



TEXTBOOK SERIES FOR THE CULTIVATION OF GRADUATE INNOVATIVE TALENTS

研究生创新人才培养系列教材

工程中的流动测试技术及应用

FLOW MEASUREMENT TECHNIQUES AND APPLICATIONS IN ENGINEERING

姜楠 田砚 唐湛棋 编著

非外借

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



TEXTBOOK SERIES FOR THE CULTIVATION OF GRADUATE INNOVATIVE TALENTS

研究生创新人才培养系列教材

工程中的流动测试技术及应用

FLOW MEASUREMENT TECHNIQUES AND APPLICATIONS IN ENGINEERING

姜楠 田砚 唐湛棋 编著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

工程技术中的大量问题与流动密切相关,用实验测试的方法研究工程中的流动机理是工程技术发展的基础,工程流动测试技术的发展必将在诸多工程技术领域引起重大的科技进步并产生深远影响。

本书以实训专题的形式,对工程中的流动实验设备、流动显示、流动物理量测量等流动测试技术进行了介绍,并根据以往承担的工程应用型科研项目,总结提炼出了有关工程流动测试的10个应用案例。全书分为原理设计型实验、操作技能型实验、综合研究型实验、工程应用型实验四个层次,以适应不同专业、不同学科、不同层次人才培养的需要。

本书可供力学、航空航天、工程热物理、动力机械、自动化仪表、环境工程、化工、机械、土木、水利、船舶、海洋工程等专业的本科生和研究生在学习实验流体力学时选用,也可供科研人员和工程技术人员在解决相关问题时参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程中的流动测试技术及应用 / 姜楠,田砚,唐湛
棋编著. — 天津:天津大学出版社,2018.11

研究生创新人才培养系列教材

ISBN 978-7-5618-6288-9

I. ①工… II. ①姜… ②田… ③唐… III. ①工程测
试-流动特性-研究生-教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第256349号

工程中的流动测试技术及应用

GONGCHENG ZHONG DE LIUDONG CESHI JISHU JI YINGYONG

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm×260mm

印 张 15.25

字 数 381千

版 次 2018年11月第1版

印 次 2018年11月第1次

定 价 65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究



前言

工程技术中的大量问题与流动密切相关。工程流动测试技术的发展必将在国民经济的诸多工程技术领域,如航空、航天、国防、交通、建筑、土木、水利、能源、化工、冶金、轻工、机械、环境、海洋、医学、生物工程等领域引起重大的科学技术进步并产生深远影响。

用实验的方法研究工程中的流动机理是工程技术发展的基础,历史上许多工程问题都是首先从实验中发现和提出的,并贯穿于工程技术发展的各个阶段,渗透到工程技术的各个分支学科,对推动工程技术的发展起到十分重要的作用,在工程技术领域中也具有广泛的应用价值。通过实验发现流动中的新现象,揭示流动的本质和机理,验证理论和数值模拟结果,为工程技术提供和验证可靠的设计方案,开拓工程技术研究的新领域,发展新的测试技术,是工程测试的中心任务。

工程技术的发展日新月异,新发现、新成果、新应用层出不穷。人们对复杂流体流动机理的认识也在不断深化和发展,需要不断更新对复杂流体流动本质机理的认识和理解。工程技术发展的这些特点给工程流动测试理论与技术课程的教学改革提供了难得的机遇,同时也提出了更高的要求和挑战。用发展的、与时俱进的观点进行创新和改革,跟踪世界工程流动测试理论与技术的最新成果,不断更新教学内容和教学手段是我们永恒追求的理念和目标。应该充分认识到工程流动测试理论与技术的综合性、实践性和应用性,在教学改革中以科研为依托,及时将科研成果转化到教学实践中去,注重在教学中树立以学生为主体,融知识传授、创新能力培养和科学素质提高于一体的综合协调发展的教学理念,以培养学生的探索精神、科学思维、实践能力和创新能力为核心,加强实验教学内容与科研、工程、应用的互相促进,形成教学与科研、基础与应用、经典与现代的有机结合,加强实验教学的综合性、研究性、设计性、创新性和实践性,推进学生自主学习、合作学习和研究性学习,全面提高教学水平。

《工程中的流动测试技术及应用》一书是在我们长期从事本课程教学和相关科学研究的基础上,经过挖掘、总结、提炼编写的一部实验教材。它以显示工程中的流动现象、测量流动参数、研究流动机理、揭示流动规律为题目,从而使学生巩固和加深对课堂教学内容的理解,学习和掌握实验原理、实验方法和实验技能,树

立实事求是、独立思考、勇于创新的科学精神和严谨、周密、求实的科学作风。

全书分为原理设计型实验、操作技能型实验、综合研究型实验、工程应用型实验四个层次,以适应不同专业、不同学科、不同层次人才培养的需要。

通过本课程的学习要达到以下目标:(1)通过研学结合型教学实验,使学生掌握现代工程流动测试技术;(2)通过流动显示和流动测量实验,使学生认识流动机理和规律,熟悉流动控制技术;(3)通过研学结合型实验,使学生了解流体力学在工程中的应用背景;(4)培养学生用实验研究的方法开展科学研究的能力和创新能力。

通过这些综合性、研究性教学实验的实践,更新实验教学的内容和手段,激发学生学习本课程的积极性、主动性和创造性;使学生掌握现代先进的工程流动测试方法和实验技能,了解流动测试技术发展的最新动态和前沿,激发学生学习的兴趣;提高学生发现问题、提出问题、分析问题、解决问题和实践、观察、动手、动脑的能力,使学生具备开展科学研究的创新能力和素质,为今后开展科学研究奠定良好的基础。

本书可供力学、航空航天、工程热物理、动力机械、自动化仪表、环境工程、化工、机械、土木、水利、船舶、海洋工程等专业的本科生和研究生在学习实验流体力学时选用,也可供科研人员和工程技术人员在解决相关问题时参考。由于时间仓促和编者水平所限,书中一定存在不少缺点和错误,恳请读者不吝指正。

本书植入9个教学视频,获取步骤如下:(1)刮开封底二维码的涂层,打开微信扫一扫,查询真伪并获取扫码权限;(2)扫描书中的二维码,即可免费浏览流动测试技术应用视频。

编者

2018年10月

目 录

第一篇 原理设计型实验	(1)
实验 1-1 流体静力学实验	(1)
实验 1-2 用精密压力检验天平标定微差压计	(6)
实验 1-3 弯道压力分布测量	(7)
实验 1-4 二维机翼表面压力分布测量	(9)
实验 1-5 伯努利能量方程实验	(12)
实验 1-6 文丘里流量计测量原理实验	(15)
实验 1-7 管道沿程阻力测量	(18)
实验 1-8 毕托管的标定	(20)
实验 1-9 用毕托管测量风洞实验段平均速度及其均匀度	(23)
实验 1-10 用湍流球测量风洞实验段湍流度	(24)
实验 1-11 圆出口自由淹没射流的流动显示	(27)
实验 1-12 用毕托管测量自由淹没射流平均速度剖面	(31)
实验 1-13 卡门涡街的流动显示	(33)
实验 1-14 卡门涡街发射频率的测量	(35)
实验 1-15 圆柱绕流阻力测量	(36)
实验 1-16 PIV 原理实验	(38)
实验 1-17 各种管道的流动显示	(41)
实验 1-18 雷诺圆管的流动显示	(46)
实验 1-19 用总压探针测量平板边界层参数	(49)
实验 1-20 流动双折射原理实验	(51)
第二篇 操作技能型实验	(54)
实验 2-1 低速风洞调速	(54)
实验 2-2 单丝热线探针的标定	(56)
实验 2-3 双丝热线探针的标定	(63)
实验 2-4 单丝水探针的标定	(67)
实验 2-5 用热线风速仪测量自由射流平均速度分布	(71)
实验 2-6 用热线风速仪测量自由射流湍流度和雷诺应力分布	(73)
实验 2-7 用热线风速仪测量圆柱尾流平均速度剖面	(77)
实验 2-8 用热线风速仪测量圆柱尾流湍流度和雷诺应力分布	(79)
实验 2-9 用 TRPIV 测量圆柱尾流平均速度剖面	(81)

实验 2-10	用 TRPIV 测量圆柱尾流湍流度和雷诺应力分布	(83)
实验 2-11	用热线风速仪测量平板边界层平均速度剖面	(85)
实验 2-12	用热线风速仪测量平板边界层湍流度和雷诺应力分布	(90)
实验 2-13	用 TRPIV 测量平板湍流边界层平均速度剖面	(92)
实验 2-14	用 TRPIV 测量平板湍流边界层湍流度和雷诺应力分布	(94)
实验 2-15	壁湍流条纹结构的氢气泡流动显示	(96)
实验 2-16	氢气泡流动显示数字图像处理	(101)
实验 2-17	用热线风速仪测量风洞实验段平均速度分布	(107)
实验 2-18	用热线风速仪测量风洞实验段湍流度、均匀度和稳定度	(108)
实验 2-19	激光多普勒测速原理实验	(110)
实验 2-20	用三维激光多普勒测速仪测量水槽主要性能指标	(113)
第三篇	壁湍流相干结构认识与检测技术综合研究型实验	(118)
3.1	关于壁湍流相干结构流动显示与单点测量研究的综述	(118)
3.1.1	壁湍流的分层结构	(119)
3.1.2	不可压缩流体零压力梯度湍流边界层平均速度剖面	(121)
3.1.3	壁湍流相干结构的流动显示研究	(123)
3.1.4	壁湍流相干结构的条件采样技术	(124)
3.1.5	条件采样方法的局限性	(128)
3.1.6	用子波分析检测壁湍流多尺度相干结构	(129)
3.1.7	湍流多尺度局部平均结构函数	(135)
3.1.8	湍流多尺度涡结构的间歇性	(138)
3.1.9	壁湍流相干结构不同速度分量和雷诺应力分量的相位平均波形	(143)
3.1.10	客观识别和检测湍流相干结构的综合方法	(150)
3.2	壁湍流相干结构 PIV 测量的综述	(153)
3.2.1	涡量准则	(153)
3.2.2	Galilean 速度分解	(154)
3.2.3	Q 准则	(154)
3.2.4	Δ 准则	(155)
3.2.5	λ_2 准则	(156)
3.2.6	λ_{ci} 准则	(156)
3.2.7	条件平均	(156)
3.2.8	Lagrangian 涡辨识准则	(158)
3.2.9	速度空间局部平均结构函数辨识准则	(161)
3.3	壁湍流相干结构认识与检测技术综合研究型实验	(164)
	本篇参考文献	(166)
第四篇	工程应用型实验	(172)
实验 4-1	住宅小区空气污染的流动显示	(172)

实验 4-2	丘陵地形污染物输移扩散规律研究	(175)
实验 4-3	环流反应器流场气含率测量	(181)
实验 4-4	半圆形防波堤表面压力分布的测量	(186)
实验 4-5	半圆形防波堤周围流场的流动显示	(189)
实验 4-6	长距离输气管道壁面涂料减阻实验	(189)
实验 4-7	浮选柱气泡发生器流场的测量	(193)
实验 4-8	电动增压器增压流量的测量	(196)
实验 4-9	投弃式海流剖面仪探头流场的 TRPIV 实验	(199)
实验 4-10	圆管内楔形节流件周围流场的 TRPIV 实验	(204)
实验 4-11	加齿被动控制射流增强混合的流动显示	(209)
实验 4-12	加齿被动控制射流增强混合的热线测量	(217)
实验 4-13	飞机客舱条缝通风口流场的测量	(222)
实验 4-14	机舱个性化通风口流场的测量	(224)
实验 4-15	高超声速边界层非对称转捩的数字图像处理	(226)
附录	风力等级表	(232)

第一篇 原理设计型实验

实验 1-1 流体静力学实验

一、实验原理

1. 流体静压强测量原理

在重力作用下不可压缩流体的静力学基本方程为

$$z + \frac{p}{\rho g} = C \quad \text{或} \quad p = p_0 + \rho gh \quad (1-1-1)$$

式中 z ——被测点相对于基准面的位置高度；

p ——被测点的静水压强(用相对压强表示,以下同)；

p_0 ——水箱中液体的表面压强；

ρ ——液体密度；

g ——重力加速度；

h ——被测点的液体深度。

压强的测量方法有机械式测量方法与电测法,测量的仪器有静态与动态之分。测量流体点压强的测压管属机械式静态测量仪器。测压管是一端连通于流体被测点,另一端开口于大气的透明管,适用于测量流体测点在静态低压范围的相对压强,测量精度为 1 mm。测压管分直管和 U 形管。直管如图 1-1-1 中管 2 所示,其测点压强公式为 $p = \rho gh$, h 为测压管液面至测点的竖直高度。U 形管如图 1-1-1 中管 1 与管 8 所示。直管测压管要求液体测点的绝对压强大于当地大气压,否则会因气体流入测点而无法测压。U 形测压管可测量液体测点的负压,如管 1 中当测压管液面低于测点时的情况;U 形测压管还可测量气体测点的压强,如管 8 所示,一般 U 形测压管中为单一液体(本装置因其他实验需要在管 8 中装有油和水两种液体),测点气压 $p = \rho g \Delta h$, Δh 为 U 形测压管两液面的高度差,当管中接触大气的自由液面高于另一液面时 Δh 为“+”,反之 Δh 为“-”。由于受毛细管作用影响,测压管内径应为 8 ~ 10 mm。本装置采用毛细现象弱于玻璃管的透明有机玻璃管作为测压管,内径为 8 mm,毛细高度仅为 1 mm 左右。

测量液体恒定水位的连通管属机械式静态测量仪器。连通管是一端连接于被测液体,另一端开口于被测液体表面空腔的透明管,如图 1-1-1 中管 3 所示。敞口容器中的测压管也是测量液位的连通管。连通管中的液体直接显示了容器中的液位,用 mm 刻度标尺即可测读液位值。本装置中连通管与各测压管同为等径透明有机玻璃管,液位测量精度为 1 mm。

说明:

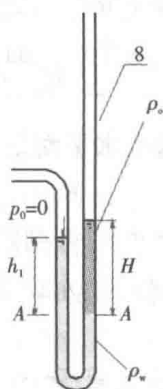


图 1-1-2 油密度测量方法一

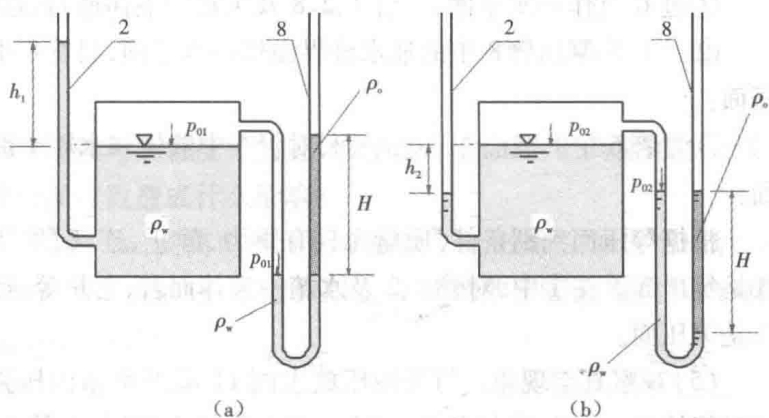


图 1-1-3 油密度测量方法二

二、实验仪器和设备

- (1) 流体静力学实验仪。
- (2) 500 mm 直尺。
- (3) 250 mL 量杯。

三、实验目的和要求

- (1) 掌握用测压管测量流体静压强的技能。
- (2) 验证不可压缩流体静力学基本方程。
- (3) 测定油的密度。
- (4) 通过对诸多流体静力学现象的实验观察分析,加深对流体静力学基本概念的理解,提高解决静力学实际问题的能力。

四、实验内容

1. 定性分析实验

(1) 测压管和连通管判定。按测压管和连通管的定义,实验装置中管 1、2、6、8 都是测压管,当通气阀关闭时,管 3 无自由液面,故是连通管。

(2) 测压管高度、压强水头、位置水头和测压管水头判定。测点的测压管高度即为压强水头 $\frac{p}{\rho g}$, 不随基准面的选择而变,位置水头 z 和测压管水头 $z + \frac{p}{\rho g}$ 随基准面的选择而变。

(3) 观察测压管水头线。测压管液面的连线就是测压管水头线。打开通气阀 4, 此时 $p_0 = 0$, 那么管 1、2、3 均为测压管,从这三管液面的连线可以看出,对于同一静止液体,测压管水头线是一条水平线。

(4) 判别等压面。关闭通气阀 4, 打开截止阀 7, 用加压打气球 5 稍加压, 使 $\frac{p_0}{\rho g}$ 为 0.02 m 左右, 判别下列几个平面是不是等压面。

实验 1-2 用精密压力检验天平标定微差压计

一、实验原理

压力(压差)测量是流体力学实验的重要内容之一,精密压力检验天平(图 1-2-1)是专门用于标定或检查压力计刻度的精密检验仪器。压力范围是从 0 起至 150 mm 水柱或从 0 起至 100 mm 水柱。在 0.01 ~ 1 mm 水柱间误差为 0.003 mm,在 1 ~ 150 mm 水柱间误差为 0.15%。

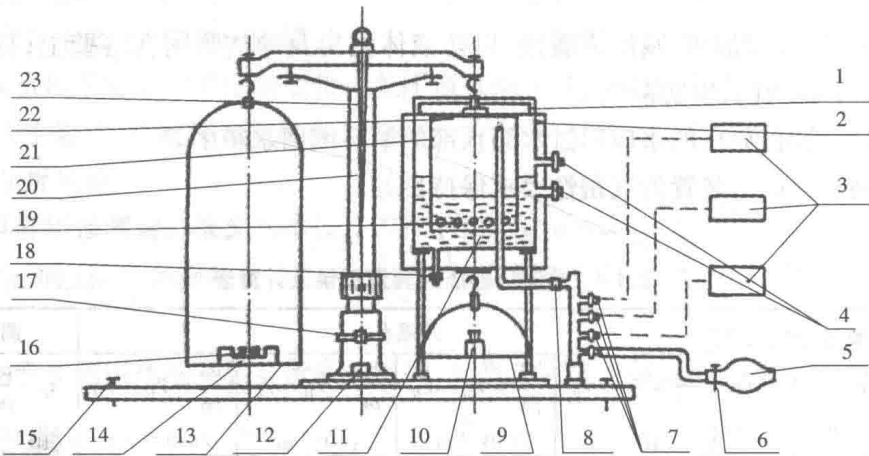


图 1-2-1 精密压力检验天平构造图

- 1—盖板;2—贮液罐;3—被校微压计;4—溢出阀门;5—充气球;6—单向阀门;7—外接阀门;
8—总阀门;9—右砝码盘;10,16—砝码;11—工作液体;12—水平指示;13—左砝码盘;
14—砝码托盘;15—水平调节螺钉;17—天平悬起手柄;18—排液阀;19—钟罩连通道;
20—天平支杆;21—钟罩;22—钟罩内上受压面;23—指针

此天平的主要构件包括一个灵敏度很高的精密天平和一个光滑镀镍的储液容器,工作溶液是“Dekalin0.89”。在储液容器内悬浮有一个钟罩,它的有效向上受压面制作极其精确,保证了产生 1 mm 水柱压力恰好需要在天平右砝码盘加上 20 g 重的砝码。

二、实验仪器和设备

- (1)精密压力检验天平。
- (2)各种微压计。
- (3)计算器。

三、实验目的和要求

要求用所给实验仪器,设计一套用精密压力检验天平检验微压计的实验装置和实验方案,画出实验装置图,并按照操作步骤进行实验。通过本实验,达到以下目的:

- (1) 了解用精密压力检验天平检验微压计的原理;
- (2) 掌握用精密压力检验天平检验微压计的方法;
- (3) 了解几种常见微压计的测压原理;
- (4) 掌握几种常见微压计的使用方法。

四、问题讨论与思考

- (1) 用漏斗将“Dekalin0.89”溶液灌入储液罐时需要注意哪些问题?
- (2) 为什么需要调整天平的零位? 如何调整? 调整天平的零位时需要注意哪些问题?
- (3) 为什么需要调整压力计水平和零位? 如何调整?
- (4) 工作溶液由“Dekalin0.89”改变成水,会有什么影响?
- (5) 产生实验误差的主要因素有哪些?

实验 1-3 弯道压力分布测量

一、实验原理

流体流经弯道时,气流方向偏转,产生离心力,当弯道曲率比较大时,流体与固壁还会发生分离,使得沿弯道径向压力逐渐增大,加之管壁上存在边界层,会在横断面内形成二次流,二次流与主流叠加,实际的流线是螺旋线,流动情况相当复杂。本实验是将势流解与实测结果作比较。

忽略二次流,仅按势流分析,设来流速度为 U_{∞} ,则弯道径向的速度分布规律为

$$U = \frac{C}{r} \quad (1-3-1)$$

式中 U ——曲率半径 r 处的流速;
 C ——常数,可根据连续性方程确定。

$$Q = U_{\infty} b (r_2 - r_1) = b \int_{r_1}^{r_2} U dr \quad (1-3-2)$$

式中 b ——弯道过流断面的宽度。

将式(1-3-1)代入式(1-3-2),积分可得

$$C = U_{\infty} \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1-3-3)$$

因而,沿径向无量纲速度分布为

$$\frac{U}{U_{\infty}} = \frac{r_2 - r_1}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (1-3-4)$$

给出曲率半径 r ,即可计算无量纲速度 $\frac{U}{U_{\infty}}$ 。

由于稳压箱体积很大,可认为其中的压力为总压 P_0 。对稳压箱及收缩段出口两截面运用伯努利方程,则可得来流的动压为

$$P_0 - P_\infty = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (1-3-5)$$

弯道内任意一点的压力系数为

$$\bar{P} = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1-3-6)$$

沿弯道径向各点的压力系数 \bar{P} 可表示为

$$\bar{P} = 1 - \left(\frac{U}{U_\infty} \right)^2 = 1 - \frac{(r_2 - r_1)^2}{\left[r \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right]^2} \quad (1-3-7)$$

二、实验仪器和设备

实验仪器和设备如图 1-3-1 和图 1-3-2 所示。

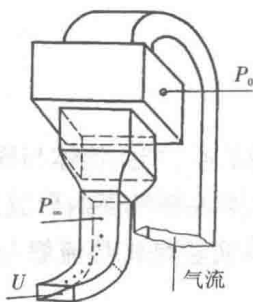


图 1-3-1 空气动力学多功能实验装置
及弯道实验段模型

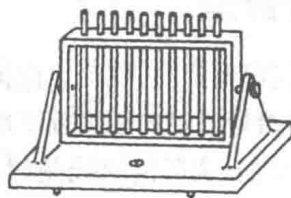


图 1-3-2 多管压力计

三、实验目的和要求

要求用所给实验仪器,设计一套测量弯道压力分布的实验装置和实验方案,画出实验装置图,并按照操作步骤进行实验。通过本实验,达到以下目的:

- (1) 学习用多管压力计测定管道中流动的压力分布;
- (2) 通过实验加深对弯道内流动规律的理解;
- (3) 根据实测数据计算各点的压力系数 \bar{P} 及径向无量纲速度 $\frac{U}{U_\infty}$, 并绘制曲线。

四、问题讨论与思考

- (1) 流体流经弯道时,沿流动方向管道内、外侧静压如何变化?
- (2) 弯道径向静压如何变化?
- (3) 流体流经弯道时流动状态如何? 为什么会产生压力损失?

实验 1-4 二维机翼表面压力分布测量

一、实验原理

测定物体表面压力分布有三个方面的意义:其一,有了物体表面的压力分布曲线,就可以了解物体上各部分的载荷分布,为强度设计提供基本数据;其二,有助于了解气流绕过物体时的物理现象,如判断激波、分离点的位置等;其三,还可以利用压力分布曲线,计算出物体所受的力。

二维机翼模型的某一剖面上根据需要设置若干测压孔,每个测压孔连接模型内的金属细管,各金属细管均由模型一端引出,通过测压胶管接到多管压力计上。也可以通过多点压力传感器,将压力信号转换为电信号,由计算机进行数据处理。

压力通常表示为压力系数 C_p (或 \bar{P})

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (1-4-1)$$

式中 P_i ——机翼表面上某点的静压;

P_∞ ——来流的静压;

U_∞ ——来流速度。

若将测来流速度的毕托管的总压 P_0 及静压 P_∞ 分别接到多管压力计上,则各待测点的压力系数可表示为

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = \frac{a_i - a_\infty}{a_0 - a_\infty} \quad (1-4-2)$$

为消除多管压力计各管在初始状态下液面不在同一水平面上的影响,可事先读出各管的初读数,则有

$$C_p = \frac{(a_i - a_{i初}) - (a_\infty - a_{\infty初})}{(a_0 - a_{0初}) - (a_\infty - a_{\infty初})} \quad (1-4-3)$$

二、实验仪器和设备

实验仪器和设备如图 1-4-1 所示。

三、实验目的和要求

要求用所给实验仪器,设计一套测量二维机翼表面压力分布的实验装置和实验方案,画出实验装置图,并按照操作步骤进行实验。通过本实验,达到以下目的:

- (1) 掌握测定绕流物体表面压力分布的方法;
- (2) 测定二维机翼在不同冲角下的压力分布曲线;