

文章编号: 1673-5196(2011)03-0034-04

基于功能危险分析的数控机床主传动系统故障树分析

杨合立, 张 鹏, 祝红林, 安宗文

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对数控机床主传动系统故障树分析中顶事件选择片面的问题, 指出进行功能危险分析为顶事件的选择提供技术和理论依据, 即以功能危险分析的输出作为故障树分析的输入建立故障树. 采用上行法对故障树求最小割集并进行分析, 确定出系统的薄弱环节, 验证了应用功能危险分析技术确定故障树顶事件的有效性.

关键词: 数控机床; 传动系统; 功能危险分析(FHA); 故障树分析(FTA)

中图分类号: TG659 文献标识码: A

Fault tree analysis of main drive system in CNC machine tool based on functional hazard analysis

YANG He-li, ZHANG Peng, ZHU Hon-lin, AN Zong-wen

(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problem of one-sided choice of top event for fault tree analysis (FTA) of main drive system in NC machine tool, it was pointed out that the functional hazard analysis(FHA) would provide a technical and theoretical basis for top event choice, viz the fault tree would be established so that the input for its analysis should be the output of FHA. The minimum cut sets was then found and analyzed with up-going method. The system's weak links were determined, verifying the effectiveness of determination of fault tree top event with FHA technique.

Key words: CNC machine tool; drive system; functional hazard analysis(FHA); fault tree analysis(FTA)

随着复合功能的增多和密集型技术的引入, 使得数控机床故障隐患增多, 系统的先进功能和性能不能维持, 造成的损失越来越大^[1-2]. 因此, 为了提高系统可靠性, 减少寿命周期费用, 有必要对其进行可靠性分析. 故障树分析(fault tree analysis, FTA)是行之有效的可靠性技术, 在数控机床系统可靠性分析与设计中已有广泛的应用^[3-4]. 但在实际应用 FTA 时, 顶事件的选择往往凭经验设定, 对于危及生产安全和影响任务完成的所有事件很少作全面系统的分析, 在一定程度上影响顶事件选择的准确性.

根据这种现状, 本文针对 TH5640A 数控机床主传动系统, 首先进行功能危险分析(functional hazard analysis, FHA)^[5], 以确定 FTA 的顶事件; 之后进行 FTA, 确定主传动系统的薄弱环节. 由此形成综合应用 FHA 和 FTA 技术的数控机床主传动系统可靠性分析的基本方法.

1 TH5640A 数控机床主传动系统

数控机床传动系统结构简图如图 1 所示. 该数控机床主传动系统包括: FANUC-a6 交流主轴电动机

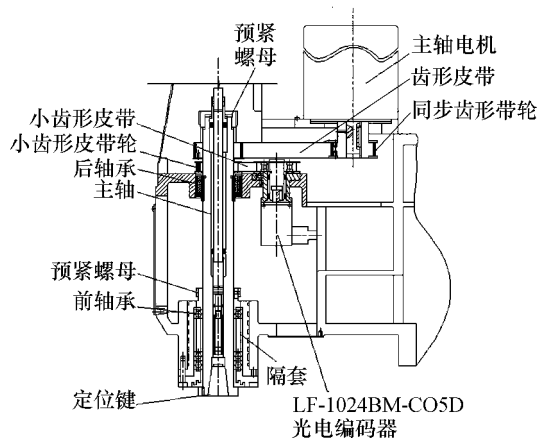


图 1 TH5640A 数控机床主传动系统结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of main transmission system structure in TH5640A CNC machine tool

机、主轴、同步带、同步带轮、预紧螺母、小同步带、小同步带轮、前后轴承、定位键、轴承隔套和 LF-1024BM-CO5D 光电编码器等。主轴箱由单根主轴组成,主轴直接由电动机通过齿形皮带带动,齿形皮带有 2 档,一档为 1:1,另一档为 1:2,即主轴可得 2 种转数:35~5 000 r/min 和 17.5~3 000 r/min,可按需要变换齿形带和对应的齿轮。本文针对转数为 35~5 000 r/min 的主传动系统进行研究。

2 数控机床主传动系统的 FHA

FHA 是通过全面分析系统每个部件的所有功能,确定每一功能失效或故障的潜在危险及这种危险对整个系统的影响或影响等级,其中影响等级分为 4 级,即 I 级(致命的)、II 级(危险的)、III 级(重大的)和 IV 级(非重大的)^[5]。本文根据数控机床主传动系统每一故障模式的严重程度对传动系统中的部件划等分类,并通过对 I 级和 II 级故障模式的分析确定 FTA 的顶事件,保证 FTA 工作的准确性。

2.1 数控机床主传动系统功能分析

数控机床主传动系统的功能是将主轴电动机的原动力变成可供主轴上刀具切削加工的切削力矩和切削速度。主传动系统应具有较大的调速范围,以保证加工时能选用合理的切削用量,同时主传动系统还需要有较高精度及刚度并尽可能降低噪声,从而获得最佳的生产率、加工精度和表面质量。

2.2 故障判据

主传动系统凡发生以下不满足要求的情况之一,即认为该系统发生了故障:

- 1) 机床在切削过程中切削振动大;
- 2) 主轴不能转动或转速不正常;
- 3) 主轴不定位或定位不准确;
- 4) 主轴转动时振动和噪声太大;
- 5) 主轴发热(由于轴承预紧问题)。

2.3 故障影响类别及定义

为了划分主传动系统部件不同故障模式产生的最终影响程度,需要对最终影响的后果等级进行预定义,从而对系统中各故障模式按其严重程度进行分类。考虑到故障造成最坏的潜在后果,并根据最终可能出现的人员伤亡、系统损坏或经济损失的程度来确定故障影响等级。主传动系统故障影响类别及定义见表 1。

表 1 系统故障影响类别及定义

Tab. 1 Category and definition of system fault influence

类别	定义
I 类故障	引起系统毁坏的故障及重大经济损失
II 类故障	导致系统任务失败或重大经济损失
III 类故障	导致系统中等程度损坏或中等程度的经济损失

2.4 主传动系统 FHA 图表

FHA 是一个分析和评估过程,它通过分析来确

表 2 功能危险性分析图表

Tab. 2 Function hazard analysis list

系统部件功能	故障描述	故障影响	影响类别
FANUC-a6 交流主轴电动机 为主轴提供动力	主轴不转	系统停止工作或任务失败	III
	主轴转速不正常	任务失败或产生废品	II
同步齿形带传递电动机动力到主轴	皮带过松	主轴在强力切削时停转	III
	皮带过紧	主轴在工作时有大噪声	IV
	皮带表面有油	主轴在强力切削时停转	III
同步齿形带轮带动同步带运动	主轴与电机两轮之间传动平衡不佳	主轴产生噪声	III
主轴完成转动运动	操作不当使主轴发生强烈碰撞	主轴变形	I
主轴定位键实现准确定位	定位键过松	主轴定位不准确	III
	轴承预紧力不够,游隙过大	机床工作时切削振动大	II
	轴承研伤或损坏	主轴发热或在切削时振动大并且伴随有摆动现象	II
前后轴承支持主轴承受 轴向和径向力	轴承拉毛或损坏	机床切削时振动大	III
	轴承预紧力过大	轴承易损坏	II
	螺母松动使主轴窜动	机床工作时切削振动大	III
小同步齿形皮带传递动力到 光电编码器	光电编码器不能及时、准确地 接收到主轴角位移量信号	CNC 系统不能准确地 控制主轴准停	II
小同步齿形带轮带动 小同步齿形带运动	光电编码器接收到不 稳定信号	CNC 系统不能准确地 控制主轴准停	II
LF-1024BM-CO5D 光电编码器 通过光电转换将主轴的角位 移量转换成电脉冲当量实现控制	无法反馈信号	主轴不能准停且无法 加工螺纹	II

定系统操作中可能发生的故障,并判断故障造成的危害.本文以 TH5640A 数控机床主传动系统各部件潜在功能故障或失效为对象,并采用图表的形式分析确定各部件功能故障或失效对系统的影响和危害性等级.分析表采用推论的方法填写.

第一步明确系统各部件功能;第二步查阅资料^[6-7],参相似产品的历史故障模式确定系统各部件相应故障模式以及故障影响^[8-9];第三步根据定义确定故障影响类别;第四步与相关专家讨论确定分析结果的准确性.特别指出表中的故障描述是指某种功能故障情况下系统状态的描述;故障影响是指某一功能故障对系统正常工作的影响.功能危险性分析见表 2.通过 FHA 图表 2 可得 I 类故障是由于操作不当使主轴发生强烈碰撞引起的主轴变形;II 类故障是主轴转速不正常引起的任务失败或产生废品,轴承的研伤或损坏引起主轴发热或在切削时振动大并且伴有摆动现象,以及小同步齿形皮带、小同步齿形带轮和光电编码器等故障引起 CNC 系统不能准确地控制主轴准停等.由此可以看出 I 类、II 类故障模式主要影响主轴且使主轴发生故障,而主轴是主传动系统的最关键部件,因此主轴故障被视为系统最不希望发生的故障.按照故障树顶事件选择的原则以最不希望发生的事件为顶事件,即选择主轴故障作为 FTA 的输入.

3 数控机床主传动系统的 FTA

FTA 是通过可能对造成产品故障的硬件、软件、环境、人为因素等进行分析,画出故障树,从而确

定产品故障原因的各种可能组合方法或其发生概率的一种分析技术.其思想是运用演绎法逐级分析,把系统的故障与组成系统部件的故障有机地联系在一起.从上到下按一定的逻辑关系,逐层寻找造成顶事件的各种可能原因,一直追寻到其故障机理或概率分布已知的最基本的原因,并且通过 FTA 可以找出系统的全部可能的失效状态,也就是故障树的全部最小割集.

FTA 关键是故障树的建立,而故障树顶事件的选择直接影响 FTA 工作的效果,所以顶事件的选择很重要.本文以 FHA 的输出结果作为 FTA 的输入,即选择主轴故障作为主传动系统故障树分析的顶事件,保证分析的工程性和准确性.

3.1 故障树的建立

故障树的构建是从顶事件出发,采用自上而下的演绎法建树,逐级寻找导致顶事件发生的原因,最终将事件细化到不可再分的程度.各种事件通过适当的逻辑门联系起来,形成一棵倒置的树状流程图.

第一步以主轴故障为顶事件;第二步找出直接引起主轴故障的各种因素;第三步找出引起第二步各因素的原因.如此循环,直到不需要分析底事件.建立的故障树如图 2 所示,故障树代码意义见表 3.

3.2 求最小割集

FTA 的主要目的是找出主轴故障的原因事件及原因事件组合,识别导致主轴故障发生的所有故障模式,从而有利于指导故障诊断和维修.FTA 的关键是找出最小割集,即导致故障树顶事件发生的所有故障的组合,从而指导系统的故障诊断和维修.

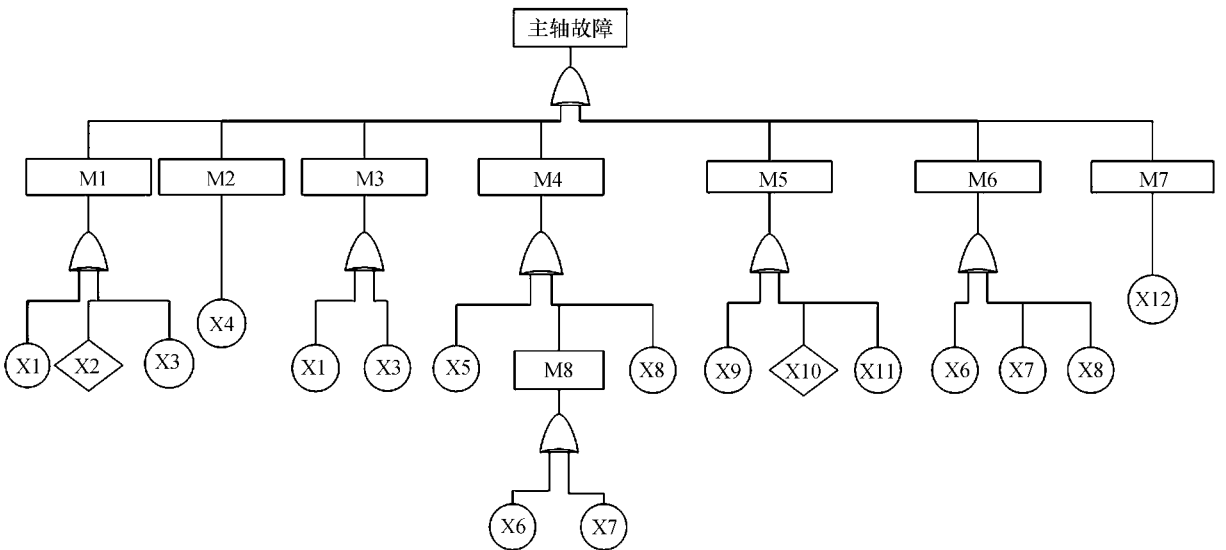


图 2 TH5640A 故障树

Fig. 2 Fault tree of TH5640A

表3 故障树代码意义表

Tab.3 Fault tree code significance diagram

代码	代码意义	代码	代码意义
M1	主轴不转或转速不正常	X3	同步带表面有油
M2	主轴上下窜动	X4	预紧螺母松动
M3	强力切削时主轴停转	X5	同步带过紧
M4	主轴有大噪声	X6	轴承预紧力小或轴承研伤(拉毛)
M5	主轴定位不准	X7	轴承拉毛(研伤)或损坏
M6	主轴发热或振动	X8	主轴与电机之间传动不平衡
M7	主轴变形	X9	定位键松动
M8	轴承故障	X10	光电编码器故障
X1	机床切削过载	X11	主轴与编码器之间传动不平衡
X2	主轴电动机故障	X12	误操作

最小割集一般有2种方法求解:上行法和下行法。上行法算法是自上而下进行,基本思想是把最底一层的逻辑门用其输入事件来表示,而上一层逻辑门再由其输入表示,一层层往上推,直到把顶事件表示出来。

在这一过程中,按照布尔代数吸收律和等幂律来化简。本文采用上行法进行分析得到故障树全部最小割集为

$\{X1\}, \{X2\}, \{X3\}, \{X4\}, \{X5\}, \{X6\}, \{X7\}, \{X8\}, \{X9\}, \{X10\}, \{X11\}, \{X12\}$

3.3 结果分析

在求得全部最小割集后,由于没有足够多的数据对故障树中各个底事件发生概率作出推断,无法进一步对顶事件发生概率作定量分析。因此,根据每个最小割集所含底事件数目(阶数)排序,由于各个底事件发生概率比较小,且相互差别不大,因此按以下原则对最小割集进行比较:

- 1) 阶数越小的最小割集越重要;
- 2) 在低阶最小割集中出现的底事件比高阶最小割集中的底事件重要;
- 3) 在最小割集阶数相同的条件下,在不同最小割集中重复出现的次数越多的底事件越重要。

由图2可以看出,所有最小割集基本都是同阶最小割集;机床切削过载,同步带表面有油,轴承预紧力小或轴承研伤(拉毛),轴承拉毛(研伤)或损坏等事件重复出现;主轴电动机故障和光电编码器故障是未探明事件,表明该事件可能发生,但是概率较小,无需进一步分析故障事件,在故障分析中一般可以忽略不计。对于重复事件由表2可知机床切削过

载和同步带表面有油所引起的故障属于Ⅲ类故障;轴承预紧力小或轴承研伤(拉毛)和轴承拉毛(研伤)或损坏所引起的故障属于Ⅱ类故障;主轴与电机之间传动不平衡所引起的故障属于Ⅲ类故障。同时对照表2知误操作引起的主轴变形是Ⅰ类故障,属于人为因素且故障率极小,通过对操作人员培训等方式可以避免,无需进一步分析。

根据以上分析得出最重要的最小割集是轴承预紧力小或轴承研伤(拉毛)和轴承拉毛(研伤)或损坏,由此知前后轴承是系统的薄弱环节。因此,为预防主传动系统故障、提高系统可靠性,建议将前后轴承作为维护和维修主传动系统工作的重点。

4 结论

在应用FTA技术分析数控机床系统时,FHA技术的使用除了为FTA顶事件的选择提供技术与理论依据外,FHA图表分析也为FTA结果分析提供信息或数据支持,提高了FTA技术的有效性。

致谢:本文得到“甘肃省高等学校基本科研业务费专项基金(GCJ2009019)”和“兰州理工大学科研基金(BS02200903)”资助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 贾亚洲,杨兆军.数控机床可靠性国内外发展现状与技术发展策略[J].中国制造业信息化,2008(4):35-37.
- [2] 鲁芳霞,邓朝晖.数控机床的发展趋势及国内发展现状[J].工具技术,2006,40(3):44-48.
- [3] 赵太平.故障树分析法在数控车床故障诊断中的应用[J].铁道车辆工人,2006,6(6):19-22.
- [4] 迟向磊.加工中心故障树分析[J].北京机电通讯,2001,28:14-18.
- [5] 陈圣斌,周晓光.“4F”技术在直升机研制中的应用与经验教训[J].直升机技术,2008,(1):25-29.
- [6] 张福荣.数控机床主传动系统的噪声分析与控制[J].机械研究与应用,2005,18(2):39-45.
- [7] 张行军,戴怡.加工中心故障模式影响及危害性分析[J].机械制造,2007,45(11):64-65.
- [8] 邓爱民.高可靠寿命产品可靠性技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.
- [9] 韩光臣.复杂机电装备故障诊断关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2007.