

TK/00-2

# 压缩空气站 设计手册

《压缩空气站设计手册》编写组 编

机械工业出版社

# 压缩空气站设计手册

《压缩空气站设计手册》编写组 编



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本手册是一本较为实用的压缩空气站设计工具书,全书共分十二章。内容包括空气的性质,空气压缩机及其辅助设备,压缩空气的干燥净化及设备,压缩空气站工艺设计,对有关专业的设计要求,热工测量仪表和自动控制,压缩空气管道的设计,压缩空气站的安全、环保和节能,压缩空气站设计实例及投资概算等。

本手册供从事压缩空气站工艺设计的专业人员使用,亦可供运行操作人员 and 施工安装人员参考。

**图书在版编目(CIP)数据**

压缩空气站设计手册/《压缩空气站设计手册》编写组  
编。—北京:机械工业出版社,1993.12  
ISBN 7-111-03936-X

I. 压…

II. 压…

III. 压缩空气站-设计-手册

IV. TK05-62

出版人 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:兰伏金

封面设计:郭景云

北京昌平环球印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1993年12月第1版·1993年12月第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·41<sup>1/2</sup>印张·3插页·1020千字·

0 001—1 500册

定价:49.00元

## 《压缩空气站设计手册》编写组

**主 编** 徐 明 机械部第八设计研究院

**副主编** 冯根发 机械部第七设计研究院

徐振国 机械部第三设计研究院

### 编写人

机械部第八设计研究院

彭 恒 (第一章、第十章)

王选和 (第二章、第十章)

欧阳晨星 (第三章)

徐 明 (第七章)

王 忠 (第八章)

朱依群 (第十一章)

机械部第七设计研究院

冯根发 (第六章)

电子部第十设计研究院

陈霖新、章光护、陈灿棠、张建虎 (第四章、第五章)

机械部第四设计研究院

奚伟伦 (第九章)

航空工业规划设计研究院

谢玉兰 (第十二章)

### 特约审稿人

王振邦 (航空工业规划设计研究院)

杨启钧、沙长海 (机械部设计研究院)

陈既贵 (机械部中电设计研究院)

章光护 (机电部第十设计研究院)

曾 安 (机械部第八设计研究院)

## 前 言

随着国民经济的发展和技术水平的提高,压缩空气在生产上得到日益广泛的应用,对压缩空气的品质要求也越来越高。为配合新发布的压缩空气站设计规范,使压缩空气站的设计做到安全可靠,既经济合理,又便于操作管理,机械工业动力科技情报网专门组织了多年从事压缩空气站设计工作,且参加《压缩空气站规范》编写、修订的一些同志,编写了这本《压缩空气站设计手册》。

本手册在内容上除了介绍压缩空气站设计所需的资料、数据以外,还着重对安全、环保、节能及空气的干燥净化等方面作了较为详细的介绍。手册还收编了近年来设计、投运的各种类型的压缩空气站实例,在设计中颇有参考价值。在保证充实、丰富的内容基础上,为减少篇幅,编写过程中采用了大量图表。内容新颖、实用性强。

本手册主要供从事压缩空气站工艺设计的专业人员、运行操作人员和施工安装人员使用和参考。

本手册的编写工作得到下列生产厂家的大力支持和帮助,特在此表示感谢。

柳州第二空压机总厂、肇庆化工机械厂、余姚通用机器厂、柳州压缩机总厂、肇庆仪表机械厂、上海嘉定机械厂、沈阳压缩机制造厂、湖北压缩机厂、无锡第二压缩机厂、咸阳压缩机厂、陕西鼓风机厂、西安压缩机厂、南京压缩机厂、蚌埠压缩机厂、四川华西通用机器公司、上海伟华干燥设备厂、重庆压缩机厂、四川自贡空压机厂、无锡县致冷干燥厂、上海英格索兰压缩机公司、江西压缩机厂、上海建材机械厂、常德通用机械厂、成都半导体材料厂、松江橡胶制品厂、杭州嘉美净化设备公司、北京第一通用机械厂、湘潭压缩机厂、长春气动元件厂、江苏靖江县劳动保护设备厂、长沙消声器厂、沈阳鼓风机厂、长沙起重机厂等。

由于我们水平不高,能力有限,不足和错误之处,请读者指正。

手册编写组

# 目 录

<b>第1章 空气的性质</b> .....	1	4.2 离心式空气压缩机的结构	166
1 空气的物理性质 .....	1	4.3 离心式空气压缩机的 调节方法 .....	166
1.1 气体常数 .....	1	4.4 离心式空气压缩机组的 主要技术资料 .....	168
1.2 密度 .....	2	<b>5 螺杆式空气压缩机</b> .....	180
1.3 热导率 .....	4	5.1 基本原理和特点 .....	186
1.4 粘度 .....	4	5.2 螺杆压缩机的性能参数 和性能曲线 .....	187
1.5 海拔高度与大气压力、温度和 密度的关系 .....	4	5.3 排气量调节 .....	188
<b>2 空气的湿度</b> .....	5	5.4 螺杆式空气压缩机组的 主要技术资料 .....	190
2.1 绝对湿度 .....	5	<b>第3章 压缩空气站辅助设备</b> .....	207
2.2 相对湿度 .....	6	1 空气过滤器 .....	207
2.3 含湿量 .....	6	1.1 LWP型滤尘器 .....	207
2.4 水蒸汽的体积分数 .....	6	1.2 CWA型、CWB型初效空 气过滤器 .....	209
2.5 露点 .....	7	1.3 TJ-3型自动卷绕式空 气过滤器 .....	210
<b>第2章 空气压缩机</b> .....	11	1.4 YJ <sub>4</sub> 型自动卷绕式空气过滤器 .....	215
1 空气压缩机的分类及适 应范围 .....	11	1.5 粗、中效空气过滤机组 .....	215
1.1 空气压缩机的分类 .....	11	<b>2 消声器</b> .....	216
1.2 各类型空气压缩机型 号意义 .....	11	2.1 ZY型消声器系列 .....	216
1.3 各类型空气压缩机的应 用范围 .....	13	2.2 AP <sub>3</sub> 型消声器系列 .....	216
<b>2 空气压缩机润滑油及其选择</b> .....	13	2.3 KYX型消声器系列 .....	217
2.1 润滑油 .....	13	2.4 XW-05型消声器系列 .....	218
2.2 润滑油的选择 .....	16	2.5 ZK2(KP)型消声器 .....	218
<b>3 往复活塞式空气压缩机</b> .....	17	2.6 ZK5型消声器 .....	219
3.1 基本原理与特点 .....	17	<b>3 消声滤清器</b> .....	219
3.2 活塞式空气压缩机的结构 .....	17	3.1 YXL型过滤消声器 .....	219
3.3 无油润滑空气压缩机 .....	20	3.2 ZKSG型组合式消声 过滤器 .....	220
3.4 站房设计中的热力学计算 .....	21	<b>4 后冷却器</b> .....	221
3.5 活塞式空气压缩机组的性 能调节 .....	23	4.1 列管式冷却器 .....	221
3.6 空气压缩机组的主要 技术资料 .....	23	4.2 散热片式冷却器 .....	223
<b>4 离心式空气压缩机</b> .....	163	<b>5 油水分离器</b> .....	225
4.1 基本原理与特性 .....	163		

5.1	旋风式油水分离器	225	6.1	布置原则	292
5.2	直通式油水分离器	225	5.2	布置形式	292
5.3	YST型直通式油水分离器	225	6	干燥净化空气的检测方法 及使用仪器	293
5.4	YSJ型直角式油水分离器	225	<b>第5章 压缩空气的干燥、 净化设备</b>		298
5.5	旋流板式油水分离器	227	1	压缩空气的吸附干燥设备	298
5.6	YF-15-400、L20-81-00、 L80-81-00型液气分离器	229	1.1	加热再生吸附干燥设备	298
6	储气罐	230	1.2	无热再生吸附干燥设备	302
6.1	活塞式空气压缩机储气罐	230	1.3	微热再生吸附干燥设备	319
6.2	调节负荷用储气罐	231	2	压缩空气冷冻干燥设备	321
7	废油收集箱和含油废水 处理机	232	3	压缩空气的净化设备	332
7.1	CR603系列废油收集箱	232	3.1	压缩空气过滤器	332
7.2	BHK-1型含油废水处理机	233	3.2	油等杂质的过滤、净化器	346
8	起重设备	234	4	气源处理元件	352
8.1	手动起重设备	234	<b>第6章 压缩空气站工艺设计</b>		358
8.2	电动起重设备	239	1	设计原始资料	358
<b>第4章 压缩空气的干燥 和净化</b>		249	1.1	压缩空气负荷资料	358
1	概述	249	1.2	厂址情况	358
1.1	干燥、净化压缩空 气的用途	249	1.3	气象资料	358
1.2	压缩空气中杂质的主 要来源	250	2	压缩空气供应方案的确定	358
2	压缩空气的干燥方法及 基本原理	251	3	压缩空气站负荷计算及压缩机类 型选择	359
2.1	干燥方法及其特点	251	3.1	压缩空气消耗量	359
2.2	压缩空气的吸附干燥	251	3.2	压缩空气站设计容量的确定	361
2.3	压缩空气的冷冻干燥	268	3.3	压缩机类型的选择原则	362
3	压缩空气的净化	271	4	活塞式空气压缩机站房设计	363
3.1	压缩空气中杂质的清除方法	271	4.1	空气压缩机台数确定原则	363
3.2	过滤机理	272	4.2	辅助设备的选择	364
3.3	表示过滤器性能的几个参数	274	4.3	工艺系统	365
3.4	过滤材料	275	4.4	站房布置的一般原则	367
3.5	过滤器	280	4.5	站的组成及设备布置	367
4	压缩空气干燥净化工艺流程	283	4.6	压缩空气站机器间高度的 确定原则	370
4.1	流程组织原则	283	4.7	站内管道设计	370
4.2	典型干燥净化工艺流程	285	5	螺杆式空气压缩机站房设计	372
4.3	压缩空气干燥工艺流程举例	287	5.1	螺杆式空气压缩机及其应用	372
4.4	压缩空气净化过滤单元	291	5.2	螺杆式空气压缩机站房设计 及工艺系统	372
5	压缩空气干燥净化装置的布置	292	6	离心式空气压缩机站房设计	373
			6.1	离心式空气压缩机的选型	373
			6.2	离心式空气压缩机站工	

艺系统 .....	384	7.2 热工测量和控制 .....	435
6.3 离心式空气压缩机的		7.3 热工仪表盘和控制柜 .....	436
设备布置 .....	386	<b>第9章 压缩空气管道的设计</b> .....	437
<b>第7章 对有关专业的设</b>		1 确定管道系统的一般原则 .....	437
计要求 .....	392	2 管道的水力计算 .....	439
1 总图布置 .....	392	2.1 管道计算流量的确定 .....	439
2 建筑和结构 .....	395	2.2 管径的计算 .....	439
2.1 活塞式空气压缩机房 .....	395	2.3 管道压力损失计算 .....	440
2.2 离心式空气压缩机房 .....	396	2.4 计算表的应用 .....	444
3 给水和排水 .....	396	2.5 计算实例 .....	455
3.1 冷却水水质要求 .....	396	3 管道的连接、敷设和布置 .....	457
3.2 冷却水水量的确定 .....	396	3.1 连接方法和特点 .....	457
3.3 冷却水系统及冷却水压力		3.2 车间管道的布置和敷设	
的确定 .....	398	方法 .....	458
4 采暖和通风 .....	400	3.3 车间管道的入口装置 .....	459
5 供、配电及照明 .....	401	3.4 厂区压缩空气管道的布	
<b>第8章 热工测量仪表和</b>		置与敷设 .....	459
自动控制 .....	403	4 管道的热补偿和支、吊架 .....	461
1 热工测量 .....	403	4.1 管道的热补偿 .....	461
1.1 热工检测项目 .....	404	4.2 管道的支、吊架 .....	462
1.2 热工检测仪表的选择 .....	404	5 管道材料及附件的选择 .....	463
2 空气压缩机的信号保护及		5.1 管道材料的选择 .....	463
自动控制 .....	415	5.2 管道附件的选择 .....	463
3 3LE-10/8型无油润滑空气压缩机		5.3 管道附件的装设要求 .....	466
自动控制装置 .....	416	6 管道的保温、防腐、油漆和着色 .....	466
3.1 装置的组成 .....	416	6.1 管道的保温 .....	466
3.2 3LE-10/8型无油润滑空气压缩机的		6.2 管道的防腐 .....	468
运行方式 .....	416	6.3 管道的油漆 .....	469
4 微机控制 .....	416	7 管道的防雷接地 .....	469
4.1 SKD-PC-3型压缩空气站综合		8 管道安装技术条件和验收方法 .....	469
控制台 .....	416	8.1 未经干燥、净化的压缩空气管道	
4.2 KWT系列空气压缩机微机控制		的施工及验收 .....	469
装置 .....	419	8.2 干燥、净化压缩空气管道的施工	
5 仪表盘与操纵台 .....	425	及验收 .....	471
6 控制室 .....	427	<b>第10章 压缩空气站的安全、环保</b>	
6.1 控制室位置的选择 .....	427	和节能 .....	475
6.2 控制室的建筑要求 .....	427	1 压缩空气站及其管道系统的燃烧和爆炸原	
6.3 控制室的采光与照明 .....	427	因 .....	475
6.4 控制室的采暖通风及空调 .....	427	1.1 积炭及分解物的形成 .....	475
6.5 控制室面积 .....	427	1.2 温度在燃爆中的作用 .....	475
7 压缩空气站热控设计工程实例 .....	428	2 燃爆事故的防止方法 .....	476
7.1 工艺系统的组成和流程 .....	428	2.1 减少和清除积炭 .....	476



2.2	降低气体温度 .....	476
2.3	改善操作方法 .....	477
3	压缩空气站的消声设计 .....	477
3.1	国家现行的噪声控制标准、规范 .....	477
3.2	压缩空气站的噪声及其影响因素 .....	479
3.3	噪声声压级及衰减量的计算 .....	480
3.4	空气压缩机及其管道系统的消声、 隔声措施 .....	481
3.5	总图布置对压缩空气站噪声治理 的影响 .....	486
3.6	建筑和结构上的消声、隔声措施 .....	486
3.7	噪声控制设计的一般步骤 .....	496
4	空气压缩机及管道振动的防治 .....	498
4.1	振动的危害、原因及控制标准 .....	498
4.2	振动的防治 .....	503
4.3	常用隔振、减振元件 .....	509
4.4	空气压缩机组基础的设计条件 .....	522
4.5	离心式压缩机端振的原因、判 断及防止措施 .....	525
5	压缩空气站含油废水的回收及处理 .....	527
5.1	含油废水的排放量、危害及控 制标准 .....	527
5.2	含油废水的回收及处理 .....	528
6	压缩空气系统的节能措施 .....	532
<b>第11章 投资概算 .....</b>		<b>535</b>
1	压缩空气站的概算指标 .....	535
2	设备、管道、阀门价格 .....	545
<b>第12章 压缩空气站设计实例 .....</b>		<b>559</b>
1	活塞式空气压缩机站房实例 .....	560
1.1	安装二台2Z-3/8-1型空气压缩机的常 州×××厂压缩空气站 .....	560
1.2	安装三台2Z-6/8-1型空气压缩机的咸 阳×××厂压缩空气站 .....	560
1.3	安装二台V-6/8-1和一台3L-10/8 型空气压缩机的天津×××厂压缩 空气站 .....	565
1.4	安装三台3L-10/8型空气压缩机的江 西×××厂压缩空气站 .....	570
1.5	安装四台3L <sub>E</sub> -10/8型空气压缩机的 洛阳×××所压缩空气站 .....	570
1.6	安装二台4L-20/8-1型空气压缩机的江 西××××厂压缩空气站 .....	576
1.7	安装四台4L-20/8型空气压缩机的河 南××××厂压缩空气站 .....	576
1.8	安装三台3L <sub>E</sub> -10/8-G和二台L3.5 <sup>7</sup> 20/3-G型空气压缩机的南京××× 厂压缩空气站 .....	576
1.9	安装二台5L-40/8和一台4L-20/8型 空气压缩机的朝阳××××厂 压缩空气站 .....	588
1.10	安装二台L8-60/8和一台5L-40/8型 空气压缩机的郑州××××厂压缩 空气站 .....	591
1.11	安装四台5L-40/8和一台2D12-100/8型 空气压缩机的南京×××厂压缩 空气站 .....	595
1.12	安装六台2D12-100/8和四台 4L-20/8-I型空气压缩机的安阳 ×××厂压缩空气站 .....	599
1.13	安装四台2D3.5-15/12型空气压缩机的 沈阳×××厂压缩空气站 .....	604
2	螺杆式空气压缩机站房实例 .....	607
2.1	安装二台LG II 16-6/7-D型空气 压缩机的上海××××厂压缩 空气站 .....	607
2.2	安装六台ZR5A型空气压缩机的陕西 ××××厂压缩空气站 .....	609
3	离心式空气压缩机站房实例 .....	614
3.1	安装一台EI450-3.5/0.97和一台 EI290-3.5/0.96-4型空气压缩机的 湖南×××厂压缩空气站 .....	614
3.2	安装二台DHP-40-2型空气压缩机的 湖南××××厂压缩空气站 .....	622
<b>附 录 .....</b>		
1	常用国家法定计量单位 .....	627
2	常用单位换算 .....	628
3	常用管材 .....	631
4	常用阀门型号规格及性能 .....	633
5	耗气设备(工具)的压缩空气消耗量 .....	641
6	常用国家标准图目录及主要内容 .....	647
7	全国主要城市气象资料 .....	649
8	全国主要空气压缩机及其辅助设备 生产厂家通讯录 .....	652
<b>参考文献 .....</b>		<b>654</b>

# 第1章 空气的性质

压缩空气作为一种重要的动力源，它被用于各种风动工具，气动设备，被用来控制仪表及自动化装置，也被广泛地用于科学试验之中。根据不同的用途，压缩空气的压力与品质要求也不尽相同，尤其在近代精密仪表及微电子产品的生产过程中，用来吹洗零件及控制仪表和自动化装置中的压缩空气，其干燥净化的要求是很高的，了解和掌握空气的性质，对合理设计压缩空气站很有必要。

## 1 空气的物理性质

空气是多种气体的混合物，在标准状态下，干空气的组成成分见表1-1，干空气常用的物理常数见表1-2。

表1-1 干空气的组成成分

气体名称	分子式	摩尔质量 <sup>①</sup>	容积分数 %	重量分数%	气体名称	分子式	摩尔质量	容积分数 %	重量分数 %
氧	O <sub>2</sub>	32.00	20.93	23.1	氩	Kr	83.8	1.03×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-4</sup>
氮	N <sub>2</sub>	28.016	78.03	75.6	氦	He	131.3	8×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-5</sup>
氩	Ar	39.944	0.932	1.286	氢	H <sub>2</sub>	2.016	5×10 <sup>-5</sup>	3.6×10 <sup>-5</sup>
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	0.03	0.046	臭氧	O <sub>3</sub>	48.00	(1~2)×10 <sup>-6</sup>	2×10 <sup>-5</sup>
氖	Ne	20.183	(1.5~1.8)×10 <sup>-3</sup>	1.2×10 <sup>-3</sup>					
氦	He	4.003	(4.6~5.3)×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-3</sup>					

① 单位为kg/mol。

表1-2 干空气的物理常数

名称	状态	符号	单位	数值
摩尔质量	—	<i>M</i>	kg/mol	28.96
气体常数	—	<i>R</i>	J/(kg·K)	287.041
密度	0℃ 101325Pa	<i>ρ</i>	kg/m <sup>3</sup>	1.293
绝热指数(比热容比)	0℃	<i>k</i> 或 <i>C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub></i>	—	1.4
定压比热	0℃ 低压F	<i>C<sub>p</sub></i>	kJ/(kg·K) kcal/(kg·K)	1.004 0.240
热导率	0℃ 低压F	<i>λ</i>	W/(m·K) kcal/(h·m·K)	0.0243 0.0206
动力粘度	0℃ 低压F	<i>η</i>	Pa·s	1.722×10 <sup>-3</sup>

### 1.1 气体常数

湿空气的气体常数为

$$R = \frac{R_a + d \cdot R_v}{1 + d} \quad (1-1)$$

式中  $R$ ——湿空气的气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
 $R_a$ ——干空气的气体常数, 为  $287.041 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
 $R_v$ ——水蒸汽的气体常数, 为  $461 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
 $d$ ——含湿量, 见式 (1-15) 和式 (1-16),  $\text{kg}/\text{kg}$ 。

## 1.2 密度

标准状态时空气的密度为  $1.2931 \text{kg}/\text{m}^3$ , 在温度为  $t(^{\circ}\text{C})$ , 压力为  $p(\text{Pa})$  时, 空气的密度为

$$\rho = 1.2931 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{p}{101325} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-2)$$

湿空气的密度为

$$\rho = 1.2931 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{p - 0.378\varphi \cdot p_s}{101325} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-3)$$

式中  $\varphi$ ——相对湿度, 见式 (1-13);  
 $p_s$ ——在温度  $t$  时空气中饱和水蒸汽分压力,  $\text{Pa}$ 。  
 湿空气的密度也可由式 (1-4) 求得。

$$\rho = \rho_a + \rho_v = \frac{p_a}{R_a T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-4)$$

式中  $\rho_a$ ——干空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_v$ ——水蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $p_a$ ——干空气分压力,  $\text{Pa}$ ;  
 $p_v$ ——水蒸汽分压力,  $\text{Pa}$ ;  
 $R_a$ ——干空气的气体常数, 为  $287.041 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
 $R_v$ ——水蒸汽的气体常数, 为  $461 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  
 $T$ ——湿空气的绝对温度,  $\text{K}$ 。

干空气的密度与压力、温度的关系见表 1-3。

表 1-3 不同压力温度下的空气密度

$\text{kg}/\text{m}^3$

压力 $\text{MPa}$	温度 $^{\circ}\text{C}$													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
0.1	1.276	1.231	1.189	1.149	1.113	1.078	1.046	1.015	0.987	0.959	0.934	0.909	0.886	0.864
0.1013	1.292	1.247	1.204	1.164	1.127	1.092	1.059	1.029	0.999	0.972	0.946	0.921	0.898	0.875
0.2	2.551	2.461	2.377	2.299	2.225	2.156	2.092	2.031	1.973	1.919	1.867	1.819	1.772	1.729
0.3	3.827	3.692	3.566	3.448	3.338	3.235	3.138	3.046	2.959	2.878	2.801	2.728	2.658	2.593
0.32	4.082	3.938	3.803	3.678	3.560	3.450	3.347	3.249	3.157	3.070	2.988	2.910	2.836	2.766
0.34	4.337	4.184	4.041	3.908	3.783	3.666	3.556	3.452	3.354	3.262	3.175	3.092	3.013	2.938
0.36	4.592	4.430	4.279	4.138	4.005	3.882	3.765	3.655	3.552	3.454	3.361	3.274	3.190	3.111
0.38	4.847	4.676	4.516	4.367	4.228	4.097	3.974	3.858	3.749	3.646	3.548	3.456	3.368	3.284
0.40	5.102	4.922	4.754	4.597	4.450	4.313	4.183	4.061	3.946	3.838	3.735	3.637	3.545	3.457
0.42	5.357	5.168	4.992	4.827	4.673	4.528	4.393	4.265	4.144	4.029	3.922	3.819	3.722	3.630
0.44	5.612	5.414	5.229	5.057	4.896	4.744	4.602	4.468	4.341	4.222	4.108	4.001	3.899	3.803

(续)

压力 MPa	温度 °C													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
0.46	5.868	5.660	5.467	5.287	5.118	4.960	4.811	4.671	4.538	4.413	4.295	4.183	4.077	3.976
0.48	6.123	5.906	5.705	5.516	5.341	5.175	5.020	4.874	4.736	4.605	4.482	4.365	4.254	4.148
0.50	6.378	6.153	5.943	5.747	5.563	5.391	5.229	5.077	4.933	4.797	4.669	4.547	4.431	4.321
0.52	6.633	6.399	6.180	5.977	5.786	5.607	5.433	5.280	5.130	4.989	4.855	4.729	4.608	4.494
0.54	6.888	6.645	6.418	6.206	6.008	5.822	5.648	5.483	5.328	5.181	5.042	4.911	4.786	4.667
0.56	7.143	6.891	6.656	6.436	6.231	6.038	5.857	5.686	5.525	5.373	5.229	5.092	4.963	4.840
0.58	7.398	7.137	6.894	6.666	6.453	6.254	6.066	5.889	5.722	5.565	5.416	5.274	5.140	5.013
0.60	7.653	7.383	7.131	6.896	6.675	6.469	6.275	6.092	5.919	5.757	5.602	5.456	5.317	5.186
0.62	7.908	7.629	7.369	7.126	6.898	6.685	6.484	6.295	6.117	5.949	5.789	5.638	5.495	5.358
0.64	8.164	7.875	7.607	7.356	7.121	6.900	6.693	6.498	6.314	6.140	5.976	5.820	5.672	5.531
0.66	8.419	8.121	7.844	7.586	7.343	7.116	6.903	6.701	6.512	6.332	6.163	6.002	5.849	5.704
0.68	8.674	8.367	8.082	7.815	7.566	7.332	7.112	6.904	6.709	6.524	6.349	6.184	6.026	5.877
0.70	8.929	8.614	8.320	8.045	7.788	7.547	7.321	7.108	6.906	6.716	6.536	6.366	6.204	6.049
0.72	9.184	8.859	8.557	8.275	8.011	7.763	7.530	7.311	7.104	6.908	6.723	6.547	6.381	6.223
0.74	9.439	9.106	8.795	8.505	8.233	7.974	7.739	7.514	7.301	7.100	6.909	6.729	6.558	6.395
0.76	9.694	9.352	9.033	8.735	8.456	8.194	7.948	7.717	7.498	7.292	7.096	6.911	6.735	6.563
0.78	9.949	9.598	9.271	8.965	8.679	8.410	8.158	7.919	7.696	7.484	7.283	7.093	6.913	6.741
0.80	10.204	9.844	9.508	9.195	8.901	8.626	8.367	8.123	7.893	7.676	7.470	7.275	7.090	6.914
0.82	10.459	10.090	9.746	9.425	9.124	8.841	8.576	8.326	8.090	7.867	7.657	7.457	7.267	7.087
0.84	10.715	10.336	9.984	9.654	9.346	9.037	8.785	8.529	8.288	8.059	7.843	7.639	7.444	7.260
0.86	10.970	10.582	10.221	9.884	9.569	9.273	8.994	8.732	8.485	8.251	8.030	7.821	7.622	7.433
0.88	11.225	10.829	10.459	10.114	9.791	9.488	9.203	8.935	8.682	8.443	8.217	8.002	7.799	7.605
0.90	11.480	11.075	10.697	10.344	10.013	9.704	9.413	9.138	8.879	8.635	8.404	8.184	7.976	7.778
0.92	11.735	11.321	10.935	10.574	10.236	9.919	9.622	9.341	9.077	8.827	8.590	8.366	8.153	7.951
0.94	11.990	11.567	11.172	10.804	10.459	10.135	9.831	9.544	9.274	9.019	8.777	8.548	8.331	8.125
0.96	12.245	11.813	11.410	11.034	10.681	10.351	10.040	9.747	9.471	9.211	8.964	8.730	8.508	8.297
0.98	12.500	12.059	11.648	11.263	10.904	10.566	10.249	9.951	9.669	9.403	9.151	8.912	8.685	8.469
1.00	12.756	12.305	11.885	11.493	11.126	10.782	10.458	10.154	9.866	9.594	9.337	9.094	8.862	8.643
1.02	13.011	12.551	12.123	11.723	11.349	10.998	10.668	10.357	10.063	9.786	9.524	9.276	9.039	8.815
1.04	13.266	12.797	12.361	11.953	11.571	11.213	10.877	10.560	10.261	9.978	9.711	9.457	9.217	8.988
1.06	13.521	13.043	12.598	12.183	11.794	11.429	11.086	10.763	10.458	10.170	9.898	9.639	9.394	9.161
1.08	13.776	13.289	12.836	12.413	12.016	11.645	11.295	10.966	10.655	10.362	10.084	9.821	9.571	9.334
1.10	14.031	13.536	13.074	12.643	12.239	11.860	11.504	11.169	10.853	10.554	10.271	10.003	9.748	9.507
1.12	14.286	13.782	13.312	12.873	12.461	12.076	11.713	11.372	11.050	10.746	10.458	10.185	9.926	9.680
1.14	14.541	14.028	13.549	13.102	12.684	12.292	11.923	11.575	11.247	10.938	10.645	10.367	10.103	9.852
1.16	14.796	14.274	13.787	13.332	12.907	12.507	12.132	11.778	11.445	11.129	10.831	10.549	10.280	10.025
1.18	15.052	14.520	14.025	13.562	13.129	12.723	12.341	11.981	11.642	11.321	11.018	10.730	10.458	10.198
1.20	15.307	14.766	14.262	13.792	13.352	12.938	12.550	12.184	11.839	11.513	11.205	10.912	10.635	10.371
1.22	15.562	15.012	14.500	14.022	13.574	13.154	12.759	12.387	12.037	11.705	11.392	11.094	10.812	10.544
1.24	15.817	15.258	14.738	14.252	13.797	13.370	12.968	12.591	12.234	11.897	11.578	11.276	10.989	10.717
1.26	16.072	15.504	14.976	14.482	14.019	13.585	13.178	12.794	12.431	12.089	11.765	11.458	11.167	10.889
1.28	16.327	15.751	15.213	14.711	14.242	13.801	13.387	12.997	12.629	12.281	11.952	11.640	11.344	11.062
1.30	16.582	15.997	15.451	14.941	14.464	14.017	13.596	13.200	12.826	12.473	12.139	11.822	11.521	11.235
1.32	16.837	16.243	15.689	15.171	14.687	14.232	13.805	13.403	13.023	12.665	12.325	12.004	11.693	11.408
1.34	17.093	16.489	15.926	15.401	14.909	14.448	14.014	13.606	13.221	12.857	12.512	12.185	11.876	11.581
1.36	17.348	16.735	16.164	15.631	15.132	14.664	14.223	13.809	13.418	13.048	12.699	12.367	12.053	11.754

(续)

压力 MPa	温度 °C													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
1.38	17.603	16.981	16.402	15.861	15.354	14.879	14.433	14.012	13.615	13.240	12.886	12.549	12.230	11.927
1.40	17.858	17.227	16.639	16.091	15.577	15.095	14.642	14.215	13.813	13.432	13.072	12.731	12.407	12.099
1.42	18.113	17.473	16.877	16.321	15.799	15.310	14.851	14.418	14.010	13.624	13.259	12.913	12.587	12.272
1.44	18.368	17.719	17.115	16.550	16.022	15.520	15.060	14.621	14.207	13.816	13.446	13.095	12.762	12.445
1.46	18.623	17.965	17.353	16.780	16.244	15.742	15.269	14.824	14.405	14.003	13.633	13.277	12.933	12.618
1.48	18.878	18.212	17.590	17.010	16.467	15.957	15.478	15.027	14.602	14.120	13.819	13.459	13.116	12.791
1.50	19.133	18.458	17.828	17.240	16.689	16.173	15.683	15.230	14.799	14.392	14.006	13.640	13.294	12.964
1.52	19.389	18.704	18.066	17.470	16.912	16.389	15.897	15.434	14.997	14.584	14.193	13.822	13.471	13.137
1.54	19.644	18.950	18.303	17.700	17.135	16.604	16.106	15.637	15.194	14.775	14.379	14.004	13.648	13.309
1.56	19.898	19.195	18.541	17.930	17.357	16.820	16.315	15.840	15.391	14.967	14.566	14.186	13.825	13.482
1.58	20.154	19.442	18.779	18.159	17.579	17.036	16.524	16.043	15.588	15.159	14.753	14.368	14.003	13.655
1.60	20.409	19.688	19.017	18.389	17.802	17.251	16.733	16.246	15.786	15.351	14.940	14.550	14.180	13.828

### 1.3 热导率

空气的热导率与温度的关系可用式 (1-5) 来表示:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{273 + c}{T + c} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad \text{W/(m} \cdot \text{°C)} \quad (1-5)$$

式中  $c$ ——常数, 为125;

$\lambda_0$ ——空气在0°C时的热导率, 可取0.0248 W/(m·°C);

$T$ ——空气温度, °C。

### 1.4 粘度

空气的动力粘度可由式 (1-6) 求得:

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + c}{T + c} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (1-6)$$

式中  $\eta_0$ ——空气在0°C时的动力粘度, 为 $1.72 \times 10^{-6}$  Pa·s;

$c$ ——常数, 为124 (在1绝对大气压下)。

空气的动力粘度与运动粘度的关系为:

$$\nu = \frac{\eta g}{\rho} \times \frac{1}{9.806} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-7)$$

式中  $\rho$ ——空气密度, kg/m<sup>3</sup>;

$g = 9.81$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

### 1.5 海拔高度与大气压力、温度和密度的关系

海拔高度在11000m以下的范围内, 大气压力、温度和密度可由已知海拔高度分别按式 (1-8), 式 (1-9), 式 (1-10) 求得。

$$p = 101325(1 - 0.02257H)^{5.256} \quad \text{Pa} \quad (1-8)$$

$$t = t_0 - 6.5H \quad \text{°C} \quad (1-9)$$

$$\rho = \rho_0(1 - 0.02257H)^{4.256} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-10)$$

式中  $P$ ——大气压力, Pa;

$t$ ——大气温度, °C;

$t_0$ ——海平面上大气温度,  $^{\circ}\text{C}$

$\rho$ ——大气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_0$ ——海平面上大气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$H$ ——海拔高度,  $\text{km}$ 。

不同海拔高度处的大气压力也可直接由表(1-4)查得

表1-4 不同海拔高度处的大气压力

海拔高度m	大气压力 Pa	海拔高度m	大气压力 Pa	海拔高度m	大气压力 Pa
-100	102531.08	1200	87708.56	2600	73737.96
-60	102047.12	1300	86644.67	2700	72814.05
0	101325.20	1400	85591.44	2800	71898.14
100	100128.76	1500	84547.54	2900	70992.90
200	98943.98	1600	83249.01	3000	70095.66
300	97770.59	1700	82493.08	3100	69209.08
400	96608.47	1800	81481.18	3200	68330.50
500	95457.12	1900	80465.29	3300	67461.25
600	94317.23	2000	79485.38	3400	66601.34
700	93189.35	2100	78502.82	3500	65750.75
800	92070.79	2200	77530.91	3600	64908.18
900	90990.90	2300	76568.34	3700	64074.93
1000	89868.35	2400	75615.10	3800	63249.67
1100	88783.12	2500	74671.20	3900	62433.76
				4000	61625.84

## 2 空气的湿度

干空气和水蒸汽的混合物称为湿空气,自然界中的空气都是湿空气。一般情况下,湿空气中的水蒸汽都处于过热状态,即呈不饱和状态。干空气、水蒸汽及湿空气均可视为理想气体进行计算。

根据道尔顿分压定律,湿空气的压力等于其干空气分压力与水蒸汽分压力之和。湿空气的温度即为干空气及水蒸汽的温度。

在一定的压力和温度下,水蒸汽含量达到最大值的湿空气称为饱和空气,低于最大值的湿空气则为未饱和空气。

下面介绍一些描述空气中水蒸汽含量的参数。

### 2.1 绝对湿度

湿空气的绝对湿度 $\rho_v$ 是指单位容积的湿空气中包含的水蒸汽重量,也即水蒸汽在其分压力及湿空气温度下的密度。根据理想气体公式,则:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-11)$$

式中  $m_v$ ——水蒸汽的重量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——湿空气的体积,  $\text{m}^3$ 。

由式(1-11)可以看出,在一定温度下,蒸汽分压力愈大,则绝对湿度愈大,当蒸汽分压

力达到该温度相应的饱和蒸汽压时，蒸汽开始凝结，析出水分，此时空气中水蒸汽含量已达到最大值，其绝对湿度称为饱和绝对湿度。按式 (1-11) 则

$$\rho_s = \frac{p_s}{R_v \cdot T} \quad (1-12)$$

式中  $\rho_s$ ——饱和绝对湿度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$p_s$ ——饱和水蒸汽压力，Pa。

## 2.2 相对湿度

湿空气的绝对湿度 $\varphi$ 与同温度下的饱和绝对湿度之比称为湿空气的相对湿度。

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} = \frac{p_v}{p_s} \quad (1-13)$$

相对湿度表示空气距离饱和的程度，即“潮湿”程度（达到饱和时 $\varphi=1$ ）。

## 2.3 含湿量

含湿量 $d$ 亦称湿含量、比湿度。系指湿空气中包含的水蒸汽重量与干空气重量之比。

$$d = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (1-14)$$

式中  $d$ ——含湿量， $\text{kg}/\text{kg}$ ；

$m_a$ ——干空气重量， $\text{kg}$ ；

含湿量可由式 (1-15) 求得：

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \quad \text{kg}/\text{kg} \quad (1-15)$$

空气达到饱和时 $\varphi=1$ ，则有饱和含湿量

$$d_s = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad \text{kg}/\text{kg} \quad (1-16)$$

当空气的绝对湿度变化时，湿空气的总重量也随之变化，但湿空气中干空气的重量是恒定不变的。因此，在研究湿空气的物理性质，尤其是计算湿空气中的水蒸汽含量及水份析出量时，采用含湿量这个概念就非常方便。

## 2.4 水蒸汽的体积分数

水蒸汽的体积分数 $\Phi$ 是指湿空气中水蒸汽的体积与湿空气总体积之比，通常以其百万分率 (ppm) 来表示。

所谓湿空气中水蒸汽的体积是指水蒸汽处于湿空气温度 $T$ 和总压力 $p$ 时单独占有的容积。按理想气体公式有

$$V_v = \frac{m_v \cdot R_v \cdot T}{p} \quad (1-17)$$

$$\Phi = \frac{V_v}{V} \times 10^6 = \frac{p_v}{p} \times 10^6 \quad (1-18)$$

式中  $V_v$ ——水蒸汽的体积， $\text{m}^3$ ；

$\Phi$ ——水蒸汽的体积分数，ppm。

## 2.5 露点

露点系指在恒定压力下湿空气冷却至饱和时的温度

湿空气在露点时为饱和状态，故其相对湿度 $\varphi = 1$ ，由式(1-16)可得

$$p_d = \frac{dp}{0.622 + d} \quad (1-19)$$

式中  $p_d$ ——露点下水蒸汽饱和压力，Pa。

由  $p_d$  可以从水蒸汽性质表中查得露点。

露点的测试一般是将样品(气)压力降至大气压力下进行的，这时的露点称为气体的常压露点，气体实际压力下的露点称为压力露点。在使用压缩空气时，只要气体温度不降到压力露点以下，就不会有水份析出。常压露点与压力露点的换算见图1-1。

表1-5列出了101325Pa(1个标准大气压)下湿空气中各种水蒸汽含量参数的值，可以很方便地用于换算。由表中可以看出，温度越低，空气中的饱和绝对湿度就越小。因此，对于去除水份来说，降低进入装置的空气温度是有利的。

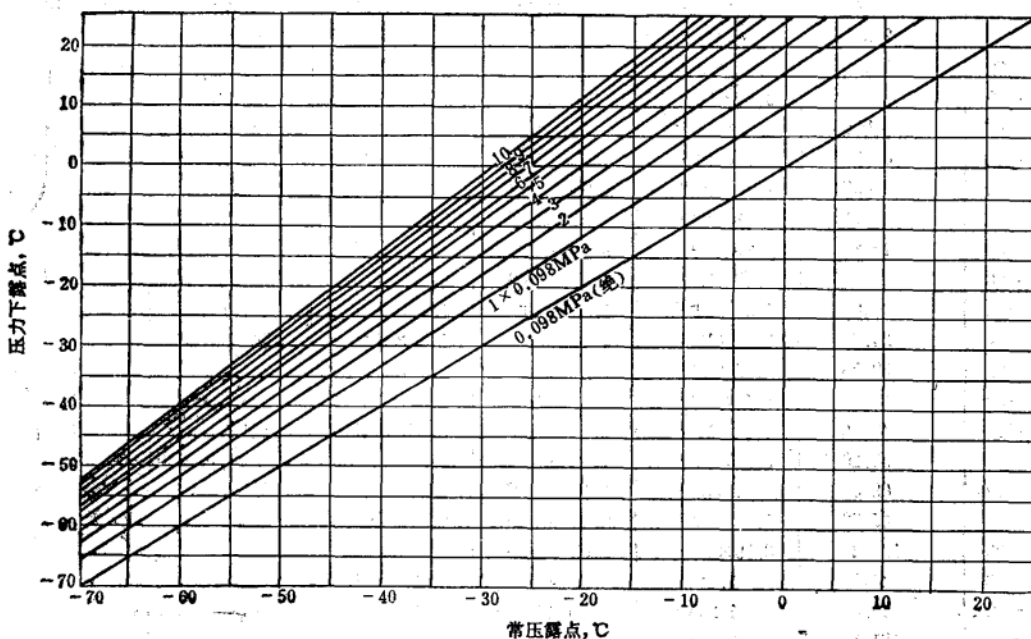


图1-1 常压露点与压力露点的换算

表1-6列出了不同温度和压力下压缩空气中的饱和含湿量。



表1-5 101325Pa 压力下空气中的水蒸汽含量

露点 ℃	露点下的饱和蒸 汽压 (水蒸汽分 压) Pa	露点下的饱和绝 对湿度 g/m <sup>3</sup>	常温下 (20℃) 的绝对湿度 g/m <sup>3</sup>	含 湿 量 g/kg	水蒸汽的体积分数 PPm	常 温 下 (20℃) 的相对湿度 %
-120	1.33×10 <sup>-5</sup>	1.89×10 <sup>-7</sup>	9.83×10 <sup>-8</sup>	8.16×10 <sup>-8</sup>	0.00013	5.7×10 <sup>-7</sup>
-110	1.33×10 <sup>-4</sup>	1.77×10 <sup>-6</sup>	9.830×10 <sup>-7</sup>	8.18×10 <sup>-7</sup>	0.00134	5.6×10 <sup>-6</sup>
-100	1.32×10 <sup>-3</sup>	1.65×10 <sup>-5</sup>	1.039×10 <sup>-5</sup>	8.10×10 <sup>-6</sup>	0.01387	5.7×10 <sup>-5</sup>
-90	9.33×10 <sup>-3</sup>	1.11×10 <sup>-4</sup>	7.161×10 <sup>-5</sup>	5.73×10 <sup>-5</sup>	0.09564	4.0×10 <sup>-4</sup>
-86	5.33×10 <sup>-2</sup>	5.99×10 <sup>-4</sup>	4.051×10 <sup>-4</sup>	3.27×10 <sup>-4</sup>	0.5410	2.3×10 <sup>-3</sup>
-78	7.47×10 <sup>-2</sup>	8.31×10 <sup>-4</sup>	5.610×10 <sup>-4</sup>	4.58×10 <sup>-4</sup>	0.7492	3.2×10 <sup>-3</sup>
-76	1.03×10 <sup>-1</sup>	1.13×10 <sup>-3</sup>	7.717×10 <sup>-4</sup>	6.30×10 <sup>-4</sup>	1.031	4.6×10 <sup>-3</sup>
-74	1.40×10 <sup>-1</sup>	1.53×10 <sup>-3</sup>	1.055×10 <sup>-3</sup>	8.59×10 <sup>-4</sup>	1.409	6.0×10 <sup>-3</sup>
-72	2.00×10 <sup>-1</sup>	2.16×10 <sup>-3</sup>	1.433×10 <sup>-3</sup>	1.23×10 <sup>-3</sup>	1.914	8.3×10 <sup>-3</sup>
-70	2.59×10 <sup>-1</sup>	2.76×10 <sup>-3</sup>	1.935×10 <sup>-3</sup>	1.59×10 <sup>-3</sup>	2.584	1.1×10 <sup>-2</sup>
-68	3.47×10 <sup>-1</sup>	3.67×10 <sup>-3</sup>	2.599×10 <sup>-3</sup>	2.13×10 <sup>-3</sup>	3.471	1.5×10 <sup>-2</sup>
-66	4.65×10 <sup>-1</sup>	4.87×10 <sup>-3</sup>	3.471×10 <sup>-3</sup>	2.86×10 <sup>-3</sup>	4.635	2.0×10 <sup>-2</sup>
-64	6.19×10 <sup>-1</sup>	6.42×10 <sup>-3</sup>	4.608×10 <sup>-3</sup>	3.80×10 <sup>-3</sup>	6.154	2.65×10 <sup>-2</sup>
-62	8.19×10 <sup>-1</sup>	8.42×10 <sup>-3</sup>	6.087×10 <sup>-3</sup>	5.02×10 <sup>-3</sup>	8.128	3.5×10 <sup>-2</sup>
-60	1.08	1.10×10 <sup>-2</sup>	7.998×10 <sup>-3</sup>	6.63×10 <sup>-3</sup>	10.68	4.6×10 <sup>-2</sup>
-58	1.41	1.43×10 <sup>-2</sup>	1.045×10 <sup>-2</sup>	8.67×10 <sup>-3</sup>	13.96	6.03×10 <sup>-2</sup>
-56	1.84	1.84×10 <sup>-2</sup>	1.360×10 <sup>-2</sup>	1.13×10 <sup>-2</sup>	18.16	7.82×10 <sup>-2</sup>
-54	2.37	2.35×10 <sup>-2</sup>	1.761×10 <sup>-2</sup>	1.46×10 <sup>-2</sup>	23.51	1.01×10 <sup>-1</sup>
-52	3.07	3.01×10 <sup>-2</sup>	2.270×10 <sup>-2</sup>	1.88×10 <sup>-2</sup>	30.32	1.31×10 <sup>-1</sup>
-50	3.935	3.89×10 <sup>-2</sup>	2.912×10 <sup>-2</sup>	2.45×10 <sup>-2</sup>	38.89	1.71×10 <sup>-1</sup>
-48	5.026	4.86×10 <sup>-2</sup>	3.720×10 <sup>-2</sup>	3.09×10 <sup>-2</sup>	49.67	2.1×10 <sup>-1</sup>
-46	6.393	6.13×10 <sup>-2</sup>	4.732×10 <sup>-2</sup>	3.94×10 <sup>-2</sup>	63.19	2.74×10 <sup>-1</sup>
-44	8.097	7.69×10 <sup>-2</sup>	5.993×10 <sup>-2</sup>	4.98×10 <sup>-2</sup>	80.03	3.46×10 <sup>-1</sup>
-42	10.21	9.61×10 <sup>-2</sup>	7.555×10 <sup>-2</sup>	6.28×10 <sup>-2</sup>	100.9	4.3×10 <sup>-1</sup>
-40	12.83	1.2×10 <sup>-1</sup>	9.451×10 <sup>-2</sup>	7.91×10 <sup>-2</sup>	126.8	5.6×10 <sup>-1</sup>
-38	16.06	1.49×10 <sup>-1</sup>	1.189×10 <sup>-1</sup>	9.90×10 <sup>-2</sup>	158.7	6.8×10 <sup>-1</sup>
-36	20.02	1.84×10 <sup>-1</sup>	1.141×10 <sup>-1</sup>	1.23×10 <sup>-1</sup>	197.8	8.6×10 <sup>-1</sup>
-34	24.88	2.26×10 <sup>-1</sup>	1.841×10 <sup>-1</sup>	1.53×10 <sup>-1</sup>	245.8	1.07
-32	30.79	2.78×10 <sup>-1</sup>	2.278×10 <sup>-1</sup>	1.90×10 <sup>-1</sup>	304.2	1.33
-30	37.98	3.40×10 <sup>-1</sup>	2.810×10 <sup>-1</sup>	2.34×10 <sup>-1</sup>	375.3	1.63
-28	46.69	4.14×10 <sup>-1</sup>	3.454×10 <sup>-1</sup>	2.87×10 <sup>-1</sup>	461.3	1.97
-26	57.20	5.10×10 <sup>-1</sup>	4.233×10 <sup>-1</sup>	3.51×10 <sup>-1</sup>	565.3	2.44
-24	69.85	6.12×10 <sup>-1</sup>	5.169×10 <sup>-1</sup>	4.31×10 <sup>-1</sup>	690.2	3.0
-22	85.02	7.37×10 <sup>-1</sup>	6.291×10 <sup>-1</sup>	5.24×10 <sup>-1</sup>	840.2	3.64
-20	103.2	8.89×10 <sup>-1</sup>	7.629×10 <sup>-1</sup>	6.37×10 <sup>-1</sup>	1019	4.41
-18	124.8	1.06	9.225×10 <sup>-1</sup>	7.69×10 <sup>-1</sup>	1233	5.34
-16	150.6	1.274	1.113	9.277×10 <sup>-1</sup>	1487	6.46
-14	181.1	1.520	1.339	1.116	1789	7.8
-12	217.2	1.808	1.606	1.338	2145	9.24
-10	259.7	2.144	1.921	1.600	2566	11.5
-8	309.7	2.543	2.292	1.912	3060	13.3
-6	368.5	2.930	2.725	2.221	3640	15.75
-4	437.2	3.526	3.233	2.696	4318	18.72
-2	517.3	4.141	3.827	3.191	5111	22.14
0	610.7	4.847	4.517	3.770	6033	26.0
2	705.5	5.558	5.215	4.360	6962.4	30.13