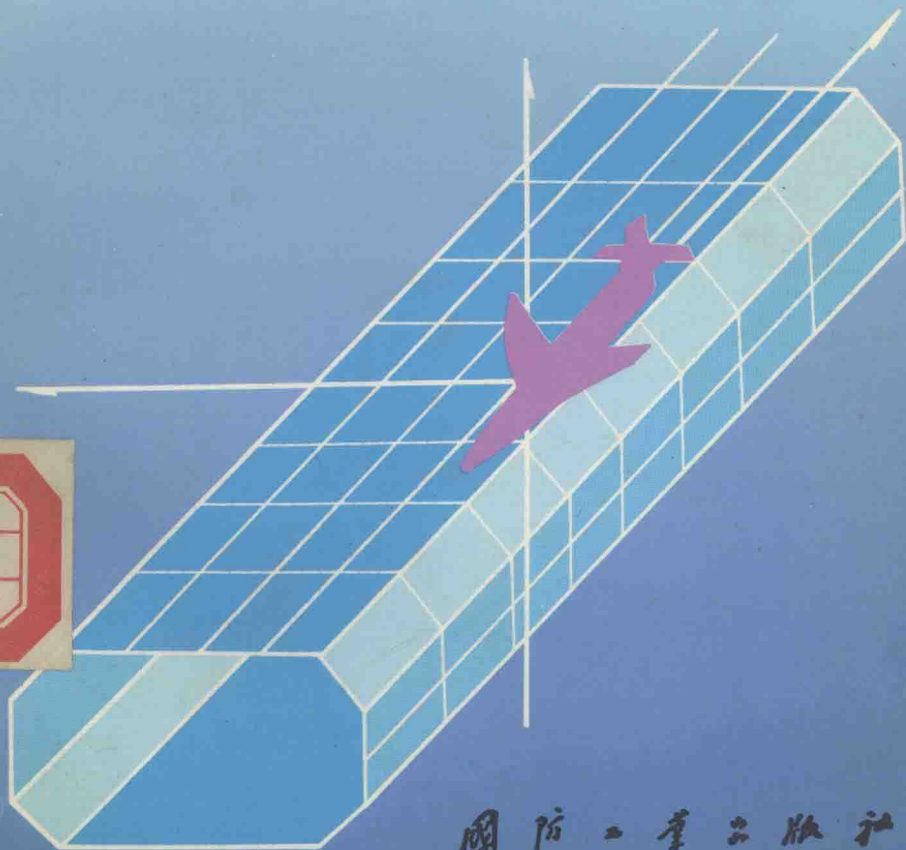


# 风洞实验数据的误差 与修正

FENGDONG SHIYAN SHUJU DE  
WUCHA YU XIUZHENG

恽起麟 编著



国防工业出版社

# 风洞实验数据的误差与修正

恽起麟 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

风洞实验数据的误差与修正/恽起麟编著. —北京:国防工业出版社, 1996. 1

ISBN 7-118-01408-7

I. 风… II. 恽… III. 风洞试验-实验数据-误差控制技术 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 16474 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{7}{8}$  307 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 15.30 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 前 言

风洞实验的主要任务是正确模拟气流流过实物的流态并提供精确的实验数据。风洞实验数据精确与否直接关系到飞行器(或其他做实验的物体,如桥梁、高层建筑等)设计方案的取舍、研制的成败。此外,精确的风洞实验数据是建立复杂流场的流动模型,验算计算方法的依据。因此,国内外的风洞实验研究工作者、飞行器设计者、各类有关风工程实验研究工作者以及空气动力理论研究、数值计算工作者都十分关注风洞实验数据的精确度及其修正与使用方法。

风洞实验是一项复杂的空气动力实验,从实验准备到最后给出实验数据要经过许多环节,由于实验方法不完善,实验设备不精确,周围环境影响以及实验人员的主观因素等,都会给实验数据带来误差。此外,一般情况下,风洞模型未能完全模拟飞行器,风洞实验环境未能完全模拟飞行器的飞行环境,致使风洞实验数据必须进行修正后方可用于飞行器设计。因此,了解风洞实验数据误差产生的原因,掌握减小其误差的方法以及了解风洞实验数据应用到飞行器飞行状况的修正与使用方法是至关重要的。

尽管国内外在这一领域已进行了大量的研究工作,但至今尚没有一本较为全面、系统地阐述风洞实验数据的误差与修正方法的著作。为此,作者仅根据本人从事风洞实验研究近四十年来积累的经验 and 国内外有关这方面的研究成果,编著此书,以期望对从事气动力实验研究的科技工作者有所裨益。

全书共分八章。第一章系统、扼要地介绍了误差理论基本知识,给出了风洞实验数据误差的计算公式;第二章对风洞实验数据误差做了理论分析,阐述了提高风洞实验数据精度的主要方法;第

三章给出了国内、外用于风洞实验的标准模型及其实验结果；第四章介绍了风洞实验数据除风洞洞壁干扰、支架干扰和雷诺数效应外的其余各项的修正方法；第五、六和七章则专门介绍风洞洞壁、支架和雷诺数对风洞数据的影响及其修正方法；最后一章给出了国内、外经各项修正后的风洞模型实验数据与飞行器飞行值的比较并对风洞与飞行相关性作了简要评述。

风洞实验数据的修正与使用是一个工程应用性很强的领域，目前尚在不断的发展与完善中。国内外飞机公司一般都有根据自己的长期实践经验所建立的风洞实验数据修正与使用方法。本书不可能全部概括这些内容。再加之作者水平有限，书中定有不少错误和不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正。

本书每章后都附有大量的参考文献，便于读者对所感兴趣的问题作进一步了解。本书除大量引用了国外的研究成果外，还大量引用了中国空气动力研究与发展中心、哈尔滨空气动力研究所、沈阳空气动力研究所、北京空气动力研究所、南京航空航天大学、西北工业大学等单位在国防科工委空气动力协作攻关办公室风洞实验组召集的各类学术交流会议上发表的论文和其他有关的论文。在此，向本书所引用的实验研究结果的作者致以真诚的谢意。

中国空气动力研究与发展中心黄序高级工程师、吴慰祖研究员、江桂清研究员仔细审阅了全书的初稿，范召林高级工程师审阅了第五章初稿，提出了许多宝贵意见和建议，邓红俊工程师对本书修改稿做了文字校核，在此向他们表示诚挚的谢意。

作者

于中国空气动力研究与发展中心

1994年5月

# 目 录

第一章 误差理论 .....	1
1 误差的基本概念 .....	1
1.1 误差的定义 .....	1
1.2 误差的来源 .....	2
1.3 误差的分类 .....	3
1.4 不确定度与置信概率 .....	4
1.5 舍入误差与有效数字 .....	5
2 随机误差 .....	6
2.1 随机误差的特性 .....	6
2.2 随机误差的正态分布 .....	7
2.3 正态分布的数值特征 .....	8
2.4 随机误差的 $t$ 分布 .....	13
2.5 随机不确定度(极限误差) .....	16
2.6 被测量真值的区间估计 .....	17
2.7 权与不等精度测量 .....	17
2.8 随机误差计算举例 .....	19
3 系统误差 .....	22
3.1 系统误差的特性及分类 .....	22
3.2 系统误差的判别方法 .....	23
3.3 系统误差的消除 .....	26
4 可疑测量值的舍取准则 .....	29
4.1 格拉布斯准则 .....	29
4.2 $t$ 检验准则 .....	30
4.3 坏值剔除举例 .....	31
5 误差的合成与分配 .....	32
5.1 误差的合成 .....	32

5.2	间接测量中的误差 .....	35
5.3	误差的分配 .....	37
6	风洞实验数据误差计算公式 .....	37
6.1	气流参数误差计算公式 .....	38
6.2	模型迎角、侧滑角误差计算公式 .....	39
6.3	压力系数误差计算公式 .....	40
6.4	气动力(力矩)系数误差计算公式 .....	40
6.5	风洞实验数据误差计算举例 .....	43
	参考文献 .....	46
<b>第二章 风洞实验数据的精度 .....</b>		<b>47</b>
1	风洞实验数据精确度对预测飞行器性能的影响 .....	47
2	对风洞实验数据精确度的要求 .....	48
2.1	国外对风洞实验数据精确度的要求 .....	48
2.2	国内对风洞实验数据精度的要求 .....	51
3	风洞实验数据误差的理论分析 .....	53
3.1	气流参数误差 .....	53
3.2	压力系数误差 .....	57
3.3	力和力矩系数误差 .....	57
4	提高风洞实验数据精度的主要方法 .....	68
4.1	提高天平的精确度 .....	68
4.2	提高迎角测量的精确度 .....	72
4.3	提高压力测量的精确度 .....	73
4.4	减小风洞气流温度变化对实验数据的影响 .....	74
4.5	提高控制系统和数据采集系统的精确度 .....	75
4.6	提高模型加工质量 .....	76
4.7	降低气流脉动及其对实验数据的影响 .....	77
4.8	减小模型振动 .....	80
4.9	采用能获得高精度实验数据的风洞运行方式 .....	82
4.10	建立完善的自动校正、检查及监视系统 .....	83
5	国外风洞实验精度 .....	84
5.1	压力分布测量精度 .....	84
5.2	力和力矩测量精度 .....	84

6	国内风洞实验精度 .....	88
6.1	国内低速风洞实验精度 .....	88
6.2	国内高速风洞实验精度 .....	90
	参考文献 .....	96
<b>第三章 标准模型实验 .....</b>		<b>98</b>
1	国外风洞标模及其实验结果 .....	99
1.1	AGARD 标准模型 .....	99
1.2	ONERA 标准模型 .....	105
1.3	DFVLR-F4 翼-身组合体标模 .....	116
1.4	NACA0012 翼型标模 .....	118
1.5	AGARD 喷流标模 .....	126
1.6	动导数标模 .....	128
1.7	谐振压力测量标模 .....	132
2	国内风洞标模及其实验结果 .....	136
2.1	国内高速和低速风洞标模编号和几何外形 .....	137
2.2	GBM-01 标模实验结果 .....	138
2.3	GBM-03 标模实验结果 .....	139
2.4	GBM-04 标模实验结果 .....	139
2.5	DBM-01 标模实验结果 .....	142
2.6	NACA0012 翼型标模实验结果 .....	142
2.7	AGARD 喷流标模实验结果 .....	144
	参考文献 .....	145
<b>第四章 风洞实验数据的修正与使用 .....</b>		<b>147</b>
1	测量仪器系统误差的消除与修正 .....	148
1.1	天平系统误差的消除与修正 .....	148
1.2	压力测量系统误差的消除与修正 .....	152
1.3	模型姿态角测量系统误差的消除与修正 .....	153
2	风洞气流品质的影响及修正 .....	153
2.1	参考点速度( $Ma$ 数)的确定和修正 .....	154
2.2	流场不均匀的影响及修正 .....	154
2.3	气流湿度的影响 .....	162
3	模型几何外形的影响及修正 .....	164



3.1	模型尾部放大的修正 .....	165
3.2	表面粗糙度和附加物阻力的修正 .....	166
3.3	模型加工和安装误差的影响 .....	168
4	进气影响及修正 .....	170
5	喷流影响及修正 .....	175
6	静气动弹性影响及修正 .....	178
	参考文献 .....	182
<b>第五章</b>	<b>洞壁干扰及其修正 .....</b>	<b>184</b>
1	基本概念 .....	185
1.1	洞壁干扰的概念及术语 .....	185
1.2	洞壁边界条件 .....	187
2	实验修正方法 .....	189
3	映象法 .....	191
4	涡格法 .....	198
5	壁压信息法 .....	204
5.1	壁压信息法用于求解低速洞壁干扰 .....	205
5.2	壁压信息法用于求解高速洞壁干扰 .....	208
6	各类模型实验的洞壁干扰及其修正 .....	216
6.1	翼型实验 .....	216
6.2	模型大迎角实验 .....	217
6.3	地面效应实验 .....	219
6.4	非流线体模型实验 .....	220
6.5	螺旋桨实验 .....	220
6.6	直升机旋翼实验 .....	222
6.7	动导数实验 .....	224
6.8	非定常压力分布测量 .....	225
6.9	颤振实验 .....	226
7	侧壁边界层的影响及修正 .....	228
7.1	侧壁边界层对二维翼型实验结果的影响 .....	228
7.2	侧壁边界层干扰修正 .....	228
7.3	侧壁边界层控制 .....	231
8	自适应壁风洞——无洞壁干扰的风洞 .....	233

参考文献 .....	240
<b>第六章 支架干扰及其修正 .....</b>	<b>243</b>
1 支架的型式及其干扰 .....	243
1.1 模型支架系统的技术要求 .....	243
1.2 低速风洞常规测力(压)实验的支架型式及其干扰 .....	244
1.3 高速风洞常规测力(压)实验的支架型式及其干扰 .....	252
1.4 模型大迎角实验的支架型式及其干扰 .....	256
1.5 喷流实验的支架型式及其干扰 .....	258
1.6 单独机翼实验的支架型式及其干扰 .....	261
1.7 动稳定性导数实验的支架型式及其干扰 .....	262
1.8 旋转天平实验的支架型式及其干扰 .....	264
2 支架干扰的修正方法 .....	265
2.1 实验修正方法 .....	265
2.2 工程估算修正方法 .....	268
2.3 数值计算修正方法 .....	268
3 磁悬挂天平系统——无支架干扰的实验方法 .....	270
3.1 概述 .....	270
3.2 磁悬挂天平系统(MSBS)的原理及其组成 .....	271
3.3 磁悬挂天平系统的应用 .....	271
参考文献 .....	273
<b>第七章 雷诺数效应及其修正 .....</b>	<b>276</b>
1 雷诺数效应 .....	277
1.1 雷诺数效应的分类 .....	277
1.2 雷诺数对翼型气动特性的影响 .....	277
1.3 雷诺数对大展弦比飞机气动特性的影响 .....	278
1.4 雷诺数对小展弦比飞机气动特性的影响 .....	281
1.5 雷诺数对机(弹)身气动特性的影响 .....	283
1.6 雷诺数对非常气动特性的影响 .....	287
1.7 伪雷诺数效应 .....	293
2 风洞实验的雷诺数模拟 .....	296
2.1 雷诺数模拟准则 .....	296
2.2 模型边界层的固定转换 .....	298

2.3	模型边界层的后固定转换 .....	300
2.4	模型边界层控制 .....	302
2.5	提高气流湍流度与噪声 .....	303
3	雷诺数修正 .....	304
3.1	雷诺数修正方法 .....	305
3.2	雷诺数修正实例 .....	312
4	高雷诺数风洞 .....	318
4.1	高雷诺数风洞的型式 .....	318
4.2	低温高雷诺数风洞 .....	319
4.3	美国国家跨音速设备 NTF 简介 .....	321
4.4	欧洲跨音速风洞 ETW 简介 .....	322
	参考文献 .....	322
<b>第八章 风洞实验数据与飞行数据的相关性 .....</b>		<b>325</b>
1	风洞实验数据与飞行数据相关的计算系统 .....	325
1.1	飞机推力与阻力的计算系统 .....	326
1.2	飞机的阻力计算系统 .....	329
1.3	飞机的推力计算系统 .....	330
2	国内风洞实验数据与飞行数据的比较 .....	332
3	国外风洞实验数据与飞行数据的比较 .....	334
3.1	压力分布 .....	334
3.2	升阻特性 .....	335
3.3	后体阻力和底部阻力 .....	338
3.4	纵向和横向力矩特性 .....	340
3.5	舵面效率 .....	340
3.6	铰链力矩 .....	343
3.7	减速板气动特性 .....	344
3.8	进气道性能 .....	345
3.9	外挂物气动特性 .....	346
3.10	地面效应 .....	348
3.11	抖振边界 .....	348
3.12	尾旋特性 .....	351
3.13	直升机旋翼性能 .....	351

3.14 导弹气动特性 .....	354
3.15 航天飞机气动特性 .....	355
4 风洞实验数据与飞行数据相关性的评述 .....	358
参考文献 .....	362

# 第一章 误差理论

实验结果都具有误差。误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中。

风洞实验是一项复杂的空气动力实验,从实验准备到最后给出实验数据要经过许多环节,由于实验方法不完善,实验设备不精确,周围环境影响以及实验人员的主观因素等,都会给实验数据带来误差。正确处理实验数据,给出实验数据的误差,合理选用实验仪器、条件及方法,得到所要求的精确度数据,对于风洞实验具有头等重要意义。它涉及到所观测的气动规律是否准确、可靠;所研制的飞行器是否安全、经济。举一个古典的力学例子:牛顿因为月球加速度的测量值与他的理论要求值相差约 10%,而推迟 20 年发表他的引力理论。牛顿显然没有想到,在他的计算中用到的地球半径的实验值的误差会达到如此大的程度。应记住:有精确度很差的实验数据还不如没有实验数据。

目前,国内外关于误差的名词、术语尚不统一,本书采用当前高、低速风洞实验通用的名词、术语。

## 1 误差的基本概念

### 1.1 误差的定义

误差或绝对误差是指某物理量的给出值与客观真实值(真值)之间的差异。

$$\text{误差} = \text{给出值} - \text{真值}$$

给出值包括测量值、标称值、示值及计算近似值等。真值是一个客观存在的理想值。在某些特定情况下,真值是已知的(例如,平面三

角形三内角之和为  $180^\circ$ , 圆的面积等于  $\pi r^2$  等); 而一般情况下, 真值是未知的。常用约定真值或实际值来代替真值。例如, 根据 1983 年国际计量大会决议, 计量学约定真值: 米是光在真空中于  $1/299792458$  秒的时间间隔内所经过的距离。实际工作中, 通常把高精度测量值或在无系统误差条件下多次重复测量的算术平均值作为实际值代替真值。

相对误差是绝对误差与真值之比。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真 值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{给出值}}$$

例如, GBM-04 标模,  $Ma=0.8$ , 零升阻力系数测量值  $c_{z_0}=0.0168$ , 测量误差  $\Delta c_{z_0}=0.0003$ , 其相对误差是

$$\frac{\Delta c_z}{c_z} = \frac{0.0003}{0.0168} = 1.8\%$$

引用误差是仪器仪表的示值误差与其最大刻度值(满刻度值)之比, 即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{最大刻度值}}$$

例如电工仪表的精度分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 七级, 对  $S$  级仪表( $S$  指七级中的任一级), 其最大引用误差不会超过  $S\%$ 。

## 1.2 误差的来源

风洞实验数据的误差主要来自以下几个方面:

(1) 环境误差。模型在风洞中实验未能完全模拟飞行器在大气中飞行的环境所导致的误差。例如, 风洞试验段流场不均匀、洞壁干扰、支架干扰及雷诺数效应等引起的误差。

(2) 实验装置和仪器仪表误差。如风洞模型姿态角机构误差、压力测量系统误差、天平误差等。

(3) 方法误差。如风洞实验数据修正公式不准所引起的误差, 实验数据的曲线拟合, 经验公式函数类型的选择, 公式中各系数的确定所导致的误差。

(4)人员主观因素引起的误差。如读数、记数、测量等错误导致的误差。

### 1.3 误差的分类

误差可按其性质分为系统误差、随机误差及粗差三类。

(1)系统误差。系统误差是在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号均保持恒定;或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差。如风洞试验段的气流偏角、洞壁干扰及支架干扰等给实验数据带来的误差就是系统误差。衡量系统误差大小本书用准度,有的文献用正确度(Correctness)或准确度。

(2)随机误差(Random error)。随机误差又叫偶然误差(Accidental error)。它是在实际相同条件下多次测量同一量时,误差时大时小、时正时负,不可预定,但却呈现统计规律并具有抵偿性的误差。如读数不一致,仪器、环境条件的变化都可能产生随机误差。衡量随机误差大小本书用精度,有的文献称精密度、精确度或重复性等。常用的英语词汇是 precision, repeatability, fidelity。

(3)粗差(parasitic error)。粗差又叫过失误差。它是明显歪曲测量结果的误差。如测错、读错、记错、实验条件搞错等都会带来粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值。在正确的测量结果中是不允许粗差存在的,即所有的坏值都应剔除(见本章第4节)。所以,要估计的实验数据误差只有系统误差和随机误差两类。

随机误差与系统误差的合成称综合误差或总误差(Composite error)。衡量综合误差的大小本书用精确度(accuracy),有的文献称精准确度或准确度。

随机误差、系统误差在一定条件下可以转换。例如,不同风洞、不同天平所测飞行器模型气动力系数的差异是系统误差,但飞行器设计者通常把它当作随机误差来处理;砝码重量的误差对于制造砝码者来说是随机误差,但它作为标准重量去衡量一物体时就会造成系统误差。至于粗差与随机误差,它们之间也没有一个绝对的界限。例如,对一组测量值中某一个偏大的测值,当置信概率取

得大时,它就可能被判作正常值予以保留;当置信概率取得小时,就可能判作坏值予以剔除(见本章第4节)。对一项精密实验的要求是:消灭粗差、修正系统误差,控制随机误差。

精度与准度的差别通常可用打靶的例子来说明(图1-1)。图

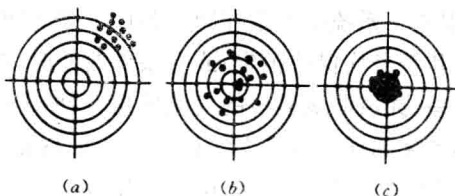


图 1-1 精度和准度说明图

(a)、(b)、(c)表示三个射手的打靶成绩:图(a)表示精度高,即随机误差小,但均偏离靶心,有系统误差,即准度低;图(b)的精度较图(a)的低,但准度较图(a)的高;图(c)表示精度和准度都高,随机误差和系统误差都小,即精确度高。

#### 1.4 不确定度与置信概率

在测量中常要求估计误差的上限。设测量值为 $x$ ,真值为 $A_0$ ,误差的上限值 $U$ 可表示成

$$U = |x - A_0|_{\max} \quad (1-1)$$

这个上限值 $U$ 通常称为不确定度(uncertainty),也叫置信限。它是估计出的极限误差。若 $x$ 值只有随机误差而无系统误差,则此上限值 $U$ 称为随机不确定度;若 $x$ 值既有随机误差又有系统误差,则此上限值 $U$ 称为总不确定度,有时也简称为不确定度。不确定度是由估计得到的,估计的可信程度一般用概率表示,这种概率称为置信概率。

对于同一个测量结果,如 $U$ 值估计较小,则实际上 $|x - A_0|$ 不小于 $U$ 的可能性就较大;反之,若 $U$ 值估计较大,则 $|x - A_0|$ 不大于 $U$ 的可能就较大,此估计就较为可信。如果说 $|x - A_0| \rightarrow \infty$ ,此估计



就 100% 可信。因此可以看出,置信限愈宽,则置信概率愈大。然而,如果置信限给得很大,测量的结果就毫无意义了。置信概率取多大值才合适,这取决于测量的目的及测量结果的用途。在一般工程问题中,最常用的置信概率为 0.90, 0.95 与 0.99。风洞实验的置信概率常用 0.95。

### 1.5 舍入误差与有效数字

在测量和数字计算中,应该正确使用有效数字来表示测量或计算结果的误差。例如,  $Ma$  数的测量误差为 0.001, 实验所测  $Ma$  数为 0.786, 其含义是  $Ma$  数测值在  $0.7855 \leq Ma \leq 0.7865$  范围内, 其有效数字为 3 位, 它正确反映了测量的精度。若将所测  $Ma$  数的有效位数增加到 6 位, 如  $Ma = 0.796247$ , 则没有任何意义, 因为小数点后面第 4 位已是不准确的了; 若将所测  $Ma$  数表示为 0.8, 只取一位有效数字, 它表示  $0.795 \leq Ma \leq 0.805$ , 显然, 这降低了测量精度。

有效位数与小数点后面的位数多少无关。例如, 长度 5.2mm 与 0.0052m 均为两位有效数字, 其精度完全相同。当有效数字确定后, 例如为  $n$ , 则  $n+1$  位数采用小于 5 舍去, 大于 5 进入, 等于 5 则  $n$  位数为偶数(包括零)舍去,  $n$  位数为奇数进入。例如,  $Ma$  数为 0.7855 和 0.7865, 取三位有效数字, 则均应为 0.786。

有效数值在运算中应遵循以下法则:

①在加减计算中, 各数所留的小数点后的位数, 应与所给各数中, 其小数点后位数最少的相同(A 法则)或比小数点后位数最少的多一位(B 法则)。一般情况采用 A 法则, 当加减运算的项数较多, 且小数点后位数较小的项数相对较少时, 可采用 B 法则, 这样可使运算的精度稍高一些。

②在进行乘除计算中, 所得积或商所取位数, 应不多于各值中有效数字位数最少者位数。例如,  $4.2 \times 3.1416 = 13$ 。

③计算平均值时, 若为 4 个数或超过 4 个数取平均, 则平均值的有效数字可增加一位。