

RIGOL

应用指南

电源动态响应测量

——DL3000 应用指南

2020.08

RIGOL TECHNOLOGIES CO., LTD.

前言

版权

©2020 普源精电科技股份有限公司

商标信息

RIGOL®是普源精电科技股份有限公司的英文名称和商标。

声明

- 本公司产品受中国及其它国家和地区的专利（包括已取得的和正在申请的专利）保护。
- 本公司保留改变规格及价格的权利。
- 本手册提供的信息取代以往出版的所有资料。
- 本手册提供的信息如有变更，恕不另行通知。
- 对于本手册可能包含的错误，或因手册所提供的信息及演绎的功能，以及因使用本手册而导致的任何偶然或继发的损失，**RIGOL**概不负责。
- 未经**RIGOL**事先书面许可，不得影印、复制或改编本手册的任何部分。

产品认证

RIGOL 认证本产品符合中国国家产品标准和行业产品标准及 ISO9001:2015 标准和 ISO14001:2015 标准，并进一步认证本产品符合其它国际标准组织成员的相关标准。

联系我们

如您在使用此产品或本手册的过程中有任何问题或需求，可与**RIGOL**联系：

电子邮箱：service@rigol.com

网址：www.rigol.com

概述

本文档主要介绍以下内容：

1. 动态响应测量在电源设计中的作用；
2. 如何使用 **DL3000** 及配套仪器进行测试环境搭建；
3. 如何对测试结果进行特征分析。

阅读提示：

完成全文阅读，大概需要 **15** 分钟时间。

1 简介

电源系统是整个电子设备的基石，一个电子设备通常需要一个或者数个电源单元才能支撑其运行，因此电源决定了整个系统的完整性和可靠性。

在电源量产中，我们需要和各种器件离散性做“斗争”。那么一个电源是否是稳定的、鲁棒的？在设计电源时，我们有必要对其性能做详尽的测试和验证，其中包括在动态负载条件下对电源进行稳定性评价。

1. 设计优良的电源到底“优良”在哪里？

一个设计优良的电源，应该具有以下特性：

- 较好的负载调整率和电源调整率
- 较好的负载动态响应和电源动态响应：恢复时间快，电压跌落/过冲小
- 其他指标，如纹波，效率，启动时间，输入浪涌电流，功率因数等

2. 何为负载动态响应？

动态响应性能，包含负载动态响应和电源动态响应，是电源非常重要的指标之一。负载动态响应指的是在恒压模式下，继输出电流规定大小的阶跃变化之后，输出电压恢复到规定百分数范围内的时间；或者在恒流模式下，针对输出电压规定大小的阶跃变化，输出电流恢复到规定百分比范围的时间。

在常见的电源应用中，当负载存在快速波动时保证输出电压的稳定是电源需要具备的性能之一，动态响应测试可以较好地评估电源内部稳压控制的稳定性。

3. 动态响应测试和伯德图有什么区别？

动态响应测试与伯德图都具有评估电源控制环路稳定性的功能，但是两者存在一定的差异，如下表所示：

测试项目	动态响应测试	伯德图测试
评估部分	电源的控制电路稳定性，负载响应	电源的控制电路稳定性（相位裕度，增益裕度等）
测试偏向	定性和定量（部分功能）测试	定量测试
测试准确度	一般	较高
测试时间	较快	较慢
测试环境搭建	较方便	较复杂
测试灵活性	很高	一般

表 1 差异说明

由于负载动态响应测试不需要对电源进行修改，测试连接简单，测试速度快，非常适合在电源生产过程中进行在线测试。

2 原理描述

常见的电源通常由两个部分组成：功率变换部分和控制部分，两者组成了一个闭环的系统。

常见的电源通常都可以简化为以下结构：

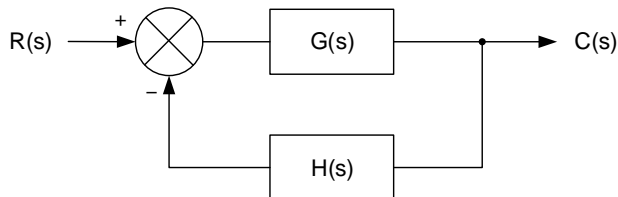


图 1 闭环系统结构图

这是一个非常经典的闭环系统结构图， $G(s)$ 通常是前向通道（功率变换部分的）传递函数，而反馈通路部分 $H(s)$ 和比较元件则是电源的控制部分， $R(s)$ 通常为电源的基准装置。

这个闭环系统的稳定性对于通常使用相位裕度和幅值裕度来判定系统的稳定性（LTI 系统）。

对于此系统，系统的开环传函为 $A(s)=G(s)H(s)$ ； $s=j\omega$

- 若 ω_c 为系统的截止频率： $A(\omega_c)=G(\omega_c)H(\omega_c)$
则相位裕度 $PM=180^\circ+\angle G(\omega_c)H(\omega_c)$
- 若 ω_c 为系统的穿越频率： $A(\omega_c)=G(\omega_c)H(\omega_c)$
则幅度裕度 $AM = \frac{1}{|G(\omega_c)H(\omega_c)|}$ （通常会进行二次转换为 dB）

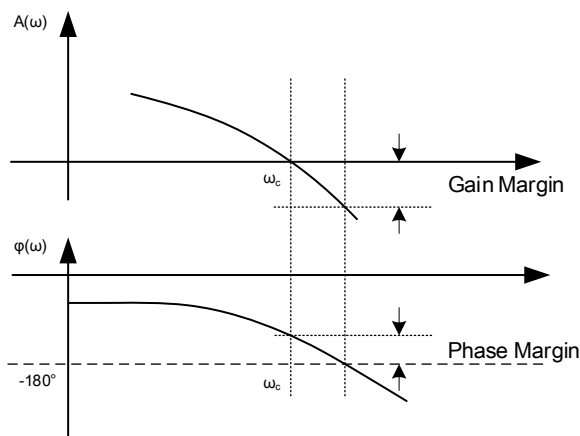


图 2 相位裕度和幅度裕度

实际运行的系统不可避免地会接收到来自内外部的扰动和干扰，即使控制电路良好屏蔽，器件本身也会带来一定的宽带噪声，这些都是系统的扰动源，并且可以注入到在整个控制环路的任意一个部分。因此电源的控制系统需要对系统带宽以外的扰动有足够的抵抗（衰减）能力。当然，对于相位裕度 ≥ 0 （=0:临界稳定）的电源系统，噪声因素可能并不会导致电源输出持续震荡。但是，相位裕度（频域）和动态响应（时域）存在一定的相关性，相位裕度较小意味着系统对外部扰动中包含 ω_0 [$\phi(\omega_0)=-180^\circ$]对应频率成分的衰减能力较弱， $R(s)$ 的阶跃将会导致系统输出产生震荡，并需要较长时间才能衰减至0并达到新的稳态。这意味着电源是极度敏感的。此外由于器件离散性，较低的相位裕度将导致部分电源相位裕度低于0。

因此，对于一个设计优良的电源来说，其相位裕度通常在 45° 甚至更高，此时从时域角度来说，系统对震荡的阻尼效果很好，输出波形在负载动态响应测试时不存在振铃。对于部分要求较高响应速度并允许部分超调的电源来说，相位裕度也不应该低于 30° ，此时振铃亦应该在3~4个周期内衰减至0。

通常的测试中，将扰动施加在 $R(s)$ 上（如一个扫频正弦波信号或者一个包含丰富谐波成分的脉冲波）并观察其响应是非常直观和便于理解的，伯德图即是使用这种方式运作。但是对于部分电源系统来说，这种调整“基准”的做法是不方便甚至不可操作的，此时，将扰动施加在输出侧将是一个较为合理的选择。虽然在理想系统中，输出的物理量如电压由于是一个仅取决于输入的理想模块，不随其他参量改变而改变，但是实际电源系统的输出电压通常会随着输出电流的变化改变（这也是需要反馈控制系统的缘故），这也为负载响应测试提供了可行性。

3 搭建测试环境

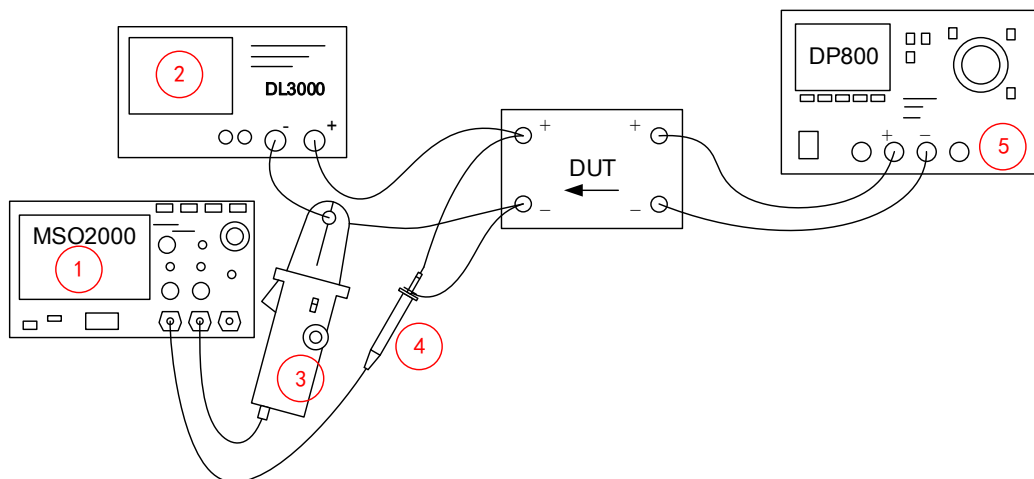


图 3 连接示意图

环境搭建所需仪器：

- ①：示波器（RIGOL 全系列示波器产品均可，如 DS/MSO7000、MSO2000 等型号）
- ②：电子负载（DL3000）
- ③：RP 系列或 PCA 系列电流探头（PCA 系列电流探头需搭配 DS/MSO7000、MSO8000 系列示波器使用）
- ④：RP 系列电压探头（如 PVP2350）
- ⑤：（可选）符合待测设备供电条件的供电设备（DP700/800/3000/5000 等系列产品，或由 DUT 可以接受的其他供电设备）

硬件系统的连接方式：

1. 将 DUT 的输出端子的正、负端分别连接一根电缆，电缆的载流量根据负载大小或者准许压降确定^[1]，并连接在 DL3000 的输入端子上。
2. 将合适衰减比例的 PR 系列电压探头连接在 DUT 输出端子^[2]。
3. 将 DUT 的输入端连接在符合要求的电源上，并接通电源。

说明：

注^[1]：过长的线缆会带来较大的寄生电感影响测量，甚至可能导致电子负载出现震荡，因此不建议使用较长的线缆，如果不可避免，建议将连接到 DUT 的两根线缆绞合在一起。

对于有些低压大电流应用，使用内阻较大的电缆可能导致电流稳定失败（UNREG）（电子负载在短路|SHORT|状态下依然存在一定导通电阻和接触电阻）。

注^[2]：在大电流应用中，输出端子压降将会带来显著影响，因此建议电压采样点应在 DUT 的 Sense 端，通常的，DUT 的 CV 采样回路的采样端和控制器的信号地可以作为电压采样端子位置。

4 操作步骤

Step1 连接硬件系统

1. 将 DUT 的输出端连接在 DL3000 电子负载的输入端子上（注意电源和负载极性）
2. 将合适的①电压探头并联在 DUT 输出端，探头连接到示波器的通道 1
3. 将 DUT 输入端与供电电源连接
4. 用电流探头②卡在 DUT 输出端的地线上，电流探头连接到示波器的通道 2

Step2 设定参数

1. 将 DL3000 设定为 CC（定电流）模式，按下前面板的[CON]按钮选择 Continual 模式，此时屏幕上将会显示设置向导，如下图所示：

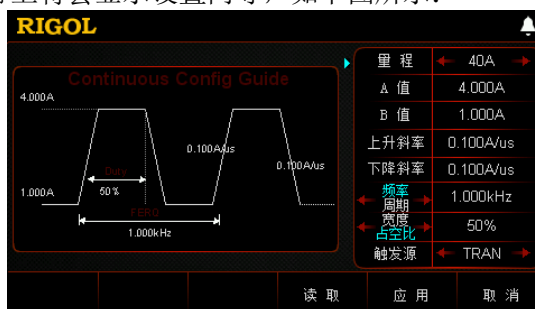


图 4 设置向导示意

2. 根据 DUT 的额定电流设定量程、A/B 值、斜率和频率。
 - A/B 值
A 值可以选定为 DUT 的额定电流；B 值初始值可以设定为 A 值的 80%，后续可以适当调节 B 值。
 - 斜率
斜率通常意味着从 A 值转换到 B 值的电流斜率，斜率越高意味着激励包含的频率分量越高，因此建议选择最大值。
 - 频率
通常来说 1KHz 50% 占空比作为初始参数是一个不错的选择。在后续测试中可以根据实际波形适当提高/降低。
3. 配置完成后点按[应用]使设定值生效。
4. 将示波器通道 1（电压探头监测通道）设定为 AC 耦合，垂直档位调节到合适范围（通常是 50 ~ 100 mV/Div）。
5. 将示波器电流探头连接在通道 2。
6. 示波器的触发通道选择为通道 2，触发边沿选择为“上升沿触发”，触发模式选择“普通”。



注意

RP 系列电压探头本身并不能提供 AC 耦合，因此即使动态测量时电压波动峰峰值电压较低，测量高电压输出的 DUT 时也必须使用合适衰减比例的电压探头，以避免损毁示波器的接口。

Step3 开始测试

DUT 上电后，点按 DL3000 的 [Tran] 进入连续测试，此时示波器理应用电流探头对应的通道进行正常触发。此时您应在示波器上看到类似下图的测试画面：

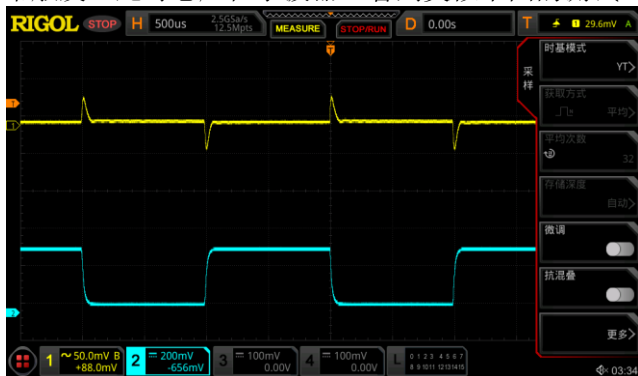


图 5 测试画面实例

适当调节示波器各个通道的衰减旋钮以及时基旋钮。你将可以获取到较为清晰的测试波形，上图中通道 2 为电流探头测量的电流波形，通道 1 为 DUT 输出端子上的电压波形。

上图展示的测试波形是一个设计良好的电源的动态响应，原则上，DUT 的响应波形也应该是上图中的样式。

5 操作要点

1. 如何对测试波形进行分析

根据实际 DUT 测试，可能会存在以下测试波形：

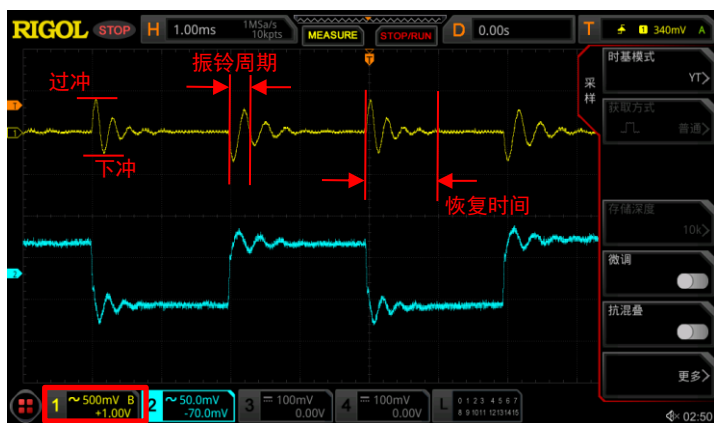


图 6 严重振铃的电压波形

可见此测试中 DUT 的输出电压在 Transition(跳变)过程中存在非常大的振荡(振铃)，此振荡频率通常在系统的开环传递函数在 180° 交越点所对应的频率附近。这也意味着系统的相位裕度很小，对此振荡频率的阻尼较弱。

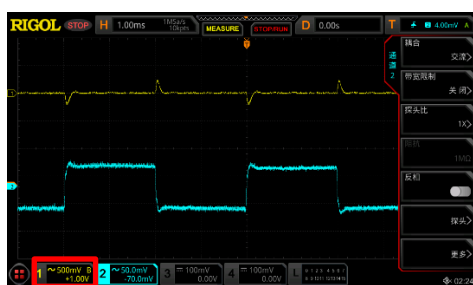


图 7 震荡衰减较快

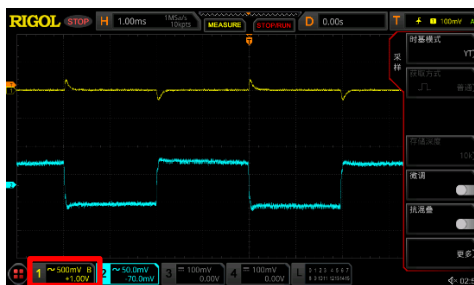


图 8 较为合理的动态响应

通过调整电路参数，可见响应波形逐渐改善（图 7），直至最后为右上图 8 所示的响应波形，可见振荡被快速阻尼，恢复时间也较为合理。此时系统的相位裕度已经较大，可以满足电源设计的需要。

相位裕度增加也会影响响应时间参数，这也是环路校正调整过程中需要综合考虑各项参数进行调节的原因。

相位裕度（频域）和响应波形（时域）存在一定的相关性，在右上图所示的测试波形中，相位裕度在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 左右，裕度较大。

2. 如何对测试图中的一些特征进行判别

1) 直流电压台阶

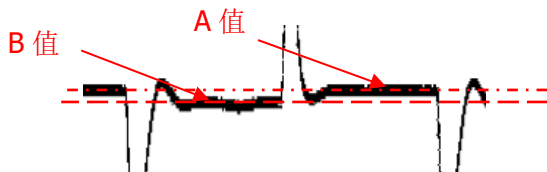


图 9 电压台阶

在测试中可能会出现动态响应 A/B 值所对应的电压不一致的情况，如上图的红色箭头指示，此时应该检查电流负载端子（功率回路）和电压采样端子（采样回路）的连接点是否正确。如果连接正确，则说明此电源电路具有相对较差的负载调整率，需要针对性地排查，如测量系统的开环增益是否足够大。

当然，部分数字控制的电源设备存在电压容许迟滞，部分电源设备也存在特定的补偿功能（如线路损耗补偿，此时应在大电流状态下得到更高的电压）等等，需要根据分析进行排除。

2) 较大的电压跌落和过冲

在部分测试中，可能会观测到如下的特征波形，这种波形通常更容易出现在线性稳压电路中。



图 10 较大的电压跌落和过冲（示意图）

在上述模拟波形中，我们可以观测到以下两个特征：

- 较大的电压跌落，有些情况下跌落较大甚至跌落至 0V，出现一个台阶。
- 较大的电压过冲，有些时候甚至等于输入电压，出现一个台阶。

这种情况的原因通常指向电源的输出滤波电容，电容的容值选取和整个反馈环路特性严重失配、电容的 ESR 特性劣化/虚焊、布线不合理可能都会导致此现象。

一般来说，线性电源器件对输出电容的容值要求更高。在负载电流迅速突变的情况下，如果输出滤波电容的容值过小，导致电压下降的速度远高于反馈电路控制调整管动作的速度，将会在加载电流时带来较大的电压跌落。反之，将会在卸载电流时带来较大的电压过冲。

部分电源系统可能需要驱动一些特定的负载装置，如 MOSFET/IGBT 驱动电路，闪光灯等装置，其主要的特点是存在较大的负载突变，其存在时间较短的大功率状态以及时间较长的空闲（低功率）状态。由于占空比（Duty Cycle）较低，因此其平均功率较低，在电源设计时，可能会存在电容容量选择不足的情况。

对于这种电路，使用动态响应测试功能可以非常直观地观察到电压的变化，对设计会有很大的帮助。

6 总结

本应用指南通过使用 DL3000 作为测试核心进行动态响应测试，可以快速地完成对电源产品的性能评估。

由于 DUT 的类型较多，因此有必要根据实际需求选择合适的仪器以备测试使用：

1. 电子负载^[1]：

DL3031:60A 150V 350W

DL3021:40A 150V 200W

注^[1]：测试高压/大电流输出的特定设备可能需要自备可用的电子负载或者功率电阻

2. 示波器：

RIGOL 全系列示波器产品均可应用于本测试中，若使用 PCA 系列电流探头则需要使用 DS/MSO7000、MSO8000 示波器

3. 电压探头：

RP 系列电压探头，根据 DUT 输出电压等级可以进行对应选择

4. 电流探头：

RP1001C/1002C/1003C/1004C/1005C

（RP1003C/1004C/1005C 需要使用 RP1000P 电源供应装置）

或选择 PCA 系列电流探头：PCA1030;PCA2030;PCA1150

PCA 系列探头需要搭配 DS/MSO7000、MSO8000 系列示波器使用。

5. 电源：

DP700/800/3000/5000 电源，或者符合 DUT 需求的其他电源来源。