

基于 Lotka-Volterra 模型的复杂产品设计指标分解关联定量分析

谷孙权 张海柱* 黎荣 饶坝 汪豪

西南交通大学机械工程学院,成都,610031

摘要:针对复杂产品设计指标演化过程中关联关系往往会使分解的子功能结构设计指标被高估或低估的问题,且鉴于设计指标分解与群落生态学类似,提出了一种基于 Lotka-Volterra 模型的设计指标分解关联定量分析方法。分析了复杂产品演化过程,定义了设计指标分解过程中的生态主体和关联关系;基于 Lotka-Volterra 模型构建了系统与子功能结构设计指标之间的分解关联模型,利用龙格-库塔法结合最小二乘法求解了模型系数,定量分析了设计指标之间的关联关系;最后,以高速列车系统指标能耗与子功能结构设计指标关联求解为例,验证了方法的有效性。研究表明,该方法能够量化识别复杂产品设计指标演化过程中的相互作用关系,可为正向创新设计优先突破的方向提供定量依据。

关键词:设计指标;正向设计;Lotka-Volterra 模型;关联建模;定量分析

中图分类号:TP391

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quantitative Analysis of Correlation for Complex Product Design Indicator Decomposition Based on Lotka-Volterra Model

GU Sunquan ZHANG Haizhu* LI Rong RAO Ba WANG Hao

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

Abstract: Aiming at the problems of the correlations in the evolution processes of product design indicators made the decomposed sub-functional structure design indicators overestimated or underestimated, and the decomposition of design indicators was similar to community ecology, a method of quantitative analysis of the correlations in the decomposition of design indicators was proposed based on the Lotka-Volterra model. Firstly, the complex product evolution processes were analysed, then the ecological subjects and correlations in design indicators decomposition was defined. Secondly, the decomposition correlation model between system and sub-functional structure design indicators was constructed based on the Lotka-Volterra model, and the coefficients were solved by using the Runge-Kutta combined with the least-squares method to quantitatively analyze the correlation among design indicators. Finally, the effectiveness of the method was verified by taking the example of solving the correlation between the energy consumption of high-speed train system and the design indicators of sub-functional structure. The findings show that the methodology may quantify the interaction between identifying complex product design indicators in the evolution processes and may provide a quantitative basis for positive directions towards innovative design priority breakthroughs.

Key words: design indicator; forward design; Lotka-Volterra model; correlation modeling; quantitative analysis

0 引言

产品设计指标作为正向设计的输入,是描述产品设计条件、使用效能以及工程质量的技术量度^[1]。在复杂产品正向设计中,设计指标分解是保证产品设计先进性和匹配性的根本,直接影响正向设计的成功与否和周期长短^[2]。然而,由于产品系统、子功能结构多个层级设计指标之间都存在复杂的相互作用关系,设计指标之间的关联

是影响产品设计指标分解效率和整体性能的关键因素,因此,构建设计指标关联模型,识别设计指标之间相互作用关系是复杂产品正向设计指标分解的重要基础。

目前,关于产品设计指标分解关联建模的研究主要集中在产品性能目标到设计参数的关联映射上,主要有基于复杂网络的关联网络建模方法^[3]、基于设计结构矩阵的关联矩阵方法^[4]、基于灰色关联分析的建模方法^[5]等。吴庆鸣等^[6]基于关联网络构建了三层设计参数的逐层传递结构,实现了复杂产品的变形设计分析;刘振宇等^[7]利

收稿日期:2024-05-11

基金项目:国家自然科学基金(52105277);四川省自然科学基金(2022NSFSC0038)

用灰熵关联分析建立了产品特征参数与性能之间的映射,实现了关键特征参数的筛选;李愚等^[8]基于关联网络构建了汽车外形设计意向目标和设计参数的基元网络模型,利用复杂网络理论的节点敏感性和度数大小实现了不同意向目标下关键参数的筛选;詹敏等^[9]在传统零部件关联网络基础上构建了产品参数基元网络,通过敏感度定量计算了纵向不同层级参数间的关联;褚学宁等^[10]利用关联矩阵构建了“性能监测参数—性能参数—设计参数”的两级关联矩阵,提取了与性能退化具有密切相关性的关键设计参数;彭翔等^[11]利用关联矩阵构建了设计变量与设计函数的耦合度矩阵,结合敏感度计算定性分析了耦合度,实现了矩阵的降维和设计函数的分解。

然而,现有的设计指标分解关联建模方法仍处于数据依赖的静态的相互耦合关联建模,即只从某一个产品架构的角度进行分析^[12]。近年来,在产品性能演化产生的性能指标交互作用研究方面,ZHANG 等^[13-14]引入群落生态学理论中的物种竞争合作模型——Lotka-Volterra(L-V)方程,将工程系统中系统与组件的交互作用看作生态个体之间的相互作用,从系统与组件技术性能的演化中挖掘关联关系,探索提高系统性能的策略。群落生态学作为研究种群特性、物种组成更新,以及群落演替规律的一门学科,在物种个体演进方面具有一定的优势,在飞机等工程系统的技术演化预测^[14]、复杂产品协同设计^[15-17]中已有成功的应用。在复杂产品正向设计指标分解中,张海柱等^[17]基于群落生态学,将个体—物种—种群—生态系统映射为设计指标个体—系统或功能结构设计指标集合—设计指标集合群体—设计指标体

系,从设计指标分解架构、相互作用关系以及演进模式等特性与群落空间结构、物种相互关系、演替等生态特征的对应关系验证了群落生态学方法在复杂产品设计指标分解中的适用性。

因此,针对产品设计指标演化过程中的相互作用关系,本文提出一种基于群落生态学中 Lotka-Volterra 模型的设计指标演化过程中关联关系的定量分析方法;在复杂产品系统演化的分析基础之上,进行设计指标分解关联与群落生态学的生态关系映射,构建基于 Lotka-Volterra 模型的设计指标分解关联模型并提出模型求解方法;以高速列车系统级能耗设计指标与子功能结构设计指标分解关联的定量分析为例验证方法的可行性。

1 设计指标演化关联

1.1 产品系统演化

产品的演化过程包括三个阶段:颠覆式演化、激进式演化、渐进式演化,分别对应产品系统的诞生、子功能结构的替代升级以及子功能结构优化和零部件的替代升级^[12]。在初代产品的诞生之后,演化便通过对零部件以及子功能结构的不断替换优化实现。如图 1 所示,产品的初始系统为 X_1 ,定义 $X_1 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$,其中, $Y_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为构成系统的子功能结构, $Y_i = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$; $Z_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为构成子功能结构 Y_i 的零部件。随着技术的发展,隶属于子功能结构 Y_i 中的零部件 Z_1, Z_2 等被具有更优越性能的 Z'_1, Z'_2 所取代,形成新的 Y'_i ,进而形成新的系统 X_2 ;类似地,在第二代系统 X_2 的基础之上,通过零部件及子功能结构的不断优化,形成系统 X_3 。

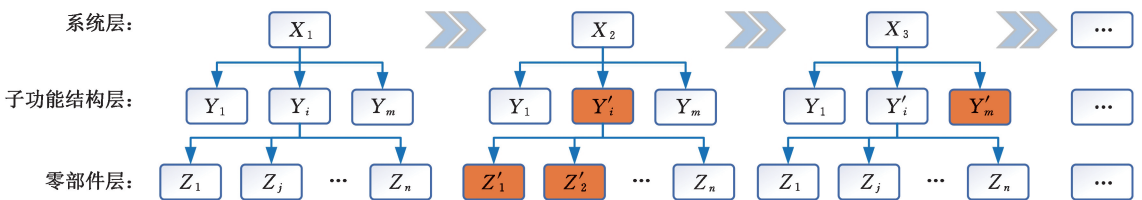


图 1 复杂产品系统演化图

Fig.1 Evolutionmap of complex product system

在产品演化过程中,系统的演化主要体现在整体技术性能的演化上,如飞机的气动效能、高速列车的运行速度等,系统的渐进演化模式使技术性能演化的趋势呈现“S”形曲线,使得系统演化建模成为可能;对于子功能结构以及零部件,演化主要体现在结构、属性以及特征参数^[18]的动态演化上,二者都可以归结为复杂产品设计指标的演

化。一方面,在工程系统中,研发和资金投入等对于子功能结构设计指标的提升有限^[19],因此需要在系统与子功能结构之间合理分配资源以实现整体性能的优化;另一方面,伴随着系统设计指标的演化,子系统功能结构设计指标的重要程度发生改变。设计者需要从指标演化数据中挖掘系统与子功能结构设计指标的关联,确定对产品系统整

体性能提升更为重要的子功能结构设计指标,从而更合理地进行研发投入,资源分配。

1.2 设计指标分解关联生态特征分析

基于产品设计指标分解体系与群落生态系统的相似性,将物种在生态系统演化过程中形成的生态关系映射至产品指标分解关联中。在生态学中,随着生态系统的演化,物种之间形成中立、偏利共生、偏害共生、互利共生、竞争和捕食关系,如表 1 所示,表中,“0”、“+”和“-”分别表示的是物种 1 和物种 2 演化对彼此的无关、有利影响和有害影响。

表 1 物种生态关系作用模式

Tab.1 Species ecological relationship role model

生态关系类型	物种 1	物种 2	关系说明
中立	0	0	物种 1 和物种 2 互不影响
偏利共生	0	+	物种 1 对物种 2 有利,物种 2 不影响物种 1
偏害共生	0	-	物种 1 对物种 2 有害,物种 2 不影响物种 1
互利共生	+	+	物种 1 和物种 2 的发展相互促进
竞争	-	-	物种 1 和物种 2 的发展相互抑制
捕食	+	-	物种 1 获利,物种 2 受到抑制

物种 1 和物种 2 在相互作用关系的影响下数量增加或减少,映射至设计指标分解关联中,以设计指标数值的变化作为物种数量变化,结合指标的演化趋势,以设计指标 A 和设计指标 B 的关联进行描述说明:

1)中立,如图 2a 所示,设计指标 A 与 B 之间并不存在直接的相互关系,考虑到系统与子功能结构的逻辑关系,实际产品中几乎不存在完全独立的两个系统与子功能结构设计指标。

2)偏利/害共生,如图 2b 和图 2c 所示,设计指标 A 的演化会促进或抑制 B 的增长,相反设计指标 B 的演化对 A 的影响却可以忽略不计。偏利共生和偏害共生属于单向的关联,且系统往往属于偏利的一方,由于系统是多个子功能结构的集成,子功能结构设计指标的改变会造成系统设计指标的增长或是降低,反之,有些子功能结构作为独立的外包件,不只存在于一类产品的架构中,系统设计指标的改变不会促进或抑制某个子功能结构设计指标演化。

3)互利共生,如图 2d 所示,设计指标 A 与 B 的演化呈现正相关,任一方设计指标的增大都会促进另一方指标的增长。

4)竞争,如图 2e 所示,设计指标 A 与 B 的演化依旧呈现正相关性,指标双方在演化过程中都

会对彼此产生抑制的影响。

5)捕食,如图 2f 所示,设计指标 A 作为捕食方,设计指标 B 作为被捕食方,在相互作用关系下,指标 A 得到增长,指标 B 受到抑制。

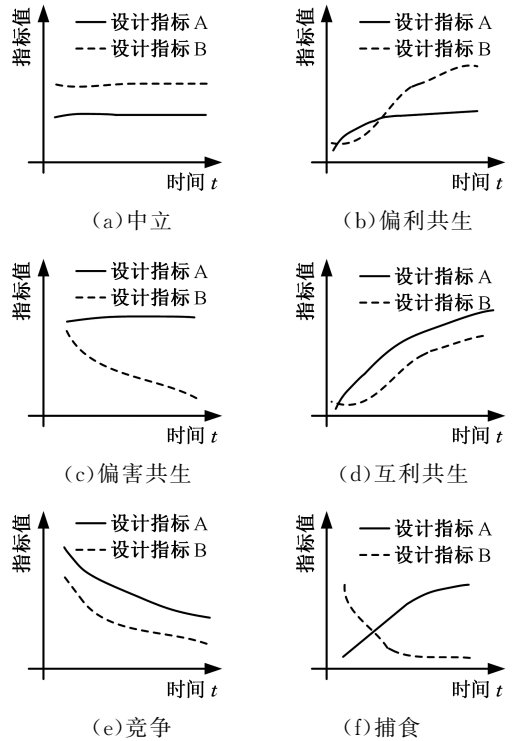


图 2 设计指标关联演化曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of design indicator correlation evolution curve

系统与子功能结构设计指标的竞争和捕食关系是双方为争夺有限资源而产生的相斥作用,这类资源可以是用于提高性能的研发、资金投入等。

2 设计指标分解关联模型及求解方法

2.1 设计指标分解关联模型构建

Lotka-Volterra 模型是用于模拟生态系统中物种之间竞争合作关系的模型,用来研究物种个体在竞争合作等相互作用关系影响下的数量演化^[12],模型的一般表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= a_n N(t) - b_n N(t)^2 + C_{nm} N(t)M(t) \\ \frac{dM(t)}{dt} &= a_m M(t) - b_m M(t)^2 + C_{mn} M(t)N(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 、 $M(t)$ 分别为物种 N 和 M 的数量; a_n 、 a_m 分别为两个物种的内禀增长率; b_n 、 b_m 分别为两个物种的增长阻力因素; C_{nm} 为物种 M 对 N 的作用系数; C_{mn} 为物种 N 对 M 的作用系数。

产品设计指标分解涉及系统设计指标与多个子功能结构设计指标,式(1)的两个个体关联模型无法满足要求,因此将其扩展为 1 个系统设计指标和 n 个子功能结构设计指标的演化关联模

型,表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_0}{dt} &= a_0 S_0 - b_0 S_0^2 + \sum_{i=1}^n C_{0i} S_0 S_i \\ \frac{dS_1}{dt} &= a_1 S_1 - b_1 S_1^2 + C_{10} S_1 S_0 \\ \frac{dS_i}{dt} &= a_i S_i - b_i S_i^2 + C_{i0} S_i S_0 \\ \frac{dS_n}{dt} &= a_n S_n - b_n S_n^2 + C_{n0} S_n S_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $S_0, S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为系统和各个子功能结构的设计指标值; $a_0, a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为系统和各个子功能结构设计指标值的演化率, 可以为增长率或是下降率, 与投入成本、指标自身特性相关; $b_0, b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为系统与子功能结构设计指标的演化阻力率, 用来决定指标演化的上下限, 与环境、约束条件等因素相关; $C_{0i}, C_{i0} (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别表示子功能结构设计指标 S_i 对系统设计指标 S_0 的作用关系, 系统设计指标 S_0 对子功能结构设计指 S_i 的反作用关系。

六种演化关联所对应的 C_{0i} 和 C_{i0} 取值如表 2 所示。

表 2 不同关联的系数值

Tab.2 Coefficient values of different correlations

关联关系	关联系数 C_{0i}	关联系数 C_{i0}
中立	0	0
竞争	-	-
捕食	- (+)	+ (-)
互利共生	+	+
偏利共生	0(+)	+ (0)
偏害共生	0(-)	- (0)

2.2 设计指标分解关联模型求解

考虑到本文构建的 Lotka-Volterra 关联模型属于微分方程组, 解析解一般无法直接求得, 4 阶龙格-库塔法作为求解微分方程的常用方法, 精度高, 程序简单^[20], 因此采用 4 阶龙格-库塔法求解方程的数值解, 然后利用最小二乘法进行模型未知参数的拟合。

在进行数据拟合之前, 需要对产品系统以及子功能结构的设计指标演化数据进行收集, 在一定时间 t (通常为年份) 内, 收集产品演化系列的指标数据, 形成指标演化数据集。为保证演化曲线拟合精度, 后一个时间点的指标值 S_0 应优于前一个时间点的指标值, 一年之内可能存在不同的产品, 选择同一年内的最优数据点, 然后利用下式进行量纲一化处理:

$$S_i^* = \frac{S_i}{S_{i\max}} \quad (3)$$

式中: S_i^* 为量纲一处理过后的数值; S_i 为原数据值; $S_{i\max}$ 为该指标采集到的数据中的最大值。

形成拟合数据样本之后, 借助 MATLAB 软件中的 ODE 求解器结合最小二乘法进行拟合。先利用 4 阶龙格-库塔法解微分方程, 求解出各数

据点的数值解, 随后, 以最小化数值解与实际数据点指标值之间差的平方和为目标, 利用最小二乘法进行参数范围的寻优。

3 实例

以高速列车能耗的设计指标分解关联为例说明上述方法的应用。随着列车运行速度的提高, 高速列车的节能问题越来越受到重视。在影响能耗的列车本身固有属性中, 文献[21]认为降耗主要通过列车阻力、轻量化、定员、牵引系统高效设计实现; 文献[22]认为列车能耗主要由列车质量(轴重)、列车头型和车体流线型设计决定; 文献[23]认为列车能耗由阻力、质量(轴重)、定员、辅助功率、系统效率决定; 文献[24]认为降耗主要从运行阻力降低、整车减重、提高牵引能力等方面进行。因此, 本文选取阻力、质量、定员及牵引作为能耗相关性较大的列车固有属性, 分别对应列车的车体、转向架以及牵引子功能结构。

对于系统来说, 能耗的量化指标众多, 选取常用的单位公里能耗^[23]作为衡量指标; 对于车体子功能结构来说, 当列车运行时速达到 400 km 时, 气动阻力将在阻力中占比 90% 以上, 故选取气动阻力系数作为车体的代表性指标^[25]; 对于转向架子功能结构来说, 轴重是衡量列车轻量化的主要指标^[26]; 对于牵引子功能结构来说, 牵引系统功率体现列车牵引性能, 考虑到定员的影响, 以每定员功率^[26]作为衡量指标。

3.1 高速列车能耗设计指标分解关联模型

在能耗分解过程中, 气动阻力系数、轴重越小, 单位公里能耗越大, 每定员功率越大单位公里能耗越小, 能耗与子功能结构设计指标值在相互作用关系下存在图 2 所示的演化趋势。因此, 可以利用 Lotka-Volterra 模型研究能耗与气动阻力系数、轴重以及每定员牵引功率演化中定量的相互作用关系。

利用 Lotka-Volterra 模型构建高速列车能耗设计指标分解关联模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_0}{dt} &= a_0 S_0 - b_0 S_0^2 + C_{01} S_0 S_1 + C_{02} S_0 S_2 + C_{03} S_0 S_3 \\ \frac{dS_1}{dt} &= a_1 S_1 - b_1 S_1^2 + C_{10} S_1 S_0 \\ \frac{dS_2}{dt} &= a_2 S_2 - b_2 S_2^2 + C_{20} S_2 S_0 \\ \frac{dS_3}{dt} &= a_3 S_3 - b_3 S_3^2 + C_{30} S_3 S_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: S_0, S_1, S_2, S_3 分别为单位公里能耗、气动阻力系数、轴重和每定员功率; a, b, C 为待拟合的未知参数。

3.2 模型求解

国内的高速列车从 2006 年发展至今已形成较为完整的谱系,以国内已有的时速 200 km/h 以上的高速列车为主要车型,同时考虑到日本东海道新干线高速列车发展起步最早,且设计注重轻量化,因此,以国内和日本部分高速列车为对象,从文献[25-28]以及企业提供的部分数据中收集单位公里能耗(S_0)、气动阻力系数(S_1)、轴重(S_2)和每定员功率(S_3)的数据,得到能耗关联设计指标数据集如表 3 所示。

表 3 能耗关联设计指标数据集

Tab.3 Energy consumption correlation design indicator dataset

运营时间	型号	$S_0/(kW \cdot h \cdot km^{-1})$	S_1	S_2/t	S_3/kW
1964	0 系	41.98	0.000 146 0	16	9.21
1985	100 系	33.30	0.000 148 0	15	8.35
1992	300 系	38.36	0.000 148 0	11.4	9.07
1997	500 系	38	0.000 131 0	11.4	13.77
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2012	CRH380D	22.3	0.000 105 0	17	17.32
2013	CRH380B	25	0.000 124 0	17	16.54
2018	CR400AF	20.8	0.000 100 7	16.4	17.36
2018	CR400BF	22.5	0.000 109 2	16.66	18.05

依次进行数据筛选、量纲一化处理形成数据拟合样本后,进行参数求解,拟合结果如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_0}{dt} &= -2.1717S_0 - 0.2790S_0^2 + 1.5437S_0S_1 + 0.6332S_0S_2 + 0.6962S_0S_3 \\ \frac{dS_1}{dt} &= -0.0896S_1 + 0.0615S_1^2 + 0.0335S_1S_0 \\ \frac{dS_2}{dt} &= -0.0050S_2 + 0.0452S_2^2 - 0.0454S_2S_0 \\ \frac{dS_3}{dt} &= 0.1088S_3 - 2.2757 \times 10^{-21}S_3^2 - 0.1299S_3S_0 \end{aligned} \right\} (5)$$

图 3 所示为模型与数据的拟合结果。

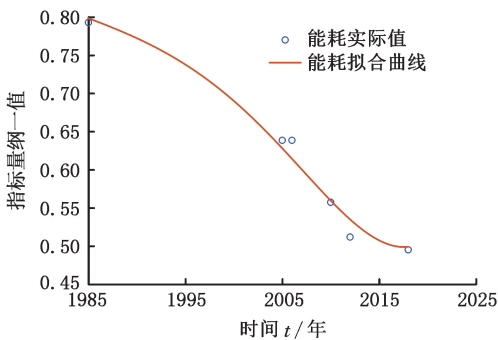


图 3 能耗拟合曲线

Fig.3 Energy consumption fitting curve

3.3 结果分析

3.3.1 能耗设计指标分解关联分析

根据拟合结果,从 Lotka-Volterra 模型参数角度分析能耗与气动阻力系数、轴重以及每定员

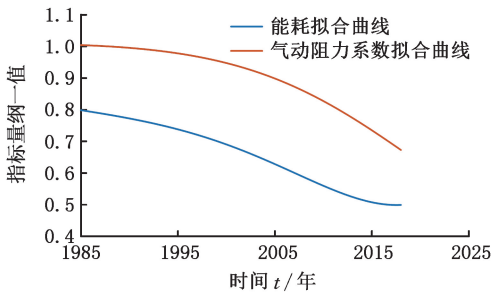
功率的关联关系。

1) 能耗与气动阻力系数。图 4a 给出了二者的交互演化曲线,可以观察到,能耗与气动阻力系数的演化趋势呈现正相关,都处于下降的趋势。气动阻力系数对能耗的影响系数为 1.5437,能耗对气动阻力系数的反作用系数为 0.0335,二者形成互利共生的关联关系,但气动阻力系数对能耗的影响远大于能耗对气动阻力系数的影响,这验证了产品系统中的涓滴效应是有限的。在高速列车指标分解过程中,设计者应注重二者之间的协同关系。

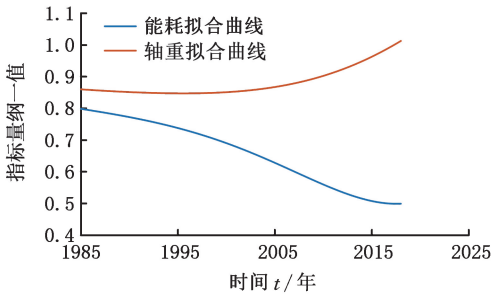
2) 能耗与轴重。图 4b 给出了二者的交互演化曲线,可以观察到,伴随着能耗的降低,轴重先是缓慢降低而后开始增长,这是由于样本中的新干线 300 系、500 系车因其动力分散等特点在轻量化方面已经达到领先水平,之后车型的轴重均大于这两种车的轴重。轴重对能耗的影响系数为 0.6332,能耗对轴重的反作用系数为 -0.0454,二者形成捕食的关联,能耗作为捕食者一方,轴重作为被捕食者。在高速列车设计中,能耗和轴重往往都是设计者想要降低的指标,因此,设计时应当注意二者的协调关系。

3) 能耗与每定员功率。图 4c 给出了二者的交互演化曲线,可以观察到,能耗与每定员功率的演化趋势呈现负相关,伴随着能耗的降低,每定员功率增长。每定员功率对能耗的影响系数为 0.6962,能耗对每定员功率的反作用系数为 -0.1299,与轴重类似,二者形成捕食的关联关系,每定员功率作为被捕食一方。随着高速列车的发展,列车运行速度不断提高,要求的牵引功率也在不断提升,与能耗降低存在冲突,因此,能耗的降低会抑制每定员功率的增长。

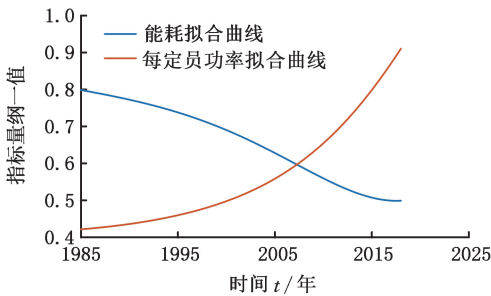
能耗、气动阻力系数、轴重以及每定员功率的自身演化率分别为 -2.1717、-0.0896、-0.0050 和 0.1088,表明能耗指标的下降潜力大于其余三个子功能结构的指标。同时,能耗的演化阻力系数相较于子功能结构设计指标最大,意味着相较于子功能结构的单独优化设计,在进行系统整体优化时往往面临更大的困难。通过比较参数 C_{0i} 的值,得出在能耗演化过程中对其影响程度大小依次为气动阻力系数、每定员功率以及轴重。因此,在考虑高速列车能耗相关的子功能结构设计指标的优化时,可以将研发以及资金等资源多投入在车体中,即降低列车运行过程中的气动阻力,通过车体头型优化、车体断面积缩小等手段实现,相较之下,轴重和每定员功率对能耗演化影响较小。



(a) 能耗与气动阻力系数演化图



(b) 能耗与轴重演化图



(c) 能耗与每定员功率演化图

图 4 能耗与子功能结构设计指标关联演化曲线

Fig.4 Curve of correlations between energy consumption and sub-functional structure indicators

3.3.2 结果验证

本文所提出的设计指标分解关联模型可通过准确性以及可解释性进行评估,准确性主要通过决定系数以及均方根误差体现,可解释性主要通过与已有研究方法及成果对比体现。

决定系数 R^2 主要衡量模型对数据的拟合优度,其值在 0 ~ 1 之间,越接近 1 则说明分解关联模型的拟合效果越好,计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (6)$$

式中: n 为数据点数量; S_i 为拟合样本实际数据值; \bar{S}_i 为模型数值解的值; \bar{S} 为拟合样本实际数据点的平均值。

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 是衡量预测值与真实值之间误差的指标,均方根误差值越小,则说明模型求解的数值解越精确,计算公式为

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (7)$$

根据式(6)计算出分解关联模型对能耗数据拟合的决定系数为 0.964,根据式(7)计算出分解关联模型对能耗数据拟合的均方根误差为 0.0193,模型准确性得到验证。

灰色关联分析 (grey relation analysis, GRA) 用于度量不同序列的相似性,适用于具有不确定性和噪声的数据集。考虑到本文的能耗设计指标关联数据集集中的数据点较少,采用改进的灰关联熵进行气动阻力系数、轴重、每定员功率与能耗的关联性计算,计算出气动阻力系数、轴重、每定员功率与能耗之间的相关性依次为 1.89、1.86、1.87,与本文提出的 L-V 模型对比如表 4 所示。

表 4 方法对比

Tab.4 Comparison of methods

方法	气动阻力系数	轴重	每定员功率	相关性排序 (由大到小)
改进的灰关联熵	1.89	1.86	1.87	气动阻力系数,每定员功率,轴重
本文模型	1.54	0.63	0.70	气动阻力系数,每定员功率,轴重

尽管采用两种方法计算出的三个设计指标与能耗的关联性大小存在差异,但是得出的相关性从大到小排序均为气动阻力系数、每定员功率、轴重,验证了本文方法的可解释性。已有研究表明^[21],对于下一代速度为 400 km/h 的高速动车组,低阻力设计、轻量化设计、高效牵引系统为主要降耗方式,在所有阻力中气动阻力占比高达 95%,列车运行气动阻力系数越小对能耗的降低贡献越大,相比之下,轴重减小带来机械阻力的减小,从而减小坡道阻力,但是对平直道减阻降耗有限。文献[29]表明,以国内某型动车为例,运行阻力每减小 1%,列车质量每减小 1%,牵引系统效率每提高 1%,所带来的能耗减少依次为 1.5%、0.82%以及 1.03%,与本文相关性排序结果一致。因此,利用本文方法计算出的能耗与气动阻力系数、轴重和每定员功率之间的关联符合工程实际情况,可解释性得到验证。

4 结论

1) 分析了复杂产品的系统演化过程,以群落生态学为指导,定义了系统与子功能结构设计指标在演化中的生态关联。通过 Lotka-Volterra 模型建立了系统与子功能结构设计指标的关联模型,定义了模型参数含义,提出了模型系数求解的方法,实现了设计指标分解关联的定量求解,解决

了系统演化过程中的设计指标分解关联建模问题,可为复杂产品正向创新设计提供定量依据。

2)以高速列车能耗设计指标分解关联为例,对能耗与气动阻力系数、轴重以及每定员功率的关联进行了定量与定性分析,给出了能耗优化优先考虑的方向,为高速列车正向设计指标分解提供了一种新的研究思路。

3)复杂产品系统与子功能结构的多个设计指标之间、子系统功能结构内部的设计指标之间均存在关联,都会影响正向设计指标分解效率与准确性,因此,后续需要进一步研究多维度的设计指标分解关联。

参考文献:

[1] 魏宏艳. 工程系统设计指标的最优分配方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
WEI Hongyan, Research on the Optimum Allocation Method of Engineering System Design Requirements[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2006.

[2] OSTERAS T, MURTHY D N P, RAUSAND M. Product Performance and Specification in New Product Development[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 17(2):177-192.

[3] LOUREIRO G B, FERREIRA J C E, MESSER-SCHMIDT P H Z. Design Structure Network (DSN): a Method to Make Explicit the Product Design Specification Process for Mass Customization[J]. Research in Engineering Design, 2020, 31:1-24.

[4] 程贤福, 邱浩洋, 万丽云, 等. 基于公理设计和模块关联矩阵的产品族设计耦合分析[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7):794-803.
CHENG Xianfu, QIU Haoyang, WAN Liyun, et al. Coupling Analysis of Product Family Design Based on Axiomatic Design and Modular Incidence Matrix[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(7):794-803.

[5] 胡东方, 王卓, 姬源浩. 基于广义灰关联的舱体结构可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15):2021-2029.
HU Dongfang, WANG Zhuo, JI Yuanhao. Structure Reliability Analysis for Airborne Pod Frame Based on Generalized Grey Relational Method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15):2021-2029.

[6] 吴庆鸣, 宗驰, 张强, 等. 复杂产品变型设计及其参数传递方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24):2955-2960.
WU Qingming, ZONG Chi, ZHANG Qiang, et al.

Research on Variant Design and Parameter Transfer Method for Complicated Products[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(24):2955-2960.

[7] 刘振宇, 周思杭, 谭建荣, 等. 基于多准则修正的产品性能多参数关联分析与预测方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15):105-114.
LIU Zhenyu, ZHOU Sihang, TAN Jianrong, et al. Multiple Parameters Correlation Analysis and Prediction Method of Product Performance Based on Multi-criteria Modification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013 49(15):105-114.

[8] 李愚, 卢纯福, 刘肖健, 等. 汽车外形设计的基因网络模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(5):1249-1260.
LI Yu, LU Chunfu, LIU Xiaojian, et al. Gene Network Model of Automobile Styling Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(5):1249-1260.

[9] 詹敏, 王铮, 赵燕伟, 等. 基于产品参数基元网络的变更传播路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(8):2545-2556.
ZHAN Min, WANG Zheng, ZHAO Yanwei, et al. Optimization of Change Propagation Path Based on Product Parameter Basic-element Network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(8):2545-2556.

[10] 褚学宁, 陈汉斯, 马红占. 性能数据驱动的机械产品关键设计参数识别方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3):185-196.
CHU Xuening, CHEN Hansi, MA Hongzhan. Identification of Critical Design Parameter for Mechanical Products Based on Performance Data[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3):185-196.

[11] 彭翔, 刘振宇, 谭建荣, 等. 基于多重耦合聚类的复杂产品多变量关联设计模型分解[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3):111-121.
PENG Xiang, LIU Zhenyu, TAN Jianrong, et al. Multivariable Correlative Model Decomposition for Complex Product Design Based on Clustering with Multiple Couplings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3):111-121.

[12] ZHANG G, MORRIS E, ALLAIRE D, et al. Research Opportunities and Challenges in Engineering System Evolution[J]. Journal of Mechanical Design, 2020, 142(8):1-14.

[13] ZHANG G, MCADAMS D, SHANKAR V, et al. Modeling the Evolution of System Technology Performance When Component and System Technology Performances Interact: Commensalism and Amensalism[J]. Technological Forecasting and So-

- cial Change, 2017, 125:116-124.
- [14] ZHANG G, MCADAMS D, SHANKAR V, et al. Technology Evolution Prediction Using Lotka-Volterra Equations[J]. Journal of Mechanical Design, 2018, 140(6):061101.
- [15] 彭巍, 胡远航, 龚壮辉. 生态视角的复杂产品协同设计网络稳定性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(1):88-94.
PENG Wei, HU Yuanhang, Gong Zhuanghui. Stability of Complex Product Collaborative Design Network from Perspective[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2023, 20(1):88-94.
- [16] FU Z, GUO W, WANG L, et al. Ecological Network Evolution Analysis in Collective Intelligence Design Ecosystem[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 58:102150.
- [17] 张海柱, 黎荣, 丁国富, 等. 高速列车顶层设计指标分解研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(2):456-466.
ZHANG Haizhu, LI Rong, DING Guofu, et al. Research Status and Prospect of Decomposition of Top-level Design Indicators for High-speed Trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(2):456-466.
- [18] 肖人彬, 林文广. 数据驱动的产品族设计研究[J]. 机械设计, 2020, 37(6):1-10.
XIAO Renbin, LIN Wenguang. Research on Data-driven Product Family Design[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(6):1-10.
- [19] ZHANG G, ALLAIRE D, SHANKAR V, et al. A Case Against the Trickle-down Effect in Technology Ecosystems[J]. PLOS ONE, 2019, 14(6):e0218370.
- [20] WEN J, HUANG C. Multistep Runge-Kutta Methods for Volterra Integro-differential Equations[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2024, 436:115384.
- [21] 孙帮成, 李明高, 安超, 等. 高速列车节能降耗关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4):69-82.
SUN Bangcheng, LI Minggao, AN Chao, et al. Research on Key Technology of High-speed Train Energy Consumption[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 17(4):69-82.
- [22] 张经强, 梁玉锋. 高速列车外形的气动性能数值计算和头部外形的改进[J]. 计算力学学报, 2003, 20(5):631-635.
ZHANG Jingqiang, LIAN Xifeng. Numerical Calculation of Aerodynamic Characteristics and Improvement for Head Shape of High Speed Trains[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(5):631-635.
- [23] 李杰波. 动车组固有速度—单位能耗指标及计算方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(4):97-98.
LI Jiebo. Research on Speed-energy Consumption-Distribution of High-speed EMU. [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(04):97-98.
- [24] 王雷, 于东明, 丁勇. 动车组运营速度由 350 km/h 提升至 400 km/h 可行性研究[J]. 机车电传动, 2020(2):17-22.
WANG Lei, YU Dongming, DING Yong. Feasibility Study on Raising the Operation Speed of EMU from 350 km/h to 400 km/h[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2):17-22.
- [25] 黄问盈, 黄民. 21 世纪初铁道高速列车特色[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(2):23-30.
HUANG Wenyang, HUANG Min. Distinct Features of Railway High Speed Train in Early Years of the 21th Century[J]. Railway Locomotive & Car, 2009, 29(2):23-30.
- [26] 张卫华. 动车组总体与转向架[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2011.
ZHANG Weihua. Rolling Stock Overall and Bogies [M]. Beijing: China Railway Publishing House Co. Ltd.
- [27] 冈田宏. 日本新干线的现状和未来的发展[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2):21-25.
OKADA H. Present Status and Future Development of SHINKANSEN[J]. China Railway Science, 2002, 23(2):21-25.
- [28] 田永洙. 动车组的运用与能耗之间的关系分析[J]. 现代制造技术与装备, 2014(3):51-53.
TIAN Yongzhu. Analysis on the Relationship Between Energy Use and EMU[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2014(3):51-53.
- [29] 于浩然. 动车组能耗和节能技术研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(2):8-11.
YU Haoran. Technical Research on Energy Consumption and Energy Saving of Multiple Units[J]. Rolling Stock, 2019, 57(2):8-11.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 谷孙权, 男, 2000 年生, 硕士研究生。研究方向为复杂装备正向设计指标分解。E-mail: gusunquan@my.swjtu.edu.cn。
张海柱* (通信作者), 男, 1989 年生, 副教授。研究方向为复杂装备智能设计与数字孪生。E-mail: zhanghaizhu@swjtu.edu.cn。

本文引用格式:

谷孙权, 张海柱, 黎荣, 等. 基于 Lotka-Volterra 模型的复杂产品设计指标分解关联度量分[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1479-1486.

GU Sunquan, ZHANG Haizhu, LI Rong, et al. Quantitative Analysis of Correlation for Complex Product Design Indicator Decomposition Based on Lotka-Volterra Model[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1479-1486.