

直连式试车台测量段的附面层 对压力测量的影响

梁允中、朱青、王志英、王杰臣

摘 要

本文论证了在测量装置前装有收敛段的条件下,管道内附面层厚度对压力测量及计算空气流量的影响,并就测量装置前后等直管长度问题给出了与多年沿用的观点不同的结果。

符 号 表

G —— 流量	ΔP —— 压差
P —— 压力	F —— 面积
T —— 温度	D —— 管道直径
ρ —— 密度	r —— 管道半径
a^* —— 临界音速	l —— 入口至测量靶的距离 (等截面管子的长度)
u —— 速度	下标:
λ —— 速度系数	C —— 测量段
M —— 马赫数	m —— 发动机扩压器喉道
$q(\lambda)$ —— 无量纲密流	0 —— 滞止参数或自由流
k —— 比热比	CP —— 平均值
R —— 气体常数	max —— 最大值
σ —— 综合修正系数	min —— 最小值
μ —— 粘性系数	w —— 壁面处
ν —— 运动粘性系数	kq —— 空气
δ —— 附面层厚度	x —— 轴向 (X 方向)
τ —— 摩擦应力	
Re —— 雷诺数	

一、前 言

在航空发动机试验中,空气流量 G_{ka} 是一个极为重要的参数,其精确度对发动机性能计算影响很大。而总压测量精度直接影响空气流量计算。总压场的均匀度反应流场的均匀度,而在均匀流场条件下较容易测出准确的压力值。均匀度较差的气流进入发动机,也将直接影响发动机性能,所以,获得均匀的总压场是很重要的。

目前,在航空发动机试验中,几种常用的空气流量测量装置有:孔板、喷咀、总压耙……。本文着重叙述在使用总压耙测量时,附面层对压力测量的影响。

长期以来,科技人员习惯地强调:在测量空气流量时,必须保证测量装置前后应有较长的直管段。笔者认为:这个观点仅适用于部分情况,有一定的局限性。当用总压耙测总压时,测量装置前装有良好的收敛段,使入口气流流场足够均匀时,由于附面层的影响,直管愈长则压力测量误差愈大,计算出的流量误差也愈大。这个观点与多年来所沿用的观点不同。

本文以直连式试车台上使用总压耙的测量方法进行讨论。

二、测量空气流量的方法

在直连式试车台上,曾采用在发动机进口前安装一测量段,在其上测量同一截面处的总压、静压和稍后一截面上的总温(见图1),用气动法计算空气流量。

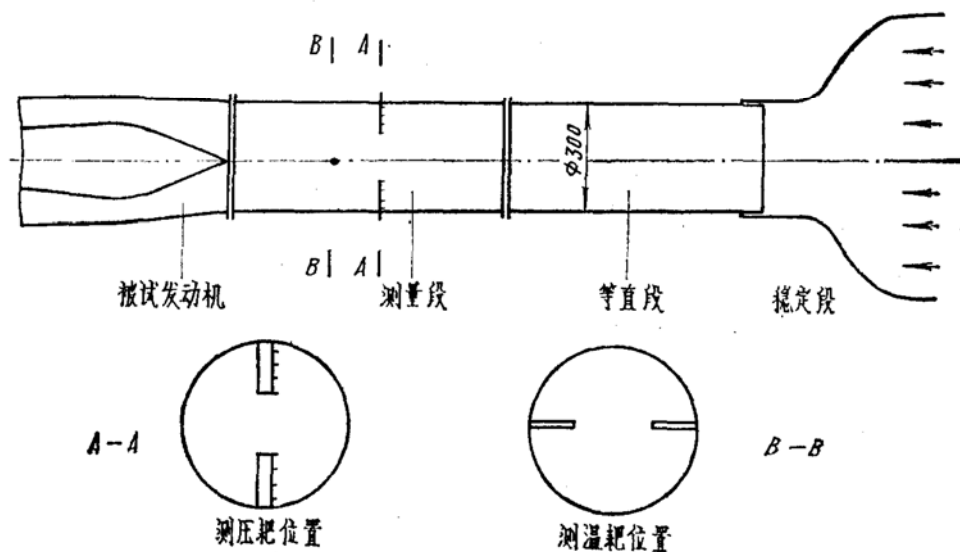


图1 设备测量段示意图

$$G_{kgc} = m \frac{P_{oc}}{\sqrt{T_{oc}}} F_c q(\lambda_c) \quad (1)$$

$$\text{式中 } m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{g}{R}}$$

由于用气动算法按总、静压比来确定 λ 时,常常因静压测量不准而导致 G_{kg} 有较大的误差,后来采用音速喉道的方法来计算 G_{kg} 。发动机进口的临界截面为 F_m 。因为该截面 $\lambda_m = 1$,所以 $q(\lambda_m) = 1$ 。考虑到测点位置到发动机临界截面的总压损失,喷管喉道的流量系数,需引入一个综合修正系数 σ ,则公式(1)改写为:

$$G_{kg} = m \frac{P_{oc} \sigma}{\sqrt{T_{oc}}} \cdot F_m \quad (2)$$

从式(2)看出, P_{oc} 的测定极为重要。为提高 P_{oc} 测量精度,除合理选取传感器、二次仪表的量程和等级外,希望有均匀的压力场。

流场均匀度用下式表示:

$$\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}} \% \quad (3)$$

其百分数愈小表示流场的均匀度愈高。由此可见应将总压耙安置在流场均匀处。

为了获得均匀的流场,不少有关空气流量测量的文献指出:使用孔板、喷嘴等装置测量空气流量时装置前直管道的长度应有15倍管直径,装置后应有5倍管径长度的等直管。但根据我们的测试结果,在测量装置前有良好收敛入口的条件下,上述观点是不可取的。

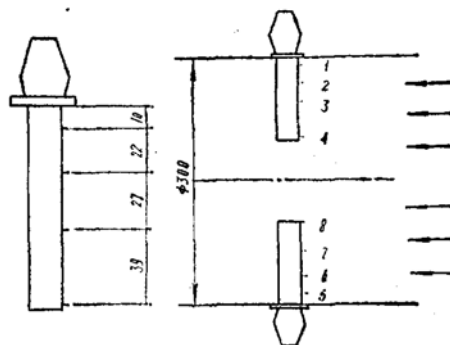


图2 总压耙示意图 ($P_{oc1} \dots P_{oc4}$ 及 $P_{oc5} \dots P_{oc8}$ 按等环面积分布)

三、总压耙前不同长度的等直管的测试结果

(一) 测量耙前等直段为9倍管径

1. 入口为突然收缩型(图3)

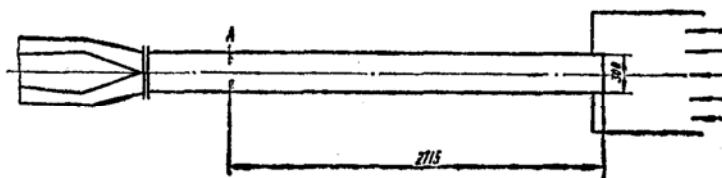


图3 突然收缩进气试验设备测量段示意图

压力测量数据如表1。

表1 压力测量数据

参数	P_{oc1}	P_{oc2}	P_{oc3}	P_{oc4}	P_{oc5}	P_{oc6}	P_{oc7}	P_{oc8}	P_{ocmax}	P_{ocmin}	P_{occp}	$\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$
数值 (公斤/厘米 ²)	4.77	5.09	5.11	5.23	4.77	4.95	5.05	5.15	5.23	4.77	5.015	9.1%

由表1可见流场的均匀度较差, $\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$ 达9.1%。

2. 入口为良好的收缩型(图4)

将图3设备中突然收缩入口改为按维托辛斯基曲线设计的收敛段。

(二) 测量耙位置分别为9倍管径(图4A处)、6倍管径(图4B处)和2倍管径(图4C处)。

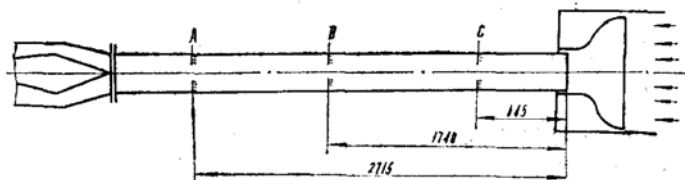


图4 突缩处装上收敛段试验设备测量段示意图

压力测量数据分别列于表2、表3和表4。

表2 压力测量数据

参数	P_{oc1}	P_{oc2}	P_{oc3}	P_{oc4}	P_{oc5}	P_{oc6}	P_{oc7}	P_{oc8}	P_{ocmax}	P_{ocmin}	P_{occp}	$\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$
数值 (公斤/厘米 ²)	4.72	5.11	5.05	4.99	4.69	4.91	—	5.02	5.11	4.69	4.93	8.5%

表3 压力测量数据

参数	P_{oc1}	P_{oc2}	P_{oc3}	P_{oc4}	P_{oc5}	P_{oc6}	P_{oc7}	P_{oc8}	P_{ocmax}	P_{ocmin}	P_{occp}	$\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$
数值 (公斤/厘米 ²)	4.89	5.09	5.23	5.09	4.94	5.12	5.20	5.13	5.23	4.89	5.09	6.7%

表4 压力测量数据

参数	P_{oc1}	P_{oc2}	P_{oc3}	P_{oc4}	P_{oc5}	P_{oc6}	P_{oc7}	P_{oc8}	P_{ocmax}	P_{ocmin}	P_{occp}	$\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$
数值 (公斤/厘米 ²)	5.10	5.12	5.15	5.10	5.09	5.14	5.20	5.14	5.20	5.09	5.13	2.1%

由表2、表3和表4中的数据可知，测量耙位于9倍管径处，即使改善了进口，总压场仍不好， $(P_{ocmax} - P_{ocmin})/P_{occp} = 8.5\%$ ；测量耙移至6倍管径处，总压场得到改善 $(P_{ocmax} - P_{ocmin})/P_{occp} = 6.7\%$ ；当测量耙移到2倍管径处，总压场有了明显的改善， $(P_{ocmax} - P_{ocmin})/P_{occp} = 2.1\%$ 。

(三) 测量耙前等直段为2倍管径，测量耙后等直段为2倍管径，延伸段由300毫米变为2020毫米(图5)

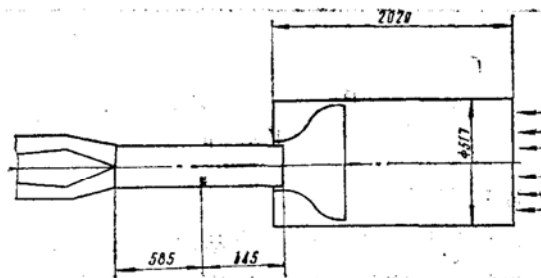


图5 测量段前加延伸段试验设备示意图

压力测量数据如表 5。

表 5 压 力 测 量 数 据

参数	P_{oc_1}	P_{oc_2}	P_{oc_3}	P_{oc_4}	P_{oc_5}	P_{oc_6}	P_{oc_7}	P_{oc_8}	$P_{oc_{max}}$	$P_{oc_{min}}$	$P_{oc_{cp}}$	$\frac{P_{oc_{max}} - P_{oc_{min}}}{P_{oc_{cp}}}$
数值 (公斤/厘米 ²)	5.05	5.07	5.05	5.07	5.07	—	5.10	5.07	5.10	5.05	5.07	0.98%

由表 5 可见总压场均匀度进一步得到改善。

综合上述几种试验的结果可见：

- (1) 入口为突然收缩时，流场分布不均匀；
- (2) 即使将入口改为良好的收敛段，由于测量耙离入口距离较远，流场也不均匀；
- (3) 测量耙前有收敛喷口时，其喷口与测量耙之距离对流场有影响，距离缩短对改善流场有利。

(4) 收敛入口段前加了延伸段 ($D = 517$ 毫米, $L = 2070$ 毫米) 及测量耙后至发动机进口的距离缩短，进一步改善了流场的均匀度。

四、试验结果分析

(一) 入口分析

1. 入口为突然收缩时，流场均匀度很差，因此，测量耙上总压探头测得的数据不均匀。
2. 入口为维托辛斯基曲线收敛型面，在型面出口处流场是均匀的。可是，在本试验中，当测量耙距入口较远 ($L = (6 - 9)D$) 时，流场均匀度并不好；只有当测量耙距入口比较近时，才能获得较好的流场。由此可见，测量耙与入口的距离是个十分重要的因素。下面就这个问题进行分析计算。

(二) 等截面摩擦管流分析

根据附面层理论，在 Re 数比较大的情况下，附面层将会沿流程增厚。下面讨论附面层增厚对测量结果的影响。

假定气流是一维、定常绝热流动。

1. 附面层沿管长增厚的关系式：

因所讨论的气流的雷诺数远大于 2300，故按紊流附面层计算。

在微元体积 ABCD (见图 6) 上应用动量定理，可推导出附面层积分关系式：

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta \rho u_x^2 dy - u_0 \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta \rho u_x dy = -\tau_w - \delta \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

式 (4) 中未知数为 τ_w 、 u_x 和 δ ，需要补充两个联系这些未知数的关系式。

在近似计算中，取附面层厚度上的速度分布规律为七分之一次方规律，即

$$u_x = u_0 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (5)$$

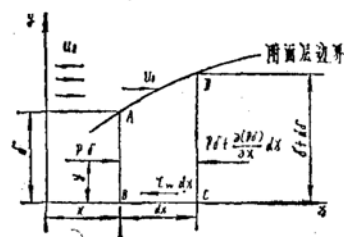


图 6 推演附面层的动量用图

文献〔7〕指出：对于圆管流动来说，最大速度与平均速度之间的关系式具有如下形式：

$$u_{\max} = u_0 = 1.235 u_{cp} \quad (6)$$

此外，由流体的平衡条件得：

$$\Delta P \cdot \pi r^2 - \tau_w \cdot 2\pi r L = 0$$

由此得

$$\Delta P = 2 \frac{L}{r} \tau_w \quad (7)$$

利用式(5)、(6)、(7)，参考文献〔6〕，可从积分关系式(4)中解出管道内附面层厚度计算的公式：

$$\delta(L) = 0.37 \left(\frac{\nu}{U_{\max} \cdot L} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot L \quad (8)$$

2. 附面层沿管长增厚的数值计算

计算举例：

已知参数：

$$P_{oc} = 5.04 \text{ 公斤/厘米}^2, \quad T_{oc} = 417.7 \text{ K}$$

$$F_m = 602.4 \text{ 厘米}^2 \quad F_c = 707 \text{ 厘米}^2$$

$$L = 2.715 \text{ 米}$$

试计算测量靶所在截面上管道附面层的厚度。

解：由克拉贝隆方程

$$P_{oc} = \rho_{oc} g R T_{oc} \quad (9)$$

$$\rho_{oc} = \frac{P_{oc}}{g R T_{oc}} = \frac{5.04 \times 10^4}{9.8 \times 29.3 \times 417.7} = 0.4200 \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \right]$$

测量段管道的直径为 $\phi 300$ 毫米，其 $F_c = 707 \text{ 厘米}^2$ ， $F_m = 602.4 \text{ 厘米}^2$ 。

对绝热流动： $T_{oc} = T_{om}$

由公式(1)得：

$$P_{oc} F_c q(\lambda_c) = P_{om} F_m q(\lambda_m)$$

$$\because \text{发动机收扩段喉道 } \lambda_m = 1 \therefore q(\lambda_m) = 1$$

$$\text{由经验取 } \sigma = \frac{P_{om}}{P_{oc}} = 0.99$$

$$\therefore q(\lambda_c) = \frac{F_m}{F_c} \sigma = \frac{602.4}{707} \times 0.99 = 0.8435$$

$$\lambda_c = 0.634$$

$$M_c = 0.605$$

由

$$\frac{T_{oc}}{T_c} = 1 + \frac{k-1}{2} M_c^2 = 1.0732$$

$$T_c = \frac{T_{oc}}{1.0732} = 389.2 \text{ K}$$

$$\text{由 } \frac{\rho_{oc}}{\rho_c} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_c^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left[1 + \frac{0.4}{2} \times (0.605)^2 \right]^{\frac{1}{0.4}} = 1.1932$$

$$\rho_c = \frac{\rho_{oc}}{1.1932} = 0.3520 \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \right]$$

由粘性系数的关系式:

$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \frac{273 + c}{T + c} \quad (10)$$

式(10)中 μ_o 是 $T = 273\text{K}$ 的 μ 值, c 是一个常数,对空气来说 $\mu_o = 1.745 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \right]$,

$c = 122\text{K}$ 。代入式(10)得:

$$\mu = 1.745 \times \left[\left(\frac{393.9}{273} \right)^{1.5} \times \frac{273 + 122}{393.9 + 122} \right] = 2.316 \times 10^{-6} \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{2.316 \times 10^{-6}}{0.3522} = 6.576 \times 10^{-6} \text{米}^2/\text{秒}$$

$$a^* = \sqrt{\frac{2}{k+1}} a_o = \sqrt{\frac{2k}{k+1} g R T_o} = \sqrt{\frac{2 \times 1.4}{2.4} \times 9.8 \times 29.3 \times 417.7} \\ = 374.07 \text{米/秒}$$

$$u_{cp} = \lambda a^* = 0.634 \times 374.07 = 237.16 \text{米/秒}$$

$$u_{max} = 1.235 u_{cp} = 1.235 \times 237.16 = 292.9 \text{米/秒}$$

对圆管雷诺数:

$$R_e = \frac{u_{cp} D}{\nu} = \frac{237.16 \times 0.3}{6.576 \times 10^{-6}} = 1.08 \times 10^7$$

由公式(8)

$$\delta(L) = 0.37 \left(\frac{\nu}{u_{max} \cdot L} \right)^{1/5} \cdot L = 0.02429 \text{米}$$

对于测量耙其它不同位置及工作情况下的附面层厚度的计算结果列在表8~12上。

(三) 试验结果分析:

1. 测量耙位置与附面层厚度之关系:

1) 对照表2与表8及参看总压测量耙示意图2,可见当测量耙与入口距离为2715毫米处,该处($P_{oc} = 5.04 \text{公斤/厘米}^2$)附面层厚度为24.36毫米,使总压测量耙的第1、第5两测点均处于附面层内,由此测得的总压值比中心区域第2、3、4、6、7、8诸测点值明显偏低,致使压力场不均匀度 $\frac{P_{ocmax} - P_{ocmin}}{P_{occp}}$ 高达8.5%,由此计算出的空气流量误差较大。

2) 同理,对照表3与表9及图2,可见当测量耙前移与入口距离为1740毫米时,该处附面层的厚度为15.31毫米。总压测量耙第1、第5测点仍然处于附面层内,测得的总压值仍然偏低。但因距入口较前述2715毫米为短,附面层内气流速度与层外气流速度之差较前者为小,故测量段内速度场、压力场的不均匀度比前者要好些。

3) 对照表4、表9及图2,可见进一步缩短测量耙与入口处之距离使其为645毫米,计算出该处附面层厚度为6.93毫米。总压测量耙上各测点均不受附面层影响,故测量段内流场基本均匀,计算出的空气流量值准确度较前述为高。

4) 由表5、表10及图2可见,总压耙与入口距离仍为645毫米,但加延伸筒改善收敛入口段之气流状态,使收敛段入口之气流流场均匀度更好一些,则在附面层厚度不变条件下,测量段流场均匀度进一步提高。

2. 采取放气措施排出附面层的效果

考虑到附面层对总压测量的影响,曾采取在测量耙前直管道上分两处简易放气的办法,旨在使附面层能溢出管道而变薄,以提高管内流场均匀度。试验设备如图7所示。

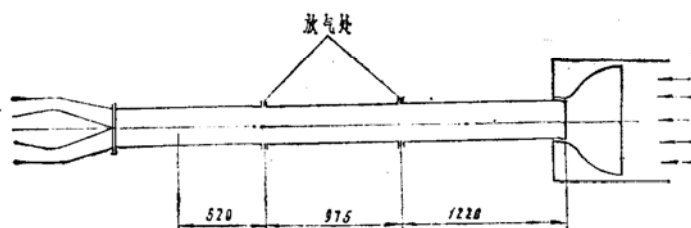


图7 简易放气试验设备示意图

采用简单措施放气,压力试验数据如表6、表7。

表6 压力试验数据 (放气面积为1597毫米²,管道面积为70686毫米²,放气面积比为2.3%)

参数	Poc ₁	Poc ₂	Poc ₃	Poc ₄	Poc ₅	Poc ₆	Poc ₇	Poc ₈	Pocmax	Pocmin	Poccp	$\frac{Pocmax-Pocmin}{Poccp}$
数值 (公斤/厘米 ²)	4.83	5.03	5.23	5.06	4.81	5.22	5.15	5.09	5.23	4.81	5.05	8%

表7 压力试验数据 (放气面积为4935毫米²,管道面积为70686毫米²,放气面积比为7%)

参数	Poc ₁	Poc ₂	Poc ₃	Poc ₄	Poc ₅	Poc ₆	Poc ₇	Poc ₈	Pocmax	Pocmin	Poccp	$\frac{Pocmax-Pocmin}{Poccp}$
数值 (公斤/厘米 ²)	4.83	5.01	5.07	5.08	4.80	5.14	5.10	5.13	5.14	4.80	5.02	6.8%

从表6、表7及表9试验结果可以看出,简单的放气措施仅稍微使等截面管中的附面层变薄(由未放气附面层厚度大约24毫米变薄到22毫米左右),故压力场也仅稍微得到改善(由未放气的压力场8.5%改善为6.8~8%)。由此可见,采用简单放气措施,企图排出附面层的效果不明显。但也能得出如下结论:附面层确实影响了总压测量,当减小附面层厚度时,总压测量得到了改善。

3. 气流压力、温度对附面层厚度的影响

由试验结果及计算可知(见表8~12),在气流压力相同的条件下,气流温度增加则附面层增厚;在气流温度相同的条件下,压力愈高则附面层愈薄。但尚须注意只要附面层未进入测

量靶上的取气口，不论其增厚或减薄，由此引起的流场不均匀度在测量系统上均反应不出来，便造成流场均匀度与温度、压力无关的假象。只有改进测量靶，才能得到更真实的流场测定。

表 8 测量靶在不同位置及不同工况的附面层厚度

工 况 计 算 参 数	收缩段、迷宫法兰、 $\Phi 300$ 连管、测量段、调节筒、点加热器					
	Poc = 5.04 公斤/厘米 ² Toc = 417.7K	Poc = 5.25 公斤/厘米 ² Toc = 395.2K	Poc = 4.99 公斤/厘米 ² Toc = 407.2K	Poc = 4.96 公斤/厘米 ² Toc = 432.5K	Poc = 5.16 公斤/厘米 ² Toc = 399.2K	Poc = 5.17 公斤/厘米 ² Toc = 401.3K
L (米)	2.715	2.715	2.715	2.715	2.715	2.715
$\delta(L)$ (米)	0.02429	0.02383	0.02426	0.02465	0.02397	0.0234
压 力 场	9.6%	6.5%	6.9%	8.5%	5.8%	7.9%

表 9 测量靶在不同位置及不同工况的附面层厚度

工 况 计 算 参 数	收缩段、迷宫法兰、 $\Phi 300$ 连管、测量段、调节筒、冷吹						
	Poc = 5.121 公斤/厘米 ² Toc = 283K	Poc = 5.091 公斤/厘米 ² Toc = 283K	Poc = 5.161 公斤/厘米 ² Toc = 283K	筒 单 放 气			
				Poc = 5.081 公斤/厘米 ² Toc = 283K	Poc = 4.861 公斤/厘米 ² Toc = 283K	Poc = 5.051 公斤/厘米 ² Toc = 283K	Poc = 4.951 公斤/厘米 ² Toc = 283K
L (米)	1.74	0.645	0.645	2.715	2.715	2.715	2.715
$\delta(L)$ (米)	0.01531	0.00695	0.00693	0.02189	0.02209	0.02192	0.02201
压 力 场	6.7%	3.6%	2.1%	8 %	7.7%	6.8%	6.1%

表10 测量靶在不同位置及不同工况的附面层厚度

工 况 计 算 参 数	装延伸筒，收缩段、迷宫法兰、测量段						
	冷 吹				点 加 热 器		
	Poc = 5.118 公斤/厘米 ² Toc = 275K	Poc = 5.068 公斤/厘米 ² Toc = 275K	Poc = 7.048 公斤/厘米 ² Toc = 275K	Poc = 7.718 公斤/厘米 ² Toc = 275K	Poc = 5.797 公斤/厘米 ² Toc = 486K	Poc = 7.147 公斤/厘米 ² Toc = 535.5K	Poc = 7.117 公斤/厘米 ² Toc = 538K
L (米)	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
$\delta(L)$ (米)	0.00687	0.00689	0.00645	0.00642	0.00779	0.00764	0.00766
压 力 场	0.98%	1.4%	1 %	1 %	1 %	1.1%	1.0%

表11 测量耙在不同位置及不同工况的附面层厚度

工 况 试 验 状 态 计 算 参 数	装延伸筒、收缩段、迷宫法兰、测量段、点加热器、发动机试验							
	Poc=7.22 公斤/厘米 ² Toc= 537.3K	Poc=7.179 公斤/厘米 ² Toc= 537.2K	Poc=7.171 公斤/厘米 ² Toc= 457.3K	Poc=7.149 公斤/厘米 ² Toc= 457.2K	Poc=7.171 公斤/厘米 ² Toc= 456.6K	Poc=7.179 公斤/厘米 ² Toc= 456.5K	Poc=7.141 公斤/厘米 ² Toc= 485.5K	Poc=7.202 公斤/厘米 ² Toc= 535.5K
L (米)	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
$\delta(L)$ (米)	0.007632	0.00764	0.007351	0.007355	0.007349	0.007347	0.007465	0.00763
压 力 场	0.84%	0.98%	0.8%	0.8%	0.6%	1.8%	0.8%	0.56%

表12 测量耙在不同位置及不同工况的附面层厚度

计 算 参 数	工 况 试 验 状 态	装延伸筒、收缩段、迷宫法兰、测量段、点加热器、发动机试验						
		Poc = 7.21 公斤/厘米 ² Toc=538K	Poc=7.139 公斤/厘米 ² Toc=537.7K	Poc=7.139 公斤/厘米 ² Toc=458K	Poc=7.179 公斤/厘米 ² Toc=537.2K	Poc=7.179 公斤/厘米 ² Toc=456.5K	Poc=7.171 公斤/厘米 ² Toc=455.2K	Poc=7.171 公斤/厘米 ² Toc=457.3K
L (米)		0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
δ(L) (米)		0.007636	0.00765	0.00736	0.00764	0.007346	0.007342	0.007351
压 力 场		0.7%	0.42%	0.6%	0.98%	1.8%	1 %	0.8%

五 结 论

在直连式冲压喷气发动机试车台上,用测量耙测出气流压力、温度进行空气流量计算时,要求压力场、温度场均匀,才能得出比较正确的平均压力、温度。本文从上述分析可得出如下结论:在等直的测量段前有良好收敛入口的条件下,测量耙距入口愈远,管道内附面层愈厚,流场愈差;测量耙前等直段之长度不能大于2.5倍管径。

又考虑到附面层沿管长增厚对发动机性能有影响,故测量耙与发动机入口之间的等直段也不宜过长。

刘兴洲、龚洵礼及一号试车台同志们,对本文所述观点及试验工作的具体实施,曾提出过宝贵意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- (1) Shapiro A. H. and Smith R. D., Friction coefficients in the inlet length of smooth round tubes, NACA Tech. Note, NO. 1785 (1948).
- (2) Von Karman, T., Turbulence and skin friction, Jour Aero sci Vol NO. 1 (1934) P. 1.
- (3) Лойцянский Л. Г., Механика Жидкости и Газа, Гиттл (1950.).
- (4) 夏皮罗 A. H. 著 陈立子等译: 可压缩流的动力学与热力学 (1978).
- (5) 阿勃拉莫维奇 Г. Н. 著: 实用气体动力学.
- (6) 阿尔然尼可夫 Н. С. В. Н 马尔果夫著: 空气动力学 (1959) .
- (7) 潘杰元 钱翼稷编: 实用气体力学 (1962.9).
- (8) 川田裕郎等著: 流量测量手册 1982 年.
- (9) 北京航空学院四系: 压力气流测量与测压仪表 1976 年.