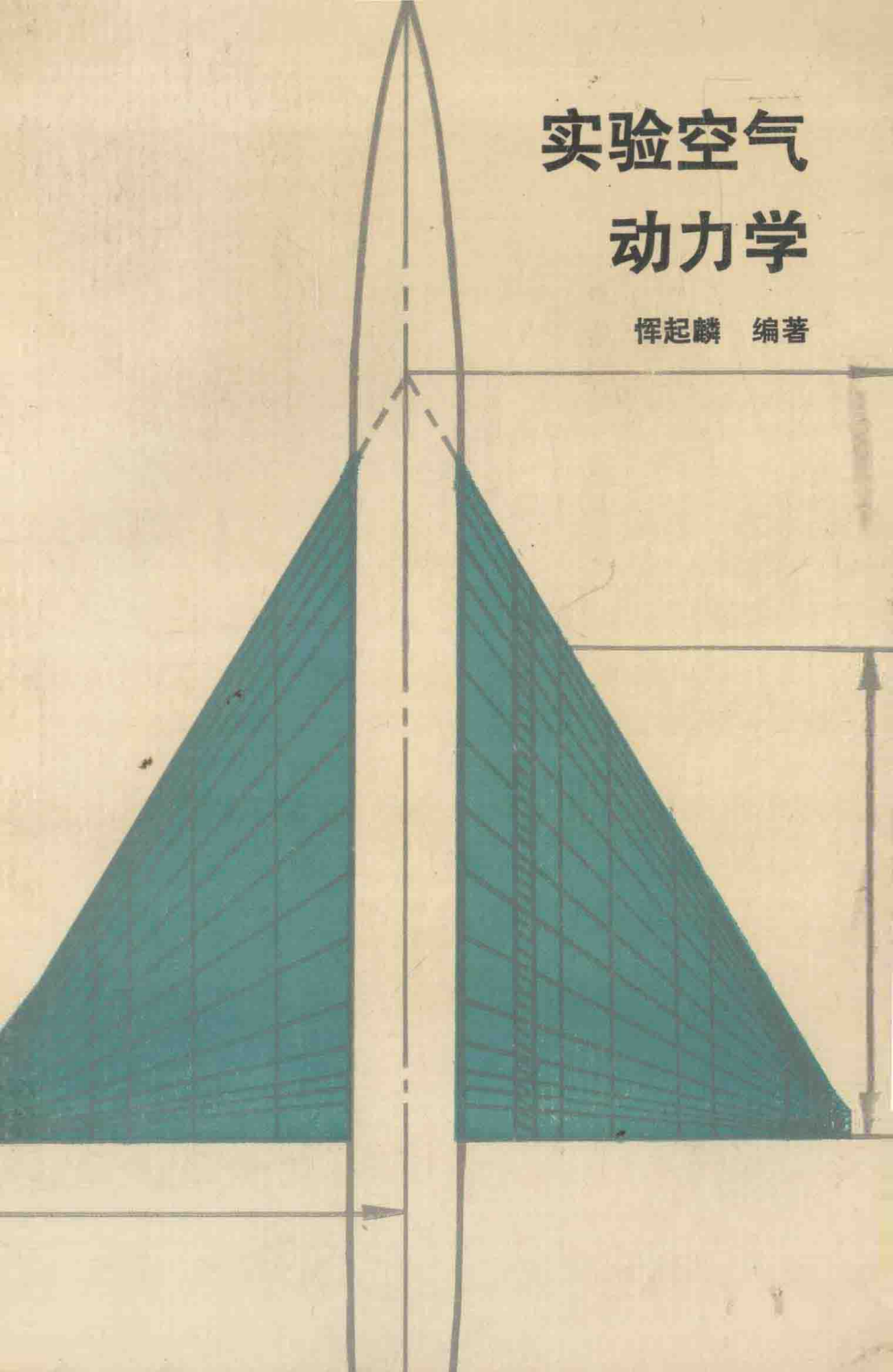


实验空气 动力学

恽起麟 编著



实验空气动力学

恽起麟 编著

国防工业出版社。

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书主要介绍低速、亚声速、跨声速及超声速风洞实验的有关内容,包括实验的基本理论、原理;国内外典型风洞性能;风洞流场校测;实验数据的精确度;各种风洞模型实验的目的、方法和结果;气流绕模型流场的显示与观测以及风洞实验数据的修正与使用。书中给出了大量国内外近期的风洞实验数据、曲线及图表。

本书的主要对象是:航空高等院校的教师、研究生、高年级学生以及从事风洞实验、空气动力学研究、飞行器设计的工程技术人员。

实验空气动力学

恽起麟 编著

*

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)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张14⁵/₈ 381千字

1991年12月第一版 1991年12月北京第一次印刷 印数: 0001—1000册

ISBN 7-118-00898-2/V·67 定价: 14.20元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；紧密结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，紧密结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。
4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革

IV

开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展而更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

前 言

实验空气动力学是采用实验的方法观察和研究空气流动现象，测量空气和物体相对运动时的相互作用的物理量，并探索空气流动规律的一门学科。空气动力实验方法有：风洞实验、飞行实验、火箭车实验、弹射实验、旋臂机实验、自由落体实验等多种，其中最广泛采用的方法是风洞实验。

自从 1891 年韦纳姆 (Frank H. Wenhan) 建造了世界上第一座风洞以来，特别是近 20 年来，由于电子计算机、激光、热线、液晶、光导以及微电子测试等先进技术应用于风洞实验，使风洞及其实验技术得到了飞跃的发展。风洞在性能先进的军用飞机、经济而舒适的民用飞机以及各种航天飞行器的研制中发挥了重要作用，为各类型飞行器的设计提供了精确的空气动力实验数据。此外，风洞实验还为揭示流动现象的机理，发展空气动力学，为验证理论分析和数值计算结果作出了重要贡献。

本书主要介绍低速、亚声速、跨声速以及超声速风洞实验的有关内容，包括实验的基本理论；国内外典型风洞性能；风洞流场校测；实验数据的精确度；各种风洞模型实验的目的、方法和结果；气流绕模型流场的显示与观测以及风洞实验数据与飞行数据的相关性——风洞数据的修正与使用等。书中除了讲述风洞实验的基本理论、原理外，侧重介绍了当前国内外广泛采用的及最新的风洞实验方法和技术，并给出了大量近期的国内外风洞实验数据、曲线及图表，力图给读者介绍更多、更新、更实际的知识。对于一般的风洞原理、功用、结构、测量仪器等内容在已出版的国内外有关风洞实验的书中均可以找到，本书不再重复。

本书每章后都附有参考文献，便于读者对所感兴趣的问题作进一步了解。本书大量引用了中国气动力研究与发展中心的内部

技术报告；引用了北京空气动力研究所、哈尔滨空气动力研究所、沈阳空气动力研究所、南京航空学院、西北工业大学、北京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所发表的技术报告以及其它有关的技术报告。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、沈礼敏高级工程师以及北京航空航天大学连淇祥教授对本书的初稿提出了宝贵的意见和建议，在此向他们表示感谢。

希望本书对我国实验空气动力学的发展能起到一点促进作用。由于作者水平有限，书中一定有许多缺点和错误，诚恳地欢迎读者批评指正。

作 者

于中国空气动力研究与发展中心

1990年6月

国防科技图书出版基金
第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德

(按姓氏笔画排列)何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘书长：刘琯德

目 录

第一章 实验的基本理论	1
§1 相似理论	1
1.1 量纲分析	2
1.2 相似定理	6
1.3 流体力学中常用的相似准则	9
§2 误差理论	12
2.1 误差的基本概念	13
2.2 随机误差	15
2.3 系统误差	19
2.4 粗差	22
2.5 间接测量中的误差	23
2.6 误差的合成	28
§3 实验数据处理	28
3.1 最小二乘法	28
3.2 经验公式	29
3.3 回归分析法	32
参考文献	36
第二章 风洞概况	38
§1 风洞发展简史	38
§2 国内风洞概况	44
§3 国外风洞概况	49
§4 高雷诺数风洞	68
4.1 雷诺数对飞行气动特性的影响	68
4.2 高雷诺数风洞的型式	75
4.3 低温高雷诺数风洞	79
§5 国内外典型风洞性能	86
5.1 CARDC FL-13风洞	86
5.2 CARDC FL-24风洞	86
5.3 NASA阿姆斯24.38m × 36.58m风洞	89

X

5.4	DNW风洞	90
5.5	DFVLR低温低速风洞(KKK)	91
5.6	AEDC 4.88m跨声速风洞	92
5.7	FFA T1500跨声速风洞	94
5.8	美国国家跨声速设备 NTF	96
5.9	欧洲跨声速风洞 ETW	98
5.10	AEDC 4.88m超声速风洞(16S)	101
	参考文献	101
第三章 风洞的气流品质及其影响因素		103
§ 1	流场校测项目	103
1.1	低速风洞流场校测项目	103
1.2	高速风洞流场校测项目	104
§ 2	风洞流场标准和要求	104
2.1	国外风洞流场标准和要求	104
2.2	国内风洞流场标准和要求	107
§ 3	流场校测仪器	111
3.1	对流场校测仪器的要求	111
3.2	流场校测仪器和模型	112
§ 4	流场校测方法和数据处理	116
4.1	低速风洞流场校测方法和数据处理	116
4.2	高速风洞流场校测方法和数据处理	120
§ 5	影响风洞气流品质的主要因素及改善气流品质的方法	123
5.1	影响速度场、方向场均匀性的主要因素及提高均匀性的方法	123
5.2	影响气流湍流度的主要因素及减小湍流度的方法	136
5.3	影响气流噪声的主要因素及降低气流噪声的方法	139
§ 6	国内外风洞的气流品质	145
6.1	国内外低速风洞稳态气流品质	145
6.2	国内外低速风洞动态气流品质	146
6.3	国内外高速风洞稳态气流品质	148
6.4	国内外高速风洞动态气流品质	151
§ 7	风洞气流品质对实验数据的影响	157
7.1	风洞稳态气流品质对实验数据的影响	157
7.2	风洞动态气流品质对实验数据的影响	161
	参考文献	171
第四章 风洞实验数据的精确度		173
§ 1	对风洞实验数据精度的要求	173

§ 2 国内风洞实验精度	177
2.1 国内低速风洞实验精度	177
2.2 国内高速风洞实验精度	179
§ 3 国外风洞实验精度	185
3.1 压力分布测量精度	185
3.2 测力实验精度	186
§ 4 影响风洞实验数据精度的主要因素及提高实验精度的 方法	190
4.1 天平测量精度	191
4.2 迎角测量精度	193
4.3 压力测量精度	193
4.4 控制系统及数据采集系统的精度	194
4.5 模型加工质量及模型振动的影响	195
4.6 气流脉动的影响	199
4.7 不同实验方式的影响	201
4.8 建立完善的自动校正、检查及监视系统	202
§ 5 风洞实验数据的准度	202
5.1 国外高速风洞标模及其实验结果	203
5.2 国内低速风洞标模及其实验数据	210
5.3 国内高速风洞标模及其实验数据	214
§ 6 影响风洞实验数据准度的主要因素	220
6.1 模型	220
6.2 测量仪器的系统误差	220
6.3 洞壁干扰	222
6.4 支架干扰	223
参考文献	226
第五章 风洞模型实验	227
§ 1 模型设计	227
1.1 低速模型设计	228
1.2 高速模型设计	231
§ 2 全机测力实验	236
§ 3 压力分布测量	240
§ 4 半模型实验	243
4.1 反射平板法	243
4.2 垫块法	246
4.3 边界层抽吸及吹除法	250

XII

4.4	涡流发生器法	251
§ 5	进气道实验	252
§ 6	通气模型实验	257
§ 7	喷流实验	260
7.1	实验目的	260
7.2	相似参数	260
7.3	实验模型及装置	264
7.4	实验结果	267
§ 8	二元翼型实验	267
§ 9	铰链力矩实验	271
§ 10	投放模型实验	273
10.1	相似准则	274
10.2	模型	277
10.3	实验设备	277
10.4	实验结果	281
§ 11	可控轨迹实验	281
§ 12	空速管校准	287
§ 13	降落伞实验	288
§ 14	带动力装置的模型实验	291
14.1	螺旋桨及带螺旋桨的全机模型实验	291
14.2	涡轮发动机动力模拟实验	294
§ 15	弹射救生系统实验	297
§ 16	静弹性实验	298
§ 17	马格努斯力实验	301
§ 18	动稳定性导数实验	304
18.1	自由振动法	305
18.2	强迫振动法	308
§ 19	风载实验	310
§ 20	抖振实验	313
§ 21	嗡鸣实验	316
§ 22	非定常压力分布测量	318
§ 23	颤振实验	323
23.1	相似准则及实验模型	323
23.2	实验方法	324
23.3	实验结果	326

§ 24 风洞自由飞实验	327
参考文献	331
第六章 流场显示与观测技术	332
§ 1 常用的流场显示与观测技术	334
1.1 烟流	334
1.2 染色线	335
1.3 丝线	336
1.4 烟屏和蒸汽屏	337
1.5 气泡	338
1.6 表面油流	339
1.7 升华	340
1.8 液晶	341
1.9 光学显示	341
1.10 压力彩色流场显示	344
1.11 计算机模拟的流动显示	345
§ 2 热线风速仪	346
2.1 概述	346
2.2 热线(膜)探头及热线风速仪	347
2.3 热线风速仪的基本原理	349
2.4 热线风速仪的校准	354
2.5 热线风速仪的应用	359
§ 3 激光测速仪	372
3.1 概述	372
3.2 激光测速仪的基本原理	373
3.3 激光测速仪的组成	375
3.4 激光测速仪的光路结构	376
3.5 散射粒子	379
3.6 激光测速仪的应用举例	382
参考文献	385
第七章 风洞实验数据的修正与使用	387
§ 1 风洞流场不均匀的影响及修正	388
1.1 流场的稳态不均匀的影响及修正	388
1.2 流场动态不均匀的影响	389
§ 2 洞壁干扰的影响及修正	391
2.1 概述	391
2.2 洞壁干扰的实验修正方法	394
2.3 映象法	395

XIV

2.4	有限基本解法	398
2.5	壁压信息法	403
2.6	自修正风洞	412
§ 3	支架干扰的影响及修正	421
3.1	腹部支架干扰	421
3.2	尾支架干扰	423
§ 4	雷诺数的影响及修正	429
4.1	粗糙带附加阻力的修正	429
4.2	零升阻力系数修正	430
4.3	升致阻力系数修正	433
4.4	最大升力系数修正	435
§ 5	进气影响及修正	436
§ 6	喷流影响及修正	439
§ 7	静气动弹性的影响及修正	442
§ 8	风洞实验数据修正举例	445
8.1	J7 飞机模型零升阻力系数 c_{x_0} 的修正	445
8.2	J7 飞机模型航向安定性导数 m_y^β 的修正	449
	参考文献	453

第一章 实验的基本理论

当人们想要作某项实验时，首先遇到的问题是：如何进行实验？要测量哪些参数？如何整理和使用所获得的实验数据等。相似理论给出了这些问题的正确答案，它是整个空气动力实验的理论基础。任何实验都需进行参数测量，测量就必然有误差。一个优秀的实验工作者应能对所获得的实验数据的误差进行分析与评价，这就必须掌握误差理论和实验数据处理的方法。作为本书的第一章将简单介绍相似理论、误差理论及数据处理方法。遵循这些基本理论和方法就能合理、高效率地安排实验，正确分析和处理实验数据，使实验达到预期的目的。本章在介绍这些理论和方法时，着重阐述其基本概念及其应用，而对书中的公式不作推导与证明，有关这些公式的严格证明可参阅本章末所列的参考文献。

§1 相似理论

当对自然现象进行研究时，最可靠的方法是对实物进行实验和观察，但实物实验往往周期长，耗费大，有时甚至是不可能的。于是，人们就想用模型实验来代替实物实验。为了解决如何作模型实验以及模型实验的数据如何推广到实物原来的现象中去的问题，建立了相似理论。此理论回答了在进行物理模型实验时，如何正确地选择相似准则，它们的数目应最少，并且应能在最大程度上反映出被研究对象的主要物理现象，以大大减轻实验工作量。因此，掌握相似理论，用它来指导实验和处理、分析实验数据是十分重要的。

1.1 量纲分析

1.1.1 量纲的概念

自然界中，物理量之间存在着一定的联系。因此，只要选定几个物理量和它们的单位，就可通过定义或定律导出其它物理量和它们的单位。被选定的那几个量称为基本量，它们的单位称为基本单位，其它从基本量导出的量称为导出量，它们的单位称为导出单位。选定哪几个量作基本量是人为的。例如，国际单位制（SI单位制）中，力学的三个基本量是长度、质量和时间；而在工程单位制中，力学三个基本量则选用长度、力和时间。基本量的单位也是人为选定的。例如，国际单位制中，力学三个基本量的单位是“m、kg、s”。为了便于分析，在许多情况下，需要避开具体单位大小不同的因素，而用“量纲”来表示被测物理量的种类。所谓量纲是用基本量度单位表示的导出量单位的表达式。同一种类的量具有相同的量纲。譬如，在国际单位制中，力学的三个基本量纲是：长度、质量和时间，相应的量纲符号是：L、M和T，涉及热效应时再增加一个基本量纲热力学温度，相应的符号是 Θ 。物理量 a 的量纲表示为 $[a]$ 。可以证明所有物理量的量纲公式都具有幂次单项式的形式

$$[a] = L^l M^m T^t \Theta^\theta \quad (1-1)$$

式(1-1)称为量纲式， l 、 m 、 t 和 θ 称为量纲指数，这些指数可以通过有关定义和定律来确定。例如，力的量纲 $[F] = LMT^{-2}$ ，粘性系数 μ 的量纲 $[\mu] = L^{-1}MT^{-1}$ 等。空气动力学中常用有量纲物理量的量纲列在表1-1中。从表中可以看出，同类量其量纲相同，但量纲相同的不一定是同类量。例如，热量、力矩和焓三者不是同类量，但它们具有相同的量纲。一个量的量纲式中，只要有一个量纲指数不为零，则该量为有量纲量；若所有量纲指数都为零，则该量为无量纲量。无量纲量不同于纯数字，它仍具有量的特征和品质。有量纲和无量纲量是相对的。例如，加速度 a 通常认为是有量纲量， $[a] = LT^{-2}$ ，但任一加速度都可用它和

表1-1 空气动力学中常用的有量纲物理量的SI单位和量纲

物 理 量		SI 单 位			量 纲
名 称	符 号	国际符号	用其它SI单位表示的表示式	用SI基本单位表示的表示式	
长度	l	m		m	L
质量	m	kg		kg	M
时间	t	s		s	T
力	F	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	LMT^{-2}
密度	ρ	kg/m^3		$kg \cdot m^{-3}$	$L^{-3}M$
速度	v	m/s		$m \cdot s^{-1}$	LT^{-1}
加速度	a	m/s^2		$m \cdot s^{-2}$	LT^{-2}
角速度; 角频率	ω	rad/s		s^{-1}	T^{-1}
压力, 压强; 应力	p, σ, τ	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$
能; 功; 热量	E, W, Q	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	L^2MT^{-2}
功率	P	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	L^2MT^{-3}
频率	f	Hz		s^{-1}	T^{-1}
力矩	M	$N \cdot m$		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	L^2MT^{-2}
动量	p	$kg \cdot m/s$		$m \cdot kg \cdot s^{-1}$	LMT^{-1}
动量矩	L	$kg \cdot m^2/s$		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$	L^2MT^{-1}
转动惯量	J	$kg \cdot m^2$		$kg \cdot m^2$	L^2M
(动力)粘性 系数	μ	$Pa \cdot s$	$N \cdot s/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	$L^{-1}MT^{-1}$
运动粘性 系数	ν	m^2/s		$m^2 s^{-1}$	L^2T^{-1}
弹性模量	E	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$
热力学温度	T	K		K	Θ
气体常数	R	$N \cdot m/(kg \cdot K)$		$m^2 \cdot s^{-2} K^{-1}$	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
焓	S	J/K		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} K^{-1}$	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$
焓	H	J		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	L^2MT^{-2}
比热 (比热容)	c	$J/(kg \cdot K)$		$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
热导率, (导热系数)	λ	$W/(m \cdot K)$	$J/(m \cdot s \cdot K)$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$	$LMT^{-3}\Theta^{-1}$
传热系数	h	$W/(m^2 \cdot K)$	$J/(m^2 \cdot s \cdot K)$	$kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$	$MT^{-3}\Theta^{-1}$

重力加速度 g 的比值 (过载) 来确定, 过载是无量纲量。有量纲量随所选用的单位不同而改变其数值, 而无量纲量则不随所选用的单位制不同而改变其数值。量纲分析的目的之一, 就是要正确