

# Fault Tree Analysis of Automatic Drill-Riveting Equipment in Large Thin-Wall Cabin

Yiping Zhong<sup>1</sup>, Tong Gao<sup>2</sup>, Yiman Ba<sup>2</sup>, Keke Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai

<sup>2</sup>School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi

Email: zhyiping165@sina.com

Received: Jul. 14<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 30<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 4<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Automatic drill-riveting equipment in Large Thin-wall Cabin is used for the cabin of a launch vehicle in aerospace industry. In this paper, the faults of Automatic drill-riveting equipment are analyzed. Then the root causes of faults are analyzed. Based on this, the fault tree is established. The weaknesses of equipment are found out by qualitative and quantitative analyses of the fault tree, which can provide theoretical support for Maintenance and optimal design of the equipment.

## Keywords

Fault Tree, Failure Mode, Automatic Drill-Riveting Equipment, Importance

---

# 大型薄壁舱体自动钻铆装备故障树分析

钟益平<sup>1</sup>, 高通<sup>2</sup>, 巴怡曼<sup>2</sup>, 钟珂珂<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海航天精密机械研究所, 上海

<sup>2</sup>西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安

Email: zhyiping165@sina.com

收稿日期: 2017年7月14日; 录用日期: 2017年7月30日; 发布日期: 2017年8月4日

---

## 摘要

大型薄壁舱体自动钻铆装备是用于航空航天工业中运载火箭铆接舱的一种钻铆装备。本文针对自动钻

铆装备的故障进行分析,了解引起其故障发生的根本原因,并基于此建立了该装备的故障树;通过对该装备故障树的定性分析和定量分析确定装备的薄弱环节,为自动钻铆装备的维修和优化设计提供理论支持。

## 关键词

故障树, 故障模式, 自动钻铆装备, 重要度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

大型薄壁舱体自动钻铆装备用于大型航天筒段、异型支架类等工件的自动钻铆加工,一次装夹能同时完成钻孔、自动送钉、自动吸屑、铆接等不同工序,实现航天筒段零件铆接的自动化生产,其精度和可靠性直接影响装备的工作性能,其中可靠性是评价自动钻铆装备好坏的一项重要指标。

国内外有许多学者和专家对数控装备的可靠性进行了研究,其中典型的主要有:英国高校技术人员对现场采集的数控机床故障信息进行分析与处理,找出了机床的薄弱环节[1]。Rauzy A. [2]和 Bartlett L.M. [3]对 FTA 进行研究,提出了基于二叉决策图的故障树分析方法。Liu T.S.等[4]提出采用 Petri 网对较为复杂故障树进行了简化以及获得故障树最小割集的有效方法。国内有申桂香等用 FTA 方法对卧式加工中心刀库进行可靠性分析,找出刀库系统中的薄弱环节并提出合理的改进措施[5]。叶伯生[6]等人基于故障树分析方法开发出数控机床故障诊断系统。吉林大学的陈传海和于捷[7] [8]等利用基于二元决策图技术的故障树分析对数控机床进行可靠性分析,该方法对复杂系统分析结果精确。目前,国内还没有学者专门针对自动钻铆装备做故障树分析,因此,本文针对该装备建立了故障树,并给出定性和定量分析方法。分析结果为自动钻铆装备的设计、制造、故障诊断和维修提供了有价值的参考。

由于大型薄壁舱体的自动钻铆装备具有专业、非标准、特种加工等特点,在此前进行的可靠性研究中,亦缺少真实的数据及相应的试验支撑,并且高品质的航天产品要求加工装备具有较高的可靠性,因此,提高自动钻铆装备可靠性,加强该装备的可靠性研究就显得十分必要。

## 2. 自动钻铆装备故障树构建

故障树是一种表示事件因果关系的树状逻辑图,用规定的事件、逻辑门和其他符号描述系统中各种事件之间的因果关系,是一种评价复杂系统可靠性与安全性的重要方法。

本文以自动钻铆装备故障作为整体故障树的顶事件。自动钻铆装备主要结构部件图如图 1 所示,装备可分为以下子系统:回转机构、内外钻铆垂直升降驱动部件、钻铆执行部件、送钉系统、控制系统等,故次级事件根据装备结构功能特点选取为:回转机构故障、内外钻铆垂直升降驱动部件故障、自动钻铆系统故障、送钉系统故障、控制系统故障、辅助系统故障。根据该装备结构及功能特点,逐级向下分析,找出各级事件的中间事件,直至找出引起顶事件发生的全部底事件,将各级事件用适当的逻辑门连接[9]。通过装备现场数据的收集和对相似装备易发生故障的统计,确定装备的故障数据,并建立装备的故障树如图 2~8 所示,各级事件代号及其所对应的故障如表 1~7 所示。

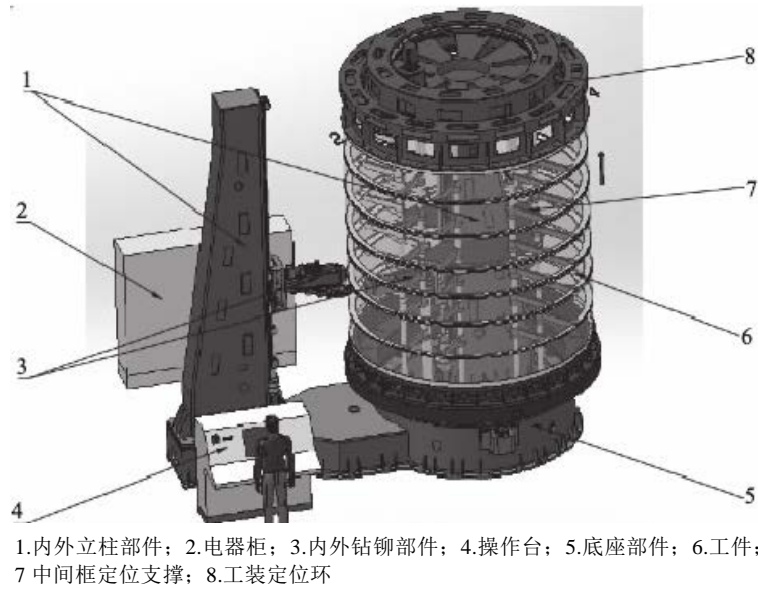


Figure 1. Main structure parts of automatic drill-riveting equipment  
图 1. 自动钻铆装备主要结构部件图

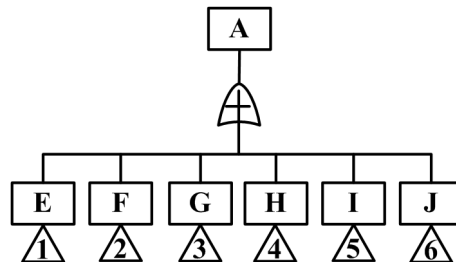


Figure 2. Fault Tree of automatic drill-riveting equipment

图 2. 自动钻铆装备故障树

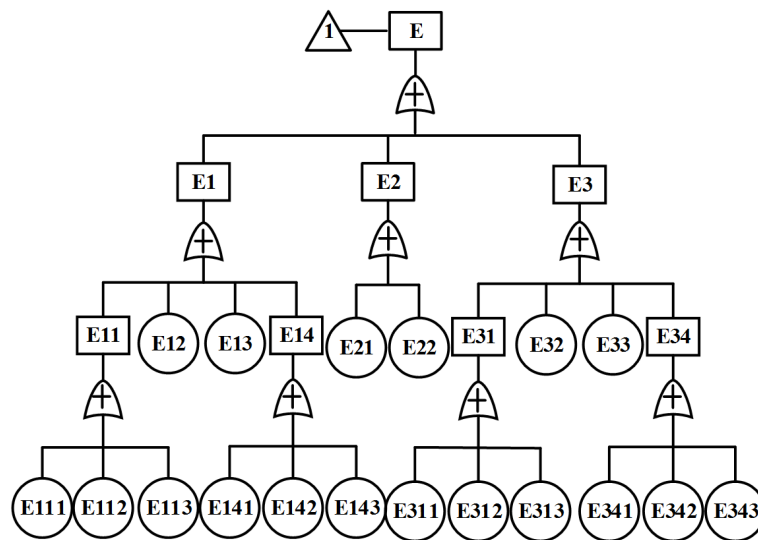
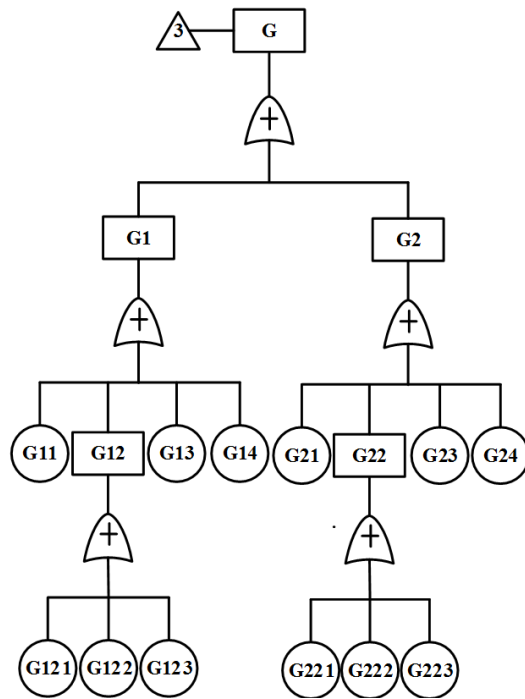
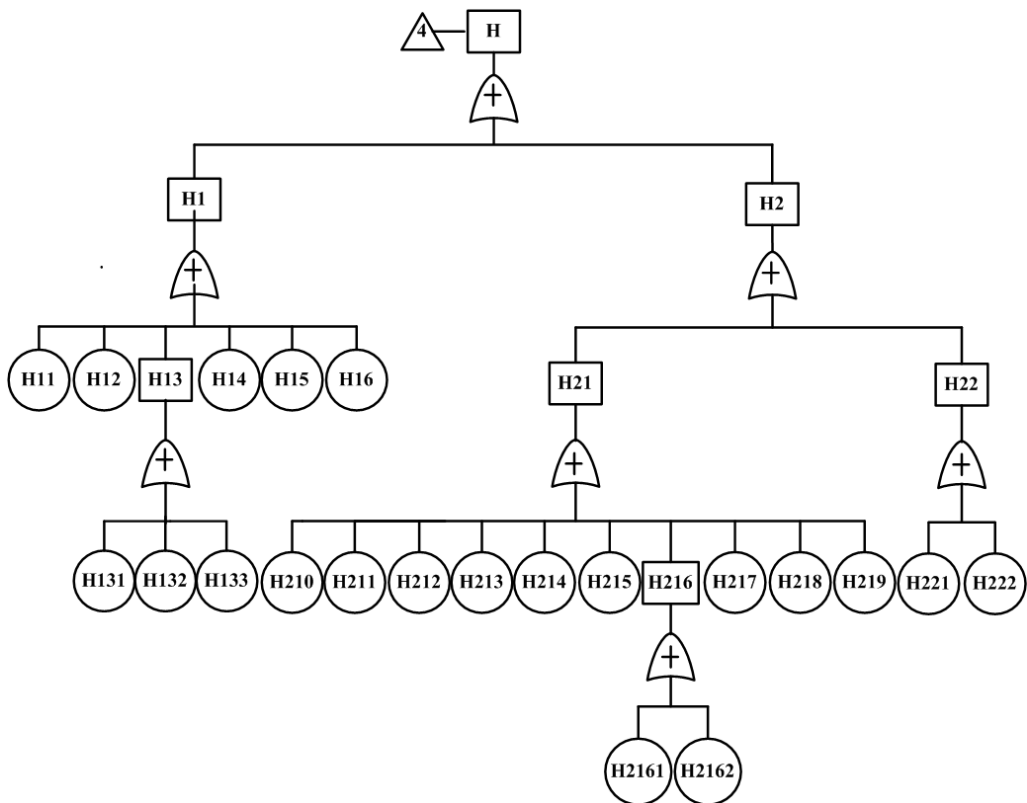


Figure 3. Fault Tree of rotation mechanism

图 3. 回转机构故障树



**Figure 4.** Fault Tree of internal and external vertical lifting mechanism  
**图 4.** 内外垂直升降机构故障树



**Figure 5.** Fault Tree of automatic drill-riveting system  
**图 5.** 自动钻铆系统故障树

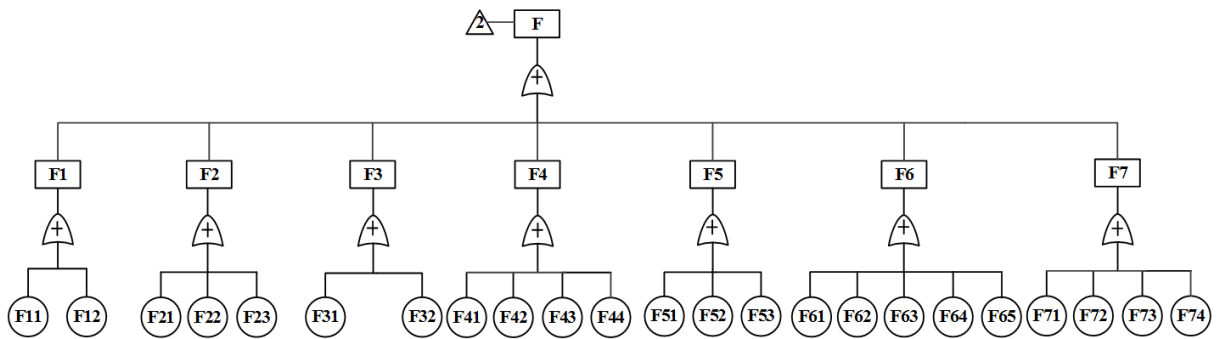


Figure 6. Fault Tree of nail delivery system  
图 6. 送钉系统故障树

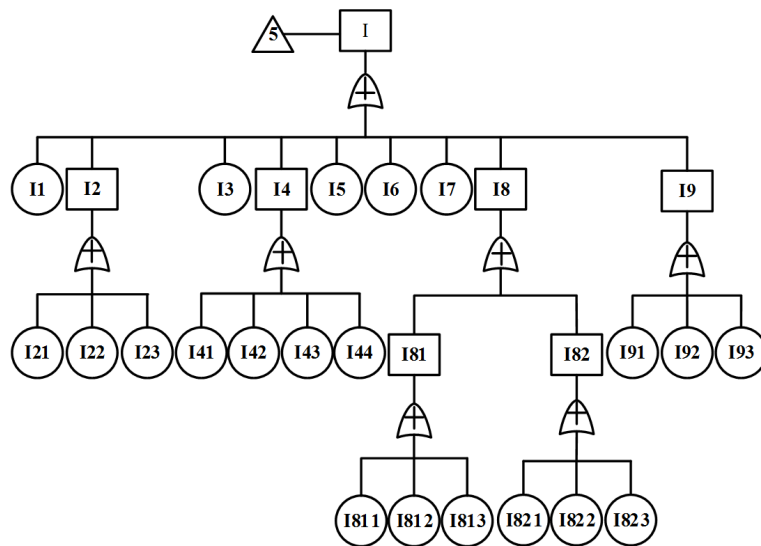


Figure 7. Fault Tree of CNC system  
图 7. 控制系统故障树

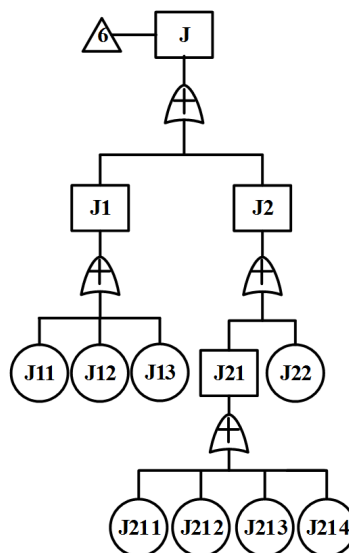


Figure 8. Fault Tree of assistant system  
图 8. 辅助系统故障树

**Table 1.** Fault code of automatic drill-riveting equipment  
**表 1.** 自动钻铆装备故障代码表

事件代号	事件名称
A	自动钻铆装备故障
E	回转机构故障
F	送钉系统故障
G	内外垂直升降机构故障
H	自动钻铆系统故障
I	控制系统故障
J	辅助系统故障

**Table 2.** Fault code of rotation mechanism  
**表 2.** 回转机构故障中的代号含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
E	回转机构故障	E34	减速机故障
E1	回转工作台传动机构故障	E111	滚轮磨损严重
E2	中间框固定装置故障	E112	齿圈故障
E3	上工装旋转机构故障	E113	润滑不良
E11	滚轮齿圈传动故障	E141	减速器输出轴油封损坏
E12	电机故障	E142	减速器中轴承损坏
E13	导轨故障	E143	减速器中齿轮故障
E14	减速机故障	E311	滚轮磨损严重
E21	支撑爪失效	E312	齿圈故障
E22	支撑杆故障	E313	润滑不良
E31	滚轮内齿圈传动故障	E341	减速器输出轴油封损坏
E32	电机故障	E342	减速器中轴承损坏
E33	导轨故障	E343	减速器中齿轮故障

**Table 3.** Fault code of internal and external vertical lifting mechanism  
**表 3.** 内外垂直升降机构故障中的代号含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
G	内外垂直升降机构故障	G23	电机故障
G1	外垂直升降机构故障	G24	丝杠传动故障
G2	内垂直升降机构故障	G121	减速器输出轴油封损坏
G11	导轨故障	G122	减速器中轴承损坏
G12	减速机故障	G123	减速器中齿轮故障
G13	电机故障	G221	减速器输出轴油封损坏
G14	丝杠传动故障	G222	减速器中轴承损坏
G21	导轨故障	G223	减速器中齿轮故障
G22	减速机故障		

**Table 4.** Fault code of automatic drill-riveting system  
**表 4.** 自动钻铆系统故障中的符号含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
H	自动钻铆系统故障	H210	电机故障
H1	自动钻孔机构故障	H211	行星齿轮箱故障
H2	自动铆接机构故障	H212	双安全制动器故障
H11	轴承失效	H213	轴承失效
H12	导轨故障	H214	连接器故障
H13	电主轴故障	H215	油嘴故障
H14	丝杠传动故障	H216	皮带传动故障
H15	联轴器损坏	H217	行星丝杠传动故障
H16	电机故障	H218	力传感器故障
H21	压铆装置故障	H219	编码器故障
H22	夹持装置故障	H221	径向弹簧失效
H131	内置电机故障	H222	驱动装置故障
H132	内置轴承失效	H2161	皮带损坏
H133	内置轴承缺少润滑	H2162	张紧轮损坏

**Table 5.** Fault code of nail delivery system  
**表 5.** 送钉系统故障中的代码含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
F	送钉系统故障	F42	料斗内的举升板与料斗的滑缝塞满了碎屑及灰尘
F1	气缸不停动作	F43	举升板与弧挡块没有保持一定的间隙
F2	铆钉不能顺利进入管道	F44	气压不足
F3	分料器没有任何动作	F51	吹送的时间不够
F4	举升板动作太快或太慢	F52	管道损坏
F5	铆钉不能被吹送到螺丝卡爪内	F53	气压不足
F6	直线振动调整失效	F61	轨道与分料器间没有间隙或有卡有异物
F7	铆钉无法从举升板滑入直送料轨道上	F62	轨道底部与料斗间没有间隙或有卡有异物
F11	对射感应器故障	F63	电磁线圈与轨道承座间没有间隙或生锈或有卡有异物
F12	气缸上的感应器安装位置不对	F64	电磁线圈烧毁
F21	振动器故障	F65	直线振动调整旋钮失效
F22	拨片和直线料道位置没有对正	F71	料斗内放置太多螺丝
F23	压板位置太高或太低	F72	排料头故障
F31	没有打开气源	F73	铆钉有油污
F32	通讯电缆故障	F74	铆钉有磁性
F41	举升板气缸的调节阀关死了或关得太小		

**Table 6.** Fault code of CNC system  
**表 6.** 控制系统故障中的代号含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
I	控制系统故障	I32	控制面板故障
I1	视频监控系統故障	I33	视频电路故障
I2	电源故障	I34	行扫描电路故障
I3	I/O 接口故障	I81	主轴实际转速与所发指令不符
I4	控制面板显示器	I82	主轴有转速但速度无显示
I5	通讯故障	I91	压力传感器故障
I6	主电路板故障	I92	压力驱动器故障
I7	存储器故障	I93	系统参数设置不当
I8	轴控制板故障	I811	主轴编码器每转脉冲数设置错误
I9	压铆力检测系统故障	I812	速度控制信号电缆连接
I21	保护装置跳闸	I821	主轴编码器损坏
I22	按钮接触不良	I822	主轴编码器电缆脱落断线
I23	互锁装置不能正常接通	I823	系统参数设置不对
I31	场扫描电路故障		

**Table 7.** Fault code of assistant system  
**表 7.** 辅助系统故障树中的代号含义

事件代码	事件名称	事件代码	事件名称
J	辅助系统故障	J21	油冷机故障
J1	润滑系统故障	J22	低温风冷装置故障
J2	冷却系统故障	J211	蒸发器故障
J11	润滑电机故障	J212	冷凝器故障
J12	润滑油压泵故障	J213	阀门故障
J13	润滑管路故障	J214	压缩机故障

### 3. 自动钻铆装备故障树定性分析

故障树的定性分析就是要找出故障树的所有最小割集。最小割集就是引起顶事件发生必须的最低限度的割集。一个最小割集代表了系统的一种故障模式，全部最小割集代表系统的全部故障模式，求出最小割集是十分必要的[10]。

#### 1) 求最小割集

一般求最小割集的方法有上行法和下行法[5]。本文采用上行法求出多轴联动数控切铣复合加工装备故障的最小割集，如表 8 所示。

#### 2) 分析

最小割集定性地给出了底事件的重要程度，底事件在最小割集中出现的次数愈多，就愈重要。根据 BARIOW 定律：一阶最小割集中底事件结构重要度大于多阶最小割集中底事件结构重要度[11]。本故障树中各底事件均只出现了一次，且每一割集均为一阶，所以每一底事件均应引起相当的注意。



**Table 8.** Minimum cut sets and suggested probability values of basic incidents of automatic drill-riveting equipment  
**表 8.** 表 8 自动钻铆装备最小割集表及底事件概率建议值

事件代码	事件名称	底事件概率建议值	概率重要度	关键重要度
E12	电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9975030792	0.0195834905
E13	导轨故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
E21	支撑爪失效	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E22	支撑杆故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
E32	电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E33	导轨故障	$1 \times 10^{-5}$	0.9974631787	0.0039165414
E111	滚轮磨损严重	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E112	齿圈故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E113	润滑不良	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
E141	减速器输出轴油封损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E142	减速器中轴承损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E143	减速器中齿轮故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E311	滚轮磨损严重	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E312	齿圈故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E313	润滑不良	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
E341	减速器输出轴油封损坏	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
E342	减速器中轴承损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
E343	减速器中齿轮故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F11	对射感应器故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
F12	气缸上的感应器安装位置不对	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
F21	振动器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F22	拨片和直线料道位置没有对正	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F23	压板位置太高或太低	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F31	没有打开气源	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
F32	通讯电缆故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F33	PLC 故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F41	举升板气缸的调节阀关死了或关得太小	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F42	料斗内的举升板与料斗的滑缝塞满了碎屑及灰尘	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F43	举升板与弧挡块没有保持一定的间隙	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F44	气压不足	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F51	吹送的时间不够	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F52	管道损坏	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F61	轨道与分料器间没有间隙或有卡有异物	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F62	轨道底部与料斗间没有间隙或有卡有异物	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F63	电磁线圈与轨道承座间没有间隙或生锈或有异物	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F64	电磁线圈烧毁	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F65	直线振动调整旋钮失效	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F71	料斗内放置太多螺丝	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612

## Continued

F72	排料头故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
F73	铆钉有油污	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
F74	铆钉有磁性	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
G11	导轨故障	$1 \times 10^{-5}$	0.9974631787	0.0039165414
G13	电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G14	丝杠传动故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G21	导轨故障	$1 \times 10^{-5}$	0.9974631787	0.0039165414
G23	电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G24	丝杠传动故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G121	减速器输出轴油封损坏	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
G122	减速器中轴承损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G123	减速器中齿轮故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
G221	减速器输出轴油封损坏	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
G222	减速器中轴承损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
G223	减速器中齿轮故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H11	轴承失效	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H12	导轨故障	$1 \times 10^{-5}$	0.9974631787	0.0039165414
H14	丝杠传动故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H15	联轴器损坏	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H16	电机故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H131	内置电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H132	内置轴承失效	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H133	内置轴承缺少润滑	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H210	电机故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H212	双安全制动器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H213	轴承失效	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H214	连接器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H215	油嘴故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H217	行星丝杠传动故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H218	力传感器故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H219	编码器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H221	径向弹簧失效	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H222	驱动装置故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H2111	行星齿轮箱故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
H2161	皮带损坏	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
H2162	张紧轮损坏	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I1	视频监控控制系统故障	$6 \times 10^{-5}$	0.9975130548	0.0235004236
I5	通讯故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I6	主电路板故障	$1 \times 10^{-5}$	0.9974631787	0.0039165414
I7	存储器故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415

Continued

I11	保护装置跳闸	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I12	按钮接触不良	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I13	互锁装置不能正常接通	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I3	I/O 接口故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I41	场扫描电路故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I42	控制面板故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I43	视频电路故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I44	行扫描电路故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I91	压力传感器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I92	压力驱动器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I93	系统参数设置不当	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I811	主轴编码器每转脉冲数设置错误	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
I812	速度控制信号电缆连接	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I822	主轴编码器电缆脱落断线	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
I823	系统参数设置不对	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J11	润滑电机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J12	润滑油压泵故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J13	润滑管路故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
J22	低温风冷装置故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J211	蒸发器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J212	冷凝器故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612
J213	阀门故障	$1.5 \times 10^{-5}$	0.9974681660	0.0058748415
J214	压缩机故障	$2 \times 10^{-5}$	0.9974731535	0.0078331612

#### 4. 自动钻铆装备故障树定量分析

##### (1) 顶事件发生概率

当故障树底事件发生的概率为已知时,按照故障树的逻辑结构由下而上逐级计算,即可求得故障树顶事件发生的概率。

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

式中:  $k$  为最小割集的个数,  $p(i)$  为最小割集发生概率。各底事件发生的概率值建议如表 8。

计算出自动钻铆装备故障树顶事件发生概率为:  $g = 0.0025468$ 。

##### (2) 底事件概率重要度

顶事件发生概率  $g$  随基本事件概率  $g_i$  的变化率叫做底事件  $x_i$  的概率重要度,其计算公式为:

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

概率重要度  $I_q(i)$  越大,说明底事件  $x_i$  就越重要,对顶事件发生影响就越大[12]。各底事件概率重要度见表 8。

##### (3) 底事件关键重要度

关键性重要度  $I_c(i)$  是底事件的故障概率  $q(i)$  的变化率与顶事件发生概率  $g$  的变化率之比。定义式为

**Table 9.** The basic incidents with greater influence on fault for automatic drill-riveting equipment  
**表 9.** 对自动钻铆装备故障影响大的底事件

序号	事件代码	事件名称
1	H16	自动钻孔机构的电机故障
2	H218	自动钻铆机构的力传感器故障
3	E22	中间框固定装置的支撑杆故障
4	H2161	压铆装置的皮带损坏
5	F44	送钉系统气压不足
6	H15	自动钻孔机构的联轴器损坏
7	H221	夹持装置的径向弹失效
8	E113	回转工作台传动机构的滚轮齿圈传动润滑不良
9	F52	送钉管道损坏
10	F72	送钉系统的排料头故障

$$I_c(i) = \frac{q(i)}{g} I_q(i) \quad (3)$$

关键性重要度  $I_c(i)$  越大表明由底事件  $x_i$  触发系统故障的可能性就越大。各底事件概率重要度见表 8。

#### (4) 分析

根据各底事件的概率重要度和关键重要度，确定了对顶事件影响大的底事件，见表 9。要使自动钻铆装备发生故障的概率迅速降低，必须减小该装备的电机故障、传感器故障、皮带损坏、联轴器损坏及一些零件的润滑不良。可从以下四点出发提高装备的可靠性：

- 1) 加强装备各外购元件的质量监督；
- 2) 对元件的位置进行合理的布置；
- 3) 加强对装备操作人员的专业培训，减少由于操作不当对装备可靠性造成的影响；
- 4) 加强日常检查工作。

## 5. 结论

1) 本文通过分析自动钻铆装备故障模式及其发生故障原因，建立该装备的故障树，并对其定性分析得到故障树的最小割集。

2) 对自动钻铆装备故障树通过定量分析求得其底事件概率重要度和关键重要度，从而找出系统薄弱环节，为自动钻铆装备的设计及其维修提供了理论和实际依据。

## 基金项目

国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项“运载火箭箭体结构制造关键成套设备与工艺” (2013ZX04001101)。

## 参考文献 (References)

- [1] Chanda, R.S. and Bhattacharjee, P.K. (1995) A Reliability Approach to Transmission Expansion Planning Using Minimal Cut Theory. *Electric Power Systems Research*, **33**, 111-117. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00937-D](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00937-D)
- [2] Rauzy, A. (1996) A Brief Introduction to Binary Decision Diagrams. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*

*Hermes*, **4**, 206-207.

- [3] Bartlett, L.M. and Andrews, J.D. (2001) Comparison of Two New Approaches to Variable Ordering for Binary Decision Diagrams. *Quality and Reliability Engineering International*, **17**, 151-158. <https://doi.org/10.1002/qre.406>
- [4] Liu, T.S. and Chiou, S.B. (1997) The Application of Petri Nets to Failure Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, **57**, 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00030-6)
- [5] 申桂香, 李怀洋, 张英芝, 等. 刀库故障重要度分析与可靠性改进设计[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(6): 70-75.
- [6] 叶伯生, 黄增双, 李斌. 故障树分析法在数控机床故障诊断系统中的应用[J]. 机械设计与制造, 2006(8): 135-137.
- [7] 陈传海, 杨兆军, 陈菲, 等. 基于 BDD 技术的数控机床故障树分析[J]. 工程与试验, 2010, 50(3): 13-16.
- [8] 于捷, 孙立大, 石耀霖, 等. 基于 BDD 技术下的数控机床转塔刀架系统重要度分析[J]. 机床与液压, 2009, 37(1): 157-161.
- [9] 苏凡圉, 袁博, 张琦, 等. 基于 FTA 的轮式推土机液压系统故障模式研究[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(1): 105-111.
- [10] 谢里阳. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 胡俊, 贡瑞光, 杨丽伟, 等. 电牵引采煤机液压制动系统的故障树分析[J]. 矿山机械, 2011, 39(1): 9-12.
- [12] 张龙, 熊国良, 何柏林, 等. 机床液压系统故障树分析[J]. 机床与液压, 2005(2): 170-171+185.

---

**Hans** 汉斯

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)