



中华人民共和国国家标准

GB/T 39589—2020

机械产品零部件模块化设计评价规范

Specifications for evaluation of modular design for parts of mechanical products

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 术语、定义和符号 1

 2.1 术语和定义 1

 2.2 符号 2

3 机械产品零部件模块化设计评价的用途、目标和过程参考模型 2

 3.1 机械产品零部件模块化设计评价的用途 2

 3.2 机械产品零部件模块化设计评价的目标 3

 3.3 机械产品零部件模块化设计评价的过程参考模型 3

4 机械产品零部件模块化设计评价基本原则 4

 4.1 总体最优原则 4

 4.2 简单化原则 4

 4.3 可度量原则 4

 4.4 独立性原则 4

 4.5 通用性原则 4

5 机械产品零部件模块化设计评价指标的参考模型 5

 5.1 机械产品零部件模块化程度评价指标的参考模型 5

 5.2 机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的参考模型 5

 5.3 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的参考模型 7

附录 A（规范性附录） 机械产品零部件模块化程度评价指标的计算方法 9

 A.1 机械产品零部件模块化程度综合评价指标的计算方法 9

 A.2 模块独立性评价指标的计算方法 9

 A.3 模块通用性评价指标的计算方法 9

附录 B（规范性附录） 机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的计算方法 11

 B.1 定制产品综合经济效益提高率的计算方法 11

 B.2 企业响应时间(T)的评价指标的计算方法 11

 B.3 产品质量(Q)评价指标的计算方法 15

 B.4 产品成本(C)的评价指标的计算方法 17

 B.5 满足用户多样化需求(U)的评价指标的计算方法 20

附录 C（规范性附录） 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的计算方法 22

 C.1 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标体系 22

 C.2 产品三废排放评价指标 22

 C.3 产品生命周期能耗评价指标 23

 C.4 资源回收利用率评价指标 23

附录 D (资料性附录) 全自动家用豆浆机模块化设计评价示例 25

 D.1 豆浆机模块化结构和配置设计示意..... 25

 D.2 豆浆机模块化程度评价..... 25

 D.3 豆浆机模块化设计经济效益的评价..... 26

 D.4 豆浆机模块化设计环境友好性的评价..... 28

参考文献 29



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国机械工业联合会提出并归口。

本标准起草单位：浙江大学、中国标准化研究院、沈阳工业大学、中国铁建重工集团股份有限公司、杭州爱科科技股份有限公司、中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司、杭州汽轮机股份有限公司、海尔智家股份有限公司、中机生产力促进中心。

本标准主要起草人：顾新建、顾复、王志强、杨青海、洪岩、王海军、刘宏洋、纪杨建、刘守华、方云科、石浩、陆群峰、孔建强、陈芑熙、代风、田楚楚、杨洁、张武杰、王袭、肖承翔、潘康华。

引 言

当前新一轮科技革命和工业革命正在到来,其目标是要实现大批量定制。对于机械产品,实现大批量定制的关键之一是将个性化和多样化产品中的零部件进行模块化,减少零部件变化的种类,降低产品复杂度,形成较大的零部件成组批量,简化生产过程,低成本、快速满足用户对多样化和个性化产品的需求。

从实践中可得知,机械产品零部件模块化设计具有实施周期长、涉及范围广、不确定因素多等特征,需要对模块化程度、经济效益和环境友好性进行评价,支持模块化设计工作的开展。因此,需要开发一套科学合理的方法帮助企业提高产品模块化设计评价的能力。对于不同的机械产品而言,其零部件模块化设计方法和评价方法也会有所差异。本标准给出的是一种通用的机械产品零部件模块化设计评价指标,可供用户根据实际需求进行选择 and 组合。

注：机械产品零部件模块化设计简称为产品模块化设计。

机械产品零部件模块化设计评价规范

1 范围

本标准规定了机械产品零部件模块化设计评价的基本原则、评价指标的参考模型和计算方法等。

本标准适用于机械产品零部件模块化设计评价,也可为其他产品(如机电一体化产品、电子产品等)的零部件模块化设计提供参考。

2 术语、定义和符号

2.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1.1

模块 module

组成系统的、具有确定功能和标准接口的独立单元。

2.1.2

基本模块 basic module

产品族中所有产品都采用,其形状和特性在这些产品中完全相同的模块。

[GB/T 31982—2015,定义 3.12]

2.1.3

通用模块 generic module

产品族中多个产品采用,其形状和特性在这些产品中完全相同的模块。

[GB/T 31982—2015,定义 3.13]

2.1.4

专用模块 specific module

在产品族中仅被特定产品所采用的、为了满足特定需求(或功能)而专门设计的模块。

[GB/T 31982—2015,定义 3.14]

2.1.5

模块化设计 modular design

将产品的某些要素组合在一起,构成一些具有特定功能的模块,这些模块作为通用性的模块与其他产品要素进行多种组合,构成新的系统,产生多种不同功能或相同功能、不同性能的系列产品的设计方法。

[GB/T 30438—2013,定义 3.4]



2.1.6

产品族 product family

具有相似功能和/或结构的产品集合。

[GB/T 31982—2015,定义 3.9]

示例:基于某一汽车产品平台开发的系列产品属于同一产品族。

2.1.7

产品零部件模块化设计评价 evaluation for modular design of product parts

包括对产品零部件模块化程度、产品零部件模块化设计经济效益和环境友好性的评价。

2.1.8

产品零部件模块化程度 modularization degree of product parts

描述产品零部件模块化本身量的指标。

注 1：主要包括模块独立性和通用性的评价指标。

注 2：模块独立性程度越高意味着产品中模块之间的相互影响越小，模块的可替换性和封装性会随之提升，有助于实现模块设计和制造的专业化分工；模块通用性程度越高则意味着模块在不同产品的使用次数越多，经济效益和环境友好性更好。

2.1.9

模块化产品平台 modular product platform

产品经过模块化设计后形成的基本模块、通用模块和专用模块以及这些模块间关系的集合。

[GB/T 31982—2015, 定义 3.8]

示例：汽车企业基于模块化汽车平台，配置设计出不同型号的汽车型号，在不同汽车型号中大部分零部件是通用的。

2.1.10

产品零部件模块化设计经济效益 economic benefit for modular design of product parts

产品零部件模块化设计所带来的企业经济效益包括缩短用户需求响应时间、提升产品质量、降低产品成本和提高用户需求满意度等方面的改进。

2.1.11

产品零部件模块化设计环境友好性 environmental friendliness for modular design of product parts

产品零部件模块化设计对于资源节约和环境保护所产生的影响。

2.1.12

产品生命周期 product life cycle

包括产品从概念形成到设计、采购、制造、使用至最终废弃后的回收、再制造、再使用及处理等阶段的全过程。



2.2 符号

下列符号适用于本文件。

mzh: 模块化程度综合评价指标；

mdl: 模块独立性评价指标；

注 1：模块独立性又称模块可替换性、模块封装性等。

mgl: 模块功能结构关联性评价指标；

注 2：模块功能结构关联性评价指标与模块独立性评价指标是反比关系。

mt_{y_i}: 模块通用性评价指标, $i=1\sim 4$ 。

注 3：模块通用性又称模块可重用性、模块可再用性、模块通用率等。

3 机械产品零部件模块化设计评价的用途、目标和过程参考模型

3.1 机械产品零部件模块化设计评价的用途

机械产品零部件模块化设计评价是模块化工作中的重要组成部分。模块化设计工作包括模块化产品平台构建(又可分解为产品模块划分和产品模块建模两部分工作)和定制产品模块化设计(包括产品配置设计和模块变型设计)。

注：模块化产品平台构建和定制产品模块化设计过程参见 GB/T 31982—2015。

机械产品零部件模块化设计评价是对模块化产品平台建立和定制产品模块化设计工作成果的评价。机械产品零部件模块化设计评价与产品模块化设计的关系如图 1 所示。产品设计对于产品成本有 70%左右的影响程度。因此,对产品模块化设计工作成果的评价应利用产品全生命周期的数据。

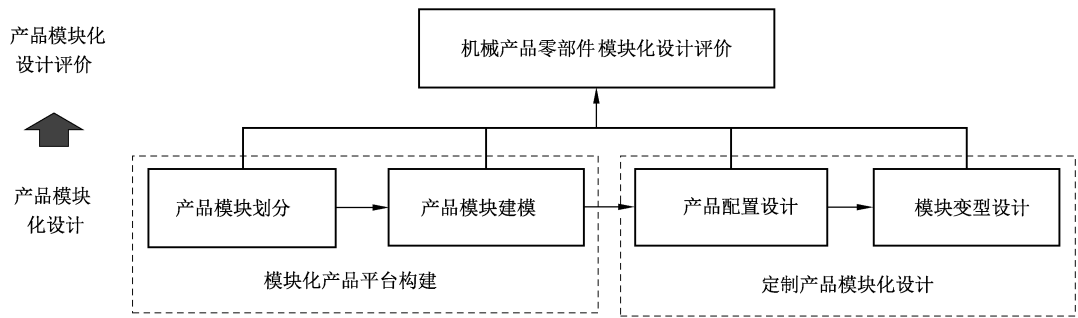


图 1 机械产品零部件模块化设计评价与模块化设计的关系

3.2 机械产品零部件模块化设计评价的目标

机械产品零部件模块化设计评价可分为机械产品零部件模块化程度评价、机械产品零部件模块化设计经济效益评价和环境友好性评价三大部分。

机械产品零部件模块化设计评价的主要目标是：

- a) 通过机械产品零部件模块化程度评价,帮助企业了解机械产品零部件模块化设计的现状和问题,为采取相关改进措施提供依据;
- b) 通过机械产品零部件模块化设计经济效益评价,帮助企业了解和提高模块化零部件设计、制造和服务效率与质量,了解和降低模块化零部件设计、制造和服务成本;
- c) 通过机械产品零部件模块化设计环境友好性评价,帮助企业了解和减少产品生命周期内的能耗、资源消耗和环境污染问题;
- d) 在模块化设计经济效益和环境友好性分别评价后,可根据需要进行模块化设计效益综合评价;模块化设计经济效益评价和环境友好性综合评价中的权重设置可根据实际情况和需求进行权衡考虑,帮助企业了解和提高机械产品零部件模块化设计的总体综合效益。

3.3 机械产品零部件模块化设计评价的过程参考模型

机械产品零部件模块化设计评价的过程参考模型如图 2 所示。

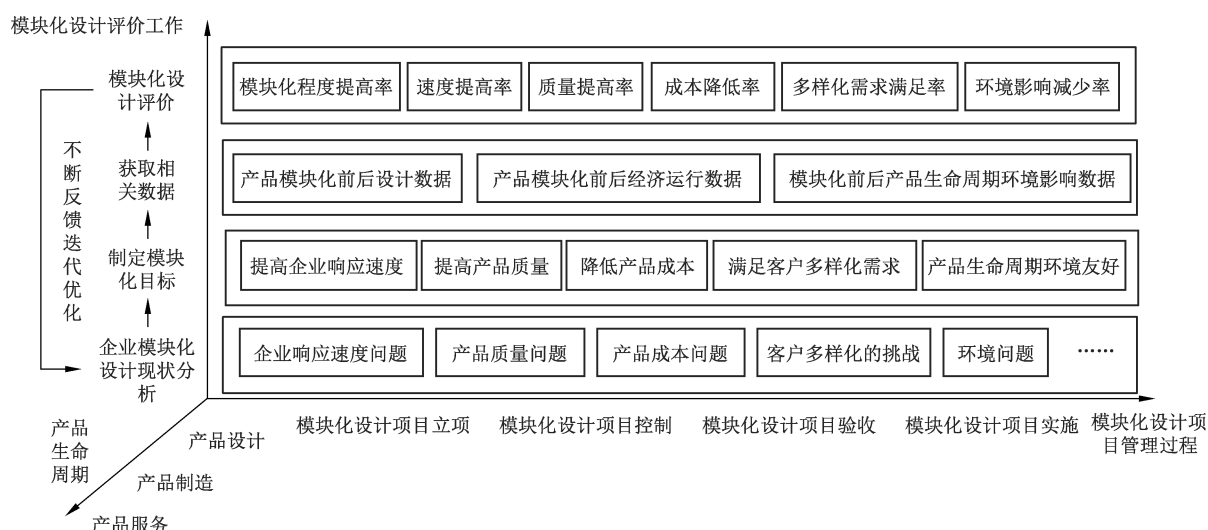


图2 机械产品零部件模块化设计评价的过程参考模型

基于图2所示的产品生命周期维度,在产品的设计、制造和服务等阶段都可提出相应的模块化需求。此外,各阶段还可进一步细分,如服务阶段可细分为:销售、运输、安装、使用、维修、回收等子阶段。机械产品零部件模块化设计可较好满足产品生命周期各个阶段对模块化的需求。

示例:针对大型变压器运输难的问题,可通过模块化设计,实现分模块运输,解决运输难题,节约运输成本。

模块化设计评价工作可在模块化设计项目管理过程维度中的模块化设计项目立项、控制、验收和实施等各个阶段分别进行。

模块化设计评价工作维度包括:企业模块化设计现状分析、制定模块化设计目标、获取相关数据、模块化设计评价等工作环节。



4 机械产品零部件模块化设计评价基本原则

4.1 总体最优原则

在产品零部件模块化设计评价中,应将产品族(空间维)和产品生命周期(时间维)的经济效益和社会效益总体最优作为最终的评价指标。产品社会效益主要考虑产品的环境友好性。

4.2 简单化原则

应采用尽可能少的评价指标,尽可能完整地评价机械产品零部件模块化程度和效益。

4.3 可度量原则

产品模块化设计评价指标尽可能量化,以便使评价尽可能精准和客观。数据是关键,需要在产品模块化设计前后获取、积累和整理相关数据,以便开展量化评价。

4.4 独立性原则

产品模块间的信息、功能、结构等耦合度应尽可能小,以利于提高模块的互换性、可维修性、可重用性和可回收性等。

4.5 通用性原则

产品模块应尽可能在不同产品中通用,有助于提高产品生产批量,降低生产和服务成本。

5 机械产品零部件模块化设计评价指标的参考模型

5.1 机械产品零部件模块化程度评价指标的参考模型

机械产品零部件模块化程度评价的一级指标包括模块独立性和模块通用性,可通过对一级指标的加权求和的方法得到机械产品零部件模块化程度综合评价指标 mzh。机械产品零部件模块化程度评价指标的参考模型如表 1 所示,计算方法见附录 A。

表 1 机械产品零部件模块化程度评价指标的参考模型

模块化程度评价指标	一级指标	二级指标	目的
机械产品零部件模块化程度综合评价指标 mzh	模块独立性评价指标 mdl		提高模块独立性,减少模块之间的相关性
	模块通用性评价指标 mty _i	基于基本模块和通用模块数量的通用性评价指标 mty ₁	增加基本模块和通用模块数量
		基于基本模块和通用模块价值的模块通用性评价指标 mty ₂	提高基本模块和通用模块在产品中的价值比例
		基于模块重复使用次数的模块通用性评价指标 mty ₃	提高模块重复使用次数
		基于模块重复使用次数和价值的模块通用性评价指标 mty ₄	提高高价值模块重复使用次数

产品零部件模块化程度评价是对模块化设计工作自身的评价,可帮助企业了解产品模块化程度,有的放矢地开展产品零部件模块化设计。

5.2 机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的参考模型

机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的参考模型如表 2 所示,对表中的指标可根据产品特点进行选择 and 组合,计算方法见附录 B。对于不同的企业,其机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的权重可能存在差异。

表 2 机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的参考模型

经济效益评价指标	一级指标	二级指标	三级指标	目的
产品综合经济效益提高率 Ψ	产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短量 t 和缩短率 ξ	产品设计时间平均缩短量 t_1 和缩短率 ξ_1	结构设计时间平均缩短量 t_{11} 和缩短率 ξ_{11}	缩短产品结构设计时间
			更改设计时间平均缩短量 t_{12} 和缩短率 ξ_{12}	缩短产品更改设计时间
			工艺设计时间平均缩短量 t_{13} 和缩短率 ξ_{13}	缩短产品工艺设计时间
		产品制造时间平均缩短量 t_2 和缩短率 ξ_2	生产计划时间平均缩短量 t_{21} 和缩短率 ξ_{21}	缩短产品生产计划时间
			外购外协时间平均缩短量 t_{22} 和缩短率 ξ_{22}	缩短零部件外购外协时间
			加工时间平均缩短量 t_{23} 和缩短率 ξ_{23}	缩短零部件加工时间
			装配时间缩短率 ξ_{24}	缩短产品装配时间

表 2 (续)

经济效益评价指标	一级指标	二级指标	三级指标	目的
产品综合经济效益提高率 Ψ	产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短量 t 和缩短率 ξ	产品服务时间平均缩短量 t_3 和缩短率 ξ_3	现场安装时间平均缩短量 t_{31} 和缩短率 ξ_{31}	缩短产品现场安装时间
			产品补货时间平均缩短量 t_{32} 和缩短率 ξ_{32}	缩短产品补货时间
			产品维护时间平均缩短量 t_{33} 和缩短率 ξ_{33}	缩短产品维护时间
			产品拆卸时间平均缩短量 t_{34} 和缩短率 ξ_{34}	缩短产品拆卸时间
		产品模块建立时间平均缩短量 t_4 和缩短率 ξ_4		缩短产品模块建立时间
	产品生命周期中质量平均提升率 q	产品设计质量平均提升率 q_1	结构设计质量平均提升率 q_{11}	提升产品结构设计质量
			工艺设计质量平均提升率 q_{12}	提升产品工艺设计质量
			协同设计质量平均提升率 q_{13}	提升产品协同设计质量
		产品制造过程质量平均提升率 q_2	加工质量平均提升率 q_{21}	提升零部件加工质量
			外协质量平均提升率 q_{22}	提升零部件外协质量
			装配质量平均提升率 q_{23}	提升产品装配质量
		产品服务质量的平均提升率 q_3	安装质量平均提升率 q_{31}	提升产品安装质量
			维护质量平均提升率 q_{32}	提升产品维护质量
	产品生命周期成本平均减少量 c 和减少率 ζ	产品设计成本平均减少量 c_1 和减少率 ζ_1	设计过程成本平均减少量 c_{11} 和减少率 ζ_{11}	减少产品设计过程成本
			试验成本平均减少量 c_{12} 和减少率 ζ_{12}	减少产品试验成本
			协同设计成本平均减少量 c_{13} 和减少率 ζ_{13}	减少产品协同设计成本
		产品制造成本平均减少量 c_2 和减少率 ζ_2	外购成本平均减少量 c_{21} 和减少率 ζ_{22}	减少零部件外购成本
			工装成本平均减少量 c_{22} 和减少率 ζ_{22}	减少工装制造成本
			加工成本平均减少量 c_{23} 和减少率 ζ_{23}	减少零部件加工成本
			装配成本平均减少量 c_{24} 和减少率 ζ_{24}	减少产品装配成本

表 2（续）

经济效益评价指标	一级指标	二级指标	三级指标	目的
产品综合经济效益提高率 Ψ	产品生命周期成本平均减少量 c 和减少率 ζ	产品服务成本平均减少量 c_3 和减少率 ζ_3	安装成本平均减少量 c_{31} 和减少率 ζ_{31}	减少产品安装成本
			维护成本平均减少量 c_{32} 和减少率 ζ_{32}	减少产品维护成本
			拆卸成本平均减少量 c_{33} 和减少率 ζ_{33}	减少产品拆卸成本
		模块材料和模块化平台成本平均减少量 c_4 和减少率 ζ_4	模块材料成本平均减少量 c_{41} 和减少率 ζ_{41}	减少产品模块材料成本
			模块化平台成本平均减少量 c_{42} 和减少率 ζ_{42}	减少产品模块化平台成本
	产品生命周期中用户需求满意度提升率 η	产品设计阶段用户满意度提升率 η_1	产品多样化提升率 η_{11}	提升产品多样化程度
			产品个性化程度提升率 η_{12}	提升产品个性化程度
			产品变型能力提升率 η_{13}	提升产品变型能力
			用户参与设计深度提升率 η_{14}	提升用户参与设计深度
		产品服役阶段用户满意度提升率 η_2	产品生命周期满意度提升率 η_{21}	提升用户的产品生命周期满意度
			产品升级能力提升率 η_{22}	提升用户的产品升级能力

5.3 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的参考模型

机械产品零部件模块化设计有助于减少零部件数量、提高产品族的模块通用化率,有利于实现个性化用户需求下的大批量定制。同时,还可提高产品制造和装配效率,减少能耗和资源消耗。并可通过减少零部件种类和材料种类等,降低库存,提高零部件和材料的回收利用率,提高产品生命周期的环境友好性。


机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的参考模型如表 3 所示,计算方法见附录 C。

表 3 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的参考模型

环境友好性评价指标	一级指标	二级指标	目的
产品生命周期中环境友好性平均提高率 e	产品三废排放平均减少率 e_1	废气排放平均减少率 e_{11}	减少产品生命周期中的废气排放
		废水排放平均减少率 e_{12}	减少产品生命周期中的废水排放
		固体废弃物排放平均减少率 e_{13}	减少产品生命周期中的固体废弃物排放
	产品生命周期能耗平均减少率 e_2	产品制造能耗平均减少率 e_{21}	减少产品制造能耗
		产品使用能耗平均减少率 e_{22}	减少产品使用能耗

表 3（续）

环境友好性 评价指标	一级指标	二级指标	目的
产品生命周期中 环境友好性平均 提高率 e	产品生命周期资源消耗 平均减少率 e_3	零部件种类平均减少率 e_{31}	减少产品中的零部件种类
		零部件回收重用率平均提 高率 e_{32}	提高零部件回收重用率
		材料种类平均减少率 e_{33}	减少产品中的材料种类
		材料回收利用率平均提高 率 e_{34}	提高产品材料回收利用率
		库存积压浪费平均减少 率 e_{35}	减少产品生命周期中各种库存积压 浪费
		材料用量平均减少率 e_{36}	减少产品生命周期中各种材料用量

机械产品零部件模块化设计评价示例参见附录 D。

附录 A (规范性附录)

机械产品零部件模块化程度评价指标的计算方法

A.1 机械产品零部件模块化程度综合评价指标的计算方法

机械产品零部件模块化程度综合评价指标 mzh 的计算如下：

$$mzh = a \times mdl + b \times mty_i$$

式中：

a, b ——权重, a, b 的取值范围为 $0 \sim 1, a + b = 1$ ；

mdl ——模块独立性评价指标；

mty_i ——模块通用性评价指标, $i = 1 \sim 4$ (见表 1)。

可根据企业的数据掌握情况和需求选择权重 a 和 b 。

A.2 模块独立性评价指标的计算方法

机械产品零部件模块化设计需要将产品中相互高度关联零部件解耦, 设计成为彼此松散耦合的模块化产品结构, 即产品由功能和结构相对独立的模块组成。模块独立性越强, 模块之间的功能结构关联性就越弱, 即一个模块功能结构的变化对产品其他模块的影响就越少, 这有利于产品零部件协同设计和制造、模块更新、产品维护和升级等。

示例: 计算机优盘存贮量和速度提高、结构的改变(小型化), 对计算机其他模块的影响就很小, 可单独开发设计。

产品中 m 个模块中的模块 i 与模块 j 的关联性为 $k_{i,j}$, $k_{i,j} = 1$ 表示完全关联, $k_{i,j} = 0$ 表示无关联; $0 \leq k_{i,j} \leq 1, i, j$ 的取值范围为 $1 \sim m$, 则该产品的模块功能结构关联性评价指标 $mg1$ 为:

$$mg1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{i,j} / m^2$$

模块独立性评价指标 mdl 与模块功能结构关联性评价指标 $mg1$ 的关系如下:

$$mdl = 1 - mg1$$

A.3 模块通用性评价指标的计算方法

模块通用性评价方法有多种, 按照所依据的数据量从少到多、计算难度从小到大, 依次是:

a) 基于基本模块和通用模块数量的模块通用性评价指标 1:

$$mty_1 = TM/TP$$

式中:

TM ——已知产品族的不同产品中的基本模块和通用模块种类数量;

TP ——不同产品中的所有模块的数量, 包括基本模块、通用模块和专用模块。

显然, 当产品中不同零部件都为基本模块和通用模块时, 模块通用性为 1。

b) 基于基本模块和通用模块价值的模块通用性评价指标 2:

$$mty_2 = TMV/TPV$$

式中：

TMV ——产品族的不同产品中的基本模块和通用模块的总价值， $TMV = \sum_{i=1}^{m_1} a_i$ ， m_1 表示基本模块和通用模块的总数， a_i 表示第*i*个基本模块或通用模块的价值；

TPV ——产品族的不同产品中的基本模块、通用模块和专用模块的总价值， $TPV = \sum_{i=1}^m b_i$ ， m 表示产品族模块数， b_i 表示第*i*个模块的价值。

示例：汽车底盘和标准螺栓都是通用模块，但两者的价值显著不同。

- c) 基于模块重复使用次数模块通用性评价，即通过模块在产品族的不同产品中的重复使用次数进行评价。通过提高模块在不同产品中的重复使用次数，提高了模块通用性和覆盖率。基本模块和通用模块在产品族的不同产品的使用次数越多，模块通用性越强，成本就越低。模块*i*在产品*j*中使用时 $k_{i,j}=1$ ，不使用时 $k_{i,j}=0$ ， $1 \leq i \leq m$ ， $1 \leq j \leq n$ ，其中*m*为产品族中的不同模块数，*n*为不同产品数，则基于模块重复使用次数的模块通用性评价指标 3：

$$mty_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_{ij} / mn$$

显然，当所有的零部件在产品族所有的产品中都应用的话，这些零部件就都成为基本模块，模块通用性为 1。

- d) 基于模块重复使用次数和价值的模块通用性评价，即对模块在产品族的不同产品中的重复使用次数进行评价，并同时考虑模块*i*的价值 V_i ，则基于模块重复使用次数和价值的模块通用评价指标 4：

$$mty_4 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_{ij} V_i / \sum_{i=1}^m V_i mn$$

附录 B
(规范性附录)

机械产品零部件模块化设计经济效益评价指标的计算方法

B.1 定制产品综合经济效益提高率的计算方法

在表 2 的基础上得到机械产品零部件模块化设计带来的定制产品综合经济效益提高率的计算方法,如图 B.1 所示。模块化设计评价指标具有层次性的特点,需要分解到能够进行量化计算的粒度。不同企业对图中的指标可根据企业和产品特点进行选择 and 组合,也可直接采用一级指标分别进行评价。

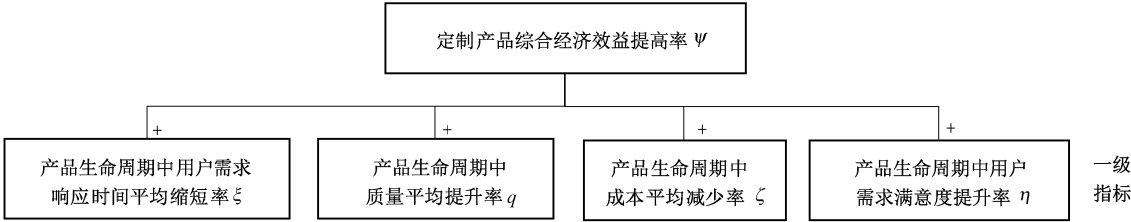


图 B.1 机械产品零部件模块化设计引起的定制产品综合经济效益提高率的计算方法

机械产品零部件模块化设计引起的定制产品综合经济效益提高率 ψ 。

$$\Psi = a_1 \times \xi + a_2 \times q + a_3 \times \zeta + a_4 \times \eta$$
$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$$

式中：

- $a_1、a_2、a_3、a_4$ ——权重系数,由专家打分或通过层次分析法确定；
- ξ ——产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短率；
- q ——产品生命周期中质量平均提升率；
- ζ ——产品生命周期中成本平均减少率；
- η ——产品生命周期中用户需求满意度提升率。

B.2 企业响应时间(T)的评价指标的计算方法

B.2.1 产品生命周期中用户需求响应时间评价指标

图 B.2 描述了企业对产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短量 t 和缩短率 ξ 的计算方法。

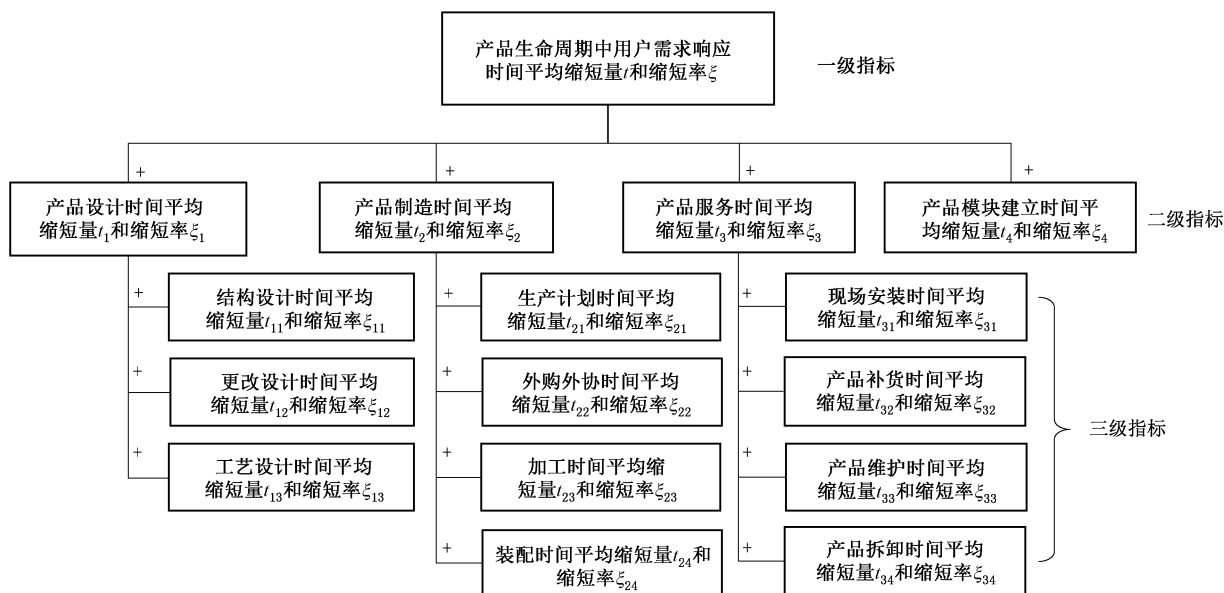


图 B.2 产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短率的指标体系

产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短率 ξ :

$$\xi = (t_{01} - t_{02}) / t_{01} \quad (\xi \leq 1)$$

$$t_{01} = \sum_{i=1}^{m_1} t_{01i} / m_1$$

$$t_{02} = \sum_{i=1}^{m_2} t_{02i} / m_2$$

式中：

t_{01} 、 t_{02} ——产品模块化设计前后产品生命周期中用户需求响应时间的平均值;

m_1 ——产品模块化设计前的定制产品数;

m_2 ——产品模块化设计后的定制产品数。

产品模块化设计带来的企业对产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短量 t (单位统一为工时):

$$t = t_{01} - t_{02}$$

或者：

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$$

式中:

t_1, t_2, t_3 ——模块化设计前、后的产品设计、制造和服务时间平均缩短量;

t_4 ——产品模块建立时间平均缩短量。

产品模块建立工作包括产品模块划分和产品模块建模两大部分,需要额外的时间。如果产品模块建立工作所需的时间大于模块化设计中所节省的时间,从时间上讲一般是不合算的。因此在企业响应速度效益分析中需要考虑产品模块建立工作的时间。

由于模块化设计前产品模块建立时间为 0, 所以模块化设计后的产品模块建立时间平均缩短量 t_4 和缩短率 ξ_4 为负值。因此理论上只有当产品模块化设计中所有订单的响应时间平均缩短量大于产品模块建立时间平均缩短量的绝对值时, 即: $t > 0$ 时, 才会产生企业的用户需求响应时间缩短的正效益。

当企业只关注产品定制阶段的快速响应时, t_4 和 ξ_4 可不必考虑。

产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短率 ξ 的另一种计算方法如下：

$$\xi = a_1 \times \xi_1 + a_2 \times \xi_2 + a_3 \times \xi_3 + a_4 \times \xi_4$$
$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$$

式中：

- a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ——权重系数；
 ξ_1 ——产品设计时间平均缩短率；
 ξ_2 ——产品制造时间平均缩短率；
 ξ_3 ——产品服务时间平均缩短率；
 ξ_4 ——产品模块建立时间平均缩短率。

以下的产品生命周期各个阶段的用户需求响应时间平均缩短量和缩短率的计算方法类似，不再重复说明。

注：模块化产品通过模块的快速重用，提高了定制产品制造企业对用户需求的响应速度，包括产品设计速度、制造速度、维护速度等。

B.2.2 产品设计时间评价指标

B.2.2.1 产品设计时间平均缩短量 t_1 和缩短率 ξ_1

指标：产品模块化设计带来的定制产品设计时间平均缩短量 t_1 和缩短率 ξ_1 。

产品设计时间包括结构设计时间、更改设计时间、工艺设计时间等。

注：模块化产品有利于专业化分工，有助于成本、工艺、制造、采购和售后服务等相关人员在产品研发早期就介入产品研发项目，支持模块信息的继承和重用，提高定制产品设计速度。

B.2.2.2 结构设计时间平均缩短量 t_{11} 和缩短率 ξ_{11}

指标：产品模块化设计带来的定制产品结构设计时间平均缩短量 t_{11} 和缩短率 ξ_{11} 。

注：模块化产品支持模块的快速选择、配置和重用，提高了定制产品结构设计速度。

B.2.2.3 更改设计时间平均缩短量 t_{12} 和缩短率 ξ_{12}

指标：产品模块化设计带来的定制产品更改设计时间平均缩短量 t_{12} 和缩短率 ξ_{12} 。

注：模块化产品所选用的是成熟的模块，有助于提高产品一次成功率，减少产品的更改次数，缩短产品开发周期。

B.2.2.4 工艺设计时间平均缩短量 t_{13} 和缩短率 ξ_{13}

指标：产品模块化设计带来的定制产品工艺设计时间平均缩短量 t_{13} 和缩短率 ξ_{13} 。

注：模块化产品有助于模块工艺的快速选择、修改和重用，提高了工艺设计速度和质量，缩短工艺编制周期，减少工艺编制的工作量。

B.2.3 产品制造时间评价指标

B.2.3.1 产品制造时间平均缩短量 t_2 和缩短率 ξ_2

指标：产品模块化设计带来的定制产品所有制造时间平均缩短量 t_2 和缩短率 ξ_2 。

产品制造时间包括生产计划时间、外购外协时间、加工时间、装配时间等。

注：模块化产品有助于提高产品模块批量、提高模块的可装配性，进而提高了定制产品加工和装配速度。

B.2.3.2 生产计划时间平均缩短量 t_{21} 和缩短率 ξ_{21}

指标：产品模块化设计带来的定制产品生产计划时间平均缩短量 t_{21} 和缩短率 ξ_{21} 。

注：模块化产品由于模块具有标准化和通用化的特点，有助于缩短产品生产计划周期。

B.2.3.3 外购外协时间平均缩短量 t_{22} 和缩短率 ξ_{22}

指标:产品模块化设计带来的定制产品模块外购外协时间平均缩短量 t_{22} 和缩短率 ξ_{22} 。

注:模块化产品有助于协同产品设计、工艺设计和制造,提高外购外协速度和质量。

B.2.3.4 加工时间平均缩短量 t_{23} 和缩短率 ξ_{23}

指标:产品模块化设计带来的定制产品各零部件加工时间平均缩短量 t_{23} 和缩短率 ξ_{23} 。

注:模块化设计的零部件可形成较大批量,有助于采用高效的制造装备和生产模式,优化加工过程,缩短加工周期。

B.2.3.5 装配时间平均缩短量 t_{24} 和缩短率 ξ_{24}

指标:产品模块化设计带来的定制产品装配时间平均缩短量 t_{24} 和缩短率 ξ_{24} 。

注:模块化产品有助于采用高效的制造装备和生产模式,优化装配过程,缩短装配时间;支持模块化供货,有助于缩短产品装配时间,快速响应用户需求。

B.2.4 产品服务时间评价指标

B.2.4.1 产品服务时间平均缩短量 t_3 和缩短率 ξ_3

指标:产品模块化设计带来的定制产品服务时间平均缩短量 t_3 和缩短率 ξ_3 。

产品服务时间包括现场安装时间、产品补货时间、产品维护时间、产品拆卸时间等。

注:模块化产品有助于提高模块批量和可维护性等,提高定制产品服务速度。

B.2.4.2 现场安装时间平均缩短量 t_{31} 和缩短率 ξ_{31}

指标:产品模块化设计带来的定制产品现场安装时间平均缩短量 t_{31} 和缩短率 ξ_{31} 。

注:模块化产品有助于事先预制好模块,运输到用户现场进行安装,缩短现场安装时间。

B.2.4.3 产品补货时间平均缩短量 t_{32} 和缩短率 ξ_{32}

指标:产品模块化设计带来的定制产品补货时间平均缩短量 t_{32} 和缩短率 ξ_{32} 。

注:模块化产品制造时间缩短,有助于产品在销售期间的快速补货,达到增加销量、减少库存的目的。

B.2.4.4 产品维护时间平均缩短量 t_{33} 和缩短率 ξ_{33}

指标:产品模块化设计带来的定制产品维护时间平均缩短量 t_{33} 和缩短率 ξ_{33} 。

注:在产品维护中,模块化产品便于快速置换模块,缩短产品维护时间,降低维护对产品使用的影响,同时能够显著减少模块配件的库存量。

B.2.4.5 产品拆卸时间平均缩短量 t_{34} 和缩短率 ξ_{34}

指标:产品模块化设计带来的定制产品拆卸时间平均缩短量 t_{34} 和缩短率 ξ_{34} 。

注:产品零部件模块化有助于快速产品拆卸,缩短产品拆卸时间。

B.2.5 产品模块建立时间平均缩短量 t_4 和缩短率 ξ_4

指标:产品模块和产品模块化平台建立所需要的时间平均缩短量 t_4 和缩短率 ξ_4 。

产品模块和产品模块化平台建立需要时间,但该建立工作一般会使订单产品的设计、制造和服务时间大为减少,所以 t_4 和 ξ_4 的评价应与订单产品的设计、制造和服务时间的缩短量和缩短率一起集成评价。

B.3 产品质量(Q)评价指标的计算方法

B.3.1 产品生命周期中质量平均提升率指标的计算方法

图 B.3 描述了产品质量(Q)的评价指标体系。

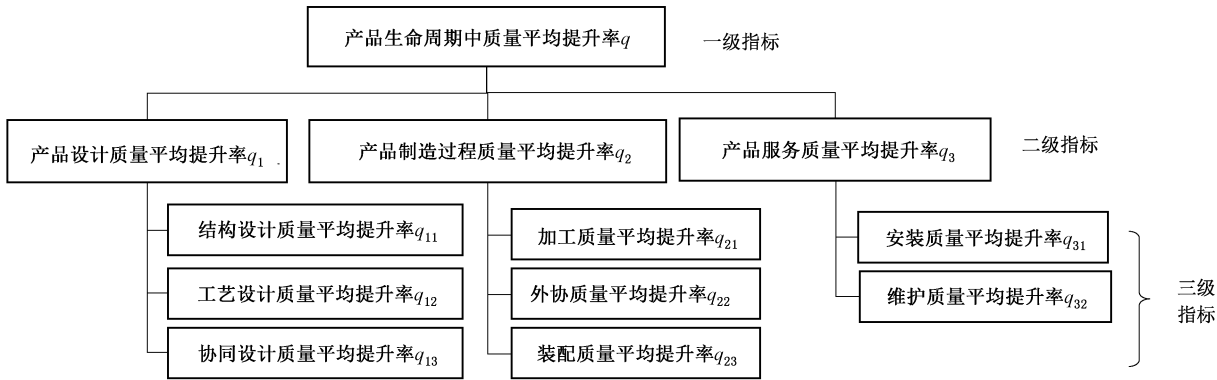


图 B.3 产品质量(Q)的评价指标体系

产品质量(Q)指标采用产品生命周期中质量平均提升率(也可称为质量问题平均减少率、错误平均减少率) q ：

$$q = (n_1 - n_2) / n_1$$

式中：

n_1 ——模块化设计前定制产品生命周期中的质量问题数量；

n_2 ——模块化设计后定制产品生命周期中的质量问题数量。

注：在模块化产品设计、制造和维护中，由于大量基本模块和通用模块是经过实践反复使用和考验的，因而具有较高的质量。

或者：

$$q = a_1 \times q_1 + a_2 \times q_2 + a_3 \times q_3$$
$$a_1 + a_2 + a_3 = 1$$



式中：

a_1 、 a_2 、 a_3 ——权重系数；

q_1 ——产品设计质量平均提升率；

q_2 ——产品制造过程质量平均提升率；

q_3 ——产品服务质量平均提升率。

B.3.2 产品设计质量评价指标

B.3.2.1 产品设计质量平均提升率 q_1

指标：模块化设计带来的产品设计质量平均提升率 q_1 。

产品设计质量包括结构设计质量、工艺设计质量、协同设计质量等。

注：根据统计，产品的质量问題中有 75% 是由于产品开发阶段引起的，而 80% 质量问题的更改工作是在产品制造阶段或后续阶段完成的。处理质量问题的时间越是滞后，所引起的连带质量问题就越多，处理质量问题所需要的费用也就越高。利用成熟的产品基本模块和通用模块可显著减少质量问题。

B.3.2.2 结构设计质量平均提升率 q_{11}

指标：产品模块化设计带来的产品结构设计质量平均提升率 q_{11} 。

注：在模块化产品设计中，大量的模块是基本和通用模块，经实践验证，产品结构设计质量问题得到大幅度减少。

B.3.2.3 工艺设计质量平均提升率 q_{12}

指标：产品模块化设计带来的工艺设计质量平均提升率 q_{12} 。

注：在模块化产品工艺设计中，可基于基本和通用模块的典型工艺进行变型设计，有助于保证产品工艺质量。因为典型工艺是经过多次应用实践、不断完善成果。

B.3.2.4 协同设计质量平均提升率 q_{13}

指标：产品模块化设计带来的协同设计质量平均提升率 q_{13} 。

注：模块化设计有助于专业化分工设计，供应商专注设计某一类模块，有助于提高模块的质量。

B.3.3 产品制造过程评价指标

B.3.3.1 产品制造过程质量平均提升率 q_2

指标：产品模块化设计带来的产品制造和装配质量平均提升率 q_2 。

产品制造过程质量包括加工质量、外协质量、装配质量等。

注：产品模块化设计有助于提高基本和通用模块的生产批量，同时这些模块经过多次生产过程，因而提升了产品制造和装配质量。

B.3.3.2 加工质量平均提升率 q_{21}

指标：产品模块化设计带来的产品零部件加工质量平均提升率 q_{21} 。

注：基本和通用模块经过实践反复使用和考验的，并可采用高效的制造装备加工，因此具有较稳定的加工质量。

B.3.3.3 外协质量平均提升率 q_{22}

指标：产品模块化设计带来的产品零部件外协质量平均提升率 q_{22} 。

注：外协企业专业生产某一类模块，批量大，可采用高效的制造装备，有助于提高模块的质量。

B.3.3.4 装配质量平均提升率 q_{23}

指标：产品模块化设计带来的产品装配质量平均提升率 q_{23} 。

注：在模块化产品装配中，由于采用了大量的基本和通用模块，有助于提高装配过程的标准化程度，进而提高装配质量。

B.3.4 产品服务评价评价指标

B.3.4.1 产品服务质量平均提升率 q_3

指标：产品模块化设计带来的产品服务平均提升率 q_3 。

产品服务包括安装质量、维护质量等。

注：在产品模块化设计中，由于模块容易分解和更换，有助于提高定制产品的服务质量。

B.3.4.2 安装质量平均提升率 q_{31}

指标：产品模块化设计带来的定制产品安装质量平均提升率 q_{31} 。

注：在模块化产品安装中，由于模块具有易分解和组合的特点，因此，可提高产品安装质量。

B.3.4.3 维护质量平均提升率 q_{32}

指标：产品模块化设计带来的维护质量平均提升率 q_{32} 。

注：在模块化产品使用维护中，由于大量模块是基本和通用模块，经过实践反复使用和考验的，并可采用高效的产品维护手段，因此可提高产品维护质量。

B.4 产品成本(C)的评价指标的计算方法

B.4.1 产品生命周期成本减少率

图 B.4 描述了产品成本(C)的评价指标体系。

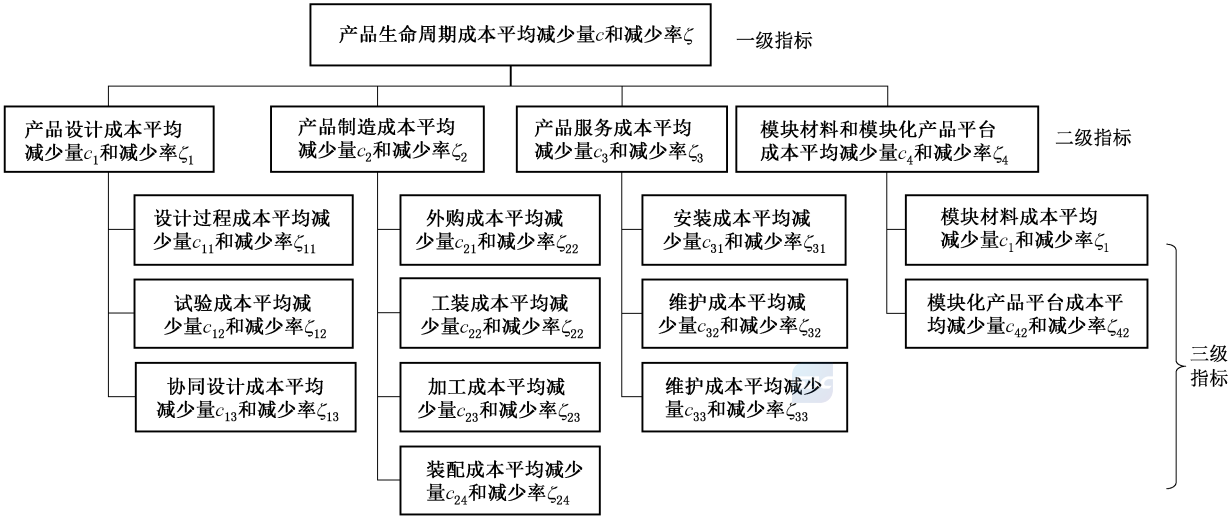


图 B.4 产品成本(C)的评价指标体系

产品模块化设计带来的产品生命周期成本平均减少率 ζ ：

$$\zeta = (c_{01} - c_{02}) / c_{01} (\zeta \leq 1)$$

式中：

c_{01} ——模块化设计前定制产品生命周期平均成本量，单位为人民币元；

c_{02} ——是模块化设计后定制产品生命周期平均成本量，单位为人民币元。

或者：

$$\zeta = a_1 \times \zeta_1 + a_2 \times \zeta_2 + a_3 \times \zeta_3 + a_4 \times \zeta_4$$
$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$$

式中：

$a_1、a_2、a_3、a_4$ ——权重系数；

ζ_1 ——产品设计成本平均减少率；

ζ_2 ——产品制造成本平均减少率；

ζ_3 ——产品服务成本平均减少率；

ζ_4 ——模块材料和模块化平台成本平均减少率。

产品模块化设计带来的产品生命周期成本平均减少量 c 可由产品设计、制造和服务时间成本平均减少量 $c_1、c_2、c_3$ 与模块材料和模块化产品平台成本平均减少量 c_4 相加得到。

注：通过模块化设计，基本和通用模块数量增加，专用模块数量减少，从而有助于实现通用模块的标准化，提高基本和通用模块的比例。在模块化产品设计、制造、使用和维护中，由于大量模块是基本和通用模块，可重复使用、批量生产，从而降低成本。

B.4.2 产品设计成本评价指标

B.4.2.1 产品设计成本平均减少量 c_1 和减少率 ζ_1

指标：产品模块化设计带来的定制产品设计成本平均减少量 c_1 和减少率 ζ_1 。

产品设计成本包括设计过程成本、试验成本、协同设计成本等。

注：在模块化产品设计中，通过模块和信息的继承和重用，降低了定制产品设计成本。

B.4.2.2 设计过程成本平均减少量 c_{11} 和减少率 ζ_{11}

指标：产品模块化设计带来的定制产品设计过程成本平均减少量 c_{11} 和减少率 ζ_{11} 。

注：在模块化产品设计中，对于整个生产过程如销售、采购、生产计划管理、设计、工艺、加工等过程都有现成的资料可供使用，从而降低了产品设计成本。

B.4.2.3 试验成本平均减少量 c_{12} 和减少率 ζ_{12}

指标：产品模块化设计带来的试验成本平均减少量 c_{12} 和减少率 ζ_{12} 。

注：在模块化产品设计制造中，由于大量模块是经过实践反复使用和考验的，并可通过计算机仿真等方法，达到减少产品试验次数的目的，从而降低产品试验成本。

B.4.2.4 协同设计成本平均减少量 c_{13} 和减少率 ζ_{13}

指标：产品模块化设计带来的定制产品协同设计成本平均减少量 c_{13} 和减少率 ζ_{13} 。

注：模块化产品能够在产品设计初期就让供应商参与，有助于降低成本；模块化产品容易分解和集成，容易协同设计，有助于降低产品协同设计成本。

B.4.3 产品制造成本评价指

B.4.3.1 产品制造成本平均减少量 c_2 和减少率 ζ_2

指标：产品模块化设计带来的定制产品制造成本平均减少量 c_2 和减少率 ζ_2 。

产品制造成本包括外购成本、工装成本、加工成本、装配成本等。

注：基本和通用模块批量较大，降低了定制产品制造成本。

B.4.3.2 外购成本平均减少量 c_{21} 和减少率 ζ_{21}

指标：产品模块化设计带来的定制产品零部件平均外购成本平均减少量 c_{21} 和减少率 ζ_{21} 。

注：通过模块化设计，采购的基本和通用模块的比例增加，其成本相对要低，因此所需要的定制产品零部件外购平均成本就相应减少。

B.4.3.3 工装成本平均减少量 c_{22} 和减少率 ζ_{22}

指标：产品模块化设计带来的定制产品所分摊的工装成本平均减少量 c_{22} 和减少率 ζ_{22} 。

注：在基本和通用模块制造中，由于模块有一定的批量和较长的生命周期，所以可采用高效的工装，降低单个模块的工装成本，最终减少各产品所分摊的工装平均成本。

B.4.3.4 加工成本平均减少量 c_{23} 和减少率 ζ_{23}

指标：产品模块化设计带来的定制产品平均加工成本平均减少量 c_{23} 和减少率 ζ_{23} 。

注：由于基本和通用模块批量增加，准备时间减少、成本降低，并可采用高效加工装备，可显著减少产品加工成本。

B.4.3.5 装配成本平均减少量 c_{24} 和减少率 ζ_{24}

指标：产品模块化设计带来的定制产品平均装配成本平均减少量 c_{24} 和减少率 ζ_{24} 。

注：通过模块化设计，模块的装配更简单和方便，可显著减少产品装配成本。

B.4.4 产品服务成本评价指标

B.4.4.1 产品服务成本平均减少量 c_3 和减少率 ζ_3

指标：产品模块化设计带来的定制产品平均服务成本平均减少量 c_3 和减少率 ζ_3 。

产品服务成本包括安装成本、维护成本、拆卸成本等。

注：在模块化产品服务中，基本和通用模块的分解、维护等比较方便，降低了定制产品服务成本。

B.4.4.2 安装成本平均减少量 c_{31} 和减少率 ζ_{31}

指标：产品模块化设计带来的定制产品平均安装成本平均减少量 c_{31} 和减少率 ζ_{31} 。

注：对于一些安装环境比较恶劣的大型复杂产品，如海上平台，生产企业将大粒度的模块运到用户现场，可降低产品安装成本。

B.4.4.3 维护成本平均减少量 c_{32} 和减少率 ζ_{32}

指标：产品模块化设计带来的定制产品维护成本平均减少量 c_{32} 和减少率 ζ_{32} 。

注：模块化产品的模块间的关系比较简单并且接口标准化，因此故障诊断相对容易，模块更换方便，从而减少了产品维护成本。

B.4.4.4 拆卸成本平均减少量 c_{33} 和减少率 ζ_{33}

指标：产品模块化设计带来的定制产品拆卸成本平均减少量 c_{33} 和减少率 ζ_{33} 。

注：基本和通用模块接口标准化方便产品的拆卸，从而减少产品拆卸成本。

B.4.5 模块材料和模块化产品平台成本评价指标

B.4.5.1 模块材料和模块化产品平台成本平均减少量 c_4 和减少率 ζ_4

指标：模块材料和模块化产品平台成本平均减少量 c_4 和减少率 ζ_4 。

注：模块化产品平台构建需要成本，基本和通用模块材料一般也有所增加，而基于平台的模块化产品可减少成本，需要综合权衡，使总体成本减少。

B.4.5.2 模块材料成本平均减少量 c_{41} 和减少率 ζ_{41}

指标：模块材料成本平均减少量 c_{41} 和减少率 ζ_{41} 。

注：因为产品零部件模块化设计同时兼顾各种用户的要求（包括潜在的、可能的要求），基本和通用模块结构往往设计保守，具有较大的产品覆盖面，因而其材料成本要高些， c_{41} 和 ζ_{41} 往往是负值。因此，不仅需要进行全面综合的成本分析，还应注意减少基本和通用模块的材料成本。

B.4.5.3 模块化产品平台成本平均减少量 c_{42} 和减少率 ζ_{42}

指标：模块化产品平台成本平均减少量 c_{42} 和减少率 ζ_{42} 。

注：模块化产品平台构建需要投入大量的工时和费用，包括样机开发，从而会造成开发设计成本的提高。在模块化产品的整个生命过程中还需经常对模块化产品平台进行修改和完善，也需要成本。 c_{42} 和 ζ_{42} 是模块化产品平台构建成本平均减少量和减少率，是由模块化设计前的成本（为零）减去模块化产品平台构建成本得到，因此为负值。所以，不仅需要注意减少模块化产品平台构建成本，更需要进行全面综合的成本分析，使产品生命周期成本最低。

B.5 满足用户多样化需求(U)的评价指标的计算方法

B.5.1 产品生命周期中用户需求满意度提升率

图 B.5 描述了满足用户多样化需求(U)的评价指标体系。

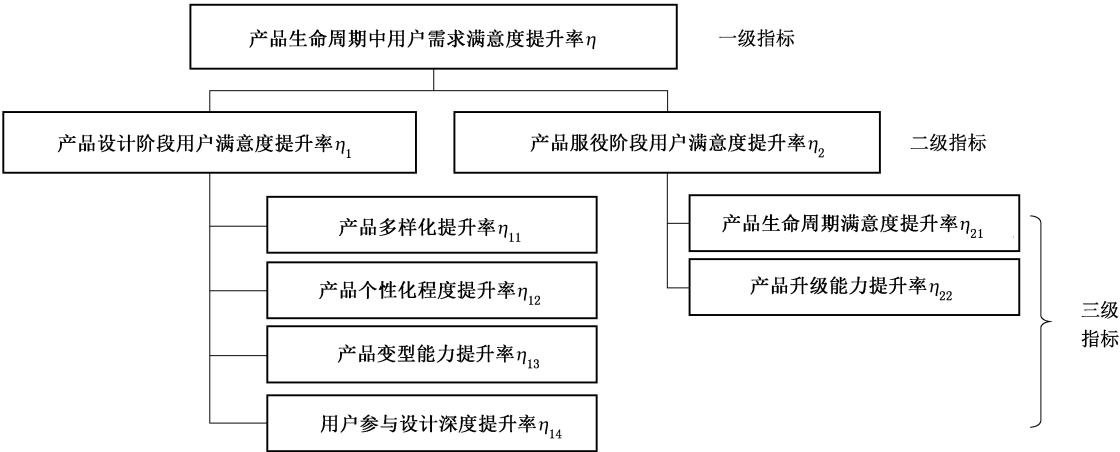


图 B.5 满足用户多样化需求(U)的评价指标体系

满足用户多样化需求(U)的评价指标主要是产品模块化设计带来的产品生命周期中用户需求满意度提升率 η ：

$$\eta = (u_{01} - u_{02}) / u_{01}$$

式中：

u_{01} ——模块化设计后产品生命周期中用户需求满意度；

u_{02} ——模块化设计前产品生命周期中用户需求满意度。

注：模块化产品通过模块的组合和变型，可较好地满足用户在产品生命周期中的多样化需求。

或者：

$$\eta = a_1 \times \eta_1 + a_2 \times \eta_2$$
$$a_1 + a_2 = 1$$

式中：

a_1 、 a_2 ——权重系数；

η_1 ——产品设计阶段用户满意度提升率；

η_2 ——产品服役阶段用户满意度提升率。

B.5.2 产品设计阶段用户满意度评价指标

B.5.2.1 产品设计阶段用户满意度提升率 η_1



指标：产品模块化设计带来的定制产品设计阶段用户满意度提升率 η_1 。

产品设计阶段用户满意度包括产品多样化、产品个性化程度、产品变型能力、用户参与设计深度等。

注：模块化产品可快速和低成本地实现满足用户多样化和个性化需求，提高了用户对定制产品设计的满意度。

B.5.2.2 产品多样化提升率 η_{11}

指标：产品模块化设计带来的对用户有价值的产品多样化提升率 η_{11} 。

注：模块化产品容易扩展产品功能，通过内部少量模块的不同组合，实现产品外部功能的多样化。当然这种产品多样化对用户是有价值的。

B.5.2.3 产品个性化程度提升率 η_{12}

指标：产品模块化设计带来的定制产品个性化程度提升率 η_{12} 。

注：产品零部件模块化可在低成本和短交货期的前提下，显著提高模块配置的个性化程度。

B.5.2.4 产品变型能力提升率 η_{13}

指标：产品模块化设计带来的定制产品变型能力提升率 η_{13} 。

注：产品零部件模块化可在低成本和短交货期的前提下，提高基本和通用模块变型能力。

B.5.2.5 用户参与设计深度提升率 η_{14}

指标：产品模块化带来的定制产品设计中用户参与设计深度提升率 η_{14} 。

注：用户参与设计正在成为产品设计的一种发展趋势，一方面满足用户体验需求，另一方面有助于企业获取用户需求。模块化产品的模块间的关系比较简单，并且接口标准化，因此用户容易参与产品设计。用户参与设计的深度可分为：配置设计、变型设计、自主设计等。

B.5.3 产品服役阶段用户评价指标

B.5.3.1 产品服役阶段用户满意度提升率 η_2

指标：产品模块化设计带来的定制产品服役阶段的用户满意度提升率 η_2 。

产品服役阶段用户满意度包括产品生命周期满意度、产品升级能力等。

注：在模块化产品服役阶段，通过模块的快速升级等，有助于提高用户满意度。

B.5.3.2 产品生命周期满意度提升率 η_{21}

指标：产品模块化设计带来的用户的产品生命周期满意度提升率 η_{21} 。

注：模块的互换性好，可为用户提供较好的备品备件服务；由于对于制造厂家来说产品基本和通用模块使用较多，因而有助于减少使用时故障出现的概率；产品模块的故障诊断相对容易、更换速度较快。

B.5.3.3 产品升级能力提升率 η_{22}

指标：产品模块化设计带来的定制产品升级能力提升率 η_{22} 。

注：模块化产品可通过更换模块进行升级，满足用户对产品性能的新需求和产品模块升级的需要。

附录 C

(规范性附录)

机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标的计算方法

C.1 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标体系

机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标体系的参考模型如图 C.1 所示。

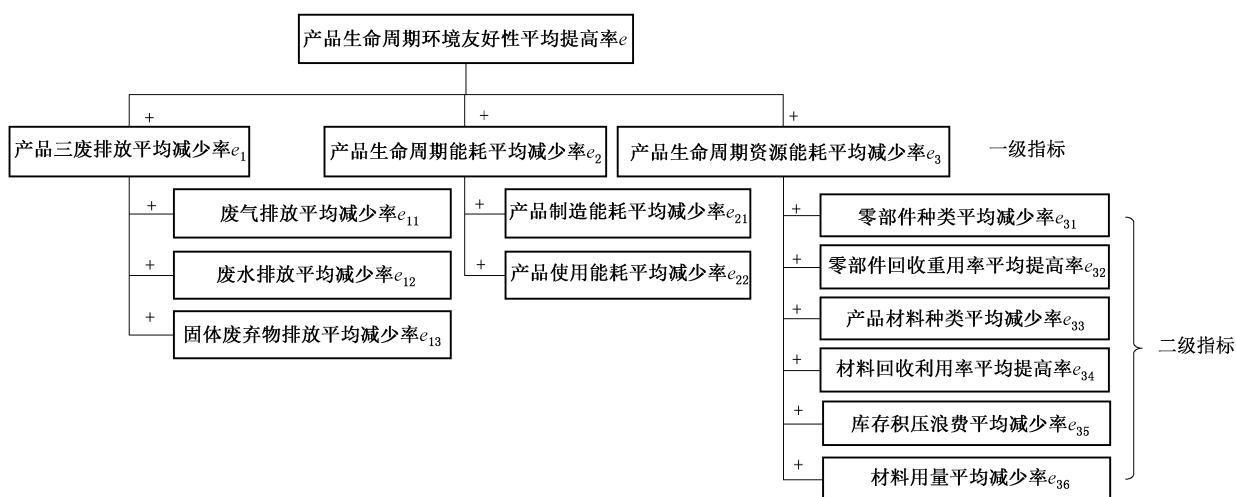


图 C.1 机械产品零部件模块化设计环境友好性评价指标体系的参考模型

机械产品零部件模块化设计环境友好性(E)的评价指标:产品生命周期环境友好性平均提高率 e 。

$$e = (e_{01} - e_{02}) / e_{01}$$

式中:

e_{01} ——模块化设计后产品生命周期平均环境友好度;

e_{02} ——模块化设计前产品生命周期平均环境友好度。

或者:

$$e = a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3$$

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1$$

式中:

a_1 、 a_2 、 a_3 ——权重系数;

e_1 ——产品三废排放平均减少率;

e_2 ——产品生命周期能耗平均减少率;

e_3 ——资源回收利用率平均提高率。

注:模块化产品通过减少产品中的零件种类数量、形成较大的成组加工批量、实现分工专业化、降低库存等,实现产品和过程的环境友好。

C.2 产品三废排放评价指标

C.2.1 产品三废排放平均减少率 e_1

指标:产品模块化设计带来的定制产品生命周期中发生的三废(废气、废水、固体废弃物)排放的平

均减少率 e_1 。

注：模块化产品中的基本和通用模块有较大批量，可采用高效的加工装备，可减少维修用的配件，方便维修，有效降低了定制产品生命周期中的三废排放量。

C.2.2 废气排放平均减少率 e_{11}

指标：产品模块化设计带来的定制产品生命周期中发生的废气排放的平均减少率 e_{11} 。

C.2.3 废水排放平均减少率 e_{12}

指标：产品模块化设计带来的定制产品生命周期中发生的废水排放的平均减少率 e_{12} 。

C.2.4 废弃物平均减少率 e_{13}

指标：产品模块化设计带来的定制产品生命周期中发生的固体废弃物排放的平均减少率 e_{13} 。

C.3 产品生命周期能耗评价指标

C.3.1 产品生命周期能耗平均减少率 e_2

指标：产品模块化设计带来的定制产品生命周期能耗平均减少率 e_2 。

产品生命周期能耗包括产品制造能耗、产品使用能耗等。

注：模块化产品可实现专业化分工，提高生产效率，降低能耗；模块化产品便于维护，可保持较高的用能效率。

C.3.2 产品制造能耗平均减少率 e_{21}

指标：产品模块化设计带来的定制产品制造能耗平均减少率 e_{21} 。

注：通过模块化，将相似零件尽可能归并处理后，可采用高效的制造方法，达到降低产品制造能耗的目的。

C.3.3 产品使用能耗平均减少率 e_{22}

指标：产品模块化设计带来的定制产品使用能耗平均减少率 e_{22} 。

注：模块化的能耗产品的维修更加方便，可更有效进行产品能耗监控和保持低能耗状态，达到降低产品使用能耗的目的。

C.4 资源回收利用率评价指标

C.4.1 资源回收利用率平均提高率 e_3

指标：产品模块化设计带来的定制产品资源回收利用率平均提高率 e_3 。

资源回收利用率包括零部件种类减少率、零部件回收重用率、产品材料种类减少率、库存积压浪费减少率、材料用量减少率等。

注：在模块化产品设计中，通过减少产品中的零件和材料种类数量、提高产品的可拆卸性，方便零件的再利用、再制造和材料回收利用。

C.4.2 零部件种类平均减少率 e_{31}

指标：产品模块化设计带来的定制产品中零部件种类平均减少率 e_{31} 。

注：通过模块化，将相似零件归并处理，减少了产品中零部件种类数量的比例，有利于降低零件加工成本，也方便产品拆卸回收处理。

C.4.3 零部件回收重用率平均提高率 e_{32}

指标:产品模块化设计带来的定制产品中零部件回收重用率的平均提高率 e_{32} 。

注:模块的生命周期较长,可在不同产品中应用,因此提高了零件回收重用率。

C.4.4 产品材料种类平均减少率 e_{33}

指标:产品模块化设计带来的定制产品材料种类的平均减少率 e_{33} 。

注:在产品模块化设计中,同一模块中的零件尽可能采用相同材料,减少材料种类数量,有利于材料的回收处理。

C.4.5 材料回收利用率平均提高率 e_{34}

指标:产品模块化设计带来的定制产品中材料回收利用率的平均提高率 e_{34} 。

注:在产品模块化设计中,模块的拆卸比较方便,并且同一模块中的零件尽可能采用相同材料,可提高材料回收利用率。

C.4.6 库存积压浪费平均减少率 e_{35}

指标:产品模块化设计带来的定制产品库存积压的平均减少率 e_{35} 。

注:模块化产品的设计和制造周期缩短,用户的个性化需求满足程度高,定制点移向用户端,零部件通用性强和重用度高,可显著减少各种库存积压所带来的浪费。

C.4.7 材料用量平均减少率 e_{36}

指标:产品模块化设计带来的定制产品中材料用量平均减少率 e_{36} 。

注:因为产品零部件模块化同时兼顾各种用户的要求(包括潜在的、可能的要求),模块化产品的结构块往往设计得过于保守,因而其材料用量较高,所以材料用量减少率往往是负值。因此需要全面综合权衡。

附录 D
(资料性附录)

全自动家用豆浆机模块化设计评价示例

D.1 豆浆机模块化结构和配置设计示意

全自动家用豆浆机的主要模块结构如图 D.1。

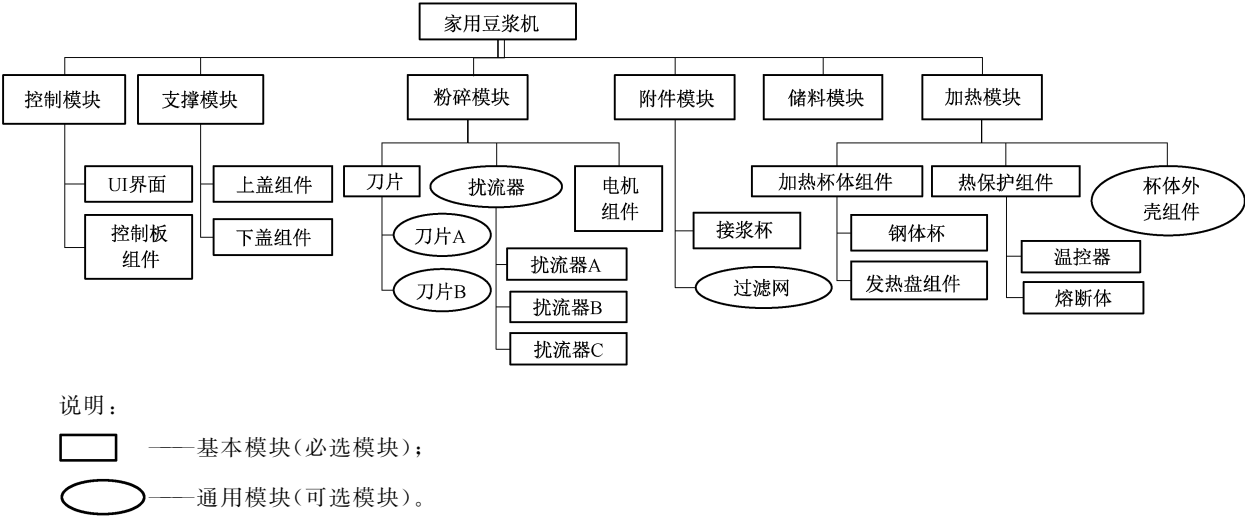


图 D.1 全自动家用豆浆机的主要模块结构

D.2 豆浆机模块化程度评价

D.2.1 豆浆机模块独立性评价

豆浆机一级模块共有粉碎模块、加热模块、控制模块、支撑模块、储料模块、附件模块。分别为模块 1~6(见表 D.1),模块 i 与模块 j 的关联性为 $k_{i,j}$, $k_{i,j}$ 取值 0~1, i,j 的取值范围为 1~6, $k_{i,j}$ 取值见表 D.1。

表 D.1 模块之间的关联性

关联性 $k_{i,j}$	1 粉碎模块	2 加热模块	3 控制与交互模块	4 储料模块	5 结构支撑模块	6 辅助模块
1 粉碎模块	1	0.2	0.8	0	0.5	0
2 加热模块	0.2	1	0.8	0	0.3	0
3 控制模块	0.8	0.8	1	0.2	0.3	0
4 储料模块	0	0	0.2	1	0.4	0
5 支撑模块	0.5	0.3	0.3	0.4	1	0

表 D.1 (续)

关联性 $k_{i,j}$	1 粉碎模块	2 加热模块	3 控制与交互模块	4 储料模块	5 结构支撑模块	6 辅助模块
6 附件模块	0	0	0	0	0	1
关联性定义说明： 完全关联： $k=1$ 强关联： $0.8 \leq k < 1$ 有关联： $0.2 \leq k < 0.8$ 弱关联： $0 < k < 0.2$ 无关联： $k=0$						

则豆浆机产品中 6 个模块之间的关联性为：

$$\text{mgl} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{i,j} / m^2 = 0.36$$

豆浆机的模块独立性为：

$$\text{mdl} = 1 - \text{mgl} = 0.64$$

D.2.2 豆浆机模块通用性评价

由于豆浆机的模块均为基本模块和通用模块，因此，豆浆机模块通用性评价指标 $\text{mty}=1$ 。

D.3 豆浆机模块化设计经济效益的评价

D.3.1 豆浆机企业响应时间(T)的评价

D.3.1.1 豆浆机产品用户需求响应时间平均缩短率 ξ

产品模块化设计带来的企业对产品生命周期中用户需求响应时间平均缩短率 ξ 。

$$\xi = a_1 \times \xi_1 + a_2 \times \xi_2 + a_3 \times \xi_3 = 0.6 \times 53\% + 0.4 \times 3.2\% = 33\%$$

式中：

a_1 、 a_2 、 a_3 ——权重系数，专家赋值 $a_1=0.6$ ， $a_2=0.4$ ， $a_3=0$ (暂不考虑服务因素)；

ξ_1 ——豆浆机产品设计时间平均缩短率；

ξ_2 ——豆浆机产品制造时间平均缩短率；

ξ_3 ——豆浆机产品服务时间平均缩短率。

D.3.1.2 豆浆机产品设计时间的评价

D.3.1.2.1 豆浆机产品设计时间平均缩短率 ξ_1

$$\xi_1 = a_1 \times \xi_{11} + a_2 \times \xi_{12} + a_3 \times \xi_{13} = 0.4 \times 66\% + 0.4 \times 55\% + 0.2 \times 21\% = 53\%$$

式中：

a_1 、 a_2 、 a_3 ——权重系数，专家赋值 $a_1=0.4$ ， $a_2=0.4$ ， $a_3=0.2$ ；

ξ_{11} ——豆浆机结构设计时间平均缩短率；

ξ_{12} ——豆浆机更改设计时间平均缩短率；

ξ_{13} ——豆浆机工艺设计时间平均缩短率。

D.3.1.2.2 豆浆机结构设计时间平均缩短量 t_{11} 和缩短率 ξ_{11}

豆浆机模块化设计后结构设计平均时间： $t'_{11}=28$ 天；

豆浆机模块化设计前结构设计平均时间： $t''_{11} = 82$ 天；

豆浆机结构设计时间平均缩短量 t_{11} ：

$$t_{11} = t''_{11} - t'_{11} = 82 - 28 = 54 \text{ 天}$$

豆浆机结构设计时间平均缩短率 ξ_{11} ：

$$\xi_{11} = (t''_{11} - t'_{11})/t''_{11} = (82 - 28)/82 = 66\%$$

D.3.1.2.3 豆浆机更改设计时间平均缩短量 t_{12} 和缩短率 ξ_{12}

豆浆机模块化设计后更改设计平均时间： $t'_{12} = 23$ 天；

豆浆机模块化设计前更改设计平均时间： $t''_{12} = 51$ 天；

豆浆机更改设计时间平均缩短量 t_{12} ：

$$t_{12} = t''_{12} - t'_{12} = 51 - 23 = 28 \text{ 天}$$

豆浆机更改设计时间平均缩短率 ξ_{12} ：

$$\xi_{12} = (t''_{12} - t'_{12})/t''_{12} = (51 - 23)/51 = 55\%$$

D.3.1.2.4 豆浆机工艺设计时间平均缩短量 t_{13} 和缩短率 ξ_{13}

豆浆机模块化设计后工艺设计平均时间： $t'_{13} = 19$ 天

豆浆机模块化设计前工艺设计平均时间： $t''_{13} = 24$ 天

豆浆机工艺设计时间平均缩短量 t_{13} ：

$$t_{13} = t''_{13} - t'_{13} = 24 - 19 = 5 \text{ 天}$$

豆浆机工艺设计时间平均缩短率 ξ_{13} ：

$$\xi_{13} = (t''_{13} - t'_{13})/t''_{13} = (24 - 19)/24 = 21\%$$

D.3.1.3 豆浆机产品制造时间平均缩短量 t_2 和缩短率 ξ_2

豆浆机模块化设计后生产一个批次的平均制造时间： $t'_2 = 61$ 天；

豆浆机模块化设计前生产一个批次(同生产数量)的平均制造时间： $t''_2 = 63$ 天；

豆浆机制造时间平均缩短量 t_2 ：

$$t_2 = t''_2 - t'_2 = 63 - 61 = 2 \text{ 天}$$

豆浆机制造时间平均缩短率 ξ_2 ：

$$\xi_2 = (t''_2 - t'_2)/t''_2 = (63 - 61)/63 = 3.2\%$$

D.3.1.4 豆浆机产品服务维修时间的评价

豆浆机产品服务维修极少,服务维修时间的变化可忽略。

D.3.2 豆浆机产品质量(Q)的评价

产品质量(Q)指标:产品模块化设计带来的产品生命周期中质量平均提升率(也可视为质量问题平均减少率、错误平均减少率) q 。

豆浆机模块化设计前设计、制造过程的平均质量问题数量： $n_1 = 115$ ；

豆浆机模块化设计后设计、制造过程的平均质量问题数量： $n_2 = 84$ ；

豆浆机暂不考虑服务质量。最终得到豆浆机模块化设计带来的产品生命周期中质量平均提升率 q ：

$$q = (n_1 - n_2)/n_1 = 27\%$$

D.3.3 豆浆机产品成本(C)的评价

暂不考虑产品成本的影响。

D.3.4 豆浆机满足用户多样化需求(U)的评价

D.3.4.1 豆浆机产品用户需求满意度提升率 η

产品模块化设计带来的产品生命周期中用户需求满意度提升率 η :

$$\eta = a_1 \times \eta_1 + a_2 \times \eta_2 = 38\%$$

式中:

a_1 、 a_2 ——权重系数,专家赋值 $a_1=1$, $a_2=0$;

η_1 ——豆浆机产品设计阶段用户满意度提升率;

η_2 ——豆浆机产品服役阶段用户满意度提升率。

D.3.4.2 豆浆机产品设计阶段用户满意度的评价

D.3.4.2.1 豆浆机产品设计阶段用户满意度提升率 η

豆浆机产品模块化设计带来的定制产品设计阶段用户满意度提升率:

$$\eta = a_1 \times \eta_{11} + a_2 \times \eta_{12} + a_3 \times \eta_{13} = 0.3 \times 75\% + 0.4 \times 21\% + 0.3 \times 25\% = 38\%$$

式中:

a_1 、 a_2 、 a_3 ——权重系数,专家赋值 $a_1=0.3$, $a_2=0.4$, $a_3=0.3$;

η_{11} ——豆浆机产品多样化提升率;

η_{12} ——豆浆机产品个性化程度提升率;

η_{13} ——豆浆机产品变型能力提升率。

D.3.4.2.2 豆浆机产品多样化提升率 η_{11}

豆浆机产品模块化设计带来的对用户有价值的产品多样化提升率: $\eta_{11} = 75\%$

D.3.4.2.3 豆浆机产品个性化程度提升率 η_{12}

豆浆机产品模块化设计带来的定制产品个性化程度提升率: $\eta_{12} = 21\%$

D.3.4.2.4 豆浆机产品变型能力提升率 η_{13}

豆浆机产品模块化设计带来的定制产品变型能力提升率: $\eta_{13} = 25\%$

D.3.4.3 豆浆机产品服役阶段的用户满意度提升率 η_2

豆浆机产品服役阶段的用户满意度提升率暂不考虑。



D.4 豆浆机模块化设计环境友好性的评价

暂不考虑豆浆机模块化的环境友好性的评价。

参 考 文 献

- [1] GB/T 19000—2016 质量管理体系 基础和术语
 - [2] GB/T 30438—2013 支持模块化设计的数据字典技术原则和方法
 - [3] GB/T 31982—2015 机械产品模块化设计规范
 - [4] 石浩, 顾复, 顾新建. 模块化设计方法及在家用豆浆机中的应用. 成组技术与生产现代化. 2019(2):1~8.
 - [5] 田楚楚, 石浩, 顾复, 顾新建. 机械产品模块化设计效益评价方法及应用. 成组技术与生产现代化. 2018(2):1~8, 48.
 - [6] 顾新建, 杨青海, 纪杨建, 顾巧祥. 机电产品模块化设计方法和案例. 北京: 机械工业出版社, 2013.
 - [7] 顾新建, 田楚楚, 杨青海, 石浩, 顾复, 陈茂熙. 产品模块化率评估指标和方法研究. 成组技术与生产现代化, 2019(2):1-5.
-