

数控机床基于元动作的 FMEA 分析技术研究

李宇龙¹,张根保^{1,2},王勇勤¹,章小刚¹,冉琰^{1†}

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044;

2. 重庆文理学院 机电工程学院,重庆 402160)

摘要:目前用于机电产品的故障模式及影响分析法实施起来较为繁琐、费时且容易出错,同时该方法选取的分析对象也无法反映机电产品“运动决定功能”的特点.为解决这一问题,首先按照“功能—运动—动作”的分解思路将机电产品的功能分解为最基本的动作——元动作;其次,对元动作的性质进行分析,并探讨了将其作为机电产品故障模式及影响分析的研究对象的合理性;再次,以此为基础提出了一种适用于机电产品的元动作故障模式及影响分析法;最后,在合理性、适用性、简易性等方面对传统方法与所提方法进行了对比,凸显了本文所提方法的优势.以国内某型号的数控机床为对象进行分析,验证了所提方法的适用性和有效性,同时也提高了机电产品故障分析的准确性和效率.

关键词:故障;元动作;机床;分解

中图分类号:TG659

文献标志码:A

Research on FMEA Analysis Technology Based on Meta-action for Numerical Control Machine Tool

LI Yulong¹, ZHANG Genbao^{1,2}, WANG Yongqin¹, ZHANG Xiaogang¹, Ran Yan^{1†}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract:At present, the FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) for electromechanical products is cumbersome, time-consuming, and error-prone. The analysis objects of this method also cannot reflect the characteristics of “motion determines function” in electromechanical products. In order to address such problems, firstly, according to the decomposition idea of “function-motion-action”, the function of electromechanical products is decomposed into the most basic action (that is, meta-action); secondly, the characteristics of meta-action are analyzed, and the rationality of taking meta-action as the research object of electromechanical products FMEA is discussed; thirdly, based on those above, a M-FMEA (Meta-action Failure Mode and Effect Analysis) method for electromechanical products is proposed; finally, traditional methods and the proposed method are compared in rationality, applicability and simplicity, which highlights the advantages of the proposed method. A numerical control machine tool made in China is

* 收稿日期:2018-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705048;51575070), National Natural Science Foundation of China(51705048; 51575070); 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2016ZX04004-005), National Major Scientific and Technological Special Project for “High-grade CNC Basic Manufacturing Equipment” of China(2016ZX04004-005)

作者简介:李宇龙(1988—),男,河南周口人,重庆大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: ranyan@cqu.edu.cn

taken as an example, the applicability and effectiveness of the proposed method are verified, and the accuracy and efficiency of failure analysis for electromechanical products are also improved.

Key words: failure; meta-action; machine tool; decomposition

对机电产品进行故障模式及影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)可以有效地找出对该产品影响较大的故障模式及其造成的影响,从而有针对性地制定出相应的改进措施^[1]. 同时,对机电产品进行 FMEA 分析也是实现其可靠性水平的快速增长重要手段^[2]. 但传统的 FMEA 分析方法主要面向的是静态的电子产品,对于依靠运动实现其功能的机电产品不太适用;且在使用传统的 FMEA 法对机电产品进行分析时,工作量过大,效率低下^[3];此外,传统的 FMEA 分析对故障模式识别和故障影响推理的能力较弱^[4];同时,传统的 FMEA 分析很难预计机电产品全部潜在的故障模式,且分析过程较为繁琐、容易出错^[5]. 因此,探寻新的、更加适用于机电产品的 FMEA 方法就显得更加迫切和必要. 为此,本文提出了元动作故障模式及影响分析(Meta-action Failure Mode and Effect Analysis, M-FMEA)的概念,相比于传统的 FMEA,在使用 M-FMEA 进行故障原因追溯时,仅需分析导致该故障产生的元动作单元本身的原因,从而避免了故障原因重复搜寻现象的发生;同时,相比于常规 FMEA 过程的繁琐, M-FMEA 以元动作为分析对象,可以简化故障模式的分析过程,提升分析效率.

为得到机电产品的元动作,就必须对其进行分解. 目前,国内外学者已对机电产品分解技术做了大量研究^[6-9]. 但这些方法都是以机电产品结构或零部件体系为基础分解,面对的是静态对象,忽视了机电产品“功能和运动”的特点,故其无法反映零件之间的相互作用,而零件之间的相互作用正是机电产品不同于电子产品的主要特征所在. 为此,本文研究团队在大量研究的基础上提出了一种功能结构分解方法(Function Motion Action, FMA),并取得了一定的进展^[10-13]. 为了使得到的元动作更加准确和符合实际,本文对元动作及其相关概念和 FMA 分解法进行了进一步完善.

本文在元动作最新研究的基础上,利用 FMA 法对机床进行了分解,得出了能够反映机床动态性能的元动作. 以机床元动作为研究对象,对其进行

M-FMEA 分析,并提出了相应的改进措施. 以实例验证本文所提方法的适用性,该方法对其他类型的数控机床同样适用,为机床可靠性的后续研究打下了坚实的基础.

1 元动作分解技术

在对机电产品进行元动作分解前,需对元动作的相关概念进行定义. 元动作和元动作单元的概念最早是由重庆大学的张根保教授团队提出的^[10],有关元动作及其相关的概念目前仍处于不断完善的过程中. 这里给出有关元动作及其相关概念的最新研究成果.

1.1 元动作

对机电产品而言,其功能和性能是通过各个部件之间的运动来实现和保障的,而部件运动的实现又离不开其组成零件的动作. 在此给出元动作如下的定义.

定义 1 元动作(Meta-action, MA)为机电产品中传递运动和动力的最基本的运动形式,它是机电产品中最小的运动.

1.2 动作单元

机电产品中,任何一个单独的零件都不能自行完成一个动作,即单个零件无法完成其规定的运动.

定义 2 元动作单元(Meta-action unit, MAU)为能够保证机电产品的元动作得以正常运行的所有零件按照装配关系组成的统一整体,且元动作单元在结构上不可再分也无需再分.

由于元动作单元是结构方面的描述,故而其也被称为元动作结构单元. 由元动作单元的定义可知,每一个元动作单元都能够很好地反映出机械产品所具有的质量特性——精度、精度寿命、性能稳定性、可靠性和可用性(Precision, Accuracy-lifetime, Performance-stability, Reliability and Availability, PA-PRA). 为实现产品的元动作,元动作单元必须具有如表 1 所示中的几个基本要素.

表1 元动作单元组成要素
Tab.1 Elements of MAU

名称	定义	举例
输入件	元动作单元中,提供运动和动力或紧邻上一个元动作运动和动力输出的零件	蜗杆转动元动作单元中的伺服电机,蜗轮轴转动元动作单元中的蜗轮
中间件	元动作单元中,主要起传递运动和动力作用,且与输入件或输出件之间无相对运动的零件	蜗杆转动元动作单元中的联轴器,蜗轮轴转动元动作单元中的平键
输出件	元动作单元中,向下游元动作单元输出运动和动力的零件	蜗杆转动元动作单元中的蜗杆,蜗轮轴转动元动作单元中的蜗轮轴
紧固件	元动作单元中,起固定、防松和密封作用、或用来连接多个零件、且没有相对运动的零件	如螺栓、螺钉、销、端盖、弹簧垫片、密封圈、密封套、密封垫片等
支撑件	元动作单元中,用来安装其他零件并起支撑作用的零件	如活塞缸、套筒、机床底座和箱体等

元动作单元作为产品最基本的组成要素,其基本功能就是实现预定的运动要求并传递动力,其工作过程示意图如图1所示.

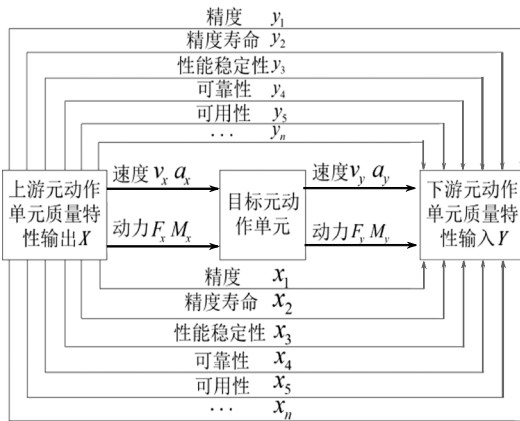


图1 元动作单元工作过程
Fig.1 Working process of MAU

1.3 元动作及元动作单元分类

由机电产品分解得到的元动作大致可以分为两大类,一类是以实现“移动”这一动作形式的移动元动作,如工作台的平移和数控转台的升降等,其概念示意图如图2所示;另一类是以实现“转动”这一运动形式的转动元动作,如蜗杆的转动和蜗轮的

转动等,其概念示意图如图3所示.不管机电产品如何复杂,其功能都可以由这两种最基本的元动作实现.

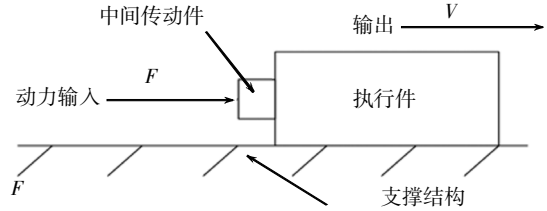


图2 移动类元动作
Fig.2 Translational MA

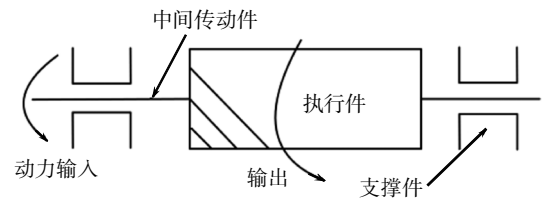


图3 转动类元动作
Fig.3 Rotational MA

相应地,机电产品的元动作单元也可以分为移动元动作单元和转动元动作单元,现以典型的移动和转动元动作单元为例,分别介绍其组成.图4为工作台移动元动作单元,螺母为其动力输入件,工作台为动力输出件,动力输入件和输出件之间依靠中间件螺钉进行力和运动的传递,动滑块依靠紧固件(螺栓)固连在工作台上,静导轨依靠紧固件(螺钉)固连在支架上,动滑块、静导轨和支架对工作台起支撑作用,共同构成了该元动作单元的支撑件.为实现一个齿轮轴转动元动作,就必须有接受动力输入的零件(齿轮)、动力输出件(齿轮轴)、中间件(键)、支撑件(轴承)和紧固件(螺钉)等,它们一起组成了齿轮轴转动元动作单元,如图5所示.

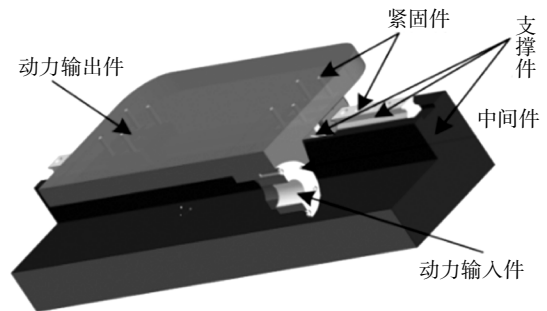


图4 工作台移动元动作单元
Fig.4 Workbench translational MAU

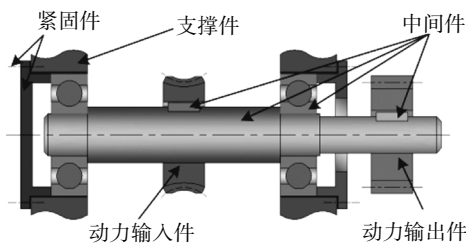


图 5 蜗轮转动元动作单元

Fig.5 Worm gear rotating MAU

1.4 元动作分解

为得到机电产品的元动作和元动作单元,笔者所在的实验室团队提出了一种结构化分解方法^[14],即 FMA 分解法。该分解法的基本思路如下:首先根据设计任务或说明书找出产品可以实现的功能,此即为产品的功能层;再根据运动传递关系,找出实现产品功能所需的部件运动,此即为运动层;最后根据部件中零件间的相对运动关系继续分解,直至找出实现部件运动的最基本的“动作”,此即为产品的元动作,从而得到动作层;以元动作为基础,从部件图上拆分出保证该“动作”得以实现的最小结构单元,即为相应的元动作单元。

根据以上分析,可得机电产品的元动作分解示意图如图 6 所示。

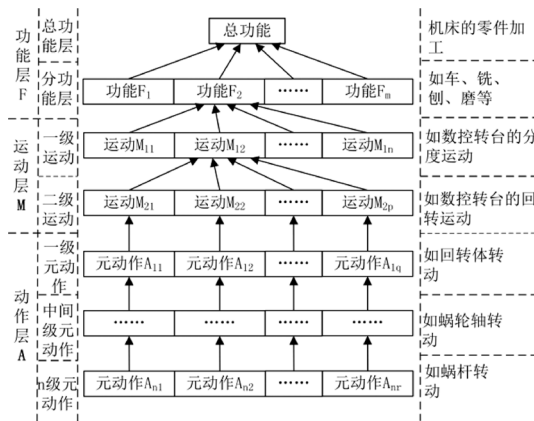


图 6 元动作 FMA 分解示意图

Fig.6 FMA decomposition diagram of MA

FMA 法可以简化机电产品的分解过程,得到的结果也更加符合实际,有利于后续的计算和分析。

2 元动作故障模式及影响分析

故障模式及影响分析是分析产品中所有潜在的故障模式及其对产品所造成的所有可能影响的一种方法^[15],但这种方法对诸如机床这类的大型复

杂机电产品来说则显得过于繁杂,且容易出错。为此本文以元动作为分析对象,提出了一种改进的基于元动作的故障模式及影响分析方法。

2.1 元动作故障及故障模式

定义 3 元动作故障 (Meta-action Fault, M-F) 为机电产品的某一元动作不能完成其规定动作的状态。

机电产品的元动作包括移动类元动作和转动类元动作,因此其故障类型也可以分为移动型元动作故障和转动型元动作故障。

GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语中将故障模式定义为:故障的表现形式^[16]。更确切地说,故障模式一般是对产品所发生的、能被观察或测量到的故障现象的规范性描述。

定义 4 元动作故障模式 (Meta-action Fault Modes, M-FM) 为元动作发生故障时,其运动状态的表现形式。

故障表现形式一般都与观察角度息息相关^[17],元动作的动作表现形式是通过元动作单元的动力输出件体现出来的,故以元动作单元的动力输出件及其故障表现形式来命名该元动作的故障模式。

2.2 M-FMEA 的优点

M-FMEA 相比于传统的 FMEA 具有以下优点:

1) 更适用于像机床这样的复杂机电产品。传统的机床 FMEA 主要以机床的单个零件为分析对象,未考虑零件之间的运动和动力传递关系,但机床功能和性能的实现是依靠其零部件之间的相互作用来实现的,元动作是保证机床正常运行的最小运动,以其为基础进行 FMEA 更具合理性。

2) 避免重复分析现象的发生。对机床进行 M-FMEA,在对故障原因进行追溯时,由元动作单元本身具有的独立性可知,仅需分析导致该故障产生的元动作单元本身的原因即可,避免了元动作故障原因重复搜寻现象的发生。

3) 分析过程化繁为简。如机床这类机电产品结构复杂,组成零件成千上万,每个零件又有很多的故障模式,常规的机床 FMEA 过程异常繁琐。机床包含的元动作单元相对较少,元动作的故障模式较为简单,故以机床元动作为对象进行 M-FMEA 分析,可以大大简化故障原因追溯的过程,提升分析效率。

2.3 M-FMEA 实施流程

借鉴传统电子产品的 FMEA 内容和流程^[17],M-FMEA 的内容及分析步骤如图 7 所示。

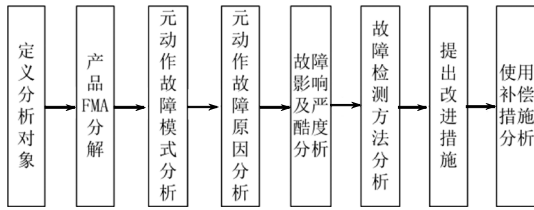


图7 机床 M-FMEA 流程

Fig.7 M-FMEA process of machine tool

根据图7,对机床 M-FMEA 流程着重分析如下.

1)元动作约定层次划分.基于 FMA 分解模型制定的有关元动作的约定层次划分规则如表2所示.

表2 M-FMEA 约定层次

Tab.2 M-FMEA indenture level

层次	定义
初始约定层次	元动作分解模型中的功能层
约定层次	元动作分解模型中的最低运动层
最低约定层次	元动作分解模型中的动作层

2)元动作故障模式及故障原因追溯.元动作的故障一般都会造成部件的运动故障,最终导致机床的 PAPRA 出现问题.可以根据元动作发生故障时表现形式的不同,对机床产品的元动作故障模式进行分类,并追溯其各自产生的故障原因.在对元动作故障原因进行追溯时,由元动作单元本身具有的独立性可知,仅需分析导致该故障产生的元动作单元本身的原因即可,大大简化了故障原因的分析过程,这也使得基于元动作的故障分析方法要优于常规的机械产品故障分析方法.

根据以上定义和分析,可以将机床产品的元动作故障模式及其产生原因归纳如表3所示.

表3 元动作故障模式及产生原因

Tab.3 Failure modes and causes of MA

故障模式	故障原因聚类	故障原因	例子
无动作	输入件驱动力丢失或驱动力供应不足	动力输入连接、控制元件故障(如线路老化、短路、过载等)	工作台不移动;托盘交换架齿条不移动;蜗杆不转动;砂轮不转动等
		电机故障(如电机过载,电机主轴卡死,电机轴承润滑不良等)	
		液压缸故障(如装配不良、液压油泄露,液压油污染等)	
	动力传递路径阻断	动力源设定动力过小(如电容量选择不足)	
		控制元件损坏(如溢流阀损坏)	
	紧固件故障	除动力源外的输入件故障(零件磨损、点蚀、疲劳或断裂等)	
		中间件故障(如联轴器损坏等)	
	紧固件损坏(如螺钉连接失效)		
	密封不良(如端盖破损)		
	零件损坏(如静导轨变形、断裂)		

续表3

故障模式	故障原因聚类	故障原因	例子
误动作	动力输入控制系统故障	伺服电机故障	砂轮架快进、快退反向;蜗杆反转等
		电路连接错误	
	电子元器件参数漂移或老化		
	检测反馈系统失灵(如圆光栅断裂,感应开关损坏等)		
自锁机构故障	程序编写错误	自锁机构损坏(如电机无法制动,联轴器不能自锁)	
	润滑不良		
动作不灵活	运动阻力过大	零件加工精度不高	滚珠丝杠转动不灵活;滑块移动不灵活等
		零件装配一致性差	
	密封性差		
驱动力不稳定	驱动件动作不灵活	传动链刚度不好(如丝杠螺母副的预紧或预拉不理想)	电主轴振动;工作台移动不平稳;齿条移动爬行;机床Z轴抖动等
		密封不良(如液压缸漏油)	
	零部件磨损、老化(如液压缸活塞磨损变形)		
	堵塞(如压力阀中阻尼孔阻塞)		
动作不平稳	传动链接故障	传动链刚度不好(如传动轴直径偏小,传动轴刚度较差等)	电主轴振动;工作台移动不平稳;齿条移动爬行;机床Z轴抖动等
		打滑(齿轮啮合、皮带打滑等)	
		动力输入不稳定(如电压不稳)	
	装配精度差	缓冲装置损坏	
		配合压力不达标(如导轨和滑块配合压力过大或过小)	
控制系故障	速度调节器故障	速度调节器故障	
	电子元器件参数漂移、老化		
	系统插补精度故障		
输出件摩擦因数不一致	系统增益等系统故障	程序代码紊乱	
	程序代码紊乱		
零件的精度及其精度保持性差	零件的精度	转轴尺寸精度、形状精度等较差	
	零件的精度保持性差	零件的精度保持性较差(如丝杠变形、导轨平行度降低等)	

续表 3

故障模式	故障原因聚类	故障原因	例子
动作不到位	动力输入件动作不准	动力源设定动力过小(如驱动活塞油压、气压设定不足)	工件台移动不到位; 托盘交换不到位; 齿条移动不到位等
		动力源输入动力过小(如电压或电流不足)	
		打滑(齿轮、轴或皮带打滑等)	
		零件精度下降(如齿轮轮齿变形)	
	装配精度、精度保持性差	传递链零件装配精度不达标	
		零件装配不到位	
	输出件过载	零件配合松动	
		输出件设计承受载荷过小	
	控制系统故障	输出件超载工作	
		控制器损坏	
电子元器件参数漂移、老化			
检测反馈系统失灵			
动作超程	零件损坏	位置检测装置故障(如光栅损坏)	
		程序编写错误	
	控制系统故障	运动未按程序指令执行	
回零不准	控制系统故障	限位开关和挡块损坏	
		回零开关位置不合理或松动	
		回零开关损坏	
		回零开关接触不良	
	驱动件动作不准	接近开关故障	
		行程挡块松动	
		编码器松动或失灵	
动作过快/过慢(匀速运行)	输入件驱动动力变化	回零参数错误	
		传动链刚度不好(如传动轴直径偏小且存在反向间隙)	
	控制系统发生故障	输入件故障(如电机线路短路, 液压缸油压过大或过小)	
		动力源设定动力过大或过小(如电机电压设定过大或过小)	
		控制元件损坏	
输出件摩擦阻力变化	检测反馈系统失灵		
	程序编写错误		

续表 3

故障模式	故障原因聚类	故障原因	例子
动作制动失灵	制动装置动力不足	动力源设定动力过小(如电动机容量选择过小)	主轴无法停止转动或停转困难; 修整轮停止时长时间空转
		动力输入过小(如电压不足)	
	制动件损坏	制动零件断裂	
		制动装置摩擦阻力变小	
控制系统发生故障	制动片与制动鼓之间的摩擦力变小, 从而导致制动失灵		
	控制器连接线路故障		
动作定向不准	零件精度、精度保持性差	控制器元器件损坏	
		零件的尺寸精度、形状精度较差	
	装配精度差	疲劳、磨损、腐蚀、点蚀、老化等造成零件的精度保持性较差	
		零件装配不到位	
控制系统发生故障	编码器松动或失灵		
	检测反馈系统失灵		

3)元动作故障影响是指元动作的每一个故障模式对其自身所在的约定层次(自身和其紧邻的下一个元动作)以及产品功能的影响. 据此, 可将 M-FMEA 约定层次的故障影响划分为局部影响和最终影响, 其划分规则如表 4 所示.

表 4 按 M-FMEA 约定层次划分影响分级表

名称	定义
局部影响	元动作故障对自身及其下游元动作造成的影响
最终影响	某元动作的故障模式对产品功能造成的影响

4)元动作严酷度. 在对元动作故障严酷度 S 进行分析时, 按照元动作故障模式最终影响的严重程度来确定其严酷度, 其严酷度等级的定义如表 5 所示.

表 5 元动作故障严酷度等级定义表

等级	定义
I	产品整体功能丧失且修复无效
II	产品整体功能大幅降低, 但经过大修后能够恢复正常
III	产品整体功能降低幅度较小, 经一般性修理后能够恢复正常
IV	产品整体功能小幅降低, 简单修理后即可恢复正常

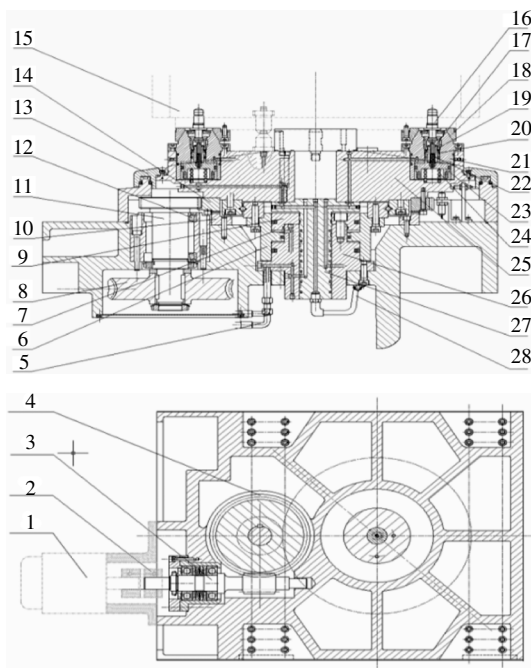
5)元动作故障模式检测方法.为了准确确定机电产品元动作某一具体的“动作”失效形式而采取的各种观测、监测或检测方法即为元动作故障模式检测方法.元动作故障模式确定方法一般有如下两种:目测法,主要用于确定一些“动作”失效形式比较明显的元动作故障,如无动作和动作不灵活等;仪器监测法,主要用于确定一些“动作”失效形式不太明显、且无法目测的元动作故障,如运动不平稳、速度不均匀等.此外,对于一些暂无检测方法的元动作故障,也应当在元动作 FMEA 表中予以说明.

3 应用

以国内某型号数控机床的不连续分度数控转台为例,进行 FMA 分解和 M-FMEA 分析.

3.1 元动作分解

数控转台的结构示意图如图 8 所示.



1-电机;2-联轴器;3-蜗杆;4-蜗轮;5-锁紧油路;6-托架;7-升降油缸;8-蜗轮;9-活塞;10-下齿盘;11-齿轮轴;12-齿轮轴轴承;13-密封罩壳;14-上齿盘;15-托板;16-顶杆螺钉;17-顶杆;18-母锥;19-拉爪;20-拉钉;21-公锥;22-小弹簧;23-活塞;24-大弹簧;25-回转体;26-活塞;27-心轴;28-升降油路

图 8 数控转台结构图

Fig.8 Structure diagram of numerical control turntable

数控转台运动是由转台分度运动、拉爪松紧运动和顶杆升降运动 3 个运动组成的,其中转台分度运动是由以下动作实现的:首先,转台在液压缸的带动下完成升降移动;其次,伺服电机通过联轴器带动蜗杆转动;再次,蜗杆通过啮合带动蜗轮旋转,蜗轮通过平键带动齿轮轴转动;最后,齿轮轴通过啮合带动上齿盘转动,上齿盘与回转体固连,进而实现数控转台的回转运动.当数控转台旋转到制定的位置后,拉爪就会在油压的作用下向下移动或在大弹簧的作用下向上移动,从而实现拉爪的松紧运动.拉爪松紧运动结束后,顶杆就会在小弹簧的作用下上升或在重物压力的作用下下降,完成其规定的升降运动.

根据数控转台的运行原理,其 FMA 分解树可表示为图 9 所示.

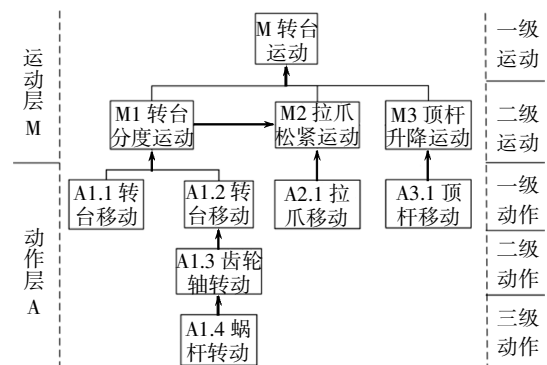


图 9 数控转台元动作分解树

Fig.9 MA decomposition tree for numerical control turntable

图 9 中的横向箭头表示 2 个运动的发生有时序上的先后顺序,竖向箭头表示 2 个运动或动作之间有运动和动力的驱动关系.因本文是以数控转台为例进行的 FMA 分解,没有涉及到机床的功能层,故 FMA 分解树的顶端是以运动层开始的.

3.2 元动作故障模式及影响分析

1)划分约定层次.本文的初始约定层次为机床的磨削功能,约定层次为转台分度运动、拉爪松紧运动和顶杆升降运动,最低约定层次为转台移动、蜗杆转动、齿轮轴转动、转台转动、拉爪移动和顶杆移动.

2)根据对数控转台的功能与结构分析,填写 M-FMEA 表如表 6 所示.

表 6 数控转台 M-FMEA 表
Tab.6 M-FMEA analysis table of numerical control turntable

元动作	运动形式	故障模式	故障原因	故障影响		严酷度	检测方法	改进措施
				局部	最终			
回转体移动	移动	回转体移动无动作	驱动活塞油压设定过小	数控转台无法升降	无法磨削零件	Ⅲ	观测	重新设定活塞油压;严控活塞入厂质量;改进装配工艺和密封结构;规范工人操作;保持良好的工作环境
			驱动活塞损坏					
			上端齿盘卡死					
		回转体误动	连接螺钉断裂	数控转台误动	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	观测	严格控制传感器的入厂质量、细化装配工艺、严控传感器的工作环境
			异物进入					
		回转体移动不灵活	传感器故障	数控转台移动不灵活	影响零件加工	Ⅲ	观测	改进密封结构;改进装配工艺;合理选择外购件供应商
			异物进入					
		回转体移动不平稳	活塞变形	数控转台出现振动	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	观测	增加油路稳压设备;改进密封结构;增加螺钉防松措施;改进装配工艺;加强装配工人的培训力度
			零件装配一致性差					
		回转体移动过快/过慢(匀速)	活塞油压出现波动	数控转台移动速度过快/过慢	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	重新设定油压;改进装配工艺;改进润滑方式或更换润滑剂;提高接触处密封性
连接螺钉松动								
回转体移动不到位	异物进入	数控转台移动不到位	无法磨削零件	Ⅲ	观测	重新设定活塞油压;改进密封结构		
	零件装配不良							
蜗杆转动	转动	蜗杆转动无动作	驱动活塞油压设定偏大/偏小	蜗杆、齿轮轴转动无动作	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	重新设定油压;改进装配工艺;改进润滑方式或更换润滑剂;提高接触处密封性
			蜗杆运行阻力发生变化					
			驱动活塞油压设定过小					
			异物进入					
		蜗杆误转动	联轴器断裂	蜗杆、齿轮轴误动	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	增加稳压设备;合理选择电机,并严控其入厂质量
			伺服电机故障					
		蜗杆转动不灵活	连接螺栓断裂	蜗杆、齿轮轴转动不灵活	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	更换润滑方式或润滑油;改进密封结构;改进轴承装配工艺;改进或增加螺母防松装置;严控轴套和蜗杆的入厂质量;规范操作工的操作流程;严格控制车间温度、湿度和粉尘等
			轴承卡死					
			蜗杆齿根断裂					
		蜗杆转动不平稳	异物进入	蜗杆、齿轮轴转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机的入厂质量;增加稳压、稳流设备;改进螺栓防松结构;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高装配质量;重新设计装配工艺
润滑不良								
进入异物								
轴承装配不良								
蜗杆转动不平稳	衬套破损	蜗杆、蜗齿轮轴转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机的入厂质量;增加稳压、稳流设备;改进螺栓防松结构;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高装配质量;重新设计装配工艺		
	蜗杆变形							
	齿面点蚀、胶合或磨损							
	蜗杆轮齿断裂							
蜗杆转动不平稳	伺服电机故障	蜗杆、蜗齿轮轴转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机的入厂质量;增加稳压、稳流设备;改进螺栓防松结构;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高装配质量;重新设计装配工艺		
	连接螺栓松动							
	异物进入							
	润滑不良							
蜗杆转动不平稳	轴承装配不良	蜗杆、蜗齿轮轴转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机的入厂质量;增加稳压、稳流设备;改进螺栓防松结构;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高装配质量;重新设计装配工艺		
	轴承装配精度保持性差							
蜗杆转动不平稳	齿面点蚀、胶合或磨损	蜗杆、蜗齿轮轴转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机的入厂质量;增加稳压、稳流设备;改进螺栓防松结构;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高装配质量;重新设计装配工艺		
	齿面点蚀、胶合或磨损							

续表 6

元动作	运动形式	故障模式	故障原因	故障影响		严酷度	检测方法	改进措施
				局部	最终			
蜗杆转动	转动	蜗杆转动过快/过慢(匀速)	伺服电机故障 异物进入 润滑不良 齿面点蚀、胶合或磨损	蜗杆、齿轮轴转动过快/过慢	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	合理选择伺服电机型号;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;控制车间环境、保持转台使用清洁度
		蜗杆转动不到位/超程	伺服电机转动不到位/超程	蜗杆、齿轮轴转动不到位/超程	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	提高电机入厂质量;及时更换问题较多的供应商;增加稳压、稳流设备
齿轮轴转动	转动	齿轮轴转动无动作	蜗轮发生断齿 齿轮轴发生断齿 连接键损坏 轴承卡死 蜗轮齿啮合处进入异物 齿轮轴齿啮合处进入异物	齿轮轴、回转体转动无动作	无法磨削零件	Ⅲ	仪器检测	提高外购件入厂质量;提高轴承装配质量;改进密封结构;保持工作环境的清洁度
		齿轮轴转动误转动	蜗轮发生误动	齿轮轴、回转体出现误动	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高伺服电机质量;增加稳压、稳流设备;加强操作人员规范操作
		齿轮轴转动不灵活	润滑不良 蜗轮齿面点蚀、胶合或磨损 齿轮轴齿面点蚀、胶合或磨损 蜗轮齿断裂 齿轮轴齿断裂 连接键损坏 轴承装配不良 蜗轮齿断裂 齿轮轴发生断齿	齿轮轴、回转体转动不灵活	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	更换润滑方式或润滑油;改进密封结构;保持转台工作的清洁度;提高外购件(蜗轮和齿轮轴等)的入厂质量;选用高强度的连接键;提高轴承装配质量;改进装配工艺
		齿轮轴转动不平稳	蜗轮齿啮合处进入异物 齿轮轴齿啮合处进入异物 连接键损坏 轴承润滑不良 轴承装配不良 螺钉松动 螺钉断裂 圆螺母松动	齿轮轴、回转体转动不平稳	影响零件加工,严重时损坏转台	Ⅱ	仪器检测	提高蜗轮及齿轮轴的入厂质量;加大外购件入厂检验力度;及时更换问题较多的外购件供应商;改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;选用高强度的连接键;提高轴承装配质量;改进螺钉、螺母防松结构
		齿轮轴转动过快/过慢(匀速)	蜗轮转动过快/过慢(匀速) 异物进入 润滑不良 齿面点蚀、胶合或磨损	齿轮轴、回转体转动过快/过慢(匀速)	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	改进密封结构;更换润滑方式或润滑油;提高外购件质量
		齿轮轴转动不到位/超程	润滑不良 轴承装配不良 螺母松动 蜗轮转动不到位/超程	齿轮轴、回转体转动不到位/超程	影响零件加工	Ⅲ	仪器检测	更换润滑方式或润滑油;提高轴承装配质量;增加稳压稳流设备;增加螺母防松设计;提高伺服电机质量

续表 6

元动作	运动形式	故障模式	故障原因	故障影响		严酷度	检测方法	改进措施	
				局部	最终				
回转体转动	转动	上端齿盘无动作						及时检查上一个元动作动力输出件; 更换上端齿盘和螺钉; 改进大轴承装配工艺; 定期检查大轴承和上端齿盘使用情况	
		回转体转动无动作	上端齿盘轮齿断裂	数控转台无动作	无法磨削零件	III	观测		
			上端齿盘卡死						
			大轴承卡死						
			螺钉断裂						
			回转体误转动	上端齿盘发生误动	数控转台出现误动	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	提高伺服电机入厂质量; 增加稳压、稳流设备; 加强工人规范操作培训
				上端齿盘轮齿断裂					加大端齿盘入厂检验力度; 改进密封结构; 更换润滑方式或润滑油; 提高轴承装配质量; 改进装配工艺
			回转体转动不灵活	进入异物	数控转台转动不灵活	影响零件加工	III	观测	
				大轴承润滑不良					
				大轴承装配不良					
				上端齿盘轮齿断裂					加大端齿盘入厂检验力度; 规范工人操作流程; 增加螺钉防松装置; 换润滑方式或润滑油; 提高轴承装配质量; 改进密封结构; 控制工作环境清洁度
			回转体转动不平稳	螺钉松动	数控转台转动不灵活	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	
				上端齿盘齿面点蚀、磨损					加大端齿盘入厂检验力度; 增加稳压、稳流设备; 改进密封结构; 更换润滑方式或润滑油; 保持车间工作环境和加工部位的清洁度
				大轴承润滑不良					
				大轴承装配不良					
		进入异物							
	回转体转动过快/过慢(匀速)	上端齿盘转动过快/慢(匀速)	数控转台转动过快/过慢(匀速)	影响零件加工	III	仪器检测			
		进入异物							
		润滑不良							
		齿面点蚀、胶合或磨损							
	回转体转动不到位/超程	上端齿盘转动不到位/超程	数控转台转动不到位/超程	影响零件加工	III	观测	改进密封结构; 更换润滑方式或润滑油; 改进装配结构; 提高轴承装配质量		
		进入异物							
		大轴承润滑不良							
		大轴承装配不良							
拉爪移动	移动	驱动活塞油压设定过小						重新设定活塞油压; 改进密封结构; 加大外购件如活塞、拉钉、弹簧、密封圈和拉爪等的入厂检验力度; 改进装配工艺	
		驱动活塞卡死							
		拉爪移动无动作	活塞螺纹损坏	拉爪松紧无动作	无法磨削零件	III	观测		
			拉钉螺纹损坏						
			拉爪折断						
			小弹簧断裂						
			密封圈破裂						
			拉爪误动	传感器故障	拉爪误动	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	提高传感器的入厂质量; 合理布局线路; 提高工作环境; 规范工人操作
				异物进入					改进密封结构; 增加稳压设备; 改进装配工艺; 加强装配工培训
			拉爪移动不灵活	活塞变形	拉爪移动不灵活	影响零件加工	III	观测	
		零件装配一致性差							

续表 6

元动作	运动形式	故障模式	故障原因	故障影响		严酷度	检测方法	改进措施		
				局部	最终					
拉爪移动	移动		活塞油压出现波动							
			活塞螺纹连接松动							
		拉爪移动不平稳	拉爪断裂 小弹簧断裂 密封圈破裂 润滑不良 异物进入	拉爪移动不平稳	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	严格控制外购件(拉爪、弹簧和密封圈等)的入厂质量; 改进活塞与拉钉连接方式; 改进密封结构; 改进装配工艺; 更换润滑方式或润滑油		
		拉爪移动过快/过慢(匀速)	驱动活塞油压设定偏大/偏小 进入异物 润滑不良	拉爪移动速度过快/过慢	影响零件加工	III	仪器检测	重新设定油压; 改进密封结构; 更换润滑方式、润滑油		
		拉爪移动不到位	驱动活塞油压设定过小 异物进入	拉爪移动不到位	无法磨削零件	III	观测	重新设定活塞油压; 改进密封结构; 保持车间清洁度		

		顶杆移动	移动		小弹簧损坏					
				顶杆移动无动作	进入异物 毛毡损坏 拉钉变形	顶杆无法升降	无法磨削零件	III	观测	加大外购件入厂检验力度; 改进密封结构; 提高装配质量
				顶杆误动	活塞出现误动现象 弹簧突然损坏	顶杆误动	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	增加稳压设备; 规范工人操作流程; 提高弹簧入厂质量
				顶杆移动不灵活	异物进入 拉钉变形 毛毡破损 零件装配一致性差	顶杆运动不灵活	影响零件加工	III	观测	改进密封结构; 提高外购件入厂质量; 提高零部件的装配质量; 加强工人装配规范培训; 加大装配检验力度
顶杆移动不平稳	弹簧发生断裂 拉钉变形 顶杆变形 进入异物 毛毡破裂 零件装配不良			顶杆运动不平稳	影响零件加工, 严重时损坏转台	II	观测	加大外购件入厂检验力度; 改进密封结构; 提高零部件的装配质量		
顶杆移动过快/过慢	弹簧选型不当 进入异物			顶杆运动过快/过慢	影响零件加工	III	仪器检测	重新选择合适的弹簧; 改进密封结构; 严控工作环境		
顶杆移动不到位/超程	弹簧选型不当 进入异物 拉钉变形 顶杆变形 零件装配不良			顶杆移动不到位	无法磨削零件	III	观测	重新选择合适的弹簧; 改进密封结构; 提高外购件质量; 提高零部件的装配质量; 改进装配工艺		

4 结 论

1)针对现有机床产品分解方法无法反映零件之间的相互作用这一缺陷,给出了有关元动作和元动作单元的最新研究成果,并以此对机床进行了分解,证明了该方法的适用性。

2)针对使用传统的借鉴于电子产品的 FMEA 分析法对机床产品分析时工作量过大、效率低下、故障原因探寻容易出错等现象,提出了基于元动作的 M-FMEA 分析法,降低了机床产品故障分析的工作量,提高了分析效率,同时避免了故障原因重复分析现象的发生,使得分析结果更加准确。

3)基于元动作的 FMA 分解法和 M-FMEA 分析法为如数控机床这类大型复杂机电产品的分解和故障分析提供了新思路,完善了现有机械产品分解方法和故障分析方法体系,为产品可靠性提高打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 姚灿江,魏领会,王海龙.基于 FTA 和 FMEA 的 RV 减速器可靠性分析[J].现代制造工程,2018(1):136—140.
YAO C J,WEI L H,WANG H L. Reliability analysis of RV reducer on FTA and FMEA [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018 (1): 136—140. (In Chinese)
- [2] 孙曙光,申桂香,张英芝,等.基于 ISM 与 FMECA 的加工中心故障分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(8):47—52.
SUN S G,SHEN G X,ZHANG Y Z,*et al.* Failure analysis of machining center based on ISM and FMECA [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015,42(8):47—52. (In Chinese)
- [3] 杨培林,候翌,徐凯,等.利用形式化方法的机电系统概率失效模式及影响分析[J].西安交通大学学报,2018,52(1):1—7.
YANG P L,HOU Y,XU K,*et al.* Probabilistic failure modes and effects analysis for electromechanical systems based on formal method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018,52(1):1—7. (In Chinese)
- [4] 冯辅周,罗建华,刘远宏,等.基于系统功能-结构-故障模型的 FMEA 分析方法[J].振动、测试与诊断,2016,36(3):413—418.
FENG F Z,LUO J H,LIU Y H,*et al.* A FMEA analysis method based on function-structure-failure model [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016,36(3):413—418. (In Chinese)
- [5] 杨培林,徐凯,薛冲冲,等.基于模型检测的机电系统 FMEA 研究[J].机械工程学报,2016,52(16):162—168.
YANG P L,XU K,XUE C C,*et al.* Study on FMEA for electromechanical systems based on model checking [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(16):162—168. (In Chinese)
- [6] EPPINGER S D,WHITNEY D E,SMITH R P,*et al.* Organizing the tasks in complex design projects [C]// Proceedings of the Conference on Design Theory and Methodology. New York:ASME, 1990,27:39—46.
- [7] 王永,刘继红.面向协同装配规划的装配单元规划方法[J].机械工程学报,2009,45(10):172—179.
WANG Y,LIU J H. Assembly unit partitioning for collaborative assembly planning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45 (10):172—179. (In Chinese)
- [8] STONE R B,WOOD K L,CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures [J]. Design Studies, 2000,21(1):5—31.
- [9] 杨育,李云云,李斐,等.产品协同创新设计任务分解及资源分配[J].重庆大学学报,2014,37(1):31—38.
YANG Y,LI Y Y,LI F,*et al.* Task decomposition and resources allocation of product collaboration innovative design [J]. Journal of Chongqing University, 2014,37(1):31—38. (In Chinese)
- [10] 张恒.基于元动作的数控机床可靠性分析与控制的研究[D].重庆:重庆大学机械工程学院,2012:33—38.
ZHANG H. Research of reliability analysis and control technology of CN machine based on element action[D]. Chongqing:College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2012:33—38. (In Chinese)
- [11] 李冬英,李梦奇,张根保,等.元动作装配单元误差源及误差传递模型研究[J].机械工程学报,2015,51(17):146—155.
LI D Y,LI M Q,ZHANG G B,*et al.* Mechanism analysis of deviation sourcing and propagation for meta-action assembly unit [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51 (17):146—155. (In Chinese)
- [12] LI D Y,ZHANG G B,LI M,*et al.* Assembly reliability modeling technology based on meta-action[C]// Procedia CIRP. Hangzhou: Zhejiang University, 2015, 27:207—215.
- [13] 冉琰.机电产品元动作单元建模及关键质量特性预测控制技术研究[D].重庆:重庆大学机械工程学院,2016:2—4.
RAN Y. Research on meta-action unit modeling and key QCs predictive control technology of electro mechanical products [D]. Chongqing:College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2016:2—4. (In Chinese)
- [14] 张根保,张恒,范秀君,等.数控机床基于 FMA 的功能分解与可靠性分析[J].机械科学与技术,2012,31(4):528—533.
ZHANG G B,ZHANG H,FAN X J,*et al.* Function decomposition and reliability analysis of CNC machine using Function-Motion-Action [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012,31(4):528—533. (In Chinese)
- [15] 李良巧.可靠性工程师手册[M].北京:中国人民大学出版社,2012:68—69.
LI L Q. Reliability engineer handbook [M]. Beijing:China Renmin University Press, 2012:68—69. (In Chinese)
- [16] GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语[S].北京:总装备部军标出版发行部,2005:6.
GJB 451A—2005 Reliability, maintainability and supportability terms [S]. Beijing:General Armament Department Military Standard Publishing Department, 2005:6. (In Chinese)
- [17] XU X W,NEWMAN S T. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies [J]. Computers in Industry, 2006,57(2):141—152.