

真空电弧理论研究及其测试

王季梅 主编

西安交通大学出版社

序 言

在电器领域里,研究真空电弧理论的主要目的是如何充分利用真空优异的介质强度和灭弧性能来为开关电器服务,具体地讲要求通过对真空电弧理论的研究和分析,不断提出指导性的理论依据和设计参数,为制造部门设计和生产出具有独特性能的真空开关创造条件。这种以研究真空电弧理论为出发点,把真空介质应用到实际的开关技术中去的思路,早在本世纪 20 年代初,还未发明真空开关前,人们就有了设想。

回顾历史,当时美国加州理工学院 R. A. Millikan 教授在研究金属电子的场致发射过程中,曾经观察到真空间隙具有很高的介质强度,在真空中只要几毫米的真空间隙就能耐受几万伏的电压。此后不久,R. A. Millikan 教授和 R. W. Sorensen 教授对此现象很感兴趣,共同研制成功了一种在 41kV 下能开断 916A 交流电流的简单结构的真空开关。随后,R. W. Sorensen 教授及其研究生 H. E. Mendenhall 发表了真空开关的研究论文。继之,美国通用电气公司从加州理工学院取得了真空开关的专利权,并提出了对真空开关的发展规划。虽然早期的一些试验结果认为真空开关是很有希望的,但到 30 年代初却遇到了不少制造上的问题。例如,由于当时真空技术还处于初期阶段,对真空器件的密封封接、材料本身的慢性放气和高度的除气工艺等都没有得到很好的解决,致使真空灭弧室的真空度无法保证在应有的使用期限;触头材料的抗熔焊性也十分不理想,触头材料在燃弧过程中放出大量气体的问题也未得到解决;采用钨这类触头材料不适合开断大电流,同时开断小电流时会产生过高的截流,从而引起操作过电压的问题等等,使真空开关的发展受到严重挫折。

直到 50 年代末 60 年代初。由于电力电子学、低温等离子体物理学和材料冶金学这些学科的理论得到广泛应用,促进了半导体工业的迅速发展,同时适用于真空灭弧室的触头材料问题也取得了初步解决,真空工艺技术有了显著的完善,从而使真空开关的发展重新获得了生命力。美国通用电气公司于 1960 年首先研制成功额定电压 15kV,分断能力达到 12.5kA 的真空断路器,1966 年相继研究成功额定电压 15kV,分断能力达到 25kA 和 31.5kA 的真空断路器。这时真空开关才正式跨进了电力开关的行列,为电力工业服务。

70 年代以后,美国、日本、英国、德国和前苏联等国家都先后大量生产了各种不同规格的真空开关。到目前为止单个断口的真空灭弧室已达到 145kV 的电压等级。采用纵向磁场结构的真空灭弧室已突破了在 12kV 下分断 200kA 的水平。

我国是在 1958 年前后开始研究真空电弧理论和研制真空开关的,于 1960 年研制成功了电压为 6.7kV,开断能力为 500—600A 的真空开关,1965 年研制成功 10kV,1 500A 的三相真空开关,1969 年制成了 10kV,2 000A 的单相快速真空开关。此后国内许多开关厂相继开始正式生产各种规格的真空开关。目前我国已能生产 10kV 电压等级,分断能力至 50kA 的三相真空断路器;35kV 电压等级,分断能力可达到 25kA 的三相真空断路器和 27.5kV 电压等级,分断能力可达到 25kA 铁路电气化专用的单相真空断路器。当前正在开发研究 110kV 电压等级的真空断路器。

本著作的主要内容选自西安交通大学电器专业真空电弧理论研究小组所属的,由教授、专家、博士研究生和硕士研究生组成的梯队和借助于这个小组的试验基地所完成的科研成果和论文著作,经过整理编写而成。作者对他们所提供的素材表示衷心的感谢。

这里还需要特别指出的是西安交通大学真空电弧理论研究的试验基地拥有 10kV、35kV 和 63kV 电压等级,分断能力达到

70kA 的合成回路;可拆式真空小室;快速摄影机;冲击和工频耐压试验设备;瞬态过程分析仪;光谱分析仪;瞬时测速装置;记忆示波器;自动程序控制记录仪;真空度测量设备;截流性能测试装置和磁场分布测量仪等等。测试条件达到了国内先进水平,有力地保证了真空电弧理论研究的正常进行。

本著作由西安交通大学王季梅教授主编。著作的第一章、第二章、第四章、第五章、第六章、第七章、第八章和第十一章由王季梅教授执笔;第九章由钱忠厚教授执笔;第三章由电器博士李宏群副教授执笔;第十章由丁秉钧副教授执笔。

本著作在出版过程中,得到了宝光电工厂(4401 厂)和西安铁路科研所的资助,初稿曾请西安交通大学王其平教授和西安电力机械制造公司楼家法总工程师(教授级高级工程师)审阅,在此表示衷心的感谢。

于西安 1993 年

目 录

序言

第一章 真空电弧的寿命和截流特性的测试

§ 1-1 真空电弧的寿命 (1)

§ 1-2 真空电弧的截流特性 (14)

第二章 真空电弧弧后电流的测试和分析

§ 2-1 弧后电流的测试 (32)

§ 2-2 试验结果分析 (34)

第三章 真空电弧熄灭后的介质强度恢复过程的研究

§ 3-1 弧后真空间隙介质强度恢复的现象与分析方法
..... (45)

§ 3-2 介质恢复时间的理论计算 (52)

§ 3-3 介质强度恢复时间的测量 (64)

§ 3-4 介质恢复研究的分析与结论 (65)

第四章 用光谱诊断研究真空电弧

§ 4-1 光谱诊断的物理基础 (68)

§ 4-2 光谱诊断的实施 (72)

第五章 大电流真空电弧收缩现象和阳极斑点形成的理论分析

§ 5-1 大电流真空电弧的收缩现象 (84)

§ 5-2 阳极斑点形成的机理和理论分析 (96)

第六章 真空灭弧室内部电场分布的理论分析

§ 6-1 电场计算方法 (105)

§ 6-2 真空灭弧室内部的电场数值分析及优化设计 ... (112)

§ 6-3 真空灭弧室耐压特性和电场分布的测量 (118)

第七章 具有纵向磁场的真空灭弧室的性能分析

§ 7-1	线圈式纵向磁场真空灭弧室	(121)
§ 7-2	多极式纵向磁场真空灭弧室	(133)
§ 7-3	单边线圈式纵向磁场真空灭弧室	(134)
§ 7-4	铁心式纵向磁场真空灭弧室	(139)
§ 7-5	线圈式结构纵向磁场分布的理论分析和测量 ...	(147)
第八章 真空断路器额定电流开断下的电寿命试验研究		
§ 8-1	额定电压下和降低电压下电寿命试验的经济对比	(166)
§ 8-2	真空电弧电压特性的分析	(167)
§ 8-3	降低电压下作电寿命试验对燃弧时间的影响 ...	(169)
§ 8-4	合闸过程中预击穿对电寿命试验的影响	(172)
§ 8-5	额定电压下的电寿命试验	(176)
第九章 真空开关操作过电压的测试和分析		
§ 9-1	真空开关的主要类型和应用范围	(180)
§ 9-2	真空开关中的各种操作过电压	(181)
§ 9-3	限制操作过电压的方法	(196)
第十章 真空断路器触头材料的研究		
§ 10-1	触头材料的耐电压强度	(206)
§ 10-2	触头材料分断电流的能力	(215)
§ 10-3	触头材料的抗熔焊性能	(221)
§ 10-4	CuTeSe 和 CuTeSeFe 触头材料	(226)
§ 10-5	含碳 CuCr 触头材料	(230)
第十一章 近期真空电弧理论的研究		
§ 11-1	真空电弧的光测研究	(238)
§ 11-2	真空电弧中宏观粒子特性的研究	(256)
§ 11-3	纵向磁场均匀分布的研究	(262)

附录

参考文献

Contents

Preface

Chapter 1	Life of vacuum arc and measurement of chopping current characteristics	
1-1	Life of vacuum arc	(1)
1-2	Chopping current characteristics	(14)
Chapter 2	Measurement and analysis of post arc current after interruption in vacuum	
2-1	Measurement of post arc current	(32)
2-2	Analysis of testing results	(34)
Chapter 3	Research on the dielectric recovery process after vacuum arc interruption	
3-1	The dielectric recovery phenomena in vacuum gap after post arc current	(45)
3-2	Theoretical calculation of the dielectric recovery time	(52)
3-3	Measurement of the dielectric recovery time	(64)
3-4	Analysis and conclusion of dielectric recovery	(65)
Chapter 4	Research on vacuum arc with spectrometric diagnostic	

	4-1 Physical basis of spectrometric diagnostic ...	(68)
	4-2 Spectrometric diagnostic in practise	(72)
Chapter 5	Shrinking phenomena in a high current vacuum arc and theoretical analysis of anode spot formation	
	5-1 Shrinking phenomena in a high current vacuum arc	(84)
	5-2 Theoretical analysis of anode spot formation	(96)
Chapter 6	Theoretical analysis of electric field distribution in inner part of Vacuum interrupter	
	6-1 Method of electric field calculation	(105)
	6-2 Numerical analysis and optimum design of electric field distribution in inner part of vacuum interrupter	(112)
	6-3 Measurement of voltage intensity and electric field distribution in vacuum interrupter	(118)
Chapter 7	Characteristics analysis of vacuum interrupter with axial magnetic field	
	7-1 Coil type vacuum interrupter with axial magnetic field	(121)
	7-2 Multipole type vacuum interrupter with axial magnetic field	(133)
	7-3 Single side coil type vacuum interrupter with axial magnetic field	(134)
	7-4 Horse-shoe iron type vacuum interrupter with axial magnetic field	(139)
	7-5 Theoretical analysis and measurement of axial	

	magnetic field distribution in a vacuum interrupter	(147)
Chapter 8	Research on electric endurance test of vacuum circuit breaker under rated current	
8-1	Economical comparison of electric endurance tests under rated voltage and reduced voltage	(166)
8-2	Analysis of vacuum arc voltage characteristics	(167)
8-3	Arcing time influence with electric endurance test under reduced voltage	(169)
8-4	Prebreakdown effect under electric endurance test during closing process	(172)
8-5	Electric endurance test under rated voltage	(176)
Chapter 9	Measurement and analysis of switching overvoltage of vacuum switches	
9-1	Classification and scope of vacuum switches	(180)
9-2	Switching overvoltage in vacuum switches	(181)
9-3	Methods to reduce switching overvoltage	(196)
Chapter 10	Research on contact materials of vacuum switches	
10-1	Electrical voltage withstand characteristics of contact materials	(206)
10-2	Breaking capacity of contact materials	(215)
10-3	Antiwelding characteristics of contact	

	materials	(221)
10-4	CuTeSe and CuTeSeFe contact materials	(226)
10-5	CuCr contact materials with carbon	(230)
Chapter 11	Vacuum arc research works in recent developments	
11-1	Vacuum arc research by spectroscopy	(238)
11-2	Influence of macroparticles in a vacuum arc	(256)
11-3	Improve of axial magnetic field distribution in contact surface	(262)
Appendix		
References		

第一章 真空电弧的寿命和截流特性的测试

真空电弧的寿命和截流特性是真空电弧在小电流下产生的特殊现象,通过对这两个现象的观察,并对其特性进行测试,有助于深入了解真空电弧的本质。

§ 1-1 真空电弧的寿命

一、概述

众所周知,真空中每个阴极斑点所能通过的电流有一个最大值,这个最大值是由阴极材料的性质确定的^[1],对铜约为100A。当电流小于上述最大值时,可以观察到引燃的电弧经过一段时间燃烧后会自动熄灭,从引燃到熄灭这段时间称为直流电弧的寿命(DC arc lifetime)^{[1][2][3]}。当外电路供给的直流电流能维持电弧稳定燃烧时,这时观察到的电弧电压为一个非常平滑的直流电压,同时电弧电流亦为一个平滑的直流电流。当外电路供给的电流不足以维持电弧稳定燃烧时,电弧电压为直流电压上叠加一噪声电压的波形,而电弧电流也为直流电流上叠加一噪声电流的波形。这种能自动熄灭的真空电弧都是属于不稳定的电弧,上面所讲的直流电弧都是指叠加有噪声电流波形的直流电流。

Copeland P. 和 Sparing W. H. 首次在直流汞弧中发现电弧寿

命现象^[1],并且还发现电弧的平均寿命是一个可重复的量。Copeland P. 在分析这些现象时,发现电弧在 t 到 $t+dt$ 中熄灭的次数和时间 dt 与燃弧至时间 t 的熄灭次数的累积成正比。由此可以推出,电弧电流在保持平稳时,电弧寿命是遵照指数规律分布的。

前人的研究表明,真空电弧的平均寿命和线路参数及电极材料等有关,其结论如下:

(1)线路电感 随着线路电感的增加,电弧平均寿命有所增加,但增加的幅度不大。Smeets R. P. P.^[2]测得当试验电流为 20A,线路电感从 $10\mu\text{H}$ 增加至 10mH 时,电弧平均寿命从 1ms 增加至 2.2ms 左右;

(2)间隙两端并联电容 随着间隙两端电容的增加,电弧平均寿命有明显的缩短。对并联电容的影响的研究,一般都是在一种电流下改变电容来完成的;

(3)电极材料 电弧平均寿命随电极材料的蒸汽压的不同而异,一般来说,蒸汽压越高电弧平均寿命越长。电极材料的熔点对电弧平均寿命也有影响,熔点越高电弧平均寿命越短。但上述结果都有例外;

(4)电极表面状态 Attia E. A.^[4]对合金的研究表明,对于均

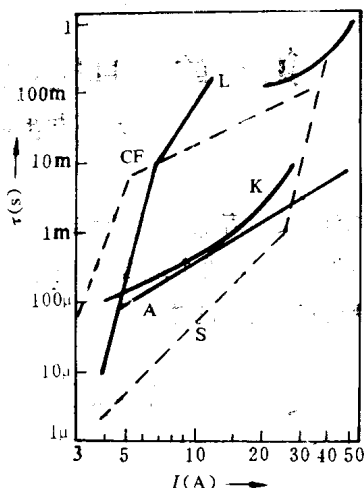


图 1-1 不同研究者对铜电弧平均寿命的测量结果, τ 为电弧平均寿命, I 为电流。

CF—Cobine 和 Farrall (1960), K—Kesaev

(1963), A—Attia (1973),

J—Juettner (1975), S—Smeets (1986), L—李宏群 (1987)^[12]

匀的合金材料,测量前电弧的烧蚀不会引起电弧平均寿命的改变。而对于非均匀的合金材料,例如对铜铍合金,测量前是否有大电流电弧烧蚀对电弧平均寿命的长短很有影响。对于上述材料,测量前有大电流烧蚀时电弧平均寿命会变短,这是由于表面的铍被预先烧蚀掉一部分的缘故。而 Smeets R. P. P. ^[2]对铜的研究结果说明,电弧的平均寿命和阴极表面的粗糙程度有关。当阴极表面的电场增强系数 $\beta^{[5]}$ 越大,则电弧越稳定,电弧平均寿命也就越长。

此外,电弧平均寿命随电流的增大而增长。即使对同一种材料,不同作者得到的电弧平均寿命随电流的变化趋势有所不同,这可能与试品的加工工艺和电路的参数有关。图 1-1 给出了李宏群博士和其他研究者对铜进行测量得到的结果。

电弧寿命现象一般来说是由于真空电弧电流小到不稳定状态时产生的。Köller G. 早在 1949 年就提出真空电弧的不稳定性是电流小到一定程度时,使电弧阴极斑点不断熄灭和不断重燃引起的^[1]。这种观点后来被许多研究者所公认。可见电弧寿命和阴极斑点的寿命有密切的关系。

此外,电弧寿命同交流真空电弧的截流有密切关系^{[1][2][3]}。

二、 电弧寿命的测量线路

本测试的目的是为了得到真空电弧寿命的平均值和分布以及与电弧电流、电源电压、电路中电感和电容的关系。图 1-2 为测量线路图。图中 VI 为被测真空灭弧室、SH 为分流器、 R_1 和 R_2 为分压器、 R 为限流电阻、TH 为晶闸管、DC 为直流电源。其中限流电阻部分在需要时可串入一电感,以观察电感对电弧寿命的影响。测量电弧寿命时,首先给真空开关一个分闸信号,这时开关机构将真空灭弧室 VI 打开,在真空灭弧室触头还未走完超行程时,辅助触点就将晶闸管触发,使回路中产生一直流电流。当触头分开后,间隙中就产生一直流电弧,由于电弧电压压降的作用,使该电流小于燃弧前的电流。记下电弧引燃至电弧熄灭间的时间,便得到了该次燃弧的电弧寿命。图 1-3 为测量电弧寿命的电弧电压和电流波形

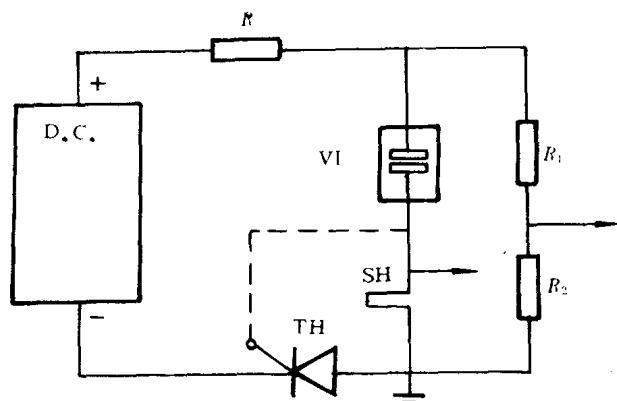


图 1-2 电弧寿命测量线路

DC—直流稳压电源；VI—被测真空灭弧室；R—限流电阻；
TH—晶闸管；SH—分流器； R_1, R_2 —电阻组成的分压器

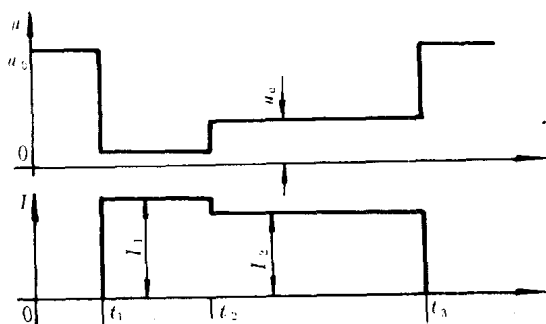


图 1-3 测量电弧寿命时电弧电压和电流的波形图

图。其中 $t=t_1$ 时晶闸管被触发，电路中流过电流 $I_1 = U/R$ ， $t=t_2$ 时真空灭弧室的触头分开，燃弧开始，且电弧电流 $I_2 = U - U_a$ ， $t=t_3$ 时电弧熄灭，电弧电流突然下降至零。用记忆示波器记下燃弧过程便可得到一次燃弧的电弧寿命。

测量线路中的直流电源 DC 为一开关电路稳压电源。其工作

原理如图 1-4 所示,其中 C 为滤波电容,值约为 $61\ 200\mu\text{F}$ 。图中下部为电子线路,从分压器 D_v 上得到电容器上的输出电压后,将其和给定的电平比较,如果输出电压低于所需电压,则电子线路将晶闸管和二极管组成的开关 TD 触发,电源通过全波整流桥向电容器 C 充电。当电容器 C 上的电压高于所需值时则充电停止。这样使得输出值在所需值范围内波动。

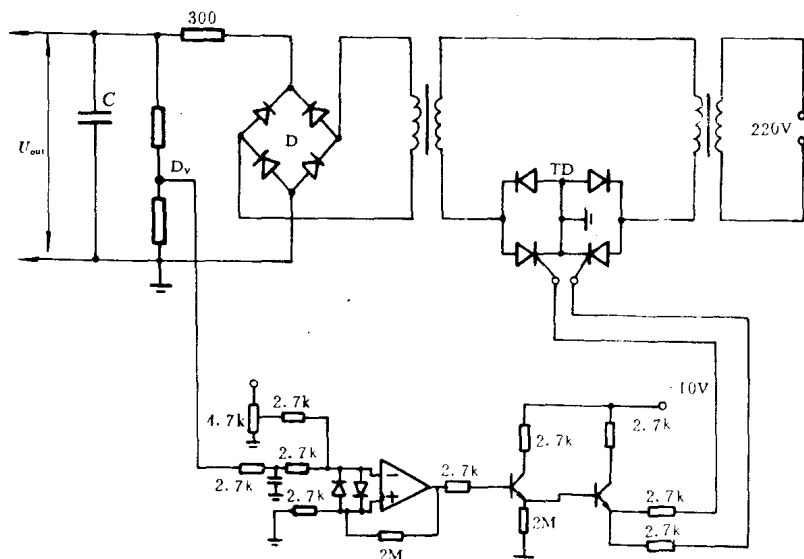


图 1-4 测量线路中直流电源 DC 的原理图

测量中使用的分流器是选用低感金属膜电阻,其值为 6Ω ,长度为 118mm 。用金属圆柱自感公式计算其自感值为 10^{-9}H 的数量级,故整个分流器的时间常数 L/R 远小于 $0.5\mu\text{s}$ 。该分流器满足频率为 2MHz 记忆示波器读数的要求。

三、 铋铈合金触头材料的电弧寿命测量

铋铈合金触头材料在低压电器范围内应用十分广泛。因此首先选用这种材料进行研究。此外,铋铈合金引燃的真空电弧具有

较好的稳定性,这使得研究工作容易进行。

(一)纯电阻限流情况下电弧平均寿命与电弧电流的关系

在纯电阻限流情况下,对两组不同电压下的电弧寿命进行了测量,电压分别为 35V 和 70V,电流在 0.2 和 0.83A 之间变化。由于铈铍合金的电弧电压只有 10V,故上述两种电压都可维持电弧燃烧一定时间。

电源电压为 35V 的电弧平均寿命示于表 1-1 中,其中每一点都是 100 次测量的平均值(个别点还进行了 200 次的测量)。将表 1-1 的结果绘于如图 1-5 所示的对数坐标中,所得到的电弧寿命平均值和电流的关系也呈折线状,并且在电流大于 0.5A 时电弧平均寿命随电流增加有明显增长,这说明真空电弧的稳定性和电流的大小密切相关。

表 1-1 35V 电源电压下铈铍合金电弧寿命测量的结果

$I(A)$	$\log(I)$	$\tau(\mu s)$	$\log(\tau)$
0.225	-0.648	5.05	0.699
0.3	-0.523	11.83	1.073
0.4	-0.398	55.41	1.744
0.5	-0.302	78.59	1.895
0.6	-0.222	996	2.998
0.67	-0.174	3 445.6	3.537
0.83	-0.081	12 835	4.108

在此要补充说明的是上述铈铍合金触头是镶嵌型的。

电源电压为 70V 的电弧平均寿命测量结果列于表 1-2 中。

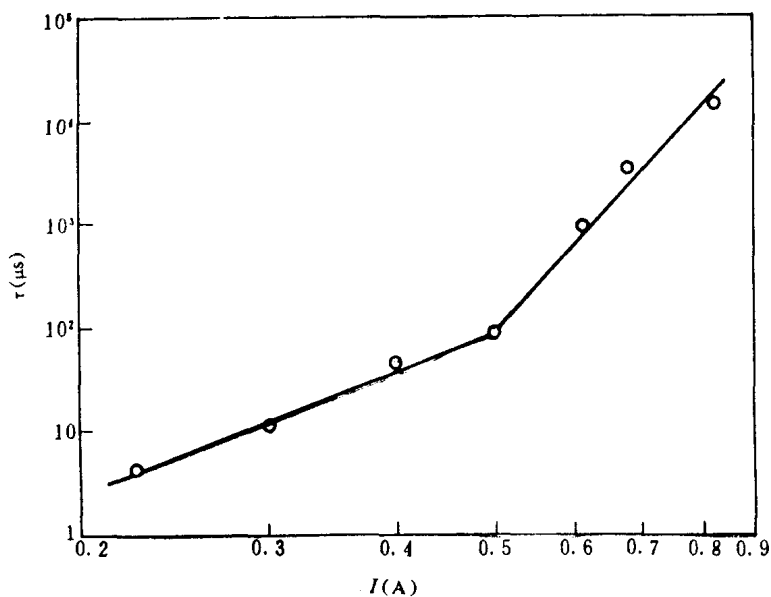


图 1-5 电源电压为 35V 时铈铈合金电弧寿命的测量结果

表 1-2 70V 电源电压下铈铈合金电弧寿命测量的结果

$I(\text{A})$	$\log(I)$	$\tau(\mu\text{s})$	$\log(\tau)$
0.204	-0.69	2.8	0.447
0.258	-0.588	5.61	0.749
0.358	-0.446	24.11	1.382
0.433	-0.364	42.91	1.633
0.57	-0.244	427.06	2.630
0.683	-0.166	9776.6	3.99
0.833	-0.079	67068	4.827

(二)限流电阻中串有电感时电弧平均寿命随电流变化的关系