



世纪高等教育规划教材

水力学实验

张志昌 编著 李建中 主审

SHUILIXUE SHIYAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TV131

2

21 世纪高等教育规划教材

水 力 学 实 验

张志昌 编著
李建中 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书是为水力学及工程流体力学实验课程编写的教材,全书共26章。第1章、第3章~第15章、第19章为基本水力学实验;第2章为水流现象演示实验,可以演示30余种水流现象;第16章~第18章、第20章和第21章为水流脉动压强、水流掺气浓度、管道水击及调压室水位波动、水流边界层和紊动射流实验;第22章、第23章和第24章为3个设计性实验,它们是管道不同组合形式的水流现象实验、消力池消能实验和射流冲击下游河床实验;第25章为水流参数测量的仪器设备,包括水位、流速、压强和流量测量等;第26章为实验的误差分析;附录是水力学常用数据表。

全书共有53个实验(包括演示实验)。除水流现象演示实验外,每个实验项目均包括有实验目的、实验原理、实验的仪器设备、实验的方法与步骤、数据处理和结果分析、注意的问题、思考题等内容。书中收集了边界层理论应用方面的最新研究成果,增设了设计性实验。

本书适用于高等院校的水利、水电、土建、环境、热能动力、海港、机械、化工等专业的师生,也可作为中等专科学校教师、学生以及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水力学实验/张志昌编著. —北京:机械工业出版社,2006.6

(21世纪高等教育规划教材)

ISBN 7-111-19106-4

I. 水... II. 张... III. 水力实验—高等学校—教材 IV. TV131

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第045724号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:刘涛 版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2006年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·6.75印张·260千字

0001—4000册

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379720

封面无防伪标均为盗版

前 言

水力学是以水为主要对象研究液体运动规律以及应用这些规律解决实际工程问题的科学，它是介于基础科学与工程技术之间的一门技术科学。在自然界中，与水流运动有关的水力学问题非常普遍，所以水利工程，给水排水工程，机械工程，环境工程，热能工程，化学工程，工程物理，港口、船舶与海洋工程等专业都将水力学作为必修课之一。

水力学实验在水力学学科的发展中占有重要的地位，是水力学课程中一个不可缺少的重要教学环节。通过实验可以使学生观察实际水流现象，增强感性认识；验证水力学的基本理论，帮助学生深化课堂教学内容，巩固理论知识和提高分析问题的能力；了解水力学学科的发展前沿，培养学生开拓、创新的能力；掌握水力要素测量和仪器使用的基本方法，了解现代测量技术的发展和运用，掌握一定的实验技能；培养学生分析实验数据、整理实验结果和编写实验报告的能力和严谨踏实的科学作风，为进一步从事科学研究以及开拓新技术领域奠定坚实的基础。

近年来，随着水力学学科和现代实验技术的不断发展，使得现代化实验仪器和实验方法不断改进，进一步促进了现代水力学的蓬勃发展。目前，用实验的方法研究工程中的实际问题仍然是水力学研究的主要方法，是检验与深化研究成果的重要手段。在有些学校，为了培养宽口径、厚基础、高素质、强能力的创造、创新、创业型复合人才，还单独开设了水力学实验课。

本书是在作者多年实验教学和科学研究的基础上编写的，全书共26章。第1章、第3章~第15章、第19章为基本水力学实验；第2

章为水流现象演示实验，可以演示 30 余种水流现象，第 16 章~第 18 章、第 20 章、第 21 章为水流脉动压强、水流掺气浓度（体积分数）、管道水击及调压室水位波动、水流边界层和紊动射流实验。第 22 章、第 23 章和第 24 章为三个设计性实验，它们是管道不同组合形式的水流现象实验、消力池消能实验和射流冲击下游河床实验；第 25 章为水流参数测量的仪器设备，包括水位、流速、压强和流量测量等；第 26 章为实验的误差分析；附录是水力学常用数据表。在编写过程中，收集了边界层理论应用方面的最新研究成果。为了培养学生的动手能力和创新能力，专门增设了设计性实验。

全书共有 53 个实验（包括演示实验）。除水流现象演示实验外，每个实验项目均包括有实验目的、实验原理、实验的仪器设备、实验的方法与步骤、数据处理和结果分析、注意事项、思考题等内容。

书中采用的实验教学仪器大多数是在作者多年从事实验教学的基础上研制的。大部分仪器实现了自循环、小型化、多功能和测量的自动化，使水力学实验体现了现代测量技术的发展与应用。

本书主要是为本科生的水力学实验而编写的，也适应于工程流体力学实验，既可配合水力学（工程流体力学）课程进度来安排实验环节，也可用于独立开设的水力学（工程流体力学）实验课。

本书由李建中教授审阅，作者在此表示感谢。全书插图由兀伟和李淳绘制，作者表示感谢。

由于水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳切欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 静水压强实验	1
1.1 实验目的和要求	1
1.2 实验原理	1
1.3 实验的仪器	2
1.4 实验的方法和步骤	3
1.5 数据处理和结果分析	3
1.6 实验中应注意的问题	4
思考题	4
第 2 章 壁挂式自循环流动演示实验	5
2.1 仪器简介和工作原理	5
2.2 安装使用说明	6
2.3 实验指导	7
第 3 章 能量方程实验	12
3.1 实验目的和要求	12
3.2 实验原理	12
3.3 实验的仪器和设备	13
3.4 实验的方法和步骤	14
3.5 数据处理与结果分析	14
3.6 实验中应注意的问题	16
思考题	16
第 4 章 动量方程实验	17
4.1 实验目的和要求	17
4.2 实验原理	17
4.3 实验装置和测量仪器	18
4.4 实验的方法和步骤	20
4.5 数据处理与结果分析	20
4.6 实验中应注意的问题	21
思考题	21
第 5 章 明渠流速分布实验	22
5.1 实验目的和要求	22
5.2 毕托管测流速的原理	22

5.3 实验的仪器和设备	23
5.4 实验的方法和步骤	23
5.5 数据处理和结果分析	24
5.6 实验中应注意的问题	25
思考题	25
第6章 文丘里流量系数测量实验	26
6.1 实验目的和要求	26
6.2 文丘里流量计的构造和测流原理	26
6.3 实验的仪器和设备	28
6.4 实验方法和步骤	28
6.5 数据处理和结果分析	29
6.6 实验中应注意的问题	30
思考题	30
第7章 孔板流量计流量系数实验	31
7.1 实验目的和要求	31
7.2 孔板流量计的构造、实验原理和取压位置	31
7.3 实验的装置和仪器	34
7.4 实验的方法和步骤	35
7.5 数据处理和结果分析	35
7.6 实验中应注意的问题	36
思考题	36
第8章 雷诺实验	37
8.1 实验目的和要求	37
8.2 实验的原理	37
8.3 实验的仪器和设备	39
8.4 实验的方法和步骤	39
8.5 数据处理和结果分析	40
8.6 实验中应注意的问题	41
思考题	41
第9章 沿程阻力系数实验	42
9.1 实验目的和要求	42
9.2 实验原理	42
9.3 实验的仪器和设备	44
9.4 实验的方法和步骤	44
9.5 数据处理和结果分析	45
9.6 实验中应注意的问题	46
思考题	46

第 10 章 局部阻力系数实验	47
10.1 实验目的和要求	47
10.2 实验原理	47
10.3 实验的仪器和设备	49
10.4 实验的方法和步骤	49
10.5 数据处理和结果分析	50
10.6 实验中应注意的问题	52
思考题	52
第 11 章 孔口和管嘴流量系数实验	53
11.1 实验目的和要求	53
11.2 实验原理	53
11.3 实验的仪器和设备	58
11.4 实验的方法和步骤	58
11.5 数据处理和结果分析	59
11.6 实验中应注意的问题	60
思考题	60
第 12 章 明槽水跃实验	61
12.1 实验目的和要求	61
12.2 实验原理	61
12.3 实验的仪器和设备	64
12.4 实验的方法和步骤	64
12.5 数据处理和结果分析	65
12.6 实验中应注意的问题	66
思考题	67
第 13 章 堰流流量系数实验和量水槽流量测定实验	68
13.1 堰流流量系数实验	68
思考题	72
13.2 量水槽流量测定实验	73
思考题	79
第 14 章 闸孔出流实验	80
14.1 实验目的和要求	80
14.2 实验原理	80
14.3 实验的仪器和设备	84
14.4 实验的方法和步骤	84
14.5 数据处理和结果分析	85
14.6 实验中应注意的问题	86
思考题	86
第 15 章 明渠水面曲线演示实验	87

15.1 实验目的和要求	87
15.2 实验原理	87
15.3 明渠水面曲线类型分析	88
15.4 实验的仪器和设备	92
15.5 实验的方法和步骤	93
15.6 数据处理和结果分析	94
15.7 实验中应注意的问题	94
思考题	95
第 16 章 水流脉动压强实验	96
16.1 实验目的和要求	96
16.2 实验原理	96
16.3 实验方法和测量仪器	98
16.4 脉动压强的分析方法	99
16.5 实验的方法和步骤	102
16.6 数据处理和结果分析	103
16.7 实验中应注意的问题	104
思考题	104
第 17 章 水流掺气浓度实验	105
17.1 实验目的和要求	105
17.2 水流掺气现象及分类	105
17.3 水流掺气对水工建筑物的影响	105
17.4 水流掺气发生的机理	106
17.5 水流掺气浓度	107
17.6 测量的仪器和设备	108
17.7 测量的方法和步骤	109
17.8 数据处理和结果分析	109
17.9 实验中应注意的问题	110
思考题	111
第 18 章 有压管道水击及调压室水位波动实验	112
18.1 实验目的和要求	112
18.2 水击压强及调压室水位波动现象	112
18.3 实验原理	113
18.4 实验的仪器和设备	117
18.5 实验的方法和步骤	117
18.6 数据处理和结果分析	118
18.7 实验中应注意的问题	119
思考题	119
第 19 章 渗流的电模拟实验	120

19.1 实验目的和要求	120
19.2 实验原理	120
19.3 实验的仪器和设备	121
19.4 实验的方法和步骤	122
19.5 数据处理和结果分析	123
19.6 实验中应注意的问题	124
思考题	124
第 20 章 边界层实验	125
20.1 实验目的和要求	125
20.2 实验原理	125
20.3 实验的仪器和设备	128
20.4 实验的方法和步骤	129
20.5 数据处理和结果分析	129
20.6 实验中应注意的问题	131
思考题	131
第 21 章 紊动射流实验	132
21.1 实验目的和要求	132
21.2 实验原理	132
21.3 实验的仪器和设备	134
21.4 实验的方法和步骤	135
21.5 数据处理和结果分析	135
21.6 实验中应注意的问题	137
思考题	137
第 22 章 设计性实验 1 管道水流实验	138
22.1 实验目的和要求	138
22.2 实验原理	138
22.3 实验仪器设备的组合形式	139
22.4 实验的方法和步骤	139
22.5 数据处理和结果分析	139
22.6 实验中应注意的问题	141
思考题	141
第 23 章 设计性实验 2 底流消力池实验	142
23.1 实验目的和要求	142
23.2 实验原理	142
23.3 算例	148
23.4 实验仪器设备的组合形式	150
23.5 实验的方法和步骤	150
23.6 数据处理和结果分析	151

23.7 实验中应注意的问题	152
思考题	152
第 24 章 设计性实验 3 挑流消能实验	153
24.1 实验目的和要求	153
24.2 实验原理	153
24.3 掺气分流墩新型挑流消能设施	155
24.4 实验装置和仪器	156
24.5 实验的方法和步骤	156
24.6 数据处理和结果分析	157
24.7 实验中应注意的问题	158
思考题	158
第 25 章 水流参数的测量	159
25.1 水位测量	159
25.2 流速的测量	163
25.3 压强测量	167
25.4 流量测量	172
第 26 章 实验误差分析	184
26.1 误差的基本概念	184
26.2 误差的来源和分类	185
26.3 随机误差的估计	186
26.4 系统误差及其消除	194
26.5 粗差的判别及剔除	194
26.6 间接测量误差的估计	195
附录	200
附表 1 水力学常用物理量的量纲及单位	200
附表 2 常用管壁材料的弹性模量 E 值	201
附表 3 不同温度下水的物理性质	201
附表 4 普通液体的物理性质	201
附表 5 不同温度下水的饱和蒸汽压强水头值 (绝对压强)	202
附表 6 水银的密度和重度	202
附表 7 不同温度下空气的物理性质	202
附表 8 气体的物理性质	203
附表 9 常见气体的参数 (经验公式)	203
附表 10 管壁当量粗糙度 Δ 值	203
参考文献	204

第 1 章

静水压强实验

1.1 实验目的和要求

(1) 掌握用测压管测量静水压强的方法, 通过对水静力学现象的实验分析, 加深理解水静力学方程的物理意义和几何意义, 提高解决实际问题的能力。

(2) 观察在重力作用下液体中任意点的位置水头 z 、压强水头 p/γ 和测压管水头 $z + p/\gamma$, 验证不可压缩流体静力学的基本方程。

(3) 测量当 $p_0 = p_a$ 、 $p_0 > p_a$ 和 $p_0 < p_a$ 时静水中某一点的压强, 分析各测压管水头的变化规律, 加深对绝对压强、相对压强、表面压强、真空压强和真空度的理解。

(4) 学习测量液体重度 γ^\ominus 的方法。

1.2 实验原理

在重力作用下, 处于静止状态下不可压缩的均质液体, 其基本方程为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = \dots = C \quad (1-1)$$

式中, z 为液体相对于基准面的位置高度或称位置水头; p/γ 为液体的压能水头或称压强水头; p 为静止液体中任意点的压强; γ 为水的重度; $z + p/\gamma$ 称为测压管水头。

方程 (1-1) 的物理意义是: 静止液体中任一点的单位质量位能和单位质量

⊖ GB3102.3—1993 没有列出重度 γ , 而是用“ ρg ”表示。水力学中还是沿用了“重度”这个量, 重度即重力除以体积。

压能之和为一常数，而 $z + p/\gamma$ 表示液体具有的总势能对应的水头，因此也可以说，在静止液体内部各点的液体的势能均相等。几何意义是：静止液体中任一点的位置高度和该点压强的液柱高度之和为一常数。

静水压强方程也可以写成

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-2)$$

式中， p_0 为作用在液体表面的压强； h 为由液面到液体中任一点的深度。

上式说明，在静止液体中，任一点的静水压强 p ，等于表面压强 p_0 加上该点在液面下的深度 h 与液体重度 γ 的乘积之和。表面压强遵守巴斯加原理，等值地传递到液体内部所有各点上，所以当表面压强 p_0 一定时，由式 (1-2) 可知，静止液体中某一点的静水压强 p 与该点在液面下的深度 h 成正比。

如果作用在液面上的是大气压强 p_a ，则式 (1-2) 可写为

$$p = p_a + \gamma h \quad (1-3)$$

上式说明当作用在液面上的压强为大气压强时，其静水压强等于大气压强 p_a 与液体重度 γ 和水深 h 乘积之和。这样所表示的一点压强叫做绝对压强（当液面上压强不等于大气压强时以 p_0 表示）。绝对压强是以没有气体存在的绝对真空为零来计算的压强；如果以当地大气压强为零来计算的压强称为相对压强，可以表示为

$$p = \gamma h \quad (1-4)$$

相对压强也叫表压强，所以表压强是以大气压强为基准算起的压强，它表示一点的静水压强超过大气压强的数值。

如果某点的静水压强小于大气压强，我们就说“这点具有真空”。其真空压强 p_v 的大小以标准大气压强和绝对压强之差来量度，即

$$p_v = \text{大气压强} - \text{绝对压强} \quad (1-5)$$

当某点发生真空时，其相对压强必然为负，故把真空又称为负压，真空度也就等于相对压强的绝对值。

1.3 实验的仪器

静水压强实验仪由盛水密闭（圆筒）容器、连通管、测压管、U形管、气门、调压筒和底座等组成，如图 1-1 所示。U形管中可以装入不同种类的液体，以测定不同种类液体的重度。

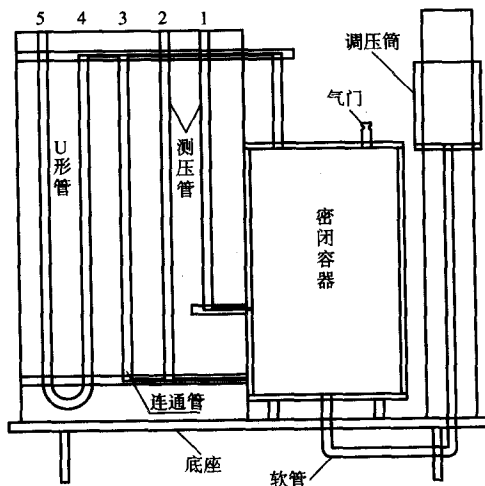


图 1-1 静水压强实验仪

1.4 实验的方法和步骤

(1) 在 U 形管中装入需要测量重度的液体，可以是油或者是其他液体。

(2) 了解仪器组成及其用法，包括加压方法、减压方法。检查仪器是否密封，检查的方法是关闭气门，在调压筒中盛以一定深度的水，将调压筒上升高于密闭圆筒容器，待水面稳定后，看调压筒中的水面是否下降，若下降，表明漏气，应查明原因加以处理。

(3) 记录仪器编号及各测压管编号，选定基准面，记录基准面到各测压点的高度。

(4) 打开密闭圆筒容器上的气门，使箱内液面压强 $p_0 = p_a$ ，记录 1、2、3、4、5 点测压管水面高度。

(5) 关闭气门，升高调压筒，使箱内液面压强 $p_0 > p_a$ ，待水面稳定后，观测 1、2、3、4、5 点测压管水面高度。

(6) 降低调压筒，使箱内液面压强 $p_0 < p_a$ ，待水面稳定后，观测 1、2、3、4、5 点测压管水面高度。

(7) 实验后将仪器恢复原状。

1.5 数据处理和结果分析

实验设备名称：

仪器编号：

同组学生姓名：

已知数据： $z_1 =$ cm； $z_2 = z_3 =$ cm

(1) 实验数据记录及计算结果

项 目	$\frac{p_1}{\gamma}$ /cm	$\frac{p_2}{\gamma}$ /cm	$\frac{p_3}{\gamma}$ /cm	$\frac{p_4}{\gamma}$ /cm	$\frac{p_5}{\gamma}$ /cm	Δh_1 /cm	Δh_2 /cm	$\frac{p_0}{\gamma}$ /cm	$z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ /cm	$z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ /cm	$\gamma_{油} / (\text{kN}/\text{m}^3)$
$p_0 = p_a$											
$p_0 > p_a$											
$p_0 < p_a$											
						指导教师签名			实验日期		

注： $\Delta h_1 = \frac{p_2 - p_3}{\gamma}$ ； $\Delta h_2 = \frac{p_5 - p_4}{\gamma}$

(2) 由表中计算的 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ 和 $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$, 验证静水压强方程。

(3) 由表中的 $\frac{p_0}{\gamma}$ 计算圆筒容器内水的表面压强, 即 $p_0 = \gamma \frac{p_0}{\gamma}$ 。

(4) 计算当 $p_0 > p_a$ 时 1 号和 2 号测点的绝对压强和 $p_0 < p_a$ 时容器内的真空度。

(5) 计算 U 形管中油的重度 $\gamma_{油}$ 。

设在 $p_0 > p_a$ 时, 2 号测压管和 3 号测压管的水面差为 Δh_1 , U 形测压管的水面差为 Δh_2 , 则

$$p_0 = \gamma \Delta h_1 = \gamma_{油} \Delta h_2$$

由上式可得

$$\gamma_{油} = \gamma \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$$

1.6 实验中应注意的问题

容器的密闭性能要保持良好状态, 实验时仪器底座要水平。

思 考 题

1. 表面压强 p_0 的改变, 对 1、2 两点的压强水头有什么影响? 对真空度有什么影响?
2. 相对压强与绝对压强、相对压强与真空度有什么关系?
3. U 形管中的压差 Δh 与液面压强 p_0 的变化有什么关系?
4. 如果在 U 形管中装上与密闭容器相同的水, 则当调压筒升高或降低时, U 形管中 Δh_2 的变化与 Δh_1 的变化是否相同?

第 2 章

壁挂式自循环流动演示实验

2.1 仪器简介和工作原理

壁挂式自循环流动演示仪由彩色有机玻璃面罩、不同边界的流动显示面、加水孔孔盖、掺气量调节阀、蓄水箱、可控硅无极调速旋钮、水泵室、日光灯、铝合金框架后盖和回水道组成，如图 2-1 所示。

该仪器以气泡为示踪介质，狭缝流道中设有特定的边界流场，用以显示不同边界条件下的内流、外流、射流元件等多种流动图谱。由图 2-1 可以看出，当工作液体（水）由水泵驱动到流动显示面，通过两边的回水流动流入蓄水箱时，水流中掺入了空气。空气的多少可以由掺气量调节阀调节。掺气后的水流再经水泵驱动到流动显示面时，形成了无数的小气泡随水流流动，在仪器内的日光灯照射和显示面底板的衬托下，小气泡发出明亮的折射光，清楚地显示出各种不同流场水流流动的图像。由于流动显示面设计成多种不同的形状边界，流动图像可以形象地显示出不同边界包括分离、尾流、漩涡等多种流动形态及其水流内部质点运动的特性。整套装置由 7 个独立的仪器组成，配以不同的流动显示面（图 2-2），分别称为 SL-1、SL-2、…、SL-7 流动显示仪。它们可以单独使用，也可以同时使用。

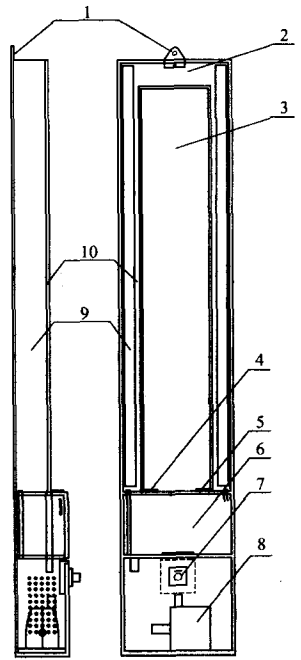


图 2-1 壁挂式自循环流动演示仪结构示意图

- 1—挂孔 2—彩色有机玻璃罩
- 3—流动显示面 4—加水孔孔盖
- 5—掺气量调节阀 6—蓄水箱
- 7—可控硅无极调速旋钮 8—水泵
- 9—灯管 10—回水道

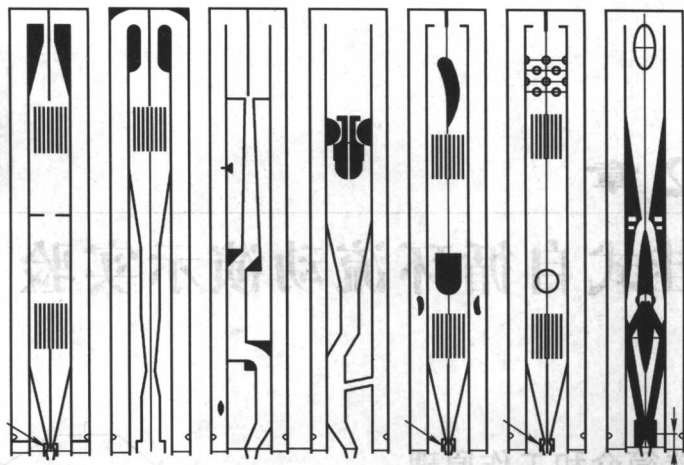


图 2-2 七种流动显示面过流道示意图

2.2 安装使用说明

流动显示仪安装使用说明和注意事项如下：

1. 安装高度

挂孔应离地 235cm 左右，中到中的间隔约为 37cm。

2. 壁挂要求

仪器背距离墙壁 1~2cm，各仪器之间分开约 5~10cm，以便通风散热。

3. 仪器检查

(1) 通电检查。未加水前插上 220V 电源，顺时针打开无级调速开关旋钮，水泵起动，日光灯亮；继而顺时针转动旋钮，则水泵减速，但日光灯不影响。最后，逆时针转动旋钮复原至关机前临界位置，水泵转速最快。

(2) 加水检查。拔开孔盖，用漏斗或虹吸法向水箱内加水。水质可以是蒸馏水或冷开水，可使水质长期不变。其水量以水位升至窗口（左侧面）中间处为宜。并检查有无漏水，若有漏，应关机补漏后再重新起动。

4. 使用方法

(1) 起动。打开旋钮，关闭掺气阀，在最大流速下使显示面两侧回水流动充满水。

(2) 掺气量调节。旋转掺气调节阀可改变掺气量，注意有滞后性。调节阀应缓慢调节，使之达到最佳显示效果。掺气量不宜太大，否则会阻断水流或产生振动。