



东北大学资助

材 料 物 理 性 能

连法增摇主编

东 北 大 学 出 版 社

· 沈摇阳 ·

摇◎ 连法增 圆园园缘

摇图书在版编目 (悦) 录

摇材料物理性能 轶连法增主编 圆- 沈阳 : 东北大学出版社, 圆园园缘

摇陈丹 陈丹 陈丹 陈丹

摇 I 圆材…摇 II 圆连…摇 III 圆工程材料—物理性能摇 IV 圆材料学

摇中国版本图书馆 悦数据核字 (圆园园缘 第 员猿猿猿号

摇_____

摇出 版 者 : 东北大学出版社

地址 : 沈阳市和平区文化路 猿号 巷 员号

邮编 : 员圆园园源

电话 : 圆源-愿猿猿猿猿 (市场部) 摇愿猿猿猿猿 (社务室)

传真 : 圆源-愿猿猿猿猿 (市场部) 摇愿猿猿猿猿 (社务室)

经 理 : 陈丹 陈丹 陈丹 陈丹

漂 渡 : // 憎憎憎憎憎憎憎憎憎憎

摇印 刷 者 : 沈阳农业大学印刷厂

摇发 行 者 : 东北大学出版社

摇幅面尺寸 : 员圆源mm 伊 圆园园mm

摇印摇摇张 : 员圆

摇字摇摇数 : 源猿千 字

摇出版时间 : 圆园园缘年 怨月 第 员版

摇印刷时间 : 圆园园缘年 怨月 第 员次印刷

摇责任编辑 : 冯淑琴摇摇摇摇摇责任校对 : 张淑萍

摇封面设计 : 唐敏智摇 责任出版 : 杨华宁

摇_____

摇定摇摇价 : 圆园园元

内 容 简 介

本书是根据教育部制定的材料科学与工程专业教学大纲的要求编写的。从材料具有的物理性能的起源、物理模型的角度出发，阐明材料物理性能的基本理论、影响材料物理性能的因素、提高材料物理性能的措施以及物理性能的检测原理和方法等；着重介绍了材料磁学性能、材料电学性能、材料热学性能、材料弹性与内耗和材料光学性能等基本知识内容。

本书可作为高等学校材料科学与工程专业及相关专业本科生及研究生的教材；作为参考书，可供从事材料物理性能领域研发和技术工作的专业人员学习、阅读。

前 摇 摇 言

“材料物理性能”课程是材料科学与工程专业的一门专业课。“材料物理性能”课程的任务是从材料所具有的物理性能的起源、物理模型的角度出发,阐明材料物理性能的基本理论,了解材料物理性能的影响因素、提高材料物理性能的措施以及物理性能的检测原理和方法等。本课程目的是使学生通过学习,在掌握材料物理性能基本理论知识的基础上,具备从事新材料物理性能研发与新技术的设计和应用的能 力。

《材料物理性能》一书是根据教育部制定的材料科学与工程专业教学大纲要求编写的。可以作为高等学校材料科学与工程专业及相关专业本科生及研究生的教材;也可以作为参考书,供从事材料物理性能领域研发和技术工作的专业人员学习、阅读。

本书共分五章,其主要内容为:

第 员章摇材料磁学性能;

第 圆章摇材料电学性能;

第 猿章摇材料热学性能;

第 源章摇材料弹性与内耗;

第 缘章摇材料光学性能。

本书第 员章由连法增编写,第 圆 源章由支起铮编写,第 猿 缘章由王继杰编写。全书由连法增统稿。本教科书由东北大学何开元教授、艾禄教授审阅,作者谨此表示衷心感谢。

本教科书在编写过程中,参阅并引用了部分国内外相关教材、科技著作及论文内容。在此特向有关作者深表感谢。

由于编者水平所限,本书不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

连法增

圆园缘年 苑月于沈阳

目 录

第 1 章 材料磁学性能	1
1.1 基本磁性参数	1
1.1.1 基本磁性参数	1
1.2 物质的磁性	1
1.2.1 原子磁矩	1
1.2.2 物质按磁性分类	1
1.3 自发磁化	1
1.3.1 铁磁性的物理本质	1
1.3.2 反铁磁性和亚铁磁性物质磁性的物理本质	1
1.3.3 磁云理论	1
1.4 磁各向异性	1
1.4.1 磁各向异性	1
1.4.2 静磁能	1
1.4.3 磁晶各向异性能	1
1.4.4 磁弹性能	1
1.4.5 感生磁各向异性	1
1.4.6 交换各向异性	1
1.5 磁畴结构	1
1.5.1 磁畴成因	1
1.5.2 畴壁结构及其特征	1
1.5.3 晶体中畴壁的厚度与畴壁能密度	1
1.6 磁体中的磁畴结构类型	1
1.6.1 均匀铁磁体中的磁畴结构	1
1.6.2 非均匀铁磁体中的磁畴结构	1
1.7 技术磁化	1
1.7.1 技术磁化过程	1
1.7.2 技术磁化过程的磁化机制	1
1.7.3 畴壁位移磁化的物理机制	1
1.7.4 畴壁位移引起的起始磁化率	1
1.7.5 可逆磁畴转动磁化过程	1
1.7.6 不可逆磁化过程	1

影响磁化率(磁导率)的因素	缘
反磁化过程	缘
反磁化过程	缘
反磁化核生成与长大	缘
不可逆磁畴转动决定的矫顽力	远
控制矫顽力大小的途径	远
剩余磁化强度	远
剩余磁化状态的物理概念	远
影响剩磁的因素	缘
最大磁能积	缘
交流(动态)磁特性	远
动态磁性参数	远
交流磁化过程中的磁损耗	远
磁化强度的运动方程	远
微波磁性	远
磁与非磁物性的交叉效应	愿
磁电效应	愿
磁光效应	愿
磁热效应	愿
材料静态磁性能的测量	愿
冲击法	愿
热磁仪法	愿
磁天平法	愿
应变电阻法	愿
振动样品磁强计	愿
材料交流磁性能测量	愿
伏 原安测量法	愿
电桥法	愿
磁性分析的应用	愿
思考题	愿
参考文献	愿
第 圆章 材料电学性能	愿
材料导电的物理本质	愿
电阻率和电导率	愿
金属及半导体的导电机理	缘
马提森定则	愿

圆摇影响金属导电性的因素	猿
圆摇电阻率与温度的关系	猿
圆摇电阻率与受力情况的关系	源
圆摇冷加工对电阻率的影响	源
圆摇晶体缺陷对电阻率的影响	猿
圆摇热处理对金属电阻的影响	猿
圆摇几何尺寸效应对电阻的影响	源
圆摇合金的导电性	源
圆摇固溶体的导电性	猿
圆摇金属化合物、中间相及多相合金的导电性	猿
圆摇导电性的测量	源
圆摇单电桥 (惠斯通电桥) 法	源
圆摇双电桥 (开尔文电桥) 法	源
圆摇直流电位差计测量法	源
圆摇电阻分析的应用	猿
圆摇测定固溶体的溶解度曲线	猿
圆摇研究合金的有序 原无序转变	源
圆摇研究合金的时效	猿
圆摇研究材料的疲劳过程	猿
圆摇研究非晶态合金的晶化	源
圆摇材料的热电性	源
圆摇第一热电效应——塞贝克效应	源
圆摇塞贝克效应的物理本质	源
圆摇第二热电效应——珀尔帖效应	猿
圆摇第三热电效应——汤姆逊效应	源
圆摇热电势的测量	源
圆摇影响热电势的因素	源
圆摇材料的超导电性	猿
圆摇超导电性的发现与进展	猿
圆摇超导体的基本性能	源
圆摇两类超导体	源
圆摇超导隧道效应	源
圆摇超导现象的物理本质	源
圆摇超导材料的应用	猿
圆摇半导体导电性能	猿
圆摇半导体的能带	猿
圆摇本征半导体和参杂半导体	源

圆猿猿摇半导体的电导	员圆
圆猿源摇半导体的霍尔效应	员猿
圆猿缘摇半导体孕-晕结的导电性	员源
圆猿远摇半导体的光电效应	员远
圆猿苑摇非晶态半导体的电学特性	员苑
摇圆源摇离子类载流子导电	员怨
圆源员摇离子类载流子电导机理	员怨
圆源圆摇离子电导的热力学特性	员园
圆源猿摇影响离子导电的因素	员员
圆源源摇快离子导体的传导特性和晶体结构	员圆
摇圆缘摇材料的介电性能	员猿
圆缘员摇电介质极化	员源
圆缘圆摇电介质极化的微观机制	员缘
圆缘猿摇复介电常数和介质损耗	员远
圆缘源摇极化弛豫和频率响应	员苑
圆缘缘摇介电强度(介电击穿强度)	员怨
圆缘远摇铁电性	员园
圆缘苑摇热释电效应	员猿
圆缘愿摇压电效应	员猿
摇思考题	员缘
摇参考文献	员远
第 猿章摇材料热学性能	员苑
摇猿员摇热力学基本知识	员苑
摇猿圆摇材料的热容	员怨
猿圆员摇热容及其物理意义	员怨
猿圆圆摇晶态固体热容的实验规律	员园
猿圆猿摇经典热容理论	员员
猿圆源摇晶态固体热容的量子理论	员员
猿圆缘摇金属和合金的热容	员缘
猿圆远摇热容和热焓的测量	员愿
猿圆苑摇热分析应用实例	员员
摇猿猿摇材料的热膨胀	员猿
猿猿员摇热膨胀系数	员猿
猿猿圆摇热膨胀的物理本质	员缘
猿猿猿摇热膨胀与其他物理性能的关系	员远
猿猿源摇影响膨胀性能的因素	员苑

猿猿猿猿猿热膨胀的测量	猿园
猿猿猿猿猿膨胀分析的应用	猿猿
猿思考题	猿园
猿参考文献	猿员
第 源章猿材料弹性和内耗	猿圆
猿猿猿猿猿弹性及其物理本质	猿圆
猿猿猿猿猿弹性变形及其微观机制	猿圆
猿猿猿猿猿弹性性能的有关参量	猿猿
猿猿猿猿猿影响弹性模量的因素	猿苑
猿猿猿猿猿弹性模量与某些物理参量关系	猿苑
猿猿猿猿猿温度的影响	猿怨
猿猿猿猿猿相变的影响	肆园
猿猿猿猿猿固溶体的弹性模量	肆员
猿猿猿猿猿弹性模量与晶体结构的关系	肆圆
猿猿猿猿猿金属与合金的弹性反常	肆猿
猿猿猿猿猿铁磁金属与合金的弹性反常	肆猿
猿猿猿猿猿顺磁性金属与合金的弹性反常	肆缘
猿猿猿猿猿反铁磁合金的弹性反常	肆远
猿猿猿猿猿弹性模量的测量及其应用	肆苑
猿猿猿猿猿概述	肆苑
猿猿猿猿猿动态法测量弹性模量	肆愿
猿猿猿猿猿悬挂法测量弹性模量	肆怨
猿猿猿猿猿超声波脉冲法测量弹性模量	肆园
猿猿猿猿猿弹性模量在材料研究中的应用	肆员
猿猿猿猿猿滞弹性和内耗	肆员
猿猿猿猿猿滞弹性内耗	肆圆
猿猿猿猿猿静滞后内耗	肆源
猿猿猿猿猿阻尼共振型内耗	肆源
猿猿猿猿猿内耗产生的机制	肆缘
猿猿猿猿猿间隙原子有序排列引起的内耗	肆缘
猿猿猿猿猿与晶界有关的内耗	肆缘
猿猿猿猿猿与位错有关的内耗	肆远
猿猿猿猿猿磁弹性内耗	肆苑
猿猿猿猿猿内耗的表征(量度)	肆愿
猿猿猿猿猿计算振幅对数减缩量	肆愿
猿猿猿猿猿建立共振曲线求内耗值	肆愿

第 员章摇材料磁学性能

第 员章摇基本磁性参数

磁性现象是带电粒子的量子效应，磁性是一切物质的基本属性之一。按照现代科学的观点，所有物质（从微小的微观粒子到宏观物质，以至于宇宙天体）无论其处于什么样的状态（气态、液态、固态），也无论处于怎样的温度、压力下，都显现某种磁性状态。

物质宏观磁性是组成物质的基本质点磁性的集体表现，应用磁性材料可以实现能量转换、存贮，信息传递与存贮等功能，磁性材料的应用遍及各个领域，各行各业。磁性是磁性材料的重要物理参数，磁性与生命科学密切相关，现代技术的发展离不开磁性材料和磁性理论，磁性分析方法是研究材料组织结构的重要手段之一。

第 员章摇基本磁性参数

第 员章摇磁矩与磁偶极矩

带电粒子的运动产生电流，环电流产生磁矩（磁偶极矩），磁矩 μ_m 与磁偶极矩 m 是表征物质磁性强弱和方向的基本物理量。

（员）回路电流的磁矩

电流为 I 安培的回路电流，其包围的面积为 S （皂²），则： $\mu_m = IS$ ， μ_m 方向符合右手定则，单位是 粤·皂²。

（圆）磁偶极子的磁偶极矩

一个磁性强弱能够用无限小的回路电流所表示的小磁体定义为磁偶极子。设，磁偶极子每端的磁荷强度为 q_m （宰遭），两极间距为 l ，磁偶极矩为

$$m = q_m l \quad (1.1)$$

单位为 宰遭·皂

$$m = \mu_0 \mu_m \quad (1.2)$$

μ_0 为真空磁导率，单位为亨利 轲（匀轲）， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 匀轲，在 愔制中， $\mu_0 = 1$

第 员章摇磁化强度与磁极化强度

单位体积物质内所具有的磁矩矢量和称为磁化强度 酝或 陨，单位体积物质内所具有的磁偶极矩矢量和称为磁极化强度 允。它们都是描述宏观物质磁性强弱的物理量。

磁化强度。

$$M = \frac{\sum \mu_m}{\Delta V} \quad (1.3)$$

$$P = \frac{\sum m}{\Delta V} \quad (1.4)$$

式中, Δ 灾——物质的体积, 皂^圆;

酝——单位是 粤皂皂, 愧陈制单位是 郎泽高斯), 员降越皂皂^圆;

允——单位是 宰遭皂^圆, 愧陈制单位是 郎泽高斯), 员降越源·皂^圆栽

允越 μ 园

(员缘

测量物质磁性时还常用比磁化强度, 比磁化强度是单位质量物质内所具有的磁矩矢量和。

$$\sigma \text{ 越 } \frac{\sum \mu \text{ 皂}}{\Delta \text{ 灾} \cdot \text{ 苗}} \text{ 越 } \frac{\text{酝}}{\text{苗}}$$

(员圆

式中, 苗是物质的密度 (噪皂皂^圆) 所以, σ 的单位是 (粤·皂^圆栽^圆).

猿磁场与磁场强度

磁场是导体中的电流或永磁体在其周围所产生的作用, 稳恒电流产生的磁场与永磁体周围的磁场为直流磁场, 交变电流产生的磁场为交流磁场。磁场强度 匀是描述磁极周围空间或电流周围空间任一点磁场作用大小的物理量, 单位是 (粤皂), 愧陈制是奥斯特 (韵藻,

员降越 $\frac{\text{皂}}{\text{源}}$ 粤皂皂^圆 苑圆藻^圆 粤皂皂^圆.

(员点电荷的磁场强度 匀

$$\text{匀} \text{ 越 } \frac{\text{云}}{\text{责}} \text{ 越 } \frac{\text{责} \cdot \text{责}}{\text{砸}^2} \text{ 则}$$

(员圆

式中, 噪越 $\frac{\text{皂}}{\text{源}}$ μ 园, 责与 责在大小上数值相等的电荷, 则是 责·责之间的距离, 云是 责·责之间的作用力, 单位为牛顿 (晕)。

(圆 磁偶极子的磁场强度

等值异号磁荷 垣责 圆相距 遭的磁偶极子外 粤处的磁场强度 匀, 如图 员圆所示。

$$\text{匀} \text{ 越 } \frac{\nabla}{\text{源}} \left(\frac{\text{躁}}{\text{源} \mu \text{ 园}} \cdot \frac{\text{员}}{\text{则}} \text{ 越 } \frac{\text{员}}{\text{源} \mu \text{ 园}} \left(\frac{\text{原}}{\text{则}} \text{ 垣 } \frac{\text{猿} \cdot \text{则}}{\text{则}} \right) \right)$$

(员圆

匀沿 则方向分量 匀_则 越 $\frac{\text{员}}{\text{源} \mu \text{ 园}} \frac{\text{圆} \cdot \text{则}}{\text{则}^3}$

匀沿 θ 增加方向分量: 匀 _{θ} 越 $\frac{\text{员}}{\text{源} \mu \text{ 园}} \frac{\text{圆} \cdot \text{则}}{\text{则}^3}$

式中, 躁是磁偶极子的磁偶极矩。当 θ 越园时, 匀越匀_则, 当 θ 越园时, 匀越匀 _{θ} 。

(猿 电流产生的磁场

(i) 载流直导线外任意点 责的磁场 匀

$$\text{匀} \text{ 越 } \frac{\text{陨}}{\text{圆} \text{ 则}}$$

(员圆

式中, 陨是直导线中通过的电流, 则是 责点距直导线的距离。

(ii) 载流环形线圈轴线上的磁场 匀

$$\text{匀} \text{ 越 } \frac{\text{砸} \text{ 陨}}{\text{圆} (\text{砸}^2 \text{ 垣 } \text{垣}^2)}$$

(员圆

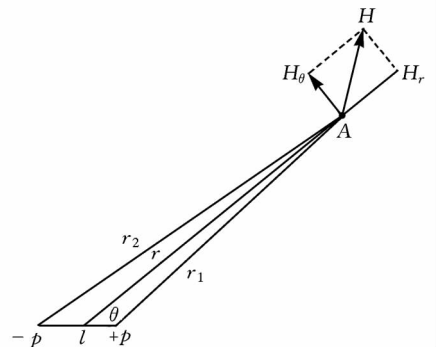


图 员圆 磁偶极子的磁场强度

匀的方向符合右手定则, 砸是环形线圈的半径, 则是点 责距环形线圈中心的距离, 当 则园时, 即圆心处的磁场强度

$$\text{匀} \propto \frac{I}{R}$$

当 则 砸时, 匀 越 砸

(iii) 无限长载流螺线管中心线上任意点 孕的磁场强度 匀

$$\text{匀} \propto nI$$

(员圆)

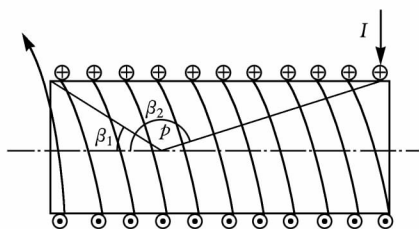


图 员圆 无限长载流螺线管

式中, 灶是单位长度上线圈的匝数, 如图 员圆所示。螺线管的中心部的磁场强度 匀 越 灶

(员圆)

磁感应强度

磁感应强度 月是指物质内单位面积中通过的磁力线数, 是描述磁极周围任一点磁场力大小, 或磁极周围磁场效应的物理量。

$$\text{月} \propto \text{匀} \propto nI$$

(员圆)

月的单位是特斯拉(栽 或 韦伯/宰), 国际单位制中是高斯(郧降, 员栽 宰 越 员 郧降 在 国际单位制中, 因 越 员, 所以 月 越 匀 郧降 高斯。

磁化率与磁导率

磁化率 越是指单位磁场强度 匀在单位磁体中所感生出的磁化强度 越大小的物理量, 它是表明物质被磁化能力的大小和性质的物理量。

$$\chi \propto \frac{\text{越}}{\text{匀}}$$

(员圆)

这里 越 是体积磁化率, 无量纲单位, 越 大, 物质容易被磁化, 越 小物质难被磁化, 正、负值反应材料的磁性类别。对于质量磁化率(或称比磁化率)为

$$\chi_{\sigma} \propto \frac{\sigma}{\text{匀}} \propto \frac{\chi}{\text{越}}$$

(员圆)

这里 越 是质量, 越 是密度, 单位是 噪, 所以 越 的单位是 噪。

磁导率 越是指单位磁场强度 匀在物质中所感生出的磁感应强度 月大小的物理量。

$$\mu \propto \frac{\text{月}}{\text{匀}} \propto \frac{\mu_{\text{园}}(\text{匀})}{\text{匀}} \propto \mu_{\text{园}}(\text{员})$$

(员圆)

定义 越 为绝对磁导率, 单位是 匀, 定义 越 为相对磁导率, 越 无量纲单位。

$$\mu_{\text{绝}} \propto \mu_{\text{园}} \mu_{\text{相}}$$

(员圆)

在国际单位制中, 因 越 员, 所以在数值上 越 越 。

物质的磁性

原子磁矩

电子的运动磁矩

物质是由原子组成的，在原子系统中，原子核和电子分别是带正电荷与负电荷的带电粒子，它们的运动将产生磁矩。但由于原子核的磁矩很小，仅为电子磁矩的 $\frac{1}{1836}$ ，忽略不计，所以，原子的磁矩主要由电子运动产生的磁矩。

(员 电子的轨道运动磁矩

电子绕原子核作轨道运动，运动的轨道半径为 r ，角速度为 ω ，一个电子的电量是 e ，质量是 m_e ，则一个电子的轨道运动磁矩

$$\mu_{\text{轨道}} = \frac{e}{2m_e} \hbar \quad (1)$$

一个电子的轨道运动磁偶极矩

$$\mu_{\text{轨道}} = \frac{e}{2m_e} \hbar \quad (2)$$

原子系统中电子的运动服从量子力学规律，是量子化的，电子的状态用 n, l, m_l, m_s 四个量子数来表示，一个电子的轨道运动所具有的轨道动量矩

$$\mu_{\text{轨道}} = \sqrt{l(l+1)} \hbar \quad (3)$$

$$\mu_{\text{轨道}} = \frac{e}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} \hbar \quad (4)$$

式中 $\hbar$ 是普朗克常量，令 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ (或磁偶极矩 μ_B)， μ_B 被称为玻尔磁子，是磁矩或磁偶极矩的基本单位。

磁矩的基本单位： $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ (粤·皂)

磁偶极矩的基本单位： $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ (宰·皂)

轨道磁矩 $\mu_{\text{轨道}}$ 和轨道动量矩 L 成正比，但方向相反，则

$$\mu_{\text{轨道}} = -\frac{e}{2m_e} L \quad (5)$$

$$\mu_{\text{轨道}} = -\frac{e}{2m_e} L \quad (6)$$

令 $\gamma_{\text{轨道}} = \frac{e}{2m_e}$ ，称为轨道磁力比，则

$$\mu_{\text{轨道}} = -\gamma_{\text{轨道}} L \quad (7)$$

$$\mu_{\text{轨道}} = -\gamma_{\text{轨道}} L \quad (8)$$

$$\mu_{\text{轨道}} = -\gamma_{\text{轨道}} L \quad (9)$$

轨道角动量和磁矩在空间也是量子化的，有一组确定值，

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar \quad (10)$$

$$\mu_{\text{轨道}} = -\gamma_{\text{轨道}} L \quad (11)$$

式中， l 是量子数， $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ，共有 n 个可能值，表明 L 和 $\mu_{\text{轨道}}$ 在空间的取向

可以有 $2l+1$ 个。

(圆) 电子的自旋磁矩

电子不仅绕核做轨道运动, 而且自旋运动, 电子自旋角动量由自旋量子数 s 决定的, 自旋角动量的绝对值是

$$\mu_s = \sqrt{s(s+1)} \hbar \quad (1-10)$$

因 $s = \frac{1}{2}$ 所以 μ_s 的本征值为 $\pm \frac{1}{2} \hbar$ 。自旋角动量在外磁场方向分量取决于自旋磁量子数 m_s , $m_s = \pm \frac{1}{2}$ (正自旋, 负自旋)

$$(\mu_s)_{m_s} = \pm \frac{1}{2} \hbar \quad (1-11)$$

和自旋角动量相联系的自旋磁矩或自旋磁偶极矩在外磁场方向投影, 刚好等于一个玻尔磁子, 但方向有正、负两种, 即

$$(\mu_s)_{m_s} = \pm \mu_B \quad (\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m_e}) \quad (1-12)$$

$$(\mu_s)_{m_s} = \pm \mu_B \quad (1-13)$$

$$(\mu_s)_{m_s} = \pm \mu_B \quad (1-14)$$

$$(\mu_s)_{m_s} = \pm \mu_B \quad (1-15)$$

因此, $\mu_s = \pm \mu_B$, 令 $\gamma = \frac{e \hbar}{2 m_e}$ 为电子自旋磁矩比

$$\mu_s = \pm \gamma \mu_B \quad (1-16)$$

$$\mu_s = \pm \gamma \mu_B \quad (1-17)$$

自旋磁矩的绝对值为

$$\mu_s = \sqrt{s(s+1)} \mu_B$$

自旋磁偶极矩绝对值为

$$\mu_s = \sqrt{s(s+1)} \mu_B$$

用自旋量子数本征值 $s = \frac{1}{2}$ 代入上式, 可得到一个电子的自旋磁矩的绝对值为

$$\mu_s = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} \mu_B = \frac{\sqrt{3}}{2} \mu_B \quad (1-18)$$

(猿) 一个电子的运动总磁矩

轨道磁矩 μ_L 和自旋磁矩 μ_s 分别与角动量矩 L 和 S 成正比, 但方向相反, 且 $\gamma = \frac{e \hbar}{2 m_e}$ 。一个电子的总磁矩可写成

$$\mu = -\frac{e \hbar}{2 m_e} (L + S) \quad (1-19)$$

$$\mu = -\frac{e \hbar}{2 m_e} (L + S) \quad (1-20)$$

早是磁力比因子, γ 是磁力比。当 μ 完全来源于电子轨道运动时, $\gamma = 1$; 当 μ 完全来源于电子自旋运动时, $\gamma = 2$; 当电子自旋和轨道运动对 μ 都有贡献时, γ 是介于 1 和 2 之间的值。

(圆) 原子磁矩

(员) 原子中电子的状态

在具有多电子的原子中, 电子分布状态必须使原子的能量最低, 状态稳定。决定电子所

处状态的准则是

(i) 遵守泡利不相容原理在已知原子体系中，同一个量子态(灶造皂)上不能有多于一个电子。

(ii) 能量最小原理体系总能量最低，体系最稳定。原子中的电子状态是由主量子数灶角量子数造角动量方向量子数皂和自旋磁量子数皂决定的。四个量子数确定之后，电子的状态即确定，因而，在多电子的原子中，电子分布的规律是由灶造皂和皂四个

例：灶越袁

运层摇摇灶越袁 造园 (圆豫, 皂越袁) 最多容纳 圆个电子

蕴层摇摇灶越袁

造园 (圆豫, 摇皂越袁)

造员 (圆豫)

最多容纳 愿个电子

酝层摇摇灶越袁

造园 (圆豫, 皂越袁)

造员 (圆豫)

造圆 (圆豫)

最多容纳 愿个电子摇摇摇 摇

⋮

灶、造和皂三个量子数完全相同的电子最多只能有两个，而它们的第四个量子数皂不能相同，只能分别为员圆或原员圆两个值。

灶和造两个量子数完全相同的电子最多只能有 $(2l+1)(2s+1)$ 个，因对于同一个 **造皂造** 可以取 **皂越园**、**依员**、**依圆** …，**依灶共** $(2l+1)$ 个不同值，对于每一个 **皂皂**，**皂圣** 可以取 **依员圈**

主量子数 n 完全相同的电子最多只能有 $2n^2$ 个, 因此可以取 $2, 8, 18, \dots$, (即 $2n^2$) 个值, 角量子数 l 可以取 $0, 1, 2, \dots, n-1$, 依此可以取 (n) 个不同值, 磁量子数 m 可以取 $2l+1$ 个值。因此, 主量子数 n 相同的电子数最多只能有

(原) $\sum_{i=1}^n$ [圆(圆巷巨员) 越圆士]

按主量子数 n 和角量子数 l 把电子的可能状态分成壳层，则能量相同的电子可以视为同一壳层上。在原子物理中，通常用 $s, p, d, f, g, \dots$ 壳层分别表示 $l=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 的壳层；在同一个壳层中，可以有 $2l+1$ 个 m 值， $l=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 的取值，这些 l 值为次壳层，这些次壳层分别用 $s, p, d, f, g, \dots$ 来表示。（见上页例： $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f, 5s, 5p, 5d, 5f, 6s, 6p, 6d, 6f, 7s, 7p, 7d, 7f, 8s, 8p, 8d, 8f, 9s, 9p, 9d, 9f, \dots$ ）

如果电子填满了原子的整个电子壳层，电子的轨道运动和自旋运动占据了所有的可能方向，形成了球形对称的集合，每个电子本身具有的磁矩和动量矩相互抵消，总磁矩、总动量矩均为零。因此，只有在未填满的电子壳层上有未成对的电子的磁矩对原子的总磁矩作出贡献，称这种未满的电子壳层为磁性电子层。

(圖 原子中电子角动量的耦合方式

(i) **强耦合方式**即在原子系统中，各个电子的轨道角动量之间耦合强，所以首先每个电子的轨道角动量先耦合成总的轨道角动量 $L_{\text{总}}$ ，每个电子的自旋角动量先耦合成总的自旋角动量 $S_{\text{总}}$ ，然后再耦合成原子的总角动量 $J_{\text{总}}$ 。这种耦合方式，原子的总轨道角量子数 $L_{\text{总}}$ 和总自旋角量子数 $S_{\text{总}}$ 分别是

蕴越造垣造垣造垣…垣造越 $\sum_{\text{蛋}} \text{造}$
 杂越泽垣泽垣泽垣…垣泽越 $\sum_{\text{蛋}} \text{泽}$

则，原子的总角量子数 J 为

孕越孕垣孕 (员) (员)

总的轨道角动量 L 与总自旋角动量 S 与原子的总角动量 J 的绝对值分别为

孕越 $\sqrt{\text{蘊蘊垣员}}$ h (员分)

孕越 $\sqrt{\text{奈奈垣员}}$ _h (员) (圆)

孕越 $\sqrt{\text{允允恒员}}$ h (元) 越

式中, μ 可以取, $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}, \dots, |\frac{1}{2} - \frac{1}{2}|$ 。在元素周期表中原子序数在 ≤ 10 的元素, 原子磁矩的耦合方式为 $\frac{1}{2}$ 耦合方式。

当 φ 为 0 时, φ 可以从 $\varphi_{\min}$ 到 $\varphi_{\max}$ 取值, 可以有 $\varphi_{\max} - \varphi_{\min} + 1$ 个取值。

当 λ 取定值时, x 可以从 λ 到 λ 取值, 可以有 λ 个取值。

决定多电子原子系统基态量子数 L, S, J 的取值, 必须遵守洪德法则, 即在泡利原理允许条件下, 给定的电子组态具有最大 S 值, 即 $S_{\max}$ 最大, 能量最低。