

电机工程手册

第2篇 电工基础

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册



机械工业出版社

TMB62
2938

电机工程手册

第2篇 电工基础

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会



机械工业出版社

·本篇包括电的一般物理概念、电磁场、电路和磁路等部分，共十一章。根据电机工程的需要，分别介绍了一些电现象的微观机理；静电场、稳定磁场和交变电磁场的基本特性以及处于场中的媒质的性能；线性集中参数电路处于直流或交流作用下的稳态与暂态的分析和计算；铁磁物质的基本磁性能以及含有铁磁物质的非线性磁路的分析与计算。

电机工程手册

第2篇 电工基础

(试用本)

上海机械学院 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $6^{1/4}$ ·字数166千字

1978年1月北京第一版·1978年1月北京第一次印刷

印数 000,001—112,000·定价0.50元

*

统一书号: 15033·4477

编辑说明

(一)我国自建国以来，特别是无产阶级文化大革命以来，机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下，坚持政治挂帅，以阶级斗争为纲，贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》，使出版工作更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务。

(二)这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查，以便广大机电工人使用，有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三)这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《电机工程手册》第2篇, 由上海机械学院主编。上海交通大学、西安交通大学、上海电器科学研究所、桂林电器科学研究所、水利电力部西北电力设计院、上海电机厂和西安电力机械制造公司所属单位等, 对编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

A ——矢量磁位
 B ——磁感应强度 (磁通密度)
 B_r ——剩余磁感应强度
 B_s ——饱和磁感应强度
 b ——电纳
 b_c ——容纳
 b_L ——感纳
 C ——电容
 c_0 ——真空中光速
 D ——电位移
 E ——电场强度, 电动势
 e ——瞬时电动势
 F ——力, 磁动势
 f ——力, 频率
 f_0 ——谐振频率 (固有频率)
 g ——电导
 g_m ——磁导
 H ——磁场强度
 H_c ——矫顽磁场强度
 H_i ——磁化强度
 h ——普朗克常数
 I ——电流强度
 I_l ——线电流
 I_a ——相电流
 i ——瞬时电流
 k ——玻尔兹曼常数, 耦合系数
 k_c ——波顶因数
 k_d ——畸变因数
 k_f ——波形因数
 L ——电感, 自感
 l ——长度
 M ——互感, 力矩
 m ——质量, 磁矩
 N ——线圈匝数
 P ——功率, 极化强度
 P_{fe} ——铁损
 P_{fec} ——比损耗
 p ——瞬时功率, 电矩
 Q ——电量, 品质因数, 无功功率
 q ——电量
 r ——电阻
 r_m ——磁阻
 S ——面积, 视在功率
 T ——周期, 畸变功率, 绝对温度
 t ——时间, 温度
 U ——电压
 U_l ——线电压
 U_m ——磁压
 U_e ——相电压

$U_{o'0}$ ——中线电压, 中点位移
 u ——瞬时电压
 V ——体积
 v ——速度
 W ——功, 能, 能级
 W_e ——电场能量, 逸出功
 W_m ——磁场能量, 激发态能级
 w ——电磁场能量密度
 w_e ——电场能量密度
 w_m ——磁场能量密度
 x ——电抗
 x_c ——容抗
 x_L ——感抗
 Y ——复导纳
 y ——导纳
 Z ——复阻抗
 Z_N ——中线阻抗
 z ——阻抗
 α ——电阻温度系数, 衰减常 (系) 数
 β ——相移常数
 γ ——电导率, 固有传输常数
 δ ——介质损耗角, 电流密度, 阻尼系数
 δ_i ——全电流密度
 ϵ ——介电常数 (电容率)
 ϵ_0 ——真空介电常数
 ϵ_r ——相对介电常数
 κ ——磁化率
 λ ——波长
 μ ——磁导率
 μ_i ——起始磁导率
 μ_m ——最大磁导率
 μ_0 ——真空磁导率
 μ_r ——相对磁导率
 μ_h ——增量磁导率
 μ_{dif} ——微分磁导率
 μ_{rec} ——回复磁导率
 ρ ——电阻率, 电荷体密度
 σ ——电荷面密度
 τ ——电荷线密度, 时间常数
 ϕ ——磁通 (磁通量)
 ϕ_E ——电场强度通量
 φ ——电位, 阻抗角
 φ_m ——标量磁位
 χ ——极化率
 ψ ——磁链, 初相角
 ω ——角频率
 ω_0 ——谐振角频率
 ω' ——自由振荡角频率
 $\cos \varphi$ ——功率因数

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 电的一般物理概念

1 电荷与电磁场的概念	2-1
1.1 电荷与电量守恒定律	2-1
1.2 电磁场的概念	2-1
2 原子	2-1
2.1 电子	2-1
2.2 原子核中质子数与中子数的意义	2-2
2.3 原子中的电子能级	2-2
2.4 原子中电子的壳层分布	2-2
2.5 价电子	2-4
2.6 离子	2-4
3 分子	2-4
3.1 分子的组成	2-4
3.2 极性分子与非极性分子	2-5
4 导体、绝缘体、半导体	2-5
4.1 能带的概念	2-5
4.2 金属——第一类导体	2-6
4.3 电解质——第二类导体	2-6
4.4 绝缘体	2-6
4.5 半导体	2-7
5 金属的热电子发射	2-8
6 气体导电	2-8
6.1 辉光放电	2-9
6.2 弧光放电	2-9
6.3 火花放电	2-9
6.4 电晕放电	2-9
7 几种电效应	2-9
7.1 光电效应	2-9
7.2 压电效应	2-10
7.3 热电效应	2-10
7.4 电化学效应	2-11

第2章 静电场

1 静电场的概念	2-11
----------	------

2 电场强度	2-11
2.1 库仑定律	2-11
2.2 真空的介电常数(真空的电容率)	2-12
2.3 点电荷的电场强度	2-12
2.4 电场强度的叠加原理	2-12
2.5 电力线	2-12
3 电压与电位	2-13
3.1 电场力的功	2-13
3.2 电压(电位差)	2-13
3.3 电位	2-13
3.4 等位面	2-13
3.5 电位梯度	2-14
4 静电场中的导体	2-14
4.1 静电感应	2-14
4.2 静电屏蔽的概念	2-14
5 电偶极子	2-15
6 电场中的电介质	2-15
6.1 电介质的极化	2-15
6.2 极化强度	2-15
6.3 极化率	2-15
7 电介质的击穿	2-15
8 电位移和高斯定理	2-16
8.1 电场强度矢量的通量	2-16
8.2 真空中的高斯定理	2-16
8.3 高斯定理的一般形式	2-16
8.4 介电常数(电容率)	2-17
8.5 电位移	2-17
9 静电场中两种媒质分界面上的 边界条件	2-17
9.1 分界面上的边界条件	2-17
9.2 折射定律	2-17
10 电 容	2-17
10.1 电容的概念	2-17
10.2 几种典型结构的电容计算公式	2-18
10.3 电容的串联与并联	2-18
11 静电场中的能量	2-18

2-VI 目 录

11.1 电场能量	2-18
11.2 从能量表达式计算电场力	2-19
12 静电场的特性	2-19
12.1 静电场的方程组	2-19
12.2 计算静电场问题的说明	2-19
13 稳定电场	2-20
13.1 稳定电流	2-20
13.2 导体内部无源部分的稳定电场	2-21
13.3 导体外部的稳定电场	2-21

第3章 稳定磁场

1 稳定磁场的概念	2-22
2 磁感应强度	2-22
2.1 磁感应强度的概念	2-22
2.2 磁感应强度定律(毕奥—萨伐尔定律)	2-22
2.3 真空磁导率	2-23
2.4 磁力线	2-23
3 磁场对载流导体的作用力	2-23
3.1 磁场对运动电荷的作用力	2-23
3.2 磁场对载流导线的作用力	2-24
3.3 两平行载流导线间的作用力	2-24
3.4 磁场对载流线圈的作用力矩和磁矩	2-24
3.5 霍耳效应	2-25
4 磁通的连续性原理	2-25
4.1 磁通量	2-25
4.2 磁通连续性原理的概念	2-26
5 物质的磁化	2-26
5.1 物质磁化的概念	2-26
5.2 物质按磁性的分类	2-26
5.3 磁化强度	2-27
6 全电流定律与磁场强度	2-27
6.1 真空中的全电流定律	2-27
6.2 导磁物质中的全电流定律	2-27
6.3 磁场强度	2-27
6.4 磁化率	2-28
6.5 磁导率	2-28
7 磁场中两种媒质分界面上的边界条件	2-28
7.1 分界面上的边界条件	2-28
7.2 折射定律	2-28

7.3 磁屏蔽	2-29
8 稳定磁场中的能量	2-29
8.1 磁场能量	2-29
8.2 用能量表达式计算电磁力	2-29
8.3 电磁铁吸力的计算	2-29
9 稳定磁场的特性	2-30
9.1 稳定磁场的方程组	2-30
9.2 求解稳定磁场的说明	2-30

第4章 交变电磁场

1 电磁感应	2-33
1.1 电磁感应现象	2-33
1.2 感应电动势	2-33
1.3 感应电动势的方向	2-33
1.4 电磁感应定律	2-34
2 自感电动势与互感电动势	2-34
2.1 磁链	2-34
2.2 自感电动势与互感电动势的表达式	2-34
2.3 对应端(同铭端)	2-35
3 电 感	2-35
3.1 自感系数	2-35
3.2 互感系数	2-35
3.3 两个线圈串联或并联时的总电感	2-35
3.4 磁耦合系数	2-36
3.5 几种典型电感的计算公式	2-37
4 全电流	2-37
4.1 传导电流	2-37
4.2 徙动电流	2-37
4.3 位移电流	2-37
4.4 电流连续性原理的一般形式	2-38
4.5 全电流定律的一般形式	2-38
5 媒质处于交变电磁场中的损耗	2-38
5.1 磁滞损耗	2-38
5.2 涡流损耗	2-38
5.3 电介质损耗	2-39
6 交变电磁场的基本特性	2-39
6.1 交变电磁场的基本方程组(麦克斯韦方程组)和媒质的性能	2-39
6.2 电磁场在两种媒质分界面上的边界条件	2-40
6.3 电磁场中的能量	2-40

6.4 电磁场的力	2-40	4.1 复数的两种座标表示形式及其互换	2-47
7 导电媒质内交变电磁场的一些效应	2-40	4.2 复数的四则运算	2-48
7.1 电磁屏蔽	2-40	4.3 相量运算的规则	2-48
7.2 趋肤效应	2-41	5 纯电阻、纯电感与纯电容电路	
7.3 邻近效应	2-41	中各量的关系	2-48
8 似稳电磁场	2-42	6 电阻、电感与电容的串联和并联	2-49
8.1 似稳电磁场的概念	2-42	7 位形图	2-50
8.2 获得似稳电磁场的条件	2-42	8 电路的谐振	2-50
8.3 属于似稳的电路	2-42	9 功率和功率因数	2-51
第5章 直流电路			
1 电 路	2-43	9.1 瞬时功率	2-51
1.1 电路的组成	2-43	9.2 有功功率	2-51
1.2 电路的物理量	2-43	9.3 视在功率	2-51
2 电阻与电导	2-43	9.4 功率因数	2-52
2.1 导体电阻的计算	2-43	9.5 无功功率	2-52
2.2 导体电阻与温度的关系	2-43	9.6 功率三角形	2-52
2.3 电导与电导率	2-44	9.7 功率因数的提高	2-52
3 欧姆定律	2-44	第7章 线性复杂电路的解法	
3.1 一段无源支路的欧姆定律	2-44	1 复杂电路	2-53
3.2 一段含源支路的欧姆定律	2-44	1.1 复杂电路有关名词的解释	2-53
3.3 回路的欧姆定律	2-44	1.2 电路中支路数与独立回路数、节	
4 电阻的串联与并联	2-44	点数间的关系——尤拉公式	2-53
5 电源的串联与并联	2-45	2 线性复杂电路	2-53
6 电能与电功率	2-45	2.1 线性阻抗	2-53
第6章 正弦交流电路			
1 正弦交流电流	2-45	2.2 线性电路	2-54
1.1 周 期	2-45	2.3 线性复杂电路的求解	2-54
1.2 频 率	2-45	3 基尔霍夫定律	2-54
1.3 相角与相角差	2-46	4 支路电流法	2-54
1.4 角频率	2-46	4.1 计算方法	2-54
1.5 正弦量的三要素	2-46	4.2 实 例	2-54
2 交流电的有效值与平均值	2-46	5 回路电流法	2-55
2.1 有效值 (均方根值)	2-46	5.1 方程组	2-55
2.2 平均值	2-46	5.2 实 例	2-55
2.3 波形因数与波顶因数	2-46	6 节点电位法	2-55
3 正弦量的表示法	2-46	6.1 方程组	2-56
3.1 旋转矢量法	2-47	6.2 实 例	2-56
3.2 相量法 (复数符号法)	2-47	7 叠加法	2-56
4 复数的运算	2-47	7.1 叠加原理	2-56
		7.2 叠加原理的适用范围	2-57
		8 星形联接与三角形联接的等值	

互换	2-57
9 二端网络	2-57
9.1 无源二端网络	2-57
9.2 含源二端网络	2-57
10 四端网络	2-58
10.1 四端网络的分类	2-58
10.2 无源四端网络的 Y 方程与 Y 参数	2-58
10.3 无源四端网络的基本方程与基本参数	2-58
10.4 无源四端网络的 H 方程与 H 参数	2-58
10.5 四端网络的特性——固有传输常数及其与基本参数的关系	2-59
10.6 无源四端网络的等值电路	2-59
10.7 含源四端网络	2-60
11 互感电路的计算	2-60

第8章 三相正弦交流电路

1 多相交流电路的一般概念	2-61
2 三相正弦交流电动势	2-61
2.1 三相正弦电动势的产生	2-61
2.2 三相正弦电动势的表示法	2-61
3 星形联接和三角形联接	2-62
3.1 星形(丫形)联接	2-62
3.2 三角形(△形)联接	2-62
4 对称三相电路的计算	2-63
4.1 “星形-星形”对称电路的计算	2-63
4.2 三角形对称电路的计算	2-64
5 不对称三相电路的计算	2-64
5.1 不对称“星形-星形”电路的计算	2-64
5.2 中点位移与中线	2-65
6 对称分量法	2-65
6.1 对称分量及其求法	2-65
6.2 三相电路中电压、电流对称分量的分析	2-66
6.3 对称分量法的应用	2-66
7 三相电路的功率	2-67
7.1 对称三相电路的功率	2-67
7.2 不对称三相电路的功率	2-67

第9章 非正弦交流电路

1 非正弦电动势、电压与电流	
----------------	--

产生的原因 2-68

2 非正弦周期量的分解	2-68
2.1 非正弦周期量分解为谐波的作用	2-68
2.2 非正弦周期量的数学分解法(傅里叶级数)	2-68
2.3 图解法	2-69
3 几种特定波形的谐波特点	2-70
4 非正弦周期量的有效值与平均值	2-70
4.1 非正弦周期量的有效值	2-70
4.2 非正弦周期量的平均值与均绝值	2-70
5 波形因数、波顶因数与畸变因数	2-72
6 常用波形的分析	2-72
7 非正弦交流电路的功率与等效正弦波	2-72
7.1 瞬时功率与有功功率	2-72
7.2 视在功率	2-72
7.3 功率因数	2-72
7.4 无功功率	2-72
7.5 畸变功率	2-72
7.6 等效正弦波	2-72

8 非正弦交流电路的计算	2-73
8.1 非正弦交流电路计算的原则与步骤	2-73
8.2 非正弦交流电路计算实例	2-73

第10章 线性电路中的过渡过程

1 换路及换路定则	2-74
2 过渡过程的计算方法	2-74
2.1 经典法及其步骤	2-74
2.2 算子法	2-75
3 过渡过程中的衰减常数与时间常数	2-75
4 r 、 L 电路的过渡过程	2-75
5 r 、 C 电路的过渡过程	2-75
6 电容通过电感和电阻的短路放电	2-75
7 r 、 L 、 C 电路接通于直流电源	2-79
8 r 、 L 、 C 电路接通于正弦电源	2-79

第11章 铁磁物质的磁性能和磁路

1 磁化过程	2-81
1.1 原始磁化曲线	2-81

1.2 磁滞回线	2-81	4.1 磁路计算的两种类型	2-84
1.3 基本磁化曲线	2-82	4.2 无分支磁路的计算	2-84
1.4 局部磁滞回线	2-82	4.3 分支磁路的计算	2-85
2 铁磁材料的分类与应用	2-82	5 交流磁路及其计算	2-86
2.1 硬磁材料	2-82	5.1 交流磁路的特点	2-86
2.2 软磁材料	2-83	5.2 铁磁材料的损耗	2-86
2.3 矩磁材料	2-83	5.3 交流铁心线圈的等值电路	2-87
3 磁路与磁路各定律	2-83	5.4 交流磁路的计算	2-87
3.1 磁路的组成	2-83	6 永久磁铁磁路	2-88
3.2 磁路的物理量与参数	2-84	6.1 给定永久磁铁磁路以确定 气隙磁通	2-88
3.3 磁路的欧姆定律	2-84	6.2 改变气隙时磁通的确定	2-89
3.4 磁路的基尔霍夫定律	2-84	6.3 给定气隙及其磁通求永久磁铁尺寸	2-89
4 直流磁路及其计算	2-84		

第1章 电的一般物理概念

恩格斯指出：“地球上几乎没有一种变化发生而不同时显示出电的现象”（《自然辩证法》）。电是物质的一种属性。本章将从原子的微观结构来说明若干电现象及其机理。

1 电荷与电磁场的概念

1.1 电荷与电量守恒定律

电荷是物质的固有属性之一。自然界不存在脱离物质而单独存在的电荷。

电荷有两种。一种叫正电荷，用符号“+”表示；另一种叫负电荷，用符号“-”表示。负电荷总是和电子相联系的；正电荷则和失去电子的原子、原子团或分子相联系的。如果某物体带有正的或负的电荷，那就是该物体失去或得到了一些电子的结果。电荷之间存在着相互的作用，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。

电荷的数量，称为电量，常用符号 Q 、 q 表示，在有理化 MKSA 单位制（简称 MKSA 制）中，它的单位是库仑。

通常，物体中正负电荷的数量是相等的。由于正负电荷的电性能相反，因而相互中和，物体在宏观上不呈现电性能。正负电荷是相互依存、相互矛盾着的双方，有了带正电荷的物体就必然同时出现带负电荷的物体，而且电量相等。总之，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能被转移（分离或中和）。电荷在转移前后，其总电量（正负电量的代数和）不变，这一规律叫做电量守恒定律。

1.2 电磁场的概念

在电荷的周围存在着一种特殊的物质——场。电荷之间的相互作用，就是通过这种场来进行的。

电荷相对于观察者是静止的情况下，和电荷相联系的场也是静止的。这种场称为静电场（见第2章）。当电荷运动而形成恒定电流时，则在恒定电流的周围存在稳定电场和稳定磁场（见第3章）。当电荷运动而形成交变电流时，则在交变电流的周

围空间存在着相互联系着的随时间变化的电场和磁场。这种场叫做交变电磁场（见第4章）。交变电磁场能以电磁波的形式向着四周空间辐射出去。但当交变电流的频率较低而所考虑的距离又较短，因而可以忽略辐射等现象时，这种交变电磁场就称为似稳电磁场。电工领域所涉及的一般就是这种似稳电磁场（见第4章第8节）。

2 原子

物质是无限可分的。以气态、液态或固态存在的物质，都是由分子组成的，而分子则由更小的粒子——原子所组成。

原子是由原子核和绕核运动的若干个电子组成。原子核由质子和中子两种基本粒子组成。质子与中子等基本粒子也只是物质分割的无限系列中的一个层次。质子带正电，其电量与电子电量相等，静止质量 m_p 约为 1.67×10^{-27} 公斤。中子是不带电的中性粒子，其静止质量基本上与质子相同。

2.1 电子

电子是基本粒子之一，带有负电荷。目前已知自然界中存在的最小电量就是一个电子的电量（常用 e 表示），物体所带的电量都是这个最小电量的整数倍。一个电子的电量等于 -1.602×10^{-19} 库仑。因此，一库仑的电量相当于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量的绝对值之和。电子的静止质量约为 9.1×10^{-31} 公斤，差不多是质子质量的 $\frac{1}{1836}$ ，所以原子的质量几乎全部集中在原子核上。

原子中的电子除了作绕核运动外，还作自旋运动。它们除了具有电的性质以外，还有磁的性质（见第3章5.2）。

① 物体的质量是随运动速度而变的，物体以速度 v 运动时的质量 m 为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}$$

其中， m_0 为物体静止时的质量， c_0 为真空中的光速。

2-2 第2篇 电工基础

由于异性电荷的相吸作用,所以在通常情况下,原子中的电子是不能脱离原子的。而且原子中的电子数与核内的质子数是相等的,因而原子的总电量等于零,原子是中性粒子。

2.2 原子核中质子数与中子数的意义

具有相同质子数的原子属同一化学元素。目前已知的化学元素有 105 种,原子核内的质子数恰好是从 1 逐个增加到 105。原子核内的质子数就是原子序数。具有相同质子数和不同中子数的各种原子,称为该元素的同位素。例如,碳元素有三种同位素(它们的原子核中都有 6 个质子,但所含的中子数则分别为 6, 7, 8),叫做碳-12、碳-13、碳-14,符号分别为 C^{12} 、 C^{13} 、 C^{14} 。这三种碳原子的质量显然是不等的。通常以碳-12 质量的 $\frac{1}{12}$ 作为衡量原子、质子、中子等粒子质量的单位,叫做碳单位。一个质子或一个中子的质量约等于一个碳单位。将某原子的质量与一个碳单位相比较,所得的比值,称为该原子的原子量,约等于原子核中质子数与中子数之和。天然碳元素中含有三种同位素,原子量分别为 12, 13, 14, 而 C^{12} 总占绝大部分,所以碳的平均原子量略大于 12 而为 12.011。

2.3 原子中的电子能级

原子光谱的实验表明,在原子中运动的电子,它的能量只能是若干定值而不是任意值。电子具有的可能能量状态常用能级表示,图 2.1-1 示出了氢原子的能级。原子中电子的能量不能是任意值,这说明了原子中电子的运动状态不能是任意的。从量子力学可以得出和光谱实验相符的结论。

从量子力学可以得出,原子中电子的运动状态由四个量子数 n 、 l 、 m 、 m_s 所决定。而允许的运动

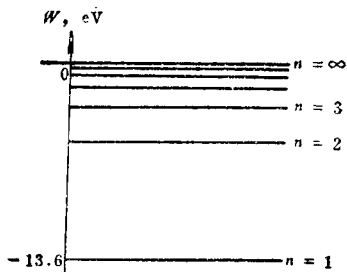


图 2.1-1 氢原子的能级

状态要求: n 取 $1, 2 \dots n$, 电子的能量基本上由 n 决定, n 称为主量子数; l 取 $0, 1, 2 \dots (n-1)$, l 的值决定了电子轨道动量矩的大小, l 称为角量子数; m 取 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, m 值决定了电子的轨道动量矩在空间某一方向的分量, m 称为磁量子数; m_s 可取 $\pm \frac{1}{2}$, 它决定了电子自旋动量矩在外磁场方向的分量, m_s 称为自旋量子数。所以,量子数实质上是反映并决定电子各种不连续的物理量的。

用量子力学方法可得出氢原子的能级为:

$$W_n = -\frac{W_H}{n^2} \quad \text{J} \quad (2.1-1)$$

式中 W_n ——第 n 个能级的能量(物理学中能级能量常用 E 表示) J (习用单位为电子伏特 eV, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

W_H ——正常氢原子的电离能, 等于 $2.18 \times 10^{-18} \text{ J}$ (习用值为 13.6 eV)

n ——主量子数

2.4 原子中电子的壳层分布

当主量子数 n 为某值时, l 的可能值为 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$, 共 n 个; 当 l 给定时, m 的可能值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, 共 $2l+1$ 个; 当 n 、 l 、 m 都给定时, m_s 可为 $+\frac{1}{2}$ 和 $-\frac{1}{2}$ 两个可能值。所以,对于某个 n 值,最多的电子数为

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = \frac{2+2(2n-1)}{2} n = 2n^2 \quad (2.1-2)$$

将原子中的电子按照 n 值来划分,并对不同的 n 值称为不同的层,这就称为电子壳层分布。通常用 K、L、M、N、O、P...等符号分别表示 $n=1, 2, 3, 4 \dots$ 时的壳层。从 (2.1-2) 式可以看出, K 层最多可容纳 2 个电子; L 层最多可容纳 8 个电子; M 层最多可容纳 18 个电子。依此类推。当某个电子层容纳的电子数恰好是 $2n^2$ 个时,该电子层即为满壳层。但是,对于最外一个电子层来说,不论其 n 为何值,最多只能容纳 8 个电子。

图 2.1-2 示出了氟原子、氯原子、铜原子的电子壳层分布。

从电子壳层的组成可以看出,除了 K 层以外,其余的壳层都含有 $l>0$ 的状态,所以电子壳层实际

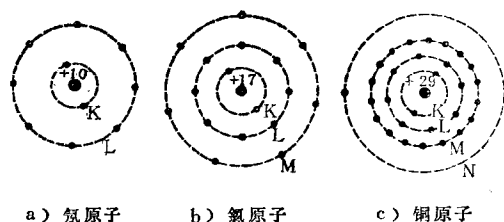


图2-1-2 氦、氯、铜原子的电子壳层分布

上包含了一组能级。

一个体系的能量愈小，就愈是稳定。这称为能量最小原理。原子中电子的分布，也符合这个原理。但是，量子力学还表明，在同一原子中，不能有两个或两个以上的电子具有相同的状态。这称为泡利不相容原理。所以，原子中电子的分布必须同时符合这两条原理。

对于多电子原子，电子的能量不仅与 n 有关，还与 l 有关。在同一个 n 值时，一般， l 愈大，能量也愈大。所以原子中电子的能量用 n, l 两个量子数来表示。在讨论原子结构时，常用 $s, p, d, f \dots$ 等符号分别表示 $l = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。所以电子在原子中的分布将从能量最低的 ($1s$) 状态开始。以氦原子为例，氦原子中10个电子的状态可以表示为：

$$(1s)^2(2s)^2(2p)^6$$

括号右上角的数字表示电子数。即两个电子是 $n = 1, l = 0$ ，因而属于K层；两个电子 $n = 2, l = 0$ ，因而属于L层；还有6个电子 $n = 2, l = 1$ ，因而也属于L层，所以L层共有8个电子。图2-1-3为大多数原子中电子分布的顺序图。

原子中的电子按照上述分布时，原子的能量最小，因而也最稳定。这种原子称为基态原子，这时电子所占的能级称为基态能级。当电子从外界获得能量（例如原子受高速粒子的碰撞或受光照射时），就从原来的能级跃迁到较高的能级，这时原子的状态称为激发态，而电子所占的能级称为激发态能级。处于激发态的原子是不稳定的，跃迁到激发态能级的电子在很短的时间内会自动地跃迁到原来的能级，同时以电磁波的形式辐射出能量，其频率与能量的关系为

$$hf_{m0} = W_m - W_0 \quad \text{J} \quad (2-1-3)$$

式中 h ——普朗克常数，为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
(习用值为 $6.626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$)

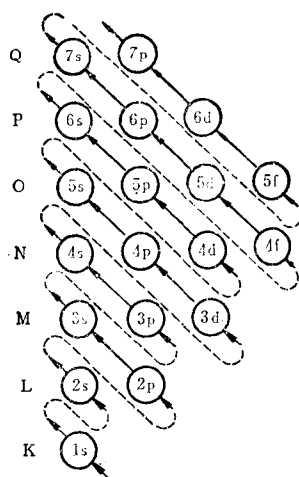


图2-1-3 电子填充顺序图

f_{m0} ——辐射电磁波的频率Hz (物理中习用符号为 ν_{m0})

W_m ——激发态能级的能量J

W_0 ——基态能级的能量J

能级的能量单位习用电子伏特，故能级用 eV 表示时，公式 (2-1-3) 右边要乘以 1.6×10^{-19} 。

当电子获得的能量足够大时，它可以脱离原子核的束缚，成为自由电子。而失去电子的原子就成为带正电的离子。对于这种自由电子来说，它的能量和一般物体一样，可取任意值。

严格地说，壳层分布并不表示电子在原子中的空间轨迹，而是能量分布。由于微观粒子的运动具有独特的规律，量子力学指出，原子中的电子在运动时是没有像宏观物体运动时那样的确定轨道的，只能得出电子出现在原子中某处的几率。如果用小黑点的多少来表示电子出现在原子中各处的几率大小，小黑点多的地方就是电子出现几率大的地方，小黑点少的地方就是电子出现几率小的地方，用这种方法描写电子在原子中出现的几率分布，称为电子云，见图2-1-4。电子的几率分布也就是它的电荷的几率分布，所以电子云可用来表示电子的电荷密度分布。按照电子的几率分布可作出等几率面。通常把由等几率面所围成而总几率很大的（例如达90%以上）空间区域作为电子云的实际空间分布。这种空间区域可随着电子的不同运动状态而有各种形状。在原子结构中，常把它称为轨道。显然，这

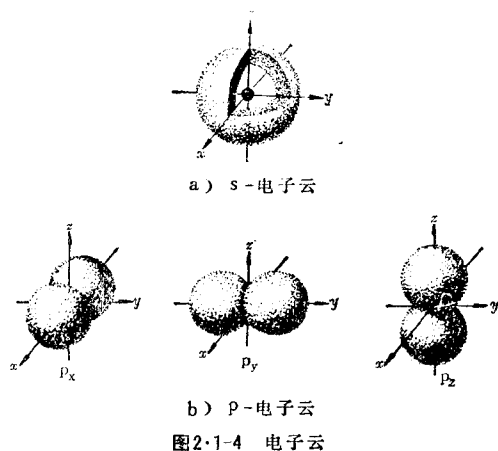


图2-1-4 电子云

与宏观轨道的含义是不同的,指的是电子常在这一空间区域内运动。

图2-1-4 a 为 s -电子云。由于 s 态的轨道动量矩为零,所以 s -电子云没有方向性,对原子核呈球面对称分布。正常氢原子中的电子云就是这种分布。图2-1-4 b 为 p -电子云。 p -电子云则由于轨道动量矩等于1而具有方向性,其图形为无柄哑铃状,切面为“8”字形。例如碳原子的电子结构为 $(1s)^2 (2s)^2 (2p)^2$,其中 s 电子均为自旋方向相反的配对电子,其 $1s$ 的电子云为离核较近的球壳, $2s$ 的电子云则为离核较远的球壳,在外电子壳层还有2个 p 电子是不配对的,具有不同的轨道动量矩分量,所以它们的电子云是相互垂直的两个无柄哑铃。在有些原子中, p 电子最多可达6个,恰好配成三对,其电子云可以形成 p_x, p_y, p_z 三个垂直方向的无柄哑铃。

2.5 价电子

元素的化学性质主要决定于原子最外层中的电子数,这种电子称为价电子。最外层电子数是8时,原子特别稳定。它们通常不参与化学反应,称为惰性元素,如氖Ne、氩Ar、氪Kr、氙Xe、氡Rn等。虽然氦He最外层的电子数是2,但也是惰性元素,这是因为这两个电子已使最外层为满壳层了。一般,最外层电子数为1,2,3的元素,在化学反应中容易失去最外层电子,它们大多是金属。与此相反,最外层电子数为5,6,7的元素,其最外层容易获得电子,它们大多数是非金属。有些元素的原子,其次外层也有部分电子可以失去,这种

电子也叫价电子。在化学反应中,原子得到或失去的价电子数叫做原子价。同一种元素在不同的化学反应中可有不同的原子价。

2.6 离子

当中性的原子、原子团或分子失去电子(或得到电子)时,它的正负电荷就不再相等,成为带正电(或负电)的原子、原子团或分子。这种带电的原子、原子团或分子称为离子。带正电的叫正离子,带负电的叫负离子。一般,金属容易失去其价电子而成为正离子;非金属则容易获得电子而成为负离子。离子的化学性质与原子大不相同,如钠原子能与水起剧烈的化学反应,而钠离子就不能与水起化学反应。

3 分子

3.1 分子的组成

分子由原子组成。分子是保持物质化学性质的最小粒子。物质的分子由同一种原子组成的,叫做单质;由不同原子组成的,叫化合物。

在分子中,原子之间存在着强烈的相互作用。这种强烈的相互作用叫做化学键。化学键有多种类型,现在明确知道的有三种:离子键、共价键和金属键。

金属原子与非金属原子的结合,是由于原子间电子的转移,形成正离子和负离子,靠正负离子间的引力而结合起来的。这种化学键叫离子键,又叫电价键,离子键是没有方向性的。

由共有电子对把两个相同或不相同原子结合起来的化学键,叫共价键。由于共价键构成的分子中不存在离子,只有原子,所以共价键又叫原子键。

如图2-1-5,当两个氯原子靠近时,每个原子都给出一个价电子为两个原子所共有。两个原子核与共有电子对互相吸引,使两个氯原子结合成一个氯分子。共价键是靠自旋方向相反的电子配对结合的。当一个电子与另一个电子配对以后,就不能再与第三个电子配对了。这种性质叫做共价键的

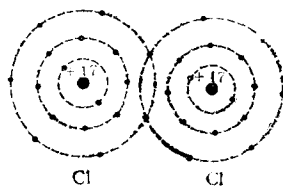


图2-1-5 氯分子的共价键结合

饱和性。共价键还有方向性，例如，当两个氢原子的 s 电子和一个氧原子的两个 p 电子配对而形成水分子 H_2O 时，在两个 $O-H$ 键之间总保持着 105° 的夹角，见图2-1-6。图中两个原子之间的每条短线代表一个共价键。

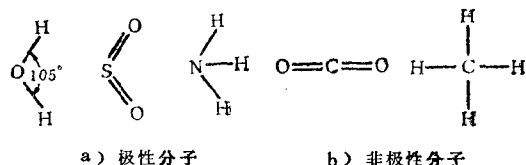


图2-1-6 极性分子与非极性分子

金属原子的价电子与原子核的联系比较松弛，因而金属原子很容易失去价电子，成为正离子。在金属晶体中，原子彼此靠得很近而且是有规律地排列起来的。其中正离子组成晶体点阵或晶格，见图2-1-7。这样，各个金属原子的价电子在原子间的相互作用下便脱离各自的原子，成为共有电子。它们可以在金属晶体中自由运动，所以称为自由电子。因此，金属晶体可以看成是由金属离子和自由电子所组成，其中金属离子则组成晶格。

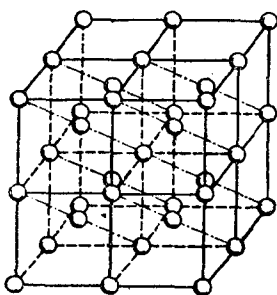


图2-1-7 锂金属的晶体结构（体心立方）

金属键是由自由电子和组成晶格的金属离子之间的相互作用构成的。金属键没有方向性和饱和性。

3.2 极性分子与非极性分子

在任何分子中，都有带负电的电子和带正电的原子核。对分子中所有的电子来说，可以认为它们的负电荷等效地集中于一点，有一个负电荷中心。同样，对所有的正电荷也有一个正电荷中心。凡是这两个电荷中心不重合的分子，叫做极性分子（又称有极分子），重合的叫非极性分子（又称无极分子）。由离子键构成的分子，是有极性的。由共价键构成的分子，结构不对称的为极性分子，结构对称的为非极性分子（见图2-1-6）。这可以从共价键的极性来说明。当共价键是在两个不同原子间形

成时，由于不同原子的原子核对共有电子对的吸引力不同，所以共有电子对偏向引力较强的原子，使该原子略带负电性，而另一个原子则略带正电性。这样，这种共价键就有了极性。例如，水分子中，氧原子略显负电性，氢原子略显正电性， $O-H$ 键就有了极性。因此，由共价键构成的分子，结构不对称的为极性分子。

4 导体、绝缘体、半导体

4.1 能带的概念

在 N 个原子组成的晶体中，如果不考虑相邻原子间的作用，则各个原子的相应能级就完全相等，从而 N 个原子的相应能级就重迭在一起，称为简并能级。实际上，晶体中相邻原子间的距离很小，和原子的大小有同等数量级（原子的直径约为 10^{-8} 厘米），原子之间存在着相互作用，所以这些简并能级将分裂成 N 个与原来能级很接近的不同能级。

在实际晶体中，原子的数目 N 非常大，由于分裂出来的新能级又与原来的简并能级很接近，所以，相邻新能级间的距离非常小（数量级为 10^{-22} 电子伏特），几乎可以看成是连续的。这 N 个新能级形成一个带，称为能带，见图2-1-8。图中 ΔW 表示能带的宽度。晶体中能带的宽度和原子间的距离有关，距离愈小则宽度愈大。

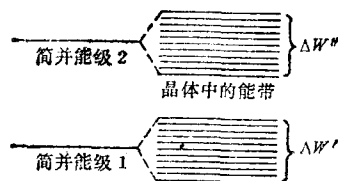


图2-1-8 晶体中能带的形成简图

由价电子所处的基态能级形成的能带称为价带。价电子则处于这些价带上。价带的宽度约几个电子伏特。如果价带中所有的能级都填满电子，则就成为满带 $\ominus$ 。

激发态能级也要形成能带。在基态时，这种能

$\ominus$ 内电子壳层当然也要形成能带。但因一般原子的内电子壳层都填满电子，在形成能带时，这些能级也填满电子，通常这些电子对导电没有作用，所以可不予考虑。

带中没有电子,所以叫做空带。由于价电子经激发后可跃迁到空带中,从而参与导电,所以空带又叫导带。

由于晶体中原子的每一个能级都要形成一个能带,所以当两个相邻能带不重叠时,就会出现一个不存在能级的区间。这种区间称为禁带。

从能带角度来看,导体的能带特征是:或者价带未填满电子,或者价带和导带发生交迭。绝缘体的能带特征是:价带是满带,而且价带和导带之间的禁带宽度比较大。半导体的能带特征是:价带也是满带,但价带与导带之间的禁带宽度介于导体和绝缘体的禁带宽度之间,而且比绝缘体的禁带宽度要小得多。

4.2 金属——第一类导体

金属都是导体。常温下,金属的电阻率在 10^{-7} 欧·米以下。正因为金属是良好的导体,所以是电机工程中主要的导电材料。铜、铝、铁以及某些合金是常用的导电材料。

金属的导电原理可以用能带理论予以说明。例如,由单价原子组成的金属晶体,价带中有 N 个能级,因而可以容纳 $2N$ 个电子,但现在只有 N 个电子,所以价带只填了一半,见图2-1-9a。在外电场的作用下,价带中的电子可以从低能级跃迁到高能级,从而参与导电,因此这种金属就是导体。对于碱土金属,例如锌Zn,原子中有30个电子,它的电子结构是 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^2(3d)^{10}$,最外壳层的 $4s$ 状态已有2个电子,似乎 $4s$ 能带已填满,但实际上锌是导体。这是由于较高的能带(空带)与 $4s$ 能带发生了重叠,见图2-1-9b,使一部分 $4s$ 电子占有了重叠的较高能带的能级,因此 $4s$ 能带就不是满带,故锌是导体。但如钙Ca和铍Be等,由于能带重叠很小,所以导电性能较差。

金属导体的电阻随温度增加而增大。实验表

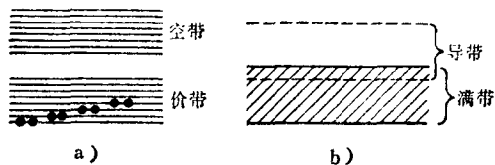


图2-1-9 金属的能带简图

明,微观粒子具有波粒二重性,既具有粒子性又具有波动性。从量子理论来看,金属导体的电阻来源于电子波和组成点阵的金属离子的相互作用。假定金属的点阵是理想的,而且没有振动,则电子波通过点阵时就不会发生散射,就像光通过理想晶体时没有散射一样。实际上,组成点阵的金属离子将随着温度的升高而在平衡位置附近作愈来愈强烈的振动,从而破坏了点阵的理想结构。这就使得电子波通过点阵时将发生散射。亦即,电子的运动将受到振动着的离子所产生的阻力。因此金属导体实际上存在着电阻。由于散射作用的强弱决定于温度的大小,所以金属导体的电阻随温度而变。当用电阻率表示时,则电阻率可写成

$$\rho_T = \rho(T)$$

$\rho(T)$ 表示由点阵热振动引起的电阻率。用量子力学对散射所作的理论计算表明,对于大多数金属说来,约当 $T > 273.15\text{ K}$ 时, ρ_T 近似地正比于 T ,即

$$\rho_T \propto T$$

而约当 $T < 20\text{ K}$ 时,则 ρ_T 近似地正比于 T^5 ,即

$$\rho_T \propto T^5$$

这些结论在一定的温度范围内与实验结果基本上是符合的。

由于一般的金属导体总含有杂质,所以一般说来,电阻率可写成

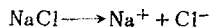
$$\rho = \rho_i + \rho_T$$

式中, ρ_i 为由杂质原子引起电子波的散射而产生的电阻率,在杂质原子浓度很小时,它与温度无关,为一数值随杂质种类而定的常数。

4.3 电解液——第二类导体

酸、碱、盐的水溶液都能导电。因此常把这类物质称为电解质,它的水溶液叫做电解液。

电解液能够导电,是由于电解质在水中发生电离,产生了带有不同电荷的离子。例如,食盐NaCl溶于水时,受到水分子的作用,电离成离子。即



由于电解液的导电是靠离子进行的,所以电解液导电的性质与离子的浓度有关。一般,离子的浓度愈大,导电性能愈好。

4.4 绝缘体

几乎不能导电的物质称为绝缘体,或电介质。