

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.007

基于正交设计方法的气缸盖上水孔流量测量技术*

王兆文 赵强 陈雄 张琨 黄荣华

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要: 采用正交设计方法,通过数值模拟手段,研究了各结构参数及安装参数对测量误差的影响。为把由结构参数及安装参数引起的测量误差控制在设定范围3%内,对模拟结果进行了极差分析,通过多轮极差分析及各因素的水平范围优化,获得了把测量误差控制在3%以内的结构参数和安装参数的允许变化范围,确定了可行的测量装置加工和安装方案。最后,进行了模拟方案的实验验证,验证结果表明,模拟误差与实验误差的偏差为2.07%,验证了数值模拟的可信性,同时也确保了测量技术的准确性。

关键词: 气缸盖 上水孔 流量测量 正交设计方法 结构参数 安装参数

中图分类号: TK437 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0042-07

引言

随着内燃机功率密度的不断提高,高强度大功率内燃机的冷却变得越来越重要。目前,气缸盖热负荷及热应力的日益增大,已成为制约内燃机进一步发展的主要因素之一^[1-5]。气缸盖内冷却水的流动分布直接决定了缸盖内各关键部位的温度分布及热应力分布,冷却水流动分布不合理,会使气缸盖受热不均,关键热部位的对流换热不充分,从而造成局部区域温度和热应力过高,导致缸盖热变形过大或产生热疲劳,最终导致气缸盖热裂而失效。

上水孔在冷却水套内起着流向导向和流量分配作用,并是缸体、缸盖水套中压损最大的阻力点,合理的水孔结构和布置有助于气缸盖内冷却水流动的合理分布^[6-9]。进行上水孔冷却水流量的测量则有助于了解气缸盖内冷却水流动的分布情况,进而有助于实现冷却水套的结构优化。本文采用正交设计方法,通过数值模拟手段,进行上水孔测量装置中不同结构参数及安装参数对测量误差的影响研究,并进行测量技术的优化,以优化其测量误差。

1 上水孔流量测量方法

图1为某重型柴油机气缸盖上水孔流量测量实验布置图^[10]。图1中连接在缸体和缸盖之间的装置即为上水孔测量装置,其具体结构图如图2所示。

图2每个编号通孔都对应着一个导水孔,导水孔与气缸盖上水孔一一对应连接,气缸体内冷却水



图1 上水孔流量测量实验布置图

Fig.1 Experiment rig layout of flowrate measurement in upper-nozzles



图2 上水孔流量测量装置结构图

Fig.2 Measuring rig of flowrate measurement in upper-nozzles

流经图2所示的导水孔进入气缸盖。导水孔内流量

收稿日期: 2013-05-10 修回日期: 2013-06-13

*教育部博士点新教师基金资助项目(20100142120047)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HUST 2012TS056)

作者简介: 王兆文, 讲师, 主要从事内燃机流动、喷雾、燃烧及排放控制研究, E-mail: wangzhaowen@mail.hust.edu.cn

测量原理如图3所示。

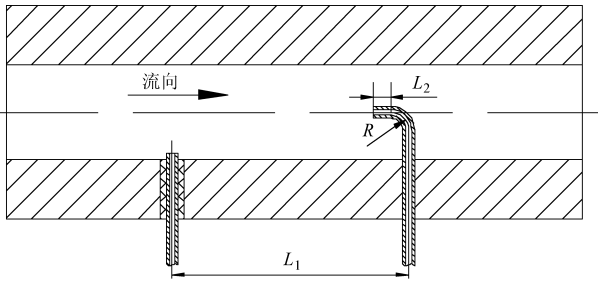


图3 导水孔内流量测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of flowrate measurement in upper-nozzle

由图3可知,导水孔上游布置有静压测压孔,下游布置有总压测压弯头,通过测量总压弯头处总压与静压测压孔处静压的压差,由伯努利方程可求得流经该导水管的流速,进而可求出冷却水的流量。该压差法^[11-15]的方程为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

式中 z_1 ——静压测压孔位置高度

z_2 ——总压测压弯头前端高度

p_1 ——静压测压孔处静压

p_2 ——总压弯头处总压

α_1, α_2 ——动能修正系数^[16]

总压测量弯头前端流速 v_2 为零,故式(1)可转换为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (2)$$

进一步转换可得

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h + \frac{2\Delta p}{\rho}}{\alpha_1}} \quad (3)$$

其中 $\Delta h = z_2 - z_1$ $\Delta p = p_2 - p_1$

欲求 v_1 ,需测量出 $\Delta p, \Delta h, \alpha_1$ 即可。由式(3)计算出流速后,流量为

$$Q_m = \rho v F \quad (4)$$

由图3及伯努利方程可知,上水孔流量测量受下述结构参数和安装参数影响^[17-18]。

结构参数有:总压测量点与静压测量点距离 L_1 、总压导压头沿水流方向直管长度 L_2 和总压导压头弯曲半径 R 。

安装参数有:总压导压头与来流方向的偏离角、总压导压头与流场中心的偏离距离。

2 正交实验设计

采用正交设计方法^[19-20],通过数值模拟手段研究不同因素对测量误差的影响程度。综上影响因

素,可以确定本文正交设计方法的6个实验因素为:因素A:总压测量点与静压测量点距离(mm);因素B:导水孔内冷却水流量(kg/s);因素C:总压导压头沿水流方向直管长度(mm);因素D:总压导压头弯曲半径(mm);因素E:总压导压头与来流方向的安装偏离角(°);因素F:总压导压头与流场中心的偏离距离(mm)。每个因素选取5个水平,即为六因素五水平正交设计优化,如表1所示。

表1 因素水平

Tab.1 Factors and levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
A/mm	16	18	20	22	24
B/(kg·s ⁻¹)	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
C/mm	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
D/mm	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
E/(°)	0	3	6	9	12
F/mm	-2	-1	0	1	2

注:表中因素F中负值表示远离安装孔方向。

根据表1中因素和水平的设计,需采用正交设计表 $L_{25}(5^6)$ 来完成该六因素五水平的正交分析和优化,正交设计表如表2所示。

表2 正交实验

Tab.2 Orthogonal experiment

方案 序号	因素					
	A/mm	B/(kg·s ⁻¹)	C/mm	D/mm	E/(°)	F/mm
1	16	0.13	2.0	1.0	0	-2
2	16	0.14	2.5	1.2	3	-1
3	16	0.15	3.0	1.4	6	0
4	16	0.16	3.5	1.6	9	1
5	16	0.17	4.0	1.8	12	2
6	18	0.13	2.5	1.4	9	2
7	18	0.14	3.0	1.6	12	-2
8	18	0.15	3.5	1.8	0	-1
9	18	0.16	4.0	1.0	3	0
10	18	0.17	2.0	1.2	6	1
11	20	0.13	3.0	1.8	3	1
12	20	0.14	3.5	1.0	6	2
13	20	0.15	4.0	1.2	9	-2
14	20	0.16	2.0	1.4	12	-1
15	20	0.17	2.5	1.6	0	0
16	22	0.13	3.5	1.2	12	0
17	22	0.14	4.0	1.4	0	1
18	22	0.15	2.0	1.6	3	2
19	22	0.16	2.5	1.8	6	-2
20	22	0.17	3.0	1.0	9	-1
21	24	0.13	4.0	1.6	6	-1
22	24	0.14	2.0	1.8	9	0
23	24	0.15	2.5	1.0	12	1
24	24	0.16	3.0	1.2	0	2
25	24	0.17	3.5	1.4	3	-2

3 各测量方案的数值模拟

3.1 三维几何模型

采用 UG 软件完成测量结构的三维几何模型建立。导水孔直径 8 mm、长 45 mm, 为方便静压压力结果的导出, 模型中坐标原点设置在静压测量点处, 液体沿着 Z 轴正方向流动。不同测量方案中的总压弯头结构和安装参数则按表 2 中数据分别建立, 方案 5 的三维几何模型如图 4 所示。

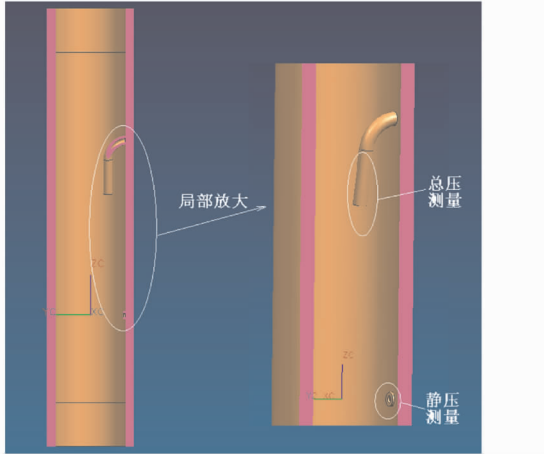


图 4 测量方案 5 的三维几何模型(剖视)

Fig. 4 3-D geometric model of measurement scheme No. 5 (sectional view)

建立各测量方案的三维几何模型后, 通过 UG 软件的 simplify 功能, 即可以得出该方案的流体区域结构。

3.2 三维网格模型

网格质量直接影响着数值模拟的精确性。为提高数值模拟的精度, 在导水孔入口、导水孔出口、静压测量孔、总压测量弯头等位置都进行了网格的细化, 细化后方案 5 网格如图 5 所示。

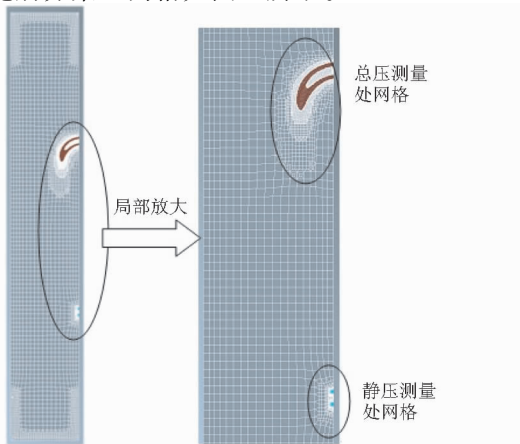


图 5 测量方案 5 的三维网格模型(剖视)

Fig. 5 3-D mesh model of measurement scheme No. 5 (sectional view)

3.3 边界条件

数值模拟边界条件则根据某重型车用柴油机水流分布实验的测量结果^[6]给出, 具体如下:

进口边界条件: 质量进口, 即按照不同工况下的实际质量流量给出。

出口边界条件: 静压 150 kPa。

壁面边界条件: 无滑移绝热边界; 粗糙度属性按 HT250 属性及图纸加工精度进行设置。

上水孔测量装置内的流动方向为竖直向上, 为提高模拟精度, 考虑重力作用, 开启重力模块, 设置重力方向为沿 Z 轴负方向。

3.4 模拟结果分析

应用 FIRE 软件依次完成 25 个测量方案的数值模拟计算, 并采集模拟结果中的总压探头内总压 p_2 、静压导压孔内静压 p_1 , 利用采集总压 p_2 和静压 p_1 , 可由式(3)计算出导水孔内流速, 进一步计算出计算流量。

由于流动粘性的作用, 总压探针处压力 p_2 与探针前端截面处平均压力存在偏差, 同样, 静压探针处静压 p_1 与探针截面处平均压力也存在偏差。故而, 通过测得的总压静压差计算得出的流量必然与实际流量存在误差。数值模拟得出的静压、总压及误差如表 3 所示。

表 3 各方案具体数值模拟结果

Tab. 3 Numerical simulation results of schemes

序号	静压 /kPa	总压 /kPa	差压法流量 /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	进口设定流量 /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差 /%
1	150.130	155.653	0.126	0.13	-3.327
2	149.997	156.715	0.138	0.14	-1.238
3	149.816	157.521	0.148	0.15	-1.425
4	149.694	158.088	0.154	0.16	-3.624
5	149.484	158.300	0.158	0.17	-7.084
6	149.794	155.098	0.123	0.13	-5.039
7	150.150	156.268	0.132	0.14	-5.501
8	149.980	157.466	0.146	0.15	-2.687
9	149.805	158.357	0.156	0.16	-2.629
10	149.545	158.952	0.163	0.17	-3.974
11	149.881	155.506	0.127	0.13	-2.133
12	149.738	155.833	0.132	0.14	-5.527
13	150.122	157.112	0.141	0.15	-5.761
14	149.959	158.297	0.154	0.16	-3.723
15	149.726	159.264	0.165	0.17	-3.221
16	149.990	155.569	0.127	0.13	-2.357
17	149.840	156.303	0.136	0.14	-2.662
18	149.605	156.540	0.141	0.15	-5.994
19	150.036	157.980	0.151	0.16	-5.855
20	149.868	159.219	0.163	0.17	-4.055
21	150.104	155.659	0.127	0.13	-2.396
22	149.954	156.430	0.137	0.14	-2.422
23	149.777	156.975	0.144	0.15	-4.153
24	149.386	157.577	0.153	0.16	-4.328
25	150.059	158.950	0.159	0.17	-6.294

4 基于模拟结果的极差分析

由表3误差数据可知,该测量技术的测量精度总体上能在工程许用范围5%以内,这表明各因素水平范围的初始选择基本合适。但由表3同时可知,最大误差达7.084%,超出本文设定值3%的范围。因此,需要优化各影响因素的水平范围,即具体结构和安装工艺的允许偏差范围,从而得到更准确的测量技术方案。

拟通过优先优化对误差影响程度较大的因素,来实现测量技术的最佳优化。故而需对模拟结果进行极差分析,确定各因素对测量误差的影响程度。极差分析结果如表4所示。

表4 各因素的极差分析结果
Tab.4 Result of range analysis

项目	因素					
	A	B	C	D	E	F
K_1	-16.70	-15.25	-19.44	-19.69	-16.23	-26.74
K_2	-19.83	-17.35	-19.51	-17.66	-18.29	-14.10
K_3	-20.37	-20.02	-17.44	-19.14	-19.18	-12.05
K_4	-20.92	-20.16	-20.49	-20.74	-20.90	-16.54
K_5	-19.59	-24.63	-20.53	-20.18	-22.82	-27.97
\bar{K}_1	-3.34	-3.05	-3.89	-3.94	-3.25	-5.35
\bar{K}_2	-3.97	-3.47	-3.90	-3.53	-3.66	-2.82
\bar{K}_3	-4.07	-4.00	-3.49	-3.83	-3.84	-2.41
\bar{K}_4	-4.18	-4.03	-4.10	-4.15	-4.18	-3.31
\bar{K}_5	-3.92	-4.93	-4.11	-4.04	-4.56	-5.59
R	0.85	1.88	0.62	0.62	1.32	3.18

注:表中 K_i 为各因素第*i*水平结果的累计评价价值, \bar{K}_i 为各因素第*i*水平结果的平均评价价值,R为各个因素的极差。

极差越大,该因素对测量误差的影响程度越大,由表4中极差R可知,在选定的水平范围内,各因素对误差影响程度由大至小依次为:因素F(总压导压头与流场中心的偏离距离)、因素B(导水孔内冷却水流量)、因素E(总压导压头与来流方向的安装偏离角)、因素A(总压测量点与静压测量点距离)、因素D(总压导压头弯曲半径)、因素C(总压导压头沿水流方向直管长度)。

各因素的水平与指标关系如图6所示。

综合极差结果和水平指标关系图可知:因素A、因素C、因素D的水平-指标曲线相对平坦,其水平范围可以综合考虑加工工艺、安装工艺和误差影响来进行小范围优化。而因素B、因素E和因素F的水平-指标曲线变化幅度相对较大,这表明这3个因素对测量误差的影响程度较大,需重点优化。各因素的分析及优化具体如下:

因素A中,水平1与其他水平的极差相对较大,

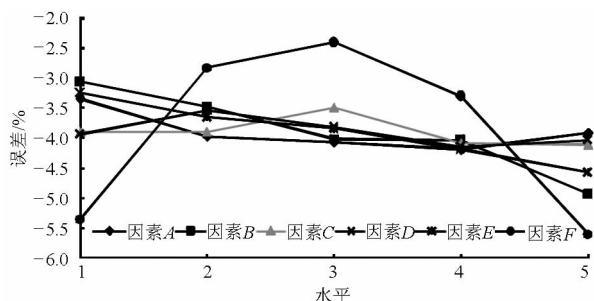


图6 因素A、B、C水平与指标关系

Fig.6 Levels and indicators graph of factors

为降低因素A对测量误差的影响,可以选择极差相对较小的水平范围,即水平2~水平4之间的范围,由图6可知,因素A水平2~水平4范围内,即18~22 mm之间,水平-指标曲线很平坦,可以较好地减小其对误差的影响程度。

因素B为上水孔流量,其水平范围对应着为发动机不同工况下的上水孔流量,因此不能更改,以确保在整个发动机工况下,测量误差都较小。

因素C和因素D为总压导压管结构尺寸,由图6可知,在选定的水平范围内,其水平-指标曲线变化幅值相对较小,故而可以综合考虑加工工艺、安装工艺和测量误差影响来进行小范围优化。针对因素C(总压导压头沿水流方向直管长度),适当减小总压导压头的直管长度,可以减小为安装总压导压管而在上水孔通道上加工的安装孔尺寸,可进一步减小测量对原始流动的影响,因此将范围由2~4 mm优化为1~3 mm。针对因素D(总压导压头弯曲半径),适当增大总压导压头弯曲半径,可以减小总压导压头的加工难度,同时,由因素D的水平-指标曲线可知,在弯曲半径较大方向,其极差更小,因此将其范围由1.0~1.8 mm优化为1.4~2.2 mm。

由因素E(总压导压头与来流方向的安装偏离角)的水平-指标曲线可知,随着安装偏离角的增加,测量误差随之增加,并且在初定水平范围内,测量误差的极差达1.32,因此应减小因素E的水平范围,控制其极差。综合考虑安装工艺的可行性和测量误差的影响程度,将其由0°~12°优化为0°~6°。

由表4中极差和图6中水平-指标曲线变化程度都可知,因素F(总压导压头与流场中心的偏离距离)对测量误差影响程度最大,其极差达到3.18,应重点优化。由其水平-指标曲线变化规律可知,总压导压头与流场中心的偏离距离对测量误差的影响基本对称,且偏离距离为0 mm时,测量误差最小。因此,可以以偏离距离0 mm为中心,缩小安装时的偏离中心距离。综合考虑安装难度和测量误差,将因素F由-2~2 mm优化为-1.5~1.5 mm。

5 水平范围优化后的模拟结果

各因素经过优化后的因素水平如表5所示,对应的正交设计如表6所示。

表5 水平范围优化后的因素水平

Tab.5 Factors and levels for optimized range of levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
A/mm	18	19	20	21	22
B/(kg·s ⁻¹)	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
C/mm	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D/mm	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
E/(°)	0	1.5	3	4.5	6
F/mm	-1.50	-0.75	0	0.75	1.50

表6 水平范围优化后的正交设计

Tab.6 Orthogonal experiment for optimized range of levels

方案	因素					
	A/mm	B/(kg·s ⁻¹)	C/mm	D/mm	E/(°)	F/mm
1	18	0.13	1.0	1.4	0	-1.5
2	18	0.14	1.5	1.6	2	-0.8
3	18	0.15	2.0	1.8	3	0
4	18	0.16	2.5	2.0	5	0.75
5	18	0.17	3.0	2.2	6	1.5
6	19	0.13	1.5	1.8	5	1.5
7	19	0.14	2.0	2.0	6	-1.5
8	19	0.15	2.5	2.2	0	-0.8
9	19	0.16	3.0	1.4	2	0
10	19	0.17	1.0	1.6	3	0.75
11	20	0.13	2.0	2.2	2	0.75
12	20	0.14	2.5	1.4	3	1.5
13	20	0.15	3.0	1.6	5	-1.5
14	20	0.16	1.0	1.8	6	-0.8
15	20	0.17	1.5	2.0	0	0
16	21	0.13	2.5	1.6	6	0
17	21	0.14	3.0	1.8	0	0.75
18	21	0.15	1.0	2.0	2	1.5
19	21	0.16	1.5	2.2	3	-1.5
20	21	0.17	2.0	1.4	5	-0.8
21	22	0.13	3.0	2.0	3	-0.8
22	22	0.14	1.0	2.2	5	0
23	22	0.15	1.5	1.4	6	0.75
24	22	0.16	2.0	1.6	0	1.5
25	22	0.17	2.5	1.8	3	-1.5

水平范围优化后方案的数值模拟过程与优化前方案相同。通过对水平范围优化后25个方案的数值模拟,可得优化后的误差结果如表7所示。

6 最大误差方案及其测量误差的实验验证

由表7中误差数据可知,水平范围优化后的25个正交方案中最大测量误差为2.54%,满足测量误差小于3%的设计要求。但为了确保优化后水平

范围内,所有可能方案的测量误差都符合设计要求,就需要确保该水平范围内的最大误差方案的测量误差也在设计要求之内。

表7 水平范围优化后方案的数值模拟结果

Tab.7 Numerical simulation results of schemes for optimized range of levels

序号	静压 /kPa	总压 /kPa	差压法流量 /(kg·s ⁻¹)	进口设定流量 /(kg·s ⁻¹)	误差 /%
1	150.115	155.863	0.1284	0.13	-1.27
2	150.058	156.733	0.1380	0.14	-1.41
3	149.785	157.577	0.1489	0.15	-0.76
4	149.515	158.327	0.1581	0.16	-1.19
5	149.661	159.655	0.1682	0.17	-1.08
6	149.749	155.391	0.1273	0.13	-2.07
7	150.063	156.730	0.1380	0.14	-1.40
8	149.776	157.574	0.1490	0.15	-0.66
9	149.70	158.554	0.1588	0.16	-0.74
10	149.409	159.239	0.1669	0.17	-1.83
11	149.836	155.639	0.1292	0.13	-0.65
12	149.656	156.215	0.1371	0.14	-2.10
13	150.015	157.637	0.1474	0.15	-1.70
14	149.808	158.537	0.1575	0.16	-1.54
15	149.563	159.506	0.1679	0.17	-1.23
16	149.927	155.783	0.1298	0.13	-0.13
17	149.772	156.487	0.1387	0.14	-0.91
18	149.528	157.008	0.1462	0.15	-2.54
19	149.928	158.552	0.1567	0.16	-2.07
20	149.729	159.632	0.1677	0.17	-1.38
21	150.027	155.866	0.1298	0.13	-0.19
22	149.850	156.573	0.1389	0.14	-0.78
23	149.652	157.300	0.1479	0.15	-1.42
24	149.424	157.958	0.1560	0.16	-2.51
25	149.847	159.586	0.1664	0.17	-2.13

根据水平范围优化后方案的数值模拟结果,可得优化后各因素的极差结果如表8所示。

表8 水平范围优化后各因素极差分析结果

Tab.8 Result of range analysis of schemes for optimized range of levels

项目	因素					
	A	B	C	D	E	F
K ₁	-5.71	-4.31	-7.96	-6.91	-6.59	-8.57
K ₂	-6.71	-6.60	-8.20	-7.58	-7.47	-5.18
K ₃	-7.23	-7.09	-6.70	-7.42	-6.95	-3.65
K ₄	-7.02	-8.05	-6.22	-6.54	-7.13	-6.00
K ₅	-7.04	-7.64	-4.62	-5.24	-5.56	-10.31
\bar{K}_1	-1.14	-0.86	-1.59	-1.38	-1.32	-1.71
\bar{K}_2	-1.34	-1.32	-1.64	-1.52	-1.49	-1.04
\bar{K}_3	-1.45	-1.42	-1.34	-1.48	-1.39	-0.73
\bar{K}_4	-1.40	-1.61	-1.24	-1.31	-1.43	-1.20
\bar{K}_5	-1.41	-1.53	-0.92	-1.05	-1.11	-2.06
R	0.30	0.75	0.71	0.47	0.38	1.33

对比表4和表8可知,优化水平范围后,除因素C外,各因素的极差都有明显改善,这表明优化后测量装置结构参数和安装参数的不一致性对测量误差的影响程度得到较好改善。

根据极差数据可绘制出水平范围优化后的各因素水平与指标关系图,具体如图7所示。

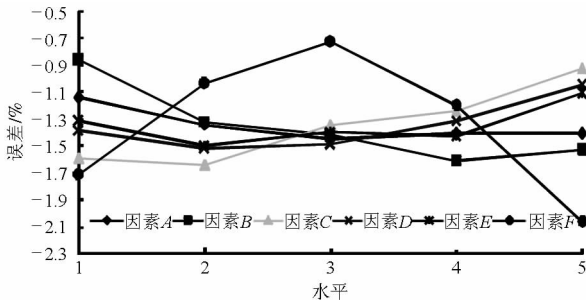


图7 因素A、B、C水平与指标关系

Fig.7 Levels and indicators graph of factors for optimized range

由图7可知,因素A最恶劣的水平为A₃或A₅,因素B最恶劣的水平为B₄,因素C最恶劣的水平为C₂,因素D最恶劣的水平为D₂,因素E最恶劣的水平为E₂或E₄,因素F最恶劣的水平为F₁或F₅。因此在水平范围优化后的水平范围内,下述8种方案有可能是最大误差方案:A₃B₄C₂D₂E₂F₁、A₃B₄C₂D₂E₂F₅、A₃B₄C₂D₂E₄F₁、A₃B₄C₂D₂E₄F₅、A₅B₄C₂D₂E₂F₁、A₅B₄C₂D₂E₂F₅、A₅B₄C₂D₂E₄F₁、A₅B₄C₂D₂E₄F₅。为得到以上8种测量方案的测量误差,并确定最大误差方案,对以上8种方案进行了数值模拟,其模拟结果如表9所示。

表9 可能最大误差方案的数值模拟结果

Tab.9 Numerical simulation results of schemes for potential maximum error scheme

序号	静压 /kPa	总压 /kPa	差压法流量 /(kg·s ⁻¹)	进口设定流量 /(kg·s ⁻¹)	误差 /%
1	149.943	158.586	0.157	0.16	-2.015
2	149.449	157.931	0.155	0.16	-2.911
3	149.934	158.571	0.157	0.16	-2.048
4	149.447	157.936	0.155	0.16	-2.872
5	149.942	158.557	0.157	0.16	-2.062
6	149.461	157.916	0.155	0.16	-2.953
7	149.944	158.541	0.157	0.16	-2.161
8	149.450	157.913	0.155	0.16	-2.908

由表9可知,最大误差方案为A₅B₄C₂D₂E₂F₅,其测量误差为-2.953%,符合设计要求。因此可认为,在优化后的水平范围,所有测量方案的测量误差都在设定值3%以内,即,测量装置的加工参数和安装参数只要在优化后水平范围内变动,其测量误差

都能得到保证。

为进一步确保上水孔流量测量技术的误差在设计范围之内,设计一套上水孔流量验证装置,以验证数值模拟的可信性。实验验证装置如图8所示。



图8 上水孔流量测量技术验证装置图

Fig.8 Validation rig of flowrate measurement in upper-nozzles

对以上8种可能的最大误差方案进行了实验验证,实验结果与模拟结果吻合程度较好。其中最大误差方案的实验验证测量结果为:压差8447 Pa,通过计算可得计算流量为0.15520 kg/s,流量计实测流量为159.8 g/s,即0.1598 kg/s,可得验证实验测量误差为-2.876%,同样小于设定值3%。同时,同方案的模拟误差为-2.953%,由此可知,实验验证得出的实验误差与数值模拟得出的模拟误差的偏差为2.595%,由此可知,数值模拟能准确地反映上水孔内的实际流动状态。因此,利用数值模拟方法来优化测量方案是准确和行之有效的,同时也表明了该测量技术的准确性。

7 结束语

设计了一套上水孔测量装置来进行上水孔流量的测量,在上水孔流量测量时,测量装置的结构参数及安装参数都对测量误差有较大影响,为分析各参数对测量误差的影响程度,并研究误差范围在3%以内的测量技术方案,进行了各参数对测量误差影响的模拟研究。通过模拟与分析,差压法流量测量影响因素由大到小依次为:总压导压头偏离中心的距离、总压导压头与来流方向的安装偏离角、总压导压头沿水流方向直管长度、总压导压头弯曲半径、总压测量点与静压测量点距离、导水孔内冷却水流量。通过极差分析及水平范围优化,得到了测量误差在3%以内的各参数的许用变化范围。最后,进行了测量技术的实验验证,实验结果表明,模拟结果能准确反映真实状况。

参 考 文 献

- 1 黄荣华,王兆文,成晓北,等.降低车用6缸柴油机热负荷的研究[J].内燃机工程,2007,28(5):28-34.
Huang Ronghua,Wang Zhaowen,Cheng Xiaobei,et al. Study on decrease of heat load of six cylinder vehicle diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(5):28-34. (in Chinese)
- 2 赵维茂,张卫正,原彦鹏,等.柴油机功率强化前后气缸盖的温度场模拟与试验[J].农业机械学报,2009,40(3):51-55.
Zhao Weimao,Zhang Weizheng,Yuan Yanpeng,et al. Simulation and experiment of temperature field on diesel engine cylinder head before and after enhancement of power[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3): 51-55. (in Chinese)
- 3 郭良平,刘福水,王长园,等.高功率条件下气缸盖的温度测试和改善冷却的数值模拟[J].内燃机学报,2012,30(5):462-468.
Guo Liangping,Liu Fushui,Wang Changyuan,et al. Temperature measurement and numerical study on improving cooling of cylinder head for high power-density[J]. Transactions of CSICE, 2012,30(5):462-468. (in Chinese)
- 4 Jian Y, Jim Covey, Daniel D Agnew. Coolant-flow optimization in a racing cylinder block and head using CFD analysis and testing [C]. SAE Paper 2004-01-3542, 2004
- 5 Mulemane Aditya, Soman Ravindra. CFD based complete engine cooling Jacket development and analysis[C]. SAE Paper 2007-01-4129,2007.
- 6 王兆文,黄荣华,成晓北,等.车用柴油机气缸盖热负荷的改善[J].华中科技大学学报,2008,36(8):99-102.
Wang Zhaowen,Huang Ronghua,Cheng Xiaobei,et al. Decrease of thermal load of cylinder head in vehicle diesel engines[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology,2008,36(8):99-102. (in Chinese)
- 7 黎苏,郑清平,张坤鹏,等.天然气发动机气缸盖流固耦合传热研究[J].农业机械学报,2012,43(7):24-27.
Li Su,Zheng Qingping,Zhang Kunpeng,et al. Numerical simulation on the fluid-solid coupled heat transfer of the CNG engine cylinder head[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):24-27. (in Chinese)
- 8 邓鹏,王兆文,黄荣华.基于正交设计的气缸盖冷却优化方案研究[C]//湖北省内燃机学会2009年学术年会论文集,2009.
- 9 李威,黄荣华,王兆文.重型柴油机冷却水套的三维数值模拟及结构优化[C]//湖北省内燃机学会2009年学术年会论文集,2009.
- 10 Wang Zhaowen, Huang Ronghua, Cheng Xiaobei. Tests and numerical simulations on the thermal load of the cylinder head in heavy-duty vehicle diesel engines[J]. JRC/ICE2007-40018, ASME,2007:361-373.
- 11 莫乃榕.工程流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2000.
- 12 章梓雄,董曾南.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,2011.
- 13 马龙博,张宏建,周洪亮,等.基于差压法的油水两相流的流量测量[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(2):365-368.
Ma Longbo,Zhang Hongjian,Zhou Hongliang,et al. Oil-water two-phase flow measurement based on differential pressure[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2007,41(2):365-368. (in Chinese)
- 14 石书喜,董浩,郑士富,等.差压法蒸汽流量测量的误差分析[J].测量与设备,2001(9):23-25.
- 15 张茂松.差压式气体流量测量的系数补偿[J].南钢科技,2001(3):48-49.
- 16 李斌怀.伯式动能修正系数 α_k 理论值与实验验证分析[J].武汉理工大学学报,2012,34(5):35-39.
Li Binhuai. Kinetic energy correction coefficient α_k : its theory value and experimental validation analysis of Bernoulli's equation in fluid dynamics[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2012,34(5):35-39. (in Chinese)
- 17 孙志强,周子民,张宏建,等.皮托管测量影响因素分析——检测杆与安装角的影响[J].传感技术学报,2007,20(3):690-693.
Sun Zhiqiang,Zhou Jiemin,Zhang Hongjian,et al. On the influencing factors in a pitot tube measurement I. Influence of air horn and mounting angle[J]. Chinese Journal of Sensors Andactuators,2007,20(3):690-693. (in Chinese)
- 18 孙志强,周子民,张宏建,等.皮托管测量影响因素分析——全压孔与静压孔的影响[J].传感技术学报,2007,20(4):941-944.
Sun Zhiqiang,Zhou Jiemin,Zhang Hongjian,et al. On the influencing factors in a pitot tube measurement II. Influence of total and static ports[J]. Chinese Journal of Sensors Andactuators,2007,20(4):941-944. (in Chinese)
- 19 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.
- 20 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
Liu Ruijiang,Zhang Yewang,Wen Chongwei,et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management,2010,27(9):52-55. (in Chinese)

developed and the optimal control was adopted to achieve the optimal shift quality. The shift sequence coordinated control of shift out and gear selection was introduced, and the gearshift controller was designed and tested. When the equivalent inertia was $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ and the speed difference was 620 r/min , the results showed that the shift time was 135 ms , the impact was 3.86 m/s^3 , and the friction work per unit was 0.077 J/mm^2 . The coordinated control method could be reduced to 11 ms . The test results indicated that, combined with the designed control strategy, the novel gearshift system achieved good shift performance.

Key words: 2-DOF electromagnetic actuator Automated manual transmission Synchronizing process
Optimal control

(上接第 48 页)

Flowrate Measurement of Upper-nozzles in Cylinder Head Based on Orthogonal Design Method

Wang Zhaowen Zhao Qiang Chen Xiong Zhang Kun Huang Ronghua

(College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the improvement of power density of internal combustion engine, the coolant jacket structure is becoming more and more important. The design and optimization of coolant jacket depend heavily on the construction and position of the upper-nozzles, so that the flowrate measurement in the upper-nozzles will benefit those design and optimization. However, during the flowrate measurement, the construction parameters and installation parameters of the measurement rig will affect the measurement error significantly. This paper explored the relationship between these parameters and the measurement error by means of CFD numerical simulation based on orthogonal design method. In order to control the measurement error in 3% , the flow in many upper-nozzle schemes were simulate, and then the range analysis of the simulation results were achieved and the levels of each factor were optimized. After the optimization, the suitable levels of each factor were determined, and the maximum measurement error of the optimum schemes was reduced to 2.95% . At the end, the paper achieved a measurement experiment to correct the numerical simulation, and the difference between simulation error and experimental error was only 2.07% according to the experimental results, which verified the reliability of the numerical simulation and accuracy of the measurement technology.

Key words: Cylinder head Upper-nozzles Flowrate measurement Orthogonal design method
Structure parameters Installation parameters