

机械产品面向可变功能再设计的环境适应性设计研究

徐灵浩^{1,2}, 贺华波^{1,2*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对现有机械产品开展面向可变功能的再设计是设计开发可变功能产品的重要方法之一。为解决新功能带来的对新工作环境适应性不足的问题, 从功能变更的角度分析了有害环境对产品功能结构的影响。在此基础上构建功能-环境模型, 用以描述变更前后产品各子功能受影响的环境因子, 并通过计算进一步得到功能-环境差序模型。根据该模型提出针对受影响产品结构的环境适应性设计方法, 使变更后的产品能高效地适应新的工作环境。最后以角磨机的环境适应性设计为例, 说明上述方法的可行性。

关键词: 机械产品; 可变功能; 功能-环境模型; 环境适应性设计

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 05-0109-08

可变功能机械是指通过调整构件的连接方式或更换系统构件来获得不同功能的机械系统^[1], 具有功能利用率高、应用范围广等优点, 市场前景良好。其设计方法之一是在已有机械产品的基础上进行合理的功能变更再设计, 实现其既有功能的变更, 引入新功能, 使其具备可变功能^[2]。不过在对现有产品进行功能变更再设计过程中, 该产品所处的工作环境也会发生较大变更。然而, 与目前大多数产品一样, 产品设计师在设计过程中往往侧重于产品的功能设计, 忽视了环境因素对产品所造成的影响。产品如果不能很好地适应其工作环境, 会对产品的寿命、使用性能和可靠性等产生不利影响。为此, 国内外学者对产品与其工作环境之间的关系展开了深入的研究。文献[3]给出了环境适应性定义; 高贵福等^[4]针对飞行器环境适应性设计不足的现状提出采用环境仿真和验证试验相结合的手段, 并逐步形成产品环境适应性设计规范; 陈典斌等^[5]通过分析装备环境适应性要求, 基于仿真计算提出了环境适应性评价机制; 胥泽奇等^[6]简要分析了我国装备环境适应性评价工作的现状, 介绍了装备环境适应性评价的内容及主要方法, 指出装备环境适应性基础数据对装备环境

适应性评价的重要作用, 建议通过自然环境试验或长期监测的方法获取装备环境适应性基础数据; 涂强^[7]将工作环境作为主要影响因素之一, 对可变功能产品进行了可靠性预测分析, 为产品可靠性研究提供了一定的理论基础; Deng等^[8]在机械产品的概念设计中, 引入工作环境概念, 并通过输入输出作用流来表达行为, 提出了功能-行为-结构-环境的功能设计信息模型。但目前有关现有机械产品面向可变功能变更再设计后对新工作环境的适应性研究仍较为鲜见。

本文针对产品功能变更再设计后所处新工作环境中的有害环境对产品造成的影响进行研究。基于对变更前后产品功能-结构的变化分析, 提出了功能-环境模型, 结合相关的优化设计技术展开适应性设计研究, 使产品进行变更设计后仍能高效地适应新的工作环境, 为机械产品面向可变功能再设计后的环境适应性设计提供参考。

1 产品的功能、结构和环境变更分析

相较于其他传统机械, 可变功能机械在总体设计过程中对工作环境的适应性设计研究更为必要和迫切。如果变更后的产品不能适应新环境, 将

收稿日期: 2020-12-08.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51375246)。

第一作者: 徐灵浩(1996-), 男, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: 870604741@qq.com

*通信作者: 贺华波(1976-), 男, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: hehuabo@nbu.edu.cn

会影响到产品的正常使用性能和可靠性,最终导致变更设计的失败.例如在粉碎机向榨汁机的功能变更再设计中,其工作环境从干燥转变为潮湿,如果其动力系统部分没有进行防潮密封的适应性设计,产品极有可能在执行榨汁功能时造成部分电子器件短路,造成产品故障和严重的安全隐患.

1.1 功能、结构变更分析

功能是设计人员对设计目的或设计意图的抽象描述^[9].可变功能机械产品的总功能可逐级分为若干子功能,这些子功能间存在一定的逻辑关系,各子功能相互协调配合实现产品的总功能^[10].若子功能发生故障可能导致功能链的不完整,最终导致产品失效.在对现有产品进行变更再设计时,由于客户需求的改变,产品的总功能也随之改变,故产品的子功能以及子功能间的相互关系也需要进行相应的变更和重组.从功能角度出发,在总功能的变更过程中,针对子功能的变更操作主要有增添、删减和替换子功能3种方法.在进行变更再设计时,通常需要混合使用这3种方法,以最终满足目标功能要求的功能链.由于不同子功能又对应多个不同的结构,产品功能的变更必须通过结构的变更才能实现.因此,可以根据功能-结构的映射关系,建立功能-结构变更图来描述变更前后的结构关系变化.

1.2 内、外环境因子

任何机械产品在使用过程中都有其工作环境,可以通过一系列背景环境加以表达^[11].产品在进行功能变更再设计后,由于目标功能发生了改变,往往意味着产品使用时的工作环境也会发生改变,从而可能面临新的有害环境.如果变更后的产品结构体不能适应这种新环境,将对产品的功能造成影响,并最终影响产品的正常使用.有害环境一般通过2种作用对产品的功能产生影响:(1)直接作用,即环境因子直接施加在产品构件上,对产品的结构产生影响,进而影响到产品的功能,最后影响产品的正常使用.(2)间接作用,即环境因子通过产品间的相互物理作用,向系统内部输入有害的动作,由此对系统内部的行为和结构产生影响,使系统产生副作用输出,进而影响产品的功能,这种关系可能包括一切作用,可以是力、力矩、移动等.

基于不同环境因子对产品功能产生影响的不

同作用方式,可以将环境因子分为外环境因子和内环境因子.外环境因子主要包括温度、湿度、沙尘、气压等直接作用在结构体上的环境因子,例如湿度过高容易导致产品中某些电子器件的短路和结构体表面的化学腐蚀等;内环境因子主要包括振动、冲击、稳态力等通过间接作用对系统功能产生影响的环境因子,如振动会影响系统中行为以及构件连接的稳定,降低机械设备的工作精度,加剧构件磨损,甚至引起结构疲劳破坏等.

2 功能-环境模型

2.1 功能-环境模型的构建

以龚勋等^[12]提出的环境剖面基因模型为参考,建立产品的功能-环境模型:

$$M = (F, E, I),$$

式中: F 为功能; E 为外环境因子; I 为内环境因子.

$$F = \{F_i | i = 1, 2, \dots, k\}, \quad (1)$$

$$E_i = \{e_{ij} | j = 1, 2, \dots, e_i\}, \quad (2)$$

$$I_i = \{i_{il} | l = 1, 2, \dots, m_i\}, \quad (3)$$

式中: F_i 为子功能; E_i 为 F_i 对应的外环境因子集合; I_i 为 F_i 所对应的内环境因子集合.

外环境因子和内环境因子按作用于不同的子功能分别构成相对独立的序列,同时作用于产品结构,对产品的性能、可靠性和寿命产生影响.

三大主要元素分别构成功能-环境模型的主链和分支链,其中主链由子功能构成,是整个功能-环境模型的核心.外环境因子和内环境因子构成功能-环境模型的枝叶结构,形成分支链,分别位于主链的两侧,对应子功能形成独立序列,由于其作用关系平等,因此采取随机排列连接方式.功能-环境模型如图1所示.

2.2 功能-环境模型变更分析

产品在进行功能变更操作时,子功能及各子功能所对应的环境因子也在发生变化.为此,功能-环境模型也将相应发生改变.功能-环境模型的变更是通过模型内部的变更操作实现.主链因子的变更操作形式主要包括主链因子的增添、删减和替换,其中所对应的分支链因子也随主链因子的变化而变化.

(1)主链因子增添.由于客户需求变更,对产

品进行功能变更设计, 相对原功能需要增加新的子功能来满足需求。

(2)主链因子删减. 由于客户需求变更, 对产品进行功能变更设计, 原产品部分子功能不再使用, 部分子功能对应的结构构件需要卸除。

(3)主链因子替换. 由于客户需求变更, 对产品进行功能变更设计, 用一个新的子功能来替换原来的子功能, 2个子功能间具有互换性。

(4)分支链因子增添. 由于产品执行变更操作后, 产品所处的有害环境发生了改变, 相对变更前, 变更后的有害环境增添了新的内、外环境因子。

(5)分支链因子删减. 由于产品执行变更操作后, 产品所处的有害环境发生了改变, 相对新工作环境, 某些在变更前的有害环境中的内、外环境因子已不再存在。

(6)分支链因子扩大. 由于产品执行变更操作后, 产品所处的有害环境发生了改变, 相对变更前, 虽然环境因子的种类未改变, 但在量上相较之前对构件产生的不利影响变得更为明显。

由于产品变更再设计操作的复杂性和工作环境的多样性, 这6种操作往往同时混合进行, 形成新的功能-环境模型(图2), 其中 $M'=(F', E', I')$, 在该功能-环境变更模型中, 同时发生了主链因子和分支链因子的变更. 主链因子变更的形式表现为: 原子功能 F_4 和 F_5 被删减, 增添了新子功能 F_7 、 F_8 和 F_9 , 这些子功能对应的外环境因子和内环境因子随之发生变化. 分支链因子的变更形式表示为子功能 F_2 增添了内环境因子 i_{23} , 删减了外环境因子 e_{23} 和 e_{24} ; 子功能 F_3 增添了内环境因子 i_{34} 和外环境因子 e_{34} , 内环境因子 i_{33} 扩大, 最终形成

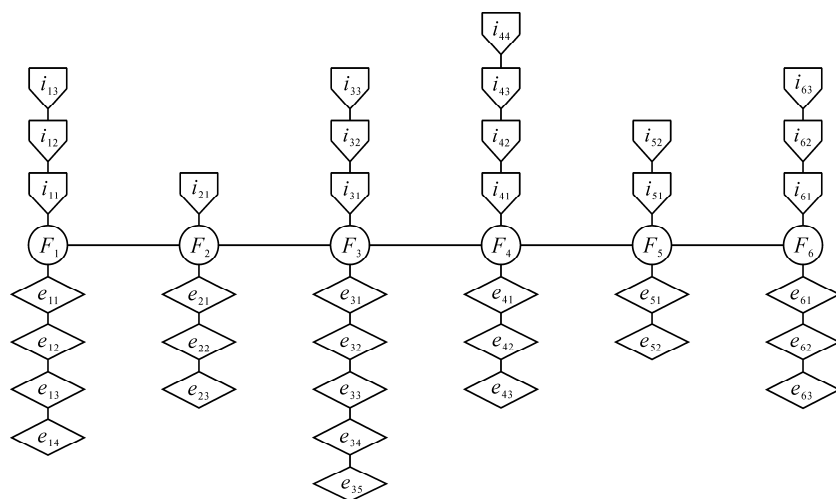


图1 功能-环境模型示例

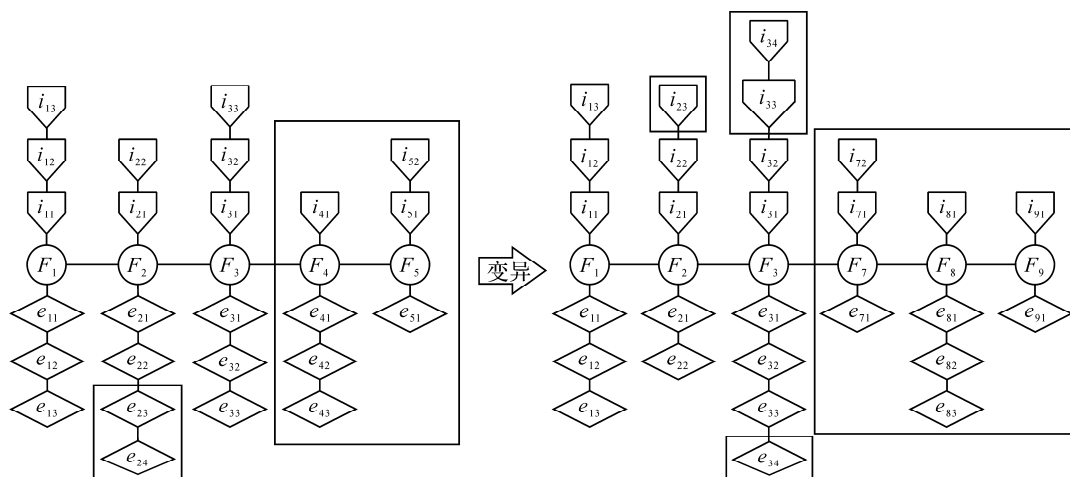


图2 功能-环境变更模型示例

变更后产品的功能-环境模型.

3 功能-环境差序模型

3.1 功能-环境差序模型的构建

功能-环境模型的差序计算, 有助于实现变更后结构体对新工作环境的快速适应性设计. 在变更前后的功能-环境模型 M 和变更后的功能-环境模型 M' 基础上构建功能-环境差序模型:

$$\Delta M = M' - (M' \cap M).$$

产品的功能-环境差序模型可以较好地反映产品功能变更再设计后各子功能变化以及明确各子功能所受到的环境因子变化状况. 在功能-环境差序模型中, 如果面对新增添和扩大的环境因子, 变更后产品子功能所对应的结构体无法适应, 则需要对其进行优化调整和改进设计; 而对因环境因子缺失所致的部分结构冗余, 则可以选择将冗余结构拆卸. 通过功能-环境差序图, 以变更后的产品结构体为母版, 针对不同的环境因子变化, 采取不同的设计手段, 可以设计出满足客户需求和新的工作环境的新产品.

3.2 环境适应性设计复杂度评估

由于变更后产品所处环境的多样性, 某些情况下会导致变更后产品的环境适应性设计过于复杂, 这也必然引起产品设计工作量和产品成本的增加, 这样的变更设计是不合理的, 必须重新开始进行产品的功能变更设计. 为此, 针对功能-环境差序模型建立环境适应性设计复杂度评估数学模型, 以分析其变更操作对环境适应性设计难度的影响量. 设子功能 F_i 对变更后产品结构体环境适应性设计难度的影响函数为 y_i , 影响函数 y_i 由影响参数 X 组成. 由于主链子功能删减和分支链环境因子删减都不会对变更后产品结构体的环境适应性设计产生影响, 因此只对该模型中增添、替换以及环境因子的扩大进行研究. 当主链因子发生增添和替换操作时, 也会随之新增大量的新的环境因子, 故其影响函数为 $y_i(\Delta x)$; 当主链因子不变, 只有分支链因子变化时, 其影响参数 X 的波动为 Δx , 影响函数为 $y_i(\Delta x)$. 分支链上的环境因子通过作用于产品的子功能对变更设计产生影响, 即任一支链的环境因子 E_i 或 I_i 对应一个影响系数 γ_{is} , 共同作用于影响函数, 形成子功能 F_i 的综合

环境适应性设计波动函数:

$$\Delta Y_i = y_i(x) \sum_{s=1}^{n_i} \gamma_{is}, \quad (4)$$

式中: $0 \leq \gamma_{is} \leq 1$, $0 \leq y_i(x) \leq 10$, $0 \leq y_i(\Delta x) \leq 1$, n_i 为功能-环境差序模型中子功能所对应的分支链中外环境因子和内环境因子的总数量. 对主链中所有子功能的综合环境适应性设计波动函数进行累加计算, 得到用以评估再设计复杂度的功能-环境差序模型的总环境适应性设计波动函数 ΔY :

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^k \left(y_i(x) \sum_{s=1}^{n_i} \gamma_{is} \right), \quad (5)$$

式中: k 为功能-环境差序模型中主链上的因子数量之和.

将总环境适应性设计波动函数(ΔY)的具体值与影响参数许用值(σ)进行比较, 其中 σ 由不同企业设计人员, 根据企业不同产品的实际情况, 对产品设计的工作量、设计周期和成本进行约束, 结合工程设计经验, 得到一个设计合理性的参照值. 若 $\Delta Y \leq \sigma$, 则证明此功能变更再设计具有合理性, 可继续对其进行相应的环境适应性设计, 否则可放弃环境适应性设计, 重新进行功能设计, 以保证产品可实现其规定的任务.

4 环境适应性设计

4.1 设计路径及技术手段

将功能-环境差序模型和功能-结构映射方法相结合, 可以进行变更后产品结构体的环境适应性设计. 由于可变功能机械系统的特殊性, 在进行此类适应性设计前, 需结合工程经验先判断变更后的结构体能否适应新的工作环境. 如果结构体能够适应新环境, 则无需进行此设计; 反之, 则需要对相应的结构体进行优化和改进. 基于杨铭等^[13]对机电设备环境适应性研究中所提及的控制策略, 本文提出针对可变功能机械系统的 2 条环境适应性设计路径: (1)通过提高变更后产品结构体的自身性能, 提高其对新的有害环境影响的抵抗力. (2)通过降低产品使用时实际受到的环境因素影响, 提高其对新环境的适应能力.

针对以上 2 条设计路径, 提出 4 种减弱有害环境因素对产品影响的技术手段: (1)强化技术, 即对产品结构进行加强, 以提高结构自身的抵抗力, 如

采用冗余技术, 选取更高性能的构件, 使产品处于不饱和工作状态, 以提高产品自身对有害环境影响的抵抗力. (2)隔离技术, 即采用隔离装置或材料、涂镀层等技术将实际环境与产品结构隔离, 降低产品在实际工作时受到环境因素的影响, 如密封设计, 防腐蚀设计等. (3)减振技术, 即采用缓冲减振设计或装置来降低产品所受到的冲击, 以降低产品在工作环境中的振动冲击. (4)温控技术, 即通过对温度的控制来降低产品受到温度效应的影响, 提高产品在工作中对环境温度变化的抵抗能力.

在实际设计中, 由于环境因子的多样性和复杂性, 通常需要混合使用各种技术手段.

4.2 环境适应性设计流程

可变功能机械环境适应性设计的目标是确保所设计的产品在不同功能的使用时, 能够保证功能切换后的产品结构可以适应新工作环境的要求, 这一设计流程(图3)可以分为4个步骤.

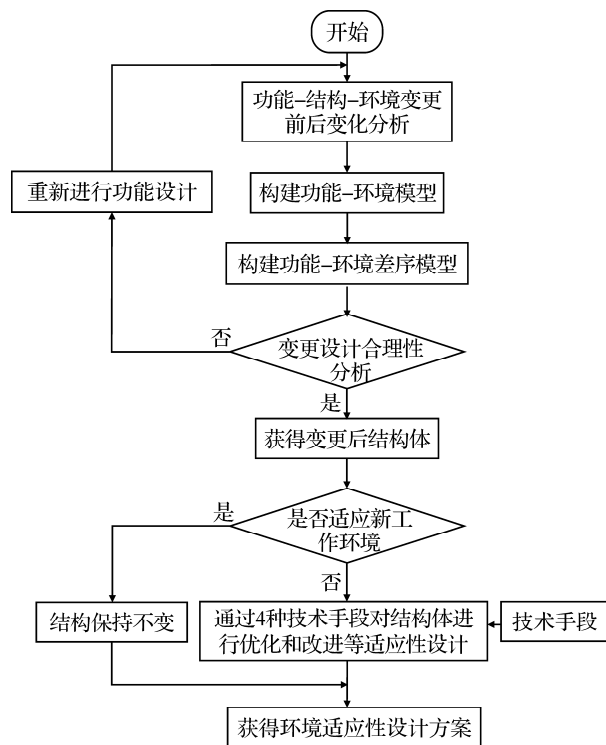


图3 可变功能机械产品环境适应性设计流程

步骤1 功能、结构和环境变更前中后变化分析. 通过对产品功能变更再设计分析, 建立产品变更前后的功能逻辑图和结构关系图, 并明确产品变更前后有害环境的变化.

步骤2 构建功能-环境模型. 以产品的子功能链为主链, 各子功能所处的内环境因子和外环境因子为分支链, 分别排列在对应的主链因子上下两侧, 构成功能-环境模型.

步骤3 构建功能-环境差序模型. 基于变更前功能-环境模型 M 和变更后功能-环境模型 M' , 构建功能-环境差序模型 $\Delta M = M' - (M' \cap M)$. 并结合环境适应性波动函数 ΔY 来评估环境适应性设计复杂度, 进而判断变更设计的合理性.

步骤4 优化和改进等适应性设计. 根据功能-环境的差序模型和功能-结构的映射, 对不能适应新环境的变更后结构体进行优化和改进设计, 最终得到完整的产品变更设计方案.

5 案例分析

对单一功能的角磨机进行功能变更再设计, 使其可以通过更换部分构件变为一把电锯, 具有磨削和切割2种功能, 成为一机两用的可变功能机械产品(图4).

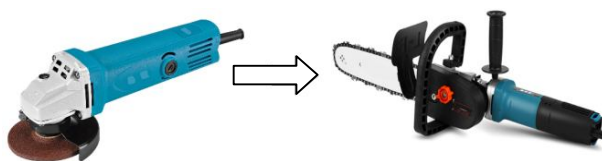


图4 具有可变功能的角磨机

以角磨机向电锯的功能变更为研究对象, 对其变更后产品的结构体进行环境适应性分析及设计, 使变更后产品能高效适应新的工作环境, 以满足产品的性能需求. 通过分析其变更前中后功能链和结构关系, 得到其变更前中后的功能结构(图5和图6). 结合功能逻辑图进一步对变更前中后各子功能所处的工作环境进行分析, 得到子功能 F 、外环境因子 E 和内环境因子 I 的因子序列.

$$F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\},$$

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}\},$$

$$I = \{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8\},$$

式中: F_1 为支撑整体, F_2 为产生扭矩, F_3 为传递扭矩, F_4 为旋转磨片, F_5 为打磨物品, F_6 为驱动链条, F_7 为支撑链条, F_8 为切割物品; e_1 为雨水, e_2 为干燥, e_3 为霉菌生长, e_4 为沙尘, e_5 为局部高温, e_6 为低温, e_7 为高温, e_8 为霜冻, e_9 为浸水,

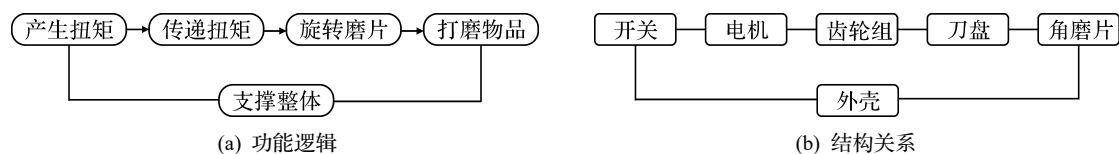


图5 角磨机功能结构

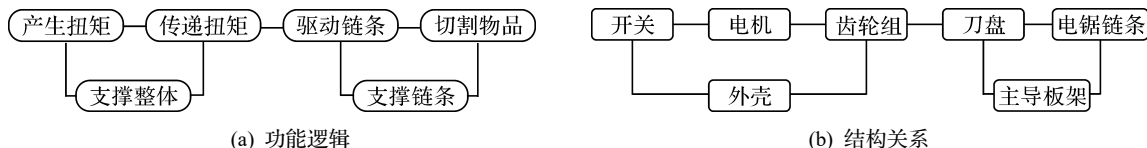


图6 电锯功能结构

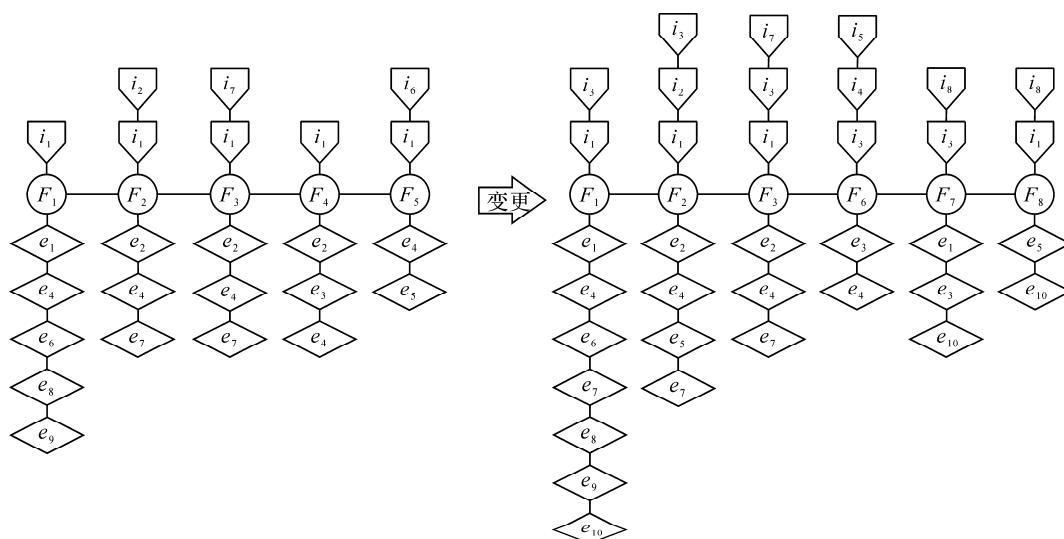


图7 产品功能-环境变更模型

e_{10} 为碎屑冲击; i_1 为磨损, i_2 为电流波动, i_3 为振动, i_4 为连接件冲击, i_5 为润滑不良, i_6 为离心加速度, i_7 为受转矩, i_8 为碰撞冲击。

按照此序列结合变更前后功能逻辑图, 建立变更前后产品的功能-环境模型(图7)。

设计人员根据不同企业不同产品的实际情况, 通过在类似此类产品的概念设计中对功能的设计更改, 以及针对有害环境所需的改进设计的难度和工作量分析加以赋值, 得到各子功能影响参数的波动区间和各环境因子对相应子功能的影响系数。其中一个案例对应的数据见表1和表2。根据变更前后产品的功能-环境模型, 进一步构建出功能-环境差序模型(图8)。

表1 子功能影响参数的波动区间

参数	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
$y(x)$	[1,3]	[1,3]	[1,4]	[2,4]	[2,3]	[2,3]
$y(\Delta x)$	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]

表2 环境因子影响系数

F_1	γ_1	F_2	γ_2	F_3	γ_3	F_6	γ_6	F_7	γ_7	F_8	γ_8
e_{10}	0.05	e_5	0.22	i_3	0.1	e_3	0.03	e_1	0.02	e_5	0.01
i_3	0.20	i_3	0.10	-	-	e_4	0.06	e_3	0.03	e_{10}	0.01
-	-	-	-	-	-	i_3	0.20	e_{10}	0.05	i_1	0.20
-	-	-	-	-	-	i_4	0.30	i_3	0.20	i_8	0.20
-	-	-	-	-	-	i_5	0.40	i_8	0.10		

注: “-”表示该子功能未处在其他环境因子的有害作用下。

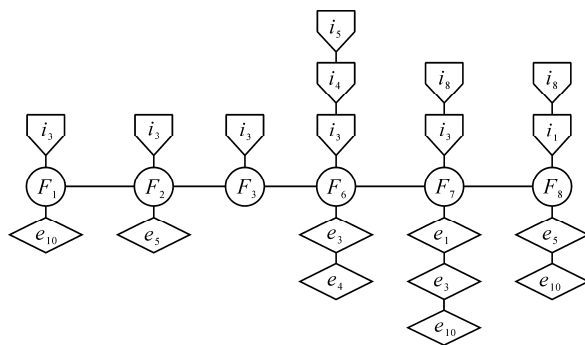


图8 产品功能-环境差序模型

表 3 产品环境适应性设计方案

子功能	环境因子	变更后 结构体	适应新 环境	技术 手段	适应性设计
支撑整体 F_1	碎屑冲击 e_{10}	外壳	否	隔离技术	采用防溅挡板安装外壳上, 防止切割时碎屑飞溅
	振动 i_3	外壳	否	减振技术	外壳安装辅助弹性 U 型手柄, 防止振动影响使用者对设备握持
产生扭矩 F_2	局部高温 e_5	电机	否	温控技术	增大电机散热扇片的直径, 以降低电机内部的温度
	振动 i_3	电机	是	—	—
传递扭矩 F_3	振动 i_3	齿轮组	否	强化技术	更换为高强度齿轮和防振动轴承, 以减轻振动对传动系统的影响
驱动链条 F_6	霉菌生长 e_3	刀盘	是	—	—
	砂尘 e_4	刀盘	否	隔离技术	在刀盘上加装防尘盖, 以防止砂尘对链条的运动造成影响
	振动 i_3	刀盘	否	减震技术	刀盘与链条带动齿间加装弹性橡胶垫圈, 以起减震的作用
	连接件冲击 i_4	刀盘和链条	否	减震技术	安装弹簧自动张紧装置, 防止冲击使链条变松
	润滑不良 i_5	链条	否	强化技术	在主导版上, 加装自动加油油壶, 以解决润滑问题
支撑链条 F_7	雨水 e_1	主导板架	是	—	—
	霉菌生长 e_3	主导板架	是	—	—
	碎屑冲击 e_{10}	主导板架	是	—	—
	振动 i_3	主导板架	否	减振技术	在主导板架两端面加装橡胶层, 以减轻振动影响
	碰撞冲击 i_8	主导板架	否	强化技术	加厚主导板架, 以提高其强度
切割物品 F_8	局部高温 e_5	切割链条	是	—	—
	碎屑冲击 e_{10}	切割链条	是	—	—
	磨损 i_1	切割链条	否	强化技术	采用淬火硬制链条, 使其更加耐磨
	碰撞冲击 i_8	切割链条	否	强化技术	采用淬火硬质链条, 不易断裂, 抗冲击性更强

注: “—”表示对能适应新的有害环境因子的变更后, 结构无需进行适应性设计。

根据式(4)和式(5)的计算方法, 以及表 1 和表 2 中的基础数据, 对环境适应性设计波动函数的设计波动量进行计算, 计算中影响参数均取最大值进行运算, 得到以下结果:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^6 \left(y_i(x) \sum_{s=1}^{n_i} \gamma_{is} \right) =$$
$$\max \left(y_1(\Delta x) \sum_{s=1}^2 \gamma_{1s} + y_2(\Delta x) \sum_{s=1}^2 \gamma_{2s} + \right.$$
$$y_3(\Delta x) \gamma_{33} + y_6(x) \sum_{s=1}^5 \gamma_{6s} +$$
$$\left. y_7(x) \sum_{s=1}^5 \gamma_{7s} + y_8(x) \sum_{s=1}^4 \gamma_{8s} \right) = 7.09.$$

将设计函数波动值与此类产品影响参数的许用值进行比较分析, 判断其变更设计的合理性. 基于功能-环境差序模型, 以变更后产品结构体为母版, 结合功能-结构的映射关系进行优化和改进等适应性设计, 得到变更后产品结构体的环境适应性设计方案(表 3).

6 结语

针对基于现有机械产品开展面向可变功能再设计所造成的新工作环境中的有害环境对产品功能结构的影响, 提出了基于功能-环境模型的环境适应性设计方法. 通过对变更前后的产品功能、结构和环境变化的分析, 建立了功能-环境模型以描述变更前后各子功能所对应的环境变化, 并进一步计算得到该变化的功能-环境差序模型. 在此基础上提出 4 种优化改进技术手段, 用以开展环境适应性设计, 最终使变更后的产品能有效地适应新的工作环境. 该方法对机械产品面向可变功能再设计的环境适应性设计提供了理论指导, 对可变功能机械产品的设计和开发具有一定的参考价值.

参考文献:

[1] Yu Y W, Deng Y M, Lu W F, et al. Analysis of mechanical systems with adaptable functions for the evaluation of functional coupling and component importance[J]. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2015, 76(5/6/7/8):1449-1458.
- [2] 张兴法. 可变功能机械产品功能获取及再设计方法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
- [3] GJB 4239-2001. 装备环境工程通用要求[S].
- [4] 高贵福, 王刚, 孙建亮, 等. 飞行器环境适应性设计方法研究与实践[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6):49-54.
- [5] 陈典斌, 柯宏发, 韩东霏. 仿真技术在装备环境适应性试验与评价中的应用[J]. 中国设备工程, 2017(22): 102-104.
- [6] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1):54-59.
- [7] 涂强. 可变功能机械产品面向功能与性能升级的再设计研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2018.
- [8] Deng Y M, Tor S B, Britton G A. Abstracting and exploring functional design information for conceptual mechanical product design[J]. Engineering with Computers, 2000, 16(1):36-52.
- [9] 邓益民, 郑堤. 机电产品功能与行为表达方法综述[J]. 工程设计学报, 2008, 15(3):164-169; 177.
- [10] 王君宇, 邓益民, 涂强. 可变功能机械基于功能逻辑图和结构关系图的变更设计方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(3):27-32.
- [11] 叶志刚, 邹慧君. 概念设计中的 F-B-S-E 模型和作用流方法[J]. 机械设计与研究, 2002, 18(4):10-12; 21.
- [12] 龚勋, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 复杂工况驱动的产品适应性设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 505-520.
- [13] 杨铭, 陈芳, 季馨. 机电产品环境适应性设计和控制策略[J]. 电子机械工程, 2001, 17(5):21-24.

Environmentally adaptive design in redesign for adaptable-function mechanical product

XU Linghao^{1,2}, HE Huabo^{1,2*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: One of the important methods for design and development of the adaptable-function mechanical product is the redesign of existing mechanical product. However, this method tends to ignore the impact of new working environment due to the introduction of new function. To address this problem, the current paper first analyzes the influence of harmful environmental factors on the product function and structure from the perspective of function change, then constructs a function-environment model to describe the environmental factors that affect the sub-functions of the product before and after the change. Further on, it obtains the function-environment difference order model by calculation on the function-environment model. An environmentally adaptive design method for the adaptable-function mechanical product is subsequently proposed, which can make the changed mechanical product functional structure of the product be adapted to the new working environment more efficiently. The research results provide theoretical basis for the environmentally adaptive design in redesign for the adaptable-function mechanical products. Finally, the feasibility of the above methods is demonstrated by a case study of an angle grinder during its environmentally adaptive design process.

Key words: mechanical product; adaptable function; function-environment model; environmentally adaptive design

(责任编辑 史小丽)