

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

基本条件和实验要求 (V2.12 2022-3-5 更新)

1. 词汇表.....	1
2. 符号表.....	2
3. 物理模型.....	3
4. 理论假设、基本参数.....	4
4.1 模型中的元件和部件.....	4
4.2 切换器 A 的故障类型.....	4
4.3 切换器 B 的故障类型.....	5
4.4 不可靠元件的使用寿命和各种故障的发生概率.....	5
4.5 其他.....	5
5. 建立理论模型.....	5
5.1 元件的状态.....	5
5.2 节点的状态.....	6
5.3 系统的状态.....	7
6. 仿真实验.....	9
6.1 可靠性指标.....	9
6.2 问题求解.....	10
6.3 本模型下系统失效后“复活”的现象.....	10
6.4 模型漏洞修补：特定故障组合令系统“工作寿命无限”的问题.....	11
7. 报告写作.....	11
7.1 写作的基本要求.....	11
7.2 格式参考.....	11
8. 课题研究报告评判要领.....	12
9. 避免不正当使用他人工作成果.....	12

1. 词汇表

元件

部件的基本构成单位，也是模型中系统的最小组成单位，具有“原子性”，不对其分割研究。

部件

系统的构成单元，其本身可以由一个或多个元件构成。

多状态系统

具有有限种性能状态等级的系统可称作“多状态系统”。在此有限种性能状态中，可以包括一种“完好”状态（性能完美），一种“完全失效”状态，和其余若干种介于前两者之间的“部分失效”状态（不同程度的性能降级）。

一个只具有“好”（性能完美）和“坏”（完全失效）两种状态的系统，是多状态系统的特例。组成多状态系统的元件（不可靠元件）和部件也可以是具有多状态的。

不可靠元件

在模型中被认为可能出现故障的元件。

可靠元件

在模型中被认为不会出现故障的元件。这通常是人为建立的理想化概念，将部分物理元件的故障情况等效为系统中其他元件的故障情况，以便简化模型。

k -out-of- n : G 系统

一个系统由 n 个组件（元件或部件）构成，其中若至少有 k 个性能正常，则整体系统能有效工作；换言之，仅当多于 $(n-k)$ 个组件同时失效，整体才失效。当 n 大于 k 意味着系统结构有冗余。

总线阻塞

当主从系统中的信号总线是各部件间的共享信道时，在同一时刻至多只允许有一个部件占用总线（向总线输出信号）。当出现特定故障时，有部件向占用总线并输出无效信号，或同时有两个及以上部件向总线输出信号，就会造成总线阻塞，导致系统整体失效。

2. 符号表

$\Pr(X)$	事件 X 的发生概率
$1(X)$	事件 X 为真时取 1，否则取 0
$\phi\{\bullet\}, \phi\{\bullet\}$	映射关系
n	声纳系统中节点的总数
k	声纳系统中组成有效主从结构所需的最少节点数
$f_{T_x}(\tau)$	元件 X 使用寿命的概率密度函数
$1/\lambda_x$	元件 X 的期望寿命
P_{EX}	元件发生故障，故障 X 发生的条件概率
$\{p_{x1}(t), p_{x2}(t), \dots, p_{xj}(t)\}$	时刻 t 元件或系统 X 各可能状态对应的概率， $\sum_j p_{xj}(t) \equiv 1$
$G_{A_i}(t), G_{B_i}(t)$	在时刻 t 节点 i 中切换器 A 和 B 的性能状态
$G_{N_i}(t)$	在时刻 t 节点 i 的性能状态
$G_{sys}(t)$	在时刻 t 声纳系统整体的性能状态
$Q_{N_j}(t)$	时刻 t 系统中恰好处于 g_{N_j} 状态的节点总数
T_f	系统工作寿命
$R(w)$	系统可靠性，系统工作寿命超过某一定值 w 的概率

3. 物理模型

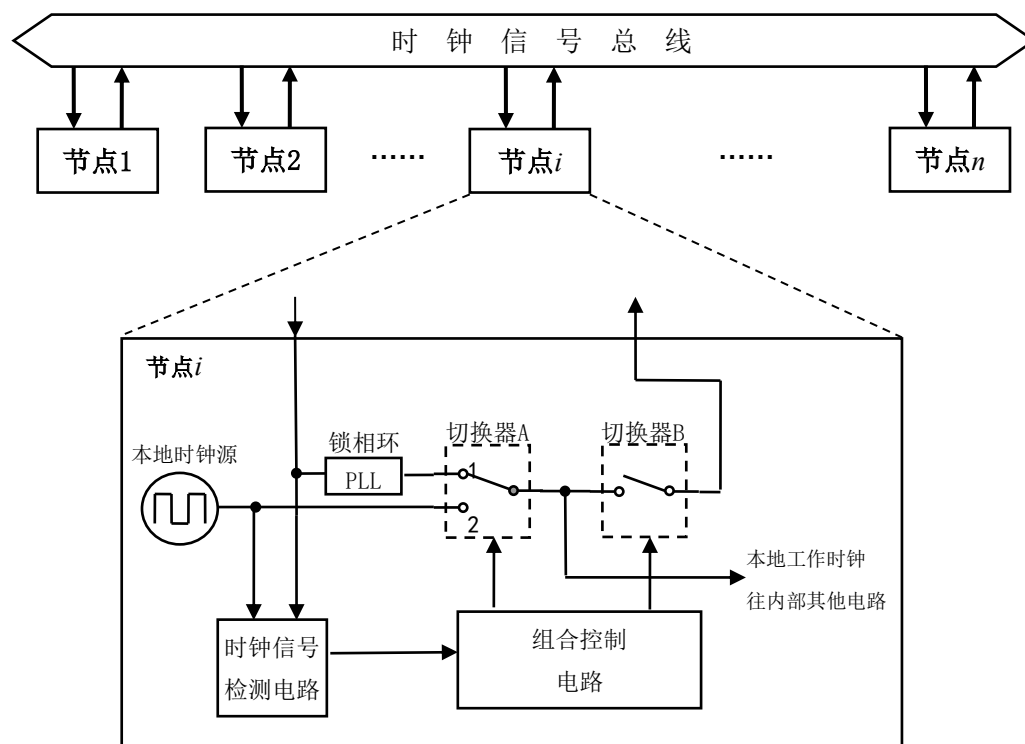


图1 一个多节点声纳系统中的时钟同步机制示意图

如图1所示，某分布式部署的声纳系统共有 n 个独立节点构成。各节点内部均是物理同构的。各节点必须保持严格的时钟信号同步才能有效协同工作，使系统发挥作用。所有节点经由时钟信号总线连接，由其中一个节点担当主节点，它的时钟电路工作于主模式，向总线输出时钟信号；其余节点均应担当从节点，节点内部时钟电路工作于从模式，仅从总线获取信号，不向总线输出信号。

节点可能发生故障。由于应用场合的特殊性，故障一旦发生就无法修复。

- 主模式

节点工作于主模式时如图2所示，内部电路中切换器A的掷刀接合于触点2，切换器B处于接通状态。本地时钟源信号既被用作本节点内部其他电路的工作时钟，又被输出到时钟信号总线上。

- 从模式

图1中所示的节点工作于从模式时所示，内部电路中切换器A的掷刀接合于触点1，切换器B处于断开状态。节点从总线获取时钟信号作为锁相环的参考信号，由锁相环输出与参考信号同频同相信号，作为本节点内部其他电路的工作时钟。

- 节点数目冗余

系统中只要有 k 个节点能在同步时钟下正常工作，系统整体就能发挥正常功能。通常，若 n 大于 k ，则系统中节点可能会有多余，这是为了提高系统生存率或使用寿命而做的冗余设计。

- 节点模式变换和主节点的“重选”

若某节点处于主模式。当它内部的时钟信号检测电路发现总线时钟信号失效，或不同于本地时钟源信号，则会通知控制电路改变切换器A和B的连接，退出主模式转为从模式。

若某节点处于从模式。当它内部的时钟信号检测电路发现总线时钟信号失效，则会通知

控制电路。控制电路进入戒备状态，为确认情况，将依据预置算法设定一段随机长度的计时。在计时期间，时钟信号检测电路如果检测到有效的总线时钟信号，则退出戒备，该节点继续工作在从模式；但如果计时结束仍未检测到有效的总线时钟信号，则该节点将主动转入主模式。

所以，尽管从系统总体角度观察，当前主节点发生时钟信号输出故障而退出主模式，其余节点中会重新“选”出一个担当新的主节点，但这一机制实际上是由所有节点各自独立动作而造成的总体效果。

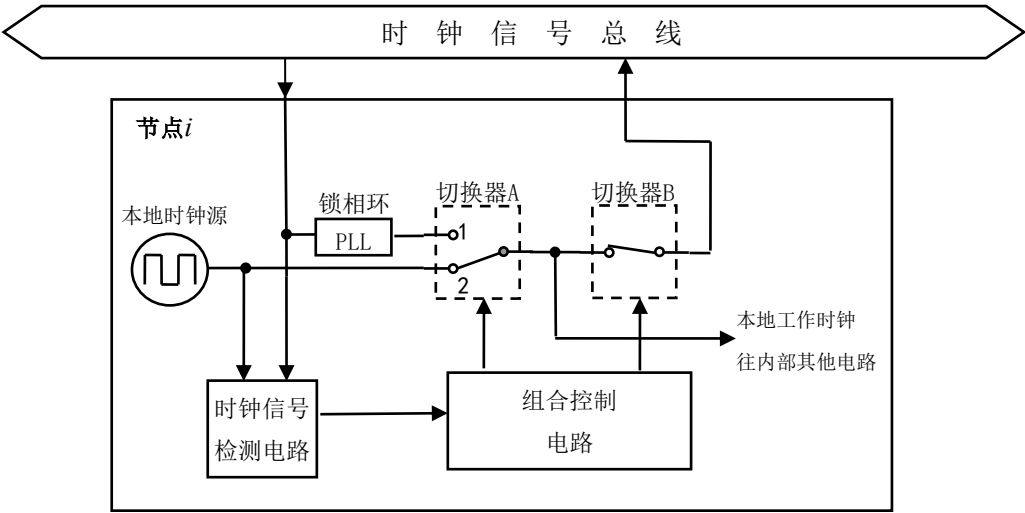


图2 工作在主模式的节点

4. 理论假设、基本参数

4.1 模型中的元件和部件

为降低运算复杂度，我们将切换器 A 和切换器 B 视作不可靠元件，而将系统中的其余元件均视作不失效的可靠元件，这些元件的失效风险已被等效地折算计入不可靠元件的失效风险中。

切换器可视作一种多状态元件，且彼此特性统计独立。由各元件组成的节点是构成系统的部件，显然其性能表现也是多状态的。声纳系统整体可看作一个多状态系统。

4.2 切换器 A 的故障类型

切换器 A 可能出现 3 种类型的故障，分别称作 A1、A2、A3。

- 故障 A1：切换器 A 不能正常受控，掷刀无法与触点 1 脱离。如图 3（a）所示。
- 故障 A2：切换器 A 不能正常受控，掷刀无法与触点 2 脱离。如图 3（b）所示。
- 故障 A3：切换器 A 不能正常受控，掷刀无法与任何一个触点接合。如图 3（c）所示。

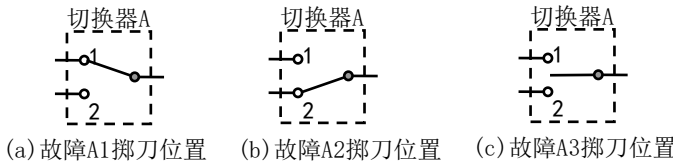


图3 切换器 A 的故障类型

4.3 切换器 B 的故障类型

切换器 B 可能出现 2 种类型的故障，分别称作 B1、B2。

- 故障 B1：切换器 B 不能正常受控，掷刀无法与触点脱离。如图 4（a）所示。
- 故障 B2：切换器 B 不能正常受控，掷刀无法与触点接合。如图 4（b）所示。

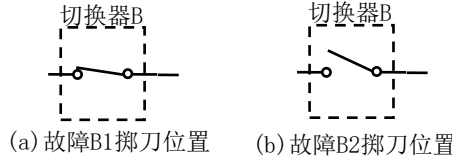


图 4 切换器 B 的故障类型

4.4 不可靠元件的使用寿命和各种故障的发生概率

切换器元件使用寿命的概率密度分布都遵从负指数分布。

- 切换器 A 的使用寿命 T_A 的概率密度分布和各种故障概率

$$f_{T_A}(\tau) = \lambda_A e^{-\lambda_A \tau} \quad \text{其中 } 1/\lambda_A = 5.90 \times 10^4 \text{ hour} \quad (\text{式 1})$$

条件概率

$$P_{EA1} = Pr(A1 \text{ occurs} | A \text{ is failed}) = 0.20$$

$$P_{EA2} = Pr(A2 \text{ occurs} | A \text{ is failed}) = 0.15$$

$$P_{EA3} = Pr(A3 \text{ occurs} | A \text{ is failed}) = 0.65$$

- 切换器 B 的使用寿命 T_B 的概率密度分布

$$f_{T_B}(\tau) = \lambda_B e^{-\lambda_B \tau} \quad \text{其中 } 1/\lambda_B = 2.20 \times 10^5 \text{ hour} \quad (\text{式 2})$$

条件概率

$$P_{EB1} = Pr(B1 \text{ occurs} | B \text{ is failed}) = 0.45$$

$$P_{EB2} = Pr(B2 \text{ occurs} | B \text{ is failed}) = 0.55$$

4.5 其他

- 不同元件随机状态的统计特性彼此独立。
- 元件一旦发生故障，故障类型即刻确定，且其后不会发生变化。
- 故障均不可修复。
- 本课题中 k 取定值 3。

5. 建立理论模型

依据前文所列各项假设，经分析可建立以下理论模型。

5.1 元件的状态

切换器 A 是一个 4 状态元件， g_{A0} 表示其处于正常工作状态，而 g_{A1} 、 g_{A2} 、 g_{A3} 分别

表示处于故障 A1、A2、A3 状态。任一节点 i 中的切换器 A 状态

$$G_{A_i}(t) \in \{g_{A0}, g_{A1}, g_{A2}, g_{A3}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

在时刻 t 时，各状态对应的出现概率 $\{p_{A0}(t), p_{A1}(t), p_{A2}(t), p_{A3}(t)\}$

由（式 1）可知

$$p_{A0}(t) = \Pr(T_A \geq t) = \int_t^{+\infty} f_{T_A}(\tau) d\tau = e^{-\lambda_A t} \quad (\text{式 3})$$

因 $\sum_{j=1}^3 p_{A_j}(t) = \Pr(T_A < t) = 1 - p_{A0}(t)$ ，则

$$p_{A1}(t) = p_{EA1} \cdot \Pr(T_A < t) = p_{EA1}(1 - e^{-\lambda_A t}) \quad (\text{式 4})$$

$$p_{A2}(t) = p_{EA2} \cdot \Pr(T_A < t) = p_{EA2}(1 - e^{-\lambda_A t}) \quad (\text{式 5})$$

$$p_{A3}(t) = p_{EA3} \cdot \Pr(T_A < t) = p_{EA3}(1 - e^{-\lambda_A t}) \quad (\text{式 6})$$

同理，切换器 B 是一个 3 状态元件，任一节点 i 中的切换器 B 状态

$$G_{B_i}(t) \in \{g_{B0}, g_{B1}, g_{B2}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

在时刻 t 时，各状态对应的出现概率 $\{p_{B0}(t), p_{B1}(t), p_{B2}(t)\}$

而
$$p_{B0}(t) = e^{-\lambda_B t} \quad (\text{式 7})$$

$$p_{B1}(t) = p_{EB1}(1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (\text{式 8})$$

$$p_{B2}(t) = p_{EB2}(1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (\text{式 9})$$

5.2 节点的状态

节点的状态由其内部元件状态的组合来确定，不同的组合也可能对应相同的节点性能状态。

$$G_{N_i}(t) = \varphi\{g_{N0}, g_{N1}, g_{N2}, g_{N3}, g_{N4}, g_{N5}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{式 10})$$

经分析可知，节点性能状态可以归为 6 种

$$G_{N_i}(t) \in \{g_{N0}, g_{N1}, g_{N2}, g_{N3}, g_{N4}, g_{N5}\}$$

其中 g_{N0} 表示节点性能完好，为直观起见，定义别名 g_{PF} （意为 perfectly functioning）；

g_{N1} 表示只能作为从节点，别名 g_{SO} （slave only）；

g_{N2} 表示或者作为主节点，或者作为不阻塞总线的失效节点，别名 g_{DM} （disable/master）；

g_{N3} 表示只能作为主节点，否则就会阻塞总线，别名 g_{MO} (master only)；

g_{N4} 表示成为不阻塞总线的失效节点，别名 g_{DN} (disable node)；

g_{N5} 表示节点总是阻塞总线，别名 g_{FB} (failed bus)；

切换器 A 和 B 的所有组合对应的节点状态见表 1。

表 1 切换器-节点状态映射关系

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}

在时刻 t ，任一节点 i 的性能状态的概率分布可表示为 $\{p_{N0}(t), p_{N1}(t), \dots, p_{N5}(t)\}$

$$p_{Nk}(t) = \sum_{(i,j) \in \{(g_{Ai}, g_{Bj}) \rightarrow g_{Nk}\}} P_{Ai}(t) \cdot P_{Bj}(t) \quad \text{其中 } k = 0,1,\dots,5 \quad i = 0,1,2,3 \quad j = 0,1,2 \quad (\text{式 } 11)$$

5.3 系统的状态

系统的整体工作状态由所有 n 个节点状态的组合来确定

$$G_{sys}(t) = \phi\{G_{N_1}(t), G_{N_2}(t), \dots, G_{N_n}(t)\} \quad (\text{式 } 12)$$

时刻 t 的系统各节点状态组合可以用 n 阶组合空间来表示

$$\{G_{N_1}(t), G_{N_2}(t), \dots, G_{N_n}(t)\} \in L^n$$

$$L^n = \{g_{N_0}, g_{N_1}, \dots, g_{N_5}\}_1 \times \{g_{N_0}, g_{N_1}, \dots, g_{N_5}\}_2 \times \dots \times \{g_{N_0}, g_{N_1}, \dots, g_{N_5}\}_n$$

不妨定义 $Q_{N_0}(t)$ 表示时刻 t 恰好处于 g_{N_0} 状态的节点总数

$$Q_{N_0}(t) = \sum_{i=1}^n 1(G_{N_i}(t) = g_{N_0}) \quad (\text{式 } 13)$$

利用前文对状态定义的别名，也可写作 $Q_{PF}(t) = \sum_{i=1}^n 1(G_{N_i}(t) = g_{PF}) \quad (\text{式 } 14)$

同样，有 $Q_{N_1}(t)$ ， $Q_{N_2}(t)$ ， $Q_{N_3}(t)$ ， $Q_{N_4}(t)$ ， $Q_{N_5}(t)$ ，或称 $Q_{SO}(t)$ ， $Q_{DM}(t)$ ， $Q_{MO}(t)$ ， $Q_{DN}(t)$ ， $Q_{FB}(t)$ 。

从整体性能的角度，可将的状态归为 4 类， $G_{\text{sys}}(t) \in \{G_{\text{sys}1}, G_{\text{sys}2}, G_{\text{sys}3}, G_{\text{sys}4}\}$ 。

- 系统确定不能有效工作的状态 $G_{\text{sys}1}$

当有以下情形之一，系统就无法有效工作。

- 1、条件 C1：任一节点处于 g_{FB} ，即 $Q_{FB}(t) \geq 1$
- 2、条件 C2：有两个或以上节点处于 g_{MO} ，即 $Q_{MO}(t) \geq 2$
- 3、条件 C3：无法找到适合工作于主模式的节点，即 $Q_{PF}(t) + Q_{MO}(t) + Q_{DM}(t) = 0$
- 4、条件 C4：能构成有效主从系统的节点总数少于 k 个，即 $Q_{PF}(t) + Q_{SO}(t) + 1((Q_{MO}(t) + Q_{DM}(t)) > 0) < k$

- 系统确定能有效工作的状态 $G_{\text{sys}2}$

当满足条件 C5I (C6UC7)，系统能有效工作。

- 1、条件 C5：无节点处于 g_{FB} ，即 $Q_{FB}(t) = 0$
- 2、条件 C6：有且仅有一个节点处于 g_{MO} （注：按前文描述的系统工作机制，该节点必然担当主节点，虽然因为随机因素，过程可能曲折），其余可工作于从模式的节点数不少于 $k-1$ ，即 $Q_{MO}(t) = 1$ 且 $Q_{PF}(t) + Q_{SO}(t) \geq k-1$
- 3、条件 C7：无节点处于 g_{MO} ，至少一个节点处于 g_{PF} 且该节点担当主节点，其余可

工作于从模式的节点数不少于 $k-1$ ，即 $Q_{MO}(t)=0$ 且 $Q_{PF}(t) \geq 1$ 且 $Q_{PF}(t)+Q_{SO}(t) \geq k$ ；或者无节点处于 g_{MO} 和 g_{PF} ，但至少一个节点处于 g_{DM} 能担当主节点，其余处于 g_{SO} 工作于从模式的节点数不少于 $k-1$ ，即 $Q_{MO}(t)=0$ 且 $Q_{PF}(t)=0$ 且 $Q_{DM}(t) \geq 1$ 且 $Q_{SO}(t) \geq k-1$ 。

- 同时满足条件 C8 和 C9，系统恰能有效工作的状态 G_{sys3}

当同时满足以下条件，系统在一定概率下有效工作。

1、条件 C8：无节点处于 g_{FB} 或 g_{MO} ，即 $Q_{FB}(t)+Q_{MO}(t)=0$

2、条件 C9：处于 g_{PF} 的节点大于等于 1，且处于 g_{PF} 和 g_{SO} 的节点总数恰好为 $k-1$ ，

另有若干节点处于 g_{DM} ，即 $Q_{PF}(t) \geq 1$ 且 $Q_{PF}(t)+Q_{SO}(t)=k-1$ 且 $Q_{DM}(t) \geq 1$

只有当任一个处于 g_{DM} 的节点恰好被选作主节点时，系统有效节点总数才能达到 k ，恰好可以有效工作，称作状态 G_{sys3} 。

由于主节点选择机制是随机等概的，所以有条件概率

$$\Pr(\text{任一 } g_{DM} \text{ 节点作主节点} | C8 \cap C9) = Q_{DM}(t) / (Q_{DM}(t) + Q_{PF}(t)) \quad (\text{式 } 15)$$

- 同时满足条件 C8 和 C9，系统恰不能有效工作的状态 G_{sys4}

当同时满足条件 C8 和 C9，而任一个处于 g_{PF} 的节点被选作主节点时，系统有效节点总数只能达到 $k-1$ ，恰好不能有效工作，称作状态 G_{sys4} 。

与（式 15）相对，有条件概率

$$\begin{aligned} \Pr(\text{任一 } g_{PF} \text{ 节点作主节点} | C8 \cap C9) &= 1 - \Pr(\text{任一 } g_{DM} \text{ 节点作主节点} | C8 \cap C9) \\ &= Q_{PF}(t) / (Q_{DM}(t) + Q_{PF}(t)) \end{aligned} \quad (\text{式 } 16)$$

6. 仿真实验

6.1 可靠性指标

本系统的各类故障均不可修复，所以可重点研究以下可靠性指标。

首次失效时间 T_f （time to failure）：又称工作寿命。是系统从初始时间到首次发生失效

的时间。在本系统中，就是系统状态首次向 G_{sys1} 或 G_{sys4} 发生转移的时间，但最大值（见 6.4 的解释）限定为 200000 hours。

平均首次失效时间 MTTF (mean time to failure): 平均工作寿命, T_f 的统计平均 $E(T_f)$ 。

系统可靠性: 系统工作寿命超过某一定值 w 的概率, 系统在 $0 < t \leq w$ 期间一直有效工作。

$$R(w) = \Pr(T_f \geq w) \quad (\text{式 17})$$

6.2 问题求解

根据前文的理论假设、基本参数和理论模型, 确立仿真算法, 用蒙特卡洛法模拟 S 套同型系统的运行状况。建议取 $S \geq 1 \times 10^5$ 。

系统可靠性统计式可以取

$$R(w) = \sum_{i=1}^S 1(T_f^{(i)} \geq w) / S \quad (\text{式 18})$$

其中 $T_f^{(i)}$ 为仿真实验的 S 套声纳系统中第 i 套的有效工作寿命。

- 1、通过随机模拟运行实验, 求节点总数 n , 使系统可靠性 $R(w)|_{w=30000\text{hours}}$ 最大, 其中 $n = 3, 4, 5, \dots, 20$
- 2、通过随机模拟运行实验, 求节点总数 n , 使系统平均工作寿命 $E(T_f)$ 最大, 其中 $n = 3, 4, 5, \dots, 20$
- 3、(optional) 通过理论计算, 解答以上 1 和/或 2 的问题, 并与 1、2 中随机模拟运行的各项结果进行对比分析
- 4、(optional) 自行设立感兴趣的其他论题

6.3 本模型下系统失效后“复活”的现象

在两种特定的情况下, 系统会发生先失效而后又恢复功能的现象。

情况一, 同时有两个 g_{MO} 节点, 系统失效。假如两个中至少一个 g_{MO} 节点内部切换器状态组合为 $g_{A0} g_{B1}$ (见表 1), 其后某一时刻切换器 A 发生 A3 故障, 节点状态转为 g_{DN} ($g_{A3} g_{B1}$)。由于两个 g_{MO} 节点争抢总线的情况消失, 于是系统可能恢复功能。

情况二, 系统处于 G_{sys4} 状态, g_{DM} 节点未能成为主节点, 有效节点少于 k 个, 系统失效。若 g_{DM} 节点的切换器状态组合为 $g_{A2} g_{B0}$, 其后某一时刻切换器 B 发生 B1 故障, 节点状态转为 g_{MO} ($g_{A2} g_{B1}$), 于是必然成为主节点, 使系统内有效节点增加 1 个, 系统功能得以恢复; 或者还有, 主节点发生故障进入 g_{SO} 状态, 一个 g_{DM} 节点成为主节点, 使系统内有效节点增加 1 个, 系统功能得以恢复。

在实际工程系统中, 这类因两个故障效果叠加产生的“负负得正”现象确会发生。比如

曾有过报道，某航天器上系统失灵后一段时日又戏剧性恢复功能，就被认为是后一个故障戏剧性地“修复”了前一个故障引发的症状。

在本案例中，对随机试验中出现“复活”现象的样本，根据可靠性的定义，不应归入可靠样本计数。

6.4 模型漏洞修补：特定故障组合令系统“工作寿命无限”的问题

考虑这样的情况：如果系统中一个节点的切换器 A、B 都已损坏，并处在 Master Only 的状态，而其余的节点的切换器 A、B 也均损坏，且处在 Slave Only 的状态。

由于假定了元件损坏后状态不再改变，则处于上述情况的系统将一直保持在工作状态，工作寿命将“无限长”。这种情况，一方面与工程常识不尽相符；另一方面，在进行可靠性指标统计时，通过加和平均运算求取首次失效时间 T_f ，则上述微小概率事件会直接导致运算结果为无穷大，这无疑是一个模型漏洞。

综合考虑，决定作补充限定：当出现上述情况时，定义其工作寿命为一个足够大的有限值，在前文中已给出此数值。

7. 报告写作

将课题研究的结果编写成报告，又称小论文，既是学生课程学习成果的总结，也是本课程评分的主要项目。本课题的报告有两次提交。先提交初稿，经过老师评判，给出反馈意见，配合师生交流指导，学习者可学习如何改进和完善，再提交最终正式稿。

7.1 写作的基本要求

- 真实反映试验结果和工作成果；
- 参照专业学术类期刊的文稿样式和学术规范，尽量做好“言之成理，言之有据”；
- 小论文主题目（注：不是指电子文件名称）指定为“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”；
- 无须详细介绍课题背景，可假定读者已阅读过《基本条件和实验要求》（即本文），将本文列为关联文档加以引述，尽量减少图文重复，把主要篇幅用作描述自己的工作；
- 正文 5 号字体，A4 纸张，允许双列排版，内部标题自拟；
- 核心内容应包括数学模型和求解算法的构建，简洁且全面地展示必要的数学表达、算法结构和步骤、实验结果，说明方案和结果的有效性；
- 如果有自主选做的拓展研讨话题，请在正文中设立专门的“一级标题”，并将相应内容置于该标题之下；
- 正文篇幅（不计正文前的“摘要”、“名词定义”和文后附录）有限制；不包含自主拓展问题讨论的报告，正文篇幅以 6 页为上限；包含自主拓展问题的，篇幅可放宽到最多不超过 8 页；
- 需将程序代码完整清单列于文后附录中，不要列在正文中；
- 初稿和正式稿的写作基本要求一致。

7.2 格式参考

可参考和使用本课程小论文模板（改编自上海交通大学本科毕业设计论文模板）。论文题目请自行改为前文规定，内部各级标题可遵照规则自改，英文摘要为选做内容。