一个多节点声纳系统中同步时钟机制的可靠性评估和系统优化问题

519030910115 李春一

摘要

在主从通信系统中，有时会发生系统故障，导致系统的平均寿命/可靠性有限。

节点数量对系统的平均寿命/可靠性起决定性作用，节点过少会导致工作的主从节点数量不足，节点过多可能由于一个节点的故障导致全局崩溃。因此，若想让系统的正常工作时间尽可能长，需要选取合适的节点个数。

针对不同种类的故障及其影响，本文建立了数学模型，将切换器、节点、系统的工作状态视为马尔科夫过程。通过数值模拟方法（包括定步长与变步长两种），验证了不同节点数目下，系统的平均寿命/可靠性。

在本文声纳系统的物理条件下，20 个节点平均寿命最长、15 个节点可靠性最高。同时，本文分析了 A，B 两种节点各自的重要性，证明了其中一个切换器的性能进行提升，都会增加整体的平均寿命/可靠性，从而为系统中切换器、节点的设计指明了方向。

关键词：系统可靠性 主从通信系统 数值模拟方法 马尔科夫链

目录

1． 概述 1
1.1. 引言 1
1.2. 寿命物理模型 1
1.3. 优化目标 2
2. 算法选择 2
2.1. 定步长 2
2.2. 变步长 3
2.3. 算法合理性说明 3
3. 最大可靠性 4
4. 最大平均工作寿命 4
5. 拓展部分 5
5.1. 概述 5
5.2. 提升最大限定寿命 5
5.3. 提升切换器性能 6
6. 总结 6
6.1. 当下的优点与不足 6
6.2. 优化方向 7

1．概述

1.1.引言

在多节点声纳监听系统中，会发生切换器故障，导致系统无法正常工作。然而，水下的雷达系统不便于修复，因此，设法延长系统的寿命至关重要。

声纳系统由以下三级组成：

- 切换器：分为 A，B 两种
- 节点：共 n 个，每个节点包含 A，B 两种切换器
- 系统：n 个节点共同组成完整的声纳系统

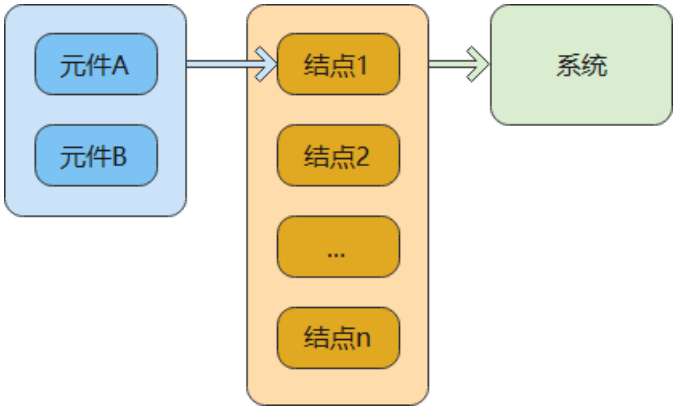


图 1 系统组成示意图

1.2.寿命物理模型

切换器 A，B 分别有 3，2 种异常状态，这$(3+1)\times(2+1)=12$种工作状态的组合，会产生 6 种不同的节点状态。

切换器 A 状态	切换器 B 状态	节点状态	别名
g_{A0}	g_{B0}	g_{N0}	g_{PF}
	g_{B1}	g_{N3}	g_{MO}
	g_{B2}	g_{N1}	g_{SO}
g_{A1}	g_{B0}	g_{N1}	g_{SO}
	g_{B1}	g_{N5}	g_{FB}
	g_{B2}	g_{N1}	g_{SO}
g_{A2}	g_{B0}	g_{N2}	g_{DM}
	g_{B1}	g_{N3}	g_{MO}
	g_{B2}	g_{N4}	g_{DN}
g_{A3}	g_{B0}	g_{N4}	g_{DN}
	g_{B1}	g_{N4}	g_{DN}
	g_{B2}	g_{N4}	g_{DN}

图 2 节点状态组合表[1]

- g_{N0}：节点性能完好
- g_{N1}：只能作为从节点
- g_{N2}：或者作为主节点，或者作为不阻塞总线的失效节点
- g_{N3}：只能作为主节点，否则就会阻塞总线
- g_{N4}：成为不阻塞总线的失效节点
- g_{N5}：节点总是阻塞总线

本题中，只有 5 个节点工作（包含 1 个主节点），且总线不被阻塞时，系统正常工作。

1.3.优化目标

- 系统可靠性
  若系统在[0,25000h]内均可靠工作，则判定系统为可靠。
  令系统的工作寿命尽量大于$25000h$，即进行多次模拟，使得寿命超过$25000h$的次数尽可能多（概率尽可能大）。
- 系统平均工作寿命
  令系统的工作寿命尽可能大，即进行多次模拟，使得平均寿命尽可能大。

2. 算法选择

2.1.定步长

按照以下步骤设计算法:

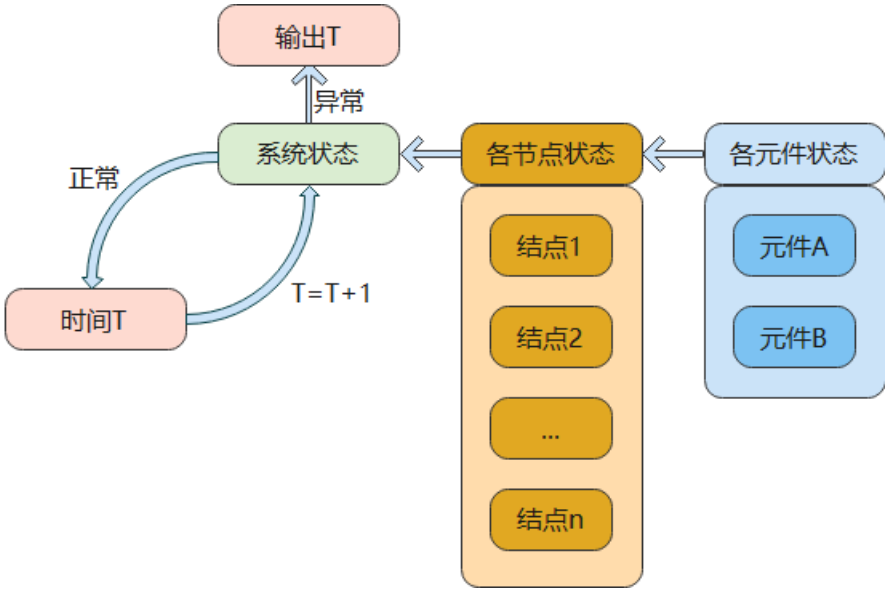


图 3 定步长算法示意图

设定步长为$1h$，每步改变各元件的状态，改变概率$p = 1 - e^{-\lambda}$，由此得到各节点的状态，最后模拟出系统的状态。

- 若系统正常，则将寿命增加$1h$

- 若系统异常，或总时间大于$90000h$，输出寿命

此方法可以得出正确结果，但耗时较长。在 20 个节点的情况下，每尝试 100 个样本，需要运行$133s$。由于使用数值模拟方法，样本数至少为10^5，因此一次计算会耗时接近$37h$，因此需要探索速度更快的方法。

2.2.变步长

按照以下步骤设计算法：

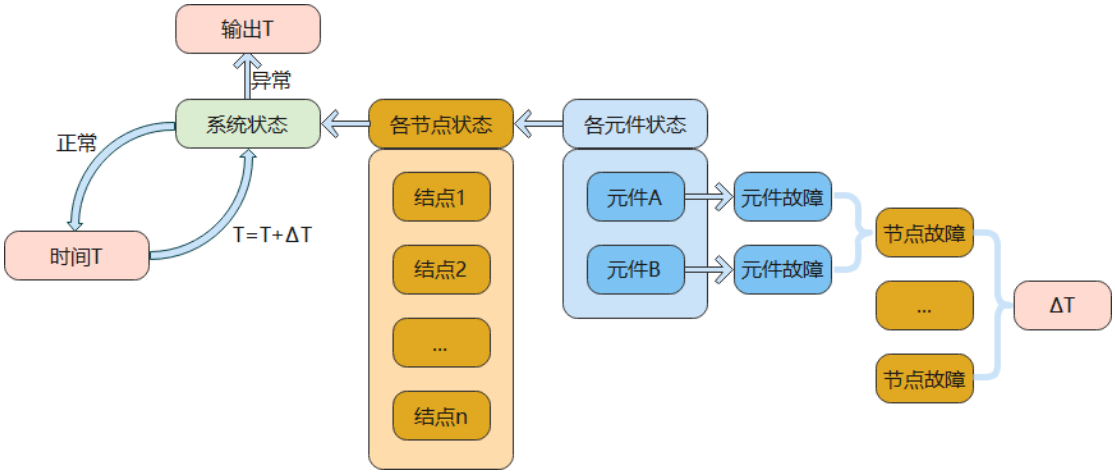


图 4 变步长算法示意图

在n个节点中，依次模拟$2n$个切换器 A，B 的状态，得到各个切换器发生故障的时间T，$f(T)=\lambda e^{-\lambda T}$，将最短的时间记为$\Delta T$，从而得到最先发生故障的切换器。由此得到各节点的状态，最后模拟出系统的状态。

- 若系统正常，则将寿命增加ΔT
- 若系统异常，或总时间大于$90000h$，输出寿命

此方法可以得出正确结果，且耗时较短。在 20 个节点的情况下，一次计算耗时约$380s$。

因此，本文采用变步长算法，设定仿真颗粒度为10^5。

2.3.算法合理性说明

2.2 中的算法可以规避以下两问题：

- 系统失效又复活

  当系统异常时，算法会直接跳出循环，时间T不会继续增加，即系统不会“复活”。
- 系统永生不死

  当寿命大于$90000h$时，算法自动跳出循环，输出$T=90000h$，故系统不存在永生不死的问题。

因此，本文的算法具有合理性。

3. 最大可靠性

对 5~20 个节点进行仿真，得到结果如下：

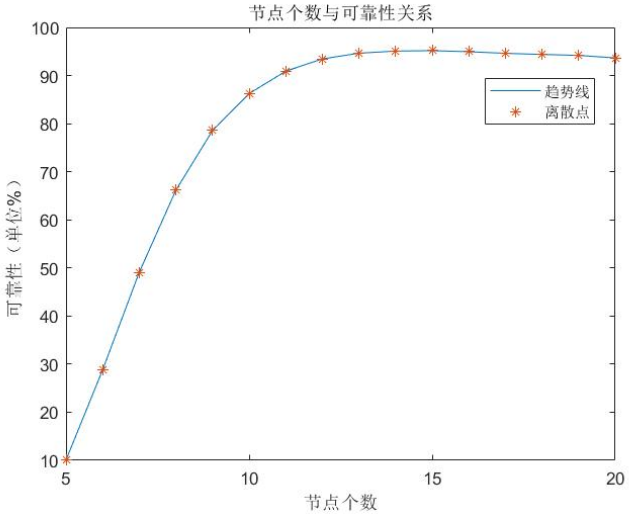


图 5 最大可靠性

可以看出，节点个数较少时，系统容易发生“工作节点不足”的情况，导致寿命小于$25000h$；节点个数较多时，总体故障概率增大，更有可能在$25000h$前发生“总线阻塞”情况。因此，可靠性在节点个数适中时最大。

节点个数：15

最大可靠性：95.176%

4. 最大平均工作寿命

对 5~20 个节点进行仿真，得到结果如下：

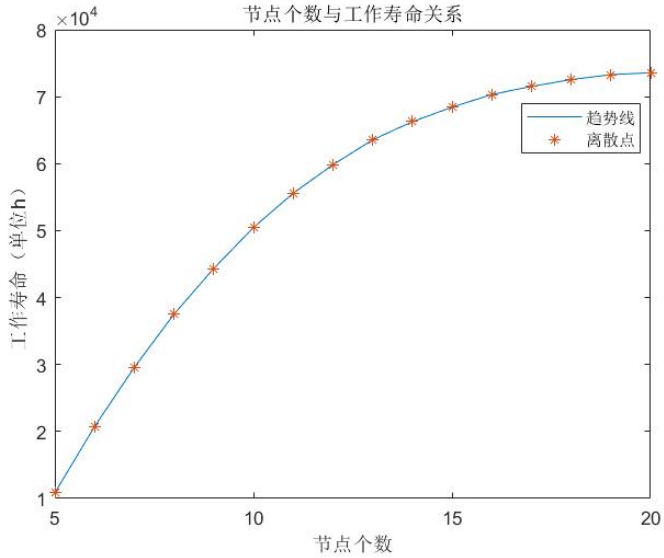


图 6 最大平均工作寿命

可以看出，工作寿命随节点个数增多而增大，增速渐渐放缓，一方面是因为最大寿命$90000h$的限制，另一方面则是节点个数增多导致“总线阻塞”情况更容易发生。

节点个数：20

最大平均工作寿命：$73572h$

5. 拓展部分

5.1. 概述

本文希望通过不同方法，提升系统性能，包括可靠性与最大寿命这两方面。

对此，本文提出了提升最大限定寿命，提升切换器性能这两种方案。

5.2. 提升最大限定寿命

在进行了 20 节点情况的模拟后，本文发现有49.68%系统，其失效不是因为内部故障导致，而是因为寿命触及了最大值$90000h$，强制失效。

因此，本文希望通过提升最大限定寿命，减少系统寿命触及最大值的概率，从而提升系统的平均寿命。在接下来的模拟中，保持节点个数为 20，每次将最大限定寿命提升$10000h$，直到系统寿命触及最大值的概率小于20%。

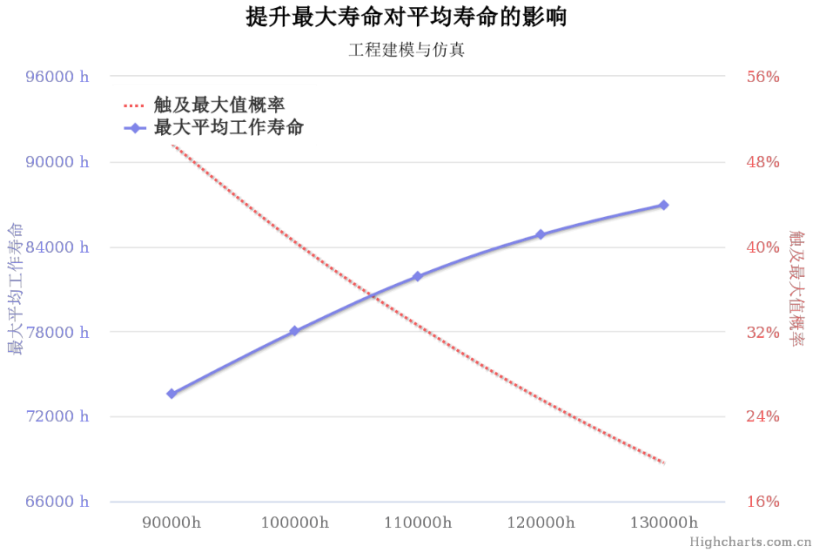


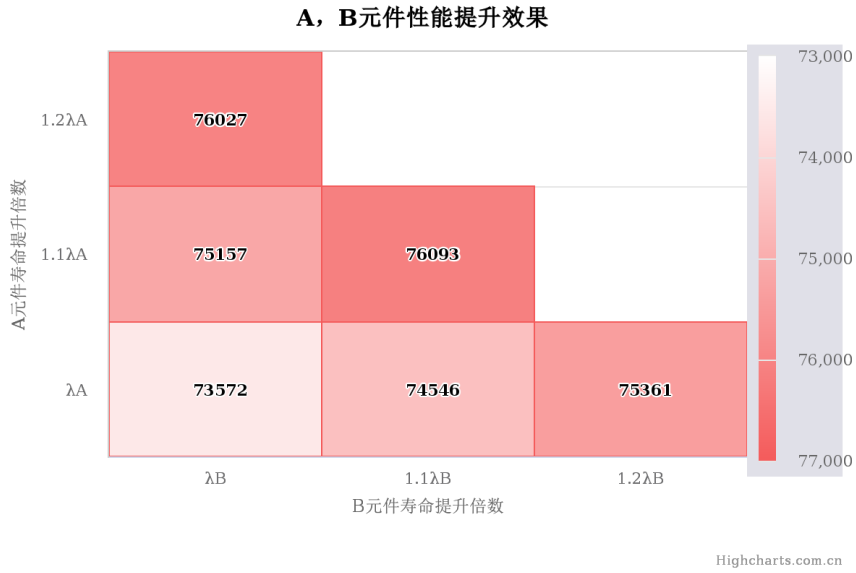
图 7 提升最大寿命对平均寿命的影响

可以看出，随着最大限定寿命的增加，系统触及最大值的概率减小，因此系统的平均寿命增大。然而，当最大限定寿命足够大时，触及最大值的概率减小幅度不会很大，因此该方法在前期效果明显，后期（触及最大值概率为 19.68%）对平均寿命的提升不足，需要探索新方法。

5.3. 提升切换器性能

每个节点由切换器 A，B 构成，如果能减小切换器的故障概率，即可减小每一个节点的故障概率，从而增加整个系统的预期寿命。

切换器 A，B 发生故障的情况与λ_A，λ_B有关。因此，将λ_A，λ_B的值调整为原来的 1.1，1.2 倍，再调用$exprnd(\lambda)$函数，可以提升整体的预期寿命。以下热力图展示了这一方法的效果：



可以看出，提高λ_A，λ_B可以提高单个切换器的性能，从而提升整体性能，其中提升 A 切换器性能的效果更为出色。同时，实验结果中的$(76093 > 76027)$说明，与其专注于提升单个切换器性能，不如同时关注两个切换器，将其性能分别进行适度的提升。

6. 总结

6.1. 当下的优点与不足

优点：

- 选择了变步长方案，并证明了其时间远远优于定步长方法
- 规避了算法中“复活”与“永生”的漏洞
- 得出了稳定性与平均寿命最大情况下的结点个数，并进行了分析
- 提出了两种方案优化系统寿命，并采用多种可视化方式展示了优化结果

不足：

- 拓展部分对提升寿命关注较大，暂无提升可靠性的方案
- 运行时间仍有优化空间，运行计时中显示$exprnd$函数占用了运行时间的一半

6.2.优化方向

- 拓展部分新策略
  拓展部分提出的两种方案，分别是：
  针对整个系统：提升最大限定寿命
  针对 A，B 元件：提升切换器性能
  由于系统由切换器—节点—系统三级构成，因此可以探索一种针对节点的优化方法，如防止节点失效导致的“总线阻塞”等，具体内容需要与老师进一步探讨。
- 不同方案下的结点数说明

  在$1/\lambda_{\mathrm{A}}=37000$，$1/\lambda_{B}=480000$时，平均寿命最大的节点数为 20，但当$\lambda_{\mathrm{A}}$，$\lambda_{B}$

  变化，或最大限定寿命升高时，最优节点数不一定仍为 20 个，应在优化后，对节点数为 5~20 的情况依次进行尝试。

参考文献

[1]上海交通大学 电子工程系 工程问题建模和仿真讲座案例 2 问题和基本数学方法.

附录

变步长代码

```
Nsample=100000;
k=5;      %工作结点数
pA=[0.26,0.26,0.48];
pB=[0.35,0.65];
pointOutput=zeros(1,n);
resOutput=zeros(1,n);
for numOfPoint=5:20 %总结点数
    life=zeros(1,Nsample);
    for t=1:Nsample
        stateSystem=0;
        stateComp=zeros(1,numOfPoint);
        stateItemA=zeros(1,numOfPoint);
        stateItemB=zeros(1,numOfPoint);
        while stateSystem==0

[stateItemA,stateItemB,T]=changeStateItemT(stateItemA,stateItemB,pA,pB,numOfPoint);
            stateComp=changeStateComp(stateItemA,stateItemB);
            stateSystem=judgeSystem(stateComp);
            life(t)=life(t)+T;
            if life(t)>=90000
                life(t)=90000;
                break
            end
        end
```

```
    %if mod(t,100)==0
    %    fprintf('%d sample,meanLife=%f \n',t,sum(life)/t)
    %end
    end
    pointOutput(numOfPoint)=mean(life);
    resOutput(numOfPoint)=sum((life-25000)>=0)*100/Nsample;
    fprintf('numOfPoint=%d, meanLife=%f \n',numOfPoint,pointOutput(numOfPoint))
    fprintf('numOfPoint=%d, meanRes=%f %% \n',numOfPoint,resOutput(numOfPoint))
end

function [stateItemA,stateItemB,T]=changeStateItemT(stateItemA,stateItemB,pA,pB,n)
%   改状态
lambdaA=37000;
%lambdaA=lambdaA*1.1;
lambdaB=480000;
%lambdaB=lambdaB*1.1;
T1=exprnd(lambdaA,n,1);
T2=exprnd(lambdaB,n,1);
T1min=min(T1);
T2min=min(T2);
T1Index=find(T1==T1min);
T2Index=find(T2==T2min);
if T1min<=T2min && stateItemA(T1Index)==0
    path=rand(1);
    if path<pA(1)
        stateItemA(T1Index)=1;
    elseif pA(1)<=path<(pA(1)+pA(2))
        stateItemA(T1Index)=2;
    else
        stateItemA(T1Index)=3;
    end
end

if T1min>=T2min && stateItemB(T2Index)==0
    path=rand(1);
    if path<pB(1)
        stateItemB(T2Index)=1;
    else
        stateItemB(T2Index)=2;
    end
end
T=min(T1min,T2min);
end
```

```
function stateComp=changeStateComp(stateItemA,stateItemB)
%AB 工作状态决定整体
changeMat=[0 3 1;1 5 1;2 3 4;4 4 4];
p=length(changeMat);
stateComp=changeMat(stateItemA+stateItemB*p+1);
end
```