

网管系统多种运行场景下的模块可靠性

吴震 孟洛明

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文针对当前网管系统(NMS)可靠性评价研究中存在的问题,提出了一种分析 NMS 运行阶段模块可靠性的方法。该方法首先把 NMS 中使用的定时报活、模块冗余等可靠性措施组合为 3 种主要运行场景;然后,运用马尔科夫再生随机 Petri 网对 3 种场景进行了建模,定量分析了不同运行场景对模块可靠性的影响,并应用模型得到了模块可用度等重要的可靠性指标。实例表明, NMS 模块的运行阶段可靠性取决于自身质量和运行场景两方面的因素,可通过配置场景针对性地进行 NMS 可靠性设计和指标分配。

关键词: 网络管理系统; 模块可靠性; 运行场景; 马尔科夫再生随机 Petri 网

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2541-04

Module Reliability in Various Run-Time Scenario of Network Management System

Wu Zhen Meng Luo-ming

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A new method for analyzing module reliability of Network Management System(NMS) in operational phase is proposed to resolve the problem existed in the domain of current NMS reliability evaluation. Firstly, some methods, e.g. periodic survival reports and module redundancy, which is used in NMS are assembled into three major run-time scenarios; Secondly, three scenario are modeled using Markov Regenerative Stochastic Petri Nets (MRSPN), and the effect which various scenario impose on module reliability is analyzed. Finally, some important reliability index, such as module availability, is concluded with applying the models. Numerical examples show that module reliability depend on both quality itself and run-time scenarios. Suitable run-time scenario can be applied in various modules according to the requirement of NMS.

Key words: Network management system; Module reliability; Run-time scenario; Markov Regenerative Stochastic Petri Nets(MRSPN)

1 前言

为了保证网络正常、经济、可靠、安全的运行, NMS 自身的可靠性日益受到了广泛的关注^[1, 2]。为了提高 NMS 的可靠性和容灾能力, 在工程实践中经常使用定时报活、模块冗余等技术措施。定时报活指 NMS 周期性地对自身的软件模块和厂家网管的运行进行报活监测, 如果自身模块或厂家网管宕掉, 系统会自动发现, 或者进行重启或者提示用户修复, 从而减少失效恢复时间。模块冗余是指 NMS 可以配置多个相同的软件模块实现同一个功能, 这些模块分布在相同或不同的物理节点上, 若只有部分模块失效, NMS 仍然可以使用。从微观角度来看, 上述机制实际上构成了模块的外部运行场景。这时模块的可靠性不仅取决于自身设计开发的质量, 而且也受到运行场景的影响, 但是目前这种影响在 NMS 中还缺乏针对性的研究。

软件可靠性自从上世纪 70 年代起步以来, 目前已有许多成熟的理论和方法^[3-7], 如各种可靠性增长模型(SRGM), 基于构件的分析技术, 神经网络分析方法, 随机 Petri 网等等, 可以从宏观或微观上对软件可靠性进行分析。本文以北京邮电大学网络与交换国家重点实验室研制的 NMS 为背景, 提出一种分析 NMS 运行阶段模块可靠性的方法。该方法使用马尔科夫再生随机 Petri 网(MRSPN)对各种运行场景进行了建模, 通过模型可以定量分析运行场景对模块可靠性的影响, 有利于针对性地对 NMS 进行可靠性设计和配置运行场景。组织结构如下, 第 2 节概括了 NMS 中的 3 种典型运行场景, 第 3 节简要介绍了 MRSPN, 第 4 节分别对 3 种场景进行了建模, 并分析了场景下的模块可靠性, 第 5 节通过数字实例论证了场景配置对模块可靠性的影响, 第 6 节对全文进行了总结。

2 NMS 软件结构及主要运行场景

NMS 的基本概念是提供一个有组织的网络结构, 以取

得各种类型的操作系统之间、操作系统与电信设备间的互连。现在重点考察软件部分, 一个典型的 NMS 软件结构如图 1 所示。NMS 软件结构总体上分为 3 层: 表示层、应用层和适配层, 各层包含若干独立的模块。这些独立模块通过分布式处理平台组成一个有机整体。其中适配层负责对多种厂家网管接口的适配, 将厂家网管模型适配成系统内部的统一的信息模型, 通过接口提供给应用层使用; 应用层: 是网管功能的实现层, 同时为其它系统提供接口。它由多个独立的模块组成, 包括性能管理模块、故障管理模块等; 表示层: 面向终端用户, 以图形化等方式负责和用户交互。

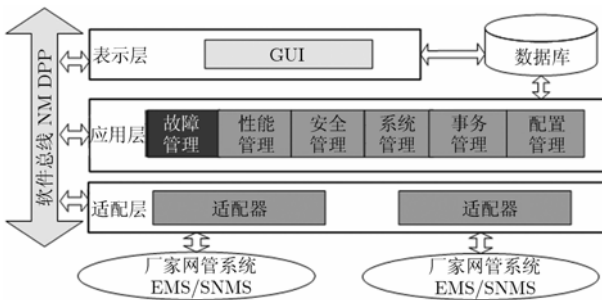


图 1 NMS 软件结构示例

图 1 中, 浅灰色模块既未施行报活机制, 也未设置冗余。包括表示层的大部分模块、对外接口模块以及软件总线 NM DPP; 深灰色模块施行报活机制, 但未设置冗余, 包括应用层的大部分模块, 适配层的适配器模块等; 黑色模块表示既实行报活机制, 也设置模块冗余, 现在这种情况主要出现在应用层故障管理模块上, 但不排除将来把这种方式扩大到其他模块的可能。因此 NMS 中各模块的运行场景主要有 3 种: 场景 1 为单一模块, 不施行报活机制; 场景 2 为单一模块, 同时施行报活机制; 场景 3 为存在冗余模块, 同时施行报活机制。

3 MRSPN 分析方法

在分析场景时, 一个主要困难是场景中存在固定(如定时报活)或非指数分布时间间隔(如修复时间), 这会导致场景丧失马尔科夫性。另外, 需要一种简洁方式表达场景下的模块行为。MRSPN^[8, 9]作为 SPN, GSPN, DSPN 的超集, 一方面具备 Petri 网的并发并行特性和可视化的动态描述能力, 另一方面可建模多种分布的变迁, 便于对场景下的模块行为建模, 因此选取 MRSPN 作为场景的分析工具。

MRSPN 的变迁有 3 种类型: IMD 变迁: 实施时间为 0 的瞬时变迁; EXP 变迁: 实施时间为指数分布的变迁; GEN 变迁: 实施时间为一般分布的变迁。MRSPN 允许 GEN 变迁存在, 因此会破坏马尔科夫性, 因此 MRSPN 的主要思想是从标记过程 $\{M(t)\}$ 中提取一些特定的再生时间点(RTP), 在这些 RTP 上系统能忘记“历史”。这时 $M(t)$ 的潜在随机过

程实际上为马尔科夫再生过程(MRGP)。令 Ω 表示 MRGP 的状态空间, Ω' 表示在 RTP 上的状态集合, 即 $\Omega' = \{M_n: (\tau_n^*, M_n)\}$ 。可通过 3 个矩阵 $V(t)$, $K(t)$, $E(t)$ 来全面描述 MRGP。其中:

$$\left. \begin{aligned} V_{ij}(t) &= \Pr\{M(t) = j \mid M(\tau_0^*) = i\} \\ K_{ij}(t) &= \Pr\{M(\tau_1^*) = j, \tau_1^* \leq t \mid M(\tau_0^*) = i\} \\ E_{ij}(t) &= \Pr\{M(t) = j, \tau_1^* > t \mid M(\tau_0^*) = i\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$V(t)$ 表示 $M(t)$ 在 τ_0^* 时刻处于标记 i 的条件下, 在 t 时刻处于 j 的概率, 以分析过程的瞬时行为。 $K(t)$ 称为 Global Kernel, 表示 $M(t)$ 在 τ_0^* 时刻处于标记 i 的条件下, 下一个 RTP 是 τ_1^* , 下一个再生标记是 j 的概率。 $E(t)$ 被称为 Local Kernel, 表示 $M(t)$ 在 τ_0^* 时刻处于标记 i 的条件下, 在下一个 RTP 到来之前在 t 时刻处于标记 j 的概率, 描述两个 RTP 之间的行为。若嵌入马尔科夫过程是有限的和不可约的, 那么稳态概率向量 v 可在 $\sum V_i = 1 (i \in \Omega')$ 的条件下通过解线性系统 $vK(\infty) = v$ 得到。令 α_{ij} 表示积分 $\int_0^\infty E_{ij}(t) dt$, 则 MRGP 稳态概率如下:

$$\pi_j = \frac{\sum_{k \in \Omega'} v_k \alpha_{kj}}{\sum_{k \in \Omega'} v_k \sum_{l \in \Omega'} \alpha_{kl}} \quad (2)$$

4 场景分析

现在对场景 1, 2, 3 下的模块可靠性进行分析, 所采用的指标为可用度。可用度是反映可修复系统利用率的一种概率指标, 指系统在规定条件下, 某一时刻处于正常可用状态的概率。为了便于分析, 假定模块修复为固定时间间隔 β 的重启操作, 这是模块投入运行后经常采取的修复办法, 而且即使采取其他分布, 按照本模型也很容易解决。

4.1 场景 1: 单一模块, 不施行报活机制

场景 1 描述: 模块初始时处于正常工作状态, 运行一段时间后发生失效(假定失效服从速率为 λ 的指数分布, 下同)。经过一个固定时间间隔 γ 后, 被工作人员发现并进行重启操作, 使模块重新正常工作。这种情况较易分析, 由于模块发生失效的时间均值为 $1/\lambda$, 因此模块可用度为

$$A_1 = 1 / [\lambda(\gamma + \beta + 1/\lambda)] \quad (3)$$

4.2 场景 2: 单一模块, 施行报活机制

场景 2 描述: 一方面, 模块初始时处于正常状态, 运行一段时间后发生失效。另一方面, 监控器从模块进入正常状态那一刻起开始计时, 每隔一个固定时间间隔 δ 检查一次模块的运行状态, 若模块正常运行则把计时清 0; 若模块失效则进行重启操作, 使模块恢复正常状态, 并把计时清 0。

MRSPN 模型: 如图 2 所示。其中全黑横条表示 GEN 变迁, 中空横条表示 EXP 变迁, 线段表示 IMD 变迁。 P_{up} 建模了正常工作状态, T_{down} 建模了失效过程, 当 T_{down} 实施时, 模块发生失效, Token 也从 P_{up} 转移到了 P_{down} 。 P_{clock} ,

T_{clock} , P_{ready} , T_{clear} 建模了报活机制的监控活动, 当计时到期的时候, T_{clock} 实施, Token 从 P_{clock} 转移到了 P_{ready} 。若此时 P_{down} 里没有 Token, 那么 IMD 变迁 T_{clock} 实施, 计时清 0; 如果此时 P_{down} 里有 Token, 那么 T_{clock} 被禁止, 一条禁止弧建模了这个特征, 同时变迁 $T_{restart}$ 处于施能状态, 经过重启时间 β 后计时清 0, 模块重新恢复正常工作。

可达图: 令四元组 $(\#P_{up}, \#P_{down}, \#P_{clock}, \#P_{ready})$ 表示标记, 其中 $\#P_x$ 表示位置 P_x 里的 Token 数。图 3 为场景 2 的化简可达图, 图中每个标记都是实存标记。为了便于表示, 给每个标记赋予了一个标签, 用 ①到③表示。

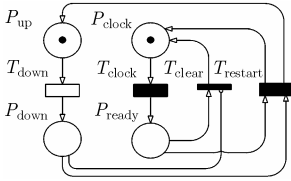


图 2 场景 2 的 Petri 网模型

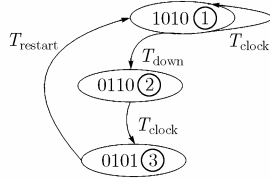


图 3 场景 2 的 MRSPN 的化简可达图

MRSPN 分析: 根据图 3, 潜在 MRGP 的 $\Omega = \{1, 2, 3\}$ 。按照 RTP 上 GEN 变迁记忆变量清 0 的原则, 选取以下事件发生的时刻作为 RTP: (1)确定性变迁获得使能; (2)确定性变迁变为禁止或获得实施; (3)EXP 变迁获得实施, 而且该变迁对于一个同样使能的确定性变迁是非“竞争性”的。这里的“竞争性”指如果标记 m 里的两个变迁 t 和 t' 都处于使能状态, 如果 t 的实施会禁止 t' 的实施, 则称 t 对于 t' 是竞争性的。按照上述原则, 显然进入标记 ①, ③的时刻可以作为 RTP, 而进入标记 ②的时刻违反了非竞争性原则, 因此不能作为 RTP。令 Ω' 表示 RTP 的集合, 即 $\Omega' = \{1, 3\}$ 。则 $\mathbf{K}(t)$ 如下所示:

$$\mathbf{K}(t) = \begin{bmatrix} K_{11}(t) & K_{13}(t) \\ K_{31}(t) & 0 \end{bmatrix}$$

其中下标数指可达图里的标记标签, 而非矩阵的行号或列号。若各标记之间没有直接变迁, 相应的元素设为 0。按式 (1), $K_{11}(t)$ 为在标记 ①的情况下, t 时刻内实施 T_{clock} 重新进入标记 ①的概率, 这时需要 $t \geq \delta$ 且在 δ 时刻内 T_{down} 不能实施, 否则系统的下一个 RTP 将会出现在进入标记 ③的时刻。因此 $K_{11}(t) = e^{-\lambda \delta} u(t - \delta)$, 其中 $u(t)$ 为 unit-step 函数, 即当 $t \geq 0$, $u(t) = 1$, 反之, $u(t) = 0$ 。 $K_{13}(t)$ 为在标记 ①的情况下, t 时刻内实施 T_{down} 并且进入标记 ③的概率, 这时需要 $t \geq \delta$ 且在 δ 时刻内 T_{down} 必须实施, 否则系统将首先进入标记 ①, 因此 $K_{13}(t) = (1 - e^{-\lambda \delta}) u(t - \delta)$ 。 $K_{31}(t)$ 为在标记 ③的情况下, t 时刻内实施 $T_{restart}$ 并且进入标记 ①的概率, 这时需要 $t \geq \beta$, 因此 $K_{31}(t) = u(t - \beta)$ 。

$\mathbf{E}(t)$ 表示的是两个相继的 RTP 之间 $M(t)$ 的行为, 因此是一个 2×3 的矩阵, 如下所示。

$$\mathbf{E}(t) = \begin{bmatrix} E_{11}(t) & E_{12}(t) & 0 \\ 0 & 0 & E_{33}(t) \end{bmatrix}$$

同样, 按 $\mathbf{E}(t)$ 定义, 可求得 $E_{11}(t) = e^{-\lambda t} [u(t) - u(t - \delta)]$, $E_{12}(t) = (1 - e^{-\lambda t}) [u(t) - u(t - \delta)]$, $E_{33}(t) = u(t) - u(t - \beta)$ 。根据 $\mathbf{E}(t)$ 和 $\mathbf{K}(t)$ 可获得稳态概率向量 \mathbf{v} 和相应的 α_{ij} 。将上述参数代入式 (2), 即可求得 MRGP 在状态 i 的稳态概率 π_i 。由于模块只有处于状态 1 的情况下是可用的, 因此处于场景 2 时, 模块的可用度为

$$A_2 = \pi_1 = \frac{1 - e^{-\lambda \delta}}{\lambda [\delta + (1 - e^{-\lambda \delta}) \beta]} \quad (4)$$

4.3 场景 3: 存在冗余模块, 施行报活机制

场景 3 描述: 一方面, 初始时多个冗余模块一起运行, 都处于正常工作状态, 运行一段时间后部分或全部模块发生失效。另一方面, 监控器从模块进入正常工作状态那一刻起开始计时, 每隔一个固定时间间隔 δ 检查各模块的运行状态, 若所有冗余模块都正常运行, 则把计时清 0; 若存在部分模块失效, 则进行重启操作。经过重启后, 模块恢复正常工作, 并把计时清 0。为方便起见, 这里的模块数量为 2, 而且失效后的重启机制采取顺序重启, 即重启时间为 2β 。

MRSPN 模型: 场景 3 的 MRSPN 模型和可达图如图 4 和图 5 所示。图中元素的含义与场景 2 基本相同, 但位置 P_{up} 中用两个 Token 表示两个模块。当 Token 从 P_{clock} 转移到 P_{ready} 时, 若此时 P_{down} 里的 Token 数为 0, 则 IMD 变迁 T_{clear} 可实施; 若 Token 数为 1, 则变迁 $T_{restart1}$ 使能; 若 Token 数为 2, 则变迁 $T_{restart2}$ 使能。与场景 2 类似, 可得在场景 3 下, 模块可用度为:

$$A_3 = \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = \frac{1 - e^{-2\lambda \delta} + 2(1 - e^{-\lambda \delta})^2 + 4\beta \lambda e^{-\lambda \delta} (1 - e^{-\lambda \delta})}{2\lambda [\delta + 2\beta(1 - e^{-\lambda \delta})]} \quad (5)$$

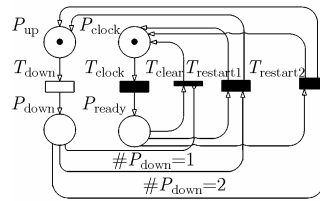


图 4 场景 3 的 Petri 网模型

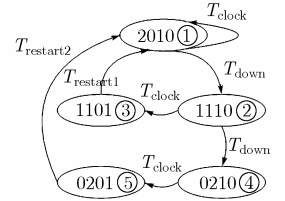


图 5 场景 3 的 MRSPN 化简可达图

5 模型分析

本节重点对以上模型进行敏感度分析, 重点有二: 一是场景 2 和场景 3 对模块可靠性的影响, 变参为 λ ; 二是分析定时报活的时间间隔对模块可靠性的影响以确定最佳时间间隔, 变参为 δ 。定参 $\gamma = 1h$, $\beta = 0.1h$ 。

图 6 给出了当 $\delta = 0.1h$, λ 取不同值时, A_1, A_2, A_3 的变化曲线。可以看出: (1) 在任意失效效率的情况下, $A_3 > A_2 > A_1$,

这说明 NMS 中采取的定时报活和模块冗余方法可以改善模块的可靠性; (2)当失效率越高, 定时报活和冗余方法改善效果越大, 但随着失效率的下降, 改善效果也随之降低, 因此可根据不同的模块可靠性需求适配不同的运行场景, 对于失效率可能较高的模块, 应当实行定时报活和模块冗余, 这样可以明显改善 NMS 的可靠性, 而对失效率较低的非关键模块, 可以不施行定时报活和模块冗余; (3)场景 3 可以提供模块相当高的可靠性, 因此关键模块应该按场景 3 设置, 可以在 $\lambda=0.005$ 的情况下得到高于 99.999% 的可靠性水平。

图 7 给出了当 $\lambda=0.1/h$, δ 取不同值时, A_1, A_2, A_3 的变化曲线。可以看出: (1)随着 δ 的增大, A_2 和 A_3 单调递减, 而且下降速率越来越快, 最终场景 2 和场景 3 的模块可用度要低于场景 1。因此似乎可以认为, δ 设置越小越好, 但本文在建模时, 没有计算冗余和报活所带来的消耗, 如果考虑消耗, 只需在可接受的范围内, 选择一个尽可能小的 δ 即可; (2)场景 3 与场景 2 相比, 下降速度较慢, 这是由于场景 3 存在模块冗余, 降低了场景 3 对 δ 的敏感度。另外值得注意的是, 当 δ 与 γ 相等时, 场景 2 下的模块可靠性仍然高于场景 1, 这是因为定时报活机制存在时, 场景 2 的平均失效发现时间低于场景 1。

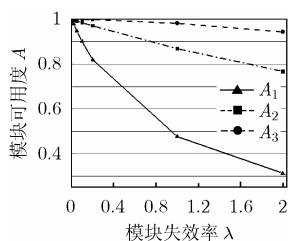


图 6 3 种场景下模块可用度 A 随 λ 的变化曲线

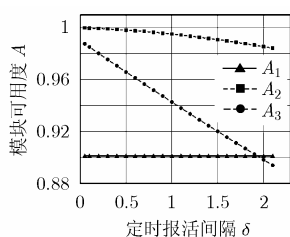


图 7 3 种场景下模块可用度 A 随 δ 的变化曲线

6 结束语

随着网络的发展, 用户对 NMS 可靠性的要求越来越高, 本文针对当前 NMS 中存在的定时报活、模块冗余等技术, 量化分析了运行场景对模块可靠性的影响, 结果证明, 模块可靠性不仅取决于模块自身的设计质量, 也受到运行场景的影响, 合理的运行场景可以有效地改善 NMS 可靠性。同时也表明在对 NMS 可靠性建模或可靠性指标分配时须考虑运行场景的因素。

参考文献

- [1] 孟洛明, 元峰. 现代网络管理技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999: 11-14.
Meng Luo-ming and Qi Feng. Modern Network Management Technology[M]. Beijing: Press of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1999: 11-14.
- [2] 熊翱, 孟洛明. 基于容错机制高可靠性网管系统的研究. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 94-97.
Xiong Ao and Meng Luo-ming. Study of high reliability network management system based on fault-tolerance Mechanism. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2006, 29(2): 94-97.
- [3] Musa J D. Software Reliability Engineering[M]. New York: McGraw Hill, 1999: 174-186.
- [4] Yacoub S, et al. A scenario-based reliability analysis approach for component-based software. *IEEE Trans. on Reliability*, 2004, 54(3): 467-475.
- [5] Dai Yuan-Shun, Xie Min, and Kim-Leng Poh. Modeling and analysis of correlated software failures of multiple types. *IEEE Trans. on Reliability*, 2005, 54(1): 100-104.
- [6] 蔡开元, 白成刚, 钟小军. 构件软件系统的可靠性评估模型简介. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 551-554.
Cai Kai-yuan, Bai Cheng-gang, and Zhong Xiao-jun. Introduction to reliability models of component-based software system. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2003, 37(6): 551-554.
- [7] Gokhale S S and Lyu M R. A Simulation approach to structure-based software reliability analysis. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2005, 31(8): 643-656.
- [8] 林闯, 郑波. 含有非马尔可夫过程的排队 Petri 网模型和性能分析. 电子学报, 2003, 31(2): 167-169.
Lin Chuang and Zheng Bo. A model of queuing Petri net including non-markovian process and performance analysis. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(2): 167-169.
- [9] Andra's Horva' th and Miklo's Telek. Time domain analysis of non-markovian stochastic Petri nets with PRI transitions. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2002, 28(10): 933-939.

吴 震: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为通信软件与网络管理。
孟洛明: 男, 1955 年生, 教授, 研究方向为通信软件与网络管理。