

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.023

基于FTA的焊接机器人故障诊断技术研究

梁 芬, 姜宏伟, 郭亚男, 朱名日
(中原工学院 信息商务学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 焊接机器人作为一种大型复杂系统, 主要从事焊接、切割与喷涂作业, 因其控制对象复杂、处理任务繁多, 所以出故障机率较大、诊断难度较高。为了解决焊接机器人故障诊断的盲目性问题, 提高诊断效率及运行可靠性, 在结合分析焊接机器人故障模式及故障树分析法特点的基础上, 将故障树分析法应用于焊接机器人故障诊断中。根据维修经验找出系统可能发生的各种故障原因, 由总体至部分, 按树枝状结构, 采用自上而下逐层细化的分析方法, 探讨了新型焊接机器人机械及电气控制系统的故障树模型。并以焊接机焊枪姿态和悬浮高度设置系统故障为例, 研究了系统故障树模型的建立, 并对此进行定性和定量分析, 找出系统的薄弱环节, 及时确定故障源。计算结果表明, 该方法直观简单, 可操作性强, 具有很好的实际应用价值。

关键词: 故障树; FTA; 可靠性分析; 故障诊断

中图分类号: TH39; TP242; TP206.3 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-1067-04

Analysis welding robots diagnosis based on fault tree analysis

LIANG Fen, JIANG Hong-wei, GUO Ya-nan, ZHU Ming-ri

(College of Information & Business, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Welding robots as a large complex system mainly engaged in welding, cutting and spraying work, it has a high failure rate more difficult diagnosis for its complex control objects and many tasks. In order to solve the problem of diagnosing welding robots blindly, improve the efficiency of diagnosis and reliability of welding robots, the fault tree analysis(FTA) method was applied to the welding robot fault diagnosis based on analyzing the failure mode of robot and the trait of fault trees diagnosis. All the possible failure causes of welding robots system will be found by the fault repair experiences, the analysis method of from general to part, from top to bottom according to the tree structure was applied, and the fault tree model of mechanic and electric control system on new welding robot was studied. Take the welding torch gesture and suspension height of welding robots for example, quantitative and qualitative analysis for fault diagnosis model was used to find the weakness and failure causes of system. The results indicate that the method is intuitive and simple, and have good maneuverability. It has greater theoretical significance and practical engineering value for new welding robot designing.

Key words: fault tree; fault tree analysis(FTA); fault diagnosis; reliability analysis

0 引 言

焊接机器人是在工业机器人基础上发展起来的先进焊接设备, 是从事焊接(包括切割与喷涂)的工业机器人, 主要用于工业自动化领域。焊接机器人作为一种大型复杂系统, 由于其控制对象复杂、处理任务繁多、出故障机率较大, 对焊接机器人故障诊断的研究也越来越受到有关专业人士的关注。

目前, 国内对焊接机器人故障诊断技术的研究相对较少, 但对机器人故障诊断技术研究较多。机器人故障诊断的研究大约是在上世纪80年代初开始产生的, 故障诊断技术也是越来越成熟和完善, 如日本东京大学提出的基于回归型神经网络的机器人故障诊断模型^[1]; 国内也有学者提出采用基于专家系统和BP神经网络对机器人进行故障检测^[2]。故障树分析法FTA(Fault Tree Analysis)的产生很好地解决了大型复杂系统的可靠性分析问题, 从而为今后对大型复杂系

收稿日期: 2014-02-13

作者简介: 梁 芬(1982-), 女, 河南郑州人, 讲师, 主要从事故障诊断、电机电器等方面的研究。E-mail: lf01023354@163.com

统进行故障诊断打下良好基础。FTA法是将系统的各种故障原因(包括硬件、环境、人为因素),由总体至部分,按树枝状结构,自上而下逐层细化的分析方法,是用于大型复杂系统可靠性、安全性分析和风险评价的一种普遍、有效方法^[3-4]。早在20世纪60年代初,美国的Watson和Mearns^[5]首先使用故障树分析方法,对民兵式导弹发射控制系统的随机失效问题成功地做出了预测。基于故障树的可靠性分析主要通过定性和定量分析,找出系统的薄弱环节,及时确定故障源^[6-8]。

本研究在结合分析焊接机器人故障模式及故障树分析法特点的基础上,将故障树分析法应用于焊接机器人故障诊断中,并以焊接机焊枪姿态和悬浮高度设置故障为例,研究故障树模型的建立,并对此进行定性和定量分析,确定故障源,从而极大地减少焊接机系统故障诊断的盲目性,提高诊断效率和诊断速度。

1 基于故障树的可靠性分析

对故障树进行定性和定量分析的目的是找出其所有最小割集,确定顶事件和底事件的发生概率。故障树的1个最小割集代表系统1个故障模式,只要有1个最小割集存在,系统就处于故障状态。在对故障树进行可靠性分析之前,作以下假设:

(1) 底事件之间相互独立;

(2) 底事件和顶事件只考虑两种状态,既正常或故障。

设系统有 K 个最小割集 $K=(K_1, K_2, \dots, K_K)$,在 K 个最小割集中,只要有1个最小割集发生,顶事件就发生。为了便于对故障树作定性和定量分析,常采用结构函数对故障树进行数学描述,故障树的结构函数可表示为:

$$\Phi(x) = \bigcup_{j=1}^k k_j(x) = K_1 + K_2 + \dots + K_k \quad (1)$$

其中:每个最小割集 k_j ($1 \leq j \leq k$)是底事件 x_i ($1 \leq i \leq n$) (n —底事件数目)的积事件,通过结构函数可以分析故障树顶事件的发生概率 F_s (系统不可靠度为 F_s ,顶事件为 T),顶事件发生概率计算如下式:

$$P(T) = p(k_1 + k_2 + \dots + k_k) = \sum_{i=1}^k p(k_i) - \sum_{i < j=2}^k p(k_i k_j) + \sum_{i < j < l=3}^k p(k_i k_j k_l) + \dots + (-1)^{k-1} p(k_1 k_2 \dots k_k) = F_1 - F_2 + \dots + (-1)^{k-1} F_K \quad (2)$$

其中:

$$F_1 = \sum_{i=1}^k p(k_i), F_2 = \sum_{i < j=2}^k p(k_i k_j), \dots, F_K = p(k_1 k_2 \dots k_k)$$

由于底事件的发生概率通常 < 1 ,故有下列不等式成立:

$$F_1 - F_2 \leq F_s \leq F_1, \\ F_1 - F_2 \leq F_s \leq F_1 - F_2 + F_3, \dots \quad (3)$$

当每个底事件的发生概率 < 0.01 时, F_s 可近似为:

$$F_s \approx (F_1 + F_1 - F_2)/2 = F_1 - F_2/2$$

或:

$$F_s \approx \sum_{i=1}^k p(k_i) \quad (4)$$

设最小割集 k_j 的发生概率为 $P(k_j)$,则最小割集 k_j 的概率重要度为:

$$I_{k_j} = \frac{P(k_j)}{P(T)}, 1 \leq j \leq k \quad (5)$$

同理,设故障树 n 个底事件中每个底事件发生概率为 F_i ($1 \leq i \leq n$),顶事件的发生概率可表示为 $F_s = F_s(F_1, F_2, \dots, F_n)$,则第 i 个底事件的概率重要度为 $\partial F_s / \partial F_i$ ($1 \leq i \leq n$)。

2 FTA在焊接机可靠性分析中的应用

本研究所研制的大型特种罐体新型焊接机器人不但能满足现代化工业生产的自动化和智能化要求,而且在焊缝检测、焊缝实时跟踪的精确度和智能化上与以往相比都有较大改善,该焊接机器人系统主要由传感器系统、控制单元、电源、送丝机、焊缝跟踪执行机构、焊枪姿态和悬浮高度设置、保护气体8个部分组成^[9-13],焊接机系统框架如图1所示。

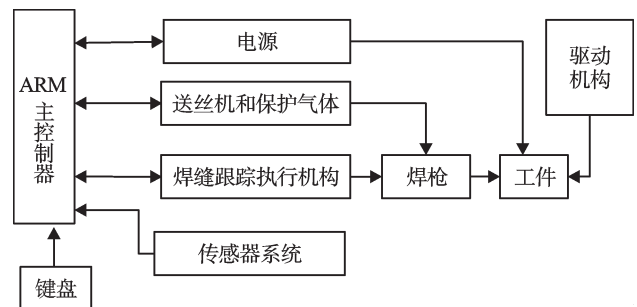


图1 焊接机系统框架图

焊枪姿态和悬浮高度设置作为焊接机系统的重要部分,一旦发生故障将严重影响焊接质量,其常见的故障类型有焊枪角度超前滞后及悬浮高度设置过高或过低等。现本研究以焊接机焊枪姿态和悬浮高度设置故障为例,从故障现象入手建立的焊枪姿态和悬浮高度设置故障树如图2所示,并对该故障树进行可靠性分析。

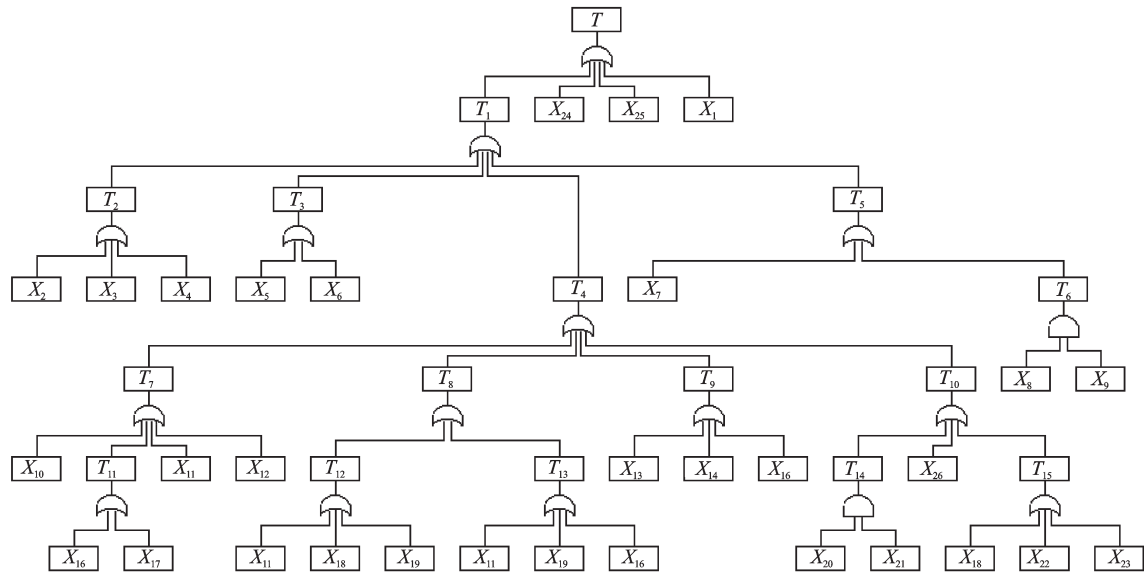


图2 焊枪姿态和悬浮高度设置故障树

如图2所示,焊枪姿态和悬浮高度设置故障树各中间事件及底事件描述如表1所示。根据上行法对故障树定性分析如下:

$$T = T_1 + X_1 + X_{24} + X_{25}$$

$$T_1 = T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + T_4 + T_5$$

$$T_4 = T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} = X_{10} + X_{16} + X_{17} + X_{11} + X_{12} + T_8 + T_9 + T_{10}$$

$$T_5 = X_7 + X_8 X_9$$

$$T_8 = (X_{11} + X_{19} + X_{18})(X_{11} + X_{19} + X_{16}) = X_{11} + X_{11} X_{19} + X_{11} X_{16} + X_{19} + X_{19} X_{16} + X_{18} X_{11} + X_{18} X_{19} + X_{18} X_{16} = X_{11} + X_{19} + X_{16} X_{18}$$

$$T_9 = X_{13} + X_{14} + X_{15}$$

$$T_{10} = T_{14} + T_{15} + X_{26} = X_{20} X_{21} + X_{18} + X_{22} + X_{23} + X_{26}$$

从而得出:

$$T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$$

根据上述分析,得出焊接机焊枪姿态和悬浮高度设置异常故障树的全部最小割集为:

$$K_1: \{X_1\}; K_2: \{X_2\}; K_3: \{X_3\}; K_4: \{X_4\}; K_5: \{X_5\}; K_6: \{X_6\}; K_7: \{X_7\}; K_8: \{X_8 X_9\}; K_9: \{X_{10}\}; K_{10}: \{X_{11}\}; K_{11}: \{X_{12}\}; K_{12}: \{X_{13}\}; K_{13}: \{X_{14}\}; K_{14}: \{X_{15}\}; K_{15}: \{X_{16}\}; K_{16}: \{X_{17}\}; K_{17}: \{X_{18}\}; K_{18}: \{X_{19}\}; K_{19}: \{X_{20} X_{21}\}; K_{20}: \{X_{22}\}; K_{21}: \{X_{23}\}; K_{22}: \{X_{24}\}; K_{23}: \{X_{25}\}; K_{24}: \{X_{26}\}。$$

由于焊接机器人设备可靠性较高,底事件的失效概率 F_i 远远小于 0.1,且均为互斥事件。故可设某工

表1 焊枪姿态和悬浮高度设置故障树中间事件及底事件

中间事件	底事件($X_1 \sim X_{15}$)	底事件($X_{16} \sim X_{26}$)
T_1 : 硬件损坏	X_1 : 设置错误	X_{16} : 负载过大
T_2 : 焊接机机械机构损坏	X_2 : 夹具故障	X_{17} : 传动机械间隙过大
T_3 : 意外干扰导致硬件损坏	X_3 : 立柱与摇臂故障	X_{18} : 电机绕组短路、断路
T_4 : 步进电机驱动机构损坏	X_4 : 机身故障	X_{19} : 定、转子卡死
T_5 : 传感器故障	X_5 : 元器件受环境粉尘、湿度、温度腐蚀	X_{20} : 供电电压过低
T_6 : GMR 焊枪悬浮高度传感器故障	X_6 : 电磁干扰	X_{21} : 驱动电源功率故障
T_7 : 失步或振荡	X_7 : 焊缝检测传感器故障	V_{22} : 接线错误
T_8 : 不能启动	X_8 : GMR 焊枪悬浮高度传感器故障(左)	X_{23} : 定、转子气隙太大
T_9 : 步进电机过热	X_9 : GMR 焊枪悬浮高度传感器故障(右)	X_{24} : Arm 主控制器软件失常
T_{10} : 出力降低或没有功率输出	X_{10} : 安装连接不好,松动	X_{25} : 产品设计缺陷或元器件质量不好
T_{11} : 机械负载不合理	X_{11} : 驱动电源故障	X_{26} : 安装或连接等人为故障
T_{12} : 运转过程电机不能启动	X_{12} : 电机阻尼系数不合理或绕组故障	
T_{13} : 调试过程电机不能启动	X_{13} : 电机绕组短路	
T_{14} : 驱动电源、主控制器供电电压故障	X_{14} : 永磁体去磁	
T_{15} : 步进电动机故障	X_{15} : 绕组绝缘恶化	

作时间内底事件 X_{24}, X_{25}, X_{26} 发生概率为0.000 1,其余底事件发生概率均为0.001,根据概率多除少补原则求得焊枪姿态和悬浮高度设置顶事件失效概率为:

$$F_s = P(T) \approx \sum_{i=1}^k p(k_i) = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15} + F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20} F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} = 0.019\ 302$$

焊枪姿态和悬浮高度设置故障树最小割集及底事件概率重要度如表2所示。

表2 底事件概率重要度及最小割集

最小割集 代码	最小割集 失效概率	最小割集 概率重要度	底事件 代码	底事件 概率重要度
$K_1 \sim K_7$	0.001 0	0.051 808 1	$X_1 \sim X_7$	1.000 0
K_8	0.000 001	5.180 81e-5	X_8	0.001 0
K_9	0.001 0	0.051 808 1	X_9	0.001 0
$K_{10} \sim K_{18}$	0.001 0	0.051 808 1	$X_{10} \sim X_{18}$	1.000 0
K_{19}	0.000 001	5.180 81e-5	X_{19}	1.000 0
$K_{20} \sim K_{21}$	0.001 0	0.051 808 1	$X_{20} \sim X_{21}$	0.001 0
$K_{22} \sim K_{23}$	0.000 1	0.005 180 8	$X_{22} \sim X_{23}$	1.000 0
K_{24}	0.000 1	0.005 180 8	X_{24}	0.000 1
			X_{25}	0.000 1
			X_{26}	0.000 1

从表2中运算近似结果可知,当系统设备的可靠性较高时,高阶最小割集的发生概率在极小值以下。根据故障树定量分析结果,维修人员在检修焊接机系统故障时,应首先改进重要度较大的部件,如首先检测是否有人为设置错误、是否有电磁干扰、是否有传感器故障等系统的薄弱环节,从而提高焊接机系统的可靠性,提高诊断效率。

3 结束语

本研究结合焊接机故障及故障树分析法的特点,以焊接机焊枪姿态和悬浮高度设置异常故障为例建立了焊枪姿态和悬浮高度设置异常故障树诊断模型,

将故障树分析法应用于焊接机器人故障诊断中,其层次性的树状故障诊断模式使得维修人员对焊接机故障诊断从单凭经验的盲目诊断上升到理论化和系统化高度,实践证明,该故障诊断方法简单直观,可操作性强。

参考文献(References):

- [1] TAKAI M, URA T. Development of a system to diagnose autonomous underwater vehicle[J]. *International Journal of Systems Science*, 1999, 30(9): 981-988.
- [2] 王随平, 张 彤, 宁小玲. 基于集成神经网络的深海机器人故障诊断研究[J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18(4): 773-775.
- [3] PIRES J N, ALTINO L T, GODINHO P, et al. Welding robots[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2003: 44-55.
- [4] AMARI S V, JENNIFER P D, AKERS B. Reliability analysis of large fault trees using the vesely failure rate [J]. *IEEE Reliability and Maintainability (Annual Symposium-RAMS)*, 2004: 391-396.
- [5] 金 星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社. 2002.
- [6] DAVID P. WEBER. Fuzzy fault tree analysis [J]. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 1994 (3): 1899-1904.
- [7] 王久崇, 樊晓光. 改进的故障树模糊诊断方法及应用[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(14): 226-230.
- [8] 尉玉峰, 阚树林. 基于Petri网的复杂制造系统故障树分析[J]. *机械设计与制造*, 2010(7): 192-194.
- [9] 马学文, 朱名日, 陈丛生. 焊缝检测与跟踪系统软硬件设计与实现[J]. *电子质量*, 2004(4): 25-26.
- [10] 张庆达. 小功率电机故障诊断与修理[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000.
- [11] 王改云, 梁 芬, 朱名日. 基于故障树的焊接件可靠性分析[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(6): 80-82.
- [12] 朱学军, 陈 宇. 基于FTA的智能型故障诊断方法的研究[J]. *微计算机信息*, 2005, 21(6): 123-125.
- [13] 尚 文, 王维民, 齐鹏逸. 基于条件规则与故障树法的燃气轮机故障诊断[J]. *机电工程*, 2013, 30(7): 798-814.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

梁 芬, 姜宏伟, 郭亚男, 等. 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.

LIANG Fen, JIANG Hong-wei, GUO Ya-nan, et al. Analysis welding robots diagnosis based on fault tree analysis[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(8): 1067-1070.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>