

# 控制与决策

Control and Decision

## 复杂机械产品设计系统与设计能力关系模型

贺颖, 赵罡, 修睿

引用本文:

贺颖, 赵罡, 修睿. 复杂机械产品设计系统与设计能力关系模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2137–2144.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0009>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于智能优化算法的Pendubot轨迹规划与控制方法设计

Trajectory planning and control method for Ppendubot based on intelligent optimization algorithm

控制与决策. 2020, 35(5): 1085–1090 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0899>

### 面向复杂装备精密产品质量特性的Kriging–RBDO可靠性优化设计

Precision product of complex equipment quality characteristic reliability–based design optimization using Kriging model

控制与决策. 2019, 34(9): 1929–1936 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0353>

### 基于加幂积分方法的制导控制一体化设计

Adding a power integrator technique based integrated guidance and control design

控制与决策. 2018, 33(2): 242–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1461>

### 非线性时变时延系统的模糊采样最优控制

Fuzzy sampled–data optimal control for nonlinear systems with time–varying delay

控制与决策. 2018, 33(11): 2069–2072 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0809>

### 基于Nussbaum增益滑模自适应控制的导弹制导控制一体化设计

Integrated guidance and control of missile based on Nussbaum gain adaptive sliding mode control method

控制与决策. 2017, 32(1): 93–99 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1601>

# 复杂机械产品设计系统与能力关系模型

贺颖<sup>1</sup>, 赵罡<sup>1†</sup>, 修睿<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

**摘要:** 针对支持正向设计的设计系统与企业设计能力关系问题, 结合设计资源类型及集成技术成熟度方法创新性, 提出设计能力衡量指标及其算法. 设计能力衡量指标由设计流程完整率、设计工具完整率、设计准则完整率和设计数据使用率 4 项指标组成, 设计流程完整率通过设计流程占当前整理的设计流程总数的比例获得, 设计工具完整率通过设计工具占当年整理的流程任务节点所需工具总数的比例获得, 设计准则完整率通过设计遵循的设计准则所占当年整理的设计活动所需准则总数的比例获得, 设计数据使用率用非结构化数据使用率来表示. 采用灰色关联和模糊综合评价改进模型求出设计能力衡量指标的准则权重, 考虑到延时因素对设计系统与能力交互关系的影响, 以 logistic 方程为基础构建考虑延时的设计系统与能力作用模型, 为企业的设计系统应用决策和设计能力提升提供依据和方法.

**关键词:** 正向设计; 设计系统; 设计能力; 灰色关联; 模糊评价; 延时

**中图分类号:** TP319.56      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2019.0009

**引用格式:** 贺颖, 赵罡, 修睿. 复杂机械产品设计系统与能力关系模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2137-2144.

## Relationship model between complex mechanical product design system and design capability

HE Ying<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>1†</sup>, XIU Rui<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Control Instrument, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In view of the relationship between design systems supporting ordinal design and enterprise design capability, the design capability measurement index and its algorithm are innovatively proposed in combination with the design resource type and integration technology maturity method. The design capability measurement index consists of four indexes: design process integrity rate, design tool integrity rate, design criteria integrity rate and design data utilization rate. The design process integrity rate is obtained by the proportion of design process to the total number of design processes currently collated. The design tool integrity rate is obtained by the proportion of design tools to the total number of tools required for process task nodes collated in the current year. The design criteria integrity rate is obtained by the proportion of design criteria followed in the design to the total number of criteria required for design activities collated in the current year. The design data utilization rate is expressed by unstructured data utilization rate. The criteria weight of design capability measurement index is obtained by using the grey correlation and fuzzy comprehensive evaluation improvement model. Considering the influence of delay factors on the interaction between the design system and design capability, a design system and design capability function model considering delay is constructed on the basis of logistic equation, which provides an effective method and basis for enterprise design system application decision-making and design capability improvement.

**Keywords:** supporting ordinal design; design system; design capability; grey correlation; fuzzy evaluation; time delay

## 0 引言

复杂机械产品设计通常具备涉及专业多、研制周期长、资金投入大、设计工具种类多、可靠性要求高、知识含量高等特征. 经过多年自主研制, 基于正向设计的复杂机械产品研制呈现出完整的研制生

命周期特点, 即从设计、试验、制造、维护、改进的多层次循环迭代, 有效提高设计阶段能力, 在设计循环中解决主要设计问题, 将会最大程度地缩短研制周期和节约研制成本. 支持正向设计的复杂机械产品设计系统正是利用数字化设计仿真集成技术支撑企业

**收稿日期:** 2019-01-02; **修回日期:** 2019-04-19.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(71430026, 61273232); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2047).

**责任编辑:** 张维海.

**†**通讯作者. E-mail: zhaog@buaa.edu.cn.

开展设计资源的梳理、管理和使用. 设计系统首先解决的是复杂机械产品流程规划问题, 实现各类设计经验、方法的融合; 其次解决的是减少设计工具间的数据传递和手工交互, 使得设计主体专注于设计工作本身; 再次解决的是设计准则的约束、指导问题; 最后解决的是设计数据的管理和应用问题, 设计系统中的应用水平和设计能力间存在正相关关系.

复杂机械产品设计一直是热点问题, 国内外学者从各个方面开展了研究, 例如: 对设计结构矩阵的研究, 主要包括对复杂机械产品的设计过程建模, 对复杂机械产品的研发项目管理、设计流程迭代、风险预测、模糊性进行建模、优化和仿真<sup>[1-3]</sup>. 对技术成熟度的研究, 主要包括航空装备、电网、医疗器械等多个领域, 覆盖设计、制造、产品、集成和系统多个维度的成熟度方法<sup>[4-6]</sup>, 利用协同或演化的方法对复杂机械产品的设计过程进行分解或优化<sup>[7-9]</sup>, 但这些研究都有其适应范围方面的不足, 且都仅关注了某个独立方面设计能力的改善.

本文直接从管理设计资源的设计系统出发, 将设计系统中管理的设计资源量化为设计能力指标, 通过对设计能力指标的关联关系研究, 获得设计系统与设计能力关系模型, 从而在较高的层次把握企业设计能力提升的方向.

## 1 设计能力指标的量化处理

在设计系统的应用过程中, 设计流程、设计工具、设计准则、设计数据随着正向设计能力的提升而不断充实和完善. 将设计流程、设计工具、设计准则和设计数据统称为设计能力衡量指标. 其完备程度可以从一个视角反映设计能力的水平, 这里给出4项设计能力评价指标的量化方法如下:

### 1) 设计流程完整率.

设计流程是衡量设计能力最重要的指标, 设计流程的成熟度和完备度能集中体现企业的设计能力. 由于正向设计能力的提升会使得设计流程发生更改, 每次重新梳理的流程总数量会发生变化. 而在设计系统上已集成的流程数和实际使用的流程数有差异, 实际使用的流程一般都是集成成熟度较高的流程, 这里涉及到集成成熟度评价问题. Sauser等<sup>[4]</sup>提出使用一个0~1之间的数作为指标表示系统工程应用程度, 系统工程应用在此处可以代指为集成. 借鉴该成熟度方法, 建立一个流程由多个单一任务节点组成, 设该流程由 $m$ 个任务节点组成, 其中 $NRL_i$ 表示单一任务应用技术的成熟度, 有

$$[NRL]_{m \times 1} = [NRL_1, NRL_2, \dots, NRL_m]^T.$$

任务节点向量归一化后, 得到

$$[NRL]_{m \times 1} = [NRL'_1, NRL'_2, \dots, NRL'_m]^T.$$

考虑流程前后任务间关联关系, 得到关联关系对成熟度影响矩阵, 有

$$[CRL]_{m \times m} = \begin{bmatrix} CRL_{11} & CRL_{12} & \dots & CRL_{1m} \\ CRL_{21} & CRL_{22} & \dots & CRL_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CRL_{m1} & CRL_{m2} & \dots & CRL_{mm} \end{bmatrix}.$$

成熟度影响矩阵归一化后, 得到

$$[CRL]_{m \times m} = \begin{bmatrix} CRL'_{11} & CRL'_{12} & \dots & CRL'_{1m} \\ CRL'_{21} & CRL'_{22} & \dots & CRL'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CRL'_{m1} & CRL'_{m2} & \dots & CRL'_{mm} \end{bmatrix},$$

其中 $CRL'_{ii} = 1$ .

通过单项任务应用技术成熟度和关联关系成熟度可计算出节点成熟度为

$$[IRL_1, IRL_2, \dots, IRL_m]^T = [CRL]_{m \times m} \times [NRL]_{m \times 1}.$$

取多个任务节点的均值作为某个流程的集成成熟度, 有

$$IRL_{pi} = \frac{IRL_{pi1} + IRL_{pi2} + \dots + IRL_{pim}}{m},$$

$$IRL_{pi} \in (0, 1).$$

设某个设计专业有 $i$ 个设计流程, 该专业的专业流程集成成熟度 $IRL_{si}$ 为本专业所有设计流程集成成熟度的均值, 即

$$IRL_{si} = \frac{IRL_{p1} + IRL_{p2} + \dots + IRL_{pi}}{i}.$$

假设某企业有 $i$ 个设计专业, 该企业流程集成成熟度 $IRL_e$ 为所有专业流程集成成熟度的均值, 即

$$IRL_e = \frac{IRL_{s1} + IRL_{s2} + \dots + IRL_{sk}}{k}.$$

设计流程完整率用于表征设计主体 $A$ 在设计系统上使用的流程所占当前整理的设计流程总数的比例, 用 $PC$ 表示, 计算如下:

$$PC = \frac{P}{PT} \times IRL_e \times 100\%. \quad (1)$$

其中: $P$ 为 $A$ 在设计系统上使用的流程累计数量,  $PT$ 为当年整理的设计流程总数量.

### 2) 设计工具完整率.

设计工具完整率用于表征设计主体在设计系统上使用的工具所占当年整理的流程任务节点所需工具总数的比例, 用 $TC$ 表示. 设计工具完整率还与设计工具设计结果的校核程度相关, 设计工具在设计系统上集成时按其校核程度被区分为3个等级, 单个

设计工具的校核程度通过多个项目的校核程度均值获得,有

$$PR_s = \frac{PR_{s1} + PR_{s2} + \dots + PR_{sn}}{n}$$

其中:  $PR_{si} \in (0, 1), PR_s \in (0, 1)$ .

设计工具的校核程度为所有被校核工具的均值,即

$$PR = \frac{PR_1 + PR_2 + \dots + PR_s}{s}, PR \in (0, 1).$$

TC计算如下:

$$TC = \frac{T}{TT} \times PR \times 100\% \quad (2)$$

其中:  $T$  为  $A$  在设计系统上使用的设计工具累计数量,  $TT$  为当年整理的流程任务节点所需工具总数量.

### 3) 设计准则完整率.

设计准则用于指导设计活动,设计准则完整率用于表征设计主体  $A$  在设计系统上遵循的设计准则所占当年整理的设计活动所需准则总数的比例,用  $SC$  表示. 设计准则的完整率与设计水平密切相关.  $SC$  计算如下:

$$SC = \frac{S}{ST} \times 100\% \quad (3)$$

其中:  $S$  为  $A$  在设计系统上遵循的设计准则累计数量,  $ST$  为当年整理的设计活动所需设计准则总数量.

### 4) 设计数据使用率.

设计系统中的设计数据可分为3类:结构型数据、非结构型数据和混合型数据. 混合型数据在文中特指设计方案,既包含结构型数据也包含非结构型数据. 由于结构型数据有大部分是通过对非结构型数据处理后得到,结构型数据和非结构型数据的比例也会随时间不同而发生变化,设计数据使用率可细分为结构型数据使用率  $DU_1$ 、非结构型数据使用率  $DU_2$  和设计方案使用率  $DU_3$  三个指标,这3个指标都表示设计主体  $A$  在设计系统上使用某类型的有效数据占数据总量的比例,计算方法如下:

$$DU_1 = \frac{PAU}{PAT + FIT + SOT} \times 100\% \quad (4)$$

$$DU_2 = \frac{FIU}{PAT + FIT + SOT} \times 100\% \quad (5)$$

$$DU_3 = \frac{SOU}{PAT + FIT + SOT} \times 100\% \quad (6)$$

其中:  $DU_1 \in (0, 1), DU_2 \in (0, 1), DU_3 \in (0, 1)$ , 有

$$DU_1 + DU_2 + DU_3 = 1;$$

$PAU$  为  $A$  在设计系统上使用结构型数据的数量;  $PAT$  为设计系统上结构型数据的总数量;  $FIU$  为  $A$  在设计系统上使用非结构型数据的数量;  $FIT$  为设计系统上非结构型数据的总数量;  $SOU$  为  $A$  在设计系统上使用设计方案的数量;  $SOT$  为设计系统上已提交的设

计方案的总数量.

设计系统本身的评价方法与设计能力指标评价方法不同,一般采用基于系统质量的度量方法评价,系统质量的度量方法分为内部属性度量法和外部属性度量法. 内部属性度量法有  $C\&K$ 、 $MOOD$  等方法,用于系统开发水平的度量;外部属性度量法从用户角度出发,遵循  $ANSI/IEEE$  中系统的品质要素进行质量评价,考虑文章篇幅,此处不展开分析.

## 2 设计系统与设计能力关系研究

### 2.1 数据来源

数据来源于某企业设计主体对设计系统应用的监控值,按式(1)~(6)以月为单位对统计的数据进行求解. 统计后发现设计主体对非结构型设计数据的使用量最大,主要是由于结构型数据和设计方案要求设计主体必需在设计系统上对其进行有效的前处理后才能使用,设计主体为了避免大量的前处理工作,直接使用非结构型设计数据. 所以现阶段,非结构型数据最具代表性,本文也以非结构型设计数据的使用率来代表设计数据的使用率.

### 2.2 准则权重计算方法

对于设计系统的设计能力关系的影响因素如上所述,为设计流程完整率、设计工具完整率、设计准则完整率和设计数据使用率,即评价的准则,下面采用灰色关联和模糊综合评价改进模型<sup>[10-13]</sup>确定准则权重.

灰色关联指的是按照各个因素数列的曲线形状态势程度作趋势分析,若两因素数列的态势一致,则认为两者关联度高;若不一致,则认为两者关联度低. 灰色关联度分为3种:灰色绝对关联度、灰色相对关联度和灰色综合关联度. 通常说的灰色关联度指的是灰色综合关联度,有6个步骤,具体内容如下.

step 1: 确定分析数列. 分析数列有两种:参考数列(母数列)和比较数列(子数列). 参考数列表示为  $\{X_0(k)\}, k = 1, 2, \dots, n$ ; 比较数列表示为  $\{X_i(k)\}, k = 1, 2, \dots, m$ .

step 2: 变量数列的无量纲化. 有

$$X_i(k) \in (0, 1), X_i(k) = \frac{j_k^i}{\sum_{j=1}^m j_k^j}$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n; j_k^i$  为第  $i$  个参数的第  $k$  个指标的初始值.

step 3: 计算差序列、最大差和最小差. 差序列公式为

$$T_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|; \quad (7)$$

最小差公式为

$$T_{\min}(k) = \min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|; \quad (8)$$

最大差公式为

$$T_{\max}(k) = \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|. \quad (9)$$

step 4: 计算关联系数. 有

$$P_i(k) = \frac{T_{\min} + \eta T_{\max}}{|X_0(k) - X_i(k)| + \eta T_{\max}}, \quad (10)$$

其中分辨系数  $\eta \in (0, 1)$ , 一般取  $\eta = 0.5$ .

step 5: 计算关联度. 有

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_1^N P_i(k). \quad (11)$$

step 6: 根据关联度大小得到各影响因素的权重值. 有

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_1^N C_i(k)}. \quad (12)$$

模糊综合评价法的核心思想是用隶属于的程度来替代属于或不属于, 求解步骤如下.

step 1: 构建评价对象  $P$ , 评价因素集  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}$  和评语集  $v = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ .

step 2: 构建模糊综合评判矩阵  $R$ . 对各个因素  $u_i (i = 1, 2, \dots, p)$  量化, 确定模糊子集的隶属度  $(R|u_i), (R|u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ , 得到模糊综合评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} R|u_1 \\ R|u_2 \\ \vdots \\ R|u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m}, \quad (13)$$

其中  $R$  中第  $i$  行第  $j$  列元素  $r_{ij}$  表示  $u_i$  对  $v_j$  的隶属度.

step 3: 计算权向量. 有

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_p) \sum_{i=1}^p w_i = 1, \quad (14)$$

$$w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

模糊综合评价权向量  $W$  计算的是各影响因素的权重值, 该权重值等于式(12)的计算结果.

step 4: 计算模糊综合评价值. 有

$$W \times R = (w_1, w_2, \dots, w_p) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix} = (s_1, s_2, \dots, s_m) = S. \quad (15)$$

### 2.3 设计系统与能力关系模型分析

2016年11月~2017年12月对设计系统的设计流程、设计工具、设计准则和设计数据的数量进行统计, 考虑到设计流程中包含设计工具、设计准则和设计数据, 且设计流程的成熟度和完备度最能反映设计能力, 用设计流程完整率指标表征主要设计能力指标. 为得到每月设计力量化指标, 企业以月度单位定期对各个专业设计系统4项监控指标和设计资源6项指标进行统计, 4项监控指标分别为: 系统应用流程数量、系统应用设计工具数量、系统应用设计准则数量、系统使用的非结构型数据量, 6项统计指标分别为(6项统计指标与设计系统无关): 企业设计流程总数、设计活动总数、设计活动所需的设计准则数量、结构型数据数量、设计方案数量、非结构型数据量.

以2016年11月份数据为例表明设计能力指标的量化过程, 如表1所示.

表1 2016年11月各专业流程工具指标统计

设计专业	系统应用流程数量	设计流程总数	系统应用设计工具数	设计活动总数
专业1	20	35	135	297
专业2	14	30	129	285
专业3	25	61	291	632
专业4	15	26	165	297
专业5	9	16	54	98
专业6	4	8	29	69
专业7	6	11	42	107
专业8	7	16	56	124
专业9	8	13	52	136
专业10	10	25	167	301
专业11	14	30	162	389
专业12	13	22	99	211
专业13	4	8	29	71
专业14	3	8	43	79
专业15	4	9	45	99
专业16	5	12	53	96
专业17	23	45	215	401
合计	184	375	1766	3692

利用式(1)、(2)、(3)、(5)对表1数据求解后得到表2, 考虑到文章篇幅问题, 此处求解过程略.

采用灰色关联和模糊综合评价改进模型对数据进行计算分析, 具体步骤如下.

step 1: 确定分析数列.

由于采用设计流程指标表征主要设计能力, 此处将设计流程完整率作为参考数列, 设计工具完整率、设计准则完整率和设计数据使用率作为比较数列.

表2 每月设计能力指标量化表

月份	PC	TC	SC	DU2
2016-11	0.332 6	0.283 6	0.331 7	0.222 2
2016-12	0.343 8	0.300 8	0.335 7	0.259 3
2017-01	0.364 4	0.315 3	0.346 6	0.296 3
2017-02	0.420 1	0.343 0	0.392 9	0.314 8
2017-03	0.487 8	0.372 0	0.398 4	0.333 3
2017-04	0.539 4	0.428 1	0.392 9	0.351 9
2017-05	0.591 2	0.708 2	0.398 7	0.353 7
2017-06	0.637 5	0.734 6	0.416 6	0.357 4
2017-07	0.684 1	0.754 2	0.420 6	0.361 1
2017-08	0.736 1	0.778 0	0.447 7	0.377 8
2017-09	0.780 0	0.814 4	0.472 9	0.446 3
2017-10	0.835 4	0.869 7	0.491 0	0.598 1
2017-11	0.868 3	0.903 4	0.493 3	0.609 3
2017-12	0.900 2	0.917 4	0.508 2	0.629 6

参考数列为

$$X_0(k) = \{0.332\ 6, 0.343\ 8, 0.364\ 4, 0.420\ 1, \dots, 0.900\ 2\}.$$

比较数列为

$$X_1(k) = \{0.283\ 6, 0.300\ 8, 0.315\ 3, 0.343\ 0, \dots, 0.917\ 4\},$$

$$X_2(k) = \{0.331\ 7, 0.335\ 7, 0.346\ 6, 0.392\ 9, \dots, 0.508\ 2\},$$

$$X_3(k) = \{0.222\ 2, 0.259\ 3, 0.296\ 3, 0.314\ 8, \dots, 0.629\ 6\}.$$

step 2: 计算差序列,如表3所示.

step 3: 计算最大差和最小差. 有

$$T_{\min}(k) = \min_i \min_s |X_0(k) - X_i(k)| = |0.221\ 6, 0.230\ 7, 0.245\ 8| = 0.245\ 8,$$

$$T_{\max}(k) = \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| = |0.084\ 6, 0.103\ 1, 0.006\ 8| = 0.006\ 8.$$

step 4: 计算关联系数如表4所示,有

$$P_i(k) = \frac{T_{\min} + \eta T_{\max}}{|X_0(k) - X_i(k)| + \eta T_{\max}} = \frac{0.006\ 8 + 0.5 \times 0.245\ 8}{|X_0(k) - X_i(k)| + 0.5 \times 0.245\ 8}.$$

step 5: 计算关联度. 由  $C_i = \frac{1}{N} \sum_1^N P_i(s)$ , 求得  $C_1 = 0.715\ 9, C_2 = 0.674\ 7, C_3 = 0.702\ 7$ . 由于所求3个关联度均大于0.6, 认为关联度是显著的.

表3 差序列表

k	$ X_0(k) - X_1(k) $	$ X_0(k) - X_2(k) $	$ X_0(k) - X_3(k) $
1	0.049 0	0.000 9	0.110 4
2	0.043 0	0.003 1	0.073 3
3	0.049 1	0.014 0	0.036 3
4	0.077 1	0.060 3	0.017 8
5	0.115 8	0.065 8	0.000 7
6	0.111 3	0.060 3	0.019 3
7	0.117 0	0.066 1	0.021 1
8	0.097 0	0.084 0	0.024 8
9	0.070 1	0.088 0	0.028 5
10	0.041 9	0.115 1	0.045 2
11	0.034 4	0.140 3	0.113 7
12	0.034 3	0.158 4	0.265 6
13	0.035 1	0.160 7	0.276 7
14	0.017 2	0.175 6	0.297 0

表4 关联系数序列表

k	$P_1(k)$	$P_2(k)$	$P_3(k)$
1	0.754 7	1.047 4	0.556 0
2	0.782 0	1.029 7	0.660 9
3	0.754 1	0.947 3	0.814 7
4	0.648 6	0.707 9	0.921 9
5	0.543 3	0.687 3	1.049 1
6	0.553 9	0.707 9	0.912 4
7	0.540 6	0.686 4	0.900 7
8	0.589 7	0.626 9	0.878 1
9	0.672 1	0.615 1	0.856 6
10	0.787 2	0.544 9	0.771 7
11	0.824 7	0.492 9	0.548 2
12	0.825 2	0.461 0	0.333 9
13	0.820 9	0.457 4	0.324 6
14	0.925 6	0.434 5	0.308 9

step 6: 计算各影响因素的权重值. 由  $w_i = C_i / \sum_1^N C_i(k)$  求得  $w_1 = 0.342\ 0, w_2 = 0.322\ 3, w_3 = 0.335\ 7$ .

step 7: 建立评语集, 评语集内容如表5所示.

step 8: 构建模糊综合评判矩阵  $R$ , 有

$$R = \begin{bmatrix} 0.772\ 1 & 0.885\ 2 & 0.524\ 5 & 0.111\ 2 \\ 0.686\ 1 & 0.694\ 4 & 0.507\ 1 & 0.137\ 5 \\ 0.691\ 2 & 0.678\ 1 & 0.477\ 2 & 0.109\ 3 \end{bmatrix}.$$

表5 评价分级标准

评价区间	评价等级
[100, 80)	优秀
[80, 70)	良好
[70, 60)	中等
[60, 0)	较差

模糊结合评判矩阵的列对应评价集中的评价等级,行对应设计工具完整率、设计准则完整率和设计数据使用率。

step 9: 计算模糊综合评价值。

$$S = W \times R = (0.3420, 0.3223, 0.3357) \times \begin{bmatrix} 0.7721 & 0.8852 & 0.5245 & 0.1112 \\ 0.6861 & 0.6944 & 0.5071 & 0.1375 \\ 0.6912 & 0.6781 & 0.4772 & 0.1093 \end{bmatrix} = (0.7172, 0.7542, 0.5030, 0.119).$$

结合灰色关联度和模糊综合评价法求出的权重显示:以设计流程完整率代表设计能力的最主要因素,仅以2016年~2017年的设计能力指标进行分析,设计工具完整率的权值最大,设计准则完整率所占权值次之,设计数据使用率权值最小。这表明:设计工具完整率与设计能力的关系最为密切,设计准则完整率与设计能力的关系次之,设计数据与设计能力的关系最不密切。需要注意的是,这仅是立足于本阶段设计主体对设计系统的应用程度分析后得到的结果,若考虑时间因素,设计系统与设计能力的关系随着时间的变化发生变化,下面讨论延时对设计系统和设计能力关系的影响。

### 3 考虑延时的设计系统与设计能力交互关系影响模型

设计流程、设计工具、设计准则和设计数据4类设计资源在设计系统上进行管理,应用设计系统实际上就是使用设计资源,设计资源的充实完善和深入应用与设计能力的提升呈正相关关系。基于此,将设计系统的应用与设计能力提升关联,分析其交互关系的影响。而设计系统的应用与包括企业、员工、设计系统等多主体的诸多因素相关,因此,设计系统的认识到应用阶段间存在着一定的延时,在企业设计系统的应用推广并非一蹴而就,员工们并不会立即接受并使用设计系统,会对各项因素进行综合考量再作出决定,因此在研究设计系统和设计能力关系时引入上述因素考虑延时的影响,能揭示出其交互关系中的部分

特征。

全部设计主体A对设计系统并非立即接受并使用,设计主体会综合考虑企业决策、个人工作饱和度、设计系统的功能、设计系统的质量属性(包括易用性、稳定性和成熟度)因素后才会决定是否使用,若将从设计主体与设计系统相互发生作用直至在实际工程项目中使用设计系统的间隔时间称为延时 $t_{ave}$ ,其中 $t_{ave}$ 为全部设计主体对设计系统发生所有延时的均值,则在 $t$ 时刻有可能使用设计系统的设计主体 $\phi(t)$ 与 $|t - t_{ave}|$ 时刻已使用设计系统的设计主体 $\phi(t - t_{ave})$ 间会发生交互关系和影响。

假设设计主体增长率是当时设计主体数量 $\varphi(t)$ 的线性递减函数 $r(\varphi(t))$ , $M_\varphi$ 表示设计主体的最大数量, $r$ 表示设计主体很少时的增长率,得到设计主体对设计系统的应用过程模型,即经典的logistic方程

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = r \left(1 - \frac{\varphi(t)}{M_\varphi}\right) \varphi(t), \\ \varphi(0) = \varphi_0. \end{cases}$$

但是,该方程假设前提是设计主体与设计系统立即发生交互关系,这种假设并非总是成立。以logistic方程<sup>[14-16]</sup>为基础,充分考虑到延时对交互关系的影响,建立新的交互关系模型。

1) 假设部分设计主体使用设计系统, $\phi(t)$ 表示 $t$ 时刻使用设计系统的设计主体总数。由于设计系统的应用一般是企业推进工业化与信息化融合的举措,企业正向决策会对设计系统的应用产生积极影响,设计主体应用设计系统的数量获得增长,用变量 $R_\phi$ 来表示增长率。

2) 设计主体对设计系统应用过程中会产生关于设计系统的评价,若设计主体认同设计系统功能,认为设计系统的使用能帮助设计主体提高设计效率,设计主体则有可能主动选择设计系统,用变量 $S_\phi$ 来表示这种设计主体主动接受而使用设计系统的概率,显然 $S_\phi$ 与设计能力的提高成正比。

3) 设计主体工作饱和度也会对设计系统应用产生影响,若设计主体工作饱和度高,则其学习使用设计系统的时间少,会对设计系统应用工作产生消极影响。若设计主体工作饱和度不高,则其学习使用设计系统的时间相对增多,会对设计系统应用工作产生积极影响,用变量 $T_\varphi$ 表示设计主体这种基于工作饱和度和客观事实而对设计系统应用的行为概率,显然 $T_\varphi$ 与设计能力的提高成反比。

4) 设计系统自身的质量属性(包括易用性、稳定性和成熟度)对设计主体应用设计系统也起到很

大作用,设  $P_\varphi$  为设计系统自身质量属性对设计主体应用设计系统影响的作用系数,那么  $P_\varphi\varphi(t - t_{ave})$  为  $t - t_{ave}$  时间设计主体使用设计系统的总数量,而设计主体的总数量为  $M_\varphi$ ,得到公式  $\varphi(t - t_{ave})/M_\varphi$ ,表示  $t - t_{ave}$  时间设计主体使用设计系统的作用密度。

按上述研究得到,企业决策、个人工作饱和度、设计系统的功能、设计系统的易用性、稳定性和成熟度是设计主体与设计系统交互作用的关键因素,也是设计能力提升的关键因素,因此,设计主体应用设计系统人数的增长  $d\varphi(t)/dt$  与前面提到的  $R_\phi$ 、 $S_\phi$ 、 $T_\phi$  和  $P_\phi$  间存在紧密联系. 又考虑到延时的因素,在  $t$  时间应用设计系统的设计主体  $\phi(t)$  与  $t - t_{ave}$  时间应用设计系统的设计人员间也会发生交互作用和影响。

按 logistic 方程思想,  $t$  时刻的设计主体应用设计系统的相对增长率  $\frac{1}{\varphi(t)} \frac{d\varphi(t)}{dt}$  等于固有增长率减去阻滞因素,  $R_\phi$  和  $S_\phi$  为固有增长率,  $T_\phi$ 、 $P_\varphi\varphi(t - t_{ave})$ 、 $\varphi(t - t_{ave})$  为阻滞因素,因此得到

$$\frac{1}{\varphi(t)} \frac{d\varphi(t)}{dt} = R_\phi + S_\phi - T_\phi - P_\varphi\varphi(t - t_{ave}) - \frac{\varphi(t - t_{ave})}{M_\phi}$$

对该方程进行变换,得到考虑延时的设计系统与设计能力作用方程

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = [R_\phi + S_\phi - T_\phi - P_\varphi\varphi(t - t_{ave}) - \frac{\varphi(t - t_{ave})}{M_\phi}] \varphi(t) \quad (16)$$

对方程(16)进行求解,由模型实际意义出发,在区域  $R_+ = \{(R_\phi, S_\phi, T_\phi, P_\phi) | R_\phi \geq 0, S_\phi \geq 0, T_\phi \geq 0, P_\phi \geq 0\}$  上对方程(16)进行讨论. 方程(16)显然有正平衡点

$$\varphi' = \frac{(R_\phi + S_\phi - T_\phi)M_\phi}{P_\varphi M_\phi + 1} = 0,$$

$\phi$  为与时间  $t$  无关的常量.

设  $\gamma = \varphi(t) - \varphi'$ , 由于方程(16)在  $\phi'$  处呈线性,利用泰勒展开式进行换算,得到

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = -\left(P_\phi + \frac{1}{M_\phi}\right) \varphi' \gamma(t - t_{ave}) \quad (17)$$

因为

$$\left(P_\phi + \frac{1}{M_\phi}\right) \varphi' = R_\phi + S_\phi - T_\phi,$$

方程(17)变换为

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = -(R_\phi + S_\phi - T_\phi) \gamma(t - t_{ave}) \quad (18)$$

方程(18)有解为  $\gamma(t) = ae^{\eta t_{ave}}$ , 代入后求得方程(18)

的特征方程

$$\eta = -(R_\phi + S_\phi - T_\phi)e^{-\eta t_{ave}} \quad (19)$$

对于形如  $\eta = -ae^{-\eta t_{ave}}$  ( $a > 0$ ) 的方程,当  $0 < a < \frac{\pi}{2t_{ave}}$  时,方程的全部根都为负实部,而当  $a \geq \frac{\pi}{2t_{ave}}$  时,方程至少会有一个根为正实部. 因此,当

$$0 < R_\phi + S_\phi - T_\phi < \frac{\pi}{2t_{ave}},$$

即

$$0 < t_{ave} < \frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)}$$

时,方程(17)的全部根都为负实部,而当  $R_\phi + S_\phi - T_\phi \geq \frac{\pi}{2t_{ave}}$ , 即

$$t_{ave} \geq \frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)}$$

时,方程(17)至少会有一个根为正实部.

由于判别系统稳定性的充要条件是系统传递函数的特征方程的所有根均严格位于左半平面,可得方程

$$\varphi' = \frac{(R_\phi + S_\phi - T_\phi)M_\phi}{P_\varphi M_\phi + 1} \quad (20)$$

在

$$0 < t_{ave} < \frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)}$$

时趋于稳定,而在

$$t_{ave} \geq \frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)} \quad (21)$$

时变得不稳定. 结合本文模型的实际意义,表明设计主体应用设计系统时的延时过大会破坏其稳定性,即会影响设计系统对设计能力的提升效果,这是设计能力提升的不利因素.

## 4 结论

本文通过对设计系统管理的设计资源进行分析,构建了设计能力评价指标,并采用灰色关联度与模糊综合评价法对2016年~2017年间的设计能力评价指标进行求解,得出了准则权重,最后讨论了延时会对设计系统与设计能力关系的影响. 研究发现:

1) 设计系统与设计能力关系受限于设计系统的应用程度,与设计能力关系密切程度是:设计流程完整率、设计工具完整率、设计准则完整率、设计数据使用率.

2) 考虑时间因素,设计系统与设计能力关系稳定的临界点是  $\frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)}$ , 当延时时间大于  $\frac{\pi}{2(R_\phi + S_\phi - T_\phi)}$  时,会影响设计系统对设计能力的提升效果.

## 参考文献(References)

- [1] 杨青, 吕佳芮, 索尼娅. 基于设计结构矩阵(DSM)的复杂研发项目建模与优化研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 989-1002.  
(Yang Q, Lv J R, Kherbachi Sonia. Progress in modeling and optimization for complex R&D project based on design structure matrix[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(4): 989-1002.)
- [2] 杨国辉, 刘继红. 基于设计结构矩阵和SysML的复杂产品研制流程建模与优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(5): 921-928.  
(Yang G H, Liu J H. DSM and SysML-based complex product development process modeling and optimizing method[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(5): 921-928.)
- [3] 曹岩, 韦婉钰, 乔虎, 等. 采用设计结构矩阵的突发事件扩散预测及建模方法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 68-75.  
(Cao Y, Wei W Y, Qiao H, et al. Disruption propagation prediction and modeling in supply chain system with DSM[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 68-75.)
- [4] Sauser B J, Marquez J E R, Henry D, et al. A system maturity index for the systems engineering life cycle[J]. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2008, 3(6): 673.
- [5] Tan W, Ramirezmarquez J, Sauser B. A probabilistic approach to system maturity assessment[J]. Systems Engineering, 2011, 14(3): 279-293.
- [6] 耿超, 曲世友, 林廷宇, 等. 复杂数字化工业体系成熟度评估技术研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2020-2026.  
(Geng C, Qu S Y, Lin T Y, et al. Research on maturity evaluation technology of complex digital industrial system [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2020-2026.)
- [7] 屈也频, 金惠明, 何肇雄. 航母舰载机装备体系及指标论证方法[J]. 航空学报, 2018, 39(5): 108-119.  
(Qu Y P, Jin H M, He Z X. Carrier-based aircraft equipment system-of-systems and index demonstration method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 108-119.)
- [8] 郑浩, 冯毅雄, 高一聪, 等. 基于性能演化的复杂产品概念设计求解过程研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 214-223.  
(Zheng H, Feng Y X, Gao Y C, et al. The solving process of conceptual design for complex product based on performance evolution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 214-223.)
- [9] 李响, 李为吉. 利用协同优化方法实现复杂系统分解并行设计优化[J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 300-304.  
(Li X, Li W J. A new collaborative optimization algorithm and its applications to complex system parallel design[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(3): 300-304.)
- [10] 杨威, 庞永锋. 基于区间值直觉模糊不确定语言变量的灰色关联度分析方法[J]. 运筹与管理, 2016, 25(2): 128-132.  
(Yang W, Pang Y F. New grey relational analysis method based on interval-valued intuitionistic fuzzy uncertain linguistic information[J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(2): 128-132.)
- [11] 韩敏, 张瑞全, 许美玲. 一种基于改进灰色关联分析的变量选择算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1647-1652.  
(Han M, Zhang R Q, Xu M L. A variable selection algorithm based on improved grey relational analysis[J]. Control and Decision, 2017, 32(9): 1647-1652.)
- [12] Xia X, Yu S, Kai W, et al. Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and grey correlation analysis method[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 152(6): 303-309.
- [13] Dong M, Li S, Zhang H. Approaches to group decision making with incomplete information based on power geometric operators and triangular fuzzy AHP[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(21): 7846-7857.
- [14] 李煜华, 高杨. 基于Logistic函数的互补关系创新产品的扩散叠加模型研究[J]. 管理学报, 2011, 8(6): 925-928.  
(Li Y H, Gao Y. Diffusion superimposition model of innovation product with complementary relationship based on Logistic function[J]. Chinese Journal of Management, 2011, 8(6): 925-928.)
- [15] Jing R Y, Tseng F M. Fuzzy piecewise logistic growth model for innovation diffusion: A case study of the TV industry[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2016, 18(3): 511-522.
- [16] Simmonds M C, Higgins J P. A general framework for the use of logistic regression models in meta-analysis[J]. Statistical Methods in Medical Research, 2016, 25(6): 2858-2877.

## 作者简介

贺颖(1979—), 女, 博士生, 从事复杂机械产品设计与仿真与评估系统的研究, E-mail: kirsty1012@163.com;

赵罡(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事计算机辅助设计及制造、虚拟现实技术与应用、飞机装配等研究, E-mail: zhaog@buaa.edu.cn;

修睿(1993—), 女, 硕士生, 从事控制科学与工程、导航、制导与控制的研究, E-mail: xiurui2012@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)