

ICS 29.160.01
K 21
备案号: 44573—2014

JB

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 8446—2013
代替 JB/T 8446—2005

隐极式同步发电机转子匝间 短路测定方法

Measuring methods of interturn short-circuit in the rotor
windings for cylindrical rotor synchronous generators

2013-12-31 发布

2014-07-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 试验设备.....	1
4 测量状态.....	1
5 测量方法.....	2
5.1 静态下转子交流阻抗测量.....	2
5.2 旋转状态下转子交流阻抗测量.....	2
5.3 旋转状态下探测线圈波形法测量.....	2
6 限定值.....	2
6.1 交流阻抗法.....	2
6.2 探测线圈波形法.....	3
7 测量方法优先级.....	3
8 推荐新测量方法.....	3
附录 A (资料性附录) 重复脉冲法 (RSO) 简介.....	4
A.1 概述.....	4
A.2 RSO 试验原理.....	4
A.3 试验设备简介.....	5
A.4 RSO 离线试验及分析.....	6
图 A.1 故障点行波的反射与折射.....	4
图 A.2 行波的反射.....	5
图 A.3 行波的折射.....	5
图 A.4 模拟发电机转子绕组抽头分布图.....	6
图 A.5 RSO 离线试验接线图.....	6
图 A.6 RSO 离线试验波形.....	7
图 A.7 L1 入 L5 出时几种情况比较.....	8
图 A.8 RSO 试验特征信号采集示意图.....	8
图 A.9 几种情况下特征信号波形图.....	8
表 1 转子匝间短路测量状态.....	1
表 A.1 模拟发电机组基本数据.....	6

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准代替JB/T 8446—2005《隐极式同步发电机转子匝间短路测定方法》，与JB/T 8446—2005相比主要技术变化如下：

- 删除了“发电机的交流励磁机转子匝间试验参照本标准执行”和“本标准与GB/T 7064《透平型同步电机技术要求》协调一致”（2005年版的第1章）；
- 将“GB/T 1029三相同步电机试验方法（GB/T 1029—1993，neq IEC 60034-2）”改为“GB/T 1029三相同步电机试验方法”（见第2章，2005年版的第2章）；
- 删除了表1中序号3的内容（2005年版的表1）；
- 删除了表1序号5内容中的“（精平衡后）”（2005年版的表1）；
- 将“总装试验”改为“型式试验”（见4.1的表1，2005年版的表1）；
- 将“180°前后度区两组数据”改为“180°前后读取两组数据”（见4.2，2005年版的4.1）；
- 将“测量并记录电压、电流、功率或两极电压（指两极机）”改为“测量并记录电压、电流、功率和各极电压（如具备测量各极电压条件）”（见5.2，2005年版的5.2）；
- 增加了推荐采用连续阻抗测量法的内容（见5.2.2）；
- 增加了在发电机空载和三相稳态短路试验工况下采用探测线圈波形法进行测量的测量方法说明（见5.3.4）；
- 增加了在采用探测线圈波形法进行测量的情况下，消除发电机转子剩磁影响的方法（在发电机转子存在剩磁的情况下）（见5.3.5）；
- 修改了对于松配合安装槽楔的发电机交流阻抗法限定值的要求（见6.1.2，2005年版的6.1.2）；
- 增加了“旋转试验中，在可连续测量阻抗或电流的情况下，如阻抗—转速曲线上有明显突变点，可认为被试转子可能存在匝间短路”（见6.1.3）；
- 将“可判定被试转子存在匝间短路”改为“可认为被试转子可能存在匝间短路”（见6.2，2005年版的6.2）；
- 将“ $\frac{45}{\text{转子被测槽匝数}} \times \%$ ”改为“ $\frac{1}{\text{转子被测槽匝数}} \times 45\%$ ” [见6.2.1的公式（2），2005年版6.2的公式（2）]；
- 将6.2细分为6.2.1和6.2.2，增加了探测线圈波形法在四极以上发电机的情况下数据处理的方法及限定值的说明（见6.2.1、6.2.2，2005年版的6.2）；
- 增加了推荐新测量方法的内容（见第8章）；
- 增加了推荐的新测量方法重复脉冲法（RSO）的简介（见附录A）。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国大型发电机标准化技术委员会（SAC/TC511）归口。

本标准起草单位：哈尔滨大电机研究所、辽宁省电力有限公司电力科学研究院、湖北电力试验研究所、上海电气电站设备有限公司发电机厂、东方电气集团东方电机有限公司、南京汽轮电机（集团）有限公司、北京北重汽轮电机有限责任公司、山东济南发电设备厂等。

本标准主要起草人：刘莹、王健军、阮羚、舒武庆、贺淑君、王建和、诸葛文兵、李录法等。

本标准于1996年首次发布，2005年第一次修订，本次为第二次修订。

隐极式同步发电机转子匝间短路测定方法

1 范围

本标准规定了隐极式同步发电机转子匝间短路的测量方法及限定值。
本标准适用于隐极式同步发电机转子匝间短路的测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1029 三相同步电机试验方法

3 试验设备

3.1 测量中所用仪器、仪表的准确度应符合 GB/T 1029 的要求。

3.2 探测线圈波形法所用探测线圈的横截面积、匝数及安装位置应保证其具有足够的灵敏度和准确度。

4 测量状态

4.1 转子匝间短路测量分别在静止及旋转两种状态下按表 1 的规定进行。

表 1 转子匝间短路测量状态

序号	试验阶段	转速 r/min	电压 V	备注
1	转子装配全序完	0	50, 100, 150, 200, 220	升压测量
2	动平衡、起动前	0	50, 100, 150, 200, 220	升压测量
3	超速前	$0 \sim n_N$, 间隔 300	220	升速测量
4	超速后	$n_N \sim 0$, 间隔 300	220	降速测量
5	型式试验 转子在定子膛内且定子绕组开路	$0 \sim n_N \sim 0$, 间隔 300	220	升速及降速测量

注 1: 交接试验中做序号 1、序号 5 曲线上一一点。
注 2: 第 5 项试验必要时进行。
注 3: 试验中所加试验电压峰值不得超过转子绕组的额定励磁电压值。
注 4: n_N 为额定转速。

4.2 静止状态。采用阻抗测量法。试验中，所测各极绕组间电压差值超过限定值时，可采用感应电动势矢量法（即开口变压器法）或各极电压分布法进一步测量。

当进行静态转子阻抗测量时，若转子不在机座内，转子本体与周围铁磁物的空间距离必须在 1 m 以上。如上述条件无法满足，必须在转子旋转几何 180° 前后读取两组数据，以作比较。

4.3 旋转状态。采用阻抗测量法，对 100 MW 及以上的机组（水冷转子除外），还应采用探测线圈波

形法。

4.3.1 旋转状态下转子阻抗测量时，应对电流连续监测，并按表 1 进行记录，作转子阻抗-转速曲线。

4.3.2 采用探测线圈波形法测量，一般应在转子动平衡期间超速前、后（精平衡后），并在额定转速下各进行一次。

5 测量方法

5.1 静态下转子交流阻抗测量

用导线将转子引线（或集电环或径向导电螺钉）同测试电源相连接，测试电源为工频实际正弦电源，测量并记录电压、电流、功率和各极电压。

5.2 旋转状态下转子交流阻抗测量

5.2.1 用装在绝缘刷架上的电刷将测试电源接到集电环上，测量并记录电压、电流、功率和各极电压（如具备测量各极电压条件）。

5.2.2 推荐采用连续阻抗测量法。测量的方法是使发电机转子转速连续上升（或下降），同时连续记录电压、电流、功率和各极电压（如具备测量各极电压条件）。

5.3 旋转状态下探测线圈波形法测量

5.3.1 探测线圈的布置。探测线圈为径向布置，应安装在距转子本体表面适当距离（一般为气隙的 1/3）的固定支架上。在安装探测线圈时，应保证探测线圈的轴线与转子径向重合。

5.3.2 转子绕组的线圈标号。紧靠磁极的第一槽的线圈标号为 1 或 1'，第二槽的线圈标号为 2 或 2'，以下类推，在转子轴上做好定位标记。

5.3.3 测量仪器的选取。应选择输入阻抗大（一般等于或大于 10 MΩ）、频域宽（保证其波形不会失真）、灵敏度高的专用匝间短路测试仪或测量准确度、功能达到本标准要求的其他测试仪器。

5.3.4 测量及数据记录。在转子动平衡期间，被试转子绕组一般通入其额定励磁电流的 4% 以下的直流电流（为检测需要也可适当加大），将探测线圈两端的电压信号接至转子匝间短路测试仪或满足本标准要求的其他测试仪器，绘出探测线圈的感应电动势波形并记录（或存储）相应的采样数据；在发电机进行空载和三相稳态短路试验期间，定子保持额定电压（空载试验）和定子保持额定电流（三相稳态短路试验）条件下，将探测线圈两端的电压信号接至转子匝间短路测试仪或满足本标准要求的其他测试仪器，绘出探测线圈的感应电动势波形并记录（或存储）相应的采样数据。

5.3.5 在发电机转子存在剩磁的情况下，应在保证同等试验条件下，分别进行正向、反向励磁两种工况的测量。在进行数据处理过程中，对于每个线圈在两种测量工况下得到的线圈电压求算术平均值，这些算术平均值即是消除了剩磁影响的各个线圈的线圈电压值。

6 限定值

6.1 交流阻抗法

6.1.1 静态试验中，各极线圈间的电压差不得大于最大值的 3%。

6.1.2 旋转试验中，对于紧配合安装槽楔的发电机，各极线圈在每一转速及电压下的阻抗差不得大于最大值的 3%。如测量每极线圈阻抗有困难时，亦可测量整个转子绕组的阻抗，但每隔 300 r/min 之间的阻抗差不得大于最大值的 5%。对于松配合安装槽楔的发电机，在较低转速段内，其限定值可根据各制造厂发电机的结构和制造工艺适当放宽。

6.1.3 旋转试验中,在可连续测量阻抗或电流的情况下,如阻抗-转速曲线上有明显突变点,可认为被试转子可能存在匝间短路。

6.2 探测线圈波形法

6.2.1 两极发电机的情况

取一个磁极上的一个线圈电压与另一磁极上相对应的同号线圈电压之差值与两者较大值之比,见公式(1)。

$$\frac{\text{同号线圈电压之差}}{\text{同号线圈电压较大值}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

如按公式(1)算得的比值大于公式(2)所计算的数值时,可认为被试转子可能存在匝间短路。

$$\frac{1}{\text{转子被测槽匝数}} \times 45\% \dots\dots\dots (2)$$

6.2.2 四极以上发电机的情况

将所有磁极上的同号线圈电压进行比较,找出其中最小的同号线圈电压(以及与其值接近的同号线圈电压),然后求其他剩余同号线圈电压的算术平均值,取该算术平均值与最小同号线圈电压(或与其值接近的同号线圈电压)之差值,再与求得的剩余同号线圈电压的算术平均值之比,并求其百分数,其值大于公式(2)所计算的数值时,可认为被试转子可能存在匝间短路。

7 测量方法优先级

如阻抗法与波形法测量结果有矛盾,则以波形法为准。

8 推荐新测量方法

将重复脉冲法(RSO)作为一种测量隐极式同步发电机转子匝间短路的新方法推广使用,并在使用过程中,对其进行深入研究和总结,以提出该方法的标准试验设备、试验波形和试验数据的分析方法,以及相应的判定标准。重复脉冲法简介参见附录A。

附录 A
(资料性附录)
重复脉冲法 (RSO) 简介

A.1 概述

本附录给出了重复脉冲法的简介, 有关重复脉冲法的更多内容介绍, 请参考由李永刚等编写的《发电机转子绕组匝间短路故障特性分析与识别》及其他相关资料。

重复脉冲法 (Repetitive Surge Oscilloscope) 应用的是波过程理论, 即行波技术。这种方法是英国专家 J. W. Wood 提出的, 可用于转子匝间短路的早期发现及短路的故障定位, 而且不需要在汽轮发电机内部安装装置。其试验基本过程是采用双脉冲信号发生器对发电机转子绕组两极同时施加一个前沿陡峭的冲击脉冲波, 用双线录波器录得两组响应特性曲线。将这两组响应特性曲线相减, 只有当两组响应特性曲线相同时, 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。经过对响应特性曲线的计算分析, 或将检测结果直接与发电机出厂时厂家提供的标准波形进行比较, 可判断转子绕组匝间是否存在短路及短路点的位置。

A.2 RSO 试验原理

A.2.1 行波的反射和折射

波的折射和反射是电流行波的基本特征。在电力系统中, 均匀线路只有在一定条件下存在。当行波沿导线运动时, 在不同波阻抗的连接点或集中参数阻抗连接点上会发生反射 (reflection) 和折射 (refraction) 现象。图 A.1 为故障点行波的反射与折射现象 (图示为直角波)。行波的反射与折射程度可以用反射系数与折射系数来表示。

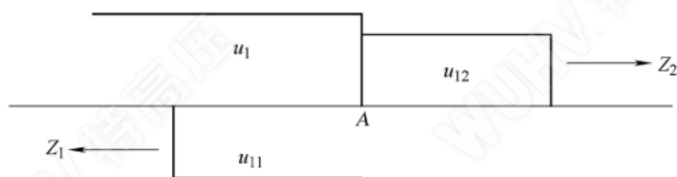


图 A.1 故障点行波的反射与折射

A.2.1.1 行波的反射

行波沿线路传播, 遇到线路参数或波阻抗不连续时, 将产生反射波。如图 A.2 所示, 行波 u_1 在波阻抗为 Z_1 的线路传播至 A 点时, 线路的均匀性发生改变, 设其等效波阻抗为 Z_2 , 则 A 点的反射系数可以用反射电压 (电流) 行波 u_{11} (i_{11}) 与入射电压 (电流) 行波 u_1 (i_1) 之比来表示, 故电压反射系数的计算按公式 (A.1)。

$$\alpha_u = \frac{u_{11}}{u_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (A.1)$$

电流的反射波极性发生改变, 因此电流反射系数的计算按公式 (A.2)。

$$\alpha_i = \frac{i_{11}}{i_1} = -\frac{u_{11}}{u_1} = -\alpha_u \dots\dots\dots (A.2)$$

可见，电流反射系数与电压反射系数大小相等，符号相反。

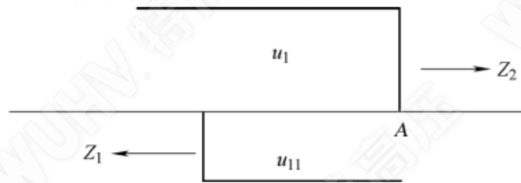


图 A.2 行波的反射

A.2.1.2 行波的折射

如图 A.3 所示，行波在 A 点发生折射时，折射系数可用折射电压（电流）行波 u_{12} (i_{12}) 与入射电压（电流）行波 u_1 (i_1) 之比表示，行波的电压折射系数的计算按公式 (A.3)。

$$\beta_u = \frac{u_{12}}{u_1} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (A.3)$$

行波的电流折射系数与行波的电压折射系数相同。

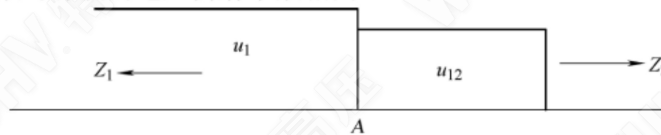


图 A.3 行波的折射

A.2.2 RSO 试验原理

RSO 试验应用的是波过程理论。当信号发生器发出的低压冲击脉冲波沿绕组传播到阻抗突变点的时候，会导致反射波和折射波的出现，因此会在监测点测得与正常回路无阻抗突变时不同的响应特性曲线。匝间短路的程度通过故障点处的波阻抗变化大小来反映，显示在波形图上可以用两个响应特性曲线合成的平展程度来判定，有突出的地方说明匝间存在异常，并且突出的波幅大小就表明短路故障的严重程度。因此，即使绕组出现一匝短路故障，应用 RSO 技术对故障识别也有很高的灵敏度。

转子绕组可近似看做一简单的传输线，冲击波在其上的传播主要是由绕组导体在槽中的几何形状和绝缘特性决定的。绕组的耦合作用将使冲击波发生散射，但对于实心转子来说，这种散射作用的影响是不大的。当冲击波加到转子集电环的一端时，冲击波的幅度由冲击波发生器内阻和绕组波阻抗所决定。冲击波从绕组的一端集电环传到另一端的时间由绕组的长度和波在绕组中的传播速度来决定。如果绕组的另一端是开路的，则反射系数 $\alpha=1$ ；如果是短路的，则 $\alpha=-1$ 。反射波再返回到冲击波发生器处时，若发生器的内阻抗与波阻抗相等（在电源端 $\alpha=0$ ），则冲击波被吸收，不再发生反射。由于匝间短路点的位置和程度不同，行波发生反射、折射的时刻及程度也不相同，故所测得的响应波形信号中必然包含了匝间短路故障的信息（短路程度及短路位置）。

A.3 试验设备简介

A.3.1 SDF-9 型故障模拟试验机组

SDF-9 型故障模拟试验机组是一台直流电动机—三相同步发电机组。它可以模拟多种情况下的定子绕组匝间短路和转子绕组匝间短路。该模拟发电机组的基本数据见表 A.1。

发电机转子共有两极，每极转子虚槽数为 8，实槽数为 6，大齿所占槽数为 3。转子并联绕组根数为 1 根，转子每槽导线根数为 160 根，励磁绕组每极匝数为 480 匝。励磁绕组在 20℃ 时的电阻为 7.8 Ω。转子绕组抽头分布如图 A.4 所示，L2、L3 为励磁绕组中某一极绕组上的抽头，分别为 3%、15%；L4 为励磁绕组中另一极绕组上的抽头，为 6%。

表 A.1 模拟发电机组基本数据

模拟发电机型号	额定容量 kVA	额定电压 V	功率因数	额定转速 r/min	额定频率 Hz	极数
SDF-9	7.5	400	0.8	3 000	50	2



图 A.4 模拟发电机转子绕组抽头分布图

A.3.2 HP33120A 函数/任意波形发生器

该发生器可产生 15 MHz 正弦波、方波、三角波和噪声波等函数信号，内置 AM、FM、FSK 等功能，具有 GPIB 和 RS-232 标准接口，并可由 Benchlink Arb 软件编程产生任意波形。其准确度为 12 bit，采样率为 40 MS/s，存储深度为 16 000 个点。HF33120A 函数/任意波形发生器能产生标准波形为正弦波、方波、三角波、锯齿波、噪声波、直流、 $\sin(x)/x$ 波、负锯齿波、上升指数上升波、指数下降波、Cardiac 波。

A.3.3 Tektronix TPS 2014 隔离通道数字示波器

该数字示波器具有 100 MHz 和 200 MHz 带宽，最高实时取样速率为 2 GS/s，拥有 2 个或 4 个完全隔离和浮动通道，以及隔离的外部触发，使用 OpenChoice 软件或集成 CompactFlash 大容量存储器，可快速编制文档和分析测量结果，并且该数字示波器有所有型号的 FFT 标准配置，可以进行 11 种自动测量。

A.4 RSO 离线试验及分析

A.4.1 RSO 离线试验

A.4.1.1 试验接线图及步骤

RSO 离线试验接线图如图 A.5 所示。其主要试验步骤如下：

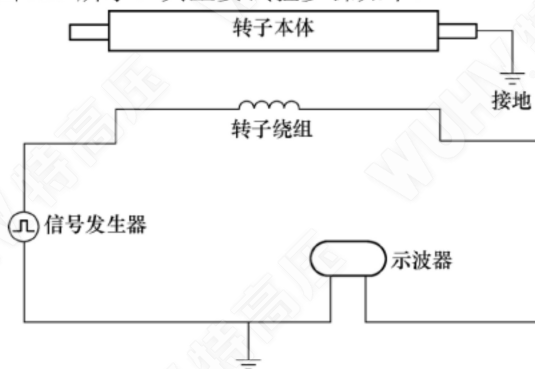


图 A.5 RSO 离线试验接线图

- 按图 A.5 进行接线；
- 将信号发生器输出调为 4 V、1 000 Hz、方波；
- 选择示波器中一个通道，并将示波器调为自动触发方式，采样频率 20 kS/s，记录 2 500 点；
- 在发电机转子绕组正常情况下，在图 A.4 中 L1 端加入输入信号，在 L5 端测输出波形，波形以图片的形式输出，存储波形图片，并将与图片相对应的波形的数据信息以 Microsoft Excel 逗号分隔值文件格式进行保存，为下面的数据处理做准备；
- 同样是在发电机转子绕组正常情况下，在 L5 端加入输入信号，在 L1 端测输出波形，并存储波

形图片和数据；

- f) 重复步骤 d)、e) 进行各种转子绕组匝间短路情况下的测量和存储，直到各种短路情况都测量完毕。

其中需要注意的是，试验中采用的是 1 000 Hz 的方波，用方波的上升沿来代替冲击脉冲波作用于转子绕组，所产生的效果并不受到影响。

A.4.1.2 试验波形

图 A.6 所示为试验过程中转子处于正常状态和一种匝间短路情况下的输出波形。

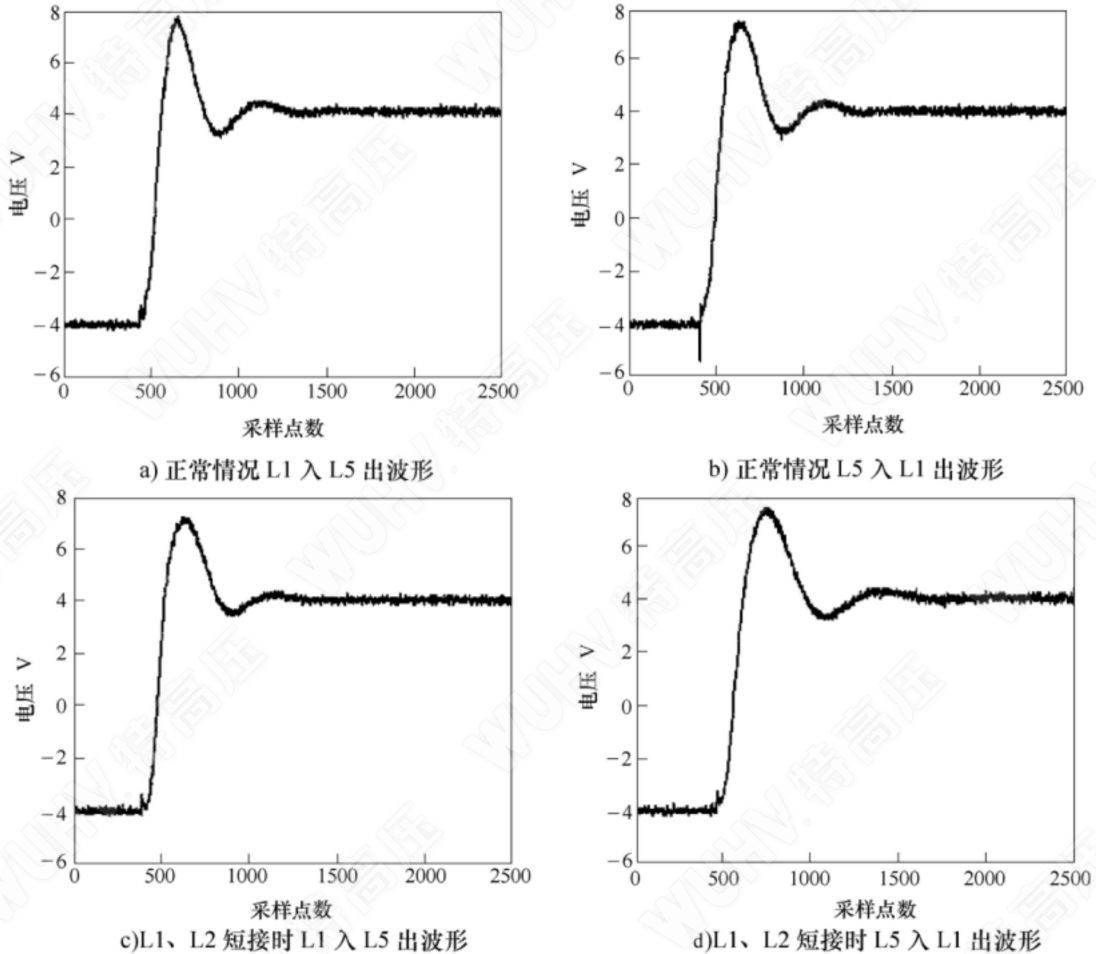


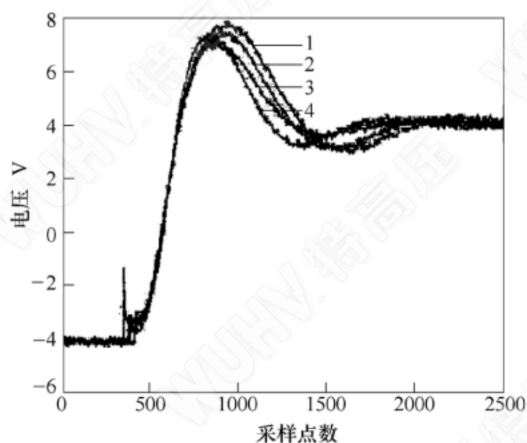
图 A.6 RSO 离线试验波形

A.4.1.3 RSO 波形分析

所测得的波形实际上是 1 000 Hz 方波输入后其响应波形一个周期内的一段。在这一段中，电压由上一周期的稳态值 -4 V 突变到 7.5 V 左右，恰为其输入值的近两倍。然后经过一系列的振荡进入新的稳态值 4 V。故障点的不同会导致振荡过程的差异，从图 A.7 可看出，对处在同一极的匝间短路越严重，其振荡时间越短。

为了最大限度地提取 RSO 波形中所含有的反映匝间短路的信息，将同一短接情况下分别在两侧测得的波形相减可获得特征信号。特征信号采集示意图如图 A.8 所示。

几种情况下特征信号波形如图 A.9 所示。从特征波形图中可看出，对于处于不同磁极的匝间短路，其特征波形在走势上恰好相反。匝间短路程度越严重，其特征波形与横轴所围的面积越大；当匝间无短路情况时，其特征波形基本上是一条与横轴平行的直线，如图 A.9 中波形曲线 1 所示。这与从理论上所推导出的结论吻合。



说明:

1——正常; 2——L4、L5 短接 (6%); 3——L1、L2 短接 (3%); 4——L2、L3 短接 (12%)。

图 A.7 L1 入 L5 出时几种情况比较

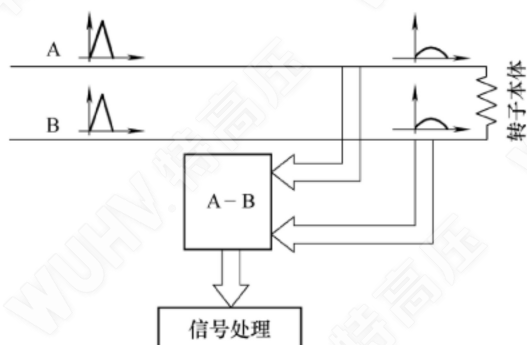
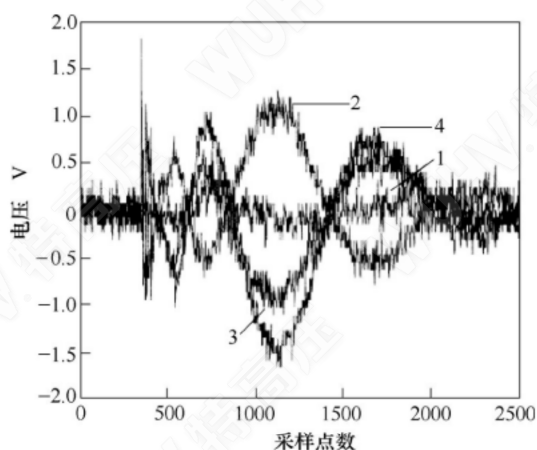


图 A.8 RSO 试验特征信号采集示意图



说明:

1——正常; 2——L4、L5 短接 (6%); 3——L1、L2 短接 (3%); 4——L2、L3 短接 (12%)。

图 A.9 几种情况下特征信号波形图

版权专有 侵权必究

*

书号: 15111·11754

定价: 15.00 元