

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.014

基于 Moldex3D 和灰色关联理论在空气滤清器上壳的工艺优化

郑尧刚¹,翟豪瑞¹,熊新¹,陈梓含¹,陈国²

(1. 盐城工学院汽车工程学院,江苏盐城 224051; 2. 山东华宇工学院,山东德州 253034)

摘要:以雷诺某摩托车的空气滤清器上壳为研究对象,采用正交试验,运用 Moldex3D 模流分析软件进行注塑工艺的优化分析。首先根据正交试验原理,选取对塑件翘曲量和体积收缩率影响较大的 5 个因素为试验因素分别为:熔体温度、模具温度、保压压力、保压时间、冷却时间。在每个因素取值范围内设定 4 个水平因子,安排 $L_{16}(4^5)$ 试验目标,目标为减少空气滤清器壳体翘曲变形量和体积收缩率。根据正交试验结论建立了参数与注塑件质量的灰色关联理论模型,获得较优的注塑成型参数组合,将最优工艺参数应用在实际生产中,最终试模验证得到符合要求的产品。

关键词: 滤清器上壳; Moldex3D; 灰色关联; 翘曲变形; 体积收缩率

中图分类号: TQ320.66 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0072-04

Process Optimization of Air Filter Upper Shell Based on Moldex3D Analysis and Grey Relational Theory

Zheng Yaogang¹, Zhai Haorui¹, Xiong Xin¹, Chen Zihan¹, Chen Guo²

(1. School of Automotive Engineering, Yan cheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. Shandong Huayu University of Technology, Dezhou 253034, China)

Abstract : Taking the air filter upper shell of a motorcycle of Renault as the research object, under the theory of orthogonal experiment, the Moldex3D mold flow analysis software was used to optimize the injection molding process. Firstly, according to the orthogonal test principle, the five factors that have great influence on the warpage and volume shrinkage of plastic parts were as follows: melt temperature, mold temperature, holding pressure, holding time and cooling time. 4 level factors within the range of each factor and arrange the $L_{16}(4^5)$ test target with the goal of reducing the air filter housing warpage displacement and volume shrinkage were settled. According to the conclusion of orthogonal experiment, the grey relational theoretical model of parameters and quality of injection molded parts was established. The optimal injection molding parameter combination was obtained and the optimal process parameters were applied in actual production. The final test mode was verified to meet the requirements of the product.

Keywords : filter upper shell; Moldex3D; grey correlation; warpage deformation; volume shrinkage

随着复合材料的快速发展,复合材料在汽摩车、船舶、航空航天等领域应用越来越广泛^[1]。而且随着注塑行业的快速发展,市场对产品的要求越来越高,但企业对产品的开发周期要求越来越短。多数企业为降低开发成本,不得不借助于新的技术来改善和提高当前的传统模式^[2]。模流分析软件的出现和普遍应用,为企业的产品开发注入了新的活力。

台湾科盛公司商业模流分析软件 Moldex3D 在 BLM 实体网格划分的先进性、材料库的丰富性、纤维配向预测的准确性等方面具有较大的优势^[3]。添

加玻纤的复合材料,在注塑过程中会发生翘曲量过大的问题^[4]。笔者以雷诺某空气滤清器上壳为研究对象,以 Moldex3D 分析塑件的翘曲量和体积收缩率为函数目标,运用灰色关联理论分析进行多目标优化分析,寻找并得到最佳成型工艺参数组合。

1 模流分析

1.1 模型介绍

本产品为美国雷诺某款摩托车空气滤清器上壳。该产品为装配体,对翘曲变形和结构强度要求较高。模具设计采用“一模两穴”的型腔排布,型

基金项目:江苏省大学生创新创业项目(2017038)

通讯作者:翟豪瑞,工程硕士,助教,主要从事汽车零部件开发、材料成型及模具集成研究 E-mail:18251423907@163.com

收稿日期:2018-08-08

引用格式:郑尧刚,翟豪瑞,熊新,等.基于 Moldex3D 分析和灰色关联理论在空气滤清器上壳的工艺优化[J].工程塑料应用,2018,46(10):72-75.

Wang Qi, Lu Chaoliang, Li Zhenhua, et al. Process optimization of air filter upper shell based on moldex3D analysis and grey relational theory[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):72-75.

腔尺寸为 $297\text{ mm} \times 67\text{ mm} \times 169\text{ mm}$, 模穴体积为 111.213 cm^3 。产品结构虽然简单, 但有较高凸台及螺纹孔设计, 该处壁厚较厚, 成型过程中易引起收缩率较大的缺陷, 模型平均厚度为 1.914 mm , 如图 1 所示。

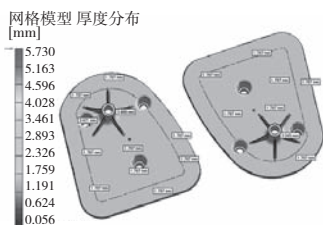


图1 模型壁厚分布

1.2 网格划分及材料选择

采用 Moldex3D R15.0 模流软件进行仿真分析, 前处理的网格划分在 Moldex3D R15.0 Designer 里进行, 模型修复用 Moldex3D R15.0 CAD doctor, 为 BLM 网格的划分成功提供可能。冷却水管直径设置为 10 mm , 浇注系统流道采用冷流道设计, 呈对角对称式分布。浇注系统和冷却系统的有限元模型如图 2 所示, 网格统计数量为 1506906。

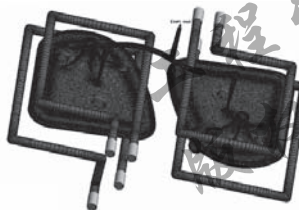


图2 有限元模型

材料为聚丙烯 (PP) 添加 15% GF, 该材料具有较高的耐冲击性, 机械性质强韧, 方向性强, 流动性极好, 易于成型, 主要应用在汽车模塑件上, 增加 15% 的玻璃纤维, 可以增强塑件的强度和韧性, 但是玻璃纤维的增加无形中给注塑成型带来困难, 主要体现在注塑件的翘曲变形量上的增加, 需要根据选取的材料属性、产品结构特点、模具设计要求等多方面考虑。笔者主要在模具设计确定后针对塑件的成型工艺参数进行优化, 最后用灰色关联理论对目标函数进行了关联度理论分析, 针对自变量进行了多级目标的优化分析, 最终得到塑件的最佳成型工艺参数组合。

1.3 参数设定

由于模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间、冷却时间为影响塑件翘曲量和体积收缩率最重要的因素, 因此选取这 5 个因素为试验因素, 分别用 A, B, C, D, E 来代替。在不考虑 5 个因素之间的交

互作用, 且根据 5 个主要因素的取值范围, 均匀地分别选取 4 个水平因子。表 1 为试验的因素及水平取值组合。

表1 试验的因素及水平

水平	因素				
	A/℃	B/℃	C/MPa	D/s	E/s
1	35	223	130	4	10
2	40	228	140	6	13
3	45	233	150	8	16
4	50	238	160	10	19

1.4 结果分析

忽略各因素间的交互作用, 采用 5 因素 4 水平的正交试验, 试验的安排选择 $L_{16}(4^5)$ 的矩阵形式。试验指标为翘曲量和体积收缩率, 正交试验组合方案及试验结果分析见表 2。

表2 正交试验表及其分析结果

试验号	试验因素					试验指标	
	A/℃	B/℃	C/MPa	D/s	E/s	翘曲量/mm	体积收缩率/%
1	1	1	1	1	1	1.111	19.390
2	1	2	2	2	2	0.719	17.627
3	1	3	3	3	3	0.677	17.769
4	1	4	4	4	4	0.650	16.133
5	2	1	2	3	4	0.649	18.517
6	2	2	1	4	3	0.674	15.643
7	2	3	4	1	2	0.847	20.426
8	2	4	3	2	1	1.121	17.746
9	3	1	3	4	2	0.702	16.294
10	3	2	4	3	1	0.804	17.151
11	3	3	1	2	4	0.652	18.453
12	3	4	2	1	3	0.684	20.576
13	4	1	4	2	3	0.676	18.169
14	4	2	3	1	4	0.651	20.101
15	4	3	2	4	1	0.774	16.858
16	4	4	1	3	2	0.718	17.656

为了得到指标与各因素的关系, 寻找最佳成型工艺参数组合, 极差分析可以得到不同因素在不同水平因子上的极差和平均值^[5]。极差 R 的大小可以反映出因素对优化目标的影响程度大小, 极差 R 越大则影响程度越大。根据表 2 分析结果可得到翘曲变形量和体积收缩率的均值和极差值, 见表 3 和表 4。

表3 翘曲变形量均值和极差

项目	因素					结论
	A	B	C	D	E	
均值 1	0.789	0.785	0.789	0.823	0.953	试验因素 影响值大 小为: $E > D > A > C > B$
均值 2	0.823	0.712	0.706	0.792	0.746	
均值 3	0.710	0.737	0.788	0.712	0.678	
均值 4	0.705	0.793	0.744	0.700	0.650	
极差 R	0.118	0.081	0.083	0.123	0.303	

从表 3 分析结果显示: 从极差 R 值大小分析可知, 对翘曲量的影响程度由大到小的因素, 排列顺序

是 $E > D > A > C > B$, 得到最优的成型工艺参数组合为 $A4B2C2D4E4$ 。

表4 体积收缩率均值和极差

项目	因素					结论
	A	B	C	D	E	
均值 1	17.300	18.093	17.786	20.123	17.786	试验因素 影响值大 小为: $D > C > A > B > E$
均值 2	18.083	17.631	18.395	17.999	18.001	
均值 3	18.118	18.377	17.978	17.773	18.039	
均值 4	18.196	18.028	19.970	16.232	18.301	
极差 R	0.896	0.746	2.184	3.891	0.515	

从表4分析结果可知,最小体积收缩率的因素组合是 $A1B2C1D4E1$ 。可以发现,影响翘曲量和体积收缩率的二者最优参数组合不同,优先运用灰色系统关联度分析法可以同时获得满足较小翘曲量和较小体积收缩率的产品。

2 灰色关联度计算

灰色关联理论是将评价指标原始数据进行无量纲化处理、计算关联系数、关联度以及根据关联度的大小对待评指标进行排序:

1) 采用最小值法对原始数据进行量纲一化处理,即初始基准数据为 $[0.649, 15.643]$ 。

2) 求两级最小差和最大差

$$\min_i \left(\min_k |x_0(k) - x_i(k)| \right) = \min_i (\Delta_i(\min)) \quad (1)$$

$$\max_i \left(\max_k |x_0(k) - x_i(k)| \right) = \max_i (\Delta_i(\max)) \quad (2)$$

依据上面两个公式分别求出两者最小值均为 0, 最大值分别为 0.472 和 4.933。

3) 计算关联系数

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i (\Delta_i(\min)) + \rho \max_i (\Delta_i(\max))}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i (\Delta_i(\max))} \quad (3)$$

式中 ρ 为分辨率,一般取 $\rho = 0.5$ 。

4) 计算比较数列对于参考序列的关联度,即求关联系数的平均值 $\eta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k)$, $k=1, 2, \dots, n$ (4)

5) 排关联序: 即比较关联度的大小,以灰色关联度最大值对应的工艺参数值为最优值。关联度越大,表明影响因素与被影响的结果之间的关系越密切,对结果的影响越大。

根据文献[6-9],表5为依照上述计算步骤得到目标函数的关联系数和关联度。对表5中的灰色关联度进行方差分析,计算出每个因子各水平下灰色关联度的均值和极差R,见表6。

根据R值的大小可以判断出影响关联度大小的因素依次为保压时间(D)、冷却时间(E)、熔体温度(B)、模具温度(A)、保压压力(C)。根据灰色关

联系统理论可以得出各因素对应的水平值,各因素的最优水平组合为 $A3B2C1D4E4$, 即最佳成型工艺参数组合为: $A(45^\circ\text{C})$, $B(228^\circ\text{C})$, $C(130\text{ MPa})$, $D(10\text{ s})$, $E(19\text{ s})$ 。

表5 目标函数的灰色关联系数和灰色关联度

试验序号	ζ_1 (翘曲量)	ζ_2 (体积收缩率)	关联度 η
1	0.338	0.397	0.184
2	0.771	0.554	0.331
3	0.894	0.537	0.358
4	0.996	0.834	0.458
5	1	0.462	0.366
6	0.904	1	0.476
7	0.544	0.34	0.221
8	0.333	0.54	0.218
9	0.817	0.791	0.402
10	0.604	0.621	0.306
11	0.987	0.467	0.364
12	0.871	0.333	0.301
13	0.897	0.494	0.348
14	0.992	0.356	0.337
15	0.654	0.67	0.331
16	0.774	0.551	0.331

表6 自变量对目标函数的平均关联度

项目	因素					结论
	A	B	C	D	E	
均值 1	0.333	0.325	0.339	0.261	0.260	试验因素 影响值大 小为: $D > E > B > A > C$
均值 2	0.320	0.363	0.332	0.315	0.321	
均值 3	0.343	0.319	0.319	0.340	0.371	
均值 4	0.337	0.327	0.327	0.417	0.381	
极差 R	0.023	0.044	0.020	0.156	0.121	

3 模流分析验证和生产实际试模验证

3.1 模流分析验证

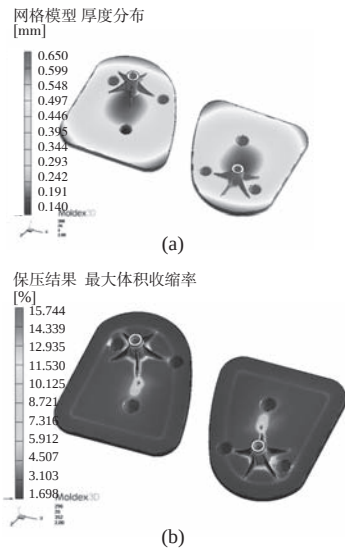
经过上述灰色关联理论的优化分析,得到最优的成型参数组合,在 Moldex3D 软件设定其最优参数数值,分析结果为:翘曲变形量最大为 0.650 mm, 体积收缩率最大为 15.744%,翘曲变形量和体积收缩率都达到了相对较优的效果,为后续实际生产工艺参数的设定提供可靠依据。但是由于所用材料添加了玻纤,很难单一通过成型参数将翘曲变形和体积收缩率降到最低。设定优化后参数组合,模拟结果如图 3a 和图 3b 所示,其中图 3a 为翘曲变形量分布,图 3b 为最大体积收缩率分布。

3.2 试模验证

经过现场试模验证分析,该工艺能满足生产实际要求,注塑出合格产品,经过三坐标测量仪检测空气滤清器各个方位标记的点,翘曲变形满足设计要求,且符合装配要求,基本吻合模流分析结果。

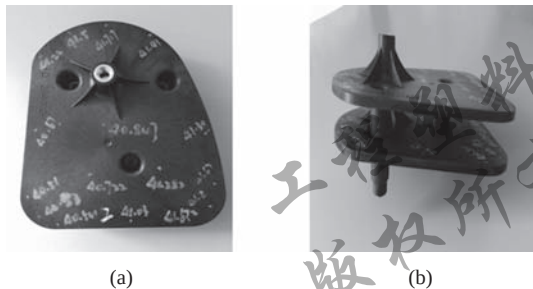
注塑产品如图 4a 所示,装配情况如图 4b 所示。

可以看出成型质量良好,装配结果满足要求。最大翘曲量和最大体积收缩率均达到最佳水平。



a—翘曲变形; b—最大体积收缩率

图3 灰色关联理论优化后模拟结果



a—注塑产品; b—装配情况

图4 试模生产装配图

4 结论

(1) 运用灰色关联系统理论,得到同时满足塑件翘曲量和体积收缩率较小的最佳注塑工艺参数组合为 A3B2C1D4E4。即模具温度 45℃、熔体温度 228℃、保压压力 130 MPa、保压时间 10 s、冷却时间 19 s。分析结果显示翘曲变形量最大为 0.650 mm,体积收缩率最大为 15.744%,翘曲变形量和体积收缩率都达到了相对较优的效果,为后续实际生产工艺参数的设定提供了依据。

(2) 经过试模验证,产品的成型质量较好,得到了符合要求的产品,该空气滤清器装配精度得到了大幅提升。Moldex3D 软件分析、正交试验分析、灰色关联理论的相互结合可以有效地应用于注塑工艺参数的多目标优化,提高注塑产品成型质量,减少试模次数,具有实际工程应用价值。

参考文献

[1] 刘峰,袁毅,沈洪雷. Moldflow 分析序列对薄壁塑件翘曲分析的

影响[J]. 塑料科技, 2017, 45(11):86-89.

Liu Feng, Yuan Yi, Shen Honglei. Influence of moldflow analysis sequence on warpage of thin-shell plastic parts[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(11):86-89.

[2] 王秀梅,翟豪瑞. 基于 CAE 技术的翘曲分析及反变形补偿设计[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5):77-80.

Wang Xiumei, Zhai Haorui. Warpage. Analysis and anti-deformation compensation design based on CAE technology[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5):77-80.

[3] 翟豪瑞,王小松,熊新,等. 用 Moldex3D 对副仪表盘热流道浇口时序的优化[J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(6):54-56.

Zhai Haorui, Wang Xiaosong, Xiong Xin, et al. Optimization of hot runner gate time sequence of auxiliary instrument panel by Moldex3D[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(6):54-56.

[4] 翟豪瑞,葛晓宏,陈长秀,等. 基于 Moldex3D 碳罐本体优化分析及模具设计[J]. 模具工业, 2018, 44(1):40-45+52.

Zhai Haorui, Ge Xiaohong, Chen Changxiu, et al. Optimization analysis of carbon canister based on Moldex3D and the mould design[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(1):40-45+52.

[5] 刘成娟,刘成刚,刘艳,等. 基于 CAE 与正交试验法的工艺参数对翘曲变形的影响分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(1):102-107.

Liu Chengjuan, Liu Chenggang, Liu Yan, et al. Analysis of effect of injection-molding process parameters on warpage deformation of printer plastic parts based on cae and orthogonal experiments[J]. China Plastics, 2018, 32(1):102-107.

[6] 冯志新. 基于 DOE 的汽车保险杠注塑工艺参数的优化方法研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(7):73-76.

Feng Zhixin. Study on the optimization method of the automobile bumper injection molding process parameters based on DOE[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):73-76.

[7] 李梦,何继敏,李晨昊,等. 长玻纤增强热塑性复合材料注塑成型的研究进展[J]. 塑料科技, 2016, 44(10):100-105.

Li Meng, He Jimin, Li Chenhao, et al. Research progress for injection moulding of long glass fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(10):100-105.

[8] 王秀梅,翟豪瑞. 玻纤增强汽车注塑件成型工艺优化分析及模具设计[J]. 汽车实用技术, 2018(9):108-111.

Wang Xiumei, Zhai Haorui. Optimization analysis and mold design of glass fiber reinforced plastic injection molding parts[J]. Automobile Applied Technology, 2018(9):108-111.

[9] 薛世鲜,黄瑶. 基于灰色关联理论的汽车门锁注塑工艺优化[J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(6):50-53.

Xue Shixian, Huang Yao. Injection process of optimization of car door locks based on grey relation theory[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(6):50-53.

(下转第 85 页)

参考文献

- [1] 潘秀石,林桂霞.基于CAD/CAE/CAM的吸尘机电机罩注塑模设计[J].工程塑料应用,2015,43(3):370-372.
Pan Xiushi, Lin Guixia. Design of injection mold for motor hood of cleaner based on CAD / CAD / CAM[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(3):370-372.
 - [2] 李德群,肖祥芷.模具CAD/CAE/CAM的发展概括及趋势[J].模具工业,2005(7):9-12.
Li Dequn, Xiao Xiangzhi. Development and trend of die CAD / CAE / CAM [J]. Die & Mould Industry, 2005(7):9-12.
 - [3] 汪文虎,刘晓辉,张军.我国模具CAD / CAM技术的现状及发展趋势研究[J].模具技术,2007(1):55-58.
Wang Wenhui, Liu Xiaohui, Zhang Jun. Research on the present situation and development trend of CAD / CAM technology in China[J]. Die Technology, 2007(1):55-58.
 - [4] 王刚.Moldflow模具分析应用实例[D].北京:清华大学出版社,2005:2-6.
Wang Gang. Application example of Moldflow die analysis[D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:2-6.
 - [5] 崔俊芝.计算机辅助工程(CAE)的现在和未来[J].计算机辅助设计与制造,2000(6):3-7.
Cui Junzhi. The present and future of computer aided engineering (CAE)[J]. Computer Aided Design and Manufacture, 2000(6):3-7.
 - [6] 张惠敏,焦冬梅.注塑模型腔壁厚计算公式讨论[J].工程塑料应用,2005,33(9):52-54.
Zhang Huimin, Jiao Dongmei. Discussion on calculation formula for cavity thickness of injection mold[J]. Engineering Plastics Application, 2005, 33(9):52-54.
 - [7] Marr R, Gamse T. Use of supercritical fluids for different processes including new developments—a review[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2000, 39(1):19-28.
 - [8] 韩阳飞,杨国定,陆建军.网格质量对Moldflow分析结果影响的研究[J].机床与液压,2005(11):185-186.
Han Yangfei, Yang Dingguo, Lu Jianjun. Research on the influence of grid quality on Moldflow analysis results[J]. Machine Tools And Hydraulics, 2005(11):185-186.
 - [9] 李雯雯,卢军,刘洋.Moldflow软件在注塑模具CAE中的应用[J].工程塑料应用,2009,37(9):80-82.
Li Wenwen, Lu Jun, Liu Yang. Application of Moldflow software in injection mold CAE[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(9):80-82.
 - [10] 谈建豪,陈燕,向和平,等.基于CAE的书立注塑模设计及成型工艺优化[J].塑料工业,2013,41(5):57-58.
Tan Jianhao, Chen Yan, Xiang Heping, et al. Design of injection mold and optimization of forming process based on CAE[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(5):57-58.
 - [11] 赵明娟,赵志龙,张尚兵.基于CAD/CAE的汽车车门内饰板注塑模设计[J].塑料科技,2011,39(4):91-94.
Zhao Mingjuan, Zhao Zhilong, Zhang Shangbing. Design of injection mold for automobile door interior trim panel based on CAD / CAE[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(4):91-94.
 - [12] 李军,张苗根,陈治平.基于UG模具设计模块的塑料模架库开发[J].工程塑料应用,2010,38(8):70-73.
Li Jun, Zhang Miaogen, Chen Zhiping. Development of plastic mold base library based on UG mold design module[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(8):70-73.
 - [13] 吴梦陵,张琰.基于正交法的汽车前罩板注塑工艺参数优化研究[J].塑料,2009,38(1):5-8.
Wu Mengling, Zhang Long. Research on optimization of injection molding process parameters of automobile front cover plate based on orthogonal method[J]. Plastics, 2009, 38(1):5-8.
 - [14] 潘柏松,龚惠玲,刘红.基于正交实验法的注塑工艺多目标优化设计[J].浙江工业大学学报,2007,35(3):308-312.
Pan Baisong, Gong Huiling, Liu Hong. Multi-objective optimization design of injection molding process based on orthogonal experimental method[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(3):308-312.
-
- (上接第75页)
- ssing and Applications, 2017, 29(6):50-53.
 - [10] 曹将栋,丁建波.基于灰色系统理论的注射成型工艺参数优化[J].现代塑料加工应用,2013,25(3):48-51.
Cao Jiangdong, Ding Jianbao. Optimization of injection process parameters based on grey theory[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2013, 25(3):48-51.
 - [11] 吴俐俊,袁志成,苑昭阔.基于正交设计和灰色关联理论的板式省煤器优化[J].同济大学学报:自然科学版,2017,45(11):1694-1700.
Wu Lijun, Yuan Zhicheng, Yuan Zhaokuo. Optimization on the structure of plate economizer based on orthogonal design and grey relational theory[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(11):1694-1700.
 - [12] 张弢,王金波,张涛,等.基于灰色理论的复杂系统多故障模糊诊断[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1832-1840.
Zhang Tao, Wang Jinbo, Zhang Tao, et al. Multi-fault fuzzy diagnosis for complicated system based on grey theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9):1832-1840.