

发电机转子绕组匝间短路 故障特性分析与识别

李永刚 李和明 万书亭 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

发电机转子绕组匝间短路 故障特性分析与识别

李永刚 李和明 万书亭 著
傅自清 张建忠 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书分析了大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的原因和形式,指出传统的匝间短路探测方法的不足之处,在此基础上重点研究了匝间短路故障机理、电磁及机械特性,提出了故障诊断新方法,并利用神经网络和小波变换等对试验数据进行了分析、验证。

全书共分为6章,主要内容包括汽轮发电机转子基本结构和绕组短路故障的成因、基于新判据和神经网络的匝间短路故障诊断、转子绕组匝间短路故障时定子环流分析、基于气隙动测法的发电机转子绕组匝间短路故障诊断、基于重复脉冲法和神经网络的转子绕组匝间短路故障诊断、转子绕组匝间短路故障时振动特性分析。

本书可作为电力系统科学研究人员和工程技术人员的参考书,也可作为电气工程及其自动化专业的研究生及教师用书。

图书在版编目(CIP)数据

发电机转子绕组匝间短路故障特性分析与识别/李永刚, 李和明, 万书亭著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-6852-8

I. 发… II. ①李…②李…③万… III. ①发电机-转子绕组-短路事故-分析②发电机-转子绕组-短路事故-识别
IV. TM310.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第016752号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年3月第一版 2009年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 7.75印张 162千字

印数0001—3000册 定价19.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言 PREFACE

随着国民经济的迅速增长,电力系统正朝着超高压大容量多机互联系统的方向发展。作为电力系统的核心——发电机,随着单机容量的不断增大,运行可靠性显得尤为重要和突出,一旦这样的机组发生故障,特别是恶性故障,就会给电力系统和国民经济带来巨大的经济损失。因此研制发电机在线监测与诊断系统显得十分必要。

发电机在正常负载运行状态下,能否对转子绕组匝间短路进行监测、怎样实现早期报警,是实现转子绕组匝间短路在线监测应首先解决的课题。传统的检测方法都已经在线应用中应用了多年,并且积累了很多经验。但是大部分都不是在线检测或者受到其他因素的干扰比较大,所以实际测试中得到的结果并不十分理想,而且检测的灵敏度也不高,即使检测出故障后,也无法一次性实现对故障槽的准确定位。因此,就目前研究现状来看,急需找到一种有效监测转子绕组匝间短路的方法。

本书分析了大型汽轮发电机转子匝间短路故障的原因和形式,指出传统的转子匝间短路探测方法的不足之处,在此基础上,重点研究了发电机转子绕组匝间短路故障机理、电磁及机械特性,提出了故障诊断新方法并对传统诊断方法进行了改进,并利用神经网络和小波变换等,对试验数据进行了分析,并用试验验证。

本书第1、2、3、4、5章由华北电力大学李永刚教授著,第6章由华北电力大学万书亭副教授著,华北电力大学李和明教授参与了第1、2章的写作工作并承担了全书的统稿工作。东方电机厂傅自清教授级高工、河北省电力研究院张建忠高工担任主审,在审阅过程中提出很多有价值的意见和建议,对两位高工的不吝赐教深表感谢。华北电力大学研究生于娜、徐剑、刘盟伟、张志猛等在实验、排版等方面做了大量工作一并表示感谢,同时感谢华北电力大学电机教研室全体老师的支持。

由于编者水平和经验,书中难免有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2008.11

目 录 CONTENTS

前言

绪论	1
0.1 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障概述	1
0.2 国内外研究现状	1
0.3 转子绕组匝间短路故障诊断需要解决的问题	3
第1章 汽轮发电机转子基本结构和绕组短路故障的成因	5
1.1 转子的基本结构	5
1.2 转子绕组的结构	5
1.3 绕组匝间短路故障的常见形式和原因	8
1.4 检测方法	8
第2章 基于新判据和神经网络的转子绕组匝间短路故障诊断	11
2.1 发电机转子绕组匝间短路故障电磁特性分析	11
2.2 转子绕组匝间短路故障诊断数学模型	12
2.3 实验	15
2.4 基于BP神经网络的转子绕组匝间短路故障诊断	20
第3章 转子绕组匝间短路故障时定子环流分析	24
3.1 环流特性分析	24
3.2 基于小波变换的发电机转子绕组匝间短路环流分析	37
第4章 基于气隙动测法的发电机转子绕组匝间短路故障诊断	54
4.1 大型汽轮发电机转子绕组动态匝间短路故障机理分析	54
4.2 转子气隙动测信号分析与处理算法的研究	60
4.3 动态识别系统硬件设计	73
4.4 动态识别系统软件设计、仿真及其实验步骤、分析	78
第5章 基于重复脉冲法和神经网络的转子绕组匝间短路故障诊断	87
5.1 RSO试验原理	87
5.2 试验设备简介	88
5.3 RSO离线试验及分析	89
5.4 人工神经网络识别	93
第6章 转子绕组匝间短路故障时振动分析	97
6.1 发电机电磁振动分析方法	97
6.2 转子绕组匝间短路时气隙磁动势分析	99

6.3 转子绕组匝间短路时振动特性	100
6.4 实验分析	105
附录 I 故障模拟实验机组简介.....	109
附录 II 神经网络构建、训练、仿真的 Matlab 源程序	112
参考文献.....	116

绪 论

0.1 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障概述

随着国民经济的迅速增长,电力系统正朝着超高压大容量多机互联系统的方向发展,200、300MW 及以上容量的大型发电机已成为我国电网的主力机组。截止到 2007 年底,我国总装机容量为 71 329 万 kW。其中,火电机组 55 442 万 kW,占总容量的 77.73%;水电机组 14 526 万 kW,占总容量的 11.49%。作为电力系统的核心——发电机,随着单机容量的不断增大,运行可靠性显得尤为重要和突出,一旦这样的机组发生故障特别是恶性故障,就会给电力系统和国民经济带来巨大的经济损失^[1,2]。因此研制发电机在线监测与诊断系统显得十分必要:一是可检测出发电机在初始阶段出现的缺陷,以便有计划安排检修,减少强迫停机次数,避免发生事故;二是可延长发电机平均无故障时间及缩短平均修理时间,从而降低发电机的维护费用和提高发电机的可用性^[1,2,3]。

在大型汽轮发电机组的各个组成部分中,转子处于高速旋转状态,承受着巨大的机械应力和热负荷,所以对转子部分的故障检测就显得尤为重要。转子绕组匝间短路故障是发电机运行中比较常见的故障,也是影响安全运行的主要原因之一。参考文献 [1]、[2] 表明:在已运行的大型汽轮发电机组中,发生转子绕组匝间短路故障占故障总数的比重较大,危害程度为“严重”,故障发生频率为 11.46%。大型发电厂中的大多数汽轮发电机都发生过或者存在着转子绕组匝间短路故障。山东省自 1993 年 1 月~1998 年 6 月发生了 6 起转子绕组匝间短路故障,轻微的绕组匝间短路对发电机运行的不良影响较小,常常会导致发电机的励磁电流升高、无功功率相对下降、轴承不平衡振动增加。一旦转子绕组匝间短路的严重程度增加,将会导致转子一点甚至两点接地故障的发生,使得转子大轴磁化,严重者还将烧伤轴颈和轴瓦,对机组本身的安全稳定运行构成巨大威胁。某电厂 3 号发电机(国产 QFSN-600-2 型 600MW 发电机),1998 年并网运行 168h 后的一次大修中就检测出残留在 1 极面、第 8 套线圈、第 5~6 匝之间的,由金属屑形成的匝间短路。

0.2 国内外研究现状

美、英、俄、德、加等国家对发电机转子绕组匝间短路故障都在进行广泛而深入的研究,我国如清华大学、华中科技大学及东南大学等高校在这方面也做了大量的研究工

作,提出了一些分析方法,取得了一些具有一定理论意义和实用价值的研究成果。目前,常见的检测转子绕组匝间短路的方法有以下几个。

1. 微分线圈动测法

这种方法最早是由美国人 Albright 在 1971 年提出来的。它是将探测线圈装在定子铁芯的空气隙表面,这样既可以测量磁通的径向分量,也可以测量磁通的切向分量。其基本原理是把发电机气隙中的旋转磁场进行微分,然后将此微分信号引入示波器进行分析。由于不同的信号微分后的波形不一样,特别是正常和故障情况有很大的差别,所以对微分波形进行分析即可诊断出转子绕组是否存在绕组匝间短路故障,并准确显示出故障槽的位置。微分线圈动测法不受外部条件及匝间短路故障点在槽中位置的影响,可信度较高。然而气隙线圈探测法只能在发电机空载和三相短路的情况下进行。在发电机带负载条件下,由于电枢反应,探测效果并不明显,且检测准确度较差。这种方法要求转子处于旋转状态下测量,所以在转子安装前和半成品时不能采用,而且从已调研的资料发现,国内绝大多数电厂现有及新设计的电机中,极少装有这种测量线圈,并且安装这种线圈需要的停机时间也很长。

2. 电压降法

在转子绕组中通入交流电,测量转子两极电压。两极电压相等时说明不存在绕组匝间短路,不相等时说明存在绕组匝间短路,然后依次测量各个线圈的电压降。在存在短路线匝的线圈上测量的电压降将显著减小,实质上等于分别测量各个线圈的交流阻抗。

通常采用直流电压降法较多。在转子绕组中通入直流电,利用接有毫伏表的探针,依次测量短路线圈中各个线匝间的电压降,在短路线匝上所测得的电压将显著减小,且靠近短路点处的电压最低。对于绕线式和具有辐向通风孔的转子,可以很方便的利用此方法进行测量,而对于其他形式发电机转子,只有在拆下套箍时才能应用此方法。

3. 开口变压器法

单开口变压器法的测试原理是将转子置于定子膛外,由滑环通入交流电到绕组中,在转子槽齿上便产生交变磁通。当绕组中存在或不存在匝间短路两种情况下,在开口变压器绕组上所感应的电动势的大小和电源电压之间的夹角是不同的。双开口变压器法是利用电磁感应原理,将两个开口变压器置于转子本体同一绕组的对应槽齿上。故障时,由短路匝产生的磁通对测量变压器起助磁作用,因此测量变压器的感应电动势比槽内无匝间短路时成倍增长。单开口变压器法和双开口变压器法的缺点是均不能应用于转动状态下检测,需要在停机抽出转子后才可以进行。

4. 交流阻抗和功率损耗法

正常情况下,当转子旋转时,槽内线匝在离心力的作用下压向槽楔,既减少了线匝在槽内的有效高度,又使槽楔与转子槽齿接触紧密,增强了阻尼效应,使得阻抗值随转速升高而有规律下降。发生匝间短路故障时,对同一台机组相同状态下的阻抗值会发生突变,而功率损耗则相对升高。对于现场广泛采用的交流阻抗法,虽然具有简便、实用和较为灵敏的优点,也可以在静态和动态下测量,但是交流阻抗法的测试结果受外部条

件影响因素较多,检测方法有很大的局限性。除了受到转子槽楔的材料及槽楔与槽壁接触的紧密程度的影响之外,还受到转动状态下的定子附加损耗、转子本体剩磁、试验时施加电压的高低、试验电源频率、波形的谐波分量等多种因素的影响,对判定较轻微的匝间短路故障有时不能获得较准确结论,故不能作为判断匝间短路的主要依据。

5. 直流电阻法

直流条件下,转子绕组电阻故障状态的测量值比正常状态的测量值明显偏低。直流电阻法的缺点是灵敏度较低,只有在短路匝数较多时,直流电阻值才呈现明显的变化。

6. 空载及短路特性试验法

用发电机空载和短路特性试验,在正常或故障状态下所测参数值与特征曲线的不同来判断是否发生转子绕组匝间短路故障。

空载与短路特性法对绕组匝间短路故障的反映不够灵敏,与直流电阻法相似,只有在短路匝数较多时,特性曲线才有明显变化。

7. 定子绕组并联支路环流特性分析

定子并联支路中是否会出现环流,只要分析各支路在相应的谐波磁场中能否获得同大小、同相位的感应电动势,也就是说,只要分析各支路在相应极对数谐波磁场空间中绕组系数以及其支路轴线的相位关系即可。如果其绕组系统和相位均相同,则无环流,否则在其并联支路间就会出现环流。发电机正常运行时,气隙磁场均匀对称,每相定子绕组的两条并联支路参数也近似相等,各支路在相应的谐波磁场中获得同大小、同相位的感应电动势,支路间不存在环流。但当发生转子励磁绕组匝间短路故障时,情况则不同,参考文献[6]分析了转子匝间短路对大型发电机定子绕组电压不平衡及每相并联支路环流的影响,得出转子匝间短路故障后,定子一相并联的两条支路之间存在偶次谐波的环流,其大小随短路严重程度上升。

8. 转子轴电压特性分析

由于转子励磁绕组匝间短路引起气隙磁场不对称及磁场畸变,从而引起磁通脉动,旋转的转轴切割这些脉动磁通,就会在两端产生感应电压,即轴电压。参考文献[7]分析了转子励磁绕组匝间短路故障时,由于发电机气隙磁场不对称引起的转子轴电压特性,并以一台2对极、1500rad/min、30kVA的模拟发电机为例,从而分析得到转子绕组匝间短路将产生频率为100、200、300Hz的轴电压。

0.3 转子绕组匝间短路故障诊断需要解决的问题

发电机在正常负载运行状态下,能否对转子绕组匝间短路进行监测、怎样实现早期报警,是实现转子绕组匝间短路在线监测应首先解决的课题。上述介绍的方法属于比较传统的检测方法,它们中的大多数都已经在现场中应用了多年,并且积累了很多经验。但是大部分都不是在线检测或者是受到其他因素的干扰比较大,所以实际测试中得到的结果并不十分理想,而且检测的灵敏度也不高,即使检测出故障后,也无法一次性实现对故障槽的准确定位。因此,就目前研究现状来看,有效检测转子绕组匝间短路的方法

可以通过以下几方面来解决。

(1) 故障机理的研究和诊断规则的确定。目前诊断软件中所使用的诊断规则通常是通过实验室模拟或理论计算得出的，与发电机的实际情况有较大的差异。可以通过进一步深入研究故障机理，结合现场应用，形成基于现场的故障诊断系统。

(2) 故障诊断方法的改进。目前各种在线诊断方法都存在不足，故障诊断存在误诊和漏诊现象，同时故障定位很难实现。可以综合考虑故障的各种特征量，采用集成型智能化故障诊断方法来提高故障诊断的有效性。

总之，随着现场应用的增多，经验的不断积累，尤其是专用的故障软件的编制和实现，转子绕组匝间短路故障的在线诊断和检测一定会得到完美的解决。

第 1 章

汽轮发电机转子基本结构和绕组短路故障的成因

1.1 转子的基本结构

汽轮发电机由于转速较高（一般都是 3000r/min），为了很好地固定励磁绕组，大容量的发电机几乎全做成隐极式转子。隐极式转子从外形来看，没有明显凸出的磁极，但是在它的励磁绕组里通入直流电流后，转子的周围将会出现 N 极和 S 极的磁场。

在较高的转速下，转子直径受到离心力的影响，有一定的限制。为了增大容量，只能增加转子的长度。因此汽轮发电机的转子是一个细而长的圆柱体，如图 1-1 所示。这样的设计可以减少转子圆周上的线速度，避免转子上的部件由于高速旋转的离心作用而损坏，造成重大的恶性事故。转子的直径虽然已经尽量缩小，但是对于大容量的发电机仍有 1~1.5m，因此圆周上的线速度仍然可以达到 150~250m/s。尤其在负载突然减小时，转子会出现短时的增速。这时，转子外围圆周上的线速度会变得更大，所以要求转子的材料要有很好的机械强度，避免被破坏。转子本体一般由高机械强度和导磁性能较好的合金钢锻成，并且和转轴做成一个整体。转子的各部分详细组成如图 1-2 所示。

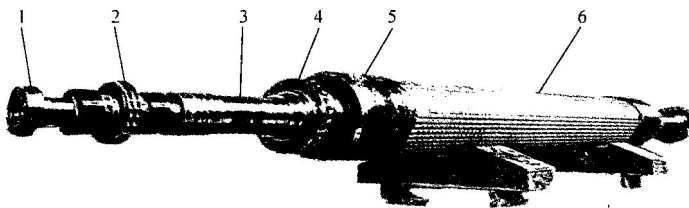


图 1-1 汽轮发电机转子结构图

1—联轴器；2—外风扇；3—轴；4—内风扇座环；5—护环；6—转子本体

1.2 转子绕组的结构

汽轮发电机根据容量的变化，转子采取的冷却方式有所不同。小容量的机组普遍采用空冷方式，而空冷方式以其高可靠性和低维护量深受运行部门的欢迎。然而，随着单

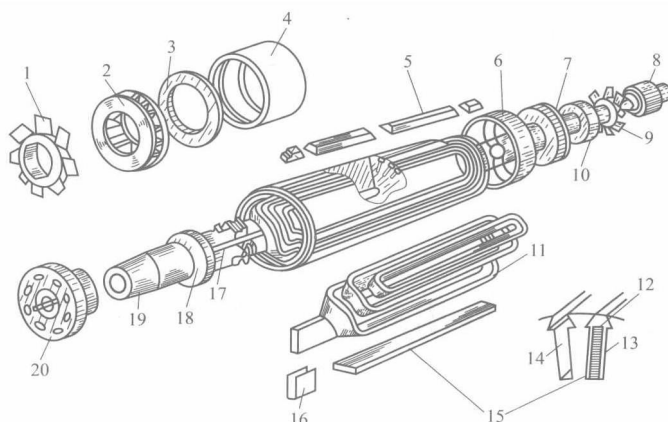


图 1-2 汽轮发电机转子组成图

- 1—轴向风扇；2—径向风扇；3—中心环；4—护环；5—槽楔；6—护环；7—风扇；
8—励磁机电枢；9—励磁机风扇；10—滑环；11—转子绕组；12—槽楔；13—转子绕组；
14—转子槽；15—槽绝缘（对地绝缘）；16—槽口保护套；17—励磁引线；
18—滑环；19—轴头；20—联轴器

机容量的增大，考虑到机组体积、重量、材料利用率等原因，空冷方式不再适用。但目前国际上仍有一些国家，通过结构及材料性能上的改进，制造出具有较高性能价格比的中等容量空冷机组。中等容量的机组有两种冷却方式，即水内冷和氢冷。两种方式转子槽形都做成开口槽，便于放励磁绕组。目前国内外的机组都是采用氢冷方式。本课题研究的对象是我国电力系统网上的主力机组（300MW 以上），此类机组多为水氢冷汽轮发电机组，即定子绕组采用水内冷，转子则采用氢冷。

氢冷方式的发电机沿转子铁芯表面全长铣有凹槽，在槽中放励磁绕组，槽的排列形

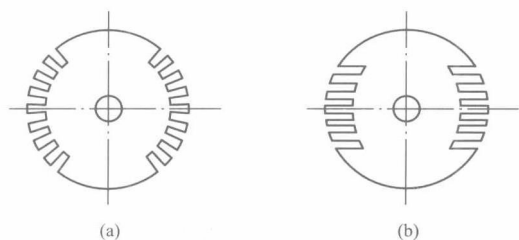


图 1-3 转子绕组槽的形状
(a) 辐射形排列；(b) 平行排列

状如图 1-3 所示。从图中可以看出，转子槽的形状有两种，一种为辐射形排列，另一种是平行排列，我国生产的电机都采用辐射形槽。沿着转子外圈，占 2/3 的表面上均匀开的下线槽较多，那里槽与槽之间的部分较窄，叫小齿。在另外的占转子 1/3 的部分没有开下线槽，形成了大齿。转子大齿的中心线实际上就是磁极的中心。

大型汽轮发电机转子的磁极有两个，每个磁极占有 n 个槽，槽内由 $n/2$ 个线圈串联组成，每个线圈内又包含 m 匝，每匝由 k 根含银扁铜线并联组成。转子绕组的各线圈之间在端部连接起来构成整个绕组，这种绕组称为同心式绕组。转子的两极之间是由绕线从端部串联连接形成。其详细的转子绕组接线图如图 1-4 所示。

氢冷方式的发电机转子线圈是用实心裸铜线连续绕制，然后再贴上或垫上匝间绝缘形成。其绝缘为组合结构，即由槽衬垫条、槽绝缘、匝间绝缘、冷却风道、空心导线、

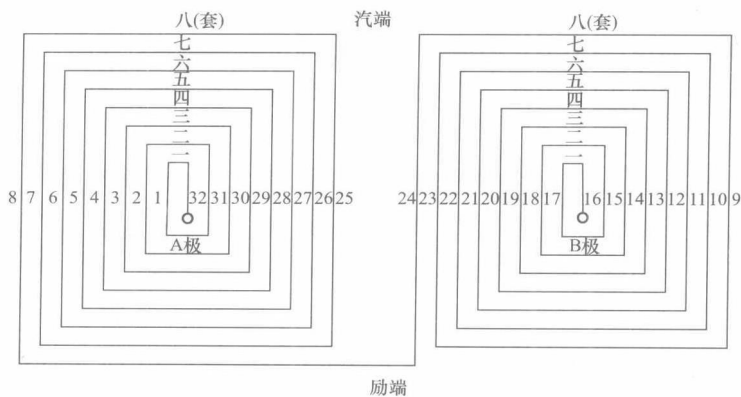


图 1-4 转子绕组接线图

槽下绝缘、转子槽楔等组合而成(见图 1-5)。由于冷却通风的需要,在绕组、槽口垫块、层间绝缘、槽楔上加工对应的孔组成风道。由于这种结构的转子中风道的存在,金属异物容易掉入转子绕组内部,形成短路故障。同时,由于绝缘结合部位多,高速旋转时离心力的作用下,也很容易产生由于绝缘件的窜动、损坏而导致的匝间短路故障的发生。

转子励磁绕组的引线部分固定是很重要的问题。在槽里的导体用槽楔来压紧,端部的导体之间需要通过垫块相互隔离,而端部的则要用护环来固定。励磁绕组通过装在转子上的集电环与电刷装置才能和外面的直流电源构成回路。转子端部的连接及端部导体之间垫块的嵌放如图 1-6 所示。

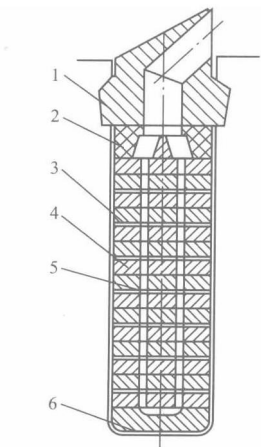


图 1-5 氢冷转子槽横截面

- 1—槽楔; 2—槽下绝缘; 3—槽绝缘;
4—导体; 5—匝间绝缘; 6—槽衬垫条

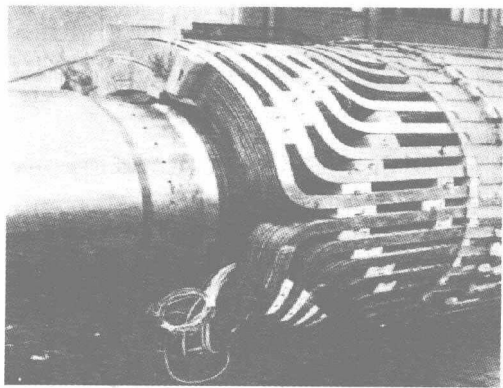


图 1-6 发电机转子绕组端部接线和垫块

转子绕组引线由径向导电螺钉、轴向导电杆及软引线组成。轴向导电杆置于转轴中心孔内,借助励磁端部轴端侧的导电螺钉与集电环连接,而通过护环侧的导电螺钉与软

引线连接。软引线与转子绕组第1号线圈的顶匝铜线相连接。轴向导电杆为铬青铜棒，与导电杆用管螺纹连接，用铜合金连接集电环或软引线则用螺钉紧固。导电螺钉外圆周包绝缘，但是与密封圈相接触的一段外圆周表面不包绝缘，通过密封结构和螺帽支承结构紧固导电螺钉。

绕组端部的匝间绝缘可用垫入绝缘垫条的方法实现。转子绕组端部在轴上成型时，在端部区域要装设下垫块。下垫块由干山毛榉木块组成，重复使用的下垫块是由胶合板或层压布板制成。在下垫块表面上开有切口，用以放置过渡线匝、线圈之间的连线、止挡、水冷却套管等。

发电机在高速旋转时，转子端部线圈受着很大的离心力作用，护环就是用来固定线圈端部位置的。由于护环的存在使得转子运转时端部线圈不致被移动，所以护环应该能够承受住很高的离心力，即机械应力的作用。同时，还应考虑发电机端部的杂散磁场在护环上引起的发热损耗。

如果转子的大套线圈的端部焊点在焊接后未认真进行清理，焊点附近的焊渣也未经锉磨平整，机组运行后，在起停及加减负荷过程中，焊接部位受到硌压及摩擦的损伤，以致在运行电压下被击穿，就会形成匝间短路。因顶部线匝所受的离心力较下部大，在运行中匝间绝缘垫条更易受磨压甚至被残留的焊渣硌破。

从转子绕组的结构和装设方法看，转子绕组匝间短路最易出现在端部的地方。这一部位的固定系统和转子绕组本身由于承受作用其上的强大的离心力，因而容易造成绕组的固定不牢、垫块松动，从而直接导致端部匝间的短路。所以，在研究转子绕组匝间短路故障的问题时，这部分的研究是比较重要的。

1.3 绕组匝间短路故障的常见形式和原因

造成汽轮发电机转子绕组匝间短路的因素有很多，不论在静止或者旋转状态下，微小的疏忽或原因都会导致转子绕组匝间短路故障的发生。具体从静态和动态情况下其原因概括如下：

(1) 静态匝间短路：匝间绝缘破损、窜位、导条加工残存毛刺，端部R绝缘尺寸或位置偏差，金属异物进入。

(2) 动态匝间短路：除上述原因以外，也可能是在离心力作用下，匝间绝缘破损、窜位及活动金属异物造成的。

匝间短路故障中，动态短路故障出现的频率比较高，造成的损失也很大，一旦出现漏判、误判，后果不堪设想。所以这一类型的故障原因应该更认真地分析和重视。

1.4 检测方法

汽轮发电机的生产已经有几十年的历史，不论是转子结构的原因，还是绝缘材料本身的原因，可以说转子匝间短路故障一直伴随其发展的全部过程。因此，人们不仅从结构设计及绝缘材料性能改进等方面采取措施，并且已经杜绝了这一故障。与此同时，也

寻找到了许多有效的检验方法来发现、排除这一故障，以保证机组的安全运行。随着科学技术不断进步，检验方法及手段不断更新。由于发电机转子在不同的制造阶段，所处状态、环境区别较大，尤其是在现场运行中其实际情况更复杂，因此，匝间短路故障采用的检验方法也有所不同。现将目前我国电机行业常用的方法予以简介。

1.4.1 静止状态的检验方法

这种检验匝间短路的方法适用于转子半成品工序及成品转子现场安装前交接试验的检查。在转子半成品工序静态检查中，目前尚无十分可靠的检验方法，尤其是存在金属活动异物及在离心力作用下绝缘产生的缺陷造成的短路故障，转子处于静止状态下还无法查出。对于稳定的短路故障（俗称“死接”），按以往的经验，采用两极电压法确定短路槽还是比较有效的。静态短路故障的检验方法及其特点可简单归纳为表 1-1 的方法。

表 1-1 静止状态下转子绕组匝间短路故障的检测方法

序号	检验方法	适用范围	判定限值	备 注
1	交流阻抗法	半成品工序及现场安装前交接检验	阻抗值小于较大值 3%	各厂家均采用，较成熟
2	两极电压法	半成品工序检验	电压差小于较大值的 8%	各厂家均采用，较成熟
3	开口变压器法	成品转子及现场安装前交接检验	凭经验	不常用，只在故障存在的前提下复检用
4	直流电压分布法	半成品转子工序	凭经验	不常用，只在故障存在的前提下复检用

1.4.2 旋转状态的检验方法

转子绕组匝间短路故障的动态检验是在额定转速下进行的，属于成品转子工序。经过热失效、超速试验后，如果转子内部存有活动金属异物或绝缘缺陷，在强大的离心力作用下也会充分表现出来，这是静态检验所无法达到的。由于动态检验是成品转子短路故障的最终检验，对发电机组上网运行的可靠性关系重大。因此，成品转子的动态检验历来受到发电机制造行业的重视，机械工业部部颁标准《隐极式同步发电机转子匝间短路测定方法》(JB/T 8446—2005)，对这一检验所采用的方法和判定限值都做出了严格的规定。动态短路故障的检验方法及其特点见表 1-2。

表 1-2 旋转状态下转子绕组匝间短路故障的检验方法

序号	检验方法	适用范围	判定限值	备 注
1	交流阻抗法	成品转子各工序	阻抗差小于较大值的 3%	如无中性点引出，可测整个绕组阻抗值
2	两极电压法	成品转子各工序	压差小于较大值 8%	如无中性点引出，此项取消
3	探测线圈法	仅在转速达到额定转速时用	同号线圈电压之差与较大值之比 $\leq 5\%$	—

1.4.3 运行状态的检验方法

在生产实际中，由于运输单位重量限值等原因，大型汽轮发电机总是采用分体发送的运输方式。按照标准的要求，除了首台产品在厂内需做整机形式的试验外，成型产品批量生产后在厂内均不做整机试验。因此，本节介绍的方法是应用在现场整机装机后的检验中，在此介绍是为了实现对运行中转子短路故障的在线诊断做一铺垫。运行状态下转子绕组匝间短路故障的检验方法及特点见表 1-3。

表 1-3 运行状态下转子绕组匝间短路故障的检验方法

序号	检验方法	适用范围	判定限值	备 注
1	稳态短路法	机组处于非正常状态，判断较严重故障	励磁电流增加 5% 时，可能存在故障	无法确定故障槽
2	空载法	机组处于非正常状态，判断较严重故障	励磁电流增加 10% 时，可能存在故障	无法确定故障槽
3	交流阻抗法损耗法	机组处于非正常状态，判断较严重故障，灵敏度较高	阻抗下降 8%，损耗上升 10% 可能存在故障	无法确定故障槽
4	探测线圈法	可用于各种状态直观准确性高，在线检验	尚无成熟经验，凭波形判断	能确定故障槽

表 1-3 中列出的检验方法是以往电厂常用的方法，与电厂实际要求尚有一定的差距。正是由于这一原因，至今还没有形成完善统一的标准，通常情况下对于转子绕组匝间短路故障的判断往往是凭借实际运行中的经验来判断。当存在明显匝间短路故障征兆时通常是在机组检修过程中，使得发电机机组处于非正常状态下进行故障检验，而无法实现运行中的实时在线检验。近年来，一些电厂尝试使用气隙探测线圈法进行转子绕组匝间短路故障的检测，虽然仍然是使机组处于非正常运行的状态下，利用示波器对比波形来分析判断，检验的准确度也比较差，且在现场应用的经验尚少，但是毕竟是一种可贵的尝试。

以上的各种检验转子绕组匝间短路的方法各有其优点和不足之处，开口变压器法不能应用于转动状态下检测，仅在停机抽出转子后方能进行；开口变压器和交流阻抗及功率损耗法的检测虽然较为灵敏，但受转子槽楔的材料和槽楔与槽壁接触的紧密程度的影响；交流阻抗法虽然简单、实用且较为灵敏，也可在静态和动态下测量，但这一方法除了受上述槽楔的影响外，还受到转动状态下的定子附加损耗、转子本体剩磁、试验时施加电压的高低、试验电源频率、波形的谐波分量等多种因素的影响，对判定较轻微的匝间短路故障有时不能获得准确结论；直流电阻法的灵敏度较低，只有在短路匝数较多的情况下才呈现明显降低；空载与短路特性法对匝间短路故障的反映也不够灵敏，与直流电阻法相似，只有短路匝数较多时，特性曲线才有明显的变化。而且这些测试方法都不能在实际运行的工况状态下进行检测，其检测的条件与实际运行工况的等价性也较差，无法实现运行检测的目的，并且大部分方法无法测得故障槽的准确位置，只能作为分析短路故障及其发展趋势的参考。由于实际运行中的动态匝间短路往往随着转子的静止而消失或减轻，上述方法均无法捕捉动态匝间短路故障。

第 2 章

Chapter 2

基于新判据和神经网络的转子绕组匝间短路故障诊断

2.1 发电机转子绕组匝间短路故障电磁特性分析

2.1.1 短路故障的机理

转子绕组匝间短路是发电机故障中发生概率较高的一类故障。引起它的主要原因是线匝绝缘的异动, 转子端部的热变形, 线圈端部垫块的松动或者护环绝缘衬垫的老化, 小的导电粒子或碎渣进入转子绕组端部及通风沟等。其影响程度多取决于短路的程度和短路的具体部位。故障发生后, 不仅能够引起转子热不平衡, 使得转子的漏磁场发生变化, 不均匀的转子发热还能引起机械上的不平衡并使振动增加。同时, 相邻的磁极不平衡磁拉力也能促使振动增加, 定子绕组的每相并联支路内会产生环流, 主轴、轴承座和端板也会磁化。它能够限制发电机的功率输出或者运行, 增加了运行的危险性, 进一步的发展将会导致一点甚至两点接地故障的发生, 从而迫使机组停机。另外, 故障短路点处的短路损耗将会增大, 从而导致绕组总损耗的减小、转子的平均温度减小、局部温度不断升高, 热膨胀在一个很小的范围内发生, 造成转子不同程度的弯曲、振动剧烈增加。因此, 为了能够估计发电机停机的迫切性、损坏程度及所需检修的时间和费用, 必须检查出是否有绕组短路的发生及判定短路故障的具体位置。

2.1.2 发电机转子绕组匝间短路电磁特性分析

在一定的运行条件下, 如果存在转子绕组匝间短路, 由于励磁绕组的有效匝数减少, 为满足气隙合成磁通条件励磁电流必然增大。机组正常运行时, 当略去开槽造成磁动势的少许不连续性, 转子磁动势的空间分布非常接近于梯形波。转子的短路效应将会导致磁动势局部损失, 从而使有短路磁极的磁动势峰值和平均值减少。造成的磁动势损失可用一个解析模型简便表示: 将匝间短路认为是退磁的磁动势分布, 它反向作用在有短路磁极主磁场的磁动势上, 即视为正常条件下的磁动势减去由短路引起的磁动势突变, 采用叠加原理可求出合成磁动势的大小, 磁动势的损失使其更倾向于线性变化, 故可忽略主磁通回路的饱和, 采用简单的矢量表示为

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_0 + \Delta\vec{F}$$