

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108613

气体涡轮流量计性能优化的模拟与实验研究

王智威¹, 严微微¹, 肖云巩², 林景殿², 章圣意²

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 浙江苍南仪表集团股份有限公司 苍南 325800)

摘要:以 TRZ80 气体涡轮流量计为研究对象,采用数值模拟与实验测试相结合的方法,提出了前整流器和后导流体的结构优化方案。通过对结构优化前后流量内部流场特征的分析,揭示了流量计结构与性能优化背后确切的流体力学机制。研究结果表明:前整流器和后导流体区域的压降突变与后导流体尾部的涡旋结构和回流现象是影响流量计计量性能的主要机制。优化的流量计结构可以明显减弱压降突变、涡旋结构与回流现象。优化的流量计结构既可以显著降低流量计的压力损失,又可以明显提高流量计的测量精度与稳定性,其压力损失和线性度误差分别降低了约 48.58% 和 32.43%。研究结果有助于为今后开发与量产计量性能更好的气体涡轮流量计提供理论指导和技术支持。

关键词: 气体涡轮流量计; 压力损失; 线性度误差; 计量性能

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on performance optimization of gas turbine flowmeter by numerical simulation and experimental measurement

Wang Zhiwei¹, Yan Weiwei¹, Xiao Yungong², Lin Jingdian², Zhang Shengyi²

(1. College of Metrology Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Cangnan Instrument Group Co., Ltd., Cangnan 325800, China)

Abstract: Taking TRZ80 gas turbine flowmeter as the research object, the structural optimization scheme of the front rectifier and the rear deflector is proposed by combining numerical simulation and experimental test. Through the analysis of the internal flow field characteristics before and after structural optimization, the exact hydrodynamic mechanism behind the structure and performance optimization of flowmeter is revealed. Research results show that the sudden change of pressure drop in the front rectifier and rear deflector area, as well as the vortex structure and reflux phenomenon at the rear deflector tail, are the main mechanisms that affect the metering performance of the flowmeter. The optimized structure can greatly reduce the sudden change of pressure drop, vortex structure and reflux phenomenon. In addition, the optimized structure can significantly reduce the pressure loss of the flowmeter. And it can also obviously improve the measurement accuracy and stability of the flowmeter. The pressure loss and linearity error are reduced by about 48.58% and 32.43%, respectively. Research results could help to provide theoretical guidance and technical support for the development and mass production of gas turbine flowmeter with better metering performance in the future.

Keywords: gas turbine flowmeter; pressure loss; linearity error; metering performance

0 引言

气体涡轮流量计具有测量精度高、量程范围宽、压力损失小、以及对流量测量敏感等优点,在城市燃气、石油、化工等领域获得了广泛应用^[1-3]。研究气体涡轮流量计的结构改进与性能优化对流量计量行业的发展起着至关重要的作用^[4-6]。

迄今为止,许多学者在气体涡轮流量计的结构与性能研究方面取得了重要的进展^[7-10]。在叶轮方面,刘民杰等^[11]实验分析了叶片螺旋角对气体涡轮流量计性能的影响,发现具有 55° 螺旋角的流量计的性能最好。Wang 等^[12]数值研究了气体涡轮流量计的流场特征,提出了精确预测叶轮转子转速的转矩平衡分析方法。王菊芬等^[13]改进了气体涡轮流量计的叶轮结构,流量计的抗流体干扰能力得到了明显增强。郭素娜等^[14]通过对气

体涡轮流量计的叶轮叶片做合适切角,极大提高了流量计的计量性能。在前整流器方面,冯越等^[15]设计了一种新型前整流器结构,明显降低了流量计的压力损失。孙宏军等^[16]优化了前整流器的结构,发现增大整流器长度或者缩短整流器叶片长度可以显著提升流量计的性能。在后导流体方面,陈铄等^[17]数值分析了流量计各部位对压力损失的影响,发现后导流体所产生的压力损失占比最大。

叶轮作为气体涡轮流量计最核心的部件,目前的研究最为成熟,优化设计的空间不大,而对流量计前整流器和后导流体的优化研究目前尚不成熟,且缺乏对其背后确切的流体力学机制的分析。本文采用数值模拟与实验测量相结合的方法,对 TRZ80 气体涡轮流量计进行研究,通过分析流量计的内部流场特征,提出针对前整流器和后导流体的结构优化方案,进而综合评估流量计的计量性能。

1 流量计的结构与性能指标

1.1 流量计的结构

本文以德国 RNG 公司生产的 TRZ80 气体涡轮流量计为研究对象,其结构模型如图 1 所示。流量计的结构主要由前整流器、叶轮、后导流体以及壳体等组成。气体从管道流入流量计,首先经过前整流器进行整流,之后气体推动叶轮使之发生周期性旋转,从而产生电磁脉冲信号,叶轮转速正比于气体流速,通过测量叶轮转速获得气体流速,经过信号转换后得到管道内气流的流量值。

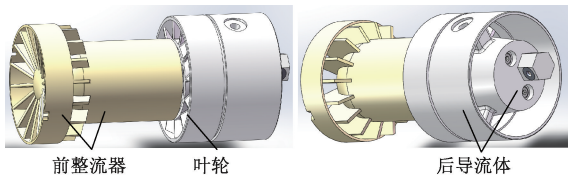


图1 TRZ80 气体涡轮流量计结构图

Fig. 1 Structure of the TRZ80 gas turbine flowmeter

根据力矩平衡原理,建立 TRZ80 气体涡轮流量计叶轮旋转的运动方程:

$$Jd\omega/dt = M - M_1 - M_2 - M_3 \quad (1)$$

式中: J 为叶轮转动惯量; ω 为叶轮转动角速度; M 为气体推动叶轮叶片产生的力矩; M_1 为摩擦产生的阻力矩; M_2 为流体经过叶轮时在叶片上产生的流动阻力矩; M_3 为电磁转换器工作产生的电磁阻力矩。

1.2 流量计的性能指标

根据气体涡轮流量计检定规程^[18],流量计的计量性能主要由压力损失 ΔP 、仪表系数 K 、线性度误差 E 等指标评价。降低压力损失能够降低流量计在使用过程的能

耗^[19]。气体通过流量计的压力损失的计算公式为:

$$\Delta P = \alpha \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad (2)$$

式中: α 为压力损失系数; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; v 为气流速度, m/s 。

仪表系数 K 是衡量流量计测量精度的重要指标,它表示输出脉冲频率 f 与实际体积流量 Q_v 之比:

$$K_i = \frac{f}{Q_v} \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{2} [(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}] \quad (4)$$

式中: $(K_i)_{\max}$ 为仪表系数最大值; $(K_i)_{\min}$ 为仪表系数最小值。在实际流动中,由于叶轮转动要克服轴承的机械阻力、流体阻力等影响, K 不能保持为常数,尽量使 K 接近常数是提高流量计测量精度的关键。

线性度误差 E 是表征流量计性能的重要指标,可以由下式进行计算:

$$E = \frac{(K_i)_{\max} - (K_i)_{\min}}{(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}} \times 100\% \quad (5)$$

在量程范围内线性度误差 E 越小,表明流量计越稳定、测量精度越高,计量性能也就越好。

2 模拟方法与实验测试

2.1 数值模拟方法

采用基于计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的数值方法对 TRZ80 气体涡轮流量计的内部气流进行计算,气流的运动遵循质量守恒和动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \quad (7)$$

式中: u_i 、 u_j 为气体流速, m/s ; p 为热力学压强, Pa ; $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 为雷诺应力。运用 FLUENT 软件进行数值模拟,采用基于压力的基本求解器,选取 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行气体湍流模拟计算^[20]。

模拟时进出口均加了 10 倍于机芯内径的直管段,以消除管道进口段效应对模拟结果的影响。流体域包含前、后直管段、叶轮旋转区和除去叶轮部分机芯的流体域等 4 个部分。采用 ANSYS Mesh 软件进行网格分块划分,其中直管段和机芯流道几何结构规整部分采用结构化网格,叶轮部分机芯流体域几何结构复杂区域则使用非结构化混合网格。为了提高计算的准确度,局部加密叶轮旋转部分的网格。

整个流动区域划分为静区域和叶轮旋转的动区域,并采用多重参考模型耦合动静区域。进口给定速度边界条件,且假定切向和径向的速度为0,进口平均速度由 $v=Q_v/A$ 确定,其方向与进口段截面垂直;出口为大气压,壁面无滑移。叶轮采用滑移边界条件,相对于旋转区域速度为0,即叶轮与旋转区域转速相同。对于叶轮旋转区域,采用力矩平衡方法得到稳定状态的转速^[12]。叶轮区域与前后静区域定义为 interface 交互面。

2.2 实验测试方法

实验测试采用基于负压法的标准表气体流量标准装置(如图2所示)。装置主要由标准罗茨流量计、稳压气罐、气动阀门、抽气泵、控制系统等组成。用高精度罗茨流量计作为标准流量计,其工作量程为0~250 m³/h,流量控制精度为1级。控制系统从罗茨流量计读入流量信号,经PLC设备控制气动阀门实现对流量的控制。稳压气罐接于标准流量计后,用于补偿气压损失与稳定气流。TRZ80气体涡轮流量计作为待测流量计,差压计的两个测压口分别连接待测流量计的前后直管段,用于测量待测流量计的压力损失,其量程范围为±3 000 Pa,压力测量精度等级为1级。高频转速传感器嵌入待测流量计测量叶轮的转速。装置尾端的抽气泵装置作为动力源,用于产生相对稳定的负压压力。在实验过程中,在13~250 m³/h流量量程内等比例选取了9个特征流量点,依次输入到控制端,记录每个流量点下的压力损失、转速、流量等数据。

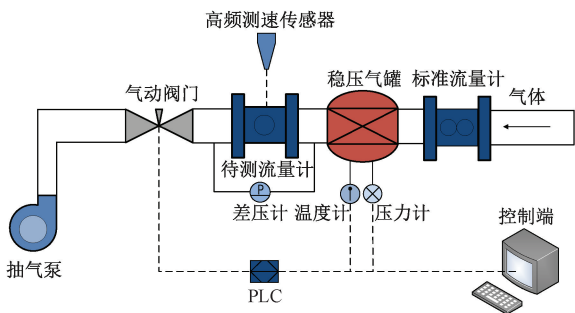


图2 实验装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

3 结果分析与讨论

3.1 方法验证

为了消除网格数量对模拟结果的影响,在150 m³/h特征流量值下分别选取了158万、255万、356万、505万和643万5种网格进行网格无关性验证。经数值计算,5种网格数下流量计压力损失的相对误差分别为7.10%、3.82%、1.64%、0.64%和0.21%。当网格数量为

505万时,计算所得的压力损失与643万网格的计算结果相比误差仅为0.56%。此时计算所得的压力损失已经非常接近实验测量值。因此,选取了505万网格数对流量计进行后续的模拟研究。

此外,我们还对比了流量计压力损失的数值结果与实验结果。由图3可知,随着流量的增大,流量计的压力损失明显增大,且数值结果与实验结果的吻合性十分良好,在全量程范围内最大误差不超过3.10%,验证了所采用的模拟方法和实验方法的准确性与可靠性,为后续流量计的结构改进与性能优化研究打下基础。

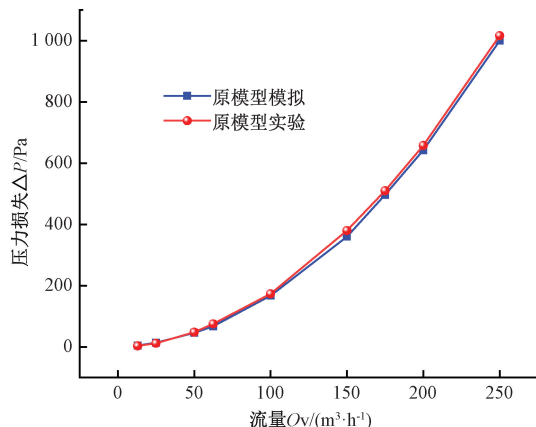


图3 流量计压力损失的模拟与实验结果对比

Fig. 3 Comparison between numerical and experimental results of pressure loss in flowmeter

3.2 流量计内部流场特征分析

为了得到流量计的结构优化方案,首先对流量计的内部流场特征进行分析。基于CFD模拟技术,我们计算得到最大流量250 m³/h下原模型内部流体的压力场和速度场分布。由图4可知,最大压力出现在前整流器的头部,其数值约为1 100 Pa。由于前整流器管道突然收缩,气流速度迅速增大,速度梯度较大;此时气体的压降变化也较为剧烈。在后导流体区域,叶轮下游的压力产生了突变,出现了明显的负压区,前后压差达到了900 Pa左右。后导流体尾端的速度分布较为杂乱,由于流体间的相互作用,产生了明显的涡旋结构和回流现象,最大回流速度在-10 m/s左右,此时压力分布也较分散,尾端负压达到了-600 Pa。涡旋结构和回流在流量计内部做负功,造成能量损失,且会对流量计机械结构的稳定性造成影响,影响计量的准确性,缩短流量计的使用寿命。综上所述,前整流器和后导流体区域的压力突变与后导流体尾部的涡旋结构和回流现象是影响流量计性能的主要原因。因此,对流量计结构的优化方案可以从降低前整流器和后导流体区域的压力突变,以及减弱后导流体尾部的涡旋结构和回流现象的角度去考虑。

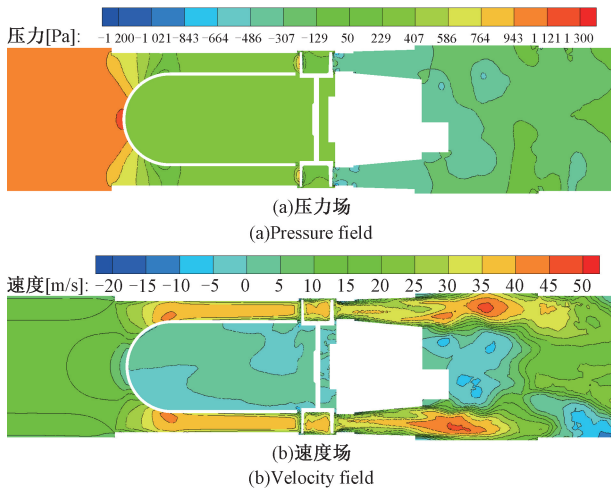


图 4 流量计内部流体的压力场和速度场分布
Fig. 4 Distribution of pressure field and velocity field inside flowmeter

3.3 流量计结构优化方案

基于内部流场特征分析,优化前后的前整流器结构模型如图 5 所示。优化前后前整流器的长度、进口内径、尾部内径以及叶栅数目保持一致;优化前的前整流器头部为半球形,头部长度为 26.4 mm,头部内径为 52.8 mm,尾部为长圆柱体形,尾部长度为 76.6 mm;优化后的前整流器头部设计成长流线型,头部长度为 80 mm,尾部为短圆柱体形,尾部长度为 23 mm。前整流器的设计能够使气体平稳降压,稳定流速。具体结构参数及其尺寸可以参照表 1。

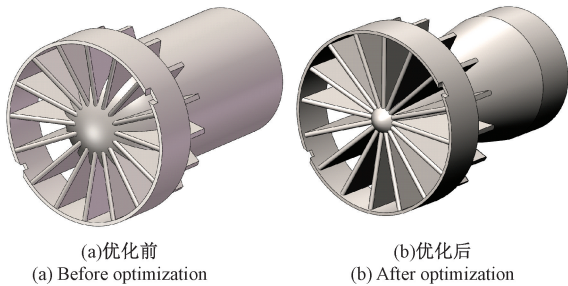


图 5 前整流器结构图

Fig. 5 Structure diagram of front rectifier

表 1 前整流器结构参数

Table 1 Structural parameters of front rectifier

前整流器结构参数	优化前前整流器尺寸	优化后前整流器尺寸
总长 L /mm	103	103
进口内径 D /mm	77.4	77.4
头部长度/mm	26.4	80
头部内径/mm	52.8	—
尾部内径/mm	52.8	52.8
叶栅数	16	16

对流量计的后导流体也进行了结构优化,优化前后的结构模型如图 6 所示。优化后的后导流体内径(如图 6 中 A'、B' 所示,内径分别为 52.5 mm 和 42 mm)与原模型(如图 6 中 A、B 所示,内径分别为 54 mm 和 45 mm)相比有所减小,这样可以防止气体回流干扰叶轮旋转,不仅可以提高计量的准确性,还能减小气流做负功所产生的能量损耗。原模型中厚度不同的支撑结构(如图 6 中 C₁、C₂ 所示,厚度分别为 13.5 mm 和 7.5 mm)更改为厚度一致且更薄的支撑结构(如图 6 中 C' 所示,厚度为 3 mm),既保证了结构的稳定性,还能减小气体沿程阻力造成的压力损失。优化的后导流体用短流线型的尾部(如图 6 中 D' 所示)代替了原模型中的短六棱柱形尾部(如图 6 中 D 所示),后导流体的长度也由 85 mm 增大至 105 mm。尾端的设计是为了气体能够平稳流出,减小涡旋和回流现象,提高结构的稳定性和测量的准确性。后导流体优化前后的结构参数及其尺寸可以参照表 2。

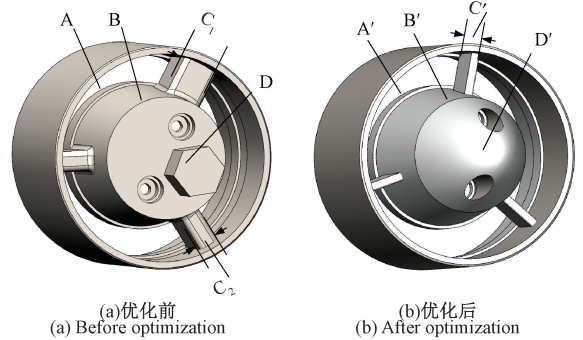


图 6 后导流体结构图

Fig. 6 Structure diagram of rear deflector

表 2 后导流体结构参数

Table 2 Structural parameters of rear deflector mm

优化前结构	优化后结构	优化前尺寸	优化后尺寸
A	A'	直径 $D=54$	直径 $D=52.5$
B	B'	直径 $D=45$	直径 $D=42$
C ₁	C'	厚度 $H=13.5$	厚度 $H=3$
C ₂	C'	厚度 $H=7.5$	厚度 $H=3$
D	D'	边长 $l_1=9.8$ 尾部长度 $l_2=15$	尾部长度 $l=35$
总长度 L		$L=85$	$L_1=105$

3.4 流量计的性能指标

为了验证优化思路的可行性,对结构优化后的流量计内部流场特征进行分析。图 7 表示在最大流量 250 m³/h 下优化后流量计内部流体的压力场和速度场。最大压力出现在前整流器的顶端,最大压力值约为 600 Pa。改进的流线型前整流器管道逐渐收缩,对气流产

生了良好的缓冲作用。在前整流器的主体区域,气体流速随着管道收缩平稳增大,速度梯度较小,压降变化较为缓慢,有效抑制了压降突变现象。在后导流体区域,气体流出叶轮端的压降明显减小,后导流体尾端没有出现明显的涡旋结构,压力分布相对均匀,这是由于改进的短流线型后导流体结构对气流起到了缓冲作用,抑制了涡旋结构的产生。后导流体尾端的速度分布与原模型相比较为稳定,没有出现明显的混乱涡旋结构,回流现象较弱,最大回流速度约为 -3 m/s ,表明优化后的后导流体结构有助于流量计的稳定工作。气体流过后导流体后负压逐渐变小,改进模型比原模型提早出现了压力为0的位置,这说明优化的后导流体结构有助于气流压力的回升。综上所述,优化后的前整流器与后导流体结构可以有效降低前整流器和后导流体区域的压力突变,减弱后导流体尾部的涡旋结构和回流现象,是一种较为合理的结构优化方案。

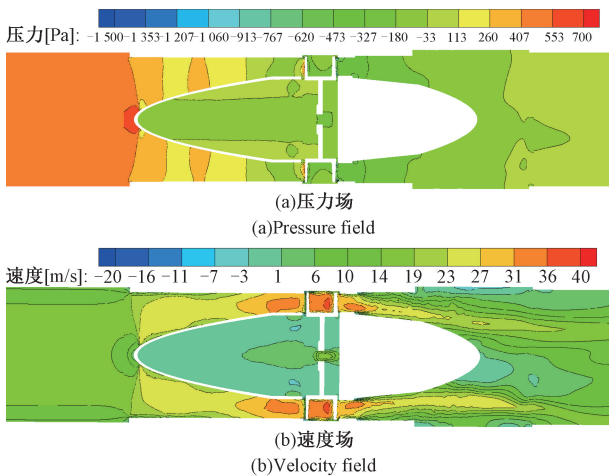


图7 结构优化后流量计内部流体压力场和速度场分布
Fig. 7 Distribution of pressure field and velocity field in flowmeter after structure optimization

为了进一步评估流量计结构优化效果,运用3D打印技术制作出优化后的前整流器和后导流体结构模型,安装进TRZ80气体涡轮流量计进行实验测试,测量得到流量、压力损失、转速、仪表系数以及最大示值误差等实验结果。经过3组实验测试,每组测试3次实验数据,计算出每个特征流量点下实验数据结果的平均值。表3列出了结构优化前后流量计的压力损失、仪表系数和线性度误差。

图8表示原模型和优化模型的压力损失随着流量的变化规律。在9个特征流量点下,3种模型的压力损失与流量均呈二次曲线增长趋势,实验结果符合式(2),改进模型的压力损失均低于原模型,说明优化模型的压力损失系数 α 要比原模型小。由表3可知,在最大流量下压力损失由原模型的 $1\ 016.00\text{ Pa}$ 降至优化模型的

表3 优化前后流量计的实验数据

Table 3 Experimental data of flowmeter before and after optimization

流量 $Q_v/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	原模型 $\Delta P/\text{Pa}$	原模型 K/m^{-3}	原模型 $E/\%$	优化 模型 $\Delta P/\text{Pa}$	优化 模型 K/m^{-3}	优化 模型 $E/\%$
250	1 016.00	2 361.66		522.46	2 385.74	
200	657.48	2 356.14		369.10	2 378.03	
175	509.84	2 353.51		303.30	2 375.94	
150	379.95	2 351.46		222.90	2 375.11	
100	173.43	2 347.73	0.37	111.20	2 374.02	0.25
62.5	75.13	2 345.94		48.70	2 375.05	
50	47.90	2 344.74		30.20	2 375.09	
25	11.77	2 344.31		8.80	2 376.44	
13	3.32	2 345.09		2.80	2 375.71	

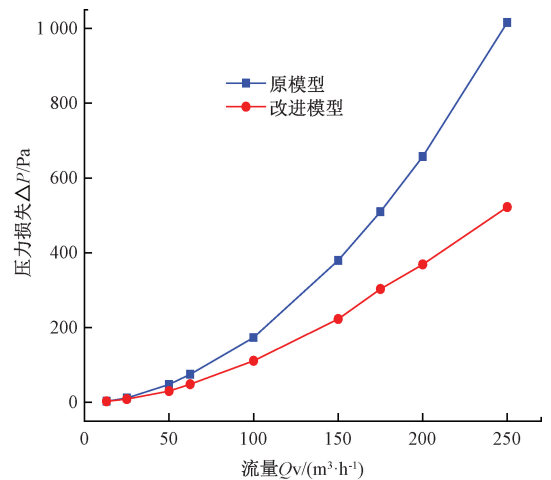


图8 压力损失随流量的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of pressure loss with flow rate

522.46 Pa ,压力损失降低了约48.58%。因此,优化模型可以明显减小气体流动过程所产生的能量损耗,所开发的流量计产品必将更加节能环保。

除了流量计的压力损失性能指标,我们还通过实验测试得到了输出脉冲频率 f 与体积流量 Q_v 的信息。运用式(3)和(4)计算得到了流量计的仪表系数 K 。图9表示流量计的仪表系数 K 随着流量的变化规律。总体而言,结构优化后的流量计的仪表系数更大,分布也更趋向于恒定。统计分析得到:原模型的仪表系数平均值为 $2\ 350.06$,标准偏差为 6.06 ;优化模型的仪表系数平均值为 $2\ 376.79$,标准偏差为 3.54 ,这说明了结构优化后的流量计的仪表灵敏度更好,测量的准确度也更高。此外,我们还用仪表系数通过式(5)计算得到了流量计的线性度

误差 E 。实验数据表明:原模型的线性度误差约为 0.37%,优化模型的线性度误差约为 0.25%,优化后的流量计的线性度误差降低了 32.43%左右。因此,优化方案有助于提升流量计测量的精确性与稳定性。

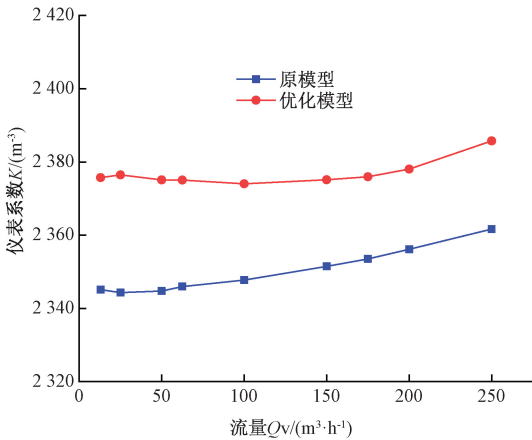


图9 优化前后 K 随流量变化的曲线

Fig. 9 Curves of K with flow rate before and after optimization

4 结 论

本文对 TRZ80 气体涡轮流量计进行了数值模拟和实验测量研究,提出了关于前整流器和后导流体的结构优化方案;通过对优化前后流量计内部流场特征的分析,理清了流量计结构与性能优化的流体力学机制;根据流量计检定规程综合评估了优化前后流量计的性能指标,找到了提升流量计性能的有效方法。主要研究结论如下:

1) 前整流器和后导流体区域的压降突变与后导流体尾部的涡旋结构和回流现象是影响流量计性能的主要流体力学机制。优化后的长流线型前整流器和短流线型后导流体结构可以明显减弱压降突变、涡旋结构与回流现象。

2) 优化的流量计结构既可以显著降低流量计的压力损失,又可以明显提高流量计的测量精度与稳定性,其压力损失和线性度误差分别降低了约 48.58% 和 32.43%。研究结果有助于为今后开发与量产性能更好的气体涡轮流量计提供理论指导和技术支持。

参考文献

[1] 汪秋航, 孙丽丽, 王国辉, 等. 对气体涡轮流量计扰动试验的分析[J]. 中国仪器仪表, 2009, 29(3): 85-87.
WANG Q H, SUN L L, WANG G H, et al. The analysis for perturbation test on gas turbine meters [J]. China Instru-Mentation, 2009, 29(3):85-87.

[2] 杨乐, 侯晓璐, 朱春磊, 等. 涡轮流量计计量偏差的修正[J]. 能源与节能, 2021, 26(2): 173-177.
YANG L, HOU X L, ZHU CH L, et al. Correction of measurement deviation of turbine flowmeter [J]. Energy and Energy Conservation, 2021, 26(2): 173-177.

[3] 温怀海. 流量仪表在石油化工行业中的选型及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(5): 4-6.
WEN H H. Selection and application of flow meter in petrochemical industry [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(5): 4-6.

[4] 刘夷平, 陈超, 马力, 等. 多工况下涡轮流量计标定曲线的分散与聚合[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 147-154.
LIU Y P, CHEN CH, MA L, et al. Dispersion and aggregation of turbine meter calibration curves under multi-working conditions [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 147-154.

[5] POURPASHA H, ZEINALI H S, MOHAMMADFAM Y. Comparison between multi-walled carbon nanotubes and titanium dioxide nanoparticles as additives on performance of turbine meter oil nano lubricant [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 11064.

[6] 吴小川, 张陆军, 张军, 等. 涡轮流量计计量稳定性影响成因分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(2): 23-26.
WU X CH, ZHANG L J, ZHANG J, et al. Analysis on the causes of the influence of turbine flowmeter's metrological stability [J]. Gas & Heat, 2021, 41(2): 23-26.

[7] 刘正刚, 杜广生, 刘丽萍. 动量式气体流量计内部流场特性与测量性能研究[J]. 计量学报, 2019, 40(1): 124-129.
LIU ZH G, DU G SH, LIU L P. Study on internal flow field and measurement performance of momentum gas flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(1): 124-129.

[8] ZOHEIR S, SHAHROKH S, HOSSEIN S. Developing a model for prediction of helical turbine flowmeter performance using CFD [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 42: 47-57.

[9] 裴江辉, 苏中地, 张凯, 等. 气体涡轮流量传感器叶轮压力的数值模拟[J]. 中国计量学院学报, 2013, 24(2): 124-128.
PEI J H, SU ZH D, ZHANG K, et al. Numerical simulation of impeller pressure of gas turbine flow sensor [J]. Journal of China University of Metrology,

- 2013, 24(2): 124-128.
- [10] 汪秋航, 刘秀东. 导流器结构对气体涡轮流量计曲线影响的试验研究[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2008, 24(6): 41-42.
WANG Q H, LIU X D. Experimental research for the influence of the configuration of flow straightener on the gas turbine meter's curve[J]. Instrument Standardization & Metrology, 2008, 24(6): 41-42.
- [11] 刘民杰, 阎兵. 叶片螺旋角对气体涡轮流量计性能影响的分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015, 52(11): 18-20.
LIU M J, YAN B. Analysis of the effect of blade helix angle on the performance of gas turbine flowmeter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, 52(11): 18-20.
- [12] WANG ZH, ZHANG T. Computational study of the tangential type turbine flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 19(5): 233-239.
- [13] 王菊芬, 孟浩龙. 新型涡轮流量计计量性能试验研究[J]. 计量技术, 2019, 63(12): 13-16.
WANG J F, MENG H L. Experimental research on the measurement performance of the new type turbine flowmeter[J]. Metrology Science and Technology, 2019, 63(12): 13-16.
- [14] 郭素娜, 张涛, 孙立军, 等. 采用流场分析提高涡轮流量传感器性能的研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2473-2478.
GUO S N, ZHANG T, SUN L J, et al. Research on improving performance of turbine flow sensor using flow field analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2473-2478.
- [15] 冯越, 任建强, 王彦华. 基于 Fluent 的涡轮流量计前导流体改进研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(5): 663-669.
FENG Y, REN J Q, WANG Y H. Research on improvement of front diversion body of turbine flowmeter based on fluent [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(5): 663-669.
- [16] 孙宏军, 冯越, 汪波. 气体涡轮流量计前导流器的数值模拟与优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 550-557.
SUN H J, FENG Y, WANG B. Numerical simulation and optimal design of the front deflector of gas turbine flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 550-557.
- [17] 陈铄, 苏中地, 林景殿. 气体涡轮流量计流道压力损失的数值模拟[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26(2): 134-139.
CHEN SH, SU ZH D, LIN J D. Numerical simulation of pressure loss in flow channel of gas turbine flowmeter[J]. Journal of China University of Metrology, 2015, 26(2): 134-139.
- [18] 全国流量容量计量技术委员会. JJG 1037—2008 涡轮流量计检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
National Flow & Volume Capacity Measurement Technical Committee. JJG 1037—2008 Verification Regulation of Turbine Flowmeter [S]. Beijing: Quality Inspection of China Press, 2008.
- [19] 沈方荣. 重视流量计压损 向每个计量点要效益[J]. 中国计量, 2011, 17(7): 118-119.
SHEN F R. Pay attention to the pressure loss of the flowmeter and seek benefits for each metering point[J]. China Metrology, 2011, 17(7): 118-119.
- [20] 刘民杰, 阎兵. 气体涡轮流量计旋转部件内流场模拟与性能分析[J]. 机械工程师, 2016, 48(2): 42-45.
LIU M J, YAN B. Flow field simulation and performance analysis of rotating parts of gas turbine flowmeter [J]. Mechanical Engineer, 2016, 48(2): 42-45.

作者简介



王智威, 2019年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为流量计量、CFD仿真等。

E-mail: zww660531@163.com

Wang Zhiwei received his B.Sc. degree from China Jiliang University in 2019. He is currently a master student at China Jiliang University. His main interests include flow measurement, CFD simulation and so on.



严微微 (通信作者), 2004年于温州大学获得学士学位, 2007年于浙江师范大学获得硕士学位, 2011年于香港理工大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为流量计量、多相流动等。

E-mail: yanww@cjlu.edu.cn

Yan Weiwei (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Wenzhou University in 2004, received her M.Sc. degree from Zhejiang Normal University in 2007, and received her Ph.D. degree from The Hong Kong Polytechnic University in 2011. She is currently a professor and a master advisor at China Jiliang University. Her current research interests include flow measurement, multiphase flow, and so on.