

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.016

多序关系分析-模糊综合评价法在轿车 电液制动系统方案评判中的应用*

刘存香¹, 刘学军^{1,2}, 莫韦花¹

(1. 广西交通职业技术学院 汽车工程系, 广西 南宁 530216;

2. 广西科技大学 广西汽车零部件与整车技术重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要:针对轿车电液制动系统(EHYS)难以通过单一方法对系统方案进行合理评判的问题,提出了基于多序关系分析-模糊综合评价法的EHYS方案评判方法。通过对制动力矩、电磁制动器使用寿命、性价比以及安装难度等关键指标进行了多序关系分析,确定出了各指标权重;建立了关键指标评价表,获取了各方案评价矩阵,对关键指标的权重与各方案的评价矩阵进行了模糊运算,计算得到了各方案模糊综合评价模型,最终得到了各方案的评判结果。研究结果表明:电磁制动器线圈通电电流强度为25 A,铁芯与制动盘间的气隙为1 mm,线圈匝数为810匝,制动盘材料为钢材质的方案是EHYS最佳选型方案。

关键词:电液制动系统;多序关系分析;模糊综合评价;方案评判

中图分类号:TH-39;U463.5

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1089-05

Rank correlation analysis-fuzzy comprehensive evaluation method in scheme judging of car electro-hydraulic braking system

LIU Cun-xiang¹, LIU Xue-jun^{1,2}, MO Wei-hua¹

(1. Department of Automobile Engineering, Guangxi Vocational & Technical College of Communication,

Nanning 530216, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Automobile Component and

Vehicle Technology, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Aiming at the problem that the selection scheme to the electromagnetic-hydraulic braking system (EHYS) is difficult to judge by a single method, an EHYS scheme evaluation method based on rank correlation analysis -fuzzy comprehensive evaluation method was proposed. The rank correlation analysis was applied to determine the index weights of the key indicators, which included braking torque, electromagnetic brake service life, cost performance and installation difficulty. The key index evaluation table was established, the evaluation matrix of each scheme were obtained, the weight of the key indicators and the evaluation matrix of each scheme were fuzzy calculated, the fuzzy comprehensive evaluation model of each scheme were calculated, the evaluation results of each scheme were finally obtained. The results indicate that the best EHYS election scheme can be obtained when the current intensity to the electromagnetic brake coil is 25 A, the air gap between the iron core and the braking disc is 1 mm, the number of coil turns are 810, and the brake disc material is steel material.

Key words: electromagnetic-hydraulic braking system (EHYS); rank correlation analysis; fuzzy comprehensive evaluation method; scheme judging

0 引言

目前,针对电液制动系统(EHYS)或类似系统的

研究较多。何仁教授团队^[1-4]研究的电磁与摩擦制动集成系统,通过模糊控制算法实现了电磁制动器线圈通电电流的精确控制;江苏大学刘学军博士^[5]

收稿日期:2019-03-27

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFBA118262);广西汽车零部件与整车技术重点实验室开放课题资助项目(2015KFYB01)

作者简介:刘存香(1981-),男,广西宁明人,博士,教授,硕士生导师,主要从事汽车机电一体化技术方面的研究。E-mail:77664219@qq.com

通过滑模变控制算法,有效缩短了制动距离和制动时间。

从已有文献看,多数研究集中在如何增大制动力矩、如何降低热失效和涉水失效及各种控制算法上;所开展的试验多为针对所构建模型而开展的、短时间的验证性试验;试验结果只是说明了所构建模型的科学性,但是对于 EHYS 的可靠性研究、各参数的方案选型、评判研究甚少。开展 EHYS 的方案评判对于系统中试,甚至是 EHYS 推广应用有着重要意义。

在选型评价方面,已有的较为成熟的研究方法包括:模糊评价法、可拓评价方法及基于粗糙集理论的评价方法^[6]。这些方法都可以较好地通过构建数学模型,用定量的方式对各类选型方案进行定性表征。但在评价过程中,如何合理地确定关键指标权重却往往被忽视。

EHYS 涉及的关键指标较多,单一运用一种评价方法不能很好地对系统的综合性能进行评价。本文将根据 EHYS 的结构特点、制动效果等,提出运用多序关系分析-模糊综合评价法对 EHYS 选型方案进行综合评判。

1 电液制动系统 (EHYS) 结构

电液制动系统 (EHYS) 的结构图如图 1 所示^[7]。

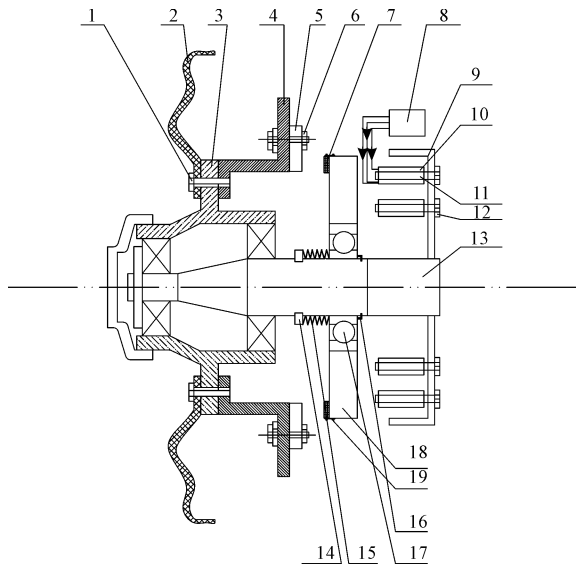


图 1 EHYS 结构

1 - 制动盘连接螺栓;2 - 轮盘;3 - 轮毂凸缘;4 - 摩擦制动盘;5 - 电磁离合器吸盘;6 - 离合器连接螺栓;7 - 离合器接合盘;8 - 控制器;9 - 电磁制动器支架;10 - 电磁制动器线圈;11 - 电磁制动器铁芯;12 - 电磁制动器连接螺栓;13 - 后桥壳;14 - 弹簧挡板;15 - 弹簧;16 - 轴承挡板;17 - 滚动轴承;18 - 电磁制动器制动盘;19 - 铰接板

EHYS 的实物图如图 2 所示。

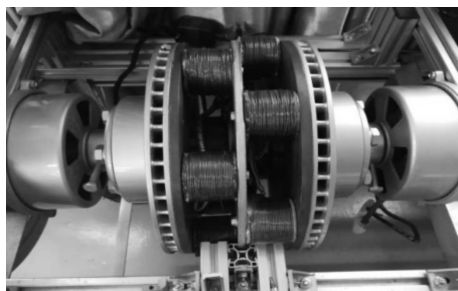


图 2 EHYS 实物图

EHYS 通过轮速传感器采集车辆的轮速,并计算出轮速变化率,进而确定车辆滑移率。为了控制车辆滑移率在理想范围,EHYS 将通过控制其中的电磁制动器线圈通电电流强度,以达到控制总制动力矩的目的,实现车辆制动过程中,处在最佳滑移率状态。

2 多序关系分析-模糊综合评价法

多序关系分析法可以将统一集合内不同元素通过权重的形式表征相关关系,而模糊综合评价法是结合隶属度原理,将定性表征转化为定量表征的一种模糊评价方法,模糊综合评价可以综合主、客观因素,通过模糊运算、归一化处理,得到各方案的得分占比,最终为决策者提供较为合理的评价结果。然而,在模糊综合评价法运用中,权重合理与否对评价结果可信度高有着重要作用,单一的特尔菲法或专家调查法并不能很好地得到权重系数。

为此,本文提出了序关系分析-模糊综合评价法,利用序关系分析法得出各权重值,再结合模糊综合评价法得到评价结果。

模糊综合评价模型如下表征^[8]:

(1) 将指标集 U 按属性的类型划分为 k 个因素,记为:

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_k) \tag{1}$$

且应满足:

$$\bigcup_{i=1}^k U_i = U, \quad U_i \cap U_j = \varphi \tag{2}$$

将评价集 V 按属性的类型划分为 h 个子集,记为:

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_h) \tag{3}$$

(2) 建立模糊综合评价矩阵 r_{kh} :

$$r_{kh} = \frac{D_{kh}}{\sum_{i=1}^k D_{ki}} \tag{4}$$

式中: D_{kh} —指标集 U 中的第 k 项因素为评价集 V 的第 h 种评价的评价数; D_{ki} —指标集 U 中的第 k 项因素为

评价集 V 的第 i 种评价的评价数。

由此得到模糊综合评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1h} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2h} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & r_{k3} & \cdots & r_{kh} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3) 序关系分析法确定权重集 $A^{[9]}$ 。

第一步:在指标集 U 中,选出最重要(关于某评价准则)的唯一一个指标记 a_1^* ,在余下的指标中选出仅次于 a_1^* 的次重要指标 a_2^* ,以此类推,直至选出最后一个指标 a_k^* 。由此确定了序关系: $a_1^* > a_2^* > \cdots > a_k^*$ 。

第二步:给出 a_{k-1}^* 与 a_k^* 间相对重要程度的比较判断。根据已有研究或经验,关于评价指标 a_{k-1}^* 与 a_k^* 的重要性程度之比 A_{k-1}/A_k 的理性判断为 t_k, t_k 的取值满足:

当 a_{k-1}^* 与 a_k^* 具有同样重要性时, $t_k = 1.0$; 当 a_{k-1}^* 比 a_k^* 稍微重要时, $t_k = 1.2$; 当 a_{k-1}^* 比 a_k^* 明显重要时, $t_k = 1.4$; 当 a_{k-1}^* 比 a_k^* 强烈重要时, $t_k = 1.6$; 当 a_{k-1}^* 比 a_k^* 极端重要时, $t_k = 1.8$; 且应满足: $t_{k-1} > 1/t_k$ 。

由此:各指标权重为:

$$A_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m a_i\right)^{-1} \quad (6)$$

$$A_{k-1} = a_k A_k \quad (k = m, m-1, \dots, 3, 2) \quad (7)$$

(4) 对数据进行适当的处理,求得归一化指标关于等级的隶属度,从而得到评判矩阵 B , 综合评判矩阵:

$$B = A^\circ R \quad (8)$$

3 EHYS 选型多序关系分析 - 模糊综合评价模型构建

电磁制动器结构参数表如表 1 所示。

表 1 电磁制动器结构参数表

方案	$N/\text{匝}$	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	l_g/mm	I/A
一	820	0.172×10^{-7}	2	25
二	800	0.172×10^{-7}	1	20
三	850	1×10^{-7}	3	20
四	900	0.27×10^{-7}	2	18
五	810	1×10^{-7}	1	25

从表 1 中可以看出:EHYS 制动性能的主要参数有电磁制动器线圈匝数 N 、制动盘材料 ρ 、铁芯与制动盘间的气隙 l_g 、电磁线圈通电电流 I 等。根据文献给出针对 4 个参数的 5 种备选方案。

3.1 EHYS 关键指标的确定

对于 EHYS 而言,其关键指标包含:安装难度、电磁制动器使用寿命、性价比以及制动力矩等 4 个因素。为此,本文结合表 1,确定各方案的关键指标。

3.1.1 制动力矩确定

制动力矩 T_L 计算公式为:

$$T_L = \sigma R_a^2 S d B_s^2 \omega = \sigma R_a^2 S d \left(\frac{8 \pi \rho \mu_0 N I}{16 \pi \rho l_g + \sqrt{2} S \Delta_h \mu_0 k_e \omega} \right)^2 \omega \quad (9)$$

式中: T_L —电磁制动器制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; R_a —制动盘中心至磁极在盘上投影中心的距离, m ; S —电磁制动器在制动盘上投影面积, m^2 ; d —制动盘厚度, m ; B_s —穿过制动盘的磁感应强度, T ; ω —制动盘转动角速度, rad/s ; σ —制动盘电导率, Ω^{-1} ; ρ —制动盘电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; μ_0 —真空磁导率, $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$, H/m ; N —铁芯上所绕线圈的匝数; I —电磁制动器通电电流强度, A ; Δ_h —涡流在制动盘上的集肤深度; k_e —折算系数,通常取 $k_e = 1.5$ 。

根据表 1 所给出的参数,笔者选择一汽—大众捷达王轿车,计算 $\omega = 50 \text{ rad/s}$ 时,各方案制动力矩值 $T_{Li} (i = 1 \sim 5)$,如表 2 所示。

表 2 各方案制动力矩值

T_{L1}	T_{L2}	T_{L3}	T_{L4}	T_{L5}
54	41	21	18	47

3.1.2 使用寿命的影响因素

电磁制动器线圈通电电流越大,则制动力矩越大。然而,当通电电流过大时,将导致电磁制动器线圈发热量过大,从而缩短电磁制动器线圈的使用寿命。由于铁芯材料存在磁化效应,当电磁制动器通电电流达到 20 A 后,磁通增加将变得缓慢;电流增加到 25 A 后,磁通将不随着电流的增加而增加,铁芯达到饱和状态。

3.1.3 安装难易的影响因素

EHYS 的安装难易主要取决于电磁制动器线圈尺寸、电磁制动器铁芯与制动盘间距离。电磁制动器线圈尺寸又与线圈个数、线圈匝数等因素有关。虽然电磁制动器线圈个数、匝数的增多将增大制动力矩,但同时也增加了安装难度。

3.1.4 性价比影响因素

EHYS 性价比可以看成制动效果与系统总价的比例关系。制动力矩越大,制动效果越好,所需要的线圈匝数越多,制动盘的材料也将越贵。

3.2 各关键指标权重分析

笔者将安装难度、电磁制动器使用寿命、性价比以

及制动力矩 4 个指标分别记为 U_1, U_2, U_3, U_4 , 根据“效果优先、长久耐用、兼顾价格”的原则, 得到 4 个指标的相对重要程度为: $U_4 > U_1 = U_2 > U_3$, 则: $a_1^* > a_2^* = a_3^* > a_4^*$ 。

且: $t_2 = a_1^*/a_2^* = 1.2, t_3 = a_2^*/a_3^* = 1, t_4 = a_3^*/a_4^* = 1.2$ 。

由此得到: $t_2 t_3 t_4 = 1.44, t_3 t_4 = 1.2, t_4 = 1.2, t_2 t_3 t_4 + t_3 t_4 + t_4 = 3.84$ 。

因此, 可以得到:

$$a_4^* = (1 + 3.84)^{-1} = 0.2066;$$

$$a_3^* = a_4^* t_4 = 0.2066 \times 1.2 = 0.2479;$$

$$a_2^* = a_3^* t_3 = 0.2479 \times 1.0 = 0.2479;$$

$$a_1^* = a_2^* t_2 = 0.2479 \times 1.2 = 0.2975。$$

为此, 各关键指标 U_1, U_2, U_3, U_4 的权重系数为:

$$A_1 = a_2^* = 0.2479, A_2 = a_3^* = 0.2479, A_3 = a_4^* = 0.2066, A_4 = a_1^* = 0.2975。$$

各关键指标的权重分配向量 A_f 为:

$$A_f = [0.2479 \quad 0.2479 \quad 0.2066 \quad 0.2975]。$$

4 EHYS 方案评判及结果分析

表 1 中关键指标的评价表如表 3 所示。

表 3 方案(1~5) 关键指标评价表

方案 评价指标	方案 1			方案 2			方案 3			方案 4			方案 5		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
安装难度	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.5
电磁制动器使用寿命	0.2	0.6	0.2	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1	0.3	0.3	0.4
性价比	0.4	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2
制动力矩	0.7	0.2	0.1	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.1	0.2	0.6	0.5	0.4	0.1

对表 1 的 5 个方案进行单因素评价, 评价集 $V = (V_1, V_2, V_3)$, 其中, $V_1 =$ “好”, $V_2 =$ “较好”, $V_3 =$ “一般”, 由专家对 5 个方案的安装难度、电磁制动器使用寿命、性价比以及制动力矩 4 个指标进行综合评价, 得到评价向量。

各方案的评价矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}; R_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.4 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}; R_4 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix};$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.5 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix}。$$

对各方案进行模糊评价, 将关键指标的权重与各方案的评价矩阵进行模糊运算, 计算各方案模糊综合评价模型为 $B_i, B_i = A \circ R_i (i = 1 - 5)$ 。

$$B_1 = A_f \circ R_1 =$$

$$[0.2479 \quad 0.2479 \quad 0.2066 \quad 0.2975] \circ \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}。$$

$$B_1 = (0.2 \vee 0.2 \vee 0.2066 \vee 0.2975, 0.2479 \vee 0.2479 \vee 0.2066 \vee 0.2, 0.2479 \vee 0.2 \vee 0.2066 \vee 0.1)。$$

得到:

$$B_1 = (0.2975, 0.2479, 0.2479); B_2 = (0.2975, 0.2975, 0.2975); B_3 = (0.2479, 0.2479, 0.2975); B_4 = (0.2479, 0.2479, 0.2479); B_5 = (0.2975, 0.2975, 0.2479)。$$

对各方案评价模型进行归一化处理, 可得:

$$B_1 = (0.376, 0.312, 0.312); B_2 = (0.333, 0.333, 0.334); B_3 = (0.312, 0.312, 0.376); B_4 = (0.333, 0.333, 0.334); B_5 = (0.353, 0.353, 0.294)。$$

计算各方案评价模型“ $V_1 + V_2$ ”的值, 按最大隶属度原则, 则可判定各方案的优先顺序为:

$$\text{方案 5}(0.706) > \text{方案 1}(0.688) > \text{方案 2}(0.666) = \text{方案 4}(0.666) > \text{方案 3}(0.624)。$$

5 结束语

本文通过已有研究抽取安装难度、电磁制动器使用寿命、性价比以及制动力矩等 4 个参数作为 EHYS 的关键指标, 结合多序关系分析法得到各指标权重值, 利用模糊综合评价法进一步对 5 种方案进行模糊运算和归一化处理, 从而得到模糊综合评价模型; 再结合最大隶属度原则, 客观地对以“安装难度、电磁制动器使用寿命、性价比以及制动力矩”4 个参数作为关键指标的 EHYS 进行了评定。

本文提出的综合评价法可以较为全面地评判 EHYS 的选型方案,对于 EHYS 系统综合性能评价、系统中试,甚至是推广应用有着重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 何仁,刘存香,李楠. 轿车电磁制动与摩擦制动集成系统的模糊控制[J]. 机械工程学报,2010,46(24):83-87.
- [2] 何仁,丁福生. 轮边缓速器制动力矩的计算方法[J]. 汽车技术,2008(10):10-12.
- [3] TIMOTHY J C, JOEL E M. Development of a hydraulic retarder for the allison AT545R transmission[R]. Winston-Salem:SAE,1995.
- [4] KARAKOC K, EDWARD J P, AFZAL S. Improved braking torque generation capacity of an eddy current brake with time

varying magnetic field; a numerical study [J]. **Finite Elements in Analysis and Design**,2012,59(1):66-75.

- [5] 刘学军,何仁. 电磁-液压复合防抱死制动系统滑模控制[J]. 农业机械学报,2014,45(5):1-7.
- [6] 刘存香. 汽车电磁制动与摩擦制动集成系统控制技术及其性能研究[D]. 镇江:江苏大学汽车与交通工程学院,2012.
- [7] 谢军,刘存香,刘学军,等. 轿车电液制动系统设计及性能试验研究[J]. 机电工程,2019,36(3):251-256.
- [8] 于共增,吴铃海,周建军. 汽车离合器操纵舒适度的模糊综合评价研究[J]. 机电工程,2009,26(3):69-72.
- [9] 李航,李根,张帅阳,等. 基于序关系分析法的车辆主动悬架控制器仿真研究[J]. 中国工程机械学报,2018,16(3):231-236.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

刘存香,刘学军,莫韦花. 多序关系分析-模糊综合评价法在轿车电液制动系统方案评判中的应用[J]. 机电工程,2019,36(10):1089-1093.

LIU Cun-xiang, LIU Xue-jun, MO Wei-hua. Rank correlation analysis-fuzzy comprehensive evaluation method in scheme judging of car electro-hydraulic braking system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(10):1089-1093. [《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)

(上接第 1078 页)

- [5] LIU L, LING X, PENG H. Analysis on flow and heat transfer characteristics of EGR helical baffled cooler with spiral corrugated tubes [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2013(44):275-284.
- [6] KIM H M, PARK S K, CHOI K S, et al. Investigation on the flow and heat transfer characteristics of diesel engine EGR coolers [J]. **International Journal of Automotive Technology**, 2008,9(2):149-153.
- [7] 王银燕,马传杰,杨传雷,等. EGR 率对高压共轨柴油机燃烧性能影响的多维仿真[J]. 热科学与技术,2017,16(3):218-223.
- [8] 陆磊,张振东,尹丛勃. 废气再循环冷却器的性能仿真及结构改进研究[J]. 中国机械工程,2015,26(17):2369-2373.
- [9] 陈刚. 304 不锈钢换热器管断裂分析[J]. 化工机械,2012,39(3):378-381.
- [10] 汪伟,陈禹. 薄壁不锈钢换热管管头焊接[J]. 压力容器,2017,34(11):1029-1032.
- [11] 路宝玺. 换热器试运行期间管束焊缝发生疲劳断裂分析[J]. 压力容器,2010,27(4):51-54,46.
- [12] 严永华. 国六柴油机废气再循环系统开发技术的研究

[J]. 汽车与新动力,2018,1(4):92-96.

- [13] NEUSSER H J, KAHRSTEDT J, DORENKAMP R, et al. The euro 6 engines in the modular diesel engine system of volkswagen[J]. **MTZ worldwide**, 2013,74(6):4-10.
- [14] 曹爽. 满足国六排放的柴油机性能研究[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院,2017.
- [15] 宋学官,蔡林,张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [16] 王勇,李雨,罗凯凯,等. 排盐泵流固耦合特性分析[J]. 流体机械,2017,45(12):22-26.
- [17] 桑勇,邵利来,王旭东. 基于 ANSYS 大流量管路流固耦合振动分析[J]. 液压气动与密封,2018(7):8-12.
- [18] 韩占忠. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [19] 陈伟婧. 不锈钢 EGR 冷却器钎焊结构断裂失效实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,2008.
- [20] 夏小维,吴杰峰,沈旭,等. 316L 奥氏体不锈钢焊接接头 4.2K 低温冲击韧性研究[J]. 热加工工艺,2018,47(19):77-81.

[编辑:方越婷]