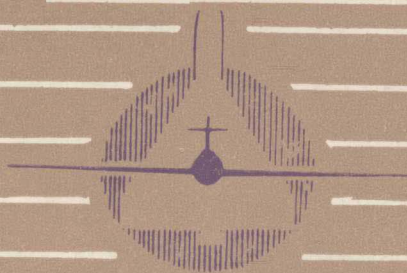


空气动力学实验技术

王铁城 吴志成 肖人熙 郝忠祥 鲍国华 编

王铁城 主编



国防工业出版社

空气动力学实验技术

王铁城 吴志成 肖人熙 郝忠祥 鲍国华 编

王铁城 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讲述空气动力学实验的基本理论、实验设备、实验方法和实验数据的修正,包括相似理论、误差理论、风洞原理、气流参数测量、流动显示、空气动力天平、高速和低速风洞常规实验方法和实验数据修正等。

本书可作为航空院校本科的教材,也可作为短训班的教材。对于从事流体力学实验和飞行器设计的工程技术人员也有参考价值。

空气动力学实验技术

王铁城 吴志成 肖人熙 祁忠祥 鲍国华 编

王铁城 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 13 298千字

1986年4月第一版 1986年4月第一次印刷 印数: 0,001—1,550册

统一书号: 15034·3083 定价: ~~2.15元~~

2.15元

前 言

本书是根据航空院校空气动力学专业的教学计划和“空气动力学实验技术”课程大纲，作为大学本科生的教材而编写的，供课内学时为70至80者使用，亦可供低学时者选用。

“空气动力学实验技术”课程的内容包括以下几个部分：实验的基本理论、空气动力学实验的实验设备、实验方法和实验数据修正的基本原理。本书共分为九章，每章末附有问题和习题。

本书在编写过程中考虑了以下几个方面：

1. 以满足教学要求为主，本书注重基本概念和基本原理的阐述。
2. 本书除着重介绍目前广泛应用、行之有效的实验技术外，对正在发展中的新实验技术也作了相应的介绍。
3. 设想读者在阅读本书之前，已先修了空气动力学基础和其它的工科基础课程。

本书由王铁城主编。绪论和第一、二章由王铁城编写，第三、五章由吴志成编写，第四章由肖人熙编写，第六、七章由郗忠祥编写，第八、九章由鲍国华编写。全书插图由肖人熙描绘。

本书承顾高墀副教授审阅，伍荣林教授、戴昌晖教授、凌云沛教授、汪乔森教授、张佩林副教授、纪仕坪副教授、连其祥副教授、吴慰祖高级工程师、刘福长讲师、李春林讲师对本书初稿提出了宝贵的意见和建议。在此向他们表示真诚的谢意。

本书在编写过程中，参考了几所航空院校的讲义，并得到中国空气动力研究与发展中心、中国航空研究院沈阳、哈尔滨空气动力研究所和北京大学力学研究所的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中定有很多缺点错误，诚恳地欢迎读者批评指正。

目 录

绪 论	
§ 0-1 空气动力学实验技术的研究内容	1
§ 0-2 空气动力学实验技术发展简史	1
§ 0-3 空气动力学实验的基本方法	2
§ 0-4 本课程的内容和任务	4
第一章 相似理论	
§ 1-1 相似与相似定理	5
(一) 相似的基本概念	5
(二) 相似准则	6
(三) 相似定理	7
(四) 由基本方程导出相似准则的举例	8
§ 1-2 量纲分析	11
(一) 关于量纲的基本知识	11
(二) 物理方程的量纲一致性原理	13
(三) Π 定理及其意义	14
(四) Π 定理的应用	18
§ 1-3 相似理论的应用	22
问题与习题	24
第二章 风 洞	
§ 2-1 风洞的类别	26
§ 2-2 低速风洞	27
(一) 低速风洞的型式	28
(二) 低速风洞的主要部件	30
(三) 低速风洞的需用功率与能量比	34
§ 2-3 超音速风洞	36
(一) 超音速风洞的型式	36
(二) 超音速风洞的组成部分	38
(三) 超音速风洞的压强比与超音速扩压段	41
§ 2-4 跨音速风洞	44
§ 2-5 风洞发展动向简述	46
问题与习题	48
第三章 误差理论	
§ 3-1 测量误差的基本概念	50
(一) 误差定义	50
(二) 误差产生原因	51
(三) 误差分类	51
(四) 准确度	52
§ 3-2 直接测量误差的处理	53
(一) 系统误差的处理	53
(二) 随机误差的处理	54
(三) 粗大误差的处理	62
(四) 等精度直接测量列的数据处理	64
§ 3-3 间接测量误差的处理	66
(一) 间接测量误差计算	66
(二) 间接测量误差分配	69
§ 3-4 实验数据处理	70
(一) 有效数字	70
(二) 实验曲线方程	71
问题与习题	74
第四章 气动力天平	
§ 4-1 机械式天平	76
(一) 模型支架与角度机构	76
(二) 力与力矩的分解系统	77
(三) 力与力矩的传递系统	79
(四) 力与力矩分量的测量元件	79
(五) 台式天平	79
§ 4-2 电阻应变式天平	81
(一) 电阻应变片	82
(二) 测量电桥的特性	84
(三) 电阻应变仪与显示记录仪器	86
(四) 应变式天平的测量元件	86
§ 4-3 天平性能指标与影响因素	91
§ 4-4 天平的校准	92
§ 4-5 坐标轴系及其转换	94
§ 4-6 磁悬式天平简介	96
问题与习题	97
第五章 气流参数测量	
§ 5-1 压强测量	98
(一) 静压测量	98
(二) 总压测量	100
(三) 压强测量仪器	102
(四) 测压传感器	103
(五) 压强传递	105
§ 5-2 温度测量	106
(一) 风洞稳定段总温测量	106
(二) 高速气流总温测量	106
(三) 复温系数	107

§ 5-3 气流速度、方向、紊流度 与噪声测量	107
(一) 风速测量	107
(二) 马赫数测量	110
(三) 气流方向测量	111
(四) 气流紊流度测量	114
(五) 跨、超音速风洞噪声测量	117
§ 5-4 数据采集系统简介	117
问题与习题	119

第六章 低速风洞模型实验

§ 6-1 实验大纲的制定	120
(一) 影响空气动力系数的各种参数	120
(二) 实验大纲	121
§ 6-2 低速实验的模型设计	122
(一) 模型尺寸的确定	122
(二) 模型的外形与结构	123
(三) 模型的材料与加工要求	125
§ 6-3 低速全机模型测力实验	126
(一) 升力特性	127
(二) 阻力特性	127
(三) 俯仰力矩特性	128
(四) 操纵面的空气动力特性	129
(五) 平尾区下洗角	130
(六) 襟翼的气动特性	131
(七) 横侧气动特性	131
§ 6-4 压强分布实验	132
§ 6-5 动量法实验	134
(一) 动量法测升力	134
(二) 积分压强计	136
(三) 动量法测型阻	137
§ 6-6 地面效应实验	138
问题与习题	139

第七章 低速风洞模型实验数据修正

§ 7-1 支架干扰修正	140
§ 7-2 平均气流偏角修正	142
§ 7-3 轴向静压梯度影响修正	144
(一) 二维风洞水平浮力修正量公式	145
(二) 三维风洞水平浮力修正量公式	145
§ 7-4 低速风洞洞壁干扰修正	146
(一) 基本概念	146
(二) 镜象法	147
(三) 洞壁的阻塞效应及其修正	149
(四) 洞壁的升力效应及其修正	154
§ 7-5 洞壁干扰修正数值算法简介	163
§ 7-6 无干扰洞壁与自修正风洞简介	164
(一) 通气壁	164

(二) 流线型洞壁	165
(三) 自修正风洞	165
§ 7-7 气流紊流度与雷诺数影响修正	167
问题与习题	170

第八章 高速模型实验与数据修正

§ 8-1 高速模型设计	172
(一) 模型尺寸的确定	172
(二) 模型外形的模拟	174
(三) 模型的结构与加工要求	175
(四) 模型的强度与刚度	176
§ 8-2 全机模型测力实验	177
(一) 升力特性	177
(二) 阻力特性	177
(三) 俯仰力矩特性	178
(四) 横侧特性	178
(五) 舵面特性	179
(六) 外挂物等对全机空气动力特性的影响	179
§ 8-3 半模型实验	180
§ 8-4 人工转捩实验	181
§ 8-5 铰链力矩实验	182
§ 8-6 高速风洞模型实验数据修正	183
(一) 迎角与侧滑角修正	183
(二) 天平静校中心与飞机质心不重合时的修正	184
(三) 模型自重修正	184
(四) 模型底部阻力修正	185
(五) 雷诺数影响修正	186
(六) 进气口模拟修正	186
(七) 弹性影响修正	188
问题与习题	188

第九章 流动显示

§ 9-1 烟流法	189
§ 9-2 丝线法	190
§ 9-3 油膜法	191
§ 9-4 升华法	191
§ 9-5 水流显示	192
(一) 染色法	192
(二) 氢气泡法	192
(三) 水面撒播法	192
§ 9-6 高速气流流动显示的光学法	193
(一) 有关的光学知识	193
(二) 纹影法	193
(三) 阴影法	196
(四) 干涉法	197
§ 9-7 激光全息摄影	198
§ 9-8 激光多普勒测速仪	199
问题与习题	201
参考资料	201

绪 论

§ 0-1 空气动力学实验技术的研究内容

空气动力学实验技术，是研究空气动力学实验的基本理论、实验设备、实验方法和实验数据修正与处理的一门技术性学科。

实验，是自然科学发展的基础。空气动力学实验，对于空气动力学的发展，起着重要的作用，主要表现在以下三个方面：

通过实验揭示流动的本质，开拓空气动力学的新领域。由于空气运动的复杂性，空气动力学的研究总是离不开实验。空气动力学的各种复杂的物理现象，都是通过实验逐步认识的，例如，附面层的存在及其特性，激波与附面层干扰，紊流结构，升力线理论，面积律，尖峰翼型，超临界翼型，前缘涡的利用和边条翼等，都是在实验研究的基础上发展起来的。

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，理论要经过实验验证方可确定其能否成立。在理论分析和计算中，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。理论分析和计算的系统性强、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，方可应用于工程实际。

为飞机（包括其它飞行器，下同）设计提供空气动力数据。在飞机研制和改型过程中，只有把理论计算与实验密切地结合起来，才能全面地解决各种复杂的空气动力学问题。通常的做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计算，为研制和改型指出方向，定出几种初步方案，然后再通过空气动力实验取得各种情况下的大量数据，以供分析、比较和最后定型。由于飞机外形和流动现象都比较复杂，可靠的空气动力数据只能从实验中得到。因此，现代飞机的研制过程中，不仅要进行大量的计算，而且要进行数千小时，乃至数万小时的模型气动力实验。

§ 0-2 空气动力学实验技术发展简史

空气动力学实验技术这门学科，是随着航空航天事业的发展而发展的。本世纪初，飞机刚刚出现，当时的风洞十分简陋，实验方法也十分简单。三十年代前后，世界上有了大量的大、中型低速风洞，各种空气动力学实验方法和实验数据修正与处理等都有了长足的进步。当时飞机的速度从二十年代的大约 50 m/s 提高到 170 m/s ，主要是依靠空气动力学实验的成果，改善了飞机空气动力外形，而不是依靠增大动力装置的功率。正是在这种航空生产实践的基础上，逐渐形成了空气动力学实验技术这门学科。四十年代末突破了“音障”，五十年代突破了“热障”，超音速飞机和人造卫星等相继出现。与此同时，五十年代是超音速风洞及其实验技术迅速发展的时期。其它各类风洞这时也有了相

当大的发展，空气动力学实验技术这门学科的内容得到了充实和完善。近二、三十年来，新一代风洞在不断地兴建，同时国内外各类风洞不断吸收现代科学技术新成果，同现代电子技术、计算机技术、激光技术和致冷技术等密切结合，使空气动力学实验的实验设备、实验方法和实验数据修正处理等又有了新的进展和提高。总之，空气动力学实验技术是在航空和航天生产实践的基础上应用现代科学技术发展起来的一门技术性学科。

空气动力学实验技术的发展，同其它自然科学一样，既依赖于生产实践，又受其它社会因素的影响。早在三十年代中期，我国清华大学曾计划兴建一座中型的低速风洞，并在江西南昌确定了建设风洞的地点。然而，在当时半封建半殖民地社会条件下，这一早期的建设风洞的计划，最终未能实现。直到1949年，我国没有一座可供科研用的大、中型风洞。中华人民共和国成立后，随着我国工农业生产和科学技术的发展，空气动力学实验技术取得了巨大进展。五十年代，我国首次建成了中型的低速风洞和中型的跨、超音速风洞。至今我国各类风洞已初步配套，建成了若干个具有一定规模的空气动力学研究机构，形成了一支具有一定水平的空气动力学实验工作者队伍，科研成果不断涌现，在许多方面与世界先进水平相比并无逊色。

在现代科学技术迅速发展的推动下，空气动力学实验技术的发展也进入了一个新的时期，首先，随着电子计算机和数值计算方法的发展，一方面计算机可以代替一部分实验项目，可比实验更迅速、更经济地提供必要的空气动力数据，使空气动力学实验工作者可以把精力更多地集中到探索空气动力学新领域方面去，促进空气动力学向着更深的方向发展。另一方面，计算机永远不可能完全代替实验研究，计算机只能解决物理机理已经通过实验研究弄清楚的不是过于复杂的流动问题，至于流动机理方面的研究以及数值计算结果的验证，仍要靠实验来解决。因此，电子计算机的飞速发展，不仅不会取代实验手段，而且将会促使空气动力学实验技术出现相应的跃进。其次，近年来飞机的性能越来越先进，需要解决的空气动力学问题越来越复杂，因而，对实验的要求越来越高，实验项目和实验的时数越来越多。五十年代研制一架大型飞机，风洞实验的时数达到一万小时，当时是一个十分可观的数字。七十年代研制的超音速运输机的风洞实验时数达四万小时，八十年代初出现的航天飞机的风洞实验时数国外估计达十万小时，可见，实验手段仍是现代飞机研制的重要基础。此外，随着工业空气动力学、环境科学和气象科学等学科的发展，空气动力学实验技术的应用的范围已不局限于航空和航天方面，已涉及到机械、农业、林业、建筑、桥梁、车辆、舰船、生物、能源、气象、环保、化工、电力和体育等各个领域，出现了汽车风洞、气象风洞、环保风洞、风沙风洞等各种专用风洞，空气动力学实验技术在这些方面的发展有着广阔的前景。

§ 0-3 空气动力学实验的基本方法

在空气动力学实验中，一般采用模拟的方法，即用模型实验来模拟实物（飞机）在大气中飞行的情况。所谓“模拟”，是指在一定条件下，用一个比较容易求得结果的物理现象来研究另一个遵循相同物理规律或数学规律的物理现象的方法。在空气动力学实验中，绕流模型和绕流实物这两个物理现象，虽有数量的差别，但物理本质相同，遵循相同的物理规律。这种模拟属于物理模拟。

要进行模拟实验，就要有满足一定实验条件的实验方法和设备。空气动力学实验的

基本方法和设备，按照模型与空气之间产生相对运动的方式不同，主要有以下三类：

1. 风洞实验法 模型在风洞中进行实验，模型一般不动，空气流过模型，只要满足必要的相似条件，与实物在静止空气中飞行具有相同的物理规律。这种实验方法的优点是测量方便，气流参数如速度、压强等易于控制，可基本上不受天气变化的影响，实验费用低。其缺点是实验的流场一般不能与飞行的流场完全相似，特别是洞壁和模型支架会对模型产生干扰，故实验数据一般都要进行修正。

2. 飞行实验法 飞机在飞行条件下进行的实验。有动力或无动力的模型在飞行条件下进行的实验，即模型自由飞实验，也属于飞行实验的范畴。飞行实验能够较全面地模拟飞行情况，是空气动力学实验的手段之一，已作为一门独立的学科发展起来。与风洞实验法相比较，飞行实验法的缺点是实验费用高，实验条件不稳定，测量方法复杂。

3. 携带实验法 将模型固定在以一定速度在大气中运动的携带设备上，使模型与空气之间产生相对运动，携带设备上装有测量仪器，可测出模型的空气动力数据。携带设备可以是旋臂机、火箭车或飞机。旋臂机的中间是一根竖立的转轴，旋臂的根部固定在转轴上，转轴转动带动旋臂在水平面内旋转，模型装在旋臂的端部，与空气之间产生了相对运动。旋臂机上的模型沿圆周的运动，不仅与飞机直线飞行情况不相同，而且模型总是在自身先前所产生的尾流中运动，流场不均匀。火箭车，是用火箭产生推力的在长达数十 km 的轨道上高速运行的车。其速度可超过音速。模型装在火箭车上进行实验，由于受到自然风等的影响，测量的精确度一般不高。用飞机或火箭携带模型进行实验，流场比较均匀，但实验费用高，对测量仪器的要求也高。

由上可知，风洞实验法进行空气动力学实验的最重要的方法，应用得最广泛，也最有成效。风洞实验中的测量方法，主要有以下几种：

1. 天平测力法 使用气动力天平，测出作用在模型上的空气动力，是风洞实验中最常见的测量方法。气动力天平可测出直角坐标轴系中沿三个坐标轴的力和绕三个坐标轴的力矩，即测出六个分量，也可测出其中的一个或几个分量。

2. 压强分布测量法 测出模型表面上的压强分布，可得到飞机或其部件强度计算所需的载荷数据，可用积分法算出由压差所形成的忽略了切向力的空气动力，还可用来研究绕流的状态。

3. 流动显示法 利用物理或化学的方法将绕模型流动的状态形象地显示出来，可加深对流动状态的感性认识，对于分析风洞测力测压实验的结果、建立理论研究用的简化模型以及研究飞机外形存在的问题等，有很大的帮助。随着空气动力学的发展，流动显示的方法将会越来越多。在低速风洞中常用的流动显示方法有丝线法、烟纹法以及油膜法等。在跨、超音速风洞中常用光学仪器来显示流动。

4. 流场测量法 风洞实验中一般都要测量气流的参数，包括流速、流向、压强、紊流度和温度等。有时要测量空风洞（无模型）时实验段流场各点的气流参数，以判断流场是否符合要求，这叫做流场校测。有时测量模型绕流流场中气流参数的分布情况，例如测量模型的尾流等。

上述的常规测量方法中，利用气动力天平测力，可测出作用在模型上空气动力。其它几种方法便于了解绕流流场的各种状态，便于深入研究空气动力特性的物理本质。除了这些常规测量方法外，还有一些非常规测量方法，属于特殊实验，例如动导数实验、

颤振实验……等。有些特殊实验在本课程中只作一般介绍，有些则不予介绍了。

§ 0-4 本课程的内容和任务

空气动力学实验技术，是空气动力学专业的专业课之一。本课程的主要内容是阐述空气动力学实验的基本理论，常规空气动力学实验的实验设备、实验方法和实验数据修正处理的基本概念和基本原理。通过本课程的学习，有助于进一步去掌握从事空气动力学实验工作的能力。

空气动力学实验工作，一般是比较复杂的，对一项具体实验来说，大致包括以下十个方面的工作：

1. 在调查研究的基础上，论证实验的目的、必要性和理论根据。
2. 应用相似理论，确定实验中哪些参数必须模拟，哪些参数可以不模拟或通过其它途径予以处理。
3. 选定实验的原始变量，并采取一定的措施予以实现和控制。确定应测哪些量、测量的精确度要求和测量的重复次数，预计测量结果的量级。
4. 确定在不同的条件下应采集多少个数据点。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. 论证实验数据需作哪些修正和修正的原理，确定修正的方法。
6. 选用现有的仪器设备，研制专用的仪器设备，校准和确定仪器设备的基本性能。设计实验用的模型，提出制造、检验和安装模型的技术要求。
7. 制定实验大纲和实验计划。
8. 处理实验中出现的技术问题，保证实验质量。
9. 实验前和实验中应分析各种不安全的因素，采取必要的安全措施。
10. 对实验数据进行修正和处理，对实验结果进行分析，提出实验报告。

了解空气动力学实验的以上十个方面的工作，有助于明确学习本课程的目的性，有助于提高学习本课程的自觉性，并可在学习本课程中和学习本课程后，对照这十个方面来检查自己的水平和能力。

本课程在有限的学时内只能涉及上述十个方面中的最基本的内容，包括：

1. 相似理论-实验的基本理论。它对实验起着指导作用。
2. 风洞的工作原理。风洞是进行空气动力学实验的基本实验设备。
3. 误差理论。它对各种测量和实验数据处理都有指导作用。
4. 各种空气动力学实验方法的基本原理，包括气流参数测量、流动显示、低速风洞实验、高速风洞实验以及风洞实验专用测量装置——气动力天平的原理等。
5. 低速风洞和高速风洞实验数据修正的基本原理。

本课程的特点是实践性强，与相关学科的渗透性强。因此，在学习方法上应重视勤下实验室，勤动手，同时又要重视相关学科理论知识的学习。

本书中采用了以国际单位制（SI）为基础的法定计量单位，空气动力学中常用的有量纲物理量的符号、单位和量纲，见本书表 1-1。

第一章 相似理论

用模型在风洞中进行实验，取得实物(飞机等)在飞行中的空气动力数据，必须首先解决两个重要的问题：

1. 在模型实验中，如何模拟实物飞行的实际情况？
2. 在模型实验后，如何将实验所得的数据应用到实物飞行情况中去？

解决这两个问题的正确途径，应该是：

1. 要按照相似理论，使模型实验的流场与实物飞行的流场相似。
2. 要用相似准则来整理模型实验所得的数据。也就是说，用相似准则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？要模拟哪些相似准则呢？如何确定相似准则呢？如果不能完全模拟所有应该模拟的相似准则，又该怎么办呢？这一系列的问题，要由相似理论来回答，是本章的主要内容。鉴于本课程的性质和任务，在本章中着重于相似理论的应用，而不着重于相似定理等的严格证明。

§ 1-1 相似与相似定理

(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区分开来，必须具有的相应的基本条件，叫做单值条件。单值条件有以下几类：

物性条件：物体的状态和性质，如空气的粘性系数 μ 、热导率 λ 等。

几何条件：发生现象的空间几何形状和大小。

时间条件：现象的初始条件，现象的定常性、非定常性。

边界条件：同周围介质相互作用的条件，即边界的流动情况和边界的性质等。

2. 单值条件相似 现以几何相似来说明这个问题。几何相似是人们所熟知的相似现象，如相似三角形、地图、沙盘……等。它们的共同特点是，单值条件——长度成比例。对相似三角形来说，其对应边长度成比例，若 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l'_1 、 l'_2 、 l'_3 是两个相似三角形对应边长度，则

$$\frac{l_1}{l'_1} = \frac{l_2}{l'_2} = \frac{l_3}{l'_3}$$

由此可知，单值条件成比例，即保持固定的比例关系，是两个现象相似的重要条件，叫做单值条件相似。三角形的边长如果变化，面积则随之变化。面积虽不是单值条件，但对相似三角形来说面积之比等于边长之比的平方，这是相似的必然结果。即：相似的现象，其对应的量都是成固定的比例关系的。研究物理现象的相似，虽然要比几何相似复杂，但都是几何相似概念的扩充和发展。

3. 空气动力学中两个流场的相似 两个同一类物理现象，如果在对应点上对应瞬时所有表征现象的相应物理量都保持各自的固定的比例关系（如果是向量还包括方向相

同), 则两个现象相似。两个流场的对应点上对应瞬时所有表征流动状况的相应物理量都保持各自的固定的比例关系 (如果是向量还包括方向相同) 则两个流场相似。研究两个流场相似, 是涉及到各种参数的综合问题, 包括几何参数、运动学参数、动力学参数和热力学参数等。一般情况下, 两个流场的相似可以用以下几个方面相似来描述:

(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。令 l 和 l' 是两个物体的对应长度, 则

$$\frac{l}{l'} = C_l (\text{常数})$$

(2) 运动相似 两个流场对应点的速度, 具有相同的方向, 它们的大小保持固定的比例关系。令 v 和 v' 是两个流场对应点的速度, 则

$$\frac{v}{v'} = C_v (\text{常数})$$

速度相似也就决定了两个几何相似的流场对应点的加速度相似。运动相似, 即速度矢量场和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种力所组成的力多边形是几何相似的。令 F 和 F' 为对应的力, 则

$$\frac{F}{F'} = C_F (\text{常数})$$

动力相似, 即作用力矢量场的几何相似。

(4) 热力学相似 两个流场对应点温度 T 和 T' 保持固定的比例关系, 即

$$\frac{T}{T'} = C_T (\text{常数})$$

(5) 质量相似 两个流场对应点密度 ρ 与 ρ' 保持固定的比例关系, 即

$$\frac{\rho}{\rho'} = C_\rho (\text{常数})$$

(二) 相似准则

自然界的现象总是具有一定的规律, 表征现象特性的各个物理量之间存在着一定的关系, 并可用物理方程来描述这一关系。同一类物理现象必符合同一类物理方程。两个现象相似, 必然是同一类现象, 符合同一类物理方程, 而且相应物理量保持各自固定的比例关系。

例如, 一个物体受外力作用而运动, 其物理方程为

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

如果另一物体受力运动的现象与其相似, 则

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

而且

$$\frac{F}{F'} = C_F, \quad \frac{m}{m'} = C_m$$

$$\frac{v}{v'} = C_v, \quad \frac{t}{t'} = C_t \quad (1-3)$$

其中 C_F 、 C_m 、 C_v 和 C_t 是比例常数，又称相似常数。将式 (1-3) 代入式 (1-1) 可得

$$\frac{C_F C_t}{C_m C_v} F' = m' \frac{dv'}{dt'}$$

与式 (1-2) 相比，可得相似系数（相似指标）为 1，即

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

式 (1-3) 代入式 (1-4) 可得

$$\frac{Ft}{mv} = \frac{F't'}{m'v'} = \text{常数}$$

$Ft/(mv)$ 是无量纲参数，称为牛顿数。它是由几个特征物理量组合而成的，用符号 Ne 表示为

$$Ne = \frac{Ft}{mv}$$

当两个力学现象相似时，其牛顿数必然相同，即

$$Ne = Ne'$$

牛顿数是两个力学现象相似的特征和标志，是相似准则中的一种。在更复杂的物理现象中，相似准则会有若干个，各具有不同的名称。

两个相似现象，对应点的由一些特征物理量组合而成的无量纲参数是相同的。这些无量纲参数叫做相似准则。同名相似准则相同，是现象相似的特征和标志，有些还是衡量现象相似与否的判据。

相似准则，又叫相似准数、相似判据、相似模数、相似参数等。空气动力学中常见的相似准则有雷诺数 Re 、马赫数 Ma 、普朗特数 Pr 、比热比 γ 、弗劳德数 Fr 和斯特劳哈尔数 Sr 等。现在先着眼于如何导出这些相似准则，暂不考虑它们的物理意义。

由上例可知，应用物理方程导出相似准则的步骤如下：

1. 列出物理方程；
2. 列出各物理量成比例的关系式，并代入物理方程；
3. 得出由相似常数组合而成的相似系数（相似指标），令其为 1，整理可得相似准则。

顺便指出，牛顿数在不同的场合又有一些其它名称。例如，空气动力系数，本质上就是牛顿数。如果模型实验的流场与实物飞行的流场相似，那么两者的空气动力系数（牛顿数）是相同的。模型实验的结果通常都整理成空气动力系数（相似准则）形式，也就不难理解了。

（三）相似定理

第一定理：“相似的现象，其同名相似准则的数值相同”。

由相似的基本概念可知，相似的现象必是以几何相似为前提的，对应点上同类量保持各自的固定的比例关系；相似现象必是同一类现象，其物理方程式文字上必为同一形式。因此，可导出若干个相似准则，同名相似准则的数值是相同的。这是相似现象所具

有的重要性质之一。由此可知，实验中应对相似准则或相似准则中所包含的各物理量进行测量。

第二定理：“现象的各物理量之间的关系，可以化为各相似准则之间的关系。”

关于这一定理，在下节的 II 定理中将作更深入的讨论。现象的各物理量之间的关系，一般表示为物理方程或其它函数关系，可将它们化为无量纲形式，即化为相似准则之间的关系式。这种无量纲形式的相似准则之间的关系式，对于两个相似现象来说，是完全相同的。这是相似现象的又一重要性质。由此可知，一个现象的实验结果，用相似准则之间的关系来表达，可以用到与其相似的其它现象上去。

第三定理：“两个现象的单值条件相似，而且由单值条件组成的同名相似准则数值相同，则这两个现象相似。”

这个定理告诉我们，单值条件相似，以及由单值条件组成的同名相似准则的数值相同，是现象相似的必要充分条件。单值条件相似，除了本身的含意之外，还包括了几何相似这一前提，并且还包括了相似现象是同一性质的现象这一条件（因为不可能存在单值条件相似的不同性质的物理现象）。所以，单值条件相似是现象相似的必要条件。但是，只有这一条件还不完整，还应加上“由单值条件组成的同名相似准则的数值相同”这一条件。在各种相似准则中，有些是由单值条件组成的相似准则，对于现象相似来说是决定性的相似准则。除此而外，还有些相似准则在相似现象之间也是数值相同的，乃是现象相似的必然结果，它们是非决定性的相似准则。当单值条件相似、同名决定性相似准则数值相同时，就足以使现象相似了。现象相似了，非决定性相似准则的数值自然会相同。当我们安排实验，使两个现象相似时，要求所有的同名相似准则数值相同是没有必要的，是多余的，只要决定性相似准则数值相同即可判定两个现象相似了。相似第三定理对于实验的指导意义，就在于此。

由上述相似定理可知，当我们进行模型实验时，首先要保证模型和实物的两个流场相似，应根据相似的必要充分条件来安排实验。实验中应测量各相似准则或各相似准则中所包含的物理量，实验数据按相似准则进行整理，可以用到实物流场上去。

（四）由基本方程导出相似准则的举例

当现象能够用物理方程描述时，可由物理方程导出相似准则。从前面的简例中总结出的导出相似准则的步骤，对于复杂的方程也适用。下面以空气动力学中的纳维-斯托克斯方程和能量方程为例，就一般情况（非定常、可压缩、完全气体流动）导出有关的相似准则。为了节省篇幅，只写出二维 x 向的基本方程，方程中的彻体力 f 按重力处理。

例1-1 由纳维-斯托克斯方程导出相似准则。

解

1. 列出方程

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} &= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (1-5)$$

2. 列出相应物理量成比例的关系式

$$\begin{aligned}\frac{x}{x'} &= \frac{y}{y'} = \frac{l}{l'} = C_l, & \frac{t}{t'} &= C_t, \\ \frac{v_x}{v'_x} &= \frac{v_y}{v'_y} = \frac{v}{v'} = \frac{C_l}{C_t} = C_v, \\ \frac{f_x}{f'_x} &= \frac{f_y}{f'_y} = \frac{g}{g'} = C_g, \\ \frac{p}{p'} &= C_p, & \frac{\rho}{\rho'} &= C_\rho, & \frac{\mu}{\mu'} &= C_\mu\end{aligned}$$

代入式(1-5)得

$$\begin{aligned}& \frac{C_p C_v}{C_t} \rho' \frac{\partial v'_x}{\partial t'} + \frac{C_p C_v^2}{C_l} \left(\rho' v'_x \frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \rho' v'_y \frac{\partial v'_x}{\partial y'} \right) \\ &= C_p C_g \rho' f'_x - \frac{C_p}{C_l} \frac{\partial p'}{\partial x'} + \frac{C_p C_\mu}{C_l^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x'} \left[2\mu' \frac{\partial v'_x}{\partial x'} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{2}{3} \mu' \left(\frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \frac{\partial v'_y}{\partial y'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left[\mu' \left(\frac{\partial v'_x}{\partial y'} + \frac{\partial v'_y}{\partial x'} \right) \right] \right\}\end{aligned}$$

等式两边同乘以 $C_l/(C_p C_v^2)$ 得

$$\begin{aligned}\frac{C_l}{C_p C_t} \times \rho' \frac{\partial v'_x}{\partial t'} + \rho' v'_x \frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \rho' v'_y \frac{\partial v'_x}{\partial y'} &= \frac{C_g C_l}{C_v^2} \times \rho' f'_x - \frac{C_p}{C_p C_v^2} \cdot \frac{\partial p'}{\partial x'} \\ &+ \frac{C_\mu}{C_p C_v C_l} \times \left\{ \frac{\partial}{\partial x'} \left[2\mu' \frac{\partial v'_x}{\partial x'} - \frac{2}{3} \mu' \left(\frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \frac{\partial v'_y}{\partial y'} \right) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{\partial}{\partial y'} \left[\mu' \left(\frac{\partial v'_x}{\partial y'} + \frac{\partial v'_y}{\partial x'} \right) \right] \right\}\end{aligned} \quad (1-6)$$

3. 两相似现象, 式(1-6)和式(1-5)的形式应该相同, 故式(1-6)各项中、相乘号前面的由相似常数组合而成的相似系数应为1, 可得

$$\frac{C_l}{C_p C_t} = 1 \quad (1-7)$$

$$\frac{C_g C_l}{C_v^2} = 1 \quad (1-8)$$

$$\frac{C_p}{C_p C_v^2} = 1 \quad (1-9)$$

$$\frac{C_\mu}{C_p C_v C_l} = 1 \quad (1-10)$$

由式(1-7)整理可得斯特劳哈尔数

$$Sr = \frac{l}{vt} \quad (1-11)$$

由式(1-8)整理可得弗劳德数

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{lg}} \quad (1-12)$$

由式(1-9), 并引用比热比 γ 在两个相似现象中是相同的这一关系, $\gamma = \gamma'$, 比热比是定压比热 c_p 与定容比热 c_v 之比

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (1-13)$$

整理可得马赫数

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (1-14)$$

由式(1-10)整理可得雷诺数

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1-15)$$

例1-2 由能量方程导出相似准则。

解

1. 列出方程

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + v_x \frac{\partial}{\partial x} (c_p T) + v_y \frac{\partial}{\partial y} (c_p T) \right] \\ &= \frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &+ \mu \left\{ -\frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (1-16)$$

2. 列出相应物理量成比例的关系式

$$\begin{aligned} \frac{x}{x'} &= \frac{y}{y'} = \frac{l}{l'} = C_l, & \frac{v_x}{v'_x} &= \frac{v_y}{v'_y} = \frac{v}{v'} = C_v, \\ \frac{p}{p'} &= C_p, & \frac{\rho}{\rho'} &= C_\rho, & \frac{\mu}{\mu'} &= C_\mu, \\ \frac{t}{t'} &= C_t, & \frac{C_p}{C'_p} &= C_{c_p}, & \frac{T}{T'} &= C_T, \\ \frac{\lambda}{\lambda'} &= C_\lambda \end{aligned}$$

代入式(1-16)得

$$\begin{aligned} & \frac{C_p C_{c_p} C_T}{C_t} \rho' \frac{\partial}{\partial t'} (c'_p T') + \frac{C_p C_v C_{c_p} C_T}{C_l} \rho' \left[v'_x \frac{\partial}{\partial x'} (c'_p T') \right. \\ & \left. + v'_y \frac{\partial}{\partial y'} (c'_p T') \right] = \frac{C_p}{C_t} \frac{\partial p'}{\partial t'} + \frac{C_v C_p}{C_l} \left(v'_x \frac{\partial p'}{\partial x'} + v'_y \frac{\partial p'}{\partial y'} \right) \\ & + \frac{C_\lambda C_T}{C_l^2} \left[\frac{\partial}{\partial x'} \left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \right] \\ & + \frac{C_\mu C_v^2}{C_l^2} \mu' \left\{ -\frac{2}{3} \left(\frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \frac{\partial v'_y}{\partial y'} \right)^2 \right. \\ & \left. + 2 \left[\left(\frac{\partial v'_x}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial v'_y}{\partial y'} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x'} + \frac{\partial v'_x}{\partial y'} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

等式两边同乘以 $C_l^2 / (C_{c_p} C_\mu C_T)$ 得

$$\begin{aligned}
& \frac{C_p C_l^2}{C_\mu C_t} \times \rho' \frac{\partial}{\partial t'} (c_p' T') + \frac{C_p C_v C_l}{C_\mu} \times \rho' \left[v_x' \frac{\partial}{\partial x'} (c_p' T') + v_y' \frac{\partial}{\partial y'} (c_p' T') \right] \\
= & \frac{C_l^2 C_p}{C_{\rho p} C_\mu C_T C_t} \times \frac{\partial p'}{\partial t'} + \frac{C_l C_p C_p}{C_{\rho p} C_\mu C_T} \\
& \times \left(v_x' \frac{\partial p'}{\partial x'} + v_y' \frac{\partial p'}{\partial y'} \right) + \frac{C_\lambda}{C_{\rho p} C_\mu} \times \left[\frac{\partial}{\partial x'} \left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \right] \\
& + \frac{C_v^2}{C_{\rho p} C_T} \times \mu' \left\{ -\frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x'}{\partial x'} + \frac{\partial v_y'}{\partial y'} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial v_x'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y'}{\partial y'} \right)^2 \right] \right. \\
& \left. + \left(\frac{\partial v_y'}{\partial x'} + \frac{\partial v_x'}{\partial y'} \right)^2 \right\}
\end{aligned}$$

3. 令上式各项中乘号前面的相似系数为 1, 并应用 $C_l/C_t = C_v$, 可得

$$\frac{C_p C_v C_l}{C_\mu} = 1 \quad (1-17)$$

$$\frac{C_p C_l C_v}{C_{\rho p} C_\mu C_T} = 1 \quad (1-18)$$

$$\frac{C_\lambda}{C_{\rho p} C_\mu} = 1 \quad (1-19)$$

$$\frac{C_v^2}{C_{\rho p} C_T} = 1 \quad (1-20)$$

整理以上各式, 由式 (1-17) 得雷诺数即式 (1-15)

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

由式 (1-18) 得比热比即式 (1-13)

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

由式 (1-19) 得普朗特数

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (1-21)$$

由式 (1-20) 得马赫数即式 (1-14)

$$Ma = \frac{v}{a}$$

§ 1-2 量纲分析

当现象能用物理方程描述时, 由物理方程导出相似准则, 称为相似变换法。当现象尚不能用物理方程描述时, 如何导出相似准则呢? 唯一而有效的方法是通过量纲分析来导出相似准则, 称为量纲分析法。

(一) 关于量纲的基本知识

物理量, 简称为量, 是可以定性区别并能定量确定的现象或物体的属性。人们分析了力学现象中各量之间的关系之后发现, 力学中绝大多数量都存在着内在的联系, 由各种物理定律将它们联系在一起, 只要适当地选定出三个量之后, 就可以根据描述各量之间关系的物理定律将其它量导出。所选定的这三个物理量, 称为基本物理量或基本量, 其它的物理量称为导出物理量或导出量。作为量制基础的基本量, 是人们最初统一选定了