

高等学校教材

力学实验

上册

基础和流体力学部分

吴凤林 编



高等教育出版社

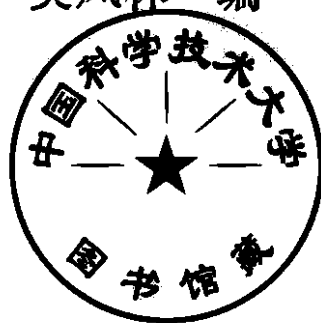
高等学校教材

力学实验

上册

基础和流体力学部分

吴凤林 编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书为《力学实验》教材的上册——力学实验基础和流体力学实验部分。

全书内容包括三部分。第一部分为力学实验基础,分为:第一章,量纲分析和相似律,第二章,误差理论,第三章,实验数据的处理方法,第四章,随机性实验数据的处理方法初步。第二部分为流体力学实验方法与技术,分为:第五章,流体力学实验设备简介,第六章,流动显示方法,第七章,流动参数测量,第八章,空气动力测量。第三部分为流体力学实验指导内容,包括二十个实验。

本书供大学本科生使用,也可供教师 and 有关人员参考。

高等学校教材

力 学 实 验

上 册

基础和流体力学部分

吴凤林 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.75 字数 209,000

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数 0001—1,700

ISBN 7-04-001940-X/O·703

定价 2.35元

前 言

这本教材是以北京大学经过长期教学实践的流体力学实验教材为基础,按照高等学校数学、力学教材编审委员会力学编审组于1982年组织的综合大学力学专业教材会议上制定的“力学实验”教学大纲编写的。后来又根据1985年力学专业教材审定会议的意见,作者对原稿做了大量删节,才形成本书。

本教材的第一部分“力学实验基础”是为了综合大学力学专业学生学习力学实验(包括材料力学、固体力学、流体力学和振动力学实验)应具备的共同基础而编写的。第二部分“流体力学实验方法与技术”是为了学生学习流体力学实验的最基本的方法和技术而编写的。第三部分“流体力学实验指导内容”介绍了二十个典型的流体力学实验,供学生选作。指导内容中介绍的实验装置是北大流体力学实验室的实验装置情况,仅供参考。

由于作者水平所限,教材中难免出现错误,欢迎读者批评指正。

吴凤林

1986年十月于北大流体力学实验室

目 录

第一部分 力学实验基础

第一章 量纲分析和相似律	1
§ 1-1 力学中诸物理量的量纲	1
§ 1-2 相似概念	3
§ 1-3 相似理论	6
§ 1-4 量纲分析方法	9
第二章 误差理论	15
§ 2-1 基本概念	15
§ 2-2 误差理论基础	22
§ 2-3 间接测定值的误差估计	27
§ 2-4 非等精度测定值的计算	30
§ 2-5 误差的判定与异常数据的取舍	31
第三章 实验数据的处理方法	38
§ 3-1 实验数据的表示方法	38
§ 3-2 实验公式的作法	45
第四章 随机性实验数据的处理方法初步	51
§ 4-1 基本概念	51
§ 4-2 随机数据的基本特性	53
§ 4-3 随机数据的模拟处理方法概要	58
§ 4-4 随机数据的数字处理方法概要	62

第二部分 流体力学实验方法与技术

第五章 流体力学实验设备简介	66
§ 5-1 风洞概述	66

§ 5-2	低速风洞	69
§ 5-3	超音速风洞	74
§ 5-4	其他用途风洞	76
§ 5-5	水动力学实验设备介绍	78
第六章	流动显示方法	81
§ 6-1	示踪粒子法	81
§ 6-2	丝线法	90
§ 6-3	表面涂膜法	92
§ 6-4	光学法	93
§ 6-5	激光技术在流动显示中的应用简介	100
第七章	流动参数测量	101
§ 7-1	压力测量	101
§ 7-2	流速测量	115
§ 7-3	温度测量	135
第八章	空气动力测量	140
§ 8-1	空气动力坐标系及其分力	140
§ 8-2	衡力法	141
§ 8-3	动量法	151
§ 8-4	压力分布法	154
§ 8-5	表面摩擦力的测定方法	156

第三部分 流体力学实验指导内容

实验一	压力计校准	160
实验二	风速管校准	164
实验三	热线流速计校准与气流湍流度测量	170
实验四	平面方向仪标定	178
实验五	激光流速计入射光束夹角的测定与流速测量	185
实验六	圆管流动类型观察与临界雷诺数和层流、 湍流速度剖面测量	192
实验七	热线流速计的使用——风洞实验段流场测量	197

实验八	流动显示——氢泡技术和微烟丝技术的应用·····	203
实验九	沿程阻力损失系数测定·····	209
实验十	管路局部阻力损失系数测定·····	215
实验十一	文凸里管流量计流量系数测定·····	219
实验十二	平板附面层速度剖面与厚度测定、转换点观察·····	223
实验十三	用圆球压力系数法确定圆球临界雷诺数和气流湍流度·····	229
实验十四	二元机翼表面压力分布测量·····	236
实验十五	机翼升力、阻力、俯仰力矩系数测定·····	242
实验十六	用动量法测定机翼型阻力·····	250
实验十七	动量定理的验证·····	253
实验十八	湍射流流动特性测定·····	255
实验十九	拉瓦尔喷管轴向压力分布测量和激波观察·····	264
实验二十	超音速气流总温测量·····	270

第一部分 力学实验基础

第一章 量纲分析和相似律

科学实验是发展科学, 解决生产实际问题的重要手段。科学实验按其进行的方式分为原型(实物)和模型(模拟)实验。由于原型实验所需要的费用大, 而且受环境、自然条件(如气候变化、风、雨等)等因素的限制, 往往不能及时和有效地进行实验。所以在实验室中进行模型实验是普遍采用的方法。于是, 就提出了两个基本问题:

(1) 如何保证模型实验时的物理模型能正确地代替原型实验时的“物理模型”呢?

(2) 怎样把模型实验的结果运用到相应的实际原型中去呢?

这两个问题的回答, 需要借助于相似理论和量纲分析方法。相似理论是模拟实验的基础, 量纲分析方法是模型实验的重要手段。

§ 1-1 力学中诸物理量的量纲

每一个物理量都是用度量这个物理量的单位和其与该物理量的比数的乘积来表示的。例如某物体长度是“五米”, 那么, “米”就是用以度量长度的单位, “五”则是用这一单位长度量该长度所得的比。如果将度量这一物体长度的单位改变, 那么它与该物体长

度的比值也将随之改变。譬如将上面例子中的单位换为“厘米”，其比值将变成“五百”。但不论是五米还是五百厘米，它们都是说明该物体长度的量，其性质是相同的。对于具有同类性质的物理量，我们就说它们具有相同的量纲。并用一个文字去代表它，譬如长度用“L”并称“L”是长度量纲的单位。

在自然界中，一般说来，任何一个物理现象的运动过程，都可用刻画这一物理现象的一些物理量之间的联系，即一定的物理规律去描述。因此描述这一物理现象的物理量的量纲之间也应遵守一定的物理规律。例如在宏观力学中，物体运动必须服从牛顿第二定律。如果已经确定了力 F 和物体质量 M 的量纲，那么加速度 a 的量纲必须满足牛顿第二定律：

$$F = Ma. \quad (1-1)$$

在 F 、 M 、 a 三个量中，二个量的量纲可以自由选择，而第三个量的量纲，则必须根据已选定的二个物理量的量纲由公式(1-1)中导出。

由此看到，在物理量中，有些量的量纲是基本的，可以独立取定，而另外一些物理量的量纲则是根据物理定律导出的，也就是说，它们本身不能独立取定，而是诱导出来的、派生的。我们把前者叫做基本单位，把后者称为导出单位。

力学量中，作为基本单位的量纲有两个系统：

(1) 表征长度的量纲[L]；时间的量纲[T]和质量的量纲[M]。

(2) 表征长度的量纲[L]；时间的量纲[T]和力的量纲[F]。

除此之外，其他物理量的量纲均为导出单位。为了以后应用方便计，现在根据第一个基本单位的量纲系统将力学中经常遇见的一些物理量的量纲列表如下：

物 理 量	量 纲	物 理 量	量 纲
长 度	[L]	表面张力	[MT ⁻²]
时 间	[T]	频 率	[T ⁻¹]
质 量	[M]	压 强	[ML ⁻¹ T ⁻²]
面 积	[L ²]	应 力	[ML ⁻¹ T ⁻²]
体 积	[L ³]	力 矩	[ML ² T ⁻²]
速 度	[LT ⁻¹]	惯 性 矩	[ML]
加 速 度	[LT ⁻²]	角 速 度	[T ⁻¹]
线 动 量	[MLT ⁻¹]	角加速度	[T ⁻²]
角 动 量	[ML ² T ⁻¹]	动 量 矩	[ML ² T ⁻¹]
力	[MLT ⁻²]	弹性系数	[ML ⁻¹ T ⁻²]
能, 功	[ML ² T ⁻²]	粘性系数	[MT ⁻¹ L ⁻¹]
功 率	[ML ² T ⁻³]	扩散系数	[L ² T ⁻¹]
密 度	[ML ⁻³]		

§ 1-2 相 似 概 念

在几何学里,如果二图形的对应角彼此相等,而且构成图形的诸对应边成一定比例时,则称这两个图形是相似的。即一个图形是另一个图形的缩影或放大的相。在这种情况下,这两个图形没有实质性差别,其差异只不过是构成图形的比例尺大小不同而已。如果我们对其中一个图形的一切性质都研究清楚了,就很容易推知另一图形的情况。这种相似的思想,已被广泛应用于自然现象的研究。关于力学现象的相似,概括说来包括以下几个方面:

1. 几何相似

几何相似是指两物体各对应部分间的夹角相等,各对应部分的尺寸成一定的比例关系。如果原型和模型之间符合上述条件,则认为原型和模型是几何相似的。例如图 1-1 所示二机翼,当:

$$\angle\alpha_P = \angle\alpha_M, \angle\beta_P = \angle\beta_M, \angle\gamma_P = \angle\gamma_M, \dots \quad (1-2)$$

且

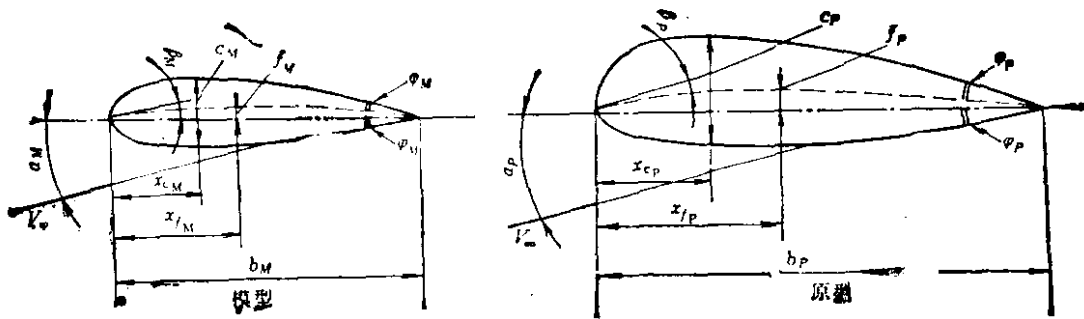


图 1-1 几何相似示例

$$\frac{b_P}{b_M} = \frac{x_{CP}}{x_{CM}} = \frac{x_{fP}}{x_{fM}} = \frac{f_P}{f_M} = \frac{c_P}{c_M} = \text{常数}, \quad (1-3)$$

则二机翼几何相似。

2. 运动相似

运动相似是指在几何相似条件下，两物体所处的速度场及加速度场相似。这表现为二运动系统所有的速度、加速度的方向互相对应，其大小对应地成比例。例如图 1-2 所示处在流场中的

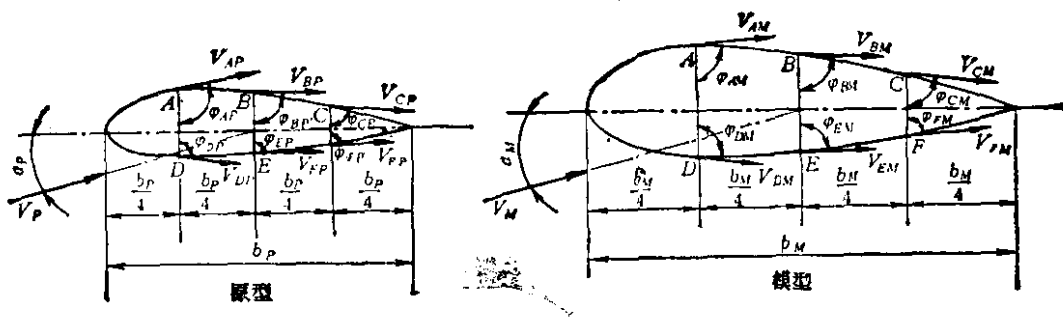


图 1-2 运动相似示例

二几何相似的机翼剖面，当其姿态相同，而且流体在各个对应点的流速大小成比例且方向相同时，即在冲角

$$\angle \alpha_P = \angle \alpha_M$$

的条件下，当

$$\left. \begin{aligned} \angle \varphi_{AP} &= \angle \varphi_{AM}, \quad \angle \varphi_{BP} = \angle \varphi_{BM}, \\ \angle \varphi_{CP} &= \angle \varphi_{CM}, \quad \angle \varphi_{DP} = \angle \varphi_{DM} \text{ 等} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

且

$$\frac{V_P}{V_M} = \frac{V_{AP}}{V_{AM}} = \frac{V_{BP}}{V_{BM}} = \frac{V_{CP}}{V_{CM}} = \frac{V_{DP}}{V_{DM}} = \text{常数时}, \quad (1-5)$$

则流过二机翼的气流运动是相似的。

3. 动力相似

动力相似是指在几何相似和运动相似条件下，二物体所处的力场保持几何相似。这表现为作用于二物体上的力，其方向相对应，其大小相应地成比例。例如图 1-3 所示，当作用在原型机翼

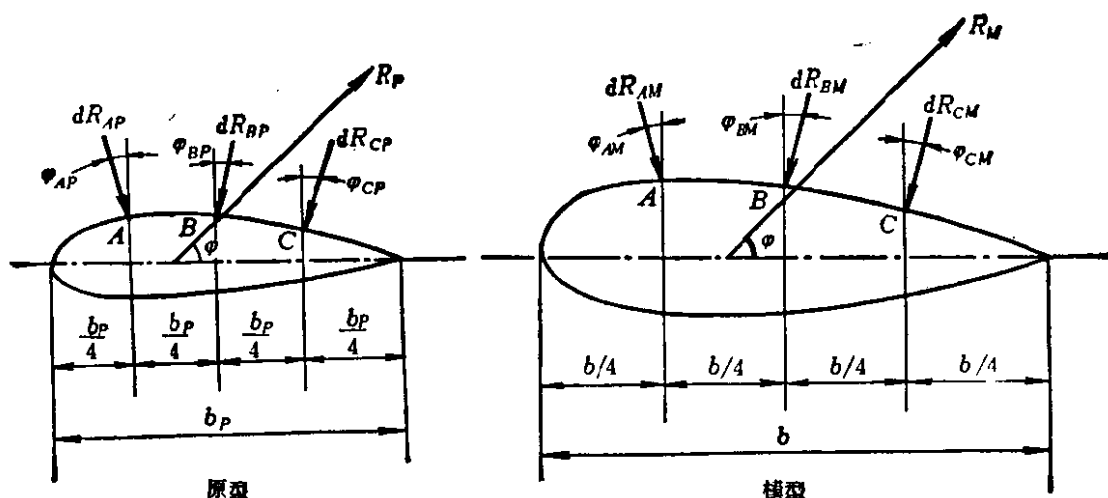


图 1-3 动力相似示例

和模型机翼的对应点上的力满足下列条件

$$\frac{dR_{AP}}{dR_{AM}} = \frac{dR_{BP}}{dR_{BM}} = \frac{dR_{CP}}{dR_{CM}} = \frac{dR_{DP}}{dR_{DM}} = \dots = \text{常数} \quad (1-6)$$

且

$$\angle \varphi_{AP} = \angle \varphi_{AM}, \angle \varphi_{BP} = \angle \varphi_{BM}, \angle \varphi_{CP} = \angle \varphi_{CM}, \dots, \quad (1-7)$$

则认为绕二机翼剖面的流动是动力相似的。

在一些特殊的力学问题中，例如振动、燃烧等问题中，时间和温度对问题起着主导作用，因此现象相似还应包括时间相似和温度相似。

4. 时间相似

时间相似就是指二运动系统的时间间隔成比例。即

$$\frac{t_{P1}}{t_{M1}} = \frac{t_{P2}}{t_{M2}} = \frac{t_{P3}}{t_{M3}} = \frac{t_{P4}}{t_{M4}} = \dots = \text{常数}. \quad (1-8)$$

5. 温度相似

温度相似是指二运动系统的温度场对应点的温度都成比例,

即

$$\frac{\tau_{P1}}{\tau_{M1}} = \frac{\tau_{P2}}{\tau_{M2}} = \frac{\tau_{P3}}{\tau_{M3}} = \frac{\tau_{P4}}{\tau_{M4}} = \dots = \text{常数}, \quad (1-9)$$

实际设计模型实验时,往往不能作到所有相似条件都满足,而只能是部分条件得到满足. 对于只能满足部分相似条件的情况叫做部分相似,或者局部相似. 对于全部条件都能满足的情况叫做完全相似.

§ 1-3 相 似 理 论

1. 相似第一定理

上一节里,我们讨论了力学现象相似的几个方面. 为了保证力学问题的原型和模型之间的相似,就必须保证实现诸相似方面的要求,也就是必须保证实现描述相似方面的诸物理量之间的比例关系.

一般说来,一种力学现象可以用一个物理方程组来描述,包含在这一物理方程组中的诸物理量可能隶属于上述相似方面的各个方面. 由于力学问题的原型和模型属性相同,因此描述力学问题原型的方程组和描述力学问题模型的方程组应具有相同的形式,即具有不变性. 显然,只有包含在方程组中诸物理量的比例常数的组合数保持常数且等于1时,才能保证物理方程组的不变性. 通常把物理量的比例常数的组合数叫做相似指标.

于是,相似第一定理可叙述为: 对于相似的现象,其相似指标为1.

在宏观力学中,任何物体的运动,都必须遵守牛顿第二定律,即

$$F = Ma. \quad (1-10)$$

对于相似的二个系统, 令 F_P, M_P, V_P, t_P 分别代表原型系统的力、质量、速度、时间等物理量, F_M, M_M, V_M, t_M 分别表示模型系统的相应的物理量. 则应有

$$\frac{F_P}{F_M} = C_F, \quad \frac{M_P}{M_M} = C_M, \quad \frac{V_P}{V_M} = C_V, \quad \frac{t_P}{t_M} = C_t \quad (1-11)$$

其中 C_F, C_M, C_V, C_t 都是比例常数. 于是, 对于原型系统牛顿第二定律, 有:

$$F_P = M_P \frac{dV_P}{dt_P}, \quad (1-12)$$

对于模型系统, 牛顿第二定律为:

$$F_M = M_M \frac{dV_M}{dt_M} \quad (1-13)$$

用模型系统诸物理量表示原型系统的诸物理量, 我们得到:

$$\begin{aligned} C_F F_M &= C_M \frac{C_V}{C_t} M_M \frac{dV_M}{dt_M}, \\ \frac{C_F C_t}{C_M C_V} F_M &= M_M \frac{dV_M}{dt_M} \end{aligned} \quad (1-14)$$

比较 (1-13) 与 (1-14) 式, 看到: 要使模型系统与原型系统相似, 则:

$$\frac{C_F C_t}{C_M C_V} = 1. \quad (1-15)$$

现在, 我们把 (1-15) 式中的比例系数用相应的原型与模型系统的物理量代替, 从而得到:

$$\frac{F_P t_P}{M_P V_P} = \frac{F_M t_M}{M_M V_M}. \quad (1-16)$$

(1-16) 式说明, 对于相似的两个系统, 各自系统的物理特征量的组合数相等. 令 Ne 表示其组合数, 去掉物理量的下标, 于是有:

$$Ne = \frac{Ft}{MV} = \text{不变量}. \quad (1-17)$$

一般称 Ne 为相似不变量或相似准则. 这样, 相似第一定理也可表达为: 对于相似的两个系统, 同名相似准则的数值相等.

2. 相似第二定理

相似第一定理指出,二现象相似,则其相似指标等于1,或同名相似准则的数值相等.现在要问,对于一类相似现象,能有多少个相似准则,它们之间有什么关系?相似第二定理回答了这些问题.

相似第二定理:当一类物理现象由 n 个物理参数刻画时,若其中 k 个物理量是量纲无关的,则可组成 $(n-k)$ 个相似准则.这些准则之间具有函数关系.

所谓量纲无关指的是,诸物理量中,任何一个物理量的量纲公式都不能以幂次单项式的形式表示为其他各量的量纲公式的组合.例如长度的量纲 $[L]$ 、速度的量纲 $[LT^{-1}]$ 和能量的量纲 $[ML^2T^{-2}]$ 是量纲无关的.相似第二定理就是著名的 π 定理.

3. 相似第三定理

现在要问,满足了相似第一、第二定理的要求后,二现象是否一定相似?相似第三定理正是回答这一问题的.换句话说,相似第三定理是规定现象相似的充分条件的定理.

我们知道,揭示同类现象的关联方程代表这类现象的运动过程,但它不能具体刻画这类现象的某一具体的运动过程.为了把关联方程运用到同类现象的某一具体的运动过程,需要给关联方程加上一些补充的条件,对同类现象加以限制.这些附加的条件与运动的过程无关,它确定现象的具体几何特征,物理常数的数值,边界条件和初始条件等,因而称做单值性条件.

由于关联方程描述一类现象的整个运动过程,当把某些确定现象的单值性条件中的某些量包括进去以后,对于相似现象,其关联方程的解仍然应保持不变,为此,相似现象的单值条件必须相似.这是相似的第二个必要条件,但不是充分条件.

在讨论相似的第一定理时我们已经指出,对于二相似现象,相似常数的选择不是任意的,它们必须满足无量纲相似指标等于1

的要求。在所研究的二相似现象中,也可能存在着仅仅是由单值条件中的单值量的相似常数组成的相似指标。显然,这种相似指标也应等于1。由单值量组成的相似指标等于1可以导出由单值量组成的相似准则是不变量。这个条件就是二现象相似的充分条件。于是,相似第三定理可叙述为:现象相似的充分条件是包含在单值条件中的量组成的相似准则相等。

§ 1-4 量纲分析方法

相似理论指出,为了导出模拟某一力学现象的相似准则,需要使用描述该力学现象的方程组,但在许多的具体力学问题中,往往不能提出描述那些问题的方程组,知道的只是描述那些现象的一些特征物理量。在这种情况下,为了进行模拟实验研究,该怎样决定相似准则呢?这就要用量纲分析的方法。所谓量纲分析就是利用物理量的量纲性质,通过分析研究,确定诸物理量之间关系的方法。它的基本理论就是伯京汉所提出的“ π 定理”。

任何一个表征物理现象的各物理量间关系的方程式都具有量纲齐次的性质。所谓量纲齐次就是指构成方程的各项具有相同的量纲。换句话说,就是方程式的各项具有同一的单位。如果对方程用这一单位去除,则方程就变成没有量纲的方程。即方程的各项将变为物理量的无量纲综合数群,这种无量纲综合数群就是相似准则。 π 定理就是利用了这种性质推得的。

1. π 定理

π 定理:任何一个含有 N 个有量纲的变数的函数

$$F(S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_m, S_{m+1}, \dots, S_N) = 0 \quad (1-18)$$

可表示为 $n-i$ 个无量纲综合数群 π 的函数,即

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_{n-i}) = 0, \quad (1-19)$$

其中每一个无量纲综合数群 π 是由任意选择的 i 个变数群及其他

另一个变数组合成的,亦即

[illegible]

式中 i 是描述所有 n 个 P 变数所必须的基本量纲的数目,

π 定理是以量纲分析为基础建立起来的。这个定理对实验的发展起了重要的作用。但是 π 定理有着不少弱点。

π 定理的第一个弱点是对如何确定描述物理现象的物理参数没有给予指示。在一个实际的力学问题里，取那些物理量就能刻画出这个力学问题的本质，往往是很难确定的。过多地加进一些物理量就会使得分析过程复杂化。但是，取的物理量太少往往不能正确地刻画物理现象本身，甚至会发生没有选入表示物理现象特征的量或列入与现象无关的物理量的毛病。所以，如何决定必要的，但又不是过多的物理量是个重要的问题。实际中，必须从分析具体问题出发，依靠对物理现象的深刻观察来最后确定。这就要靠经验。

第二个弱点是如何确定作为基本量纲的物理量。选取不同的基本物理量,最后得到的 π 值也不同,这样在选取基本物理量的同时,就决定着结果。由于基本物理量的选取没有规律可循,因此所得到的方程并不唯一。

第三个弱点是各个 π 互相运算得出新的 π , 因此 π 组也不唯一。

由于 π 定理存在这些弱点,它的应用受到了一定的限制。尽管如此, π 定理还是帮助人们解决了不少问题。

2. π 定理的应用——流体动力学问题模拟实验的相似准则

在流体动力学问题的模拟实验中，保证哪些相似准则才能使