

电力设备手册

——故障排除与维护

ELECTRICAL EQUIPMENT HANDBOOK

〔美〕菲利普·凯迈赫 著
高金峰 常 晟 张宇波 译

TROUBLESHOOTING
& MAINTENANCE



- 介绍电力器件基础知识与电力设备基本原理
- 涵盖电力设备与系统的维护方法、故障诊断及排除技术
- 提供电力设备选择与提高效能的详细信息



科学出版社

www.sciencep.com

电力设备手册

——故障排除与维护

〔美〕 菲利普·凯迈赫 著
高峰 常 晟 张宇波 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2004-6734 号

内 容 简 介

本书通过大量的照片和图表不仅简洁易懂地讲解电力设备的工作原理,而且还介绍当设备出现问题时如何对其进行检测和维修。书中分别对多种型号电动机,变速驱动装置,变压器,发电机整流器,逆变器,电路断路器,熔断器以及轴承、振动、废油分析,电厂电力系统及其设计准则,电力保护系统等进行介绍。本书理论阐述深入浅出,资料收集完备、系统,应用实例丰富,是一本不可多得的解决电力设备工程实际问题的技术手册。

本书适合电气工程专业的技术人员,设计、研究人员,管理人员以及职业学校的师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备手册:故障排除与维护/(美)凯迈赫(Kiamah, P.)著;高金峰等译.
—北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015178-X

I. 电… II. ①凯… ②高… III. 电力系统-电气设备-手册
IV. TM7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 035333 号

责任编辑: 詹京涛 崔炳哲 / 责任制作: 魏 谨

责任印制: 刘永平 / 封面制作: 刘佳音

北京万方数据有限公司制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 9 月第一次印刷 印张: 27 3/4

印数: 1—4 000 字数: 539 000

定 价: 49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

《电力设备手册——故障排除与维护》以多种型号的电动机,变速驱动装置,变压器,发电机,整流器,逆变器,电路断路器,熔断器,轴承、振动、废油分析,电厂电力系统及其设计准则以及电厂保护系统等为对象,为使用者尽可能多地提供了相关的基本理论、工作特性、测试、检验、技术特征、规范标准、先进的故障诊断技术、关键元件、故障排除等多方面的知识,并以最新技术为依托,详细阐述了电力设备与系统的维护与维修问题。作者相信,以本书中给出的设备、系统的操作方法、技术规范及使用条件为准则,可以保证电力设备和系统以最小的投入、较低的操作和维护费用、最高的效率和可靠性及使用寿命运行。另外,本书还提供了电力设备与系统的技术指标、设备选用、应用示例等内容,为使用者选用设备提供了指南。

本书以工程师、管理人员、技术人员、设备操作者以及设备维护者等为使用对象。内容的组织以简单实用为出发点,以便不具有高等数学知识的使用者能够理解与应用。不夸张地讲,本书对于那些选择、使用或维护电力设备和系统的人员来讲是一本必备之书。

目 录

第1章 电力系统基础	1
1.1 电容器	1
1.2 电流与电阻	3
1.3 磁 场	5
1.4 法拉第电磁感应定律	8
1.5 楞次定律	9
1.6 电 感	12
1.7 交 流	12
1.8 三相系统	17
参考文献	20
 第2章 电机原理概述	 21
2.1 电机与变压器	21
2.2 常用术语和定理	21
2.3 磁 场	21
2.4 铁磁材料的磁特性	22
2.5 法拉第电磁感应定律——磁场随时间变化产生感应电势	26
2.6 铁损值	27
2.7 永久磁铁	28
2.8 导线上感应力的产生	31
2.9 磁场中运动导体产生的感应电势	32
参考文献	32
 第3章 变压器	 33
3.1 变压器的重要性	33
3.2 变压器的类型和结构	33
3.3 理想变压器	34
3.4 变压器的阻抗变换作用	35
3.5 含理想变压器电路的分析	36
3.6 单相变压器工作原理	40
3.7 变压器的电压比	40

3.8 变压器的励磁电流	42
3.9 同名端	43
3.10 变压器等效电路	44
3.11 变压器电压调整率与效率	47
3.12 自耦变压器	49
3.13 三相变压器	50
3.14 变压器的额定值	52
参考文献	55

第4章 变压器元件与维修 56

4.1 引 言	56
4.2 变压器分类	56
4.3 电力变压器主要元件	57
4.4 绝缘的种类和特征	65
4.5 力	66
4.6 变压器产生故障的原因	67
4.7 变压器油	69
4.8 气体控制器及其收集系统	76
4.9 减压装置	79
4.10 与输电线路的连接	79
参考文献	81

第5章 交流电机基础..... 82

5.1 旋转磁场	82
5.2 旋转磁通概念证明	84
5.3 交流电机的感应电压	86
5.4 交流电机的感应转矩	88
5.5 交流电机绕阻的绝缘	89
5.6 交流电机功率流向和损耗	89
参考文献	90

第6章 感应电动机..... 91

6.1 感应电动机结构	91
6.2 感应电动机的基本概念	93
6.3 感应电动机的等效电路	95
6.4 损耗与功率流图	97

6.5 感应电动机的转矩——转速特性	98
6.6 通过转子设计控制电动机特性	102
6.7 感应电动机的启动	105
参考文献	108
第7章 感应电动机的速度控制	109
7.1 改变电源频率的速度控制	109
7.2 改变电源电压的速度控制	111
7.3 改变转子阻抗的速度控制	111
7.4 固态感应电动机驱动器	112
7.5 感应发电机	114
7.6 感应电动机额定值	116
参考文献	118
第8章 电机维护	119
8.1 电机的规格参数	119
8.2 外壳与冷却方法	119
8.3 应用数据资料	120
8.4 设计特点	122
8.5 交流电机绝缘	123
8.6 三相定子绕组故障	124
8.7 预防性维护	124
8.8 电机故障检修	125
8.9 电动机的诊断试验	128
8.10 交流感应电动机的维修和整修	136
8.11 三相定子绕组故障的典型原因	138
参考文献	140
第9章 电力电子器件、整流器、脉宽调制逆变器	141
9.1 电力电子引论	141
9.2 电力电子器件	141
9.3 电力电子器件的功率和速度比较	146
9.4 基本整流电路	147
9.5 整流滤波输出	150
9.6 脉冲电路	150
9.7 利用 PNP 二极管的张弛振荡器	151

9.8 脉冲同步	153
9.9 交流相位控制电压变化	153
9.10 相角控制中感性负载的影响	156
9.11 逆变器	156
参考文献	161

第 10 章 变速驱动器..... 162

10.1 交流变速驱动器基本原理	162
10.2 逆变器	162
10.3 脉宽调制逆变器	163
10.4 输入电源转换器(整流器)	164
10.5 直流耦合能量	164
10.6 输出 IGBT 逆变器	165
10.7 正反馈式输入电源或动态减速	167
10.8 正反馈	167
10.9 PWM-2 需要考虑的事项	168
10.10 瞬变、谐波功率因数和故障	168
10.11 晶闸管故障与检测	171
10.12 交流驱动应用问题	172
10.13 交流功率因数	172
10.14 IGBT 开关瞬变	173
10.15 AC 驱动的电纜布线细目	175
10.16 电纜细目	176
10.17 电动机轴承电流	177
10.18 交流驱动器应用规则小结	179
10.19 VSD 的选择标准	180
10.20 正反馈	181
10.21 维 护	182
10.22 一般故障类型	182
10.23 电动机应用准则	183
参考文献	183

第 11 章 同步电机..... 184

11.1 基本结构	184
11.2 极角:电角	185
11.3 同步电机的气隙和磁路	185

11.4 同步电机绕组	187
11.5 励 磁	188
11.6 旋转整流励磁	188
11.7 串 励	189
11.8 空载与短路分析	189
11.9 转矩试验	189
11.10 同步电机的励磁	192
11.11 电机损耗	193
11.12 铁心损耗	194
11.13 杂散负载损耗	194
11.14 电枢导体损耗	194
11.15 励磁损耗	194
参考文献	194

第 12 章 同步发电机..... 195

12.1 结 构	195
12.2 转 速	198
12.3 电动势	199
12.4 等效电路	199
12.5 相量图	203
12.6 功率和转矩	204
12.7 单机运行	206
12.8 并联运行	207
12.9 与大电网的并联运行	212
12.10 额定值	215
12.11 容量曲线	217
12.12 短时运行与利用系数	219
参考文献	220

第 13 章 同步发电机的结构部件、辅助装置与励磁 221

13.1 转 子	221
13.2 汽轮发电机的结构部件:定子	233
13.3 冷却系统	247
13.4 轴密封和密封油系统	249
13.5 定子绕组水内冷系统	252
13.6 其他冷却系统	255

13.7 励磁系统	256
13.8 电压调节器	261
13.9 电力系统稳定器	265
13.10 发电机励磁机功率系统(GEP)的特性	266
13.11 发电机运行	267
参考文献	269
第 14 章 发电机主接线	270
14.1 概 述	270
14.2 分相封闭式母线的环流	270
14.3 系统描述	270
参考文献	275
第 15 章 同步发电机性能和运行	276
15.1 发电机系统	276
15.2 状态监控	278
15.3 运行限额	283
15.4 故障状态	283
参考文献	290
第 16 章 同步发电机的监视和试验	291
16.1 发电机的运行检测(监视和监测)	291
16.2 发电机诊断试验	292
16.3 机械试验	308
第 17 章 同步发电机的检修和维护	311
17.1 有载维护和监控	311
17.2 无载维护	314
17.3 发电机测试	317
参考文献	322
第 18 章 同步发电机的运行问题和整修选择	323
18.1 典型的发电机运行问题	323
18.2 发电机转子的可靠性和平均寿命	329
18.3 发电机转子的整修	329
18.4 绝缘的类型	330
18.5 发电机转子的改进、提高等级和提高定额	332

18.6 高速配平衡	332
18.7 磁通探测试验	332
参考文献	332

第 19 章 断路器 333

19.1 概 论	333
19.2 电弧的物理过程	333
19.3 断路器的额定参数	335
19.4 常规断路器	335
19.5 增加电弧电阻的方式	336
19.6 普通型断路器	336
19.7 磁吹型断路器	337
19.8 分弧型断路器	337
19.9 应 用	338
19.10 油断路器	338
19.11 电弧控制型断路器	340
19.12 断路器的近期发展	340
参考文献	345

第 20 章 熔断器 346

20.1 熔断器的类型	346
20.2 限流型熔断器的特征	349
20.3 熔断器优于断路器的方面	350
20.4 有关电气系统保护的讨论	350

第 21 章 轴承和润滑 352

21.1 轴承的类型	352
21.2 轴承寿命的统计数字	354
21.3 材料与最后加工	354
21.4 轴承的尺寸	354
21.5 滚动轴承的类型	356
21.6 推力轴承	358
21.7 润 滑	358
参考文献	366

第 22 章 已用油分析 367

22.1 正确的润滑油取样技术	367
-----------------------	-----

22.2 检测描述及其意义	367
22.3 总 结	373
参考文献	373

第 23 章 振动分析 374

23.1 振动中正弦波的应用	374
23.2 多质量块系统	376
23.3 共 振	376
23.4 对数和分贝	377
23.5 滤波作用	377
23.6 振动测量仪表	378
23.7 时 域	379
23.8 频 域	380
23.9 机械设备实例	381
23.10 振动分析	381
23.11 共振频率	383
23.12 振动强度	384
23.13 一个实例:冷凝泵偏移	386

第 24 章 发电厂电力系统及设计要求 387

24.1 简 介	387
24.2 系统要求	387
24.3 电力系统简介	389
24.4 系统的功能	395
24.5 电厂停机和故障	401
24.6 不间断供电(UPS)系统	401
24.7 直流系统	403
参考文献	406

第 25 章 电厂保护系统 407

25.1 简 介	407
25.2 设计准则	408
25.3 发电机保护	408
25.4 直流跳闸系统	420
参考文献	421

译后记 427

第 1 章 电力系统基础

1.1 电容器

图 1.1 是两个相互绝缘的导体 a 和 b 构成的电容器。导体上带有等量异号的电荷,分别为 $+q$ 和 $-q$ 。电场中的电力线起始于导体 a 终止于导体 b。电容器由如下参数表征:

- q , 导体上携带的电荷量。
- V , 两导体间的电势差或电压。

电容器上的电荷 q 与电压 V 成正比,或者表示为 $q=CV$, 此处的 C 是比例常数,称之为电容器的电容。电容的大小由以下因素确定:

- 导体的形状。
- 导体间的相对位置。
- 导体间的媒质。

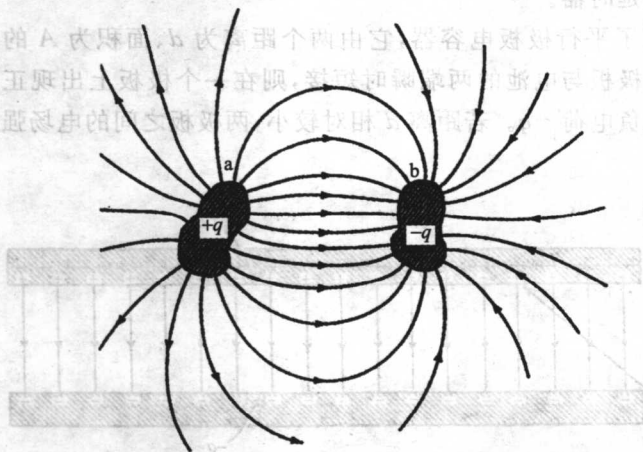


图 1.1 由绝缘媒质隔开并带有等量异号电荷的导体构成的电容器

电容的单位为库/伏(C/V)或者法(F)。即

$1\text{ F}=1\text{ C/V}$

结合电荷与电压的关系,有

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

由于

$$\frac{dq}{dt} = i$$

所以

$$i = C \frac{dV}{dt}$$

上式表明,电容器中的电流与电压对时间的变化率成正比。

实际应用中,常使用电容单位“法[拉]”的辅助单位:

- 微法($1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$)。

- 皮法($1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$)。

电容器是不可缺少的电气器件,主要应用包括:

- 储存电场能量。能量被储存在称之为极板的两导体之间。电容器中储存的电场能可以表示为:

$$U_E = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{C}$$

- 降低电力供应中的电压波动。
- 传递脉冲信号。
- 产生或检测射频范围的电磁振荡。
- 用于电子延时器。

图 1.2 给出了平行极板电容器,它由两个距离为 d 、面积为 A 的平行极板构成。如果将两个极板与电池的两端瞬时短接,则在一个极板上出现正电荷 $+q$,另一个极板上出现负电荷 $-q$ 。若距离 d 相对较小,两极板之间的电场强度 E 可以看成是均匀的。

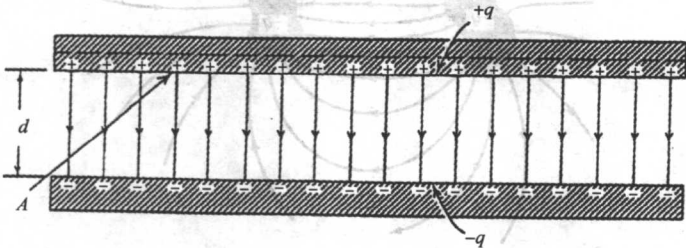


图 1.2 平行极板电容器

当极板之间放置电介质(绝缘材料)时,电容器的电容会增加。某种材料的介电常数 κ 等于极板间有电介质时电容器的电容与无电介质时电容器的电容的比值。表 1.1 列出了常用材料的介电常数与绝缘强度。

表 1.1 某些电介质的属性¹⁾

材 料	介电常数	绝缘强度 ²⁾ /(kV/mm)
真空	1.000 00	∞
空气	1.000 54	0.8
水	78	—
纸	3.5	14
红宝石云母	5.4	160
瓷	6.5	4
石英	3.8	8
硼硅酸玻璃	4.5	13
胶木	4.8	12
聚乙烯	2.3	50
琥珀	2.7	90
聚苯乙烯	2.6	25
聚四氟乙烯	2.1	60
氯丁橡胶	6.9	12
变压器油	4.5	12
二氧化钛	100	6

1) 这些属性在室温条件下测得,此时介质中的电场强度 E 不随时间而改变。

2) 这是在不会发生电介质击穿情况下可能存在的最大电势梯度。导体极板间通常充有电介质,这比以空气为电介质时可允许较高的电势梯度。

应注意的是,真空的绝缘强度很高(∞ ,即无穷大)。这表明:若两个极板以真空隔开,即使极板间的电压差达到无穷大,也不会产生电弧。真空的这一重要特性提示人们开发出了真空断路器。目前,真空断路器在电力系统中获得了广泛应用。

1.2 电流与电阻

时间 t 内导体中流过电荷 q , 电流为 i , 电流 i 可定义为:

$$i = \frac{q}{t}$$

式中, i 的单位为安[培](A); q 的单位为库[仑](C); t 的单位为秒(s)。

电子在电场力的作用下在导体中运动。正电荷的运动方向与负电荷的运动方向相反。因此,为简便起见,假设导体中的电荷均为正,这样可画出电流的方向,即正电荷流动的方向(图 1.3)。

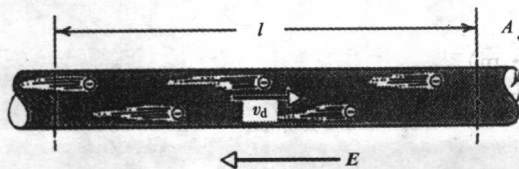


图 1.3 导体中电子移动的方向与电场方向相反

导体对电荷的阻碍作用用电阻来表征。电阻的定义为导体两端的电压与流过导体中电流的比值。即

$$R=\frac{V}{i}$$

式中, V 的单位为伏[特](V); i 的单位为安[培](A); 电阻 R 的单位为欧[姆](Ω)。

电流, 即导体中的电荷流, 通常比喻为管道中的水流。之所以在管道中会出现水流, 是因为管道的入口与出口之间有水压差。同样地, 导体中有电流流动是因为导体两端有电压差。

电阻率 ρ 是由导体材料决定的一个特性。它是导体材料对电流阻碍作用的电阻的量度。例如, 铜的电阻率为 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; 而石英为 $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 。表 1.2 列出了某些金属的电属性。

表 1.2 金属导体的属性

金 属	电阻率(在 20℃)/ $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	电阻率的温度系数 $\alpha / ^\circ\text{C} (\times 10^{-5})^{1)}$
银	1.6	380
铜	1.7	390
铝	2.8	390
钨	5.6	450
镍	6.8	600
铁	10	500
钢	18	300
锰铜	44	1.0
碳 ²⁾	3500	-50

1) 该量的定义为 $\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$ 是电阻率对温度的单位变化率, 它随温度变化。例如在 20℃ 附近, 温度每升高 1℃, 铜 ($3.9 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$) 的电阻率增加 0.39%。注意碳的温度系数为负值, 表示其电阻率随温度升高而下降。

2) 碳, 不是严格意义上的金属, 在表中列出是为比较起见。

电阻率的温度系数 α 定义为:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

上式表示电阻率随温度的变化率, 单位为 $1/^\circ\text{C}$ ($1/^\circ\text{F}$)。电导率(σ)比电阻率更为常用, 它等于电阻率的倒数, 即

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

电导率的单位为 $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。

对电阻器, 电压和电流有如下关系:

$$V = iR$$

电阻器中的功率损耗(电能转化为热能)为:

$$P = i^2 R$$

或者

$$P = \frac{V^2}{R}$$

式中, P 为瓦[特](W), V 为伏[特](V), i 为安[培](A), R 为欧[姆](Ω)。

1.3 磁 场

磁铁或载流导体会在其周围空间中产生磁场。磁场用磁感应线 $\mathbf{B}$ 表示。图 1.4 表示一个长载流导体周围的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 线。

磁场矢量与磁感应线之间有如下关系:

- ① 任一点 $\mathbf{B}$ 的方向为磁感应线的切线方向。
- ② 每单位横截面积内磁感应线的数量与 $\mathbf{B}$ 的大小成比例。磁感应线越密说明磁感应强度 $\mathbf{B}$ 越大, 线越稀说明 $\mathbf{B}$ 越小。

$\mathbf{B}$ 的通量即磁通 ϕ_s 定义为:

$$\phi_s = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

它是穿过面积 S 的 $\mathbf{B}$ 的积分。

磁场对在运动中运动的电荷有力的作用。如果正电荷 q_0 以速度 $\mathbf{v}$ 在磁场 $\mathbf{B}$ 中运动, 磁场力 $\mathbf{F}$ (图 1.5) 为:

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

力 F 的大小为

$$F = q_0 v B \sin\theta$$

式中, θ 是 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{B}$ 的夹角。

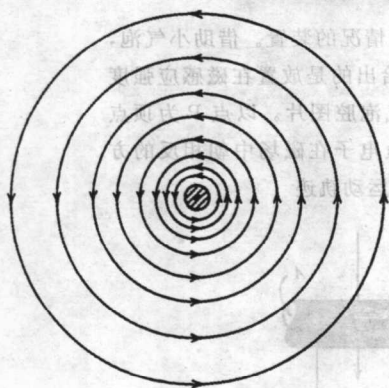


图 1.4 $\mathbf{B}$ 线近似为长圆柱形线。

中央圆点表示电流 i 的方向,

方向从纸面流出

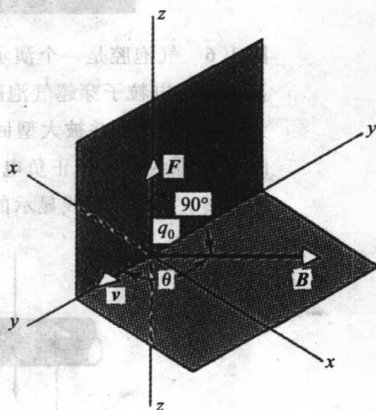


图 1.5 $\mathbf{F} = q_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 的图解说明,

试验电荷 q 以速度 $\mathbf{v}$ 通过原点

此图说明了磁力的方向