

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.019

基于 Moldflow 和 Hypermesh 的轴承座 翘曲工艺参数优化

张浩¹, 王骥¹, 周小林², 李继成²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波富佳实业有限公司, 浙江 余姚 315400)

摘要:为了提高轴承座注塑件有限元分析中的网格质量,利用 Hypermesh 软件划分有限元网格,并按照网格质量的一般准则进行检验。运用 Moldflow 模拟吸尘器轴承座的成型过程中,采用了4因素5水平的正交试验探究翘曲与主要因素的关系。通过对试验结果进行极差分析来得到正交空间内最优注塑参数组合。为了找出整个工艺条件空间内的最优解,利用翘曲测试数据建立起用于预测轴承座翘曲值的多元回归方程,然后对回归方程进行显著性检验。最后根据回归方程求得工艺空间内的最优参数组合,从而得到最小的翘曲量。研究表明采用 Hypermesh 划分网格比 Moldflow 更容易得到高质量的网格模型,运用回归方程求取的最小翘曲值比极差分析获得的翘曲值更优。

关键词:注塑成型;翘曲;Hypermesh 软件;多元回归方程;Moldflow 软件

中图分类号:TQ320.66 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)04-0087-05

Optimization of Bearing Stand Warpage Process Parameters Based on Moldflow and Hypermesh

ZHANG Hao¹, WANG Ji¹, ZHOU Xiaolin², LI Jicheng²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Ningbo Furja Industrial Co., Ltd., Yuyao, Zhejiang 315400, China)

Abstract: The finite element model of a bearing stand was processed by Hypermesh to improve the mesh quality and examined in accordance with the general guidelines of the mesh quality. Four factors and five levels of orthogonal experiment were used to analyze the relationship between the warpage and each factor in the injection molding process with Moldflow. With the range analysis, we could obtain the best combination of process parameters for minimum warpage. To find out the optimal process parameters within the solution space, the regression equation for predicting warpage was established, and the significance test was made. Finally, the minimum warpage was obtained through the optimal process parameters from the regression equation. The results showed that high-quality mesh was more easier to be obtained by Hypermesh rather than Moldflow, and minimum warpage based on the regression equation was better than warpage obtained by range analysis.

Key words: injection molding; warpage; Hypermesh; regression equation of several variables; Moldflow

作为模拟注塑成型的主流软件, Moldflow 对于减小产品翘曲、提高产品质量和降低成本具有重要意义^[1]。在模流分析中,为了获得最小翘曲值,常采用的方案是在正交试验的基础上使用极差分析来获得最优的注塑参数组合^[2-3]。然而这种方法求取最小翘曲值有2个问题:①Moldflow 划分网格的能力不强,为了

获得高质量的网格模型,需要大量的时间对模型进行修补;②极差分析只能获得正交空间内的最小翘曲值,不能获得整个工艺空间内的最小翘曲值。为了获得整个工艺空间内的最小翘曲值,使用 Hypermesh 作为网格划分工具来提高网格划分的效率,在正交试验基础上,建立翘曲值与注塑工艺参数之间关系的 Fourier 级

收稿日期:2015-12-28;修回日期:2016-02-20

作者简介:张浩(1978),男,江苏泗洪人,硕士研究生,主要研究方向为模具结构设计及其注塑工艺参数优化。E-mail: 1019680181@qq.com

数型多元回归方程,然后对回归方程进行最小值求解,以获得完整的工艺空间内翘曲值最小的工艺参数组合。

1 轴承座有限元模型和网格划分

对于复杂的注塑件,为了提高网格划分的效率,使用 Hypermesh 对注塑件进行网格划分^[4]。以划分塑料轴承座的中性面网格为例,可先将 UG 建好的三维模型导入 Hypermesh 中进行中性面的抽取与网格划分,然后对网格进行简单的修复,最后导出可供 Moldflow 分析的有限元模型,具体的流程如图 1 所示。

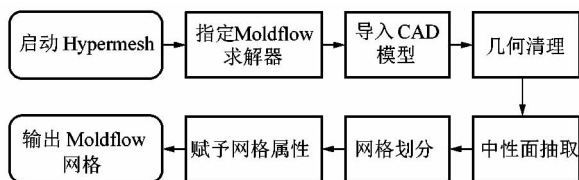


图 1 Hypermesh 划分流程

Figure 1 Meshing steps of Hypermesh

轴承座的尺寸为 292 mm × 190 mm × 15 mm,壁厚约为 2.5 mm。图 2 和图 3 分别是用 Hypermesh 与 Moldflow 划分的轴承座中性面网格模型,网格边长设定为 4 mm。

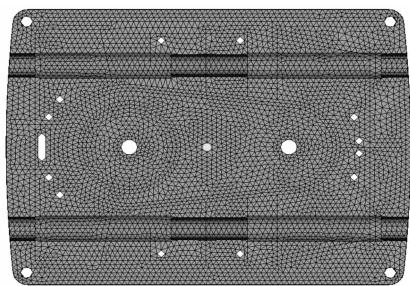


图 2 Hypermesh 网格

Figure 2 Mesh scheme from Hypermesh

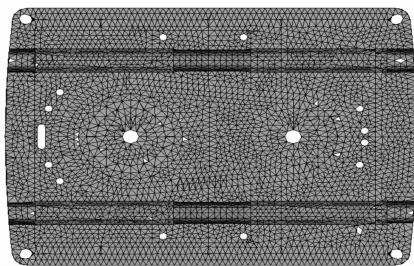


图 3 Moldflow 网格

Figure 3 Mesh scheme from Moldflow

将 Hypermesh 导出的轴承座模型输入 Moldflow 中,通过网格统计,将得到具体的轴承座网格信息见表 1。

表 1 轴承座中性面网格统计

Table 1 Mesh statistics of midplan model of a bearing stand

网络划分	三角形	连通区域	最大纵横比	平均纵横比	最小纵横比	配向不正确单元
Moldflow	15 711	9	350.5	2.29	1.16	310
Hypermesh	17 589	1	6.0	1.52	1.16	1

Moldflow 中性面网格质量的评价标准有以下 3 个方面:①一般要求最大纵横比不超过 6,最小纵横比不小于 1.15,平均纵横比 1.5 左右;②希望网格配向不正确单元数越少越好;③有限元模型必须为一个整体。由表 1 可知,Hypermesh 划分的轴承座有限元模型的连通区域为 1,最大纵横比为 6,最小纵横比为 1.16,平均纵横比 1.52,配向不正确单元为 1,基本符合 Moldflow 的分析要求;而 Moldflow 划分的轴承座有限元模型的网格纵横比最大值为 350 且配向不正确单元有 310,需要大量的修复才可以达到 Moldflow 分析标准。很明显,Hypermesh 作为塑料轴承座中性面网格的划分工具,其划分网格的质量比 Moldflow 自带的处理器划分网格的质量高。因此用 Hypermesh 做 Moldflow 的中性面网格的划分非常合适,不仅提高了网格质量,还减少了修复网格所需要的时间。

2 正交试验设计及其结果

使用 Moldflow 对塑料轴承座进行注塑模拟,选择对翘曲影响较大的 4 个工艺参数为变量进行正交试验,4 个工艺参数分别为模具温度、熔体温度、保压时间和保压压力^[5]。注塑材料为 INEOS ABS 公司的 ABS + PA6,根据 Moldflow 材料库推荐的工艺参数见表 2。

表 2 ABS + PA6 工艺参数表

Table 2 Process parameters of ABS + PA6

水平	模具温度 W/℃	熔体温度 D/℃	保压时间 T/s	保压压力 B/MPa
1	60	250	3	35
2	69	260	5	45
3	78	270	7	55
4	87	280	9	65
5	96	290	11	75

根据表 2,每个参数有 5 个变量,应该建立 $L_b(5^4)$ 正交表,其中 b 表示正交表的行数,4 表示有 4 个参数,5 表示每个参数有 5 个水平。由于没有 $L_b(5^4)$ 正交表,选择较符合要求的 $L_{25}(5^6)$ 正交表的前 4 列来代替 $L_b(5^4)$ 的正交表^[6]。正交试验方案及其翘曲值如表 3 所示。

表3 正交试验结果

Table 3 Result of orthogonal experiments

试验号	W/℃	D/℃	T/s	B/MPa	翘曲值/mm
1	60	250	3	35	4.848
2	60	260	5	45	4.365
3	60	270	7	55	3.715
4	60	280	9	65	3.119
5	60	290	11	75	2.430
6	69	250	5	55	4.158
7	69	260	7	65	3.474
8	69	270	9	75	2.521
9	69	280	11	35	5.236
10	69	290	3	45	2.921
11	78	250	7	75	3.326
12	78	260	9	35	3.121
13	78	270	11	45	4.904
14	78	280	3	55	2.409
15	78	290	5	65	4.153
16	87	250	9	45	2.666
17	87	260	11	55	4.183
18	87	270	3	65	2.963
19	87	280	5	75	3.816
20	87	290	7	35	4.164
21	96	250	11	65	2.559
22	96	260	3	75	3.253
23	96	270	5	35	4.230
24	96	280	7	45	4.124
25	96	290	9	55	3.472

对试验结果进行极差分析以获得最佳的注塑参数组合^[7-8]。表4中将每个参数的1,2,3,4,5水平下翘曲量的平均值记作 k_1, k_2, k_3, k_4 和 k_5 ;5个平均值中最大值与最小值之差即为对应参数的极差。

表4 试验结果的极差分析

Table 4 Range analysis of orthogonal experiments

因素	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	极差
模具温度 W	3.695 4	3.662 0	3.582 6	3.558 4	3.527 6	0.055 0
熔体温度 R	3.511 4	3.679 2	3.666 6	3.740 8	3.428 0	0.312 8
保压时间 T	3.278 8	4.144 4	3.760 6	2.979 8	3.862 4	1.164 6
保压压力 P	4.319 8	3.796 0	3.587 4	3.253 6	3.069 2	1.250 6

根据极差分析表2.3绘制直观的均值分析折线图如图4所示。

根据表4与图4,翘曲值随模具温度的升高而缓慢减小;翘曲值随熔体温度的升高先增大后减小;随着保压时间的延长翘曲值变化较快,5~9 s时,翘曲值迅速减小,3~5 s与9~11 s时,翘曲值都增大;翘曲值随着保压压力的增加一直减小。通过极差分析,最佳的工艺参数水平为 $W_5D_3T_4B_5$,即模具温度为96℃、熔体温度为290℃、保压时间为9 s、保压压力为75 MPa;在该参数水平之下 Moldflow 模拟翘曲值为1.993 mm。图5为正交试验模拟翘曲值。

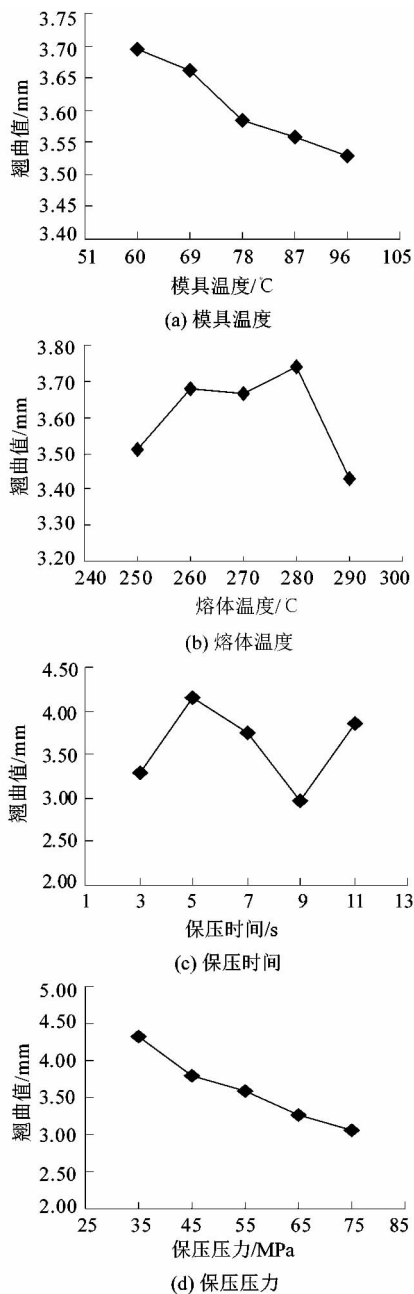


图4 正交试验的均值分析

Figure 4 Average analysis of orthogonal experiments

3 回归方程的建立

极差分析只能在特定的离散点中寻找最佳的工艺参数组合,不能够反映翘曲值与各个参数之间的关系。为了能够对参数作细致分析,根据正交试验数据,建立翘曲值与各个参数之间关系的傅里叶回归方程非常必要。多重傅里叶级数实数型为^[9]:

$$f(x) = A_0/2 + \sum_{m \in Z^n} [a_k \sin(m \cdot x) + b_k \cos(m \cdot x)]$$

式中: A_0 为常数; a_k 与 b_k 为三角函数的系数; $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]$ 为列向量,代表4个注塑工艺参数(x_1 为模具

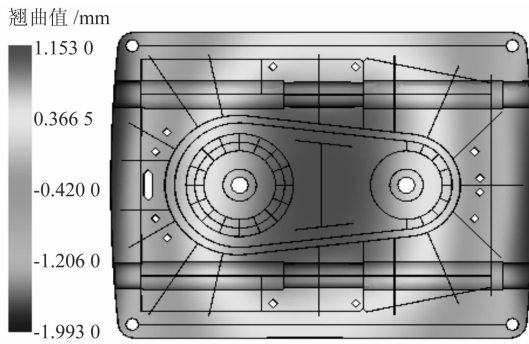


图5 正交试验模拟翘曲变形分布

Figure 5 Warpage distribution with Moldflow based on orthogonal experiment

温度/ $^{\circ}\text{C}$, x_2 为熔体温度/ $^{\circ}\text{C}$, x_3 为注射时间/s, x_4 为保压压力/MPa); Z^n 表示有 n 个元素的列向量的全体,且列向量的每个元素都为整数; $\mathbf{m} = [m_1, m_2, m_3, m_4]$, m_1, m_2, m_3 和 m_4 都为整数。

采用 1stopt 软件来求解傅里叶级数,将傅里叶级数的模型输入到 1stopt 软件进行计算,选择的优化算法为差分进化法,在计算停止指标上选择当收敛容许误差达到 10^{-11} 时停止^{[10]7}。

Fourier 级数:

$$\begin{aligned} f(x) = & 3.3167 - 1.2719 \times 10^{-1} \cdot \sin(2x_1 - 4x_3 + 4x_4) - 3.3614 \times 10^{-1} \cdot \cos(2x_1 - 4x_3 + 4x_4) + \\ & 5.2954 \times 10^{-1} \cdot \sin(-4x_1 + 2x_2 + 4x_3 - 2x_4) + 2.5653 \times 10^{-1} \cdot \cos(-4x_1 + 2x_2 + 4x_3 - 2x_4) + \\ & 2.3972 \times 10^{-2} \cdot \sin(-3x_1 - 2x_2 + x_3 + 2x_4) + 1.4792 \times 10^{-1} \cdot \cos(-3x_1 - 2x_2 + x_3 + 2x_4) + \\ & 2.5650 \times 10^{-1} \cdot \sin(4x_1 + 8x_2 + 4x_3 - 5x_4) - 6.1331 \times 10^{-1} \cdot \cos(4x_1 + 8x_2 + 4x_3 - 5x_4) + \\ & 3.9499 \times 10^{-2} \cdot \sin(-6x_1 - 3x_2 - 6x_4) + 1.8810 \times 10^{-1} \cdot \cos(-6x_1 - 6x_2 - 6x_4) - \\ & 6.4378 \times 10^{-1} \cdot \sin(2x_1 - 6x_2 + 2x_3 + 8x_4) + 2.1088 \times 10^{-1} \cdot \cos(2x_1 - 6x_2 + 2x_3 + 8x_4) - \\ & 4.3213 \times 10^{-2} \cdot \sin(-5x_1 + 5x_2 + 5x_3 + 4x_4) - 1.7000 \times 10^{-1} \cdot \cos(-6x_1 + 5x_2 + 5x_3 + 4x_4) - \\ & 2.3476 \times 10^{-1} \cdot \sin(9x_1 + 5x_2 - 4x_3 + 7x_4) - 5.6987 \times 10^{-1} \cdot \cos(9x_1 + 5x_2 - 4x_3 + 7x_4) \end{aligned}$$

对 Fourier 级数型回归方程进行有效性检验,用以下 3 种方式检验回归模型的有效性,当 3 个检验都合格时,回归方程才能较好地反映因变量与自变量之间的关系。

1) R^2 检验。 R^2 表示回归方程的拟合程度。 R^2 越接近于 1,表示回归方程的拟合效果越好。由 1stopt 软

件计算可知,相关系数 $R^2 = 0.9965$,相关性很强,拟合效果很好。

2) F 检验。 F 检验考察的是翘曲值与工艺参数之间的显著性。由表 5 所示, F 值为 1 437,而临界值 $F_{0.01}(4, 20)$ 由 F 分布表可得 $F_{0.01}(4, 20) = 4.17$,文中 $F > F_{0.01}$,回归方程高度显著。

表5 回归方程的显著性检验

Table 5 Significance test of regression equation

模型	平方和	自由度	方差	F 值	P 值
回归	6.8977	4	1.7244	1 437	0.000
残差	0.0241	20	0.0012		
总计	6.9218	24			

3) P 值检验。 P 值检验是考察 Moldflow 模拟所得翘曲值与非线性回归所得翘曲值的偏离程度, P 值越小,模拟值与翘曲值偏离的程度越小。由 1stopt 计算结果, P 值为 0.000,小于显著性水平 0.01,表明 Moldflow 计算值与拟合值偏离程度非常小。

通过以上 3 个检验可知,Fourier 方程是有效的,能较好地反应翘曲值与各个工艺参数的关系。也就是说,可以利用该三角级数回归方程来分析工艺参数对塑料轴承座翘曲的影响。文中给出了如何建立回归方程的原则和步骤,在试验数据充分的情况下,可以建立更加可靠和完整的回归方程,奠定参数研究的可靠基础。

4 回归方程的最值求取及试验验证

运用 1stopt 软件编程,采用非线性规划对回归方程求取最小值^{[10]6}。计算得到最优解为: $W = 89.67^{\circ}\text{C}$, $D = 287.98^{\circ}\text{C}$, $T = 8.99\text{ s}$, $B = 74.70\text{ MPa}$,翘曲值 $Y = 1.569\text{ mm}$ 。将该工艺参数组合在 Moldflow 中进行模流分析,得到的翘曲值 $Y = 1.519\text{ mm}$,将该翘曲值与 Fourier 级数在该工艺参数组合下得到的预测值比较,所得的偏差为 3.19%,可见所建立的 Fourier 级数是有效的,拟合方程有一定的可信度。

根据 Moldflow 软件默认的工艺参数模拟出来的翘曲值为 4.521 mm,经过 Fourier 方程优化处理后的翘曲值为 1.519 mm,可见通过 Fourier 方程的优化处理,可以将翘曲量减小 66.40%;正交试验得出的最佳工艺参数组合在 Moldflow 模拟下得到的翘曲值为 1.993 mm,比 Moldflow 默认工艺参数下得到的翘曲值减小了 55.92%;由此可见,Fourier 方程也可以得到使翘曲值最小的注塑工艺参数组合且比极差分析得到的工艺参数组合更优。图 6 和图 7 给出了默认条件下的翘曲变形与 Fourier 级数得出的翘曲变形。

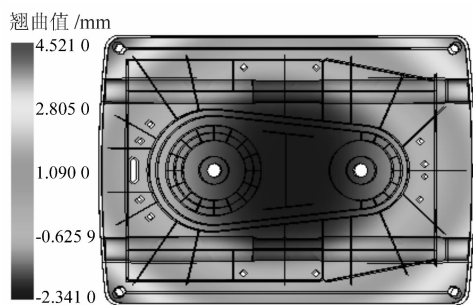


图6 优化前的翘曲变形

Figure 6 Warpaga of a plastic bearing stand before optimization

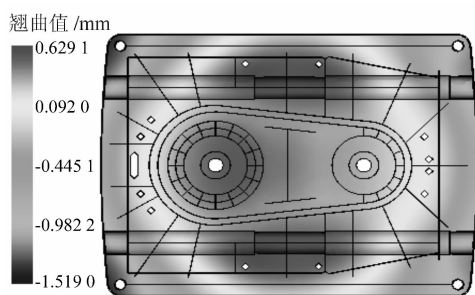


图7 回归方程得出的翘曲变形

Figure 7 Warpaga of a plastic bearing stand after regression equation

5 结语

本文使用 Hypermesh 与 Moldflow 对轴承座进行模拟分析,在正交试验的基础上对所得的数据进行回归分析,获得了使翘曲值最小的注塑工艺参数组合。根据模拟分析结果,可以得到以下结论:

1) 对于复杂的薄壁件,由于 Moldflow 软件划分网格的能力有限,得到满足 Moldflow 分析的网格模型需要大量的时间来修复网格。采用通用的网格划分软件

(上接第 86 页)

3 结论

1) 通过 FLUENT 数值模拟可以看出,选择 C 型管道进气装置对轴流风机进行性能试验,若轴承支座距离风机出口过近,则风机全压及全压效率的测试值会显著降低。

2) 在满足结构强度和刚度要求的前提下,适当增大轴承支座与风机出口的距离,可以减小出口障碍对性能试验结果的影响。

参考文献:

[1] 董其煌,高宝三. 小型风扇试验台设计[J]. 江苏工学院学报, 1987,8(1):46-57.

Hypermesh 能够得到很好的网格质量,且节约大量修复网格的时间。

2) 正交试验基础上的极差分析可以得到较好的工艺参数组合,在此工艺参数组合下得到的翘曲值比 Moldflow 默认条件下减小 55.92%,可见极差分析在注塑工艺优化方面具有重要的意义。

3) 根据试验数据,采用 Fourier 级数拟合,得到了关于翘曲值的多元回归方程。通过对回归模型进行最小值求解,得到了最优的注塑工艺参数组合。在此工艺参数组合下,Moldflow 模拟得到的翘曲值比默认条件下所得的翘曲值减小 66.40%,比极差分析得到的翘曲值减小 23.78%。可见回归方程得到的工艺参数组合可以进一步接近最佳参数,更大程度地减小翘曲值,实现工件的精准加工。

参考文献:

[1] 朱春东,李福涛,朱红艳. 基于正交试验及 Moldflow 模拟优化注塑工艺参数[J]. 塑料工业,2009,37(增刊 1):30-33.
[2] 付永峰. 汽车薄壳注塑件翘曲变形及注塑工艺优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007:46-54.
[3] 薛玮珠. 基于 CAE 分析的汽车饰件顺序注射模具成型研究[J]. 机电工程,2015,32(8):622-625.
[4] 刘斌,覃孟然. 基于 Hypermesh 的 Moldflow 中性面网格实现技术[J]. 塑料科技,2007,35(9):8-10.
[5] 朱昊. 基于神经网络的注塑制品翘曲优化研究[D]. 苏州:苏州大学,2011:33-24.
[6] 虞俊波. 基于 CAE 和 BP 网络对塑料轴承座注塑成型的翘曲优化研究[D]. 宁波:宁波大学,2013:32-33.
[7] 刘斌,许建文,江开勇. 基于 CAE 和神经网络的注射成型工艺参数优化[J]. 工程塑料应用,2007,35(11):31-34.
[8] 陈哲,邓益民,孙宝寿. 基于 UDE 试验设计的注塑翘曲工艺参数优化[J]. 轻工机械,2010,28(2):7-9.
[9] 潘文杰. 傅里叶分析及其应用[M]. 北京:北京大学出版社,2002.
[10] 山丹,胥效文,史忠科. 一种旋转变压器误差分析和校正方法[J]. 计算机技术与发展,2014(2):5-7.

[2] 国家机械工业局. 工业通风机用标准化风道进行性能试验:GB/T 1236—2000 [S]. 北京:中国标准出版社,2001.
[3] 李建峰,吕俊复. 风机流场的数值模拟[J]. 流体机械,2006,34(4):11-13.
[4] 钱方琦,张淑佳,毛鹏展. 大比转速双吸泵吸水室 CFD 数值模拟[J]. 轻工机械,2010,28(6):33-35.
[5] 刘松,吴树福,张立祥. 基于 CFD 轴流通风机三维建模及其内部流场的探讨[J]. 风机技术,2009,51(2):16-19.
[6] 上官文斌,吴敏,王益有. 发动机冷却风扇气动性能的计算方法[J]. 汽车工程,2010,32(9):800-802.
[7] 刘颖,郑水英,沈海涛. 翼型厚度对轴流风机性能的影响[J]. 风机技术,2013,55(2):15-18.
[8] 吴玉林,陈庆光,刘树红. 通风机和压缩机[M]. 北京:清华大学出版社,2011.