

多流束水表设计中的CFD应用

蒋京铭

三川智慧·温岭甬岭水表有限公司 浙江温岭 317500

摘要: 多流束水表的应用是一个复杂的流体流动过程,其流动特性受多个因素的影响。通过多流束水表的设计,可以使各个流束流量分配均匀,避免局部压力过高或过低的现象。在实际应用中,由于流场的复杂性和多变性,使对多流束水表的研究变得十分困难,因而多流束水表设计过程中必须借助计算流体力学(CFD)技术来解决流量分配不均匀性问题。

关键词: 多流束水表设计; CFD模块; 力学理论; 应用方式

CFD Application in multi-Stream water Meter Design

Jingming Jiang

Sanchuan Wisdom · Wenling Yongling Water Meter Co., LTD., Wenling, Zhejiang 317500

Abstract: The application of multi-beam water meter is a complicated fluid flow process, and its flow characteristics are affected by many factors. Through the design of multi-beam water meter, the flow of each beam can be evenly distributed, and the phenomenon of local pressure is too high or too low can be avoided. In practice, because of the complexity and variability of the flow field, it is very difficult to study the multi-beam water meter, so computational fluid dynamics (CFD) technology must be used to solve the problem of uneven flow distribution in the design process of multi-beam water meter.

Keywords: Multi-stream water meter design; CFD module; Mechanical theory; Application mode

引言

多流束水表是一种集超声波、涡轮等多种测量技术于一体的新型智能水表,在不同流量下具有不同的测量精度,并可实现高精度计量,目前已广泛应用于自来水公司和油田等单位。基于Solidworks三维软件的多流束水表设计方案,并将其导入ANSYS有限元软件进行流体动力学仿真分析,通过CFD软件仿真得出不同流量下的流场分布情况。同时对不同流量下水表的压损分布、流速分布进行了对比分析。结果表明,使用CFD软件对多流束水表进行流体动力学仿真分析是可行的,本文所介绍的设计方法可以为多流束水表的设计提供参考。

1 CFD的概念

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)是用计算机求解流体力学问题的一种计算方法,它是随着计算机技术的发展而发展起来的。计算流体力学是近代物理中最活跃的研究领域之一,其目的在于把有关流体动力学问题转化为计算机可以处理的形式。它是应用数学、物理学、工程科学和计算机科学等学科中关于流体力学基本原理和方法所建立起来的一门应用学科,它研究的

是运动中的流体在流场所发生的物理现象,通过对这些物理现象进行数值模拟来揭示其中流动机理,从而为人们提供有关流动规律、流动稳定性和流动控制等方面的理论依据。它可以广泛应用于计算流体力学、计算传热学、空气动力学、燃烧和燃烧产物分析、水处理技术、工程设计和实验研究等众多领域。在多流束水表设计领域中,基于CFD技术,通过建立流体与几何模型,对多流束水表进行数值模拟分析,并对多流束水表内部流场特性和水表性能进行分析。可以看出多流束水表内部流动是一种三维、非定常、湍流流动,其内部流场压力分布不均匀,而CFD技术在多流束水表设计领域中的应用可以为多流束水表的设计提供有力支持。

2 多流束水表的功能

多流束水表是指多个单流束水表在同一条管道内串联使用的水表。多流束水表的工作原理是:流体经过多个单流束水表后,在阀门处开始分流,分流的流体在阀门处汇合,然后又分流,依此类推。由于在多个单流束水表之间有若干个阀门,因此通过阀门可以把多个单流束水表串联起来。多流束水表的流量特性可由单流束水表的流量特

性曲线求得。由于多流束表中各单流束水表的流量特性不同，因此流量特性曲线中各节点的流量是不同的。多流束水表的量程比为1:3，而单流束水表的量程比为1:10。多流束水表只需在一条管道内安装一台多流束表即可实现流量测量。多流束水表在设计 and 安装时必须考虑两个问题：一是管道内介质的温度对流量测量精度的影响；二是在设计管道时要考虑多个单流束水表之间流量特性不同。多流束表通常有三种安装方式：一是装在阀门处；二是装在管道内；三是装在管道上。多流束表在使用时必须注意以下几点：一是要选择合适的安装位置；二是要保证管内介质不流动，以免影响测量精度；三是要注意尽量减少多流束表之间的流量差异。

3 CFD软件在流体流动分析的基础建模中的应用

3.1 流体力学基本方程

控制方程包括：连续性方程、能量方程、动量方程。数值求解方法：有限体积法（FVM）、有限元方法（FEM）等。数值模拟步骤：首先根据需要计算的区域生成网格；对于不可压缩流体，需要先确定控制方程，再选择合适的数值格式；设定求解变量（时间步长、网格参数等）；进行数值模拟，通过改变边界条件和初始条件，得出不同的模拟结果；分析不同结果的优劣，作出合理的结论，最终得出最佳的结果。在流体力学基本方程组中， ρ 为流体密度； p 为压力； p_0 为流体静压力； η_p 为粘性系数； k 和 V 分别为流体的密度和速度。其中， $V(t)$ 、 $E(v)$ 、 $\eta_p(t)$ 和 $\eta_p(v)$ 分别表示时间、空间和动量通量。各基本方程之间是相互关联的，对其进行求解必须通过有限元方法进行。

3.2 控制方程

CFD求解流体运动的控制方程，主要是时间推进方程和压力—速度耦合方程。时间推进方程：对于定常的流体流动，根据流动的物理性质和边界条件，将连续相的运动过程分为两部分，一是由固定边界条件引起的连续性变化过程；二是由流函数或紊动方程引起的非连续变化过程。在这两部分中，分别采用质量守恒、动量守恒和能量守恒三种基本守恒方程。控制方程中的能量项可用雷诺应力（RSM）来描述。压力—速度耦合方程：对于非定常流动，压力与速度之间是相互影响和作用的。因此，在CFD中要同时考虑这两种变量，并以相应的速度来描述。流体运动的控制方程是三维的，即可以用连续性方程、动量方程、能量方程表示。这是一组二阶的偏微分方程，是用数值方法求解的，可以通过有限差分法、有限元法或有限体积法求解。这三种方法中，有限差分法是一种半解析、半数值的方法，它只在一维的流动中有较好的效果，而且对网格有很高的要求。有限元法也可用于三维流动中，但是计算量比较大。所以在多流束水表设计中，更多地采用有限体

积法和有限差分法。用CFD求解流体运动控制方程时，需将控制方程转化为可计算问题。具体方法有：用有限体积法将控制方程转化为一系列具有有限个局部网格和有限个单元的代数方程组；通过求解代数方程组得到流体的流动参数、速度场和压力场，并通过计算得到的数据进行数值模拟计算；根据物理模型对控制方程进行离散化处理，即把连续方程和运动微分方程离散化为时间域上的线性代数方程组；将离散后的方程组求解，得到数值解。数值解是通过计算获得的数值结果与理论解进行比较而得到的。

3.3 湍流模型

计算流体力学（CFD）是通过计算机来模拟流体流动过程中的物理现象，是一种以计算机为工具对流体运动规律进行数值模拟的方法。在CFD软件中，其主要功能包括：流场模拟、流场分析；流动显示、流动参数采集、压力与温度采集；模型控制、数据存储；流体力学计算分析。其中湍流模型是CFD软件中的一个重要组成部分，它直接影响计算结果的精确度和准确性。湍流是流体在运动过程中的一种特殊状态，它具有周期性、不连续、不可压缩性和不可预测性等特点。湍流的形成主要取决于流体的密度差和剪切力，因此湍流可以用两种模型来模拟，即标准 $k-\epsilon$ 模型和RNG $k-\epsilon$ 模型。在多流束水表的设计中，涉及湍流的计算，这是一个复杂的问题，通常使用湍流模型来求解。为了简化计算过程，可采用 $k-\epsilon$ 两方程模型来代替RANS模型。

3.4 边界条件

采用计算机辅助设计技术可通过数值模拟方法模拟流体在封闭管道内的流动情况，进而预测和优化管道内流体的流动状态。当对多个流束水表进行设计时，为了确定每一流束内部的流动状态，在CFD软件中可以设定多个流束水表在不同工况下的边界条件，当设置好这些边界条件之后，就可以通过CFD软件进行模拟计算。通过CFD软件计算出每一流束内部的流动速度和压力分布，进而判断出每一流束内各个部件的工作状态是否正常，同时也可以了解到各个部件之间的流动是否合理，从而达到优化整个水表内部结构的目的。CFD软件可以在一定程度上提高设计效率和设计质量。由于多流束水表的计算需要考虑管内流动，因此管内流动边界条件必须满足以下条件：流体在管道中的流速大于零，且各流束流速相等；流体压力等于管道内压力；流体在管道中的流动方向与管道轴线平行；管内流体为不可压缩流体；流动过程中，各流束内压力、速度相等，且流速方向相同；各流束内的压力、速度均为定值，不可压缩流体的密度为定值；管内流体为稳态流动，且各流束内的压力、速度均相等。

3.5 网格生成技术

网格生成是多流束水表设计的重要内容之一，网格质

量的好坏直接影响到计算结果的准确性和可靠性。多流束水表设计中,常用的是基于物理的网格生成方法,主要是在UG中通过Solid Works软件生成网格,然后再将其导入到Navier-Stokes软件中进行数值计算。这种方法比较简单,但是建模过程中可能会出现数据量过大,或者是难以控制等问题。所以一般不建议进行此种方法。当需要对多个流束进行数值计算时,可以使用几何方法。这种方法通常是基于特征的,也就是说在进行数值计算前需要先对流束进行划分,然后再利用特征工具来构建网格。它是基于流体力学理论和相关几何特征来进行网格划分和建模的,主要是针对某些流束进行划分,然后再利用Solid Works软件对其进行数值计算。由于目前常用的多流束水表设计软件均为商业软件,其自带的网格库中通常会包括已有的结构化、非结构化和点云模型,这些模型是建立在实际应用的基础上,且大多已经过实践验证,其质量较高,因此使用这类网格可以满足大部分多流束水表设计中的网格需求。

4 优化设计中的仿真与分析

4.1 水表的结构设计

多流束水表通常由涡轮、超声波、电磁流量计、信号处理单元等组成。其中,涡轮采用电磁感应原理,工作时利用线圈产生磁场,将流经涡轮的水流导向叶轮,在叶轮两侧的流体产生压差,当流经涡轮的水流越大,压差越大;涡轮叶轮通过机械传动作用于叶片,叶片推动水流以一定的速度转动,同时带动指针和显示器转动。超声波信号由超声波换能器采集并传输到信号处理单元进行处理后将流量信息反馈给显示终端。电磁流量计主要测量管道中的流体流动情况,并将其转化为电信号传输给信号处理单元。信号处理单元对电信号进行处理,转换为脉冲形式输出。该水表可以在一定范围内测量水流量,并能进行高精度计量。

4.2 数学模型

流场是流体的运动,在流体运动的基本方程式中, F 为流体静压; ρ 为流体密度; h 为流速; u 为流体运动速度; v_p 为压力; q 为速度。由于流束内流体运动的复杂性,只采用一种方程并不能完全描述整个流场,通常采用两种或者两种以上方程来描述流场。两种或者两种以上的方程一般是通过对时间步长、压力步长和粘性系数的限制来实现的,在模型中采用控制容积法来模拟流束内的流动情况。这些方程一般采用欧拉、拉格朗日、欧拉-拉格朗日法。当采用欧拉方法时,可以用速度矢量,即用速度矢量场;当采用拉格朗日方法时,可以用动量方程代替质量守恒方程。这里主要介绍拉格朗日方法,该方法是通过求解流体力学基本控制方程来描述流体的运动,它属于非常的数值模拟方法。

4.3 有限元仿真及试验验证

本文使用的是基于Solidworks的三维建模和流体动力学仿真分析方法,仿真结果可直接使用,便于在生产中及时发现并进行修改。仿真结果显示,在最大流量为 $5.24\text{m}^3/\text{h}$ 时,水表各流束的压损和流速分布均匀设计要求一致,最大压损为 $0.357\text{Pa}/\text{m}$,最大流速为 $10.16\text{m}/\text{s}$,符合设计要求。多流束水表的性能试验验证采用了相同的试验装置和测量方法,对水表在不同流量下的流速值进行了测试,从测试结果中可以看出:在最大流量 $5.24\text{m}^3/\text{h}$ 时,水表各流束的压损均在 0.016MPa 以下,流速在 $0.357\text{Pa}/\text{m}$ 以下;而在最小流量 $3.24\text{m}^3/\text{h}$ 时,各流束的压损均在 0.012MPa 以下。

4.4 流场仿真结论

多流束水表的压损主要来自叶轮对流体的冲击作用,当流量一定时,叶轮的尺寸越大,对流体的冲击作用就越大,使得水表压损越大。所以在设计中应该尽量减少叶轮尺寸;多流束水表的流速随流量变化而变化,在设计时应综合考虑这两个因素,以提高水表的测量精度;多流束水表的流束结构要尽量简单,以减少流动阻力,并尽量降低表内压降,防止涡流和流体自激振荡等现象的发生;多流束水表采用的是涡轮流量计测量流量,在设计中应根据流量计本身所允许的最大压差确定涡轮叶轮直径;本文所介绍的多流束水表设计方法可以为多流束水表提供设计参考,但是由于多流束水表结构复杂、流量测量范围宽等特点,其流体动力学仿真分析还需要进一步深入研究。

5 结语

由于受到模型、求解方法和网格划分等多种因素的限制,特别是单个水表和数值模型之间存在差异,导致计算结果与真实数据存在很大差异,无法准确评价,但仍可为水表的设计提供一定的参考依据。以理想流体为基础,通过对多流束水表的流态分析,提出一种简便、快速、精确的计算方法,并将CFD仿真技术引入到多流束水表的设计中,对多流束水表的工作状态进行仿真,这将使新产品的试制和重复设计的次数大幅度减少,使新产品的开发周期大幅度缩短,生产成本大幅度下降,并增强其在市场上的竞争能力。

参考文献:

- [1] 罗安华. 基于CFD的双声路超声水表研究[J]. 计量与测试技术, 2022(02): 7.
- [2] 郑玉斌. 关于几个水表术语的理解[J]. 中国计量, 2022(11): 3-5.
- [3] 姚灵, 王欣欣. 超声水表声道布置与权重系数设置方法的讨论[J]. 仪表技术, 2023(01): 90.