

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.09.006

自动化立体料库机械传动系统 FMEA 分析

毕温海¹, 贾志新¹, 严 伟², 潘心伟²

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;
2. 扬州恒佳自动化设备有限公司, 江苏 扬州 225129)

摘要:为了解决自动化立体料库在钣金自动化生产线中的可靠性问题,采用维护感知设计环境(MADe, maintenance aware design environment)对自动化立体料库机械传动系统进行了故障模式与影响分析(FMEA, failure modes and effects analysis)。通过标准化分类法,定义其机械传动系统的功能和故障,建立起机械传动系统模型;利用模糊认知图(FCM, fuzzy cognitive map)分析各故障的传播路径和影响,生成机械传动系统的 FMEA 结果。结果表明,主要故障机理为磨损、腐蚀和变形,主要故障原因为润滑不足、污染物的进入和载荷问题。由此提出一系列针对性的改进措施,提高了自动化立体料库的可靠性。

关键词:立体料库;机械传动系统;维护感知设计环境;故障模式和影响分析;模糊认知图

中图分类号:TH132.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2019)09-044-11

FMEA analysis of mechanical drive system of automatic three-dimensional material warehouse

BI Wenhai¹, JIA Zhixin¹, YAN Wei², PAN Xinwei²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China;
2. Yangzhou Henga Automation Equipment Co., Ltd., Yangzhou 225129, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: To solve the reliability problem of automatic three-dimensional material warehouse in sheet metal automatic production line, failure modes and effects analysis(FMEA)of mechanical drive system of material warehouse was carried out using maintenance aware design environment (MADe). The functions and failures of mechanical drive system were defined through standardized classification, and the model of mechanical drive system was established. The propagation path and influence of each failure were analyzed using fuzzy cognitive map (FCM) to generate the FMEA result of mechanical drive system. The results show that the main failure mechanisms are wear, corrosion and deformation, and the main failure causes are insufficient lubrication, pollutant entry and load problems. Thus, a series of targeted improvement measures are put forward to improve the reliability of the automatic three-dimensional material warehouse.

收稿日期:2019-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775036)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51775036).

作者简介:毕温海(1994—),男,北京科技大学硕士研究生,主要从事可靠性工程研究。

通信作者:贾志新,男,北京科技大学教授,主要从事可靠性工程、先进制造技术数字化模拟仿真、特种加工技术等研究,
(E-mail)jiazhixin1997@163.com。

Keywords: three-dimensional material warehouse; mechanical drive system; maintenance aware design environment; failure modes and effects analysis; fuzzy cognitive map

自动化立体料库作为钣金自动化生产线的物料中心,为各加工中心储存和运送板料。自动化立体料库一旦发生故障不仅会对生产线上其他设备产生影响,而且还会增加生产损失成本和维修成本。机械传动系统作为自动化立体料库的重要组成系统,在实际生产过程中,故障率较高,可靠性低。因此对自动化立体料库机械传动系统进行可靠性分析至关重要。

故障模式与影响分析(FMEA, failure modes and effects analysis)是目前产品开发过程中主要的可靠性分析技术。它采用故障逻辑传输的思想,识别潜在的故障模式、故障原因及其对系统性能的影响,然后由工程师提出针对性的改进措施,以此来提高系统的可靠性。该技术在航空航天^[1-2]、机床^[3-4]、电力^[5]、汽车^[6]和机器人^[7]等领域均有广泛应用,并获得了较好应用效果。但是目前的 FMEA 仅以文档和表格的形式来完成,不能形成直观的故障逻辑过程,故障影响关系混乱。故障分析过于依赖工程师的经验,造成故障信息的错判或遗漏,重复使用性差^[8-9]。所以文中结合自动化立体料库的结构、功能和故障信息,采用维护感知设计环境(MADe, maintenance aware design environment)中标准化分类法定义系统的功能和故障,减少工程师主观经验的影响。利用模糊认知图(FCM, fuzzy cognitive map)分析相关故障的传播路径和影响,避免故障影响关系的混乱。最终形成标准化 FMEA 结果,并由此提出改进措施,为自动化立体料库可靠性的增长提供依据。

1 MADe 原理与方法

MADe 是基于模型的复杂系统设计、可靠性、维修性及诊断开发的集成工具,适用于可靠性分析、测试性评估与诊断分析等^[10],其有效性在电子产品^[11]、液压^[12]、燃油供给^[13]、民用飞机^[14]等领域得到了验证。

在 MADe 中,使用标准化分类法定义了功能和故障^[10],使得不同专业背景的工程师在故障分析时使用一致的术语进行分析,减少了主观经验对分析结果的影响。为了标准化,功能被定义成“功能动词+流名词”的表示形式。将系统或部件的功能看作是输入流和输出流之间的关系,当输入转换为输出时,显示出特定的功能。功能动词分为分支、导向、连接、转换、控制、供应、信号、停止和支持九大类。流名词则是系统或部件的输入和输出对象,分为物质流、能量流和信号流三大类^[15]。系统或部件的功能模型如图 1 所示。

MADe 中系统建模是分级的,分为系统级、子系统级、部件级和零件级。在相关级别上,通过定义故障原因、机理和模式来确定故障因果关系图(图 2)。其中故障原因、机理和模式的定义如表 1 所示,它们都有标准化的分类列表,在很大程度上覆盖了工程设计活动。

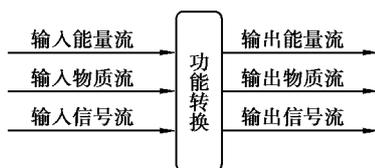


图 1 系统或部件的功能模型

Fig. 1 Functional model of systems or components

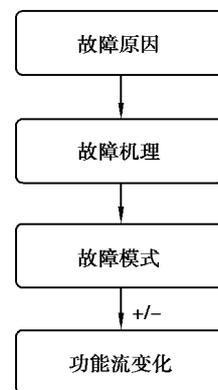


图 2 故障因果关系图

Fig. 2 Fault causality diagram

表 1 MADe 中的故障概念^[16]
Table 1 Failure concepts in MADe

概念	定义	MADe 建模方法
故障原因	造成组成单元退化的输入、装配或环境的异常状态	使用标准化的故障原因分类列表在“故障因果关系图”中建模
故障机理	退化的物理过程	使用标准化的故障机理分类列表在“故障因果关系图”中建模
故障模式	组成单元不能实现其功能的表现形式	使用标准化的故障模式分类列表在“故障因果关系图”中建模

模糊认知图是一种系统分析方法,借助图论知识和矩阵工具,将系统间的复杂影响关系转化为可视化的结构模型,从而对复杂系统内元素间的相依关系作出定量分析。文中利用该方法进行故障传播路径的仿真,进而得到各部件间的故障影响关系。

FCM 是一个 4 元组 (C, E, X, f) ,用 G 表示,其结构示意图如图 3 所示。

式中: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 是构成有向图的节点概念集合。 C 在文中是系统部件的输出流属性。

$E: (C_i, C_j) \rightarrow w_{ij}$ 是一映射, $w_{ij} \in E, C_i, C_j \in C$, 用 w_{ij} 表示 C_i 与 C_j 之间的因果影响程度, 则 $E(C \times C) = (w_{ij})_{n \times n}$ 是该有向图的邻接矩阵。在文中, w_{ij} 是系统部件内部的极性关系强度和故障因果关系强度。“+”表示 w_{ij} 的取值为 1, “-”表示 w_{ij} 的取值为 -1。

$X: C_i \rightarrow x_i$ 是一映射, $x_i(t)$ 表示节点 C_i 在 t 时刻的状态, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 表示 G 在 t 时刻的状态, 则

$$x_i(t+1) = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij} x_j(t)\right) \tag{1}$$

FCM 为动态系统, 随时间的推移可以得到特定的固定状态(固定点或极限环)。

f : 变换函数, 其作用是将输出变换到 $[0, 1]$, 选择不同的变换函数可以得到不同的输出。研究使用三值变换函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0.5, \\ 0, & -0.5 < x < 0.5, \\ -1, & x \leq -0.5. \end{cases} \tag{2}$$

图 3 中有 4 个概念节点 C_1, C_2, C_3, C_4 , 定义节点向量 $X_1 = (C_1, C_2, C_3, C_4)$, 每个节点的初始值为 0。它的邻接矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \circ$$

假设节点 C_1 增大, 即 C_1 值由 0 变成 1, 系统输入节点向量 $X_1 = (1, 0, 0, 0)$ 。

$$X_1 * E = [0, 1, 0, -1], X_2 = f(X_1 * E) = [f(0), f(1), f(0), f(-1)] = [0, 1, 0, -1],$$

$$X_2 * E = [0, 0, -2, 0], X_3 = f(X_2 * E) = [f(0), f(0), f(-2), f(0)] = [0, 0, -1, 0],$$

$$X_3 * E = [1, 0, 0, 0], X_4 = f(X_3 * E) = [f(1), f(0), f(0), f(0)] = [1, 0, 0, 0] = X_1.$$

由计算可得, X_1 是图 3 所示 FCM 动态系统中的极限环。当 C_1 增大时, C_2 增大, C_3 和 C_4 减小。MADe 利用 FCM 这一特性, 某一组成单元的输出流

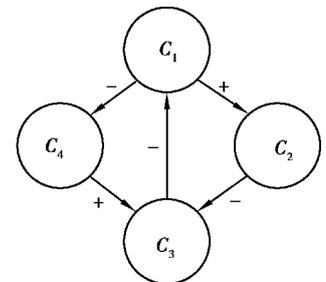


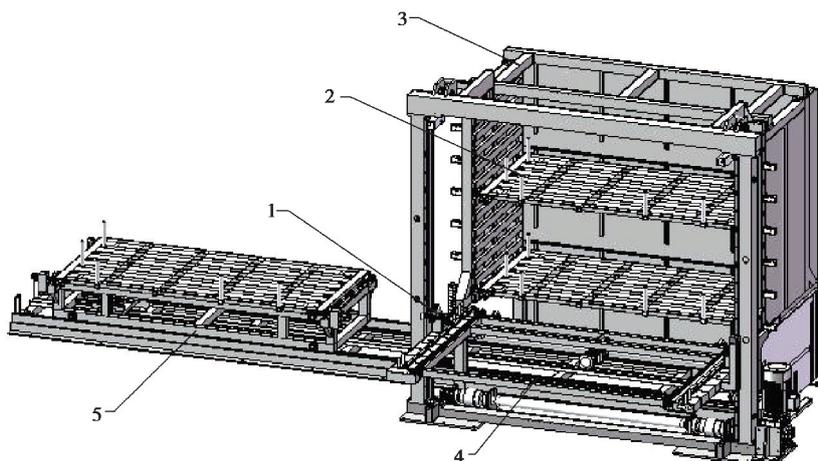
图 3 FCM 的结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of FCM structure

属性变化,引起其他响应组成单元输出流属性的变化,从而自动生成 FMEA 结果中的故障影响。

2 自动化立体料库的任务和工作原理

自动化立体料库作为钣金自动化生产线上的物料中心,它的任务是实现钣金生产线上板料的自动化存取。它不仅能存储原材料,还能存储半成品和成品,减少了占地面积,缩短了板料搬运行程,提高了加工能力。

自动化立体料库主要由固定货架、垂直升降装置、水平进出装置、托料小车及电气控制系统组成,如图 4 所示。其工作原理:以电气控制系统为基础,操作人员通过垂直升降装置将水平进出装置移动到目标层,水平进出装置将目标层中的托料小车拖出,然后垂直下降到指定位置,再将托料小车水平移动到输送装置上,为各加工中心提供原料。加工完成的成品或半成品通过相反的控制动作被放入目标层中。



注:1.垂直升降装置;2.托料小车;3.固定货架;4.水平进出装置;5.输送装置

图 4 自动化立体料库结构原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of the automatic three-dimensional material warehouse

3 系统模型的建立

MADe 提供的 FMEA 是基于模型的 FMEA,它的特点是:①功能/故障的标准化分类使分析结果更加客观;②模糊认知图仿真自动生成准确的故障影响关系;③功能框图、故障因果关系图使故障逻辑关系清晰直观。系统模型的建立流程如图 5 所示。

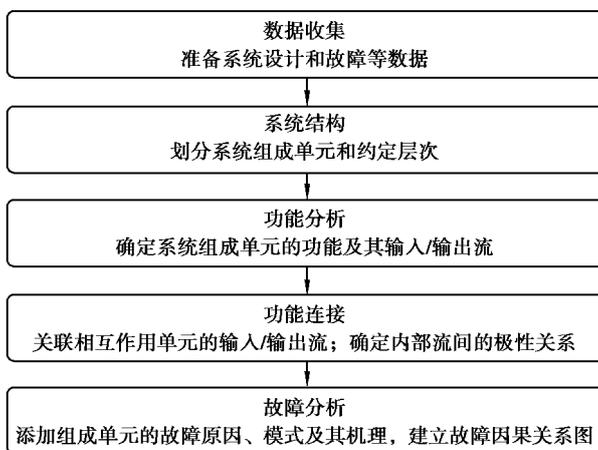


图 5 系统模型的建立流程

Fig. 5 Establishment process of system model

3.1 系统结构

在进行 FMEA 时,应该先明确分析对象,即约定层次。约定层次划分为初始约定层次和最低约定层次。初始约定层次指的是总的、完整的产品所在约定层次的最高层次,是 FMEA 最终的影响对象。最低约定层次是约定层次的最底层,决定了分析工作的深入、细致程度,同时也决定了分析的工作量^[17]。根据系统组成的复杂程度和维修单元,确定初始约定层次为机械传动系统,最低约定层次为部件级。自动化立体料库机械传动系统包括垂直升降装置、水平进出装置和托料小车。立体料库机械传动系统的结构层次划分如图 6 所示。

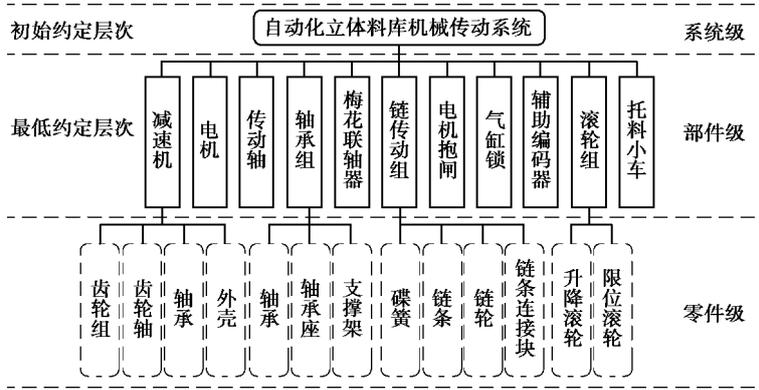


图 6 立体料库机械传动系统的结构层次

Fig. 6 Structure hierarchy of mechanical drive system of three-dimensional material warehouse

3.2 功能分析

为建立各部件间的功能依赖关系,需明确每个部件的功能。电机将电源提供的电能转换为运动所需的机械能,为运动提供旋转角速度,同时接收来自变频器和辅助编码器的信号,调节转速。在出现紧急情况时,电机抱闸收到外部传来的离散信号,产生扭矩,使电机停止转动。减速机将电机高转速匹配成运动所需的低转速。轴承组支撑传动轴,减少摩擦,保证其回转精度。传动轴将减速机传来的转矩传递给联轴器。链传动组将传动轴的转矩传递给滚轮组。滚轮组位于立柱上,支撑托架,将链传动组的转动转化为垂直方向上的直线运动。梅花联轴器将主传动轴和中间传递轴结合在一起,保持同步转动。当托料小车完成入库时,安装在货架上的气缸锁接收到检测传感器的离散信号进而产生动作,限制托料小车的运动。由于长时间工作,链条会发生松动,链条运动位置发生变化。辅助编码器记录链条的实际运动状态,然后与电机编码器的数据做对比,进而调节运动。托料小车位于托架上,可以在垂直方向和水平方向上直线运动,以此来完成板料的出入库。通过分析各部件在机械传动系统中所发挥的实际作用,并参照标准化分类,得到机械传动系统各部件的功能、流及属性如表 2 所示。根据各部件功能流属性和机械传动系统的功能,将机械传动系统的功能定义为输送,输入流是电机、编码器、抱闸和气缸锁的输入流,输出流定义为输出位置。

表 2 机械传动系统各部件的功能、流及属性

Table 2 The function, flow and properties of the components of mechanical drive system

部件	功能	输入流形式	输入流属性	极性关系	输出流形式	输出流属性
电机	转换	信号流-信号	信号	+	能量流-机械能	转速
		能量流-电能	电压	+		
		信号流-信号	信号	+		
减速机	分配	能量流-机械能	转速	-	能量流-机械能	转矩
轴承组	支撑	能量流-机械能	转速	+	能量流-机械能	转速

续表 2

部件	功能	输入流形式	输入流属性	极性关系	输出流形式	输出流属性
传动轴	传递	能量流-机械能	转矩	+	能量流-机械能	转矩
链传动	传递	能量流-机械能	转矩	+	能量流-机械能	转矩
联轴器	结合	能量流-机械能	转矩	+	能量流-机械能	转矩
滚轮组	转化	能量流-机械能	转矩	+	能量流-机械能	速度
抱闸	停止	信号流-信号	信号	+	能量流-机械能	扭矩
气缸锁	停止	信号流-信号	信号	+	能量流-机械能	力
		能量流-气动	气压	+		
编码器	测量	信号流-信号	信号	/	信号流-信号	信号
		能量流-机械能	速度	+		
托料小车	支撑	能量流-机械能	速度	+	物质流-固体	位置
		能量流-机械能	力	-		

3.3 功能连接

在进行功能分析后,系统的组成部件独立存在,部件间没有任何联系,需要建立功能依赖关系将部件联系起来。功能依赖关系分为 2 种:一种是部件内部输入流和输出流之间的极性关系。极性为正,输入流与输出流成正比,否则相反;另一种是部件外部功能流之间的关联关系。关联关系只能连接相互作用部件的同类流,无极性关系。以电机为例,电机内部的输入流与输出流的极性关系如图 7 所示。其他部件内部的输入与输出流的极性关系已在表 2 中给出。

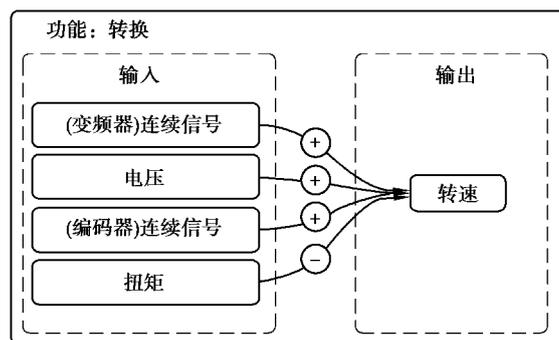


图 7 Z 轴电机的功能流极性关系

Fig. 7 Functional flow polarity of Z-axis motor

在各部件内部功能流的极性关系确立后,根据各部件间的相互作用建立部件外部的关联关系,最终得到机械传动系统的功能框图,如图 8 所示。

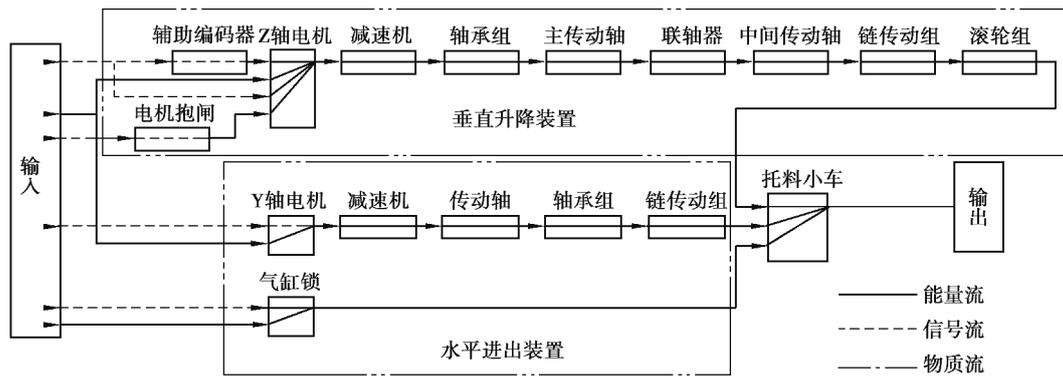


图 8 机械传动系统功能框图

Fig. 8 Functional block diagram of mechanical drive system

3.4 故障分析

对扬州恒佳自动化设备有限公司生产的自动化立体料库进行现场试验,统计各部件的主要故障模式及其机理如表 3 所示。

表 3 机械传动系统故障模式和故障机理

Table 3 Fault mode and mechanism of mechanical drive system

部位	故障模式	故障机理
电机	短路	环境高温引起绝缘老化,导致电机绕组发生短路,电机故障
	卡死	电机润滑不足引起黏性磨损导致输出轴不转
减速器	异响	轴承和齿轮由于磨损或者冲击产生损伤,金属异物进入,产生异响。
	振动	轴承长时间磨损会导致间隙加大,从而导致减速机振动。
轴承组	磨损	润滑不足和密封性差引起磨料磨损,导致轴承表面凹陷和剥落
	疲劳	速度过快和重载加剧疲劳,导致轴承表面金属缺陷和脱落
传动轴	弯曲	冲击负载和过载引起轴的弯曲,轴线偏离,产生振动
	腐蚀	腐蚀性污染物和清洁不足引起轴的表面破坏
链传动	伸长	循环高机械载荷引起拉伸变形,导致链条伸长
	断裂	过载和腐蚀环境下引起链板裂纹,导致其断裂
联轴器	磨损	转矩或错位过大,联轴器可能会栓牢和松动,导致弹性体磨损
滚轮组	磨损	由于润滑不足和异物的进入,导致滚轮磨损,滚动时产生振动
电抱闸	卡死	固体颗粒污染物卡在见间隙中,阻止抱闸动作
气缸锁	卡死	气缸结构不合理和感应不灵敏造成卡顿
编码器	断裂	编码器的支撑板材料选择不合理,受到拉伸破坏,造成断裂
托料小车	弯曲	板材重量过大,超出承重,导致车轮轴弯曲,小车左右位置不平衡

在功能依赖关系的基础上,依据标准化的故障分类,将各部件的故障信息添加进去,生成故障因果关系图,完成故障依赖关系的建立。以机械传动系统的电机和链传动组为例,它们在故障因果关系图中的信息如图 9 所示。

假设链条断裂,依据链传动组故障因果关系图可得链传动组输出转矩 C_6 下降(极端状态下,转矩下降到零),系统输入节点向量 $\mathbf{X}_1 = [0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0]$ 。根据式(1)和式(2)计算得:

$$\mathbf{X}_1 * \mathbf{E} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0] = f(\mathbf{X}_1 * \mathbf{E}) = \mathbf{X}_2,$$

$$\mathbf{X}_2 * \mathbf{E} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1] = f(\mathbf{X}_2 * \mathbf{E}) = \mathbf{X}_3,$$

$$\mathbf{X}_3 * \mathbf{E} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] = f(\mathbf{X}_3 * \mathbf{E}) = \mathbf{X}_4,$$

$$\mathbf{X}_4 * \mathbf{E} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] = f(\mathbf{X}_4 * \mathbf{E}) = \mathbf{X}_5 = \mathbf{X}_4。$$

由此可得, \mathbf{X}_5 是 FCM 动态系统中的固定点。因此链条断裂时,故障原因是循环高机械载荷和腐蚀,故障机理为腐蚀破坏,局部影响是链传动组输出转矩 C_6 下降(为零),高一层影响为滚轮组输出输出速度 C_7 降低(为零),最终影响为传动系统输出位置 C_{11} 偏差(下降和升高都视为存在偏差)。其他故障以此类推,可得立体料库机械传动系统 FMEA 结果如表 5 所示。

表 5 立体料库机械传动系统 FMEA 结果

Table 5 FMEA analysis result of mechanical drive system of three-dimensional material warehouse

部位名称	故障模式	故障原因	故障机理	故障影响		
				局部影响	高一层次影响	系统影响
电机	短路	高温	热降解	电机转速下降	减速器转矩下降	传动系统输出位置偏差
	卡死	润滑不足	黏性磨损	电机转速下降	减速器转矩下降	传动系统输出位置偏差
减速器	异响	固体颗粒污染物	磨料磨损	减速器转矩下降	轴承组转速下降	传动系统输出位置偏差
	振动	长时间循环载荷	磨损破坏	减速器转矩下降	轴承组转速下降	传动系统输出位置偏差
轴承组	磨损	润滑不足、密封差	磨料磨损	轴承转速下降	传动轴转矩下降	传动系统输出位置偏差
	疲劳	速度过快、重载	接触疲劳	轴承转速下降	传动轴转矩下降	传动系统输出位置偏差
传动轴	弯曲	冲击、过载	弯曲变形	轴转矩下降	联轴器转矩下降	传动系统输出位置偏差
	腐蚀	腐蚀性污染物	腐蚀破坏	轴转矩下降	联轴器转矩下降	传动系统输出位置偏差
链传动	伸长	高机械载荷	拉伸变形	链条转矩下降	滚轮组速度下降	传动系统输出位置偏差
	断裂	腐蚀性污染物	腐蚀破坏	链条转矩下降	滚轮组速度下降	传动系统输出位置偏差
联轴器	磨损	大转矩、错位	磨损破坏	联轴器转矩下降	传动轴转矩下降	传动系统输出位置偏差
滚轮组	磨损	润滑不足、固体污染	磨料磨损	滚轮速度下降	小车位置偏差	传动系统输出位置偏差
抱闸	卡死	固体颗粒污染物	颗粒积累	抱紧力减小	电机转速下降	传动系统输出位置偏差
编码器	断裂	材料硬度不符	拉伸断裂	信号出现偏差	电机转速有偏差	传动系统输出位置偏差
气缸锁	卡死	结构干涉	结构设计	锁紧力减小	小车锁紧力减小	传动系统输出位置偏差
托料小车	弯曲	重载	弯曲变形	位置偏差	无	传动系统输出位置偏差

从 FMEA 结果中可以看出,主要故障机理为磨损、腐蚀和变形,追究其故障原因,主要有润滑不足、污染物的进入和载荷问题。依据 FMEA 结果,提出以下针对性改进措施:

- 1) 对现场的工作环境做好控制,防止环境中的固体颗粒、腐蚀性气体进入到减速器、轴承中。
- 2) 测试磨损部件材料本身的耐磨性能,不符合要求的,及时进行更换,避免事故的发生。
- 3) 合理选择润滑油的种类,必要时在润滑油中加入适当的添加剂或固体润滑剂;在易于磨损的部位涂抹

防护材料或者加装防磨装置。

4)对设备操作人员进行培训,提高设备维护意识,定期对设备进行保养维护。

5)提高安装检修的质量,因为不正确的安装方式,会产生附加载荷,进而加剧磨损程度。

6)在传动轴和链条表面覆盖保护层,如在金属表面涂漆、电镀或用化学方法形成致密耐腐蚀的氧化膜。

7)对链条抗拉强度、传动轴抗弯强度、轴承组寿命和齿轮副疲劳强度进行计算和校核,确定其载荷极限,操作人员在合理的载荷范围内使用设备。

5 结论

1)利用标准化分类法定义了自动化立体料库机械传动系统的功能和故障,形成功能框图和因果关系图,减少了工程师主观经验的影响,故障逻辑关系更加直观,使得 FMEA 结果的可信性得到了提高。

2)采用模糊认知图分析了自动化立体料库机械传动系统相关故障的传播路径和影响,有效解决了故障影响关系混乱的问题,提高了 FMEA 的分析效率。

3)根据 FMEA 结果,自动化立体料库机械传动系统的主要故障机理为磨损、腐蚀和变形,主要故障原因有润滑不足、污染物的进入和载荷问题。由此提出了一系列针对性的改进措施,提高了自动化立体料库的可靠性。

参考文献:

- [1] Zhang Y J, Sun Y C, Wang F C, et al. Method of aircraft fuel tank system ignition source fail-safe feature analysis [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 17: 638-644.
- [2] Yazdi M, Daneshvar S, Setareh H. An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system[J]. *Safety Science*, 2017, 98: 113-123.
- [3] 贾亚洲,于捷,姜巍巍,等. 国产加工中心故障模式及影响分析(FMEA)[J]. *机械制造与自动化*, 2001, 30(4): 111-114.
JIA Yazhou, YU Jie, JIANG Weiwei, et al. The faults analyses for home machining center[J]. *Jiangsu Machine Building & Automation*, 2001, 30(4): 111-114.(in Chinese)
- [4] 陈宥宇. 冲床外购件可靠性分析与控制关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
CHEN Youyu. Reliability analysis and control key technologies research of purchased parts for punch press [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.(in Chinese)
- [5] 何迎春. 基于故障树的架空输电线路可靠性评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
HE Yingchun. Study of a reliability assessment method of overhead transmission line based on fault tree [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.(in Chinese)
- [6] Renu R, Visotsky D, Knackstedt S, et al. A knowledge based FMEA to support identification and management of vehicle flexible component issues[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 44: 157-162.
- [7] Bensaci C, Zennir Y, Pomorski D, et al. Complex safety study of intelligent multi-robot navigation in risk's environment [C]//2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). Madrid, Spain: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] Long G, Liang A. Product failure modeling method based on Altarica language[C]//2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin). Harbin, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [9] Huang Z, Swalgen S, Davidz H, et al. MBSE-assisted FMEA approach: Challenges and opportunities[C]//2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Orlando, FL, USA: IEEE, 2017:1-8.
- [10] Hess A, Stecki J S, Rudov-Clark S D. The maintenance aware design environment: development of an aerospace phm software tool[C]//International Conference on Prognostics and Health Management(PHM). Denver, Colo,USA: IEEE, 2008:1-9.
- [11] Menon S, Stecki C, Song J, et al. Optimization of PHM system for electronic assemblies using maintenance aware design environment software [C] // AIAC-14 Fourteenth Australian Interbational Aerospace Congress. Australia: Australia Defence Science and Technology Organisation, 2011: 1-14.
- [12] Rudov-Clark S, Stecki J, Stecki C. Application of advanced failure analysis results for reliability and availability

- estimations[C]//2011 Aerospace Conference Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [13] 冯辅周, 罗建华, 刘远宏, 等. 基于系统功能-结构-故障模型的 FM MEA 分析方法[J]. 振动.测试与诊断, 2016, 36(3): 413-418.
FENG Fuzhou, LUO Jianhua, LIU Yuanhong, et al. A FMMEA analysis method based on function-structure-failure model[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3): 413-418. (in Chinese)
- [14] 李海伟. 引气系统建模及传感器集优化分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(2): 51-54.
LI Haiwei. Optimizing analysis of bleed aircsystem modeling and sensor set[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015 (2): 51-54. (in Chinese)
- [15] Hirtz J, Stone R B, Mcadams D A, et al. A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts[J]. Research in Engineering Design, 2002, 13(2): 65-82.
- [16] Rudov-Clark S D, Stecki J. The language of FMEA: on the effective use and reuse of FMEA data[C]// AIAC-13 Thirteenth Australian Interbational Aerospace Congress. Australia: Australia Defence Science and Technology Organisation, 2009:1-17.
- [17] GJB/Z 1391—2006 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2006.
GJB/Z 1391—2006 Guide to failure mode, effects and criticality analysis [S]. Beijing: General equipment department military standard publishing and distribution department, 2006. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)

(上接第 9 页)

- [15] 姚丽萍, 曾忠, 张永祥. 微重力环境下横向旋转磁场对热表面张力流的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 115-120.
YAO Liping, ZENG Zhong, ZHANG Yongxiang. Effects of transverse rotating magnetic field on thermocapillary flow under microgravity[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2012, 35(3): 115-120.(in Chinese)
- [16] Yao L P, Zeng Z, Zhang Y, et al. Influence of rotating magnetic field strength on three-dimensional thermocapillary flow in a floating half-zone model[J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(12): 2103-2111.
- [17] Hoshikawa K, Kohda H, Hirata H. Homogeneous dopant distribution of silicon crystal grown by vertical magnetic field-applied czochralski method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1984, 23(1): L37-L39.
- [18] Zhou X M, Huang H L. Numerical simulation of Cz crystal growth in rotating magnetic field with crystal and crucible rotations[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 340(1): 166-170.
- [19] Takagi Y, Okano Y, Minakuchi H, et al. Combined effect of crucible rotation and magnetic field on hydrothermal wave [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 385(1):72-76.
- [20] Shi W Y, Imaishi N. Hydrothermal waves in differentially heated shallow annular pools of silicone oil[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 290(1): 280-291.
- [21] Hu K X, He M, Chen Q S. Instabilities of thermocapillary flows between counter-rotating disks [J]. Procedia Engineering, 2015, 126: 54-57.
- [22] Hur M J, Han X F, Song D S, et al. The influence of crucible and crystal rotation on the sapphire single crystal growth interface shape in a resistance heated czochralski system[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 385: 22-27.
- [23] 张发云, 罗玉峰, 李云明, 等. 磁场应用在硅晶体生长过程中的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(13): 15-19.
ZHANG Fayun, LUO Yufeng, LI Yunming, et al. Research and development on magnetic field application in the process of silicon crystal growth[J]. Materials Review, 2013, 27(13): 15-19.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)