

Multiagent 系统通讯及单元可靠性综合评测

郭 勇, 马培军, 苏小红

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 150001 哈尔滨, guoy@hit.edu.cn)

摘 要: 为了更准确的评测 Multiagent 系统可靠性, 提出了将通讯可靠性、单元可靠性及系统拓扑结构都考虑在评测过程中的综合评测方法. 该方法概括出 Multiagent 系统的结构, 采用基于马尔可夫过程的方法, 分析通讯可靠性、单元可靠性等因素对集中式、分布式及联邦式 Multiagent 系统可靠性的影响, 并给出了系统可靠性评测模型. 仿真结果表明, 该方法能够将复杂系统的可靠性评测问题分解为简单的形式. 针对各分解后的结构进行评测, 进一步得到了整个系统的可靠性.

关键词: Multiagent 系统; 可靠性评测; MAS 结构; 备份 agent

中图分类号: TP311.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0083-06

Synthetic evaluation of Multiagent system communication and unit reliability

GUO Yong, MA Pei-jun, SU Xiao-hong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, guoy@hit.edu.cn)

Abstract: To evaluate the reliability of Multiagent system accurately, a synthetic evaluation approach considering communication reliability, unit reliability and system topology is proposed. Multiagent system structures are summarized; the influence of communication reliability and unit reliability to the reliability of centralized, distributed and federated Multiagent system is analyzed based on Markov process; and system reliability models are given. The simulation results show that this method can simplify the problem of complex system reliability, for the entire system reliability can be obtained after the reliability of every part is achieved.

Key words: Mmultiagent system; reliability evaluation; Mas structure; copy agent

MAS(Multiagent system)是由多个智能 Agent 组成的网络系统, 其可靠性研究主要集中在 3 个方面: 1) 通讯可靠性及节点之间的连通性问题^[1-5]; 2) 将通讯可靠性作为节点可靠性的一部分或假设通讯完全可靠^[6-11]; 3) 综合了拓扑、通讯和处理单元等对整个系统可靠性的影响. 文献[12-15]分别考虑了通讯及处理单元的可靠性, 但主要针对一种拓扑结构, 文献[16]考虑了拓扑结构、通讯路径、处理单元对整个系统可靠性影响, 但重点讨论了特定条件下单一任务可靠性问题. MAS 的可靠性与其拓扑结构有很大关系,

不同位置的节点存在冗余对整个系统的影响完全不同. 本文综合考虑了系统的拓扑结构、通讯可靠性、单元可靠性及不同节点有无备份等具体情况, 概括出 MAS 的 3 种主要拓扑结构, 并给出了这 3 种结构的可靠性评测模型.

1 可靠性理论及 MAS 故障种类

系统在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力称为可靠性. 可靠性的概率度量称为可靠度 $R(t)$, 通常系统的可靠度可表示为

$$R_T(t) = p(T > t), t \geq 0.$$

式中: R 为可靠度; P 为规定时间内和规定条件下完成规定功能的概率; t 为规定时间; T 为系统发生故障前的工作时间. $T > t$, 即在规定时间内未发生故障; $T \leq t$, 为规定时间内发生故障. 设失效时刻 T 的概率密度函数为 $f(t)$, 则有

收稿日期: 2009-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60673035); 国家自然科学基金资助项目(61073052); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20092302110040).

作者简介: 郭 勇(1967—), 男, 博士生;

马培军(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

$$R_T(t) = \int_t^\infty f_T(x) dx.$$

MAS 的故障是指 MAS 中的某一部分存在缺陷最终导致任务失败. MAS 中故障分为 5 种故障类型^[17],如表 1 所示. 要评测 MAS 的可靠性就要从这 5 种类型故障的概率出发进行综合考虑,最终给出具体数值.

表 1 MAS 系统故障分类

编号	故障类型	具体描述
1	程序缺陷	程序中未被测试出的错误
2	未预料的状态	对特殊状态程序未做处理
3	处理器故障	系统崩溃或资源不足
4	不希望的行为	出现了未预知的系统行为
5	通讯故障	通讯变得非常慢、失效

2 Multiagent 连接结构

MAS 主要有 3 种结构:分布式、集中式和联邦式^[18].

2.1 分布式结构

分布式 MAS 结构如图 1 所示,系统中的任意两个 agent 都可相互连接进行通讯,所有 agent 是独立自治的,需要合作时 agent 间可直接进行通讯.

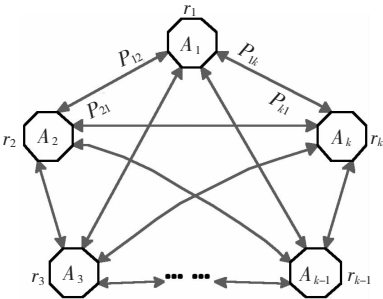


图 1 分布式 MAS 结构

2.2 集中式结构

集中式 MAS 如图 2 所示. 整个 MAS 有一个管理 agent,协调 MAS 对本组 agent 的控制和消息传递任务,它们之间存在着一种主从关系. 集中式能保持系统内部信息的一致性,系统的管理、控制和调度较为容易,但存在控制的瓶颈问题.

2.3 联邦式结构

联邦式 MAS 如图 3 所示,是上述 2 种结构的综合. 它由多个联邦组成,每个联邦内部是集中式结构,联邦之间又构成了分布式结构,每个联邦内部有管理 agent 负责本联邦内部 agent 之间的协调. 这种结构平衡了集中式和分布式 2 种结构的优点和不足,因此是目前 MAS 普遍采用的系统结构.

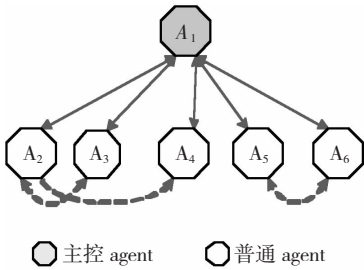


图 2 集中式 MAS 结构

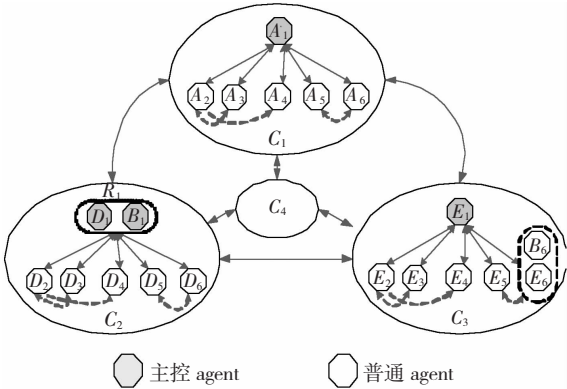


图 3 联邦 MAS 结构图

3 MAS 可靠性计算

一个 MAS 可以看成节点及其连接都有一定失效概率的网络系统,其可靠性主要受通讯可靠性及节点可靠性的影响,为简化问题,将表 1 中 5 种类型的故障分为: 1) 故障 1 ~ 故障 4 属于每个 agent 的故障; 2) 故障 5 单独作为通讯故障. 假设每个节点 (agent) 及边 (通讯) 的故障率已知,然后对整个 MAS 给出其可靠性的评测方法.

3.1 分布式 MAS 可靠性计算

分布式结构 MAS 在完成一个任务时,需要多个 agent 分工协作,任务分解后每个 agent 完成任务的一部分,有些 agent 有备份,当一个 agent 失效,备份 agent 可接替失效的 agent,最终完成任务.

图 1 为一个分布式 MAS 的模型,它是一个有向图,每个节点代表一个 agent,节点之间的连线表示完成一个任务时 2 节点间存在的通讯关系, p_{ij} 为一个节点到另一个节点的通讯的可靠性,图 1 中节点 i 对应的 r_i 为该节点本身的可靠性.

先考虑每个 agent 都没有备份的情况,只要某一 agent 出现问题,则整个任务即失败. 假设任务由 A_1 发起,涉及 $A_1, A_2, \dots, A_k$, 在任务执行过程中各 agent 之间会进行必要的通讯,最后任务完成将结果返回给任务的发起者 A_1 . 假设 MAS 中每个 agent 的可靠性是独立的,下一个要执行任务的 agent 只与上一个向其发出任务请求的 agent 有关

与其他 agent 无关,因此完成任务的整个过程可以

$$M = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & A_3 & \cdots & A_{k-1} & A_k \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ \vdots \\ A_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & P_{12}r_2 & P_{13}r_3 & \cdots & P_{1(k-1)}r_{(k-1)} & P_{1k}r_k \\ P_{21}r_1 & 0 & P_{23}r_3 & \cdots & P_{2(k-1)}r_{(k-1)} & P_{2k}r_k \\ P_{31}r_1 & P_{32}r_2 & 0 & \cdots & P_{3(k-1)}r_{(k-1)} & P_{3k}r_k \\ P_{41}r_1 & P_{42}r_2 & P_{43}r_3 & \cdots & P_{4(k-1)}r_{(k-1)} & P_{4k}r_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{k1}r_1 & P_{k2}r_2 & P_{k3}r_3 & \cdots & P_{k(k-1)}r_{(k-1)} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

式中: $M(i,j) = P_{ij}r_j$ 为 A_i 与 A_j 之间成功通讯并且 A_j 完成 A_i 所指定的任务的概率. 在完成任务时 A_i 与 A_j 之间存在关系时 $M(i,j) = P_{ij}r_j$, 如果不存在通讯关系则 $M(i,j) = 0$. 系统的可靠性 R 为

$$r = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k M(i,j), \text{ 当 } M(i,j) \in (0,1]. \quad (1)$$

式中: 当 $M(i,j) = 0$ 时, 表示 2 个 agent 中 A_i 与 A_j 之间没有任何关系, 即在此次任务中两者不进行交流, 因此对应的 $M(i,j)$ 与系统的可靠性无关, 计算可靠性时不在考虑范围之内, 所以式(1) 要求 $M(i,j) \in (0,1]$.

在实际设计 MAS 时, 对于无法进一步提高可靠性的 agent 或完成某些关键任务的 agent, 可以采用相应的容错措施, 一般采用冗余 agent 的方法提高整个 MAS 的可靠性.

有备份 agent 的情况如图 4 所示. $A'_2, \dots, A'_m$ 为 A'_1 的备份, 现在针对这种情况给出其可靠性的评测方法. 假设任务 W 涉及 k 个 agent: $A'_1, A_2, \dots, A_k$, 其中 A'_1 有 $m-1$ 个备份 $A'_2, \dots, A'_m$, 即 $A'_1, \dots, A'_m$ 彼此都能完成对方所做的工作, 当其中某个 agent 出现故障, 可由备份 agent 接替来完成工作, 可将 $A'_1, \dots, A'_m$ 看成一个整体记为 $A_b = \{A'_1, \dots, A'_m\}$, 这样任务 W 可看成由 $A_b, A_2, \dots, A_k$ 来完成. 其中 $M(i, A_b)$ 为 $A_i (i = 2, \dots, k)$ 与 A_b 之间成功通讯并且 A_b 完成 A_i 所指定的任务的概率. $M(A_b, j)$ 为 A_b 与 A_j (其中 $j = 2, \dots, k$) 之间成功通讯并且 A_j 完成 A_b 所指定的任务的概率, 则有

$$M(i, A_b) = (1 - \prod_{\tau=1}^m (1 - \lambda(i, \tau))). \quad (2)$$

其中: $\lambda(i, \tau) = P(i, \tau) \times r_\tau$,

$$M(A_b, j) = (1 - \prod_{\tau=1}^m (1 - P(\tau, j)))r_j. \quad (3)$$

式中: $\lambda(i, \tau)$ 为 A_i (其中 $i = 2, \dots, k$) 单独与 $A'_\tau (\tau = 1, 2, \dots, m)$ 进行通讯并且 A'_τ 完成 A_i 指定任务的概率; $P(\tau, j)$ 为 $A'_\tau (\tau = 1, 2, \dots, m)$ 单独与 A_j (其中 $j = 2, \dots, k$) 进行通讯的概率. 虽然 A_b 中有多个备份 agent, 但 A_b 将任务发送到 A_j 时, 完成任务的是 A_j , 因此这种情况下不会提高完成任务的

看成一个马尔可夫过程, 建立矩阵形式为

可靠性, 只能提高由 $A_b \sim A_j$ 的通讯可靠性, 因此 $M(A_b, j)$ 按式(3) 计算. 算出 $M(i, A_b)$ 和 $M(A_b, j)$ 后再用式(1) 来计算整个 MAS 的可靠性.

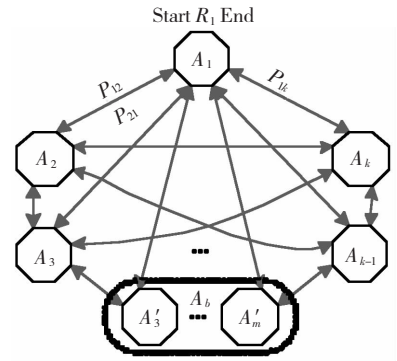


图4 分布式节点有备份 MAS 模型

3.2 集中式 MAS 可靠性计算

如图 2 所示, 由于集中式 MAS 存在主从关系, 管理 agent 下的不同 agent 之间要进行通讯必须由管理 agent 来协调, 这种情况下, 必须将管理 agent 的可靠性考虑进来.

集中式 MAS 有管理 agent 来进行中介, 所以在得到的初始数据中, 即使 2 个 agent 之间看不到其通讯可靠性数据, 它们仍然有可能通过管理 agent 相互通讯, 为说明在集中式 MAS 中任意 2 个 agent 之间是否有关系, 还要引入一个表明 agent 之间关系的矩阵 T_{rel} , 如果 $T_{rel}(i, j) = 1$ 则表示第 i 个 agent 会向第 j 个 agent 发送任务信息, 否则表示第 i 个 agent 不向第 j 个 agent 发送任务信息. 如果 A_i 与 A_j 在完成任务时需要进行通讯, 中间经过了管理 agent, 则 $M(i, j)$ 计算为

$$M(i, j) = P_{i,1} \times r_1 \times P_{1,j} \times r_j. \quad (4)$$

式中: r_1 为管理 agent 的可靠性; $P_{i,1}$ 为 A_i 到管理 agent 的通讯可靠性; $P_{1,j}$ 为管理 agent 到 A_j 的通讯可靠性. 整个 MAS 的可靠性计算方法为

$$R = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k M(i, j), \text{ 当 } M(i, j) \in (0,1] \text{ 且 } T(i, j)_{rel} = 1. \quad (5)$$

式中 $T_{rel}(i, j) = 1$ 为在完成任务时 A_i 向 A_j 发送了

表 2 $C_1 \sim C_4$ 之间的通讯可靠性

$P_{ci, ej}$	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	0	1	0	0
C_2	1	0	0.992	0
C_3	0	0	0	0.999
C_4	0.997	0	0	0

4.1 联邦 C_1 可靠性计算

C_1 内部结构如图 3 所示, C_1 内部各 agent 的可靠性数据 r_n 及任意 2 个直接相连 agent 之间的通

表 3 联邦 C_1 相关数据

agent		任意两个直接相连 agent 之间的通讯可靠性 P_{ij}							agent 之间交互关系 T_{rel}						
可靠性		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	
r_1	0.999	A_1	1	0.996	0.995	0.993	0.989	0.994	A_1	0	0	0	0	0	0
r_2	0.989	A_2	0.997	1	0	0	0	0	A_2	0	0	1	1	0	0
r_3	0.998	A_3	0.999	0	1	0	0	0	A_3	0	1	0	0	0	0
r_4	0.998	A_4	1	0	0	1	0	0	A_4	0	0	0	0	0	0
r_5	0.990	A_5	0.996	0	0	0	1	0	A_5	0	0	0	0	0	1
r_6	0.996	A_6	0.994	0	0	0	0	1	A_6	0	0	0	0	1	0

4.2 联邦 C_2 可靠性计算

C_2 的内部结构如图 3 所示, D_1 有一个备份 B_1 , 这样可靠性的计算要将 B_1 也考虑进来, 假设 $D_1, D_2, \dots, D_6$ 之间的通讯可靠性及每个 agent 自身的可靠性同 $A_1, A_2, \dots, A_6$, 另外备份 B_1 的可靠性 r_b 为 0.998. 备份 B_1 的初始值及计算结果如表 4 所示, 表 4 中 PB_1 to j 列是备份 B_1 到其他 agent 的通讯可靠性, P_i to B_1 列为其他 agent 到备份 B_1 的通讯可靠性, S_{DB} 为由 D_1 和 B_1 构成的整体, i to S_{DB} 为其他 agent 到 S_{DB} 的通讯可靠性, S_{DB} to j 为 S_{DB} 到其他 agent 的通讯可靠性.

按集中式 MAS 可靠性计算的分析可将 D_1 及其备份 B_1 看成一个整体, 来计算这个整体到其他 agent 的 $M(i, j)$ 值. 计算 $S_{DB} \sim D_j$ 的可靠性用式(3)类似方法, 计算后的结果如表 4 中 S_{DB} to j 列所示. $A_i \sim S_{DB}$ 的可靠性用与式(2)类似的方法, 其结果如表 4 中 i to S_{DB} 列所示. 按式(6)计算有相互通讯关系的 $M(i, j)$ 值, 结果为 $M(2, 3) = 0.987, M(2, 4) = 0.987, M(3, 2) = 0.985, M(5, 6) = 0.989, M(6, 5) = 0.987$.

将表 4 数据代入式(1)得到联邦 C_2 的可靠性: $R_{c_2} = 0.9366$. 最后计算非管理 agent 有备份的情况, 如图 3 联邦 C_3 的内部结构, 其中非管理 agent 中 E_6 有一个备份 B_6 , 假设 B_6 的值同联邦 C_2 中 B_1 与计算 R_{c_2} 方法类似, 可计算出 R_{c_3} 可靠性, 计算可得: $R_{c_3} = 0.9332$.

讯可靠性 P_{ij} 及完成任务时 agent 之间交互关系 T_{rel} 如表 3 所示. C_1 有 6 个 agent, 其中 A_1 为管理者. 计算这种结构的可靠性首先按式(4)计算 $M(i, j)$, 其中 r_i 为管理 agent 的可靠性. $M(i, j)$ 值中 $M(2, 3) = 0.9890, M(2, 4) = 0.9871, M(3, 2) = 0.9831, M(5, 6) = 0.9851, M(6, 5) = 0.9723$, 其他均为 0. 整个 C_1 的可靠性通过式(1)计算可得: $R_{c_1} = 0.9192$.

表 4 备份 B_1 的初始值及 S_{DB} 与其他 agent 间的 M 值计算结果

	PB_1 to j	P_i to B_1	S_{DB} to j	i to S_{DB}
D_1	1.000	1.000	1.000 0	1.000 0
D_2	0.989	0.990	0.989 0	0.989 0
D_3	0.988	0.997	0.997 9	0.996 0
D_4	0.994	0.999	0.998 0	0.998 0
D_5	0.996	0.994	0.990 0	0.993 0
D_6	0.995	0.998	0.996 0	0.997 0

得到了上述数据后, 联邦式 MAS 就可简化成图 6 所示的分布式 MAS, 这样就可按分布式 MAS 计算其可靠性.

5 结 论

1) 可将复杂的 MAS 分解为几种简单的结构, 先对分解后的 MAS 进行可靠性分析, 然后再讨论整个系统的可靠性, 使 MAS 可靠性的评测问题简化.

2) 本方法将通讯可靠性及单元可靠性都考虑进来, 给出了对 MAS 可靠性的评测方法, 并考虑了有无备份 agent 的 2 种情况, 使评测结果更可信. 通过仿真实验可看出, 管理 agent 有备份比非管理 agent 有备份能更好的提高 MAS 的可靠性.

3) 通常 MAS 系统都比较复杂, 可将 agent 之间的通讯流量, 每个 agent 所完成任务在占总任务的比例等信息考虑进来, 进一步提高评测结果

的准确性.

参考文献:

- [1] 孙壮志,尹国峰,王海竹. Multi-Agent 系统中 Agent 通信可靠性的研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(1): 166 – 222.
- [2] 卢致杰,覃正,原欣伟,等. 基于元过程的多代理过程可靠性优化方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 864 – 868.
- [3] 刘向军,刘世平,张洁,等. 多 Agent 系统通信与协作机制构造[J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(2): 40 – 42.
- [4] MURPHY A L, PICCO G P. Reliable communication for highly mobile agents [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2002, 5(1): 81 – 100.
- [5] CHIU Chinchung, YE Yishiung, CHEN Rushun. Reduction of the total execution time to achieve the optimal k -node reliability of distributed computing systems using a novel heuristic algorithm[J]. Computer Communications, 2000, 23(1): 84 – 91.
- [6] 易朋兴,刘世元,杜润生,等. 分布式监测系统可靠性贝叶斯评估[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(3): 42 – 45.
- [7] 刘永,李言,李淑娟,等. 基于可靠性分析的 MAS 构建优化算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(6): 1532 – 1535.
- [8] MA Dianfu, LIU Min, ZHAO Yongwang, *et al.* Reliability quantification of the tree structure based distributed system[C]//Proceedings of 14th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. Taipei: IEEE, 2008: 351 – 352.
- [9] 张薇,马建峰,杨晓元. 分布式存储系统的可靠性研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(3): 480 – 485.
- [10] YI Pengxin, YANG Shuzi, DU Runsheng, *et al.* Distributed monitoring system reliability estimation with consideration of statistical uncertainty[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(4): 519 – 524.
- [11] LIN Minsheng. Linear-time algorithms for computing the reliability of bipartite and ($\# \leq 2$) star distributed computing systems [J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(11): 1697 – 1712.
- [12] CHEN Yinong, HE Zhongshi. Bounds on the reliability of distributed systems with unreliable nodes & links[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(2): 205 – 215.
- [13] WANG Jinlong. Markov-chain based reliability analysis for distributed systems[J]. Computers & Electrical Engineering, 2004, 30(3): 183 – 205.
- [14] FAHMY H M. Reliability evaluation in distributed computing environments using the AHP[J]. Computer Networks, 2001, 36(5): 597 – 615.
- [15] RAGHAVENDRA C S, KUMAR V K P, HARIRI S. Reliability analysis in distributed systems [J]. IEEE Transactions on Computers, 1988, 37(3): 352 – 358.
- [16] 胡华平,金士尧. 分布式系统可靠性模型[J]. 计算机工程与应用, 1999(8): 1 – 3.
- [17] FEDORUK A, DETERS R. Improving fault-tolerance by replicating agents[C]//Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Bologna Italy: ACM, 2002: 737 – 744.
- [18] 洪流. 基于 MAS 的协调知识与协调策略研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.

(编辑 张 红)