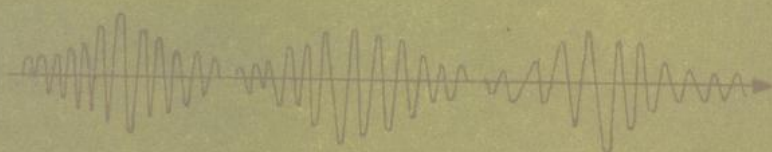


盛森芝 沈 熊 舒 玮 编著

流速测量技术



北京大学出版社

流 速 测 量 技 术

盛森芝 沈 熊 舒 玮 编著

北京大学出版社

内 容 简 介

本书在内容安排上依据三种不同的流速测量仪器分为三章。较为系统地描述了毕托管、热线热膜风速计和激光流速计的工作原理和使用技术。分析了这三种流速测量仪器各自的特点和实用范围。既侧重于物理说明和实用描述，又有一定的理论深度。对应用较为广泛的一些典型的流速测量仪器作了较为系统的分析。

本书可供从事流动测量的技术人员、实验工作者、高等院校有关专业的学生、研究生和教师以及有关科技人员学习参考。

流 速 测 量 技 术

盛森芝 沈熊 舒玮 编著

责任编辑：李怀玺

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 11印张 280千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数：00001—3,300册

统一书号：13209·172 定价：2.50元

前 言

人类在研究自然现象及其内在规律的过程中，归根结底是要确定其质的关系和量的关系。而在研究质的关系和量的关系的过程中都离不开测量。所谓测量就是通过实验的方法将一个被测量与一个标准量相比较的认识过程。因此测量是认识自然现象及其内在规律不可缺少的、极为重要的方法和工具。

门捷也夫曾经说过：“科学始于测量”，“在自然界里，度量衡是主要的认识工具”。

雅科比也曾经说过：“没有测量就没有任何精密科学，就没有任何应用科学，就没有任何实验。新的测量方法标志着真正的进步。”

先辈科学家的这些至理名言，言简意赅地点明了测量技术对于发展科学技术的重大意义，指出了测量科学工作者的重大责任，规定了测量工作的根本任务。

流动速度是描述流动现象的主要参数，研究流场，首先就是要研究速度场。因此流速测量是研究流动现象的必不可少的一环，也是极为重要的一环。

流动速度是涉及许多科学技术领域的一个参量，不仅流体力学、空气动力学、水力学、热工学、农业科学、林业科学、气象学、化学、地质学、医学、生态学，而且环境保护工程、水利工程、航空工程、航天工程等都需要测量流动速度。正因为这样，流速测量技术早在二十世纪四十年代就开始成为一种专门学问而存在，许多科学工作者为之付出了毕生的精力。

作为流速测量的代表性仪器，有早期的毕托管，后来的热线热膜风速计，以及近期出现的激光流速计。这三种仪器代表了三

种不同的测速原理，反映了科学技术发展的不同侧面。毕托管是建立在一维管道流理论基础上的，是通过测量压力来测量流速的，它反映了机械力学发展时期的技术状况。热线热膜流速计（简称HWA）是建立在热交换原理基础上的，它反映了热力学理论和电子技术的发展状况。激光流速计（简称LDV）则是建立在激光多普勒频移原理基础上的，是通过测量频率来测量流动速度的，它反映了新技术迅猛发展的时代特点。毕托管和热线热膜风速计属于接触式测量工具，在测量的同时又会干扰和破坏流场，而激光流速计则为非接触式测量工具，它本身不会干扰破坏流场，因而特别适用于窄小流场、易变流场和有害流场的测量。但是这三个测量工具不是对立的，而是互相补充、互为校核的。热线热膜流速计的出现并没有否定和代替毕托管。同样，激光流速计的出现也不会否定和代替热线热膜流速计。

《流速测量技术》一书较为系统地描述了这三种流速测量仪器的工作原理和使用技术，力图为从事流动研究的工作者提供一本既通俗易懂又有一定理论深度的读物。因此在撰写时，既注意深入浅出的原理说明，也注意引进必要的数学方程和公式定律。但是在篇幅上、内容上我们都极力避免烦琐的数学推导，而侧重于物理说明和实用描述。

本书的对象是从事流动测量的技术人员、实验工作者，高等院校有关专业的学生、研究生和教师。全书共分三章：第一章为毕托管，由天津大学舒玮教授执笔；第二章为热线热膜风速计，由北京大学盛森芝高级工程师执笔；第三章为激光流速计，由清华大学沈熊副教授执笔，其中的粒子跟随性部分则是由舒玮教授撰写的。全书由盛森芝同志做了协调统一。

盛森芝

1985年10月

目 录

第一章 毕托-静压管流速计	1
§1 毕托管	2
§2 毕托管的标定	9
§3 毕托管测速的修正及标准偏差	18
§4 微差压计	31
§5 一种数字显示式的微差压计	38
参考文献	44
第二章 热线热膜风速计	45
§1 概述	45
§2 热线热膜敏感元件	48
§3 热线的静态热耗散规律	53
§4 热线风速计的基本原理	59
§5 热线风速计的校准	80
§6 测量结果的修正问题	87
§7 各种专门量的测量	107
§8 结论和展望	136
参考文献	139
第三章 激光流速计	141
§1 概述	141
§2 激光多普勒效应	145
§3 激光测速光学布置的基本模式	148
§4 激光测速中的微粒光散射	154
§5 散射粒子的跟随性	165
§6 激光测速的光路结构和基本参数	171

§7	二维激光测速原理和光路	185
§8	多普勒信号的特性	189
§9	频谱分析	211
§10	频率跟踪解调	220
§11	计数式信号处理	239
§12	频移原理及其功能	264
§13	光学频移的主要方法	273
§14	频移量可变的激光测速系统	278
§15	频移技术在多维测速系统中的应用	281
§16	频移激光测速技术的应用	301
	参考文献	311
	结束语	316
附录一	修改椭球头NPL型标准毕托管	321
附录二	ISP-3 型(钟罩式)精密微差压计规格	323
附录三	若干公司生产的热线风速计性能比较表	325
附录四	若干激光流速计系统性能简介	328
附录五	TSI公司IFA·100新型智能化流动分析仪 性能简介	338
附录六	非许用单位与法定计量单位换算表	342

第一章 毕托-静压管流速计

早在1732年,法国工程师毕托(H.Pitot)为了测量水流的流速就发明了毕托管^[1]。不过他当时所用的管子只能测出水流的总压,必须从中减去静压才能算出流速。

德国流体力学家普朗特(L.Prandtl)参考泰勒(G.W.Taylor)于1905年提出的装置,设计出能同时测出总压和静压的复合管^[2]。一直到现在,大多数国家把这种复合管称为毕托-静压管(Pitot-Static tube),简称毕托管,但这已经不是当初所指的毕托管了。

从19世纪20年代起,英国国家物理实验室(National Physical Laboratory简称NPL)就对毕托管进行了长时间的详细研究。他们早期的研究成果于1943年被审定为英国标准。以后,他们还继续研究和改进,英国标准局于1973年颁布了新的有关毕托管的标准BS1042:Part2A:1973^[3]。

1977年,国际标准化组织(International Organization for Standardization简称ISO)颁布了关于用毕托管测流的标准ISO3966-1977^[4]。对毕托管的设计、制造、使用、误差分析和修正都作了具体规定。这一标准得到了包括英、德、法、苏在内的18个会员国的核准,其它会员国没有表示反对。

目前,我国尚未建立这方面的标准。但在毕托管的制造方面已有较高水平的产品,完全能满足国内的需要。

毕托管这样一种古老的流速计,为什么直到今天还广泛地被人们重视和采用呢?这是因为它构造简单、使用方便、坚实可靠、价格低廉。而且,只要经过精心设计和制造,细心地标定和修正,在一定的测速范围内,它还可以达到很高的测量精度。

§1 毕 托 管

我们所指的“毕托-静压管流速计”包括两部分：一部分是毕托管，另一部分是微差压计。使用时，将毕托管插入所要测量的流场，然后将毕托管根部的两个输出接头用橡皮管与微差压计连接，这样就可以从微差压计的指示来求得流速了。图 1-1 是这一测量系统的示意图。

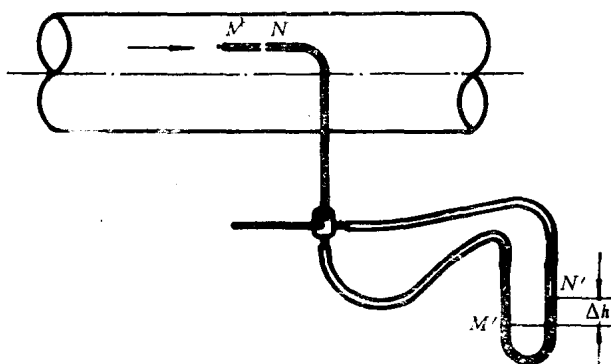


图1-1 毕托管流速计示意图

在毕托管流速计中，毕托管的作用是将流速转变成差压，而微差压计是对差压进行检测。我们自然要问：毕托管是怎样将流速转变成差压的？从这一差压又怎样来求得流速呢？这就需要讨论毕托管的测速原理。

（一）毕托管测速原理

要了解毕托管的测速原理，首先需要弄清楚毕托管的构成。毕托管是一根弯成直角形的金属细管，它的内部结构可以简化成

如图1-2所示。

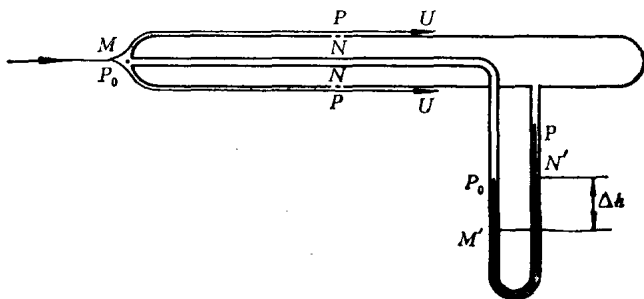


图1-2 毕托管构成原理图

在毕托管头部的顶端，迎着来流开有一个小孔 M ，小孔平面与流体流动的方向垂直。在毕托管头部靠下游的地方，环绕管壁的侧面又开了多个小孔 N ，这些小孔与顶端的小孔 M 不同，流体流动的方向与这些小孔的孔面相切。需要注意的是，小孔 M 和小孔 N 分别与两条互不相通的管路相连，分别接到微差压计的两端。如果这两条通路之间漏气或堵塞，那么，这根毕托管就不能使用了。在这两条通路中，一条充满从小孔 M 流入的流体，如图1-2中的 MM' 。另一条充满从小孔 N 进入的流体，如图1-2中的 NN' 。这两部分流体虽然都处于静止状态，但它们传到微差压计两端的压力是不相等的。因为小孔 M 迎着来流的冲击，进入 MM' 的流体除了它本身原有的压力外，还包含流体被滞止后由动能转变来的那一部分压力。小孔 N 则不同，它并不受流体的冲击，从这里进来的流体的压力比 MM' 内的压力要小得多。因此，微差压计将出现压差指示，例如图1-2中 U 形管内指示液的液位高差 Δh 。

这样一种装置为什么能测出流速呢？

首先需要明确，毕托管所测得的流速是毕托管头部顶端所对准的那一点的流速。当毕托管没有插入流场时，设该点的流速为

U ，压力为 P 。为了测出此点的流速 U ，我们将毕托管顶端的小孔 M 对准此点，并转动毕托管使其头部的轴线与流向平行。这时，由于插入了毕托管， M 点的流速被滞止为零，压力由原来的 P 变成了 P_0 ，我们称此压力 P_0 为滞止压力或总压。总压 P_0 不仅包含有流体原来就具有的压力 P ，更重要的是它还包含有由动能转化为压力的成份。因此，我们可以说 P_0 中包含有流速 U 的信息。怎样才能将 P_0 中的流速信息提取出来呢？关键是要从 P_0 中将流体原有的压力 P 去掉。这一任务是由下游的小孔 N 来完成的。流体绕过毕托管的头部流到 N 点，只要经过精心设计，总可以使该点的压力恢复到 P ，因而该点的流速为 U 。注意，这是未插入毕托管时 M 点的压力和流速值，现在是插入毕托管之后在 N 点出现。如果保证做到这一点，那么，小孔 N 测得的压力便是 P ，习惯上称 P 为静压。总压和静压分别通过管路 MM' 和 NN' 传递到微差压计上，这样，微差压计的指示就只和流速的大小有关了。

为了从理论上建立总压和静压之差与流速的关系，我们先考虑理想情况，即忽略流体的粘性、压缩性，并假设流动是不随时间变化的定常流动。由流体力学可知，毕托管顶端的 M 点和下游的 N 点是同一流线上的两点，因此，根据理想不可压缩流体的伯努利(D. Bernoulli)方程有以下关系式

$$\frac{P_0}{\rho} = \frac{U^2}{2} + \frac{P}{\rho},$$

式中 ρ 是流体的密度。由此得

$$U = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}}. \quad (1-1)$$

这就是毕托管测速的理论公式。它通过测量总压和静压的差压 $P_0 - P$ 来求得流速。

式(1-1)虽然是在理想条件下得到的，但它反映了毕托管测量流速的主要本质，即毕托管的作用是把流速转变成差压。它顶端的小孔 M 是用来检测总压 P_0 的，下游侧壁的小孔 N 是用来检

测静压 P 的。我们称小孔 M 为总压孔，小孔 N 为静压孔。微差压计则是给出 $P_0 - P$ 的值。

最后，需要强调两点：一是毕托管测得的流速是没有插入毕托管时流场内 M 点的流速。插入毕托管是为了将流速转化为压强使其包含到总压之中。另一点是静压孔的设计很重要，如何保证它所测得的压力是不插入毕托管时 M 点的压力，这是非常关键的。

(二) 测量空气流速的计算公式

在毕托管测量流速的理论公式(1-1)中，除了差压 $P_0 - P$ 外还包含流体的密度 ρ 。对于液体，密度比较容易测量。对于气体就不容易直接测量了。现以空气为例来说明间接测量的办法。

我们知道，对于完全气体有状态方程

$$P = R\rho T,$$

其中 R 是气体常数， $T = 273 + t^\circ\text{C}$ 是绝对温度K。

当气体从某一状态 P_0, ρ_0, T_0 变化到另一状态 P, ρ, T 时，则由 $P_0 = R\rho_0 T_0$ 和 $P = R\rho T$ 可得

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{P_0}{P} \times \frac{T}{T_0}.$$

如果被测的气体是空气，我们就可以取标准大气为已知状态，即取 $P_0 = 760\text{mmHg}$ ， $T_0 = 293\text{K}$ ， $\rho_0 = 0.1219\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。此外，在实际测量时，流动气体的静压 P 常常是测得相对压强，即比当地大气压高或低的数值，并以 h (mm H₂O) 表示。将这些数据代入上式得

$$\begin{aligned} \frac{0.1219\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4}{\rho} &= \frac{760\text{mmHg}}{B} \times \frac{T}{293\text{K}} \\ &\times \frac{10350\text{mmH}_2\text{O}}{10350\text{mmH}_2\text{O} + h,} \end{aligned}$$

其中 B 是当时当地的大气压，用mmHg表示。最右边的一项是流

动气体的相对静压比。通常，当 h 小于250mmH₂O时，这一项可忽略不计。只有当对高压管道内的气流进行测量时，这一项才需要计算进去。

将上式代入式(1-1)并以 $\Delta h(\text{mmH}_2\text{O})$ 表示差压 $P_0 - P$ 则得

$$U = 4.05 \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{mmH}_2\text{O}^{1/2}} \times \sqrt{\frac{760 \text{ mmHg}}{B} \times \frac{T}{293 \text{ K}} \times \frac{10350 \text{ mmH}_2\text{O}}{10350 \text{ mmH}_2\text{O} + h_s} \times \Delta h} \quad (1-2)$$

若用国际单位制，上式变为

$$U = 1.288 \frac{\text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{N}^{1/2}} \times \sqrt{\frac{101325 \text{ N/m}^2}{B} \times \frac{T}{293 \text{ K}} \times \frac{103500 \text{ N/m}^2}{103500 \text{ N/m}^2 + h_s} \times \Delta h} \quad (1-3)$$

这是测量空气流速时用的公式。其中 B 可用气压计测得， T 可用温度计测得。这样，就不需要去测量空气的密度了。

下面给出式(1-2)和(1-3)中各量所用的单位：

U ——m/s, Δh ——mmH₂O 或 N/m²;

B ——mmHg 或 N/m²; T ——K;

h_s ——mmH₂O 或 N/m²。

各量最后标出的单位是国际单位，用于式(1-3)。

如果被测的气流与标准大气接近，则式(1-2)中 Δh 前的系数接近于1，因而有近似公式

$$U \approx 4 \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{mmH}_2\text{O}^{1/2}} \sqrt{\Delta h} \quad (1-4)$$

这个近似公式用来估算空气流速很方便。例如微差压计指示的 $\Delta h = 1 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，对应的空气流速大约是 4 m/s。当空气流速小

于 4 m/s ，毕托管输出的差压就比 $1 \text{ mmH}_2\text{O}$ 还要小了。

例 用毕托管测量低速风洞实验段的流速。从微差压计读得毕托管的输出差压 $\Delta h = 121 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，从气压计读得当时当地的大气压 $B = 748 \text{ mmHg}$ ，从温度计读得气流温度为 26.5°C 。此外，风洞内的气流由于在封闭洞体内流动，其静压比大气压低 $12 \text{ mmH}_2\text{O}$ 。求风速。

解 风洞内气流的静压 $h_s = 12 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，在式(1-2)中与大气压 $10350 \text{ mmH}_2\text{O}$ 相比可以忽略。因此由式(1-2)得

$$U = 4.05 \sqrt{\frac{760}{748} \times \frac{273 + 26.5}{293} \times 121} \text{ m/s} = 45.40 \text{ m/s}.$$

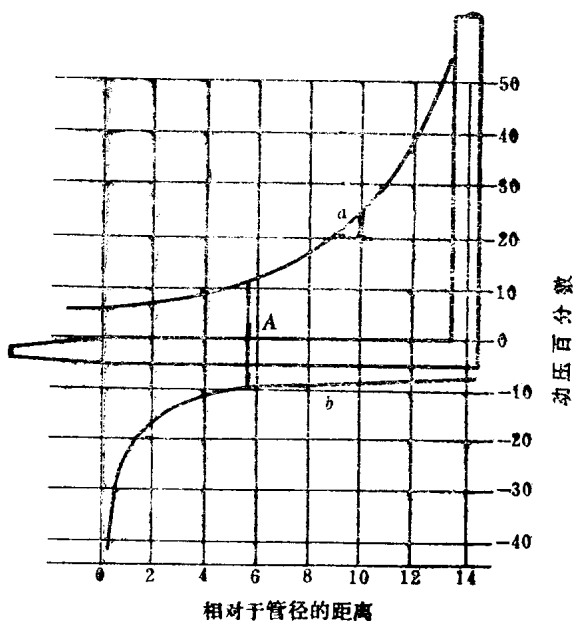
若用近似式(1-4)估算 $U = 4 \times \sqrt{121} \text{ m/s} = 44 \text{ m/s}$ ，只是大致接近，因此只能用于估算。

(三) 毕托管的结构形式

设计毕托管最主要的要求是：尽一切可能保证总压孔和静压孔所接受到的压力真正是被测点的总压和静压。

我们来看静压孔 N 。怎样才能使它测得的压力是静压呢？从流体绕流毕托管来考虑， N 点的流动状态，既受上游毕托管头部绕流的影响，还受下游毕托管立杆绕流的影响。通过实验研究发现，当静压孔 N 开在某一适当位置，这两种影响有可能互相抵消，使得该处的压力恰好等于未插入毕托管时 M 点处的静压。图 1-3 是这一研究的结果^[5]。我们看图中的 A 点，由于头部绕流而减小的压力恰好等于绕流立杆所增加的压力，当在此位置开静压孔 N ，就有可能测得流动流体的静压。

在毕托管设计中，除了要考虑静压孔的位置以外，静压孔的孔数、形状，毕托管的头部形状，总压孔的大小，探头与立杆的联接方式等等，都会影响毕托管的测量结果。对于这些问题很多人曾进行过仔细的研究，并在此基础上设计和制造了各种形式的毕托管。



a: 立杆的影响 b: 头部的影响

图1-3 毕托管静压孔的位置

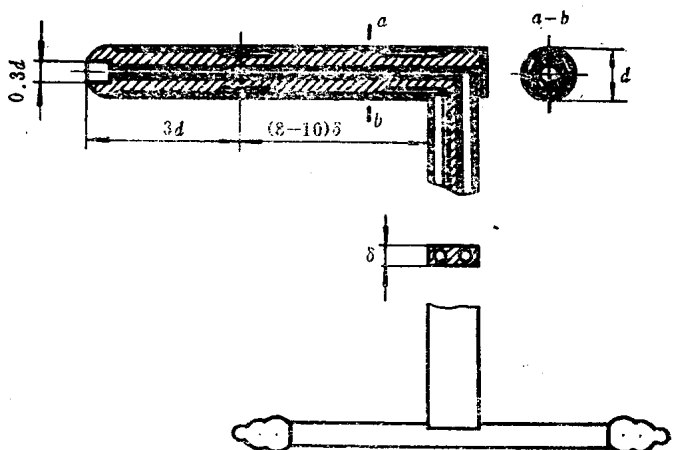


图1-4 普朗特设计的毕托管

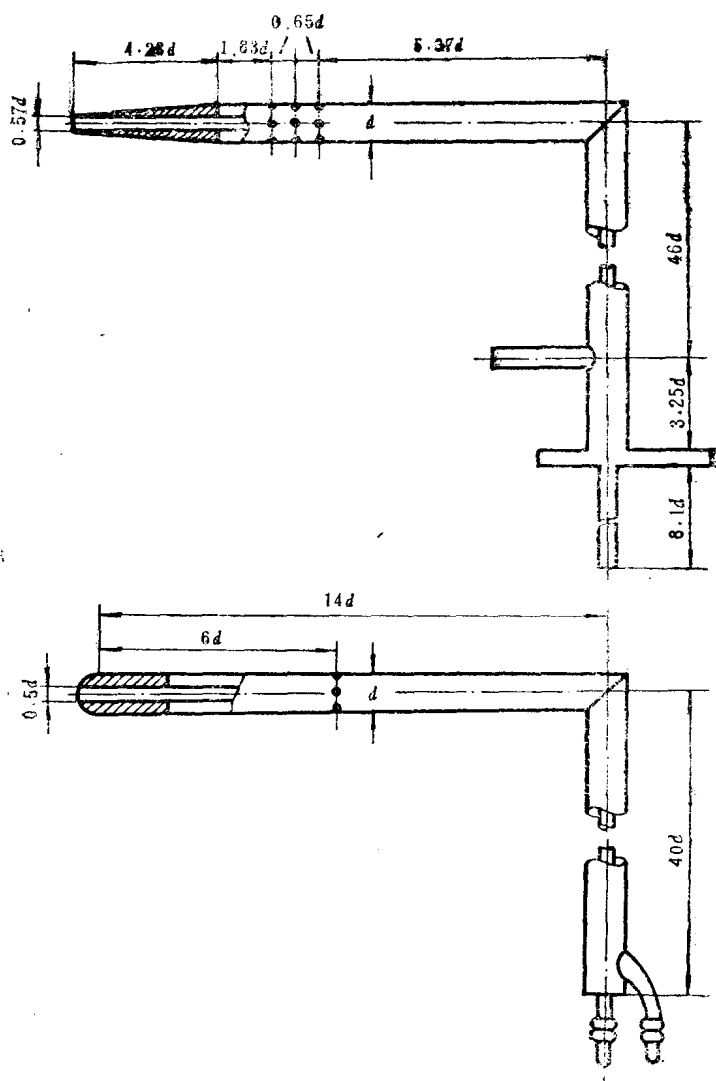


图1-5 早期的NPL型标准毕托管

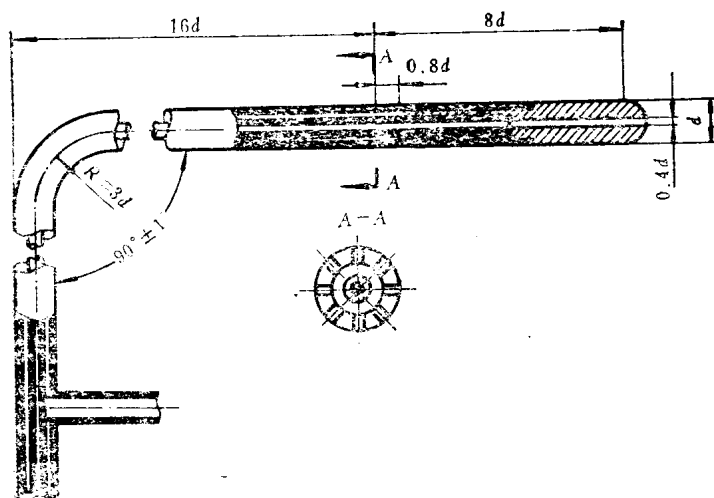


图1-6 AMCA型毕托管(ISO3966推荐)

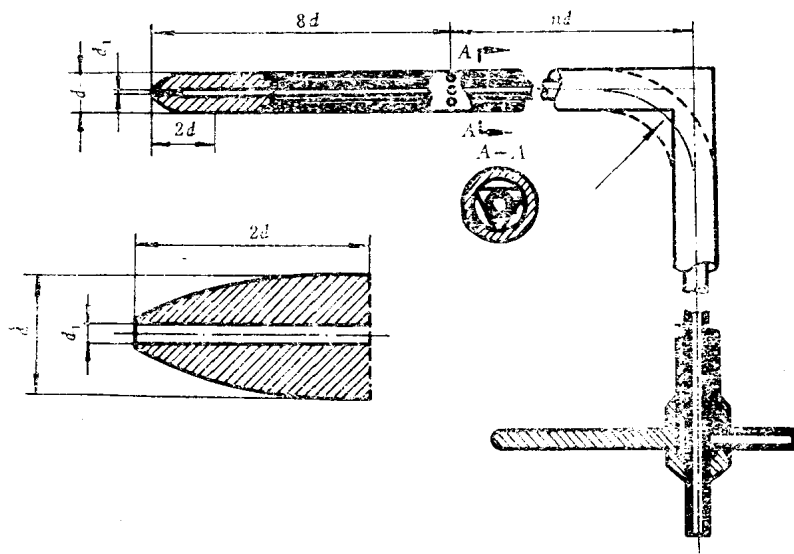


图1-7 修改球头NPL型毕托管(ISO3966推荐)