



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

热工实验

郭美荣 俞爱辉 高婷 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

热工实验

郭美荣 俞爱辉 高婷 主编



北京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书是根据本科能源动力类实验课程教学大纲编写的实验实训教材。本书以基础理论为依托,分析实验过程中遇到的问题并给出解决办法,详细描述了各热工实验的目的、原理、装置、实验方法等。全书共分为8章,包括测量与仪表的基本知识、相似理论和模化实验、主要热工参数的测量、误差分析与数据处理、工程流体力学实验、工程热力学实验、工程燃烧学实验及传热传质学实验。

本书可作为能源与动力类本科生专业实验教材,也可供从事热工动力专业的教学、科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工实验/郭美荣,俞爱辉,高婷主编. —北京:冶金工业出版社,2015.9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7037-1

I. ①热… II. ①郭… ②俞… ③高… III. ①热工试验—高等学校—教材 IV. ①TK122-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222054 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 唐晶晶 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7037-1

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2015 年 9 月第 1 版, 2015 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.5 印张; 300 千字; 191 页

29.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

《热工实验》教程是根据本科能源动力类实验课程的教学大纲编写的普通高校教育实验实训教材。

本实验教程归纳总结了能源动力类专业实验实训课程的内容，共分为8章。第1章是测量和仪表的基本知识；第2章是相似理论和模化实验；第3章是主要热工参数的测量；第4章是误差分析与数据处理；第5章是工程流体力学实验；第6章是工程热力学实验；第7章是工程燃烧学实验；第8章是传热传质学实验。

本书将能源动力类四大专业基础课程“工程流体力学”、“工程热力学”、“工程燃烧学”、“传热传质学”的相关实验及其实验设备的使用方法有机地融合为一体，充分依托四门专业基础课程的知识体系，吸取以往及现有教材的优秀经验，按照“工程流体力学”、“工程热力学”、“工程燃烧学”、“传热传质学”的顺序编排，共描述了四门课程的29个演示及综合实验，对每个实验的基本理论、操作规程、实验报告要求进行了系统阐述，同时还介绍了测量的基本知识、仪表的基本知识、处理数据的基本方法等相关内容，此外本书还提供了相应的思考题，以利于学生进一步深入思考，加深掌握知识要点，更好地形成理论思维与实践经验相结合的分析、解决实际问题的处理模式。

本实验教程第1章部分内容、第7章部分内容由高婷编写，第1章部分内容、第3章、第6章、第7章部分内容由郭美荣编写，第2章、第4章、第5章、第8章由俞爱辉编写。在本书的编写过程中，得到了北京科技大学热能工程系的众多教师的帮助和指导，在此表示衷心的感谢。

此外，本书的出版得到了北京科技大学“濮耐教育基金”、“洛伊教育基金”、“沃克教育基金”、“赛迪教育基金”、“凤凰教育基金”、“威仕炉教育基金”、“思能教育基金”、“赛能杰教育基金”、“热陶瓷教育基金”和“北京神雾教育基金”的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中疏漏和错误之处，恳请读者们批评指正！

编 者
2015年6月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
传热学 (第2版) (高等教材)	周筠清	29.50
燃烧基础	[英] A. G 盖顿	34.00
燃料及燃烧 (第2版) (高等教材)	韩昭沧	22.00
工程流体力学 (第4版) (高等教材)	谢振华	36.00
带钢连续热处理炉内热过程数学模型及 过程优化	温治	50.00
热能与动力工程基础 (高等教材)	王承阳	29.00
热能转换与利用 (第2版)	汤学忠	32.00
能源与环境 (高等教材)	冯俊小	35.00
现行冶金行业节能标准汇编	冶金工业信息标准研究院	96.00
供热工程 (高等教材)	贺连娟	39.00
冶金工业自动化仪表与控制装置安装 通用图册	中国冶金建设协会	350.00
流体力学及输配管网 (高等教材)	马庆元	49.00
流体力学 (高等教材)	李福宝	27.00
燃料与爆炸学	张英华	30.00
蓄热式高温空气燃烧技术	罗国民	35.00
赛隆的热力学可控合成与应用实践	彭犇	25.00
冶金与材料力学 (高等教材)	李钊	65.00
热工测量仪表 (第2版) (高等教材)	张华	46.00
链算机-回转窑-环冷机系统质量、 热量、烟平衡	冯俊小	32.00
热工实验原理和技术 (高等教材)	邢桂菊	25.00
热工仪表及其维护 (第2版)	张惠荣	32.00
供热工程实用仿真案例详解	彭力	16.00
炼焦热工管理	刘武鏊	52.00

目 录

1 测量和仪表的基本知识	1
1.1 测量概述	1
1.1.1 测量的意义	1
1.1.2 测量方法及分类	1
1.2 测量系统	3
1.2.1 测量系统组成	3
1.2.2 测量环节功能描述	3
1.3 仪器的性能指标	5
2 相似理论和模化实验	7
2.1 相似理论的产生	7
2.2 相似的基本概念	8
2.2.1 几何相似	8
2.2.2 物理量相似	9
2.2.3 现象相似	9
2.3 量纲分析和 π 定理	10
2.3.1 量纲的概念	10
2.3.2 量纲分析法	11
2.3.3 π 定理	13
2.4 相似理论及其应用	14
2.4.1 相似基本定理	14
2.4.2 相似理论的应用	15
2.4.3 定性温度和特性尺度	16
3 主要热工参数的测量	18
3.1 温度测量技术	18
3.1.1 各种温标	19
3.1.2 测温方式	20
3.1.3 温度显示仪表	33
3.2 压力的测量	38
3.2.1 弹性压力计	39
3.2.2 液柱式压力计	40

3.2.3 负荷式压力计	42
3.2.4 电气式压力计	44
3.3 流速的测量	44
3.3.1 毕托管	45
3.3.2 激光多普勒测速仪	46
3.4 流量的测量	46
3.4.1 流量计分类	47
3.4.2 节流式流量计	47
3.4.3 毕托管流量计	51
3.4.4 浮子流量计	52
3.4.5 涡轮流量计	53
3.4.6 涡街流量计	54
3.4.7 质量流量计	54
3.5 功率的测量	55
4 误差分析与数据处理	56
4.1 误差分析概述	56
4.1.1 误差分析的目的	56
4.1.2 误差的数值表示方法	56
4.1.3 误差的性质及其分类	57
4.2 直接测量中随机误差的估计	59
4.2.1 随机误差的性质	59
4.2.2 最小二乘法原理	60
4.2.3 随机误差的表示方法	61
4.2.4 测量结果的置信概率及表示方法	62
4.3 间接测量的误差分析	63
4.3.1 间接测量误差	63
4.3.2 误差分配方法	63
4.4 实验数据的处理	64
4.4.1 有效数字	64
4.4.2 等精度测量结果的数据处理	65
4.4.3 实验曲线的绘制和曲线的拟合	65
4.4.4 一元线性回归分析的检验	68
4.4.5 经验公式的选取	69
4.5 一般热工实验的误差分析	69
5 工程流体力学实验	71
实验1 流体静力学实验	71
实验2 不可压缩流体恒定流能量方程(伯努利方程)实验	75

实验 3 不可压缩流体恒定流动量定律实验	78
实验 4 毕托管测速实验	81
实验 5 雷诺实验	85
实验 6 局部阻力损失实验	87
实验 7 复杂管道连接综合实验	91
实验 8 气体管段流动多功能实验	94
实验 9 氢气泡流态设计与显示测量实验	103
6 工程热力学实验	108
实验 1 二氧化碳临界状态观测及 $p-V-t$ 关系测定实验	108
实验 2 可视性饱和蒸汽压力和温度关系实验	114
实验 3 气体定压比热测定实验	116
实验 4 制冷(热泵)循环演示装置实验	119
实验 5 空气绝热指数测定实验	123
7 工程燃烧学实验	126
实验 1 固体燃料热值的测定	126
实验 2 气体或挥发性液体燃料热值测定	130
实验 3 煤的工业分析	133
实验 4 液体燃料黏度的测定	136
实验 5 液体燃料闪点及燃点的测定	138
实验 6 气体成分分析	140
实验 7 动力火焰稳定性综合设计实验	143
8 传热传质学实验	152
实验 1 二维墙角温度场的电热比拟测定	152
实验 2 稳态平面热源法测定材料导热系数	155
实验 3 准稳态法测绝热材料的导热系数和比热实验	159
实验 4 横管表面空气自然对流换热实验	163
实验 5 气流横掠单管表面对流换热实验	167
实验 6 中温辐射时物体黑度的测试	172
实验 7 铂丝表面黑度的测定	176
实验 8 热管换热器实验台	180
附 录	184
参考文献	191

1 测量和仪表的基本知识

1.1 测量概述

1.1.1 测量的意义

测量是人类对自然界中客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，人们借助于专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，求得被测量的值，获得对于客观事物的定量的概念和内在规律的认识。因此可以说，测量就是为取得未知参数值而做的全部工作，包括测量的误差分析和数据处理等计算工作。

人类的知识许多是依靠测量得到的。在科学技术领域内，许多新的发现、新的发明往往是以测量技术的发展为基础的，测量技术的发展推动着科学技术的前进。在生产活动中，新的工艺、新的设备的产生，也依赖于测量技术的发展水平，而且，可靠的测量技术对于生产过程自动化、设备的安全以及经济运行都是不可少的先决条件。无论是在科学实验中还是在生产过程中，一旦离开了测量，必然会给工作带来巨大的盲目性。只有通过可靠的测量，然后正确地判断测量结果的意义，才有可能进一步解决自然科学和工程技术上提出的问题。

测量技术对自然科学、工程技术的重要作用越来越为人们所重视，它已逐步形成了一门完整的、独立的学科。这门学科主要研究的是测量原理、测量方法、测量工具和测量数据处理。根据被测对象的差异，测量技术可分为若干分支，例如力学测量、电学测量、光学测量、热工测量等。测量技术的各个分支既有共同需要研究的问题，如测量系统分析、测量误差分析与数据处理理论；又有各自不同的特点，如各种不同物理参数的测量原理、测量方法与测量工具。

1.1.2 测量方法及分类

所谓测量，就是用实验的方法，把被测量与同性质的标准量进行比较，确定两者的比值，从而得到被测量的量值。欲使测量结果有意义，测量必须满足以下要求：

- (1) 用来进行比较的标准量应该是国际上或国家所公认的，且性能稳定。
- (2) 进行比较所用的方法和仪器必须经过验证。

根据上述测量的概念，被测量的值可表达为：

$$X = aU \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量；
 U ——标准量（即选用的测量单位）；
 a ——被测量与标准量的数字比值。

式(1-1)称为测量的基本方程式。

测量方法就是实现被测量与标准量比较的方法。按测量结果产生的方式来分类,测量方法可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

1.1.2.1 直接测量法

使被测量直接与选用的标准量进行比较,或者用预先标定好了的测量仪器进行测量,从而直接求得被测量数值的测量方法,称为直接测量法。用水银温度计或者数字显示温度计测量介质温度,用压力表测量压力或者压差,用数字万用表测量电流、电压和电阻等都属于直接测量法。

直接测量的方法有如下几种:(1)直读法,用度量标准直接比较或由仪表直接读出;(2)差值法,用仪表测出两个量之差即为所要求之量,如用热电偶测温差,压差计测压差等;(3)代替法,用已知量代替被测量,而两者对仪表的影响相同,则被测量等于已知量,如用光学高温计测温度;(4)零值法,被测量对仪表的影响被同类的已知量的影响所抵消,使总的效应为零,则被测量等于已知量,如用电位差计测量电势,此法准确度最高,但需要较长的时间和精密的仪表。

1.1.2.2 间接测量法

通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各个变量,然后将所测得的数值代入函数关系进行计算,从而求得被测量数值的方法,称为间接测量法。如测量电路中一段输出功率的大小,往往分别测量电路中的电压和电流,通过两者的乘积计算出功率的大小;又如,测量一段管路的阻力损失系数,首先要测量出管路的特征速度和阻力损失(压差),然后根据相关的公式计算阻力损失系数。例如,测量透平机械轴功率 P (kW)时,可借用关系式:

$$P = \frac{Mn}{9549}$$

通过直接测量扭矩 M 和转速 n ,然后将测得的数值代入上式,可以求得轴功率 P 。

1.1.2.3 组合测量法

测量中使各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件以获得这种不同组合),根据直接测量或间接测量所获得的数据,通过解联立方程组以求得未知量的数值,这类测量称为组合测量。例如,用铂电阻温度计测量介质温度时,其电阻值 R 与温度 t 的关系是:

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2)$$

为了确定常数 a 、 b ,首先需要测得铂电阻在不同温度下的电阻值 R_t ,然后再建立联立方程求解,得到 a 、 b 的数值。

组合测量法在实验室和其他一些特殊场合的测量中使用较多。例如,建立测压管的方向特性、总压特性和速度特性曲线的经验关系式等。

除按测量结果产生的方式分类外,还可以根据测量中的其他因素分类。

按不同的测量条件,可分为等精度测量与非等精度测量。在完全相同的条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量;反之,在多次测量中测量条件不尽相同的测量称为非等精度测量。

按被测量在测量过程中的状态,可分为静态测量与动态测量。在测量过程中,被测量不随时间而变化,称为静态测量;若被测量随时间而具有明显的变化,则称为动态测量。实际上,绝对不随时间而变化的量是不存在的,通常把那些变化速度相对于测量速度十分缓慢的量的测量,按静态测量来处理。相对于静态测量,动态测量更为困难。这不仅在于参数本身的变化可能是很复杂的,而且测量系统的动态特性对测量的影响也是很复杂的,因而测量数据的处理有着与静态测量不同的原理与方法。

按照测量方法来区分,测量又可以分为接触式测量和非接触式测量两种。接触式测量是指一次仪表要与被测物体接触,如用皮托管测量管道中的速度,就必须将皮托管伸进管路当中;非接触测量是指一次仪表可以远离被测物体,测量中不破坏它的固有状态,如用红外线热像仪测量物体的温度。

1.2 测量系统

1.2.1 测量系统组成

在测量技术中,为了测得某一被测物理量的值,总要使用若干个测量设备,并把它们按一定的方式组合起来。例如,测量水的流量,常用标准孔板获得与流量有关的差压信号,然后将差压信号输入差压流量变送器,经过转换、运算,变成电信号,再通过连接导线将电信号传送到显示仪表,显示出被测流量值。为实现一定的测量目的而将测量设备进行的组合称为测量系统。任何一次有意义的测量,都必须由测量系统来实现。由于测量原理不同,测量精度要求不同,测量系统的构成会有悬殊的差别。它可能是仅有一只测量仪表的简单测量系统;也可能是一套价格昂贵、高度自动化的复杂测量系统。如果脱离具体的物理系统,任何一个测量系统都是由有限个具有一定基本功能的测量环节组成的。所谓测量环节是指建立输入和输出两种物理量之间某种函数关系的一个基本部件。从这种意义上说,整个测量系统实际上是若干个测量环节的组合,并可看成是由许多测量环节连接成的测量链。

1.2.2 测量环节功能描述

一般测量系统由敏感元件、变换元件、显示元件和传送元件四种基本环节组成。

1.2.2.1 敏感元件

敏感元件是测量系统直接与被测对象发生联系的部分。它接收来自被测介质的能量,并且产生一个以某种方式与被测量有关的输出信号。

敏感元件能否精确、快速地产生与被测量相应的信号,对测量系统的测量质量有着决定性的影响。因此,一个理想的敏感元件应该满足如下几方面的要求:

(1) 敏感元件输入与输出之间应该有稳定的单值函数关系。

(2) 敏感元件应该只对被测量的变化敏感,而对其他一切可能的输入信号(包括噪声信号)不敏感。

(3) 在测量过程中,敏感元件应该不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

实际上,一个完善的、理想的敏感元件是十分难得的。首先,要找到一个选择性很好

的敏感元件并非易事。这时,只好限制无用信号在全部信号中的成分,并用试验的方法或理论计算的方法把它消除。其次,敏感元件总要从被测介质中取得能量。在绝大多数情况下,被测介质也总要被测量作用所干扰。一个良好的敏感元件,只能是尽量减少这种效应,但这种效应总会某种程度地存在着。

1.2.2.2 变换元件

变换元件是敏感元件与显示元件中间的部分,它将敏感元件输出的信号变换成显示元件易于接收的信号。

敏感元件输出的信号一般是某种物理变量,例如位移、压差、电阻、电压等。在大多数情况下,它们在性质、强弱上总是与显示元件所能接收的信号有所差异。测量系统为了实现某种预定的功能,必须通过变换元件对敏感元件输出的信号进行变换,包括信号物理性质的变换和信号数值上的变换。

对于变换元件,不仅要求它的性能稳定、精确度高,而且应使信息损失最小。

1.2.2.3 显示元件

显示元件是测量系统直接与观测者发生联系的部分。如果被测量信号需要通知观测者,那么这种信息必须变成能为人们的感官所识别的形式。实现这种“翻译”功能的环节称为显示元件,其作用是向观测者指出被测参数的数值。显示元件可以对被测量进行指示、记录,有时还带有调节功能,以控制生产过程。

显示元件主要有3种基本形式:

(1) 模拟式显示元件。最常见的结构是以指示器与标尺的相对位置来连续指示被测参数的值。其结构简单、价格低廉,但容易产生视差。记录时,以曲线形式给出数据。

(2) 数字式显示元件。直接以数字形式给出被测参数的值,不会产生视差。但直观形象性差,且有量化误差。记录时可以打印输出数据。

(3) 屏幕显示元件。既可按模拟方式给出指示器与标尺的相对位置、参数变化的曲线,也可直接以数字形式给出被测参数的值,或者二者同时显示,是目前最先进的显示方式。屏幕显示具有形象性和显示大量数据的优点,便于比较判断。

1.2.2.4 传送元件

如果测量系统各环节是分离的,那么就需要把信号从一个环节送到另一个环节。实现这种功能的元件称为传送元件,其作用是建立各测量环节输入、输出信号之间的联系。

传送元件可以比较简单,但有时也可能相当复杂。导线、导管、光导纤维、无线电信,都可以作为传送元件的一种形式。

传送元件一般较为简单,容易被忽视。实际上,由于传送元件选择不当或安排不周,往往会造成信息能量损失、信号波形失真、引入干扰,致使测量精度下降。例如导压管过细过长,容易使信号传递受阻,产生传输迟延,影响动态压力测量精度;导线的阻抗失配,将导致电压、电流信号的畸变。

应该指出,上述测量系统组成及各组成部分的功能描述并不是唯一的。尤其是敏感元件、变换元件的名称与定义目前还没有完全统一的理解。即使是同一元件,在不同场合下也可能使用不同的名称。因此,关键在于弄清它们在测量系统中的作用,而不必拘泥于名称本身。

1.3 仪器的性能指标

仪器本身的性能指标是测量系统误差的影响因素之一。判别测量系统中仪器性能的好坏,有下列几个主要的质量指标:

(1) 灵敏度。灵敏度是指仪器对测量参数的反应程度,它以测量参数的变化值与被测物理量变化值的比值来表示。例如,一只温度表上指针每移动 1mm 代表 1°C ,而另一只表上指针每移动 2mm 代表 1°C ,则后者具有较高的灵敏度。虽然仪表的灵敏度可以通过放大系统来加大,但是通常也会使读数带来新的误差。对于线性系统来说,灵敏度是个常数。

(2) 分辨率。分辨率是指可以使仪表指针发生动作的被测量的最小变化,也就是说仪表可以感受的被测量的最小变化值。仪表的灵敏度越大,其准确度相应较低。一般仪器的分辨率应小于仪器允许绝对误差的一半。

(3) 精确度。精确度也叫精度,它由准确度和精密度综合决定。准确度是指仪器显示值与被测量物理量真值的偏离程度,它反映了测量装置的系统误差大小。而精密度是指仪器测量结果的分散程度。应该指出,一个测量系统准确度高,未必精密度就高;而精密度才能真正反映仪器的综合性能。这个概念可以借用子弹射击的事件来加深理解,如图 1-1 所示。

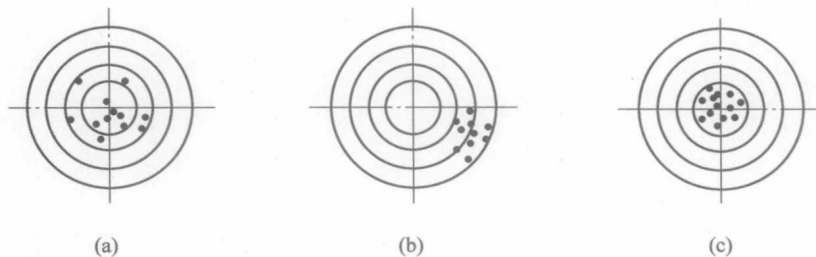


图 1-1 子弹射击中靶的准确度、精密度和精确度示意图

图 1-1 (a) 说明子弹射击中靶准确度高,但是精密度低;图 1-1 (b) 说明子弹中靶准确度低,但是精密度高;图 1-1 (c) 说明子弹中靶准确度高,精密度也高,综合起来精度高。

仪表的准确度是仪表的一个重要技术性能,一般仪器设备都要标出它的精度等级,普通热工仪表的精度分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共 7 级。

显然,精度等级级数越低,档次越高。精度大小反映了该仪器所能允许的误差大小。例如精度等级为 1.0 的仪表,表示了该仪器的允许误差值不超过满量程的 $\pm 1\%$ 。

在精度相同的条件下,选择仪器的量程不宜过大。因为量程越大,其绝对误差也越大。在满足被测量的数值范围的条件下,应选用量程小的仪表,并使测量值在满量程度的三分之二处较为合适。

(4) 复现性。仪表在同一工作条件下对同一对象的同一参数重复进行测量时,仪表的读数不一定相同。各次读数之间的最大差数称为读数的变化量。变化量越小,仪表的复现性越好。

(5) 动态特性。仪表对随时间变化的被测量的响应特性。动态特性好的仪表,其输出

量随时间变化的曲线与被测量随同一时间变化的曲线一致或比较接近。一般仪表的固有频率越高,时间常数越小,其动态特性越好。

为了得到可靠的测量结果,首先必须掌握仪表本身的工作性能。在实验室里检定、试验和分度确定仪表的工作性能是计量工作的三种基本任务。这三种基本工作是仪表在出厂前都应当进行的。仪表在使用过程中还必须定期到国家规定的标准计量机构进行检验,以确保仪表在可靠状态下进行工作。



(a)



(b)



(c)

图 1-1 标准尺和分度尺的示意图 (a) 标准尺 (b) 分度尺 (c) 分度尺

2 相似理论和模化实验

为了研究热工过程的一些基本规律,如湿度分布、速度分布和流动阻力特性等。需要在实际的热工设备中进行实验研究。但是由于经济上和技术上的限制,对实物进行实验通常是行不通的。因此绝大部分的研究和测试是在实验室中通过模型进行的。例如航空工程中的飞机模型,热工过程中的炉子模型,水利工程中的水坝模型等都是模拟研究成功的例子。对于模型的实验研究,必须解决如何制造模型,如何安排实验以及如何把模型的实验结果换算到实物上去等一系列的问题。

在热工理论研究的范围内,实际存在的流动和传热过程称为原型,在实验室内进行重演或预演的流动和传热过程称为模型。通常我们希望在模型上进行实验所得到的结果能够准确地预测实物(原型)上所发生的过程和各个物理量的变化。这样将大大节省人力、物力和时间。而且在实验室中进行实验、控制和测试都可以比较容易实现。下面介绍的相似理论是考虑实验方案、设计模型、组织实验以及整理实验数据和把实验结果推广到原型上去的理论依据。

2.1 相似理论的产生

实验研究方法是针对自然界和工程中各种复杂、耦合的物理现象,借助各种测试元件、仪表和设备,来研究其规律的一种基本的科学方法。它的特点是:

(1) 可以直接、真实地反映客观物理过程,提供第一手定性和定量的测量数据,并且具有新发现的可能。

(2) 可以人工控制影响客观物理现象的一些因素,将一切次要因素采取措施化小化了,使复杂问题变得简单。

(3) 由实验方法探索的规律具有一定的近似程度和局限性。因为在一定的技术条件和研究水平上,用各种元件和设备进行实验势必存在着各种误差,而且观察和实验过程要受到各种条件的限制,只能在一定的参数范围内进行,由此所得到的规律不可能很精确地反映客观事物本质及其全部面貌。

理论分析方法是建立在实验结果之后的行为,在一定程度上了解了客观事物的本质,提出一些假设,构造出物理模型,然后用数学工具将物理模型转化为数学模型,建立起各种物理量之间的关联方程式。如质量守恒方程、动量方程、组分守恒方程和能量守恒方程。将这些方程给定单值条件,就可以得到解决自然界和工程中实际问题的理论依据。其结果具有普遍性和预测性,这是实验方法所不及的。同时理论研究方法由于它主要通过理论推导计算手段,所以其研究成本远远不及实验方法,而且它不需要实验设备的设计、制造、安装、调试、维护和繁杂的测量过程,使研究周期大为缩短。另外,理论研究方法能够提供全部的信息资料,不干扰和破坏客观事物的本来面目,也不受测量条件的限制。

当然这些是在所建立的数学模型总体上能够反映客观事物的前提下才成立的, 否则不论数学推导多么严密, 计算结果如何精确, 都是错误的。

即便如此, 理论研究方法还有它的不足之处。比如建立符合物理模型的数学模型的过程就具有一定的难度, 要想得到方程的解必须做出许多假设, 往往有些假设很牵强, 与实际并不相符。因此所得出的结果只能近似地反映客观事物及内在规律。最后, 这种结果还要拿到实践中去比较, 确定其可信赖和可应用的程度, 并加以修正完善。

基于上述两种研究方法的利弊所在, 人们便创造了兼有两者优点的所谓相似理论的研究方法。相似理论把描述客观现象的微分方程用实验环节来求解, 既排除了数学方法的困难, 又提出了研究结果的普遍应用价值。

相似理论萌生于 360 多年以前, 从 17 世纪到 18 世纪仅有几位科学家提出相似的概念, 如米哈伊洛夫 (O. Михайлов)、伽利略 (Galileo)、牛顿 (Isaac Newton); 19 世纪 20 年代, 傅里叶 (J. B. Fourier) 提出了个别条件下的相似问题。直到 19 世纪中叶 (1848 年), 相似第一定理才诞生, 法国科学家伯特朗 (J. Bertrand) 在分析力学方程之后阐明了相似现象的基本性质, 即相似现象的对应点的同名相似特征数值相等。

相似第一定理激发了许多科学家的灵感。19 世纪末, 雷诺 (O. Reynolds) 应用它研究水等各种流体在通道内流动时流动阻力, 整理成相似准则 R_e 对管道流动的影响规律。20 世纪初, 俄国空气动力学家茹柯夫斯基 (H. B. Жуковский) 将气体力学相似实验结果用于航空航天飞机, 紧接着努塞尔特 (W. Nusselt) 用相似理论研究了换热过程。

1911 年, 俄国费德尔曼 (A. O. Федерман) 提出了相似第二定理, 即微分方程的积分结果可以用相似准则之间的函数关系来表示。1914 年美国学者柏金汉 (E. Buckingham) 推出了在特定条件下的量纲分析的 π 定理。所以相似第二定理也称 π 定理。

相似第一定理和相似第二定理确立了相似现象所具有的性质, 但是还没有确定出任何两个现象相似的原则。17 年以后 (1931 年), 苏联学者基尔比乔夫 (M. B. Кирпичёв) 和古赫曼 (A. A. Гухман) 推出了相似第三定理, 并得到了包括基尔比乔夫在内的多人证明。

至此, 相似理论形成了完整的学科, 它得到了广泛的应用。

2.2 相似的基本概念

2.2.1 几何相似

几何相似可以分为两种情况。一种是线性几何相似群, 如所有的圆球、椭圆都属于一个线性几何相似群; 所有的直角平行六面体, 包括所有的书、火柴盒、鞋盒也都属于一个线性几何相似群。另一种称为几何相似群, 它是指按照同一比例放大或者缩小了的几何相似体。

在相似理论中, 往往把以上两种相似群分别放入某一坐标系中来考虑, 称为线性几何相似域或几何相似域的几何相似现象。在很多的情况下, 相似理论研究的是几何相似域内的物理现象。严格地说, 几何相似群要比线性几何相似群的约束条件多。

几何相似的概念可以推广到任何一种物理现象。例如两种流体运动之间的相似, 称为运动相似; 温度场或热流之间的相似可以称为热相似。

2.2.2 物理量相似

所谓物理量相似，一般是指在几何相似群（或线性几何相似群）中的各物理参数成比例。这个概念是针对稳定场而言的。对于非稳定场，要引入相似时间段。

2.2.3 现象相似

现象相似也可以按照两种情况来讨论，一种是同类现象，一种是异类现象。就同类现象而言，现象相似至少要发生在线性几何相似域，而且各同名物理量呈某种比例或者说存在线性变换，即如果形式相同的完整方程组所包含的各变量可以相似变换，则这些方程组所确定的性质相同的现象，称为同类相似现象。例如，各种流体动力学过程可以用连续性方程和 Navier-Stokes 方程来描述。流体对流换热过程可以用上述两方程以及导热微分方程和边界换热方程来描述。这些方程组适用于该类现象的普遍情况。

下面通过热工过程中两个典型的现象来分析现象相似的条件。首先研究流体流动的速度场，根据速度的定义，流体的流动速度可以表示为流体质点在 $d\tau$ 时间内所经历的路程 dl 与 $d\tau$ 的比值，即

$$u = \frac{dl}{d\tau} \quad (2-1)$$

对于两个相似的速度场，必然有

$$u_1 = \frac{dl_1}{d\tau_1} \quad u_2 = \frac{dl_2}{d\tau_2} \quad (2-2)$$

根据相似现象的定义，对应物理量互成比例，则

$$\frac{u_2}{u_1} = C_u \quad \frac{l_2}{l_1} = C_l \quad \frac{\tau_2}{\tau_1} = C_\tau \quad (2-3)$$

将式 (2-3) 代入式 (2-2)，得

$$C_u u_1 = \frac{C_l}{C_\tau} \frac{dl_1}{d\tau_1} \quad (2-4)$$

$$u_1 = \frac{C_l}{C_\tau C_u} \frac{dl_1}{d\tau_1} \quad (2-5)$$

比较式 (2-5) 和式 (2-2)，显然有

$$\frac{C_\tau C_u}{C_l} = 1$$

或者写成

$$\frac{u_1 \tau_1}{l_1} = \frac{u_2 \tau_2}{l_2} = \frac{u \tau}{l} = \text{常数} \quad (2-6)$$

这就是两个相似速度场的特征。

又如，边界上的换热问题，边界上的换热微分方程为：

$$h \Delta T = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2-7)$$

式中 h ——流体和界面之间的换热系数；

ΔT ——边界上某点的温度与流体温度之差；