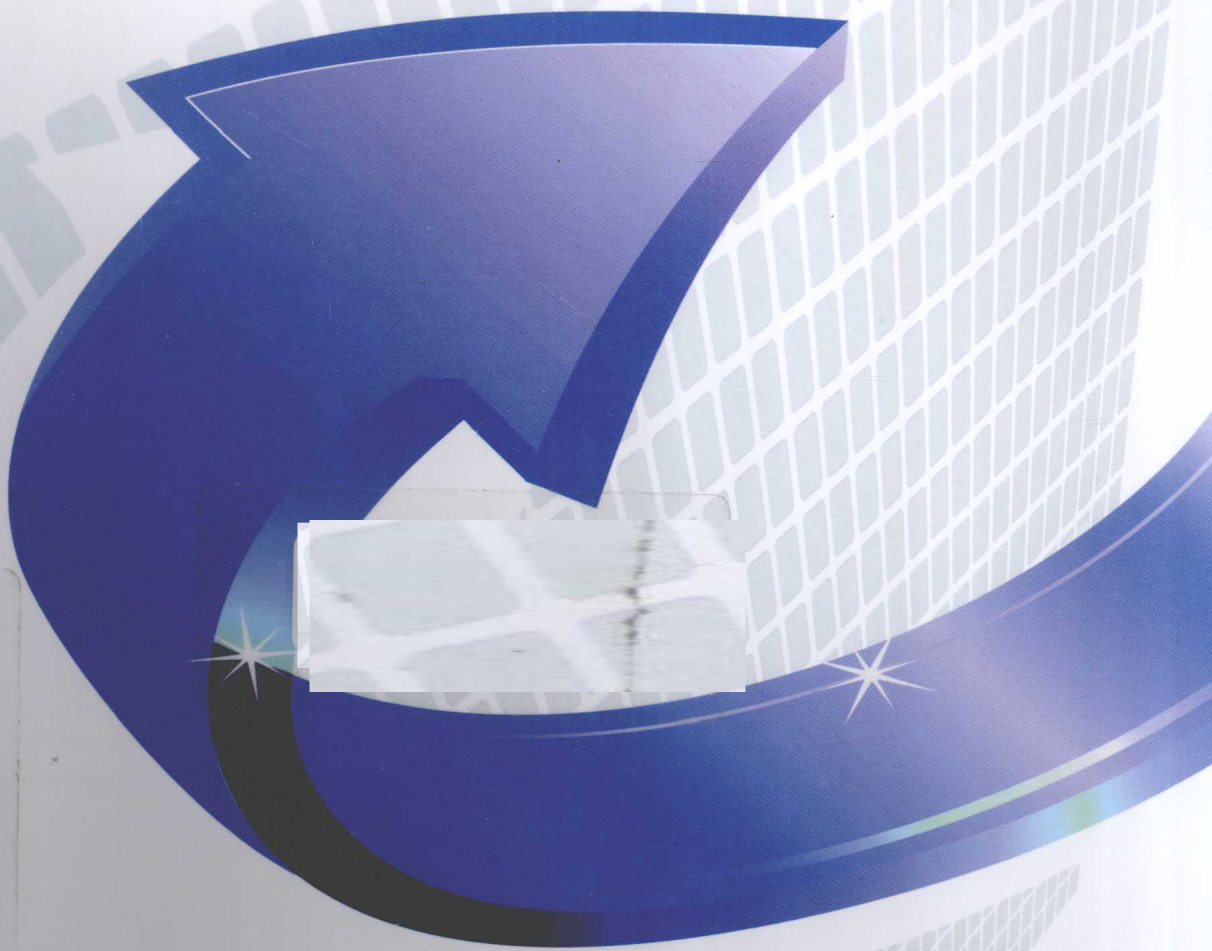


Greg C. Stone 等著

《旋转电机的绝缘——设计 评估 老化 试验 修理》编译组 编译

旋转电机的绝缘

—— 设计 评估 老化 试验 修理



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

旋转电机的绝缘

—— 设计 评估 老化 试验 修理

Greg C. Stone 等著

《旋转电机的绝缘——设计 评估 老化 试验 修理》编译组 编译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

本书翻译组成员名单

翻 译 白亚民（第3章、第5章、第6章、第15章、第16章）
白 恺（第7章、第8章）
王劲松（第4章、第10章、第11章、第13章、第14章）
梅志刚（第1章、第12章）
吴宇辉（第2章、第9章）
审校、统稿 白亚民

Greg C. Stone, 电气工程师, 首创多个评估定子绝缘系统的新试验方法, 其中许多已经成为 IEEE 和 IEC 标准化的试验方法。他从加拿大 Waterloo 大学获得博士学位, 在北美最大的电力公用事业单位安大略省水电局 (Ontario Hydro) 研究处工作。Stone 博士是专业手册《大型旋转电机绝缘状态评估》的第一作者, 撰写了大量的技术论文和文章。Stone 博士目前在 Iris Power Engineering 公司工作, 也是 IEEE 的高级会员。

Edward A. Boulter, 美国海军预备役少尉 (退休), 是包括通用电气公司 (General Electric Company)、依索拉绝缘材料公司 (Von-Roll-ISOLA)、几个州的公用事业单位及制造厂涉及多个领域的工程顾问。在此之前, 他有近 40 年的时间在通用电气公司 (General Electric) 做规划设计方面的高级工程师, 担任技术团队的负责人。

Ian Culbert, 毕业于苏格兰敦提技术学院 (Dundee Technical College), 是安大略水电局 (Ontario Hydro) 的专家, 为电站设计工程以及所有型号的电动机和备用发电机的运行和维护人员提供技术支持, 并且在加拿大 Reliance Electric 公司和英国 Parsons Peebles 公司担任过电动机的设计师。现在他是 Iris Power Engineering 公司的旋转电机专家。

Hussein Dhirani, 加拿大多伦多市的安大略发电公司 (Ontario Power Generation Inc.) 工程服务部的高级设计工程师, 在印度浦拿 (Poona) 大学获得的工学学士学位 (电气)。

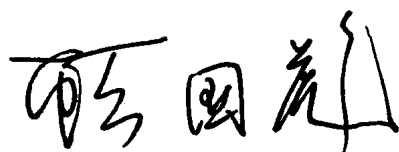
当前，我国电力工业正处在举世瞩目的高速发展时期，无论在发电设备总装机容量还是发电机组单机最大容量和拥有的数量等方面，都已位居世界前列。中国人引以自豪的有正在发电和即将发电的大批百万千瓦等级超超临界的火电机组和 120 万千瓦等级的核电机组，以及世界上最大的 800MVA 等级的水轮发电机组。我们用几年、十几年即走完了发达工业国家历时数十年的发展过程，实现了跨越式的发展。但也明显带来了在“软件”上的不足，即对现代先进的大型发电设备在制造、运行、检修诸方面的经验不足，急需吸收发达工业国家积累的先进经验，这样才能少走弯路，才能使发电设备的管理水平与先进的“硬件”相适应。IEEE 出版的这本《旋转电机的绝缘——设计、评估、老化、试验和修理》是旋转电机工业应用方面的经典著作，该著作在中国的编译出版，无疑可为我国发电设备在技术和实践方面提供专业指导。

电机绝缘被称为电机的心脏，约有超过 1/3 的电机事故是由电机绝缘系统引起的，而且绝缘事故本身具有设备损坏大、修复难度高的特点。本书是系统论述电机绝缘的难得好书，国内还没有类似的著作。本书的作者和主要编译者是长期从事电机工作的著名专家，具有丰富的经验和扎实的理论基础。作者从运行角度全面总结了电机绝缘系统的相关内容，并具有通俗易懂、简洁实用的特点。

纵观全书，第 1~6 章概括介绍了定子、转子绝缘系统的结构、材料和评估方法，论述深入浅出，概念清楚，对工程应用是必须的；第 7~10 章讲述电机定子、转子绕组和定子铁心绝缘故障，包括它的分类、故障机理和修理方法，理论联系实际，分析透彻，思路清晰，对从事电机故障诊断和运行的专业人员很有指导意义；第 11~15 章讲述电机绝缘方面的试验和监测的原理和方法，包括工厂试验和现场试验，以及对 IEC、IEEE 有关标准进行了解读，对试验要点和注意事项进行了分析，内容很实用，很精彩。总之，本书深入

浅出，内容实用，实例丰富，为发电机、电动机设计、运行、科研、教学人员提供了宝贵的经验和有益的参考，对电机故障诊断、保证维修质量、提高电机运行可靠性是不可缺少的良师益友。

最后，希望我们相关的出版部门能够像中国电力出版社引进这本 IEEE 专著一样，与 IEEE 等外国出版部门多多沟通和增加联系，多出专业技术方面的新书、好书，为我国电力工业的持续高速发展提供更加全面的、稳健的“软件”基础。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '陈国良' (Chen Guoliang).

2010 年 10 月 31 日

译者最早接触到这本《旋转电机的绝缘》一书，是在 2007 年初，原书作者 Greg 博士一行来华讲学访问，在华北电力科学研究院有限责任公司举办的电机专业人士学术座谈会上，Greg 博士向我们展示了这本书。

在与 Greg 博士进行学术交流的过程中，我们匆匆翻阅了此书，都深深为 Greg 博士及其团队在电机专业领域取得的业绩所折服。他们始终处在世界电机绝缘专业制造、运行、维护领域的前沿，特别是处在绝缘在线监测技术领域的领先地位，拥有极丰富的实践经验和最先进的技术理念，对旋转电机绝缘的研究代表了当今世界最高水平。他们既有从事设备设计制造的经验，又曾是电力设备用户，既能够从理论上讲清电机绝缘的基本结构和功能原理，又能够从用户角度理解电机绝缘的故障分析、设备维护和监测技术诸方面的需求，因而从制造和用户两个层面上讲清了一个电机专业人士所亟须的绝缘技术知识。

本书的主要作者 Greg 博士曾经在北美最大的电力公用事业单位安大略省水电局 (Ontario Hydro) 工作多年，深刻理解电力用户对设备的要求，他曾首创多个评估定子绝缘系统的新试验方法，其中许多已经成为 IEEE 和 IEC 标准化的试验方法。Greg 博士本人曾担任美国 IEEE 电气绝缘学会 (IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society) 的主席和 IEEE 执行委员会成员 (IEEE Technical Activities Board)，目前仍是 IEEE 的高级会员，同时还担任国际电工委员会 (IEC) 理事会成员，主导着许多国际电工领域的绝缘标准制定工作。Greg 博士所在的 Iris Power Engineering 公司在电机绝缘局部放电监测领域知名度很高，生产的监测仪器用户遍布全球。

在座谈会上我们即产生了将此书译成中文的想法，希望能借此使国内广大同行及时了解和掌握当今世界上最先进的电机绝缘技术资料。随后我们与本书作者和美国 IEEE 出版商进行了反复的沟通，在原书主要作者 Greg 博士的大力支持下终于取得了本书的翻译版权。

在翻译本书的过程中，书中关于电机技术的精彩论述屡屡与我们已有的经验产生共鸣，并随之从中得到理念上的升华，还从中学到许多对我们是全新的很有用的专业知识，这些使我们感觉与此书相见恨晚。我们认为，此书以旋转电机绝缘的设计、评估、老化、试验和修理为主线，却不局限于绝缘，几乎涉及旋转电机常见技术问题的方方面面，而且很多内容在国内电机专业书中尚属空白，同时该书又具有非常好的实用性和可操作性，是很理想的现代版电机绝缘实用教材。作为一本电机专业书，书中并没有很多艰深的理论表述，而是用比较通俗易懂的语言，以生产实践为基础，做到了深入浅出的叙述，相信无论是电机专业的普通技术人员，还是从事电机专业多年的资深工程师，以及大专院校的电机专业师生，都可以在书中找到自己感兴趣的东西，都会有所裨益。

本书的译者全部是华北电力科学研究院有限责任公司高压所从事电机专业的技术人员，常年工作在电力生产服务现场第一线，有着丰富的专业实践经验，英语基础也不错，足以胜任专业翻译工作，在翻译过程中遇到的主要困难是难得有静静地坐下来进行文字工作的整块时间，平时承担的生产任务非常繁忙，在完成生产任务同时，从2009年春节前后收到样书开始，到同年11月底交出译文全稿，不到一年时间内即完成全书翻译和校对工作，其艰苦紧张情况可想而知，几乎全部靠穿插点滴时间进行文字工作，并挤占了大量业余时间。

本书基本保留了英文原版中有关符号的写法，仅依我国习惯修改了个别符号。另外，译者还对原版中的个别笔误经与原作者核对后进行了修正。

本书共有16章，其中第3章、第5章、第6章、第15章和第16章由白亚民翻译，第7章和第8章由白恺翻译，第4章、第10章、第11章、第13章和第14章由王劲松翻译，第1章和第12章由梅志刚翻译，第2章和第9章由吴宇辉翻译，全书由白亚民审校和统稿。

本书是在华北电网有限公司的资助下出版的，在此我们对华北电网有限公司倾心支持和资助科技工作者引入国外优秀技术专著表示敬意和感谢，也对始终关心和支持这项工作的华北电力技术院和华北电力科学研究院的多位领导、同事和朋友表示衷心感谢。

此外，根据原著作者的建议，我们在书中增加了我国几个主要电机制造厂的绝缘系统情况简介，为此得到了哈尔滨电机厂、上海发电机厂、东方电机厂和山东济南发电设备厂等国内最主要的几家发电机制造厂的大力支持，在此对提供有关资料的沈梁伟、赵昌宗、李希明、张忠海、高晓红、皮如贵等专家学者一并表示感谢。

我们在翻译过程中尽可能地忠实于原著并经过多次审核检查，但由于时间仓促和水平所限，肯定存在错译和不足之处，在此竭诚欢迎读者批评指正，请及时与译者或出版社联系，希望能在本书再版时得到更正。

本书编译组

2010年9月于北京

本书旨在为大型电动机和发电机的设计人员及用户提供有关旋转电机绝缘方面的全面参考。我们同样希望为现行绝缘系统的形成过程及其原因提供一些资料。一直以来，旋转电机的绝缘就不是工程研究领域的热门，它有时被看作是“事后诸葛亮”。当本领域先驱引退后，鲜有新人继续专攻于斯，由此导致该领域知识的逐渐缺失。我们希望本书整理的资料能延缓这个过程，并成为本领域革新的一个有益起点。

本书极具特色，其中两位作者（Alan Boulter 和 Ian Culbert）具有电机设计的背景，而另外两位曾经是电机的主要用户。因此，值得庆幸的是，电机的用户和制造部门都能在本书中找到自己感兴趣的东西。

我们三人（Greg Stone、Ian Culbert 和 Hussein Dhirani）要共同向安大略水电局（现安大略发电公司）表示谢意，正是在安大略水电局的工作经历使我们得以成为本领域的专家。在现如今商业氛围中，似乎很少有工程师能像我们那样被允许从事专业研究。我们还要向 John Lyles, Joe Kapler 和 Mo Kurtz 等安大略水电局所有前员工致谢，是他们教会了我们许多知识。感谢美国电力科学研究院（EPRI），尤其是 Jan Stein，他们曾在 20 世纪 80 年代赞助过一本手册的编著，这为我们三人撰写本书提供了一次“预演”。

感谢 Resi Lloyd 忘我的工作，为本书各章节提供了统一的字体样式，描绘了大量插图，促使本书成册。

Hussein Dhirani 感谢他的家人，他们允许他在某些周末去办公室从事本书的工作，而借口只是工作效率更高等经不起推敲的理由。Hussein 还要向那些慷慨奉献自己知识的人们致敬，包括从事发电机工作的技师、研读图纸的设计师、与之探讨共性问题的兄弟单位员工、解释绝缘系统设计复杂问题的供货商组织等等。尤其要感谢安大略发电公司 Derek Sawyer 和 Bill Wallace 对本书的理解和支持。

Ian Culbert 要感谢安大略电力公司，允许他参与大量公司内部以及 EPRI

的项目，从中获取的大量信息成为撰写本书的素材。他还要感谢他以前的雇主 Reliance Electric 和 Parsons Peelbes，他们给了他学习电动机的设计、试验和故障检修的机会。

最后，Greg Stone 想要感谢他在 Iris Power Engineering 公司的原始合伙人——Blake Lloyd, Steve Campbell 和 Resi Lloyd，他们让他从日常公司事务中解放出来，能有精力从事本书中较艰深的命题。当然，Greg 还要感谢他的妻子 Judy Allan，她从未对她的亲人利用假期写书或论文提出过疑问。

原书作者：Greg C. Stone

Edward A. Boulter

Ian Culbert

Hussein Dhirani

加拿大安大略省多伦多市

2003 年 10 月

序

译者前言

原版前言

第 1 章 旋转电机的绝缘系统	1
1.1 旋转电机的类型	1
1.2 绕组的作用	5
1.3 定子绕组结构的类型	7
1.4 定子绕组绝缘系统的特性	9
1.5 转子绕组绝缘系统部件	23
参考文献	28
第 2 章 绝缘材料及系统的评估	30
2.1 老化应力	31
2.2 加速老化试验的原则	35
2.3 热耐受试验	40
2.4 耐电试验	44
2.5 热循环试验	46
2.6 多因素测试	48
2.7 核环境资质鉴定试验	48
2.8 材料特性试验	51
参考文献	52
第 3 章 绝缘材料和绝缘系统的历史发展	55
3.1 天然材料	55
3.2 早期的合成绝缘	57
3.3 塑料薄膜和无纺织物	60
3.4 液态合成树脂	60
3.5 云母	64
3.6 玻璃纤维	67
3.7 层压板	68
3.8 导线绝缘和股线绝缘的发展	69
3.9 散绕定子线圈的制造	70

3.10	成型线圈和线棒的制造	70
3.11	导线换位的绝缘	73
3.12	绝缘衬垫、隔离板和套管	74
	参考文献	75
第4章	当前在用的定子绕组绝缘系统	76
4.1	成型定子线圈绝缘的应用方法	78
4.2	主要的成型定子绕组绝缘系统品牌介绍	79
4.3	成型绕组绝缘系统的最新发展	89
4.4	散绕定子绝缘系统	91
4.5	定子绕组绝缘系统的变革	92
	参考文献	93
第5章	转子的绝缘系统	97
5.1	转子的槽绝缘和匝间绝缘	97
5.2	集电环绝缘	99
5.3	绕组端部绝缘和挡块	99
5.4	护环绝缘	100
5.5	直接冷却转子的绝缘	100
第6章	铁心叠片和绝缘	102
6.1	电磁材料	102
6.2	制造厂施加的绝缘	107
6.3	叠片冲制和激光切割	107
6.4	退火和去除毛刺	107
6.5	涂漆或覆膜	108
	参考文献	108
第7章	绕组故障、维修和重绕的基本原理	109
7.1	故障过程	109
7.2	影响维修决定的因素	112
7.3	故障后去除部分线圈	113
7.4	重绕	113
	参考文献	114
第8章	定子故障机理和修理	116
8.1	热劣化	116
8.2	热循环	119
8.3	浸渍或浸漆不良	123
8.4	槽内线圈松动	125

8.5	半导体涂层故障	128
8.6	半导体和（或）分段防晕涂层交叠部位故障	130
8.7	反复的电压冲击	131
8.8	脏污（表面爬电）	134
8.9	磨损颗粒	137
8.10	化学侵蚀	138
8.11	绕组端部间距不足	140
8.12	绕组端部振动	142
8.13	定子冷却水泄漏	145
8.14	电气连接不良	147
	参考文献	148
第9章	转子绕组故障机理和修理	150
9.1	圆柱形（隐极）转子绕组	150
9.2	凸极转子绕组	159
9.3	绕线式感应电动机转子绕组	164
9.4	笼式感应电动机转子绕组	167
	参考文献	173
第10章	铁心片间绝缘的故障和修理	174
10.1	热损伤	174
10.2	电劣化	176
10.3	机械劣化	179
10.4	制造缺陷引起的故障	182
10.5	铁心的修理	183
	参考文献	186
第11章	试验和监测的基本原理	187
11.1	试验和监测的目的	187
11.2	离线试验与在线监测	188
11.3	目视检查的作用	189
11.4	将数据转变为信息的专家系统	190
	参考文献	192
第12章	离线的转子绕组和定子绕组试验	193
12.1	绝缘电阻和极化指数	195
12.2	直流耐压试验	199
12.3	直流电阻测量	202
12.4	交流耐压试验	204

12.5	电容量测试	206
12.6	电容量增量测试	208
12.7	电动机定子的容抗试验	210
12.8	介质损耗（或功率损耗）角试验	210
12.9	介质损耗（功率损耗）角增量试验	212
12.10	离线局部放电试验	214
12.11	局部放电部位探测试验	218
12.12	定子冲击比较试验	219
12.13	感抗试验	222
12.14	半导体涂层接触电阻试验	223
12.15	导体冷却介质管路电阻试验	224
12.16	定子槽楔敲击试验	225
12.17	槽部侧面间隙试验	226
12.18	定子槽部径向间隙试验	227
12.19	定子绕组端部谐振试验	228
12.20	转子电压降试验	229
12.21	转子 RSO 及冲击试验	229
12.22	转子试验装置 Growler	231
12.23	转子荧光着色渗透试验	232
12.24	转子额定磁通试验	232
12.25	转子单相旋转试验	233
12.26	定子遮光起晕试验	233
12.27	定子压力和真空衰减试验	234
	参考文献	236

第 13 章	运行中定子和转子绕组的在线监测	239
13.1	温度监测	239
13.2	工况监测仪和标识化合物	243
13.3	臭氧	246
13.4	局部放电在线监测	247
13.5	绕组端部振动监测	257
13.6	同步电机转子磁通监测	258
13.7	电流信号分析	260
13.8	凸极电机的气隙监测	263
13.9	冲击电压监测	264
13.10	轴承振动监测	266
	参考文献	267

第 14 章 铁心试验	270
14.1 插刀试验.....	270
14.2 额定磁通试验.....	271
14.3 铁心损耗试验.....	275
14.4 铁心低磁通试验 (EL-CID)	275
参考文献.....	278
第 15 章 新绕组的验收和现场试验	279
15.1 定子绕组绝缘系统的资质试验.....	279
15.2 定子绕组绝缘系统的工厂和现场试验.....	284
15.3 转子绕组的工厂和现场试验.....	289
15.4 铁心绝缘的工厂和现场试验.....	292
参考文献.....	293
第 16 章 维修策略	294
16.1 维修和检查的选择.....	294
16.2 各种不同型式的电机适用的维修策略及实施措施.....	299

旋转电机的绝缘系统

自电动机和发电机发明以来的 100 多年间,应用范围广泛、种类繁多的电机相继问世。在很多情况下,不同的制造公司用完全不同的名称来命名同一种类型的电机或电机的同一部件。因此,为了避免混淆,本书在详细阐述电机绝缘系统之前,有必要对本书所讨论的电机类型的名称进行确认和描述。同时,本章还将确认电机的主要部件和绕组组件的命名名称,并描述其作用。

尽管本书主要针对 1kW 及以上电机,但是其中大部分关于绝缘系统设计、故障和试验的内容对更小型的电机、线性电动机和伺服电机等也是适用的,不过,本书将不对这几种类型的电机展开讨论。

1.1 旋转电机的类型

额定功率约为 1hp (1hp=745.70W) 或 1kW 及以上的电机(一般)分为两大类:①电动机,将电能转化成机械能(通常是旋转转矩);②发电机(也称作交流发电机),将机械能转化成电能。需要补充说明的是,还有一种称作同步调相机的电机,它是一种特殊的发电机或电动机,用于产生无功功率。有关电机的工作原理及更加详尽的描述,请参阅有关电机的通用书籍 [1.1]、[1.2]、[1.3]。

电动机和发电机可以是直流的,也可以是交流的,也就是说,它们可以使用交流电或直流电(电动机),也可以产生交流电或直流电(发电机)。直流电机具有调速方便的优点,所以在以往,直流的电动机和发电机在工业中得到过广泛应用。然而,通过组合交流电机和电子式变频驱动器,现在可以很容易地造出可调速电动机,因此,在 100kW 及以上的电动机中,直流电动机就不再常见。

电机还可以根据所采用的冷却方式来分类,它们可以直接或间接地使用空气、氢气和作为冷却介质。

本书集中讨论交流感应电动机、交流同步电动机和同步发电机。虽然存在其他的电机类型,但在目前各国使用的额定功率大于 1kW 的电机中,上述电动机和发电机占绝大多数。

1.1.1 交流电动机

几乎所有的交流电动机都具有单相定子绕组(适用于小于 1kW 的电动机)或三相定子绕组,绕组中流过输入电流。对于交流电动机来说,定子也被称作电枢。交流电动机通