

基于故障树的自适应光学电控系统可靠性分析

高国庆^{1,2} 周璐春¹

¹中国科学院光电技术研究所中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 自适应光学系统涉及到光学、电控等多个领域,因此分析和提高自适应光学电控系统的可靠性是非常必要的。引入基于故障树的分析方法,对自适应光学电控系统中影响成像的关键模块,例如波前探测单元、波前处理单元,建立了系统的故障树模型,并对其定性分析得到了系统的最小割集,定量分析得到了系统的故障概率以及底事件概率的重要度排序。根据分析结果,可以有效地提高系统的稳定性,优化系统设计。

关键词 自适应光学; 电控系统; 故障树分析法; 可靠性

中图分类号 TP277

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.010102

Fault Tree Analysis on Reliability of Electronic Control System of Adaptive Optics

Gao Guoqing^{1,2} Zhou Luchun¹

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The adaptive optics (AO) system involves many fields like optics, electronic control and so on, so it is necessary to improve the reliability of the electronic control system. The fault tree analysis (FTA) method introduced, and the key modules, such as the wavefront detection unit, wavefront processing unit, are analyzed. A fault tree model of the system is established. The minimum cut sets of system are got through qualitative analysis. Similarly, the probability of failure of the system and the order of the importance of bottom incident are got through quantitative analysis. According to the result, the stability of system can be improved and the design of system can be optimized effectively.

Key words adaptive optics; electronic control system; fault tree analysis; reliability

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 220.1080

1 引言

自适应光学(AO)系统是一套大型的复杂系统,整个系统涉及光学、机械、电子、控制等不同领域,其中电子技术更是覆盖了自适应光学系统的采集、处理、矫正、观察等各个阶段。随着自适应光学技术的日益发展和成熟,自适应光学系统更是越来越多的应用在航天、医学、天文、工业等不同领域。自适应光学系统的高复杂度和广泛应用也对其电气系统的可靠性提出了更高的要求。虽然国内自适应光学系统研制起步较早,学科体系发展也已经很健全,但是对于其电气系统的可靠性分析,国内研究较少。

同时,故障树分析法(FTA)是系统安全性和可靠性分析的一种十分重要的方法。目前在国际上,FTA是一种公认的简单、有效的故障分析、可靠性分析方法,对于指导系统设计的最优化、分析系统的薄弱环节大有意义^[1]。

本文通过应用故障树对AO电气系统故障进行分析研究,建立故障树,并分析了故障形成原因及发生概

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26; 网络出版日期: 2015-12-28

作者简介: 高国庆(1990—),男,硕士研究生,主要从事可靠性分析方面的研究。E-mail: 296405364@qq.com

导师简介: 周璐春(1977—),女,博士,副研究员,主要从事信号处理方面的研究。E-mail: 907570582@qq.com(通信联系人)

率大小,利用该方法方便发现潜在问题和系统薄弱环节,对于提高系统可靠性和系统改进有很大帮助。

2 故障树分析法

1961年美国贝尔实验室在民兵导弹的发射控制系统可靠性研究中首次应用了FTA技术,并且获得成功,之后美国在1974的核电站安全评价报告中也应用了FTA技术。故障树指用来表明产品哪些部分的故障或外界事件或他们的组合将导致产品发生一种给定故障的逻辑图。故障树把最不希望发生的故障事件作为顶事件,把不能再细分的基本故障事件作为底事件,把介于底事件和顶事件之间的一切事件称作中间事件。用对应的符号代表这些事件,再用合适的或、与门把这些事件连接成树状图。这种图形化的方法清晰易懂,使人们对事件之间的逻辑关系一目了然,更加便于定性、定量分析^[2]。

故障树分析是通过对系统的硬件、软件、环境、人为等诸多因素加以分析,绘制故障图,确定可能导致系统故障的事件组合及其概率大小。通过这些分析可以确定系统的薄弱环节,以便人们采取有效措施提高产品可靠性。

故障树分析主要分为定性分析和定量分析。定性分析的目的主要在于寻找顶事件发生的原因事件及原因事件的组合,也就是归纳导致顶事件发生的所有故障事件的集合。定量分析则是通过故障树的数学描述计算出系统顶事件的故障概率以及一些其他的可靠性指标^[3]。本文主要通过对故障树进行定性、定量分析,从而找出其所有的最小割集,确定顶事件发生概率。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。

3 自适应光学系统电控系统

3.1 AO系统简介

自适应光学系统原理如图1所示,自适应光学系统由波前探测器、波前控制器和波前校正器三个部分组成,在系统中首先由波前传感器实时探测出波前畸变,然后由波前处理器处理波前畸变信号后将产生的控制信号加到波前校正器上,产生与所探测的波前畸变大小相等符号相反的波前校正量,使光波波前由于受到动态干扰而产生的畸变得到实时补偿,从而获得接近衍射极限的成像质量^[4]。

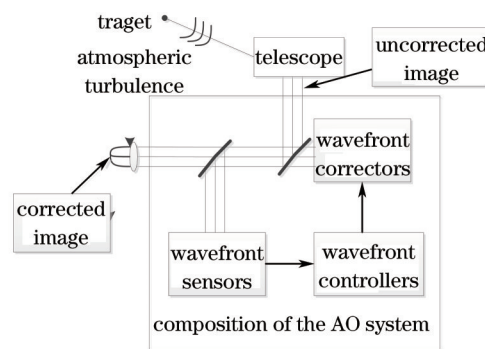


图1 自适应光学系统原理图

Fig.1 System schematic of adaptive optics

3.2 AO电控系统简介

在工程应用中自适应光学系统电控系统分为如下4个部分:波前控制系统、电源系统、通信网络系统、成像及数据记录系统如图2所示。波前控制系统是整个自适应光学系统的核心之一,由波前探测模块、波前处理模块、波前控制模块、波前校正模块组成。波前探测模块探测带有波前畸变的目标信息,并将其转换为数字信号输出到波前信号处理模块,波前信号处理模块完成波前误差提取、波前复原及控制器电压计算工作,并输出数字控制电压到波前控制模块^[5]。波前控制模块主要由驱动放大模块组成,驱动放大模块将接收到的数字控制电压转换为模拟控制电压,并根据驱动器的驱动需求将模块电压放大后输出到波前校正系统。波前校正系统主要由倾斜镜(TM)和变形镜(DM)组成。

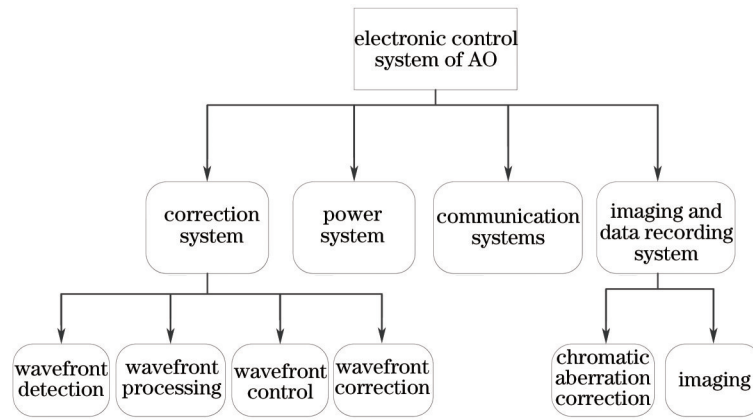


图2 AO电气系统模块示意图

Fig.2 Block diagram of the electronic control system of AO

4 可靠性分析

4.1 AO电气系统故障树设计

故障树的生成是可靠性分析的前提。故障树的生成方法主要分为演绎法和合成法。演绎法主要用于人工建树,合成法主要用于计算机辅助建树。使用演绎法生成故障树要求建树者对于系统及其各个组成部分充分了解。AO电控系统故障树如图3所示(其中故障标号说明如表1所示),选取AO电气系统故障作为顶事件,所谓AO电气系统故障,即由于系统中部件损坏或者其他原因导致整个系统不能正常工作的情形。分析得到AO电控系统故障主要包含以下4个方面:系统监控服务器返回故障、成像监控服务器故障返回、网络系统故障和电源系统故障。事件与逻辑符号表示如图4所示,下文故障树均以图3为例。

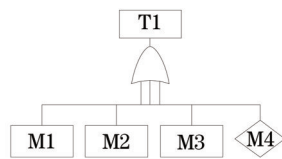


图3 AO电控系统故障树示意图

Fig.3 Fault tree of electronic control system of AO

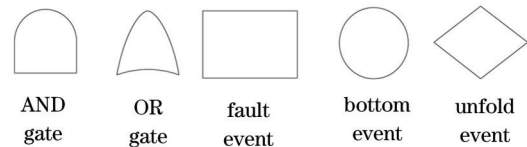


图4 故障树事件及逻辑门符号

Fig.4 Event and logic gate symbols of fault tree

表1 故障标号说明1

Table 1 Description of fault No.1

Fault No.	Fault name
T1	Fault of electrical system of AO
M1	Fault of system monitoring server
M2	Fault of imaging monitoring server
M3	Fault of communication system
M4	Fault of power system

进一步分析系统监控服务器主要负责之前提到的波前控制系统,其故障树如图5所示(其中故障标号说明如表2所示),主要包含波前探测、波前处理、波前控制、波前校正4个部分,每个部分主要负责精跟踪和哈特曼传感器,相应信号的获取、处理、转移等。工程经验表明参数未正确加载和高压驱动故障相对更容易发生。

成像系统故障树如图6所示(其中故障标号说明如表3所示)。成像监控成像服务器主要监控色差校正系统和成像系统,对于成像系统来说不同波段的成像系统是相对独立的,只有在所有波段的成像系统都发生故障时,高一级的的事件才会发生。

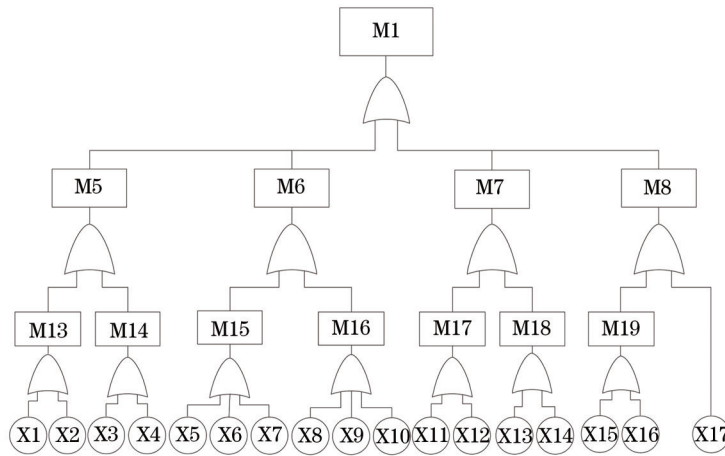


图5 波前系统故障树示意图

Fig.5 Fault tree of wavefront system of AO

表2 故障标号说明2

Table 2 Description of fault No.2

Fault No.	Fault name	Fault No.	Fault name
M5	Fault of wavefront detection system	M6	Fault of wavefront processing system
M7	Fault of wavefront controlling system	M8	Fault of wavefront correcting system
M13	Fault of precision tracking(PT) sensor	M14	Fault of Shack-Hartmann sensor(S-H)
M15	Fault of PT processor	M16	Fault of S-H processor
M17	Fault of PT high voltage amplifier (HVA)	M18	Fault of S-H HVA
M19	Fault of S-H correction system	X1	Fault of PT sensor receiving
X2	Fault of PT sensor transmitting	X3	Fault of S-H sensor receiving
X4	Fault of S-H sensor transmitting	X5	PT processor parameter is not loaded correctly
X6	Fault of PT processor	X7	Fault of PT processor transmitting
X8	S-H processor parameter is not loaded correctly	X9	Fault of S-H processor
X10	Fault of S-H processor transmitting	X11	Fault of PT HVA receiving
X12	Fault of PT HVA power returning	X13	Fault of S-H HVA receiving
X14	Fault of S-H HVA power returning	X15	Fault of S-H TM receiving
X16	Fault of DM receiving	X17	Fault of PT TM receiving

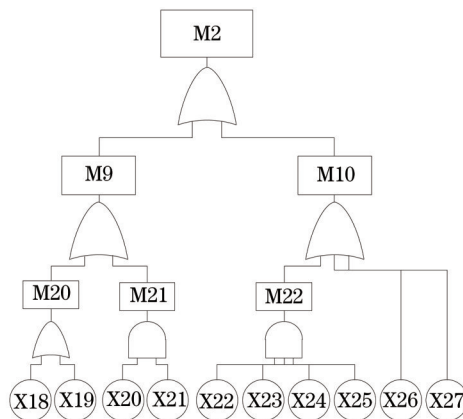


图6 成像系统故障树示意图

Fig.6 Fault tree of imaging system of AO

表3 故障标号说明3
Table 3 Description of fault No.3

Fault No.	Fault name	Fault No.	Fault name
M9	Fault of aberration correction system	M10	Fault of imaging system
M20	Fault of aberration correction controller	M21	Fault of analog to digital converter (ADC)
M22	Fault of imaging	X18	Fault of aberration correction controller receiving
X19	Fault of data transmit	X20	Fault of ADC1
X21	Fault of ADC2	X22	Fault of I imaging
X23	Fault of J imaging	X24	Fault of K imaging
X25	Fault of IR imaging	X26	Fault of imaging recording system
X27	Fault of imaging monitoring system		

网络系统故障树如图7所示(其中故障标号说明如表4所示)。网络系统故障主要指主控网络和电控网络的故障,由于网络系统已经深入到AO电控系统的各个模块之中,在对其他系统的分析过程中网络故障是不可分离的,所以本文简单的将网络系统故障作为未展开事件进行分析。

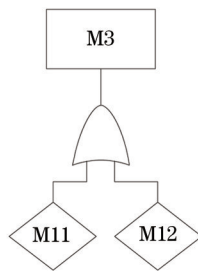


图7 网络系统故障树示意图

Fig.7 Fault tree of network system of AO

表4 故障标号说明4

Table 4 Description of fault No.4

Fault No.	Fault name	Fault No.	Fault name
M11	Fault of main control network	M12	Fault of electrical control network

4.2 定性分析

对故障树进行定性和定量分析首先都要根据故障树求出其最小割集,一般求最小割集的方法主要有上行法和下行法,本文采用上行法求其最小割集。上行法从故障树的底事件开始,自下而上逐层的进行集合运算,将或门输出事件用输入事件的布尔和代替,与门输入事件用输入事件的布尔积代替。在逐层代入过程中按照布尔代数运算律化简,最后将顶事件表示成底事件积之和的最简式。其中每一积项对应于故障树的一个最小割集,全部积项即是故障树的所有最小割集^[6]。

$$M13=X1+X2; M14=X3+X4; M5=M13+M14;$$

$$M15=X5+X6+X7; M16=X8+X9+X10; M6=M15+M16;$$

$$M17=X11+X12; M18=X13+X14; M7=M17+M18;$$

$$M19=X15+X16; M8=M19+X17;$$

$$M1=M5+M6+M7+M8;$$

$$M20=X18+X19; M21=X20.X21(“.”指取布尔积); M9=M20+M21;$$

$$M22=X22.X23.X24.X25; M10=M22+X26+X27;$$

$$M3=M11+M12(未展开事件当作底事件处理)。$$

将以上各式代入 $T1=M1+M2+M3+M4$, 得

$$T1=X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X11+X12+X13+X14+X15+X16+X17+X18+X19+X20.X21+X22.X23.X24.X25+X26+X27+M11+M12+M4,$$

因此其最小割集为

K1:{X1},K2:{X2},K3:{X3},K4:{X4},K5:{X5},K6:{X6},K7:{X7},K8:{X8},K9{X9},K10{X10},K11:{X11},K12:{X12},K13:{X13},K14:{X14},K15:{X15},K16:{X16},K17{X17},K18:{X18}K19:{X19},K20:{X20,X21},K21:{X22,X23,X24,X25},K22:{X26},K23:{X27},K24:{M11},K25:{M12},K26:{M4}.

得到 24 个一阶最小割集, 1 个二阶割集, 1 个四阶割集, 阶数越低的割集重要性越大, 并且割集越多, 系统更加危险。

4.3 定量分析

AO 系统电控系统目前已经投入使用, 系统运行正常, 稳定性较高。上文分析中已经提到根据工程经验参数未正确加载和高压驱动故障相对更加容易发生。所以根据工程经验假设各底事件故障概率为 $p_x(5) = p_x(8) = p_x(11) = p_x(12) = p_x(13) = p_x(14) = 1.5 \times 10^{-5}$, 其他底事件概率 $p_x(i) = 10^{-5}$, 未展开事件概率为 $P_m(i) = 10^{-4}$, 计算过程中未展开事件当作底事件处理。顶事件概率:

$$g = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - p_x(i)], \quad (1)$$

式中 $p_x(i)$ 为第 i 个底事件的概率经过计算的顶事件概率, $g = 5.9984 \times 10^{-4}$ 。

重要度分析是故障树分析的重要组成部分, 底事件概率重要度是指一个底事件或者最小割集发生失效时对顶事件发生的贡献, 其计算公式为

$$I_q(i) = \frac{\partial g}{\partial p_x(i)}, \quad (2)$$

经过计算发现对于概率重要度, $I_q(5) = I_q(8) = I_q(11) = I_q(12) = I_q(13) = I_q(14) > I_q(1) = I_q(2) = I_q(3) = I_q(4) = I_q(6) = I_q(7) = I_q(9) = I_q(10) = I_q(14) = I_q(15) = I_q(16) = I_q(17) = I_q(18) = I_q(19) = I_q(26) = I_q(27) > I_q(20) = I_q(21) > I_q(22) = I_q(23) = I_q(24) = I_q(25)$ 。可见当系统稳定性较高时, 阶数较高的最小割集发生的概率也要相对小许多, 而对于阶数越小, 概率越大的底事件, 比如, 望远镜参数未正确加载, 驱动放大器故障等, 在进行系统完善和改进的时候, 工作人员要优先改进和完善。

4.4 故障树分析总结

从之前的定性分析可知, 系统共有 26 个最小割集, 这就预示着顶事件运营期间存在这 26 种故障可能。其中最小割集阶数越低, 影响越大, 所以 24 个一阶割集更要引起工作人员和专家警惕。根据之前工程经验, 考虑到维修成本和故障代价, 波前探测、处理、控制、校正系统的影响较大。

经过计算顶事件发生概率 $g = 5.9984 \times 10^{-4}$, 虽然表明系统相对稳定, 但是从系统重要度分析可以看出, 系统基本事件重要度相差不大, 这也就同样表明 AO 电控系统电气故障的一个特点: 一旦系统中某一部件产生故障, 系统将会立即失效, 而不会等到其他部件产生故障共同作用。这一点波前探测、处理、控制、校正系统表现最为明显。所以, 考虑以上因素, 系统的日常检查和维护不能因为系统的稳定而忽略。

5 结 论

结合自适应光学系统电控系统的故障特性采用 FTA 对 AO 电控系统进行故障分析, 建立了以电控系统故障为顶事件的系统故障树模型, 取得了较好的效果, 获得了层次化、有序的故障体系, 极大的节省了日常维护和诊断的时间, 并且在此基础上可以进一步分析系统, 采取更多有效的办法保证系统有效的运行。

参 考 文 献

- Li Yuanyuan, Li Yazhou, Hu Liqin. Fault tree analysis on measuring system of a laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 335-339.
- 李媛媛, 李亚洲, 胡丽琴, 等. 激光雷达测量系统故障树分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 335-339.
- Liu Weidong, Xu Yingqiang, Gao Xiya. Fault analysis of automobile brake system based on fault tree[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, (6): 118-120.
- 柳卫东, 徐颖强, 高西亚. 基于故障树的汽车制动系故障分析[J]. 机械设计与制造, 2007, (6): 118-120.
- Liang Fen, Jiang Hongwei, Guo Yanan. Analysis welding robots diagnosis based on fault tree analysis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 1067-1070.

- 梁 芬, 姜宏伟, 郭亚男. 基于 FTA 的焊接机器人故障诊断技术研究[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 1067-1070.
- 4 Jiang Wenhan. Adaptive optics technology[J]. Nature Magazine, 2005, 28(1): 7-13.
- 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2005, 28(1): 7-13.
- 5 Zhou Luchun, Wang Chunhong, Li Mei, *et al.*. A wavefront slope processing method based on FPGA technique[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3): 28-31.
- 周璐春, 王春鸿, 李 梅, 等. 基于 FPGA 技术的波前斜率处理方法[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 28-31.
- 6 Zhang Qi, Liao Jie, Wu Jianjun, *et al.*. Design of diagnostic expert system for electronic system of general equipment based on FTA[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(2): 174-177.
- 张 琦, 廖 捷, 吴建军, 等. 基于 FTA 的通用装备电子系统故障诊断专家系统设计[J]. 兵工学报, 2002, 29(2): 174-177.

栏目编辑: 史 敏