

# 再制造发动机的可持续发展水平研究

崔福曾 李涛 闫萌 张应中

(大连理工大学机械工程学院 辽宁 大连 116081)

**摘要:** 近年来,再制造发动机的生产和使用的必要性备受质疑。本文从可持续发展评价的角度去对比三种再制造发动机和全新制造发动机,并给出结论;目前可持续发展评价的单一评价方法繁多,因此产生“多方法评价结论非一致性”的问题,本文给出一种距离熵最小的模型并解决了上述问题。

**关键词:** 再制造发动机;可持续发展;距离熵

## 0 引言

近年来,随着汽车的普及,汽车废旧发动机越来越多,这使得发动机的再制造成为热点。虽然目前再制造发动机的质量等技术指标能够达到相应标准,但是环境、经济、社会三个维度仍面临争议性问题,比如,再制造发动机是否更环保,成本更低,从事生产再制造发动机的员工工作环境是否更好。本文从可持续发展评价的角度,对三种再制造发动机(修复型、油改气型、加装型)和全新制造发动机进行比较,最终得出结论。但是目前单一可持续评价方法繁多,如理想解法、灰色关联度法、模糊综合评价法、遗传算法、BP神经网络算法,以及层次分析法等,由于方法不同,故会产生“多方法评价结论非一致性”的问题,本文给出一种距离熵最小的模型并解决了上述问题。

## 1 基于距离熵最小的可持续发展组合评价模型

假定存在一个组合评价向量集 $u_0$ ,它的构成要素为 $n$ 种评价向量的任意线性组合, $u_i$ 为单一方法评价结果向量, $i=1, 2, \dots, n$ ,即:

$$u_0 = \sum_{i=1}^n w_i u_i \quad (1)$$

式中, $u_0$ 可看作基于评价向量 $u_i$ 的若干种可能的组合评价向量,它的全体

$$\{u_0 \mid u_0 = \sum_{i=1}^n w_i u_i, w_i \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1\}$$

表示可能的组合评价集。

假定由(1)构成的组合评价向量集中存在一个最优向量组合 $u_0$ ,使得 $u_0$ 到所有评价向量 $u_i$ 的偏差值最小,那么我们可以根据这个思路建立最小偏差模型。即:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n \|u_0 - u_i\| &= \sum_{i=1}^n \left\| \sum_{j=1}^n w_j u_j - u_i \right\| \\ S.T. \sum_{i=1}^n w_i &= 1, w_i > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

求解模型(2),可以得到 $w_i$ ,即为最优权重分配,由 $w_i$ 可求得该模型下最优组合评价向量。

通过观察可知,模型(2)仅考虑到单一评价方法评价结果与最优评价向量之间的距离,未考虑到单一评价指标在该评价方法中的波动性。设 $1/S_i$ 为客观权重,如果 $S_i$ 越小,表明对该评价指标越重视。

假定有 $m$ 个待评价指标, $n$ 种单一评价方法。其中, $A=\{a_j\}, j=1, 2, \dots, n$ 表示评价方法集, $X=\{x_i\}, i=1, 2, \dots, m$ 表示待评价指标。

$$(X_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)知,如果 $\sum_{j=1}^n x_{ij} / n (i=1, 2, \dots, m)$ 较大,则在组合评价结果向量中该评价指标趋好,并且如果各个单一评价方法的评价结果向量十分接近,那么该方法集的选取质量较高。假定组合评价的结果向量为 $x=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ ,那么可以表示出任一评价方法的结果与组合评价的结果之间的误差 $d_j$ :

$$d_j = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i)$$

$$\text{其中, } S_i = \sum_{j=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n-1}$$

由  $d_j$  可以构建出离差最小化模型，即：

$$\begin{aligned} \min \sum_{j=1}^n d_j &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i) \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{(x_{ij} - x_i)^2}{S_i} \quad (4) \\ S.T. \sum_{i=1}^m x_i &= 1, \quad x_i > 0 \end{aligned}$$

模型 (4) 虽然弥补了模型 (2) 中未考虑到单一评价方法中的单一评价指标的波动性的缺点，但熵权法的优点仍没有用到。因此根据熵的定义，我们可直接定义  $d_j \ln d_j$  为距离熵。由于  $d_j \ln d_j$  的值正负不可确定，为消除其影响，这里直接采用指数的方法。

定义 1：根据指数消除正负影响和熵的定义，直接定义出距离熵  $d_j e^{d_j}$ 。

定义 1 中的距离熵模型相对于 (4) 而言，直接增加了惩罚系数  $e^{d_j}$ ，使得“奖惩优劣”的思想在该组合评价模型中得到体现。

由模型 (4) 结合定义 1 可建立基于距离熵最小的组合评价模型：

$$\begin{aligned} \min H &= \sum_{j=1}^n w_j d_j e^{d_j} = \sum_{j=1}^n w_j \sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i) e^{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i)} \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{(x_{ij} - x_i)^2}{S_i} e^{\sum_{i=1}^m \frac{(x_{ij} - x_i)^2}{S_i}} \quad (5) \\ S.T. \sum_{i=1}^m x_i &= 1, \quad x_i > 0 \end{aligned}$$

模型 (5) 中  $w_j$  视为主观权重向量，可以由层次分析法等求得，与决策者主观偏好即对各评价指标的重视程度有关。如果不考虑决策者主观权重，上述模型可得到简化，那么基于距离熵最小的组合评价模型可表示为：

$$\begin{aligned} \min H &= \sum_{j=1}^n d_j e^{d_j} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i) e^{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_i) S_i^{-1} (x_{ij} - x_i)} \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{(x_{ij} - x_i)^2}{S_i} e^{\sum_{i=1}^m \frac{(x_{ij} - x_i)^2}{S_i}} \quad (6) \\ S.T. \sum_{i=1}^m x_i &= 1, \quad x_i > 0 \end{aligned}$$

## 2 再制造发动机的可持续发展水平研究

### 2.1 构建再制造发动机的可持续发展指标体系

指标是反映系统要素或效益的数量概念和具体数

值，指标体系是可持续发展评价的基础，是综合反映待评价目标的可持续发展水平的依据。本文从三个维度，即环境、经济、社会对再制造发动机建立可持续发展指标体系即表 1，其中环境维度为发动机再制造各个阶段产生的环境效应特征化之后的指标值，包括：初级能源消耗 (PED)，以千克标准煤 (kg ce) 表示；全球变暖潜值 (GWP)，以千克 CO<sub>2</sub> 当量 (kg CO<sub>2</sub> eq) 表示；酸化潜值 (AP)，以千克 SO<sub>2</sub> 当量 (kg SO<sub>2</sub> eq) 表示；富营养化潜值 (EP)，以千克 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 当量 (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq) 表示；臭氧层损耗潜值 (ODP)，以千克 CFC-11 当量 (kg CFC-11 eq) 表示；光化学臭氧合成潜值 (POCP)，以千克 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 当量 (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) 表示。经济维度为一台发动机再制造各个阶段产生的经济成本，社会维度的指标数据采取发动机的社会可再制造性指标值。以下指标数据均来自“复强动力公司”（全称“中国重汽集团济南复强动力有限公司”）的 WD615.87 型斯太尔发动机的调研和相关延伸计算，WD615.87 型斯太尔发动机如图所示。

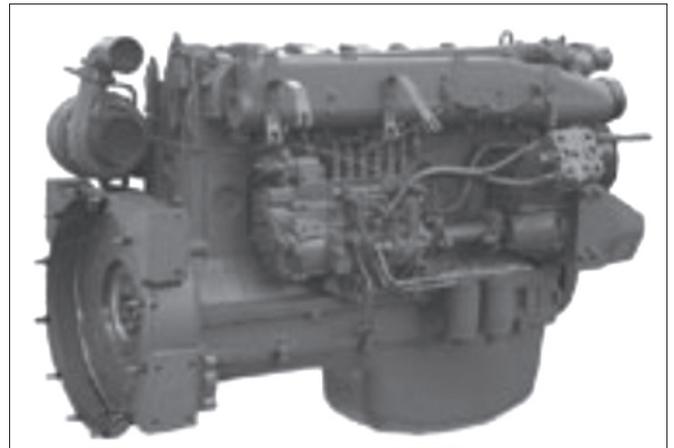


图 WD615.87 型斯太尔发动机

### 2.2 可持续发展综合评价结果

本文采用理想解法、灰色关联度法、模糊综合评价法、遗传算法、BP 神经网络算法和层次分析法等 6 种单一可持续发展评价方法分别对上述指标体系进行可持续发展综合评价，并将结果进行归一化，结果如表 2 所示。

由表 2 可见，上述多种单一可持续发展评价方法评价结果并不一致，因此根据上述 6 种结果采用 (6) 距离熵最小的组合评价模型，求得  $X = (\{x_i\}, i=1, 2, \dots, 4) = \{0.2587, 0.2756, 0.2089, 0.2568\}$ 。

## 3 结语

由上述可知，本文给出的基于距离熵最小的组合评

表1 再制造发动机可持续发展指标体系

指标		修复型	油改气	加装型	全新制造
环境	PED	1.02E+05	1.09E+05	1.06E+05	1.21E+05
	GWP	5.11E+05	7.16E+05	5.26E+05	4.89E+05
	AP	5.21E+02	2.11E+02	5.59E+02	4.47E+02
	EP	5.20E+01	2.76E+01	5.51E+01	5.03E+01
	ODP	2.76E-05	1.45E-05	2.33E-01	7.62E-05
	POCP	2.64E+01	7.99E+00	2.76E+01	2.28E+01
经济	外协及采购 / (千元 / 台)	4.56E+00	9.82E+00	1.54E+01	1.48E+02
	回收 / (千元 / 台)	1.21E+01	1.21E+01	1.21E+01	—
	再制造 / (千元 / 台)	3.87E+00	4.12E+00	3.11E+00	—
	装配 / (千元 / 台)	8.13E-01	7.28E-01	6.95E-01	4.82E-01
	销售 / (千元 / 台)	1.02E+01	8.25E+00	9.60E+00	7.58E+00
	使用 / (千元 / 台)	2.90E+02	2.32E+02	4.70E+02	2.78E+02
社会	人类权利	0.88	0.92	0.82	0.90
	健康安全	0.97	0.95	0.87	0.98
	工作环境	0.80	0.84	0.76	0.91
	社会经济	0.92	0.88	0.85	0.93

表2 再制造发动机单一可持续评价方法评价结果归一值

类型	理想解法	灰色关联度法	模糊法	遗传算法	BP神经网络	层次分析法
修复型	0.2614	0.2715	0.2328	0.2623	0.2532	0.2673
油改气	0.2892	0.2653	0.2614	0.2784	0.2816	0.2639
加装型	0.1956	0.1984	0.2362	0.2047	0.2105	0.2158
全新制造	0.2538	0.2648	0.2696	0.2546	0.2547	0.2530

价模型能够解决多种单一评价方法评论结果不惟一的问题。

由基于最小距离熵的可持续发展评价结果可知,从经济、社会和环境三个维度去对三种再制造发动机和全新制造发动机进行评价时,油改气再制造发动机具备相当高的优越性,从可持续发展的角度应大力提倡生产油改气再制造发动机。

参考文献:

[1] 李美娟,陈国宏,陈勃,等.基于方法集化的动态组合评价方法研究[J].中国管理科学,2013(2):132-

136.

[2] 时君丽.基于LCSA的机械装备多维度可再制造性分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2017.

[3] 高桂芹,王猛,袁雷武,等.基于理想解法河北城市气候宜居综合评价研究[J].环境科学与管理,2019,44(11):157-161.

[4] 李祚泳.可持续发展评价模型与应用[M].北京:科学出版社,2007.

作者简介:崔福曾(1996.08-),男,汉族,硕士研究生在读,研究方向:LCA、可持续发展评价。