application management-do current techniques meet the requirements[C]// DAIS 2001, 2001: 395–404.
- [32] Markopoulou A, Iannaccon G. Characterization of failures in an IP backbone[C]// INFOCM2004, 2004, 4: 2307–2317.
- [33] Oppenheimer D, Ganapathi A, Patterson D A. Why do Internet service fail and what can be done about it[C]// USIT 2003, 2003.
- [34] Giorgi G, Narduzzi C. A study of measurement-based traffic models for network diagnostics[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(8): 1642–1650.
- [35] Gao Y T, Zhou X. The design of network fault diagnosis system based on PNN[C]// 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, 2010: 709–711.
- [36] 李千目, 戚勇, 张宏, 等. 基于粗糙集神经网络的网络故障诊断新方法 [J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(10): 1696–1702.
Li Q M, Qi Y, Zhang H, et al. A new network fault diagnosis method based on RS neural network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(10): 1696–1702.
- [37] Basak J, Krishnapuram R. Interpretable hierarchical clustering by constructing an unsupervised decision tree[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(1): 121–132.
- [38] Vapnik V. Statistical Learning Theory[M]. New York: Wiley, 1998.
- [39] Lin C F, Wang S D. Fuzzy support vector machine[J]. IEEE Transaction on Neural Network, 2002, 13(2): 464–471.
- [40] Takuya I, Shigeo A. Fuzzy support vector machine for pattern classification[C]// Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks, 2001, 2: 1449–1454.
- [41] 周小平, 晏蒲柳, 吴静. 基于支持向量机的网络故障在线诊断方法研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2006, 39(3): 102–106.
Zhou X P, Yan P L, Wu J. Research on network fault diagnosis method based on support vector machines[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(3): 102–106.
- [42] Zhang L, Meng X R, Zhou H. Network fault diagnosis using hierarchical SVMs based on kernel method[C]// Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining (WKDD2009), Moscow, Russia, January, 23–25, 2009: 753–756.

- [43] Miyaxnura T, Kurilnoto T, Aoki M. Enhancing the network scalability of link-state routing protocols by reducing their flooding overhead[C]// Proceedings of IEEE HPSR Torino Italy, 2003: 263–268.
- [44] Narvaez P. Routing reconfiguration in IP networks[D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [45] Korkmarz T, Krunz M. Hybrid flooding and tree based broadcasting for reliable and efficient link-state dissemination[C]// Proceedings of IEEE GLOBECOM, Taiwan, China 2004: 2400–2404.
- [46] Francois P, Shand M, Bonaventure O. Disruption free topology reconfiguration in OSPF networks[C]// Proceedings of INFOCOM2007, Anchorage, AK: IEEE Press, 2007: 89–97.
- [47] Nelakuditi S, Lee S W, Yu Y Z, et al. Failure insensitive routing for ensuring service availability[C]// Proc International Workshop on Quality of Service (IWQoS), 2003: 287–304.
- [48] Atlas A. U-turn alternates for IP/LDP Local Protection[EB/OL]. draft-at-las-ip-local-protect-uturn-00.txt, November 2004.
- [49] Bryant S, Shand M. IP Fast Reroute Using Notvia Addresses[EB/OL]. draft-bryant-shand-ipfrr-notvia-addresses-00, March 2005.