

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《汽轮发电机定转子电磁力分析及其应用研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：



日 期：

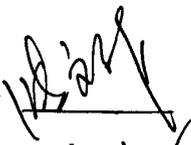
2010.6.5

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

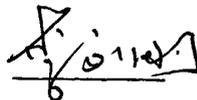
作者签名：



日 期：

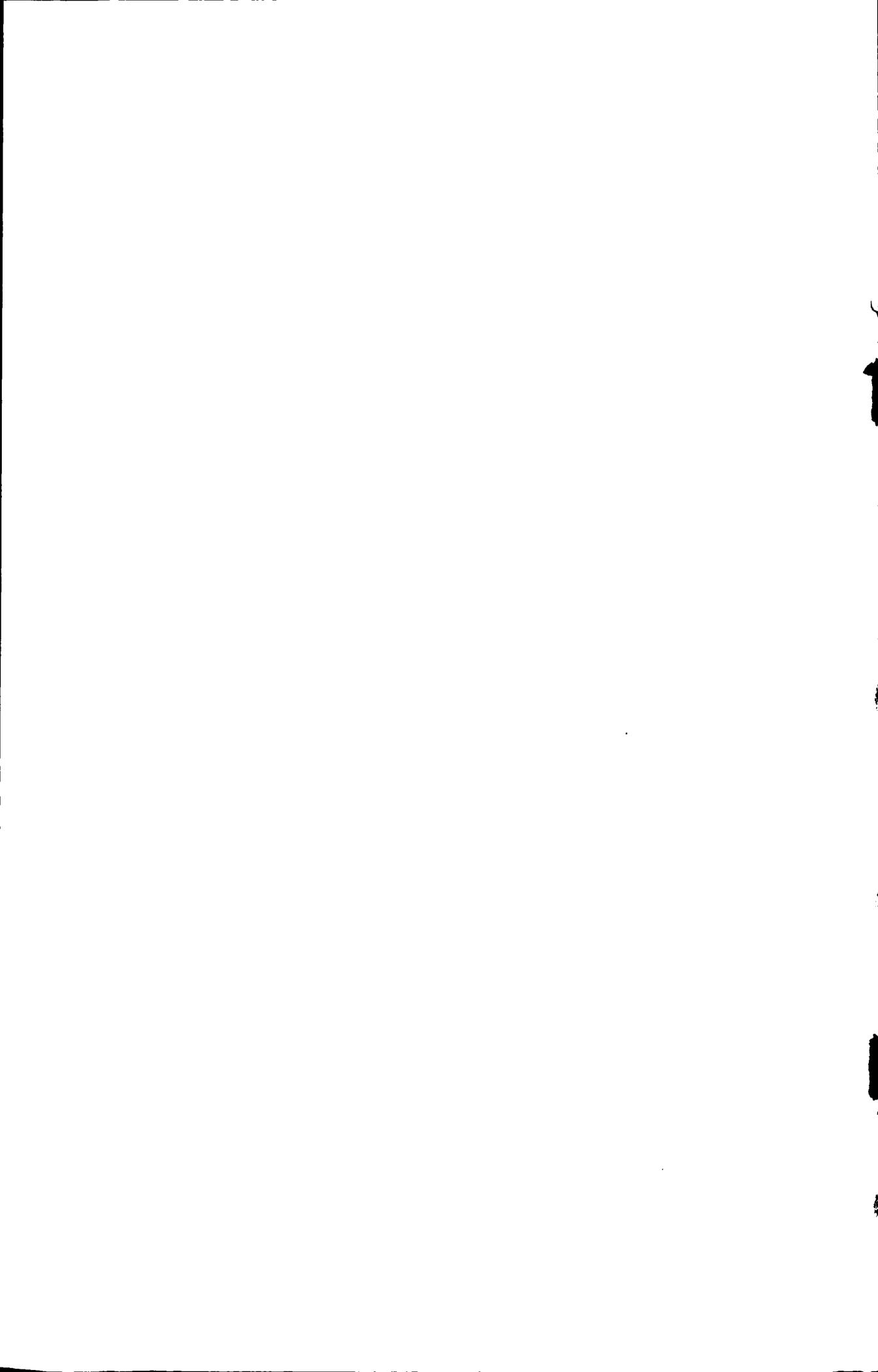
2010.6.5

导师签名：



日 期：

2010.6.5



摘 要

汽轮发电机不同于一般旋转机械,在旋转过程中不仅承受各种机械力而产生机械振动,同时承受较大电磁力而产生电磁振动。随着发电机单机容量不断增加,电磁振动引发的定转子及其绕组振动超标事故时有发生。本文在简要介绍大型汽轮发电机结构及电磁振动概念基础上,首先分析了正常运行和转子励磁绕组匝间短路故障时转子电磁力的计算方法。并以某发电厂转子励磁绕组匝间短路故障为工程背景,分析此故障引起的发电机定转子振动特性,以及基于振动特性分析此故障的方法。然后分析汽轮发电机定子槽内绕组和端部绕组的电磁力,采用 FOA1660 光纤加速度传感器和瑞博华 RBH8351 采集卡,基于 LabVIEW8.0 开发定子端部绕组监测系统,包括信号采集预处理、实时参数设置、振动信号时频域分析、振动信号趋势分析、帮助等功能模块。
关键词:汽轮发电机,定子绕组,转子,电磁力,监测系统

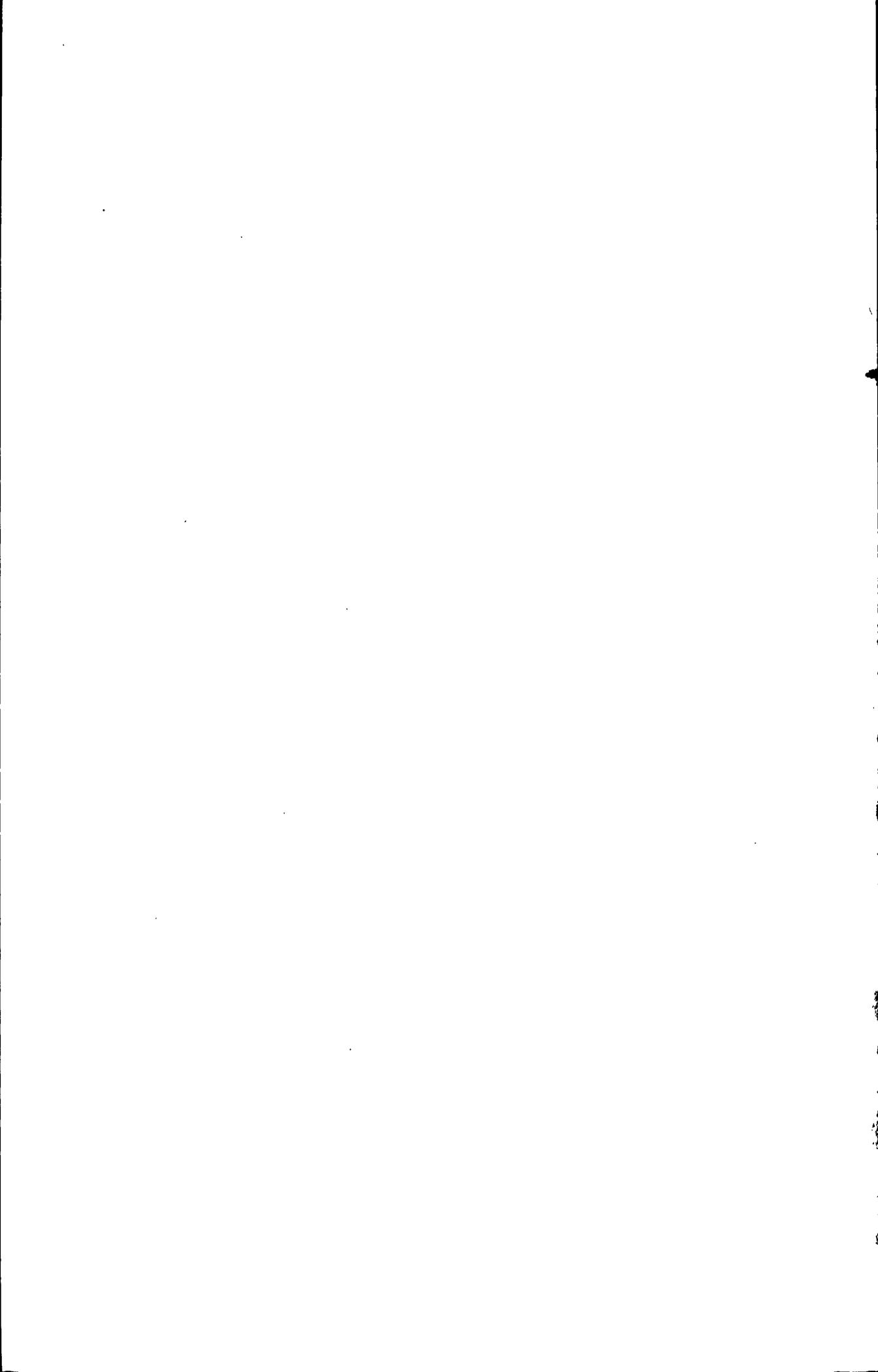
ABSTRACT

Turbo-generators are different from normal rotating machines. They not only endure mechanical vibrations caused by mechanical forces, but also bear electromagnetic vibrations caused by large electromagnetic forces. As the unit capacity increases, the excess stator and winding vibration faults caused by electromagnetic forces happen frequently. Based on the introduction of the turbo-generator structure and the electromagnetic vibration, the calculating methods of the rotor electromagnetic pulls under normal condition and rotor interturn short circuit are analyzed. Then the rotor interturn short circuit fault in a power plant is taken as an example to analyze the stator and rotor vibration characteristics. Also, the fault analysis method according to the vibration characters is put forward, and the electromagnetic forces act on the end winding and the winding inside the slots are studied. Finally, the monitoring system for the end winding based on LabVIEW8.0 is developed. This system adopts FOA1660 fibre optic accelerometer and RBH8351 grabbing card. Its modeuls include signal pickup and pre-processing, real time parameter setting, time-domain and frequency-domain vibration signal analysis, vibration trend analysis, help module and so on.

Zhang Wenzhan(Electrical engineering)

Directed by prof. Li Yonggang

KEY WORDS: Turbo-Generator, Stator Winding, Rotor, Electromagnetic Force, Monitoring System



目 录

中文摘要

英文摘要

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及其意义	1
1.2 汽轮发电机的电磁振动	1
1.2.1 定子铁芯、机座等部件的振动	2
1.2.2 定子绕组振动	3
1.2.3 转子系统的振动	4
1.3 课题研究内容	7
第二章 汽轮发电机转子电磁力分析及其应用	8
2.1 发电机正常运行时转子电磁力分析	9
2.2 转子绕组匝间短路时转子电磁力分析	11
2.3 某发电厂转子绕组匝间短路故障测试与分析	13
2.3.1 机组情况	13
2.3.2 历史运行情况	13
2.3.3 故障分析	14
2.3.4 不平衡电磁力计算	18
2.3.5 机组检修结果	19
2.4 本章小结	21
第三章 汽轮发电机定子绕组电磁力分析及其应用	22
3.1 定子槽内绕组电磁力分析	23
3.1.1 同槽同相线棒电磁力的计算	24
3.1.2 同槽异相线棒电磁力的计算	25
3.2 定子端部绕组电磁力分析	26
3.3 定子端部绕组监测系统设计	28
3.3.1 定子端部绕组监测系统现状	28
3.3.2 总体方案设计	32
3.3.3 光纤加速度计	35
3.3.4 采集卡	37
3.3.5 定子端部绕组在线监测软件	39
3.4 本章小结	42

第四章 结 论	43
参考文献	44
致 谢	48
在学期间发表的学术论文和参加科研情况.....	49

第一章 绪论

1.1 选题背景及其意义

随着科学技术的进步,以及制造和电网稳定运行水平的提高,发电机单机容量不断增加。由此,大型发电机的安全运行对整个电网的安全、稳定至关重要。电机与其他旋转机械运行时的振动原因有很大的不同之处,除了因电机所用的绝缘材料、叠片铁心、线圈嵌线等零部件组成的方式,使其结构刚度和运行时热胀冷缩条件等不同于其他机械外,还由于电机内存在的电磁力作用以及其所具有的频率与电机中部件固有频率相近所引起的共振。在大型高速 3000r/min 汽轮发电机中,还由于其电磁负荷大、转子长,运行中转子冷热不均,电磁不平衡也会引起振动。这些振动都会影响汽轮发电机的正常运行,严重时造成机组某些零部件疲劳断裂,绝缘磨损造成事故,有的还影响机组的基础和监控仪表,这对机组安全运行的危害性是很大的,甚至可能发生转子断裂飞车,造成机毁人亡的大事故。^[1]

同时发电机定子端部绕组承受着正常运行时的交变电磁力和出口或内部短路时巨大的瞬态电磁力。随着发电机单机容量的增加,这种电磁力也迅速增大。因此,定子端部绕组的固定问题和两倍频率电磁振动的危害研究成为发电机制造、运行部门共同关注的一个重要课题之一。汽轮发电机组在正常运行状态下,定子端部绕组由于受到电磁力的作用,将产生频率为两倍工频的振动^[2]。一般来说,这种振动在正常运行允许范围内。但当发电机受到频繁的冲击负荷或者发生短路事故等情况时,这种振动可能引起端部绕组的机械损伤或造成绕组的机械疲劳,成为事故的诱因。单纯依靠加大发电机端部绕组支撑结构的强度和结构件的数量,固然可以解决端部绕组电磁力所引起的绕组机械损伤问题,提高发电机运行的可靠性,但同时也带来材料利用率低、电机造价偏高、制造难度增加等不利因素。因此研究发电机转子电磁力的分析计算方法、发电机绕组故障时由于不平衡电磁力所引起的电磁振动以及定子端部绕组的电磁力及其振动监测等问题,将对发电机运行、状态监测与故障诊断具有一定的指导意义。

1.2 汽轮发电机的电磁振动

在发电机振动分析中,按激励的性质将振动分为机械振动和电磁振动,对一般的旋转机械,机械振动研究较多。可对于发电机,由于电磁力的作用,电磁振动同样作为当前研究的热点。^[3]

按振动部件分:定子铁芯、机座等部件的振动;定子绕组的振动;转子系统的

振动

按激励力分：强迫振动；自激振动

按频谱特征分：低频振动；工频振动；高频振动；复合频率振动

按振动性质分：机械振动；电磁振动

1.2.1 定子铁芯、机座等部件的振动

定子铁芯的振动是受到电磁、机械两种原因造成的；机座振动主要来源于定子铁芯振动和转子振动的影响（由于发电机采用端盖轴承，转子将力传到轴承，轴承连接与端盖上，最后通过机座与地基连接）。

1、定子铁芯的电磁振动

定子绕组磁势：由电机学知三相绕组的基波磁动势 $f_1 = F_1 \cos(\omega t - \alpha)$ ，三次谐波磁动势为 0，五次、七次谐波磁动势都较小，故只考虑基波磁动势，其中： α 是电角度， ω 是磁势脉振频率。

气隙磁导：假设定子和转子都有齿槽，则气隙磁导主要成分可表示为

$$\Lambda(\alpha) = \Lambda_0 + \Lambda_1 \cos Z_1 \alpha + \Lambda_2 \cos Z_2 \alpha$$

气隙磁场： $b(\alpha, t) = f(\alpha, t) \times \Lambda(\alpha, t)$ ，得基波磁场为 $b_1 = B_1 \cos(\omega t - \alpha)$

磁场产生的径向力： $p_r = \frac{b^2(\alpha, t)}{2\mu}$ ，得基波磁场产生的力波

$$p_r = \frac{b_1^2}{2\mu_0} = \frac{B_1^2}{4\mu_0} [1 + \cos 2(\omega t - \alpha)] = p_0 + p_1, \text{ 其中:}$$

$$p_0 = \frac{B_1^2}{4\mu_0} \quad p_1 = \frac{B_1^2}{4\mu_0} \cos(2\omega t - 2\alpha)$$

P_0 是径向力的不变部分，它是在定子圆周上均匀分布的力系，使定子铁芯受到压缩应力。 P_1 是径向力的交变部分，从表达式可知它是行波，脉振频率为倍频，故引起定子铁芯倍频振动。这个力波在空间沿定子铁芯圆周的交变次数为 2，将定子铁芯拉成椭圆形。如时间 t 一定，则 P_r 是一个空间按余弦分布的波；当空间位置 α 一定时，则 P_r 是一个随时间按余弦变化的波，其幅值都是 $B_1^2 / (4\mu_0)$ ，取幅值 $B_1^2 / (4\mu_0)$ 这一点来研究次行波的转速，因出现该点的条件是 $2(\omega t - \alpha) = 0$ ，或 $\alpha = \omega t$ ，把 α 对 t 求导，即可求得对应于波幅这一点，也就是基波磁场产生的力波旋转角速度为 ω 。总之基波磁场产生的力波在空间沿定子铁芯整圆交变 2，在时间上又以角速度 ω 沿

气隙旋转。一般在定子铁芯和机座间设有隔振板，300MW 发电机的隔振效果为 4~6。

铁芯的轴向振动：当铁芯松动时，由于定子叠片铁芯内有交变磁场通过，也会产生轴向振动，严重时造成断齿。特别是定子铁芯边端齿部，如未垫紧压紧，在长期振动力作用下，再加上局部漏磁分布的复杂性，受热不均匀，可使叠片疲劳断裂。但如果铁芯压力过大，铁芯绝缘层会由于过大的局部压力而受损伤。

2、机座振动

机座振动振源主要来自两个方面，一是由定子铁芯的电磁振动通过铁芯与机座的连接传来，将引起机座的倍频振动，这种倍频振动随单机容量的增大而增大，二是来自转子振动的激振力。为减小机座振动，采取两个措施：一是铁芯与机座之间采用弹性结构，二是机座的固有频率避开工频和二倍频。

3、振动问题的解决及监测方法

减小振动的方法：(1) 铁芯和机座的自振频率避开 100Hz；(2) 铁芯与机座间采用弹性隔振机构，定位筋相对于铁芯采用弹性过盈固定，过盈量超过可能出现的铁芯松动量；(3) 保证铁芯的初始压力，压力太低，铁芯会松动，压力太高，铁芯冲片绝缘层会由于过大的局部负载而受损。

1.2.2 定子绕组振动

1. 受力分析：在发电机运行时，定子绕组受到以下四种力的影响：

(a) 绕组中的电流与漏磁通的作用力，此力形状是椭圆的，且以工频（50Hz）旋转。

(b) 铁芯承受转子磁拉力引起的倍频（100Hz）的振动，因为定子线圈固定在铁芯槽里，绕组也承受来自铁芯倍频振动。

(c) 绕组热胀冷缩力。

(d) 在运行中，定子绕组受转子振动而引起的振动，其频率等于转子振动的频率。

2. 槽部线棒振动

同槽同相：上层线棒的电磁力 P_1 为一恒定分量与一交变分量的合力，交变频率为倍频，合力指向槽底；下层线棒的电磁力 P_2 为一恒定分量与一交变分量的合力，交变频率为倍频，合力指向槽底， $P_1 = 3P_2$ ，因此下层线棒实际电磁力为 $4P_2$ 。

同槽异相：上层线棒的电磁力 P_1' 为倍频交变力，指向槽楔；下层线棒的电磁力 P_2' 为一恒定分量与倍频交变分量的合力，指向槽底。

3. 定子绕组端部振动

定子线棒振动后果:

- 线棒相对振动, 导致端部范围内绝缘的磨损和击穿; 绕组端部相对于定子铁芯的振动, 导致绝缘磨损和击穿, 线棒出槽口部位附近铜导线疲劳损坏; 线棒鼻部的振动, 导致线棒间以及汇流排及供水元件连接处的故障。
- 线棒振动加速绝缘老化。发电机使用环氧云母绝缘, 其剩余击穿电压随定子线棒反复弯曲次数的增大而减小, 当弯曲次数达 10^7 时, 其绝缘水平开始逐步减小

4. 减小振动的措施: (1) 在线棒之间加垫块且与线棒联成一体, 减小线棒相对振动。(2) 改善端部绕组的固定方式, 使绕组的固有频率避开 100Hz。特别注意端部绕组的固定方式不能阻碍绕组的轴向移动。(3) 因端部绕组振动的激动力一部分来自铁芯, 应降低铁芯的振动。

1.2.3 转子系统的振动

发电机转子系统的振动主要是由于转子所受不平衡电磁力激发的, 有关不平衡磁拉力的问题已经被许多学者研究过, 像 Dorrell D. G., A., Pennacchi P., Frosini, L. 等已经发表了诸多文献。在这些已经公开发表的文献中, 大部分是针对电动机进行的研究^[4-6], 而针对发电机的则相对较少。此外, 大部分已发表的文献关注的都是由不平衡磁拉力引起的电机转子的振动特性, 而在电机定子振动方面关注的人则较少。

1、励磁绕组匝间短路对转子振动的影响

目前, 国内已运行的大型汽轮发电机中, 发生转子励磁线圈匝间短路故障占故障总数的比重较大, 且匝间短路故障会导致励磁绕组一点甚至两点接地, 导致恶性事故。

图 1-1 为某 100MW 发电机励磁绕组匝间短路后发电机前后轴的振动频谱图, 以工频振动为主, 倍频振动为辅, 另有振幅较小的高频振动, 说明匝间短路的热弯曲振动量比磁不平衡引起的振动量大。^[9]

2、定转子间气隙偏心对转子振动的影响

由于制造安装和运行原因, 转子外圆和定子内圆之间会产生偏心, 偏心有两种: 一种是定、转子的中心偏移, 转子旋转时偏心的位置不变, 称为静偏心(如图 1-2a); 另一种是转子本身在转轴上装偏了, 但转轴与定子是同心的, 转子旋转时偏心的位置也在变化, 称为动偏心(如图 1-2b)。由于偏心的发生, 气隙变小的一面气隙磁

密增强，气隙增大的一面气隙磁密减弱，使定转子间产生偏心磁拉力。静偏心时磁拉力的方向是恒定的，即为转子的偏心方向，不会旋转变化的，因此不引起转子的振动，它仅使轴系各处在转子偏心方向产生挠度，导致轴承的单侧负荷增大，定子铁芯变形等危害，下面主要分析动偏心对转子振动的影响。

气隙偏心的诊断、成因以及预防性维护很早就被 L. T. Rosenberg 提出^[10]，继此之后，关于偏心的建模和仿真也得到了研究^[11,12]。同时，由偏心产生的作用在转子上的不平衡磁拉力研究也得到了发展^[13-17]。研究表明，气隙偏心将同时使发电机转子产生径向振动和轴向振动^[18]。

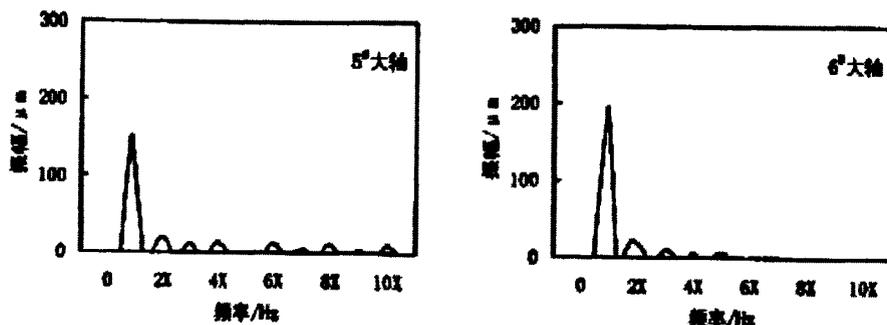


图 1-1 励磁绕组匝间短路时轴振动频谱图

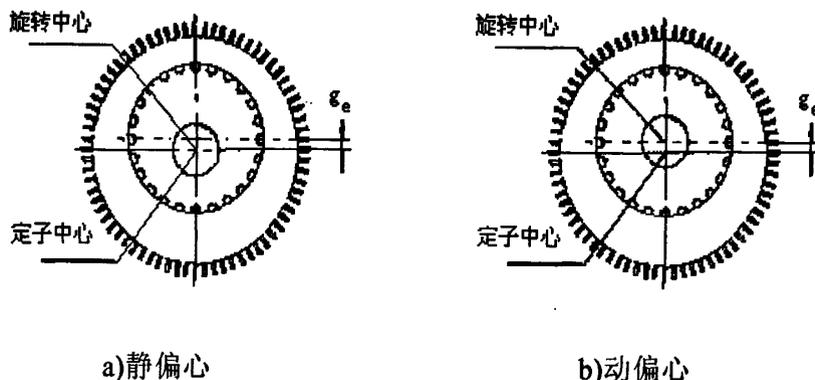


图 1-2 气隙偏心示意图

动偏心引起的离心力：

由于动偏心时转子旋转中心与转子重心不重合，引起转子机械不平衡，使转子发生工频振动。

动偏心引起的不平衡磁拉力：

设无偏心时的均匀气隙为 g_a ，偏心量为 g_e ，则相对偏心率 $\varepsilon = g_e / g_a$ 。按余弦规律，气隙表达式为：

$$g(\omega, \alpha) = g_a (1 - \varepsilon \cos(\omega t - \alpha)) \quad (1-1)$$

式中： ω 为旋转角速度， α 为机械角位移。

在直径两端的气隙可分别表示为 $g_1 = g_a(1 - \varepsilon \cos(\omega t - \alpha))$ ，
 $g_2 = g_a(1 - \varepsilon \cos(\omega t - \alpha + \pi)) = g_a(1 + \varepsilon \cos(\omega t - \alpha))$ 。设气隙 g_1 处磁密为 B_1 ，气隙 g_2 处磁密为 B_2 。由每极磁势相等可近似认为 $B_1 g_1 = B_2 g_2$ ，得 $B_1 = B(1 + \varepsilon \cos(\omega t - \alpha))$ ，
 $B_2 = B(1 - \varepsilon \cos(\omega t - \alpha))$ ，式中 B 为气隙平均磁密。则不平衡磁拉力为：

$$F = \frac{B_1^2 - B_2^2}{2\mu_0} = \frac{2\varepsilon B^2}{\mu_0} \cos^2(\omega t - \alpha) = \frac{2\varepsilon B^2}{\mu_0} (1 - \cos(2\omega t - 2\alpha)) \quad (1-2)$$

不平衡磁拉力的交变频率为 2 倍频，且与 B^2 成正比，而 B 随励磁电流和有功的增大而增大。因此不平衡磁拉力引起转子倍频振动，且倍频振幅值随励磁电流、有功的增大而增大。由于气隙偏心也可引起轴系不对中，产生倍频振动，以及振幅较小的高次谐波电磁振动。

3、转子刚度不对称引起的倍频振动和结构共振分析

众所周知一般发电机转子本体开有大小齿，使转子在两个互相垂直的轴线上刚度不等，横截面两主惯性矩存在差别，虽在大齿表面铣有月牙槽，但也经常发生转子刚度不对称，转子将发生倍频振动，只要存在主惯性矩差，即使质量处于平衡状态，这种振动仍存在。

设发电机转子直轴刚度为 C_d ，交轴刚度为 C_q ，转子角速度 ω ，则轴的刚度与时间的关系为： $C_\omega = C + \Delta C \sin 2\omega t$ ， $C = \frac{C_d + C_q}{2}$ ， $\Delta C = \frac{C_d - C_q}{2}$ ，因此在转子上将作用一个附加的倍频干扰力，一方面转子发生振动频率为工作频率两倍的倍频振动，另一方面转子以临界转速一半旋转时，干扰力频率正好等于转子固有振动频率，将引起转子共振，即为转子刚度不对称引起的结构共振。

4、汽轮发电机非对称运行时转子振动分析

发电机在对称负载状态下运行，电磁力矩基本上是对称稳定的，一旦定子各相电流的对称度被破坏，出现负序电流，产生负序磁场，由于正序旋转磁场与负序磁场之间相互作用而产生倍频的附加振动。

5、轴振和轴承振动的标准 (μm ，绝对峰峰值)

表 1-1 轴振和轴承振动的标准

范围	转速 (r/min)					
	1500		1800		3000	
	座振	轴振	座振	轴振	座振	轴振
A	50	120	42	110	25	100
B	128	240	107	220	64	200
C	324	385	270	350	162	320

范围 A, 设备是良好的, 可不加限制运行; 范围 B, 可以运行; 范围 C, 开始报警, 提请注意, 安排维修; 振幅超过 C 时, 就瞬时跳闸。

6、振动常用的一些分析方法

(a) 工作过程中: 轴心轨迹图、频谱分析图、相关分析(含自相关和互相关)、功率谱图(含自功率谱和互功率谱)

(b) 发电机启停过程中: 波特图(即振幅随转速的变化图)、Nquist 图(即极坐标图)、三维频谱图(即频谱随转速的变化图)

(c) 变工况时振动的变化。如改变励磁电流, 振幅及频谱的变化趋势图;

改变冷却氢气入口温度, 振幅及频谱的变化趋势图;

改变负荷, 振幅及频谱的变化趋势图;

1.3 课题研究内容

本文在简要介绍大型汽轮发电机结构及电磁振动概念的基础上, 主要研究发电机定转子电磁力的分析计算方法、发电机绕组故障时由于不平衡电磁力所引起的电磁振动以及定子端部绕组的电磁力及其振动监测等问题。主要研究内容如下:

(1) 分析汽轮发电机正常运行和转子励磁绕组匝间短路故障时, 转子电磁力的计算方法。并以某发电厂转子励磁绕组匝间短路故障为工程背景, 分析此故障引起的发电机定转子振动特性, 以及基于振动特性分析此故障的方法。

(2) 分析汽轮发电机定子槽内绕组的电磁力, 包括同槽同相线棒、同槽异相线棒。

(3) 分析定子端部绕组的电磁力。

(4) 采用 FOA1660 光纤加速度传感器和瑞博华 RBH8351 采集卡, 基于 LabVIEW8.0 开发定子端部绕组监测系统。

第二章 汽轮发电机转子电磁力分析及其应用

如图 2-1 所示，转子总体上包括转轴（包含转子本体）、励磁绕组、槽绝缘、槽楔、护环、中心环、阻尼绕组、转子绕组引线、风扇、滑环等。励磁绕组绕在轴的轴向槽内，端部用护环固定，用中心环轴向固定，且在励磁绕组和转子本体开有径向通风槽，使冷却用氢气流过。图 2-2 为转子铁心结构，铁心槽包括励磁绕组槽（用于安放励磁线圈，形成转子磁场）、阻尼绕组槽（安放阻尼绕组，提高发电机负序承载能力）、月牙槽（平衡大、小齿刚度，降低倍频振动）、排风槽（端部励磁绕组径向冷却出风口）。图 2-3 为转子励磁绕组的绕线结构。

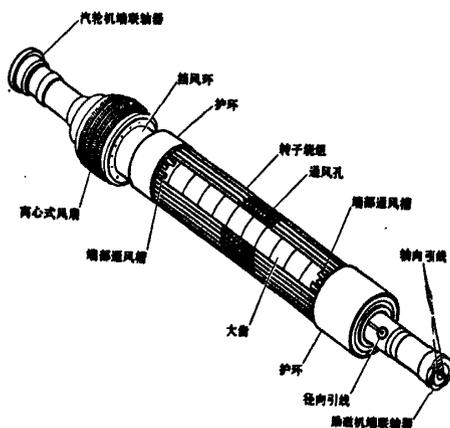


图 2-1 转子结构图

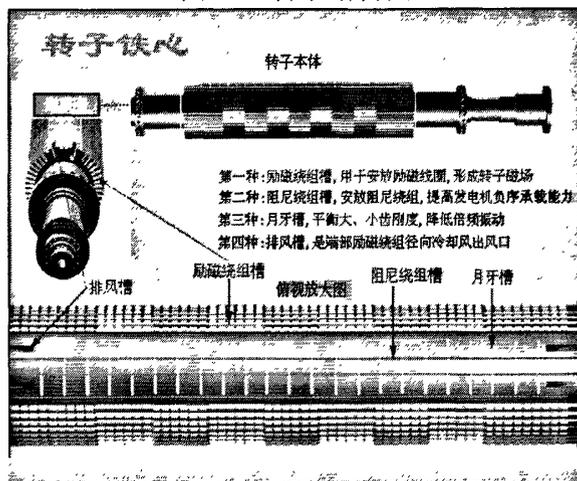


图 2-2 转子铁心结构

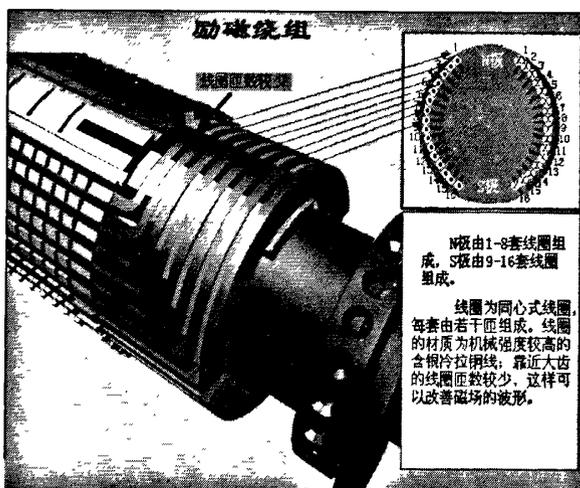


图 2-3 转子励磁绕组

2.1 发电机正常运行时转子电磁力分析

在发电机振动分析中,按激励的性质将振动分为机械振动和电磁振动,对一般的旋转机械,机械振动研究较多。可对于发电机,由于电磁力的作用,电磁振动同样作为当前研究的热点。对于由发电机气隙电磁力引起电磁振动问题,国内研究较早的学者是天津大学的邱家俊教授^[19],分析方法如下:

(1)、发电机气隙磁势

发电机正常运行时,气隙磁势为:

$$f(\alpha_m, t) = F_s \cos(\omega t - p\alpha_m - \psi - \frac{\pi}{2}) + F_r \cos(\omega t - p\alpha_m) \quad (2-1)$$

式中: p 为极对数; $\omega = 2\pi f = p\omega_r = 2\pi p f_r$, ω 为电角频率, f 为电频率, ω_r 为转子机械角频率, f_r 为转子机械频率; α_m 为定子机械角度; ψ 为发电机内功角

(2)、气隙磁导表达式

电机转子外圆相对于定子内圆的偏心,一般认为由下列五种情况造成:

- (a) 柔性转子轴弯曲振动变形
- (b) 弹簧隔振定子铁心的振动位移
- (c) 轴颈相对轴承中心的油膜偏心
- (d) 定子内圆圆心相对转子轴承中心的偏心
- (e) 转子外圆相对于转子轴承中心的偏心

其中 (a)、(b) 是振动形成的偏心, 是发电机正常运行时考虑的重点, 单位面积气隙磁导可近似表示为:

$$\Lambda(\alpha_m, t) = \frac{\mu_0}{g(\alpha_m, t)} \approx \Lambda_0 - \Lambda_e \cos p(\omega, t - \alpha_m) \quad (2-2)$$

(3)、气隙电磁力

气隙电磁力可表示为:

$$q(\alpha_m, t) = \frac{B^2(\alpha_m, t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} f^2(\alpha_m, t) \Lambda^2(\alpha_m, t) \quad (2-3)$$

气隙电磁力作用于定子内圆表面, 对定子产生圆柱壳体的振动, 定子振动频率及特性取决于气隙电磁力的脉振频率及特性。同时气隙电磁力也作用于转子, 激发电磁转子的电磁振动, 转子的振动频率及特性取决于作用于转子的不平衡电磁力特性。分析作用于转子的电磁力有两种方法, 一是电磁力的磁密公式计算法: 先通过气隙磁势和磁导, 求得气隙磁密 $B(\alpha_m, t)$, 然后利用公式 $q(\alpha_m, t) = B^2(\alpha_m, t) / 2\mu_0$ 求得转子表面单位面积或定子内圆表面单位面积的径向电磁力, 此分布的径向电磁力同时作用于电机定子铁心和转子上, 对空心圆柱形定子产生弹性圆柱壳体的振动, 而对转子的振动则取决于此分布电磁力沿转子外圆周的合力, 因此需利用公式 (2-4):

$$\begin{cases} F_x = LR \sum \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \cos \alpha_m d\alpha_m \\ F_y = LR \sum \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \sin \alpha_m d\alpha_m \end{cases} \quad (2-4)$$

求出合力; 二是电磁力的能量计算法, 先计算电机气隙空间的磁场能量, 然后将此能量分别对 X 、 Y 求导, 直接得到作用于转子外圆周沿 X 、 Y 方向的电磁力 F_x 、 F_y 。

电机气隙磁管能量为:

$$d_w = \frac{1}{2} f(\alpha_m, t) d\phi = \frac{1}{2} \Lambda(\alpha_m, t) f^2(\alpha_m, t) R d\alpha dz$$

则气隙空间的磁场能量为:

$$W = \frac{R}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \{ \Lambda(\alpha_m, t) f^2(\alpha_m, t) \} dz d\alpha_m \quad (2-5)$$

式中: R 是定子内圆半径, L 为气隙轴向长度。

磁拉力在 X 轴上的分力 F_x 和在 Y 轴上的分力 F_y 为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{\partial W}{\partial X} = \frac{RL}{2} \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Lambda}{\partial X} f^2(\alpha_m, t) d\alpha_m \\ F_y = \frac{\partial W}{\partial Y} = \frac{RL}{2} \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Lambda}{\partial Y} f^2(\alpha_m, t) d\alpha_m \end{cases} \quad (2-6)$$

2.2 转子绕组匝间短路时转子电磁力分析

励磁线圈无论什么原因发生匝间短路，由于匝间短路不能流过电流，在极对称位置短路匝线圈与槽邻接的齿部温度就比正常部位低，从而产生热弯曲。进而通过N极和s极的安匝差产生磁不平衡，同时，还由于磁拉力的作用产生和热弯曲同方向的弯曲。因此，下面针对这些热磁不平衡的评价方法进行讨论。^[20]

1、转子匝间短路造成的热不平衡分析

转子线圈无论什么原因发生匝间短路，由于短路匝不能流过电流，与短路匝线圈所绕的两槽邻接的齿部温度就比正常部位低，使转子横截面上温度分布不均匀，发生热弯曲。由于热不平衡而在轴体两端产生的等效弯矩表达式：

$$M_x = 2E\alpha Sr_0 \Delta t (\cos \alpha_0 + \cos \alpha_1) \quad (2-7)$$

式中 E ——轴的杨氏模量， N/m^2

α ——轴的热胀系数

S ——1个齿的截面积， m^2

Δt ——正常时和层间短路时的齿部温差， $^{\circ}C$

α_0, α_1 ——与匝间短路线圈邻接槽部的两齿间的角度

r_0 ——槽底半径， m

如果将这个热弯矩 M_x 作为集中弯矩的方式施加在变截面轴上作用于转子两端(如图 2-4 所示)，将激发转子与机械旋转频率同频的振动。

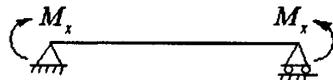


图 2-4 由热不平衡引起的附加力矩

2、匝间短路造成的磁不平衡的评价

如图 2-5 所示，在正常时，N极和S极的磁通分布是对称的，一旦发生匝间短路，由于存在安匝差，磁通分布便发生虚线像实线那样的变化。在N极侧和S极侧的安匝相等处密度为零，假如考虑励磁线圈的分布在圆周上是均匀的，密度为零的点 β 为式(2-8)

$$\frac{N_l}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) = \frac{N_l - N_s}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \quad (2-8)$$

即：

$$\beta = \frac{\frac{\pi}{2} N_s}{N_t + (N_t - N_s)} \quad (2-9)$$

式中 N_t ——每极励磁线圈的总匝数

N_s ——引起短路的匝数

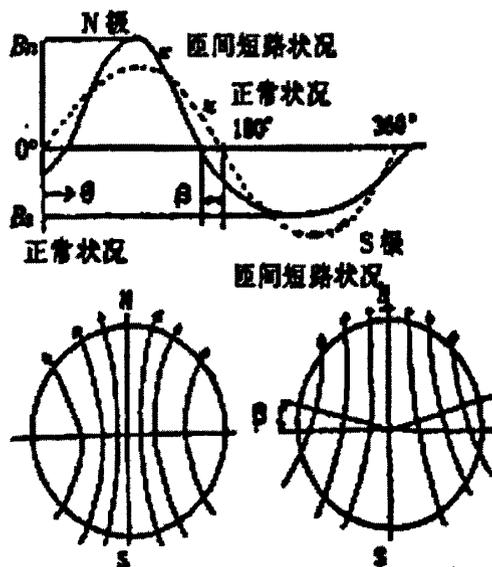


图 2-5 匝间短路的磁流分布

在图 2-5 中，由于 N 极和 S 极的磁通量相等，假如其分布为正弦波，那么式 (2-10) 成立，

$$B_N \int_0^{180-2\beta} \sin \frac{180}{180-2\beta} \theta d\theta = B_S \int_0^{180+2\beta} \sin \frac{180}{180+2\beta} \theta d\theta \quad (2-10)$$

按式 (2-11) 分别计算 N 极和 S 极磁通密度

$$B = N_t \times I \times \mu_0 / (2 \times \delta) \quad (2-11)$$

其中 N_t 是每极励磁线圈的总匝数， I 是励磁电流， μ_0 为空气磁导率， δ 是气隙距离。

磁拉力为式 (2-12)：

$$F = \left\{ \int_{\beta}^{\pi-\beta} B_N^2 \sin^2 \left[(\theta - \beta) \frac{\pi}{\pi - 2\beta} \right] \sin \theta d\theta + \int_{\pi-\beta}^{\pi+\beta} B_S^2 \sin^2 \left[(\theta - \pi + \beta) \frac{\pi}{\pi + 2\beta} \right] \sin \theta d\theta \right\} \frac{LR}{2\mu_0} \quad (2-12)$$

式中 B_N 为 N 极磁通密度， B_S 为 S 极磁通密度， L 为转子长， R 为转子半径， μ_0 为空气磁导率。

作用于转子的不平衡磁拉力为：

$$F = \left\{ \frac{4(1+\xi)\pi^2 \cos \beta}{(2\beta+\pi)(-2\beta+\pi)} - \frac{4\pi^2 \cos \beta}{(-2\beta+\pi)(2\beta+3\pi)} \right\} \times \frac{LRB_s^2}{2\mu_0 g} \quad (2-13)$$

2.3 某发电厂转子绕组匝间短路故障测试与分析

2.3.1 机组情况

3×350MW 的天然气联合循环电厂，燃机是日本三菱的 M701F，发电机是东方电机厂产的 409MW。燃机启动时用 SFC（静止变频器）拖到 500rpm 左右点火，加速到 2000rpm 后 SFC 脱离。具体机组参数如下：

发电机型号	QFR-400-2-20	额定容量	482MVA
额定功率	409.7 MW	额定电压	20KV
额定电流	13.914 KA	相数	3
额定频率	50 Hz	绝缘等级	F
额定励磁电流	3390 A	额定功率因数	0.85
出厂编号	12-400-3-2		

2.3.2 历史运行情况

- 2007 年 2 月投运, 4 月 5 日 168 结束, #7 瓦振动很好, 过一阶 0.066mm, 过二阶 0.093mm, 高负荷 3000rpm 振动 0.045mm;
- 2007 年 5 月-10 月, #7 瓦 (发电机汽端瓦) 过临界共振幅值加大一阶跳跃变大至 0.1mm 附近, 二阶增大至 0.1-0.12mm 之间, #8 瓦 (发电机励端瓦) 增大却不大;
- 2007 年 10 月 22 日, #7 瓦过一阶增大至 0.15mm, 其后一阶基本在 0.13-0.17mm 之间波动, 二阶增大至 0.13mm, 一阶开始超过二阶, 其后超过幅值越来越大;
- 2007.11.13~12.4 第一次检查, 发现轴瓦和轴颈磨伤, 现场修补轴瓦, 2007.12.5 启机后情况无好转, 一阶仍为 0.15mm, 12.14 过一阶增大至 0.208mm, 首次超过 0.20mm;
- 2008.1.5~1.17 第二次检修, 哈汽补轴颈。以后低盘时转子晃动大 0.022~0.058, 启机后情况继续恶化, 过一阶增大超过 0.29mm, 高负荷振动未变;
- 2008.2.10~3.13 第三次检修, 更换新轴瓦和新轴承套, 低盘时转子晃动大 0.023~0.059, 启机后情况继续恶化, #7 瓦过一阶振动达到 330 μm, #8 则 90 μm 左右, #1~#6 瓦的振动和以前比较相差不大; 在停机下降过程中 (发电机定子、转子均没有电流电压), #7 瓦不会发生类似的振动, 但在下降过程中转子加 900A 励磁电

流, #7 瓦过一阶振动达到 $330\mu\text{m}$, 加 200A 励磁电流, #7 瓦过一阶振动不明显; #7 瓦过一阶振动均是工频振动, 其重复性非常好。;

■ 2008.4 月中转子返厂, 拔线发现 II 极的 8 号线圈实际有一匝静态短路, II 极的 6 号线圈有一匝在转速 $680\text{rpm}\sim 1940\text{rpm}$ 时有动态匝间短路。

2.3.3 故障分析

1、第一种分析结果

征兆 1:

- 2007.11.13~12.4 第一次检查, 发现轴瓦和轴颈磨伤, 现场修补轴瓦, 2007.12.5 启机后情况无好转, 一阶仍为 0.15mm , 12.14 过一阶增大至 0.208mm , 首次超过 0.20mm ;
- 2008.1.5~1.17 第二次检修, 哈汽补轴颈。以后低盘时转子晃动大 $0.022\sim 0.058$, 启机后情况继续恶化, 过一阶增大超过 0.29mm , 高负荷振动未变;
- 2008.2.10~3.13 第三次检修, 更换新轴瓦和新轴承套, 低盘时转子晃动大 $0.023\sim 0.059$, 启机后情况继续恶化, 过一阶增大至 0.33mm ;
- 3月17日启机提高轴承进油温度至 40°C , 但与3月14日启机比较无改善;

分析结果 1: 在已经修补了轴颈、轴瓦甚至更换了轴瓦和轴承套并在提高油温的情况下振动情况并未获得好转, 说明产生振动的主要原因不在于轴瓦与轴承套处, 而在于转子或是基座的其它缺陷处。

补充征兆 2: #7 瓦防旋转定位块间隙处理后, 3月26日、27日升速过 1 阶临界转速共振振幅由 3月17日、21日的 $330\mu\text{m}$ 下降至 $286\mu\text{m}$ 。

分析结果 2: 证明了前面推测的正确性, 确实是在基座方面有缺陷, 基座缺陷除了定位块松动之外还有基座螺栓松动或是内部裂纹, 而征兆“3月17日: 联轴器螺母重新把紧; 把紧地脚螺栓”, 这说明可以排除地脚螺松松动这一条, 只需再验证基座是否存在内部裂纹等缺陷即可。

补充征兆 3:

- 正常降速通过 1 阶临界转速时转子汽端 7 号瓦轴无共振, 基本无尖峰, 振幅约 $90\mu\text{m}$;
- 带励磁电流 (888A) 下降过 1 阶临界转速 7 号瓦轴共振, 振幅达 $287\mu\text{m}$, 带励磁电流 (200A) 下降过 1 阶临界转速 7 号瓦轴振动无明显尖峰, 为 $84\mu\text{m}$ 。

分析结果 3: 这说明励磁电流对 7 号瓦处的振动有很重大的影响, 励磁电流对转子所产生的最主要作用是不平衡电磁拉力, 故转子的匝间短路所导致的不均衡磁拉力是重要因素。

2、第二种分析结果

图 2-6 为升速过程发电机测点布置图, 表 2-1 为相应的测试结果。

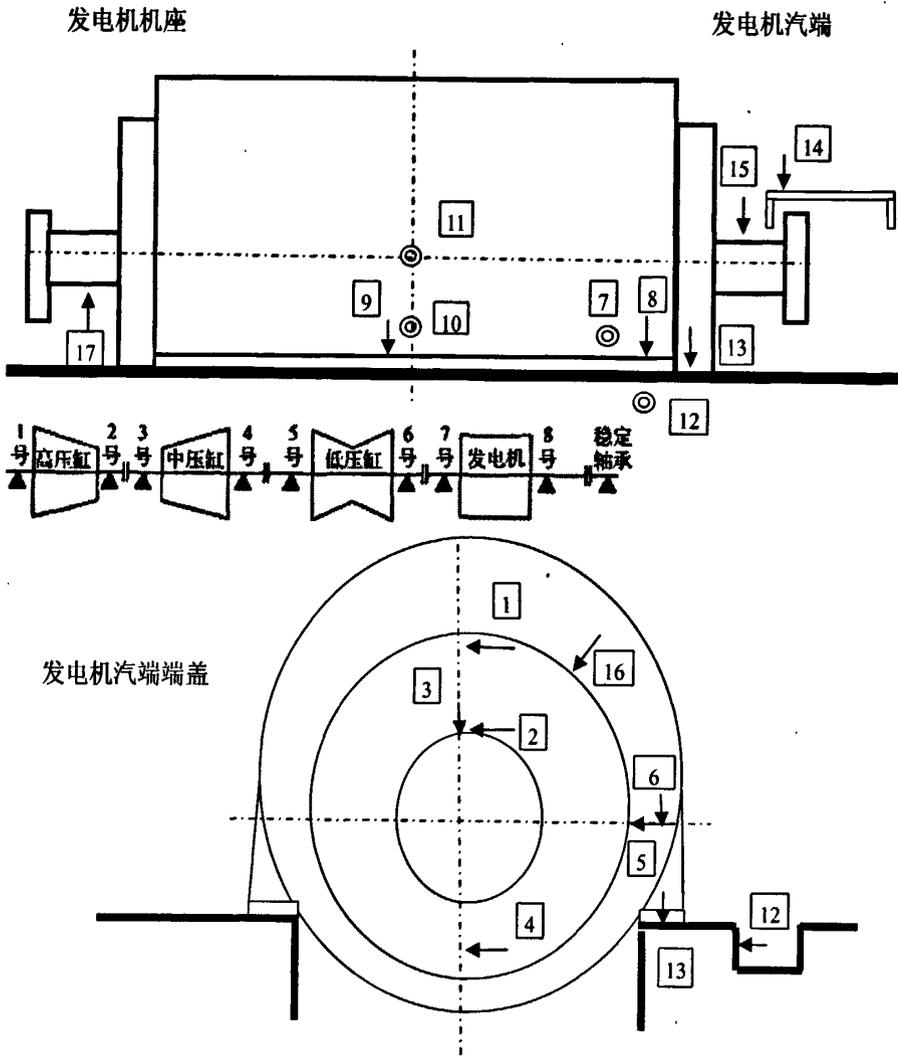


图 2-6 升速过程发电机测点布置图

表 2-1 各测点振动值

工 况 测点	安装位置	上升	上升	上升	空转	加励	下降
		260 转	702 转	754 转	3000 转	+800A 3000 转	+800A 760 转
1#	汽端端盖上部水平	360/289	21/18	63/53	14/5/5	13/4/8.5	49/42
2#	汽端端盖中部水平						
3#	汽端端盖中部垂直	137/111	45/42	98/89	10/6/2	11/8/3	94/84
4#	汽端端盖下部水平	334/274	11/7	42/12	14/4/4	13/4/6	17/9
5#	汽端端盖中缝面水平	355/292	9/5	62/18	13/4/4.5	13/4/8	23/14
6#	汽端端盖中缝面垂直	17/3.3	48/46	111/102	10/7/2	10/8/3	101/91
7#	机座汽端底脚水平	935/90	43/43	88/86	5/3/3	5/3/5	78/77
8#	机座汽端底脚垂直	25/8	36/34	84/77	6/4/0.3	6/4/0.6	78/72
9#	机座中部底脚垂直	153/9	34/34	78/77	2/2/1	3/2/1.5	78/78
10#	机座中部底脚水平	349/247	41/41	58/56	6/6/0.7	6/6/2	56/54
11#	机座中部水平	357/247	29/29	22/21	6/4/4	6/4/8	18/16
12#	机座汽端基础水平	221/170	31/31	48/47	2/2/0.3	2/1/0.8	53/51
13#	机座汽端基础垂直	45/5	30/30	55/54	3/2/0.6	3/3/0.8	53/53
14#	汽端盘车盖架子垂直	68/3.4	22/21	43/42	3/2/1	3/2/0.9	42/42
15#	汽端盘车盖相对轴	96/3	64/24	197/86	64/9/45	71/11/45	122/74
16#	汽端端盖上部 45°	221/170	29/29	50/49	6/5/4	7/6/7	51/50

分析结果:

(1)在 260 转的时候各处的振幅值都较大,怀疑基座或是轴承瓦部分存在 4.3Hz 的固有频率或是其它什么原因;

(2)在低频时,机座汽端基座下方在靠近七号轴承处的振动值(如 7#处)较大,理论上基座下方靠近地基,其刚度较之其它地方应当只大不小,其振动值不应当比别的地方大这么多,再结合前面的分析,怀疑基座内部存在如裂纹一类的某种不可见缺陷;

3、第三种分析结果

图 2-7 为第二次升速过程发电机测点布置图,表 2-2 为相应的测试结果。

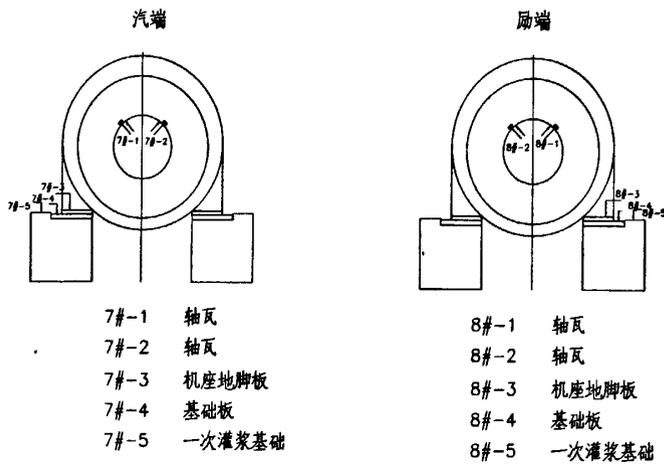


图 2-7 升速过程发电机测点布置

表 2-2 各测点振动值

工 况 测点	26 日-759 转 上升	27 日-204 转 上升	27 日-244 转 上升	27 日-749 转 上升	27 日-3000 转 上升	3000 转 +200A	下降 +200A 747 转
7#-1	97/43/259	136/34/349	249/192/38	67/62/199	15/15/195	15/15/226	12/3/69
7#-2	77/60/331	136/17/259	252/216/318	86/80/289	16/16/254	13/12/272	11/5/179
7#-3	78/61/293	68/3.4/143	84/12/64	83/80/248	6.5/6/231	6.5/6/228	5/4.5/130
7#-4	73/57/269						
7#-5	62/49/332	68/3.4/190	74/14/316	61/54/287	5/4/258	4/4/258	5/4.5/171
8#-1	46/28/238	153/34/350	324/288/43	56/50/185	7/7/221	11/11/278	12/4.5/53
8#-2	123/101/344	102/34/256	336/299/313	125/120/305	6/4/319	7/6/335	7/7/198
8#-3	20/0.04/	28/0.1/355	39/0.2/37	42/0.8/153	6/4/252	7.5/5/272	8/6/145
8#-4	82/63/305	11/3/268	38/22/325	84/72/263	6/3/227	6/3/242	7/6/141
8#-5	56/44/298	51/3.4/223	72/12/67	58/54/254	3/2/336	3/3/2	3/2.5/134
轴振	156/75/27	141/16/150	100/15/156	149/56/341	73/29/154	73/29/146	64/10/151

分析结果：

励端 8#轴瓦两个对称侧的振动量以及励端、汽端的基基座地脚步板振动量有较大差异，而理论上两个对称侧的振动数据差异不应如此大，加上征兆“#7 瓦轴振倍频分量偏大”、“联轴器的螺栓曾经松动过并重把紧”，因此有理由怀疑是不是存在转子不对中，或是轴承的水平标高不齐（即在水平方向上各轴承不同心），文[21]认为，若某个轴承标高发生变化，则发生变化的轴承本身其负荷变化并不是最大的，

往往是与之相邻的第二个轴承所受的影响最大（如该文献所给出的算例就是这样），再现场征兆：

- 各种工况升速、降速过程，汽机#6 瓦轴、发电机#8 瓦轴共振振幅不大，在 80-110 μm 之间。
- #7 瓦轴的低速盘车水平晃动大，达 50~60 μm ；汽机抽真空后，发电机轴下沉约 130 μm ，7#瓦晃动加大；
- 基础和端盖振动情况，端盖 97 μm ，基础 62 μm

因此我们有理由怀疑是不是五号轴承、六号轴承或是稳定轴承标高有所偏差。另有关于“要重新控制轴承的标高”的征兆：

- 经过现场振动实测和分析；认为轴颈的不圆度可能存在问题，要求严格控制不圆度；建议重新调整#7 瓦中心（标高）。

另有文[22]描述的故障特征与本例有相似之处，其诊断的最终结论其原因的其中一条便为轴承标高不齐。

4、最终分析结果：

根据已有的数据和信息，认为：

(1) 转子匝间短路导致产生不平衡电磁拉力以及 7#轴瓦的 12.5Hz 固有频率为振动主要原因；

(2) 基座方面可能存在有内部裂纹等不可见因素；

(3) 可能存在转子不对中或是轴承（水平）标高不齐，也有可能两者兼有。

2.3.4 不平衡电磁力计算

本例中，转子有 16 个绕组，每极最近大极的一个线圈有 7 匝，其它 14 个绕组分别有 9 匝，因此每极励磁线圈的总匝数 N_t 为 70 匝，其中 S 极有 3 个短路匝，分别为汽端 II 极的八号线圈的 4、5 匝匝间和 5、6 匝匝间，该两处是静态固定的匝间短路；汽端 II 极的六号线圈的 3、4 匝匝间 R 部有烧焦的痕迹，是磨损导致转子的动态匝间短路。低速时一般只有静态匝间短路，因此 $N_{s1}=2$ ，而在转子高速旋转时，才发生动态匝间短路，因此 $N_{s2}=3$ 。

根据公式 (2-9)，首先求得静态短路时密度为零的点 β_1 为：

$$\beta_1 = \frac{\pi N_{s1}}{N_t + (N_t - N_{s1})} = 0.0072\text{rad}$$

按式 (2-11) 分别计算 N 极和 S 极磁通密度:

$$B_{N1} = N_1 \times I \times \mu_0 / (2 \times \delta) = 70 \times 888 \times 4\pi \times 10^{-7} / (2 \times 0.1) = 0.3906T$$

$$B_{S1} = N_1 \times I \times \mu_0 / (2 \times \delta) = (70 - 2) \times 888 \times 4\pi \times 10^{-7} / (2 \times 0.1) = 0.3794T$$

代入公式 (2-13) 求得不平衡磁拉力 $F_1 = 10073N$ 。

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$, $L=6.03m$, $R=0.55m$, $I=888A$, $\delta=0.1m$ 。

同理计算当转子高速运转发生动态短路时, 密度为零点 β_2 为:

$$\beta_2 = \frac{\frac{\pi}{2} N_{s2}}{N_1 + (N_1 - N_{s2})} = 0.0109rad$$

N 极和 S 极磁通密度:

$$B_{N2} = N_1 \times I \times \mu_0 / (2 \times \delta) = 70 \times 888 \times 4\pi \times 10^{-7} / (2 \times 0.1) = 0.3906T$$

$$B_{S2} = N_1 \times I \times \mu_0 / (2 \times \delta) = (70 - 3) \times 888 \times 4\pi \times 10^{-7} / (2 \times 0.1) = 0.3738T$$

将各参数带入式 (5), 求得: 不平衡磁拉力 $F_2 = 14998N$ 。

2.3.5 机组检修结果

2008.4 月中#2 发电机转子在东方电机厂进行转子绕组拔线, 发现转子的汽端 II 极的八号线圈的 4、5 匝匝间和 5、6 匝匝间分别因为匝间的绝缘层跑位导致匝间短路 (见图 2-8、图 2-9), 该两处是静态固定的匝间短路, 汽端 II 极的六号线圈有一匝在转速 680rpm~1940rpm 时有磨损导致转子的动态匝间短路, 3、4 匝匝间 R 部有烧焦的痕迹 (见图 2-10); 另外, 据前两天上午做转子动平衡时测试的交流阻抗数据反映, 在转速上升的过程中, 在 680rpm, 交流阻抗从 4.2Ω 突然降到 4.0Ω, 到转速上升到 1940rpm 时, 交流阻抗从 3.8Ω 突然升到 4.0Ω。另外发现励端和汽端的护环处转子绕组的匝间的绝缘层多处有跑位的现象。

2008.4 月将 2#机转子返厂彻底处理: 检查转子机械、电气、以及动力特性状态; 车削轴颈消除磨伤沟槽; 配轴瓦瓦块、密封瓦和挡油盖等部件; 消除转子匝间短路; 重新动平衡。转子于 2008 年 4 月 9 日到厂后, 进行了: 转子回厂原始状态的外观质量和圆度检查; 转子回厂原始状态的电气性能检查; 转子回厂原始状态的密封性能检查; 转子回厂原始状态的动力特性检查; 转子解体过程的详细检查和记录; 转子解体后的圆度检查和记录。



图 2-8 汽端 II 极的八号线圈的 4、5 匝匝间



图 2-9 汽端 II 极的八号线圈的 5、6 匝匝间

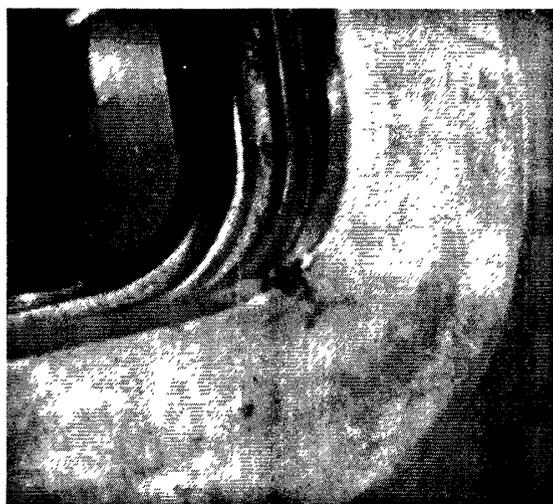


图 2-10 汽端 II 极的六号线圈的 3、4 匝匝间 R 部

2.4 本章小结

本章首先分析了汽轮发电机正常运行时转子电磁力计算方法和转子励磁绕组匝间短路故障时转子电磁力的计算方法，然后以某发电厂转子励磁绕组匝间短路故障为工程背景，分别介绍了机组情况、历史运行情况、故障分析、不平衡电磁力计算结果和机组检修结果。

第三章 汽轮发电机定子绕组电磁力分析及其应用

定子铁心端部结构如图 3-1 所示，线棒在定子铁心槽内的固定方式如图 3-2 所示。汽轮发电机的定子端部绕组固定结构如图 3-3 所示，定子端部绕组槽口设分层垫块，渐开线采用 42 个支架与压板通过无磁钢螺杆把合在压圈上，鼻部之间周向设组合楔块和内外撑环用绝缘螺杆径向固定。定子绕组端部水电接头示意图如图 3-4 所示。

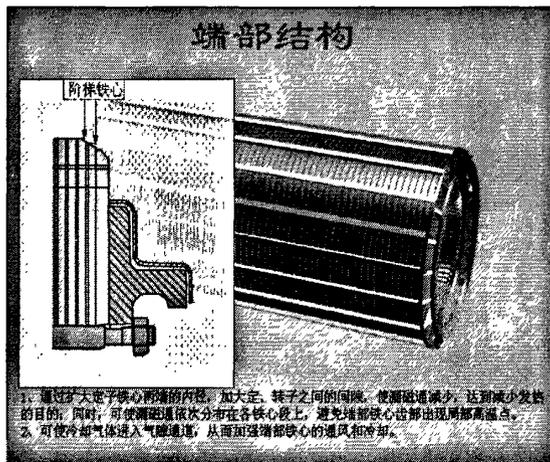


图 3-1 定子铁心端部结构

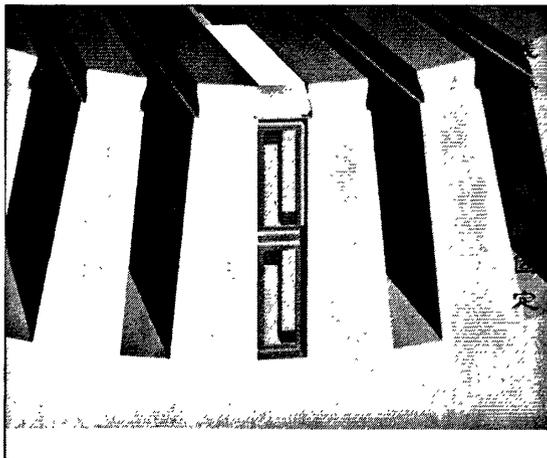


图 3-2 线棒在定子铁心槽内的固定模式

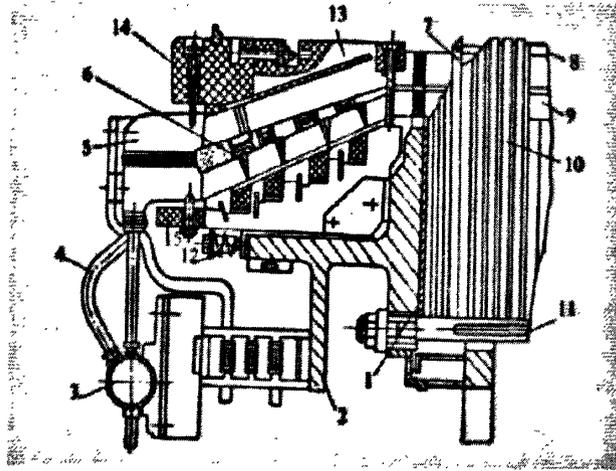


图 3-3 某汽轮发电机定子端部绕组固定结构

1—铜屏蔽；2—压圈；3—汇水环；4—绝缘引水管；5—绝缘盒；6—绑绳；7—压指；8—槽楔；9—线棒；10—定子铁心；11—弹性鸽尾筋；12—保证轴向移动的弹簧；13—压板；14—内撑环；15—外撑环

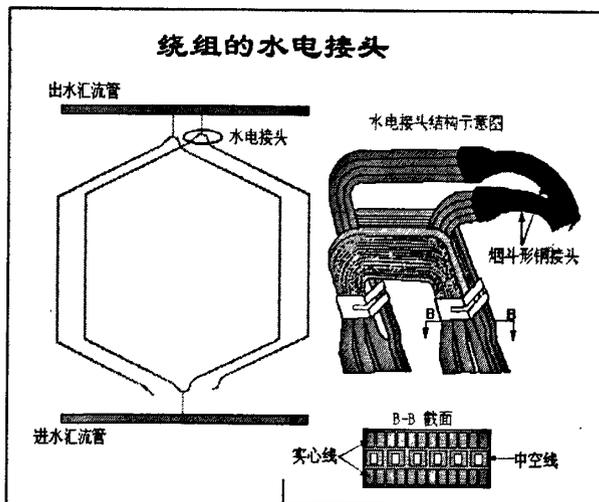
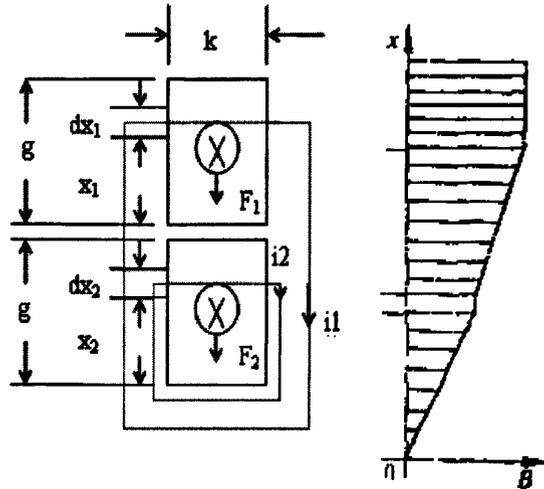


图 3-4 定子端部绕组的水电接头

3.1 定子槽内绕组电磁力分析

发电机在运行中，由于定子线棒的电流与槽内横向磁场的作用使槽部线棒产生性向电磁力。图 3-5 画出了线棒的电流和磁场示意图。为便于分析计算，认为定子电流均匀地沿线棒截面分布。首先，分析上下层线棒均为同槽同相的情况。



图中 k —— 线棒宽度, 厘米
 g —— 线棒高度, 厘米
 i_1 —— 上层线棒电流, 安培
 i_2 —— 下层线棒电流, 安培
 F_1 —— 上层线棒所受电磁力, 牛顿/厘米
 F_2 —— 下层线棒所受电磁力, 牛顿/厘米
 x_1 —— 距上层线棒底边的距离, 厘米
 x_2 —— 距下层线棒底边的距离, 厘米

图 3-5 定子槽部线棒的电流和横向磁场

3.1.1 同槽同相线棒电磁力的计算

1、上线棒所受电磁力

因距上层线棒底边距离为 x_1 的微小段 dx_1 的电流 i_{x1} 为

$$i_{x1} = \frac{i_1}{g} dx_1$$

故微小段 dx_1 的磁通密度为: $B_{x1} = \frac{\mu_0}{k} (i_2 + i_1 \frac{x_1}{g})$

式中 μ_0 为空气磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

dx_1 截面所产生的电磁力 dF_1 为:

$$dF_1 = B_{x1} \cdot i_{x1} = \frac{4\pi}{k} (i_2 + i_1 \frac{x_1}{g}) \times 10^{-7} \times \frac{i_1}{g} dx_1$$

故上层线棒所产生的电磁力 F_1 为:

$$F_1 = \int_0^g \frac{4\pi}{k} \left(i_1 i_2 \frac{1}{g} + i_1^2 \frac{x_1}{g^2} \right) \times 10^{-7} dx_1$$

因上层线棒与下层线棒的电流相同, 即 $i_1 = i_2 = i = I_m \sin(\omega t)$ 。

$$\text{故: } F_1 = \frac{3\pi}{k} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t) \times 10^{-7} \quad (3-1)$$

由此可见, 同槽同相上层线棒所受的力为一恒定分量与一交变分量的合力, 且线棒受力的交变频率为二倍的工频, 合力的方向指向径向。

2、下层线棒所受电磁力

用同样的方法可计算出下层线棒所受的电磁力 F_2 为

$$F_2 = \frac{\pi}{k} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t) \cdot 10^{-7} \quad (3-2)$$

由(3-1)式和(3-2)式相比可以看出, 下层线棒受力也是恒定分量与二倍工频交变分量的合力。 $F_1 = 3F_2$, 且这个力与上层线棒的力方向相同, 由于上下层线棒受力方向相同, 故下层线棒本身实际承受的电磁力为 $4F_2$ 。

3.1.2 同槽异相线棒电磁力的计算

由于异相线棒电流大小相同, 但相位相差 120° , 故当上层线棒电流 i_1 为: $i_1 = I_m \sin \omega t$ 时, 下层线棒的电流为: $i_2 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ 。

1、上层线棒受力

同样由前述可得上层线棒所产生的电磁力 $F_{1\text{异相}}$ 为

$$F_{1\text{异相}} = -\frac{\sqrt{3}\pi I_m^2}{k} \times \sin 2\omega t \times 10^{-7} \quad (3-3)$$

可见, 异相上层线棒所受的电磁力没有恒定分量, 只有二倍工频交变分量且方向与同槽同相线棒受力相反。

2、下层线棒受力

由(3-2)式可得下层线棒所受电磁力 $F_{2\text{异相}}$ 为

$$F_{2\text{异相}} = \frac{\pi I_m^2}{k} [1 - \cos(2\omega t - 240^\circ)] \times 10^{-7} \quad (3-4)$$

即异相槽内下层线棒所受的力是由恒定分量与二倍工频交变分量组成, 其合力总是指向槽底。由于(3-3)式与(3-4)式的交变分量的相位几乎相反, 所以下层线棒的电磁力受上层线棒的影响幅值无多少变化。比起同槽同相线棒, 同槽异相的电磁力要小一些。

通过以上分析, 我们看到, 发电机线棒在运行中总是受到一个交变力的作用,

这个交变力的变化频率是二倍工频，即 100Hz。

3.2 定子端部绕组电磁力分析

汽轮发电机组在正常运行状态下，定子端部绕组由于受到电磁力的作用，将产生频率为两倍工频的振动。一般来说，这种振动在正常运行允许范围内。但当发电机受到频繁的冲击负荷或者发生短路事故等情况时，这种振动可能引起端部绕组的机械损伤或造成绕组的机械疲劳，成为事故的诱因。单纯依靠加大发电机端部绕组支撑结构的强度和结构件的数量，固然可以解决端部绕组电磁力所引起的绕组机械损伤问题，提高发电机运行的可靠性，但同时也带来材料利用率低、电机造价偏高、制造难度增加等不利因素。准确计算汽轮发电机在不同运行工况下端部绕组所受电磁力以及由此产生的振动，对合理地选择端部材料、优化端部结构设计、降低发电机制造成本等具有重要意义。对已经投入运行的发电机组，端部绕组电磁力和振动分析也具有改进端部结构，估测端部绕组振动情况，避免事故发生等作用。

文献[23]中介绍到发电机定子绕组端部因其形状复杂，各金属构件对端部合成漏磁场的分布产生不同程度的影响，使得磁密 B 的大小和方向较难确定，因此要准确计算出电磁力的数值相当困难。为简化起见，定子线圈端部电磁力可按三部分进行分析：出槽口直线段、圆锥面渐开线段、线圈鼻端。然后建立力学模型对该三个方向的受力情况分别进行分析。文献[24]研究汽轮发电机运行时定子绕组端部承受的电磁力，根据电磁场的基本理论，推导了汽轮发电机定子端部区域电磁场以及绕组所受电磁力的计算公式，利用镜像法建立了定子绕组端部电磁场的数学模型。文献[25]提出了一种计算方案，计算出在电动力的作用下汽轮发电机定子绕组端部的振动，它在试验模态分析和计算相结合的基础上建立起定子绕组端部的有限元计算模型，通过实例计算出相应的电磁力。文献[26]对发电机定子绕组端部振动静态特性进行了试验研究，分析了发电机定子绕组鼻端头部静态特性，给出了间接判断发电机定子绕组鼻端头部静频率振幅大小的方法。文献[27]介绍了一种运用机械振动理论和材料力学叠加原理，解决发电机定子绕组端部振动所产生振动位移的方法。文献[28]通过与三维有限元电磁分析方法比较，提出了一种新的绕组端部电磁力分析和评价方法。此外，根据工厂试验数据推荐了端部绕组振动的估算方法。文献[29]深入的分析了引起汽轮发电机定子绕组端部振动的原因，并且对固有频率试验可信度和影响振幅大小的因素进行了分析。文献[30]对汽轮发电机定子绕组端部振动产生的原因进行了分析，指出了其危害，并提出了防护措施。文献[31]用离线分析，采用锤击法对某大型汽轮发电机定子端部绕组进行了模态研究。建立起端部绕组部件和整体结构模型，定量确定出影响汽轮发电机定子端部模态固有频率的关键因素。文献[32]对定子绕组端部的受力情况进行分析，指出振动故障的产生原因。文

献[33]用有限元的分析方法分析了定子绕组端部的电磁力情况。文献[34]对水轮发电机的定子绕组进行了有限元分析,得到了一些有用的结论。文献[35]分析了转子和定子绕组端部的漏磁通情况,分析该部分的电磁力。

1、电动力计算的基本公式^[36]

在对端部定子绕组的振动进行分析计算之前,必须准确求出端部绕组受到的电动力。由洛仑磁力公式,可以推导出

$$dF_l = Id_l B \quad (3-5)$$

所以,流过电流 I 的导线元 d_l 在电磁场中受到的力密度可以表示为:

$$f = IB \quad (3-6)$$

式中: f 代表导线元 d_l 受到的力密度; I 为导体中流过的电流,用导线元的方向作为 I 的方向; B 是导线元 d_l 处的磁通密度。

在圆柱坐标系中式 (3-6) 可以表示为:

$$\begin{cases} f_r = i_\theta B_z - i_z B_\theta \\ f_\theta = i_z B_r - i_r B_z \\ f_z = i_r B_\theta - i_\theta B_r \end{cases} \quad (3-7)$$

2、绕组电动力的计算

一般情况下,绕组由于受到电动力所产生的振动形变非常微小,可以忽略不计,所以计算端部绕组电动力时,不考虑绕组的变形,将端部绕组的渐开线部分近似简化成直线段。

当求出 t 时刻发电机端部子午面上的磁场分布以后,整个端部磁场的空间分布也随之确定。先将定子端部绕组分成若干直线段,求出每段绕组导体中点处的磁通密度,导体所在的相带决定了 t 时刻绕组中电流的大小,这样就利用式 (2) 求出端部绕组上的力密度分布,再应用数值积分的方法求出端部绕组在时刻受到的电动力大小

3、端部绕组渐开线部分的近似拟合

汽轮发电机端部定子绕组部分形状非常复杂,它的渐开线部分是圆锥面上的一条空间曲线。如果将圆锥面展开,则该曲线为一条渐开线。这种设计保证了端部定子绕组线圈相互之间始终保持一段距离,以及在 r 、 θ 、 z 这三个方向上的变化是均匀的。

由于一般无法知道发电机设计过程中定子端部绕组渐开线部分基圆如何选取,所以采用较为精确的渐开线解析表达式有一定的困难。根据端部绕组渐开线部分的

特点,可采用一种比较简单的用直线段近似拟合渐开线部分的方法。拟合的过程中忽略了端部绕组直线部分与渐开线部分的圆弧连接,省略了鼻端部分(将上下层绕组分开考虑)。

假设将下层绕组渐开线部分用平均划分的 n 段直线段来拟合,则这 n 段直线段端点的坐标为:

$$\begin{cases} r_i = r_1' + i \frac{r_2' - r_1'}{n} \\ \theta_i = -\frac{\beta\pi}{2} + i \frac{\beta\pi}{2n} \\ z_i = b_{s1} + i \frac{c_{s1}}{n} \end{cases} \quad (3-8)$$

同样,上层绕组的近似拟合直线端点坐标为:

$$\begin{cases} r_i = r_1'' + i \frac{r_2'' - r_1''}{n} \\ \theta_i = i \frac{\beta\pi}{2n} \\ z_i = b_{s2} + i \frac{c_{s2}}{n} \end{cases} \quad (3-9)$$

式中:取绕组的轴线为 $\theta = 0$ 处; $i = 1, 2, \dots, n$; b_{s1}, c_{s1} 分别为下层端部绕组直线部分以及渐开线部分在 z 轴上的投影长度; b_{s2}, c_{s2} 为上层绕组中的相应长度。

3.3 定子端部绕组监测系统设计

3.3.1 定子端部绕组监测系统现状

发电机定子绕组端部承受着正常运行时的交变电磁力作用和突然短路时的巨大电磁力冲击,是承受应力最高的部件之一,特别是发电机单机容量的增加,这一与电流的平方成正比的电磁力作用迅速增大,由此带来的绕组端部的振动磨损现象越来越突出,发电机定子绕组端部固定的稳定性已成为确保发电机安全运行的重要环节。对国产 200MW 及以上容量发电机绝缘故障统计分析表明,绕组端部是故障的多发部位。引进俄罗斯生产的 210MW 发电机共计 8 台,其中有 6 台不同程度的出现铁心松动和端部绕组磨损现象,某电厂引进的俄罗斯 300MW 发电机出现了多次断股故障。西屋公司产 350MW 及以上容量的发电机,出厂时都安装了在线振动检测装置。在沙角 C 电厂安装的振动在线检测设备已两次提前预警,避免了重大损失。文[37]报道了绥中发电有限公司的 2 台俄罗斯电力工厂制造的 TBB-800-2EY3 型汽轮发电

机运行约 19 000 h, 出现由于定子线棒振动引起的股线磨损断裂以及定子端部绕组连接母线振动导致疲劳断裂的故障。分析认为定子端部绕组支撑刚度严重不足、整体性差等设计结构上的弊病是造成该型发电机故障的根本原因。文[38]报道了四川省某发电有限责任公司#1 发电机的定子绕组 12 根引线有 8 根引线靠弓形部分第 1 至 3 绑扎位置出现黄粉现象, 其原因是由于定子端部绕组在电磁力的作用下松动引起磨损。文[39]以丹河发电有限公司 2 号发电机定子端部绝缘盒脱落事故为例阐述了发电机因检修工艺、端部固有频率振动、绝缘材料等原因, 造成定子端部绝缘脱盒脱落等缺陷, 使定子端部的绝缘受到严重威胁, 危及发电机的安全可靠运行, 因此, 要提高设备的检修工艺水平, 严格执行各项检修及运行规程和措施, 从而保证设备安全可靠运行。文[40]以淮北发电厂的 7 台发电机组为例, 本文从发电机端部线棒振动事故现象入手, 对其原因进行了分析, 并提出了解决方案。首先检查发现发电机定子端部线棒振动磨损, 分析原因认为可能是由于存在频率共振, 在运行中产生共振现象, 引起发电机定子线棒端部产生磨损。通过做发电机定子绕组端部振形模态试验, 制订出处理方案, 处理结果令人满意, 能够保障机组安全稳定地运行。

总结以往的经验, 人们逐渐认识到引起发电机定子绕组端部绝缘故障的原因很多且比较复杂, 有时甚至很难确定。由于定子绕组端部受电磁力、机械力等引起的振动使线圈绝缘磨损、股线疲劳损坏、鼻端空心导线焊口振裂渗漏水等导致绝缘性能下降, 是导致上述绕组端部绝缘故障的主要原因之一, 对发电机的安全可靠运行造成了极大的危害。《大型汽轮发电机定子端部绕组模态试验分析和固有频率测量方法及评定》机械行业标准和《大型汽轮发电机定子端部绕组动态特性的测量及评定》电力行业标准的实施, 使发电机定子绕组端部动态特性的测量成为发电机大修的必做项目, 试验中发现缺陷在现场制定可行的绕组端部检修方案, 指导大修。同时由于在线测量技术的发展, 在线测量线棒的振动, 实现状态检修, 成为迫切需要解决的问题。

近代设计先进、工艺可靠的发电机, 都采用了许多防止端部振动过大的措施, 发电机安装和检修工作也规定了相应的措施。运行实践和检修经验表明, 发电机定子绕组端部的振动状态不可能是一成不变的, 在交变电磁力和热应力的长期作用下, 可能因绝缘的微缩作用及磨损或紧固件的局部松动, 使模态参数发生变化, 投运时完全合格的发电机在经长期运行后, 其固有频率可能落入在两倍频电磁力谐振范围内, 造成振动状态逐步或突然恶化, 而一般的电气监测和外部部件振动监测反映不出这种危险的振动变化, 难以完全避免突然事故的发生。从保证长期安全运行的角度讲, 直接监测定子绕组端部的振动幅值是非常有必要的。

此外, 如果检修中通过模态试验发现某台发电机端部动态特性不合格, 存在有倍频附近的椭圆振型, 对这种发电机的处理就是一个很困难的问题。经验证明, 仅

靠端部结构的局部简单改动,很难改变端部整体的动态特性。重做定子绕组和端部紧固结构,不仅代价非常昂贵,以现有的技术还不能保证改造百分之百成功。而实际情况是这台发电机也可能已经运行了很长时间,并没有发生影响安全的严重问题,但显然并不能保证它今后不会出现振动恶化。对这种发电机最经济、最理想的处理方法,就是加装在线监测系统,监视运行中发电机定子绕组端部的实际振动状态,实现早期故障报警,进行状态检修,从而有效地防止突然事故的发生。

因此研究发电机定子绕组端部振动测量的手段和方法,测量绕组端部的振动状态,及时发现和处理发电机运行中定子绕组端部潜在的或发展中的故障,采取防止振动的有效措施,加强端部固定,对提高发电机运行的安全性和可靠性将具有重要意义。

总体来讲国内外对定子绕组端部振动情况的研究多数是在离线的状态下进行的,对定子绕组动特性、模态进行分析的,将端部结构分解成单个元件进行固有频率及模态试验,结合计算确定各种材料的性质,并通过反复的试验和计算来确定恰当的模型和合适的边界条件。最后将单个元件组合成整体进行分析计算,找到影响定子绕组端部绕组的固有频率的各种因素,最后提出大修方案。但是由于定子绕组端部在正常运行状态和离线状态下的环境是不一样的,在线状况是处在高电场、高磁场、高温的环境中的,其振动特性与离线分析得到的数据是有差别的,因此在线监测与离线分析有一定的区别,在线监测有一定的困难性,在阅看的文献资料中,发现现行在线监测系统的建立一般只是在传感器的选择上和功能上有细微的差别。现在针对自己的研究方向进行分析。

国内的大部分监测系统基本上应用国外现成的产品,这些产品中以下面两种应用较为广泛。文献[41]中给出了两款不同的国外监测系统。

(1) 美国 WH 公司的光学振动监测系统

在该系统中,传感器可直接安装到被测部位上,其内部结构为一个舌簧和光栅组。光栅位于舌簧运动最高点的端部,承受振动时可间断遮光生成光脉冲。传感器设计为给定时间段上脉冲数量与被测振幅成正比。光脉冲信号通过光缆送到机外的主机中,经过数据处理在主机的液晶显示屏上显示振动峰一峰值。系统的基本配置一般包括 12 个振动传感器和 2 根光缆束、两个光纤承压密封盒,以及一台多通道振动监视器。光纤传感器通常用于测量径向振动,当然轴向和周向的振动也一样可以测量,具体测量方向的选择取决于发电机的型号和历史上可能出现振动磨损的部位。对于没有振动数据作参考的发电机,可以通过锤击试验寻找安装传感器的最佳位置。传感器用浸环氧的玻璃编织带永久性紧固在线圈端部。为避免发电机抽插转子和做检查工作时受损,典型的安装位置在上下层线棒连接鼻端,或下层线棒的外

表面。光缆的典型安装走向是沿下层线圈支撑环的外表面布置，其目的也是为防止损坏。多通道振动监视系统的电子回路由两种基本单元组成：前置放大单元和主机单元，两部分组成的系统作为一个模块封装。前置放大模块是可以互换的。前置放大单元的作用是把来自绕组端部安装的传感器上采集到的光学编码振动信号进行处理，提取出振动和系统状态信息。振动信息被处理并经由电路传输到主机中用数字显示。前置放大部分包括 12 个单个的前置放大模块和对应的 12 个光学振动传感器（通常发电机汽侧和励侧各安装 6 个传感器）。前置放大部分可选择扩展到 16 个前置放大模块。测点数是可以根据用户需要改变的，单台发电机最多曾安装到 48 个测点。主机单元将来自前置放大器的交变频率编码信号转换为用于面板表计数字显示的直流电压电平，亦可用于计算机采集接收。这个单元也含有当传感器通道处于低光状态时触发继电指示的回路。为确保振动测量的准确度，主机单元自动校准在线测量的每个传感器，包括随着运行温度变化，或传感器老化等原因引起的传感器固有频率的漂移偏差。主机架可安装在控制室、继电器室等处。每个主机单元的一般配置是 12 个通道。

(2) 加拿大 VibroSystM 公司的光学振动监测系统

VibroSystM 公司生产的 FOA-100 型光纤加速度传感器，专门用于发电机定子绕组端部的振动监测。该光纤传感器设计原理与美国 WH 公司不同，测量方法靠的是探测单个光束入射角在一个弹性支架上的角度变化。其特点是利用光偏振原理，反射光束穿过一个双折射板到一个光极性分析器再返回以获得光干涉纹，振动峰—峰值之间的距离就与被测角度成正比函数关系。

传感器头位于三根单股多模式光缆的一端。一根承载照射用光，可通过调节电子装置对其控制。传感器头通过另两条光纤返回两个强弱可变的光信号。当光纤加速度计承受振动时，受力与引起一个弹性支架的角度偏转对应的加速度成正比。支架角度的变化使支架上的一面镜子角度随之变化。射入镜子的光束就随加速度幅值成比例改变角度。电子调节装置由光电探测器回路、放大器和滤波器组成，其输出是一个被校准的模拟加速度信号。一个带通滤波器用于衰减噪声和支架的谐振频率。

光传感器采集的信号通过光缆送到安装在机壳上的承压密封盒内的光电耦合器上，转变为电信号再送入 AGM-P21 信号处理模块和 PCU-100 型可编程信号处理器。PCU-100 既可以处理普通的压电式加速度传感器采集的电信号，也可以处理由 FOA-100 光纤传感器送出的光信号转换出来的电信号，是一种通用型数据信号处理器。

文献[42]中介绍了光纤传感器、压电式加速度传感器安装在发电机定子绕组端

部的振动幅值测量应用,指出了发电机定子绕组端部在线振动监测装置应用的现实意义。文献[43]介绍了广东省电力试验研究所开发研制的振动在线监测系统的硬件和软件结构与功能,以及现场测试的结果。该系统已研制成功并应用于两台 200MW 汽轮发电机上。文献[44]介绍了一种应用压电晶体加速度传感器在发电机充氢空载短路和短路工况下测量发电机定子绕组端部的 100Hz 振动位移峰峰值和频谱的方法。文献[45]介绍了一种测量方法数值稳定、价格低廉的压电加速度传感器测试汽轮发电机定子端部绕组振动的现场试验方法。文献[46]研发了一种新型的发电机定子线棒在线实时监测系统。通过新型的光纤加速度传感器检测发电机的汽端和励磁端的振动信号,进行了发电机定子线棒的振动特性的时域和频域分析;采用了虚拟仪器技术,实现了系统人机界面化,结合后台数据库,达到多功能、多状态的实时监测及报警、动态分析及历史查询、记录趋势并报表输出,达到诊断参数与数据共享,实现了远程监测与诊断技术。文献[47]中介绍了一种用于大型汽轮发电机定子绕组端部振动测量的光纤传感技术的目的、方法、原理和结果。文献[48]是通过在大型汽轮发电机定子绕组端部埋设测振传感器,将发电机定子端部振动信号引出发电机外,通过信号转换、放大、数据采集后由专门开发的软件进行计算机在线监测。在测振传感器安装位置的选择、安装时绝缘措施及抗电磁干扰措施等方面有严格要求采用 VB+SQLSever(数据库)软件开发技术在 Windows98 平台下开发出专用的在线振动监测软件,利用 Chart 控件对采集信号进行图形显示。数据采用 SQLSever 数据库技术进行管理并实现远程通讯。该系统最多可同时监测 32 通道的振动及电气参数。

3.3.2 总体方案设计

本系统有两部分组成,第一部分是由 FOA100 光纤加速度传感器和瑞博华 RBH8351 采集卡构成,传感器分布在发电机定子绕组汽端和励磁端,具有多通道的数据采集和缓冲功能;第二部分是应用 Labview 平台开发的定子端部绕组振动分析软件,具有强大的信号时域和频域分析能力。系统图如图 3-6 和图 3-7 所示。

传感器用玻璃丝带或玻璃绳将传感器帮扎于端部绕组上。FOA1660 光纤传感器本身带有 6 米固定长度的光缆,光缆沿机座内合适路径引至出口密封法兰位置,最终通过法兰引出至发电机外部,光缆用玻璃丝带固定于支撑部件上。法兰装配图如图 3-8 所示,零件图如图 3-9 所示,现场绑扎如图 3-10 所示。

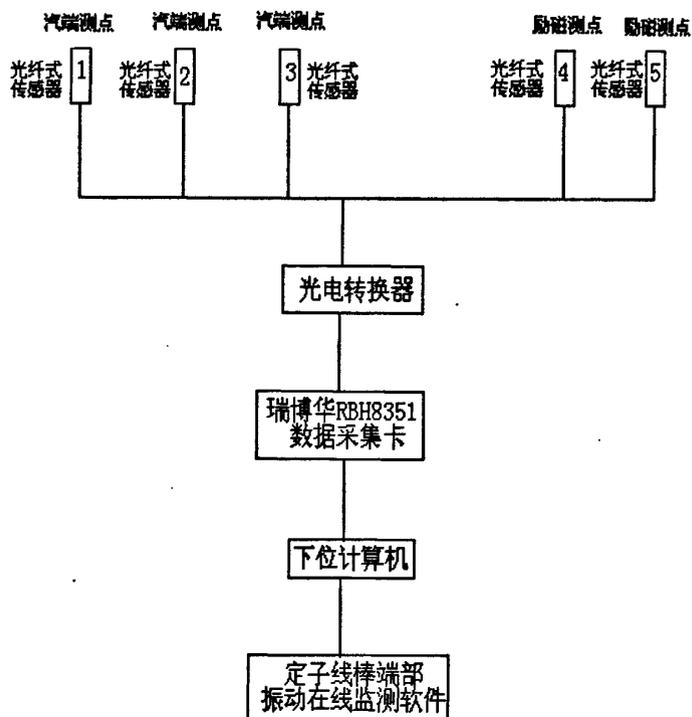


图 3-6 定子端部绕组监测系统总体方案

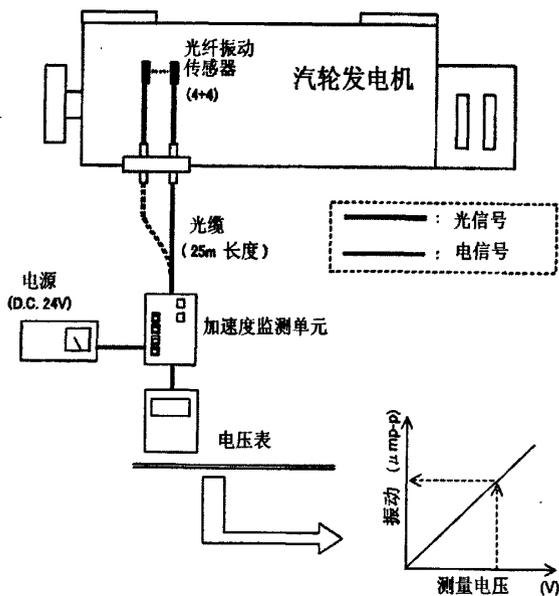


图 3-7 监测单元配置图

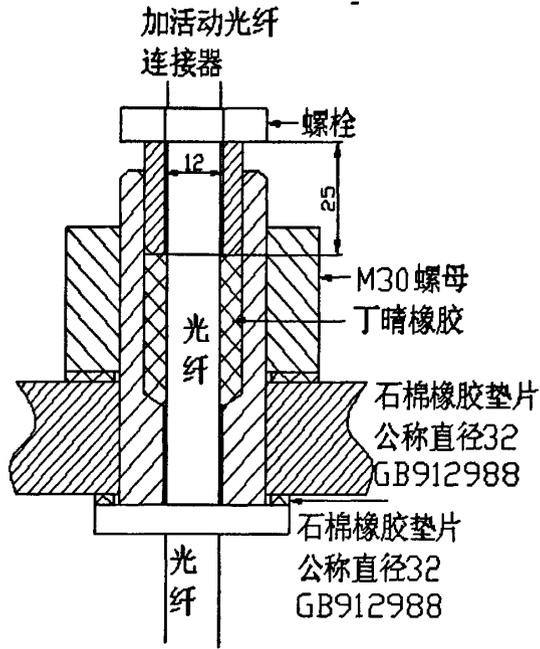


图 3-8 光纤传感器引线连接用法兰装配图

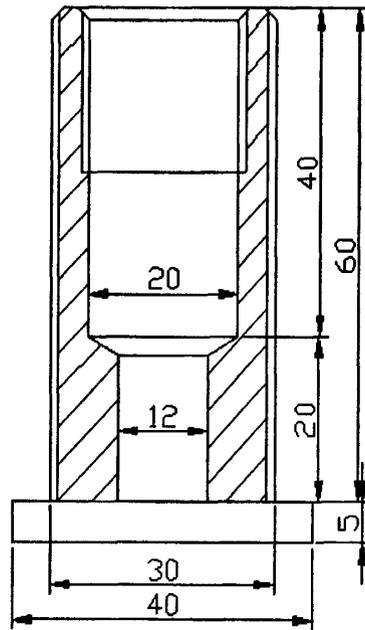


图 3-9 法兰零件图

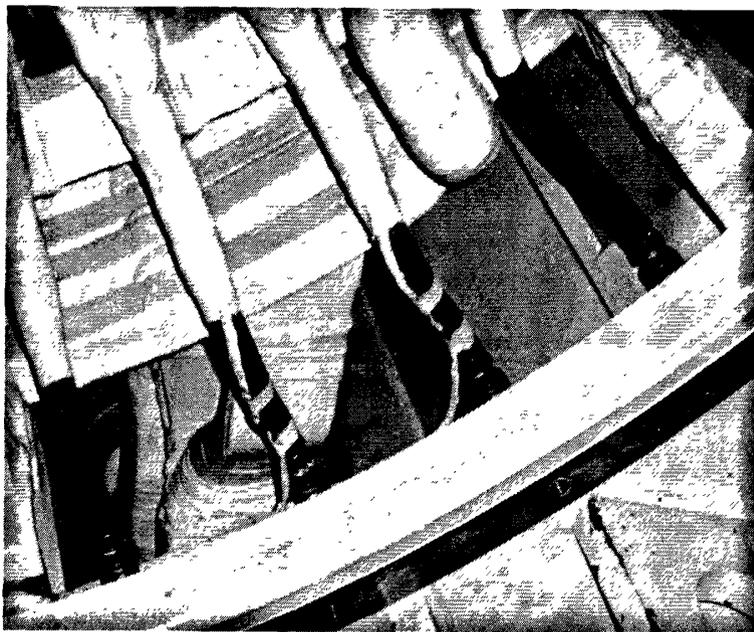


图 3-10 端部传感器绑扎结构

主要技术内容:

实时数据显示: 能够实时显示定子端部绕组径向和圆周方向振动时域波形, 并能够进行棒图显示: 棒图显示振动峰峰值, 和预先设定的报警值进行比较, 提供预警信号。

实时的频域显示: 实时进行 FFT 变换和功率谱分析, 对采集信号进行多角度分析。

建立数据保存系统: 将采集的信号按照一定时间进行保存, 利于历史数据的查看。

历史数据查看: 利用建立的数据库进行数据回调, 能快速查看不同历史段的振动值及振动变化及发展趋势折线图。

报警记录分析: 及时有效地记录故障数据, 具有实时性, 为快速分析故障特征提供依据, 同时也可以查看不同时间段的报警值。

3.3.3 光纤加速度计

随着全球对先进的传感器需求不断增长, 光纤加速度计其性能上与其它的电容、硅物质、热装置相比, 具有很多独特的优势。其优良的特性被广泛应用在无源、高灵敏度的环境中。尤其在特殊的、复杂的环境里, 例如强磁电、放射性的环境; 外界的强电磁和静电能够使许多感应器的功能失效甚至会毁坏它们, 而光纤传感器只含有玻璃和硅等, 不含有金属物质因此它对这些干扰不会有任意的反应。

光纤加速度计基于独特的光纤感应技术：一个光束通过光纤被传送到硅膜上。加速度或振动信号引起硅膜的位置改变或振动，从而反射光的强度发生改变，通过检测反射光强的变化，可以检测出外界的加速度或振动信号。最后这些信号被转换为电压信号输出。

光学加速度计主要的性能参数有：频率、灵敏度、分辨率、信噪比(SNR)、加速度范围、稳定性等。光纤加速度计的性能非常优越，可以提供动态地可调整的灵敏度。尤其是光纤加速度计具有优异的极低的频率响应和非常高的性噪比。主要特性如下：

- (1) 优异的低频特性，频响应范围 0.1Hz—500Hz
- (2) 极高灵敏度 1000mV/g
- (3) 极小的体积、极轻的重量，携带方便，操作简单
- (4) 优异的抗电磁干扰性能
- (5) 长寿命，高可靠性
- (7) 可以远距离传感、监控，可以组成传感器阵列来应用

主要应用领域有：大型结构件如飞船、火箭、飞机、舰船、潜艇等振动与模态测量、大型发电机组在线振动监测、适用于极其严酷的强电磁干扰环境的振动与加速度测量、地震、石油勘探等。

根据具体情况，定子端部绕组监测系统选用一维超宽温度范围光纤加速度传感器。型号：FOA1660，参数如表 3-1：

表 3-1 FOA1660 参数

参数	数值	单位	备注
反应频率	1—330	Hz	
加速度计响应范围	15	g	
灵敏度	100	mv/g	
工作温度	-20~+100/-4~+212	C/F	
重量	1.5	gram	
加速度计头材料	聚碳酸酯		
面积 D/H	20/16	mm	

3.3.4 采集卡

采集卡采用瑞博华 RBH8351 采集卡。

(1) 性能特点:

本板采用 USB2.0 总线接口的同步采集板。

本板通过采用高速高精度 AD 芯片、高精度的放大器、高密度 FPGA 逻辑芯片、精细地布线以及优良的制版工艺,实现了高速、高精度实时数据采集,具有以下性能特点:

- 32 通道模拟量与 16 路开关量硬件同步采集:同步误差小于 5 纳秒,32 通道的模拟量与 16 路开关量硬件同步采集,特别适合于电力系统、工程模态分析等应用。
- AD 幅值采集高精度:14 位采集精度,长时间采集误差时,误差跳码为 $\pm 1\text{LSB}$,相对精度优于 0.0061%,直流电压波动小于 0.6 毫伏。
- AD 高速度: 通道数在 5—21 通道数时,每通道的速度可以达到 100kpsps,当通道数在 25 至 33 通道时,每通道的速度可以达到 80kpsps 以上。采集方式为连续采集,采集的数据量仅仅决定于用户的硬盘。
- AD 采集定时高精度:本板直接在 CPLD 控制下工作,由硬件时钟直接控制采集与传输,采集精度与晶振精度相同,缺省定时精度误差小于 50PPM。对于有特殊要求的用户,可以通过更换晶振的方式,达到 0.1PPM 精度,甚至更高精度。
- 两种时钟源:可以采用内部时钟,也可以采用外部时钟,便于用户各种应用。
- 模拟量输入保护。32 通道模拟量采用独立抗过压、雷击、静电保护技术,确保产品可靠性。
- 软件校准:将校准信息存储在板卡上,用户不用打开仪器设备就可以进行校准,使用方便。
- 丰富的备用扩展资源:板上 CPLD 资源非常丰富,可以为用户的特殊需求进行定制,如旋转编码器接口、脉冲周期测量接口、PWM 输出接口、外同步接口、触发记录接口、开关量控制接口等。
- 提供外部时钟模式:在该模式下,外部时钟信号启动所有通道采集一次,从而实现多通道与外时钟同步采集模式。
- 提供外部触发启动模式:在该模式下,只有当外部给出上升延触发信号后才

开始采集,从而实现用户外触发采集模式的需要。用户首先软件启动,采集卡进入等待状态,当检测到有上升延触发信号加入到EX2 端子时,立即进入采集模式,并且不间断地连续采集,直到用户软件控制停止采集。

(2) 功能与指标

AD 的性能指标:

- AD 采样精度: 14 位
- AD 通道数: 单端方式32 通道,最小采集通道数为4,每次增加的通道数为4的倍数,可以设定的通道数为4、8、12、16、20、24、28 和32。
- AD 系统数据采集实际贯通率: 20 通道以下时为100Aksp/s/通道,24 通道以上时,采集速度为80ksp/s,采集速度的最低值为1Hz。
- AD 采集的综合跳码误差为 $\pm 1\text{LSB}$ 。
- 模拟采集的定时精度: 缺省情况下为50PPM,特殊要求可以定制
- AD 输入电压范围: -5V 到+5V
- AD 输入阻抗: 100 千欧
- 模拟输入安全电压: ± 15 伏。当超过AD 输入量程 ± 5 伏时,只要不超过安全电压就不会损坏硬件,当超过+5 伏时,AD 结果输出最大值,当低于-5 伏时,AD 结果输出0,当模拟量恢复到正常量程后,AD 结果立即恢复正常。建议用户尽可能使输入信号在量程范围内。
- 抗静电电压: 2000 伏
- 模拟输入有抗雷击功能。适合于野外操作,如油田勘探等。
- 采集方式: 连续采集

接口:

- 总线方式: USB2.0 总线

开关量指标:

- 16 路数字量输入, TTL 电平方式,高电平输入为高于2.4V,低电平低于0.8V
- 开关量采集与模拟量采集同步进行,16 路开关量输入合成一个16 位的字,与模拟量采集一起送到PC 机,并且占用第一个通道的位置。进行通道设置时,本通道与模拟量通道一起设置。
- 开关量输入的电流,小于1 μA

- 16 路数字量输出, 上电复位清零功能, 高电平输出大于2.4V, 低电平输出低于0.8V
- 开关量输出的电流大于5mA, 小于10mA。

电源:

- 本板仅仅需要+5 伏电源, 不需要其它电源
- 电源供电有两种方式, 一种时计算机USB 供电, 另一种是通过板上接头输入。一般情况下, 直接采用USB 供电即可。当采用外部供电时, 外部供电电压+5V±5%, 电流1A。

工作环境

- 工作温度: 0-70℃
- 环境湿度: 95%以内

3.3.5 定子端部绕组在线监测软件

1. 软件总体功能分析

本系统主要实现实时在线检测功能。以定子线棒振动为研究对象进行分析, 实现实时在线检测: 完成信号采集, 信号的存储, 时域和频域分析。系统有两部分组成: 一是有传感器、放大器和滤波器组成的信号采集预处理系统; 二是建立以 Labview 为平台的实时信号分析系统, 该系统能够实现采集振动信号存储, 与先进的数据库联系, 完成数据保存; 数据的实时时域、频域分析, 从不同角度完成数据分析; 历史数据的查看, 能提供及时有效的反馈信息; 完善的报警提示, 实现及时的报警功能等功能。总体设计框图如 3-11 所示:

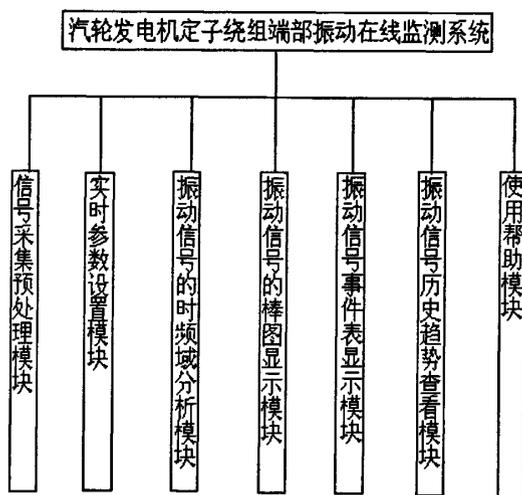


图 3-11 总体设计框图

2. 实时参数设置模块

根据传感器的安装位置和测点危险值、报警值的要求，对上述要求的参数进行一一的设定，并保存。图 3-12 为实时参数的设定图。

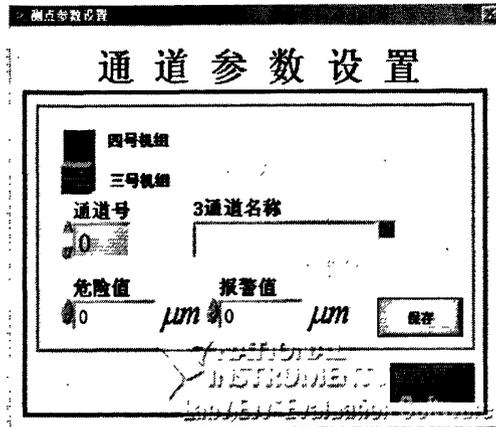


图 3-12 通道参数设置

3. 振动信号时频域分析模块

如图 3-13 所示，在该模块中实现实时信号的显示和频域信号分析功能。它有两个波形显示窗口和功能选择窗口组成。上面的窗口为时域信号显示，我们可以根据“机组选择”和“通道号选择”完成对信号的实时采集输入设置，同时可以选择“频域分析”。对实时显示的时域信号进行频域分析，例如：FFT，功率谱分析等。当时域信号的幅值超过了我们设定的预定值时，“报警显示”的颜色有绿色变成红色报警。

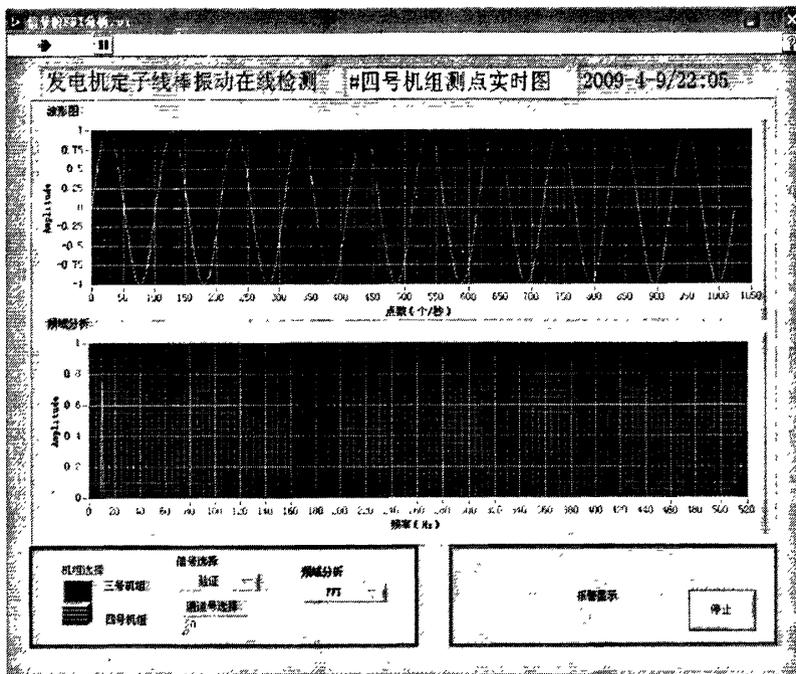


图 3-13 振动信号的时频域分析

4. 信号棒图显示模块

棒图就是信号的峰峰值，我们将采集的加速度值进行变换，得到信号的峰峰值，将此值和我们的设定的报警值进行分析比较，如果超出了我们设定的报警界限，那么就要出现报警，根据界面的显示可以进行相关的参数设定。同时还有两个消息显示窗口和记录窗口，让我们实时能够得到是哪个测点出现警告。棒图如图 3-14 所示。

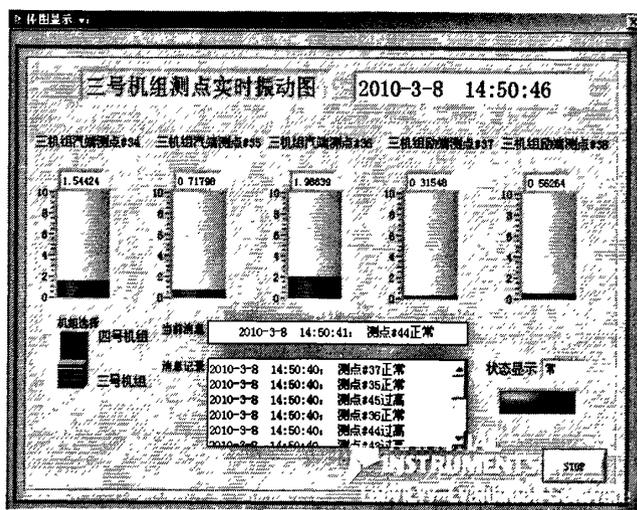


图 3-14 棒图显示

5. 振动信号历史趋势查看模块

在历史趋势查看图中，我们可以按照功能选择窗口的提示，完成对历史数据的提取同时能够对我们所提取的数据的振动频率的估计，得到该信号的振动情况和频率估计。历史趋势图如图 3-15 所示。

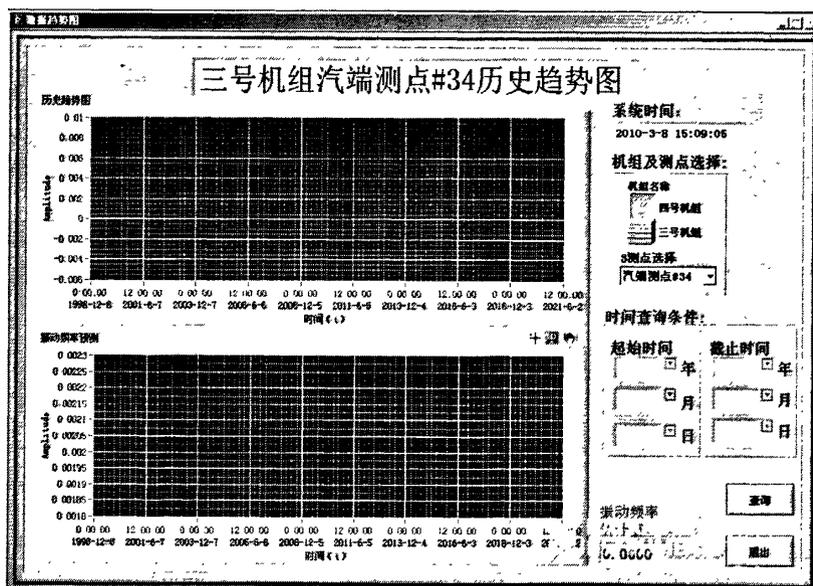


图 3-15 数据历史趋势查看图

6. 振动信号事件表查询模块

在该模块中，可以根据机组选择，测点的选择，按照时间检索顺序完成对保存数据的提取和显示工作，点击“检索”后，我们能够得到相应的事件结果，在左侧的数据表格中会有所显示，当点击“打印”按钮的时候，我们能够将在数据表格中的数据保存下来并能够连接到打印机上进行打印功能。实现数据的永久性显示，有助于对数据进行分析 and 评价。“事件”处显示当时数据是否为“正常”或者“报警”。事件显示表如图 3-16 所示。



图 3-16 事件表图

7. 使用帮助图

本系统帮助文件采用目前流行的电子书 CHM 格式。CHM 是英语“Compiled Help Manual”的简写，即“已编译的帮助文件”。CHM 是微软新一代的帮助文件格式，利用 HTML 作原文，把帮助内容以类似数据库的形式编译储存。

本帮助软件来指引用户使用轴承故障分析软件，使用户更方便、快捷的对信号进行分析，完成对定子端部振动情况的诊断。用户如对软件的某个分析界面有疑惑就可以点击该界面的链接进入该界面。里面对软件的操作过程进行了详细的介绍。

3.4 本章小结

本章首先分析了汽轮发电机定子槽内绕组的电磁力，包括同槽同相线棒、同槽异相线棒，然后分析了定子端部绕组的电磁力，最后在阐述定子端部绕组振动在线监测必要性的基础上，介绍了一套采用 FOA1660 光纤加速度传感器和瑞博华 RBH8351 采集卡的定子端部绕组在线监测系统。

第四章 结论

(1) 在阐述汽轮发电机电磁振动基本理论的基础上, 简要介绍了发电机定子铁芯、机座、定子槽内绕组、定子端部绕组、转子系统等零部件所受电磁力特征及其电磁振动的特点。

(2) 分析得到了汽轮发电机正常运行和转子励磁绕组匝间短路故障时, 转子电磁力的计算方法。并以某发电厂转子励磁绕组匝间短路故障为工程背景, 分析得到了此故障引起的发电机定转子振动特性, 并提出了基于振动特性分析转子励磁绕组匝间短路故障的方法。

(3) 通过分析汽轮发电机定子槽内绕组和端部绕组的电磁力计算方法, 得到了同槽同相绕组、同槽异相绕组等定子槽内绕组电磁振动特点和定子端部绕组电磁振动的特点, 并进一步提出了开发定子端部绕组监测系统必要性。

(4) 采用 FOA1660 光纤加速度传感器和瑞博华 RBH8351 采集卡, 基于 LabVIEW8.0 开发定子端部绕组监测系统, 包括信号采集预处理、实时参数设置、振动信号时频域分析、振动信号趋势分析、帮助等功能模块。

参考文献

- [1]. 汪耕, 王作民. 汽轮发电机的振动问题(上). 振动与冲击, 1999, 18(4): 1-5
- [2]. 单继聪. 大型汽轮发电机定子端部绕组电磁力的解析计算:[硕士学位论文], 杭州: 浙江大学, 2008
- [3]. 汪耕, 王作民. 汽轮发电机的振动问题(下). 振动与冲击, 2000, 19(1): 15-18
- [4]. Dorrell, D.G., Smith, A.C.. Calculation of UMP in Induction Motors with Series or Parallel Winding Connections. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994, 9(2):304-310.
- [5]. Dorrell, D.G. Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Small Cage Induction Motors with Skewed Rotors and Dynamic Rotor Eccentricity. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 1(3): 483-488.
- [6]. Dorrell, D.G. Experimental behaviour of unbalanced magnetic pull in 3-phase induction motors with eccentric rotors and the relationship with tooth saturation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 304-309.
- [7]. Frauman, P., Burakov, A., Arkkio, A.. Effects of the Slot Harmonics on the Unbalanced Magnetic Pull in an Induction Motor with an Eccentric Rotor. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(8): 3441-3444.
- [8]. Pennacchi, P., and Frosini, L.. Dynamical behaviour of a three-phase generator due to unbalanced magnetic pull. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 2005, 152(6): 1389-1400.
- [9]. 熊小刚, 贾碧容. 汽轮发电机组振动诊断及处理. 攀钢技术, 1999, 22(3): 52-56.
- [10]. L. T. Rosenberg. Eccentricity, Vibration, and Shaft Currents in Turbine Generators. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1955, 74: 38-41.
- [11]. Hamid A. Toliyat, Nabil A. Al-Nuaim. Simulation and Detection of Dynamic Air gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(1): 86-93.
- [12]. Iman Tabatabaei, Jawad Faiz, H. Lesani, M.T. Nabavi-Razavi. Modeling and Simulation of a Salient-Pole Synchronous Generator with Dynamic Eccentricity Using Modified Winding Function Theory. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3): 1550-1555.
- [13]. H. Ohishi, S. Sakabe, K. Tsuniagari, K. Yamashita. Radial Magnetic Pull in Salient

- Pole Machines with Eccentric Rotors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, EC-2(3): 439-443.
- [14]. Lin Wang, Richard W. Cheung, Zhiyun Ma, Jiangjun Ruan, Ying Peng. Finite-Element Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in a Large Hydro-Generator under Practical Operations. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1558-1561.
- [15]. Richard Perers, Urban Lundin, Mats Leijon. Saturation Effects on Unbalanced Magnetic Pull in a Hydroelectric Generator with an Eccentric Rotor. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(10): 3884-3890.
- [16]. S. Keller, M.Tu Xuan, J.-J. Simond, A. Schwery. Large Low-Speed Hydro-Generators- Unbalanced Magnetic Pulls and Additional Damper Losses in Eccentricity Conditions. IET Electric Power Applications, 2007, 1(5): 657-664.
- [17]. Burakov, A., Arkkio, A.. Comparison of the Unbalanced Magnetic Pull Mitigation by the Parallel Paths in the Stator and Rotor Windings. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(12): 4083-4088.
- [18]. De Canha, D., Cronje, W.A., Meyer, A.S., Hoffe, S.J.. Methods for Diagnosing Static Eccentricity in A Synchronous 2 Pole Generator. Power Tech conference proceedings, 2007 IEEE Lausanne, Jul.1-5, 2007: 2162-2167.
- [19]. 邱家俊. 机电分析动力学. 北京: 科学出版社, 1992:405-513
- [20]. 渡边孝(Watanabe, Takashi). 汽轮发电机转轴的热振动平衡法(热振动的解析方法). 国外大电机, 1997, (6):14-21
- [21]. 彭震中, 江文强, 安利强. 基于传递矩阵法的多支撑转子负荷灵敏度计算. 华北电力大学学报, 2005, 32 (6): 97-100
- [22]. 杨建刚, 谢东建, 李五四, 申小虎. 霍州发电厂4号机振动故障诊断与治理. 汽轮机技术, 2001, 43 (3): 161-165
- [23]. 刘进强, 韩东, 王瑞发. 大型汽轮发电机定子绕组端部振动测量研究. 大电机技术, 2000, No. 4: 11-15.
- [24]. 单继聪, 梁旭彪, 杨仕友等. 大型汽轮发电机定子绕组端部电磁力解析计算. 机电工程. 2008, 25(10):98-100
- [25]. 姚大坤, 曲大庄. 汽轮发电机定子端部绕组振动现场在线测试. 东北电力技术, 2002, (1):15-17
- [26]. 嵇安森. 发电机定子绕组端部振动静态特性试验研究. 电力设备. 2005(9):38-39
- [27]. 李大为, 张健, 王跃辉. 发电机定子绕组端部振动的分析. 佳木斯大学学报, 2003 21(1):85-87, 98

- [28]. 长野进. 大容量隐极同步电机定子绕组端部振动的研究. 2007 International Conference on Clean Electrical Power. 36-42, 48
- [29]. 刘得, 杨向宇, 陈权涛. 汽轮发电机定子端部绕组振动问题的研究. 防爆电机, 2007. 6(42): 38-40
- [30]. 张新斌. 大型发电机定子绕组端部振动分析. 东北电力技术, 2000(11): 37-40
- [31]. 姚大坤, 曲大庄, 李虹, 李志和. 大型汽轮发电机定子端部绕组动态特性研究. 大电机技术, 2002, (2): 1-4
- [32]. James J. Campbell, Paul E. Clark, Ian E. Mcshane, And Keith Wakeley. Strains on Motor Endwindings. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. Ia-20, No. 1, January/February 1984
- [33]. Clyde V. Maughan, P.E. Emeritus. Vibration Detection Instrumentation For Turbine-Generator Stator Endwindings. 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada, 31 May-3 June 2009.
- [34]. E.M. Pvan, A.J. Hoffman. Detecting Long-Term Trends In Turbo-Generator Stator End-Winding Vibrations Through Neural Network Modelling. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(3), 529-544.
- [35]. J.A. Tegopoulos. End Component of Armature Leakage Reactance of Turbine Generators. IEEE Tegopoulos, vol. 81, June, 1964
- [36]. 刘明丹, 刘念. 发电机端部绕组电动力计算及振动分析. 电力系统自动化, 2005, 15(29): 40-44
- [37]. 王绍禹, 孙术文, 韩长利. TBB- 8 0 0 - 2EY3 型汽轮发电机定子端部绕组故障与结构弊病分析. 中国电力, 2009, 42(5): 35-40
- [38]. 江建明, 濮峻嵩, 马辉. 150MW 空冷汽轮发电机定子绕组端部磨损动态特性试验分析. 大电机技术, 2009, 2: 6-10
- [39]. 李新峡, 贺胜利. 丹河发电有限公司 2 号发电机定子端部绝缘盒脱落原因分析及处理. 河南电力, 2006, 1: 49-50
- [40]. 尹峰. 发电机端部线棒振动原因分析及处理. 安徽电气工程职业技术学院学报. 2004, 9(1): 49-51
- [41]. 白亚民, 孙树敏, 畅雅平, 郑宝珍. 光学振动监测系统在发电机在线监测方面的应用与实践. 电力设备. 2003, 4(6): 9-13.
- [42]. 单继聪, 梁旭彪, 杨仕友. 大型汽轮发电机定子绕组端部电磁力解析计算. 机电工程. 2008, 25(10): 98-100
- [43]. 杨楚明, 周尚礼, 张启文. 汽轮发电机定子绕组端部振动在线监测系统的研制与应用. 大电机技术. 2005, (2): 23-26
- [44]. 曹剑绵, 陈小沁, 张建. 汽轮发电机定子绕组端部振动测试分析. 东方电

机, 30(4):356-359

- [45]. 畅雅平, 郑宝珍, 白亚民, 沈梁伟. 国产 200MW 汽轮发电机定子绕组端部在线振动监测的试验研究. 大电机技术, 2002, No. 6: 17-19
- [46]. 陈学军, 陶红艳, 高云, 余成波. 发电机定子线棒在线监测系统的研制. 压电与声光, 2007, 29(6):749-751, 754
- [47]. 赵秀坤, 曹美全, 毕萍菁, 潘岳民. 用光纤传感器技术测量大型汽轮发电机定子绕组端部振动. 大电机技术, 1993, (6):12-13, 24.
- [48]. 中国电力信息网. 大型汽轮发电机定子绕组端部振动在线监测系统的研制. 2005, 1

致 谢

本论文是在导师李永刚教授、王春生高级工程师的精心指导下完成的。在论文选题、工作和撰写过程中，导师渊博的知识、丰富的社会经验和对本学科发展存在问题的深邃见解，不但拓宽了我的思路，还是我的论文顺利开展和完成的保证。导师严谨求实的学术作风、无私忘我奉献的崇高精神让学生永生难忘，是学生未来生活和工作的楷模。学生的点滴进步都凝聚着恩师的心血，在论文完成之际，谨向导师致以诚挚的敬意和深深的感谢。

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

1. 李永刚, 张文战, 高永锋, 李和明. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障在线诊断研究. 发电厂电机技术交流研讨会, 2010.4 三亚

