

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.017

注塑模冷却水道工艺参数优化

吕志杰, 黄尚宇, 董晨阳

(武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘要: 结合响应曲面法和粒子群优化算法研究了注塑模冷却水道的工艺参数优化,使塑料件在一定的模壁温差下,冷却时间最短。将手机后盖的3D模型导入Moldflow中进行网格划分并对其冷却过程进行模拟,结合Box-Behnken试验设计和响应曲面法得到冷却水道工艺参数与冷却时间和模壁温差之间拟合的回归方程,再通过粒子群优化算法,得到最佳冷却水道工艺参数组合即冷却水道距模具型腔表面的距离为8.8513 mm、冷却水道直径为12 mm、冷却水道之间的距离为11.0542 mm,通过对优化的组合参数进行模拟,验证了其可行性。

关键词: 手机后盖; 注塑模; 冷却水道优化; 响应面设计法; 粒子群算法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0080-04

Optimization of Injection Mould Cooling Channel Process Parameters

Lyu Zhijie, Huang Shangyu, Dong Chenyang

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Optimization of injection mould cooling channel process parameters was researched with the response surface method and particle swarm optimization (PSO). The purpose is that cooling time of the plastic part is the shortest in the range of die wall temperature difference. The 3D model of the mobile phone cover was introduced into the Moldflow to simulate the cooling process. The regression equations about cooling time and die wall temperature difference with the process parameters were established, through combining a Box-Behnken design and the response surface method. And then the optimum process parameters combination of cooling channel was obtained by PSO. The distance between the cooling channel and the mould cavity surface is 8.8513 mm, the cooling channel diameter is 12 mm and the distance between the cooling water channels is 11.0542 mm. Simulating the combination was to verify feasibility.

Keywords: mobile phone cover; injection mould; optimization of cooling channel; response surface method; particle swarm optimization

随着现代工艺的飞速发展,制造企业对原材料的要求也越来越高,而塑料具有成本低、质量轻、比强度高、绝缘性好、化学稳定性高、使用方便等优点,在许多领域开始取代钢铁、木料,并被广泛使用。塑料件的成型方式主要有挤塑、吹塑、注塑等,其中注塑的成型方式使用最多。注塑由于具有成型周期短、可成型形状复杂制品的特点,被广泛应用于各种塑料件的生产之中。注塑过程由填充、保压、冷却、脱模这4个阶段组成,塑料件的成型周期和质量受模具和塑料件材料、注塑工艺参数以及环境等因素的影响。注塑中冷却时间占整个成型周期的比例很大,一般在80%左右。注塑模具中的冷却系统不仅直接影响成型周期,而且决定着塑料件的质量,冷却系统设计不当会导致模壁的温度分布不均匀,即冷却均匀性差,易使塑料件发生变形、翘曲等缺陷。注塑出现的许多问题主要是由模具冷却系统设计不当所

引起的。因此,注塑模具冷却系统的设计和优化对注塑意义很大^[1-2]。

1 冷却系统设计

冷却系统设计是提高塑料件生产效率的有效途径,而其中注塑模与冷却水之间的换热占冷却系统总换热的85%以上,因此冷却水道的优化对塑料件的生产效率提高有很大意义。塑料件的结构简单、壁厚较为均匀且采用传统的直通式冷却水道时,成型塑料件的模具型腔表面与各冷却水道的距离设计为大致相等。在串联回路和并联回路的选择中,考虑到塑料件尺寸较小,串联冷却回路不会因管道过长而产生较大的压降,且串联回路可避免并联回路中各支路冷却水流速不同的问题^[3-4]。因此选择直

联系人: 黄尚宇, 硕士, 教授, 从事电磁成型研究

收稿日期: 2017-05-28

通式串联冷却水道来进行塑料件的冷却分析。

冷却系统的冷却效率与诸多因素有关,如入水口冷却水温、冷却水流速、模具顶出温度等。而当冷却水道数目固定时,则与冷却水道距模具型腔表面的距离 a 、冷却水道直径 d 、冷却水道之间的距离 b 有关。

2 分析对象及建模

选取手机后盖为分析对象,其 3D 模型见图 1。塑料件采用的是聚碳酸酯 (PC) 材料,制造商为 Bayer Material Science,牌号为 Apec 1800。PC 材料是一种线型聚碳酸酯,其强度高,使用范围广,成型收缩率低,尺寸稳定性好,耐疲劳性好,在手机外壳材料中被广泛应用。考虑到注塑过程中,塑料容易因流动性差而导致注塑成型时塑料熔体无法及时流动到边角等较远的区域而形成缺料,故选择 Bayer Material Science 牌号的 Apec 1800PC 材料,相对大部分 PC 材料其流动性更好。该材料的耐热性、物理性能参数为:固体密度为 1.1534 g/cm^3 ,熔体密度为 1.0324 g/cm^3 ,推荐模具温度为 130°C ,推荐熔体温度为 335°C ,顶出温度为 165°C ,最大剪切应力为 0.5 MPa ,最大剪切速率为 $40\,000 \text{ s}^{-1}$,比热容为 $2\,100 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$,热导率为 $0.206 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ 。基本尺寸为 $111 \text{ mm}\times 62 \text{ mm}\times 7 \text{ mm}$,整个塑料件壁厚较为均匀,约为 0.8 mm 。



图 1 塑料件模型

将 3D 模型导入 Moldflow 中,采用表面网格进行网格划分并修复,最终得到三角形单元个数为 8932,网格纵横比最大为 8.54,平均为 1.53,最小为 1.16。连通区域为 1,自由边、多重边、配向不正确单元、相交单元和完全重叠单元均为 0,匹配率为 89.6%,各项网格指标均达到了要求,网格质量较好。网格划分完后设置分析序列“充填+冷却”,并建立浇注系统和冷却系统,根据塑料件的特点,在手机后盖这类小型塑料件的注塑过程中,应选用一模两腔侧面浇口的浇注系统,侧面浇口也是最通用的浇口形式。在设置冷却回路中输入对应的冷却水道工艺参数^[5],冷却水道入水口温度设为 15°C ,冷却水流速设为 10 L/min 。冷却水道的排布如图 2 所示。

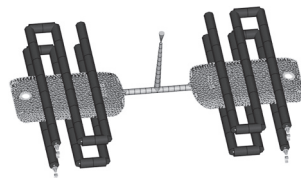


图 2 冷却水道的排布

3 冷却水道工艺参数优化

3.1 试验设计

为了让塑料件的生产效率最大化,对该塑料件要求在一定的模壁温差下,冷却时间最短。模壁温差的值反映了冷却均匀性的优劣,其值越小,说明冷却均匀性越好^[6]。模壁温差主要受冷却水道分布的影响,其值过高会产生诸如翘曲之类的缺陷,对塑料件的质量产生很大的影响。冷却时间和模壁温差相互制约,无法同时满足最小。在模壁温差的约束条件下,寻找最优冷却时间,首先需要设计试验找出冷却水道各工艺参数与冷却时间和模壁温差的关系。

设计 Box-Behnken 试验,冷却水道距型腔表面距离 a 、冷却水道之间的距离 b 、冷却水道直径 d 均对冷却时间 t_c 和模壁温差 ΔT 产生影响,以上述 3 个因素为设计变量,每个因素取 3 个水平,如表 1 所示。按照表 1 中的参数来进行 Moldflow 模拟试验,并得到表 2 中的试验方案和结果。

表 1 试验因子与水平

试验 水平	试验因子			mm
	a	b	d	
1	8	10	8	
2	10	12	10	
3	12	14	12	

表 2 Box-Behnken 试验和结果

试验 编号	试验因子			试验结果	
	a/mm	b/mm	d/mm	$t_c/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
1	8	10	10	14.625 3	29.297 7
2	12	10	10	18.485 6	24.251 3
3	8	14	10	15.746 1	29.892 6
4	12	14	10	20.495 1	24.816 5
5	8	12	8	15.986 7	26.248 9
6	12	12	8	20.748 9	21.798 7
7	8	12	12	14.724 9	25.049 8
8	12	12	12	18.179 4	20.645 6
9	10	10	8	16.856 2	27.546 8
10	10	14	8	17.659 4	27.974 6
11	10	10	12	14.954 7	26.315 3
12	10	14	12	15.874 9	26.549 1
13	10	12	10	16.126 4	24.043 7
14	10	12	10	16.126 4	24.043 7
15	10	12	10	16.126 4	24.043 7

相比于正交试验,三因素三水平的 Box-Behnken 试验虽然试验次数要多一些,但 Box-Behnken 试验有独特的优势。通过 Box-Behnken 试

验设计可以根据连续性分析来创建一个冷却水道工艺参数与目标变量之间的响应面方程,而正交试验设计的分析点是不连续的断点,只能对一个个孤立的试验点进行分析^[7-8]。根据表2的结果,利用Design-Expert软件,结合方差分析可用来检验二次模型的显著性。表3、表4为冷却时间和模壁温差的方差分析表,其中 R^2_{adj} 为修正的复相关系数。

表3 冷却时间的方差分析

试验因素	方差分析指标				
	平方和	自由度	均方值	F值 ¹⁾	P值 ²⁾
模型	51.62	9	5.74	147.91	<0.0001
<i>a</i>	35.39	1	35.39	912.67	<0.0001
<i>b</i>	2.94	1	2.94	75.94	<0.0001
<i>d</i>	7.06	1	7.06	182.17	<0.0001
<i>ab</i>	0.2	1	0.2	5.09	0.0586
<i>ad</i>	0.43	1	0.43	11.03	0.0128
<i>bd</i>	0.0034	1	0.0034	0.088	0.7750
<i>a</i> ²	5.38	1	5.38	138.63	<0.0001
<i>b</i> ²	0.013	1	0.013	0.34	0.5765
<i>d</i> ²	0.069	1	0.069	1.78	0.2235
R^2_{adj}	0.9844	1			

注:1) F值为效应项均方与误差项均方的比值;2) P值为F分布中的纵坐标绝对值大于F值的概率。

表4 模壁温差的方差分析

试验因素	方差分析指标				
	平方和	自由度	均方值	F值	P值
模型	95.63	9	10.63	303.21	<0.0001
<i>a</i>	45.02	1	45.02	1284.52	<0.0001
<i>b</i>	0.41	1	0.41	11.84	0.0108
<i>d</i>	3.14	1	3.14	89.50	<0.0001
<i>ab</i>	0.00022	1	0.00022	0.0063	0.9390
<i>ad</i>	0.00053	1	0.00053	0.015	0.9057
<i>bd</i>	0.0094	1	0.0094	0.27	0.6203
<i>a</i> ²	0.44	1	0.44	12.55	0.0094
<i>b</i> ²	46.90	1	46.90	1338.28	0.0001
<i>d</i> ²	0.36	1	0.36	10.20	0.0152
R^2_{adj}	0.9957	1			

3.2 响应面设计法

在初步得到关于冷却时间和模壁温差的方差分析表后,表中的数据并不能直接使用。还需要通过响应面设计法(也称为回归设计法),对所使用的数据的可行性、各因素是否对目标值有显著影响、得到的回归方程的拟合度等进行检验和判断^[9-10],这样,最终得到的各个参数与目标之间的回归方程才有实际意义。

复相关系数是一个在区间[0,1]之间变化的值,其值越接近1,说明正态随机误差的影响越小,回归方程越准确。若其值为1,那么回归方程准确地描述了因变量与观测值的关系。复相关系数可以描述响应面的拟合程度。然而其值并不是越大,回归方

程的拟合程度就一定越好。由于没有考虑到自由度的问题,复相关系数还会随着回归方程的自变量个数的增多而增加,当所有自变量都在回归方程中时复相关系数达到最大,即冗余的参数也会提高其值。为了克服这个缺陷提出了修正的复相关系数这个概念,来平衡参数个数所带来的影响^[11]。方差分析显示冷却时间试验修正的复相关系数 $R^2_{adj}=0.9844$,模壁温差试验修正的复相关系数 $R^2_{adj}=0.9957$,他们都接近于1,说明这两组试验的回归方程拟合度很高。因素中的某些项的P值较大,这些因素对试验的观测值影响不显著,是可以从回归方程中除去的,一般认为P大于0.5时,对应的因素对目标变量的影响不显著。可以看出,与冷却时间对应的各个因素中,*a*, *b*, *d*, *ad*, *a*²的P值小于等于0.05,表明这些项对冷却时间有显著影响,应保留。同样的,与模壁温差对应的各个因素中,保留*a*, *b*, *d*, *a*², *b*², *d*²,其余项除去,化简后的方差分析如表5和表6所示。

表5 化简后冷却时间的方差分析

试验因素	方差分析指标				
	平方和	自由度	均方值	F值	P值
模型	51.33	5	10.27	202.31	<0.0001
<i>a</i>	35.39	1	35.39	697.41	<0.0001
<i>b</i>	2.94	1	2.94	58.03	<0.0001
<i>d</i>	7.06	1	7.06	139.20	<0.0001
<i>ad</i>	0.43	1	0.43	8.43	0.0144
<i>a</i> ²	5.51	1	5.51	108.49	<0.0001

表6 化简后模壁温差的方差分析

试验因素	方差分析指标				
	平方和	自由度	均方值	F值	P值
模型	95.63	6	15.94	623.84	<0.0001
<i>a</i>	45.02	1	45.02	1762.05	<0.0001
<i>b</i>	0.41	1	0.41	16.24	0.0024
<i>d</i>	3.14	1	3.14	122.77	<0.0001
<i>a</i> ²	0.44	1	0.44	17.22	0.0020
<i>b</i> ²	46.90	1	46.90	1835.81	<0.0001
<i>d</i> ²	0.36	1	0.36	13.99	0.0038

此时通过Design-Expert软件计算得到的回归方程具有高拟合度,可以近似表示工艺参数在低水平和高水平范围内,与冷却时间和模壁温差的等量关系:

$$t_c = 27.11 - 3.83a + 0.30b + 0.35d - 0.08ad + 0.29a^2$$

$$\Delta T = 142.46 + 0.43a - 19.91b + 1.14d - 0.08a^2 + 0.83b^2 - 0.03d^2$$

3.3 粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法属于进化算法的一种,和遗传算法类似,从随机解出发,通过迭代寻得最优

解,并通过适应度来评价解的品质。在粒子群算法的优化过程中,首先需要对一群随机粒子初始化,然后通过迭代寻找最优;每一次迭代中,粒子通过追寻个体最优解和群体最优解来更新自己的速度和位置,解的优劣程度一般通过适应度函数来评价^[12-13]。利用 Matlab 软件编写 PSO 算法程序,选择惯性权重线性下降的粒子群算法,适应度函数为目标函数,适应度值即为响应值。粒子群数目取为 100,两个学习因子均取 0.5,惯性权重从 0.9 线性下降到 0.4,冷却优化问题用如下数学模型进行描述:

$$t_c = 27.11 - 3.83a + 0.30b + 0.35d \\ - 0.08ad + 0.29a^2$$

$$\Delta T = 142.46 + 0.43a - 19.91b + 1.14d \\ - 0.08a^2 + 0.83b^2 - 0.07d^2$$

求 t_c 的最小值 t_{cmin} 。

其中约束条件为:

$$\begin{cases} 8 \leq a \leq 12 \\ 10 \leq b \leq 14 \\ 8 \leq d \leq 12 \\ \Delta T \leq 25 \end{cases}$$

运行编写好的 Matlab 程序,其结果具有很好的全局收敛性和收敛速度,随着迭代次数的增多,粒子所寻的全局最优值逐渐趋向于理论最优值^[14-15]。此时对应的冷却水道工艺参数 $a=8.8513$ mm, $b=11.0542$ mm, $d=12$ mm, 对应的模壁温差 $\Delta T=24.9314^\circ\text{C}$,满足约束条件。计算出最小冷却时间 $t_{cmin}=14.8487$ s。

4 最优工艺参数下的模拟验证

为了验证经过优化后得到的冷却水道工艺参数的有效性,通过 Moldflow 软件对优化后的参数进行建模并模拟,模拟的结果和 PSO 优化结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,各项优化得到的结果误差均在工程计算的允许范围内,从而验证了优化结果的有效性。

表 5 PSO 优化结果和 Moldflow 模拟结果相对误差分析

项目	a/mm	b/mm	d/mm	$t_{cmin}/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
PSO	8.8513	11.0542	12	14.8487	24.9314
Moldflow	8.8513	11.0542	12	15.2761	24.8689
误差				2.8%	0.25%

5 结论

考虑到多因素对冷却时间和模壁温差的影响比较复杂,设计了 Box-Behnken 试验,通过 Moldflow 模拟得到试验数据,运用响应面设计法得到冷却水道工艺参数与冷却时间和模壁温差的回归

方程,再借助粒子群优化算法,在一定的约束条件下得出一定范围内冷却水道工艺参数的最优组合。从试验的方差分析中可以看出冷却水道距型腔表面的距离对冷却时间和模壁温差的影响最大,并且相互制约,无法同时满足最小。因此,在对冷却水道进行优化时,若不考虑冷却水道距型腔表面的距离、冷却水道间距、冷却水道直径三者之间的交互影响,冷却水道距型腔表面的距离是需要重点考虑的因素。最终通过粒子群算法寻优得到最佳工艺参数组合即冷却水道距模具型腔表面的距离 $a=8.8513$ mm,冷却水道之间的距离 $b=11.0542$ mm,冷却水道直径 $d=12$ mm,并模拟验证了其可行性。

参考文献

- [1] 屈华昌. 塑料成型工艺与模具设计 [M]. 广州: 高等教育出版社, 2007:4-26.
Qu Huachang. Plastic forming technology and die design[M]. Guangzhou: Higher Education Press, 2007:4-26.
- [2] 宋珂, 胡青春, 姜晓平. 注塑模具冷却水道排布优化设计 [J]. 塑料工业, 2014, 42(12):45-48.
Song Ke, Hu Qingchun, Jiang Xiaoping. Optimization design of injection mold cooling channels arrangement[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(12):45-48.
- [3] Yao Donggang, Kim B. Development of rapid heating and cooling systems for injection molding applications[J]. Polymer Engineering & Science, 2002, 42(12):2471-2481.
- [4] Khan M, Afaq S K, Khan N U, et al. Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design[J]. Isrn Mechanical Engineering, 2014, 2014(1):1-8.
- [5] 王匀. 模具 CAD/CAE/CAM[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:167-179.
Wang Yun. Mould CAD/CAE/CAM[M]. Beijing: China Machine Press, 2011:167-179.
- [6] 李海梅, 申长雨, 顾元宪. 不均匀冷却对注塑料件残余应力的影响 [J]. 中国塑料, 1999(6):106-111.
Li Haimei, Shen Changyu, Gu Yuanxian. Effects of uneven cooling on the residual stress inside injection molded parts[J]. China Plastics, 1999(6):106-111.
- [7] 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006:1-5.
Zhao Xuanmin. Experimental design method[M]. Beijing: Science Press, 2006:1-5.
- [8] 葛宜元. 试验设计与 Design-Expert 软件应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015:1-18.
Ge Yiyuan. Experimental design method and application of design-expert software[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015:1-18.

- [3] 焦瑞萍,池成忠,黄能会. 注塑模具结构中的镶件设计[J]. 塑料工业,2010,38(2):33-35.
Jiao Ruiping, Chi Chengzhong, Huang Nenghui. The insert design of injection mold's structure[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(2):33-35.
- [4] 李源,郭辰光,李威力. 薄壁电子机壳侧向抽芯注塑模具设计[J]. 塑料工业,2015,43(8):45-48.
Li Yuan, Guo Chenguang, Li Weili. Design of the side-core pulling injection mold for the thin shell of electronic part[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):45-48.
- [5] 贾乃智. 注塑模成型镶件的设计[J]. 模具制造,2011(10):55-57.
Jia Naizhi. The insert designing of injection mold[J]. Die and Mould Manufacture, 2011(10):55-57.
- [6] 李小敏,刘卫东. 注塑模具镶件的设计[J]. 装备制造技术,2009(4):168-169.
Li Xiaomin, Liu Weidong. The insert designing of injection mold[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(4):168-169.
- [7] 孟少明,陈晨. HTC 手机保护套注塑模设计[J]. 塑料科技,2013,42(3):74-76.
Meng Shaoming, Chen Chen. Design of injection mold for the HTC mobile phone protective cover[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 42(3):74-76.
- [8] 梁士红. 顺序分型点浇口自动脱料塑封定子注塑模设计[J]. 塑料,2015,44(3):92-94.
Liang Shihong. Designing of sequence parting point-gating automatic stripping injection molding for plastics packed stator[J]. Plastics, 2015, 44(3):92-94.
- [9] 罗广思,王乾,杨峰,等. 一种塑料电子零件的模具创新设计[J]. 塑料工业,2014,42(6):73-76.
Luo Guangsi, Wang Qian, Yang Feng, et al. The innovation design of mold for a plastic electronic part[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(6):73-76.
- [10] 陈开源. 电器外壳注塑模冷却系统 CAE 优化分析与设计[J]. 塑料科技,2016,44(7):78-81.
Chen Kaiyuan. CAE optimization analysis and design on injection mold cooling system of electrical equipment shell[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(7):78-81.
- [11] 王乾,张平,徐自明. 一种端盖类塑料件的模具创新优化设计[J]. 塑料科技,2015,43(10):90-93.
Wang Qian, Zhang Ping, Xu Ziming. Innovative optimal design of the mold for a plastic end cap part[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(10):90-93.
- [12] 庞植科. 手机壳上面板逆向建模及注射模设计[J]. 模具制造,2016,16(5):55-59.
Pang Zhike. Reverse modeling and injection mold design of mobile phone top panel[J]. Die and Mould Manufacture, 2016, 16(5):55-59.
- [13] 陶筱梅. AutoCAD 外挂程序在注塑模具设计中的应用[J]. 塑料科技,2013,41(11):23-24.
Tao Xiaomei. Application of AutoCAD plugins in injection mold design[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(11):23-24.
- [14] 孙庆东,宋志波,池寅生,等. CAE 技术在滚筒梳注塑模具设计中的应用[J]. 塑料科技,2016,44(8):70-74.
Sun Qingdong, Song Zhibo, Chi Yinsheng, et al. Application of CAE technology in injection mold design of the roller comb[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(8):70-74.
- [15] 张伯楠. 基于 CAE 优化分析的汽车水箱盖中盖注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(12):80-84.
Zhang Bonan. Injection mould design of middle cover of automobile radiator cap based on CAE optimization analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(12):80-84.

(上接第 83 页)

- [9] Dehghani K, Nekahi A, Mirzaie M A M. Optimizing the bake hardening behavior of Al7075 using response surface methodology[J]. Materials & Design, 2010, 31(4):1 768-1 775.
- [10] 孙骏,秦宗慧. 基于响应面模型的注塑塑料件工艺参数混合优化[J]. 中国塑料,2012(11):79-82.
Sun Jun, Qing Zonghui. Hybrid optimization of processing parameters of injection molding based on response surface model[J]. China Plastics, 2012(11):79-82.
- [11] 梁保松. 模糊数学及其应用[M]. 北京:科学出版社,2007:11-12.
Liang Baosong. Fuzzy mathematics and application[M]. Beijing:Science Press, 2007:11-12.
- [12] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2014:202-203.
- Yu Shengwei. Case study and application of matlab optimization algorithm[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2014:202-203.
- [13] 赵乃刚,邓景顺. 粒子群优化算法综述[J]. 科技创新导报,2015,12(26):216-217.
Zhao Naigang, Deng Jingshun. Survey of particle swarm optimization algorithm[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(26):216-217.
- [14] Chen Wen-Chin, Nguyen Manh-Hung, Chiu Wen-Hsin, et al. Optimization of the plastic injection molding process using the taguchi method, RSM, and hybrid GA-PSO[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9):1-14.
- [15] Jiang Yan, Hu Tiesong, Huang Chongchao, et al. An improved particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Intelligence, 2014, 193(3):231-239.