

卫星光通信粗瞄系统可靠性分析^①

崔 宁¹, 陈兴林¹, 王亚辉²

¹(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

²(63880 部队, 洛阳 471000)

摘 要: 卫星光通信终端系统对实时性和可靠性均有要求, 针对不同备份方式, 在不同故障覆盖率下, 利用马尔科夫链理论对该系统的可靠性进行分析. 仿真结果表明, 冷备份方式的系统可靠性比热备份方式的系统可靠性高, 故障覆盖率为 1 时, 采用冷、热备份相结合方式, 能够同时满足系统的可靠性与实时性需求.

关键词: 卫星光通信; 冗余系统; Markov 链; 可靠性

Reliability Analysis of Rough Targeting System of Satellite Optical Communication

CUI Ning¹, CHEN Xing-Lin¹, WANG Ya-Hui²

¹(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

²(63880 Troops, Luoyang 471000, China)

Abstract: Satellite optical communication terminal system must be real-time and reliable. For different backup and fault coverage, the paper analyzes the reliability of the system using Markov chain theory. The simulation results show that system reliability for the cold backup is higher than that for the hot backup. That can meet the requirements of reliable and real-time of the system when the fault coverage is 1.

Key words: satellite optical communication; redundant system; Markov chain; reliability

卫星光通信具有高速率、大容量、抗干扰性强的优势, 对于国防及商业应用都具有极大的价值^[1]. 其工作的空间环境中存在着大量的带电粒子, 其受到高能粒子的冲击和电磁场的辐射等各种影响, 电子元器件会产生总剂量效应、单粒子闭锁和单粒子翻转等空间辐射效应, 会降低光通信终端的使用寿命和可靠性^[2,3]. 因此卫星光通信系统必须采取适当措施来满足长寿命、高可靠性的要求.

可靠性设计最常用的技术是冗余设计, 从我国的发展及应用来看, 星载设备多采用热备份、冷备份和三模冗余^[4]. 天宫一号是中国研制的大型载人航天器, 其主控制器采用了三模冷备份模式^[5]. 天巡一号微小卫星在硬件和软件上提出了局部冷备份的故障预防及处理方法^[6]. 通常在返回卫星中采用热备份模式, 保证系统的实时性; 在轨卫星多采用冷备份模式, 保证卫星的长寿命.

根据实际需求, 针对卫星光通信粗瞄系统采用冷、热备份相结合的冗余设计. 粗瞄系统按照功能划分为粗瞄主控单元、粗瞄控制单元和码盘解码单元. 粗瞄主控单元采用热备份, 其余两个功能单元采用冷备份. 本文以粗瞄主控单元为对象, 采用马尔科夫链理论比较分析冷、热备份两种方式的可靠性^[7,8].

1 双机热备份系统的马尔科夫模型

采用冗余方式设计的粗瞄系统具备系统重构和容错纠错能力, 因此需要考虑故障覆盖率和维修率, 故障覆盖率记为, 维修率记为.

为简化系统可靠性模型, 作如下假设:

- 1) 主备切换安全可靠;
- 2) 冷备单元在其备用阶段不会发生失效;
- 3) 故障必然导致失效;
- 4) 维修率 满足指数分布.

^① 基金项目: 国家自然科学基金(10904026)

收稿时间: 2014-11-01; 收到修改稿时间: 2015-06-03

1.1 系统状态

双机热备份系统状态如下:

- 0: 系统正常工作;
- 1: 一个模块发生故障并且被检测出;
- 2: 一个模块发生故障但是没有被检测出;
- 3: 两个模块都发生故障, 系统故障;
- 4: 系统故障但未检测出.

1.2 系统状态

粗瞄主控单元的失效率记为 λ , 系统的状态转移图如图 1 所示.

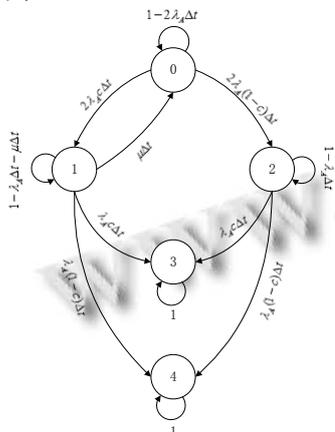


图 1 双机热备份系统状态转移图

设系统在 t 时和在 $t + \Delta t$ 时处于状态 $\{0,1,2,3,4\}$ 的概率分别为 $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$ 和 $P_0(t+\Delta t), P_1(t+\Delta t), P_2(t+\Delta t), P_3(t+\Delta t), P_4(t+\Delta t)$ 于是可以得到系统状态转移方程组:

$$\begin{cases} P_0(t+\Delta t) = (1-2\lambda_c\Delta t)P_0(t) + \mu\Delta tP_1(t) \\ P_1(t+\Delta t) = 2\lambda_c c\Delta tP_0(t) + (1-\lambda_c\Delta t - \mu\Delta t)P_1(t) \\ P_2(t+\Delta t) = 2\lambda_c(1-c)\Delta tP_0(t) + (1-\lambda_c\Delta t)P_2(t) \\ P_3(t+\Delta t) = \lambda_c c\Delta tP_1(t) + \lambda_c c\Delta tP_2(t) + P_3(t) \\ P_4(t+\Delta t) = \lambda_c(1-c)\Delta tP_1(t) + \lambda_c(1-c)\Delta tP_2(t) + P_4(t) \end{cases} \quad (1)$$

上式中的 $P_i(t+\Delta t)$ 表示 $t + \Delta t$ 时刻系统处于状态 i ; $P_i(t)$ 表示 t 时刻系统处于状态 i . 求连续时间的马尔科夫模型方程组, 可将方程组改为 $[P_i(t+\Delta t) - P_i(t)] / \Delta t$ 的形式, 并求 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限得出如下微分方程组:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -2\lambda_c P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P_1'(t) = 2\lambda_c c P_0(t) - (\lambda_c + \mu) P_1(t) \\ P_2'(t) = 2\lambda_c(1-c) P_0(t) - \lambda_c P_2(t) \\ P_3'(t) = \lambda_c c P_1(t) + \lambda_c c P_2(t) \\ P_4'(t) = \lambda_c(1-c) P_1(t) + \lambda_c(1-c) P_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

系统在 t 时刻的可靠度 $R(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t)$.

1.3 系统状态

根据美军标 MIL-HDBK-217J, 计算出粗瞄主控单

元的失效率为 $0.1573(10^{-6}/h)$. 卫星光通信终端在轨工作期间, 主要通过故障摘除后重启自检这样的系统重构方法来实现系统修复, 因此设维修率为 $2/h$. Matlab 仿真结果如表 1.

表 1 不同故障覆盖率下双机热备份系统的可靠度

故障覆盖率 c	可靠度 $R(t)$					
	$R(t_1)$	$R(t_2)$	$R(t_3)$	$R(t_4)$	$R(t_5)$	$R(t_6)$
1	0.999 335	0.998 670	0.997 342	0.996 015	0.993 367	0.986 778
0.99	0.981 808	0.951 129	0.887 783	0.828 111	0.720 498	0.508 735
0.98	0.964 723	0.906 138	0.790 581	0.688 798	0.522 799	0.262 386
0.97	0.948 068	0.863 554	0.704 321	0.573 168	0.379 512	0.135 387
0.96	0.931 831	0.823 241	0.627 750	0.477 165	0.275 620	0.069 889
0.95	0.916 002	0.785 075	0.559 759	0.397 428	0.200 263	0.036 095

$t_1 = 4380h, t_2 = 8760h, t_3 = 17520h, t_4 = 26280h,$

注: $t_5 = 43800h, t_6 = 87600h.$

故障覆盖率对双机热备份系统可靠性影响如图 2 所示.

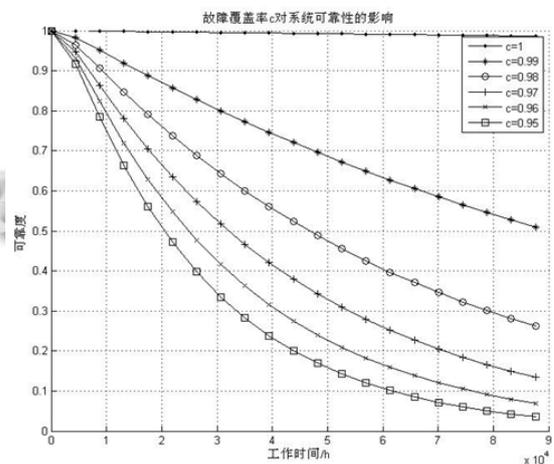


图 2 故障覆盖率对双机热备份系统可靠性的影响

2 双机冷备份系统的马尔科夫模型

2.1 系统状态

双机冷备份系统状态如下:

- 0: 工作单元正常;
- 1: 工作单元故障并被检测出, 备份单元正常;
- 2: 两个单元都发生故障, 系统故障;

3: 工作单元故障但是未被检测出, 系统故障.

2.2 系统可靠性

系统的状态转移图如图 3 所示.

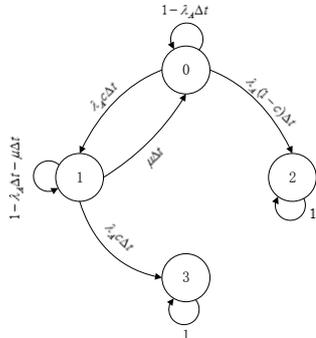


图 3 双机冷备份系统状态转移图

设系统在 t 时和在 $t + \Delta t$ 时处于状态 $\{0,1,2,3\}$ 的概率分别为 $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ 和 $P_0(t + \Delta t), P_1(t + \Delta t), P_2(t + \Delta t), P_3(t + \Delta t)$, 于是可以得到系统状态转移方程组:

$$\begin{cases} P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda_1 \Delta t)P_0(t) + \mu \Delta t P_1(t) \\ P_1(t + \Delta t) = \lambda_1 c \Delta t P_0(t) + (1 - \lambda_2 \Delta t - \mu \Delta t)P_1(t) \\ P_2(t + \Delta t) = \lambda_1 (1 - c) \Delta t P_0(t) + P_2(t) \\ P_3(t + \Delta t) = \lambda_2 c \Delta t P_1(t) + P_3(t) \end{cases} \quad (3)$$

将方程组改为 $[P_i(t + \Delta t) - P_i(t)] / \Delta t$ 的形式, 并求 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限得出如下微分方程组:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda_1 P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P_1'(t) = \lambda_1 c P_0(t) - (\lambda_2 + \mu)P_1(t) \\ P_2'(t) = \lambda_1 (1 - c)P_0(t) \\ P_3'(t) = \lambda_2 c P_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

系统在 t 时刻的可靠度 $R(t) = P_0(t) + P_1(t)$.

2.3 系统可靠性仿真

Matlab 仿真结果如下:

表 2 不同故障覆盖率下双机冷备份系统可靠度

故障覆盖率 c	可靠度 $R(t)$					
	$R(t_1)$	$R(t_2)$	$R(t_3)$	$R(t_4)$	$R(t_5)$	$R(t_6)$
1	0.999 667	0.999 335	0.998 670	0.998 005	0.996 677	0.993 366
0.99	0.982 746	0.965 791	0.932 751	0.900 842	0.840 262	0.706 040
0.98	0.966 112	0.933 372	0.871 184	0.813 139	0.708 394	0.501 821
0.97	0.949 759	0.902 042	0.813 680	0.733 974	0.597 220	0.356 671
0.96	0.933 683	0.871 764	0.759 972	0.662 516	0.503 493	0.253 505

$t_1 = 4380h, t_2 = 8760h, t_3 = 17520h, t_4 = 26280h,$

注: $t_5 = 43800h, t_6 = 87600h.$

故障覆盖率对双机热备份系统可靠性影响如图 4 所示.

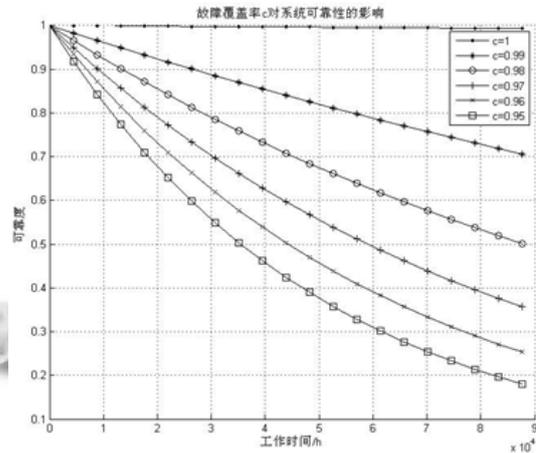


图 4 故障覆盖率对双机热备份系统可靠性的影响

3 两种备份方式下系统可靠度比较

在空间环境中, 卫星光通信系统预计在轨运行十年(87600 小时), 粗瞄系统在十年后的可靠度不低于 0.99, 依此为设计依据对不同故障覆盖率下, 两种备份方式的系统可靠度比较如图 5、图 6 所示.

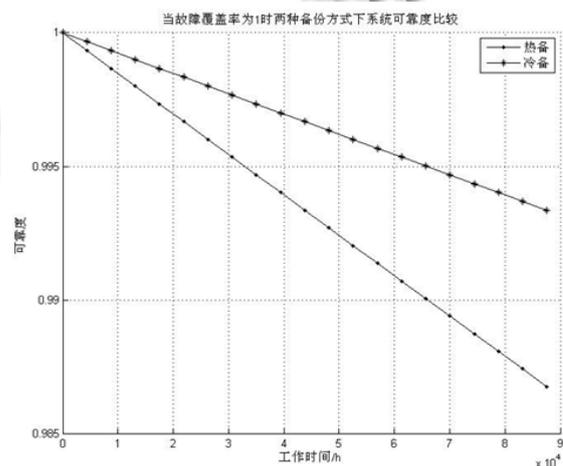


图 5 故障覆盖率为 1 时, 两种备份方式系统可靠度比较

由图 5、图 6 可以看出, 在不同故障覆盖率下, 冷备份方式的系统可靠度比热备份方式下的系统可靠度高; 当故障覆盖率下降时, 系统可靠度下降, 工作时间越长, 系统可靠度下降幅度越大.

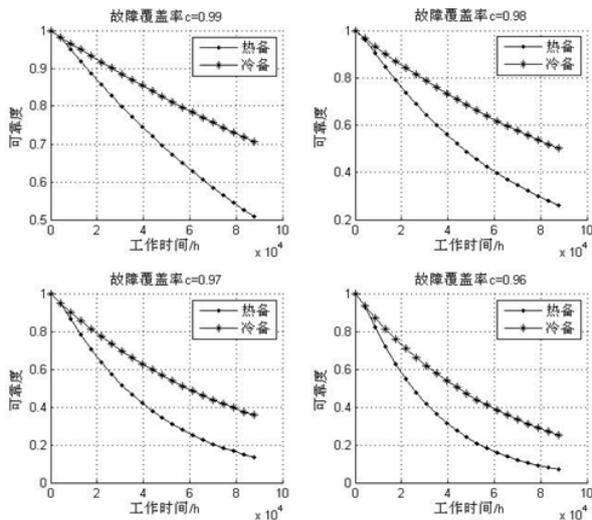


图6 不同故障覆盖率时,两种备份方式系统可靠度比较

4 结语

本文以粗瞄主控单元为对象,比较分析了在不同故障覆盖率下,热备份与冷备份两种方式下系统的可靠度.通过分析得出以下结论:

(1)在进行长寿命工作要求下的冗余系统设计时,其故障检测要覆盖全部故障.

(2)双机冷备份系统可靠度比双机热备份系统的可靠度高,因此对于实时性要求高的系统,应该采用热

备份方式,否则,冷备份方式更好一些.

综合以上分析,粗瞄系统采用冷、热备份相结合的方式,能够兼顾到系统对主控单位的实时性要求,又能保证整个系统的高可靠性.

参考文献

- 1 Chan VS. Free-Space optical communications. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750–4762.
- 2 刘韵,赵尚弘,杨生胜等.空间辐射下卫星光通信系统半导体激光器的可靠性估计. *激光与光电子学进展*, 2014, 5: 1–5.
- 3 赵力,杨晓花.辐射效应对半导体器件的影响及加固技术. *电子与封装*, 2010, 10(8): 31–36.
- 4 马文·劳沙德.系统可靠性理论:模型、统计方法及应用(第2版).北京:国防工业出版社, 2010.
- 5 蔡彪,林宇,刘波.天宫一号目标飞行器 GNC 分系统容错策略设计. *空间控制技术与应用*, 2011, 37(6): 40–46.
- 6 陈志明,刘海颖,叶伟松.“天巡一号”微小卫星星务故障管理设计. *中国空间科学技术*, 2014, 4: 79–83.
- 7 张本宏,陆阳.双模冗余—比较系统的可靠性和安全性分析. *系统工程学报*, 2009, 24(2): 231–237.
- 8 杨其国.基于 Markov 过程的冗余系统可靠性分析. *计算机仿真*, 2011, 28(1): 356–359.