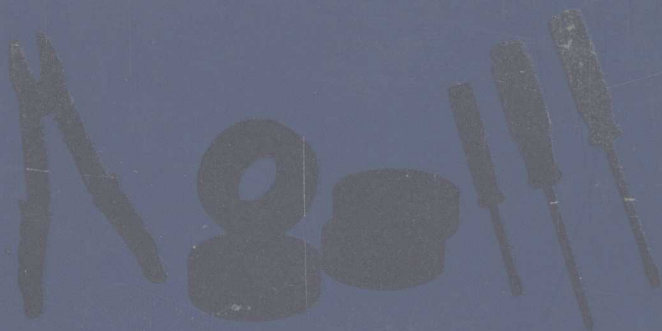


# 电气技师手册

DIANQI JISHI SHOUCHE

《电气技师手册》编委会 编著

福建科学技术出版社



中国标准书号 15500·33382·33600

ISBN 7-5338-2336-0

I. 电… II. 电… III. 电… IV. TM-62

15500·33382·33600

# 电气技师手册

主任委员 张友汉 赵承荻

副主任委员 刘晰梦 黄旭 黄华圣 张文华 李乃夫

委员 (按姓氏笔画排列)

方宁 王文蓉 王兆凤 王奇 朱力恒 何伟

张微波 肖耀南 杨立军 陈海洲 陈湘 罗厚军

金山 首珩 徐利娟 贾威 高男 曹卫权

彭涛 熊林

册手册技师电	合	并
志报	查	并
技新	行	出
技各	群	登
技新	测	群
技新	隔	甲
787	本	开
69	游	甲
323	技	甲
300	火	测
390	火	甲
1—	线	甲
12B	号	并
115	份	宝

福建科学技术出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气技师手册/张友汉主编. —福州: 福建科学技术出版社, 2004. 9

ISBN 7-5335-2336-9

I. 电… II. 张… III. 电气设备—技术手册  
IV. TM-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 003065 号

书 名	电气技师手册
作 者	张友汉
出版发行	福建科学技术出版社 (福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
印 刷	福建地质印刷厂
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张	69.75
字 数	2234 千字
版 次	2004 年 9 月第 1 版
印 次	2004 年 9 月第 1 次印刷
印 数	1—4 000
书 号	ISBN 7-5335-2336-9/TN·300
定 价	115.00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

# 前 言

当代科学技术的飞速发展，缩短了产品的研发周期，使其科技含量不断提高，各项经济技术指标都有了更高的要求。而同时，经济全球化的浪潮，已使我国进入世界制造大国的行列。毫无疑问，一个国家其直接从事产品生产及加工的一线技术工人的操作技能水平，对于保证该国产品质量，降低损耗，提高效益，增强竞争力，是极为重要的。因此我国近些年来对职业技术教育及管理方面给予了极大的重视，制订了相应的政策与法规，以便尽快造就一批以高中级技术工人骨干及主体的高素质技术工人队伍。

技师是高级工人队伍中的优秀技术人才，是各行各业的能工巧匠。他们知识全面，技艺高超，一专多能，经验丰富，担负着组织指导现场生产，进行技术攻关，指导培养技术工人，实施技术改造与技术革新，推广新技术、新工艺、新设备、新材料等任务。

根据现行的技师队伍的岗位职责，过去的知识和技能要求已远远不够了。广大技师及高级技术工人对此有迫切的需求。为此，我们组织编著了这本《电气技师手册》。参加编撰的人员为来自高等院校的教师、科研及设计部门的研发人员及企业第一线的工程师。他们带来了丰富的现场实践经验和教学经验。在本手册的编写中，我们特别注意一个“新”字，选编了大量与生产实践联系紧密的新技术、新工艺、新知识，以适应当前生产和技术的实际需求。

《电气技师手册》是参照劳动部、机械工业部共同颁发的《工人技术等级标准》中有关工种高级工“知识要求，技能要求”，中华人民共和国职业技能鉴定规范（考核大纲）中有关工种高级工“鉴定要求、鉴定内容”，国家技术监督局制定的《技术监督行业技师技术考核标准》，并结合企业实际生产和技师工作实际情况而编写的。在编写过程中力求内容新颖、选材实用、叙述简明扼要、图表数据可靠，全书采用最新的电气国家标准 GB/T4728-98 到 2000《电气简图用图形符号》，GB/T5465-1996《电气设备用图形符号绘制原则》和 GB/7159-1996《电气技术中的文字符号制定通则》。

本手册可供电气工程、电子技术及机电数控技术等方面的技师、高中级技术工人使用，也可作为各类相关技术人员及各级各类职业技术学校教学人员的参考书。

科学技术高速发展，知识更新日益加快，今天的新知识明天也许就不再新鲜。无疑，本版的《电气技师手册》只是第一步，我们将不断根据需求修订再版，同时也希望广大读者提出意见，并对书中的不足及错误之处批评指正。

编著者

2004年1月

# 目 录

## 第一篇 基本概念和公式

第一章 电磁学基础 .....	(1)
1.1 电及电场 .....	(1)
1.2 磁场 .....	(5)
1.3 电磁场与电磁效应 .....	(7)
第二章 电工基础 .....	(10)
2.1 电路与电路定律 .....	(10)
2.2 电路分析的一般方法 .....	(12)
2.3 一端口网络与二端口网络 .....	(13)
2.4 线性动态电路 .....	(14)
2.5 正弦交流电路 .....	(15)
2.6 非正弦电路 .....	(19)
2.7 磁路及磁路计算 .....	(20)
第三章 电子技术 .....	(24)
3.1 模拟电子技术 .....	(24)
3.2 数字电子技术 .....	(35)
3.3 电力电子技术 .....	(44)

## 第二篇 电工材料与电线电缆

第一章 绝缘材料 .....	(53)
1.1 概述 .....	(53)
1.2 气体电介质 .....	(55)
1.3 液体绝缘材料(绝缘油) .....	(58)
1.4 绝缘漆、绝缘胶及绝缘粉 .....	(60)
1.5 绝缘纤维制品 .....	(73)
1.6 绝缘纸品 .....	(80)
1.7 电工层压制品 .....	(85)
1.8 电工用橡胶、塑料 .....	(90)
1.9 绝缘薄膜及其复合制品及粘带 .....	(98)
1.10 云母制品 .....	(101)
第二章 磁性材料 .....	(110)
2.1 磁性材料基本性能 .....	(110)
2.2 软磁材料 .....	(111)

2.3	硬磁材料	(123)
2.4	特殊磁性材料	(131)
<b>第三章</b>	<b>特殊导电材料</b>	<b>(131)</b>
3.1	电阻材料	(131)
3.2	电热材料	(138)
3.3	电触头材料	(147)
3.4	热双金属片材料	(152)
3.5	常用熔体材料	(156)
3.6	电刷	(156)
3.7	热电偶	(161)
<b>第四章</b>	<b>电线电缆</b>	<b>(164)</b>
4.1	裸电线	(164)
4.2	电磁线	(168)
4.3	电气装备用电线电缆	(174)
4.4	电力电缆	(189)
4.5	控制电缆	(195)
4.6	信号电缆	(198)
4.7	通信电缆与光纤光缆	(199)

## 第三篇 电机

<b>第一章</b>	<b>旋转电机通论</b>	<b>(204)</b>
1.1	电机的用途与分类	(204)
1.2	电机的绝缘与温升	(204)
1.3	电机的工作制和定额	(204)
1.4	电机的防护类型	(205)
1.5	电机的冷却方式	(207)
1.6	电动机的选择	(208)
1.7	电机的通用试验	(211)
<b>第二章</b>	<b>三相异步电动机</b>	<b>(217)</b>
2.1	三相异步电动机基本工作原理	(217)
2.2	三相异步电动机的分类、型号及选用	(218)
2.3	常用三相异步电动机技术数据	(222)
2.4	三相异步电动机绕组	(254)
2.5	三相异步电动机常见故障分析与检修	(272)
2.6	小型三相异步电动机定子绕组的重绕	(279)
<b>第三章</b>	<b>同步电机</b>	<b>(288)</b>
3.1	同步电机的分类、用途及工作原理	(288)
3.2	常用同步电动机的主要技术数据	(292)
3.3	三相同步电动机的常见故障及排除	(301)
<b>第四章</b>	<b>直流电机</b>	<b>(302)</b>

4.1	直流电机的分类、型号及用途 .....	(302)
4.2	直流电动机的工作原理及励磁方式 .....	(304)
4.3	直流电机的换向及整流供电 .....	(305)
4.4	常用直流电动机技术数据 .....	(307)
4.5	直流电动机的使用、维护及故障处理 .....	(322)
<b>第五章</b>	<b>微特电机 .....</b>	<b>(327)</b>
5.1	概述 .....	(327)
5.2	微型直流电动机 .....	(329)
5.3	微型异步电动机 .....	(337)
5.4	微型同步电动机 .....	(346)
5.5	单相交流换向器电动机 .....	(349)
5.6	自整角机 .....	(353)
5.7	旋转变压器 .....	(359)
5.8	测速发电机 .....	(360)
5.9	伺服电动机 .....	(370)
5.10	步进电动机 .....	(377)
5.11	直线电动机 .....	(383)
5.12	无刷直流电动机 .....	(386)
<b>第六章</b>	<b>变压器 .....</b>	<b>(388)</b>
6.1	变压器的分类及其工作原理 .....	(388)
6.2	电力变压器 .....	(391)
6.3	小型单相变压器 .....	(402)
6.4	特殊用途变压器 .....	(412)

## 第四篇 低压电器与控制电路

<b>第一章</b>	<b>常用低压电器 .....</b>	<b>(422)</b>
1.1	概述 .....	(422)
1.2	主令电器 .....	(425)
1.3	接触器 .....	(441)
1.4	继电器 .....	(457)
1.5	熔断器 .....	(481)
1.6	低压断路器 .....	(487)
<b>第二章</b>	<b>电气控制电路 .....</b>	<b>(497)</b>
2.1	电气图的识读与绘制 .....	(497)
2.2	电器元件的安装及布线工艺 .....	(503)
2.3	常用机床电气控制电路 .....	(506)

## 第五篇 半导体器件与传感器

<b>第一章</b>	<b>概述 .....</b>	<b>(511)</b>
1.1	半导体器件的分类 .....	(511)

1.2	集成电路的分类与外封装	(511)
1.3	半导体器件型号命名法	(513)
1.4	传感器应用领域及其分类	(516)
<b>第二章</b>	<b>半导体器件</b>	<b>(521)</b>
2.1	半导体二极管	(521)
2.2	半导体三极管	(526)
2.3	场效应晶体管	(539)
2.4	稳压管	(541)
2.5	运算放大器	(545)
2.6	数字集成电路	(560)
2.7	晶闸管	(573)
2.8	控制极可关断晶闸管 (GTO)	(579)
2.9	电力 MOSFET	(581)
2.10	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	(584)
<b>第三章</b>	<b>传感器</b>	<b>(586)</b>
3.1	光传感器	(586)
3.2	红外传感器	(590)
3.3	温度传感器	(593)
3.4	压力传感器	(595)
3.5	磁敏传感器	(599)
3.6	流量传感器	(602)
3.7	音响传感器	(604)
3.8	湿度传感器	(607)
3.9	气敏传感器	(608)
3.10	液位、物位传感器	(610)
3.11	传感器典型应用电路	(612)

## 第六篇 工业变频技术

<b>第一章</b>	<b>变频器的组成及选用</b>	<b>(621)</b>
1.1	变频器的基本组成	(621)
1.2	变频器的额定数据	(623)
1.3	变频器的种类	(623)
1.4	变频器的选用	(626)
<b>第二章</b>	<b>常用变频器</b>	<b>(627)</b>
2.1	惠丰公司 HFV 系列变频器	(627)
2.2	佳灵公司 JP6C-T9/J9 系列变频器	(628)
2.3	台达公司 VFD 系列变频器	(630)
2.4	丹佛斯公司 VLT-2800 系列变频器	(631)
2.5	三菱电机公司 FR 系列变频器	(632)
2.6	富士电机公司 FRENIC 5000 系列变频器	(634)



2.7	三星公司 SAMCO—i 系列变频器	(639)
2.8	安川公司 VS-616G5 系列变频器	(641)
2.9	佳灵 ZY 系列中压变频器	(642)
2.10	佳灵 GY 系列高压变频器	(644)
第三章	变频器的应用	(646)
3.1	变频器应用概况	(646)
3.2	变频器应用实例	(647)

## 第七篇 工业控制计算机

第一章	工业控制计算机概述	(655)
1.1	工业控制计算机的主要特点	(655)
1.2	工业控制计算机的发展	(655)
1.3	工业控制计算机分类	(656)
第二章	单片微型计算机	(659)
2.1	概述	(659)
2.2	MCS-51 系列单片机的硬件结构	(662)
2.3	MCS-51 系列单片机的指令系统	(675)
2.4	MCS-51 系列单片机的实用程序设计	(681)
2.5	MCS-51 系列单片机的系统扩展与应用	(691)
2.6	MCS-96 单片机	(705)
第三章	可编程控制器	(720)
3.1	概述	(720)
3.2	松下电工公司的 PLC	(732)
3.3	欧姆龙公司的 PLC	(772)
3.4	三菱公司的 PLC	(787)
3.5	PLC 控制系统的设计、装配与维护	(797)

## 第八篇 CAD/CAM/CAE

第一章	CAD/CAM/CAE 系统的硬件配置	(803)
第二章	CAD/CAM/CAE 系统的软件	(805)
2.1	软件要求	(805)
2.2	AutoCAD 简介	(805)
2.3	Mastercam 简介	(807)
2.4	Pro/Engineer 简介	(809)
2.5	Cimatron 简介	(810)
2.6	UG 简介	(812)
第三章	AutoCAD 2002 (中文版)	(816)
3.1	AutoCAD 2002 使用说明	(816)
3.2	AutoCAD 2002 常用命令	(818)
3.3	AutoCAD 2002 其他功能	(833)

第四章 计算机仿真 .....	(835)
4.1 Protel 99 SE 电路设计仿真软件 .....	(835)
4.2 MULTISIM 2001 电路设计仿真软件 .....	(868)

## 第九篇 数控机床

第一章 数控机床的组成及其特点 .....	(909)
1.1 数控机床的组成及工作原理 .....	(909)
1.2 数控机床的特点 .....	(910)
1.3 数控机床的分类 .....	(910)
第二章 数控机床的机械部件与结构 .....	(913)
2.1 数控机床的结构特点 .....	(913)
2.2 数控机床的主轴及主传动部件 .....	(914)
2.3 数控机床进给系统机械传动结构 .....	(916)
2.4 数控机床的自动换刀装置 .....	(919)
第三章 伺服驱动系统 .....	(924)
3.1 伺服系统的基本要求 .....	(925)
3.2 步进电动机开环进给伺服系统 .....	(925)
3.3 步进电动机开环控制 .....	(926)
第四章 计算机数控 (CNC) 系统 .....	(929)
4.1 CNC 装置的组成 .....	(929)
4.2 CNC 装置的工作流程 .....	(930)
4.3 CNC 系统的硬件结构 .....	(931)
第五章 数控机床程序的编制 .....	(933)
5.1 数控代码 .....	(933)
5.2 数控车床编程指令 .....	(937)
5.3 数控铣床编程指令 .....	(943)

## 第十篇 供电与配电

第一章 发电简介 .....	(946)
1.1 发电装置名词术语 .....	(946)
1.2 水电站 .....	(946)
1.3 火电厂 .....	(948)
1.4 核电站 .....	(949)
1.5 其他发电方式 .....	(951)
第二章 电力网络 .....	(952)
2.1 电力系统 .....	(952)
2.2 电力负荷及负荷分类 .....	(955)
2.3 供电质量 .....	(956)
2.4 高压直流输电 .....	(958)
第三章 配电系统 .....	(962)

3.1	配电方式 .....	(963)
3.2	低压配电系统 .....	(965)
3.3	用电设备端的配电箱(柜、台) .....	(966)
第四章	低压输电系统 .....	(971)
4.1	工业企业电力负荷的计算 .....	(971)
4.2	导线、电缆截面的选择计算 .....	(975)
4.3	低压电力线路的敷设 .....	(981)
4.4	进户、计量装置 .....	(985)
4.5	电力电缆的运行 .....	(987)
4.6	架空电力线路的运行 .....	(989)

## 第十一篇 电气照明及电加热

第一章	电气照明 .....	(981)
1.1	照明基本知识 .....	(981)
1.2	照明用具 .....	(992)
第二章	电加热设备 .....	(1000)
2.1	电热设备标准 .....	(1000)
2.2	电阻加热炉 .....	(1001)
2.3	电弧炉 .....	(1005)
2.4	感应炉 .....	(1009)
2.5	特殊加热设备 .....	(1014)
2.6	电弧焊机 .....	(1018)
2.7	电阻焊机和其他焊机 .....	(1025)

## 第十二篇 电子测量仪表与测量技术

第一章	电子测量仪器仪表 .....	(1028)
1.1	指示式仪表 .....	(1028)
1.2	数字式仪表 .....	(1029)
1.3	检流计 .....	(1029)
1.4	电位差计 .....	(1030)
1.5	电桥 .....	(1031)
1.6	积算仪表 .....	(1031)
1.7	记录仪表 .....	(1032)
1.8	显示仪表 .....	(1032)
1.9	调节仪表 .....	(1035)
1.10	遥测仪表 .....	(1036)
1.11	自动测试仪器 .....	(1036)
1.12	逻辑分析仪 .....	(1039)
1.13	工业流程分析仪 .....	(1040)
1.14	自动控制系统中的执行器 .....	(1042)

1.15 工业自动化仪表的发展趋势 .....	(1042)
<b>第二章 电子测量技术 .....</b>	<b>(1042)</b>
2.1 电子测量的分类与误差 .....	(1042)
2.2 电量的测量 .....	(1044)
2.3 非电量的测量 .....	(1052)

### **第十三篇 安全用电与节约用电**

<b>第一章 触电预防与急救 .....</b>	<b>(1065)</b>
1.1 人身触电及其预防 .....	(1065)
1.2 触电的急救 .....	(1068)
<b>第二章 安全用电 .....</b>	<b>(1069)</b>
2.1 电工安全操作 .....	(1069)
2.2 漏电保护装置 .....	(1071)
2.3 保护接地与接零 .....	(1074)
2.4 防雷 .....	(1078)
2.5 电气火灾的扑救 .....	(1084)
<b>第三章 节约用电 .....</b>	<b>(1084)</b>
3.1 减少线路损失 .....	(1084)
3.2 照明节电 .....	(1086)
3.3 通用设备节电 .....	(1087)
<b>附录一 电气电子技术常用数据及图形符号 .....</b>	<b>(1090)</b>
<b>附录二 数字电路故障检修 .....</b>	<b>(1094)</b>

# 第一篇 基本概念和公式

## 第一章 电磁学基础

### 1.1 电及电场

#### 1.1.1 与电磁学相关的物理概念

##### 1. 原子和原子核

原子是组成单质和化合物分子的最小单元。而元素是具有相同原子序数（即核电荷数）的同一类原子的总称。目前已知的元素有 108 种。原子由原子核和绕核运动的电子组成。

原子核由质子和中子组成。在原子序数为  $Z$  的原子核内，有  $Z$  个质子。原子核内的质子数  $Z$  与中子数  $N$  之和，称为核的质量数。原子核常用符号表示， $X$  为核所属的化学元素。原子核内如  $Z$  相同、 $N$  不同，则属于同一元素，称为同位素。原子质量单位就是碳的同位素  $^{12}\text{C}$  原子质量的  $1/12$ 。

##### 2. 原子中电子的能级

原子中电子的能量只能是若干定值，常用能级表示。图 1-1-1 示出了氢原子的能级。这种情况是由于电子的运动状态不能是任意的，而一般是由一组量子数 ( $n, l, m, m_s$ ) 所决定。其中  $n$  称为主量子数，电子的能量主要取决于它， $n=1, 2, 3, 4, \dots$ ； $l$  称为角量子数，它规定电子轨道动量矩的大小， $l=0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$ ； $m$  称为磁量子数，规定电子轨道动量矩在空间某一特殊方向（例如外磁场方向）的分量， $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ； $m_s$  称为自旋磁量子数，规定电子的自旋动量矩在空间某一特殊方向的分量， $m_s=\pm 1/2$ 。量子数实质上反映了这类物理量的不连续性。

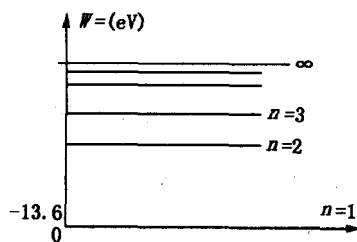


图 1-1-1 氢原子的能级量子数

##### 3. X 射线

X 射线是波长在  $10^{-7} \sim 10^{-13} \text{m}$  的电磁波。它的波谱常由波长连续变化的连续谱和叠加在其上的线状谱所组成。

X 射线管的阳极（也称靶）电压  $U$  一定时，连续谱具有一个最短波长  $\lambda_0$ ，它与射线管产生的高速电子撞击靶时的动能 ( $eU$ ) 全部转换成辐射能相对应，亦即

$$h\nu_0 = eU \quad (1-1)$$

式中  $\nu_0$  是与  $\lambda_0$  ( $=C_0/\nu_0$ ) 相对应的频率，将普朗克常数  $h$ 、光速  $C_0$ ，以及电子电量  $e$  的值代入，则可得

$$\lambda_0 = 1.24 \times 10^6 / U$$

X 射线具有高贯穿本领，常用于医疗、工业材料或成品的检验上。

##### 4. 原子核的放射衰变—— $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线

某些天然元素和一些人造同位素，它们的核不稳定，能自发地放出射线而衰变为另一种元素，因此被称为放射性元素。它们有的只放射  $\alpha$  和  $\beta$  射线，有的则在放射  $\alpha$ 、 $\beta$  射线时还放射  $\gamma$  射线。

$\alpha$  衰变和  $\beta$  衰变具有相同的规律，设  $N_0$  是不稳定核的起始数目，则经过  $t$  时间后，剩下的核数目

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-2)$$

$\lambda$  为每种核所特有的常数，称衰变常数。使核数目减少一半所需的时间  $T$  称半衰期。由式 1-2 可知，

$$T = 0.693 / \lambda$$

放射性元素在医疗、农业、考古以及金属材料或制品等方面都有所应用。

### 5. 核磁共振

原子核中的质子和中子都有磁矩。当原子核处于磁场中时，核磁矩在磁场的作用下，将绕着磁场的方向发生旋进（进动）。如果在垂直于磁场方向施加一个高频电磁场，则当高频电磁场的频率等于核磁矩进动频率时，核磁体就会吸收电磁场的一个能量量子，使核磁矩从低能态跃迁到高能态。这种现象称为核磁共振。核磁共振常用于研究物质结构和磁场的测定，并在生物、医学等方面有着广泛的应用。

### 6. 核裂变和核聚变

一个重核分裂成几块碎片，称为核裂变。当  $U^{235}$  受到慢中子轰击时可分裂成两个中等质量的核并放出 2~3 个中子，释放出能量。此能量来源于两个中等质量的核的结合能，比原来  $U^{235}$  的核的结合能大。裂变时放出的中子可使其他核裂变，因此可使裂变过程持续进行，这称为链式反应。核发电是通过控制链式反应的速率以达到利用核能的目的。

两个轻核聚成一个较重的核，称为核聚变。由于合成核的结合能大于两个轻核的结合能之和，所以聚变也可释放能量。由于核带正电，所以两个轻核发生聚变要有一定的动能，以克服库仑斥力，与所需的动能相应的温度约为  $10^7 \sim 10^9$  K。太阳的能量就来自核聚变。

### 7. 电荷与电荷守恒定律

电荷是物质的重要属性之一。自然界没有脱离物质而单独存在的电荷。目前已知的最小电荷量就是电子的电量  $e$ 。电荷有正、负两种。通常，物体中正负电荷的数量是相等的，因此表现为电中性。当物体失去或得到一些电子时，它就表现为带正电或负电。

当一物体的电量在增加时，必有其他物体的电量在减少。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，这一规律称为电量守恒定律。

#### 1. 1. 2 电子热发射与电子运动

##### 1. 金属的热电子发射

当金属的温度足够高时，大量电子从金属发射出来的现象，称为金属的热电子发射。真空电子二极管中的饱和电流  $I_0$ ，符合下列里查孙公式，

$$I_0 = AT^2 e^{-\frac{W}{kT}} \quad (A) \quad (1-3)$$

式中， $A$ ——金属的热发射常数 ( $A/K^2$ )； $T$ ——绝对温度； $k$ ——玻尔兹曼常数； $W$ ——逸出功 (eV)，是使电子离开金属表面时克服离子的引力作用所需的能量，如钾电子离开时克服离子的引力作用所需的能量 2.3eV。某些电子因热激发而具有超过  $W$  的能量，从而脱离金属，这些电子就是热发射电子。电子热发射的数量随温度  $T$  的增高而增加。

##### 2. 电子在电磁场中的运动

速度为  $\vec{v}$  的电子在电磁场中运动时，将同时受到电场力  $-e\vec{E}$  和磁场力  $-e\vec{v} \times \vec{B}$  的作用，即

$$\vec{f} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1-4)$$

因此，电子的运动方程为

$$-e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1-5)$$

电子在几种特殊电磁场中的运动，见表 1-1-1。

#### 1. 1. 3 固体、液体和气体的导电

##### 1. 固体的能带理论

当大量原子（设为  $N$  个）规则地排列形成晶体时，每个原子的价电子都将受到邻近原子的作用，因此它们不再只属于个别的原子，而为  $N$  个原子所共有。共有化使原来  $N$  个相同的价电子能级（激发态能级也一样）变成彼此相隔很近的  $N$  个新能级，它们基本上连成一片，形成能带。

由价电子能级形成的能带称为价带。如果价带的所有能级都被价电子填满，就称为满带。由激发态能级形成的能带称为导带。当相邻能带不重叠而出现一个无能级的区间时，这种区间称为禁带。

表 1-1-1 电子在几种特殊电磁场中的运动

电磁场类型	作用	结果	运动情况及说明
纵向电场	电子加速	$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ m/s	$v$ -电子到达阳极时的速度 $U$ -阳极电压
横向电场	电子运动偏转	$\tan \theta = v_y/v_x$ $= \frac{eU_1}{mv_0 d}$	$U$ -极板间电压 $v_x$ 、 $v_y$ 电子刚离开极板时 $x$ 、 $y$ 方向的速度
横向磁场	电子作圆轨道运动	$R = \frac{mv}{eB}$ m $T = \frac{2\pi m}{eB}$ s	$T$ -回转周期
斜向磁场	磁聚焦	电子作绕磁场的螺旋线运动，螺距为 $L = v_0 \cos \theta T$ $= \frac{2\pi m v_0 \cos \theta}{eB}$ m	$\theta$ 很小时可使从同一点出发的电子束，经回转周期 $T$ 后相遇于离出发点一个螺距 $L$ 的同一点上

(1) 导体。由单价原子组成的金属，其  $N$  个价电子只能填满半个价带，当在外电场作用下，价带中的电子可从低能级跃迁到高能级，这表示电场可以加速电子，因此为良导体。对于碱土金属，例如锌，其原子有两个  $4s$  价电子，似乎已填满  $4p$  能带，但由于它的较高的  $4p$  能带与  $4s$  能带有重叠，乃使一部分价电子占据了  $4p$  能带的能级，因此  $4s$  能带就不是满带，所以锌是导体。但如钙  $\text{Ca}$  和铍  $\text{Be}$  等，由于能带重叠很少，故导电性较差。

(2) 绝缘体。绝缘体的价带为满带，且禁带比较宽（约几个  $\text{eV}$ ）。所以在通常的电场作用下不能使电子改变能态从满带跃迁到导带，亦即电场不能使电子加速，从而不表现出导电性。

(3) 本征半导体。半导体的禁带比较窄（约  $\text{eV}$ ），理论上，在绝对零度时纯净半导体是不导电的，但在外界激发（如足够强的电场或光照）下，可使电子从满带跃迁到导带，从而表现出导电性。这时，满带中出现与跃迁出禁带去电子数相等的空位，称为空穴。在电场作用下，满带中的其他电子可以跃入这些空穴，并在其原来的能级上产生出新的空穴。这样由于电子在满带中的连续跃迁而形成了空穴的反向运动，它相当于一种与电子电量相等的、带正电荷的载流子（电流的负载者）参与导电，这种存在电子一空穴载流子的导电机构称为本征导电，相应的半导体称为本征半导体。例如纯净的硅、锗即属于此。

## 2. 电解液

酸、碱、盐的水溶液都能导电，称为电解液。在溶液中的溶质称为电解质。其导电性能与离子的浓度有关，浓度愈大，导电性能愈好。

## 3. 辉光放电

辉光放电属低压气体自激导电现象。在一个置有电极的玻璃管内充入低压气体（约  $1.3 \sim 1300 \text{Pa}$ ），当两极间的电压达到一定数值时，气体被击穿所出现的发光现象即为辉光放电。辉光放电时，气体中会出现交替分布的发光区和暗区。辉光放电有一稳压区，即正常辉光放电区。在这一电压下，电流增加，分子的碰撞电离也加剧，气体的电导随电流正比地增大，从而使  $U = I/G = \text{常数}$ （ $G$  为此时气体的电导）。霓虹灯、日光灯都是辉光放电的应用例子。

## 4. 弧光放电

弧光放电亦属自激导电现象。随着气体的压强和击穿方式的不同，气体击穿后的放电形式也不同。若在大气中将两个电极接触在一起，然后慢慢拉开，可得到弧光放电。这时发出强烈的光和热，常用于切割或焊接金属。弧光放电具有下降的伏安特性，这时，阴极表面的放电区域很集中，且有大量电子发射出来，所以电流密度很大，发出的光呈弧状。

## 5. 火花放电

火花放电亦常压下的气体自激导电现象。在大气压下，在曲率不大的电极间加上高电压，如果电源的

功率不足以产生和维持稳定的弧光放电, 气体也会被击穿, 在区域内形成发光通道, 产生火花放电。火花放电的击穿电压决定于电极的材料、形状、大小、极间距离。例如, 在高压技术中常用测量两个球形电极间发生火花时的距离来测定高电压。雷电是大自然中的火花放电现象。

## 6. 电晕放电

电晕放电亦属自激导电现象。在带电体的尖凸表面附近具有很大的电场强度, 因此使大气中的气体分子发生电离而形成自激导电, 这称为电晕放电。电晕放电时气体的电离和发光只在带电体表面附近, 形成一电晕层。电晕放电是一种不完全的火花放电。

高压输电线和高压电机的绕组有时会发生电晕放电。这时将产生臭氧, 造成能量损耗和影响绝缘性能。

### 1.1.4 电场及电场的物理量

#### 1. 电场强度与电力线

(1) 电场强度 (简称场强)。电场强度  $\vec{E}$  是表征某一点电场强弱和方向的一个物理量, 它定义为

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \text{ V/m} \quad (1-6)$$

式中,  $q$ ——电场中被测点电量和尺寸都很小的试体的正电荷 (C);  $\vec{F}$ ——试体在该点所受的力 (N)。

电场强度是一个矢量, 其方向与该试体电荷所受力的方向一致。

点电荷  $q$  (其正负可在其前用 +、- 表示) 的场强是

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{r}^0 \text{ V/m} \quad (1-7)$$

式中,  $\epsilon_0$ ——真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ;  $r$ ——源点与场点间的距离 (m);  $\vec{r}^0$ ——单位矢量, 方向是由源点指向场点。

(2) 电场强度的叠加原理。在线性介质 (即其电容率不随场强而变的介质) 中, 由电荷连续分布的带电体在空间某给定地点所产生的场强, 是带电体中的每一电荷元  $dQ$  在这一点上单独产生的场强的叠加, 即

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ}{r^2} \vec{r}^0 \text{ V/m} \quad (1-8)$$

(3) 在静电场中的导体, 其内部任一点的电场强度为零, 它表面上任一点的场强方向一定垂直于导体表面; 整个导体是一个等位体。

(4) 电场线是形象地表示电场分布的场强线, 见图 1-1-2。空间任一点上电场线的切线方向就是该点  $E$  的方向; 而电场线的疏密程度示出的是  $E$  大小。电场线有如下性质: 起始于正电荷, 终止于负电荷, 既不闭合, 也不中断; 电场线不会相交。

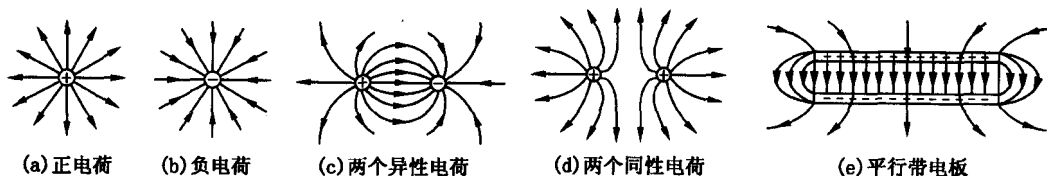


图 1-1-2 几种电场的电场线

## 2. 电通量

电场强度  $E$  的通量  $\Phi_E$  是

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{s} \text{ V/m} \quad (1-9)$$

式中,  $\Phi_E$ ——电场强度矢量  $E$  通过任一曲面  $S$  的通量。  $dS$  的方向是该曲面的法线方向, 若  $S$  是封闭的, 则规定外法线的方向为正方向; 若  $S$  不是封闭的, 则面积元的法线正方向与  $S$  边缘绕行方向须符合右手螺旋关系。



### 3. 电位

电位  $\varphi$  是另一个表征电场特性的物理量，它是标量。在电场中单位正电荷由  $P$  移到  $Q$  点时电场力所做的功

$$\int_P^Q \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varphi_P - \varphi_Q = U_{PQ} \quad (1-10)$$

称为  $P$  点到  $Q$  点的电位差（电压）。如选定  $Q$  点为参考（其电位为零），则  $\varphi_P = \int_P^Q \vec{E} \cdot d\vec{l}$  称为  $P$  点的电位。当参考点选定后， $\varphi_P$  只与  $P$  点的位置有关，而与所取的积分路径无关。电位的参考点常取无限远点或大地。

电位相等的各点所组成的曲面称为等位面，它与电力线处处正交。

### 4. 极化强度

在外电场力的作用下，电介质内量值相等的正、负电荷 ( $q$ ) 的宏观作用中心会在空间位置上发生很小的偏移而形成电偶极子，破坏了电的中性状态，这种现象称为电介质的极化。在极化状态下的电荷称为束缚电荷。

电偶极子的特性可以用它的电矩  $\vec{p}$  来表示。

$$\vec{p} = q \vec{h} \quad \text{Cm} \quad (1-11)$$

式中， $\vec{h}$ ——由负电荷指向正电荷的有向距离 (m)。

在电介质中，单位体积内由于极化而出现的电矩的矢量和称为极化强度  $\vec{p}$ 。

$$\vec{p} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \sum \vec{p} / \Delta V \quad \text{C/m}^2 \quad (1-12)$$

电介质内的电场，是电介质内束缚电荷的电场与外电场的合成，在各向同性的线性电介质中，极化强度  $\vec{P}$  与合成场强  $\vec{E}$  成正比，即

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E} \quad \text{C/m}^2 \quad (1-13)$$

式中， $\chi_e$ ——为电极化率，是无量纲的常数。

许多电介质的极化是与外电场同时存在或同时消失；而电介质受强外电场作用后其极化现象不随外电场的撤除而完全消失者，称为驻极体。

### 5. 介电常数

介电常数也称为电容率。各向同性的线性电介质的介电常数  $\epsilon$  是

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \text{F/m} \quad (1-14)$$

式中， $\epsilon_0$ ——真空介电常数； $\epsilon_r$ ——相对介电常数，无量纲，空气的相对介电常数  $\epsilon_r = 1.00058$ 。

## 1.2 磁场

### 1. 磁感应强度 $B$

磁感应强度是表征空间某一点磁场特性的物理量，其量值是单位正电荷以单位速度向与磁场方向相垂直的方向运动时所受到的磁场力，即

$$B = f / qv \quad \text{T} \quad (1-15)$$

磁感应强度  $\vec{B}$  是一个矢量，它的方向就是磁场的方向。磁场作用于运动电荷的力又称为洛仑兹力，它的方向同速度方向、磁感应强度方向间的关系符合右手螺旋定则，见图 1-1-3，且有

$$\vec{f} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{T} \quad (1-16)$$

### 2. 磁感线

磁感线（即磁感应线，俗称磁力线）是形象地表示磁场分布的磁感应强度线。在空间任意一点，磁感线的切线方向，就是该点磁感应强度  $B$  的方向，磁感线的疏密程度与磁感应强度大小成正比。