

作者序：著名的天文物理学家洛德·凯尔文（Lord Kelvin）曾说“你如能用数字来描述事物，说明你对它有所了解，否则，你在这方面的知识就有限了……。”用仪表测试的数据，最科学、最客观。

用测试数据评估环形通道流量仪表

毛新业

一 背景

百年来，节流装置在流程工业所用流量仪表中，一直处于绝对优势，近二三十年来，虽涌现了不少如电磁、超声等新型仪表，但要取代节流装置并非一朝一夕之事。况且，节流装置面对新的形势，也在不断改进中。环形通道节流装置的出现正成为业界关注的热点。



本文作者毛新业先生

的单位及设备都必需用仪表进行监测。流量仪表监测了除电及固态煤以外的油、气能源及载能工质（水蒸气），这类流量仪表都应具有一定准确度而本身永久压损不太大。

3. 形势催生新型仪表

上述二个要求，迫切

寻求一种新型流量仪表，其性能应为：直管段要求不长，仍能维持较高准确度；永久压损小；重量/口径比（或体积/口径）不宜太大，价格不宜太贵等。在此背景下，近年来国内不少媒体、研讨会都推荐美国 McCrometer 公司 1986 年推出的内锥流量计（亦称 V 形内锥流量计），在扬长避短的宣传下，在全国流量行业掀起了一股“内锥热”。甚至还有人鼓吹“从节能降耗要求应大力推广内锥流量计”，在业内引起不少争议。内锥流量计是否如国外产品说明书所说的那么完美？不能盲目轻信，而应通过自己的科学试验，用测试数据给予公正的评价，优点要肯定，缺点也要指出，进行改进。只有做到了心中有数，才能逐步推广应用，而不能急于求成。

令人欣喜的是国内近

关键词：环形通道 内锥 准确度
永久压损 直管段长度

毛新业先生，高级工程师。

几年已有不少人对内锥流量计进行了系统的测试（如天津大学）；也有人提出了一些改进产品（如槽道、梭式、内文丘里、塔式……）。

二 内锥式流量计

1. 环形孔板的启发

孔板作为经典节流装置的代表，成功应用于流程工业近百年，但由于它使流体被迫节流主管道中心，急剧磨损孔板的上游边缘，从长期看其准确度并不理想，此外它还要求前直管段太长，压损太大，不宜测脏污流体等缺点。优化改进工作一直在进行中。Howell 于 1939 年提出了环形孔板的设想，即置一圆板于中心，形成环形通道，令流体从

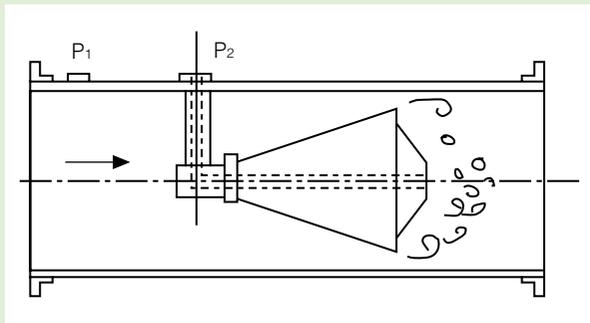


图1 内锥式(V-cone)流量计

1. 新标准出了个难题

数年前，国际标准化组织 ISO/TC 30 公布了节流装置新标准 ISO 5167 - 2003，并于 2003 年贯彻实施。新标准规定经典节流装置欲取得较高准确度还应加长前直管段长度，最大可达 40D（D 为内径）。在现代工业管径日益增大的情况下，现场很难满足这个要求；而在全球经济市场化的形势下，贸易计量核算又不允许降低准确度。严峻的形势需迫切寻求一种对直管段要求较低又能保持较高准确度的节流装置。

2. 能源监测的要求

“节能减排”是我国“十一五”经济计划中的重要国策，为此，制定了国标 GB 17167。它要求用能达到一定水平

中心收缩改为在管壁收缩。Bell(1957)、Bergelin(1962)相继对21组样机进行了测试,研究表明,环形孔板所形成的环形通道具有整流作用,对仪表上游的阻力件不敏感,具有在上游直管段不长的情况,仍能保持测试时较高的准确度,但其压损仍较大,边缘也易磨损。

表1 不同参数内锥流量计流出系数C及误差Ea%

前锥角	后锥角	$\beta=0.5$		$\beta=0.65$		$\beta=0.85$	
		C	Ea%	C	Ea%	C	Ea%
40°	120°	0.8733	5.5%	0.8515	2.11%	0.7322	7.4%
45°	130°	0.8606	1.84%	0.8421	2.0%	0.7178	0.7178%
50°	140°	0.8516	1.00%	0.8249	2.2%	0.7042	6.4%
Ea%平均值			2.7%		2.1%		7%

上世纪80年代中期,美国McCrometer公司,将节流件改为内锥,推出了内锥式流量计(见图1),它不仅具有环孔对直管段要求不高仍能保持较高准确度的优点;还具有边缘不易磨损,可保持长期准确度,以及脏污流体易被冲刷等优点,特别适用于测如高炉、焦炉煤气等湿气体的流量。

2. 机理分析

内锥流量计的前锥体与管壁形成的逐渐收缩的环形通道(国内亦有称为边壁收缩),迫使流体加速、降压,在流体力学试验中证明是可以减小、甚至消除上游由阻力件带来的漩涡;而内锥的最大直径与管壁形成的最窄环形通道其作用类似于流动调整器的管束(或板孔),具有消除漩涡改善流动方向的作用。因而,可以说内锥具有节流与整流的双重

作用。

3. 实流测试

天津大学自动化工程学院等单位自2003年开始,对内锥流量计的特性及影响因素进行了系统的测试研究,现列出其部分测试数据(表1)。

a 充分发展紊流

测试条件:上游具有30D直管长度(D内径),介质为

空气,流量基准: $\pm 1\%$ 气体涡轮流量计,内锥流量计的样机: β 值为0.5, 0.65, 0.85三种;前锥角为40°, 45°, 50°三种;后锥角为120°, 130°, 140°三种,共组合为27种不同参数样机。

原文中采取了仿真及实流测试二种方法,由于仿真试验的模型略去了前支承立柱,与实际情况有较大出入,本文略去相关内容。

实流测试表明:(见表1)

(1) β 值的影响

随着 β 值的增大,流出系数C有减小的趋势。 β 值处于0.5~0.65之间时,流出系数的分散性(原文定义为误差)较小,约2~3%;而当 $\beta=0.85$ 时,流出系数C的分散性可达7%以上。

(2) 前锥角的影响

较大的前锥角可减小雷诺数Re对

流出系数C的影响。随着前锥角的增大,流出系数有减小的趋势。

(3) 后锥角的影响

后锥角对流出系数影响不大(本文略去相关参数),也许是所选三种后锥角相差无几。普遍的规律是流出系数随着后锥角增大有减小的趋势。

内锥流量计的 β 值选取0.5~0.65较合适,当 β 值选用0.5时,宜选取较大的前锥角。 β 不宜采用0.85,如前所述,选用过大的 β 虽可减小压损,但已失去整流作用。

b 上游阻力件的影响

内锥流量计自80年代问世以来,其安装条件(即不受上游阻力件的影响,而能维持较高的准确度)是最受研究机构、生产厂商及用户关注的热点,也是经典节流装置无法与之抗衡的优势;Stephen. A. Ifft等人于1993年研究测试了上游单个、双个90°弯头对内锥、孔板准确度的影响,认为内锥的抗干扰性优于孔板;又于1996年研究测试了上游为阀门时,其开度对内锥流量计准确度的影响;1995年, J.S. Shen等人开展了内锥流量计的抗旋流特性测试,之后, S.N. Singh, Darin George等也对此进行了测试研究。2004年至今天津大学对内锥流量计的特性进行了一系列的测试,取得了宝贵的成果。

(1) 弯头的影响

内锥流量计样机 β 值选用0.45, 0.65, 0.85三种。内径为100mm。

阻力件弯头为三种:90°单弯头;

表2 不同等效直径比、阀表间距、阀开度的流出系数

等效直径比 β	0.643						0.77					
	5D		10D		15D		5D		10D		15D	
阀开度	流出系数Co											
	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差
全开	0.7145	0	0.7157	0	0.7123	0	0.7207	0	0.7207	0	0.7205	0
开75%	0.7396	3.51%	0.7136	-0.30%	0.7170	0.66%	0.7277	0.97%	0.7195	-1.67%	0.7210	0.07%
开50%	0.7482	4.72%	0.7147	-0.14%	0.7167	0.62%	0.7490	3.92%	0.7199	-1.11%	0.7195	-1.39%
开25%	0.7540	5.53%	0.7157	0.00%	0.7152	0.41%	0.7790	8.09%	0.7197	-1.39%	0.7210	0.07%

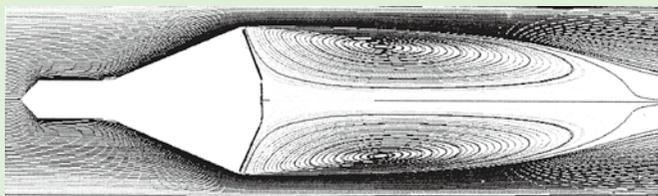


图2 锥体附近的流线图

90° 双弯头处于同一平面；90° 双弯头处于相互垂直平面，双弯头之间无直管道。阻力件（弯头）与内锥流量计之间的距离为 0、1D、2D、5D 四种。如此排列组合共进行了 35 种类型的测试，测试介质为水。测试数据由于尚未公开发表，本文不便直接使用，仅介绍其测试结论：如需保持 ±1% 的准确度，当内锥流量计 $\beta=0.45 \sim 0.55$ 时，上游应不少于 2D 直管段；当 $\beta=0.65$ 时，直管段应不少于 3D ~ 5D；当 $\beta=0.85$ 时，直管段应不少于 10D。

(2) 阀门开度的影响

S.A.Ifft 研究测试了阀门开度及与仪表间距对内锥流量计流出系数的影响。

内锥流量计 $\beta=0.643, 0.77$ 二种；间距采取 5D, 10D, 15D, 阀门开度为全开, 开 75%、50%、25% 共 4 类，介质为水，测试结果列于表 2。数据表明：

当 β 值等于 0.643 时，阀门开度为 25%，上游直径仅 5D，流出系数误差为 5.53%；当 β 值等于 0.77 时，仍处于上述情况，误差可达 8%。即说明，当阀门仅打开 25% 时，直管段长度不应小于 10D。遗憾的是所选 β 值都较大，如 β 值选 0.45 ~ 0.55，有可能会缩短所需直管段长度。

(3) 加工、安装的影响

表3 水标定内锥流量计流出系数离散性

管径(mm)	β	流出系数c范围	离散性%
100	0.47	0.8633 ~ 0.8752	1.375
150	0.60	0.8275 ~ 0.8400	1.51
200	0.55	0.8165 ~ 0.8428	3.18
600	0.43	0.7867 ~ 0.8314	5.68
800	0.44	0.8209 ~ 0.8600	4.76

当前研究、测试的样机，尺寸都较小，内径一般未超过 100mm，采用单臂立柱安装形式，锥体的加工以及安装的同心度均易于保证。如果尺寸大了，如内径在 300mm 以上，加工、安装就难以保证了，对准确度的影响将暴露出来。天

仪表并呼吁从节能降耗看应大力推广。天津大学采用稳态时间法对内锥 RSM 模型 ($\beta=0.65$, 前锥角 45°, 后锥角 130°) 进行了仿真试验，得到了内锥附近的流线图 (图 2)，从图可见，流体在内锥尾部出现分离，显现了一个较大的漩涡区，必将产生较大的永久压损，根据实测拟合内锥流量计永久压损 ΔPe 的公式为：

$$\Delta Pe / \Delta P = 1.3 \sim 1.25\beta \quad (\Delta P \text{ 为输出压差})$$

将其与其他节流装置的压损随 β 变化，绘于图 3。由图 3 可见，内锥流量计的永久压损仅次于孔板而大于其他节流装置。现在不少人要说明自己研制的仪表是节能的，总是与孔板进行比较，怡笑大方。

(5) 小结

(a) 大量数据说明内锥流量计因具有环形通道，与经典节流装置相比，确具有无需较长直管段而可维持较高准确度的优点，但并非某些宣传所说长直管段仅需 0~3D。根据现场不同情况及内锥的 β 值，前直管段长度应有 3~10D。

(b) 内锥流量计的压损仅次于孔板，并非节能仪表，如采用较大的 β 值 (如 $\beta=0.85$)，研究表明，它几乎失去抗上游扰动的作用。所以，整流效果与压损是相互制约，不可兼得的。

(c) 内锥式流量计的优点要充分肯定，但要实事求是，它并不像某些宣传所说的那么完美，实践证明他还有些不足之处 (如：悬臂支承立柱易产生振动，压损较大，尾锥后取压孔易于堵塞……)。这些不足正是创新的切入点，近几年又推出一些具有环形通道的新型节流装置，

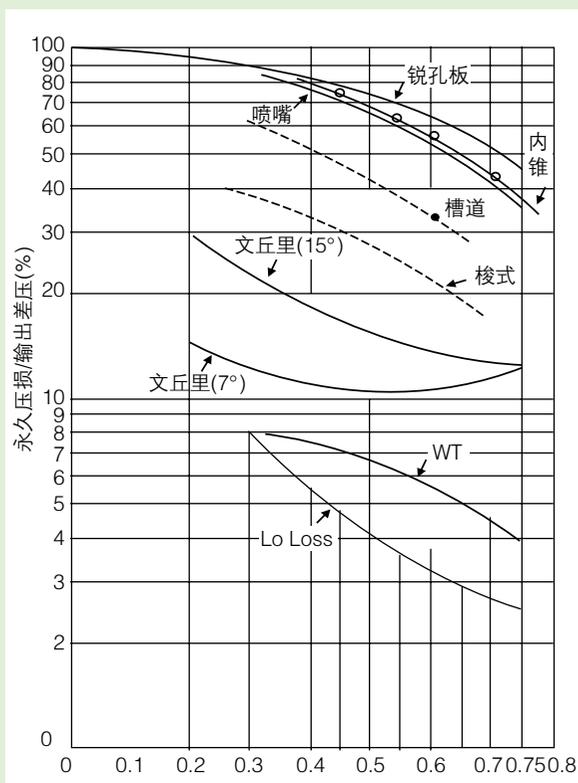


图3 各种节流装置 β 值与永久压损的关系

津科特公司对内径 100 ~ 800mm 的内锥流量计，在水流量实验室进行了测试，结果列于表 3。当口径小于 150mm 时流出系数分散度小于 ±1.5%；当内径大于 200mm 时，分散度将大于 ±5%。

(4) 永久压损的评估

当前，“节能减排”已成为我国经济建设的重要国策，国内外厂商也纷纷推出永久压损较低的节能型流量仪表，在某些文章中认为“内锥流量计在尾锥后仅形成高频、低幅“噪声信号”，因而压损小是节能

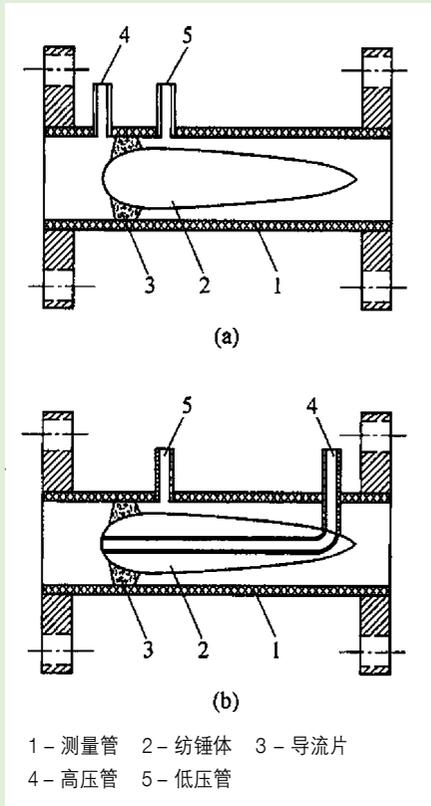


图4 槽道流量计简图

简介如下。

三 新型环形通道节流装置

1. 槽道流量计

由我国南京优杨技术公司推出。

a. 结构简介

主要结构如图4,有a、b两种形式。节流件为流线纺锤体,沿管道轴线安装,中部具有一段较长的等直径段,与测量管内壁之间形成均匀的环形通道。如测清洁流体采用4b形式,一般情况采用结构较简单的4a形式。

流量计的入口有4片导流片,既可改善流场,又起固定纺锤体的作用。由于具有较长的环形通道,它也具有内锥流量计的抗扰动性能,即无需较长直管段也可取得较高准确度。此外,由于纺锤体的流线型外形,不会产生漩涡,其压损在相同的 β 值下,可小于内锥流量计。

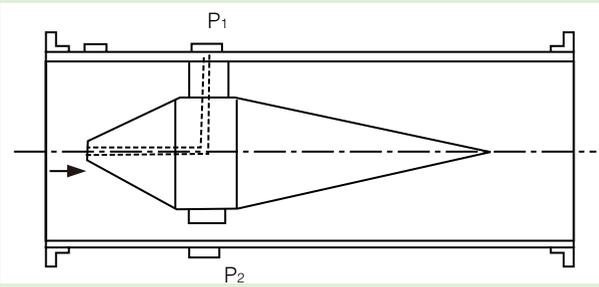


图5 梭式流量计

b. 实流测试

胜利油田对DN 50、DN100的两种槽道流量计在气体流量实验室进行了性能测试,装置的流量不确定度优于 $\pm 0.5\%$,重复性小于0.1%。

c 直管段影响

(a) 弯头

在槽道流量计上游1D~8D处安装了2~4个90°弯头,测试表明,要维持较高准确度 $\pm(0.5\sim 1)\%$,槽道流量计前直管段长度不得小于5D。

(b) 阀门

在槽道流量计上游6D处,安装了蝶阀,测试阀门开度对其准确度的影响。测试表明,要维持较高准确度 $\pm 0.5\%$,阀门开度不得小于50%,前直管段不得小于6D,文章还建议在正常工作时,阀门开度最好大于80%。

d 压损测试

由于槽道流量计的节流件为流线形纺锤体,不会产生漩涡,压损应比孔

板、内锥小。测试表明:在 $Re \geq 1.6 \times 10^5$ 时,其压损比 $Pe/\Delta P$ 为0.33,而孔板为62%,内锥为55%。

e 小结

槽道流量计的节流件所形成的环形通道以及入口处的支承都有整流效果,所以,

它的抗扰流性(即无需较长直管即可维持较高准确度)不亚于内锥,而力学结构牢固,压损小的性能优于内锥。

据介绍,槽道流量计在内径仅50mm时,纺锤体即达200mm,四倍于内径,仪表的长度将达5.5~7倍内径左右。在管径较大时就显得十分笨重,如果是图4a型,取压点在纺锤体前方,是否还有必要这么长的槽道?供厂家参考。

2 梭式流量计

这种流量计(见图5)2005年9月由国家知识产权局授权为专利产品,专利号(200420061026.9)。

a 简介

节流件为梭体,由前后二个锥体组成,前锥角为 $45^\circ \sim 60^\circ$,后锥角 $20^\circ \sim 30^\circ$,中间有较短的直管段。支柱为三个,相距为 120° ,剖面为对称翼形,将梭体固定在仪表内壁上。高压

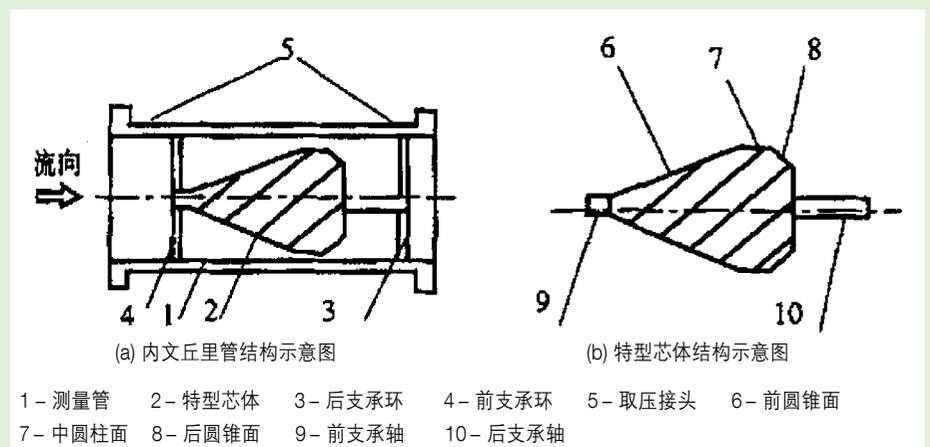


图6 内文丘里管流量计简图

取自前端管壁或前锥体中央；低压取自梭体的直管段部分，两个支柱之间，及环形通道最窄处。从设计思想上看，它倒像一个具有环形通道的“道尔管”（70年代推出的一种低压损节流装置）。

b 实流测试

(1) 条件

样机内径 100mm， $\beta = 0.64$ ，测试介质为水。

(2) 技术参数

流出系数误差 $\pm 0.3\%$ ，重复性 0.1%，量程比 15:1。

永久压损 $\Delta P_e / \Delta P = 0.205$

c 小结

从梭式流量计的初步测试表明：技术性能较好，特别是永久压损是槽道约 2/3，是内锥的 1/3。

梭体紧凑，仪表总长仅为内径的 2.5 ~ 3 倍，固定牢固，结构仍在不断优化中，具有较大的发展潜力。

3 内文丘里管

这种流量计（见图 6）由大连索尼卡

公司于 2001 年推出。

从图 6 可见，其节流件较内锥多了一个圆柱，处于前后锥体之间，设计者认为这样有助于改善流出系数的稳定性，支承固定节流件的方法借用了环形孔板固定的方式，较内锥单臂立柱牢固可靠，不易产生振动。

从已有文献发表的测试数据看：流出系数的误差为 $\pm 0.5\%$ ，量程比为 10:1，压力损失未见测试数据。由于节流件类似内锥，后锥角度大而短，并没有文丘里管的将动能转化为位能的扩张段，压损应与内锥相差无几，而大于槽道与梭式。

四 建议

(1) 测试应具有权威性

“内锥热”在我国已风行了几年，从开始的盲目追随、仿造，到理性的置疑，再到踏踏实实地进行测试（仿真、实流试验），这个过程令人欣慰！但测试后技术参数的确定却并不完全一致，这是因

为影响的因素太多，如样机的结构、测试的条件、试验室的流量不确定度等级，测试数据的取舍等都会影响技术参数的大小，测试的权威性已无法回避，提到日程上来。建议：首先应组成一个专家组，由他们来确定测试大纲；其次，应在有一定资质的试验室进行，这样得到的数据及结论才能令人信服。如果试验室的流量不确定度（或标准表的准确度）太低，所测数据就难以令人信服。

(2) 结构是否可以改进

内锥流量计是美国 McCrometer 公司 1986 年推出的，在近 1/4 个世纪的应用中已发现它的结构并不是那么完美，如用单臂立柱固定内锥易引起振动；低压取压点处于尾锥中央易于堵塞……我们如果要定型测试，是否可优化一下结构？本文后一部分介绍了 3 种环形通道流量计，都是针对内锥的弊病改进的，从测试的初步结果来看，性能都并不亚于内锥，它们是否可进入定型的候选行列，不要照搬国外的产品，请专家们参考。

