

LIXINBENG YINGYONGJISHU

离心泵 应用技术

吴德明 主 编
蔡振东 副主编

中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

离心泵应用技术

吴德明 主 编
蔡振东 副主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了泵和水力学的基本知识,泵的汽蚀与防止,泵的运行与调节,泵和原动机的选型,泵的安装、使用及维修,泵的相关试验等内容。

本书可供离心泵使用、维护及设计人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

离心泵应用技术/吴德明主编. —北京:中国石化出版社, 2013. 3
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1847 - 0

I. ①离… II. ①吴… III. ①离心泵 IV. ①TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 036961 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 334 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

前 言

泵作为通用机械产品，广泛地应用在各行各业，如动力发电、石油化工、冶金、采矿、城市给排水、农业排灌等。上至航空航天，下到日常生活，处处都离不开泵。泵的研发和生产也发展迅速，据不完全统计，目前全国有大小泵厂数千家之多。在使用中，泵消耗着大量的动力和电力资源。为普及泵的基本知识，尤其是泵的实际应用技术，力求实际应用中，正确选型，合理安装使用，及时维护检修，使泵在规定范围内运转，节约能源，延长泵的使用寿命，避免安全事故，编者结合数十年“泵”教学与研究及使用工作经验，编写了《离心泵应用技术》一书，以飨读者。

本书侧重于泵实际使用中的问题，根据作者的研究及使用实际经验给予系统全面的说明。前四章阐述了关于泵和水力学的基本知识；后四章全面系统地介绍了从泵选型到安装、使用、故障排除、维修测试等使用者必须具备的实用知识，并且结合实际案例给予说明。叙述中力求深入浅出，文字通俗易懂。

本书适用范围广，泵使用单位的管理人员、采购人员、操作维修人员；泵生产单位的销售人员、售后服务人员；设计院泵的设计人员（如给排水等）及大专院校相关专业师生均可从中受益。

本书由吴德明主编并统稿，参加编写的有吴德明（第一、二、五、七章），蔡振东（第三、四、八章），史仲光（第六章），张孝风参加了部分章节的编写，浙江工业大学牟介刚教授对全书进行了审读。

在编写过程中，张洪波、陈玉珍、陈荣彬帮助打印整理书稿等，做了大量工作，在此表示感谢。

本书在成稿过程中，吸收、引用了大量文献资料，其出处未能一一列出，在此对著作人表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，实践经验尚需不断积累，搜索资料的深度和广度仍需完善，书中存在的缺点和可争论之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 水力学与流体力学基础知识	(1)
第一节 流体的主要力学性质	(1)
第二节 流体静力学	(7)
第三节 流体动力学	(9)
第四节 动量方程与动量矩方程	(11)
第五节 流动阻力和能量损失	(11)
第二章 离心泵的基础知识	(34)
第一节 泵的分类及型号	(34)
第二节 离心泵的几种常用结构	(39)
第三节 离心泵的工作原理	(45)
第四节 泵的主要性能参数	(46)
第五节 液体在叶轮中的运动及能量方程	(49)
第六节 泵内的损失与效率	(51)
第七节 泵的性能曲线	(56)
第八节 泵的相似定律及比转数 n_s	(62)
第九节 影响泵性能的因素	(66)
第十节 离心泵中的径向力、轴向力及其平衡	(67)
第三章 泵的汽蚀与防止	(73)
第一节 泵的汽蚀现象	(73)
第二节 泵的汽蚀余量 $NPSH$	(74)
第三节 吸上真空高度 H_s	(75)
第四节 汽蚀的防止	(77)
第五节 提高汽蚀性能的方法	(78)
第四章 泵的运行与调节	(79)
第一节 装置扬程特性曲线及工作点	(79)
第二节 泵的串联工作	(80)
第三节 泵的并联工作	(81)
第四节 泵运行工况的调节	(83)
第五节 泵运行中的振动和噪声	(88)
第五章 泵和原动机的选型	(90)
第一节 选型原则	(90)
第二节 选型步骤	(90)
第三节 泵的性能参数确定	(91)
第四节 泵的型式选择	(95)

第五节	泵型号的确	(97)
第六节	泵材料的选用	(97)
第七节	泵的轴封选择与使用	(102)
第八节	泵的轴承、轴承部件的选择与使用	(112)
第九节	泵传动装置的选择与使用	(122)
第十节	泵的原动机选择	(132)
第六章	泵的安装	(140)
第一节	泵的安装位置	(140)
第二节	泵机组安装	(143)
第三节	管路安装	(144)
第七章	泵的使用及维修	(148)
第一节	泵的使用	(148)
第二节	泵的故障及分析排除方法	(149)
第三节	泵的故障分析及排除实例	(154)
第四节	泵为维护修理	(159)
第五节	泵叶轮和泵体的测绘	(160)
第八章	泵试验	(168)
第一节	泵试验的目的和采用的标准	(168)
第二节	泵试验种类和方法	(168)
第三节	泵的试验装置	(176)
第四节	测量仪表	(180)
第五节	泵的振动测量与评价	(193)
第六节	泵的噪声测量与评价	(201)
参考文献		(207)

第一章 水力学与流体力学基础知识

第一节 流体的主要力学性质

一、密度 ρ

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，以 ρ 表示。水的密度见表 1-1 及表 1-2。

对均质流体：
$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

M ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

二、重度 γ

单位体积流体所具有的重量称为流体的重度，以 γ 表示。

对均质流体：
$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度， N/m^3 （工程制 kgf/m^3 ）；

G ——流体的重量， N （工程制 kgf ）；

V ——流体的体积， m^3 。

密度和重度的关系：因为重量是质量和重力加速度的乘积，即：

$$G = Mg$$

代入式 (1-2)：

$$\gamma = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度， m/s^2 ， $g = 9.807 \text{m}/\text{s}^2$ 。

对于 4°C 左右的水，它的密度 $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ ，它的重度 $\gamma = 9807 \text{N}/\text{m}^3$ （工程制： $1000 \text{kgf}/\text{m}^3$ ）。

三、流体的压缩性和热胀性

1. 流体的压缩性

流体受压，体积缩小，密度增大的性质，称为流体的压缩性。流体随压力的增减变化很小，可视为不变，称为不可压缩流体，如液体为不可压缩流体。而气体的体积、密度随压力增减有显著的变化，称可压缩流体。

2. 流体的热胀性

流体受热后，体积膨胀，密度减小的性质，称为流体的热胀性。

表 1-1 一个标准气压下 1~99℃水的性质

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]
1	999.9	0.0067	17.32	37	993.3	0.0639	6.97
2	999.9	0.0072	16.74	38	993.0	0.0675	6.83
3	1000.0	0.0077	16.19	39	992.6	0.0712	6.71
4	1000.0	0.0083	15.68	40	992.2	0.0752	6.59
5	1000.0	0.0089	15.20	41	991.8	0.0793	6.46
6	999.9	0.0095	14.74	42	991.4	0.0836	6.35
7	999.9	0.0102	14.30	43	991.0	0.0880	6.24
8	999.8	0.0109	13.88	44	990.6	0.0928	6.13
9	999.8	0.0117	13.48	45	990.2	0.0977	6.02
10	999.7	0.0125	13.10	46	989.8	0.1023	5.92
11	999.6	0.0134	12.74	47	989.4	0.1082	5.83
12	999.5	0.0143	12.40	48	988.9	0.1138	5.73
13	999.4	0.0152	12.07	49	988.5	0.1196	5.64
14	999.3	0.0163	11.76	50	988.0	0.1257	5.56
15	999.1	0.0174	11.46	51	987.6	0.1321	5.47
16	998.9	0.0185	11.17	52	987.1	0.1388	5.39
17	998.8	0.0197	10.89	53	986.7	0.1457	5.31
18	998.6	0.0210	10.62	54	986.2	0.1529	5.23
19	998.4	0.0224	10.36	55	985.7	0.1605	5.15
20	998.2	0.0238	10.11	56	985.2	0.1683	5.07
21	998.0	0.0253	9.87	57	984.7	0.1765	4.99
22	997.8	0.0269	9.63	58	984.2	0.1850	4.92
23	997.6	0.0286	9.40	59	983.7	0.1939	4.85
24	997.3	0.0304	9.18	60	983.2	0.2031	4.78
25	997.0	0.0323	8.97	61	982.7	0.2127	4.71
26	996.8	0.0342	8.77	62	982.2	0.2227	4.64
27	996.5	0.0363	8.58	63	981.6	0.2330	4.58
28	996.2	0.0385	8.39	64	981.1	0.2488	4.52
29	995.9	0.0408	8.21	65	980.6	0.2550	4.46
30	995.6	0.0432	8.04	66	980.0	0.2666	4.40
31	995.3	0.0458	7.87	67	979.5	0.2787	4.34
32	995.0	0.0484	7.70	68	978.9	0.2912	4.28
33	994.7	0.0512	7.55	69	978.4	0.3042	4.22
34	994.4	0.0542	7.39	70	977.8	0.3177	4.16
35	994.0	0.0573	7.25	71	977.2	0.3317	4.11
36	993.7	0.0605	7.10	72	976.6	0.3463	4.06

续表

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]
73	976.0	0.3613	4.01	87	967.3	0.6372	3.39
74	975.5	0.3769	3.96	88	966.7	0.6623	3.35
75	974.9	0.3931	3.91	89	966.0	0.6882	3.31
76	974.3	0.4098	3.86	90	965.3	0.7149	3.27
77	973.7	0.4272	3.81	91	964.6	0.7425	3.23
78	973.0	0.4451	3.76	92	964.0	0.7710	3.20
79	972.4	0.4637	3.71	93	963.3	0.8004	3.17
80	971.8	0.4829	3.67	94	926.6	0.8307	3.14
81	971.2	0.5028	3.63	95	961.9	0.8619	3.11
82	970.5	0.5234	3.59	96	961.2	0.8942	3.08
83	969.9	0.5447	3.55	97	960.5	0.9274	3.05
84	969.3	0.5667	3.51	98	959.8	0.9616	3.02
85	968.6	0.5894	3.47	99	959.1	0.9969	2.99
86	968.0	0.6129	3.43				

表 1-2 饱和状态下 100 ~ 374.15℃ 水的性质

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]
100	958.1	1.0332	2.9116	120	942.9	2.0246	2.4386
101	957.4	1.0707		121	942.1	2.0896	
102	956.7	1.1092		122	941.2	2.1562	
103	955.9	1.1489		123	940.4	2.2246	
104	955.2	1.1898		124	939.4	2.2948	
105	954.7	1.2318	2.7764	125	938.8	2.3667	2.3446
106	953.8	1.2751		126	937.9	2.4405	
107	952.9	1.3196		127	937.1	2.5162	
108	952.2	1.3654		128	936.2	2.5937	
109	951.5	1.4125		129	935.4	2.6732	
110	950.6	1.4609	2.6535	130	934.6	2.7546	2.2583
111	950	1.5107		131	933.7	2.8380	
112	949.1	1.5618		132	932.8	2.9235	
113	948.3	1.6144		133	932	3.0110	
114	947.6	1.6684		134	931.1	3.1010	
115	946.8	1.7239	2.5413	135	930.2	3.192	2.1789
116	946.1	1.7809		136	929.4	3.286	
117	945.3	1.8395		137	928.5	3.388	
118	944.4	1.8996		138	927.6	3.481	
119	943.7	1.9613		139	926.8	3.582	

续表

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]
140	925.8	3.685	2.1056	175	892.1	9.100	1.7236
141	925	3.791		176	891.1	9.317	
142	924.1	3.898		177	890.1	9.538	
143	923.2	4.009		178	889	9.762	
144	922.3	4.122		179	888	9.991	
145	921.4	4.237	2.0378	180	886.9	10.224	1.6832
146	920.5	4.355		181	885.8	10.462	
147	919.5	4.476		182	884.8	10.703	
148	918.6	4.599		183	883.7	10.949	
149	917.7	4.725		184	882.6	11.00	
150	916.8	4.854	1.9753	185	881.5	11.455	1.6458
151	915.8	4.985		186	880.4	11.714	
152	914.9	5.120		187	879.4	11.978	
153	914	5.257		188	878.3	12.247	
154	913	5.397		189	877.1	12.521	
155	912.1	5.540	1.9172	190	876	12.799	1.6107
156	911.1	5.687		191	874.9	13.082	
157	910.2	5.836		192	873.8	13.370	
158	909.2	5.988		193	872.7	13.662	
159	908.2	6.144		194	871.5	13.960	
160	907.3	6.303	1.8633	195	870.4	14.263	1.5781
161	906.3	6.464		196	869.3	14.571	
162	905.3	6.630		197	868.1	14.884	
163	904.3	6.798		198	867	15.203	
164	903.3	6.970		199	865.8	15.526	
165	902.4	7.146	1.8133	200	864.7	15.855	1.5477
166	901.3	7.325		201	863.5	16.190	
167	900.3	7.507		202	862.4	16.530	
168	899.4	7.693		203	861.2	16.875	
169	898.4	7.883		204	860	17.226	
170	897.2	8.076	1.7669	205	858.8	17.583	1.5193
171	896.3	8.274		206	857.6	17.945	
172	895.3	8.474		207	856.5	18.314	
173	894.2	8.679		208	855.2	18.688	
174	893.2	8.888		209	854	19.068	

续表

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$]
210	852.8	19.454	1.4928	245	806.5	37.243	1.3533
211	851.6	19.846		246	805	37.889	
212	850.3	20.244		247	803.6	38.544	
213	849.1	20.648		248	802.1	39.207	
214	847.9	21.058		249	800.6	39.879	
215	846.7	21.475	1.4681	250	799.2	40.560	1.3391
216	845.4	21.898		251	797.7	41.250	
217	844.2	22.328		252	796.2	41.949	
218	842.9	22.764		253	794.7	42.656	
219	841.6	23.206		253	793.1	43.373	
220	840.3	23.656	1.4453	255	791.6	44.099	1.3262
221	839.1	24.112		256	790.1	44.834	
222	837.8	24.574		257	788.6	45.579	
223	836.5	25.044		258	787	46.332	
224	835.2	25.520		259	785.5	47.096	
225	833.9	26.044	1.4240	260	784	47.869	1.3144
226	832.6	26.494		261	782.4	48.652	
227	831.3	26.992		262	780.8	49.444	
228	830.1	27.496		263	779.2	50.246	
229	828.7	28.008		264	777.5	51.058	
230	827.3	28.528	1.4041	265	776	51.880	1.3039
231	825.3	29.054		266	774.4	52.713	
232	824.7	29.588		267	772.7	53.555	
233	823.2	30.130		268	771.1	54.407	
234	821.9	30.679		269	769.4	55.270	
235	820.5	31.236	1.3858	270	767.8	56.144	1.2947
236	819.2	31.801		271	766.1	57.027	
237	817.8	32.373		272	764.4	57.922	
238	816.7	32.954		273	762.7	58.827	
239	815	33.542		274	761	59.742	
240	813.6	34.138	1.3689	275	759.3	60.669	1.2866
241	812.1	34.743		276	757.6	61.607	
242	810.8	35.355		277	755.8	62.555	
243	809.4	35.976		278	754.1	63.515	
244	808	36.606		279	752.3	64.486	

续表

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m^3)	饱和蒸气压/ (kgf/cm^2)	运动黏度 ν / [$10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$]
280	65.468	750.5	1.2798	315	679.1	107.69	1.2525
281	748.7	66.461		316	676.7	109.15	
282	746.9	67.466		317	674.3	110.62	
283	745.2	68.482		318	671.8	112.10	
284	743.3	69.511		319	669.4	113.60	
285	741.6	70.650	1.2742	320	666.9	115.12	1.2446
286	739.6	71.602		321	664.4	116.65	
287	737.8	72.666		322	661.9	118.20	
288	735.9	73.741		323	659.3	119.76	
289	734	74.829		324	656.7	121.34	
290	732.1	75.929	1.2698	325	654.1	122.93	
291	730.2	77.041		326	651.4	124.55	
292	728.2	78.166		327	648.7	126.17	
293	726.3	79.303		328	646	127.82	
294	724.3	80.452		329	643.2	129.48	
295	722.3	81.615	1.2669	330	640.4	131.16	1.2398
296	720.4	82.790		331	637.6	132.86	
297	718.3	83.978		332	634.7	134.57	
298	716.3	85.179		333	631.8	136.30	
299	714.3	86.394		334	628.9	138.05	
300	712.2	87.621	1.2653	335	625.9	139.82	
301	710.1	88.862		336	622.9	141.61	
302	708.1	90.116		337	619.8	143.41	
303	705.9	91.384		338	616.6	145.23	
304	703.8	92.665		339	613.5	147.07	
305	701.7	93.960		340	610.2	148.93	1.2356
306	699.5	95.289		341	606.9	150.81	
307	697.3	96.592		342	603.3	152.71	
308	695.1	97.929		343	600.2	154.63	
309	692.9	99.281		344	596.7	156.56	
310	690.6	100.646	1.2525	345	593.2	158.52	
311	688.4	102.03		346	589.6	160.50	
312	686.1	103.42		347	585.9	162.49	
313	683.8	104.83		348	582.1	164.51	
314	681.4	106.25		349	578.3	166.55	

续表

温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]	温 度/ ℃	密度 ρ / (kg/m ³)	饱和蒸汽压/ (kgf/cm ²)	运动黏度 ν / [10 ⁻⁷ (m ² /s)]
350	574. 3	168. 61	1. 2344	363	509. 5	197. 44	1. 23
351	570. 4	170. 69		364	503	199. 82	
352	566. 7	172. 80		365	496	202. 24	
353	561. 9	174. 92		366	488. 7	204. 67	
354	557. 5	177. 07		367	480. 7	207. 14	
355	552. 9	179. 24		368	472	209. 63	
356	548. 2	181. 43		369	462. 6	212. 15	1. 2
357	543. 3	183. 65		370	451. 8	214. 69	
358	538. 2	185. 88		371	439	217. 27	
359	533	188. 15		372	423. 1	219. 87	
360	527. 5	190. 43	1. 23	373	400. 6	222. 60	
361	521. 7	192. 74		374	351. 8	225. 16	
362	515. 8	195. 08		374. 16	351. 5	225. 56	

四、流体的黏滞性

流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力（内力）以反抗相对运动的性质，称为黏滞性。此内摩擦力称为黏滞力。表示流体黏滞性程度大小的量，是动力黏性系数 μ 和运动黏性系数 ν 。

1. 动力黏性系数 μ

表征流体内摩擦力与流体性质有关的系数，称动力黏性系数或称动力黏度，简称黏度。它与流体的种类有关。 μ 值愈大，表示流体的黏滞性（黏度）愈大。同一类流体的 μ 值随温度的变化而变化，随着液体的温度升高 μ 值降低。

μ 的单位泊（P），1 泊 = 10⁻¹ Pa · s。

2. 运动黏性系数 ν

流体动力黏性系数 μ 与密度 ρ 的比值 ν 称流体运动黏性系数或称运动黏度，工程计算中常用到运动黏性系数。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν 的单位斯托克斯（St）或称斯。1St = 1cm²/s。

表 1-1、表 1-2 中表示了水在不同温度下的运动黏性系数 ν 的值。

第二节 流 体 静 力 学

一、流体静压强

静止液体内部水静压强，如图 1-1 所示。

$$p = p_0 + p' = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h \quad (1-4)$$

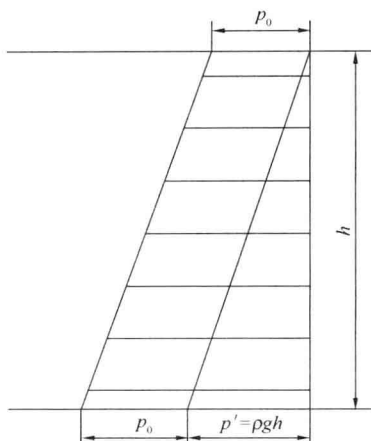


图 1-1 压力分布图

式中 p ——静止流体内任何一点处静水压强；

p_0 ——自由表面上流体静压强；

ρ ——液体的密度；

g ——重力加速度；

h ——该点的淹没深度；

γ ——流体的重度。

从式 (1-4) 可以得出，液体内部任一点的静压强 p 与液面压强 p_0 有关，和该点在液面下的深度有关，并且与液体的重度 γ 有关。

二、压强的计算基准

压强有两种计算基准，绝对压强和相对压强，如图 1-2 所示。

绝对压强：以毫无一点气体存在的绝对真空为零点起算的压强，称为绝对压强。以 p_s 表示。

相对压强：以当地同高程的大气压强 p_b 为零点起算的压强，称为相对压强。以 p 表示。采用相对压强基准，则大气压强的相对压强为零。

相对压强，绝对压强和大气压强的关系如下式

$$p = p_s - p_b \quad (1-5)$$

某一点的绝对压强只能是正值。但是某一点的相对压强可能是大于大气压强，也可能小于大气压强，因此，相对压强可正可负。当相对压强为正值时，称为表压，或计示压力。当相对压强为负值时称为负压。负压的绝对值称为真空度，即为大气压力不足的部分。

三、压强的量度单位

压强有三种量度单位。

(1) 从压强的基本定义出发，单位面积上的力，即：

$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ：国际单位称帕斯卡

kgf/cm^2 ：工程单位称工程大气压

(2) 用液柱高度来表示，常用水柱高度或汞柱高度来表示，其单位为 mH_2O ， mmH_2O ，或 mmHg 。

从式 (1-4) $p = p_0 + \rho gh$ 计算液体的相对压强时 $p_0 = p_b = 0$ ，则有

$$p = \rho gh = \gamma h \quad (1-6)$$

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho g} \quad (1-7)$$

对一个标准大气压相应的水柱高度为

$$h = \frac{p_b}{\gamma_w} = \frac{101325 \text{ N/m}^2}{9807 \text{ N/m}^3} = 10.33 \text{ m}$$

相应的汞柱高度为

$$h = \frac{p_b}{\gamma_H} = \frac{101325 \text{ N/m}^2}{133375 \text{ N/m}^3} = 0.76 \text{ m} = 760 \text{ mm}$$

对一个工程大气压相应的水柱高度为

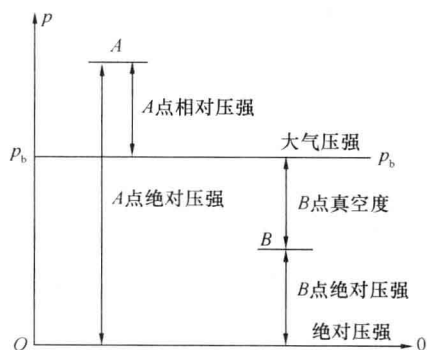


图 1-2 压强的图示

$$h = \frac{10000 \text{ kgf/m}^2}{1000 \text{ kgf/m}^3} = 10 \text{ m}$$

(3) 用大气压的倍数来表示，国际上规定标准大气压用 atm 表示。温度为 0℃ 时海平面上的压强（即 760mmHg）为 101.325kPa 即 1atm = 101.325kPa。工程单位中规定工程大气压用 at 表示，即 1at = 1kgf/cm² = 10mH₂O。表 1-3 表示了各种压强单位的换算关系。

表 1-3 各种压强单位换算关系

压强名称	Pa (N/m ²)	bar (10 ⁵ N/m ²)	mmH ₂ O (kgf/m ²)	at (10 ⁴ kgf/m ²)	标准大气压/ (1.0332 × 10 ⁴ kgf/m ²)	mmHg
换算关系	9.807	9.807 × 10 ⁻⁵	1	10 ⁻⁴	9.678 × 10 ⁻⁵	0.07356
	9.807 × 10 ⁴	9.807 × 10 ⁻¹	10 ⁴	1	9.678 × 10 ⁻¹	735.6
	101325	1.01325	10332.5	1.03335	1	760
	133.332	1.3333 × 10 ⁻³	13.595	1.3595 × 10 ⁻³	1.316 × 10 ⁻³	1

第三节 流体力学

一、流速

1. 流速

流体质点在单位时间内流过的位移，称为流速 v

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-8)$$

式中 v ——流体的流速，m/s；

Δs ——流体质点的位移，m；

Δt ——流体质点位移 Δs 所经过的时间，s。

2. 平均流速

在某一断面上，流速的平均值称平均流速 v_{cp} ，工程计算上常用的是平均流速。对于流体的流速、流量和过流断面面积的关系，用以下公式表示。

对于质量流量 q ，可用下式表示：

$$\begin{aligned} q &= \rho F v_{cp} \\ v_{cp} &= \frac{q}{\rho F} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 q ——质量流量，kg/s；

ρ ——流体的密度，kg/m³；

F ——过流断面面积，m²；

v_{cp} ——平均流速，m/s。

对于重量流量 G ，可用下式表示：

$$v_{cp} = \frac{G}{\gamma F} \quad (1-10)$$

式中 G ——重量流量，N/s 或 kgf/s；

γ ——流体的重度，N/m³ 或 kgf/m³。

当液体流动时，温度和压力不变的情况下，其密度 ρ 和重度 γ 是不变的，所以可以用体积流量来表示：

$$v_{cp} = \frac{Q}{F} \quad (1-11)$$

式中 Q ——体积流量， m^3/s 。

二、流体连续性方程

由图 1-3 所示，在管道中，流体由 1-1 断面流入，2-2 断面流出。根据质量守恒定理，同一时间内流入的质量应该等于流出的质量。

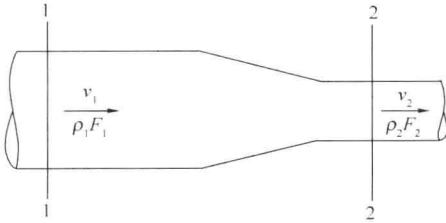


图 1-3

$$M = \rho_1 v_1 F_1 = \rho_2 v_2 F_2 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 就是可压缩流体的连续性方程。

如果流体的密度 ρ 为常数时，即不可压缩流体， $\rho_1 = \rho_2$

$$v_1 F_1 = v_2 F_2 \quad (1-13)$$

式 (1-13) 为不可压缩流体的连续性方程。

三、流体能量守恒定理 - 柏努利方程

如图 1-4 所示，假设一股液流，从管道的 1-1 断面流入，经过 2-2 断面流出。若以 0-0 为基准线，则在 1-1 断面处：位置高度为 Z_1 ，平均流速为 v_1 ，压强为 p_1 ；2-2 断面处：位置高度为 Z_2 ，平均流速为 v_2 ，压强为 p_2 ，并且假设为理想流体，流体流动过程中没有摩擦力的作用，并为恒定流动，根据能量守恒的原理，就有下式：

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = c \quad (1-14)$$

式中 Z_1 、 Z_2 ——断面 1-1 和 2-2 的位置水头，m；

$\frac{p_1}{\rho g}$ 、 $\frac{p_2}{\rho g}$ ——断面 1-1 和 2-2 的压强水头，m；

$\frac{v_1^2}{2g}$ 、 $\frac{v_2^2}{2g}$ ——断面 1-1 和 2-2 的单位重量液体所具有的速度水头，m。

这就是理想流体的柏努利方程，其几何意义是单位重量的液体在流动中，其位置水头 Z ，压强水头 $\frac{p}{\rho g}$ 及速度水头 $\frac{v^2}{2g}$ 三者之和为一常数。并且三者在流动过程中是可以互相转换的。

但实际流体是有黏性的，液体在流动过程中流体之间有内摩擦阻力，流体与固体壁面之间也有摩擦力，这种摩擦力将会引起水头阻力损失，设为 h_{w1-2} 。则式 (1-14) 可写成：

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1-15)$$

这就是实际流体的柏努利方程。

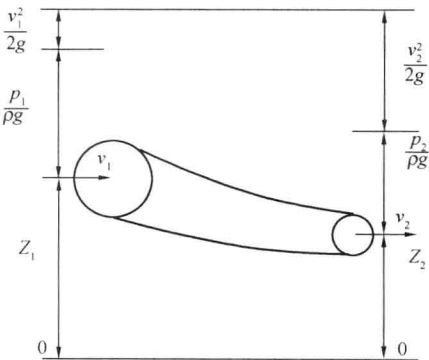


图 1-4 能量方程的图示

第四节 动量方程与动量矩方程

一、动量方程

一元定常流动的动量定律：单位时间内流出控制面（边界面）（如图 1-5 中的 ABCD）与流入控制面流体的动量之差，等于控制面内流体所受外力之向量和。动量方程为：

$$\rho Q (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \Sigma \vec{F} \quad (1-16)$$

式中 ρ ——流体的密度；

Q ——流过断面上的流量；

$\vec{v}_1, \vec{v}_2$ ——断面 1, 2 上的平均流速；

$\Sigma \vec{F}$ ——作用在流体上外力的向量和。

作用在流体上的外力包括流体的质量力，固体作用在流体上的力及控制面外的流体作用在控制面边界处流体的力。

二、动量矩方程

一元定常流体的动量矩定律：单位时间内流出控制面流体的动量对任一定点 O 之矩与流入控制面流体的动量对同一定点 O 之矩的差，等于控制面中的流体所受外力对于 O 点之矩的向量和。

动量矩方程式为：

$$\rho Q (\vec{r}_2 \times \vec{v}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{v}_1) = \Sigma M_O (\vec{F}) \quad (1-17)$$

式中 $\vec{r}$ ——从任一点 O 到断面形心处的矢量半径；

$\vec{r} \times \vec{v}$ ——矢量 $\vec{r}$ 与矢量 $\vec{v}$ 的积；

$M_O (\vec{F})$ ——外力 $\vec{F}$ 对 O 点之矩。

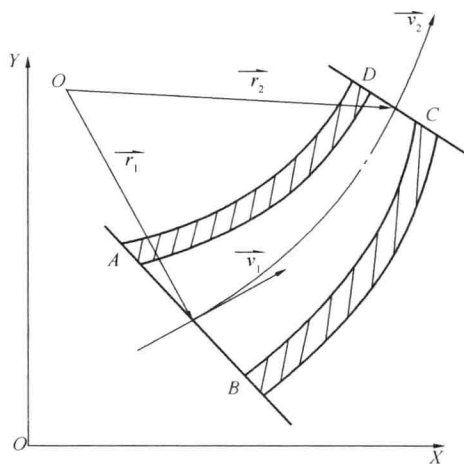


图 1-5 动量图

第五节 流动阻力和能量损失

一、流动阻力分类

实际流体在流动过程中，因黏滞力的作用，流体之间，流体与固体壁面之间有摩擦力及固壁对流体扰动作用，将会引起能量损失。阻力损失可分为两类，一类是沿程阻力损失 h_f ；另一类是局部阻力损失 h_j 。总的损失应是两者之和： $h_w = \Sigma h_f + \Sigma h_j$ 。

1. 沿程阻力损失 h_f

它是沿流动路程上，由于各流体层之间内摩擦力及流体与固体壁面之间的摩擦力而产生的流动阻力损失。在层流状态下，沿程阻力完全是由黏性摩擦产生的。在紊流状态下，沿程阻力一部分是由附面层内的黏性摩擦产生的，另外是由流体微团的迁移和脉动所造成的。

2. 局部阻力损失 h_j

它是由于流体通过局部障碍时（如阀门、弯头、管道的突然扩大或缩小等），干扰了液