

流量计应用指南

# 质量流量计

肖素琴 韩厚义 主编

中国石化出版社

流量计应用指南

# 质量流量计

肖素琴 韩厚义 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书是《流量计应用指南》的分册。专门介绍质量流量计的基本知识，特别对目前国内应用较多的科氏力式质量流量计进行了详细的介绍。

全书共分7章，内容涉及质量流量计的发展、工作原理及典型结构，质量流量计选型、检定、安装调试、应用及日常维护等。书中汇集了作者多年实践的经验，实用性强，可供工程技术人员及从事流量测量的有关工作人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

质量流量计/肖素琴，韩厚义主编。—北京：中国石化出版社，1999

(流量计应用指南)

ISBN 7-80043-694-2

I. 质… II. ①肖… ②韩… III. 质量流量计 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 02967 号

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010) 64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

\*

850 × 1168 毫米 32 开本 8.5 印张 2 彩插 232 千字 印 1—3000

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

定价：18.00 元

京工商广临字 97022 号

**主    编** 肖素琴 韩厚义

**编写人员** 宋文其 何 杰 张 宁  
王树江 范立勇 任双泉  
王旭芬

# 目 录

第一章 概述	1
第一节 流量和流量计	2
第二节 质量流量计	5
第三节 质量流量测量技术的发展	27
第二章 科氏力式质量流量计的工作原理和典型结构	32
第一节 科里奥利力	33
第二节 工作原理和典型结构	38
第三章 流量计选型	83
第一节 技术指标	83
第二节 选型原则和选型方法	93
第四章 检定	108
第一节 质量流量计检定的基本内容	108
第二节 液体质量流量检定方法	111
第三节 气体质量流量检定方法	124
第四节 科氏力式质量流量计的检定	133
第五章 验收、安装和调试	138
第一节 开箱检验	138
第二节 仪表安装	140
第三节 调试投用	163
第六章 质量流量计的应用	174
第一节 在交接计量中的应用	175
第二节 在过程控制中的应用	188
第三节 在其他场合的应用	200
第七章 日常维护和故障处理	209
第一节 日常维护	209

第二节 故障处理.....	212
参考文献.....	223
附录一 封闭管道中流体流量的测量	
——科里奥利质量流量计.....	224
附录二 中华人民共和国国家计量检定规程	
——质量流量计.....	242

# 第一章 概 述

在现代工业生产过程中，为有效地进行生产操作和控制，需要测量生产过程中各种介质的物理参数。其中，流体的流量是经常测量和控制的参数之一。在企业管理、流体输送和贸易交接上，需要对各种流体进行流量测量，其测量的准确与否直接关系到企业的生产稳定、产品质量和经济指标，是企业加强生产管理、提高经济效益的重要技术保障手段之一。

流量测量与人类的生产活动、科学试验和日常生活有着密切的关系。随着我国市场经济的发展，对流体流量及总量的测量要求越来越高，特别是在注重产品质量、节约能源、经济核算和企业效益的当今时代，流量测量就显得更为重要。因为各种流体介质，如石油、天然气、煤气、蒸汽和水等都是重要的能源或含能工质，只有做到对它们的准确测量，才能做到“耗能有数，节能有据”，使企业的经济核算、生产管理及经营活动建立在科学、可靠的基础上，切实有效地开展经营管理工作。

随着工业技术的发展，需要测量的流体日趋多样化，对流量测量的准确度要求也越来越高。被测流体有气相、液相和混组混相，流体的粘度有高有低，流体的测量条件从高温到低温、从高压到低压，被测介质可能呈层流、紊流、脉动流、间隙流……等各种流动状况，流体的实际流量从微小流量到大流量，流量的范围很宽。为此，要根据被测流体的种类和流动状况以及测量场所等条件，研究各种相应的测量方法。

由于流量测量的复杂性，流量测量仪表已经成为工艺过程检测控制仪表中品种规格最为繁多的一类仪表。各种流量仪表，有着各自不同的测量原理和结构特征，其使用方法也各不一样。因此，测量流量时，事先必须要充分研究测量条件，选用适合于相

应条件的流量仪表。

为准确测量流量，不但要懂得流量仪表本身的结构原理及有关知识，还要掌握包括流量仪表在内的整个工艺系统的有关知识。另外，流量仪表的安装方式、现场工艺管线布置和附件设施等，可能影响流量仪表的工作状况和使用特性，所以正确的安装方法以及工艺管线与流量计的相互适应配合，也是准确地进行流量测量的一个重要方面。

当前，流量测量技术正日新月异地向前发展。现有的流量仪表在结构和制造技术上不断地改进；新型流量仪表不断出现，克服了一些以往流量测量技术难以解决的问题。例如，科里奥利质量流量计，又称科氏力式质量流量计，就是近一个时期发展起来的具有代表性的新型流量仪表之一，它以独特的测量原理和结构迅速应用于各个工业领域。每一位从事与流量测量有关的工作者，都应不断地学习新的流量测量技术，掌握新型流量计的测量原理和结构，才能有助于流量测量工作更深入的开展。

## 第一节 流量和流量计

### 一、流量

在流体流动时，把流经管道横截面或明渠横断面（简称横截〔断〕面）的流体量与测量时间之比，即流体在测量时间内的平均流率，称为流体的平均流量，也可称为时均流量。

流体在某一时刻的流率，称为瞬时流量，并简称为流量。

流量对时间的积分称为“累积流量”，它表示在一段时间内流过横截〔断〕面的流体总量，也可称“总量”。

在流量测量中，流体量可以用体积或质量来表示。用体积表示流体量的称为体积流量；用质量表示流体量的称为质量流量。因此，流量可分为体积流量和质量流量，累积流量可分为累积体积流量和累积质量流量。

如果流体的流动不随时间变化而变化，是定常流，流量就可以用流体在单位时间内通过一定横截〔断〕面的体积或质量来表



示。当流动为非定常流时，流量随时间的变化而变化。因此，对某一时刻的流量，可以假定在该时刻前后某一微小的  $\Delta t$  时间内流动为恒定，用该微小时间间隔内流过的流体体积或质量与该时间间隔之比来表示。

设流体通过横截面中的某一微小面积为  $dF$ ，并设通过该微小面积流体的流速为  $u$ ，则流体通过微小面积  $dF$  的体积流量  $dq_v$  为：

$$dq_v = u dF \quad (1-1)$$

流体通过整个截面积的体积流量  $q_v$ ，可用对截面积  $F$  积分求出：

$$q_v = \int_F u dF \quad (1-2)$$

流体在管道中流动，横截面上各点速度并不相等，在弯管和阀门附近，横截面上各点，具有杂乱的流速分布，当流体流经足够长的直管段以后，就形成在管路中心部具有最大流速的轴对称流速分布。由此引出平均流速的概念。流经管路的流体体积流量与该管路截面积之比，称为平均流速。平均流速如以  $\bar{u}$  表示，则：

$$\bar{u} = q_v / F = \frac{\int_F u dF}{F} \quad (1-3)$$

质量流量可以用流体体积流量与流体密度的乘积来表示。若质量流量为  $q_m$ ，流体密度为  $\rho$ ，则

$$q_m = \rho q_v = \rho \int_F u dF = \rho \bar{u} F \quad (1-4)$$

在工程应用中，常常同时要求测量经过一段时间流过管道的总流体量，即要求测量通过管道的流体累积流量。

如果体积流量为  $q_v$ ，质量流量为  $q_m$ ，那么，在某一时间间隔  $t$  内流过的累积流量，可用下式表示：

$$\text{流体累积体积流量： } Q_v = \int_t q_v dt \quad (1-5)$$

$$\text{流体累积质量流量: } Q_m = \int_t q_m dt \quad (1-6)$$

如果流动为定常流，由式 (1-5)、(1-6) 可得：

$$\begin{aligned} Q_v &= q_v t; \\ Q_m &= q_m t \end{aligned} \quad (1-7)$$

应用式 (1-4) 对上述关系式进行整理，可得：

$$Q_m = q_m t = \rho q_v t = \rho Q_v \quad (1-8)$$

从上述累积流量关系式可以看出，累积流量的测量，即测量一段时间内流过管道的流体总量，在数值上它等于流量对时间的积分。

本书中采用的体积流量单位有  $\text{m}^3/\text{h}$ 、 $\text{m}^3/\text{min}$ ，质量流量单位有  $\text{t}/\text{h}$ 、 $\text{kg}/\text{h}$ 、 $\text{kg}/\text{min}$ ，累积体积单位为  $\text{m}^3$ ，累积质量单位为  $\text{t}$ 、 $\text{kg}$ 。

## 二、流量计

用于测量流过管路或明渠流体流量的仪表，通称为流量计。按其测量目的，可以分为体积流量计和质量流量计两大类。测量流体体积流量的称为体积流量计，测量流体质量流量的称为质量流量计。体积流量计种类繁多，通常根据其结构原理和测量方法来分类和命名。利用伯努利方程原理来测量流量的称为差压式流量计（如孔板流量计……等）；利用测量流体流速来测量流量的称为速度式流量计（如涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声波流量计……等）；利用一个定容容积来测量流量的称为容积式流量计（如腰轮流量计、椭圆齿轮流量计、刮板流量计……等）。质量流量计近些年来发展较快，特别是以科里奥利质量流量计为代表的质量流量直接式测量方法，正在获得越来越广泛的应用。

自古以来，流量测量都作为人类文明进步的一种标志。埃及人用尼罗河水的流量来预报年成的好坏；古罗马人修渠引水，采用简易孔板测量流量。如果从皮托管算起，流量仪表的出现已有二百多年的历史。当时由于科学技术和经济生产的不发达，流量

测量范围都较窄，测量准确度也只能满足低水平的生产需要。到本世纪 50 年代，工业上使用的流量计主要有孔板、皮托管和浮子流量计等。第二次世界大战后，国际经济和科学技术迅速发展，流量测量日益受到重视，流量测量仪表也随之迅速发展起来。为满足不同类型、不同流动状况下的流体流量测量的需要，近几十年来，先后研制并投入使用的流量计有电磁流量计、超声波流量计、涡街流量计、容积式流量计和科里奥利质量流量计等许多种流量仪表。随着工业生产过程的管道化、自动化和智能化，流量测量仪表在整个计量仪表中所占的比重也越来越大。

## 第二节 质量流量计

我们知道，流体的体积是流体温度和压力的函数，它是一个因变量，而流体的质量是一个不随时间、空间温度、压力的变化而变化的量。如前所述，常用的流量计中，如孔板流量计、涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、转子流量计、超声波流量计和椭圆齿轮流量计等的流量测量值是流体的体积流量。在科学研究、生产过程控制、质量管理、经济核算和贸易交接等活动中所涉及的流体量一般多为质量量。采用上述流量计仅仅测得流体的体积流量往往不能满足人们的要求，通常还需要设法获得流体的质量流量。以前只能在测量流体的温度、压力、密度和体积等参数后，通过修正、换算和补偿等方法间接地得到流体的质量。这种测量方法，中间环节多，质量流量测量的准确度难以得到保证和提高。随着现代科学技术的发展，相继出现了一些直接测量质量流量的计量方法和装置，从而推动了流量测量技术的进步。

目前，质量流量测量方法可以分为两大类：一是质量流量间接式测量方法，即同时测量流体的体积流量和密度值，由运算器计算得到流体质量，或是同时测量流体的体积流量和温度、压力值，利用流体密度与温度、压力之间的关系，计算出流体质量；二是质量流量直接式测量方法，流体测量直接反映质量流量值，与流体的温度、压力和密度等参数的变化无关。

## 一、质量流量间接式测量方法

质量流量间接式测量方法也称为质量流量推导式测量方法。它是在分别测量多个参数的基础上，通过运算器计算得到流体的质量流量。一般采用测量  $\rho q_v^2$  的流量计与密度计的组合、测量  $q_v$  的流量计与密度计的组合、测量  $\rho q_v^2$  的流量计与测量  $q_v$  的流量计组合或在测量流体的温度和压力后，利用流体密度与温度、压力之间的关系求出该温度、压力状况下的密度值，再由流体体积流量乘以密度得到质量流量值。

### 1. 测量 $\rho q_v^2$ 的流量计与密度计的组合

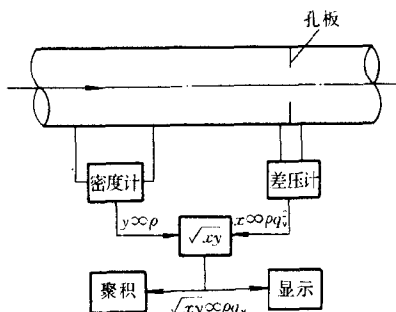


图 1-1 测量  $\rho q_v^2$  的流量计与密度计的组合图

测量工艺管线内流体组合量  $\rho q_v^2$  的流量计通常采用差压式流量计，将它与密度计组合起来就成为能间接测量流体质量流量的质量流量计，其工作原理如图 1-1 所示。

在图 1-1 中，由孔板两端测得的差压信号  $\Delta P$  与  $\rho q_v^2$  成正比关系。设差压变送器的输出信号为  $x$ ，则有  $x \propto \rho q_v^2$ 。设密度计测得的信号为  $y$ ，则  $y \propto \rho$ 。将  $x, y$  信号输入到运算器进行开方，可得：

$$\sqrt{xy} = k_1 \sqrt{\rho q_v^2 \rho} = k_1 \rho q_v = k_1 q_m \quad (1-9)$$

式中， $k_1$  为比例常数。

### 2. 测量 $q_v$ 的流量计与密度计的组合

测量工艺管线内流体体积流量  $q_v$  的流量计通常采用容积式流量计或电磁流量计、涡轮流量计、涡街流量计和超声波流量计等速度式流量计。将这些流量计与密度计组合起来就能间接求出

流体的质量流量，其原理如图 1-2 所示。

由体积流量计测得的信号为  $x$ ，它与体积流量  $q_v$  成正比关系，即  $x \propto q_v$ 。设密度计测得的信号为  $y$ ，则  $y \propto \rho$ 。将  $x$ ， $y$  信号输入到运算器进行乘法运算，可得：

$$xy = k_2 \rho q_v = k_2 q_m \quad (1-10)$$

式中， $k_2$  为该装置的比例常数。

### 3. 测量 $\rho q_v^2$ 的流量计与测量 $q_v$ 的流量计组合

这种质量流量计由两个流量计组成，其原理如图 1-3 所示。

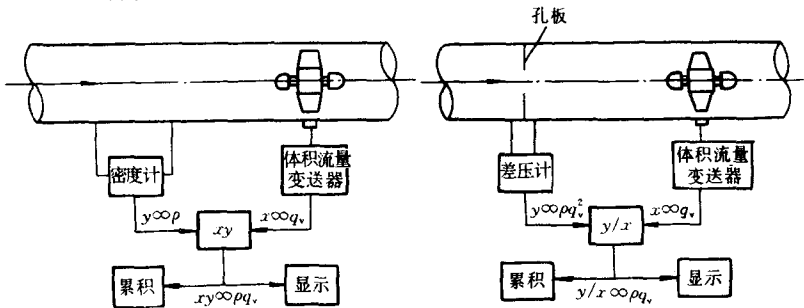


图 1-2 测量  $q_v$  的流量计  
与密度计的组合图

图 1-3 测量  $\rho q_v^2$  的流量计与  
测量  $q_v$  的流量计组合图

在图 1-3 所示的两个流量计中，通常一个是差压式流量计，设其输出信号为  $y$ ，则有  $y \propto \rho q_v^2$ 。另一个是容积式或速度式体积流量计，设其输出信号为  $x$ ，则  $x \propto q_v$ 。将  $x$ ， $y$  信号相除，可得：

$$y/x = k_3 \rho q_v^2 / q_v = k_3 \rho q_v = k_3 q_m \quad (1-11)$$

式中， $k_3$  为该测量方式的比例常数。

### 4. 补偿式质量流量计

补偿式质量流量计的测量方法是在测量流体的温度和压力后，利用流体密度  $\rho$  与温度  $T$ 、压力  $p$  之间的关系求出该温度、压力状况下的密度值，再由流体体积流量乘以密度值得到流体质量流量。

流体密度  $\rho$  是流体的温度和压力的函数。当流体压力、温

度变化时，就会引起流体密度的变化。尤其当被测介质是气体时，温度、压力的变化对密度的影响就更大。为了能间接求出流体的质量流量，就必须在测量流体体积流量的同时测量流体的密度。一般来说，测量气体的温度、压力这两个参数较测量气体的密度更易实现，通过温度、压力补偿方式对气体质量流量进行测量的关键问题就是要寻找  $\rho = f(p, T)$  的函数关系式。

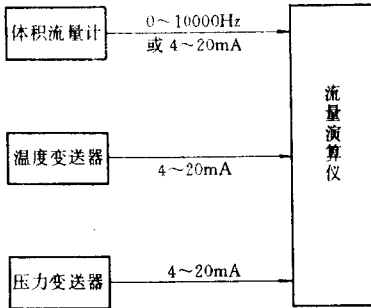


图 1-4 补偿式质量流量计原理示意图

目前常采用的方法是先测出工况温度和压力条件下气体的体积流量，再换算成标准状态下的体积流量或质量流量。其工作原理如图 1-4 所示。流量信号一般可选用涡街、涡轮和孔板等体积流量计，得到与流量成正比的频率量或模拟量。温度信号常采用测温敏感元件通过温度变送器，得到模拟量。压力信号通过压力变送器，得到模拟量。将上述三个

频率或模拟量送入流量演算仪，按照所预置的气体补偿方程进行运算，从而得到标准状态下的气体体积流量，如需得到气体的质量流量，则将标准状态下的气体体积流量乘以标准状态下的气体密度值即可求得。

气体的密度不仅随温度变化，对压力变化也非常敏感。在常温常压下，如温度变化  $10^{\circ}\text{C}$  左右，则气体密度变化约为 3%，在压力为一个大气压时，如压力变化为 10kPa，则密度变化约为 10%。

为了求得在压力  $p$ 、温度  $T$  状态下的气体密度  $\rho$ ，可利用下式进行计算：

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \frac{Z_0}{Z} \quad (1-12)$$

式中， $p_0$ 、 $T_0$  分别是标准状态下的绝对压力和绝对温度， $\rho_0$  是标准状态下的气体密度。系数  $Z$  称为“压缩系数”，这是考虑到实际气体并非完全遵守理想气体状态方程，当使用理想气体状态方程进行计算时应进行修正的系数。式中， $Z_0$  是实际气体在标准状态下的压缩系数， $Z$  是实际气体在压力  $P$ 、温度  $T$  状态下的压缩系数。压缩系数随气体而异，且随气体压力、温度而变化。在较低的压力下，理想气体定律成立的范围内，压缩系数为 1。一般地说，在中低压状态下，压缩系数可近似看作为 1。届时，式 (1-12) 可简化为：

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \quad (1-13)$$

当用体积流量计测量时，检出管道内的气体体积流量  $q_v$ ，则归化到标准状态下的气体体积流量  $(q_v)_0$  为：

$$(q_v)_0 = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} q_v \quad (1-14)$$

于是，气体的质量流量为：

$$q_m = \rho_0 \cdot (q_v)_0 = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} q_v \quad (1-15)$$

$$\text{令 } k_0 = \rho_0 \frac{T_0}{p_0}$$

于是，式 (1-15) 可改写为：

$$q_m = k_0 \cdot \frac{p}{T} \cdot q_v \quad (1-16)$$

可见，要进行自动补偿，只要把由体积流量计测出的体积流量  $q_v$  乘以介质的绝对压力  $p$  和绝对温度  $T$  之比，即可相应求得气体的质量流量  $q_m$ 。

对于高温高压气体流量的测量，还必须考虑气体压缩系数的变化影响。例如：严格地说，过热蒸气是非理想气体，其密度  $\rho$  与  $p$ 、 $T$  之间的关系甚为复杂，虽然物理学证明，其密度  $\rho$  也是  $p$ 、 $T$  的函数，并导出了它们之间的关系式，但在工业上必须根据补偿范围及准确度要求进行简化后方便于应用。

## 二、质量流量直接式测量方法

质量流量直接式测量方法发展至今，已产生多种类型的直接式质量流量计。常见的有量热式质量流量计、冲量式质量流量计、差压式质量流量计、双涡轮式质量流量计和科里奥利质量流量计等，目前以科里奥利质量流量计应用的最为成熟和广泛。

### 1. 量热式质量流量计

量热式质量流量计是利用加热流体时，使流体温度上升所需要的能量与流体质量流量之间的关系为原理或是在加热流体时利用测量热的传递、热的转移来测得流体质量流量的流量计。量热式质量流量计主要有以下几种：托马斯流量计、边界层流量计、旁路管热式流量计等。下面将分别予以简要介绍。

#### (1) 托马斯流量计

托马斯流量计是由外热源对被测流体加热，测量因流体流动而造成的温度变化来反映质量流量，或利用加热流体时流体温度上升所需能量与流体质量流量之间的关系来测量流体质量流量的仪表。这种流量计主要是用来测量气体的质量流量，其工作原理如图 1-5 所示。

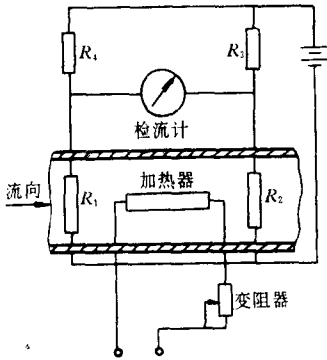


图 1-5 托马斯流量计原理简图

放在上游侧的电阻  $R_1$  测量未经加热的气体温度  $T_1$ ，放在下游侧的电阻  $R_2$  测量被加热气体的温度  $T_2$ 。这两支电阻温度计接到惠斯登电桥两臂，从而测出两者之间的温度差  $\Delta T = T_2 - T_1$ 。在这两支温度计位置的中间安装一个电加热器，通过调节加热器的电流使温度差  $\Delta T$  维持恒定，加热器所消耗的电能可用功率计准确测量。

设气体的定压比热容为  $c_p$ ，电热丝前后两测温点的温度差为  $\Delta T$ ，气体质量流量为  $q_m$ ，在单位时间内消耗的电能  $E$ ，则加热气体所需的能量和加热器上下游温度差之间的关系为：



$$E = J \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot q_m \quad (1-17)$$

式中,  $J$  为热功当量。由式 (1-17) 可得气体的质量流量为:

$$q_m = \frac{E}{J \cdot c_p \cdot \Delta T} \quad (1-18)$$

对于一定的气体, 设其定压比热容  $c_p$  为常数。由上式可知, 无论是提供一定的能量而测量温度差  $\Delta T$ , 或是维持一定温度差而测量所给予的能量  $E$ , 都可以确定气体的质量流量  $q_m$ 。由于后一种方法其质量流量与能量之间有正比例关系, 因此, 在实际应用中, 多为采用。

此种气体质量流量计, 是假定气体的定压比热容  $c_p$  为恒定值。实际上, 对于一定的气体, 定压比热容  $c_p$  值与气体的压力无关, 而在一定的温度范围内, 受温度的影响很小。但当被测气体是混合气体时, 定压比热容的值将随组分比发生变化。以致在实际使用时, 当被测气体的组分发生变化时, 会带来显著的测量误差。这种结构形式的流量计, 由于它利用加热器直接对流体加热, 因而不能使用于易燃易爆介质和导电介质。

## (2) 边界层流量计

边界层流量计, 又称作附面层流量计, 主要是用于气体质量流量的测量。图 1-6 是这种流量计的原理简图。

在流量计管道的外侧绕有加热器线圈。在流动方向的上下游管道外侧安装着两个电阻温度计  $R_{w1}$  和  $R_{w2}$ 。加热时, 热量通过管壁和流体边界层向管内的流体传递。由于边界层很薄, 热量在管壁和边界层内部的热传递可以看作是以热传导方式进行的。在远离加热器的上游侧以及紧靠加热器的下游侧, 管道内部温度分布分别如图 1-6 中的左、右两根曲线所示。图中右边曲线中的实线表示的是紊流情况下的温度分布, 虚线表示的是层流情况下的温度分布。由于管壁是用导热性能很好的材料制造的, 以致管子沿壁厚方向温度梯度很小, 可以忽略不计。管壁和管道内部温度梯度主要是在边界层内产生, 边界层以外的其他部分