
*** 大 气 环 境 质 量 评 价 ***

(下 册)

北京大学环境科学中心

1983. 9.

目 录

第六章: 大气环境质量评价的实验室模拟(I).....	2
第七章: 大气环境质量评价的实验室模拟(II).....	79
第八章: 湍流扩散的数值模拟.....	107
第九章: 大气环境质量评价的模式计算.....	209
第十章: 大气环境质量的评价方法, 内容及实例.....	233

第六章：大气环境质量评价的实验模拟(一)

大气污染物迁移、扩散过程的实验模拟——

——环境风洞实验

本章主要内容之一是介绍有关环境风洞设计的一般方法，另一个主要内容是介绍环境风洞实验的主要内容、方法，以及如何处理实验结果和应用实验结果。

§ 6—1 环境风洞实验概述

一、风洞是什么？

环境风洞实验是大气环境质量评价的实验模拟的主要方法之一，在环境风洞模拟实验中，最主要的实验设备就是风洞。风洞是什么呢？

风洞是一个经过特殊设计的管道，通过动力系统（电动机和风扇）在其内部产生一股可以人为自由控制的气流，用它来模拟物体在空气中运动时空气的流动现象、物体的受力情况，空气绕某些固定物体的绕流现象以及烟气在空气中的迁移，扩散现象等。

风洞有高速风洞（如高超音速风洞、超音速风洞、跨音速风洞及高亚音速风洞等）和低速风洞（指试验段中气流的速度不超过125米/秒的风洞，因为这时风速小于0.4倍音速，可以忽略压缩性的影响）之分。环境风洞是低速风洞的一种，是一种极低速风洞（一般试验段风速在0.1~30米/秒之间）。

风洞的类型很多，按风洞的气动廓面分，有直流式风洞（又称开路式风洞）和回流式风洞（又称闭路式风洞）之分。

直流式风洞又分为直流吹式和直流吸式，图6—1所示是直流吸式闭口风洞。回流式风洞如图6—2所示。

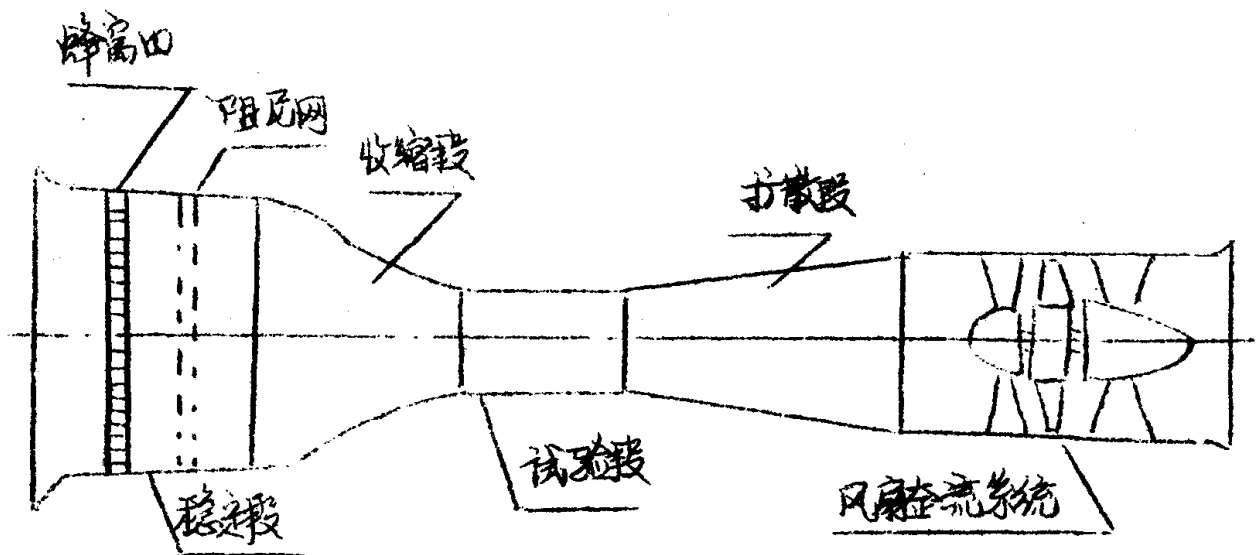


图6—1 直流吸式闭口风洞

不管是什么类型的风洞，大体上都是由稳定段、收缩段、试验段、扩散段和动力段等部分组成。直流式风洞还应有进口段和出口段（不同的风洞其进口、出口的形式各异），回流式风洞还应包括拐角导流片部分和回流通道部分等。

试验段（又称工作段、测定段）是风洞最主要的部分，实验就是在这部分中进行的，因此它的性能的好坏直接影响整个风洞的性能。

稳定段（又称安定段）是稳定气流的部分，通过在稳定段中安装的蜂窝器和阻尼网，可以把气流的流动方向校正，把气流的

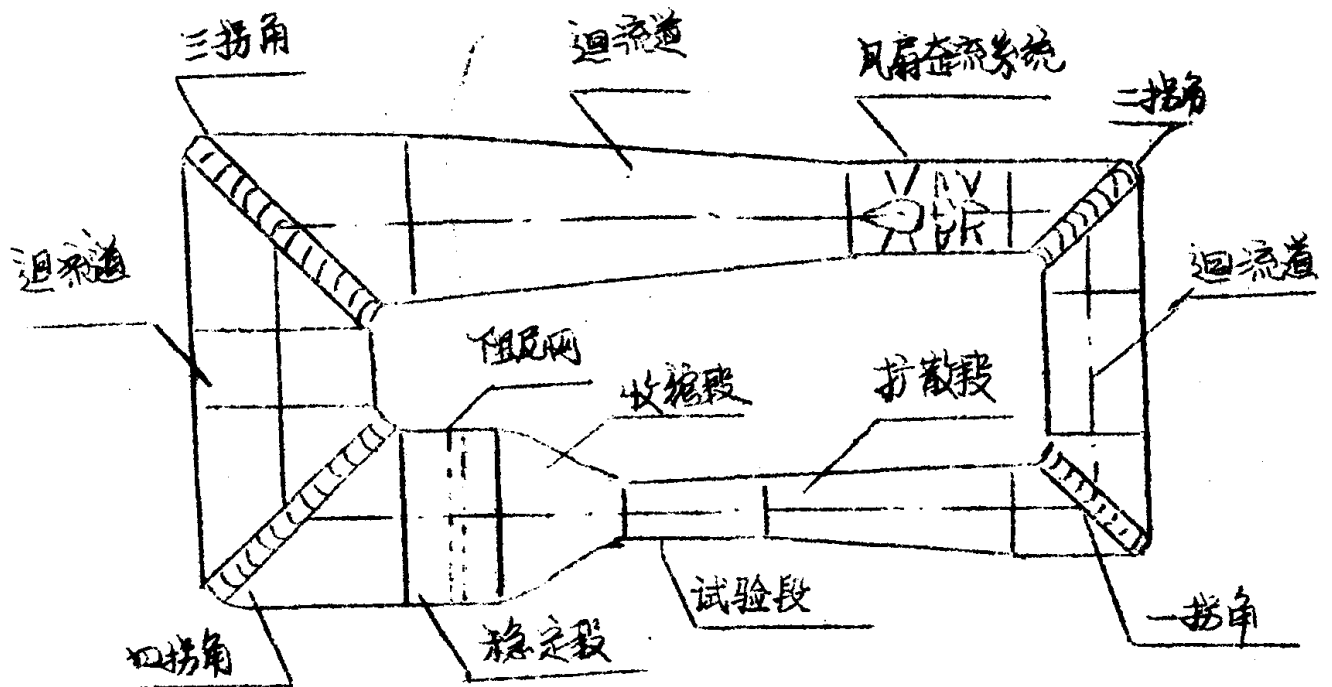


图 6—2 单回流闭口风洞

湍流度降低。

收缩段主要用来加速气流，并有降低湍流度的作用。

扩散段用来降低流速，把气流动能转成压力能，提高风洞的能量比。

动力段 为在试验段建立一定的流速提供所需的能量。

风洞各段的详细设计在 § 6—2 中叙述。

二、风洞实验在环境评价中的作用；

在进行大气环境质量评价时有三种方法可供选用。

第一种方法是现场观测方法，这是一种最直接最基本的方法，测试的结果较能真实地反映实际的情况，是一种必不可少的处理

方法。但是这种方法需要耗费大量的人力、物力和时间，由于它不能由人随意改变和控制观测的条件，因此不能观测到人们需要了解的全部内容，机理性的研究也受到限制。

第二种方法是在理论分析的基础上进行数值计算，但是由于它依赖于理论分析的水平数学模型的精确程度，目前还只能处理一些比较简单的流动类型。

第三种方法是在实验室内进行模拟实验，这种方法由于实验条件容易人为地控制、重复和改变，因此可以进行全面的实验，在进行机理性研究时表现出特有的优越性，而且可以节省人力、物力和时间。可是由于在模拟过程中不可能使相似参数全部同时得到满足，模拟的能力受到限制。

上述三种方法，各有短长，因此必须将其很好地配合起来使用，取长补短，相辅相成。

在室内模拟中最有用的设备就是环境风洞。下面就详细地介绍一下它的设计方法和大气边界层的风洞模拟技术。

§ 6—2 环境风洞气动设计概述

一、低速风洞气动设计的一般原则

1 风洞气动设计的主要步骤

进行风洞气动设计的基本目标是使所设计的风洞能在最小的能量损失的前提下达到实验所需要的条件。

风洞气动设计的主要步骤是：

(1) 根据实验任务明确风洞的各项技术指标（实验段的尺寸大小、风速范围、湍流度的大小及流场的性能要求等）；

(2)根据提出的技术指标,结合所能提供的物质条件(场地的
大小,场地周围的情况,资金的多少),制定几种可行方案,并
绘制出气动廓面图;

(3)对制定的几种方案,分别计算能量比,然后进行分析对比,
选出一个认为最优的方案;

(4)对选定的方案,在进行部分修改后仔细计算能量比,绘制
出精确的气动廓面图;

(5)设计风扇整流系统。要注意在这一步工作中很有可能对选
定的方案作局部的修改,如若有修改则须从第(4)步起再重复计算
一次。

在完成以上几步工作后,风洞的气动设计的任务就基本上完
成了。

2 风洞各部件的气动设计

(1)试验段:

试验段又叫工作段,它是进行实验的地方,是整个风洞最主
要的部分,它的气流品质的好坏是反映风洞气动性能好坏的主要
标志之一。因此可以说对试验段的要求就是整个风洞的要求。

a) 试验段截面的形状

试验段的截面形状有圆形、椭圆形、方形、矩形和八角形等,
采用什么形状要根据实验的对象而定,此外还要考虑加工简单,
装拆模型容易等因素。环境风洞一般采用矩形截面。

b) 试验段的截面尺寸

试验段的截面尺寸的大小主要取决于实验的类型和模型的尺
寸。一般说来,作机理性实验的截面尺寸小些,作生产性实验的
截面尺寸要大些。要注意的是在实验中能够作实验的区域一般仅

占风洞截面的70%左右，因此在考虑截面尺寸时要适当放大一些。原则是在满足实验要求的前提下采用尽可能小的截面，这样可以减少风洞所需的功率。

c) 试验段的长度

试验段的长度也主要取决于实验的类型，一般低速风洞是取试验段当量直径的2—2.5倍，而环境风洞的试验段长度比较长，一般取试验段高度的10~15倍左右。

d) 试验段边界层的修正

边界层沿壁面增长之后使试验段的有效截面积逐渐减小，气流流速增加，静压减小，从而沿试验段的轴向产生一个压力梯度 dp/dx ，这是不希望出现的，必须设法消除。在风速范围不大，试验段又不长的时候，多采用固定修正法，就是设法使试验段的壁面有一个小的固定的扩散角（如 0.5° ）。但是环境风洞的风速范围大，试验段又长，采用固定修正法已不能满足需要，因此多采用可调顶板的方法来加以解决。

(2) 收缩段

收缩段位于稳定段和试验段之间，处于试验段的上游。它的作用是加速气流，使试验段获得所需的流速，此外，设计良好的收缩段还会使进入试验段的气流流速均匀，湍流度降低。

根据连续方程有：

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (6.1)$$

其中： A_1 ， A_2 和 V_1 ， V_2 分别是收缩段进口和出口的截面积及气流流速。

$$V_2 = (A_1 / A_2) V_1 = CV_1 \quad (6.2)$$

其中 $C = A_1 / A_2$ 是收缩段进、出口的面积比，通常叫做收缩比。

显然，收缩比大的对气流加速的作用也大。

收缩段降低湍流度的作用已为实践所证实。通常用下式来估算收缩段对降低湍流度的作用。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 / C \quad (6.3)$$

其中 ε_1 和 ε_2 分别是收缩段进、出口的湍流度，由 (6.3) 式可知，试验段的湍流度 ε_2 是稳定段出口湍流度 ε_1 的 $1/C$ 倍，在 ε_1 不变的情况下， C 愈大 ε_2 愈小。

另外，在试验段气流流速一定的前提下，收缩比大的风洞有较高的能量比。通常在管道中的能量损失与当地的气流流速的三次方成正比，因而，如果降低了管道中的流速，也就减少了气流在管道中的能量损失。大的收缩比的作用之一就是降低了大部分通道中的气流流速。

收缩段设计的好坏直接影响试验段的气流品质，因此在设计中有以下几点需要考虑：

a) 收缩比 C 的选取

采用大的收缩比，无疑对试验段气流的品质有好的作用，但这并不意味着收缩比愈大愈好。因为在试验段截面积一定的情况下，收缩比大就意味着风洞的其他部分的尺寸大（对回流式风洞来说尤其如此），这将增加风洞的造价。一般风洞的 C 值多在 4—9 之间，选多大合适要根据风洞的用途全面权衡。

b) 收缩段的长度

收缩段的长度的选取可以随意些，不过也应注意长短适当，长度过长一则没有必要二则增加造价经济上不合算，过短则有可能使出口的气流不均匀。一般对 $C = 4 \sim 9$ 的收缩段，其长度取进口当量直径的 0.5~1.5 倍，其中大的值是在收缩比小的时

候采用。

C) 收缩曲线的计算

收缩段的收缩曲线应好好计算，以保证气流在出口处均匀。

三维收缩曲线常用的计算式是 Bumouy Hekyú 公式

$$R = \frac{R_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \frac{(1 - 3x^2/a^2)^2}{(1 + x^2/a^2)^2} \right]}} \quad (6.4)$$

其中 R_1, R_2 为收缩段进、出口处截面的半径， x 为沿收缩曲线中心轴的座标； a 是特征长度， $a = 3l$ ， l 是收缩段的长度； R 是计算位置 x 处的截面半径。如图 6—3 所示

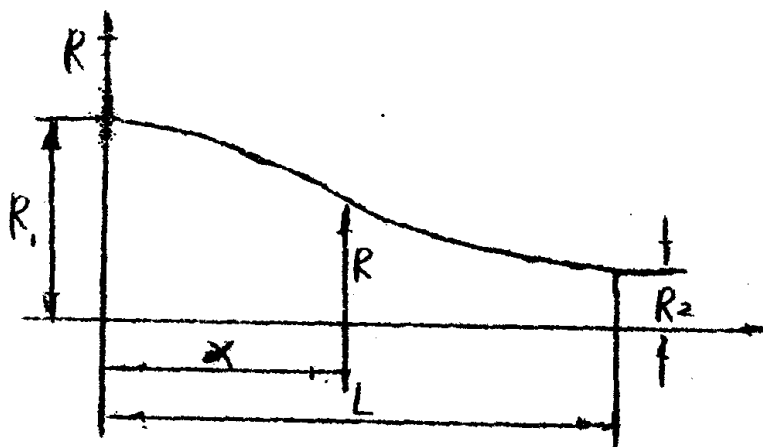


图 6—3 收缩曲线

若收缩段截面是非圆截面时，则 R, R_1 和 R_2 表示其当量半径。收缩曲线的计算公式还有很多，如三维的还有钱学森方法和 Batchlor—Shaw 方法，二维的有林同骥方法和 Cheers 法和 Libby—Reiss 方法等，这里不再一一介绍。

(3) 扩散段

扩散段是一个截面积逐渐变大的管道，通过它可以降低气流

的流速从而把气流的动能转变成压力能，以达到减少能量损失的目的。扩散段一般位于试验段的下游，进口与试验段的出口相接（也有把它用到其他部位的情况）。它是风洞的一个不可缺少的部分，无论是直流式风洞还是回流式风洞都必须用它。

在设计扩散段时必须综合考虑扩散比、扩散角和扩散段长度的搭配。以上各术语的几何意义如图6-4所示

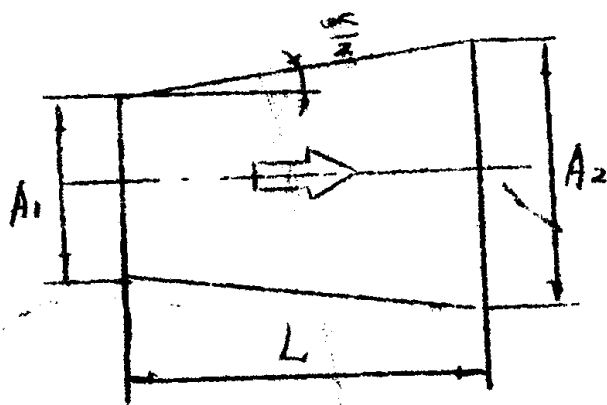


图6-4 扩散段

其中 A_1 和 A_2 分别是扩散段进口及出口的截面积， A_2 / A_1 叫做扩散比， α 是扩散角， L 是扩散段的长度。

扩散角和扩散比 A_2 / A_1 是影响扩散段性能的主要因素。在扩散比一定的情况下，扩散角大就可以缩短扩散段的长度，降低风洞的造价，但扩散角太大就会产生气流的分体，这不仅降低了扩散效率，而且分体的气流还会反过来影响试验段气流的品质。反之，如果扩散角小了，虽然扩散效率高些，但扩散段的长度就会增加，因而增加了风洞的造价。所以扩散段设计的任务就是把风洞的空气动力性能和经济性结合起来，确定合适的扩散角和扩散比。

一般说来，对于三维扩散段扩散角以 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 为宜，不宜超过 7° ；对于二维扩散段扩散角可以选得稍大些，在 $7^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 之间选取，不宜超过 10° 。扩散比在2—3之间选取。扩散段的长度是扩散角和扩散比的因变量，当 α 和 A_2/A_1 确定以后 L 也就确定了。

(4) 稳定段及整流装置

稳定段位于收缩段的上游，是稳定气流的地方。一般在稳定段内都装有蜂窝器和阻尼网，以保证气流进入收缩段时平直均匀。稳定段的构成如图6—5所示。

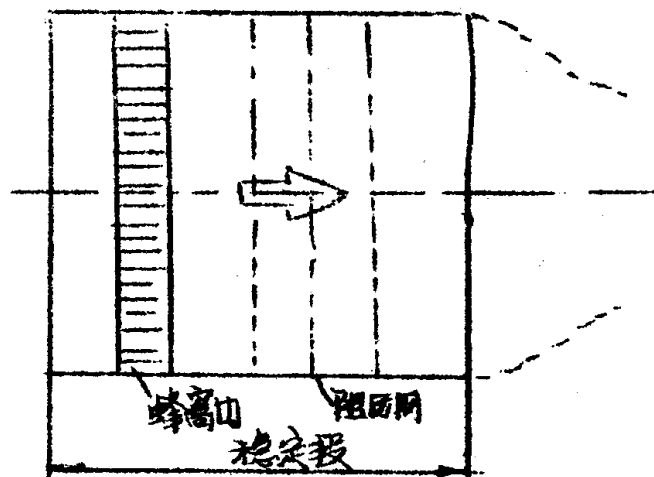


图 6—5 稳定段

a) 稳定段

稳定段是一等截面管道，其截面的形状，尺寸大小与收缩段入口一样，受试验段的形状的影响，受收缩比大小的影响。

稳定段的长度除了能供安装蜂窝器、阻尼网的地方以外，还需要有足够的长度供经过蜂窝器、阻尼网后气流中涡旋的衰减。其长度多取其当量直径的 $0.5\sim 1.0$ 倍。

b) 蜂窝器

蜂窝器是由截面呈六角形、方形和圆形等的小管组成的，其形状类似于蜂窝，故称之为蜂窝器。它的作用是校正气流的方向，把大尺度的涡旋割碎成小尺度的涡旋。

蜂窝器的形状如图 6—6 所示。

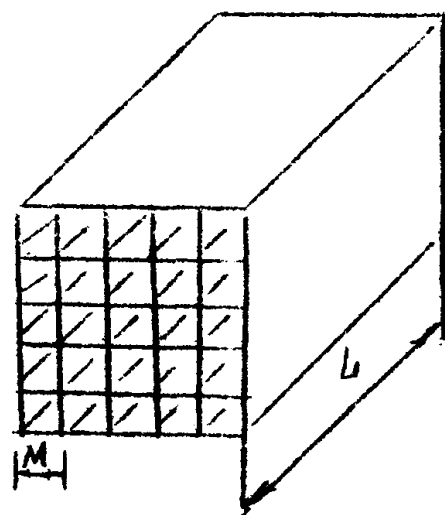


图 6—6 蜂窝器

其中 M 表示蜂窝器的特征尺寸， L 是蜂窝器的长度，一般采用 $L/M = 6 \sim 10$ 的规格。

c) 阻尼网

阻尼网安装在蜂窝器的下游，它的作用是把经过蜂窝器变小的涡旋在沿程衰减之后，再进一步减小涡旋的尺度和强度。在要求湍流度低的风洞中，根据需要可以加多层阻尼网以满足需要。

阻尼网降低湍流度的近似关系式如下：

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{(1+nK)^{n/2}} \quad (6.5)$$

其中 ε_1 和 ε_2 分别是网前和网后的湍流度， K 是单层网的阻力损

失系数， n 是网的层数。

(5) 回流段及拐角

回流段只用在回流式风洞中（个别直流式风洞也用），拐角不仅在回流式风洞中用，而且在某些直流式风洞中也使用。

a) 回流道

回流通道有的是截面不变的管道，有的是截面积逐渐扩大的管道，它除了起循环通道的作用外，对于逐渐扩大的通道来说还可以起继续扩散作用。扩散角的大小和扩散段的扩散角应大体相当。

b) 拐角

对于回流式风洞，气流沿风洞循环一次要转 360° 角，这时一般是采用四个 90° 角的拐角来实现。有的直流式风洞也采用一个或二个拐角来改变进气或排气的方向。

拐角处的能量损失很大，在回流式风洞中一般要占风洞全部损失的 $40 \sim 60\%$ 左右。气流在拐角处由于离心力的作用容易分离，产生较大的涡旋引起气流的脉动，从而影响试验段气流的品质，因此必须仔细设计。

为了改善拐角处的气流流态，在拐角处大都安装拐角导流片。导流片的形状有翼剖面形、圆弧形和圆弧加直线段形等式样。如图 6—7 示。

导流片的弦长、片数、间距及安装角等应按照规定的值加工、安装。如有需要可参考有关资料。

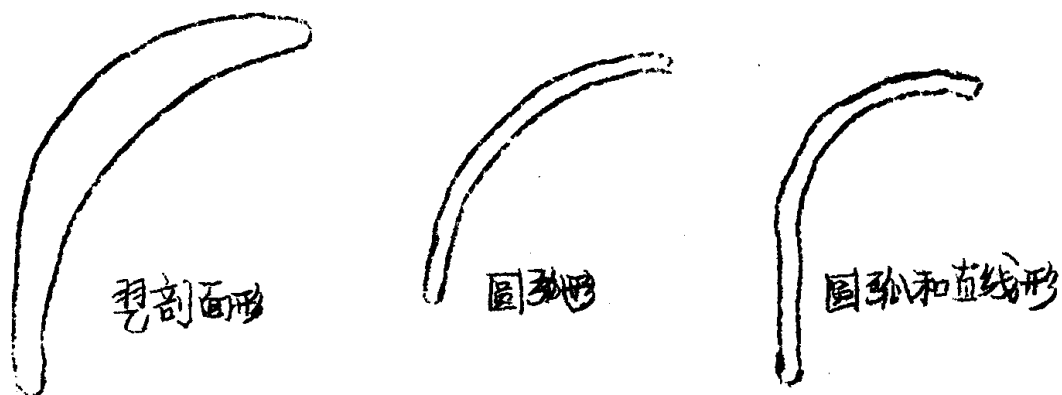


图 6—7 拐角导流片的形状

3 气流在风洞中的能量损失

(1) 计算气流在风洞中的能量损失是气动设计的最主要的一项内容。

首先，通过能量损失的计算可以估计所设计的风洞的运转费用，判断在经济上是否合算；

其次，通过计算可以发现原设计中不合理的地方，为进一步完善设计提供依据；

再者，能量损失的计算是设计（或选用）风扇、估计所需功率必不可少的前提条件。

经验表明，用瓦吞道夫 (Wattendorf) 的方法来计算能量损失是比较可靠的。他的方法是把风洞看成是由等截面管道，扩散管道、收缩管道和拐角等组成的，然后根据管道中的水力摩阻损失的计算方法，分别计算气流在各类通道中的能量损失。

首先，定义局部损失系数 K_i

$$K_i = \frac{\Delta P_i}{\frac{1}{2} \rho v_1^2} \quad (6.6)$$

其中 ΔP_i 是气流在该局部管道中损失的静压差, V_i 是该管道中的气流流速

再定义损失系数 K_{oi}

$$K_{oi} = \frac{\Delta P_i}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (6.7)$$

其中 v_0 是试验段中的气流流速。由 (6.6), (6.7) 和连续方程式显然有

$$K_{oi} = K_i \left(\frac{V_i}{v_0} \right)^2 = K_i \left(\frac{D_0}{D_i} \right)^4 \quad (6.8)$$

局部能量损失 ΔE_i 可以由下式确定:

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \Delta P_i \cdot A_i \cdot V_i \\ &= K_i \cdot \frac{1}{2} \rho V_i^3 \cdot A_i \\ &= K_{oi} \cdot \frac{1}{2} \rho v_0^3 \cdot A_0 \end{aligned} \quad (6.9)$$

各局部损失求出后就可求总合求出总的能量损失。因此关键在于求 K_i (或 K_{oi})。

(2) 风洞中各段损失系数的求法

a) 平直段

试验段、稳定段和部分回流通道的都是平直段, 可以用下式计算局部损失系数:

$$K_i = \frac{L}{D} \lambda \quad (6.10)$$

其中 L 和 D 是该段的长度和当量直径, λ 是摩擦损失系数。当 Re 数为 $10^5 \sim 10^7$ 时, λ 的值可以用尼古拉茨 (Nikraudze) 公式求出

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad (6.11)$$

也可以用 V. Karman 公式计算

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (6.12)$$

根据 V. Karman 公式绘出的曲线, 如图 6—8 所示根据求出的 Re 数可以从曲线上查出 λ 值。

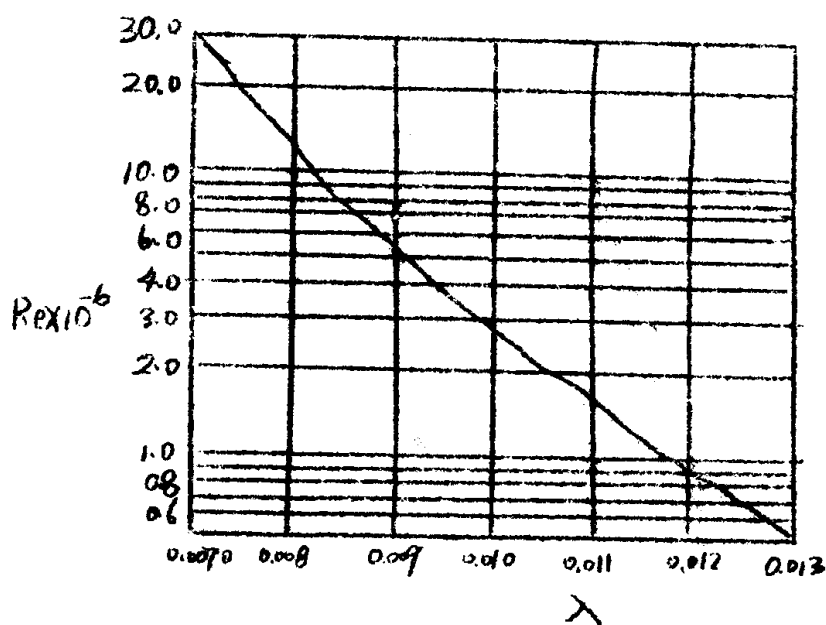


图 6—8

b) 收缩管道

收缩段的损失在全部损失中占很小一部分, 通常用下式来估算

$$K_{o1} = 0.005 \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^4 \right] \quad (6.13)$$

实践表明, 这一经验公式估算的误差是很小的。

c) 扩散管道