|  |  |
| --- | --- |
| ICS |  |
| CCS | |  | | --- | | D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.png CGS |   XXX |

     团体标准

T/CGS XXXX—XXXX

油气勘探装备智能导钻仪器三轴振动试验方法

Tri-axis simultaneous vibration test vibration test method for

intelligent petroleum exploration equipment

     - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国地球物理学会  发布

目次

[前言 II](#_Toc197526519)

[1 范围 1](#_Toc197526520)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc197526521)

[3 术语和定义 1](#_Toc197526522)

[4 符号 2](#_Toc197526523)

[5 试验要求 2](#_Toc197526524)

[5.1 试验环境要求 2](#_Toc197526525)

[5.2 试验条件要求 3](#_Toc197526526)

[5.3 测量点及控制点 3](#_Toc197526527)

[5.4 试验允差 3](#_Toc197526528)

[6 试验设备要求 3](#_Toc197526529)

[6.1 一般要求 3](#_Toc197526530)

[6.2 三轴振动台 3](#_Toc197526531)

[6.3 振动控制系统 3](#_Toc197526532)

[6.4 振动测量和分析系统 3](#_Toc197526533)

[6.5 振动试验夹具 4](#_Toc197526534)

[7 试验程序 4](#_Toc197526535)

[7.1 试验流程 4](#_Toc197526536)

[7.2 试验准备 5](#_Toc197526537)

[7.3 试验实施 5](#_Toc197526538)

[8 试验中断及其处理 5](#_Toc197526539)

[8.1 试验设备故障引起的中断 6](#_Toc197526540)

[8.2 产品失效引起的中断 6](#_Toc197526541)

[8.3 试验超差引起的中断 6](#_Toc197526542)

[9 试验结果 6](#_Toc197526543)

[9.1 试验数据记录信息 6](#_Toc197526544)

[9.2 试验判据 6](#_Toc197526545)

[10 试验报告 6](#_Toc197526546)

[附录A（资料性） 多台多轴振动试验控制原理 7](#_Toc197526547)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任，本文件由中国地球物理学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院微电子所、中国石油集团测井有限公司、中海油田服务股份有限公司、中石化石油工程技术研究院有限公司、渤海钻探定向井技术服务分公司、苏州苏试试验集团股份有限公司。

本文件主要起草人：xxx、xxx、xxxx。

油气勘探装备智能导钻仪器三轴振动试验方法

* 1. 范围

本文件规定了利用电动振动台进行石油勘探装备智能导钻仪器三轴向同时激振的振动试验方法的术语和定义、目的、试验系统、试验方法、试验实施等要求。本文件适用于石油勘探装备智能导钻仪器三轴向振动试验，其他产品的三轴向振动试验可参考使用。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 2298 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 2423.62 环境试验 第2部分:试验方法 试验Fx和导则:多输入多输出振动

GB/T 14499 地球物理勘查技术符号

GB/T 44401 三轴同振电动振动试验系统

GJB 8547 军用装备多激振器振动试验方法

SY/T 5102 石油勘探开发仪器基本环境试验方法

GF/T 197 产品多台多轴振动试验方法

* 1. 术语和定义

GB/T 2298、GB/T 44401、GB/T 44400、GB/T 197 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

**智能导钻 Intelligent Drilling Guidance**

智能导钻是一种利用先进的传感器技术、自动化控制技术和人工智能算法，实时监测地质条件和钻探过程参数，并根据预设目标和实时数据自动调整钻探方向和参数的钻探技术，井下仪器包括地质导向工具、旋转导向工具、井地高速传输仪器等。

**三轴同振电动振动试验系统 tri-axissimultaneous electrodynamic testing system**

至少由3个电动振动发生器组成，可同时进行3个正交轴线方向振动的试验系统。

[来源:GB/T 44401,3.1]

**机械耦合装置 mechanical decoupling device**

三轴同振机械耦合装置是能将三个正交轴线方向的单向激励合成三轴同时振动的装置

[来源:GB/T 44401,4]

**方阵控制 square control**

振动控制点数量等于激振数量的多输入多输出控制方式。

[来源:GF/T 197,3.3]

**长方阵控制 rectangular control**

振动控制点数量不等于激振数量的控制方式。

[来源:GF/T 197,3.4]

**限制控制 limit control**

使测量点的响应不大于规定的试验谱的控制方式。

**限制谱 limit profile**

进行限制控制的试验谱。

**限制点 limit points**

进行限制控制的测量点。

**自由度 degrees of freedom**

完全确定一个机械系统状态所需要的最少广义坐标个数。

[来源:GB/T2298,2.27 ]

* 1. 符号

表1中的符号适用于本文件,其他符号参照GB/T 14499的规定执行。

表1 符号及说明

| 符号 | 名称 | 单位 | 符号说明 |
| --- | --- | --- | --- |
| PSD | 加速度功率谱密度 | g²/Hz | 描述振动时域信号功率在频域上的分布 |
| Oct | 倍频程 | / | 一种频率间隔的相对度量，应用频率能量分布的描述与评估 |
| RMS | 均方根值 | g | 描述信号的有效值，能够反映振动能量大小 |
| MIMO | 多输入多输出 | **/** | 描述通过多路响应信号和多路驱动输出信号进行振动控制 |
| MISO | 多输入单输出 | **/** | 描述通过多路响应信号和单路驱动输出信号进行振动控制 |

* 1. 试验要求
     1. 试验环境要求

宜在下列标准大气条件下进行试验：

1. 温度：15℃～35℃；
2. 相对湿度：20%～80%；
3. 大气压力：试验场所气压；

如果现场环境条件不能满足要求，需要将实际环境数据进行记录，应对试验件、试验设备等进行评估，确认环境条件对试验结果无影响后方可开展试验。

* + 1. 试验条件要求
       1. 正弦振动试验

试验条件应以钻井过程中测得的能够反映产品寿命周期的实际振动数据为依据，当没有实测数据，或实测数据信息不充分时，可按照SY/T 5102石油勘探开发仪器基本环境试验方法中13.1中规定的试验条件选取相关参数。

* + - 1. 随机振动试验

试验条件应以钻井过程中测得的能够反映产品寿命周期的实际振动数据为依据，当没有实测数据，或实测数据信息不充分时，可按照SY/T 5102石油勘探开发仪器基本环境试验方法中15.1.1中规定的试验条件选取相关参数。

* + 1. 测量点及控制点

对于三轴振动试验宜选择3个控制点进行方阵控制。测量点需标注出是内部还是外部点。测量点和控制点数目总和不能大于控制器的可测量通道数量。控制方法参见A.3.

* + 1. 试验允差
       1. 正弦振动试验

用方阵控制且未进行限制控制的情况下，正弦振动试验的允差要求参照GJB8547 军用装备多激振器振动试验方法.7.3.2.3正弦振动控制允差：

在整个试验频率范围内，正弦峰值加速度偏差在规定值的±10%以内，在共振段可允许为±20%。

任意两个振动控制相位差偏差在±10%以内。

* + - 1. 随机振动试验

随机振动试验的允差要求参照GJB8547 军用装备多激振器振动试验方法.7.3.2.2随机振动控制允差：

在整个试验频率范围内，自功率谱密度的控制允差在±3dB以内；500Hz以上可以为±6dB，但超过±3dB的累积带宽宜限制在整个试验频率范围的10%以内；自功率谱均方根值与规定值的偏差在±20%以内。试验中宜通过调试试验使互功率谱密度最大程度接近规定要求。

* 1. 试验设备要求
     1. 一般要求

应确保试验设备状态完好，满足试验方法、试验条件和试验容差要求。有计量检定要求的试验设备应计量检定合格并在检定有效期内。

* + 1. 三轴振动台

三轴振动台的要求依据 GB/T 44401 4~6章规定执行。

* + 1. 振动控制系统

振动控制系统要求如下：

1. 控制频率范围应满足2Hz～2000Hz。频率示值误差、正弦信号失真度、随机闭环加速度功率谱控制动态范围等要求应该满足计量检定中要求。任意两通道一致性应满足：同步采样，幅值比小于等于0.25dB,相位差小于等于0.5°；
2. 应具备多输入多输出振动控制的功能，输入通道和输出数量均不少于3个；实时闭环控制的控制点自谱、互谱、相干系数和相位符合预置要求，频谱线数可选。
   * 1. 振动测量和分析系统

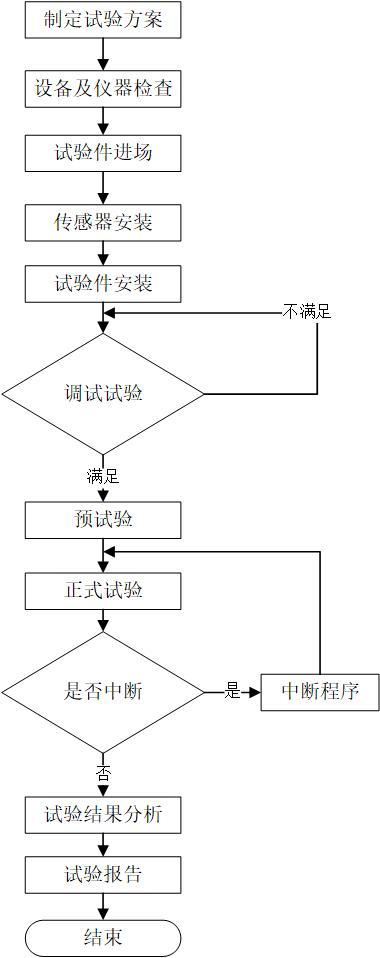
振动测量和分析系统要求如下：

1. 控制频率范围至少满足2Hz～2000Hz；加速度传感器工作频率应覆盖试验频率范围，量程应大于测量点响应均方根值的5倍以上，且能满足计量检定规程规定的测量精度要求；
2. 具有自功率谱密度、互功率谱密度、相干、相位、频率响应等分析功能。
   * 1. 振动试验夹具

振动试验夹具要求如下：

1. 夹具应选用比刚度大和阻尼大的材料，如铝合金、铝镁合金；
2. 夹具采用整体式结构，避免螺栓连接；
3. 试验前应通过分析和试验的手段来评价夹具的动态特性，试验频率范围内不应有过大的放大或衰减以致影响试验的进行；
4. 避免在试验频率范围内发生夹具—试验件—振动台耦合共振；
5. 夹具加工完成后，应与试验件进行预安装以确认协调性，必要时进行局部修整。
   1. 试验程序
      1. 试验流程

三轴振动试验流程见图1。



1. 试验流程图
   * 1. 试验准备
        1. 制定试验实施方案

宜在试验前编制试验方案并评审，试验方案应包含以下内容：

1. 试验设备的选取；
2. 激励方案；
3. 控制方案；
4. 试验安装方案；
5. 试验夹具设计；
6. 模拟件或工艺件要求；
   * + 1. 状态确认

检查试验件技术状态，确保试验件满足相关技术文件规定的技术状态要求。

* + 1. 试验实施
       1. 传感器安装

传感器的安装应为刚性连接，与试验件之间应进行绝缘，宜使用速干胶水粘接，传感器与试验件之间应有胶木块等绝缘隔层。

* + - 1. 试验件安装

将试验件通过试验夹具固定在振动台台面上。

* + - 1. 调试试验

安装完成后，根据7.2.1控制方案开展调试试验。随机试验功率谱密度值宜小于或等于正式试验条件的1／9，正弦试验量级宜小于或等于0.1g。对调试试验结果进行分析，根据调试结果优化控制方案。

* + - 1. 预试验

试验流程复杂或者试验量级大的试验宜在正式试验前进行预试验，试验件技术状态和试验流程应与正式试验一致。根据调试试验确定的控制方案开展预试验。随机试验功率谱密度值宜为正式试验条件的1／9，正弦试验量级宜为0.1g，试验时间宜小于正式试验时间。对预试验结果进行分析，确认后开展正式试验。

* + - 1. 正式试验

预试验通过后，开展正式试验，具体步骤如下：

1. 确认预试试验后的试验仪器与设备、试验件状态完好；
2. 根据试验要求对试验件进行初始检测，记录测试结果；
3. 按规定试验条件开展试验；
4. 试验中按要求记录振动数据；
5. 试验中按要求开展试验件检测；
6. 试验过程中进行监测，监测内容包括：振动控制、测量点响应、试验设备运行情况、夹具螺栓连接情况、试验件的功能和性能。
7. 达到要求的试验持续时间，停止试验；
8. 试验后按要求开展试验件检测；
9. 试验后对振动控制和测量数据进行处理和分析；
10. 填写相关运行记录和试验记录；
11. 完成全部试验内容；
12. 与委托方协商后，拆卸试验件，进行相关检查；
13. 试验结束。
    1. 试验中断及其处理
       1. 试验设备故障引起的中断

若由于试验设备异常引起的中断，需要对振动控制和响应数据进行分析与评价，分析试验中断对试验件影响。若无不良影响，则修复试验设备后从中断点继续试验。若存在不良影响，应立即向委托方通报，经双方共同分析、评估对试验件的影响，根据分析结果决定后续试验方案。

* + 1. 产品失效引起的中断

若因试验件的失效而中断试验，需要分析失效原因。若失效原因不影响对试验件功能性能的判断，处理完成后可从中断点继续试验。若试验件失效是由某一部件的失效引起的，终止本次试验，再分析确定是否更换试验件或修复失效部件后，重新开始试验。

* + 1. 试验超差引起的中断

若试验中断前一段时间内试验量级超出容差下限，故障排除后，重新进行试验，试验时间为试验条件要求的时间减去中断前没有欠试验的时间。当出现过试验时，应判断过试验是否对试验件造成不良影响，是否需要更换试验件重新进行试验。

* 1. 试验结果
     1. 试验数据记录信息

试验后应记录的信息如下：

1. 试验件的外观、功能和性能检查结果；
2. 试验顺序和过程；
3. 振动试验条件；
4. 对试验要求或技术状态的偏离及说明；
5. 控制点和监测点传感器响应的数据分析；
6. 异常数据测量结果分析；
7. 试验中断的记录及处理结果。
   * 1. 试验判据

当试验件满足下列情况时，则认为产品通过试验考核：

1. 振动控制满足规定的试验条件及允差要求；
2. 试验件的功能性能参数测试结果满足试验件有关标准和技术文件规定的要求。
   1. 试验报告

试验报告应至少包含以下内容：

1. 试验依据；
2. 试验目的；
3. 试验件信息；
4. 试验仪器与设备信息；
5. 试验条件；
6. 试验系统；
7. 试验方法；
8. 试验过程；
9. 试验数据与分析；
10. 试验结论。

2. （资料性）  
   多台多轴振动试验控制原理
   1. 目的

本附录给出了一种多台多轴振动试验控制原理。在图1a）所示的典型公共台面振动试验系统上开展三轴三自由度振动试验时，可参照本方法。

* 1. 概述

多台多轴振动试验两个重要的参数设置为：输入/输出矩阵的设置、目标参考谱的设置。

多台多轴振动试验方法与试验条件的定义形式有关，如果试验条件按照本文件6.4（g）的方法定义，多台多轴振动试验方法与多点并激试验（多点同轴向激励）的试验方法是一样的，唯一不同的是传感器的粘贴方向应与试验要求的一致。

当试验条件按照本文件6.4（f）的方法制定时，除了需要设置各自由度的相关参考信息（参考谱、相干和相位）外，还要设置输入矩阵和输出矩阵。而且在试验前，还需要将转动自由度的角加速度参考谱转换为线加速度参考谱。因此，大纲或任务书给出的试验参考信息不能直接进行设置，需要进行一定的变换，同时需要求解输入和输出矩阵。

不同的多台多轴振动试验系统，输入和输出矩阵的形式是不一样的，需要针对试验系统的搭建方式、传感器的布局方案，建立输入和输出矩阵。图1a）所示的三轴六自由度系统是最具有代表性的典型公共台面振动试验系统，本附录以该系统为例，说明试验条件按照6.4本文件（f）的系统制定时，多台多轴振动试验的两个重要矩阵的获取方法。

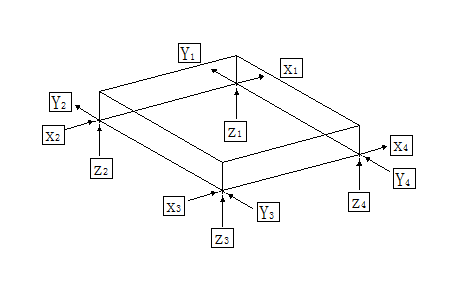
* 1. 控制方法

图A.a）所示的4-4-4的控制方式，、、方向分别由四个控制传感器控制，属于过度驱动。

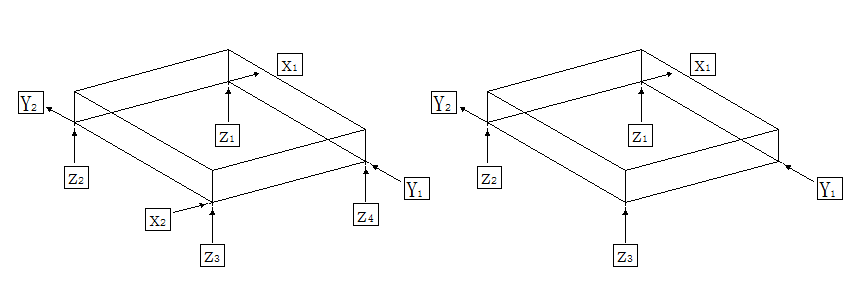
图A.b）所示的2-2-4的控制方式，、方向分别由两个控制传感器控制，方向由四个控制器控制，属于过度驱动。

图A.c）所示的1-2-3的控制方式，方向由一个控制器控制，方向由两个控制传感器控制，方向由三个控制器控制，属于正常驱动。

这三类控制方式均可复现试验件的三轴六自由度运动，不同点在于不同控制方式对应不同输入转换矩阵，可以根据试验系统选择合适的控制方法。



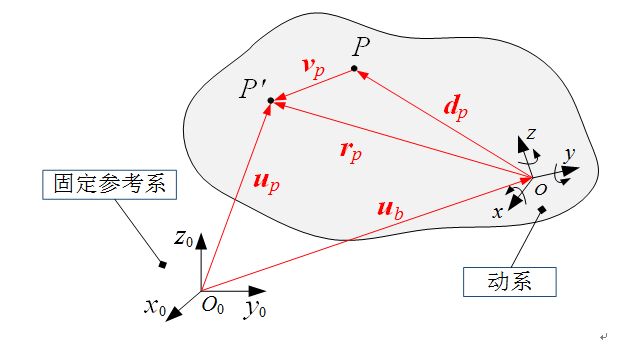
a）4-4-4控制方式



b）2-2-4控制方式 c）1-2-3控制方式

* 1. 多台多轴振动试验控制方法示意图
  2. 输入矩阵

建立采集的线振动加速度与六自由度振动加速度之间的关系，最后通过合理的简化假设得到输入转换矩阵的宜表达式。

  
图A.2六自由度振动试验系统加速度分析

考虑如图B.2所示的振动系统，其中固定参考系连接大地，动系连接振动台并随着时间发生运动。设点为结构上任意一点，点为结构发生弹性变形后点的位置。点的绝对位移矢量可以表示为：

...................（B.1）

其中，是点的绝对运动位移矢量，是动系的运动位移矢量,是点在动系中的运动位移矢量。矢量上面一横表示矢量在坐标系里的向量表示，和分别为惯性系和动系的基坐标矩阵。这里需要注意的是，动系的基坐标矩阵是时间的函数。

两个坐标系基向量矩阵通过欧拉旋转角矩阵表示为：

.................................（B.2）

其中，为欧拉旋转角矩阵。

对点的绝对位移求一次导数可以得到绝对速度，表示为：

...............................（B.3)

其中，为动系的角加速度矢量

对于六自由度振动控制，传感器宜布置在振动台体上，控制台体的六个刚体自由度。因此，若传感器布置在台面上，且假设台面为绝对刚性，则有：

.......................（B.4)

考虑到大多数随机振动试验中，结构的法向角速度相对很小以至于可以忽略，代入求解的：

......................（B.5)

考虑到振动试验中台体的转角很小(通常小于5°)，即：

 ......... .........................(B.6)

因此将上式用矢量矩阵形式表示，并用字母表示加速度，点的绝对加速度可以写成：

 ......... .....................(B.7)

其中：

......... ...................(B.8)

假定在振动台上布置个三轴向传感器，可以得出：

..................(B.9)

其中，，和分别为坐标系三个轴向上的单位向量。根据上式（B.9），可得：

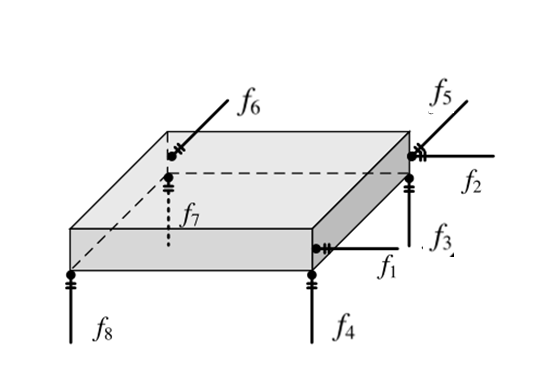
......... ................(B.10)

其中，输入转换矩阵定义为：

......... .............(B.11)

其中，表示对矩阵取伪逆。上标‘’表示对矩阵取转置。

* 1. 输出矩阵



图A.3振动台系统受力示意图

如图B.3所示，通过分析六自由度振动系统运动所需的六个合力与激振器实际所需施加激振力之间的关系，并推导得到了输出转换矩阵的宜表达式。图B.2给出了振动台系统受到个激振器作用的示意图，其中坐标系原点位于振动台的质心处。施加振动台体质心上的合力可以表示为：

..........................(B.12)

其中表示单位方向矢量，为激振器施加在振动台上的力。

施加振动台体质心上的合力矩可以表示为：

................................(B.13)

其中，是力臂矢量。将向量积用矩阵形式表示，则可以写为：

................(B.14)

合并上述矩阵可得：

..............(B.15)

式(B.15)可以写为：

.......................(B.16)

若实际想要控制的自由度数为(,为整数)，则上式写为：

......................(B.17)

是行满秩矩阵，因此，可以得出：

............(B.18)

因此，输出转换矩阵定义为：

.........................(B.19)

* 1. 多输入多输出随机控制原理

在用，，…，表示控制器生成的路随机驱动信号：，，…，表示控制点的路响应信号。假设多激振器振动试验系统为线性时不变系统。对于和作傅里叶变换后，系统响应与激励之间有式（B.20）所示的关系：

.........................(B.20)

式中：

—阶响应频谱向量；

—阶系统传递函数矩阵；

—阶驱动频谱向量；

—上标，表示矩阵转置。

对式(B.20)作变换可以得到式(B.21)：

.........................(B.21)

式中：

、—分别表示驱动和响应的自功率谱密度矩阵。

由式(B.21)可以得到驱动谱的计算公式为式(B.22)：

.........................(B.22)

当的时，为方阵：当时，为长方阵，的计算需要进行伪逆近似估计。

多激振器随机振动试验控制的目标就是使响应谱矩阵与参考谱矩阵匹配。控制器根据、矩阵的实测值实时修正，使与匹配。

在控制算法实现过程中，需要将驱动谱矩阵转换为解耦的驱动力时域信号，应用最广泛的是由David Smallwood提出的随机驱动信号产生方法，利用(B.23)求解耦的驱动频谱，在通过傅里叶逆变换等求出驱动力时域信号：

.........................(B.23)

式中：

——对或进行Cholesky分解产生的阶下三角矩阵；

——具有单位振幅和随机相位的白噪声频谱矩阵。

* 1. 多输入多输出正弦振动和波形再现控制原理

正弦振动和波形再现的控制原理与随机振动类似，其驱动频谱计算式为(B.24)：

.........................(B.24)

在正弦振动控制过程中，控制器根据和矩阵的实测值来实时修正，再通过式(B.24)来求解驱动谱。误差分析是通过时域信号来完成的，见式(B.25)：

......................... (B.25)

式中：

——响应时间历程误差；

——设定的参考时间历程；

对做傅里叶变换，得到误差的频谱，带入式(B.24)计算新的驱动谱，再通过傅里叶逆变换得到新的驱动信号，从而使响应不断逼近。

波形再现试验的整个时间历程[0，T]的面积误差计算方法见式(B.26)：

...........................(B.26)