

实验空气动力学

上册

601 教研室

南京航空学院

1982.6.

实验空气动力学 (上册)

目 录

第一章 绪论

- § 1—1 实验空气动力学的研究对象 1—1
- § 1—2 实验空气动力学中的基本实验设备 1—2
- § 1—3 实验空气动力学中的测量方法 1—4
- § 1—4 本课程的内容和任务 1—6

第二章 实验空气动力学中的相似律

- § 2—1 概述 2—1
- § 2—2 相似理论及其应用 2—2
 - (一) 相似的基本概念 2—2
 - (二) 相似准数及其求取方法 2—4
 - (三) 相似理论 2—5
 - (四) 应用相似理论求取相似准数的举例 2—6
- § 2—3 量纲理论及其应用 2—10
 - (一) 关于量纲的基本知识 2—11
 - (二) 物理方程的量纲一致性原理 2—15
 - (三) π 定理及其应用 2—15
 - (四) 应用量纲理论求取相似准数的举例 2—22
- § 2—4 相似模拟问题的实际处理 2—24

第三章 风洞

- § 3—1 风洞的类别和功用 3—1
- § 3—2 低速风洞 3—5
- § 3—3 其它形式的低速风洞 3—13
- § 3—4 低速风洞的需用功率与能量比 3—18
- § 3—5 超音速风洞 3—22

§ 3—6 超音速风洞的压力比和超音速扩压段 3—33

§ 3—7 跨音速风洞 3—39

第四章 误差分析

§ 4—1 误差概念 4—1

(一) 误差定义 4—2

(二) 误差产生的原因 4—5

(三) 误差分类 4—6

(四) 精度 4—9

§ 4—2 随机误差的处理 4—10

(一) 随机误差的正态分布规律 4—10

(二) 概率计算 4—14

(三) 最小二乘法原理与算术平均值 4—16

(四) 标准误差 4—18

§ 4—3 误差传递 4—21

(一) 误差传递公式 4—22

(二) 误差传递公式的应用 4—27

§ 4—4 误差理论在风洞实验中的应用 4—28

(一) 误差计算 4—28

(二) 用最小二乘法原理确定最佳实验曲线方程 4—32

第五章 风洞气流基本参数测量

§ 5—1 概述 5—1

§ 5—2 压力测量 5—1

(一) 总压测量 5—1

(二) 静压测量 5—4

(三) 物体表面上压力的测量 5—7

〔四〕 压力传递导管	5—8
〔五〕 压力显示仪器	5—10
〔六〕 压力传感器	5—17
§ 5—3 气流速度与 M 数测量	5—19
〔一〕 风速管	5—19
〔二〕 低速风洞实验段中气流速度测量	5—20
〔三〕 M 数测量	5—22
§ 5—4 流向测量	5—23
§ 5—5 紊流度测量	5—25
§ 5—6 气流温度测量	5—30
§ 5—7 流场校测的项目	5—31

实验空气动力学

第一章 绪 论

§ 1-1 实验空气动力学的研究对象

借助于实验的方法去探索、验证空气动力学中的客观规律、为飞机（包括飞行器，下同）设计提供空气动力数据，是实验空气动力学的主要任务。具体地说，实验空气动力学的研究对象有以下三个主要方面：

1. 探索空气动力学中的新领域。空气动力学跟其它自然科学一样，理论是来自实践的，需要借助于实验来认识客观存在的规律性。空气动力学中许多复杂的物理现象都是首先通过实验进行探索、研究的，例如：附面层中的流动特性、激波与附面层干扰、紊流结构、升力线理论，特别是近期的三项重大成果：五十年代发现的面积律、六十年代的尖峰翼型和后来的超临界翼型、以及前缘涡的利用和边条机翼等。都是最初在实验研究的基础上发展起来的。

2. 验证空气动力学中理论分析和计算的结果。空气动力学跟其它自然科学一样，理论要由实验来验证。在理论分析和计算方法中，一般首先对所研究的现象进行必要的简化，建立和求解方程，最后得到一定的结论、公式或数据。这种方法系统性、完整性强，省时省力，十分经济。但在分析、计算过程中难免要作一些简化和假设，与真实的现象有一定的差别，所以，理论分析和计算所得的结果都要借助于实验来验证其近似程度和可靠程度。在空气动力学中这样的实例不胜枚举。

3. 为飞机研制和改型提供气动力数据。在飞机的研制和改型过程中，只有把理论计算和模型实验密切结合起来，才能全面地解决所

面临的各种气动力问题。通常的作法是先根据已有的理论结果和实验结果结合具体要求进行理论计算，这样先行一步，为研制或改型指出方向，定出各种方案，然后再用实验取得各种情况下的大量数据，以供分析比较和最后的选择与定型。由于飞机外形和流动现象都比较复杂，可靠的气动力数据只能从实验中得到。因此，现代飞机在研制过程中不仅要进行大规模的理论计算，更主要的还要进行数以千计甚至万计实验小时的模型实验。因此，模型实验在飞机研制和改型过程中占有相当重要的地位。

§ 1—2 实验空气动力学中的基本实验设备：

为了进行气动力实验，首先要使模型与空气之间产生相对运动，然后测量模型上的气动力或观测其流动状态。使模型与空气之间产生相对运动的基本方法和相应的设备，可分为三类：

1. 风洞实验法和风洞

风洞实验法的特点是：利用各种方法（例如利用轴流式风扇）在一种特殊的管道内造成人工空气流动，然后把要做实验的模型用支杆固定在这个管道中气流最均匀、风速最大的实验段中，气流吹过模型时作用在模型上的气动力数据传到测量仪器上去，从而取得作用在模型上的各种气动力实验数据。

风洞实验法的优点，首先在于模型和观测仪器可以固定安装在地面上，流场相对于地面观测者来说是定常流，对于现象观测和测量都比较方便，而且精度较高。其次，这种方法便于控制和改变实验条件，所能研究的气动力现象的范围也比较广，效能比较高。缺点是实验流场不能保证与实际完全相似，只是部份相似而已，特别是洞壁和支杆

会对模型产生干扰，故实验数据要经过比较麻烦的修正过程才能用到实际中去。

由于风洞实验法已有了数十年的历史，比较成熟和完善，因此在飞机的气动力实验中应用得最普遍、最有成效，可以说，在今天，不论在气动力问题的基础研究、应用研究、以及飞机的研制过程中都离不开风洞实验，它已成为气动力研究中最强有力的实验工具。

2. 携带实验法和携带设备

携带实验法的特点是：将模型固定在携带设备上，并随着一起运动，以使模型与空气产生相对运动，使用装在运动着的携带设备上的测量仪器测出模型上的各种气动力数据。根据携带情况不同，可分为飞行携带和地面携带。用飞机（称之为母机）或火箭携带模型在天空飞行的，属于飞行携带。所谓地面携带则有旋臂机携带和火箭车携带两种。

旋臂机携带的设备是旋臂机，旋臂机的中间有转轴，由强有力的电机带动转轴，转轴上有一旋臂，转轴带动了旋臂，模型装在旋臂端部。当旋臂作等速旋转时，模型则作等速圆周运动。这种方法在十九世纪就有了，但它有严重缺点：模型所产生的尾流仍留在圆周上，所以模型总是在自身先前所产生的尾流遗迹中运动，流场不均匀；模型作圆周运动，与飞机的直线飞行情况不同，模型上的气动力测量比较麻烦，因为模型在动，测量仪器与模型相联通有较大的困难。这种方法在现在已很少被应用了。

火箭车携带法所使用的火箭车是利用强有力的火箭来推动的，在很长的轨道上急驶的实验车，轨道长达数十公里，运动速度有的可达超音速。车上有安装模型的支架，和测量模型上气动力的测量仪器，这种方法优点是：相对来流比较均匀、流场不象风洞那样要受到洞壁的

干扰影响，而其缺点是：测量仪器装在试验车上，受到很大的惯性力，以及振动，测量准确度不高，工作时间短促、占地多。

飞行携带法是用飞机或火箭携带模型在大气中飞行以进行实验测量。它有着与火箭车携带法相同的优点，但同样对测量仪器要求较高，实验费用也较昂贵。

3. 自由飞行实验法

这种实验的特点是：用发射的方法或带动力装置的方法使模型在大气中自由飞行，测量仪器装在模型本身上自动记录或利用无线电原理发送到地面接收系统上去。优点是周围流场与飞机流场一样。缺点是测量工作和整理数据很困难。在一般情况下只能根据运动轨迹和加速度来推算气动力，因此数据准确性不高。

携带法和自由飞行实验法在历史上曾为空气动力研究（例如跨音速飞行）作过一些有价值的研究工作，得出了不少有用的数据。但由于风洞实验法的进一步发展和完善化，绝大部分的气动力实验工作今天都可以在风洞中进行了，因此它们的重要性已有所下降，但仍不失为风洞实验之外的重要辅助方法和工具，以便验证风洞实验数据的可靠性和解决那些在风洞中难于解决的问题。

§ 1—3 实验空气动力学中的测量方法

实验空气动力学中的测量方法甚多，这里主要是讲风洞实验中经常使用的几种测量方法。测量方法按其基本性质可分为常规测量法，和特殊测量法两类。

常规测量法有以下几种：

1. 流动显示法：流动显示法又叫形象观察法，在风洞实验中有很大的作用，利用形象观察可以帮助我们对流动状态的物理现象比较

深刻的感性认识，这对于在研究分析实验结果，建立合理的简化模型便于进行理论研究的开展，以及发现飞机存在的问题从而改型设计以获得良好的性能等方面有很大的帮助。

常用的流动显示法有：

(1) 丝线法：一般是将丝线粘贴在模型的表面上，用以观察模型绕流流场中的流动形态。从而可以看出模型上什么地方有分离现象，和旋涡的位置与形状，流线的大致形状等。

(2) 烟纹法：基本上与以上方法有相似的作用。

(3) 油膜法：根据附面层内风速不大，将具有适当粘性的滑油涂在模型表面上，气流吹过后可从油膜的纹理结构中观察膜型表面绕流情况。

(4) 光学仪器法：有阴影法、纹影法、和干涉法等，一般是在超音速风洞实验时用来观察气流中气流密度变化较大的地方如激波、膨胀波以及激波与附面层干扰之用。而快速照相，快速电影摄影，以及连续曝光等方法也属于此类。激光技术可在风洞实验时用来测速以及全息摄影。

(5) 化学反应法：将化学涂料涂在模型表面上，用以鉴别模型表面绕流的流态是层流还是紊流，因为紊流的气流中气体微团紊动速度大，促使了化学反应快，从而使化学涂料在层流与紊流的分界处，产生了明显的分界线。这就是附面层内层流变成紊流的转捩点。

2. 压力分布测量法：由模型表面压力分布的测量可以获得飞机部件强度计算所需要的载荷数据。还可以由压力分布用积分法算出由压差所形成的部分空气动力（如升力、俯仰力矩等）。在风洞实验中，压力分布测量法用得相当普遍。模型实验中，翼剖面和三元机翼的压力分布实验是最主要的，其它部件的压力分布测量也是经常碰到的。

3. 使用气动天平来直接测量模型所受的各个气动力和力矩。根据测量对象的要求，有时只要测一个力或两个力，但有时需要测更多的力的分量；例如同时测出作用在模型上的沿三个轴向的力 X 、 Y 、 Z 和绕三个轴的力矩 M_x 、 M_y 、 M_z ，也就是六个分量。测力法是风洞实验中最主要的方法，它是取得气动力数据最直接最方便的方法。

4. 流场测量法：测量空风洞实验段中或模型区流场中的流速、流向、温度、紊流度等气流参数的分布值，从而判断风洞流场的好坏。

5. 附面层测量法：测量物面上附面层的速度型、温度型、转捩点、分离点、单位面积摩擦力、壁温等等，以便判断附面层流动的特性。测量模型尾流区的动量改变也属于这一类。

除以上测量实验外，还有些特殊实验，如动导数实验、颤振实验、进气道实验、尾喷流实验、垂直或短距起落实验等等，这时需要用特殊的方法来进行测量，在本课程中有的将略加介绍，有的就不讲了。

由于在风洞中可以利用如上各种方法来进行观察和测量气动力现象，因此风洞实验可以获得大量的有用的气动力数据，这是其它实验方法所不能与之比拟的，这也就是风洞实验目前在气动力研究工作中成为最强有力的实验设备的主要原因。

§ 1—4 本课程的内容和任务：

《实验空气动力学》是空气动力学专业的必修课之一。作为一个在飞机设计部门或在实验室从事气动力工作的工程技术人员，一般应具有进行实验设计的能力、处理实验中出现的技术问题的能力和对实验数据进行修正和处理的能力。其中实验设计是最基本的工作，对一项具体的实验来说，实验设计大致包括以下内容：

1. 在调查研究的基础上, 论证该项实验的目的和必要性。
2. 根据相似律, 确定该实验中应该模拟哪些参数、对不能模拟的参数应如何处理。
3. 确定该实验中的原始变量以及如何控制这些变量, 确定应测哪些量、测量的精度要求和测量的重复次数, 预计测量结果的量级。
4. 确定在各种不同的条件下应采集多少数据点, 既要足够, 又要尽可能少。数据点的分布密度要适当。
5. 实验结果需作哪些修正, 论证其原理, 确定其方法。
6. 确定实验所需的仪器、设备的工作范围和基本性能。
7. 选用、购置已有的合用的仪器设备, 研制专用的仪器设备。设计实验用的模型, 并提出制造、安装和测量的方案。
8. 分析实验中的不安全因素, 事先采取必要的安全措施。
9. 对经费预算、时间限制和人力组织进行论证和计划。
10. 制定实验大纲和实验计划。

以上十个方面的能力, 是需要在学习中不断学习, 不断积累经验, 才能真正得到提高的。要想简单地通过一两门课程的学习后就能胜任这些工作, 是不现实的。本课程主要讲述常规气动力实验及其仪器和设备的基本知识、基本概念和基本原理, 为今后在工作实践中进一步提高实验设计的能力打下一个基础。

在此顺便提及, 本书采用的单位制, 除特别说明者外, 均系国际单位制(SI)。

第二章 实验空气动力学中的相似律

§ 2—1 概述

大多数学科的科学实验是用实物（样机）进行实验的，既真实可靠，又简单方便。而空气动力学则不然，在飞机研制和改型中，往往是在没有实物的情况下进行空气动力学实验，或不可能用实物进行实验，而只能用模型进行实验。这就存在一个空气动力学实验的模拟问题。其它学科，例如水利、航海和化工等，也存在模型实验的模拟问题。

用模型在风洞中进行实验，取得相应于实物（飞机）在空中飞行状况的气动力数据，这是实验空气动力学中惯用的方法，既经济，又安全。但是，是否“可靠”呢？也就是说，风洞模型实验的数据是否符合飞机在空中飞行的实际呢？对这个问题给予科学的回答，就是本章的主要目的。所谓科学的回答，即有一定科学依据的回答，而不是一般性的回答。例如，根据一般常识可知，要研究某一轰炸机的性能不会用歼击机模型进行实验，要研究低速飞行的性能则不会进行超音速风洞实验。又例如，某模型是某飞机的 $1/10$ 缩尺，外形相似，风速也相等，测得阻力是50牛顿，难道实物（飞机）的阻力一定是扩大10倍而为500牛顿吗？如果不应该这样处理，那么，应该如何处理实验数据呢？

综上所述，可归纳为两个问题：

1. 在模型实验中，如何模拟实物飞行的实际情况，才能使实验所得数据与飞行情况相符？
2. 在模型实验后，如何将实验所得数据应用到实物飞行情况中去？

对这两个基本问题的正确回答，应该是：

1. 要按照相似律的要求使两个流场相似。即：风洞模型实验的流场，实物飞行的流场，两者应该相似。

2. 要用相似准数来整理实验数据。也就是说，用相似准数表示的模型实验结果，可以用到实物上去。

那么，什么叫两个流场相似呢？如何判别和保证两个流场相似呢？要模拟哪些相似准数呢？如何确定相似准数呢？不同的实验要模拟的相似准数都一样吗？如果不能完全模拟所有应该模拟的相似准数，又该怎么办呢？这一系列的问题，要由相似理论和量纲理论来回答，也就是本章的主要内容。

§ 2—2 相似理论及其应用

〔一〕相似的基本概念

1. 单值条件：能够把一个个别的物理现象从该类物理现象中分离开来，必须具有的相应的基本条件，叫做单值条件。其中有些是物理量，叫做单值量。单值条件（包括单值量在内，不另区分）有以下几类：

物理条件：物体的状态、性质、物理参数。

几何条件：发生现象的空间几何形状和大小。

时间条件：过程的初始条件，过程中的定常性、非定常性。

边界条件：同周围介质相互作用的条件。

2. 单值条件相似：现以几何物体的相似来说明这个问题。

几何物体的相似，是人们所熟知的相似现象，例如相似三角形，以及地图，沙盘……等。它们的共同特点是，长度这个单值条件是成比例的，对相似三角形来说，其对应边是成比例的：

$$\frac{L_1}{L_1'} = \frac{L_2}{L_2'} = \frac{L_3}{L_3'}$$

由此可知，单值条件的比值相同（即单值条件相似），两个现象就是相似的。这是我们已有的关于相似的概念。

研究两个物理现象的相似，要比研究孤立的静止的几何物体的相似问题复杂一些。两个物理现象的相似，不仅是其几何相似，而且在两个现象对应点上同一物理量的比值相同（如果是矢量还包括方向相同），单值条件都是相似的。

3. 空气动力学中两个流场的相似：

在空气动力学中研究两个流场的相似，是涉及到各种参数的综合问题，包括几何参数，运动学参数，动力学参数，热力学参数等。一般说来，空气动力学中的相似问题，涉及到以下几个方面：

1. 几何相似：两个物体，其中一个物体经过均匀变形（每个尺寸都扩大或缩小同一倍数）后能和另一个物体完全重合，则称这两个物体几何相似。 l 、 l' 是两个物体的对应尺寸。则：

$$\frac{l}{l'} = \text{常数}$$

2. 运动相似：两个流场对应点的速度、加速度具有相同的方向，它们的大小保持同一比值：

$$\frac{v}{v'} = \text{常数}$$

$$\frac{a}{a'} = \text{常数}$$

运动相似，既速度矢量场、加速度矢量场的几何相似，流线谱均匀变形后会重合。

3. 动力相似：两个流场对应点上作用的各个力组成的力多边形是几何相似的。令 P 和 P' 为对应的力，其方向相同，而且

$$\frac{p}{p'} = \text{常数}$$

动力相似，即作用力的矢量场的几何相似。

4. 热力相似：两个流场中对应点温度的比保持同一数值。即温度场（标量）的几何相似。

5. 质量相似：两个流场或物体，对应点的密度之比为同一常数即

$$\frac{\rho}{\rho'} = \text{常数}$$

〔二〕相似准数及其求取方法

自然现象总是服从一定的规律。表征现象特性的各个参数间存在着一定的关系，并可用物理方程来描述这一关系。同一物理现象必符合同一类型的物理方程。

两个现象相似，必然是同一类型的现象，符合同一类型的物理方程，同时各物理量各自互成比例。

例如，一个物体受外力作用而运动，其物理方程为

$$f = m \frac{dv}{dt} \quad (2-1)$$

如果另一物体受力运动的现象与其相似，则

$$f' = m' \frac{dv'}{dt'} \quad (2-2)$$

根据相似的定义，单值条件成比例，即：

$$\frac{f}{f'} = C_f, \quad \frac{m}{m'} = C_m, \quad \frac{v}{v'} = C_v, \quad \frac{t}{t'} = C_t \quad (2-3)$$

其中 C_f 、 C_m 、 C_v 和 C_t 是比例常数，又称相似常数。

(2-3) 式代入 (2-1) 式可得：

$$\frac{C_f C_t}{C_m C_v} f' = m' \frac{dv'}{dt'}$$

与(2-2)式相比, 可得相似系数(相似指标)为1

$$\frac{C_f C_t}{C_m C_v} = 1 \quad (2-4)$$

(2-3)式代入(2-4)式得

$$\frac{ft}{mv} = \frac{f't'}{m'v'} = \text{常数}$$

$\frac{ft}{mv}$ 是无量纲参数, 称作牛顿准数, $N_e = \frac{ft}{mv}$ 。当两个力学

系统相似时, 其牛顿准数必相同, $N_e = N_e'$ 。牛顿准数是衡量两个力学系统相似与否的一个判据, 是一种相似准数。

推而广之, 两个相似现象, 对应点上一定物理量的组合等于某一常数, 这个常数称作相似准数。当两个现象相似时, 其同名相似准数的数值必然相同。

相似准数, 在不同的书中有的叫做相似准则、相似判据、相似模数、相似参数等。

由上面简单的例子可知, 应用基本方程式求取相似准数的步骤如下:

1. 列出基本方程式;
2. 列出单值条件相似的关系式, 代入基本方程式;
3. 得出由相似常数组成的相似系数(相似指标)为1, 整理可

得相似准数。

(三) 相似理论:

在上述的关于相似的定义和性质的基础上, 可将相似理论总结、归纳如下。

1. “相似的现象，其单值条件相似，其同名相似准数的数值相同”。这就是说：1) 相似的现象，必是以几何相似为前提的；2) 对应点上同类量的比为常数；3) 相似的现象必是同一性质的现象，服从同一规律（其物理方程文字上必为同一形式），可导出若干个相似准数，同名相似准数的数值是相同的。这些就是相似现象具有的性质。

2. “相似的现象，由相似准数描述的函数关系，对两个相似现象是相同的。”也就是说，一个现象的实验结果，按相似准数整理，可以用到另一个与其相似的现象上去。

3. “现象的单值条件相似，相似准数相等，则现象相似”。这就告诉我们，现象相似的必要充分条件是：

1. 单值条件相似；
2. 同名相似准数相等。

〔四〕应用相似理论求取相似准数的举例

例一，由 N—S 方程求取相似准数

1. 列出基本方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ &+ \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ &+ \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

式中：u、v——x 向和 y 向的流速

f_x 、 f_y ——单位质量的物体力在 x、y 向的分力。