

机械产品基于变更影响和升级复杂度的升级潜力评估

邬宏伟^{1,2}, 于悦晖³, 邓益民^{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; 3. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 基于信息熵理论和产品结构关联性研究, 提出了一个机械产品升级潜力评估模型, 从升级变更影响程度(前端)和升级复杂度(后端)两方面进行综合分析, 得出机械产品的升级潜力量化值, 并用实例验证了所提出模型的有效性.

关键词: 机械产品; 升级变更; 信息熵; 结构关联性

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 06-0072-05

在技术高速发展、信息大爆炸的当今, 每年都会有大量功能更好、性价比更高、结构设计更合理的新产品投放到全球市场, 对早期投入市场的产品带来冲击, 使得那些零部件和性能仍旧完好的产品被迫淘汰. 据统计, 美国每年产品再升级产业规模高达 750 亿美元, 其中机械产品约有 500 亿美元^[1]. 因此, 对即将面临淘汰或已被淘汰的产品进行产品可升级性潜力评估具有较大的实用价值.

目前已有一些有关产品的升级再设计的研究, 如 Matsuda 等^[2]提出了一种基于技术趋势预测与用户需求的产品再设计方案; Umeda 等^[3]将“功能-行为-状态”模型运用于可升级性产品设计中, 并充分考虑到可升级设计中的集合约束关系等; Hamraz 等^[4]基于 FBS 理论对再设计问题进行求解; Xing 等^[5]将遗传算法运用于升级设计方案优选, 并相应地提出了产品可升级性指标, 最后基于此方法得出合适的升级方案; 涂强等^[6]提出了基于原理实例检索的可变功能产品功能升级再设计, 将辅助功能再设计软件与发明问题解决理论(Theory of Inventive Problem Solving, TRIZ)相结合, 从而实现了对升级问题的求解. 然而, 在对产品升级再设计研究中对产品升级潜力评估的研究较为鲜见. 杜彦斌等^[7-8]提出了一种机床再制造评价方案, 但该方法只针对机床的再制造性进行评估, 局限性较大;

Sundin 等^[9]研究了有利于再制造利用的某些产品特性, 并对这些产品特性赋予了不同权重, 建立了产品可再制造性度量方法, 但主要面向产品开发后期, 即再制造性, 对设计指导的针对性不强.

本文基于信息熵理论和产品结构关联性研究, 提出了一个用于机械产品升级潜力评估的评价模型, 可帮助产品研发者在产品开发初期通过该模型量化新产品具备的可升级性程度, 减少初期投入, 使得具有高升级潜力的机械产品得到再利用.

1 机械产品升级的含义

与传统的产品再利用策略(如产品再利用和再制造)相比, 机械产品升级可为原有系统带来新功能, 提升产品的性能, 从而提高产品原先功能结构的价值. 机械产品的可升级性反映了产品是否适合进行系统更新和功能提升, 表明了用于产品升级或再次使用的相关技术的可行性^[10]. 因此, 可将产品的可升级性定义为产品本身功能、结构特点与升级目标之间的相一致的程度.

2 机械产品升级潜力评价模型

产品升级潜力的大小可从两方面进行综合评价, 即升级变更程度和升级复杂度. 升级变更程度反映出产品升级后对原产品造成的影响程度, 即

收稿日期: 2019-04-22.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51375246).

第一作者: 邬宏伟(1995-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: 971684414@qq.com

*通信作者: 邓益民(1966-), 男, 安徽舒城人, 博导/教授, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: dengyimin@nbu.edu.cn

考虑到产品升级对产品的前端影响(面向客户);升级复杂度是对产品升级的难易程度进行预判,即产品升级的后端影响(面向设计人员)。

2.1 升级变更程度

升级变更是对机械产品进行升级操作,使得原产品发生结构变化的行为(如结构件的引入、删除和替换等)。产品功能得以实现是各结构部件协同作用的结果,因此对机械产品进行升级再设计操作时必定会使原产品结构发生变化。这些由于升级再设计操作导致变化的结构件(以下统称构件)又可能进一步影响到与之关联的其他构件,在一定程度上形成了由于升级操作而导致的变更传播^[11],使得对产品结构的变更影响越大,可升级性越低。因此,对产品可升级性分析时考虑因产品升级而造成的结构变更程度很有必要。

对产品进行升级再设计操作时,必定会存在直接受影响构件和间接受影响构件,为更好地衡量产品升级变更程度,首先判定构件受何种影响,随后再分析构件的变更情况。直接影响构件意为在升级再设计操作时对目标功能起到直接作用的结构,产品升级必定会使直接影响构件发生变化,例如在对自行车产品升级时,要使其脚踏板转轴具有压电发电功能^[12],则脚踏板转轴为因产品升级所直接影响的构件;此外,若仍需相应地增加部分新构件,这些新构件也属于直接影响构件。间接影响构件为和直接影响构件相关联的部分结构件,当直接影响构件在产品升级中发生变化时,可能会导致与直接影响结构相关联的部分结构发生改变。例如对自行车进行压电发电升级时,脚踏板转轴为直接影响构件,而脚踏板为与之相关联且受其影响需要做出必要改变的构件,故将其称为间接影响构件。在产品升级过程中,间接影响构件和直接影响构件联系越紧密,间接影响结构发生变更的可能性就越大。为了量化分析得出由于升级再设计导致的变更影响程度的大小,参考文献[13],给出了产品升级变更影响度 I 的评价公式为:

$$I = \sum_{l=1}^{C_1} \omega_{1l} \lambda_{1l} \left(1 + \sum_{i=1, i \neq l}^{C_2} \omega_{2i} \lambda_{2i} \varphi_{li} \right), \quad (1)$$

式中: C_1 为直接影响构件的个数; C_2 为间接影响构件的个数; ω_{1l} 为第 l 个直接影响构件的重要性权重; λ_{1l} 为第 l 个直接影响构件发生变更的概率; ω_{2i} 为第

i 个间接影响构件的重要性权重; φ_{li} 为第 l 个直接影响构件和第 i 个间接影响构件的关联性大小; λ_{2i} 为直接影响构件的变更导致间接影响构件发生变更的概率。

为使式(1)得出的值处于(0, 1)之间,对 I 进行对数化处理,即:

$$S(I) = \begin{cases} \log_n I, & I > 1, \\ 0, & I \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n=C_1+C_2$ 为直接影响构件数与间接影响构件数之和。

变更概率可能性大小和结构重要度权重由工程设计人员根据经验得出,详见表 1。

表 1 升级变更可能性及构件重要性判定

变更可能性描述	构件重要性描述	数值
变更概率极大	在结构模块中极其重要	1.0~0.8
变更概率大	在结构模块中重要	0.8~0.6
变更概率较大	在结构模块中较重要	0.6~0.4
变更概率小	在结构模块中一般	0.4~0.2
变更概率极小	在结构模块中不重要	0.2~0

2.2 升级复杂度

产品升级过程的复杂程度在很大程度上影响着产品本身的升级潜力。本文提出了基于设计矩阵和熵理论进行产品升级复杂度的评价。公理化设计将设计过程分为 4 个域^[14],分别为客户需求域、功能域、结构域和过程域(图 1)。AD (Axiomatic Design)理论使得原先各自孤立的设计域得以联系,可有效地减少设计缺陷,使设计更为合理。

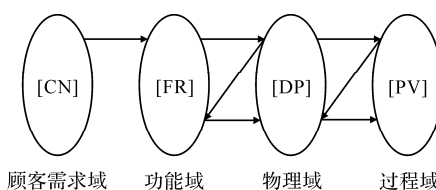


图 1 AD 理论设计域

对产品进行升级操作,会使产品功能结构得到提升,而在产品升级过程中,最困难的是将新增的功能转换为产品结构上的设计。采用公理化设计理论可以从产品的升级总功能出发,在相应的设计结构域中找到总设计参数,再根据总体设计参数进行总功能分解,直至分解到最下层的子功能和其所对应的设计参数为止。由此可以建立功能信息与设计参数相关的设计方程式:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{bmatrix},$$

式中: a_{ij} 表示功能与结构的关联性, 若 $a_{ij}=0$, 表示功能与结构无关联, 反之表示关联, 如 a_{12} 表示 DP_2 与 FR_1 两者关联性.

创建的设计矩阵有 3 种类型, 即无耦合矩阵、解耦矩阵和耦合矩阵. 当设计矩阵为无耦合矩阵(对角矩阵)时, 每个 FR 都有且仅有唯一的 DP 与之对应, 这样的设计即为理想设计, 因其在再设计过程中改变其中的某一个结构参数时, 并不会对其他功能产生影响, 所以无需对再设计方案进行更改, 升级复杂度最小, 将其值设为 0. 若依据再设计方案, 生成的再设计矩阵为三角矩阵或耦合矩阵, 无法满足公理设计的独立公理, 则设计者需要对该矩阵进行解耦, 会增加设计难度与复杂度, 此时可基于信息熵理论对升级复杂度进行计算.

信息熵是由信息论创始人香农提出, 用来描述系统状态的不确定性的概念^[15], 同时也可用来描述系统的复杂度, 信息熵 H 的计算公式为:

$$H = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \quad (3)$$

式中: k 为系数; p_i 为系统事件 i 发生的概率.

产品功能信息复杂度表明: 对产品功能升级时功能分解出的子功能越多, 进行功能升级时相对有更多的设计参数, 产品再设计方案也会更复杂; 反之, 则简单. 产品功能信息复杂度 S 的计算公式为:

$$S(FR) = \sum_i^n n_{FRi} \ln n_{FRi}, \quad (4)$$

式中: n_{FRi} 表示分配给设计参数 DP_i 的功能需求 FR 的数目; n 表示设计参数的数目.

为使功能信息复杂度值处于 $(0, 1)$, 对 $S(FR)$ 进行对数化处理, 即:

$$S'(FR) = \begin{cases} \log_n S(FR), & S(FR) \geq 1, \\ 0, & S(FR) < 1. \end{cases} \quad (5)$$

将设计参数复杂度定义为所有设计参数对应功能需求的非零熵的平均值, 其计算公式为:

$$S(DP) = \begin{cases} (\sum_i^k n_{DPi} \ln n_{DPi}) / k, & k \neq 0, \\ 0, & k = 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中: n_{DPi} 表示功能需求 FR_i 对应 DP 的数目; k 表示

$DP_i \neq 1$ 的 FR 的数目.

同理, 对设计参数复杂度作如下标准化处理:

$$S'(DP) = \begin{cases} \log_n S(DP), & S(DP) \geq 1, \\ 0, & S(DP) < 1. \end{cases} \quad (7)$$

综合产品升级时将产品升级复杂度定义为产品功能信息复杂度与设计参数复杂度之和:

$$S(RE) = S'(FR) + S'(DP). \quad (8)$$

为使产品升级复杂度 $S(RE) \in [0, 1]$, 对其进行标准化处理:

$$S(R) = \log_{2n} S(RE). \quad (9)$$

产品升级存在不确定性, 即升级操作完成后不一定能实现功能需求, 不确定性势必会诱发产品升级的复杂性, 而系统的信息量与复杂性在一定程度上成正比. AD 理论中信息量的数值与熵值相似, 因此熵值越小产品的升级复杂度越低.

2.3 升级潜力

升级变更程度和升级复杂度是衡量产品升级潜力的 2 个指标, 综合考量这 2 个因素, 得到产品升级潜力公式为:

$$S(P) = 1 - [W_I S(I) + W_R S(R)], \quad (10)$$

式中: W_I 与 W_R 分别表示 2 个因素在升级潜力评估中的权重因子, 若在评估过程中发现升级操作对结构变更的影响较大, 则权重因子取值时 $W_I > W_R$, 反之亦然, 而且 2 个权重因子之和为 1. 升级潜力的参考指标值为 0~1, 由专家经过多次升级案例评估后所得. 升级潜力最高为 1, 高为 0.9~0.7, 较高为 0.7~0.5, 中等为 0.5~0.3, 较低为 0.3~0.1, 低为 0.1, 无为 0. 机械产品升级潜力的评估流程如图 2 所示.

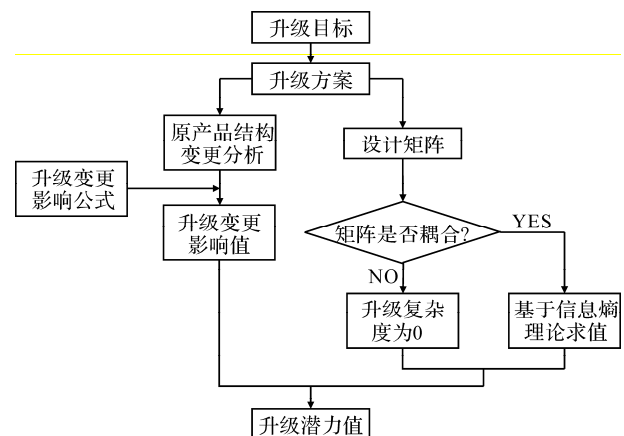


图 2 机械产品升级潜力的评估流程

3 实例分析

液压修井机是一种油田专用的机械设备,其初始的设计原理如图3所示.液压修井机在起出油管时,需要用大功率的电动机,但在卸油管时用较小功率的电动机即可,原先的设计方案统一用大功率的电动机来实现油管的起卸,造成能量浪费,因此有必要对液压修井机进行升级操作.

采用本文提出的评估方案对液压修井机进行升级潜力的评估.为使液压修井机的电动机在整个工作周期内满负荷连续工作,对原先机构执行新增液压蓄能器的升级操作,升级后的设计原理如图4所示.新增的蓄能器可使电动机在卸油管时将多余的能量存入蓄能器中,并在起升油管时释放能量,从而降低了电机的功率消耗.

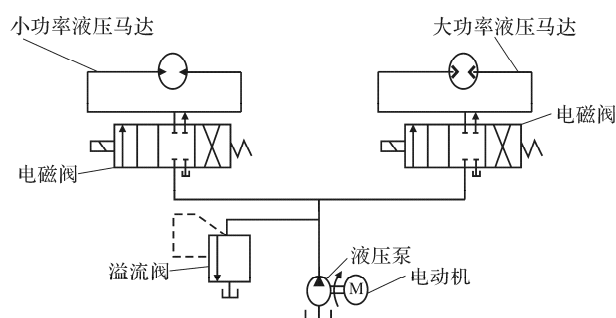


图3 初始方案设计原理

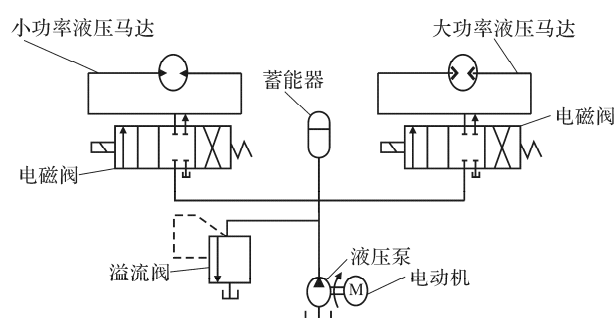


图4 升级后方案设计原理

3.1 变更影响程度计算

在升级方式操作中,直接影响的结构件为蓄能器,而在蓄能器的安装过程中,必定会对液压泵造成一定影响.由于升级导致液压泵发生变更的概率为1,并认为液压泵在机构中的重要度为0.9,因此由于液压泵的安装造成的直接影响为 $0.9 \times 1 = 0.9$.间接影响构件为溢流阀,而工程人员认为溢流阀发生变更的概率和重要性均为0.8,溢流阀与液压泵的关联强度为0.4.因此,利用式(1)可以

算出由于蓄能器的安装而导致的升级变更的影响值为:

$$I = (0.9 \times 1) + (0.9 \times 1 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.4) = 1.13,$$

最后得出 $S(I) = \log_2 1.13 = 0.18$.

3.2 升级复杂度计算

升级操作后的修井机的功能参数可以表示为: FR_1 (起升油管), FR_2 (卸油管), FR_3 (起卸油管时储放能). 其对应的设计结构可以表示为: DP_1 (大功率液压马达绞车), DP_2 (小功率液压马达驱动油管钳), DP_3 (液压蓄能器). 矩阵方程式为:

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & X \\ & X & X \\ & & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix},$$

式中: X 表示数值1,其余表示数值0.根据式(4)~(7),可计算出功能信息复杂度与设计参数复杂度,并对其进行对数化处理.

功能信息复杂度:

$$S(FR) = 1 \ln 1 + 1 \ln 1 + 3 \ln 3 = 3.30,$$

$$S'(FR) = \log_3^{3.3} = 1.09.$$

设计参数复杂度:

$$S(DP) = (2 \ln 2 + 2 \ln 2) / 2 = 1.39,$$

$$S'(DP) = \log_3^{1.4} = 0.31.$$

再根据式(8)和(9),求出产品升级复杂度:

$$S(R) = \log_6 S(RE) = 0.19.$$

3.3 升级潜力计算

根据式(10),认为本次升级操作的变更影响与升级复杂度同等重要,因此权重因子 W_I 和 W_R 均取0.5,最后得出液压修井机的升级潜力值为:

$$S(P) = 1 - (0.5 \times 0.18 + 0.5 \times 0.19) = 0.82.$$

根据上述升级潜力的参考指标值可知,液压修井机面向能量回收问题的升级再设计具有较高的升级潜力.

4 结论

通过分析产品升级对结构变更的影响特性,并结合考虑产品升级得以实现的难易程度,提出了一种机械产品升级潜力的评估模型,为研发人员早期开发机械产品提供了一个评判产品是否值得升级的量化指标,并用实例验证了该评估模型的可行性.

参考文献:

- [1] Huang J, Chen Y, Zhang Z, et al. An affordance-integrated approach for design knowledge reuse[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(10):1569-1585.
- [2] Matsuda A, Shimomura Y, Kondoh S, et al. Upgrade planning for upgradable product design[J]. International Symposium on Environmentally Conscious Design, 2003, 22:231-234.
- [3] Umeda Y, Kondoh S, Shimomura Y, et al. Development of design methodology for upgradable products based on function-behavior-state modeling[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 2005, 19(3):161-182.
- [4] Hamraz B, Caldwell N H M, Ridgman T W, et al. FBS linkage ontology and technique to support engineering change management[J]. Research in Engineering Design, 2015, 26(1):3-35.
- [5] Xing K, Abhary K. A genetic algorithm-based optimisation approach for product upgradability design [J]. Journal of Engineering Design, 2010, 21(5):519-543.
- [6] 涂强, 邓益民, 王君宇. 基于原理实例检索的可变功能产品功能升级再设计[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(4):17-22.
- [7] 杜彦斌, 曹华军, 刘飞, 等. 基于熵权与层次分析法的机床再制造方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1):84-88.
- [8] 杜彦斌, 李成成. 基于可拓理论的重型机床再制造方案评价方法[J]. 制造技术与机床, 2018, 7(5):102-106.
- [9] Sundin E, Bras B. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(9):913-925.
- [10] Xing K, Belusko M, Luong L, et al. An evaluation model of product upgradeability for remanufacture[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(1/2):1-14.
- [11] Shankar P, Morkos B, Summers J D. Reasons for change propagation: A case study in an automotive OEM[J]. Research in Engineering Design, 2012, 23(4):291-303.
- [12] 任泉荣. 自行车脚踏板压电发电装置: 中国, 201610971770X[P]. 2017-03-08.
- [13] Tu Q, Deng Y M, Nee A, et al. Functional upgrading fundamental and performance upgrading priority ranking of adaptable-function products[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 18(3):203-210.
- [14] 朱龙英, 朱如鹏, 刘正埭. 公理化设计理论研究及其应用进展[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(4):43-46.
- [15] 周薇, 李筱菁. 基于信息熵理论的综合评价方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23):5839-5843

Evaluation of mechanical product upgrading potential with consideration of change influence and upgrading complexity

WU Hongwei^{1,2}, YU Yuehui³, DENG Yimin^{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;

3.School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the information entropy theory and the existing research on product structural correlation, this paper proposes an evaluation model of the upgrading potential of mechanical products, which takes into account both the upgrading change influence (at the front end) and the upgrading complexity (at the back end). The proposed model intends to assist the designers in making decisions relating to redesign of mechanical products. Finally, a case study is also presented to demonstrate the feasibility of the proposed evaluation model.

Key words: mechanical product; upgrading change; information entropy; structural correlation

(责任编辑 史小丽)