

文章编号: 2095-2163(2020)05-0109-06

中图分类号: TP391

文献标志码: A

R型弯管流动的数值模拟分析

马影, 孙乐萌

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 通过建模和计算流体力学, 研究了弯管内流场分布、压力分布、速度分布等规律, 利用前处理工具 ICEM 对其进行网格划分, 应用商业软件 FLUENT 对本案例进行计算, 使用后处理软件 TECPLOT 绘制压力云图、速度云图和流线图。本文重点分析了不同雷诺数 Re 情况下的弯管中流场流动特点, 通过对分离点、回流点的分析, 得到了回流长度值。通过 $Re = 50, 100, 150, 200$ 时的回流长度值, 预测出雷诺数与回流长度的数学模型。

关键词: 计算流体力学; FLUENT; 雷诺数; 回流长度

Numerical simulation and analysis of flow in r-type bends

MA Ying, SUN Lemeng

(School of Air Transport, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Abstract Through modeling and computational fluid dynamics, the law of flow field distribution, pressure distribution, velocity distribution in the elbow is studied, the pre-processing tool ICEM is used to mesh it, the commercial software FLUENT is used to calculate this case, and the post-processing software is used TECPLOT draws pressure cloud diagram, velocity cloud diagram and streamline diagram. The focus is on the flow characteristics of the flow field in the elbow under different Reynolds numbers Re , and the return length value is obtained by analyzing the separation point and the return point. Through the recirculation length value when $Re = 50, 100, 150, 200$, the mathematical model of Reynolds number and recirculation length is predicted

[Key words] Computational fluid dynamics; FLUENT; Reynolds number; Reflux length

0 引言

弯管管道广泛存在于工业设备中, 例如液压系统、阀门等, 流体经过这些弯管时会发生流动分离, 引起漩涡, 从而引起压降和能量损失, 在回流区也可能产生杂质沉降现象; 此外, 在拐角处往往会发生冲蚀现象, 影响管道使用寿命。因此对于弯管流动的准确预测有助于对管道的优化设计和质量把控。

一般可采取实验或者数值模拟的方法对弯管流场进行分析, 主要涉及到流场的速度分布、压力分布、回流区大小和分离点等特征。随着计算机的高速发展, 计算流体动力学 (CFD) 方法的高效、准确和低成本较实验手段有巨大优势^[1]。本文将 CFD 方法对弯管流道进行流动分析, 以期获取可信的流场信息及流动规律。

1 方法

1.1 结构建模

如图 1 为一典型的 R 型弯曲流道, 左侧为其三维视图, 右侧横截面均为全等的 R 型弯曲流道。流体经由入口流入, 经过弯道后从出口流出, 由于垂直

于流动方向的管道长度相较于流动路径很长, 因此该三维问题可以简化成二维流动问题。只需对图 1 中右侧所示平面几何进行流动分析, 其结果可以代表三维流场中的主要信息。

由于流动雷诺数的变化会导致出口流动状态的改变, 为了保证在出口处使流动得到充分发展, 随着雷诺数的增大, 适当加大拐角后的流道长度, 具体几何流场尺寸见图 2。可见雷诺数越大, 赋予 V_2 的值越大, 其余尺寸不作改变。

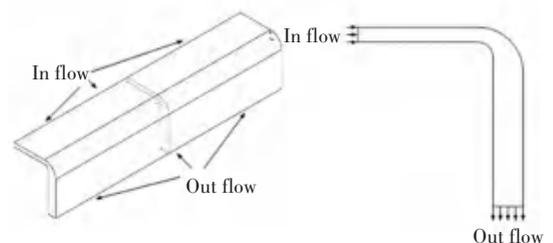


图 1 二维剖面图

Fig. 1 Two-dimensional cross-sectional view

作者简介: 马影 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 蛇形机械臂轨迹规划; 孙乐萌 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实在飞机维修中的应用。

收稿日期: 2019-09-03

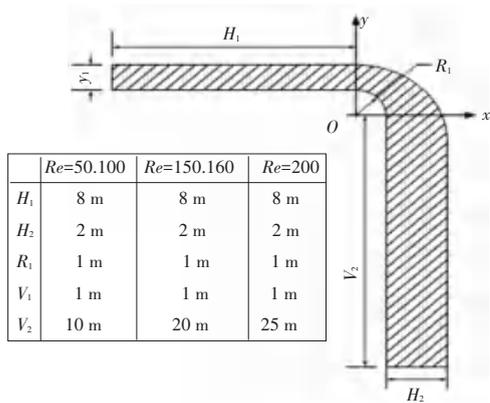


图 2 二维流场

Fig. 2 Two-dimensional flow field

1.2 网格划分

在流体力学问题中,流场信息可以通过求解关于流体微团的控制方程得到,对于不可压缩粘性流体建立了 N-S 方程。但对于复杂的外形,直接求解该方程是困难的,因此需要对该方程进行离散处理,寻求数值解。一般通过对空间的离散处理,即以网格的形式对稳态流场进行求解。目前的离散方式主要有:有限体积法、有限差分法和有限元法^[2]。目前,ANSYS CFX、ANSYS FLUENT 和 OpenFOAM 等都是采用的有限体积法。本文采取 ICEM 对计算域进行网格划分,由于是二维问题且流场区域较规范,故全流域均以四边形网格进行填充。图 3 展示了 Re = 100 对应几何的以 0.2m 作为最大单元尺寸划分的局部流场网格,网格单元总数为 1090,以长细比和扭曲度为评判标准的网格质量分别在 0.483 和 0.527 以上,网格质量较高。

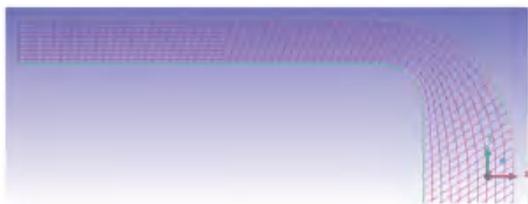


图 3 最大单元尺寸 0.2m 处的域网格划分

Fig. 3 Domain meshing at the maximum element size of 0.2m

1.3 模型设置

本文解决的是不可压缩粘性流体的数值求解,该类问题的控制方程(1)~(3)如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \tag{2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}. \tag{3}$$

其中: p 为流场的无量纲压力, Re 为雷诺数, ν 为运动粘度。式(1)连续性方程,反映了流体质量守恒,式(2)和(3)为动量方程,反映了流体动量守恒。雷诺数 Re 定义为公式(4):

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}. \tag{4}$$

其中: L 为参考长度, U 为参考速度, $\mu = \rho \cdot \nu$, 称为动力粘度。求解时,设定流体密度 ρ 为 1 kg/m^3 , 参考长度 L 为 1 m , 入口处速度为 1 m/s , 方向沿 x 轴, 且入口处压力设为 1 个大气压; 两壁面边界均为无滑移壁面; 出口为压力出口, 表压为零。由式(4)可知, 当雷诺数 Re 为 100 时, 动力粘度 μ 应取为 $0.01 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。关于 $Re = 100$ 时, 计算域的边界命名及边界条件设置情况, 如图 4 所示。对于管道内流而言, 该雷诺数处于层流区间, 因此流动模型为 Laminar, 不考虑流体的传热效应, 流体特性及流动模型的设置见表 1。采取 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合求解, 压力项为二阶格式, 动量项为二阶迎风格式, 求解方法设置如见表 2。

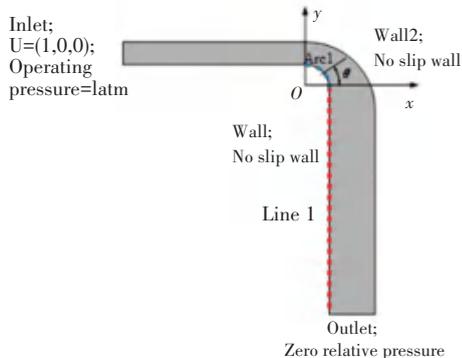


图 4 流体域边界条件设置

Fig. 4 Setting of boundary conditions of fluid domain

表 1 流体域的材料特性

Tab. 1 Material properties of fluid domain

Dynamic viscosity, μ	Density, ρ	Reference length, L	Flow model	Energy model
0.01 kg/m · s	1 kg/m ³	1 m	Laminar	None

表 2 求解方法

Tab. 2 Solution method

Pressure-velocity scheme	Spatial discretization of pressure	Spatial discretization of momentum
SIMPLE	Second order	Second order upwind

2 结果和讨论

2.1 雷诺数 $Re = 100$

由上述所给边界条件, 设置连续项和速度残差为 10^{-6} , 计算得到了 $Re = 100$ 时管道内的静压云

图、速度云图、速度流线图、Line1 和 Arc1 上静压关于纵坐标的梯度变化。

(1) 静压云图。从图 5 可知,最大静压出现在入口处。在水平阶段,随着流动发展,静压逐渐降低;当流动到达 Wall1 拐角处时,静压降至最低;此后流动继续发展,静压又逐步升高,最后达到稳定状态。另外,当静压梯度由正变为负时,说明发生了分离流动,即图 5 中标点所示位置。Arc1 上静压关于纵坐标的梯度曲线如图 6 所示,说明在 Arc1 上 $\theta = 1.090(62.5^\circ)$ 处发生分离。

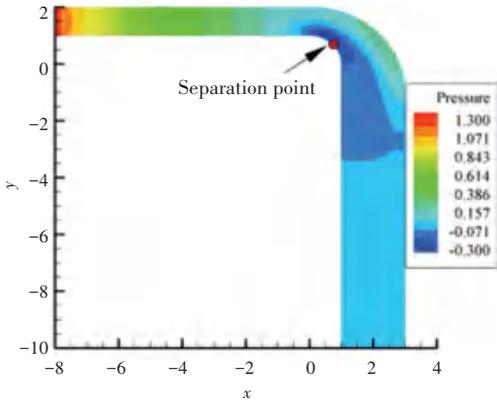


图 5 $Re = 100$ 的静压云图

Fig. 5 Static pressure cloud diagram with $Re = 100$

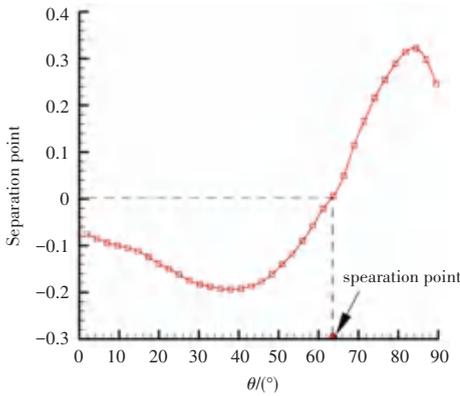


图 6 静压梯度曲线

Fig. 6 Static pressure gradient curve

(2) 速度云图与速度流线图。如图 7 所示,随着流动发展,流体速度先增加再减小;处于管道中部的流体速度高于靠近管道壁面的速度,速度最大值出现在管道 1/2 径向处,这是由于流的粘性效应,使得贴近壁面处的流体速度为零。因此,随着与壁面的距离增大,流体速度相应的增大,在距离壁面最远处即 1/2 径向处,流体速度达到最大;从图 8 可知,在出口附近处的流线已没有回流现象发生,结合速度和静压云图,可以确定在出口处的流动已经充分发展。

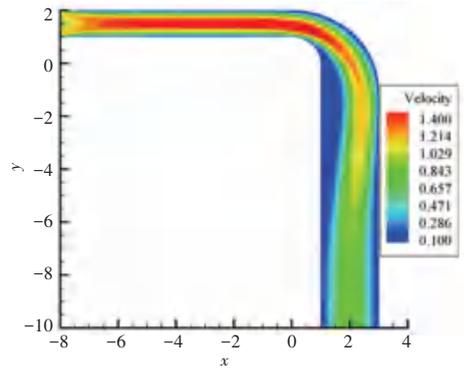


图 7 $Re = 100$ 的速度云图

Fig. 7 Speed cloud diagram with $Re = 100$

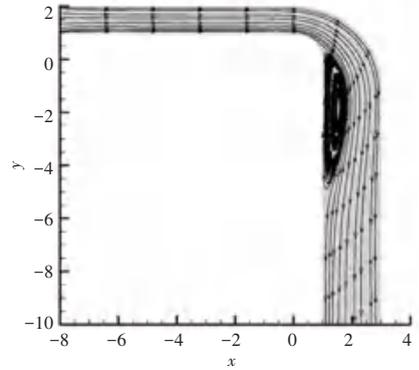


图 8 $Re = 100$ 的速度流线图

Fig. 8 Speed streamline diagram of $Re = 100$

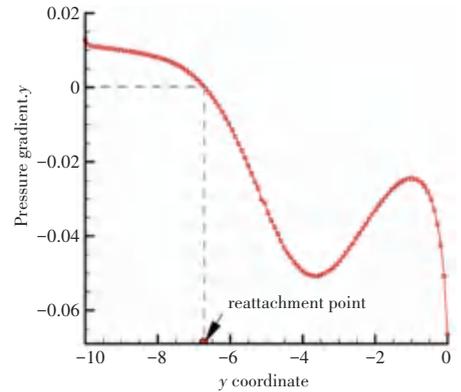


图 9 Line1 上静压关于 y 轴的梯度变化

Fig. 9 The gradient of static pressure on Line1 with respect to the y-axis

(3) 静压关于纵坐标的梯度变化。回流点处于静压梯度由负变为正,即如图 9 表点所示。回流区域包含如图 8 的螺旋流线,回流长度 L_{reatt} 为分离点处弧长与回流点坐标值的绝对值之和,即公式(5):

$$L_{reatt} = R1 \cdot \theta_{separ} + |y_{reatt}| \tag{5}$$

式中, θ_{separ} 为分离点对应的弧度, y_{reatt} 为回流点对应的纵坐标。因此, $Re = 100$ 对应的回流长度为 $1.090 + 6.693 = 6.783$ m。

2.2 网格独立性试验 (仅适用于 $Re = 100$ 模型)

在正式计算之前,需要排除网格因素对结果的

影响,即要进行网格独立性分析。针对 $Re = 100$ 时的管道流动,建立了 5 种类型的网格,分别是 coarse, medium, fine, extra_fine, super_fine。他们的区别是最大网格尺寸不同,即代表了 5 种不同的网格密度;就 aspect ratio 和 skewness 而言,这 5 种网格的质量处于同一水平;网格具体信息见表 3。图 10 中对比了由不同密度的网格计算得到的回流长度,通过左纵坐标可以发现 extra_fine 与 super_fine 网格计算结果几乎一致,右纵坐标显示了不同网格的计算迭代步数变化,super_fine 网格的迭代步数几乎是 extra_fine 的 3 倍,为了兼顾计算精确度和计算效率,将采用 extra_fine 类网格进行后续的计算。比较了 5 种不同网格类型下长宽比 (Aspect ratio) 和偏度 (Skewness) 的值,如图 11 所示,随着网格密度的增加,分离点和回流点的位置均逐渐趋于稳定。

表 3 $Re = 100$ 情况下五个网格的信息比较

Tab. 3 Information comparison of five grids under $Re = 100$

Level	Max size of meshes (m)	Aspect ratio (\geq)	Skewness (\geq)	Total number of mesh elements
coarse	0.4	0.485	0.550	275
medium	0.2	0.483	0.527	1090
fine	0.1	0.488	0.515	4360
extra_fine	0.05	0.487	0.513	17400
super_fine	0.025	0.485	0.507	69520

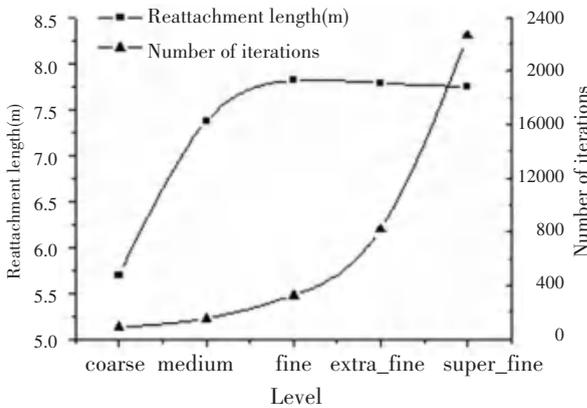


图 10 $Re = 100$ 情况下 L_{reatt} 的迭代次数和网格独立性测试

Fig. 10 The number of iterations and grid independence test under $Re = 100$

2.3 回流区尺寸相对于雷诺数的变化

讨论不同雷诺数对回流区域的影响。首先要保证当雷诺数增大时,管道几何要保证在出口处的流动是充分发展的。通过观察不同雷诺数下管道内的静压云图、流线图和速度云图等变化,判断经过拐角后的流动到出口附近时是否已经得到充分发展。如

图 12 所示,不同雷诺数下,压力分布不同,在同一标准图例下可以得到以下几条结论:

- (1) 随着雷诺数的增大入口处的压力逐渐降低;
- (2) 雷诺数越大,拐角分离点处的角度越大;
- (3) 分离点随雷诺数增加而越来越接近;
- (4) 出口处附近的压力分布均已平稳。

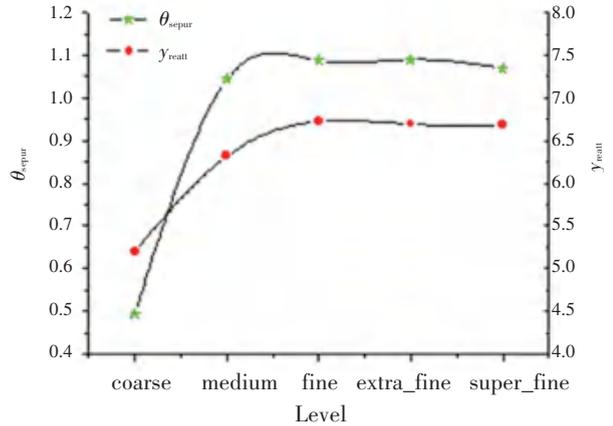


图 11 $Re = 100$ 情况下 θ_{separ} 和 y_{reatt} 的网格独立性试验

Fig. 11 Grid independence test of sum under $Re = 100$

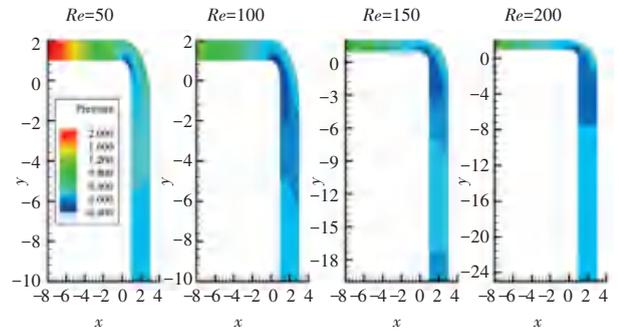


图 12 $Re = 50, 100, 150, 200$ 情况下分别的压力云图

Fig. 12 Pressure cloud diagrams when $Re = 50, 100, 150, 200$

此外,还对比了不同雷诺数下的速度云图,如图 13 所示,可以得到以下结论:(1) 随着雷诺数的增大,速度场中能达到最高速度的区域越大;(2) 出口附近区域的流动速度分布已经稳定。

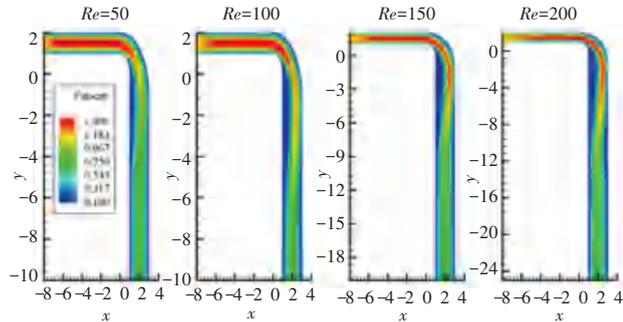


图 13 $Re = 50, 100, 150, 200$ 情况下分别的速度云图

Fig. 13 Velocity cloud diagrams when $Re = 50, 100, 150, 200$

最后,对比了不同雷诺数下的流线图,如图 14 所示,发生回流的区域随雷诺数增大而增大,可以清

晰地看到,在出口附近的流线已均匀分布,达到稳定状态。结合压力云图和速度云图,可知本文选区的随雷诺数变化而变化的几何可以满足在出口处达到稳定流动的要求。

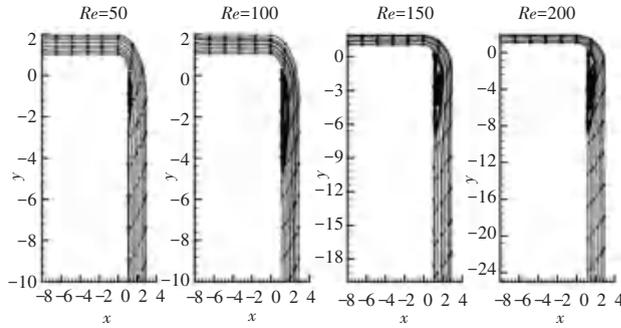


图 14 Re=50,100,150,200 的流线图

Fig. 14 Streamline diagram of Re=50,100,150,200

为了比较不同雷诺数下的回流长度,将四组分离点和四组回流点随雷诺数的变化曲线分别放到了同一张图里。图 15 显示的是四组雷诺数下的分离点对比图。可见,当 Re=50 时,分离点所处的角度最小,即最靠近 Line1; Re=100,150,200 时,对应的分离点很接近,可以认为几乎不发生变化,大约都在 64°附近; Re=150,200 时,流动分离前,压力梯度会出现震荡,说明此处的流动情况较为复杂,如果要得到分离前的流场详细信息,可以在该处进行网格加密。图 16 是回流点的对比图,可知随着雷诺数的增大,回流点越靠近出口;且当 Re=100,150,200 时,在回流发生之前,压力梯度均有类似的震荡现象出现,说明在该区域的流动较为复杂;回流发生后,压力梯度均不再有明显变化。结合式(5)可得到回流长度随雷诺数的变化曲线,如图 17 所示,回流长度随雷诺数增加而增加。

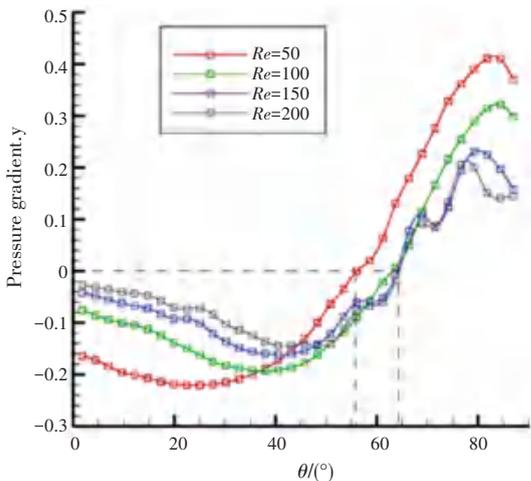


图 15 Re=50,100,150,200 的分离点对比

Fig. 15 Comparison of separation points with Re=50,100,150,200

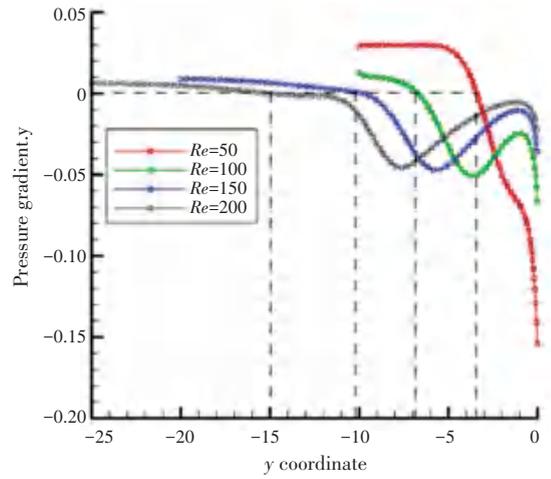


图 16 Re=50,100,150,200 的回流点对比

Fig. 16 Comparison of reflow points with Re=50, 100, 150, 200

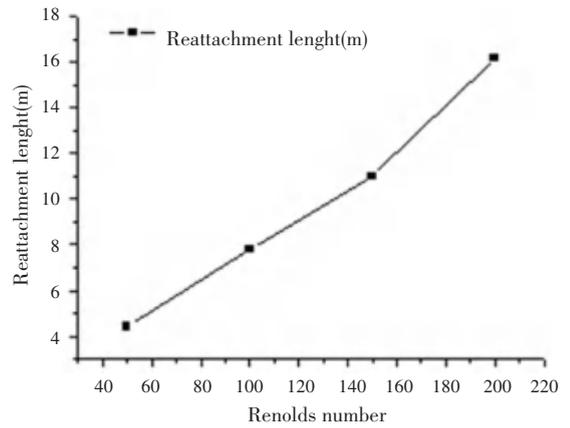


图 17 回流长度随雷诺数的变化

Fig. 17 Variation of backflow length with Reynolds number

2.4 利用 CFD 模拟结果导出预测数学模型

四组不同雷诺数下的回流长度,具体取值如表 4 所示。

表 4 四组回流长度值

Tab. 4 Four groups of return length values

Reynolds number	50	100	150	200
Reattachment length (m)	4.409	7.783	10.991	16.156

假设这四组值具有三次函数关系,即以雷诺数为自变量,以回流长度为因变量,可设该函数关系为式(6):

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \quad (6)$$

其中, $a_i (i=0,1,2,3)$ 为未知系数, x 代表雷诺数, $f(x)$ 代表回流长度。经过简单的三次函数拟合后得到的各系数为:

$$a_0 = -1.26654,$$

$$a_1 = 0.1503,$$

$$a_2 = -8.824E-4,$$

$$a_3 = 2.83067E-6.$$