

高等教育“十二五”规划教材

主编 魏京花 / 副主编 余丽芳 宫瑞婷 陈蕾 / 主审 黄伟

普通物理教程

第2版

(下册)

清华大学出版社

04
766-2
2

普通物理教程 **下册**

第2版

主编 / 魏京花

副主编 / 余丽芳 宫瑞婷 陈 蕾

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

《普通物理教程》(第2版)(上、下册)是根据教育部最新修订的“高等学校理工科非物理类专业大学物理课程基本要求”和国内工科物理教材改革动态,并结合编者多年从事工科物理教学的经验编写而成。其中,上册为力学篇和电磁学篇,下册为热学篇、振动与波篇、波动光学篇、量子物理基础篇及专题选读篇,全书共计7篇15章内容。每章由教学基本内容、例题、章节要点和习题四部分组成,书后附有习题答案。

本书可作为高等院校非物理专业学生物理课程的基础教材,也可作为高校物理教师、学生和相关技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

普通物理教程. 下册/魏京花主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-42402-4

I. ①普… II. ①魏… III. ①普通物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第287853号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17 字 数:410千字

版 次:2013年5月第1版 2016年1月第2版 印 次:2016年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:30.00元

产品编号:061004-01

前 言

FOREWORD

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式及相互作用和转化规律的科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,广泛应用于生产技术,是自然科学和工程技术的基础。大学物理课程是高等学校理工科各专业学生的一门重要的必修基础课,它是为提高学生的现代科学素质服务的,在培养学生现代的科学自然观、宇宙观和辩证唯物主义世界观,培养学生的探索、创新精神,培养学生的科学思维能力,掌握科学方法等方面,都具有其他课程不可替代的重要作用。

本书在内容上遵循教育部最新修订的“高等学校理工科非物理类专业大学物理课程基本要求”,在编写中力求使读者掌握物理学的基本概念和规律,建立较完整的物理思想,同时渗透人文社会科学知识,让读者活用所学知识,加强应用能力,实现知识、能力与素质协调发展。全书共分7篇:力学、电磁学、热学、振动与波、波动光学、量子物理基础及专题选读,分上、下两册出版。为了帮助学生掌握各篇内容的体系结构与脉络,每章编有章节要点并附有部分习题。书中最后附有物理学常用数据及常用数学公式以及习题答案,以方便学生查阅和使用。本书还有少量的阅读材料以开阔学生视野,拓展知识面,激发学生的学习兴趣,并启迪学生的创造性。全书讲授约需120学时。

本书由魏京花、黄伟、余丽芳、苏欣纺、聂传辉、王俊平、马黎君、宫瑞婷和陈蕾9位教师共同编写完成。全书分为7篇15章,其中第1章、第9章和第10章由魏京花编写,第2章由王俊平编写,第3章由马黎君编写,第4章由黄伟编写,第5章、第6章由苏欣纺编写,第7章由聂传辉编写,第8章、第11~13章由余丽芳编写,第14章、第15章由陈蕾编写,专题选读由宫瑞婷编写。全书由魏京花负责统稿,黄伟教授审稿并定稿。

本教材第1版于2013年5月出版,经过北京建筑大学和部分院校使用三年,基本体现了编者的初衷:难度合适、深入浅出、篇幅不大、易教易学。根据使用者反映的情况和编者在这几年使用本书授课的经验,保留原有教材框架,对原书的部分内容进行了增补修订,调整了部分习题,出版了第2版教程。

本书在编写过程中参考了近年来出版的部分优秀大学物理教材(见参考文献),同时得到北京市优秀教学团队——北京建筑大学大学物理教学团队全体教师的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,修订后书中仍不免存在错误和疏漏,恳请使用本教材的读者随时提出批评指正。

编 者
2015年9月

第 3 篇 热 学

第 9 章 气体动理论	3
9.1 平衡状态 理想气体状态方程	3
9.1.1 宏观描述与微观描述	3
9.1.2 理想气体状态方程	5
9.2 理想气体的压强公式与温度公式	6
9.2.1 理想气体分子模型与压强公式	6
9.2.2 气体分子的平均平动动能与温度的关系	10
9.3 能量按自由度均分定理 理想气体的内能	11
9.3.1 自由度	11
9.3.2 气体分子的自由度	12
9.3.3 能量均分定理	12
9.3.4 理想气体的内能	14
9.4 麦克斯韦速率分布律	15
9.4.1 麦克斯韦分子速率分布定律	15
9.4.2 气体分子速率的三种统计平均值	17
9.5 分子数按能量分布的统计规律	19
9.5.1 玻耳兹曼能量分布律	19
9.5.2 重力场中微粒按高度的分布	21
9.6 分子碰撞和平均自由程	22
9.6.1 分子的平均碰撞频率	22
9.6.2 分子的平均自由程	22
本章要点	23
习题 9	24
第 10 章 热力学基础	27
10.1 体积功 热量 内能	27
10.1.1 体积功	27
10.1.2 热量	28

10.1.3	内能	28
10.2	热力学第一定律及其应用	29
10.2.1	热力学第一定律	29
10.2.2	热力学第一定律的过程应用	29
10.3	循环过程与循环效率	34
10.3.1	循环过程	34
10.3.2	正循环、热机效率	34
10.3.3	逆循环、制冷系数	35
10.4	卡诺循环与卡诺定理	38
10.4.1	卡诺循环	38
10.4.2	卡诺定理	39
10.5	热力学第二定律	40
10.5.1	自发过程的方向性	40
10.5.2	热力学第二定律的两种表述	41
10.5.3	热力学第二定律的统计意义	41
10.6	熵与熵增原理	43
10.6.1	玻耳兹曼公式	43
10.6.2	熵增原理	43
10.6.3	克劳修斯熵公式	44
阅读材料 8	热力学第三定律	44
本章要点		47
习题 10		48

第 4 篇 振动与波

第 11 章	机械振动	55
11.1	简谐振动的概念和规律	55
11.1.1	简谐振动的动力学方程及其解——运动方程	55
11.1.2	描述简谐振动的特征量	57
11.2	旋转矢量	60
11.3	简谐振动的能量	62
11.4	阻尼振动 受迫振动和共振	63
11.4.1	阻尼振动	63
11.4.2	受迫振动	64
11.5	简谐振动的合成	65
11.5.1	同方向、同频率简谐振动的合成	66
11.5.2	同方向、不同频率简谐振动的合成 拍	67
11.5.3	相互垂直的同频率简谐振动的合成	68

阅读材料 9 非线性振动简介	69
本章要点	70
习题 11	72
第 12 章 机械波	74
12.1 机械波的产生及其特征量	74
12.1.1 机械波形成的条件	74
12.1.2 描述波动的特征量	75
12.1.3 波动的几何描述	76
12.2 平面简谐波	77
12.3 波的能量和能流	80
12.3.1 波的能量	80
12.3.2 波的能流	82
12.3.3 波的振幅	82
12.4 波的传播	83
12.4.1 惠更斯原理	83
12.4.2 波的反射与折射	83
12.4.3 波的衍射	84
12.5 波的叠加 驻波	85
12.5.1 波的叠加原理	85
12.5.2 波的干涉	85
12.5.3 驻波	87
12.5.4 半波损失	89
12.6 多普勒效应	89
阅读材料 10 声波 声强级	91
本章要点	93
习题 12	94

第 5 篇 波动光学

第 13 章 波动光学	99
13.1 光的干涉	99
13.1.1 光波、光的相干性	99
13.1.2 双缝干涉	101
13.1.3 光程和光程差	103
13.1.4 薄膜干涉	105
13.1.5 迈克耳孙干涉仪	111
13.2 光的衍射	112
13.2.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	112

13.2.2	夫琅禾费单缝衍射	112
13.2.3	光学仪器的分辨本领	116
13.2.4	衍射光栅	118
13.2.5	X射线衍射	121
13.3	光的偏振	121
13.3.1	自然光 偏振光	121
13.3.2	偏振片 起偏和检偏	122
13.3.3	马吕斯定律	123
13.3.4	反射和折射时光的偏振	124
13.3.5	双折射	125
13.3.6	偏振理论在各方面的应用	128
阅读材料 11	3D电影	128
本章要点	129
习题 13	131

第 6 篇 量子物理基础

第 14 章	量子力学的诞生	139
14.1	经典物理学的困境	139
14.1.1	黑体辐射问题	139
14.1.2	光电效应	142
14.1.3	原子光谱及其规律	144
14.2	普朗克-爱因斯坦的光量子论	146
14.2.1	普朗克量子假设	146
14.2.2	爱因斯坦方程	146
14.2.3	光的波粒二象性	148
14.2.4	康普顿散射	149
14.3	玻尔的量子理论	152
14.3.1	玻尔的量子理论简介	152
14.3.2	弗兰克-赫兹实验	155
14.4	德布罗意波 实物粒子的波粒二象性	157
14.4.1	德布罗意假设	157
14.4.2	电子衍射实验	159
本章要点	161
习题 14	162
第 15 章	量子力学基础	165
15.1	波函数和薛定谔方程	165
15.1.1	物质的粒子波动性	165

15.1.2	概率波 多粒子体系的波函数	165
15.1.3	自由粒子的一维波函数	166
15.1.4	不确定关系	167
15.1.5	薛定谔方程	169
15.2	定态问题求解	171
15.2.1	定态薛定谔方程	171
15.2.2	无限深势阱	172
15.2.3	势垒中的粒子	175
15.3	粒子在电磁场中的运动	177
15.3.1	电磁场中带电粒子的薛定谔方程	177
15.3.2	正常塞曼效应	177
15.3.3	朗道能级	178
15.4	自旋角动量	179
15.4.1	氢原子中电子的运动	179
15.4.2	电子的自旋 第四个量子数	183
15.4.3	原子的壳层结构	184
	本章要点	190
	习题 15	192

第 7 篇 专题选读

专题 I	激光技术	195
I.1	激光器概述	195
I.2	激光器的工作原理	197
I.3	激光器的应用领域	201
专题 II	光纤 光纤通信	205
专题 III	半导体	211
III.1	半导体概述	211
III.2	半导体的基本概念	213
III.3	半导体技术的未来	219
专题 IV	超导电性	221
IV.1	超导的发现及其电磁特性	221
IV.2	超导体的微观理论	225
IV.3	超导的应用	229
专题 V	新材料技术	232
V.1	纳米材料技术	233

V.2 液晶	237
附录	240
附录 A 量纲	240
附录 B 国际单位制(SI)的基本单位和辅助单位	241
附录 C 希腊字母	241
附录 D 物理量的名称、符号和单位(SI)	242
附录 E 基本物理常数表(2006年国际推荐值)	245
附录 F 常用数学公式	245
习题答案	248
索引	252
参考文献	259

第 3 篇

热 学

气体动理论

热学按研究角度和研究方法的不同,分为两种理论:一是宏观理论,称为热力学;二是微观理论,称为统计物理学。热力学不涉及物质的微观结构,只是根据由观察和实验所总结得到的热力学规律,用严密的逻辑推理方法,着重分析研究系统在物态变化过程中有关热功转换等关系和实现条件。而统计物理学则是从物质的微观结构出发,依据每个粒子所遵循的力学规律,用统计的方法来推求宏观量与微观量统计平均值之间的关系,解释并揭示系统宏观热现象及其有关规律的微观本质,本章所讲的气体动理论就属于统计物理学基础部分。热力学与气体动理论的研究对象是一致的,但是研究的角度和方法却截然不同。在对热运动的研究上,气体动理论和热力学二者起到了相辅相成的作用。热力学的研究成果,可以用来检验微观气体动理论的正确性;气体动理论所揭示的微观机制,可以使热力学理论获得更深刻的意义。

气体动理论的研究对象是分子的热运动。从微观上看,热现象是组成系统的大量粒子热运动的集体表现,它是不同于机械运动的一种更加复杂的物质运动形式。由于分子的数目十分巨大,对于大量粒子的无规则热运动,不可能像力学中那样,对每个粒子的运动进行逐个描述,而只能探索它的群体运动规律。就单个粒子而言,由于受到其他粒子的复杂作用,其具体的运动过程可以变化万千,具有极大的偶然性、无序性;但就大量分子的集体表现来看,运动却在一定条件下遵循确定的规律,正是由于这种特点,使得统计方法在研究热运动时得到广泛应用。在本章中,我们将根据气体分子的模型,从物质的微观结构出发,用统计的方法来研究气体的宏观性质和规律,及它们与微观量统计平均值之间的关系,从而揭示系统宏观性质及其有关规律的微观本质。

9.1 平衡状态 理想气体状态方程

9.1.1 宏观描述与微观描述

1. 热力学系统

热力学研究的对象是大量粒子(如原子、分子)组成的物质体系,称为热力学系统或热力学体系。处于体系之外的一切,称为外界。外界可与体系相互作用。热力学体系可分为

3类:孤立体系、封闭体系和开放体系。与外界既无物质交换也无能量交换的体系称为孤立体系,如绝热壁所包围的体系;与外界无物质交换,但有能量交换的体系称为封闭体系,如带有不漏气活塞的汽缸内的气体;与外界既有物质交换,又有能量交换的体系称为开放体系,如一个开口容器中的气体。

2. 宏观量与微观量

要研究系统的性质及其变化规律,那么就要对系统的状态加以描述。用一些物理量从整体上对系统状态进行描述的方法称为宏观描述,如用温度、压强、体积、热容等对气体的整体属性进行的描述。描述系统整体特性的可观测物理量称为宏观量。相应地,用一组宏观量描述的系统状态称为宏观态。宏观量一般为人们可观察到又可以用仪器进行测量的物理量。

任何宏观物体都是由分子、原子等微观粒子组成。通过对微粒子运动的说明来描述系统的方法称为微观描述。通常把描述单个粒子运动状态的物理量称为微观量,如粒子的质量、位置、动量、能量等。相应地,用系统中各粒子的微观量描述的系统状态称为微观态。微观量不能被直接观察到,一般也不能直接测量。

3. 气体状态参量

当系统处于平衡态时,系统的宏观性质将不再随时间变化,因此可以使用相应的物理量来具体描述系统的状态。这些物理量统称为状态参量,或简称态参量。一般用气体体积 V 、压强 p 和温度 T 来作为状态参量。下面介绍这三个状态参量。

体积: 气体的体积,通常是指组成系统的分子的活动范围,是气体分子能到达的空间体积。由于分子的热运动,容器中的气体总是分散在容器中的各个空间部分,因此,气体的体积也就是盛气体容器的容积,在国际单位制(SI)中,体积的单位是立方米,用符号 m^3 表示,常用单位还有升,用符号 L 表示。

压强: 气体的压强,是气体作用于器壁单位面积上的正压力,是大量气体分子频繁碰撞容器壁产生的平均冲力的宏观表现。压强与分子无规则热运动的频繁程度和剧烈程度有关。在国际单位制中,压强的单位是帕斯卡,用符号 Pa 表示,常用的压强单位还有: cmHg(厘米汞柱)、atm(标准大气压)等。它们与 Pa 的关系是

$$1\text{atm} = 76\text{cmHg} = 1.013\ 25 \times 10^5\text{Pa}$$

温度: 从宏观上说,温度是表示物体冷热程度的物理量;而从微观本质上讲,它表示的是分子热运动的剧烈程度。温度的数值表示方法称为温标。物理学中常用两种温标:热力学温标和摄氏温标。摄氏温标所确定的温度用 t 表示,单位是 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度);国际单位制中采用热力学温标,所确定的温度用 T 表示,单位是开尔文,用符号 K 表示。摄氏温标与热力学温标的关系是

$$T = t + 273.15$$

在大学物理中我们规定使用热力学温标。

一定量气体,在一定容器中具有一定体积,如果各部分具有相同温度和相同压强,我们就说气体处于一定的状态。所以说,对于一定的气体,它的 p 、 T 、 V 三个量完全决定了它的状态。其中,体积和压强都不是热学所特有的,体积 V 属于几何参量,压强 p 属于力学参量,而温度 T 是描述状态的热学性质的参量。应该指出,只有当气体的温度、压强处处相同

时,才能用 p 、 T 、 V 描述系统状态。

4. 平衡态 平衡过程

处在没有外界影响条件下的热力学系统宏观性质(如 p 、 T 、 V)不再随时间变化,经过一定时间后,将达到一个确定的状态,而无论系统原先所处的状态如何。这种在不受外界影响的条件下,宏观性质不随时间变化的状态称为平衡状态,简称平衡态。

当然,在实际情况下,气体不可能完全不与外界交换能量,并不存在完全不受外界影响从而使得宏观性质绝对保持不变的系统,所以,平衡态只是一种理想状态,它是在一定条件下对实际情况的抽象和近似。以后,只要实际状态与上述要求偏离不是太大,就可以将其作为平衡态来处理,这样既可简化处理的过程,又有实际的指导意义。

必须指出,平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化。从微观看,气体分子仍在永不停息地作热运动,各粒子的微观量和系统的微观态都会不断地发生变化。只要分子热运动的平均效果不随时间变化,系统的宏观状态性质就不会随时间变化。所以,我们把这种平衡态称为热动平衡。

当气体与外界交换能量时,它的状态就会发生变化,一个状态连续变化到另一个状态所经历的过程叫做状态的变化过程。如果过程中的每一中间状态都无限趋于平衡态,这个过程就称为平衡过程。显然,平衡过程是个理想的过程,在许多情况下,实际过程可近似地当作平衡过程处理。如图 9-1 所示, p - V 图上一个点代表系统的一个平衡态, p - V 图上一条曲线表示系统一个平衡过程。应该注意,不是平衡态不能在 p - V 图上表示。

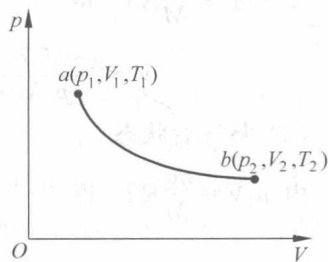


图 9-1 平衡过程曲线

9.1.2 理想气体状态方程

理想气体是一个抽象的物理模型。那么,什么样的气体是理想气体呢?在中学物理中,我们学过三个著名的气体实验规律,即玻意耳定律、盖-吕萨克定律和查理定律。后来人们发现,对不同气体来说,这三条定律的适用范围是不同的,一般气体只是在温度不太低(与室温比较)、压强不太大(与标准大气压比较)的时候才遵从气体的这三个实验定律。在任何情况下都服从上述三个实验定律的气体是没有的,这就给理论研究带来了不便。为了简化问题,人们设想有一种气体,在任何情况下都严格地遵从这三个定律,并将这种气体称为理想气体。而实际气体在温度不太低、压强不太大时都可近似地看成理想气体,在温度越高、压强越小时,近似的程度越高。

实验证明,气体在某个平衡态时, p 、 T 、 V 三个量之间存在一定关系,把这种关系称为气体的物态方程。理想气体物态方程是理想气体在平衡态时状态参量所满足的方程,可以由上述三个实验定律推出,表示为

$$pV = \frac{m_0}{M}RT = \nu RT \quad (9-1)$$

式中, R 为摩尔气体常数; ν 为气体的摩尔数; m_0 为气体质量; M 为气体的摩尔质量。在国际单位制中,

$$R = 8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

理想气体物态方程表明了平衡态下理想气体的各个状态参量之间的关系。当系统从一个平衡态变化到另外的平衡态时,各状态参量发生变化,但它们之间仍然要满足物态方程。

对一定质量的气体,它的状态参量 p 、 T 、 V 中只有两个是独立的,因此,任意两个参量给定,就确定了气体的一个平衡态。

例 9-1 某容器内装有质量为 100kg、压强为 10atm、温度为 47°C 的氧气。因容器漏气,一段时间后,压强减少为原来的 5/8,温度为 27°C。求:

- (1) 容器的体积;
- (2) 漏出了多少氧气。

解 根据理想气体的状态方程可作如下计算。

- (1) 漏气前状态

由 $p_1V = \frac{m_1}{M}RT_1$ 得

$$V = \frac{m_1RT_1}{p_1M} = \frac{100 \times 8.31 \times 320}{10 \times 1.01 \times 10^5 \times 32 \times 10^{-3}} = 8.2(\text{m}^3)$$

- (2) 漏气后状态

由 $p_2V = \frac{m_2}{M}RT_2$ 得

$$m_2 = \frac{p_2VM}{RT_2} = \frac{\frac{5}{8} \times 10 \times 1.01 \times 10^5 \times 8.2 \times 32 \times 10^{-3}}{8.31 \times 300} = 66.6(\text{kg})$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 33.4(\text{kg})$$

即漏出了 33.4kg 的氧气。

9.2 理想气体的压强公式与温度公式

9.2.1 理想气体分子模型与压强公式

热现象是物质中大量分子无规则运动的集体体现。研究物质中大量分子热运动的集体表现,需要用到统计的方法,应用统计方法就需要建立模型。

1. 理想气体的微观模型

在宏观上我们知道,理想气体是一种在任何情况下都遵守玻意耳定律、盖-吕萨克定律和查理定律的气体。但从微观上看,什么样的分子组成的气体才具有这种宏观特性呢?在常温常压下,气体分子间的距离比液体和固体分子间的距离要大得多。由于气体分子间距大,故分子间相互作用力很小。真实气体的压强越小,即气体越稀薄,就越接近理想气体。所以理想气体的微观模型具有以下特征:

(1) 分子本身的大小与分子间距离相比可以忽略不计,即对分子可采用质点模型。

(2) 除了碰撞的瞬间外,分子与分子之间、分子与容器壁之间的相互作用力可忽略不计,分子受到的重力也可忽略不计。

(3) 分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞属于牛顿力学中的完全弹性碰撞。

上述理想气体的微观模型是通过宏观实验结果的综合提出的一个假说。通过这个假说得到的结论与宏观实验结果进行比较可判断模型的正确性。实验证明,实际气体中分子本身占的体积约只占气体体积的千分之一,在气体中分子之间的平均距离远大于分子的几何尺寸,所以将分子看成质点是完全合理的。从另一个方面看,已达到平衡态的气体如果没有外界影响,其温度、压强等状态参量都不会因分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞而发生改变,气体分子的速度分布也保持不变,因而分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞是完全弹性碰撞也是理所当然的。

综上所述,理想气体可以看成是彼此间无相互作用的、自由的、无规则运动着的弹性质点的集合,这就是理想气体的微观模型。

2. 平衡态的统计假设

理想气体的微观模型主要是针对分子的运动特征而建立起来的一个假设。为了以此模型为基础,求出平衡态时气体的一些宏观状态参量,还必须知道理想气体处于平衡态时分子的群体特征。这些特征也叫做平衡态的统计特性。气体在平衡态时,分子是在作无规则的热运动,虽然每个分子的速度大小和方向是不定的,具有偶然性;但对大量分子来说,在任一时刻,都各自以不同大小的速度在运动,而且向各方向运动的概率是相等的,没有一个方向占优势,具有分布空间均匀性,宏观表现就是气体分子密度各处相同,如若不然就会发生扩散,也就不是平衡态了。也就是说平衡态的孤立系统,处在各种可能的微观运动状态的概率相等。根据这一事实,我们可以归纳出平衡态的两条统计假设:

- (1) 理想气体处于平衡态时气体分子出现在容器内任何空间位置的概率相等;
- (2) 气体分子向各个方向运动的概率相等。

根据上述假设还可以得出以下推论:

- (1) 分子速度和它的各个分量的平均值为零

平衡态理想气体中各个分子朝各个方向运动的概率相等。因此,分子速度的平均值为零,各种方向的速度矢量相加会相互抵消。类似地,分子速度的各个分量的平均值也为零。设 N 个分子在某一时刻的速度都分解成直角坐标的三个分量,则有

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0$$

- (2) 分子沿各个方向运动的速度分量平方的各种平均值相等

例如沿 x, y, z 三个方向速度分量的方均值应该相等。某方向的速度分量的方均值,定义为分子在该方向上的速度分量的平方的平均值,即把所有分子在该方向上的速度分量平方后加起来再除以分子总数:

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{ix}^2}{N}, \quad \overline{v_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{iy}^2}{N}, \quad \overline{v_z^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{iz}^2}{N}$$

按照统计性假设,分子群体在 x, y, z 三个方向的运动应该是各向相同的,则有

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

对每个分子来说,如第 i 个分子,有

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$$