

超导旋转电机

J·R·BUMBY 原著
田 成 文 等 编译



西安交通大学出版社

内 容 简 介

超导旋转电机是近 20 年来各工业发达国家开发的一项新技术。

本书主要阐述超导旋转电机(包括超导交流发电机和超导直流电机)的理论研究和设计计算程序,并系统地详细分析了超导电机的性能和超导体在旋转电机中的要求;同时,还介绍了我国研制的超导交流发电机及实用超导材料的性能。

除此以外,还简述了大型常规旋转电机的设计准则和计算方法。

本书可作理工科院校电机设计、低温物理和金属物理课程的参考书;并可作为研究院(所),高等院校和工矿企业有关人员从事研究、开发、生产超导旋转电机时的参考资料。

超 导 旋 转 电 机

原著者 J. R. Bumby

编译者 田成文等

责任编辑 赵孝昶

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 印张 9.75 字数: 198 千字

1986 年 12 月第 1 版 1987 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1,000

统一书号: 15340·109 定价: 2.25 元

前 言

本书阐述如何应用强场超导体设计旋转电机，并试图给工程师们在设计、操作和应用这种电机方面提供一本入门书。特别是，本书阐述了一般电机设计中应用超导体的有关问题，并详细描述了电机设计的程序。为了设计超导电机，了解有关超导体及它们在低温磁场内的特性方面的知识是必要的，本书的第二章就是专门为此而写的。其余的章节包括叙述和讨论超导直流电机（第三章）和超导汽轮发电机（第四章——第七章），因为这些电机代表主要的发展领域，其中重点则放在超导汽轮发电机的设计和特性方面。

我谨对所有在英国泰因河畔纽卡斯尔市国际研究开发有限公司（IRD）的同事们表示感谢，特别要感谢 A. D. Appleton 博士、J. S. H. Ross 先生和 A. J. Mitcham 先生，他们帮助我获得写这本书的许多资料，同时还让我在 IRD 愉快、有趣地工作了许多年。假如没有他们的帮助，本书是无法写成的。我也要感谢我的妻子，她校对了此书的手稿，还要感谢 Hammond 教授，他给我机会编写了此书。谢谢。

J. R. B

Durham

1982年5月

编译者的话

在我国，超导电性应用研究项目之一的超导旋转电机于六十年代就已开始。在这期间，工业发达国家如英、美、苏、日、德、法等国在超导交流发电机和直流电机方面也作了更为广泛深入的研究工作。本书的出版可认为是英国和我国发展超导旋转电机在理论研究方面的技术总结。

本书共分两部分：第一部分根据英国 J.R.Bumby 教授所著的《超导旋转电机》一书译出，其中：第一、二、四、五、六和七章由北方交通大学田成文同志翻译，第三章由西安交通大学汪人和同志翻译，由上海发电设备成套设计研究所刘承泽、王德丰和傅其伦同志合稿；第二部分是根据我国研制超导发电机和超导材料的情况编写的，其中：第八章由宝鸡稀有金属加工研究所周仲毅、周农和唐先德同志执笔，第九章由上海发电设备成套设计研究所王德丰同志执笔。全书由汪人和同志校阅。

可以预料超导旋转电机在今后的年代里是应予重点开发的一项尖端新技术，理论研究还需深入并力求实用化。为了这个目的而出版此书，希望能对我国科技工作者在研制超导旋转电机时起到推波助澜的作用。

本书在编写翻译过程中得到国家科委新技术局，上海发电设备成套设计研究所和宝鸡稀有金属加工研究所的支持和鼓励，使此书得以问世，谨在此致谢。

编译者

1985年9月

术 语 表

$\hat{Y}$	峰值, $y = \hat{Y} \sin \omega t$	f	摩擦因子, $f = \tau / \frac{1}{2} \gamma V^2$
A	面积, (米 ²)	F	力, (牛/米 ²)
AA	矢量位	g	间隙或空气隙, (米)
A_s	(电)负荷, (千安/米)	G	抗剪弹性模量, (帕)
B	磁通密度, (特)	G	标准化的波导纳
$\hat{B}$	超导汽轮发电机中的 磁负荷, (特)	h_c	对流传热系数, (瓦/米 ² ·开)
B_{c1}	下临界场, (特)	h_r	辐射传热系数, (瓦/米 ² ·开)
B_{c2}	上临界场, (特)	H	磁场强度, (安/米)
B_m	直流电机中的磁负 荷, (特)	H	惯性常数, (秒)
$\hat{C}$	导线的峰值数, $\hat{C} =$ $2k_w T_{ph} / \pi$	I	电流, (安)
C_p	比热, (千焦/公斤)	I	惯量, 公斤·米 ²
d	传统的穿透深度, $d = \delta / \sqrt{2}$	j	复算子
D, d	直径, (米)	J	电流密度, (安/米 ²)
E, e	电动势 (e.m.f.), (伏)	J_p	转动惯量, (米 ⁴)
E, E	电场, (伏/米)	k	热导率, (瓦/米·开)
E	能量, (焦)	k_r	环境屏的径向磁场增 强系数, $k_r = 1 \pm (r_s / r_x)^{2p}$
f	频率, (赫)		

k_{θ}	环境屏的切向磁场增强系数, $k_{\theta}=1+(r_s/r_x)^{2p}$	q	滑环的电负荷, (安/米)
k_{bn}	n 阶空间谐波的宽度系数	Q	传热量,(千焦/公斤)
k_{wn}	n 阶空间谐波的绕组系数	Q	无功功率,(伏安)
k_s	螺旋形绕组的扭曲系数	$\dot{Q}$	传热速率,(瓦)
K	线电流密度,(安/米)	r	半径,(米)
K_d	阻尼系数	R	电阻,(欧)
l, L	长度,(米)	R_e	Reynold数
L	电感,(亨)	s	Laplace 算子
m	相数	s	直流单极电机中的级数
M	互感,(亨)	$S(f)$	屏蔽率
n	转速,(转/秒)	t	厚度,(米)
n	谐波阶数	t	时间,(秒)
N	转速,(转/分)	t_c	临界故障清除时间, (秒)
N	串联导线的数目	T	温度,(开)
N_{OR}	外转子层的数目	T	力矩,(牛·米)
p	压力,(帕)	T	串联的匝数
p	磁极对数	T_c	临界温度,(开)
p_w	液态金属滑环中湿润的周边面积,(米 ²)	v, V	电压,(伏)
P	功率,(瓦)	v, V	速度,(米/秒)
b	传热率,(瓦/米 ²)	W	输入功,(千焦/公斤)
		X	状态变量
		x, X	电抗,(欧)
		x_d	直轴同步电抗,(欧)

x_d'	直轴瞬变电抗(磁场绕组常数的磁链), (欧)	μ_0	自由空间的导磁率, $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ (亨/米)
x_d''	直轴超瞬变电抗(辐射屏常数的磁链), (欧)	μ_r	相对导磁率
x_d'''	直轴超-超瞬变电抗(外转子常数的磁链), (欧)	ρ	电阻率, (欧·米)
		σ	导电率, (西)
x_s	同步电抗, (欧)	σ	绕组展开角, (弧度)
x_q	交轴同步电抗, (欧)	τ	剪切应力, (帕)
γ	质量密度, (公斤/米 ³)	ϕ	磁通量, (韦)
δ	传统的趋肤深度, $\delta=(2\rho/\omega\mu_0\mu_r)^{1/2}$	ϕ	外部的功率因数角
δ	转子角度, (度)	ψ	磁链
ϵ	发射率	ψ	内部的功率因数角
ξ	阻尼率	ω	角频率, (弧度/秒)
η	效率	ω_d	阻尼的自然频率, (弧度/秒)
η	涡流粘度, (公斤/米·秒)	下标	
θ	角度, (弧度)	a	在相参考结构中的电枢参数
λ	耦合系数	A	转换到 d, q 参考结构后的电枢参数
λ	比例常数	av	平均值
μ	摩擦系数	b	无限长的汇流排
μ_0	动力粘度, (公斤/米·秒)	c	临界值
		c	辐射屏
		d	直轴
		D	转子屏的直轴

D_1	外屏	θ	切向的
D_2	内屏	0	初始值
e	涡流	0	空载值
f	磁场绕组		
F	满负载		
g	空气隙		
h	磁滞		
i	所研究的绕组半径		
m	机械角		
min	最小值		
max	最大值		
n	谐波数		
NEL	电气方程数		
p	极对数		
ph	相		
q	交轴		
Q	转子屏的交轴		
r	径向的		
s	定子(电枢)绕组		
s	同步的		
s/c	短路		
t	发电机的变压器		
tot	总的		
T	包括有电力系统部件		
x	环境屏		
z	轴向的		

目 录

术语表	(IX)
第一章 超导电机入门	(1)
§ 1.1 绪论	(1)
§ 1.2 电机产生的功率	(2)
§ 1.3 直流电机的极限	(3)
§ 1.4 同步电机	(4)
§ 1.5 超导变压器	(7)
§ 1.6 故障限流器	(7)
§ 1.7 其它电机的应用	(10)
第二章 超导体的应用	(12)
§ 2.1 绪论	(12)
§ 2.2 超导体	(12)
2.2.1 超导状态	(12)
2.2.2 稳定化技术	(17)
§ 2.3 超导体的交流损耗	(23)
2.3.1 扭绞节距的影响	(23)
2.3.2 交流磁滞损耗	(25)
2.3.3 基体损耗	(26)
2.3.4 对交流损耗的讨论	(28)
§ 2.4 低温的产生	(29)
§ 2.5 传热的影响	(32)
2.5.1 绕组支撑构件的导热	(32)
2.5.2 对流传热	(33)

2.5.3 辐射传热·····	(33)
§ 2.6 超导线圈的保护·····	(34)
第三章 超导直流电机 ·····	(38)
§ 3.1 绪论·····	(38)
§ 3.2 异极直流电机·····	(39)
§ 3.3 单极直流电机·····	(41)
§ 3.4 圆形线圈的磁场·····	(42)
§ 3.5 单极电机的构造·····	(44)
3.5.1 盘式电机·····	(44)
3.5.2 筒式电机·····	(46)
3.5.3 盘式还是筒式? ·····	(48)
§ 3.6 电机的电压·····	(48)
3.6.1 双盘式电机·····	(49)
3.6.2 多筒式电机·····	(49)
3.6.3 分隔式滑环原理·····	(50)
3.6.4 连续式滑环·····	(51)
§ 3.7 多级电机的输出功率·····	(52)
§ 3.8 环境屏蔽问题·····	(54)
3.8.1 磁屏蔽·····	(54)
3.8.2 屏蔽线圈·····	(55)
§ 3.9 集流系统·····	(56)
§ 3.10 常规的固态电刷 ·····	(57)
§ 3.11 碳纤维电刷 ·····	(58)
§ 3.12 液态金属滑环 ·····	(61)
3.12.1 粘滞损耗(摩擦损耗)·····	(63)
3.12.2 传导-电流损耗·····	(64)

3.12.3	轴向磁场的影响·····	(64)
3.12.4	径向磁场的影响·····	(65)
3.12.5	稳定性方面的问题·····	(66)
3.12.6	用哪一种液态金属·····	(68)
3.12.7	滑环几何形状和在磁场环境中运行 的影响·····	(69)
§ 3.13	超导直流电机的应用 ·····	(71)
3.13.1	速度控制问题·····	(73)
3.13.2	其它应用·····	(74)
第四章	超导交流汽轮发电机·····	(75)
§ 4.1	绪论·····	(75)
§ 4.2	旋转磁场的超导汽轮发电机·····	(75)
§ 4.3	供选择的设计方案·····	(79)
4.3.1	旋转电枢、外侧磁场·····	(79)
4.3.2	旋转电枢、内侧磁场·····	(79)
4.3.3	旋转磁场、内侧电枢·····	(79)
4.3.4	旋转磁场、外侧电枢·····	(80)
4.3.5	往复式发电机·····	(80)
§ 4.4	超导汽轮发电机的经济性·····	(81)
第五章	超导交流发电机的设计·····	(85)
§ 5.1	绪论·····	(85)
§ 5.2	必要的预备知识·····	(86)
5.2.1	磁场的分布·····	(86)
5.2.2	电磁负荷及功率输出·····	(89)
5.2.3	发电机的电感和电抗·····	(91)
§ 5.3	同步电抗: 常规发电机与超导发电机	

的比较·····	(94)
§ 5.4 环境屏·····	(96)
5.4.1 对输出功率的影响·····	(96)
5.4.2 环境屏的设计·····	(99)
§ 5.5 一种设计方法·····	(103)
5.5.1 供一台两极发电机用的修正后的 出力表达式·····	(105)
5.5.2 对 B_0 和励磁电流密度的限制 条件·····	(107)
5.5.3 磁场绕组的电磁设计·····	(109)
§ 5.6 电枢绕组·····	(111)
5.6.1 常规绕组·····	(112)
5.6.2 螺旋形绕组·····	(113)
5.6.3 超高压的电枢绕组·····	(118)
5.6.4 电枢导线的设计·····	(119)
§ 5.7 有限长度的影响·····	(121)
第六章 超导交流发电机特性 ·····	(124)
§ 6.1 绪论·····	(124)
§ 6.2 发电机及电力系统的模型·····	(126)
§ 6.3 稳态运行·····	(129)
6.3.1 稳态电流·····	(129)
6.3.2 稳定状态的力·····	(130)
§ 6.4 短路运行·····	(135)
6.4.1 故障电流·····	(135)
6.4.2 短路力矩·····	(136)
6.4.3 短路时的力·····	(136)

§ 6.5 超导磁场绕组的屏蔽	(140)
6.5.1 屏蔽问题——频率响应	(140)
6.5.2 屏蔽问题——时间响应	(142)
6.5.3 超导线上所允许的磁通密度变化	(143)
6.5.4 单个转子屏	(143)
6.5.5 单个屏的阶跃响应	(146)
6.5.6 环境屏的影响	(147)
6.5.7 磁场绕组的影响	(148)
6.5.8 关于屏蔽的一点说明	(150)
§ 6.6 超导发电机的阻尼	(150)
6.6.1 问题	(150)
6.6.2 线性化	(151)
6.6.3 转子摆动的阻尼	(153)
§ 6.7 采用两个屏的转子屏蔽	(156)
6.7.1 双屏系统的屏蔽率	(157)
6.7.2 双屏系统的阻尼率	(159)
6.7.3 不同材质有孔的屏	(160)
6.7.4 其它的阻尼技术	(161)
§ 6.8 稳定性问题	(162)
6.8.1 稳态稳定性	(162)
6.8.2 瞬态稳定性	(164)
§ 6.9 负序及谐波损耗	(166)
6.9.1 一种简化的计算方法	(166)
6.9.2 负序损耗与谐波损耗:改进后的精度	(168)

6.9.3 故障后的能量损耗.....	(170)
第七章 具有新颖设计转子的超导汽轮发电机	
.....	(173)
§ 7.1 绪论.....	(173)
§ 7.2 具有惯性转子部件的超导交流发电机	
.....	(173)
7.2.1 自由的外转子.....	(174)
7.2.2 自由的内转子.....	(175)
7.2.3 惯性转子发电机的特性分析.....	(176)
§ 7.3 具有导磁钢外转子的超导交流发电机	
.....	(181)
参考文献.....	(183)
第八章 实用超导材料	(201)
§ 8.1 绪论.....	(201)
§ 8.2 NbTi 合金超导材料.....	(201)
8.2.1 NbTi 合金超导材料的发展概况	
.....	(201)
8.2.2 NbTi 合金基本的超导特性.....	(202)
8.2.3 NbTi/Cu合金超导材料的制造	
.....	(204)
8.2.4 NbTi 合金超导材料的 J_c 及其改进	
.....	(207)
§ 8.3 多芯 Nb_3Sn 超导体.....	(212)
8.3.1 Nb_3Sn 超导体的发展概况	(212)
8.3.2 多芯 Nb_3Sn 超导体设计	(213)
8.3.3 多芯 Nb_3Sn 超导体制作工艺	(214)

8.3.4 青铜法工艺的改进·····	(216)
8.3.5 多芯 Nb_3Sn 的超导性能·····	(219)
参考文献·····	(225)
第九章 超导交流发电机的实例综述·····	(231)
§ 9.1 绪论·····	(231)
§ 9.2 超导交流发电机的结构·····	(232)
§ 9.3 转子·····	(235)
9.3.1 超导磁场绕组·····	(238)
9.3.2 电磁阻尼屏·····	(241)
9.3.3 热辐射屏·····	(241)
9.3.4 力矩管与轴端热交换器·····	(244)
9.3.5 真空绝热及真空密封·····	(246)
9.3.6 冷收缩补偿结构·····	(247)
9.3.7 电流引线·····	(249)
§ 9.4 定子·····	(250)
9.4.1 电枢绕组·····	(252)
9.4.2 磁屏蔽·····	(256)
§ 9.5 氦的传输装置·····	(258)
§ 9.6 我国研制的 400 千伏安超导交流发电机 ·····	(260)
9.6.1 400 千伏安超导交流发电机的转子 ·····	(262)
9.6.2 400 千伏安超导交流发电机的定子	(265)
9.6.3 400 千伏安超导交流发电机的氦传 输装置·····	(266)
附录 A 线电流密度的分布·····	(267)

附录 B	130 万千瓦超导交流发电机的基本设计.....	(268)
附录 C	发电机及电力系统的模型.....	(272)
附录 D	转子屏蔽系统的分析.....	(277)
附录 E	一些常用材料的性能.....	(282)
附录 F	国内实用超导材料产品及技术条件*	(283)
索 引		(286)

第一章 超电机入门

§ 1.1 绪 论

1911年, H.K. Onnes 在 Leiden 大学观察金属水银性能的时候, 测量了水银在低温下的电阻率。他发现水银的电阻率小得无法测出。可是, 他又观察到电阻率不是按图 1.1 所示的正常特性, 而是在 4K 时急剧地降低。对任何实际用途而言, 当温度低于 4K 时, 呈零电阻率(图 1.2), 这种新发现的现象就被定名为“超导电性”。

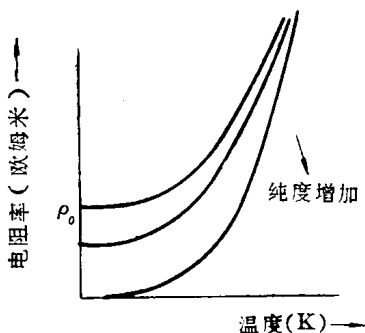


图 1.1 金属电阻率随温度的变化

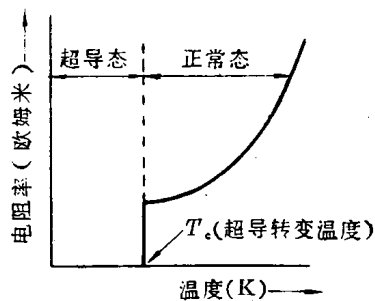


图 1.2 一种超导体的电阻率随温度的变化

虽然早在 1911 年就发现了超导电性,可是直到 60 年代,随着强磁场超导体的发展(见第二章),将它们应用于电力工程方面,才成为实际可能。超导电性的这项应用之所以具