

基于故障树的南极赤道式天文望远镜主轴 控制系统可靠性分析*

李 运^{1,2,3†} 杨世海^{1,2‡}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 南极天文望远镜长期工作在无人值守的南极之巅, 每年只有一次科考维护的机会. 其光机电系统复杂且维护不易, 需要科考队员是多面手, 故南极望远镜的可靠性必须引起格外重视. 基于南极赤道式天文望远镜AST3-3 (Antarctic Schmidt Telescopes 3-3) 主轴控制系统的故障机理和故障模式, 引入故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法, 得出该系统底事件结构重要度大小顺序. 在此结果之上, 易于发现系统潜隐问题和薄弱环节, 为提高系统稳定性和优化系统设计指明方向.

关键词 望远镜, 故障树, 方法: 数据分析

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

南极天文望远镜^[1]所处环境极端恶劣, 故障的发生在所难免. 若能预知系统的薄弱环节并对其进行强化, 进而提高系统稳定性, 延长设备平均无故障时间, 就能为南极天文观测^[2-3]奠定基础. 虽然我们已有两台天文望远镜(AST3-1和AST3-2)在南极工作, 对主轴控制系统的研究也日趋完善, 但是对于其可靠性分析的研究却很少. 南极天文望远镜工作现场见图1.

AST3-3属于赤道式天文望远镜, 主轴系统包括赤经轴和赤纬轴, 也可称为方位轴和俯仰轴. 主轴是望远镜实现跟星的核心部件, 其有效无误的运行是关乎天文观测顺利进行的主要因素. 本文通过讨论其几种常见故障模式, 建立故障树. 进而对其进行定性分析得到系统的最小割集, 定量分析得到底事件结构重要度大小顺序. 利用该结果易于发现系统潜隐问题和薄弱环节, 对于提高系统可靠性和系统改进有很大帮助.

2016-11-10收到原稿, 2017-02-16收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11373052、11403065)、973项目(2013CB834901)资助

[†]yli@niaot.ac.cn

[‡]shyang@niaot.ac.cn



图 1 南极天文望远镜工作现场

Fig.1 Working site of the Antarctic astronomical telescopes

2 故障树分析法

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)法就是通过对可能造成设备故障的环境、硬件、软件和人为等因素进行分析,建立相应的故障树,然后求出造成系统故障原因的所有可能组合和概率。FTA是目前国际上公认的一种简单、有效的故障分析和可靠性分析方法,且被广泛应用。该方法对于指导系统设计的最优化、分析系统的薄弱环节具有重大意义^[4]。20世纪60年代初期,贝尔实验室的沃森(Watson)第1个使用故障树分析法对民兵式导弹发射系统进行分析。他在1965年华盛顿大学(University of Washington)的学术年会上首次提出故障树分析法的明确概念,随即便引起学术界的高度重视^[5]。

故障树是建立在对系统故障经验库的基础之上,将系统级的故障现象(顶事件)与最基本的故障原因(底事件)之间内在的关系表示成树形的网络图。各层事件之间通过“与”、“或”、“非”和“异或”等逻辑关系相关联,并将这些逻辑关系用逻辑符号表示出来^[6]。基于组件逻辑结构关系的故障诊断方法也是利用系统模型,根据系统实际行为与预期行为的差别,通过逻辑推导得出引发故障的部件集合^[7]。在学习故障树的建树之前,首先要明确故障树的各种图形符号及含义。常用及本文用到的建树相关符号及含义见图2。

Name	Symbol	Meaning
Bottom event		The event that indicates the cause of the failure
Top event/ Intermediate event		The output of the logic gate
OR		Occurs when at least one
AND		Occurs when all
XOR		Occurs when only one
Other events		The event needs further prove

图 2 故障树常用符号及其含义

Fig.2 Common symbols and meanings of a fault tree

在进行可靠性分析之前, 假设顶事件和底事件只考虑两种状态, 即正常或者故障, 且底事件之间相互独立^[8].

3 主轴控制系统

AST3-3的赤纬轴和赤经轴分别由两个电机共同控制, AST3-3的双电机消隙设计包含两种模式: 机械消隙和电气消隙. 机械消隙采用独特的添加消隙齿轮的方法, 该方法已在专家讨论和试验中得到了理论和实验验证. 电气消隙则采用在控制器中嵌入消隙算法来实现. 假设其中一台电机故障无法运转, 机械消隙依然可以起作用, 从而起到备份电机的作用. 该机械消隙方法在中国科学院南京天文光学技术研究所经过实际测试表明: 一台电机完全满足南极巡天望远镜指向跟踪的精度要求. 系统主要由220 V电源输入、24 V电源输入、滤波器、电机驱动器、电抗器、UMAC (Universal Motion and Automation Controller)运动控制器等设备及附件组成. 电机运行模式为由码盘组成的位置反馈回路的闭环运动模式, 其中与电机同轴的旋转变压器反馈回路起到电机定相的作用. 其结构示意图见图3, 主轴控制系统原理见图4.

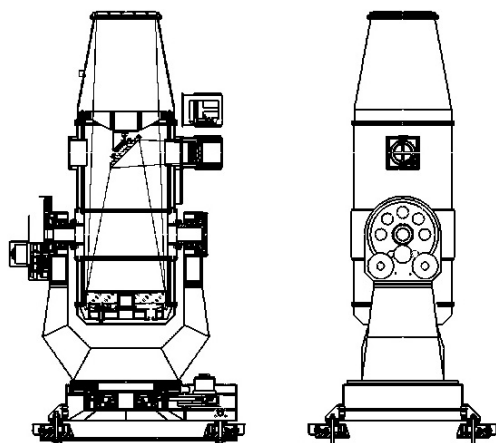


图3 AST3-3结构示意图. 左图: 正视图; 右图: 侧视图

Fig. 3 Structural schematic of AST3-3. Left: front view; Right: side view

主轴系统故障主要体现在电压、电流、功率等参数的变化上面. 根据主轴控制系统实际运行情况, 对参数异常的原因进行详细分析. 系统中4个电机的工作原理和接线方式相同, 以下只对一个电机进行故障原理分析.

根据最近3次科考人员提供的资料总结和实验室低温测试结果, 可将主轴控制系统故障总体分为如下3类: 硬件因素故障、软件因素故障和极端恶劣环境因素故障.

硬件因素故障: (1)电源供电系统故障导致控制系统失去电力供应. (2)旋转变压器与电机轴产生滑移导致电机定相故障, 电机无法启动. (3)旋转变压器和码盘在极端环境下回路信号故障导致闭环控制出现故障, 电机无法正常运转. (4)光纤插头松动导致上位机与UMAC通信阻塞. (5)电机自身引起的故障, 比如电机动力电缆损坏. 该故障主要由以下情况引起: -80°C 超低温下电缆变硬、紫外线的伤害和望远镜 360° 运动时变硬电缆的拖动和扭曲.

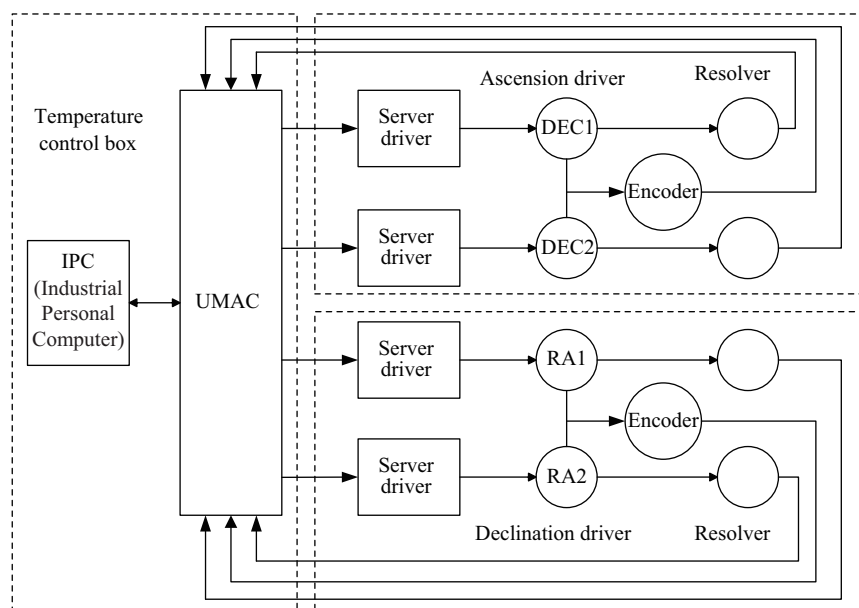


图 4 主轴控制系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the spindle control system

软件因素故障: (1)电机的过流保护. (2)控制软件死机.

环境因素故障: (1)保护罩在大风下导致焊接处断开, 风雪堆积堵塞齿轮. (2)特制低温润滑脂在超低温下粘性有一定程度的增加, 也增大了驱动系统的阻尼. (3)整个望远镜完全被冰雪覆盖, 造成整个系统负载增大. (4)活动部件的关节连接缝隙处完全被冰雪阻塞, 进一步加大了系统阻尼. 上述几种情况曾在AST3-2中出现, 都可归结于系统过载引起的故障.

4 系统可靠性分析

系统可靠性分析主要分为3个步骤, 首先列出系统的故障树, 然后基于故障树进行定性分析, 最后进行定量分析.

4.1 故障树的建立

赤纬轴电机我们分别表示为DEC1和DEC2, 两个电机可以单独控制该轴, 也可以共同控制. 由于设计有机械消除, 故两个电机只要有一个正常工作即能保证该轴的正常运行. 赤经轴电机我们分别表示为RA1和RA2, 运行机理同赤纬轴.

故障树顶事件 T 即为主轴系统故障. 在此我们主要分析以下4种情况作为中间事件: 赤纬轴故障 M_{DEC} 、赤经轴故障 M_{RA} 、电源故障 M_{POW} 、通讯模块故障 M_{COM} 和其他故障 M_{OTH} . 主轴系统故障树分析总图如图5.

下面我们对各个子系统逐一进行分析. 每个电机系统我们分析其常见的5种故障模式: 闭环回路控制的码盘信号故障、电机定相故障、机械齿轮故障、电机过流保护和电机自身故障, 其中每个电机轴上安装两个旋转变压器对电机进行定相, 两个同时故障即导致定相故障. 电机自身故障原因有很多种, 在此我们简单分为转子和定子故障. 赤纬轴

故障树见图6 (故障标号说明见表1). 表1中 $X_{resolver1}$ 表示1号旋变、 $X_{encoder1}$ 表示1号编码器、 X_{gear1} 表示1号齿轮、 $X_{overcurrent1}$ 表示1号过流、 $X_{stator1}$ 表示1号定子、 X_{rotor1} 表示1号转子, 其余表示以此类推, 不再一一赘述.

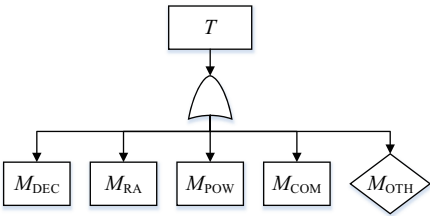


图 5 主轴系统故障树总图

Fig. 5 General drawing of the fault tree for the spindle system

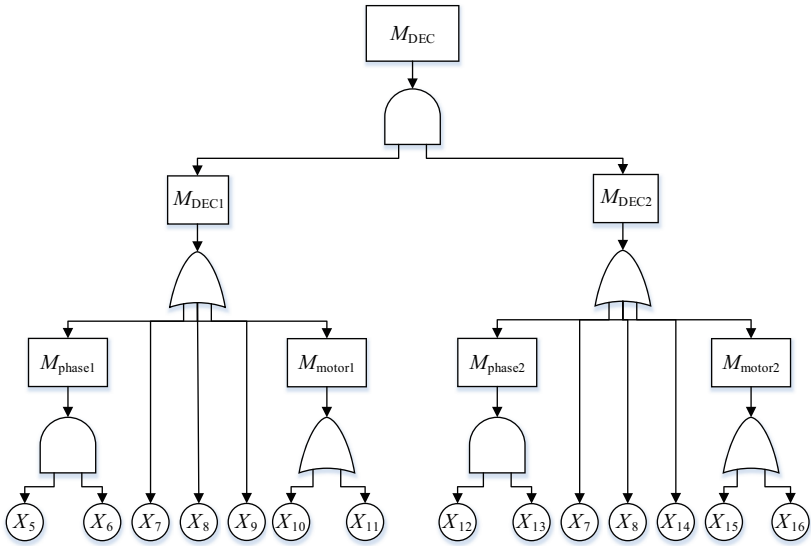


图 6 赤纬轴子系统故障树

Fig. 6 Schematic diagram of the fault tree for the declination axis subsystem

表 1 赤纬轴故障标号说明					
Table 1 The instruction of the fault marks of the declination axis					
Label1	Meaning1	Label2	Meaning2	Label3	Meaning3
M_{DEC1}	DEC1	$X_5 = X_{resolver1}$	Resolver1	$X_{11} = X_{rotor1}$	Rotor1
M_{DEC2}	DEC2	$X_6 = X_{resolver2}$	Resolver2	$X_{12} = X_{resolver3}$	Resolver3
M_{phase1}	Phase1	$X_7 = X_{encoder1}$	Encoder1	$X_{13} = X_{resolver4}$	Resolver4
M_{motor1}	Motor1	$X_8 = X_{gear1}$	Gear1	$X_{14} = X_{overcurrent2}$	Overcurrent2
M_{phase2}	Phase2	$X_9 = X_{overcurrent1}$	Overcurrent1	$X_{15} = X_{stator2}$	Stator2
M_{motor2}	Motor2	$X_{10} = X_{stator1}$	Stator1	$X_{16} = X_{rotor2}$	Rotor2

赤经轴系统同赤纬轴系统总体设计相同, 这里我们就不重复描述, 赤经轴故障树见图7 (故障标号说明见表2).

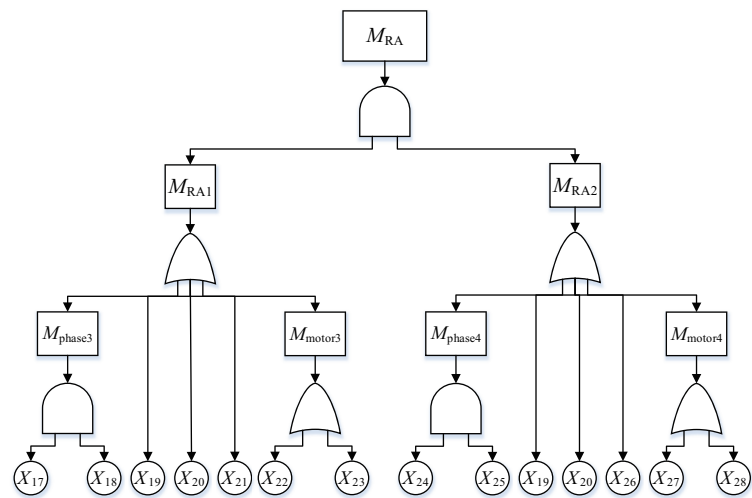


图 7 赤经轴子系统故障树

Fig. 7 Schematic diagram of the fault tree for the ascension axis subsystem

表 2 赤经轴故障标号说明

Table 2 The instruction of the fault marks of the ascension axis					
Label1	Meaning1	Label2	Meaning2	Label3	Meaning3
M_{RA1}	RA1	$X_{17} = X_{resolver5}$	Resolver5	$X_{23} = X_{rotor3}$	Rotor3
M_{RA2}	RA2	$X_{18} = X_{resolver6}$	Resolver6	$X_{24} = X_{resolver7}$	Resolver7
M_{phase3}	Phase3	$X_{19} = X_{encoder2}$	Encoder2	$X_{25} = X_{resolver8}$	Resolver8
M_{motor3}	Motor3	$X_{20} = X_{gear2}$	Gear2	$X_{26} = X_{overcurrent4}$	Overcurrent4
M_{phase4}	Phase4	$X_{21} = X_{overcurrent3}$	Overcurrent3	$X_{27} = X_{stator4}$	Stator4
M_{motor4}	Motor4	$X_{22} = X_{stator3}$	Stator3	$X_{28} = X_{rotor4}$	Rotor4

主轴控制系统的电源供电部分主要分为两种: 220 V和24 V, 220 V为电机供电, 24 V为驱动器供电. 电源子系统故障树见图8 (故障标号说明见表3).

表 3 电源模块故障标号说明

Table 3 Instructions of the power module fault codes			
Label1	Meaning1	Label2	Meaning2
$X_1 = X_{220\text{ V}}$	220 V	$X_2 = X_{24\text{ V}}$	24 V

主轴控制系统的通讯模块故障模式主要分为两种: 控制软件死机和上位机与UMAC通信阻塞. 这两种情况都会导致电机运转命令发不出去, 造成电机驱动系统不能正常运转或损坏的假象. 通讯模块故障树见图9 (故障标号说明见表4).

整个主轴控制系统的故障树见图10.

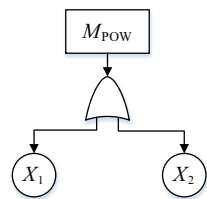


图 8 电源子系统故障树

Fig. 8 The fault tree diagram of power subsystem

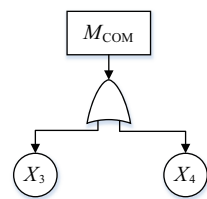


图 9 通讯模块子系统故障树

Fig. 9 The fault tree diagram of communication module subsystem

表 4 通讯模块故障标号说明

Table 4 Instructions of the communication module fault codes

Label	Meaning
$X_3 = X_{\text{software}}$	Software crash
$X_4 = X_{\text{com-block}}$	IPC and UMAC communication barriers

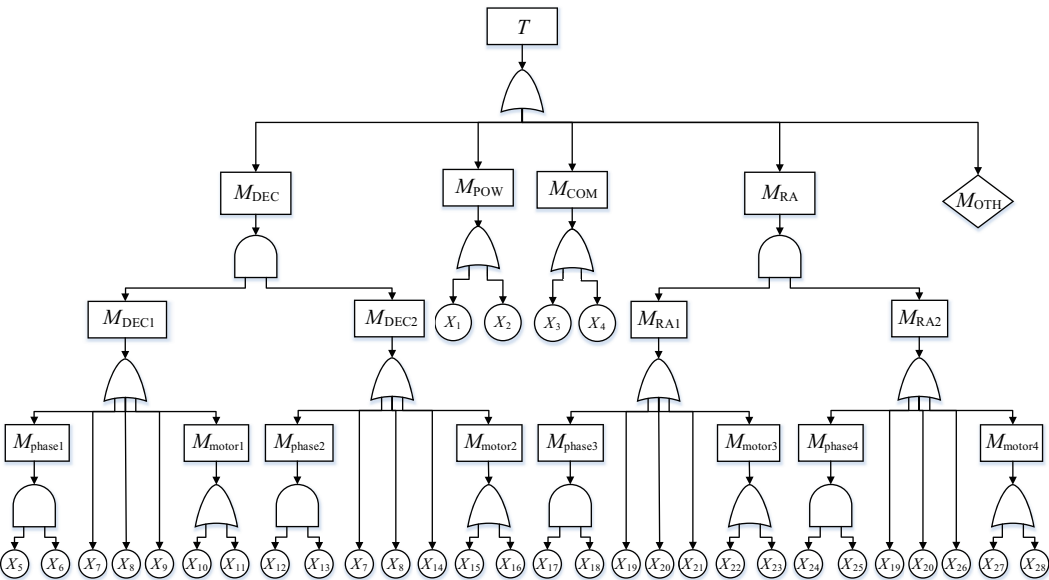


图 10 主轴控制系统故障树总图

Fig. 10 General drawing of the fault tree for the spindle control system

4.2 故障树的定性分析

故障树的定性分析主要是寻找最小割集. 最小割集是指底事件都发生就能使顶事件发生的必要底事件集合. 常用求最小割集的方法有列真值表法、上行法、下行法和二元决策图等. 本文采用下行法求其最小割集. 运算过程中按照布尔代数运算对表达式进行化简. 化简后的表达式表示成底事件积之和的最简式, 每一项对应于故障树的一个最小

割集. 运算过程如下:

$$\begin{aligned}
 T &= M_{\text{DEC}} + M_{\text{RA}} + M_{\text{POW}} + M_{\text{COM}} + M_{\text{OTH}}; \\
 M_{\text{DEC}} &= M_{\text{DEC1}} M_{\text{DEC2}}; M_{\text{RA}} = M_{\text{RA1}} M_{\text{RA2}}; \\
 M_{\text{POW}} &= X_1 + X_2; M_{\text{COM}} = X_3 + X_4; \\
 M_{\text{DEC1}} &= M_{\text{phase1}} + X_7 + X_8 + X_9 + M_{\text{motor1}}; \\
 M_{\text{DEC2}} &= M_{\text{phase2}} + X_7 + X_8 + X_{14} + M_{\text{motor2}}; \\
 M_{\text{RA1}} &= M_{\text{phase3}} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + M_{\text{motor3}}; \\
 M_{\text{RA2}} &= M_{\text{phase4}} + X_{19} + X_{20} + X_{26} + M_{\text{motor4}}; \\
 M_{\text{phase1}} &= X_5 X_6; M_{\text{motor1}} = X_{10} + X_{11}; \\
 M_{\text{phase2}} &= X_{12} X_{13}; M_{\text{motor2}} = X_{15} + X_{16}; \\
 M_{\text{phase3}} &= X_{17} X_{18}; M_{\text{motor3}} = X_{22} + X_{23}; \\
 M_{\text{phase4}} &= X_{24} X_{25}; M_{\text{motor4}} = X_{27} + X_{28};
 \end{aligned} \tag{1}$$

将以上表达式合并代入(1)式, 可得顶事件表达式为:

$$\begin{aligned}
 T &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_7 + X_8 + X_{19} + X_{20} + X_{\text{OTH}} + X_9 X_{14} + X_9 X_{15} + \\
 &\quad X_9 X_{16} + X_{10} X_{14} + X_{10} X_{15} + X_{10} X_{16} + X_{11} X_{14} + X_{11} X_{15} + X_{11} X_{16} + \\
 &\quad X_{21} X_{26} + X_{21} X_{27} + X_{21} X_{28} + X_{22} X_{26} + X_{22} X_{27} + X_{22} X_{28} + X_{23} X_{26} + \\
 &\quad X_{23} X_{27} + X_{23} X_{28} + X_5 X_6 X_{14} + X_5 X_6 X_{15} + X_5 X_6 X_{16} + X_9 X_{12} X_{13} + \\
 &\quad X_{10} X_{12} X_{13} + X_{11} X_{12} X_{13} + X_{17} X_{18} X_{26} + X_{17} X_{18} X_{27} + X_{17} X_{18} X_{28} + \\
 &\quad X_{21} X_{24} X_{25} + X_{22} X_{24} X_{25} + X_{23} X_{24} X_{25} + X_5 X_6 X_{12} X_{13} + X_{17} X_{18} X_{24} X_{25}.
 \end{aligned}$$

因此其最小割集为: (X_1) 、 (X_2) 、 (X_3) 、 (X_4) 、 (M_5) 、 (X_7) 、 (X_8) 、 (X_{19}) 、 (X_{20}) 、 (X_9, X_{14}) 、 (X_9, X_{15}) 、 (X_9, X_{16}) 、 (X_{10}, X_{14}) 、 (X_{10}, X_{15}) 、 (X_{10}, X_{16}) 、 (X_{11}, X_{14}) 、 (X_{11}, X_{15}) 、 (X_{11}, X_{16}) 、 (X_{21}, X_{26}) 、 (X_{21}, X_{27}) 、 (X_{21}, X_{28}) 、 (X_{22}, X_{26}) 、 (X_{22}, X_{27}) 、 (X_{22}, X_{28}) 、 (X_{23}, X_{26}) 、 (X_{23}, X_{27}) 、 (X_{23}, X_{28}) 、 (X_5, X_6, X_{14}) 、 (X_5, X_6, X_{15}) 、 (X_5, X_6, X_{16}) 、 (X_9, X_{12}, X_{13}) 、 (X_{10}, X_{12}, X_{13}) 、 (X_{11}, X_{12}, X_{13}) 、 (X_{17}, X_{18}, X_{26}) 、 (X_{17}, X_{18}, X_{27}) 、 (X_{17}, X_{18}, X_{28}) 、 (X_{21}, X_{24}, X_{25}) 、 (X_{22}, X_{24}, X_{25}) 、 (X_{23}, X_{24}, X_{25}) 、 $(X_5, X_6, X_{12}, X_{13})$ 、 $(X_{17}, X_{18}, X_{24}, X_{25})$ 共41个最小割集, 其中1阶最小割集9个, 2阶最小割集18个, 3阶最小割集12个, 4阶最小割集2个. 阶数越低的割集重要性越大.

4.3 故障树的定量分析

故障树定量分析的主要任务是求出顶事件发生的特征量(如概率、故障率、首次故障时间等)和底事件的重要度等. 计算顶事件发生的概率必须知道各底事件发生的概率. 基于南极项目情况的特殊性, 各个底事件发生的概率暂时还不能准确计算. 在此我们只分析底事件的重要度. 重要度对于确定系统需要监控的部位、制定系统故障诊断的先后顺序及系统设计的改善都有重大意义.

不考虑某个底事件的发生概率, 通过观察树的结构, 以决定该事件的位置重要程度, 称为该底事件的结构重要度. 假设共有 n 个底事件, 取底事件 i 的状态 X_i 的值为 0 或 1 (0 为故障、1 为正常). 在底事件 i 的状态确定的情况下, 剩下 $n-1$ 个事件组合的系统状态数应为 2^{n-1} . 底事件 i 发生则顶事件发生的状态数为 $\sum_{\{x|x_i=1\}} \varphi(1_i, x)$; 底事件 i 不发生则顶事件发生的状态数为 $\sum_{\{x|x_i=0\}} \varphi(0_i, x)$, 其差值除以剩下 $n-1$ 个事件组合的系统状态数 2^{n-1} , 得到的结果 $I_\varphi(i)$ 即为底事件 i 的结构重要度, 即:

$$I_\varphi(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{\{x|x_i=1\}} [\varphi(1_i, x) - \varphi(0_i, x)],$$

其中 $\varphi(1_i, x) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$, $\varphi(0_i, x) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$. 该系统底事件数目较多, 用此类算法求解结构重要度将会带来超大的计算量. 以下我们将对此算法进行简化. 对于底事件 X_1 , 在最小割集中出现的次数为 1, 出现的最小割集为 1 个 1 阶割集; 对于 X_5 , 在最小割集中出现的次数是 4, 出现的最小割集为 3 个 3 阶割集和 1 个 4 阶割集; 对于 X_9 , 在最小割集里出现的次数是 4, 出现的最小割集为 3 个 2 阶割集和 1 个 3 阶割集. 以此类推, 得到如下表 5.

表 5 结构重要度对照表
Table 5 Comparison table of the structural importance

Bottom event	Count	Cut set order	Bottom event	Count	Cut set order
$X_1 = X_{220 \text{ V}}$	1	1 first	$X_{15} = X_{\text{stator}2}$	4	3 second and 1 third
$X_2 = X_{24 \text{ V}}$	1	1 first	$X_{16} = X_{\text{rotor}2}$	4	3 second and 1 third
$X_3 = X_{\text{software}}$	1	1 first	$X_{17} = X_{\text{resolver}5}$	4	3 third and 1 fourth
$X_4 = X_{\text{com-block}}$	1	1 first	$X_{18} = X_{\text{resolver}6}$	4	3 third and 1 fourth
$X_5 = X_{\text{resolver}1}$	4	3 third and 1 fourth	$X_{19} = X_{\text{encoder}2}$	1	1 first
$X_6 = X_{\text{resolver}2}$	4	3 third and 1 fourth	$X_{20} = X_{\text{gear}2}$	1	1 first
$X_7 = X_{\text{encoder}1}$	1	1 first	$X_{21} = X_{\text{overcurrent}3}$	4	3 second and 1 third
$X_8 = X_{\text{gear}1}$	1	1 first	$X_{22} = X_{\text{stator}3}$	4	3 second and 1 third
$X_9 = X_{\text{overcurrent}1}$	4	3 second and 1 third	$X_{23} = X_{\text{rotor}3}$	4	3 second and 1 third
$X_{10} = X_{\text{stator}1}$	4	3 second and 1 third	$X_{24} = X_{\text{resolver}7}$	4	3 third and 1 fourth
$X_{11} = X_{\text{rotor}1}$	4	3 second and 1 third	$X_{25} = X_{\text{resolver}8}$	4	3 third and 1 fourth
$X_{12} = X_{\text{resolver}3}$	4	3 third and 1 fourth	$X_{26} = X_{\text{overcurrent}4}$	4	3 second and 1 third
$X_{13} = X_{\text{resolver}4}$	4	3 third and 1 fourth	$X_{27} = X_{\text{stator}4}$	4	3 second and 1 third
$X_{14} = X_{\text{overcurrent}2}$	4	3 second and 1 third	$X_{28} = X_{\text{rotor}4}$	4	3 second and 1 third

分析表 5 数据可以发现对于结构重要度, 有:

$$\begin{aligned} I_\varphi(220 \text{ V}) &= I_\varphi(24 \text{ V}) = I_\varphi(\text{software}) = I_\varphi(\text{com-block}) = I_\varphi(\text{encoder}1) \\ &= I_\varphi(\text{gear}1) = I_\varphi(\text{encoder}2) = I_\varphi(\text{gear}2) > I_\varphi(\text{overcurrent}1) = I_\varphi(\text{stator}1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= I_{\varphi}(\text{rotor1}) = I_{\varphi}(\text{overcurrent2}) = I_{\varphi}(\text{stator2}) = I_{\varphi}(\text{rotor2}) = I_{\varphi}(\text{overcurrent3}) \\
&= I_{\varphi}(\text{stator3}) = I_{\varphi}(\text{rotor3}) = I_{\varphi}(\text{overcurrent4}) = I_{\varphi}(\text{stator4}) = I_{\varphi}(\text{rotor4}) \\
&> I_{\varphi}(\text{resolver1}) = I_{\varphi}(\text{resolver2}) = I_{\varphi}(\text{resolver3}) = I_{\varphi}(\text{resolver4}) \\
&= I_{\varphi}(\text{resolver5}) = I_{\varphi}(\text{resolver6}) = I_{\varphi}(\text{resolver7}) = I_{\varphi}(\text{resolver8}).
\end{aligned}$$

将表5中的数据用MATLAB进行处理, 得到如图11的曲线. 由于没有各个底事件发生故障概率的具体参数, 故假定各底事件故障发生概率相同. 结构重要度完全由部件在系统结构中的位置决定, 而与其故障概率无关. 由此也可以说明我们假设各底事件故障发生概率相同是合理的. 从数学上讲, Birnbaum结构重要度^[9]是指顶事件发生概率对底事件发生概率的偏导数. 可以写成:

$$\begin{aligned}
I_i^{\text{Pr}}(t) &= \frac{\partial g(Q(t))}{\partial (Q_i(t))} = E\{\Phi[1_i, X(t)] - \Phi[0_i, X(t)] = 1\} \\
&= P\{\Phi[1_i, X(t)] - \Phi[0_i, X(t)] = 1\},
\end{aligned}$$

该处理方法能有效简化底事件集合庞大的数据冗余计算, 特别适合大型复杂系统的稳定性分析. 此处我们假设每个底事件发生故障的概率为 $P(X_i) = 0.1$, 纵坐标表示为底事件 X_i 发生即导致顶事件发生的概率. 该曲线符合以上得出的底事件结构重要度排序, 证明该处理方法的有效性.

最小割集阶数越低, 对整个系统的影响越大, 所以1阶割集的底事件应该引起我们的重视. 由表5分析可知: 电机自身故障和机械齿轮故障发生异常的概率要比定相用旋转编码器故障的概率大. 在进行系统完善和改进的时候, 按此顺序进行优先考虑.

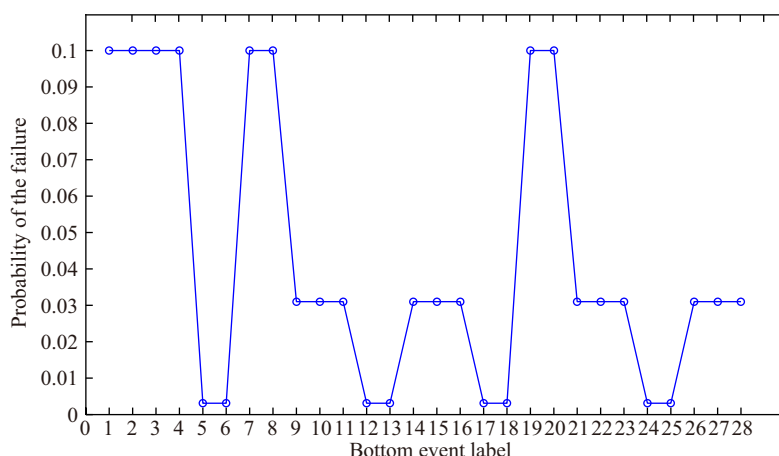


图 11 MATLAB仿真结果

Fig. 11 Result of MATLAB simulation

5 结果分析

本文对南极望远镜主轴控制系统的结构进行了分析. 基于南极巡天望远镜AST3的实际运行数据, 总结易发生的主要故障模式, 并建立对应的故障树模型. 由故障树易知望

望远镜主轴控制系统共有28个底事件, 41个最小割集, 即望远镜在工作过程中有41种故障可能. 通过对故障树进行定性和定量分析, 得出各底事件的结构重要度. 此方法可应用于AST3巡天望远镜和未来更大口径的南极天文仪器^[10], 对后期系统升级和优化有一定的指导作用. 同时本文对于南极各种设备研制也具有一定的参考价值.

致谢 感谢南京天文光学技术研究所温海焜老师、李晓燕老师和许丹丹同学对本工作的大力支持. 同时也感谢南极天文技术中心全体工作人员, 有了他们的合作才得以保证南极项目的顺利进行.

参考文献

- [1] 刘根荣, 袁祥岩. 天文学报, 2009, 50: 224
- [2] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. 天文学报, 2007, 48: 48
- [3] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. ChA&A, 2007, 31: 211
- [4] 高国庆, 周璐春. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 010102
- [5] 高国庆. 基于故障树的自适应光学电控系统故障诊断专家系统的研究. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016
- [6] 段隽喆, 李华聪. 科学技术与工程, 2009, 9: 1914
- [7] 杨悦, 黄明, 杨永安. 科学技术与工程, 2013, 13: 7357
- [8] 梁芬, 姜宏伟, 郭亚男, 等. 机电工程, 2014, 31: 1067
- [9] 孙红梅, 高齐圣, 朴营国. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25: 39
- [10] 姜铮, 程景全, 左营喜, 等. 天文学报, 2015, 56: 189

Reliability Analysis of Main-axis Control System of the Equatorial Antarctica Astronomical Telescope Based on Fault Tree

LI Yun^{1,2,3} YANG Shi-hai^{1,2}

(1 Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

(2 Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The Antarctica astronomical telescopes work chronically on the top of the unattended South Pole, and they have only one chance to maintain every year. Due to the complexity of the optical, mechanical, and electrical systems, the telescopes are hard to be maintained and need multi-tasker expedition teams, which means an excessive awareness is essential for the reliability of the Antarctica telescopes. Based on the fault mechanism and fault mode of the main-axis control system for the equatorial Antarctica astronomical telescope AST3-3 (Antarctic Schmidt Telescopes 3-3), the method of fault tree analysis is introduced in this article, and we obtains the importance degree of the top event from the importance degree of the bottom event structure. From the above results, the hidden problems and weak links can be effectively found out, which will indicate the direction for promoting the stability of the system and optimizing the design of the system.

Key words telescopes, fault tree, methods: data analysis