

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580025190.1

[51] Int. Cl.

G01F 1/42 (2006.01)

G01F 15/02 (2006.01)

G01F 1/50 (2006.01)

[43] 公开日 2007 年 9 月 19 日

[11] 公开号 CN 101040167A

[22] 申请日 2005.6.24

[21] 申请号 200580025190.1

[30] 优先权

[32] 2004.6.25 [33] US [31] 10/877,377

[32] 2005.6.22 [33] US [31] 11/159,052

[86] 国际申请 PCT/US2005/022761 2005.6.24

[87] 国际公布 WO2006/004674 英 2006.1.12

[85] 进入国家阶段日期 2007.1.25

[71] 申请人 瑞瓦泰克公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 约翰·艾伦·基尔布

格兰特·布雷德利·爱德华兹

丹尼斯·约翰·史密斯

[74] 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

代理人 杨生平 杨红梅

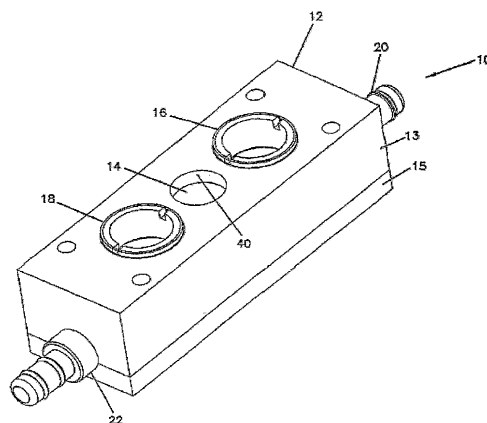
权利要求书 3 页 说明书 20 页 附图 18 页

[54] 发明名称

用于可变节流孔流量计的软件校正方法及设备

[57] 摘要

一种提高可变节流孔流量计的精确度的方法，包括针对不同的节流孔开口和不同的差压来表征流量计节流孔的流量系数。该方法对于如下流量计量和控制装置特别有用，该装置包括具有至少一个平面内壁的流体流导管和具有配置成与所述流体流导管的至少一个平面内壁配合的直线边缘的元件。该元件相对于所述导管可移动，以便限定流量节流孔并改变所述节流孔的横截面积。该装置也包括处理器，配置成基于节流孔的横截面积、差压和流量系数来计算流体流量。



1.一种计量通过可变节流孔的流体流量的方法，该方法包括以下步骤：

确定由所述可变节流孔所限定的横截面积；

测量所述可变节流孔上的压差；

利用所确定的横截面积和所测量的压差来确定排放系数；以及

利用所确定的排放系数来确定通过所述可变节流孔的流体流量。

2.权利要求1的方法，其中，确定所述排放系数包括从排放系数值阵列中选择排放系数。

3.权利要求1的方法，其中，确定所述排放系数包括利用多项式来计算排放系数。

4.权利要求1的方法，进一步包括对阵列值进行插值以便确定确切的排放系数。

5.权利要求1的方法，其中所述可变节流孔包括可移动元件，并且确定所述节流孔的横截面积包括确定所述可移动元件的位置。

6.权利要求5的方法，其中，所述可移动元件包括至少一个线性表面，并且所述可变节流孔还包括具有至少一个线性表面的导管，其中所述可移动元件的线性表面和所述导管的线性表面配置成相互配合。

7.权利要求1的方法，其中所述流体具有密度和粘度，所述方法进一步包括：

确定由所述可变节流孔所限定的节流孔几何参数；

利用所述节流孔几何参数、所述压差、所述密度和所述粘度来确定雷诺数除以流量系数的值 (Re/K)；

8.权利要求7的方法，进一步包括：

利用所述节流孔几何参数和所确定的 (Re/K) 值来确定流量系数；
以及

利用所确定的流量系数来确定通过所述可变节流孔的流体流量。

9.权利要求1的方法，进一步包括利用雷诺数的值和可变节流孔开口

的几何参数来确定所述可变节流孔的流量系数。

10.一种用于计量流体流量的具有可变节流孔类型的装置，包括：

由流体流导管和相对于所述流体流导管可移动以便改变节流孔尺寸的元件所限定的尺寸可变的节流孔；

配置成确定所述节流孔上的压差并产生压力信号的压力传感器；

配置成确定所述元件相对于所述导管的位置并产生位置信号的定位装置；以及

处理器，配置成利用压力信号、位置信号以及依赖于所述压力信号和所述位置信号的排放系数或依赖于所述压力信号、所述位置信号和流体粘度及密度的流量系数来确定所述流体流量。

11.权利要求 10 的装置，进一步包括配置成确定流体温度的温度传感器。

12.权利要求 11 的装置，其中所述流体温度用于确定所述流体粘度和密度。

13.权利要求 10 的装置，进一步包括所述处理器可访问的非易失性存储器，其中用于确定流量系数或排放系数的多个常数存储于该非易失性存储器中。

14.一种计量通过可变节流孔的流体流量的方法，所述流体具有密度和粘度，所述方法包括以下步骤：

确定由所述可变节流孔所限定的节流孔几何参数；

测量所述可变节流孔上的压差；

利用所述节流孔几何参数、所述压差、所述密度和所述粘度来确定雷诺数除以流量系数的值（ Re/K ）；

利用所述节流孔几何参数和所确定的（ Re/K ）值确定流量系数；以及

利用所确定的流量系数确定通过所述可变节流孔的流体流量。

15.权利要求 14 的方法，其中，确定所述流量系数包括利用低次单变量多项式和三角剖分表面插值出所述流量系数的值。

16.权利要求 14 的方法，进一步包括确定所述流体的温度和利用所确

定的温度确定所述密度和所述粘度。

17.权利要求 14 的方法,进一步包括:通过针对预先确定的压力条件和节流孔开口几何参数集测量通过可变节流孔开口的流体流量,确定校准数据点集,其中,所确定的节流孔几何参数和所测量的压力条件在所述校准数据点之间。

18.权利要求 14 的方法,进一步包括:针对每个校准数据点确定 Re/K 值,以及针对所确定的压力条件和节流孔几何参数、利用所确定的 Re/K 值,使用低次单变量多项式和三角剖分表面来插值出流量系数的值。

用于可变节流孔流量计的软件校正方法及设备

本申请于 2005 年 6 月 24 日以美国国家公司 Rivatek Incorporated 以及美国公民 John Allan Kielb、Grant Bradley Edwards 和 Dennis John Smith 的名义作为 PCT 国际专利申请提交，并且要求以下申请的优先权：美国发明专利申请第 10/877,377 号，提交于 2004 年 6 月 25 日，和美国发明专利申请（申请号未知），提交于 2005 年 6 月 22 日，这些申请通过引用结合于此。

发明背景

技术领域

本发明总体上涉及流体流量计量和控制装置，更具体地，涉及用于这种流量装置的与软件相关的校正方法。

背景技术

在过程控制行业，当需要小量流体用于制造过程时，通常使用小直径管以低流量来输送过程流体。管的横截面几乎总是圆形的。用来测量管内流量的仪表必须与在管内流动的流体交界，同时使对流体流的干扰最小。为了使对流体流的干扰最小，所述仪表典型地包括圆形横截面以便与管的横截面相匹配。对于测量节流孔上的压力变化的流量计，流量由以下方程 1 定义：

$$Q = C \cdot A_o \cdot \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{A_o}{A_p} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(2 \cdot \frac{(P_h - P_{lo})}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{方程 1}$$

其中：

Q=体积流量

C=节流孔排放系数（discharge coefficient）

A_o =节流孔的横截面积

A_p =管道的横截面积

P_{hi} =上游压力

P_{lo} =下游压力

ρ =流体密度

差压测量 ($P_{hi}-P_{lo}$) 可以这样完成: 使用两个单独的压力测量并将它们组合以得到压力差或压力降, 或使用如图 14 中所表示的单个装置。

当节流孔和差压测量被用来计算通过大管道的流量时, 它们通常是栓接或附着于管道的分立装置。也有可用来测量小管中的流量的装置, 其将节流孔和压力传感器集成在同一壳体内。在几乎所有情况下, 测量装置节流孔具有固定的尺寸, 用于测量固定的流量范围内的流量。节流孔的流量特性或“流量系数”由制造者测量或根据设计来确定。对于分立系统, 终端用户可以基于方程 1 中的参数计算流量, 包括制造者所提供的排放系数。在集成的系统中, 排放系数可以简单地作为制造者所执行的总的装置校准的一部分来考虑并且保持恒值。

当流量接近计量器所设计的流量范围的上端时, 即, 在对于给定的流量变化、压力变化相对大的情况下, 差压节流孔流量计量是最精确的。流量减小时, 装置的精度减小, 因为对于给定的流量变化, 压力变化相对小。这种现象也可以描述为图 15 的曲线图中所示的差压-流量比的减小。因为必须精确地知道压差以计算流量, 差压测量的任何误差导致流量计算的误差。由于曲线的斜率在低流量时较陡 (见图 15), 任何压力测量误差导致较大的流量计算误差。

为了利用节流孔和差压测量在较大的流量范围内进行较为精确的流量测量, 使用尺寸可变的节流孔会是有利的。通过针对每一种流量提供相对高的压差, 尺寸可变节流孔可用来提高节流孔开口范围内的流量测量精度。然而, 尽管计算流体动力学 (CFD) 软件可用来优化尺寸可变节流孔的设计, 当节流孔的尺寸改变时, 排放系数仍有小的变化。这种变化是由于所述装置设计用来测量的流量的范围和对节流孔的排放系数有贡献的物理因素所导致的。

一些尺寸可变节流孔装置设计成覆盖开始于层流区、结束于湍流区的流量范围, 这使得排放系数可能会在不同的流量范围内变化。而且, 众所

周知的是,节流孔的排放系数由与流体和节流孔形状相关的物理效应的组合构成。当节流孔设置为非常小的开口时,流动通道的壁的表面积相对于流动通道的横截面积是大的。这是因为得到了“狭缝”型开口。在狭缝型开口中,在流动通道的节流孔区,液体对壁的粘性力变得比开口较大时大得多。壁表面积对流动通道横截面积的较大比率具有降低节流孔排放系数的效果。

尽管可变节流孔流量计具有将流量计的量程扩展 10 倍或更多倍的优点,但它会具有精度减小的固有缺点,这归因于排放系数在不同开口时以及对于任何给定开口尺寸时的不同流量的轻微改变。

除了上述与排放系数有关的缺点外,由于几个其它的原因,已知的可变节流孔装置是低效的。第一,已知的可变节流孔装置典型地使用圆形或弯曲部件,其相对于流体流移动以改变节流孔的尺寸。由于这些部件的弯曲特性,节流孔的形状随着节流孔尺寸的改变而改变,当在某个节流孔尺寸范围内计算流体流量时,这产生显著的误差。第二,节流孔形状的改变导致对于流量范围的至少一部分非理想的节流孔形状。这导致流量改变时对于任何给定开口的不一致的流量特性,从而再次导致流体流量计算的误差。

克服已知的流量控制和计量装置的这些和其它缺点的流量装置将是本领域内的重要进步。

发明内容

本发明总体上涉及用于诸如差压流量计量和控制装置的流量装置的与软件相关的校正方法。

根据以下结合附图对本发明说明性实施例的详细描述,本发明的这些目的和进一步的目的将更加清楚。

附图说明

参考附图可以对所述说明性实施例作最好的描述,其中:

图 1 是根据发明原理的流量装置的顶部透视图;

图 2 是图 1 所示的流量装置的顶部平面视图;

图 3 是沿横截面指示 3-3 所取的图 2 所示的流量装置的一个示例配置的横截面视图；

图 4 是沿横截面指示 4-4 所取的图 3 所示的示例流量装置的横截面视图；

图 5 是图 3 所示装置的节流孔和可移动元件部分的放大视图；

图 6 是沿横截面指示 6-6 所取的图 2 所示的示例流量装置的横截面视图；

图 7 是沿横截面指示 7-7 所取的图 2 所示的示例流量装置横截面视图，该示例装置具有到节流孔的长方形入口；

图 8 是沿横截面指示 8-8 所取的图 2 所示的示例流量装置的横截面视图；

图 9 是根据本发明原理的示例流量装置的示意性过程图；

图 10 是针对根据本发明原理的示例可变节流孔流量装置、基于节流孔尺寸和压差的排放系数的示例阵列；

图 11 是流体流量控制装置的图示；

图 12 是表示根据本发明的原理确定通过流量装置的流体流量的示例方法的流程图；

图 13 是表示根据本发明的原理确定通过流量装置的流体流量的另一个示例方法的流程图；

图 14 是配置成测量节流孔上的压差的压差测量装置的图示；

图 15 是表示具有固定节流孔尺寸的示例流量装置的流量对压差的曲线图；

图 16 是表示仿真流量装置的排放系数对节流孔尺寸的曲线图；

图 17 是表示具有固定节流孔尺寸的仿真流量装置的排放系数对流量的曲线图；

图 18 是表示节流孔的已知流量系数值对雷诺数的曲线图；

图 19 是表示将根据本发明原理来近似的典型数据点集的三维曲线图；

图 20 是针对根据本发明原理的示例可变节流孔流量装置、基于节流孔尺寸的流量系数和雷诺数除以流量系数的值的示例阵列；

图 21 是示出三角剖分产生的误差的曲线图；

图 22A 和 22B 是示出对图 19 中所示的数据点集的多项式曲线拟合的二维和三维曲线图；

图 23 是示出原始数据和多项式之间的残值或差的曲线图；

图 24A 和 24B 示出分散数据和半网格化数据之间的差别；

图 25A 和 25B 是示出图 22A 和 22B 以及所得到的三角剖分的样本数据集的顶视图的曲线图；

图 26 是示出图 22A 和 22B 的三角剖分残余表面的三维曲线图；

图 27 示出两个平行网格线之间的三角剖分区的构造；以及

图 28 是表示根据本发明原理确定通过流量装置的流体流量的另一个示例方法的流程图。

具体实施方式

本发明总体上涉及流体流量计量和控制装置，更具体地，涉及尺寸可变节流孔流量装置和用于这种流量装置的与软件相关的校正方法。尺寸可变节流孔特别适合用于将要在参考几个附图加以描述的差压流量计，尽管这种应用仅仅是可应用本发明原理的多种应用的示例。

与软件相关的校正方法可以利用所存储的排放或流量系数的矩阵或阵列，这些系数与流量装置的特定压差和节流孔尺寸特性相互关联。其它与软件相关的校正方法可以利用方程或算法、针对每一个所确定的流量装置的压差和节流孔尺寸来计算确切的排放或流量系数。排放和流量系数的

阵列以及用来计算排放和流量系数的方程/算法可存储于存储器中，并由诸如处理器的控制器用来确定流体流量。

I. 示例流量装置

根据发明原理构造的用于控制和计量流体流量的示例流量装置 10 在图 1-9 中示出。该装置包括壳体 12、可移动元件 14、第一和第二压力传感器 16、18 以及入口和出口导管连接器 22、20。导管 30 穿过壳体形成并包括第一、第二、和第三段 50、52、54。壳体也包括在导管 30 的横向方向上与导管 30 相交的第一和第二传感器孔 36、38，以及也在导管 30 的横向方向上与导管 30 相交的元件孔 40。在这个示例中，元件孔 40 和传感器孔 36、38 相互平行延伸，但在其它实施例中，可以排成相互垂直。壳体 12 可以分成分开件或两半 13、15（见图 1），以便于在壳体内精确地形成复杂特征，或可以整体地形成单一件。

可移动元件 14 包括底座 42 和接触部件 44，且位于元件孔 40 中，以便延伸到导管 30 的第二段 52 中。接触部件 44 包括前沿 46、锥形后沿 48 和配置成与第二段 52 的平面表面（例如，以下描述且在图 5 中示出的固定壁 90）配合的平面接触表面 49（见图 5）。可移动元件 14 可沿着直线轴经由打开（收回）位置和闭合位置之间的位置范围可移动地调节，其中可移动元件 14 的移动限制在所述直线轴上。打开位置允许通过导管 30 的最大流体流量。当可移动元件 14 因为和流体接触向闭合位置移动时，通过导管 30 的流体流量减小。元件孔 40 中的可移动元件 14 的调节可以利用例如以下来执行：线性致动器、步进电机、液力或气力致动器、螺线管、伺服电机或手动装置如带有指旋按钮的螺纹轴。可移动元件 14 的位置可以利用例如以下来确定：霍尔效应传感器、磁致伸缩装置、线性可变差动变送器（LVDT）、光学编码器和其它位置确定技术。

将可移动元件 14 的移动限制为元件孔 40 内的直线运动可以简化可移动元件 14 的定位。其它方法可基于与所述可移动元件相关的渐进移动（incremental movement）来“推断”可移动元件 14 的位置。在一个示例方法中，可移动元件 14 可以从诸如完全打开或完全闭合的位置移动某个步数。可以对控制装置 10 的软件进行编程以便将所行进的步数转换成所行进的距离。独立的位置测量装置在这样的配置中是不必要的，这可以减少用于装置 10 的硬件的数量和复杂度。这种方法可能的缺点是：如果元

件锁定在单一位置而处理器在该元件实际上静止时认为其正在移动某个步数,则可能导致不准确的位置测量。与步进电机或线性致动器一起使用的编码器或根据相关的渐进移动“推断”线性位置的其它装置可具有相似的问题,即可能不准确。

第二段 52 包括入口部 60、出口部 62 和置于入口和出口部 60、62 之间的节流孔部 64。入口部 60 在一端与传感器室 32 保持流体连通,并在邻近节流孔部 64 的第二端包括多个锥形表面。同样地,出口部 62 在一端与传感器室 34 保持流体连通,并在邻近节流孔部 64 的相对端包括多个锥形表面。

所述装置的节流孔段的入口部和出口部包括多个固定侧壁,其在这个实施例中限定非圆形横截面。其它实施例可以包括具有圆形横截面的节流孔段的入口部和出口部,该配置在一些实例中会是优选的。示例的第一部和第二部 60、62 包括基本上正方形形状的固定壁(见图 7 中的入口部 60 的示例横截面)。如在此文件中通篇所用的,长方形的定义为有四个壁的形状,而正方形的定义为具有相同长度的四个壁的长方形。长方形的壁基本上是平的或线性的,两壁相交成大约 90° 的角。在一些应用中,因为制造的限制,长方形的角会略微地成圆形、圆角、倒角等特征而锥化。进一步,一个或多个所述壁的部分可以略微倾斜或斜切,以产生密封点或满足其它设计目标和/或克服制造限制。在包括线性壁和弯曲壁的组合(未示出)的实施例中,这些壁的相交处也可以包括诸如圆形、圆角、倒角等的特征。最后,一个或多个所述壁的部分可以通过垫片或密封的暴露面形成。

锥形 70、72、74、76 形成于入口部 60 的侧壁,以便减小入口部 60 与节流孔部 64 邻接点处的横截面积。锥形 70、72、74、76 在单个轴位置对准,以便使部分 60 的横截面积一步减小(见图 3-5)。出口部 62 也包括正方形形状的横截面,在相对的侧壁上具有锥形表面 78、80(见图 4),以便减小在节流孔部 64 和出口部 62 之间的过渡点处的出口部 62 的横截面积。

节流孔部 64 包括三个固定壁 90、92、94,固定壁 90 包括锥形后沿 96 和前沿 98(见图 5)。结果,节流孔部 64 的横截面积以锥形组 96、48 和 78、80 分两步锥形扩展到部分 62 的较大横截面积。如图 8 的横截面视图所示,与图 7 所示的入口部 60 的横截面积相比,节流孔部 64 具有相对小的横截面积。

相应的移动元件 44 和节流孔部 64 的前沿 46、98 和后沿 96、48 提供了进出节流孔部 64 的一致流量特性。节流孔部 64 的横截面的尺寸由可移动元件 14 相对于节流孔部 64 的固定壁 90、92、94 的位置来确定。节流孔部 64 没有传感器开口和死容积空间，从而避免了对流体流的扰乱和过程材料或沉淀物的可能的积累。

诸如上述那些（例如步进电机、伺服电机等等）的线性致动器（未示出），可被用来影响可移动元件 14 的移动。通过沿单个直线轴移动，可移动元件 14 线性地改变节流孔部 64 的横截面的尺寸，同时保持了大体上统一的形状，从而提供了可移动元件位置范围内相对一致的流量特性集合。节流孔部 64 的横截面形状允许根据可移动元件 14 的位置范围内的位置重复调节流体流量。在一个示例中，统一的形状是长方形，当可移动元件 14 在打开和闭合位置之间移动时，节流孔部 64 的横截面的高的尺寸减小。保持长方形的形状，或至少具有至少一个平面或线性侧壁的形状，使流量特性（背景技术部分的流量方程中的变量“C”）的变化最小，这样减小了针对每个节流孔尺寸确定流量时的误差。

使用时，流体首先通过导管 30 的第一段 50 进入流量装置 10（该示例将用于对本发明各方面的描述的其余部分）。通过段 50 的流量具有与第一段 50 的圆形横截面匹配的流量特性。该流量然后进入打开的传感器室 32，在这里、在流体流进入第二段 52 的非圆形入口部 60 之前提供了过渡容积。然后流体流由于正好在节流孔部 64 之前的入口部 60 形成的几个锥形而减小了横截面积。如上所述，由于节流孔部 64 非常小的横截面积以及由前沿 46、98 产生的壁状结构，在节流孔部 64 的入口处产生了较高的压力。节流孔部 64 的横截面积依赖于可移动元件 14 在方向 A 上的位置。沿方向 A 的每一个位置对应于在确定通过流量装置 10 的体积流量时使用的节流孔部 64 的不同横截面积。

流体流出节流孔部 64，进入部分 62 时，流体流的横截面积由于可移动元件 14 和节流孔部 64 的锥形 78 和 80 以及后沿 48 和 96 而增加。出口部 62 的横截面积优选地具有与入口部 60（在流量装置 10 中的示例流量装置中是正方形横截面，见图 2 和 6-9）相同的尺寸和形状。流出出口部 62 的流量进入传感器室 34，在这里、在流体流进入第三段 54 并呈现针对第三段 54 的圆形横截面的流量模式之前提供了另一个过渡容积。

第一和第二压力传感器 16、18 位于节流孔部 64 的相对侧，以便能够

确定导管 30 的第二段 52 的入口和出口侧的压力差。第一和第二压力传感器 16、18 可以安装得接近过程液体，以使流体的死容积量最小并减小第一和第二压力传感器 16、18 与导管 30 中的流体之间的结晶和粒子形成。在本发明的其它方面，单个差压传感器可以用来与第一和第二传感器室 32、34 两者联系，以便确定压差。而且，在第一和第二传感器室 32、34 之一具有固定压力的应用中，只需要单个传感器。例如，如果第二传感器室 34 在节流孔的下游并流注到处于大气压的开放容器中，就不需要下游压力测量，并且来自第一传感器 16 的压力测量可以单独与大气压一起用来确定压差。同样地，如果第一传感器室 32 在节流孔部 64 的上游并接收来自压力严格控制在固定值的加压容器的液体，就不需要上游压力，并且来自第二传感器 18 的压力测量可以单独与所述固定上游压力值一起用来确定压差。

其它示例实施例可以使用单个的差压传感器，其从节流孔部的入口和出口侧获取压力读数，并确定节流孔部上的差压。这种和其它类型的传感器没必要必须安装在传感器孔中，所使用的传感器孔也不要求比导管横截面积大的横截面积。例如，传感器可以配置成利用小探头获取压力读数，相对于导管尺寸，该探头需要非常小的进入导管的开口，而且传感器可安装在与装置壳体相邻或壳体内的不同位置。

另外的实施例可以不包括任何与所述装置直接关联的传感器，但可以配置成使用由外部源所提供的压力信号。这种来自外部源的压力读数可以包括：例如，来自位于所述装置上游或下游的压力传感器的压力读数，或表示所述装置的上游或下游系统的已知静压条件的压力信号。这样，尽管该装置不需要压力传感器，该装置优选地配置成使用压力信号，目的是计量或控制流经该装置的流体。

表示节流孔上的压差的压力信号可以与节流孔的横截面积、正好在节流孔前或后的入口部和出口部的横截面积、以及流体的密度一起用来确定体积流量（在以上的背景技术部分所讨论的）。

本发明的一个优点是，通过改变节流孔尺寸可以在每一种流量优化压力信号（ ΔP ）。例如，针对给定的流量，通过改变节流孔尺寸可以将压力信号设置在最小值。进一步地，针对所希望的流量或入口压力，通过改变节流孔尺寸可以优化压力信号。

进一步地，尽管所示出的第二段 52 的入口、出口和节流孔部 60、62、

64 的横截面是长方形的形状,可以理解,所述横截面可以是不同形状的横截面,如长方形、等腰三角形等等,但不限于此。进一步地,第二段 52 的不同部分可以具有不相似的横截面形状和尺寸,并沿第二段 52 的每一部分的长度可以具有变化的形状或尺寸。此外,尽管节流孔部 64 具有长方形横截面,由可移动元件 14 的接触部件 44 的前沿和后沿 46、48 所限定的节流孔部 64 的前部和后部,以及固定壁 90、92、94 的前沿和后沿 98、96 可以是与图中所示的那些不同的尺寸、形状和取向。

其它示例流量装置和流量装置 10 的进一步的方面在提交于 2003 年 12 月 3 日、名称为“APPARATUS FOR CONTROLLING AND METERING FLUID FLOW”的美国专利申请序列号第 10/728,594 中示出和描述,该专利申请通过引用结合于此。

图 1-8 中所示的优选实施例流量装置 10 的特征在图 9 中作为流量装置组件 100 的部分示意性地示出。组件 100 包括微控制器 102,其控制大部分其它组件特征并与之通信。组件 100 包括:与流量装置尺寸可变节流孔 113 有关的致动器驱动电路 104、线性致动器 106、位置传感器基准 108、位置传感器 110,和模数转换器(ADC)112,以及控制到特征 106、108、110、112 的功率的开关 114、调节器 116、调节器 150、和线性调节器 118。微处理器 102 可以是诸如以下的任何适合的处理器或控制器:例如,由 San Jose, CA 的 RENESAS 生产的 HD64F3062 16 位微处理器。

组件 100 也包括压力传感器基准 120、高压传感器 122、低压传感器 124 以及差动放大器 126、128 和 ADC 129,共同用来确定流量装置中的压差。组件 100 也包括温度传感器 121 和温度放大器 127,它们用来确定流量装置中的流体的温度。诸如 RAM 130、NVRAM 132 和程序存储器 134 的不同存储装置可以由微处理器 102 用来存储数据,如图 10 的示例阵列(和/或下面的多项式方程)、指令、编码、算法等等。

微处理器 102 可以接收具有例如 4-20mA 量值的电流信号形式的输入,利用 ADC 136 和电压隔离 137 将其转换成数字信号,并可以通过 UART 138 和数字接口 140 与直接的数字信号联系。微处理器 102 也可以产生输出信号,该输出信号通过电压基准 142、数模转换器(ADC)144,电压隔离 145 和输出电路 146 转换成模拟信号,所述输出电路产生具有例如 4-20mA 量值的信号。组件 100 可以使用包括负调节器 148 和开关调节器 150 的电源,用于为组件 100 的各种特征提供功率。

II. 软件校正方法

A. 示例#1

由于排放系数在不同节流孔开口时以及对于任何给定开口时的不同流量的略微变化,可变节流孔流量计具有丧失一定精度的固有缺点。此处所公开的示例流量计量和控制装置提供了一种利用排放系数的软件校正来克服这两个缺点的手段。不是将用于装置的单一排放系数用于所有的流量计算,而是可在每一个流量计算中使用取决于节流孔开口和所测量的差压的排放系数。针对待使用的差压和节流孔开口范围的排放系数值的阵列(见图 10 中的示例阵列)可以存储于流量计的存储器中,适当的值可以由流量计访问并用于每一个单独的流量计算。

如上所述,霍尔效应传感器可以用来测量改变流量装置的节流孔开口的、包含于流量装置的可移动元件中的磁体的线性位置。因为图 1-9 所示的流量装置 10 中的节流孔开口具有至少一个平面壁,节流孔横截面积与这个滑动元件的位置成线性比例。通过监视霍尔效应传感器的输出,流量计组件中的微处理器 102 可以确定节流孔开口面积,其为图 10 所示的示例阵列的一个索引。微处理器 102 配置成每次执行流量计算时对压力传感器 122、124 进行读取。通过对压力传感器 122、124 进行读取并计算差压,微处理器 102 确定图 10 所示的阵列的第二索引的压力值。针对阵列中所列的差压和位置点之间的值,简单的插值可用来确定阵列中的值之间的准确排放系数值。

用于图 10 所示的排放系数值的二维阵列可以通过设计确定并存储于每一个流量计的程序存储器 134 中。阵列中的排放系数值也可以通过针对所生产的每个单独的流量计进行测试来确定,这将为每个流量计提供唯一且较为精确的阵列。阵列值可存储于非易失性存储器(NVRAM) 132 或其它的与流量计组件 100 相关的存储器中。其它实施例可以包括具有范围扩展到图 10 所示的范围之外的索引,并依赖于所需要的精度水平,可以包括更大或更小的分辨率。而且,由于排放系数相对于节流孔开口和流量的变化不是线性的(见图 16 和 17 的模拟结果),阵列的每个轴上的值不需要是线性的。这样,阵列可以保持尽可能小,以便在维持所希望的精度的同时减少对存储器的需要。进一步地,尽管节流孔的位置与流量装置 10 中的节流孔的横截面积成线性比例,其它实施例可以不包括面积和可

移动元件的线性位置之间的线性关系。在这样的实施例中，阵列索引可以是可移动元件的位置或节流孔的横截面积。

图 18 以已知值的曲线进一步说明排放系数和流量之间的关系，该曲线见于技术书：JOHN A. ROBERSON 和 LAYTON T.CROWE 的 ENGINEERING FLUID MECHANICS，在 612 (1993)。图 18 将流量系数 (K) 作为 Y-轴，雷诺数 (Re) 作为 X-轴，其中流量系数和雷诺数分别与排放系数 (C) 和流量 (Q) 相关，如以下方程 2 和 3:

$$K = \frac{C}{\left[1 - \left(\frac{A_o}{A_p}\right)^2\right]^{1/2}} \quad \text{方程 2}$$

$$\text{Re}_d = \frac{4Q}{\pi d \rho} \quad \text{方程 3}$$

图 18 也在顶轴上绘出了如以下方程 4 的雷诺数与流量系数之间的关系:

$$\frac{\text{Re}_d}{K} = (2g\Delta h)^{1/2} \frac{d}{\nu} = \frac{d}{\nu} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{方程 4}$$

其中: Re_d = 节流孔部分中的雷诺数

D = 管道直径

d = 节流孔直径 (长方形节流孔与使用水力半径的 d 相关)

ν = 流体运动粘度

ρ = 流体密度

对于节流孔直径和运动粘度的固定值，雷诺数只随流量的变化而变化。方程 2-4 所提供的系数关系使图 18 基本上表示排放系数相对于流量的变化。

图 18 中的各个曲线示出了对于给定的节流孔-管道尺寸比、流量 (以雷诺数表示) 从低流量增加到高流量时导致的排放系数的显著变化。图 18 中的曲线的差异表示节流孔尺寸相对于管道尺寸变化时排放系数的变化。

图 12 中的流程图示出针对给定流量装置执行流量计算和更新输入/输出 (I/O) 时所包含的步骤。流量计算中的一些步骤包括确定排放或流

量系数。这些步骤可以以存储于本地存储器（例如，程序存储器）的编程实施，或可以下载或发送到微控制器 102。过程可以这样开始：对位置传感器进行读取以确定流量计可移动元件的位置，从而确定可变节流孔的面积。对压力传感器读取可以在对位置传感器进行读取之前、之后或同时执行。压力和位置读数用作在所存储的排放系数阵列中查询排放系数的索引。必要时对排放系数进行插值以便确定确切的排放系数值。然后将排放系数输入流量方程，并根据流量方程计算流量。然后可以利用流体流量和传感器读数来更新模拟和数字输出变量。如果节流孔位置没有变化，或节流孔装置的使用没有任何中断，该循环以新的压力读取来重复。如果使用中断或位置传感器发生变化，该循环从开始处重复。

图 10 中的排放系数值的二维阵列也可以由微处理器 102 利用将节流孔开口尺寸和差压作为变量输入的多项式来确定。示例多项式如以下方程 5 所列：

$$C = A \cdot (P_{hi} - P_{lo})^2 + B \cdot (P_{hi} - P_{lo}) + D \cdot (A_o)^2 + E \cdot (A_o) + F \quad \text{方程 5}$$

其中：A,B,D,E 和 F=常数

C=节流孔排放系数

A_o =节流孔横截面积

P_{hi} =上游压力

P_{lo} =下游压力

常数 A,B,D,E 和 F 典型地在制造过程中、在表征差压和排放系数与节流孔开口时确定。常数而不是阵列值可以存储于流量计组件 100 的存储器中。多项式系数可以通过设计确定并且对于所制造的每个流量计都相同且存储于程序存储器 134 中，或者，系数可以通过校准确定，并且对于所制造的每个流量计是唯一的，且然后存储于非易失性存储器 132 中。

图 13 中的流程图示出利用多项式确定最优排放系数和执行流量计算的步骤。过程可以这样开始：对位置传感器进行读取以确定流量计可移动元件的位置，从而确定可变节流孔的面积。对压力传感器进行读取可以在对位置传感器进行读取之前、之后或同时执行。将压力和位置读数输入多项式并计算确切的排放系数。然后将排放系数输入流量方程，并根据流量方程计算流量。然后可以利用流体流量和传感器读数来更新模拟和数字输出变量。如果节流孔位置没有变化，或节流孔装置的使用没有任何中断，

该循环以新的压力传感器读取来重复。如果使用中断或位置传感器读数发生变化,该循环从开始处重复。

本发明的原理也包括一种装置,其可以用作可变节流孔流量计或用作流量控制器。用于可变节流孔流量计和流量控制器的电硬件可以相同。流量计量和流量控制装置之间的一个差别包括流量控制器所要求的另外的软件功能。图 11 是示出流量装置 200 的基本特征的框图。装置 200 包括控制器 210、控制阀 212 和流量计 214。控制器 210 可以包括将所希望的流量设置点 (set point) 与由流量计 214 所测量的测量流量相比较的软件。然后控制器 210 向控制阀 212 发送信号,以改变节流孔开口,从而根据需要来增加或减小流量以满足流量设置点。流量控制器执行流量计量的方法与上述可变节流孔流量计 10 的执行方法相同或相似。因此通过阵列 (例如见图 10) 或多项式 (见方程 5) 对节流孔排放系数的二维校正可以用于以下两者: 可变节流孔流量计 10 和流量控制器 200 中的流量计功能。

B. 示例#2 - 对过程液体的粘度和密度变化的补偿

基于节流孔上所测量的差压 (ΔP) 的典型的流量计算包含过程液体密度项,但不包含粘度项 (见方程 1)。结果,计算只对于单一粘度是精确的,其中装置在这一粘度校准。

对于固定的节流孔尺寸/几何参数和差压的有限范围,方程 1 中的排放系数 C 是实验确定的常数。对于具有可变节流孔尺寸的装置,排放系数 C 不再是常数,而现在必须是节流孔尺寸的函数。在最简单的情况,排放系数只是节流孔尺寸 H_o 的函数:

$$C = f(H_o) \quad \text{方程 6}$$

在这种情况下,函数 f 的实现必须通过以下来从经验上确定: 在若干节流孔尺寸时测量 Q , 然后针对在方程 1 中根据所测量的 Q 值计算的 C 值来拟合内插式或近似式。其方法可以包括针对数据点之间的数据或分段线性插值来拟合多项式或样条曲线。在任何方法中,目标是针对通过校准从实验上测量的二维 (2D) 数据点集来拟合 f 所定义的曲线。

要在压力的宽范围内提高精度,上述过程可以扩展为包括在节流孔尺寸 (H_o) 的范围和压力 (ΔP) 的范围内表征 C 。排放系数于是为节流孔尺寸和差压两者的函数,而 f 现在是对三维而不是两维的点集进行拟合的内插

式或近似式:

$$C = f(H_o, \Delta P) \quad \text{方程 7}$$

在前面的示例中, 假定粘度为常数。如果过程液体的粘度与根据方程 6 和 7 用来表征 C 的粘度不同, 就会产生所计算的流量的误差。已经根据本发明的原理开发了以下表征方法, 以便为不同粘度的液体提供较为一般的解决方法。

对考虑粘度时的问题的一个解决方法是, 在 f 的定义域中加入另一维度, 并使其也成为粘度 ν 的函数:

$$C = f(H_o, \Delta P, \nu) \quad \text{方程 8}$$

这样做在理论上非常有效, 但在实际中引起至少以下困难的问题:

- Q 必须测量且 C 必须确定的点的数量增加了一个数量级。针对 10 个压力和 10 个节流孔尺寸的集合来表征 C, 需要 100 次测试运行。增加 10 个粘度的集合需要共计 1000 次的测试运行。

- 改变并检验压力和节流孔尺寸是需要几秒钟的简单操作。改变粘度需要将液体从测试系统中倾空并再注入不同的液体。注入后必须检验粘度。这是一个费时费力的过程, 会使校准所产生的每个单元所需要的时间从几小时增加到几天。

为避免在粘度的范围内表征每个装置的需要, 使用了不同的流量方程 [Roberson and Crowe, 1993, p612] :

$$Q = K \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{方程 9}$$

其中:

Q =体积流量

K =流量系数

d = 节流孔水力直径

ΔP = 节流孔上的差压

ρ = 流体密度

在这个方程中, 节流孔水力直径 (d) 根据节流孔的高度和宽度 (H_o).

和 W_o) 计算。长方形节流孔的水力半径是面积和周长的函数, 称为节流孔几何参数[Roberson and Crowe, 1993, 方程 10.3、10.35] :

$$\frac{r}{2} = \frac{A}{P} \quad \text{方程 10}$$

直径是半径的两倍, 直径然后根据节流孔高度和宽度来计算:

$$d = 2 \frac{H_o W_o}{H_o + W_o} \quad \text{方程 11}$$

利用方程 8 计算流量的一个缺点是, 排放系数 C 需要针对三个独立的变量来表征: 节流孔尺寸、差压和粘度。针对粘度来表征是一个困难的过程, 因此需要一种方法将粘度如此并入方程, 从而消除表征粘度的需要。尽管以上方程 9 看起来不考虑粘度, 利用如以上方程 4 中所示的流量系数 K 的特性[Roberson and Crowe, 1993, p612]可容易地使其考虑粘度:

1. 已知流量系数 K 节流孔尺寸和节流孔内的雷诺数 Re 的函数。

2. K 可被看作 Re/K 值的函数。

3. Re/K 值可以基于节流孔尺寸、差压、密度和粘度计算(见方程 4)。

因为 Re/K 的计算包括了粘度的影响, K 需要只作为节流孔尺寸和 Re/K 的函数来表征:

$$K = f\left(H_o, \frac{Re}{K}\right) \quad \text{方程 12}$$

函数 $K=f(H_o, Re/K)$ 的表征通过在节流孔尺寸 H_o 和差压 ΔP 的值的范围内对体积流量 Q 的经验测量实现。针对校准过程中所确定的 ($Q, H_o, \Delta P$) 的每组测量值(例如, 校准数据点)来计算 Re/K 和 K 的值。利用方程 4 计算 Re/K , 通过以下计算 K : 将方程 11 代入方程 9 并根据所测量的 $Q, \Delta P, H_o$ 的值来求解 K :

$$K = \frac{Q}{\pi \left(\frac{H_o W_o}{H_o + W_o} \right)^2 \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{方程 13}$$

这给出 K, H_o 和 Re/K 值的集合, 针对该集合可以根据方程 12 来拟合函

数 f 的近似式。待近似的典型数据点的集合在图 19 中示出。

另一个重要的步骤是确定函数 $f(H_0, Re/K)$ 的实现。函数的一般形式需要在单元与单元之间是相同的,以便使得相同版本的固件能够安装在所有单元中。然而,表面的确切形状会由于机械制造公差而略微改变。这可以通过下载固件用来计算表面的确切形状的常数集合(例如,图 20 中所示的表示在装置校准过程中获取的一些测量数据的值的表)来实现。为避免流量计算产生显著误差,在一个优选实施例中对近似所述表面所选择的方法需要再生成误差小于 0.1% 的 K 值。

几种实现方法可以使用,但每一种都有一些显著的缺点:

- 双变量多项式 - 为了在所希望的误差界限内获得拟合,需要高次多项式。这些多项式在所测量的数据集的界限之外通常表现不良,并且在数据集内的数据点之间常常表现不良。高次多项式的计算也是密集的,计算它们所需要的时间不允许实现其它理想的特征。

- 双三次样条表面 - 样条表面需要网格化数据(其中数据点全部位于长方形网格的交点上)。在生产环境中收集校准数据的实际限制产生分散于独立变量的一个轴上的数据点。使样条表面适合于对分散数据起作用导致表现不良的差的拟合和表面。另外,样条表面的计算也是密集的。

- 三角剖分 - 三角剖分的表面计算简单,良好地作用于分散数据,在数据点之间表现良好,并能使其在数据集之外表现良好。然而,高弯曲表面的误差会变大,而且对于一致地凹或凸的表面,误差全在一个方向上(误差的平均值不趋向于零)。图 21 是由三角剖分产生的误差的二维(2D)图示。三角剖分方法的另一个缺点是:需要大量的数据来以分散数据点表示三角剖分表面。

已发现低次单变量多项式与三角剖分表面的特例的结合满足函数 $f(H_0, Re/K)$ 的实现目的。这种结合提供了好的拟合,表现良好,并需要最少的计算时间。

三角剖分表面产生的误差与表面的曲率和所测量的数据点之间的距离成比例,所测量的数据点是三角形的顶点。通过使表面平坦或增加所测量的数据点的数量可以减小误差。因为增加所测量的数据点的数量增加了测试时间(从而增加了制造成本),使用多项式来“平坦化”所述表面。

弯曲表面的平坦化或展开通过以下完成:利用最小平方算法针对所测

量的数据来拟合多项式表面。然后待三角剖分的表面由残值（数据点和多项式表面之间的差）来限定。因为 K 的改变更依赖于 H_o ，而不是 Re/K ，使用以 H_o 表示的单变量多项式。现在函数 $f(H_o, Re/K)$ 包含两项的和：

$$K = p(H_o) + T\left(H_o, \frac{Re}{K}\right) \quad \text{方程 14}$$

其中：

$p(H_o)$ = 多项式在 H_o 的值

$T(H_o, Re/K)$ = 三角剖分表面在 $H_o, Re/K$ 的值

图 22A（二维）和 22B（三维）示出对图 19 中所示的数据点集的多项式曲线拟合。多项式是三次多项式，具有以下形式的附加倒数项：

$$ax^3 + bx^2 + cx + d + \frac{e}{x+f} \quad \text{方程 15}$$

三角剖分表面然后由原始数据和多项式之间的差来限定。一些示例残值在图 23 中示出。

将多项式残值而不是原始数据值用于三角剖分表面提供了至少以下几个优点：

- 待三角剖分的表面不再是凹的，产生正的和负的两种插值误差，它们的平均值接近于零。

- 表面的斜率在一个方向上显著减小，使得插值误差的量值减小。

- 用于三角形表面的组合值不再是平坦的，而是具有与数据集相同的特性曲线。这进一步减小了插值误差的量值。

预测试表明，组合方法中的插值误差可以小于单独使用三角剖分时的量值的一半。

残余表面的三角剖分可以在运行时间即时（on-the-fly）完成，或可以在装置外部完成，所得到的三角形的列表下载到非易失性存储器。使用前者的方法的优点在于其限制了装置中所需的非易失性存储量。为进一步减小存储需要并简化三角剖分算法，对数据集和三角剖分算法有两个附加约束：

- 数据点可以只分散于 Re/K 轴： H_o 值将限于离散值的集合。换言之，

数据将是“半网格化”的，其中点位于一个轴的网格线上（网格线可以不规则地间隔开），但分散在另一个轴上。图 24A 和 24B 示出分散的和半网格化的数据之间的差别。这种方法将所需要的存储空间减小了 30%，因为只需要存储每个唯一的 H_0 值的一个拷贝。

•三角剖分方法将限于使用同一网格线或邻近网格线上的三角形的顶点。这产生用于 Delaunay 三角剖分的执行时间，其是相对于每一网格线上的点数的 $O(N)$ ，而不是相对于总点数的 $O(N \log N)$ ，后者是针对更一般的 Delaunay 三角剖分算法的情况。

图 25A 和 25B 示出样本数据集和所得到的三角剖分的“顶视图”。图 26 示出三角剖分残余表面，其与图 22A 和 22B 的多项式表面相加，以得到作为 H_0 和 Re/K 的函数的 K 的最终值。

在上述两个约束适当设置的情况下，即时三角剖分算法比一般情况的 Delaunay 三角剖分算法更简单。因为将表面三角剖分的目的是在特定的 $(H_0, Re/K)$ 的值对表面进行计算，这足以能够找到包含那个点的三角形。

寻找包含给定点的三角形包括两部分。第一，寻找数据集（见图 25A 和 25B 中的竖直“网格线”）中的 H_0 值，其包围待计算表面的 H_0 值。这给出位于两条平行线上的两个数据点集。第二，在所述两条平行线之间的区域的三角剖分中寻找包含点 $(H_0, Re/K)$ 的三角形。每一个三角形将包括由所述两条平行线之一上的两个相邻点限定的一条线段（在图 27 中竖直画出），以及连接所述竖直线段的端点与相对的平行线上的数据点之一的两条线段（以下描述中称为“梯级 (rung)”）（在图 27 中大体上水平画出）。

将所述区域三角剖分的过程包括利用在两条平行线的每一个上的底部两点建立第一梯级（见图 27）。所述算法可开始于顶部或底部，只要起始端选择一致。下一个梯级通过以下确定：首先确定从最新建立的梯级的每一端到相对平行线上的下一个点的距离（在图 27 中示出为双箭头线），然后根据前一步中的两段中的最短者建立下一个梯级。最后，包含点 $(H_0, Re/K)$ 的三角形由两个最新的梯级限定。在处理点位于三角剖分区域之外的情况时会存在误差。

一旦找到了三角形， ΔK 值由通过将 $(H_0, Re/K)$ 投影到由所述三角形的顶点所限定的平面上所得到的点的 Z 坐标来确定。 ΔK 值加到由方程

15 中所示的多项式所产生的近似 K 值，这样产生最终的流量系数值 K 。利用方程 9，根据图 28 的流程图中给出的基本过程步骤，将最终的流量系数值 K 用于计算体积流量。图 28 中所表示的过程作为用来操作可变节流孔流量计量装置的计算机程序的步骤特别有用。这样，体积流量可以根据这种示例系统和方法针对某个范围的节流孔几何参数、雷诺数和流体密度及粘度来确定。

III. 结论

这里所描述的示例流量装置和软件校正系统是提高可变节流孔流量计的流量测量精度的示例性设备和方法。该方法包括：在考虑诸如粘度和密度的流体性质的同时，针对不同的节流孔开口和流量来表征节流孔的排放或流量系数。通过针对这些参数来表征节流孔的排放或流量系数，并在流量计算中对它们进行校正，流量计能够在宽流量范围内保持流量测量精度。这样，流量计对于达到或超过常规差压流量计的流量范围的 10 倍的流量范围会是有用的，并可以在整个该流量范围内精确地表现。

上述说明、示例和数据对本发明的组成的制造和使用作了完整的描述。因为可在本发明的精神和范围内实现本发明的许多实施例，本发明旨在由所附权利要求来限定。

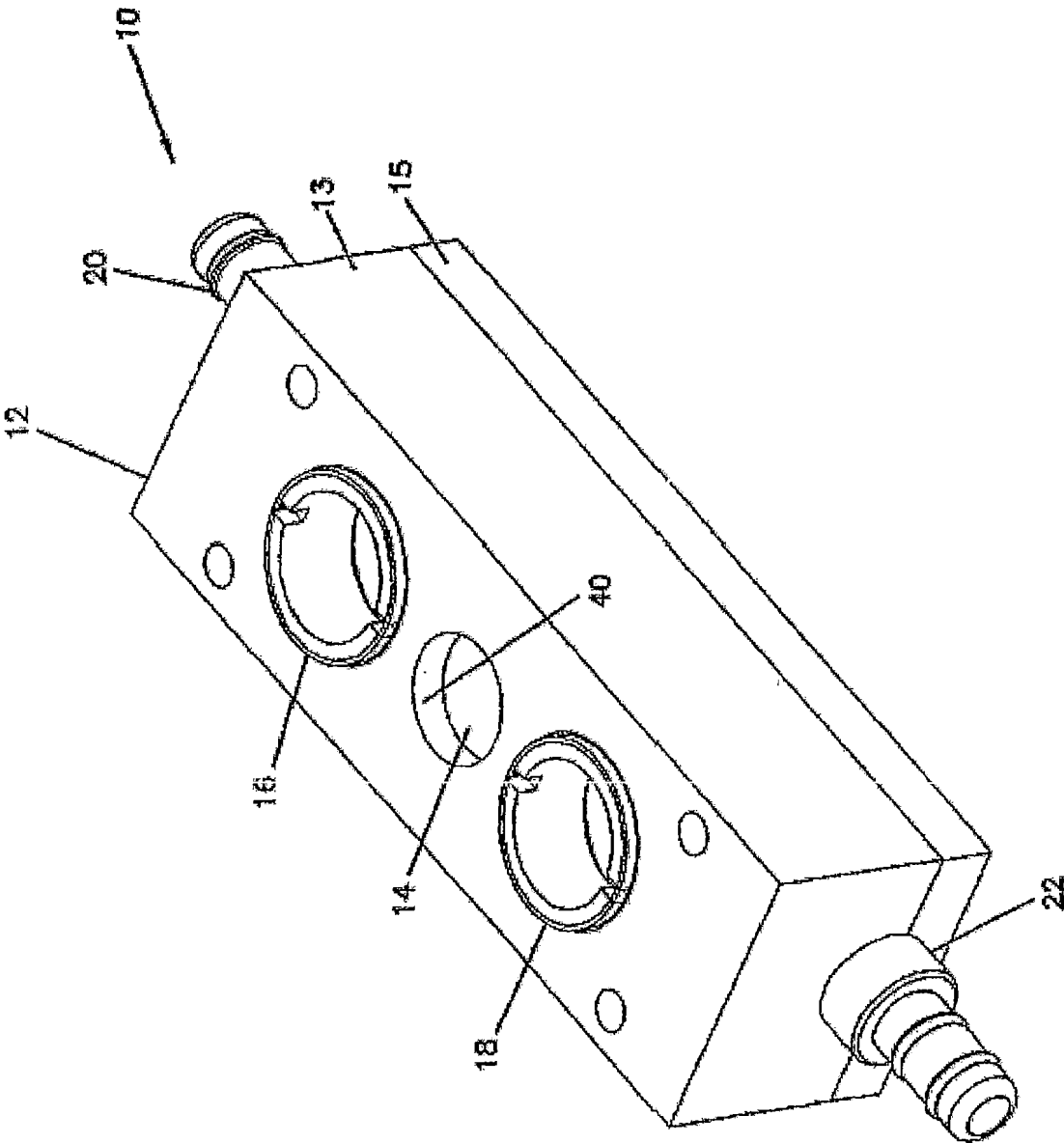


图1

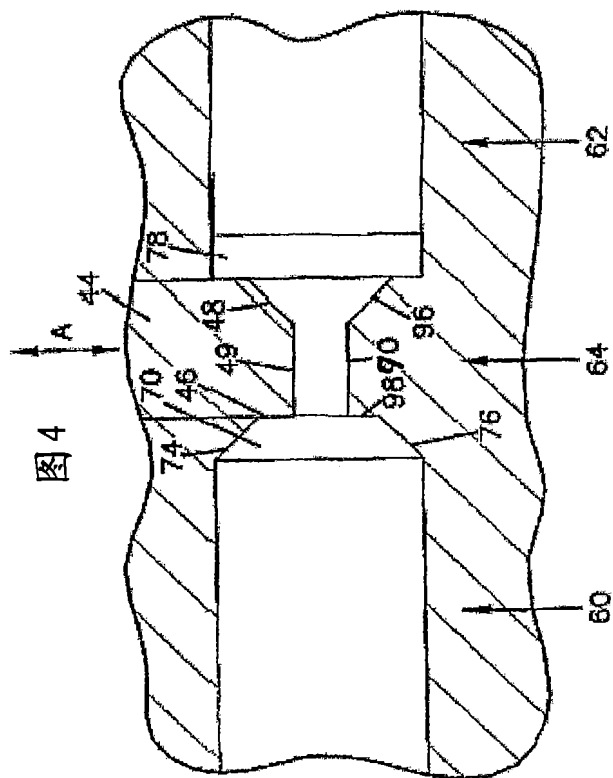
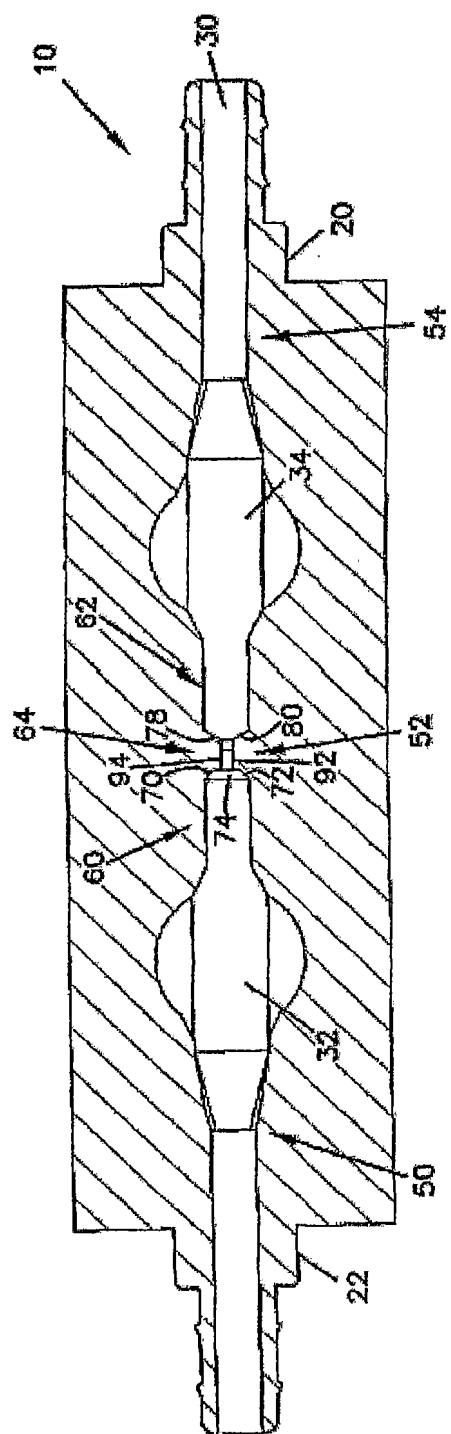


图 5

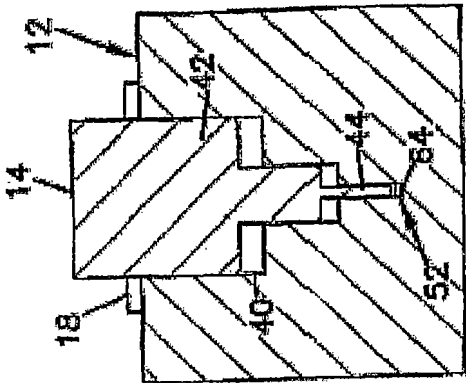


图 8

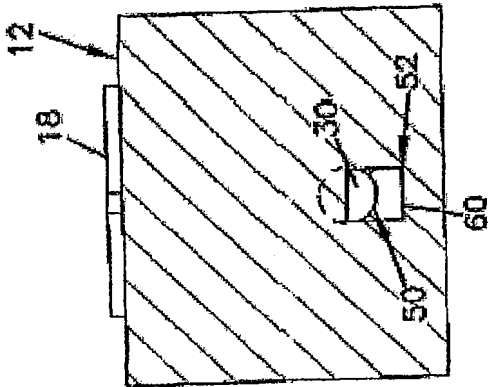


图 7

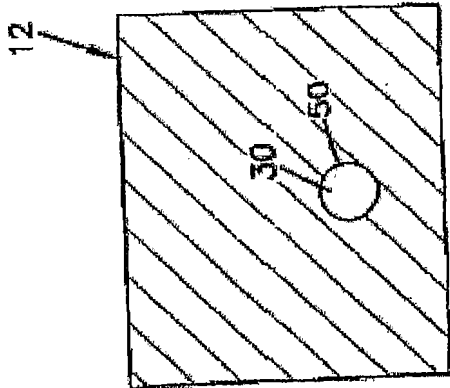


图 6

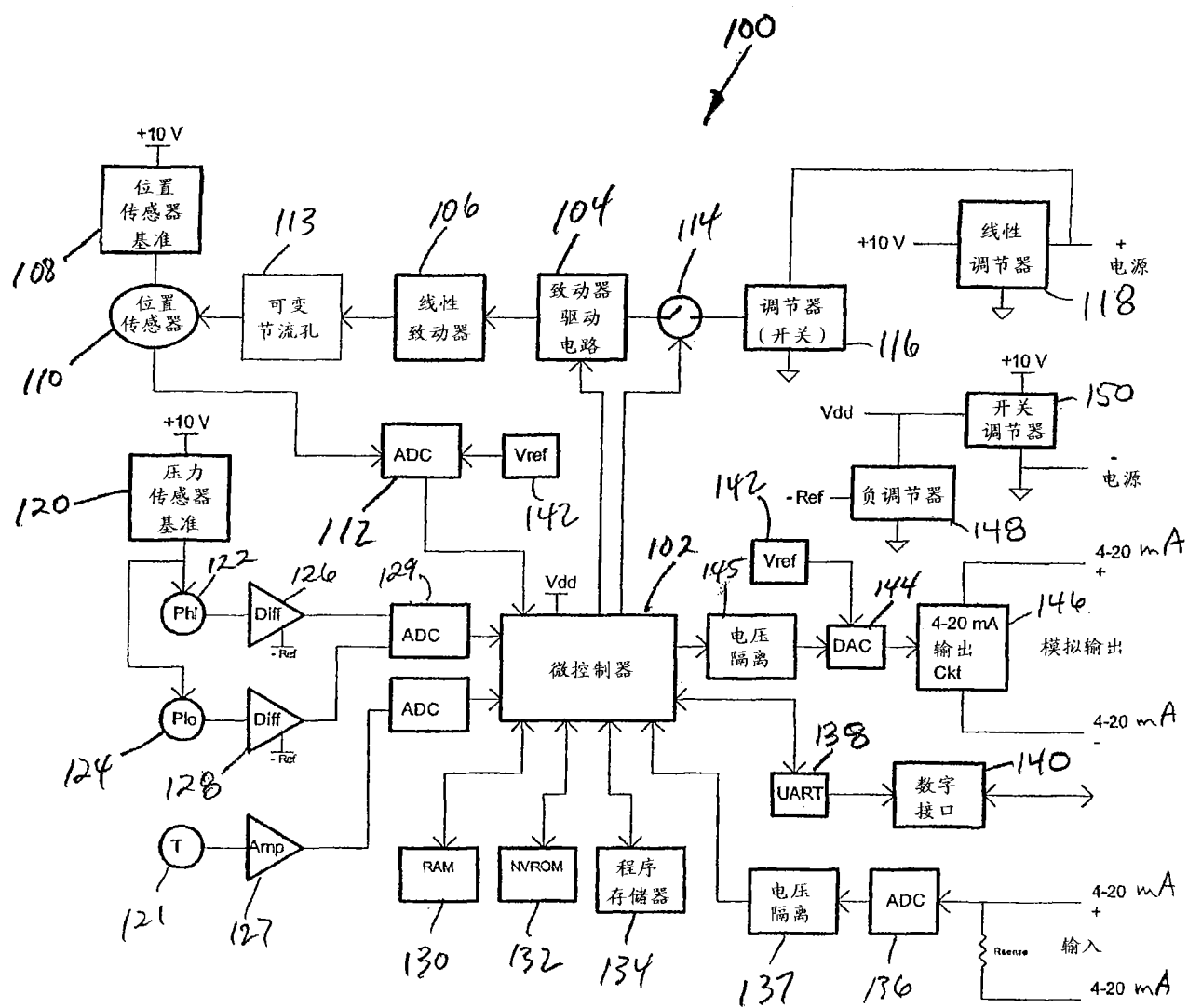


图9

		差压							
		0 psi	1 psi	2 psi	3 psi	4 psi	5 psi	6 psi	7 psi
节流孔开口	0.01 in ²	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72
	0.02 in ²	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73
	0.03 in ²	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74
	0.04 in ²	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75
	0.05 in ²	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76
	0.06 in ²	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77
	0.07 in ²	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78
	0.08 in ²	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79

图10

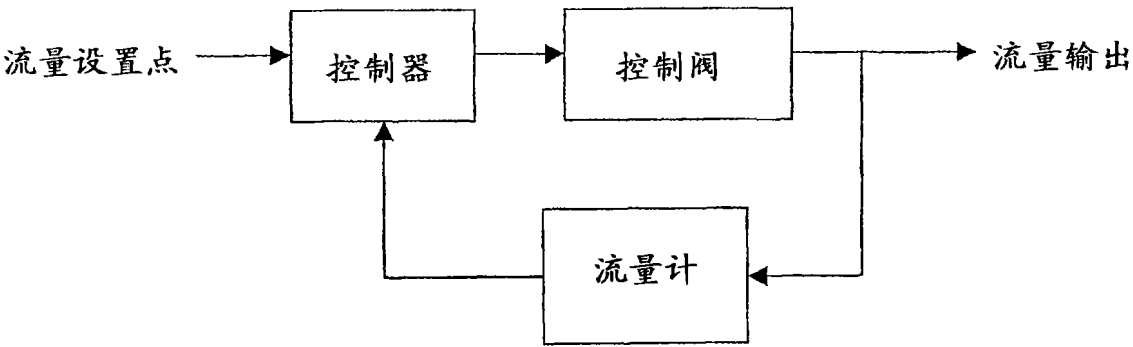


图11

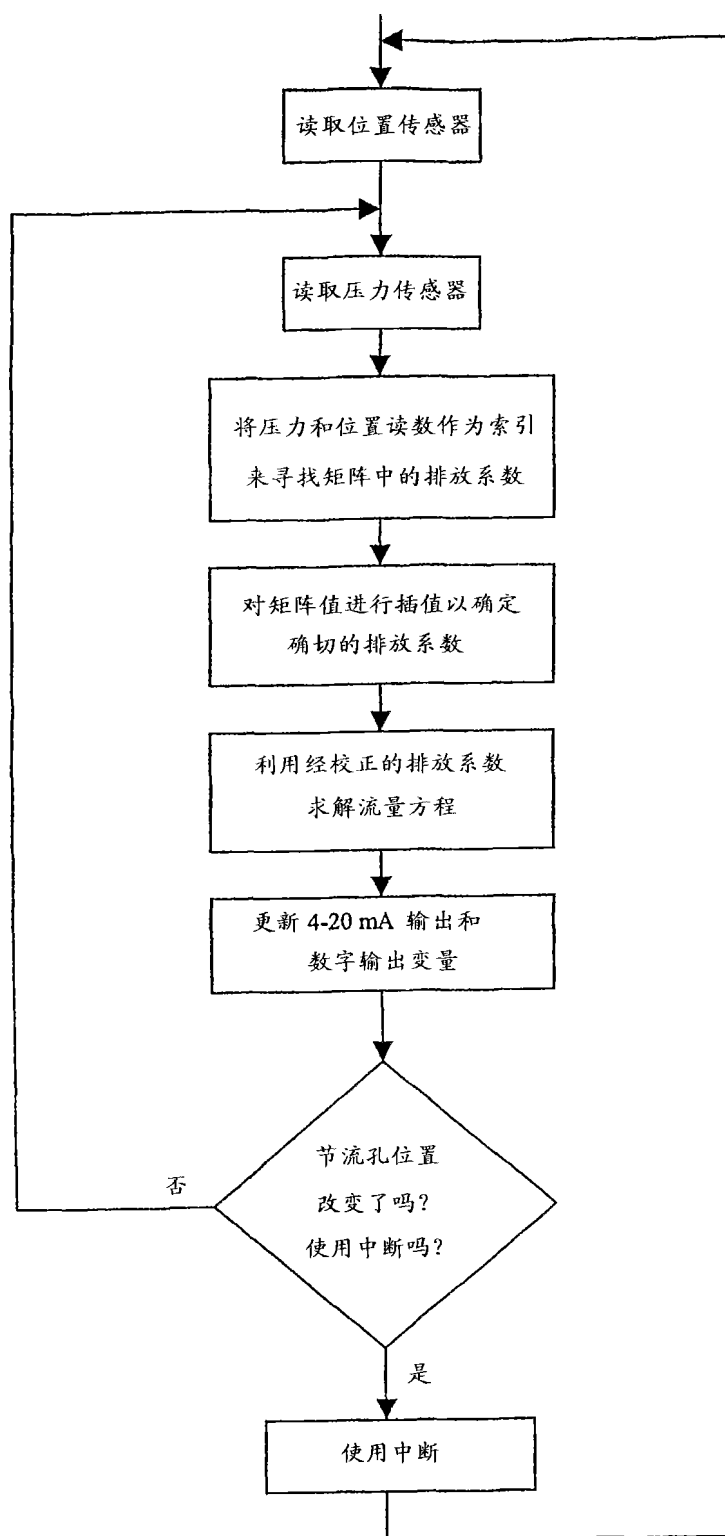


图 12

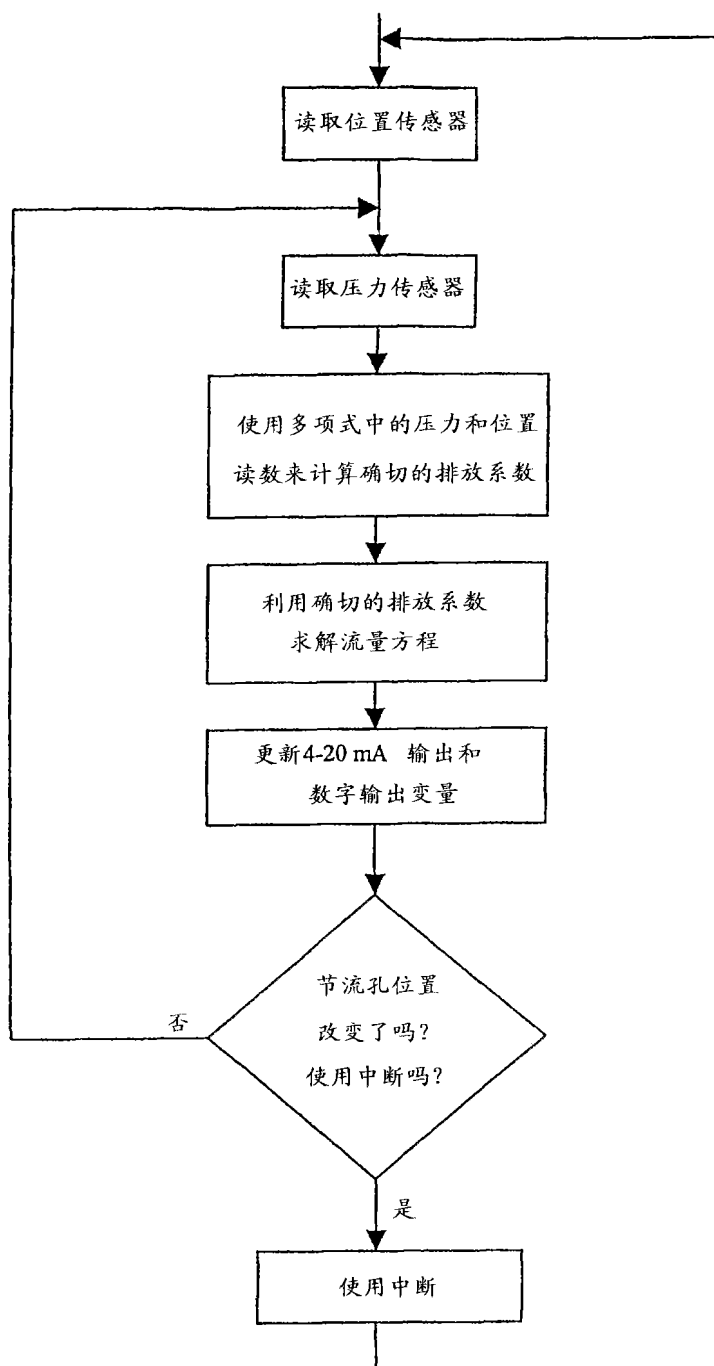


图13

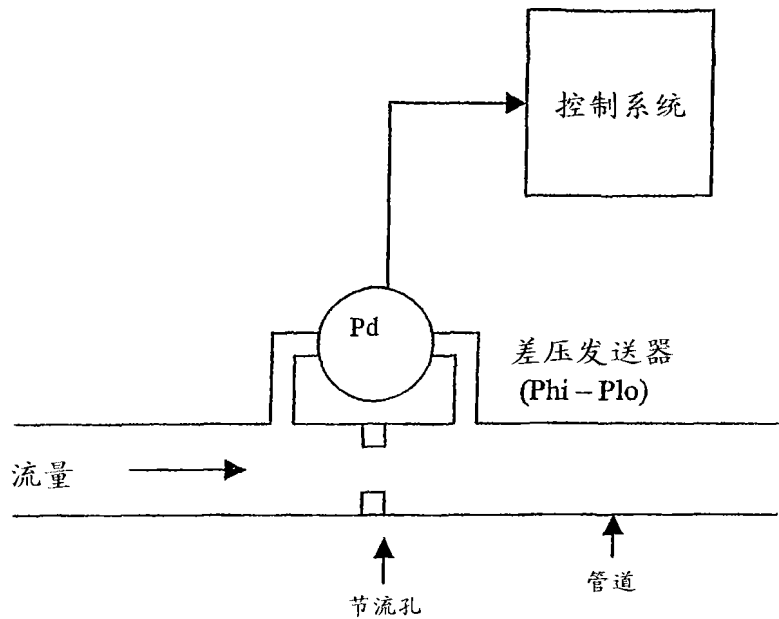


图14

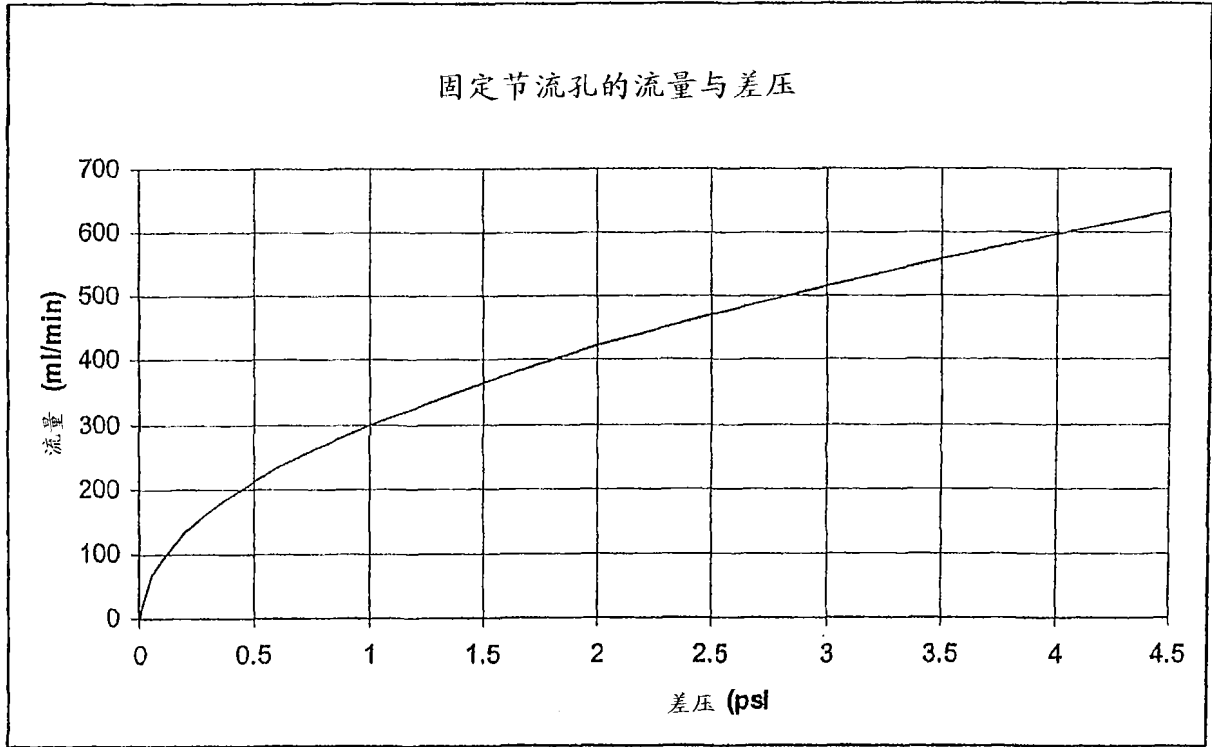


图15

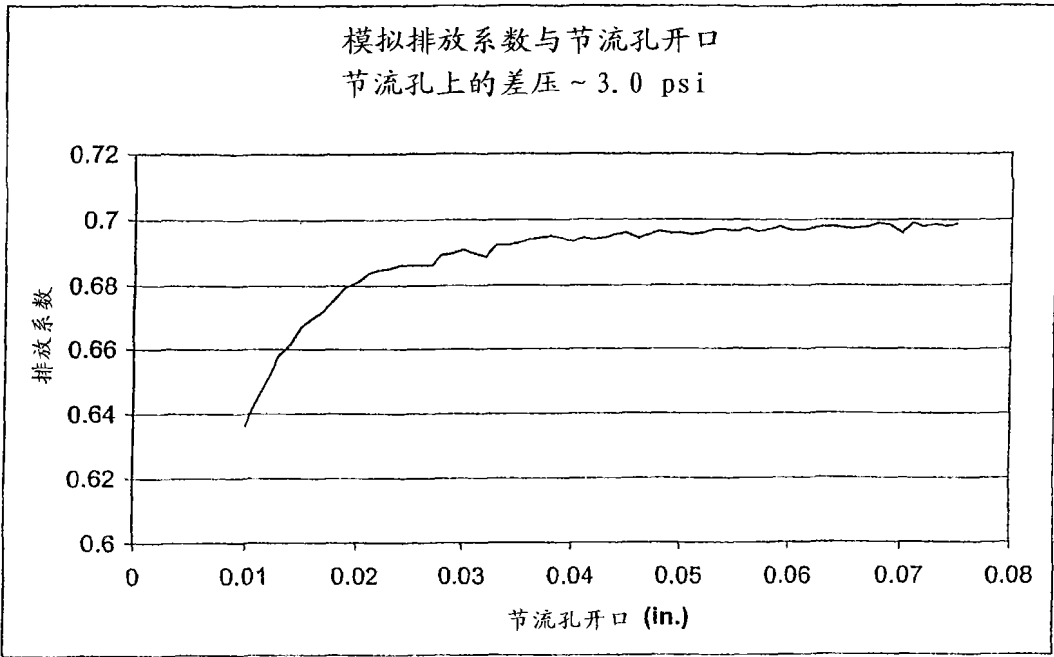


图16

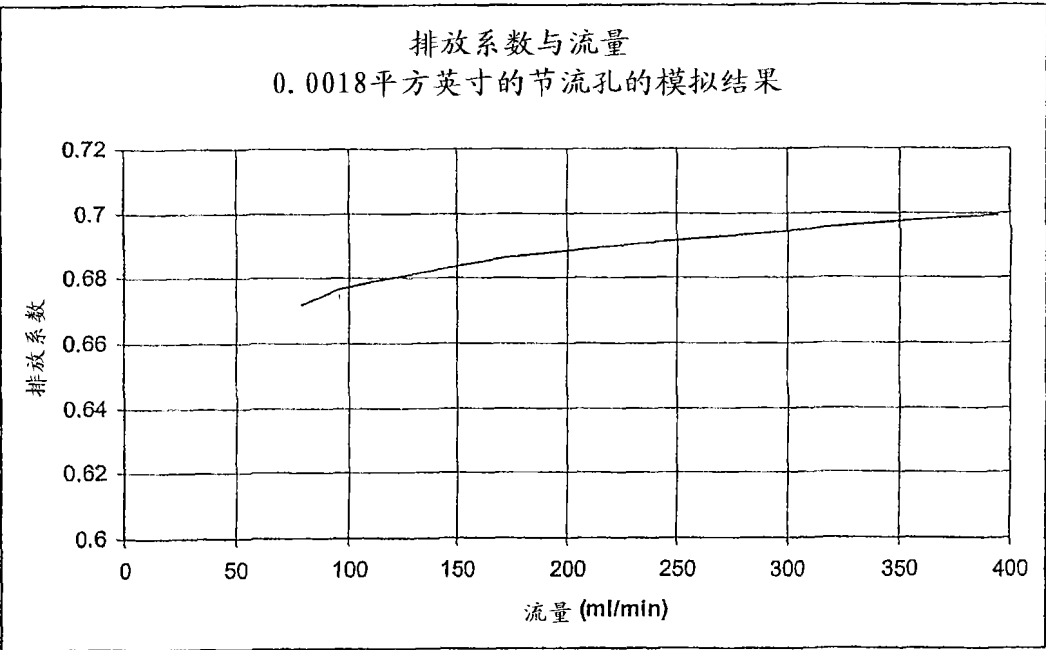


图17

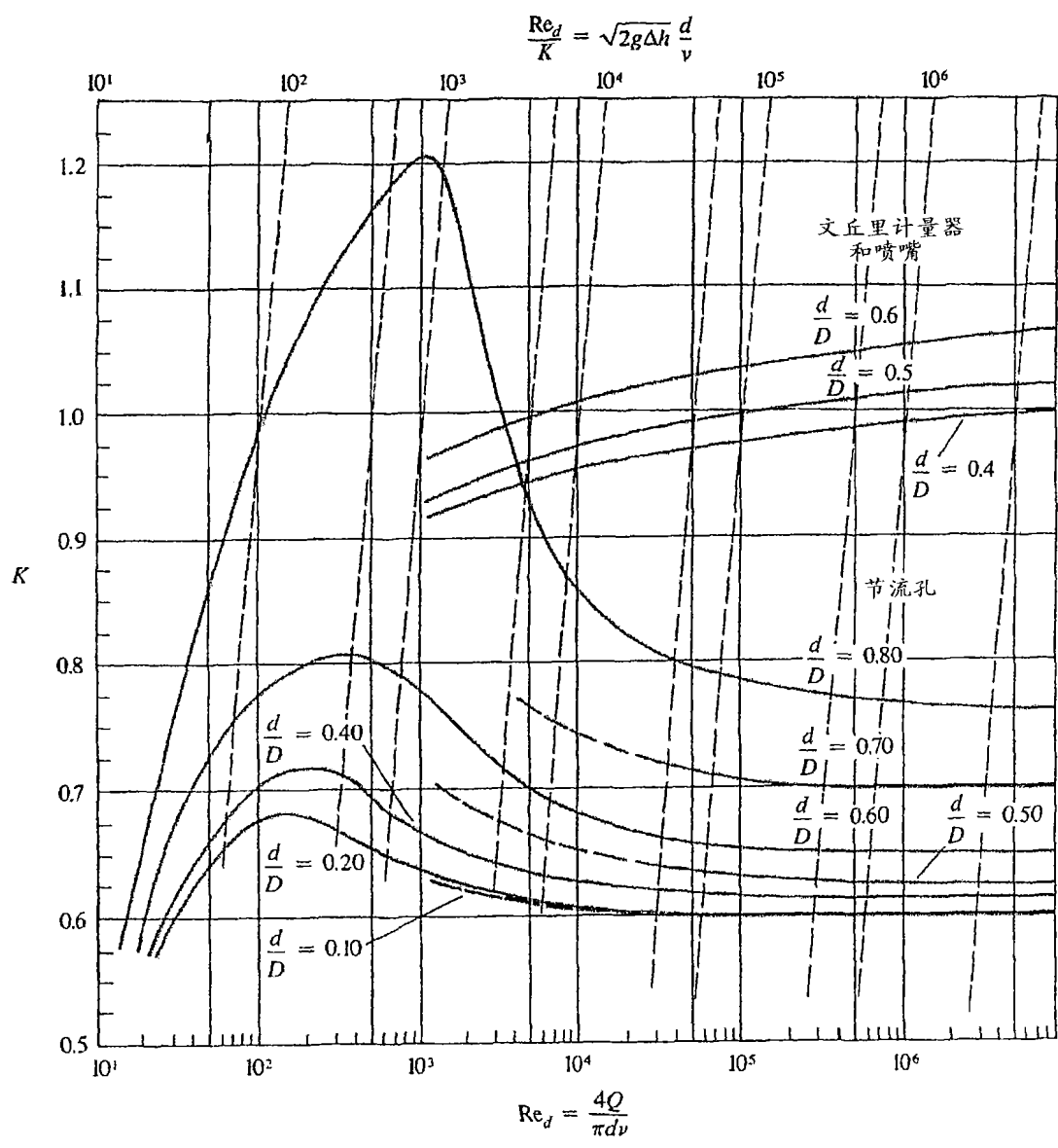


图18

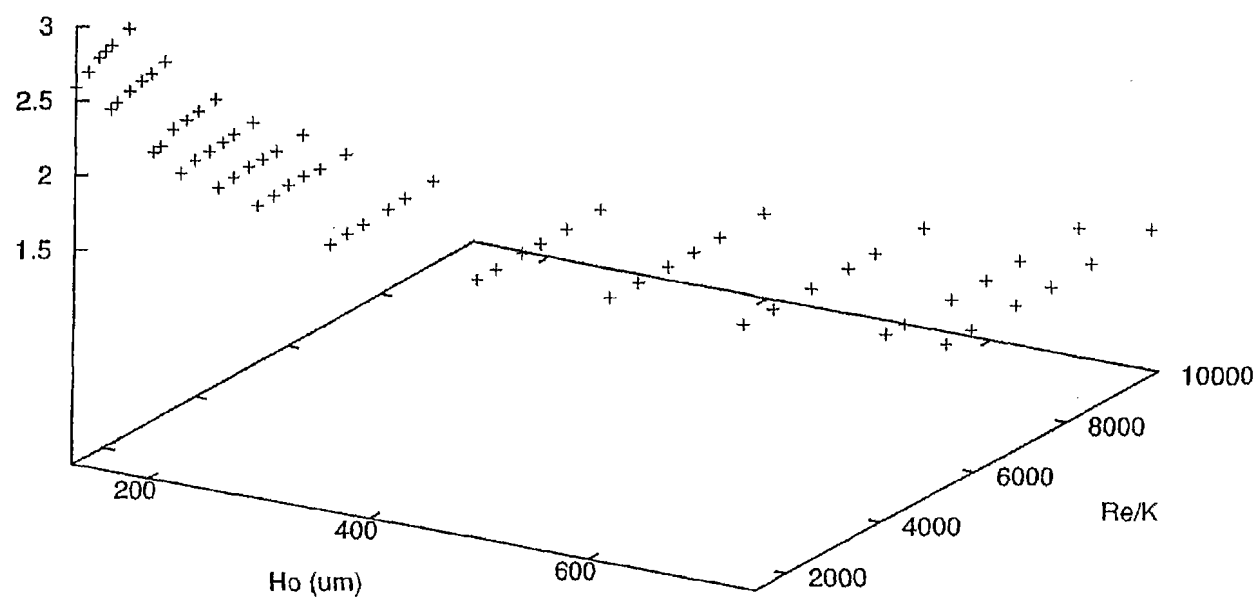


图19

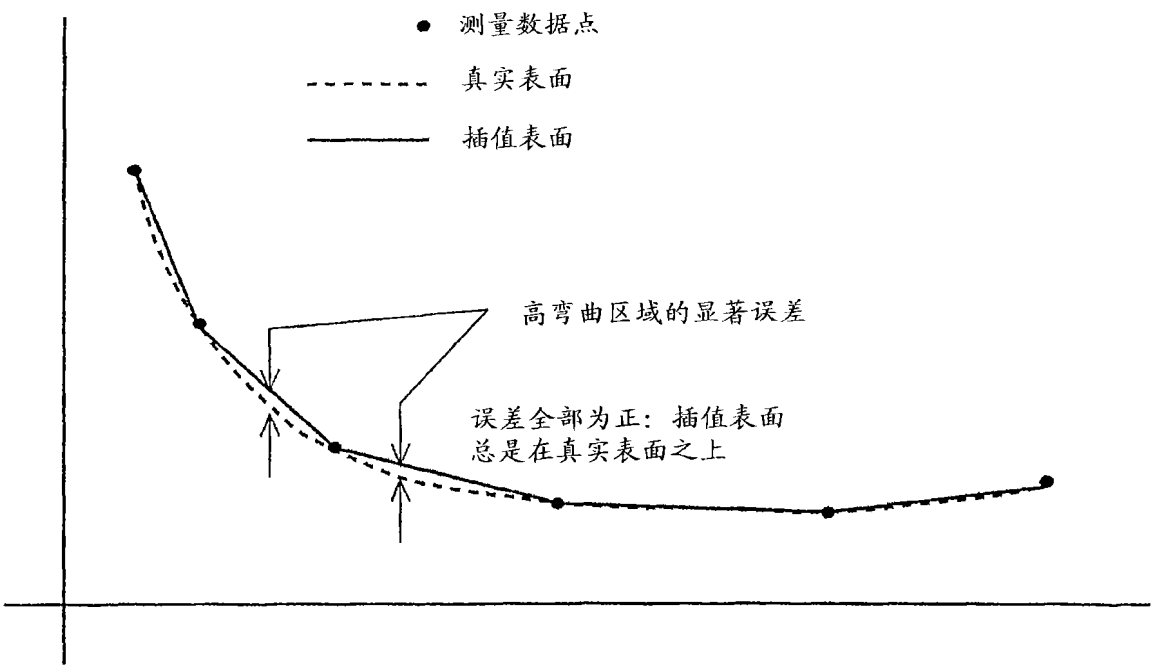


图21

□ 阀位置	Re/K	K
131.0	1336.6	2.590
131.0	1593.4	2.647
131.0	1823.0	2.705
131.0	1962.4	2.725
131.0	2092.1	2.744
131.0	2462.9	2.793
151.5	1593.0	2.428
151.5	1723.0	2.450
151.5	1990.6	2.482
151.5	2242.3	2.508
151.5	2469.2	2.519
151.5	2757.8	2.546
179.0	1863.4	2.133
179.0	2014.8	2.146
179.0	2278.3	2.215
179.0	2571.5	2.226
179.0	2829.0	2.242
179.0	3203.3	2.258
200.5	1935.3	2.009
200.5	2243.8	2.042
200.5	2555.8	2.050
200.5	2856.9	2.060
200.5	3098.6	2.073
200.5	3504.8	2.078
226.0	2149.7	1.915
226.0	2479.9	1.924
226.0	2803.5	1.938
226.0	3103.7	1.939
226.0	3397.0	1.942
226.0	3978.1	1.950
251.0	2404.1	1.784
251.0	2755.5	1.791
251.0	3068.7	1.807
251.0	3397.5	1.812
251.0	3742.5	1.795
251.0	4304.1	1.795

□ 阀位置	Re/K	K
301.0	2779.4	1.526
301.0	3143.5	1.533
301.0	3495.4	1.533
301.0	4051.0	1.536
301.0	4395.4	1.547
301.0	5002.1	1.555
403.0	4519.2	1.302
403.0	3539.0	1.290
403.0	3940.5	1.292
403.0	4912.8	1.299
403.0	5491.1	1.297
403.0	6259.7	1.299
502.0	4098.4	1.218
502.0	4729.4	1.208
502.0	5373.7	1.203
502.0	5936.9	1.200
502.0	6502.5	1.200
502.0	7452.9	1.201
604.0	4585.7	1.092
604.0	5212.7	1.091
604.0	6034.3	1.085
604.0	6829.0	1.082
604.0	7390.4	1.083
604.0	8412.8	1.081
702.5	5269.1	1.044
702.5	5661.7	1.047
702.5	6658.1	1.039
702.5	7405.8	1.040
702.5	8124.0	1.045
702.5	9402.8	1.050
752.5	6842.9	1.038
752.5	7613.2	1.031
752.5	8485.3	1.034
752.5	9794.5	1.040
752.5	5896.8	1.038
752.5	5356.0	1.035

图20

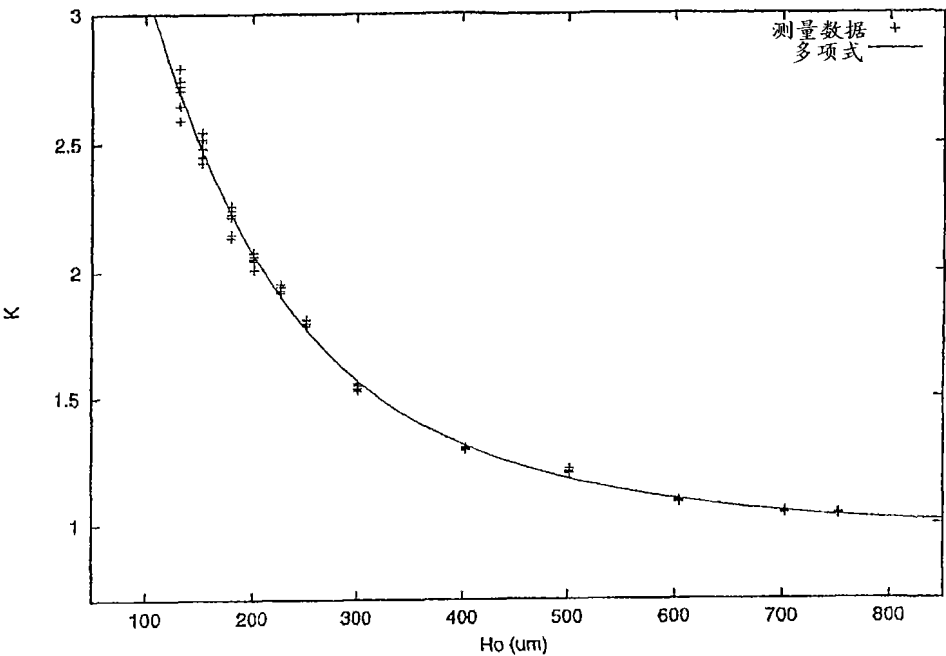


图 22A

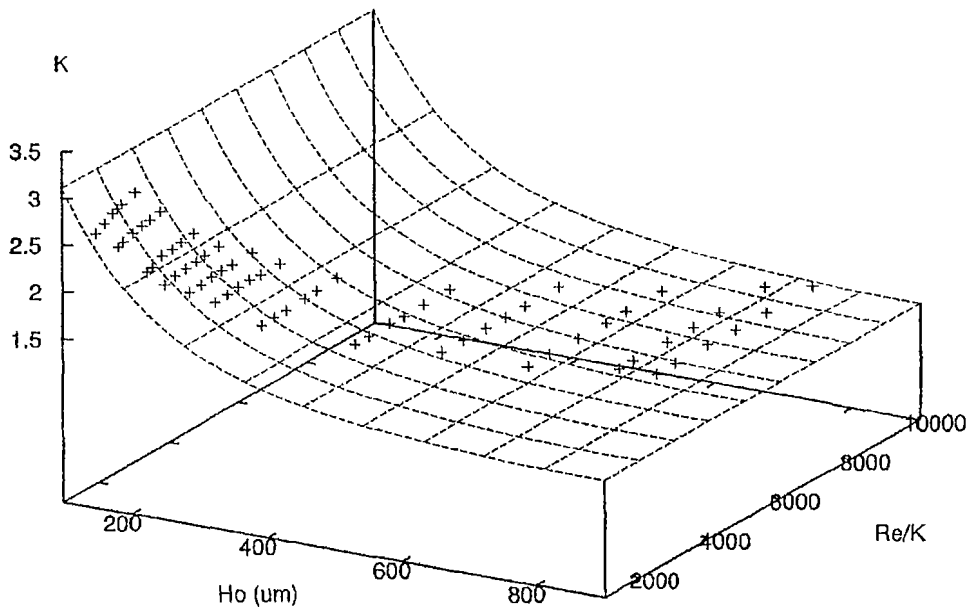


图 22B

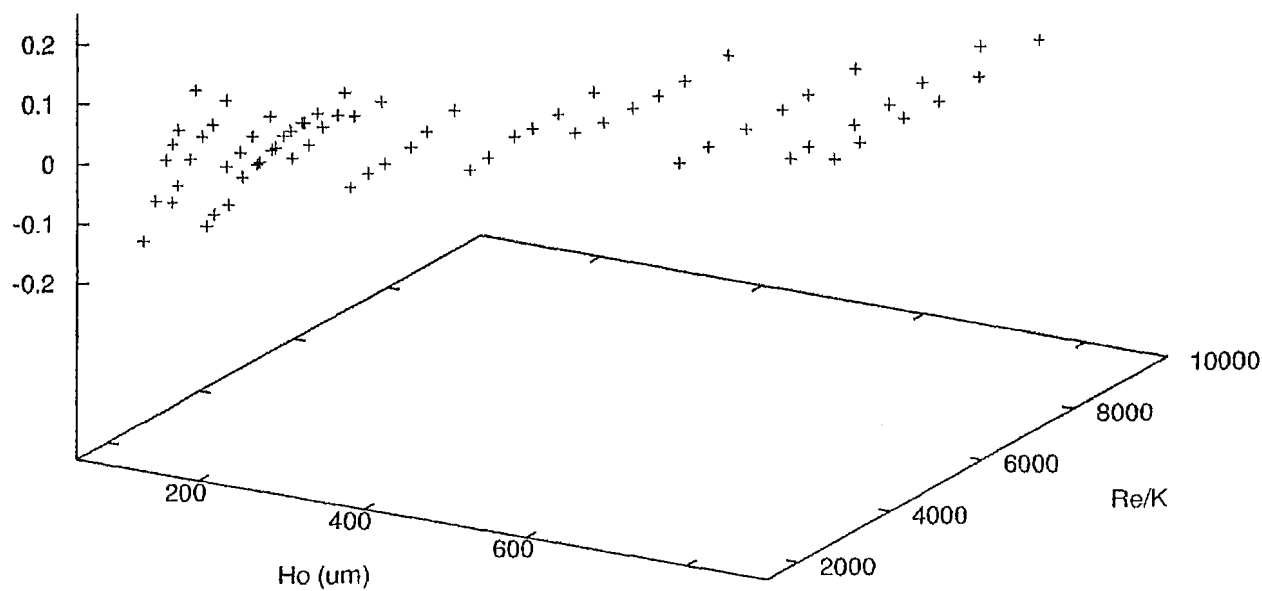


图23

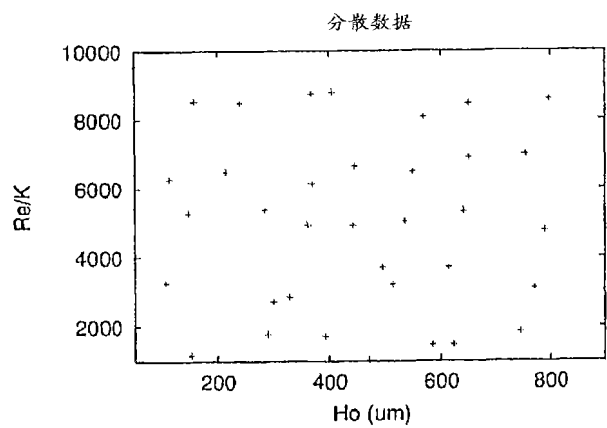


图24A

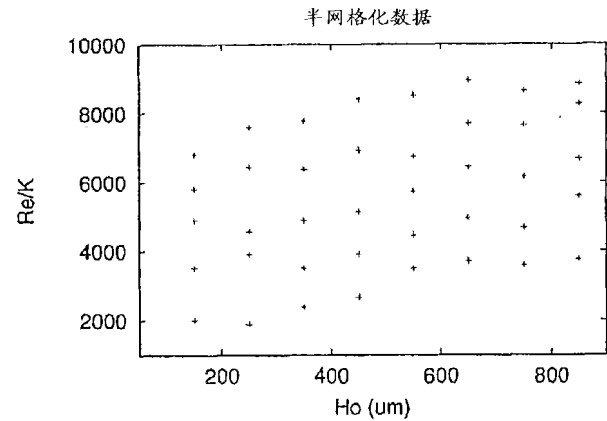


图24B

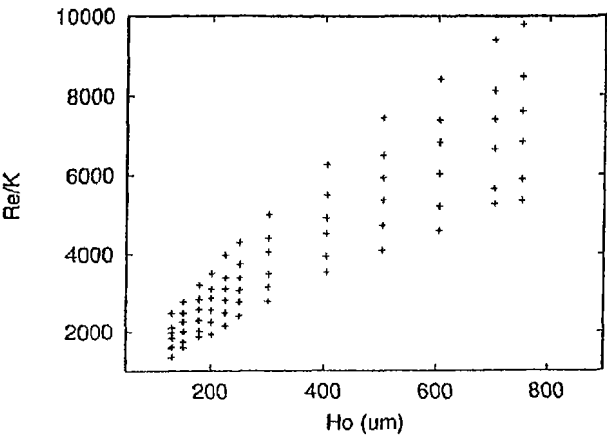


图 25A

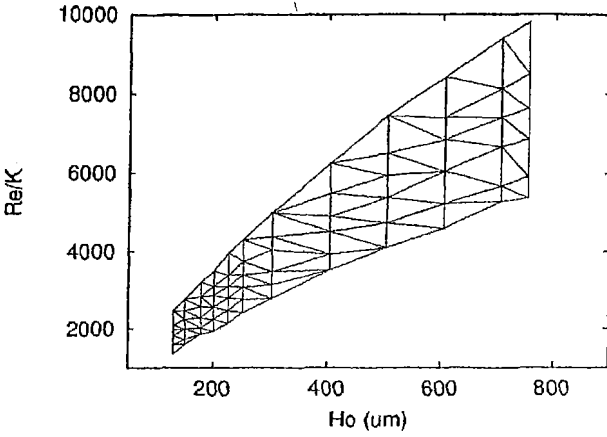


图 25B

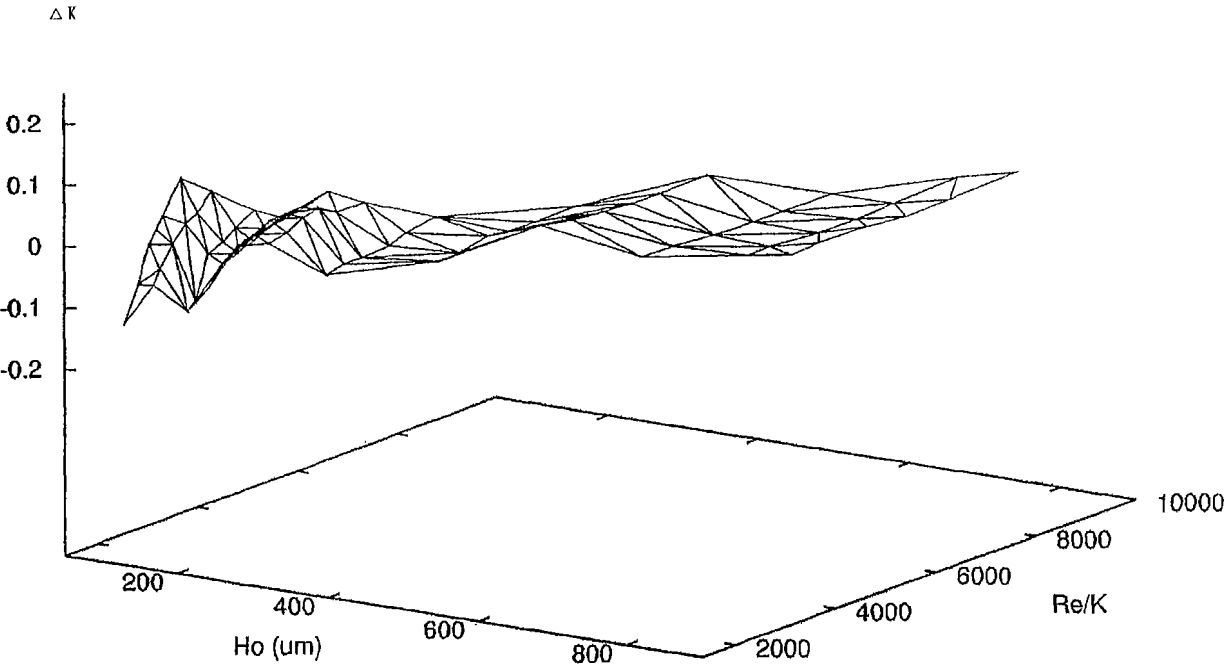


图 26

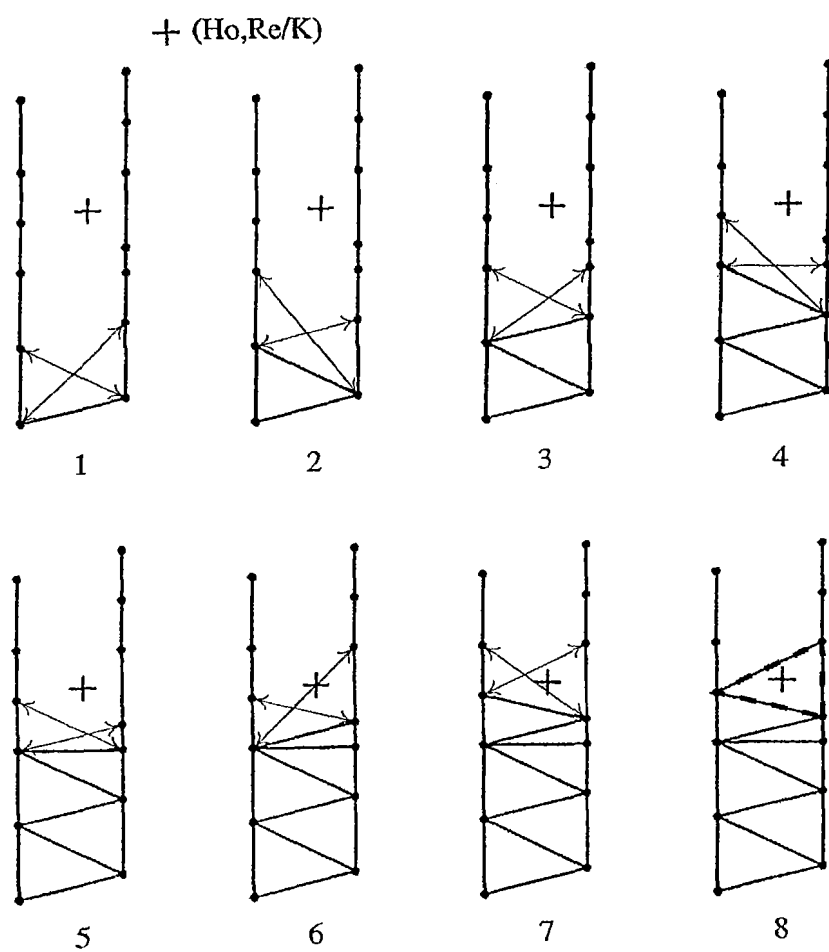


图 27

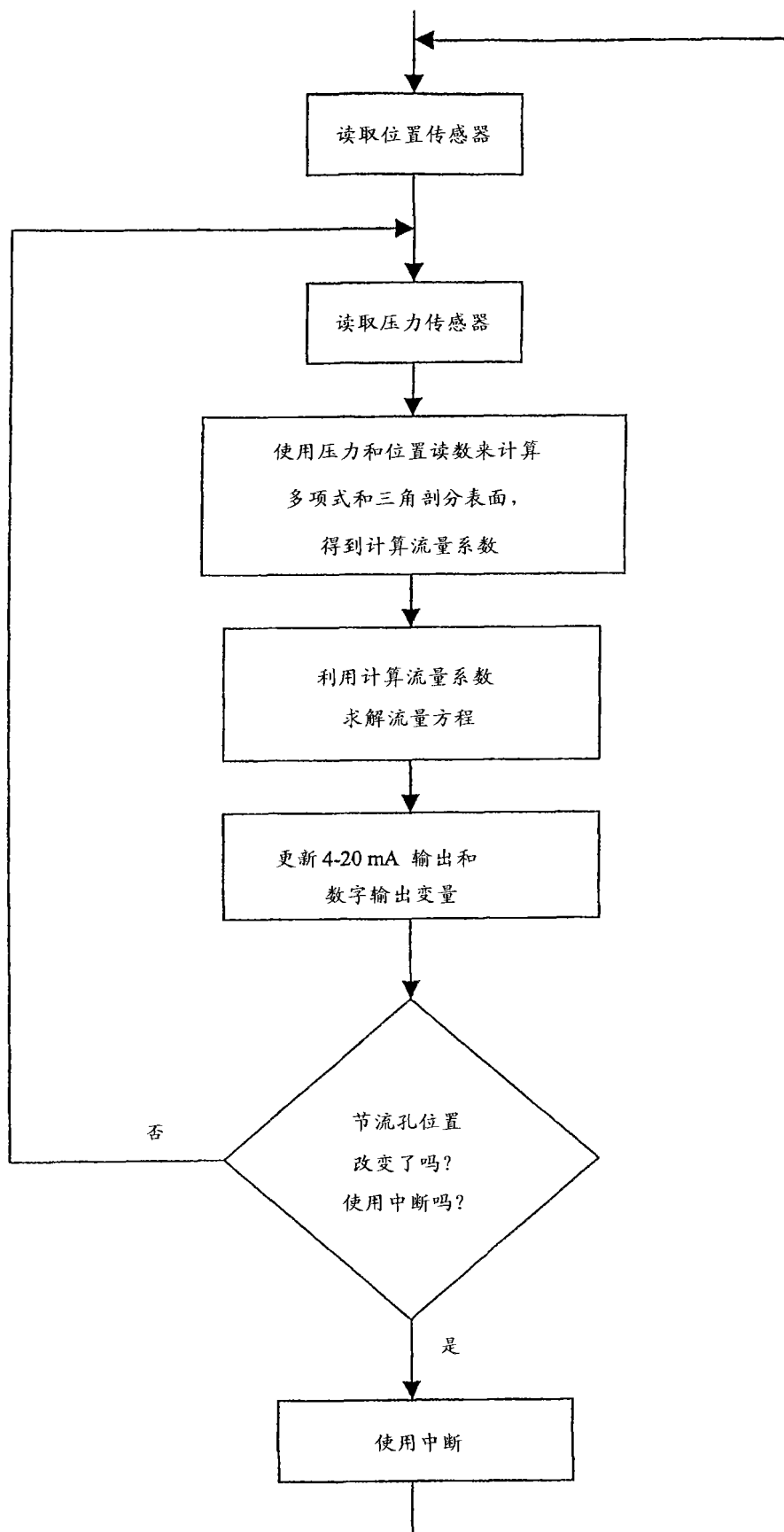


图28