

研究生教材

# 现代配电网

## 单相弧光接地过电压

主 编 张龙钦  
副主编 李 娟 张 陵 雷 鸣  
彭素江 梁乃峰 车 勇



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

研究生教材

# 现代配电网

## 单相弧光接地过电压

主 编	张龙钦					
副主编	李 娟	张 陵	雷 鸣	彭素江	梁乃峰	车 勇
编 写	袁铁江	殷 峰	杜 建	赵普志	程方亮	李勇杰
	康玉函	彭生江	徐 闯	田海刚	周二彪	刘 勇
	谭 栋	张英杰	赵 军	王 力	童 辉	郑 义
	王 轩	李新江	王 冬	石国宇	周红莲	刘 凯
	杜 彬	董昱廷	王志江	冯再均	孙 飞	王 清
	向 史	甄 欣	曾 诚	梁振武	李光应	沈菊兰
	黄书龙	彭丽玉	鹿晓明	李云霞	张国勇	



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 简 介

本书基于国家电网新疆电力公司根据现代配电网单相弧光接地过电压技术领域的理论研究和工程实践经验,重点介绍单相接地故障经常出现的间歇性弧光接地过电压的产生机理、抑制理论及治理方法,并结合实际案例,对单相弧光接地过电压及其抑制措施的计算机仿真建模方法进行了探讨。全书共分6章,主要内容包括概述、单相弧光接地过电压产生与危害、单相弧光接地故障计算机建模与仿真、单相弧光接地过电压消弧线圈抑制技术、单相弧光接地过电压中性点小电阻接地抑制技术、弧光接地过电压故障相金属接地抑制技术。论证严谨,案例翔实,用大量的工程案例,验证了本书理论的有效性。

本书可作为电气工程专业高电压方向研究生教材,也可供电力系统工程师、电气工程设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代配电网单相弧光接地过电压/张龙钦主编. —北京:中国电力出版社,2017.7

研究生教材

ISBN 978-7-5198-0973-7

I. ①现… II. ①张… III. ①配电系统—弧光放电—过电压—研究生—教材 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第152503号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王 娟 (010-63412522)

责任校对:马 宁

装帧设计:张俊霞

责任印制:吴 迪

---

印 刷:三河市百盛印装有限公司

版 次:2017年7月第一版

印 次:2017年7月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:10

字 数:212千字

定 价:35.00元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

# 现代配电网单相弧光接地过电压

主 编 张龙钦

副主编 李 娟 张 陵 雷 鸣 彭素江  
梁乃峰 车 勇

编 写 袁铁江 殷 峰 杜 建 赵普志 程方亮  
李勇杰 康玉函 彭生江 徐 闯 田海刚  
周二彪 刘 勇 谭 栋 张英杰 赵 军  
王 力 童 辉 郑 义 王 轩 李新江  
王 冬 石国宇 周红莲 刘 凯 杜 彬  
董昱廷 王志江 冯再均 孙 飞 王 清  
向 史 甄 欣 曾 诚 梁振武 李光应  
沈菊兰 黄书龙 彭丽玉 鹿晓明 李云霞  
张国勇

# 前 言

随着我国电网的快速发展,以电缆线路为主的中性点不接地大容量配电网广泛存在,随着配电系统对地电容电流不断增大,系统中不可避免频繁发生的单相接地故障极易演变成间歇性弧光接地过电压故障,破坏电缆输电线路绝缘,严重时还会扩大为配电网线路系统的相间短路故障,引发更为严重的重大事故,造成电力系统稳定性、安全性以及供电可靠性下降。为满足广大电力工作者需要,由国网新疆电力公司、国网新疆电力公司经济技术研究院、国网伊犁供电公司、国网奎屯供电公司组织撰写了本书。本书基于国网新疆电力公司在现代配电网单相弧光接地过电压技术领域的理论研究和工程实践经验,系统地介绍了现代配电网单相弧光接地过电压产生的机理、相应的抑制理论和应用技术,并结合实际案例对现代电力系统单相弧光接地过电压及其抑制措施的计算机仿真建模方法进行了深入的探讨。

本书第1章对现代配电网单相弧光接地过电压的基本概念和涉及的关键技术、国内外研究现状及其发展趋势、相关的政策法规与标准规范等做了介绍。第2章分析了小电流接地系统电弧接地过电压产生基本原理及发展过程、弧光接地过电压对配电网的危害和影响。第3章建立了单相弧光接地故障数学模型和基于ADPSS的中性点不接地系统弧光接地故障仿真模型。第4章介绍了单相弧光接地过电压的消弧线圈抑制技术。第5章介绍了单相弧光接地过电压中性点小电阻接地抑制技术。第6章介绍了弧光接地过电压的故障相金属接地抑制技术。

通过本书,读者能够系统地了解配电网单相弧光接地过电压产生的机理、危害及治理的最新发展;能够清楚地了解这些理论及技术成果在工程中的实际应用经验。希望本书能够对电力系统工程师、电气工程设计人员和电气工程专业的师生在相关领域的理论学习和工程实践提供一定的参考。

在写作过程中，作者得到包括国家电网公司运维检修部、国网宁夏电力公司、国网甘肃电力公司、大连理工大学、安徽正广电电力技术有限公司等单位的大力支持，也得到了业界专家、学者们的无私帮助，在此一并表示感谢。

最后，还要感谢书中引注和未曾引注的所有参考文献作者的辛勤工作，感谢中国电力出版社为本书出版所付出的辛勤劳动！

本书的理论与应用研究有待于进一步探索和完善，由于作者的知识水平和经验，书中的观点和结论难免有不妥之处，望读者原谅和批评指正。

作者

2017年4月

参数与变量汇总表

序号	变量	单位	名称
1	$E_d$	eV	电离能
2	$U_d$	V	电离电位
3	$f$	Hz	频率
4	$h$	/	普朗克常数
5	$E$	V/cm	弧柱电位梯度
6	$U_a$	V	阳极电压
7	$U_c$	V	阴极电压
8	$U_{arc}$	V	弧柱压降
9	$l$	cm	电弧长度
10	$I_{arc}$	A	电弧电流
11	$r$	cm	弧柱通道半径
12	$n$	1/cm <sup>3</sup>	电子密度
13	$b_e$	cm <sup>2</sup> /V·s	电子迁移率
14	$e$	C	电子电荷
15	$P_h$	W	电弧的发热功率
16	$U_h$	V	电弧压降
17	$I_h$	A	电弧电流
18	$U_0$	V	近极电压
19	$U_z$	V	弧柱电压
20	$P_s$	W	电弧的总散热功率
21	$P_{cd}$	W	传导散发功率
22	$P_{dl}$	W	对流散发功率
23	$P_{fs}$	W	辐射散发功率
24	$W_Q$	J	电弧热含量
25	$U_{ri}$	kV	真空断路器第 $i$ 次重燃时的操作过电压
26	$\dot{I}_{jd}$	A	非故障相对地电容电流总和
27	$\dot{I}_B$	A	B 相对地电容电流
28	$\dot{I}_C$	A	C 相对地电容电流
29	$C_0$	pF	对地电容
30	$\dot{U}_{xg}$	kV	电源电动势 $E$ 的有效值
31	$u_v$	kV	熄火峰压
32	$U_{fm}$	kV	电源相电压幅值
33	$u_{dv}$	kV	移位电压
34	$\delta$	/	阻尼系数
35	$L_s$	H	线路电感
36	$f_1$	Hz	振荡回路的振荡频率

续表

序号	变量	单位	名称
37	$u_{0v}$	kV	非故障相暂态过电压
38	$u_{0s}$	kV	非故障相振荡电压
39	$u_{st}$	kV	非故障相稳定电压
40	$u_{or}$	kV	非故障相初始电压
41	$U_{\Phi m}$	kV	负半波的电压最大值
42	$Q$	C	非故障相上积聚的自由电荷
43	$f_2$	Hz	自由电荷重新分布时振荡频率
44	$U'_A$	kV	故障相电压
45	$U'_C$	kV	非故障相上的电压
46	$U''_A$	kV	半个工频周波后故障相上的电压
47	$U''_C$	kV	半个工频周波后非故障相上的电压
48	$u'_{or}$	kV	二次燃弧时非故障相上的初始电压
49	$u'_{st}$	kV	二次重燃后非故障相稳定电压
50	$u'_{ov}$	kV	二次燃弧时接地电弧过电压
51	$I'_{OS}$	A	二次重燃后故障点的振荡电流
52	$U_{osm}$	kV	振荡电压的幅值
53	$Q'$	C	电弧二次熄灭后自由电荷
54	$u'_{dv}$	kV	电弧二次熄灭后三相位移电压
55	$e_A$	kV	三相电源 A 相电压
56	$e_B$	kV	三相电源 B 相电压
57	$e_C$	kV	三相电源 C 相电压
58	$e_{AB}$	kV	三相电源 AB 线电压
59	$e_{BC}$	kV	三相电源 BC 线电压
60	$e_{AC}$	kV	三相电源 AC 线电压
61	$i_{jd}$	A	工频接地电流
62	$U_A$	kV	A 相对地电压
63	$U_B$	kV	B 相对地电压
64	$U_C$	kV	C 相对地电压
65	$U_{xg}$	kV	电压幅值
66	$U_0$	kV	电容初始电压
67	$U_W$	kV	电容稳态电压
68	$U_{max}$	kV	过渡过程中的最大电压
69	$E_A$	rad	工频接地电流相位角
70	$q$	J	流过电弧的能量
71	$a$	cm	电弧半径
72	$Q_0$	J	电弧单位体积所存储的能量



续表

序号	变量	单位	名称
73	$\sigma_0$	S/cm	电弧电导率
74	$g$	S	单位长度电弧的电导
75	$\rho_0$	kW	电弧单位体积所耗散的功率
76	$\rho_{\text{loss}}$	kW	电弧能量损失
77	$\tau_0$	$\mu\text{s}$	Cassie 电弧模型时间常数
78	$g_0$	S	电导常数
79	$\tau_M$	$\mu\text{s}$	Mayr 电弧模型时间常数
80	$U_\phi$	kV	相电压有效值
81	$X_0$	$\Omega$	零序电抗
82	$X_1$	$\Omega$	正序电抗
83	$R_0$	$\Omega$	零序电阻
84	$C_a$	F	A 相对地电容
85	$C_b$	F	B 相对地电容
86	$C_c$	F	C 相对地电容
87	$C_{ab}$	F	A、B 相间电容
88	$C_{bc}$	F	B、C 相间电容
89	$C_{ac}$	F	A、C 相间电容
90	$C_0$	F	三相对地等效电容
91	$C_Z$	F	正序电容
92	$C_F$	F	负序电容
93	$C_L$	F	零序电容
94	$C_m$	F	三相等效相间电容
95	$U_A$	kV	A 相电压
96	$U_B$	kV	B 相电压
97	$U_C$	kV	C 相电压
98	$I_A$	A	A 相电流
99	$I_B$	A	B 相电流
100	$I_C$	A	C 相电流
101	$\omega$	rad/s	工频角频率
102	$f$	Hz	频率
103	$U_\phi$	kV	系统相电压
104	$I_{DC}$	A	接地故障电流
105	$U_{bd}$	kV	中性点不对称电压
106	$\rho$	%	不对称度
107	$U_N$	kV	中性点电压
108	$I_{QA}$	A	A 相无功电流

续表

序号	变量	单位	名称
109	$I_{QB}$	A	B相无功电流
110	$I_{QC}$	A	C相无功电流
111	$I_{PA}$	A	A相有功电流
112	$I_{PB}$	A	B相有功电流
113	$I_{PC}$	A	C相有功电流
114	$I_C$	A	接地电容电流
115	$I_L$	A	补偿电流
116	$I_{P_0}$	A	补偿电流有功分量
117	$I_{Q_0}$	A	补偿电流无功分量
118	$g_1$	S	A相对地电导
119	$g_2$	S	B相对地电导
120	$g_3$	S	C相对地电导
121	$gL$	S	消弧线圈损耗电导
122	$g_0$	S	三相对地电导
123	$U_0$	kV	中性点位移电压
124	$d$	%	阻尼率
125	$v$	%	脱谐度
126	$K$	%	协调度
127	$r_{\Sigma}$	$\Omega$	电网等值全损耗电阻
128	$C_{\Sigma}$	F	三相对地总分布电容
129	$L$	H	消弧线圈电感
130	$R_E$	$\Omega$	接地点过渡电阻
131	$r_j$	$\Omega$	电网三相对地绝缘电阻
132	$G$	S	电导
133	$I_{\gamma}$	A	接地残流
134	$I_R$	A	残流有功分量
135	$\varphi$	$^{\circ}$	相角差
136	$U_{0max}$	kV	串联谐振电压
137	$d_0$	%	中性点不接地电网阻尼率
138	$d_L$	%	由消弧线圈有功损耗增加的阻尼率
139	$P$	%	消弧线圈有功损耗
140	$r_L$	$\Omega$	消弧线圈等值损耗电阻
141	$I_r$	A	零序回路中有功损耗电流
142	$I_{rL}$	A	消弧线圈中有功损耗电流
143	$U_Z$	kV	自由振荡电压
144	$U_{\tau}$	kV	故障相恢复电压

续表

序号	变量	单位	名称
145	$T$	s	周期
146	$\tau_H$	s	故障相恢复至正常相电压的时间
147	$W$	/	绕组匝数
148	$R_m$	$\Omega$	磁阻
149	$L_m$	cm	铁芯磁路长度
150	$\delta$	m	气隙长度
151	$S_0$	cm <sup>2</sup>	气隙等效磁路面积
152	$\mu_r$	/	硅钢片相对磁导率
153	$U'$	kV	消弧线圈上的感应电压
154	$I'$	A	消弧线圈上的感应电流
155	$U'_A$	kV	A 相对地电压
156	$\theta$	rad	中性点偏移电压超前 A 相对地电压角度
157	$\Psi$	rad	中性点偏移电压超前 A 相电压的角度
158	$\varphi_c$	rad	中性点偏移电压超前线电压的角度
159	$\Delta C$	F	对地并联电容
160	$I'_N$	A	注入信号折算到消弧线圈一次侧的值
161	$L'_{2\sigma}$	H	消弧线圈二次侧漏电感折算到一次侧的值
162	$L_{1\sigma}$	H	消弧线圈一次侧漏电感
163	$X_L$	$\Omega$	消弧线圈感抗
164	$f_x$	Hz	电网谐振频率
165	$Y_\Sigma$	S	总导纳
166	$U_x$	kV	消弧线圈两端电压最大值
167	$\delta$	/	匝数比
168	$R_N$	$\Omega$	中性点接地电阻阻值
169	$X_2$	$\Omega$	负序电阻
170	$K_B$	/	正常相电压与故障相电压比值
171	$K_C$	/	正常相电压与故障相电压比值
172	$U_{tmax}$	V	最大接触电位差
173	$K_{tmax}$	/	最大接触电位差系数
174	$K_{smax}$	/	最大跨步电位差系数
175	$U_{smax}$	V	最大跨步电位差
176	$P_R$	kW	中性点电阻功率
177	$E$	kV	电源电势
178	$U_1$	kV	系统线电压
179	$I_Z$	A	流过中性点电阻的电流
180	$S_{10s}$	kW	Z 型变压器 10s 短时容量

续表

序号	变量	单位	名称
181	$I_{co}$	A	每相对地电容电流
182	$U$	kV	单相对地电压
183	$\dot{U}_{AD}$	kV	A 相对地电压相量
184	$\dot{U}_{BD}$	kV	B 相对地电压相量
185	$\dot{U}_{CD}$	kV	C 相对地电压相量
186	$\dot{U}_0$	kV	零序电压相量
187	$\dot{i}_{01}$	A	线路 1 零序电流相量
188	$\dot{i}_{02}$	A	线路 2 零序电流相量
189	$\dot{i}_{A1}$	A	线路 1A 相电流相量
190	$\dot{i}_{B1}$	A	线路 1B 相电流相量
191	$\dot{i}_{C1}$	A	线路 1C 相电流相量
192	$\dot{i}_{A2}$	A	线路 2A 相电流相量
193	$\dot{i}_{B2}$	A	线路 2B 相电流相量
194	$\dot{i}_{C2}$	A	线路 2C 相电流相量
195	$C_{01}$	F	线路 1 的每相对地电容
196	$C_{02}$	F	线路 2 的每相对地电容
197	$C_{0\Sigma}$	F	全系统每相对地电容的总和
198	$U_{a2}$	kV	TV 二次侧 A 相电压
199	$U_{b2}$	kV	TV 二次侧 B 相电压
200	$U_{c2}$	kV	TV 二次侧 C 相电压
201	$U_{\Delta}$	kV	开口三角的电压
202	$U_{x1}$	kV	额定线电压
203	$l$	m	线路长度
204	$I_e$	A	消弧柜额定电流
205	$I_c$	A	最大运行方式下的对地电容电流

# 目 录

前言

参数与变量汇总表

第 1 章 概述 .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.2 弧光接地过电压的关键技术 .....	7
1.3 国内外研究现状 .....	10
1.4 与单相弧光接地过电压相关的主要技术标准 .....	14
本章小结 .....	15
参考文献 .....	15
第 2 章 单相弧光接地过电压产生与危害 .....	17
2.1 单相弧光接地过电压的产生 .....	17
2.2 弧光接地过电压影响因素分析 .....	23
2.3 单相弧光接地过电压的危害 .....	24
2.4 案例分析 .....	27
本章小结 .....	34
参考文献 .....	34
第 3 章 单相弧光接地故障计算机建模与仿真 .....	36
3.1 基于高频熄弧理论的弧光接地故障数学建模 .....	36
3.2 基于工频熄弧理论的弧光接地故障数学建模 .....	38
3.3 单相弧光接地过电压建模与仿真 .....	42
3.4 案例分析 .....	56
本章小结 .....	64
参考文献 .....	64
第 4 章 单相弧光接地过电压消弧线圈抑制技术 .....	66
4.1 利用消弧线圈抑制弧光接地过电压的基本原理 .....	67
4.2 抑制弧光接地过电压消弧线圈及其效能 .....	84
4.3 应用案例及分析 .....	93

本章小结·····	102
参考文献·····	102
<b>第 5 章 单相弧光接地过电压中性点小电阻接地抑制技术</b> ·····	104
5.1 中性点小电阻接地法抑制弧光接地过电压的基本原理·····	105
5.2 抑制弧光接地过电压的电阻柜及其效能·····	113
5.3 应用案例及分析·····	120
本章小结·····	125
参考文献·····	126
<b>第 6 章 弧光接地过电压故障相金属接地抑制技术</b> ·····	128
6.1 弧光接地过电压故障简介·····	128
6.2 故障相金属接地法抑制弧光接地过电压的基本原理·····	129
6.3 基于故障相金属接地法的弧光过电压抑制装置·····	132
6.4 基于 ADPSS 的装置原理及其效能的动模实验·····	141
6.5 消弧及过电压保护装置工程应用案例·····	144
本章小结·····	145
参考文献·····	146

# 第 1 章 概 述

近年来, 电力电缆以其占地面积小、运行故障率低、供电可靠性高等优势逐步取代了架空线路, 在我国城市及农村配电系统建设中承担起重要的链接作用。然而, 电力电缆较大的对地分布电容虽能在一定程度上对电网进行无功补偿, 提高电力系统的功率因数和电网输电效率, 但与此同时, 系统对地电容电流也随之增大, 进而使系统发生弧光接地过电压概率及危害增加, 给电网安全稳定运行埋下隐患。

## 1.1 基 本 概 念

### 1.1.1 电弧及其产生

#### 1. 气体放电

在正常状态下, 气体具有良好的电气绝缘性能。但在气体间隙两端加足够强的电场, 就能引起气体导电, 这种现象就称为气体放电。气体放电与气体的种类和压力、电极的材料和几何形状、两极间的距离以及加在间隙两端的电压等因素有关。常见的电弧或弧光放电是气体放电的一种形式。

图 1-1 所示为气体放电实验电路, 它由两个电极组成的气体间隙、电源、电阻构成。实验电路中的间隙两端所加电压从零逐渐增加, 当电压增高到一定值时就会发生气体放电。图 1-2 是气体放电时间隙电压与电流关系。按照放电性质的不同, 可分为两个阶段: 非自持放电阶段 ( $0-c$ )、自持放电阶段 ( $c-f$ )。

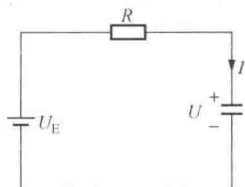


图 1-1 气体放电实验电路

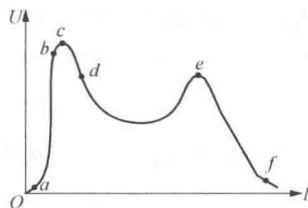


图 1-2 间隙电压与电流关系

在间隙两端电压升高的初始阶段 ( $0-a$ ), 加到电极上的电压在间隙中产生的电场强度较小, 不足以造成电场发射和电场电离, 但宇宙射线等外界电离因素的作用, 使得间隙中存在有少量的带电粒子, 因此具有很微小的电流流过间隙和电路, 并随着电压的升高电流缓慢增加。到达  $a$  点以后, 若电压再增高, 则电流将基本保持不变, 直到  $b$  点。在这个阶段中外界电离因素的作用所产生的粒子数是一定的, 因此电流是一个恒定值。这时虽有电流, 其数值却很微小, 因此工程上常忽略不计, 认为在这个阶段气体是

绝缘介质，间隙不导电。

自  $b$  点开始，在外界电离因素及较高电场作用下产生电场电离，间隙中的气体分子间的碰撞电离作用和间歇阴极板表面的电子发射，使间歇中自由电子增加，电压继续升高，电流开始有较快的增加；直到  $c$  点以前，电流都有增加的趋势。如果在此过程中移去外界电离因素，那么即使电场仍然作用，放电也会随即停止。这种在外界电离因素作用下的放电现象称为非自持放电。因此， $c$  点前的放电属于非自持放电。

在  $c$  点以后，间隙中出现了一种新的放电现象，这时电流迅速增大到较大的数值，气体开始发光并发出声响。这时即使停止外界电离因素的作用，间隙放电仍然进行。间隙放电进入自持放电阶段，气体呈现辉光，又称为辉光放电。此时，间隙中气体的电离方式仍然主要是电场电离，放电通道的温度为常温，电流密度小，阴极压降较高。当电流增大到  $e-f$  阶段时，放电形式转为弧光放电，即间隙中产生电弧。弧光放电是气体自持放电的一种形式，可以认为是放电的最终形式。弧光放电的特点为放电通道有明显的边界，发出强光，通道中温度极高（6000K 以上），电流密度很大，阴极压降很小，电离方式主要是热电离。因此电弧是一种能量集中、温度很高、亮度很大的气体自持性放电现象，是一束导电性能极好的电离气体。

## 2. 气体电离

物质的原子是由原子核和若干电子构成。对于中性气体，气体原子内的电子受到原子核正电荷的吸引，只能在围绕原子核的一定能级轨道运动，不能从原子内部跑出，因此中性气体中不存在自由电子，气体不导电。若加到气体原子上的能量足够大，大量的电子从围绕原子核运动的轨道上脱离出来成为自由电子，则这种从气体中性粒子（原子或分子）中分离出自由电子的现象称为电离。气体电离后，由于存在自由电子，气体处于导电状态。

气体原子电离后变成带负电荷的电子和带正电荷的离子（正离子）。电离所需要的能量称为电离能  $E_d$ ，电离能通常以电子伏（eV）为单位。1eV 的能量等于一个电子在电位差为 1V 的两点间移动时电场所做的功，即

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J} \quad (1-1)$$

电离能也可直接以电离电位  $U_d$  来表示，即

$$U_d = \frac{E_d}{e} \quad (1-2)$$

与固体、液体、气体的物质三态相对应，把包含足够多、正负电荷数目近似相等的带电粒子聚集状态称为等离子体（Plasma），等离子体被称为物质的第四态。物质的四种聚集态由构成物质的粒子的结合状态来划分，物质状态的保持和各状态之间的变化，一般取决于温度。固体分子或液体分子具有足够的热能时，就能转变成液体或气体，这个能量每一分子大约为  $10^{-2}\text{eV}$ 。当气体分子得到超过其电离位能的能量时，气体原子轨道上的电子就会发生电离而成为等离子体。

气体电离的主要方式有：



(1) 光电离：中性粒子在受到频率为  $f$  的光照，且满足条件  $hf \geq E_a$  时产生的电离。这里  $h$  为普朗克常数， $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。光的频率越高，其电离作用越强。

(2) 场致电离：主要是由电子和气体原子相互碰撞而造成的电离。当质量为  $m$  的带电粒子运动速度  $v$  足够大时，它的动能  $\frac{1}{2}mv^2$  就可能超过原子或分子的电离能。当它和中性粒子相碰撞时，就可能使束缚在原子内部的电子释放出来，形成自由电子和正离子。因为电子体积小、平均自由行程较长、运动速度大，容易在电场中继续积累能量，因而两次碰撞之间容易获得较大的动能，所以在电场作用下碰撞是引起气体电离的主要原因。因为弧柱的电场强度低，故在电弧形成后的弧柱中可以不考虑碰撞电离。

(3) 热电离：气体的温度升高时，少部分分子达到很高的运动速度，当其热运动的动能超过电离能时，分子间的碰撞产生电离，即为热电离。

气体的电离维持着电弧的存在。在此同时，弧柱中也存在着电离相反的过程，即消电离过程。消电离的作用就是减小弧柱中的电离程度，力图熄灭电弧，直至把间隙恢复成绝缘介质。消电离的方式主要有以下两种：

(1) 复合：两种带异性电荷的粒子互相接触而形成中性粒子，称为复合，也就是正负电荷的中和作用。复合可以在电极的表面上发生，称为表面复合；也可以是正离子和电子在间隙的空间相遇后形成中性粒子，称为空间复合。

复合过程总是伴随着能量的释放。释放出的能量以热和光的形式散向周围空间或用以加热电极、金属、绝缘物的表面。复合使弧柱中带电粒子减小，电离程度降低。复合的速度与离子的浓度、温度、压力、电场强度等因素有关，其中最主要的影响因素是温度。温度下降时，复合的速度迅速增加，消电离变得强烈。

(2) 扩散：电离气体中的带电粒子由于热运动，从浓度较高的区域向浓度较低的周围气体移动，称为扩散。扩散使带电粒子从电弧间隙中散到周围介质中去，从而使弧柱中带电粒子减少，电离程度降低。通常扩散是双极性进行的，即正负粒子成对地向外扩散，以保持弧柱中正负电荷的数量相等，否则扩散不能继续进行。

扩散的速度与离子浓度、正离子运动速度、弧柱直径、温度及压力等有关，其中弧柱直径的影响为最大。弧柱直径越小，则扩散越强烈。

### 3. 电弧的组成

电弧通常可以分为三个区域：阴极区、弧柱区和阳极区，如图 1-3 所示。

电弧在阴极和阳极之间稳定燃烧时，电弧压降沿电弧长度并非均匀分布。电弧压降可分成三个区域：阴极电位降区域、弧柱区域和阳极电位降区域。电弧形成后，在阴极附近聚集着大量的正离子，形成正空间电荷（正离子层），使阴极附近的电位有一个较大的跃变，称为阴极电位降。阴极电位降对加速正离子向阴极运动、碰撞阴极表面产生二次发射和

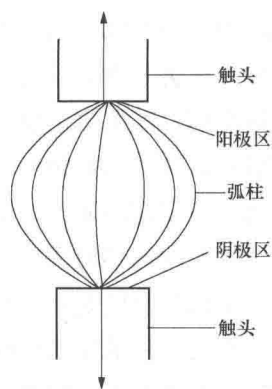


图 1-3 电弧