

数控机床液压系统故障溯源及分析*

张根保, 张 恒, 庞继红, 刘 佳

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 以提高机床液压系统可靠性为目的, 分析了液压传动的特点, 并对常见的故障现象进行了整理, 归纳出了振动异响、压力不足及波动大、流量不稳定、液压元器件损坏四种典型的故障模式。以某磨齿机为例, 采用 FTA(故障树分析)方法, 对四种故障模式进行了故障原因溯源, 找出了造成系统故障的根本原因。以压力故障为例进行了定量分析, 对每个底事件的概率重要度和相对概率重要度进行了计算, 并阐述了重要度分析在可靠性改进和控制过程中的重要作用。

关键词: 数控机床; 液压系统; 可靠性; 故障树分析; 重要度

中图分类号: TH137.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1356-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.043

Fault trace and analysis of hydraulic system attached to CNC machine tools

ZHANG Gen-bao, ZHANG Heng, PANG Ji-hong, LIU Jia

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper analysed the features of hydraulic transmission in order to improve the reliability of the hydraulic system attached to machine tools. Meanwhile, it summed up four typical fault modes including vibration and noise, insufficient pressure and pressure fluctuations, instability of flow, failure of hydraulic component after gathering the common fault phenomena. Taking one gear grinding machine for example and using FTA to search the root reasons of four typical fault modes and get the results finally. It completed quantitative analysis based on pressure fault, in the same time, the probability importance and relative probability importance of every root reason were be calculated which was used to elaborate the important role of importance analysis in improvement and control procedure of reliability.

Key words: CNC machine; hydraulic system; reliability; FTA; importance degree

作为机电液一体化系统中的重要组成部分, 液压系统对整机的性能和可靠性都有重要影响^[1,2]。而随着市场对数控机床的可靠性要求越来越高, 相应地对液压系统的可靠性也提出了更高的要求, 因此研究液压系统的可靠性具有重要的实际意义。

液压系统作为一个典型的非线性系统, 有其自身特殊的工作特点。液压油工作在一个封闭的系统内且各回路之间相互交叉干扰, 使得各个故障之间相互影响, 因此液压系统的故障分析具有一定的难度^[2]。国内外许多学者对这一问题都进行了深入的研究, 其中主要包括: 利用非线性观测器对液压伺服系统故障进行诊断, 并建立了系统的非线性观测模型^[3]; 从动态可靠性的角度分析液压系统的故障, 通过蒙特卡罗方法进行仿真, 并重点计算了液压元件的失效分布模型^[4]; 基于专家系统, 将专家经验分解成故障现象、原因、规则, 从而实现了对故障知识的有效管理和维护^[5]; 使用非线性迭代偏最小二乘(NIPALS)算法分析系统正常状态下的样本, 运用广义似然比(GLR)检验对模型残差进行假设检验, 并判断液压系统的故障状态^[6]。可以看出, 各研究的主要内容是通过检测、统计的方法对造成故障的真实原因进行判断。然而在实际生产过程

中, 由于液压系统的复杂性和制造企业检测设备水平的限制, 使得这些方法应用起来有较大的难度, 因此针对企业实际情况, 寻找切实可行的故障预防与维修方法很有必要。

1 液压系统故障分析

1.1 故障模式类型

通常情况下, 数控机床的液压系统由液压站(液压泵、蓄能器、控制阀等)、液压油及其管路、执行件(液压缸、马达等)组成。液压站是整个液压系统的核心和大脑, 它提供液压油的动力, 同时控制各个阀体的状态。液压传动在机床运行过程中主要驱动一部分速度要求不高、运行要求平稳的辅助运动, 以配合主运动完成加工, 如驱动工作台移动、夹紧刀具、快速进给和后退、液压消隙等。由于液压传动特殊的工作方式, 其故障一般会表现出复杂性、多层次性、相关性、不确定性等。与机电液中机电故障相比, 它不具有机械故障易于观察的特性, 同时也不具有电气故障易于检测的特性。尽管液压故障不易检测与发现, 同时表现形式又多种多样, 但通过对大量现场故障数据统计分析发现, 诸多故障之间都有相似之处, 因此将故障模

收稿日期: 2011-08-21; **修回日期:** 2011-10-06 **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-016, 2009ZX04001-013, 2009ZX04001-023); 国家自然科学基金重点资助项目(50835008); 国家“863”计划资助项目(2009AA04Z119); 国家重大专项基金资助项目(Z010ZX04014-015)

作者简介: 张根保(1953-), 山西新绛人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为制造系统质量控制与管理、数控机床可靠性(gen. bao. zhang@263.net); 张恒(1986-), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要研究方向为数控机床可靠性管理与控制; 庞继红(1979-), 男, 广西人, 博士, 主要研究方向为制造系统质量管理与控制; 刘佳(1985-), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要研究方向为数控机床可靠性管理与控制。

式总结为以下四种主要类型:

a) 较大振动和异响。振动和异响主要发生在液压站,是液压系统最为常见的故障。通常较大的振动和异响意味着系统某个环节出现了异常,因此振动和异响被看做是液压系统是否正常运行的体温计。

b) 流量波动较大。稳定的流量是执行件平稳运动的前提,流量波动大将导致执行件运动时快时慢,不均匀。

c) 压力不足或波动较大。足够的压力是驱动负载的前提,压力不足将无法驱动运动部件或造成夹紧部件松动,压力波动较大将造成执行件时动时停。

d) 液压元器件故障。各种控制阀、油泵、油缸、管路是实现液压回路有效控制的节点,因此,液压元器件良好的状态是保证液压系统正常工作的硬件条件。

1.2 故障树分析(FTA)

FTA 最初应用于电子行业,后来被推广到各个工程领域。FTA 是以系统所不希望发生的一个事件(顶事件)为分析的目标,通过逐层向下追溯所有可能的原因,从而找出系统内可能存在的失效模式、环境影响、人为失误以及程序处理等硬、软件因素与顶事件的逻辑关系^[7,8]。本文以磨齿机中液压系统为例进行故障树分析,在分析过程中需要用到的符号如表 1 所示。

表 1 故障树符号的意义

| 符号 | 意义 | 符号 | 意义 |
|----|-----------|----|-----------|
| □ | 顶事件或中间事件 | ○ | 底事件,即故障根源 |
| ∩ | 逻辑意义上的“与” | ∪ | 逻辑意义上的“或” |

2 数控磨齿机液压系统故障分析

数控蜗杆砂轮磨齿机是一种采用连续展成磨削原理,并集多轴精密同步传动数控、精密齿轮传动、高效精密磨削、连续位移磨削、数控齿向修形等一系列技术为一体的高效、精密齿轮磨削机床。作为机床机电液一体化的重要组成部分,液压系统在机床中的功能包括液压缸消除(V轴修整进给)、液压缸驱动执行件移动(砂轮架X轴的快进快退、工件架沿Z轴上下移动)、润滑油供给(除用润滑脂的立柱)、液压夹紧(工件芯轴的转动)。现以此机床的液压系统为例,针对四种典型的故障模式进行故障树分析。

2.1 液压系统振动和异响

液压站振动和异响是系统失效的综合体现,分析时以现有故障数据为基础,重点从液压油特性变化、液压泵吸油过程、液压阀堵塞等主要故障点入手。通过故障树分析发现,造成系统振动和异响的主要原因是液压油污染严重、管路及接头密封不好、用户使用维护不当等,如图 1 所示。

2.2 压力不足或波动较大

系统压力不足及波动较大造成的主要故障现象为液压负载不动或是时动时停,属于液压回路方面故障。分析时主要从液压泵、液压回路泄漏、液压执行件串缸故障点出发,通过故障树分析发现,造成此故障的原因主要是液压油污染、管路及接头密封不好、液压缸装配及密封不当等,如图 2 所示。

2.3 液压系统流量不稳

液压系统流量不稳定和压力不足及波动一样同属于液压

回路故障,主要现象为执行件速度时快时慢。因此分析时主要从液压管路及元件泄漏、管路堵塞等主要故障点入手。通过故障树分析发现,造成此故障的原因主要是液压油污染、混油、管接头处密封不良及液压阀损坏等,如图 3 所示。

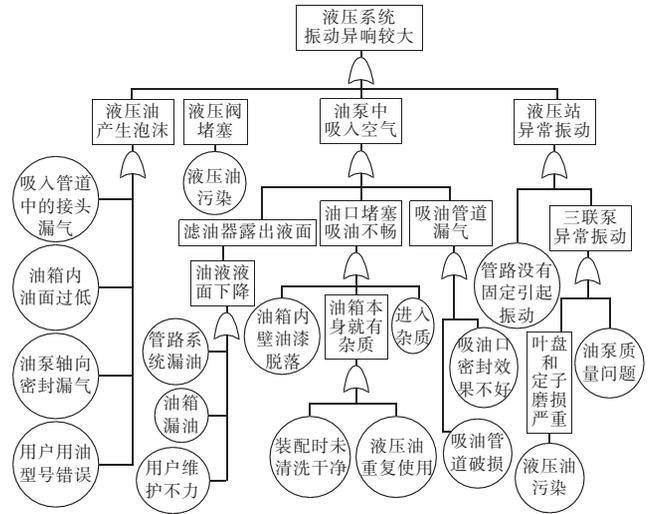


图 1 液压系统振动异响故障树

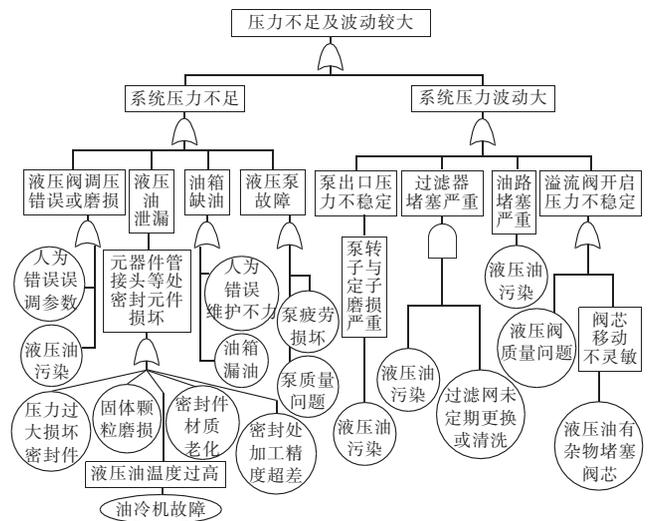


图 2 系统压力不足及波动较大故障树

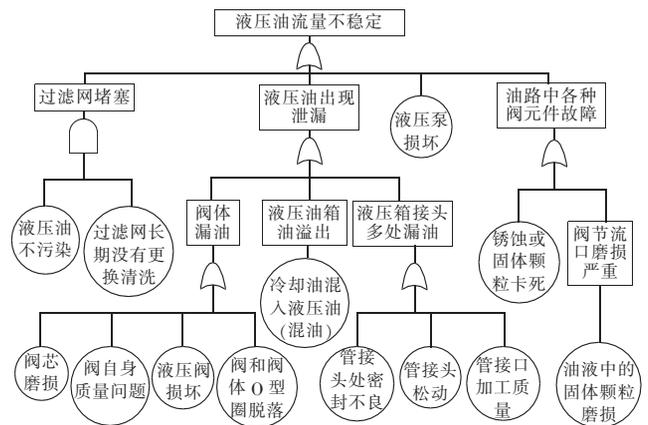


图 3 流量不稳定故障树

2.4 液压系统元器件故障器件故障

液压系统元器件故障主要是液压泵、控制阀、液压缸等在油路正常的情况下发生失效。分析时主要从元器件的机械结构出发,结合作业方式分析元器件的失效模式。通过故障树分析发现,造成此故障的原因主要是液压油污染、元件装配不良、

用户维护不当等,如图 4、表 2 所示。

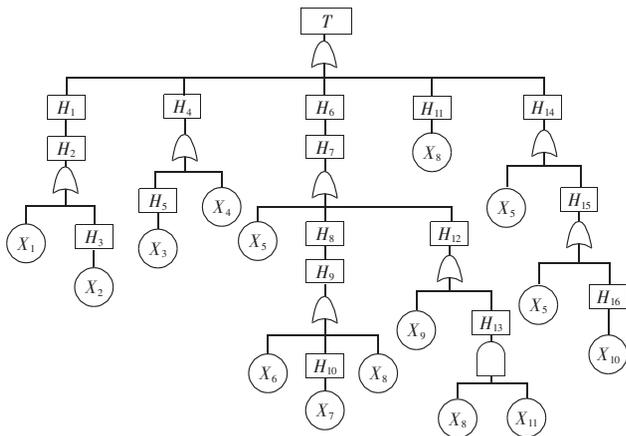


图 4 液压元器件失效故障树

表 2 液压元器件失效故障树对应事件

| 事件 | 具体内容 | 事件 | 具体内容 | 事件 | 具体内容 |
|----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|------------|
| T | 液压元器件失效 | H ₁₀ | 液压油温度过高 | X ₄ | 泵质量问题 |
| H ₁ | 压力表不能正常显示 | H ₁₁ | 溢流阀堵塞卡死 | X ₅ | 装配不良 |
| H ₂ | 压力表损坏 | H ₁₂ | 活塞与缸体磨损严重 | X ₆ | 压力过大损坏密封件 |
| H ₃ | 液压表超量程打坏 | H ₁₃ | 油中混有固体颗粒 | X ₇ | 油冷机故障 |
| H ₄ | 新油泵发热严重 | H ₁₄ | 油缸出现卡死 | X ₈ | 液压油污染 |
| H ₅ | 冷却不好,油温过高 | H ₁₅ | 缸体拉毛严重 | X ₉ | 活塞与油缸光洁度不好 |
| H ₆ | 油缸漏油 | H ₁₆ | 缸体、活塞有毛刺 | X ₁₀ | 液压站过滤网损坏 |
| H ₇ | 活塞与缸体间隙过大 | X ₁ | 液压表质量问题 | X ₁₁ | 装配时毛刺清洁不干净 |
| H ₈ | 活塞油缸密封不良 | X ₂ | 用户压力调整过高 | | |
| H ₉ | 密封圈磨损 | X ₃ | 油冷机故障 | | |

3 重要度分析

复杂的故障树往往有多个底事件,每个底事件对顶事件的影响程度不一样,将这种影响大小称为重要度^[9-12]。在进行故障预防性维修和可靠性控制时,优先考虑重要度较高的底事件,不仅能快速有效地提高系统可靠性,同时也降低控制成本。

3.1 重要度定义

组成故障树的所有事件是 {0,1} 二值变量。其中:“1”表示事件发生,“0”表示事件不发生。由于顶事件的发生与否完全由底事件的状态决定,即顶事件的状态由底事件状态决定的函数定义为系统结构函数

$$T = \varphi(X) = \varphi(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

其中: $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 。结构函数只是描述了顶事件的发生与底事件的逻辑关系,而在实际生产过程中,往往还需要知道顶事件发生的概率有多大,即系统失效概率函数为

$$P(T) = f(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

其中: $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$; $P(T)$ 是事件 $T=1$ 时的概率; x_i 是事件 X_i 发生的概率,即 $x_i = P(X_i = 1)$ 。

为了分析底事件 X_i 对系统的影响,从故障树中的 X_i 出发,对顶事件进行全概率分解,如下:

$$P(T) = P(X_i = 1)P(T=1|X_i = 1) + P(X_i = 0)P(T=1|X_i = 0) \quad (3)$$

$$\text{式中: } P(T=1|X_i = 1) \triangleq f(x_1, x_2, \dots, x_i = 1, \dots, x_n) = f(1_i, x) \quad (4)$$

$$P(T=1|X_i = 0) \triangleq f(x_1, x_2, \dots, x_i = 0, \dots, x_n) = f(0_i, x) \quad (5)$$

将式(4)(5)代入式(3),得

$$f(x) = x_i f(1_i, x) + (1 - x_i) f(0_i, x) \quad (6)$$

两边同时对 x_i 取偏导数,并定义 $I_A(i)$ 即为底事件 X_i 的概率重要度为

$$I_A(i) = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = f(1_i, x) - f(0_i, x) \quad (7)$$

从定义可知,概率重要度反映了底事件发生概率的变化对系统失效概率的影响。在实际分析处理中发现,有些底事件发生概率小,但是概率变化对系统失效影响较大;而有些底事件发生概率较大,但概率变化对系统失效影响较小^[13]。因此为了更准确地衡量底事件的这种关系,定义相对概率重要度为

$$I_C(i) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta f(x)}{f(x)}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} = \frac{x_i}{f(x)} \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = \frac{x_i}{f(x)} I_A(i) \quad (8)$$

3.2 液压系统故障树的重要度计算

现以液压元器件故障(图 4)为例进行重要度分析计算。首先利用上行法求出故障树的最小割集为: $\{X_i\} (i=1, 2, 3, \dots, 10)$ 。

根据故障树定性分析方法,得出故障树的结构函数和系统失效概率函数为

$$\varphi(X) = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{10} = \sum_{i=1}^{10} X_i \quad (9)$$

$$P[\varphi(X)] = P(\bigcup_{i=1}^{10} X_i) = P(X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup \dots \cup X_{10}) \quad (10)$$

根据容斥原理,可将失效函数展开成

$$P[\varphi(X)] = \sum_{i=1}^{10} P(X_i) - \sum_{i < j = 2}^{10} P(X_i X_j) + \sum_{i < j < l}^{10} P(X_i X_j X_l) - \dots + (-1)^{10-1} P(X_1 X_2 \dots X_{10}) \quad (11)$$

由式(11)可以看出,失效函数有 $2^{10} - 1$ 项,即随着最小割集数量的增加,将会导致组合爆炸问题。因此对计算方法作适当不影响分析结果的近似处理:当底事件发生的概率小于 0.05 时,由于三阶及其以上的数值对概率值影响极小,忽略三阶及其以上高次项。对式(11)近似,得出失效函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^{10} x_i - \sum_{i < j = 2}^{10} x_i x_j \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)中,可得出每个事件的概率重要度为

$$I_A(i) = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial [\sum_{j=1}^{10} x_j - \sum_{j < k = 2}^{10} x_j x_k]}{\partial x_i} = \frac{\partial (\sum_{j=1}^{10} x_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial (\sum_{j < k = 2}^{10} x_j x_k)}{\partial x_i} = 1 - \sum_{j=1, j \neq i}^{10} x_j \quad (13)$$

其中,底事件发生的概率 x_i (第 i 个事件发生的次数与故障发生的总次数之比)如表 3 所示。

已知 $I_C(i) = \frac{x_i}{f(x)} I_A(i)$,由于顶事件的发生概率 $f(x)$ 是定值,在实际处理过程中,为简化计算,对式子进行调整,并定义近似相对重要度为

$$I'_C(i) = f(x) I_C(i) = x_i I_A(i) \quad (14)$$

对概率重要度和近似相对重要度进行计算,如表 3 所示。

通过计算,按底事件概率重要度和近似相对重要度从大到小进行排序,均为 $X_8, X_5, X_6, X_1, X_9, X_{10}, X_7, X_3, X_4, X_2$,即液压油污染对元器件影响最大,其次是装配不良。因此生产厂家有必要为液压油污染制定一套油品管理规范,有必要完善并制定一套以保障产品可靠性的装配工艺方案。

表 3 底事件发生概率及重要度

| 重要度 | 事件 | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | X ₈ | X ₉ | X ₁₀ |
| x_i | 0.023 | 0.011 | 0.015 | 0.012 | 0.025 | 0.024 | 0.016 | 0.043 | 0.022 | 0.021 |
| $I_A(i)$ | 0.811 | 0.799 | 0.803 | 0.800 | 0.813 | 0.812 | 0.814 | 0.831 | 0.810 | 0.809 |
| $I'_C(i)/10^{-2}$ | 1.8653 | 0.8789 | 1.2045 | 0.9600 | 2.0325 | 1.9488 | 1.3024 | 3.5733 | 1.7820 | 1.6989 |

4 结束语

本文针对蜗杆砂轮磨齿机进行分析,并以(下转第 1370 页)