

轴承腔甩油盘结构优化设计

赵亚飞, 潘代锋, 李炎军, 李贵林, 胡海涛
(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 根据轴承腔中采用环下供油方式冷却跑道的特点, 设计出两种不同结构方案的甩油盘。分别建立其气液两相流的流体域数值分析模型, 采用 CFX 软件对跑道下表面的流场进行计算, 得到滑油的质量流量和体积分数。运用 ANSYS Workbench 的多参数响应面优化设计方法, 以滑油有效冷却流量为目标函数, 得到甩油盘各个结构参数在限定范围内的极值及对应的结构参数值, 并将优化后的结构参数构造的数值分析模型输入 CFX 软件中, 对其计算结果进行检验, 证明了优化设计的可靠性。通过对比两个甩油盘方案的优化结构, 选出了更优的结构方案, 可为工程设计提供参考。

关键词: 航空发动机; 甩油盘; 气液两相流; 结构参数; 多参数响应面; 优化设计

中图分类号: V233.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2019) 04-0037-06

Research on optimum design of the oil slinger of bearing oil cavity

ZHAO Ya-fei, PAN Dai-feng, LI Yan-jun, LI Gui-lin, HU Hai-tao
(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: For the raceway cooling by inner-ring oil supply, two different oil slingers have been designed. Numerical analysis models using gas-liquid two-phase flow for two slingers were established. The flow field on the lower surface of the raceway was calculated by CFX software, and the mass flow rate and volume fraction of the lubricating oil were obtained. Using the optimal design method of multi-parameter response surface of ANSYS workbench and taking the effective cooling flow of lubricating oil as the objective function, the extreme and corresponding structural parameters of each structural parameter of oil slingers in the limited range were obtained. The numerical analysis model with the optimized structural parameters was put into the CFX software, and the calculation results were checked to prove the reliability of the optimization design. The more optimum structure has been selected after comparing the optimum structures of two oil slingers and provides as reference for engineering design.

Key words: aero-engine; oil slinger; gas-liquid two-phase flow; structure parameters; multi-parameter response surface; optimum design

1 引言

轴承腔中设计甩油盘的目的, 是通过甩油盘随轴做高速圆周运动时将轴承腔中的润滑油带到轴承或密封跑道上^[1], 对相应零件进行润滑、冲洗和冷却。这种设计具有结构简单、高效、可靠等优点, 广泛应用于航空发动机滑油系统和燃油系统中。

国内外对甩油盘做了大量研究。如埃威尔等^[1]

针对某甩油盘的转速、长径比、滑油黏度等因素对润滑效果的影响进行了分析。孙丹丹^[2]对甩油盘与轴的配合进行了改进设计, 由 0.040 mm 的过盈调整为 0.063 mm 的间隙, 使得装配更加简便, 不再需要对甩油盘进行加温从而节省了电费成本。吴敬^[3]将镗床主轴密封结构由迷宫密封改进为甩油环密封结构, 有效解决了灰尘进入或滑油渗漏的难题。蔡学成^[4]在转子轴上的挡油环附近增加了一个大直径甩

油盘,有效解决了机油外漏问题。贺宏斌等^[5]将轴承腔中的甩油块改进为甩油盘后,腔压下降,密封效果得到了改善。谈锋^[6]对中间轴承甩油盘的抗冲击性能进行了模态分析,证明最大应力出现在垂向位置。王峰等^[7]针对甩油盘叶片断裂问题,分析了甩油盘的载荷工况及有限元强度,提出了相应的改进措施,经试验考核效果良好。杨策等^[8]设计的燃烧室采用甩油盘的供油方式代替喷嘴,使其具有成本低、工作可靠、易实现等优点。熊纯等^[9]在离心甩油盘性能试验器上对一种离心甩油盘的雾化性能进行了较详细的试验研究。陈晓丽等^[10]将常用的离心孔式甩油盘改进为离心叶轮式甩油盘,大大改善了甩油的均匀度。蒋雪辉^[11]对所设计的甩油盘进行了数值校核和部件及整机试验验证。吴世兴^[12]设计了一种新式甩油盘,此甩油盘具有较强的供油能力,可增大对连杆轴颈主油道润滑油的供油量,确保润滑系统的可靠性。总的来说,目前的研究仍是对已有甩油盘结构的一种简单改进与工程方面的经验性应用,对甩油结构的两相流数值模拟分析研究不够深入,缺乏对具体结构的参数化优化设计研究。

本文以一种圆周密封^[13]跑道的甩油盘为应用对象,采用气液两相流数值分析技术,以有效冷却跑道的滑油质量流量(将跑道内侧径向1.8 mm范围内的滑油流量记为有效冷却流量)为目标对甩油盘结构进行优化。基于ANSYS Workbench中的响应曲面优化方法^[14],对甩油盘结构进行多参数优化设计,并将优化结构参数值代入甩油盘结构中,检验计算出滑油流量是否最大,验算优化结构的合理性,以期甩油盘的研究和设计选型等提供理论基础及指导。

2 甩油盘数值分析计算

2.1 两种甩油结构

轴承腔主轴密封多采用环下供油^[15]方式带走摩擦热进而冷却密封跑道,其甩油盘结构设计直接关系到冷却效率进而影响密封性能。发动机轴承腔中的甩油盘结构多样,图1给出了两种典型的甩油盘结构。图中,红色线段为摩擦生热面,是需要冷却的环面;蓝色区域为A、B型两种甩油盘结构,其中A型甩油盘较B型甩油盘结构复杂。图2给出了A型甩油盘的三维结构图。

2.2 模型及边界条件

实际工作过程中,滑油流过的区域是跑道下表面与甩油盘之间的宽阔空间。取此空间为计算对

象,流体域中间截面的滑油流动示意如图3所示。

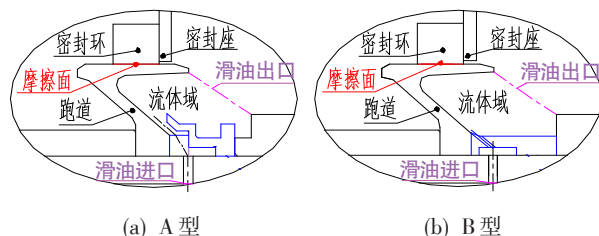


图1 两种甩油盘结构

Fig.1 Structure of two oil slingers

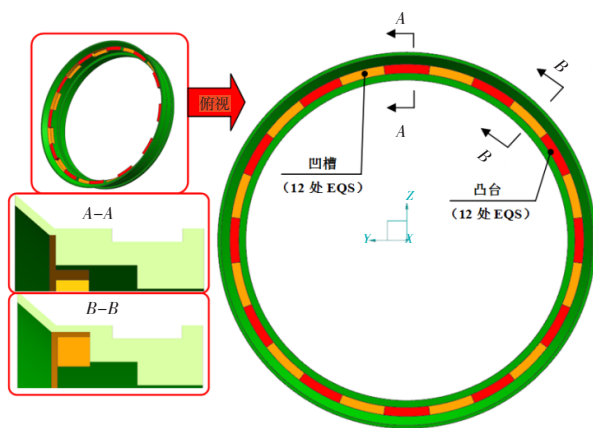


图2 A型甩油盘结构图

Fig.2 Structure diagram of type A oil slinger

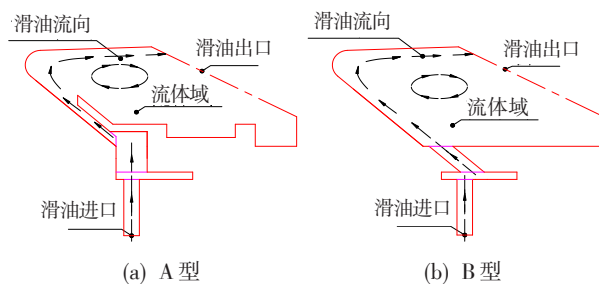


图3 流体域剖面图

Fig.3 Cutaway view of fluid domain

图4为A型甩油盘流体域三维模型(简称模型A),示出了周期对称的计算区域形状。该计算区域由入口、出口、跑道圆周、甩油盘圆周及左右循环对称分界面构成。表1列出了模型A各个表面的边界条件。B型甩油盘流体域三维模型(简称模型B)建模过程与A型甩油盘的类似。

为方便计算,对模型作如下假设:①甩油盘与跑道等壁面所在体为刚体;②滑油流动为三维定常稳态流动;③润滑油膜在厚度方向温度相等;④气体为理想气体;⑤甩油盘结构及相对位置处于理想状态;⑥流体流动循环对称。

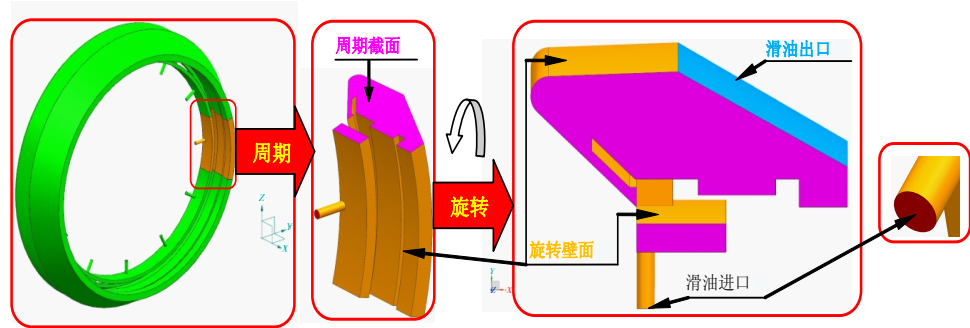


图4 流体域三维模型(模型 A)

Fig.4 3D drawing of fluid domain(model A)

表 1 模型 A 各个表面的边界条件

Table 1 Boundary conditions for different surface of model A

表面	边界条件
旋转周期边界	绕 X 轴旋转, 1/12 周期
旋转壁面	绕 X 轴旋转的转速
流体域进口	压力边界条件
流体域出口	压力边界条件

计算时,根据轴承腔的固有特性,取进口压力为滑油压力,取出口压力为大气压力。左右分界面为周期性边界,其余表面取旋转壁面边界条件。计算软件采用 CFX 流体分析软件。由于气液两相计算过程中,壁面粗糙度、滑油粘性及流动雷诺数等都会对滑油的流动产生很大的影响,因此设定以下边界条件:①轴转速为 10 000 r/min;②进口压力 0.2 MPa(表压),出口压力 0 MPa(表压);③温度 $T=300\text{ K}$;④计算模型采用带壁面函数的 $k-\varepsilon$ 模型。润滑油选用航空 4050 润滑油,其物性参数详见文献[16]。

在 CFX 中基于 N-S 方程,采用紊流、二阶迎风格式、基于微元中心有限体积法,压力速度耦合方程采用 SIMPLEC 对流场进行求解。计算域网格全部为四面体网格,总数约 8 万个。

3 多参数响应面优化

Workbench 的响应面优化方法^[14]是利用 CAE 软件进行优化的一种典型方法,具体步骤为:首先建立参数化模型,其次对多组水平组合的不同参数化 CAD 模型进行 CAE 求解,然后将优化目标提出供优化处理器进行优化参数评价并形成目标函数与多参数的响应曲面,最后根据响应曲面得到最优解(极大值或极小值)。具体优化流程见图 5。

3.1 模型 A

首先对 A 型甩油盘结构的结构参数进行参数化

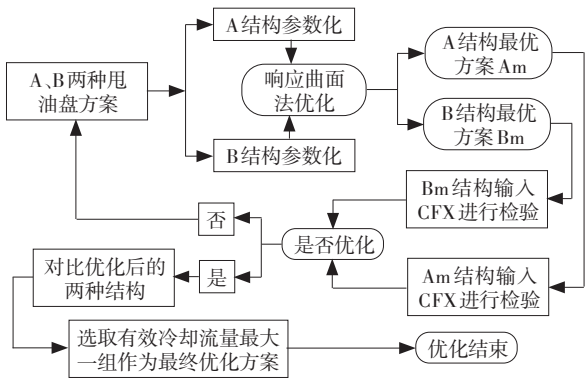


图 5 优化流程

Fig.5 Flow chart for optimization

建模。图 6 给出了使用 UG 软件创建的模型 A 的参数化模型截面图,选择的参数化结构尺寸基本覆盖了 A 型甩油盘中与滑油相关的主要结构参数,表 2 给出了图中结构参数的含义。根据结构空间的实际情况,确定各结构参数的取值范围,如表 3 所示。

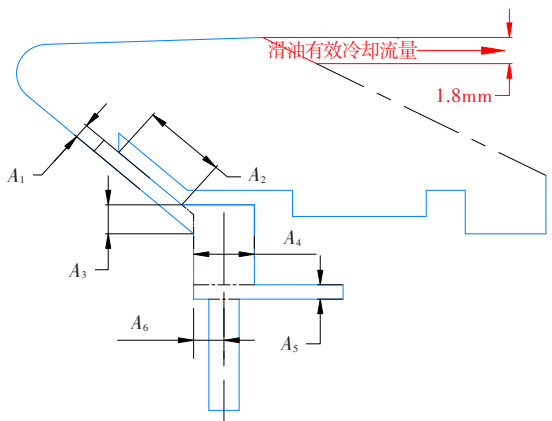


图 6 参数化的流体域模型 A

Fig.6 Parametric fluid domain model A

将滑油有效冷却流量作为目标函数,对响应曲面法选取的 45 组样本结构进行分网并设置后计算,部分结果见表 4。根据 45 组样本结构的计算结果,

表2 模型A结构参数及含义

Table 2 Structural parameters of model A

A_1/mm	甩油盘距离跑道壁面的缝隙宽度
A_2/mm	甩油盘出口跟随跑道的长度
A_3/mm	甩油盘出口的径向宽度
A_4/mm	甩油盘径向出口的轴向宽度
A_5/mm	甩油盘集油槽的径向高度
A_6/mm	甩油盘进油孔中心的轴向位置

表3 甩油盘结构参数变量(A型)

Table 3 Structural parameter variables of oil slinger(type A)

需优化结构参数	最大值	中值	最小值
A_1/mm	3.0	2.0	1.0
A_2/mm	5.5	4.5	3.5
A_3/mm	2.5	2.0	1.5
A_4/mm	4.0	3.0	2.0
A_5/mm	3.0	2.0	1.0
A_6/mm	3.0	2.0	1.0
滑油有效冷却流量/(kg/s)	优化目标		

表4 响应曲面法使用的计算参数与计算结果(A型)

Table 4 Calculation parameters and calculation results using response surface method(type A)

组别	A_1/mm	A_2/mm	A_3/mm	A_4/mm	A_5/mm	A_6/mm	滑油有效冷却流量/(kg/s)
1	2.0	4.5	2.5	3.0	2.0	2.0	0.135 476
2	2.0	4.5	1.5	3.0	2.0	2.0	0.154 137
3	2.0	4.5	2.0	4.0	2.0	2.0	0.153 396
4	2.0	4.5	2.0	2.0	2.0	2.0	0.154 231
5	2.0	4.5	2.0	3.0	3.0	2.0	0.152 676
6	2.0	4.5	2.0	3.0	1.0	2.0	0.154 217
7	2.0	4.5	2.0	3.0	2.0	3.0	0.147 466
8	2.0	4.5	2.0	3.0	2.0	1.0	0.155 144
9	3.0	4.5	2.0	3.0	2.0	2.0	0.144 813
10	1.0	4.5	2.0	3.0	2.0	2.0	0.156 935
11	2.0	5.5	2.0	3.0	2.0	2.0	0.155 705
12	2.0	3.5	2.0	3.0	2.0	2.0	0.137 588
13	2.0	4.5	2.0	3.0	2.0	2.0	0.155 986

以滑油有效冷却流量最大化为目标,使用响应面曲线法可创建6维参数的响应曲线,从而得到最优的一组结构参数。将选取的最优参数值圆整后重新代入模型进行计算,得到出口滑油有效冷却流量,如表5所示。对比优化前后结果可知,优化后的滑油有效冷却流量比优化前的大,表明根据优化结果进行圆整的结构参数具有更优的甩油能力,优化较成功。

3.2 模型B

B型甩油盘的优化过程与A型甩油盘的类似。

表5 A型甩油盘结构参数优化结果

Table 5 Optimum results of type A oil slinger structural parameters

参数	按优化结果圆整得到的值
A_1/mm	1.0
A_2/mm	5.5
A_3/mm	2.0
A_4/mm	4.0
A_5/mm	2.85
A_6/mm	1.0
滑油有效冷却流量/(kg/s)	0.161 257

图7为模型B的参数化模型截面图,表6给出了图7中结构参数的含义。各结构参数的取值范围见表7。表8给出了响应曲面法选取的25组样本结构的计算结果。使用响应面曲线法创建结构参数的4维响应曲线,从而得到最优的一组结构参数。将此最优参数值圆整后重新代入模型进行计算,得到出口滑油有效冷却流量,如表9所示。对比优化前后结果可知,优化后的滑油有效冷却流量比优化前的大,证明根据优化结果进行圆整的结构参数具有更优的甩油能力,优化较成功。

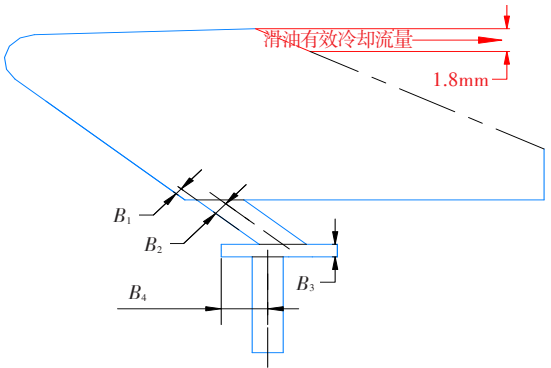


图7 参数化的流体域模型B

Fig.7 Parametric fluid domain model B

表6 模型B结构参数及含义

Table 6 Structural parameters of model B

B_1	甩油孔距离跑道壁面的最小距离
B_2	甩油孔的半径
B_3	集油环的径向宽度
B_4	进口距集油环的轴向距离

4 优化后的两种甩油盘对比

对比模型A与模型B优化后的结构,分别计算滑油体积分数,结果如图8所示。由图可看出,A型

表7 甩油盘结构参数变量(B型)

Table 7 Structural parameter variables of oil slinger(type B)			
需优化结构参数	最大值	中值	最小值
B_1/mm	1.50	1.00	0.50
B_2/mm	1.10	1.00	0.90
B_3/mm	1.20	1.00	0.80
B_4/mm	8.80	4.90	1.00
滑油有效冷却流量/(kg/s)		优化目标	

表8 响应曲面法使用的计算参数与计算结果(B型)

Table 8 Calculation parameters and calculation results using response surface method(type B)					
组别	B_1/mm	B_2/mm	B_3/mm	B_4/mm	滑油有效冷却流量/(kg/s)
1	1.0	1.0	1.0	4.9	0.112 250
2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.098 470
3	1.0	1.0	1.0	8.8	0.117 167
4	1.0	0.9	1.0	4.9	0.095 993
5	1.0	1.1	1.0	4.9	0.119 644
6	0.5	1.0	1.0	4.9	0.111 111
7	1.5	1.0	1.0	4.9	0.104 526
8	1.0	1.0	0.8	4.9	0.110 938
9	1.0	1.0	1.2	4.9	0.104 699
10	0.647 897	0.929 579	0.859 159	2.153 597	0.097 423
11	0.647 897	0.929 579	0.859 159	7.646 403	0.110 589
12	0.647 897	1.0704 21	0.859 159	2.153 597	0.114 078
13	0.647 897	1.070 421	0.859 159	7.646 403	0.127 244
14	1.352 103	0.929 579	0.859 159	2.153 597	0.092 786
15	1.352 103	0.929 579	0.859 159	7.646 403	0.105 952
16	1.352 103	1.070 421	0.859 159	2.153 597	0.109 441
17	1.352 103	1.070 421	0.859 159	7.646 403	0.122 607
18	0.647 897	0.929 579	1.140 841	2.153 597	0.093 030
19	0.647 897	0.929 579	1.140 841	7.646 403	0.106 196
20	0.647 897	1.070 421	1.140 841	2.153 597	0.109 685
21	0.647 897	1.070 421	1.140 841	7.646 403	0.122 851
22	1.352 103	0.929 579	1.140 841	2.153 597	0.088 393
23	1.352 103	0.929 579	1.140 841	7.646 403	0.101 559
24	1.352 103	1.070 421	1.140 841	2.153 597	0.105 048
25	1.352 103	1.070 421	1.140 841	7.646 403	0.118 214

甩油盘结构的滑油在跑道下表面更加集中,更有利于对跑道进行润滑和冷却。

由表5和表9可知,A型甩油盘优化后模型的滑油有效冷却流量为0.161 kg/s,B型甩油盘优化后模型的有效冷却流量为0.127 kg/s。A型甩油盘的最优化模型的有效冷却流量比B型的高出约26.4%,这说明A型甩油盘优化后的结构更优。

表9 B型甩油盘结构参数优化结果

Table 9 Optimum results of type B oil slinger structural parameters	
参数	按优化结果圆整得到的值
B_1/mm	1.0
B_2/mm	1.1
B_3/mm	1.2
B_4/mm	4.5
滑油有效冷却流量/(kg/s)	0.127 357

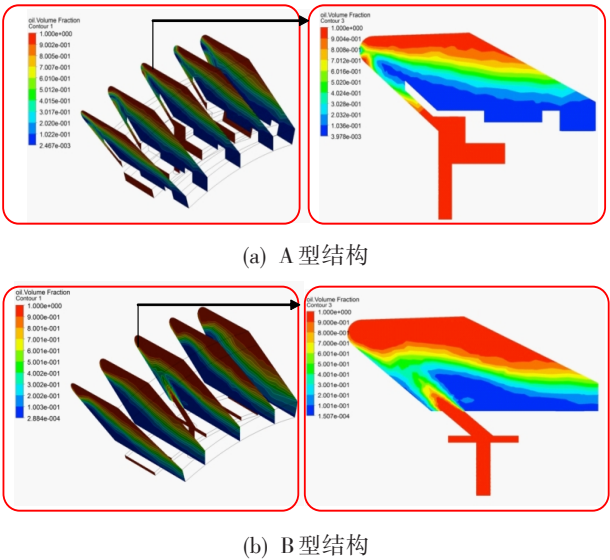


图8 滑油体积分数云图

Fig.8 Lubrication oil volume fraction distribution

5 结论

- (1) 运用 ANSYS Workbench 多参数响应面优化方法,以滑油有效冷却流量为目标函数,可得到甩油盘各个结构参数在取值范围内的最优解。该方法提高了优化效率,避免了优化的盲目性。
- (2) 相比B型甩油盘结构优化结果,A型甩油盘结构优化结果的滑油有效冷却流量更大,甩油效率更高。
- (3) 本文中的优化设计方法不仅可为甩油盘的研究和设计选型等提供理论基础及指导,亦可应用到结构复杂的其他机械结构优化设计过程中。

参考文献:

[1] 埃威尔 R C,布鲁斯 E R. 采用甩油环润滑轴颈轴承[J]. 国外建材:绵阳,1991,(1):52—59.

[2] 孙丹丹. YFJ 系列筋外冷异步电动机轴承改进[J]. 上海大中型电机,2007,(1):4—5.

- [3] 吴敬. W200A 镗床主轴密封结构改进[J]. 设备管理与维修, 2014, (3): 71.
- [4] 蔡学成. 副机烧机油的原因分析[J]. 航海技术, 2003, (5): 68—69.
- [5] 贺宏斌, 刘军战. 振动压路机振动轴承的润滑[J]. 建筑机械, 2001, (4): 54.
- [6] 谈锋. 基于 DDAM 的中间轴承甩油盘抗冲击性能分析[J]. 船舶工程, 2013, 35(S1): 66—69.
- [7] 王峰, 赵焱明, 李爱荣, 等. 贯通式驱动桥甩油盘叶片的改进[J]. 工程机械, 2010, 41(8): 33—36.
- [8] 杨策, 马朝臣, 沈宏继, 等. 一种微型燃气轮机核心机工程设计及分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 53—55.
- [9] 熊纯, 宋双文, 陈剑, 等. 一种离心甩油盘雾化性能的试验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1517—1522.
- [10] 陈晓丽, 蒋雪辉, 何悟, 等. 微小型甩油盘式燃烧室若干关键技术研究[J]. 推进技术, 2016, 37(2): 296—303.
- [11] 蒋雪辉. 气液 2 相离心甩油盘设计[J]. 航空发动机, 2016, 42(2): 7—10.
- [12] 吴世兴. 小型飞溅式润滑柴油机润滑过程分析与甩油盘的改进[J]. 湖南农机, 1998, (5): 14—15.
- [13] 王伟, 赵宗坚, 张振生. 单环圆周密封装置设计 and 应用研究[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 7—11.
- [14] 徐进峰. ANSYS Workbench 15.0 完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [15] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 12 册——传动及润滑系统[K]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [16] 曹文杰, 陈主波. 先进航空动力油料发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.

(上接第 26 页)

面积比为神经网络输入, 以流量系数为神经网络输出, 利用神经网络对高空台特种调节阀的特性进行修正, 获取新的流量特性。新旧流量特性模型仿真对比验证表明, 修正后的流量计算误差减小, 流量特性模型精度得到提高。

参考文献:

- [1] 侯敏杰. 高空模拟试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [2] Doyle J C. A review of μ : for case studies in robust control [C]// Proceedings of 10th IFAC World Congress. Munich, 1987: 395—402.
- [3] Dueterhaus D A, Maywald P V. Free-jet test capability for the aeropropulsion systems test facility[R]. AIAA 89-2537, 1989.
- [4] Martin S, Wallace I, Bates D G. Development and validation of a civil aircraft engine simulation model for advanced controller design[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(5): 051601.
- [5] 朱美印, 裴希同, 张松, 等. 一种轮盘式特种调节阀流量特性的修正算法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(5): 40—45.
- [6] 杨世忠, 邢丽娟. 调节阀流量特性分析及应用选择[J]. 阀门, 2006, (5): 33—36.
- [7] 薛永飞. 调节阀流量特性控制分析[J]. 河南纺织高等专科学校学报, 2003, (15): 19—23.
- [8] 裴希同, 朱美印, 张松, 等. 一种特种阀流量特性计算的公式迭代算法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(5): 35—39.
- [9] 邹包产, 赵宇, 李云, 等. 基于 BP 神经网络的汽轮机调节阀流量特性校正[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(5): 60—64.
- [10] 马卡洛夫 A H, 舍尔曼 M Я. 节流孔计算[M]. 姚文华, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1957.
- [11] 张鸿燕, 狄征. Levenberg-Marquardt 算法的一种新解释[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 5—8.