

气液联合举升液压系统的典型故障研究

王 辉, 吕明亮, 王 玺, 韦学中
(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076)

摘要: 气液联合快速举升液压系统是一种采用气驱油源和电机泵源共同驱动的新型大流量举升液压系统, 能够大幅度提高举升速度。对气液联合快速举升液压系统进行故障分析和可靠性分析, 以举升到位冲击振动过大故障为例进行故障树分析, 采用联合仿真的方法对系统典型故障进行仿真分析, 研究故障原因与故障现象间的关系, 揭示故障的影响及危害, 并针对系统故障提出一些改进措施, 有效地提高了系统的可靠性。

关键词: 举升; 液压系统; 故障树; 故障仿真; 冲击

中图分类号: V55 **文献标识码:** A

Research on Typical Faults of Combined Gas-liquid Erection Hydraulic System

WANG Hui, LYU Mingliang, WANG Xi, WEI Xuezhong
(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing, 100076)

Abstract: The gas-liquid combined rapid erection hydraulic system is a new type of large flow hydraulic system which is driven by gas and motor pump, and can greatly increase the erection speed. The fault analysis and the reliability analysis of a rigid erecting hydraulic system with combined gas-liquid oil is carried out. Then the fault tree analysis is carried out by taking the fault of excessive vibration in the erection position as an example. The simulation analysis of typical faults of the system is carried out by means of co-simulation, and the relationship between fault causes and fault phenomena is studied and the effects and hazards of the fault are discovered. Some improvement measures are put forward to improve the reliability of the system.

Keywords: erecting; hydraulic system; fault tree; fault simulation; impact

0 引言

大型举升装置驱动方式多种多样, 包括液压驱动、电驱动、燃气驱动和气液驱动等, 液压驱动方式由于其结构紧凑、工作平稳和易于实现调节控制等优点得到大量应用。为了提高装置的举升快速性, 本文采用气液联合举升的方式, 液压系统作为举升系统的关键组成部分, 其性能的好坏直接影响到整个举升系统的性能, 液压系统的可靠性也直接关系到举升过程的安全性。而举升液压系统构成较为复杂, 举升过程中载荷变化较大, 且气液联合快速举升液压系统举升速度较快, 若出现故障可能带来较大冲击, 导致严重的后果。这种情况下, 对举升液压系统的故障进行分析至关重要。

以往对液压系统故障的研究一般集中在两个方面: 液压系统的故障机理研究和诊断方法研究^[1-4]。

李永安^[5]从液压系统组成、元件结构及工作原理出发, 分析了矿用梭车液压系统的故障机理, 并给出一定建议。程度旺等^[6]结合起重机故障案例, 采用排除法、替代法等方法对液压故障进行分析处理, 提供了液压故障的工程解决方法。文献[7]~[11]采用仿真软件对液压系统进行故障仿真, 通过修改仿真参数进行故障注入, 并分析了系统异常与元件故障间的联系, 为故障诊断提供了依据。唐海军等^[12-13]对液压系统进行故障诊断分析, 指出故障发生的原因并提出改进意见。大型装置气液联合举升液压系统相对于一般工程机械的液压系统而言有其独特性, 但对于液压系统故障的研究方法有着很多共通之处。

本文结合工程实际, 对大型装置举升液压系统故障进行分析, 首先进行可靠性分析和故障树分析, 提取出单点故障, 在此基础上采用联合仿真的方法对影

响较大的故障模式进行仿真分析，研究故障对系统的影响和危害，并提出一些针对性的改进措施，提高了系统的可靠性。

1 举升液压系统工作原理

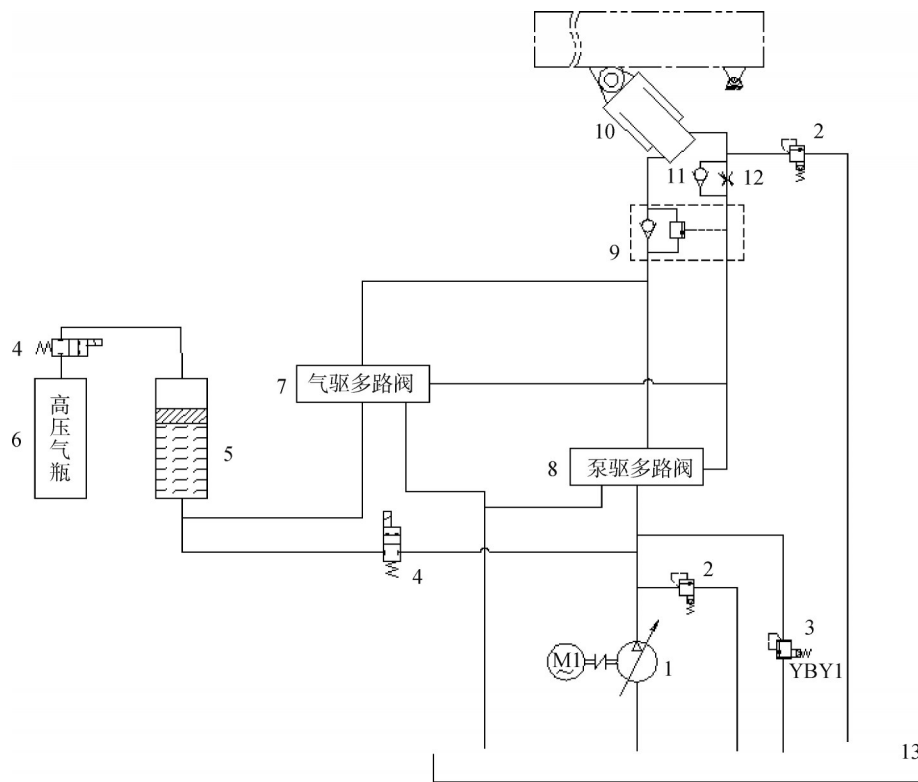
1.1 液压系统组成

一般液压系统由5部分组成：能源装置、执行机构、控制调节装置、辅助装置和介质。本文所研究气液联合快速举升液压系统能源装置包括电机泵源和气驱油源，其中电机泵采用恒压变量泵，气驱油源由充入高压气体的蓄能器组成；执行机构为多级液压缸；回路中控制元件包括电液比例多路阀组、平衡阀、电

磁换向阀、比例溢流阀、单向阀等，用于控制举升过程中回路的压力流量等参数，并实现举升装置的起升和回平。

1.2 液压系统工作原理

本文所研究液压系统工作原理如图1所示，为满足举升系统的快速性要求，动力源采用气液联合的混合动力源，由气驱油源和电机泵源联合为系统供油，能够在短时间内为系统提供大量高压油。举升液压系统开始工作后，气驱油源中高压气体推动蓄能器中液压油进入回路，配合电机泵源输出的油液共同驱动液



1—恒压变量泵;2—安全阀;3—比例溢流阀;4—电磁换向阀;5—活塞式蓄能器;6—高压气瓶;7—气驱多路阀;8—泵驱多路阀;9—平衡阀;10—液压缸;11—单向阀;12—可变节流阀;13—油箱。

图1 液压系统工作原理

Fig.1 Schematic diagram of hydraulic system operation

液系统中设置各种阀件用于控制和调节液压系统的压力、流量和油液方向。比例溢流阀设置在进油路，用于控制进油路压力；平衡阀用于实现负载在举升任意时刻可靠停止；泵驱多路阀和气驱多路阀用于控制举升过程中电机泵源和气驱油源的流量大小和方向；电磁换向阀用于控制电机泵源对活塞式蓄能器的充油；回油路设置节流阀，在举升后期实现油缸运动的减速；安全阀正常流程时不打开，起保护作用。

2 举升液压系统可靠性分析

根据相关标准定义，可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。可靠性包括可靠度、故障率、平均故障间隔时间等基本特征量，其中，可靠度是指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率，记作 $R(t)$ 。

液压系统的可靠性不仅与液压元件的可靠度有关，而且还和液压元件间的关系、工况、参数设置和

环境等因素有关。下面通过建立举升液压系统的可靠性框图来描述系统可靠性和基本元件可靠度之间的关系,该液压系统可靠性框图如图2所示。

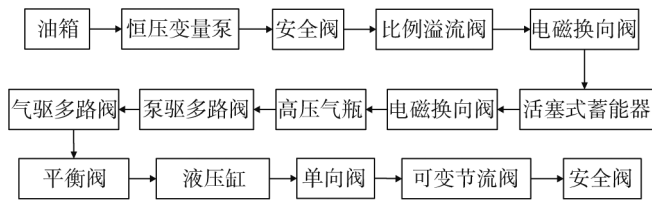


图2 液压系统可靠性框图

Fig.2 Hydraulic system reliability block diagram

可以看出,举升系统可靠性模型为串联结构,系统的可靠度可由下式表示:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{k=1}^n R_k \quad (1)$$

式中 R_k 为第 k 个元件可靠度; n 为元件个数。

3 举升液压系统故障树分析

故障树分析又称失效树分析 (Fault Tree Analysis, FTA)。举升液压系统故障模式多种多样,有的可能是由单一元件故障导致,有的则是由多个元件故

障共同引起的。故障现象和故障原因的关系错综复杂,同一元件的故障可能导致不同故障现象,而一种故障现象也可能由不同元件故障引起。为了方便进行故障诊断,工程技术人员一般使用故障树分析法进行分析^[14],将举升液压系统的故障关系用故障树直观地表示出来,在出现故障时可以更快地锁定故障的根本原因。

进行故障树分析,首先需要确定顶事件。举升液压系统可能发生的故障较多,包括举升时间过长、举升到位冲击振动过大或无法完成举升动作等,其中,举升到位冲击振动过大故障会导致较严重的后果。下面介绍举升到位冲击振动过大故障模式作为顶事件的液压系统故障树分析。

在开始建立故障树前,首先作出如下假设:

- 不考虑人为操作失误引起的故障;
- 不考虑环境条件引起的故障;
- 故障树中的底事件之间是相互独立的;
- 每个底事件和顶事件只考虑其发生或不发生两种状态。

在此基础上,依据顶事件自上向下逐级建树,所建立故障树如图3所示。

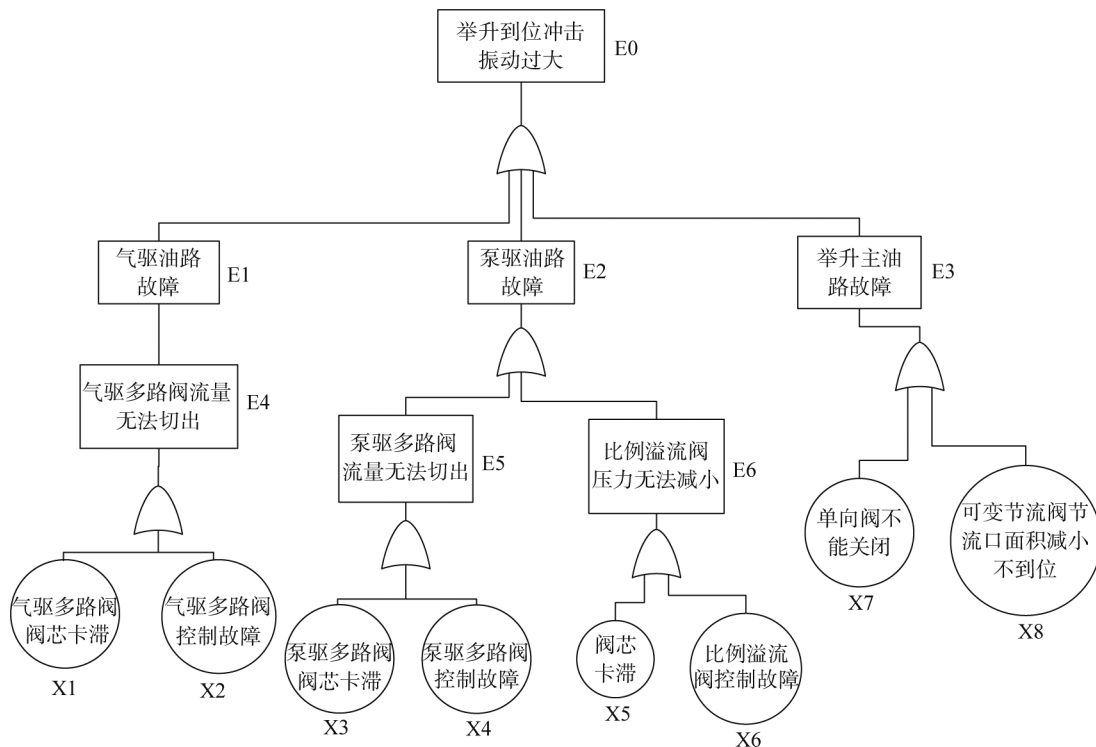


图3 举升到位冲击振动过大故障树

Fig.3 Fault tree with excessive vibration in erection position

建立故障树后,采用定性分析法进行分析,定性分析的核心是求最小割集,可根据故障树利用下行法

求得“举升到位冲击振动过大”的最小割集。经过分析可知,其最小割集有8个,均为一阶最小割集,分

别为X1~X8,表明存在8个单点故障模式,由此可知系统的可靠性较差,需要进行针对性的改进。下面首先通过仿真的方法,以几个典型的故障为例对系统故障的影响及危害进行分析,并针对系统的部分故障模式提出改进措施,以此来提高系统的可靠性。

4 故障模式仿真及改进措施

4.1 举升系统建模

a) 液压系统建模。

举升液压系统包含元件较多,结构较为复杂,本文选择采用仿真软件AMESim进行建模与仿真分析。根据举升液压系统的工作原理,在一定简化和等效的基础上,建立了包括气驱油源、电机泵源、溢流阀、换向阀、多路阀、三级缓冲液压缸等主要元件的模型,其中三级缓冲液压缸在软件中无现成模型可调用,通过使用液压元件设计库中单元搭建而成;气驱油源、电机泵源均通过控制模块由举升角度进行控制,所建立的液压系统模型如图4所示。

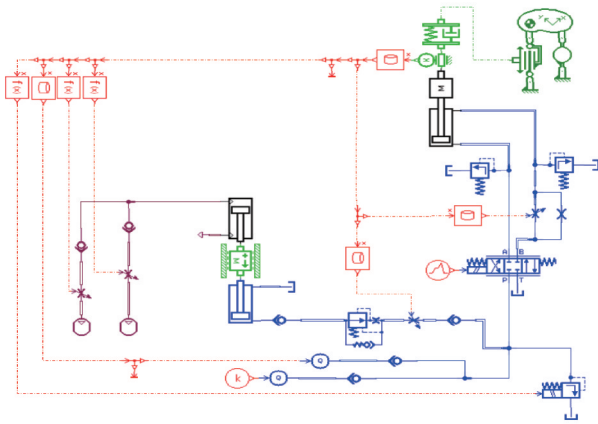


图4 举升液压系统模型

Fig.4 The model of erecting hydraulic system

b) 联合仿真模型建立。

为了对举升系统故障模式下整个系统的动态特性有更加全面和深入的了解,本文采用联合仿真的方式对举升系统进行分析。在动力学软件SIMPACT中建立了更加精确的机械结构模型,并合理设置柔性体模型,可以对故障模式下系统机械结构的响应进行分析;在Simulink软件中实现机械和液压软件的数据交互并控制动作顺序,所建立的联合仿真模型如图5所示。

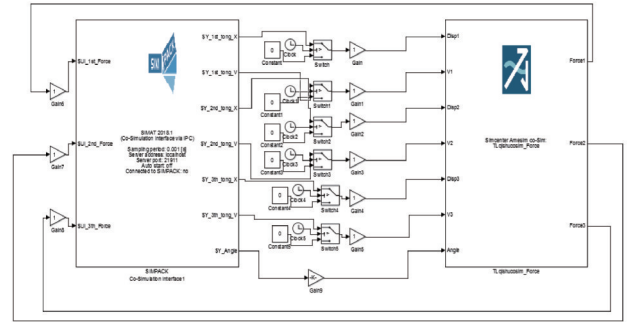


图5 联合仿真模型

Fig.5 Co-simulation model

4.2 故障模式仿真

对举升液压系统进行故障仿真的目的主要是通过仿真的手段对故障模式下举升系统的故障特性进行研究,一方面了解各种故障情况可能导致的后果,便于后续进一步对液压系统进行优化设计或添加冗余保护措施,另一方面根据对不同故障模式下系统的不同响应特点进行分析,便于研究在故障模式下系统各参数的变化,为故障诊断提供基础。本文介绍举升液压系统两种故障,两种故障模式所对应的仿真参数设置如表1所示。

表1 故障模式及对应仿真参数设置

Tab.1 Fault mode and simulation parameter setting

| 故障模式 | 变动参数 | 正常值 | 故障值 |
|---------------|---------|--|----------------------------------|
| 气驱多路阀阀口无法关小故障 | 可变节流阀面积 | 升至最大值706.8 mm ² 后,从60°开始减小,70°时减小至0 | 升至最大值706.8 mm ² 后一直维持 |
| 比例溢流阀压力无法下调故障 | 溢流阀输入信号 | 0~70°时为25 MPa,70~90°时为5 MPa | 0~90°一直维持25 MPa |

a) 气驱多路阀阀口无法关小故障仿真。

在举升液压系统中,气驱多路阀主要用于控制气驱油源的流量大小。在快速举升阶段,需要保证气驱流量稳定地维持在最大值,在进入减速段前,调节控制阀口来减小气驱流量大小,直至完全切出。由上文分析可知,气驱多路阀常见故障包括阀芯径向卡滞和控制故障,其中较为严重的后果是流量调节失效,下面对气驱多路阀阀口关不小、无法切出故障进行仿真分析,通过固定可变节流阀面积的方式来模拟该故障,得到仿真结果见图6。

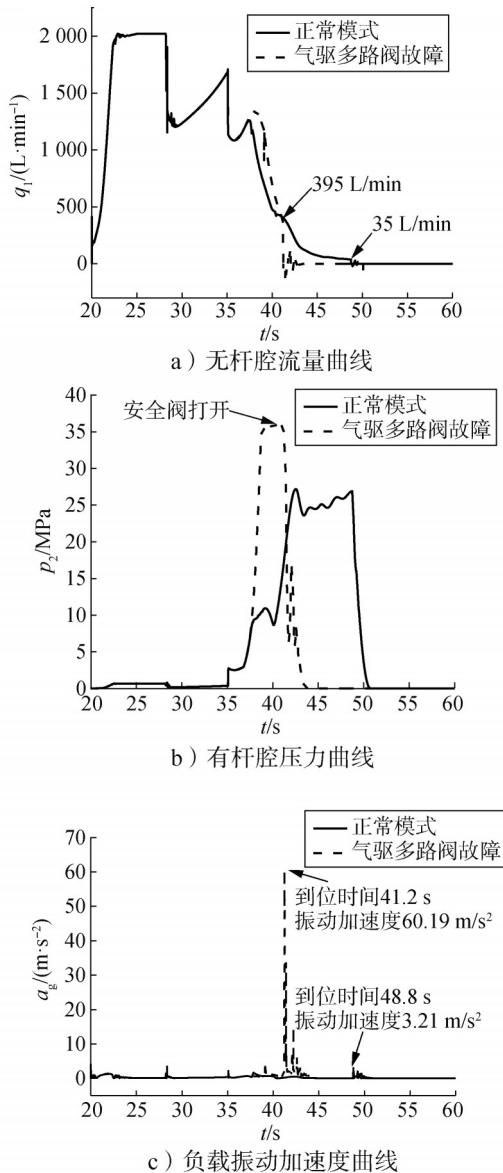


图6 气驱多路阀阀口关不小故障仿真结果

Fig.6 Simulation results of valve port closing failure of gas actuated multitandem valve

从无杆腔流量曲线可以看出,因多路阀故障,气驱油源流量未能及时减小,到位时流量从395 L/min快速减小至0,流量曲线有较大振荡,并可推出负载到位速度较快;在有杆腔压力曲线中,故障模式下,由于提供流量较大,因此回油流量较大,有杆腔压力急剧升高,达到36 MPa,略高于安全阀打开压力;而从负载振动加速度曲线中可以看出,尽管故障模式下负载到位时间减少,但会带来很大的到位冲击,对应振动加速度可达60.19 m/s²,远远超过对振动加速度的控制要求,会导致负载上相关设备的损坏,甚至存在过冲风险。

b) 比例溢流阀压力调不下来故障仿真。

举升液压系统中比例溢流阀的主要作用为控制电机泵源的出口压力,在举升过程的不同阶段根据系统的实际需求调整其压力大小,一方面减少不必要的溢流损失,提高效率,同时在减速段减小无杆腔压力以配合有杆腔节流作用使负载运动减速,避免有杆腔压力过高。如果比例溢流阀出现故障导致阀件调压失灵,系统压力将无法减小从而导致在举升后期举升液压缸有杆腔压力过高,导致安全阀打开,到位速度不能达到要求值。下面对这种故障模式进行仿真分析,通过固定比例溢流阀的输入信号使其压力无法调节的方式进行故障模拟,得到结果见图7。

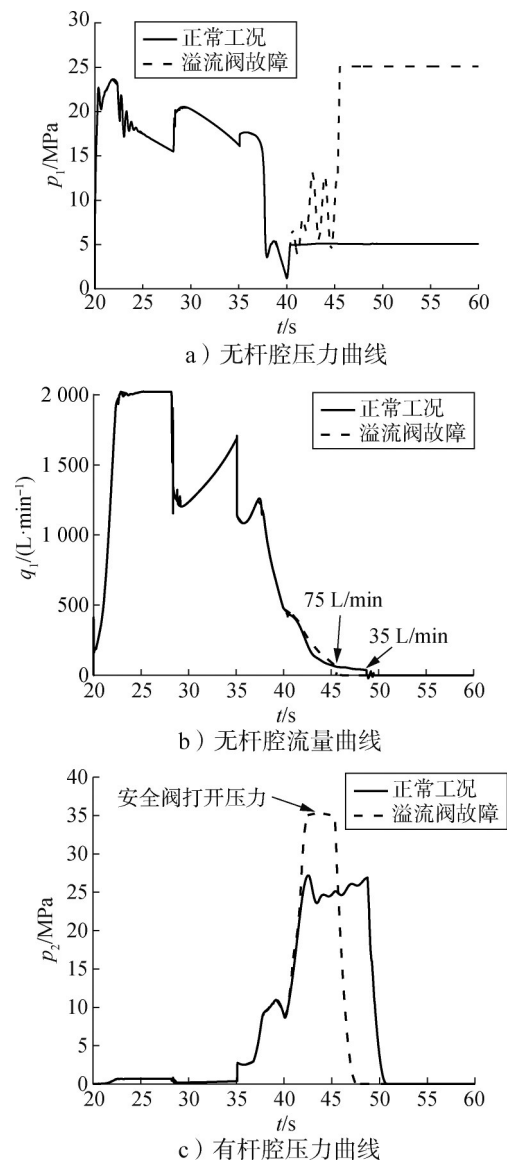
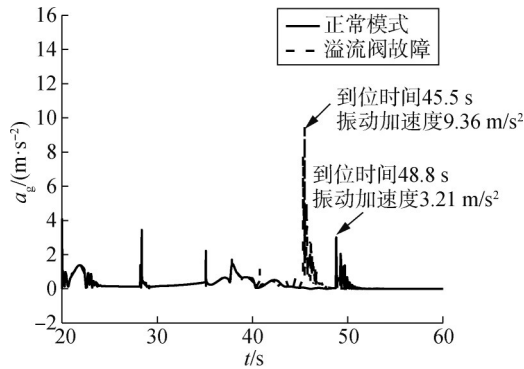


图7 比例溢流阀压力调不下来故障仿真结果

Fig.7 Simulation results of failure when the pressure of proportional relief valve cannot be adjusted down



d) 负载振动加速度曲线
续图 7

从无杆腔压力曲线可以看出，故障模式下举升减速段无杆腔压力较高并出现较大振荡，且最后压力无法降低维持在较高值；从无杆腔流量曲线可以看出，故障模式下系统流量在到位时为 75 L/min，而正常工况下为 35 L/min，可知故障模式下到位时举升速度约为正常工况的 2 倍。

有杆腔压力曲线显示，故障模式下有杆腔压力较高，安全阀打开压力达到 35 MPa，导致有杆腔节流控制效果减弱；同时从振动加速度曲线也可以看出，故障模式下举升到位时负载振动加速度明显大于正常举升情况，最高可达 9.36 m/s²。比例溢流阀故障的明显特征为系统压力最终维持在较高值，可通过这一参数进行该故障的诊断。

根据仿真分析得到两个典型故障现象及可能发生的后果。根据故障模式、影响及危害性的相关规定，可将故障按其严酷程度分为几个等级：I级为灾难级，可导致人员死亡、设备严重损坏；II级为致命级，可导致人员严重受伤或设备功能丧失；III级为轻度级，可导致人员轻伤，流程延误或设备性能下降；IV级为轻微级，代表轻于III级的故障。根据以上要求及仿真分析结果，各种故障模式的现象及危害程度如表 2 所示。

表 2 两个典型故障模式的严酷度类别

Tab.2 Fault mode and impact analysis table

| 故障模式 | 故障现象 | 危害等级 |
|--------------------|--|------|
| 气驱多路阀阀口无法关小、无法切出故障 | 气驱油源流量不能及时减小，有杆腔压力突破安全阀打开压力；到位时速度过快，到位振动加速度过大，存在过冲风险 | II级 |
| 比例溢流阀压力无法下调故障 | 到位时流量较大，到位速度较快，有杆腔压力过高致安全阀打开，到位振动加速度较大 | III级 |

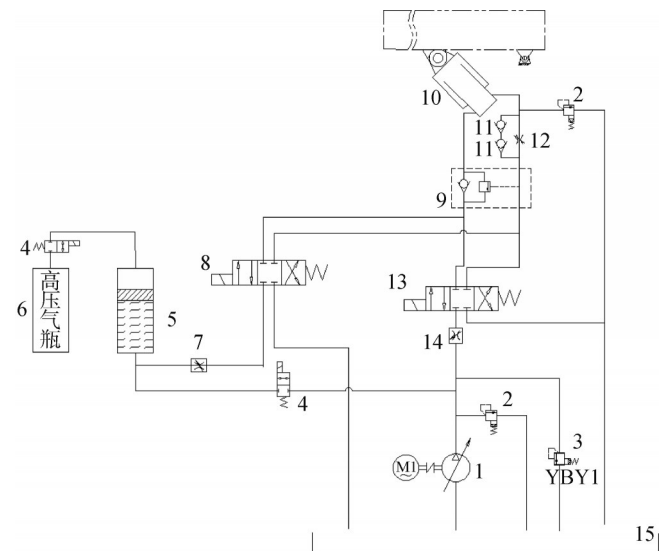
4.3 系统改进措施

前文对系统举升到位冲击振动过大故障进行了故障树分析，并通过仿真分析了故障的影响及危害，由于该系统存在较多单点故障，因此系统可靠性较低，需要对系统进行改进。

针对单点故障，本节主要对系统进行冗余设计，提出以下几点改进措施：

- a) 对气驱控制油路进行冗余设计，将气驱多路阀改为比例调速阀和电磁换向阀的组合，分别用于调节流量和控制油源切出；
- b) 同上，将泵驱多路阀改为比例调速阀和电磁换向阀的组合；
- c) 在单向阀 DF4 后再接一个单向阀，避免单个单向阀导致的单点故障；
- d) 定期检查过滤系统和油液，及时更换滤芯和油液，减小阀件因油液污染而卡滞的概率。

在对系统进行以上改进后，按改后系统组成及原理重新绘制系统原理图，如图 8 所示。



1—恒压变量泵；2—安全阀；3—比例溢流阀；4—电磁换向阀；5—活塞式蓄能器；6—高压气瓶；7—气驱调速阀 1；8—气驱电磁换向阀；9—平衡阀；10—液缸缸；11—2 个单向阀；12—可变速流阀；13—泵驱电磁换向阀；14—泵驱调速阀 2；15—油箱。

图 8 改进后液压系统原理

Fig.8 Schematic diagram of improved hydraulic system

根据改进后系统原理图重新对系统“举升到位冲击振动过大”故障进行故障树分析，得到改进后故障树见图 9。

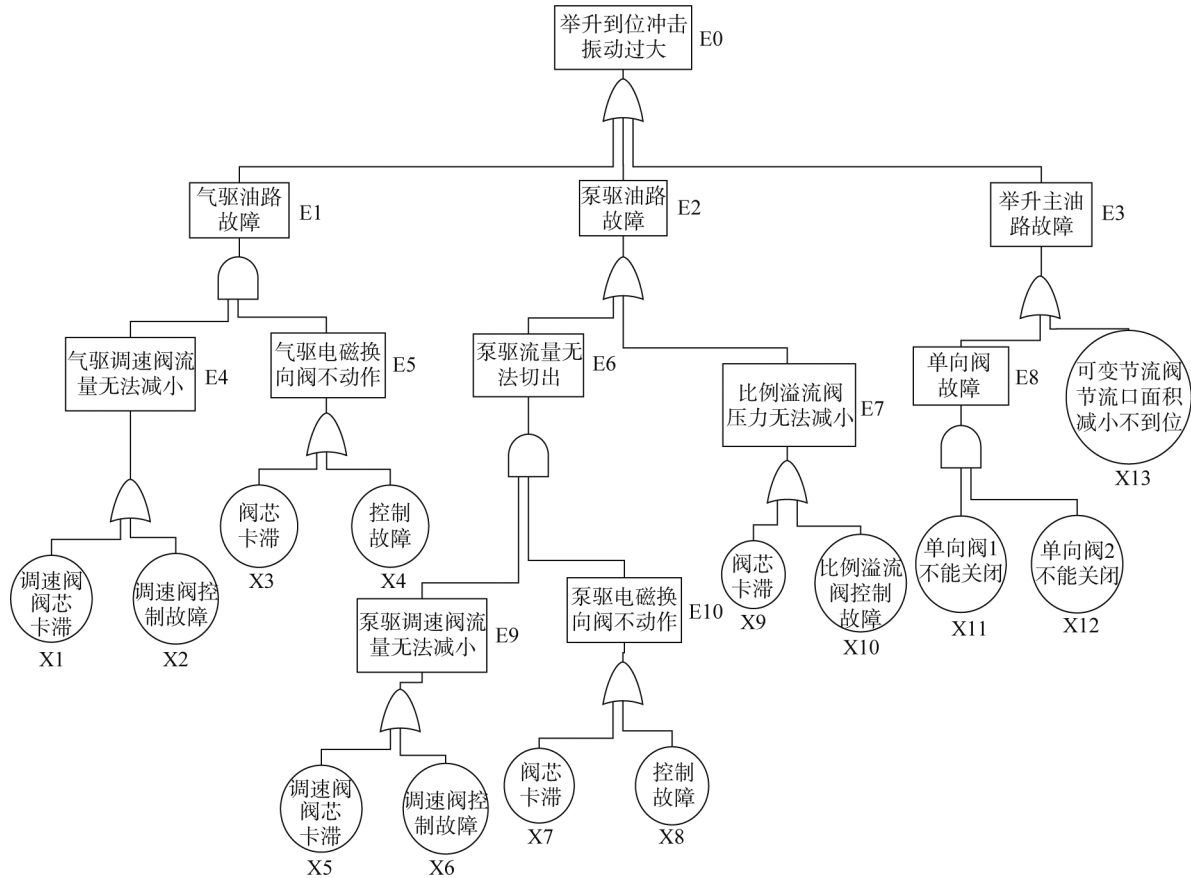


图9 改进后系统故障树

Fig.9 Improved system fault tree

通过对改进后系统“举升到位冲击振动过大”故障树进行分析可得，该故障共有最小割集12个，其中一阶最小割集3个，二阶最小割集9个。可看出系统改进后一阶最小割集由原来的8个减少为3个，表明系统单点故障有效减少，说明本文所提出的改进措施有效地提高了系统的可靠性和安全性。

5 结束语

本文对举升液压系统的组成及工作原理进行了描述，对举升液压系统进行了可靠性分析和故障树分析。通过定性分析得出系统单点故障较多，基于联合仿真的方法，通过故障注入对典型故障模式进行仿真，对结果进行分析从而得到了故障的影响和危害，得到故障模式下关键参数的变化情况，最后针对故障提出改进措施，有效减少了系统的单点故障，为气液联合举升液压系统的故障诊断和故障树分析提供了基础。

参考文献

[1] 徐康. 后装压缩式垃圾车液压系统故障机理及智能诊断系统研

究[D].长沙:中南大学,2014.
 XU Kang. Research on failure mechanism and intelligent diagnosis system for the hydraulic system of back-loading compression refuse collector[D]. Changsha: Changsha Central South University, 2014.
 [2] 连瑞德. 轴向柱塞泵故障机理分析及模式识别诊断方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
 LIAN Ruide. Research on vibration mechanism and pattern recognition diagnosis method of axial piston pump[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.
 [3] 周静. 水泥立磨机液压系统故障分析与诊断[D]. 唐山: 华北理工大学, 2018.
 ZHOU Jing. Fault analysis and diagnosis of hydraulic system of cement vertical mill[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2018.
 [4] 左子璋. 某型机主液压泵故障分析与诊断[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(12): 72-73.
 ZUO Zizhang. Fault analysis and diagnosis on the primary hydraulic pump for an aircraft[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(12): 72-73.
 [5] 李永安. 矿用梭车液压系统典型故障机理分析与处理[J]. 液压气动与密封, 2018, 6(19): 57-59.
 LI Yong'an. Mechanism analysis and solution of common failure on shuttle car hydraulic system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 6(19): 57-59.

- 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 537-542.
- HU Yasi, MENG Xin, LI Ligang. A satellite coverage computing model for multi-sensor[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 537-542.
- [12] HE X Y, LI H Y. General analysis method for global revisit characteristics of satellite constellation with repeating ground tracks[J]. Acta Astronautica, 2023, 202: 319-332.
- [13] SAULSKIY V K. A vector method for synthesis of orbits and the structure of satellite constellations for multiswath periodic coverage of the Earth[J]. Cosmic Research, 2016, 54(4): 313-324.
- [14] 苗悦. 快速响应成像卫星在轨任务规划与姿态控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- MIAO Yue. Onboard task planning and attitude control of fast response imaging satellites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [15] 苗悦, 陈升泽, 白云飞, 等. 轨道机动空间飞行器对地观测在轨任务规划[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(6): 24-32.
- MIAO Yue, CHEN Shengze, BAI Yunfei, et al. Earth-observation onboard task planning for spacecraft with orbit-maneuver abilities[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(6): 24-32.

作者简介

- 苗悦 (1991—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为体系总体设计。
- 刘富豪 (1997—), 男, 工程师, 主要研究方向为体系总体设计。
- 陈升泽 (1987—), 男, 研究员, 主要研究方向为体系总体设计。
- 范青正 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为体系总体设计。
- 白云飞 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为体系总体设计。

(上接第76页)

- [6] 程度旺, 张铁军, 郑海. 大吨位起重机液压系统故障分析与处理[J]. 液压与气动, 2014(10): 95-98.
- CHENG Duwang, ZHANG Tiejun, ZHENG Hai. Failure analysis and handling for crane hydraulic system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(10): 95-98.
- [7] 陈昭明, 徐泽宇, 邹劲松. 多功能铺设台车液压系统动态特性及故障仿真[J]. 液压与气动, 2018, 9(11): 63-69.
- CHEN Zhaoming, XU Zeyu, ZOU Jinsong. Dynamic characteristics and fault simulation of hydraulic system for multi-functional laying trolley[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018, 9(11): 63-69.
- [8] 刘智键, 刘宝林, 胡远彪. 液压卷扬系统失速故障的仿真研究[J]. 液压与气动, 2016, 12(6): 37-45.
- LIU Zhijian, LIU Baolin, HU Yuanbiao. Simulation for fault diagnosis of hydraulic winch system stall[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016, 12(6): 37-45.
- [9] 王强, 刘玉科. 基于 SimHydraulics 的某飞机起落架液压系统建模与故障仿真[J]. 液压与气动, 2020, 4(20): 123-129.
- WANG Qiang, LIU Yuke. Modeling and fault simulation of landing gear hydraulics system for certain aircraft based on SimHydraulics [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 4(20): 123-129.
- [10] 张立杰, 鄂东辰, 王晋川. 翻车机液压控制系统常见故障仿真研究[J]. 液压与气动, 2015, 9(22): 89-93.
- ZHANG Lijie, E Dongchen, WANG Jinchuan. Common faults of hydraulic control system of rotary dump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 9(22): 89-93.
- [11] 黄雄军. 基于 AMESim 的电液伺服系统故障仿真研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2014.
- HUANG Xiongjun. Fault simulation research of electro-hydraulic servo system based on AMESim[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2014.
- [12] 唐海军, 卢桂琴. 某重型起重机支腿锁故障诊断与改进[J]. 液压与气动, 2015, 1(30): 131-133.
- TANG Haijun, LU Guiqin. The fault analysis and improvement for a crane outrigger lock[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 1(30): 131-133.
- [13] 刘学慧. 某运输车液压系统故障分析与改进[J]. 液压与气动, 2015, 1(26): 114-116.
- LIU Xuehui. Failure analysis and adaptation for hydraulic system in a transportation vehicle[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 1(26): 114-116.
- [14] 姚成玉, 侯安农, 陈东宁. 基于 T-S 故障树的液压轮边制动系统可靠性分析[J]. 液压与气动, 2019, 6(3): 11-16.
- YAO Chengyu, HOU Annong, CHEN Dongning. Reliability analysis based on T-S fault tree for hydraulic wheel braking system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, 6(3): 11-16.

作者简介

- 王辉 (1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为发射总体技术。
- 吕明亮 (1993—), 男, 工程师, 主要研究方向为液压元件与系统。
- 王玺 (1984—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为系统仿真技术及系统可靠性。
- 韦学中 (1976—), 男, 研究员, 主要研究方向为地面支持与发射技术。