

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210150

气体涡轮流量计结构优化研究*

李旭阳¹, 万观军¹, 严微微¹, 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 温州 325800)

摘要:以 TM80 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对其进行结构优化研究。数值结果表明压力梯度骤变和边界层分离的出现主要由流量计的表芯支座和后导流体引起。由此提出了关于表芯支座坡度和后导流体直径的结构优化方法,将表芯支座的坡度设计为 15° ,将表芯支座侧面的台阶流转变成渐缩流;将后导流体直径缩减为 62 mm,将后导流体侧面的台阶流转变成等直径的管道流。数值模拟和实验测试证实,当表芯支座坡度设计为 15° 、后导流体直径设计为 62 mm 时,流量计的压力损失显著降低,仪表系数变得更加稳定,线性度误差明显变小,说明该结构优化方法可以明显提升流量计的计量性能。研究结论有助于为今后开发性能更好的气体涡轮流量计提供有力的理论指导和技术支持。

关键词: 气体涡轮流量计; 结构优化; 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

Research on structure optimization of the gas turbine flowmeter

Li Xuyang¹, Wan Guanjun¹, Yan Weiwei¹, Lin Jingdian², Zhang Shengyi²

(1. China Jiliang University and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

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

Abstract: In this article, the structure of the TM80 gas turbine flowmeter is optimized by using numerical simulation and experimental test. The numerical simulation results reveal that the sudden change of pressure gradient and boundary layer separation are mainly caused by the core support and rear deflector. Therefore, the structural optimization schemes about the slope of core support and the diameter of rear deflector are proposed. Specifically, the slope of the movement support is designed to be 15° . The step flow on the side of the movement support is transformed into a gradual flow, the diameter of the rear guide fluid is reduced to 62 mm, and the step flow on the side of the rear guide fluid is transformed into a pipe flow of equal diameter. The numerical and experimental results show that when the slope of core support is 15° and the diameter of rear deflector is 62 mm, the pressure loss of the flowmeter is significantly reduced, the instrument coefficient becomes more stable, and the linearity error becomes obviously smaller, which verify that the structural optimization schemes can greatly improve the metering performance of the flowmeter. The research results are helpful to provide theoretical guidance and technical support for the development of gas turbine flowmeter with better performance in the future.

Keywords: gas turbine flowmeter; structure optimization; metering performance

0 引言

气体涡轮流量计是一种速度式流量传感器,具有计量精度高、响应速度快、量程范围广等明显优点^[1-3]。随着天然气贸易的增加及其计量技术的发展,进一步提高

气体涡轮流量计的计量性能显得尤为重要。然而,由于气体涡轮流量计的结构比较复杂,对其进行结构优化和性能提升仍存在较大难度,亟待开展相关的实验和模拟研究^[4-6]。

许多学者对气体涡轮流量计的结构与性能进行了研究。在前整流器方面,刘正先等^[7]采用数值模拟和实验

测试研究了前整流器形状对流量计压力损失的影响,指出前整流器结构变化会明显改变流量计的局部压力损失。孙宏军等^[8]通过数值模拟发现增加前整流器长度和缩短前整流器叶片可以改善流场的均匀性,有效降低流量计的压力损失、线性度误差以及重复性误差。在叶轮方面,王菊芬等^[9]设计了一种新型三叶片长螺旋叶轮结构,运用实验测试证实这种叶轮结构可以显著提高流量计在大流量计量时的抗干扰能力。孙鹏飞等^[10]采用六自由度模型结合数值模拟对流量计的叶片进行了结构优化。当叶片的流入角为 55° 、轴向宽度为 55 mm 以及重合度为 1 时,流量计具有最好的测量精度。在后导流体方面,陈铎等^[11]对流量计内部的流场特征进行了数值分析,发现后导流体所产生的压力损失达到了流量计总压力损失的 55%。邵家存等^[12]基于实验测试和数值模拟,通过增加后导流体长度和延置后导流体位置,使流量计的压力损失减少约 20.5%,最大值误差降低约 2.5 倍。王智威等^[13]指出后导流体附近的压力梯度剧变及其下游的涡旋和回流是影响流量计性能的主要因素,通过对后导流体局部结构优化,使流量计的压力损失和线性误差分别降低 48.6% 和 32.4%。

综上所述,现阶段对气体涡轮流量计的研究主要集中在叶轮、前整流器与后导流体,对表芯支座的结构优化研究还很少见^[14-16]。此外,后导流体是流量计产生压力损失的主要原因,研究其结构优化具有重要意义。因此,本文以 TM80 气体涡轮流量计为研究对象,通过数值模拟与实验测试方法,研究流量计内部的流场特征,提出针对表芯支座和后导流体的结构优化方案,评估结构优化后流量计的性能指标,探索提高流量计性能的有效方法,为今后开发性能更好的气体涡轮流量计提供有力的理论指导和技术支持。

1 流量计物理模型与性能指标

1.1 流量计物理模型

以浙江苍南仪表集团开发的 TM80 型气体涡轮流量计为研究对象,其结构主要由前整流器、前导流体、叶轮、表芯支座、后导流体以及壳体组成,如图 1 所示。流量计的前整流器采用叶栅结构,前导流体由第二级叶栅和圆柱体组成,表芯支座用于固定叶轮,后导流体位于叶轮后方,用于稳定出口气流。天然气流入流量计,首先经过前整流器和前导流体整流,使得气体以一定角度冲击叶轮,叶轮受力产生旋转,叶轮转速和气体平均流速成正比,叶轮旋转会周期性改变电磁转换器的磁阻值,从而产生电磁脉冲信号,经信号放大器放大后得到瞬时流量值,再得到累积流量值^[17]。

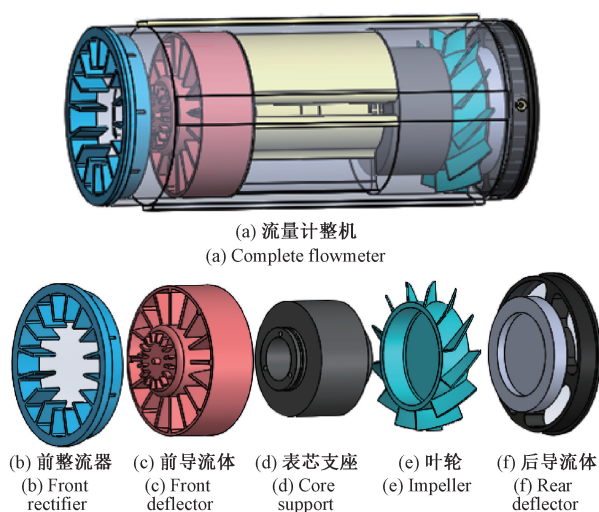


图 1 TM80 气体涡轮流量计物理模型

Fig. 1 Physical model of TM80 gas turbine flowmeter

1.2 流量计性能指标

根据气体涡轮流量计检定规章《JJG 1037—2008》^[18],压力损失、仪表系数、线性度误差等是衡量气体涡轮流量计性能的重要指标。

压力损失 ΔP 表征流体通过流量计的能量损失。压力损失越小,表示流量计越节能。天然气通过流量计的压力损失的计算公式可以表示为:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \alpha \rho \cdot u^2 \quad (1)$$

式中: α 为压力损失系数; ρ 为气体密度; u 为气体流速。

仪表系数 K 是表征流量计计量精确度和量程比的关键性能指标。各流量点的仪表系数 K_i 与待测气流量 Q_i 以及流量计输出脉冲频率 f 的关系式为:

$$K_i = \frac{f}{Q_i} \quad (2)$$

根据流量计检定规章^[18],仪表系数 K 如下式:

$$K = \frac{1}{2} [(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}] \quad (3)$$

式中: $(K_i)_{\max}$ 和 $(K_i)_{\min}$ 分别表示流量计在分界流量点 q_i 到最大流量点 $q_{\max}$ 范围内各流量检定点得到 K_i 的最大值和最小值。 K 值越接近恒定,表示流量计的测量稳定性越高,计量的精确度和可靠性也就越高。

线性度误差 δ 表征流量计仪表系数的稳定性。根据流量计检定规章^[18],线性度误差如下式:

$$\delta = \frac{(K_i)_{\max} - (K_i)_{\min}}{(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}} \times 100\% \quad (4)$$

线性度误差表示全量程范围的端点形成直线的最大偏差。线性度误差越小,表明流量计的仪表系数越稳定。

2 数值模拟与实验测试方法

2.1 数值模拟方法

天然气在气体涡轮流量计内部的运动遵循流体力学的基本方程,即满足流体运动的质量守恒和动量守恒方程。将气体当成不可压缩流体处理,其质量守恒和动量守恒方程分别表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial \vec{x}_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\vec{u}_i \vec{u}_j)}{\partial \vec{x}_j} = - \frac{\partial p}{\partial \vec{x}_i} + \frac{\partial p_{ij}}{\partial \vec{x}_j} + \vec{f}_i \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中: $\vec{x}_i$ 、 $\vec{x}_j$ 为空间坐标分量; $\vec{u}_i$ 、 $\vec{u}_j$ 为气流速度分量; p 为静压; p_{ij} 为应力张量; $\vec{f}_i$ 为体积力分量。

由于气体涡轮流量计结构十分复杂,天然气在其内部的运动往往呈现湍流状态。为了实现气体湍流运动的模拟,选取 RNG $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型^[19]。气流运动与叶轮旋转存在相互作用,根据力矩平衡原理,叶轮旋转的运动方程可以表示为^[20]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_2 - M_3 - M_4 \quad (7)$$

式中: J 为叶轮惯性力矩; $d\omega/dt$ 为叶轮角加速度; M_1 为流体对叶轮驱动力矩; M_2 为轴承摩擦阻力矩; M_3 为黏性阻力矩; M_4 为磁阻力矩; t 为时间。

采用 Fluent 软件求解流量计内部气流的运动方程。为了消除管道进口段效应,在流量计进口和出口均增加 $10D$ 直管段, D 为机芯直径。进口采用速度边界条件,出口为大气压,壁面采用无滑移边界,叶轮采用滑移边界条件。为了求解叶轮旋转运动方程,将整个计算区域划分为静区域和叶轮旋转的动区域,两个区域间选用多重参考模型耦合。

2.2 实验测试方法

实验测试采用标准表法气体流量标准装置(实验在浙江苍南仪表集团完成)。实验装置主要由待测流量计、罗茨流量计、稳压气罐、气动阀门、气泵和控制系统等构成,如图2所示。通过控制系统调节气动阀门,实现对气体体积流量的控制。罗茨流量计作为标准表,其工作量程为 $0 \sim 250 \text{ m}^3/\text{h}$, 计量精度为 0.5 级。TM80 气体涡轮流量计作为待测流量计,其工作量程为 $13 \sim 250 \text{ m}^3/\text{h}$, 量程比为 20:1。差压计的两个测压口分别安装在待测流量计前后直管段 $3D$ 处,其量程为 $\pm 3000 \text{ Pa}$, 计量精度为 1 级。根据国家计量检定标准^[18],需对气体涡轮流量计的 13、50、100 和 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 等特征流量点进行检定。在同个流量点进行多次测量,获得标准流量计和待测流量

计的的压力损失、脉冲数、体积流量等信息,经过数据处理后得到仪表系数和线性度误差等指标,通过这些指标评估待测流量计的性能。

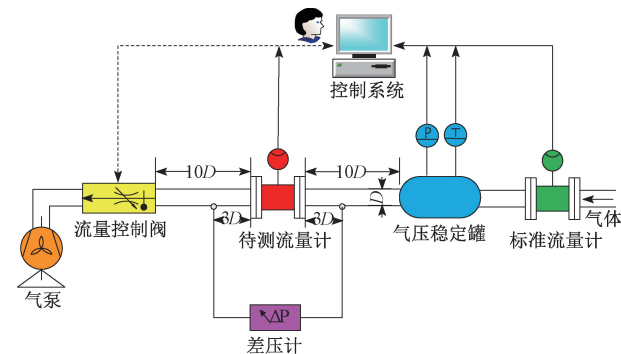


图2 气体流量标准实验测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of gas flow standard experiment

3 结果分析与讨论

3.1 研究方法验证

运用 SolidWorks 软件对 TM80 气体涡轮流量计各零件进行组装建模,再将模型导入 Ansys WorkBench 进行网格划分。直管段采用结构化网格,由于叶轮和后导流体结构更复杂,采用非结构混合网格,并对其进行局部细化处理。选取 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量点进行网格无关性验证。当网格数为 580×10^4 与 671×10^4 时,两者的压力损失基本持平。为了兼顾计算精度和效率,最终选择 580×10^4 网格数进行数值模拟。

为了验证研究方法的可靠性,本文比较了 TM80 气体涡轮流量计在 $13 \sim 250 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内 11 个流量点的压力损失,如图3所示,这些流量点包含了国家计量检定标准的 4 个特征流量点,符合实际流量检测要求。由图3可知,在全量程范围内,流量计压力损失的模拟结果与实验结果十分吻合,误差控制在 $0\% \sim 6\%$,证实了所采用数

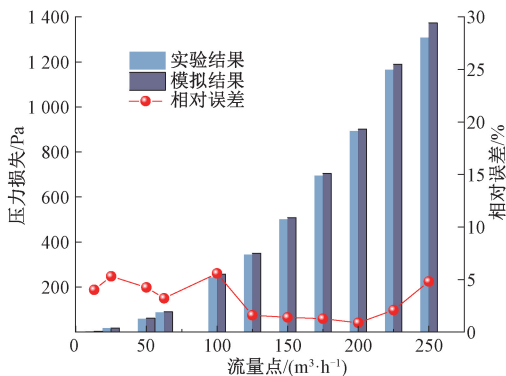


图3 流量计压力损失的实验测试与数值模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of experimental and numerical results of pressure loss

值模拟和实验测试方法的可靠性和准确性,为流量计的结构优化研究奠定基础。

3.2 流量计流场特征分析

首先对优化前流量计的内部流场特征进行数值研究,探索其结构优化方案。图 4(a)和(b)所示为 250 m³/h 流量点流量计内部气流的速度云图和压力云图。气体首先经过前整流器和前导流体整流,气流流速随着流道截面的减小而增大。在表芯支座处,流道截面进一步缩小,气流速度进一步增大,在表芯支座近壁面出现明显的负压区以及压力梯度骤变,干扰气流运动。

图 4(c)所示为叶轮及后导流体的压力分布,可见后导流体处也存在明显的负压区。图 4(d)所示为后导流体及其下游的流线图。由于边界层分离的出现,气流在后导流体下游出现明显的漩涡和回流,造成较大的能量损失。由流场特征分析可知,表芯支座和后导流体结构对流量计性能影响很大,可以通过优化表芯支座和后导流体结构达到提高流量计性能的目的。对表芯支座的优化可以从减小近壁面的压力梯度骤变和负压区的角度考虑;对后导流体的优化可以从减弱边界层分离,稳定流场、减少回流、缩小负压区和尾迹范围的方向思考。

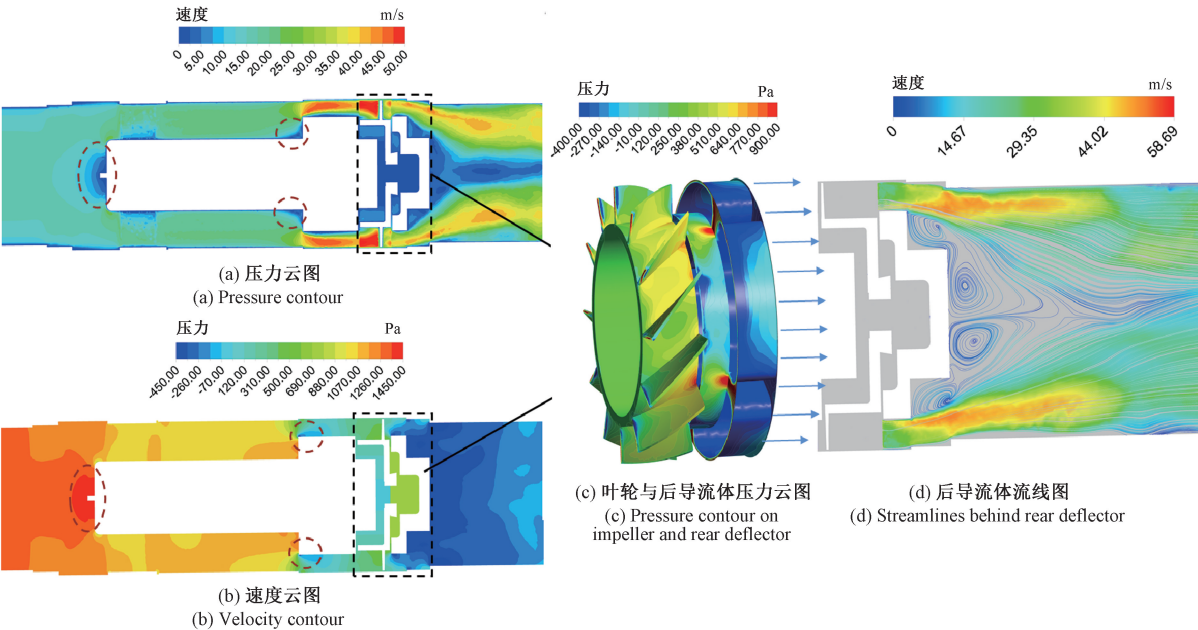


图 4 优化前流量计内部流场特征

Fig. 4 Flow field characteristics in the original gas turbine flowmeter

3.3 流量计结构优化

根据上述结构优化思路,提出了关于表芯支座和后导流体的结构优化方案:1)设想通过设计表芯支座坡度缓解气流运动的速度梯度骤变,消除负压区;2)设想对后导流体直径进行缩减,减轻边界层分离、削弱漩涡和回流。为此,选择了 5°、10°、15°和 20°这 4 个表芯支座坡度以及 60、62、64 和 66 mm 4 个后导流体直径来验证优化效果。优化前后表芯支座和后导流体的结构如图 5 所示。

运用数值方法研究了不同表芯支座坡度的流量计内部流场特征,如图 6 所示。由图 6 可知,当表芯支座坡度为 5°时,气流速度分布明显不对称,这会导致叶轮在旋转变过程受力不均匀,增加中心轴与轴承间的摩擦力,影响流量计的使用寿命。其中,标识椭圆形虚线部分为尾流形状,虚直线表示最大流速区域范围,即红色高速区。当坡度为 10°时尾流范围最大,当坡度为 20°时尾流范围最小。坡度在 10°和 15°时,流速大于 20 m/s 的区域范围

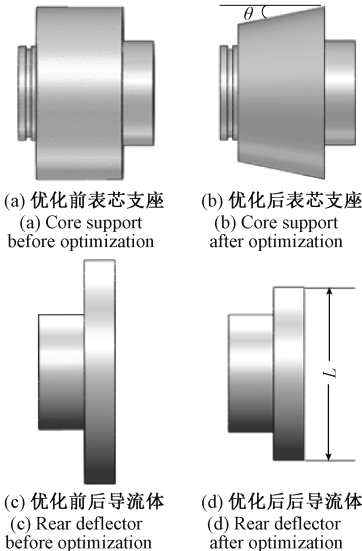


图 5 表芯支座与后导流体结构

Fig. 5 Structure of core support and rear deflector

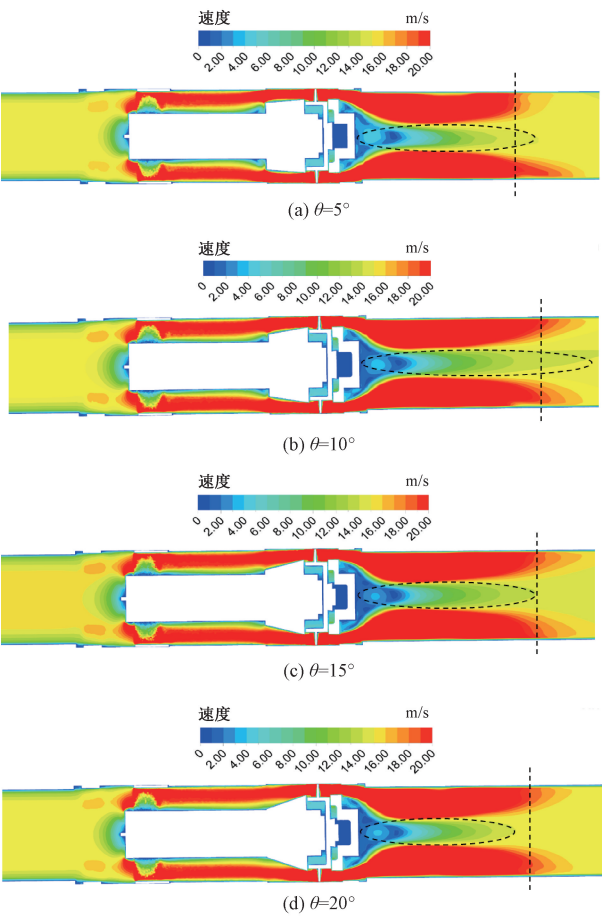


图 6 不同表芯支座坡度的速度云图

Fig. 6 Velocity contours at different angles of core support

最大,范围越大即表示驱动叶轮的速度越大、驱动力越强。从流场角度分析,坡度为 15°和 20°的表芯支座结构较为合适。

为了定量研究表芯支座坡度的优化效果,本文计算得到 250 m³/h 流量点各个坡度的流量计的压力损失、叶轮转速以及仪表系数等信息,如表 1 所示。结果表明,当表芯支座坡度为 15°时,流量计的压力损失最小,比未优化结构的压力损失减少了约 25%;此外,当坡度为 15°时,流量计的叶轮转速和仪表系数也最小,说明流量计工作时产生的能量损耗和磨损均最小。因此,选取坡度 15°作为表芯支座的最优结构。

表 1 表芯支座优化数值模拟结果

Table 1 Numerical simulation results of core support optimization

坡度/(°)	0	5	10	15	20
压力损失/Pa	1 369.2	1 118.2	1 043.9	1 024.9	1 043.7
叶轮转速/(r·min ⁻¹)	7 172	7 149	7 152	7 132	7 143
仪表系数/(m ⁻³)	3 442.6	3 431.5	3 433.0	3 423.4	3 428.5

后导流体直径的优化效果主要通过分析其附近的边界层厚度。250 m³/h 流量点后导流体的径向截面速度云图如图 7 所示。当后导流体直径为 66 和 64 mm 时,气流有旋运动较为剧烈,气流在通道处形成明显的速度梯度。在后导流体壁面附近存在速度为 0 的区域,该区域范围越小,表明边界层厚度越薄,更不易出现边界层分离现象。当后导流体的直径为 62 mm 时,该区域范围最小,边界层厚度最薄,边界层分离最弱。因此,选取直径 62 mm 作为后导流体的最优直径。

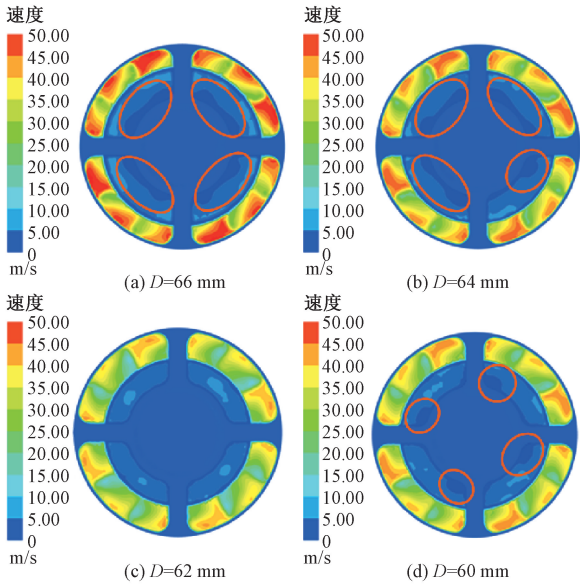


图 7 不同后导流体直径的速度截面云图

Fig. 7 Velocity contours at different diameter of rear deflector

3.4 流量计性能优化

为了评价流量计的结构优化对其性能的影响,本文通过数值模拟和实验测试,从流场特征、压力损失、仪表系数及线性度误差等方面进行性能评价。图 8(a)和(b)所示为表芯支座和后导流体结构优化后的流场特征。结果表明,表芯支座侧面的台阶流转变成渐缩流,后导流体侧面的台阶流变成等直径的管道流,该结构设计减弱了表芯支座和后导流体区域的负压,缓解了表芯支座近壁面的速度梯度骤变,尾迹区域也变得更加规则。图 8(c)所示为优化后的后导流体下游的流线分布。与优化前模型相比,后导流体下游流场混乱的问题得到明显改善,尾迹区域的范围减小,尾迹散耗造成的能量损失降低。这种优化思路对其他口径的气体涡轮流量计同样具有指导意义,即只要在表芯支座处将台阶流通过设计合适的坡度转变成渐缩流,将后导流体的直径设置成与叶轮轮毂直径一致,就可以有效提高流量计的性能。

图 9 所示为实验测试得到优化前后流量计的压力损失随体积流量变化的规律以及实验测试与数值模拟的相

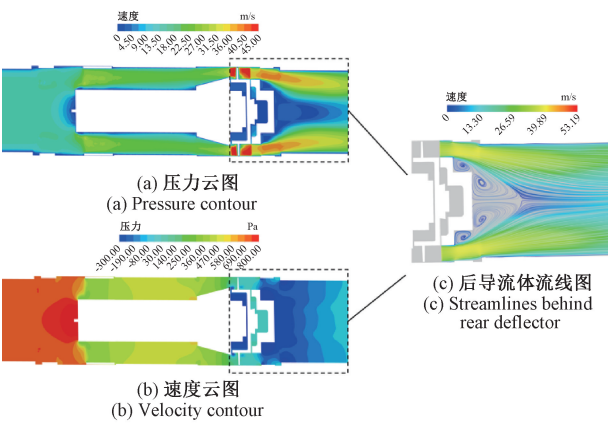


图8 优化后流量计内部流场特征
Fig.8 Flow field characteristics in optimized gas turbine flowmeter

对误差。随着流量的增大,所有模型的压力损失均呈明显上升趋势。结构优化后流量计的压力损失大大减小,数值结果与实验结果的变化趋势高度一致,全量程范围相对误差始终保持在6%内,表明优化结构可以显著降低流量计的压力损失,减少流量计使用过程的能耗,提高流量计的计量性能。

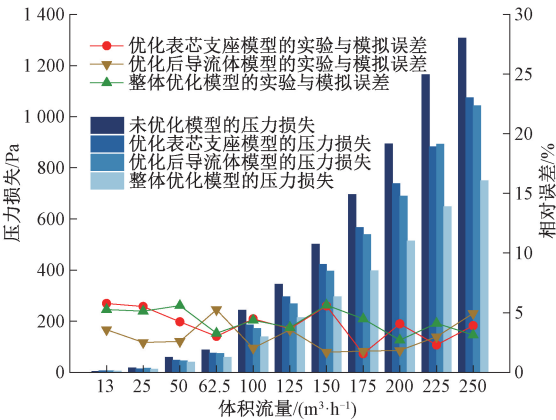


图9 不同流量计模型的压力损失随着流量的变化规律
Fig.9 Variation of pressure loss with flowrate in different flowmeter models

根据实验测试数据运用式(2)和(3)得到流量计的仪表系数,利用式(4)得到流量计的线性度误差。图10所示为仪表系数随体积流量变化的规律以及各种流量计模型的线性度误差。由图10可知,在13~50 m³/h的流量范围,由于受到流体阻力和机械阻力等因素的影响,各流量计模型的仪表系数有较大起伏。相对而言,整体优化模型在小流量计量中表现出较好的性能。在50~250 m³/h的大流量范围,4种模型的仪表系数均处于较稳定状态。尤其优化后3种模型的流量计仪表系

数更加稳定,线性度误差明显变小,这表明优化表芯支座和后导流体结构可以明显提高流量计计量的准确性和稳定性。

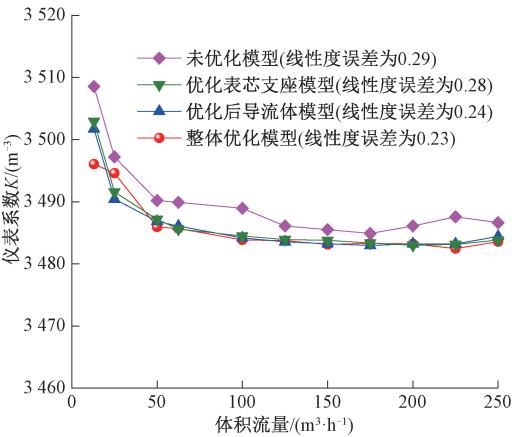


图10 结构优化前后流量计仪表系数和线性度误差的对比
Fig.10 Comparison of instrument coefficient and linearity error of the flowmeter before and after structural optimization

4 结 论

本文采用数值模拟与实验测试方法对TM80气体涡轮流量计进行了结构优化研究,得出如下结论。由表芯支座和后导流体结构引起的压力梯度骤变和边界层分离的出现是影响气体涡轮流量计性能的重要原因。表芯支座坡度设计为15°,后导流体直径设计为62 mm,可以明显缓解表芯支座近壁面的速度梯度骤变和负压区,减弱后导流体附近的边界层分离及其下游的漩涡和回流现象。优化结构可以显著降低流量计的压力损失,提高仪表系数的稳定性,减小流量计的线性度误差,证实优化结构可以显著提升流量计的计量性能。

参考文献

[1] 彭锋. 天然气流量计的介质压力对准确度的影响[J]. 上海计量测试, 2020, 47(6): 32-34.
PENG F. Influence of medium pressure on accuracy of natural gas flowmeter [J]. Shanghai Metrology & Measurement, 2020, 47(6): 32-34.
[2] 张晓宏. 气体涡轮流量计测量不确定度分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2016 (5): 42-44.
ZHANG X H. Measurement uncertainty analysis of gas turbine flowmeter [J]. Instrument Standardization and Metrology, 2016 (5): 42-44.
[3] 吴小川, 张陆军, 张军. 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. Analysis of causes of influence on metering stability of turbine flowmeter[J]. Gas & Heat, 2021, 41(2): 23-26.
- [4] PRISHCHEPOV S K, VLASKIN K I. A multifunction magnetometric turbine flowmeter [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2011, 54(6): 857-861.
- [5] 苗雪冬. 涡轮流量计流场特性与测量性能研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- MIAO X D. Study on flow field characteristics and measurement performance of turbine flowmeter [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.
- [6] 赵作广, 徐焰栋, 孙彩虹, 等. 气体涡轮流量计计量比对分析[J]. 工业计量, 2021, 31(4): 15-17.
- ZHAO Z G, XU Y D, SUN C H, et al. Comparison analysis of gas turbine flowmeter [J]. Industrial Metrology, 2021, 31(4): 15-17.
- [7] 刘正先, 徐莲环. 涡轮流量计前导流器的结构与性能[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 233-237.
- LIU ZH X, XU L H. Structure and performance of front oriented-body in turbine flowmeter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 233-237.
- [8] 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 front diversion body in gas turbine flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 550-557.
- [9] 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(12): 13-16.
- WANG J F, MENG H L. Experimental study on metering performance of new turbine flowmeter [J]. Metrology Science and Technology, 2019(12): 13-16.
- [10] 孙鹏飞, 徐鸿鹏, 李涛, 等. 大推力液体火箭发动机试验用涡轮流量计结构优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 74-84.
- SUN P F, XU H P, LI T, et al. Structure optimization design of turbine flowmeter for high thrust liquid rocket engine test [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 74-84.
- [11] 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 the pressure loss of a gas turbine flowmeter's flow channel[J]. Journal of China University of Metrology, 2015, 26(2): 134-139.
- [12] 邵家存, 严微微, 林景殿, 等. 气体涡轮流量计后导流体结构优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 46-53.
- SHAO J C, YAN W W, LIN J D, et al. Structure optimization design of rear guide body of gas turbine flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 46-53.
- [13] 王智威, 严微微, 肖云巩, 等. 气体涡轮流量计性能优化的模拟与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 28-34.
- WANG ZH W, YAN W W, XIAO Y G, et al. Simulation and experimental study on performance optimization of gas turbine flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 28-34.
- [14] GUO S N, YANG Z H, YAN Z. Analysis of blade structure impact on turbine flow sensor performance[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2021, 81: 102011.
- [15] 陈赏顺, 金岚, 王函滔. 前直管段对气体涡轮流量计的影响[J]. 计量技术, 2014 (6): 38-39.
- CHEN SH SH, JIN L, WANG H T. Influence of front straight section on gas turbine flowmeter[J]. Metrology Technology, 2014 (6): 38-39.
- [16] 廖启良. 涡轮流量计产品概述和应用[J]. 中国化工贸易, 2014, 6(14): 97.
- LIAO Q L. Product overview and application of turbine flowmeter[J]. China Chemical Trade, 2014, 6(14): 97.
- [17] GU Y F, ZHAO Y, LV R Q, et al. Theory and structure of a modified optical fiber turbine flowmeter[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2016, 50: 178-184.
- [18] 沈方容. 重视流量计压损向每个流量点要效益[J]. 能源计量技术, 2011(7): 118-119.
- SHEN F R. Pay Attention to the pressure loss of flowmeter and seek benefits from each measuring-point[J]. China Metrology, 2011(7): 118-119.
- [19] ZIJAD D, BRANE S, BENJAMIN B. Turbine flowmeter response to transitional flow regimes [J]. Flow

Measurement & Instrumentation, 2018, 59: 18-22.

[20] SABOOHI Z, SORKHKHAH S, SHAKERI H. Developing a model for prediction of helical turbine flowmeter performance using CFD [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2015, 42: 47-57.

作者简介



李旭阳,2021 年于安徽工业大学获得学士学位,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: 1427932612@ qq. com

Li Xuyang received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research 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,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, M. Sc. degree from Zhejiang Normal University in 2007, and Ph. D. degree from The Hong Kong Polytechnic University in 2011. She is currently a professor at China Jiliang University. Her main research interests include flow measurement, multiphase flow and so on.