

## 电机部分

## 一起汽轮发电机转子匝间短路缺陷的查找与分析

吴宇辉<sup>1</sup>, 席斌<sup>2</sup>, 余学文<sup>2</sup>, 曾芳<sup>3</sup>, 方浩<sup>2</sup>, 白恺<sup>1</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 福建大唐国际宁德发电有限责任公司, 福建 福安 352100;

3. 大唐国际发电股份有限公司, 北京 100033)

**[摘要]** 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障是汽轮发电机转子最常见的故障之一, 本文详细介绍了一台 QFSN-660-2-22 型 660MW 发电机转子绕组匝间短路诊断、确认和故障定位的方法和过程, 特别是 RSO 试验数据情况, 能够为类似故障分析和处理提供参考。

**[关键词]** 汽轮发电机; 转子; 匝间短路; RSO 故障定位

**[中图分类号]** TM303.1 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1000-3983(2012)01-0001-04

**Analysis and Location on Inter-turn Short Circuit Fault of Turbogenerator Rotor Winding**

WU Yuhui<sup>1</sup>, XI Bin<sup>2</sup>, YU Xuwen<sup>2</sup>, ZENG Fang<sup>3</sup>, FANG Hao<sup>2</sup>, BAI Kai<sup>1</sup>

(1. North China Electrical Power Research Institute Co. Ltd, Beijing 100045, China;

2. Fujian Datang International Ningde Generation Co. Ltd, Fuan, 352100, China;

3. Datang International Power Generation Co. Ltd, Beijing 100033, China)

**Abstract:** Inter-turn short circuit in rotor winding is the most common fault for turbogenerator rotors, this paper introduce some different testing methods to find, determine and locate the inter-turn short fault, especially by RSO. It can be a helpful reference to such faults.

**Key words:** turbogenerator; rotor winding; inter-turn short; RSO; fault location

## 1 汽轮发电机转子绕组匝间短路的原因和危害

大型汽轮发电机的转子绕组经常由于加工工艺的不良和运行中各类机电作用的影响导致匝间短路或高阻接地等缺陷, 是发电机运行中比较常见的缺陷, 也是影响安全运行的主要原因之一。

由于轻微的转子匝间短路故障和高阻接地对机组正常运行的影响不大而且故障特征并不明显, 所以运行中此类故障经常被忽略。但是如果不对称的匝间短路长期运行下去, 会引起转子剧烈振动, 转子本体严重磁化, 严重的会导致转子线圈一点甚至两点接地的故障, 引起大轴烧损; 而且发电机长期运行在故障状态会使发电机转子电流显著增加, 绕组温度升高, 对其寿命产生影响, 导致恶性事故的发生, 更严重的情况是一旦出现转子匝间短路, 电机中便会出现气隙磁通波形的畸变, 引起定子侧电压的不平衡, 并在发电机的定子两条并联支路间产生高次谐波环流, 增加线圈的发热, 影响发电机的无功出力, 引起机组振动等机械故障, 最终导致轴电压升高, 灼伤转子护环、

发生机座及大轴磁化并进而烧伤轴瓦和大轴的严重后果。

## 2 汽轮发电机转子绕组匝间短路早期诊断方法

目前, 国内发电厂对转子匝间绝缘进行预防性试验和诊断的主要手段是采用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, 既减少了线匝的槽内有效高度, 又使槽楔与转子槽齿接触紧密, 增强阻尼效应, 使得阻抗随着转速升高而有规律的下降。发生匝间短路时, 对于同一台机组相同状态下, 阻抗值会发生突变, 而功率损耗则相对升高。

该方法虽然具有简便、实用和较为灵敏的优点, 也可以在静态和动态下测量, 但是其测试结果受外部条件影响因素较多, 除了受到转子槽楔材料及槽楔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。目前规程中对转子交流阻抗注意值的规定是: 在相同

试验条件下,与历年数值比较,不应有显著变化,相差 10% 应该引起注意。

因此,交流阻抗和功率损耗法对判定匝间短路故障,特别是轻微匝间绝缘缺陷不能获得直接结论,特别是在测试数据接近注意值 10% 时,往往无法明确给出是否存在匝间短路、短路程度如何的结论,使得现场很难决策是否应采取抽转子、拔护环等措施扩大检修以进一步检查和处理。

直流电阻法、空载及短路特性试验法、开口变压器法以及在线监测的微分线圈法理论上都可以应用于转子绕组匝间短路早期缺陷诊断,但都因存在各种局限性实际应用较少。

反射法(RSO)是近几年来发展出的新的转子绕组匝间短路早期检测方法,理论上是一种理想的检测匝间短路缺陷的试验方法。RSO 测试方法是由英国专家 J.W.Wood 在上世纪末提出来。试验应用的是行波过程理论,其试验基本原理是:采用双脉冲信号发生器对发电机转子两极同时施加一个前沿陡峭的冲击波,当脉冲波传播到阻抗突变点位置时会产生一个反射波和

折射波。用双通道录波器录得两组响应特性曲线,将这两组响应特性曲线作差,只有当两响应曲线相同时,其差值才为一条直线,表明匝间无短路现象存在;否则,将说明匝间存在异常或短路。匝间短路程度可以通过故障处的波阻抗变化大小来体现,反映到波形图上即可以用差值波形的平展程度来判定。差值波形不但能表明绕组匝间是否存在异常,而且波幅的大小可以表明短路故障的严重程度,波突起位置可以表明短路点的大概位置。

目前国外多家大制造商(如 GE、三菱、ALSTON)将此项目试验作为出厂标准试验,国内生产厂家、科研院所等单位也已将该技术引进用于出厂试验和现场故障诊断检验手段。

### 3 转子绕组匝间绝缘缺陷查找实例

2011 年 6 月,某电厂 2 号发电机转子抽出后对转子进行了转子交流阻抗和功率损耗试验,结果见表 1。

表 1 2 号发电机转子交流阻抗试验数据比较

电压 V	电流/A		功率/W			阻抗/ $\Omega$		
	交接	大修	交接	大修	变化	交接	大修	变化
50	14.39	16.03	433	487	+12%	3.47	3.11	-10.6%
100	25.96	28.9	1659	1812	+9.2%	3.91	3.47	-11.4%
150	33.86	37.5	3340	3532	+5.7%	4.44	4.01	-10%
180	37.88	41.23	4591	4889	+6.5%	4.78	4.36	-8.7%
200	40.26	43.46	5476	5666	+5.6%	4.99	4.59	-8.1%

经交流阻抗、功率损耗试验数据分析,转子交流阻抗最大变化接近 11%,功率损耗也有明显增加,虽然在 200V 电压下,其交流阻抗和功率损耗,均未超过 10% (规程规定超过 10% 变化,应该引起注意),仍判断发电机很可能存在轻微匝间短路。随后逐步展开多种试验方法来确认故障和查找故障位置。

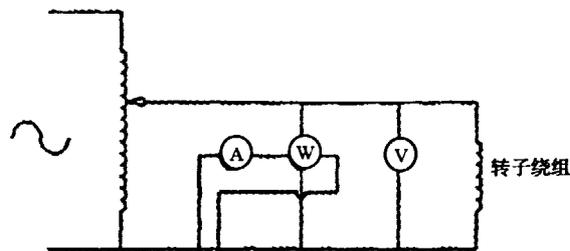


图 1 交流阻抗和功率测试图

第一步:用 RSO 重复脉冲法进行缺陷确认  
转子盘车状态下 RSO 试验:转子转动一周,出现

2 处轻微匝间短路迹象。

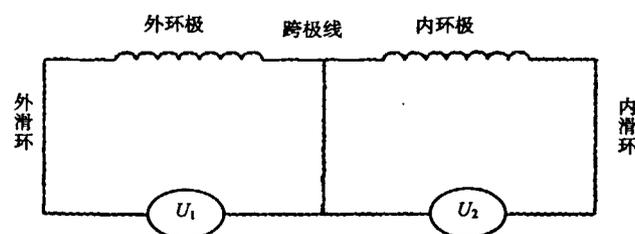


图 2 两极电压法试验示意图

从转子在盘车时不同位置的测试图来看,有两处轻微匝间短路现象。

第二步:进行两极电压试验,确定缺陷点在内环极还是在外环极

转子抽出后通入 100V、200V 交流电压,测量外环极、内环极分别对跨极线的电压。试验方法示意图见图 2。通 100V 时内环极比外环极小 6V,通 200V 时

内环极比外环极小 12V, 因此确定了转子内环绕组存在匝间短路。

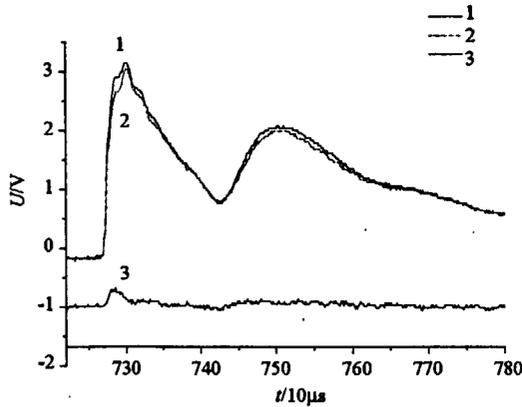


图3 转子冷态盘车位置一 RSO图

(注: 曲线1、曲线2分别为外环极和内环极响应特性曲线, 两者之差为故障特征曲线3, 下同)

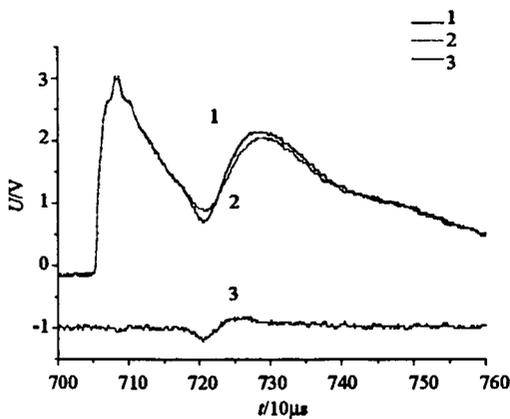


图4 转子冷态盘车位置二 RSO图

第三步: 进行转子分包压降试验, 确定故障线包

该试验具体方法是: 对有通风孔的转子, 从集电环通入一定交流电压, 利用电压表两个探针, 一端从转子励端端部通风孔处插入, 可探到线圈表层匝线; 另一端从护环下伸入可探到该号线圈的底层匝线, 测量出的电压值为该线包上的压降, 由于匝间短路故障位置, 短路匝电流有明显去磁作用, 所以故障匝所在线包, 电压会有明显降低, 具体试验数据见表2。

表2 2号发电机转子分包压降试验数据

	1包	2包	3包	4包	5包	6包	7包	8包
内极	8.1V	11.5V	13.1V	14.0V	14.6V	14.6V	14.0V	3.2V
外极	8.7V	11.6V	13.5V	14.2V	14.5V	14.5V	14.6V	15.1V

通过此方法的测量和对测量数据的分析, 内极 8

号线包电压比对应线包电压明显偏小, 确定故障存在于内极 8 号线圈处。

第四步: 进行匝间直流压降, 确定短路点的具体位置

该试验具体方法是: 从两极集电环通入 100A 左右的直流电流, 在有匝间故障的那个线包上, 按图 5 所示, 测量每包拐弯处 A、B、C、D 四处相邻匝上的电压降的分布。

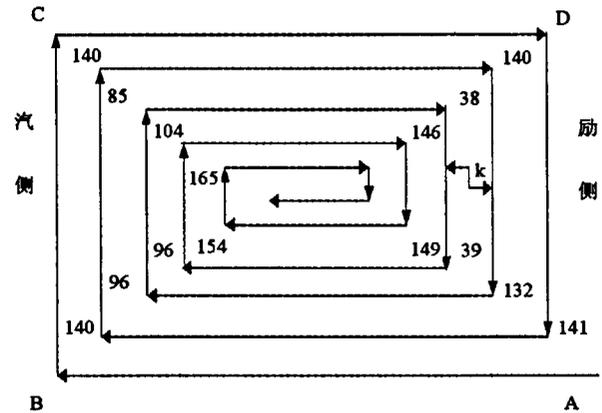


图5 匝间直流压降试验示意图和测试数据

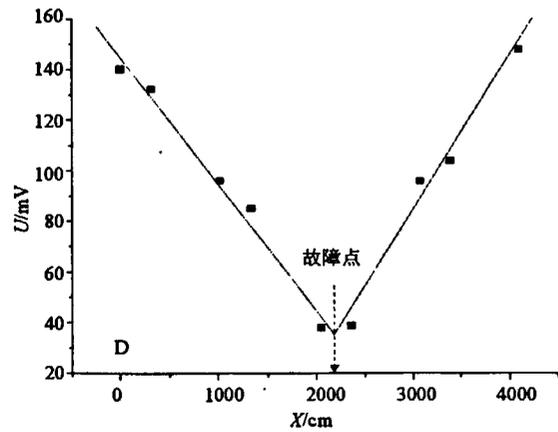


图6 匝间直流压降法故障定位坐标图

具体试验数据已标注在图5上, 可见第2至第3匝间电压明显比其他匝间电压低, 因此进一步判断匝间短路点就在内环极第8号线圈的2至第3匝之间。

缺陷沿绕组长度方向的具体位置, 可由测试分布电位与转子线圈长度的坐标图来进一步定位。例如, 2号发电机转子绕组第8号线圈直线段长约710cm, 端部长约312cm, 如图6所示, 以D点为原点, 标出故障点两侧的测试数据, 然后用最小二乘法拟合, 最后定位故障点在转子励侧护环下内环极第8包2-3匝之间。

第五步: 用 RSO 重复脉冲法进行热态下缺陷检查

图6是在护环拔下过程中,加热后的RSO测试曲线,显示出明显的故障特征,根据故障特征图谱,判断存在两个故障点,分别为内环第8包和外环第1包,故障程度均为1匝左右。

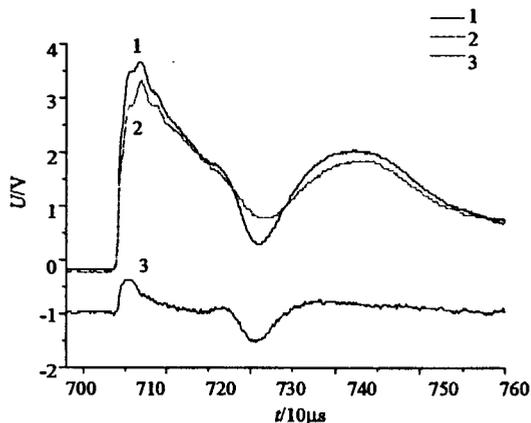


图7 护环加热后RSO试验曲线

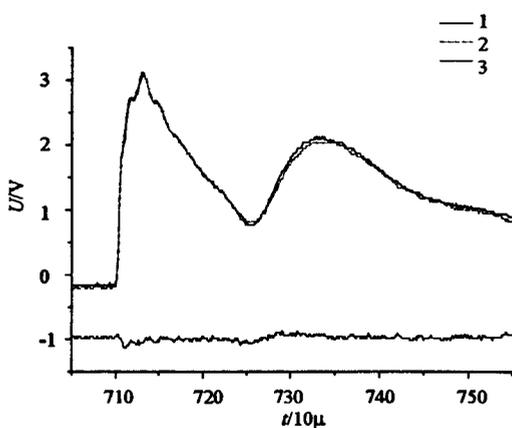


图8 故障处理完后RSO曲线

#### 第六步:故障处理及RSO确认缺陷消除

护环拔下后,在内环第8包故障处,发现此处面积约一元硬币大小的匝间绝缘已经碳化发黑。故障处经打磨并加垫一层匝间绝缘。内环第1包处,对护环下相关部位加垫绝缘,故障消失。图8为故障处理后的RSO曲线。

#### 4 转子匝间短路查找过程中故障特征不稳定现象分析

在2号机转子拔护环前,曾出现交流阻抗、两极电压试验数据从异常又恢复正常的情况,给故障查找带来很大困难。这种情况一般有两种可能:其一,转子某处存在毛刺导致匝间短路,但在查找过程中因通入大电流定位时,毛刺被灼烧、消失,匝间短路特征消失;其二,转子处于冷态静止时,匝间紧力比运行

时高温和高离心力条件下低很多,如果只是高阻匝间短路,在静态时的常规试验方法通常无法发现。

转子护环经过加温处理拔掉后,通过RSO重复脉冲法和常规方法查找,确认短路点。隔日处理前,再次测量两极电压和交流阻抗试验的数据又恢复正常。通过以上情况说明2号机转子匝间短路故障现象不是很明显,有很大的隐蔽性。分析原因认为护环加热后线圈温度升高,受热膨胀,匝间紧力增加,在绝缘破损处形成明显匝间短路,故障现象明显。待降温后,线圈收缩,未接触匝间绝缘导致故障现象不明显。

另外,转子短路点的状态与转子支撑位置有一定关系,交流阻抗、两极电压试验很难测量到这种差别,而RSO波形可以在转子盘车或低速旋转过程中进行连续测量,因此,RSO能检测出常规试验方法不能检测出的不稳定匝间短路故障。

#### 5 结论

根据本次转子绕组轻微匝间短路的诊断和处理情况,分析此间进行的多种试验方法,可以得到以下结论:

(1) 转子交流阻抗和功率损耗试验是简单易行的现场测试手段,能一定程度上反应转子绕组匝间短路情况。当测试数值的变化程度接近规程规定的10%时,要结合历史数据及其他试验来综合判定是否存在匝间短路。

(2) 转子膛外时,分包压降和两极电压法能反应匝间短路缺陷,并能初步定位到故障包,但对高阻匝间短路不敏感。

(3) RSO试验方法简单,无论转子在膛内和在膛外、动态和静态下均能连续测量,对轻微匝间短路也有比较高的灵敏度,可应用于对发电机转子进行早期预防性诊断,也可用于发现故障的确认、定位以及修复后的复测,对运行监督和现场检修都有直接的指导作用,值得推广。

(4) 直流压降测试法能精确定位匝间短路故障点,尤其是未拔护环情况下,通过测试数据可以决定拔下哪侧护环,大大减少检修工作量、缩短检修周期,对现场处理故障有重要指导作用。

(5) 轻微的转子匝间短路会随着转子状态的变化发生变化,稍有疏忽就不一定能发现问题,所以在诊断判断转子绕组是否有匝间短路时,应结合实际情况,选择多种测量方法进行测量,互相引证,综合判断,一旦发现问题,不要轻易否定。因此,发电机转子匝

(下转第9页)

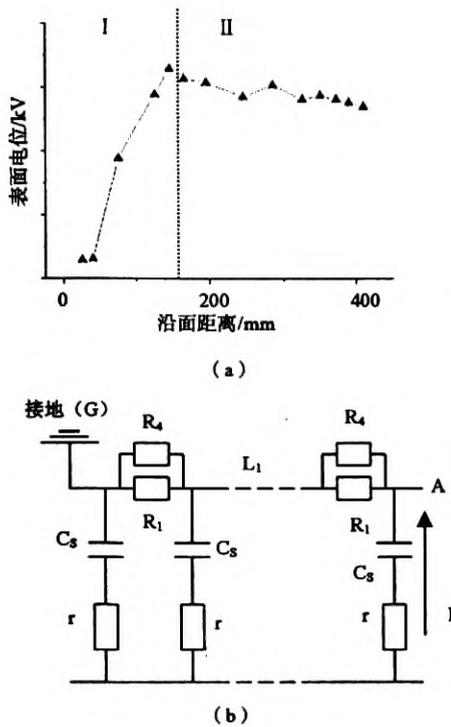


图8 “反接法、断开低阻”示意图、电位分布图及防晕层区域的等效电路

由式(4)可知,除损耗电阻引起的有功功率外,电流流过  $R_2$  导致有功功率增加;  $R_1$  的阻值范围约为  $10^8\Omega$ ,  $R_3$  的阻值范围约为  $10^9\sim 10^{10}\Omega$ ,因此,  $R_2$  比  $R_3$  小很多,电位差却相差不大,与“测量电极包至高阻末端、反接法”相比,有功电流及有功功率更大,因此,介质损耗因数的初始值是4种情况(两种接法)中最大的;随着外施电压的升高,  $R_2$  急速下降,有功电流及有功

(上接第4页)

间短路处理过程中应结合应用多种匝间短路试验方法来诊断、定位和确认修复结果。

[参考文献]

[1] 赵永浩. 发电机分包压降法判断标准探讨[J]. 华北电力技术, 2002(11):1-2.

[2] 冯复生. 不拔护环诊断大型汽轮发电机转子线圈匝间短路位置的新方法[J]. 华北电力技术, 2000(3):1-5.

[3] 谢勇, 廖放. 汽轮发电机转子不拔护环精确检测匝间短路方法探索[J]. 东方电机, 2005(01):65-68.

[4] J.W.Wood, Ph.D., C.Eng., M.I.E.E., and R.T.Hindmarch. Rotor winding short detection[J]. IEE

功率迅速增加,导致介质损耗因数增量大幅增加。

5 结论

(1)“正接法”测量介质损耗因数值小,“反接法”测量介质损耗因数值偏大。

(2)两种测试方法的比较分析表明:与“反接法”相比,“正接法”测试可以有效的减少防晕层表面电阻对介质损耗因数测试值的影响。若线棒可与地分离,现场试验应尽量采用“正接法”的测试方式。

(3)为保证线棒的完整性,并考核包含中、高阻防晕层区域的介质损耗因数,推荐采用“正接法、测量电极包至高阻末端”的测试方式。

[参考文献]

[1] F. T. Emery. Partial Discharge, Dissipation Factor, and Corona Aspects for High Voltage Electric Generator Stator Bars and Windings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, (2).

[2] F. T. Emery. Power Factor Measurements on High Voltage Stator Bars & Stator Windings[C]. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, MA USA, 2002(4)7~10

[收稿日期] 2011-5-25

[作者简介]



陈阳(1981-), 2004年毕业于哈尔滨理工大学电气与电子工程学院,现从事高压电机的绝缘试验工作,工程师。

审稿人: 潘宇光

proceedings, 1986(3):181-189.

[5] 向成, 刘志强. 大型发电机转子绕组 RSO 试验分析和探讨[J]. 大电机技术, 2008(1):16-22.

[6] 纪璇, 李永刚, 董延昌. 重复脉冲法检测发电机转子绕组匝间短路故障的研究[J]. 实验室科学, 2010(3): 88-89.

[收稿日期] 2011-10-20

[作者简介]



吴宇辉(1974-), 1996年7月毕业于浙江大学电机系电机及其控制专业,现从事发电机和新能源技术研究工作,高级工程师。

审稿人: 沈轶伟

# 一起汽轮发电机转子匝间短路缺陷的查找与分析

作者: [吴宇辉](#), [席斌](#), [余学文](#), [曾芳](#), [方浩](#), [白恺](#), [WU Yuhui](#), [XI Bin](#), [YU Xuewen](#), [ZENG Fang](#), [FANG Hao](#), [BAI Kai](#)

作者单位: [吴宇辉, 白恺, WU Yuhui, BAI Kai \(华北电力科学研究院有限责任公司, 北京, 100045\)](#), [席斌, 余学文, 方浩, XI Bin, YU Xuewen, FANG Hao \(福建大唐国际宁德发电有限责任公司, 福建福安, 352100\)](#), [曾芳, ZENG Fang \(大唐国际发电股份有限公司, 北京, 100033\)](#)

刊名: [大电机技术](#) [ISTIC](#) [PKU](#)

英文刊名: [Large Electric Machine and Hydraulic Turbine](#)

年, 卷(期): 2012(1)

## 参考文献(6条)

1. [赵永浩](#) [发电机分包压降法判断标准探讨](#)[期刊论文]-[华北电力技术](#) 2002(11)
2. [冯复生](#) [不拔护环诊断大型汽轮发电机转子线圈匝间短路位置的新方法](#)[期刊论文]-[华北电力技术](#) 2000(03)
3. [谢勇](#); [廖放](#) [汽轮发电机转子不拔护环精确检测匝间短路方法探索](#) 2005(01)
4. [J. W. Wood](#); [C. Eng](#); [M. I. E. E](#); [R. T. Hindmarch](#) [Rotor winding short detection](#) 1986(03)
5. [向成](#); [刘志强](#) [大型发电机转子绕组RS0试验分析和探讨](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2008(01)
6. [纪璇](#); [李永刚](#); [董延昌](#) [重复脉冲法检测发电机转子绕组匝间短路故障的研究](#)[期刊论文]-[实验室科学](#) 2010(03)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_ddjjs201201001.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ddjjs201201001.aspx)