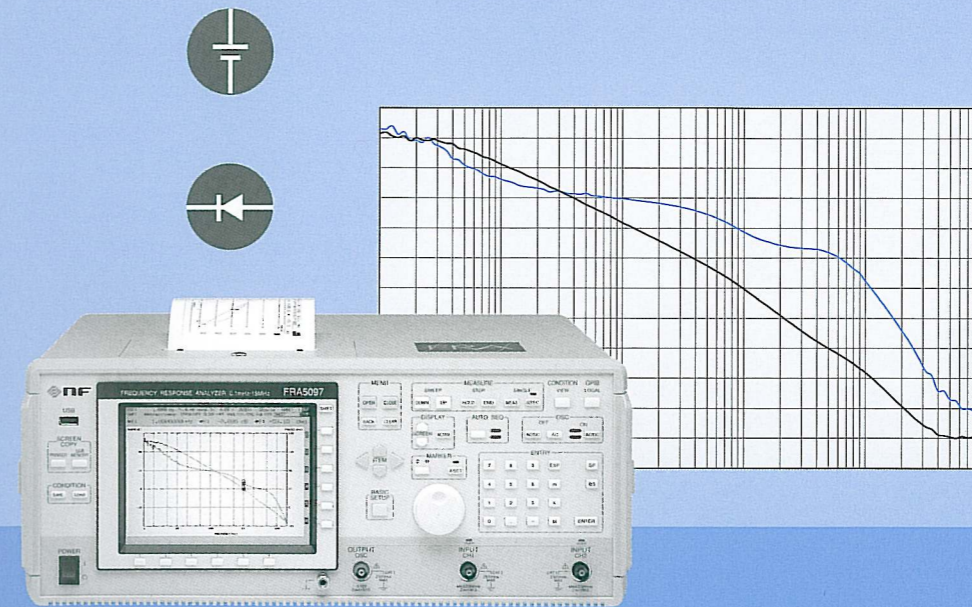


用频率特性分析仪进行的 开关电源的稳定性评估

用频率特性分析仪进行的
开关电源的稳定性评估



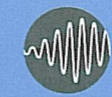
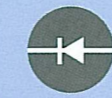
技术资料

株式会社 NF回路设计

- 上海代表处 上海市长宁区延安西路726号 华敏翰尊国际大厦22楼C室 邮编 200050
电话：021-6473-5735 传真：021-6415-6576
- 深圳代表处 深圳市福田区滨河大道5003号 爱地大厦东座17楼1701室 (邮编 518045)
电话：0755-8355-1866 传真：0755-8355-1214
- 总公司地址 日本国神奈川县横浜市港北区纲岛东6-3-20 (邮编 223-8508)
电话：+81-45-545-8128 传真：+81-45-545-8187

<http://www.nfcorp.co.jp/chinese/index.html>

恩益禧印刷制品贸易(上海)有限公司 上海市延安东路222号外滩中心3505室 (邮编 200002)



株式会社 NF回路设计

用频率特性分析仪进行的 开关电源的稳定性评估

■回路增益的测量 ■输出阻抗的测量 ■部件传导特性的测量 ■部件阻抗的测量

评估开关电源之际	1
1. 用频率特性分析仪测量回路增益	
1. 负反馈电路的稳定性	2
2. 测量回路增益 $A\beta$ 的方法	4
3. 用于测量开关电源的回路增益的测量仪	5
4. 回路增益的实际测量	6
4.1 测量顺序	6
4.2 测量举例	6
5. 测量时的注意事项	7
5.1 连接方法	7
5.2 注入电阻的电阻值	7
5.3 注入信号的强度	8
2. 用频率特性分析仪测量输出阻抗	
1. 测量开关电源的输出阻抗	9
2. 测量方法	9
3. 用于测量开关电源输出阻抗的测量仪器	10
4. 测量举例	11
3. 测量组成开关电源的零部件的传输特性	
1. 并联稳压器	12
1.1 在作为电压稳定元件时的测量	12
1.2 在作为误差放大器时的测量	13
2. 光电耦合器	14
3. 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路	15
4. LC滤波器	16
4. 用频率特性分析仪测量零部件的阻抗	
1. 电解电容器	18
2. 电感器	20
2.1 频率的影响	20
2.2 直流电流的影响	21

评估开关电源之际

开关电源作为OA器械等的电源，因其小巧，轻量，高效率而被广泛应用。开关电源的内部，采用开关回路和PWM技术，为使其作为输出阻抗低的恒定电压电源运作，其整体由负反馈电路构成。

负反馈电路是早就为人所熟知的有用技术，但是若稍有差错，就会引起异常振荡等缺点，所以其稳定性的评估就显得尤其重要。虽然评估负反馈电路稳定性的方法有好几种，但在定量评估之际，回路增益测量是必不可缺的。

另外，根据负反馈技术，输出阻抗可以被减低但不能达到零，因此作为表示性能的指标之一，掌握此值非常重要。

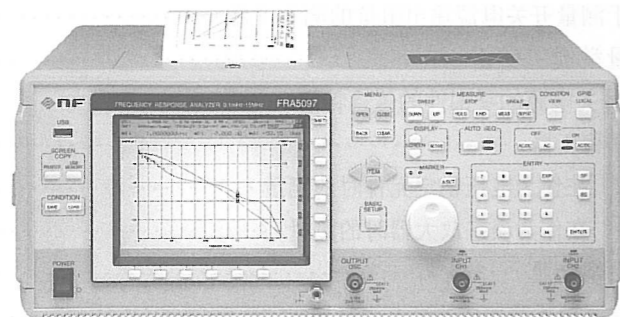
本稿使用本公司生产的频率特性分析仪(Frequency Response Analyzer 下称FRA)来对开关电源的回路增益测量法和输出阻抗的测量法进行解说。而且也介绍和开关电源特性渊源很深的电解电容的交流阻抗的测量方法。

使用FRA测量法，有如下特长：

- 在实际运作状态下，能在宽频带范围内，以增益 $\pm 0.05\text{dB}$ 、相位 $\pm 0.3^\circ$ 的高精度，短时间测量。
- 测量结果可以伯德(Bode)线图、尼奎斯特(Nyquist)线图的形式直接打印获得。由此，可立刻判断相位容限，增益容限等反馈电路的稳定性。
- 同样，输出阻抗的频率依赖性也能一目了然。
- 即使构成系统的模块有多个，也可在闭环状态下测量各模块的开环增益，而且对各模块的解析也很容易。
- 可轻易测量电子元件的阻抗的频率依赖性。

频率特性分析仪 FRA5087 / FRA5097

从伺服特性到所有频率特性的测量



FRA5097

- 增益精度 $\pm 0.05\text{dB}$
- 相位精度 $\pm 0.3^\circ$
- 动态范围 大于140dB
- 测量频率 FRA 5087 : 0.1MHz ~ 10MHz
FRA 5097 : 0.1MHz ~ 15MHz
- 绝缘电压 250Vrms
- 可输出伯德(Bode)线图、尼奎斯特(Nyquist)线图、尼科尔斯(Nichols)线图、科尔-科尔(Cole-Cole)线图
- 装备自动积分·振幅压缩·运算功能等
- 用USB储存器保存/读取测量数据
- 内置打印机&装有彩色液晶显示器
- 阻抗显示功能(FRA5087需要追加选购件)

1. 用频率特性分析仪测量回路增益

1. 负反馈电路的稳定性

负反馈电路的框图如下所示：

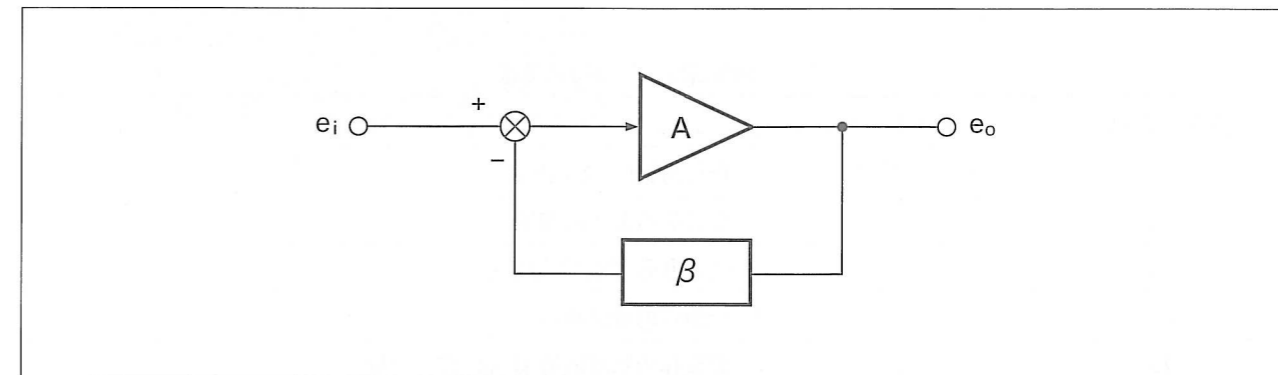


图1-1 负反馈回路的方框图

负反馈电路的增益可由下列公式求得：

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

但是，放大器的增益A不是固定的，由于是频率的函数，因而会随频率的增加而减少。同时，放大器输出输入的相位关系也是，与放大器的增益变化相关联，随频率一起变化的函数。在放大器的输出输入的相位量为超过 180° 的频率，并且回路增益大于1时，就会出现负反馈变成正反馈、产生异常振荡的不稳定状态。另外，放大器的相位量和回路增益因反馈量而有所不同，所以时而稳定时而不稳定。

因此，评估实际的负反馈电路的稳定性之际，测量如图1-2所示的回路增益 $A\beta$ 的频率特性非常有必要。

回路增益 $|A\beta|$ 及回路相位差 $\angle A\beta$ 的频率特性用伯德线图表示时，系统的稳定性可通过相位容限及增益容限来判断。理想的放大器，其相位移动量为 0° ，在负反馈电路中的回路相位差为 180° 是理想值。

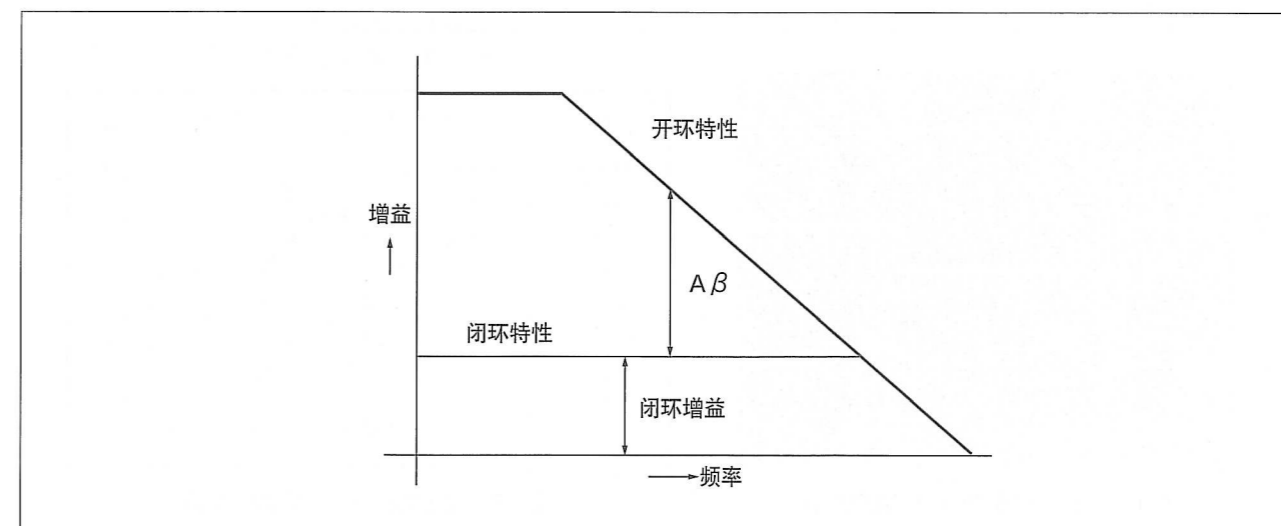


图1-2 负反馈放大器的开环增益对频率特性

相位容限,如图1-3所示,是指增益为0dB,频率为 f_1 时的回路相位差比 0° 大多少,也就是说回路相位差值。另外,回路相位差为 0° 频率为 f_2 时的增益,比0dB小多少,被定义为增益容限。一般来说,为保持闭环响应不出现峰值,相位容限 60° 以上,增益容限6dB以上是必要的。负反馈电路中的相位容限,可分别由相对应的约为 30° (图1-4, 1-5)和 80° (图1-6, 1-7)

时的矩形波(e_i)的响应波形(e_o)和伯德线图来表示。相位容限为 30° 时,可观察到回路增益为0dB的频率,产生了振荡效应。阶跃响应和相位容限、增益容限的关系,大致如表1所示。请注意相位容限和增益容限,不能只控制其中一方。图1-8为其不稳定的例子。

表1 相位容限, 增益容限的值

相位容限 [度]	增益容限 [dB]	
20	3	严重的振荡 数据极差
30	5	少量的振荡 数据较差
45	7	临界阻尼 最佳响应时间
60	10	一般性的合适数据
72	12	希望作为基准的值 闭环响应无峰值

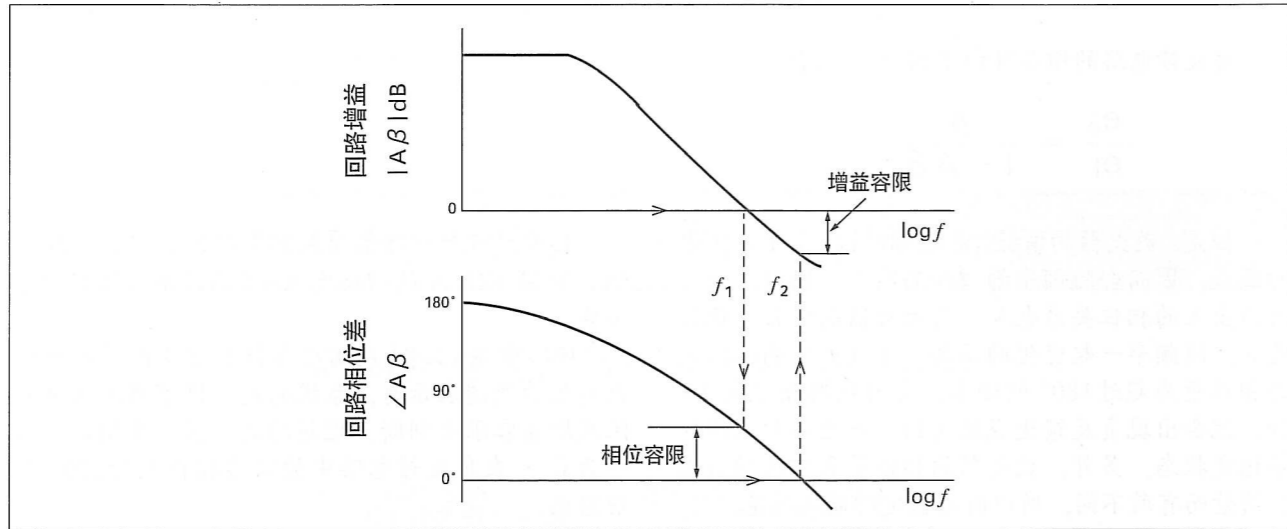


图1-3 伯德线和相位·增益容限

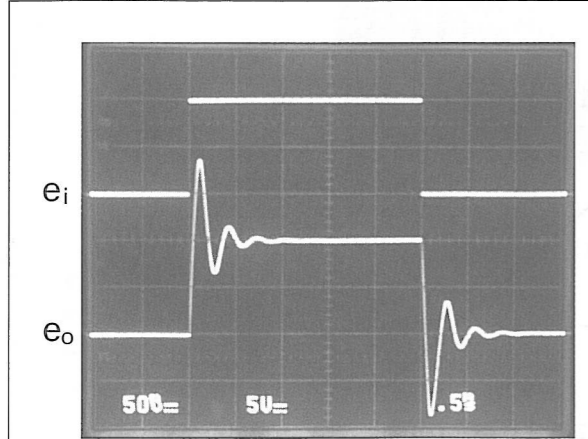


图1-4 相位容限 30° 时的响应波形

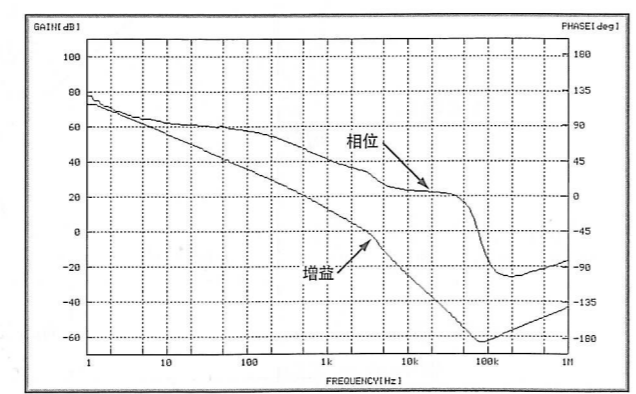


图1-5 相位容限 30° 时的伯德线图

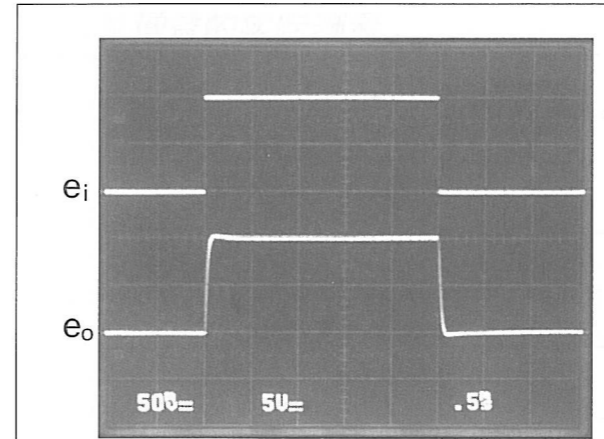


图1-6 相位容限 80° 时的响应波形

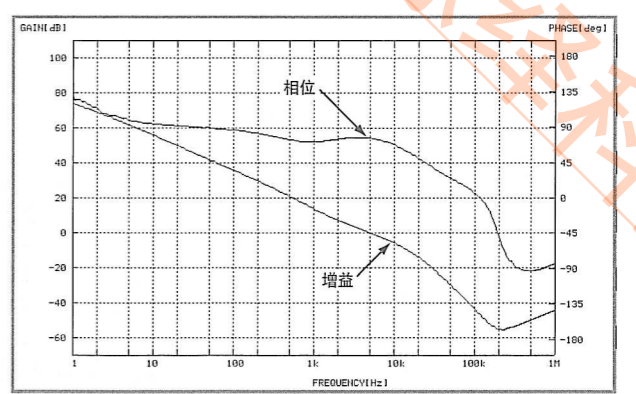


图1-7 相位容限 80° 时的伯德线图

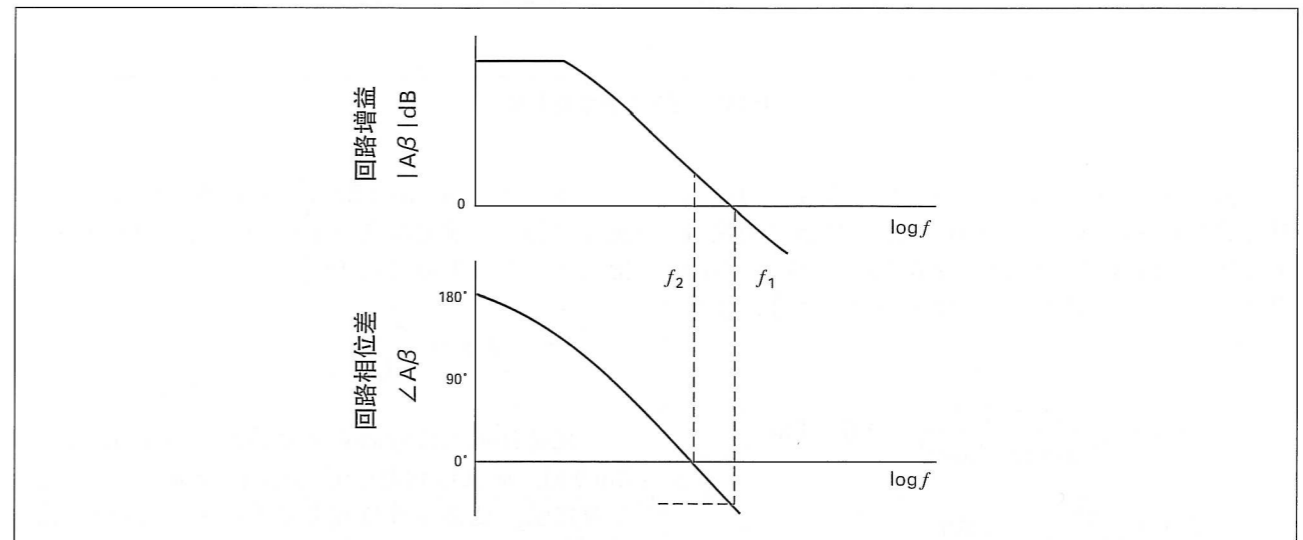


图1-8 不稳定情况下的伯德线图

2. 测量回路增益 $A\beta$ 的方法

回路增益的测量采用了给回路输入测量信号以后测量其响应的方法。这个方法可以在实际运行状态下测量回路增益,所以数据的可信度较高。这是开关电源的稳定性评价的主流测量方法。

作为给回路输入信号的方法,这里介绍简单而且实际上可以测得充分的数据的电阻法。测量框图及其等效电路如图1-9,图1-10所示。

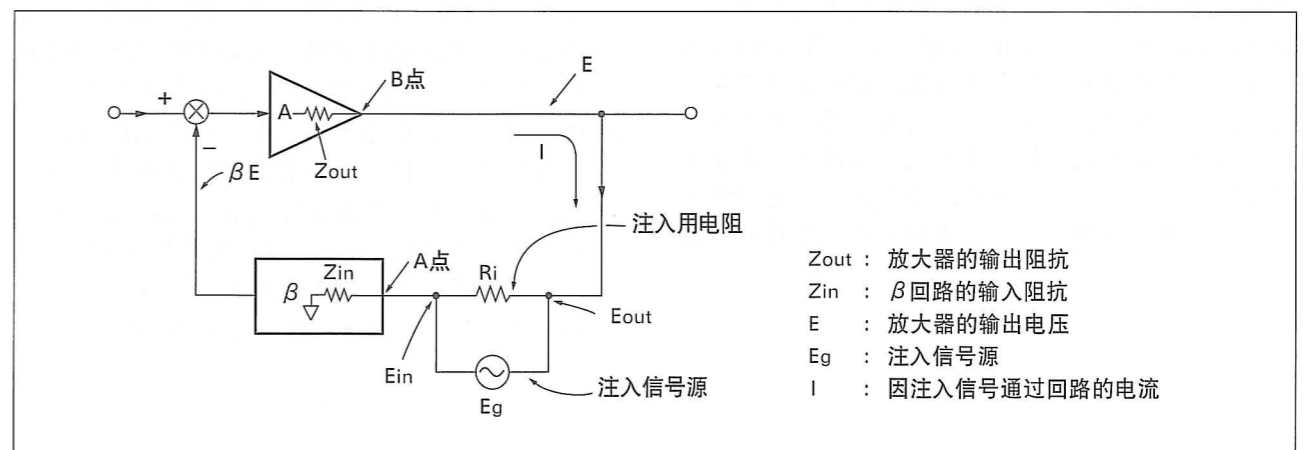


图1-9 回路设定框图

- Z_{out} : 放大器的输出阻抗
- Z_{in} : β 回路的输入阻抗
- E : 放大器的输出电压
- E_g : 注入信号源
- I : 因注入信号通过回路的电流

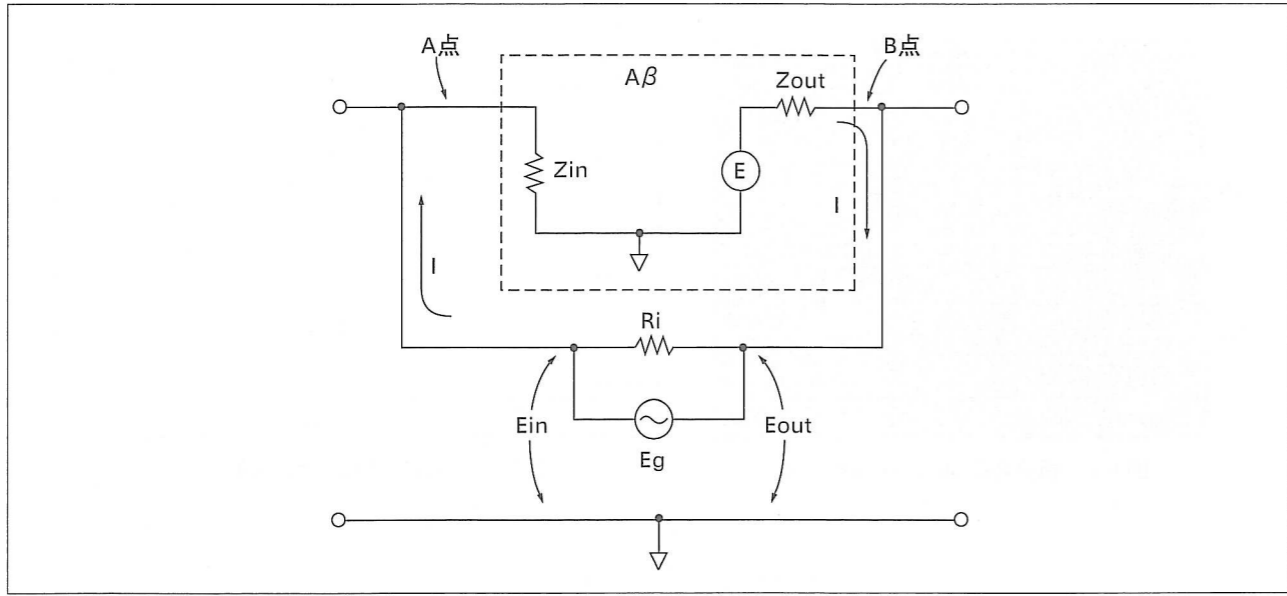


图1-10 图1-9的等效电路

在等效电路的A点，通过连接在信号注入用电阻Ri的输入信号源Eg，发生相对于GND(地线)的交流电压Ein。Ein通过Aβ增幅，在B点出现相对于GND(地线)的交流电压Eout。这时Eout和Ein的关系为下式：

$$E_{out} = \frac{(Z_{in} + R_i)}{(Z_{in} + R_i + Z_{out})} \cdot A\beta \cdot E_{in}$$

$$E_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_i} \cdot E_{out}$$

为了让 $Z_{in} \gg R_i$ ，而且为了让注入电阻接近于插入之前的状态 $E_{in} = E_{out}$ ，在 $Z_{in} \gg R_i$ 的情况下，变为下面的式子：

$$A\beta = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

就是说注入信号的点必须满足 $Z_{in} \gg Z_{out}$ 、 $Z_{in} \gg R_i$ 。而且Eout与Ein的关系在 $E_{out} - E_{in} = E_g$ 下为定量。这意味着随着由频率产生变化的Aβ值的变化，Eout与Ein的绝对值的大小关系也将产生变化。

3. 用于测量开关电源的回路增益的测量仪

回路增益如前面所述由测量信号注入点两端的电压比Eout/Ein的方法求出。

可是因为在开关电源中，测量频率范围内的测量水平产生100dB以上的变化，特别是在低频率部分由于回路增益 $A\beta = E_{out}/E_{in}$ 值很大，所以Ein变为非常小。如果信号强度变小的话，相对地噪声就会变大，所以测量信号的S/N值(信号噪声比)会劣化。而且，开关电源的情况下就成为测量重叠在直流的微小交流电压了。所以，为了高精度自动测量开关电源的回路增益，就需要满足右记条件的测量仪。

- ① 为了测量Eout/Ein(传递函数)，所以必须具备可同时测量Eout与Ein的2通道输入。
- ② 在回路增益大的情况下，随着频率变化，输入水平将产生100dB以上变化。所以输入的动态量程必须大。而且由于在输入变小的情况下相对的噪声将变大，所以必须具有去噪声的能力。
- ③ 由于需要只对重叠于直流电压的交流成分进行高精度测量，因此需具有直流除去功能。如果采用通常的由交流耦合器(AC coupling)除去直流部分的方法，会在低频领域产生相位回转，无法正确进行传递函数的测量。
- ④ 内藏输入信号用的振荡器，而且其输出被浮置。

4. 回路增益的实际测量

使用频率特性分析仪(FRA)进行的开关电源回路增益测量方法如下。

4.1 测量顺序

- ① 确定向回路注入信号的位置。
选择 $Z_{in} \gg Z_{out}$ 、 $Z_{in} \gg R_i$ 的点，从该点向回路串联连接50Ω~100Ω的注入电阻，并将FRA的振荡器输出与注入电阻的两端连接。这时，必须将FRA的振荡器输出进行浮置处理。
- ② 从注入电阻的两端通过适当的接线将信号提取出来，连接到FRA的CH-1与CH-2。

- ③ 在反馈电路的正常工作范围内(线性工作范围)，加大FRA的振荡器输出强度。
- ④ 将FRA的测量模式设定为CH-1/CH-2(不过在CH-1连接Eout，CH-2连接Ein的情况下)。然后，扫描其振荡频率以测得回路增益。

4.2 测量举例

用FRA测量开关电源(图1-11)的回路增益如图1-13所示。注入时回路如图1-12所示。

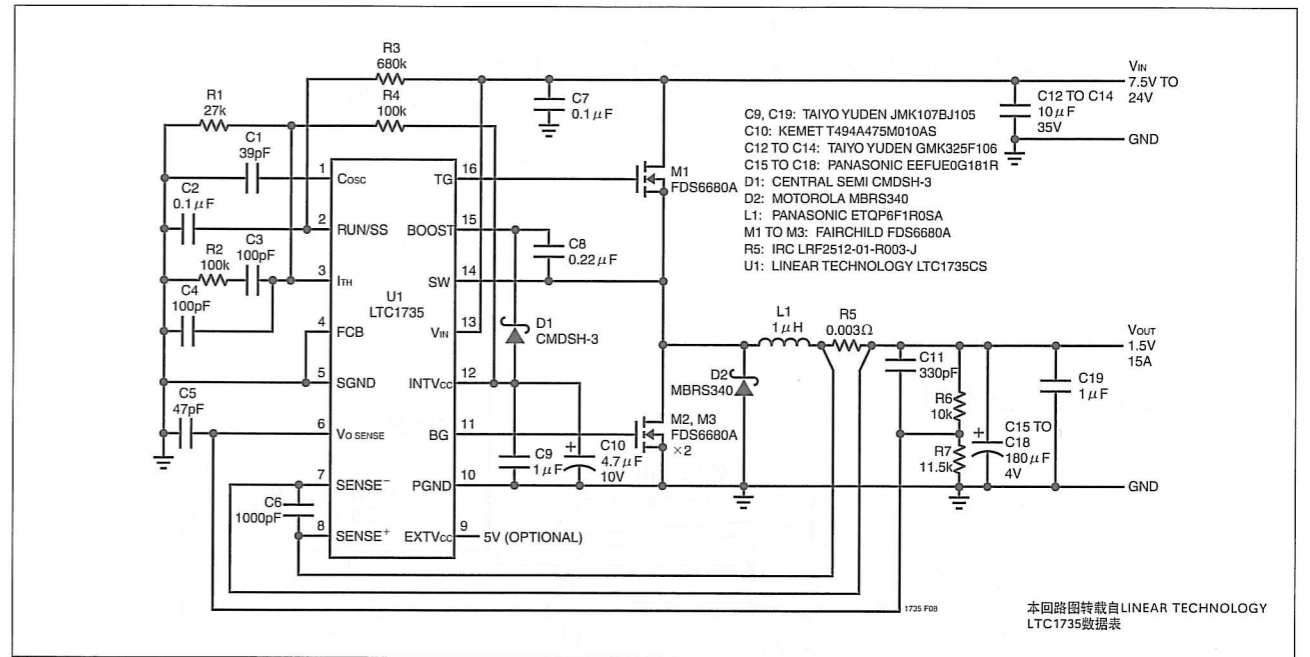


图1-11 开关电源回路

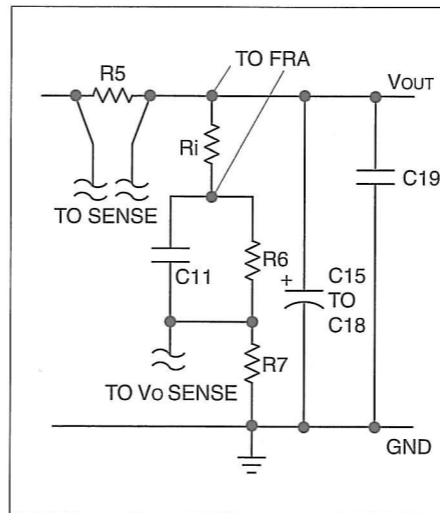


图1-12 注入时回路

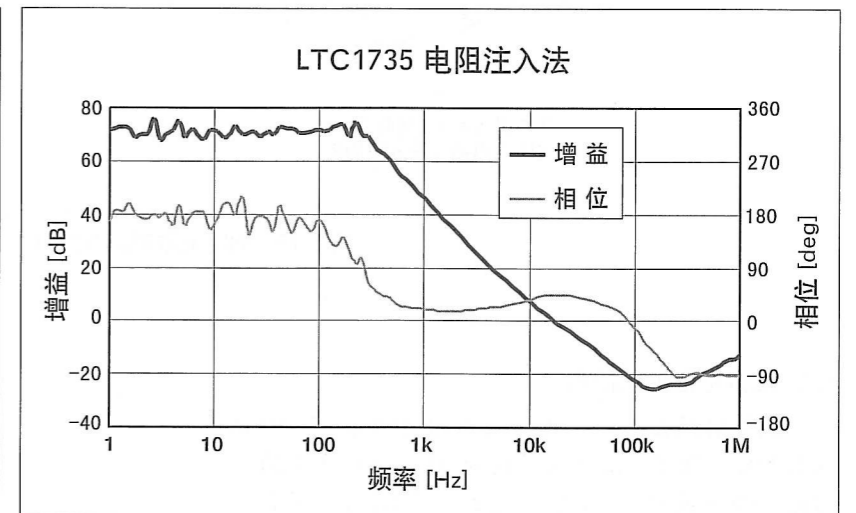


图1-13 测量结果

5. 测量时的注意事项

进行测量时的注意事项，以及将测量误差控制到最小限度的方法如下。

5.1 连接方法

关于开关电源的框图如图1-14所示。

对于回路的信号注入点必须满足 $Z_{in} \gg Z_{out}$ 的条件，在图中为A点或B点。在向A点注入信号时的连接图如图1-15所示。

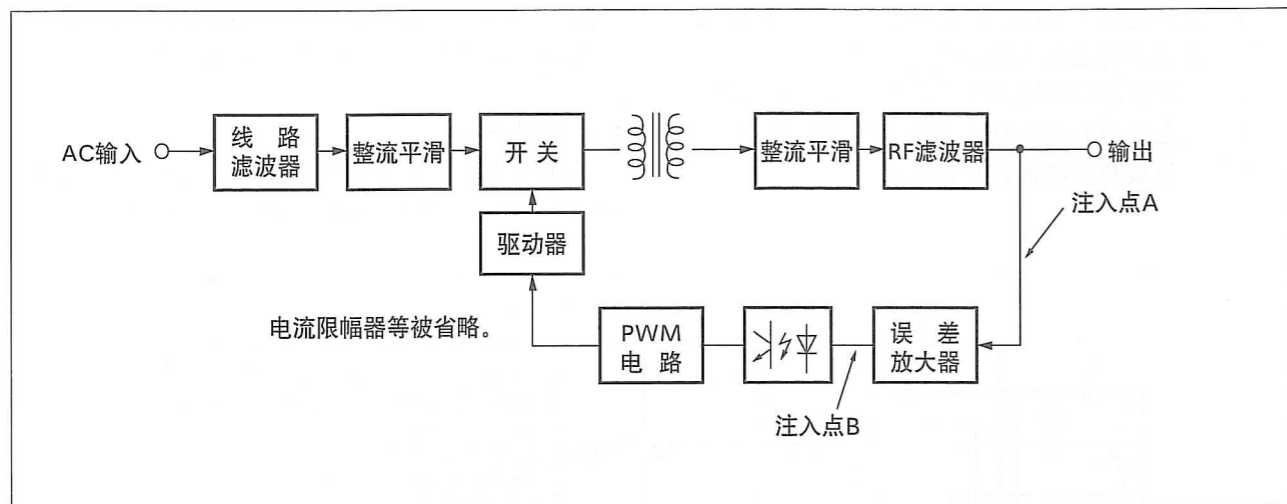


图1-14 开关电源框图

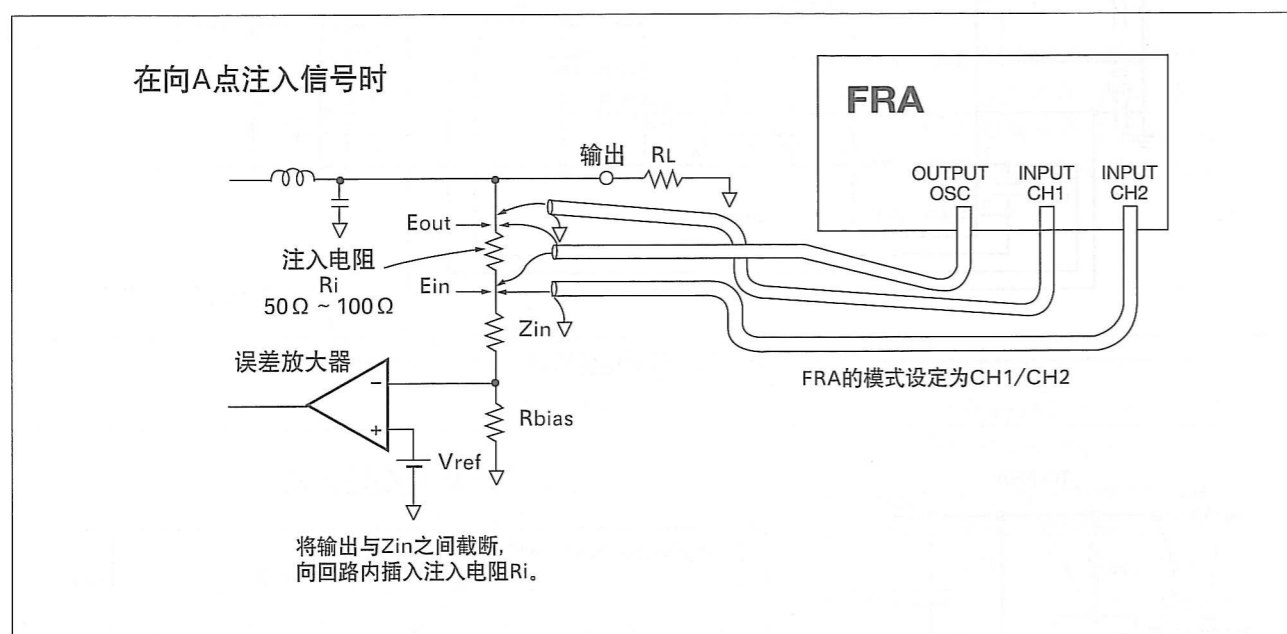


图1-15 回路增益测量连接例

5.2 注入电阻的电阻值

测量时的误差，是由注入电阻 R_i 与截断回路点上的输入阻抗 Z_{in} 之间的比值 R_i/Z_{in} 所产生的。因此，必须使用与 Z_{in} 相比足够小的 R_i 值。通常可以使用 $50\Omega \sim 100\Omega$ 范围的电阻。

5.3 注入信号的强度

回路增益的测量，通过向回路内注入FRA的振荡器输出（正弦波）信号进行。如果注入的电压过大，则回路将偏离线性工作区，所以测定值会与工作状态的回路增益产生偏差，得出错误的判断。因此，在测量之前，必须一边调节FRA的振荡频率，一边对 E_{in} 、 E_{out} 的交流波形（开关噪声重叠

于正弦波上的波形）进行观测，以确认波形是否有大的失真。当回路不再进行线性运行时， E_{in} 、 E_{out} 的波形将变为如图1-16所示的有失真的正弦波。在这种情况下，必须降低注入信号的强度。

在回路进行线性运行范围内，加大注入电压，将能够得到更准确的数值。

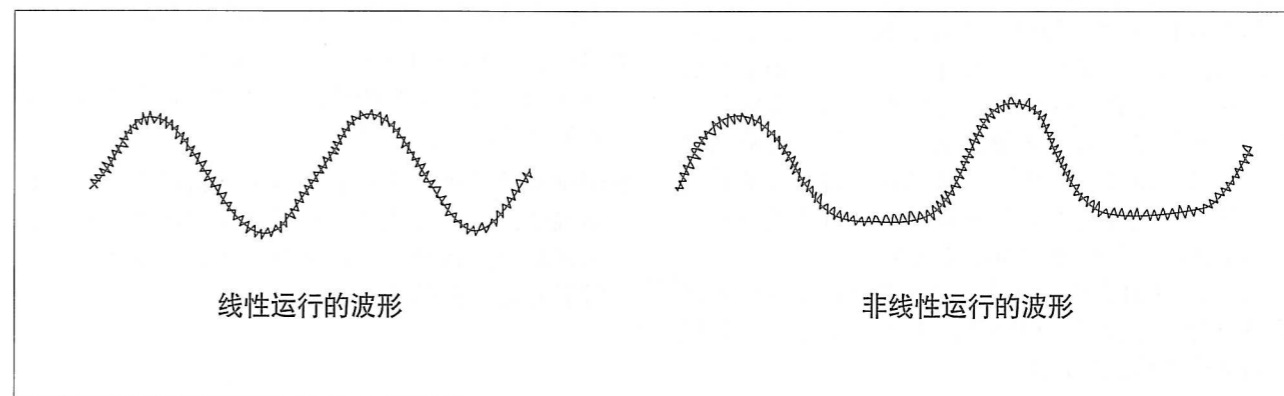


图1-16 线性运行的波形确认

2. 用频率特性分析仪测量输出阻抗

1. 测量开关电源的输出阻抗

除了前面一章介绍的回路增益测量之外，作为开关电源的一项重要性能，其还有输出阻抗特性。由于用作输出电压的开关电源都是恒压源，其输出阻抗非常低（理想的恒压源输出阻抗为0，但现实中输出阻抗在一定程度上总有一个值）。如果输出阻抗较大，那么在连接负载时输出电压就会降低。无负载与额定负载时的输出电压的变化（负载调整率），只表示对于直流的输出阻抗，因此当负载高速变动时、或连接电抗性负载时，只用直流输出阻抗就不能够掌握电源的动态情况了。

这里，我们采用在测量回路增益特性中也使用过的频率特性分析仪（FRA），来给大家介绍在频域中测量输出阻抗的方法。

采用本测量方法有如下优点：

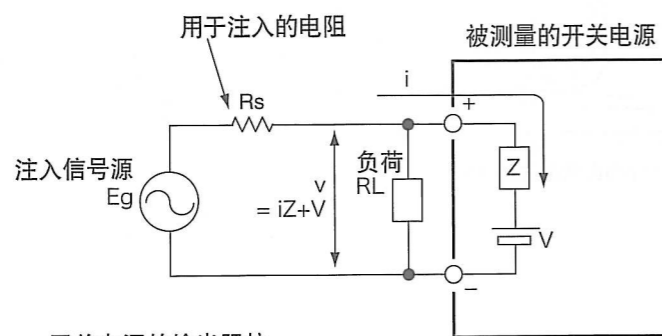
- 可在开关电源进行实际运行的状态下，在短时间、高精度地对输出阻抗和相位特性进行测量。
- 因为能在0.1 mHz~15MHz（FRA5097）的宽阔频率范围内进行阻抗测量，所以可掌握由高速变动着的负载所产生的影响。
- 测量结果不但能在液晶画面上用图形方式即时显示确认，而且还能通过内置热敏打印机以硬拷贝形式输出。由此，可以立即确认由于常数变更等所引起的输出阻抗的变化。

由不同负载所引起的输出阻抗的变化情况，不但测试方法简单，而且能得到实用上所需的充分数据。

测量框图和接线图如图2-1、图2-2所示。

2. 测量方法

对于输出阻抗的测量，采用的方法是使微小的测量信号电流通过开关电源的输出回路，并对由输出阻抗引起的电压降落进行测量。当在开关电源上连接任意的负载时，采用本方法（电阻法）可以掌握



- Z : 开关电源的输出阻抗
- V : 开关电源的输出直流电压
- Eg : 注入信号源
- i : 作为注入信号而通过开关电源的电流
- v : 由于输出阻抗而产生的电压降落 + 输出电压

图2-1 输出阻抗测量框图

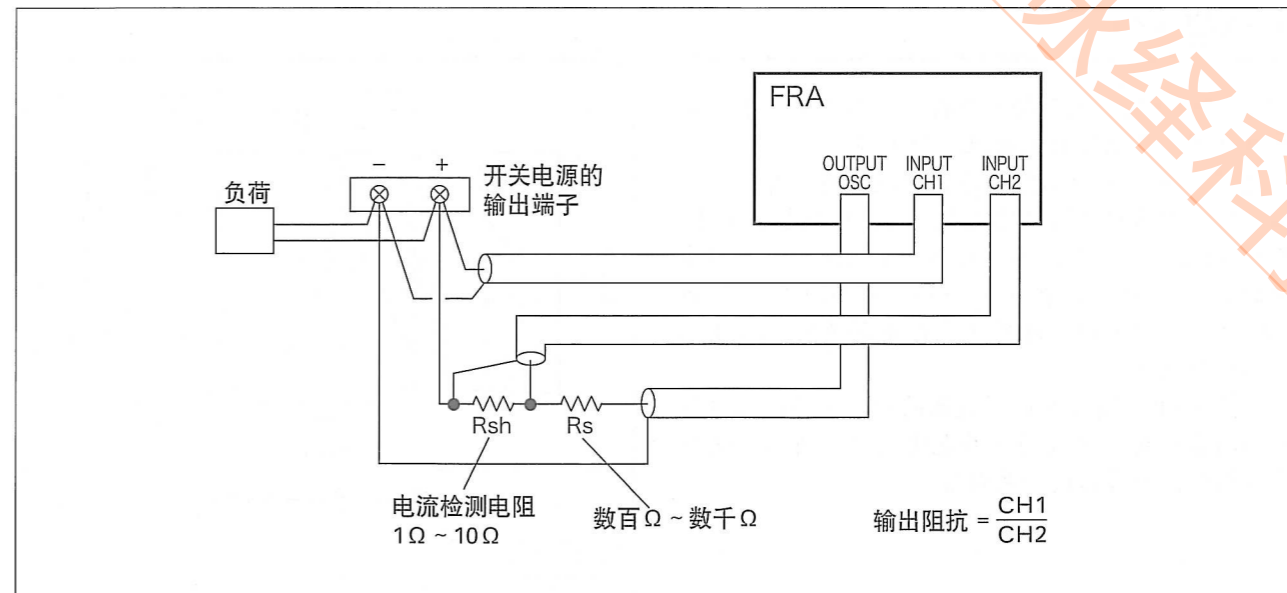


图2-2 输出阻抗测量的接线例

在框图中，如果用于注入的电阻Rs足够大、满足 $Z \ll R_s$ 的条件，那么用于测量的电流i就可以看成为电流值等于 E_g/R_s 的恒流源。为了获得更高的测量精度，如图2-2的接线图所示，用电流检测电阻Rsh来检测出电流值，并作为电压信号来输入到FRA。也就是说，从外部注入由 E_g 和 R_s 构成的测量用恒流源信号，改变其频率，测量相应的电压v。在v中，除了由于输出阻抗Z引起的电压降落iZ之外，还重叠着直流分量V。但是，FRA会去除这个直流分量V，使其不影响测量结果。另外，在一般情况下 $Z \ll R_L$ ，所以可以忽略负载

电阻对于测量结果的影响。

使用注入电阻Rs的目的，除了产生恒流源的注入信号之外，还在于抑制大的直流电流逆向注入信号源 E_g 。Rs的电阻值，要取为能够使逆向注入电流V/Rs为数十毫安以下。对于输出电压约为48V以下的开关电源，1kΩ左右为合适的值。

电流检测电阻Rsh的阻值越大，电流→电压的变换系数就越大，从而对于测量就越有利。一般1Ω左右的值较为合适。

3. 用于测量开关电源输出阻抗的测量仪器

如前项所述，在开关电源的输出端子上注入测量电流i，并测量由此产生的电压降落v，然后用v/i来求得输出阻抗。一般情况下，开关电源的输出阻抗非常小（例如，0.1Ω以下），用于测量的信号注入电流（约为数mA）所产生的电压降落v也在1 mV以下。但是，因为开关电源的直流输出电压V总是处于输出状态，所以实际测量的v上总是重叠着直流电压V。对于输出电压为24V的开关电源，（直流24V + 电压降落分量1 mV以下）就作为v被测量出来了。而为了求出输出阻抗值，需要的仅仅是v中的电压降落分量。换言之，必须要用很高的精度测量出重叠于很大的直流信号上的微小的（一万分之一以下）交流信号。另外，由于开关噪声所造成

的精度下降也是一个问题。所以，为了用很高的精度来测量开关电源的输出阻抗，就必须使用满足如下条件的测量仪器。

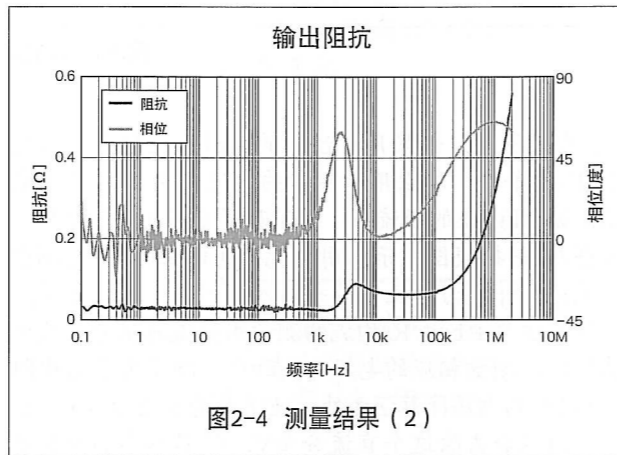
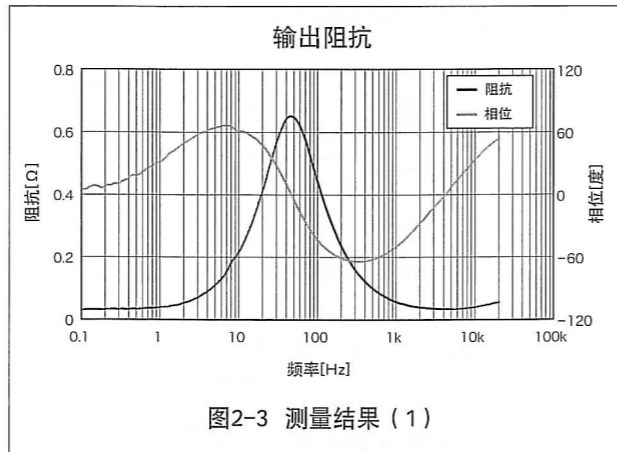
- ① 因为需要同时测量i, v, 所以需要有2个输入通道，能由此测量v/i（阻抗）。
- ② 电流检测的输入通道必须是悬浮式的。
- ③ 因为需要高精度地测量重叠于很大的直流电压上的微小的交流分量，所以需要具有去除直流的能力。如果用一般的交流耦合器，要进行数Hz以下的测量实际上是不可能的。
- ④ 因为混入了相对较大的开关噪声，所以需要有较高的噪声去除能力。

4. 测量举例

本例介绍采用频率特性分析仪 (FRA)，来测量普通市售开关电源的输出阻抗的实例。

图2-3中，在50Hz附近输出阻抗有所上升。由于前项所说明的回路增益的减小，输出阻抗也会上升。而在50Hz以上时阻抗再度减小，可认为是由于用作滤波的电解电容器在发挥作用。在100Hz处约为0.45Ω，所以可以推测现正在使用约为3,500μF容量的电解电容器。

图2-4中，因为在达到较高的频率时还能保持较低的输出阻抗，阻抗的上升也比较少，所以可认为是适用于高速负荷的开关电源。



3. 测量组成开关电源的零部件的传输特性

决定开关电源稳定程度的回路增益，可认为是由包含在回路中的各个零部件的传输特性串联而成的。通过掌握各个零部件的传输特性，就可以比较容易地预测由于零部件的特性离散和品种差异所引起的回路增益的变化。

这里，介绍关于在开关电源的二次侧中具有代表性的有源零部件即并联稳压器和承担从二次侧向一次侧起反馈作用的光电耦合器，以及这两者组合在一起的回路，还有作为无源零部件的用于输出的LC滤波器的传递特性的测量方法。

1. 并联稳压器

在并联稳压器的使用方法中，有将其作为电压稳定元件和误差放大器等情况。电压稳定元件的传输特性，可以用对于输入电压的变化所引起的输出电压（阴极电压）的变化作为频率特性来表示。作为误差放大器的传输特性，可以用对于电压的变化所

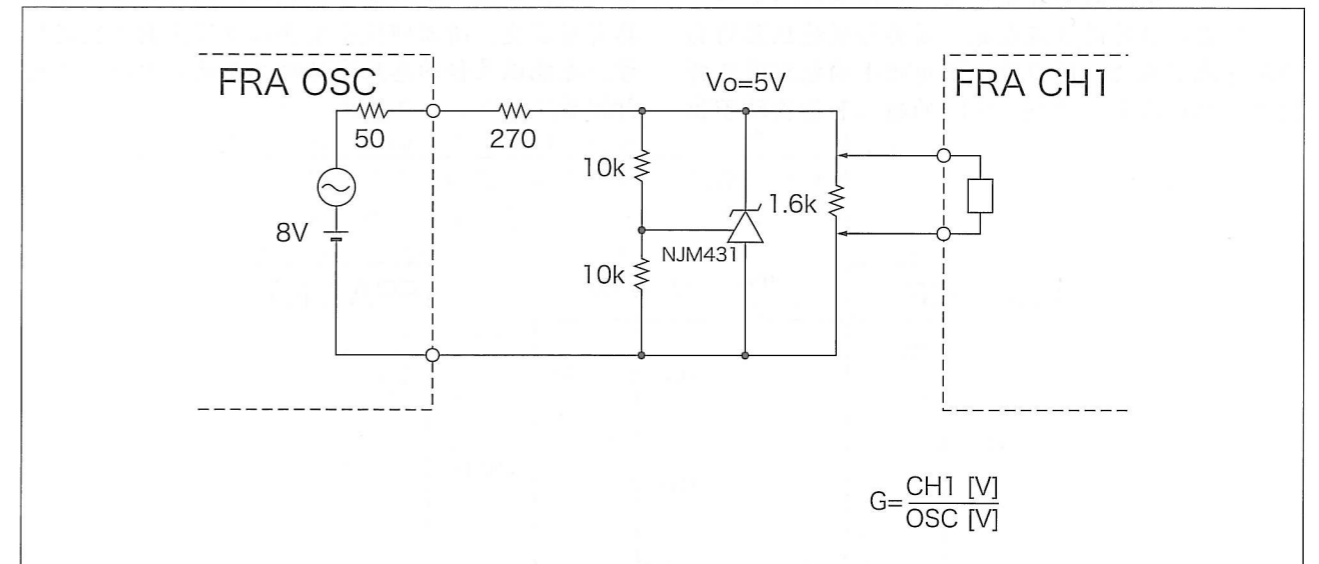
引起的阴极电流的变化作为频率特性来表示。无论在哪一种情况下，因为在高频区域中运行时其功能都会丧失，所以确认在所需的频带中能否充分正常地运行，就变得尤为重要。

1.1 在作为电压稳定元件时的测量

■ 测量方法

测量时的回路例如图3-1所示。使用并联稳压器，可将其稳定的直流电压从FRA进行供给，故不需要其他的直流电源。由并联稳压器供应的稳定的电压是相对于负荷供给5V、3mA的设定。因为FRA对直

流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度只对其交流信号振幅来进行测量。



■ 测量举例

测量结果如图3-2所示。表示在低频区域的传输特性约为-60dB、电压变动抑制在1/1000。可以看到在达到10kHz以上的高频区域时特性逐渐恶化，电压稳定的功能逐渐丧失。

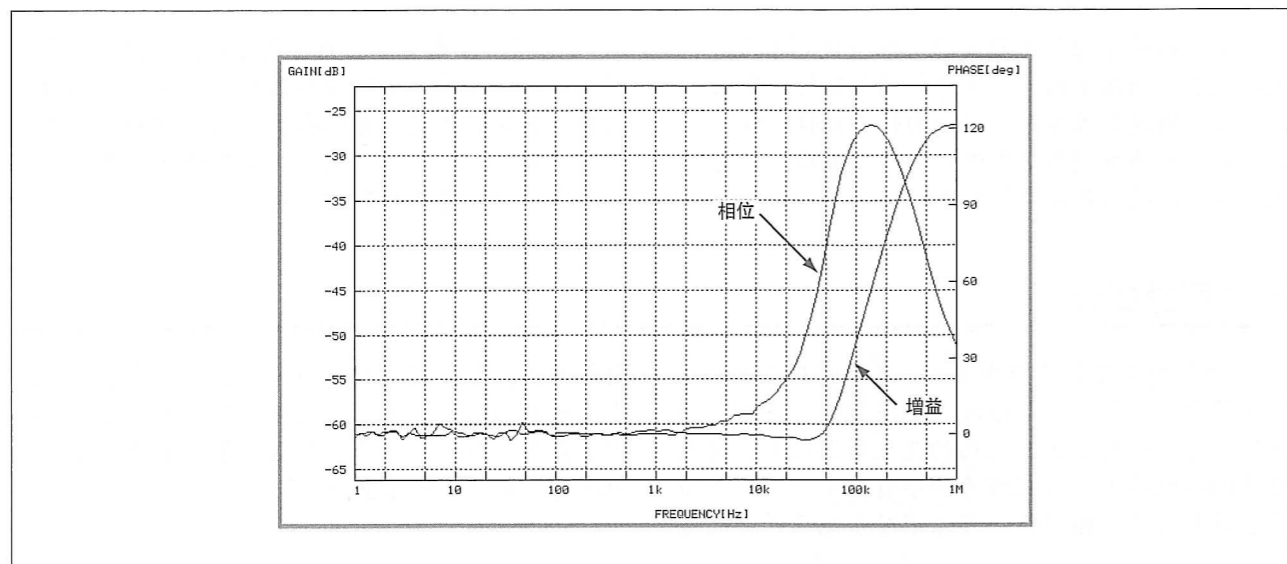


图3-2 由并联稳压器实现的稳压回路的特性测量结果

1.2 在作为误差放大器时的测量

■ 测量方法

测量时的回路例如图3-3所示。在使用并联稳压器进行误差检测时的直流电压，可以从FRA提供，所以不需要另外的直流电源。因为并联稳压器的响应是电流形式的，所以通过采用较小的电阻将其转换成电压而加以检测。FRA的输入和输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外，因为对于直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度只对其交流信号振幅来进行测量。

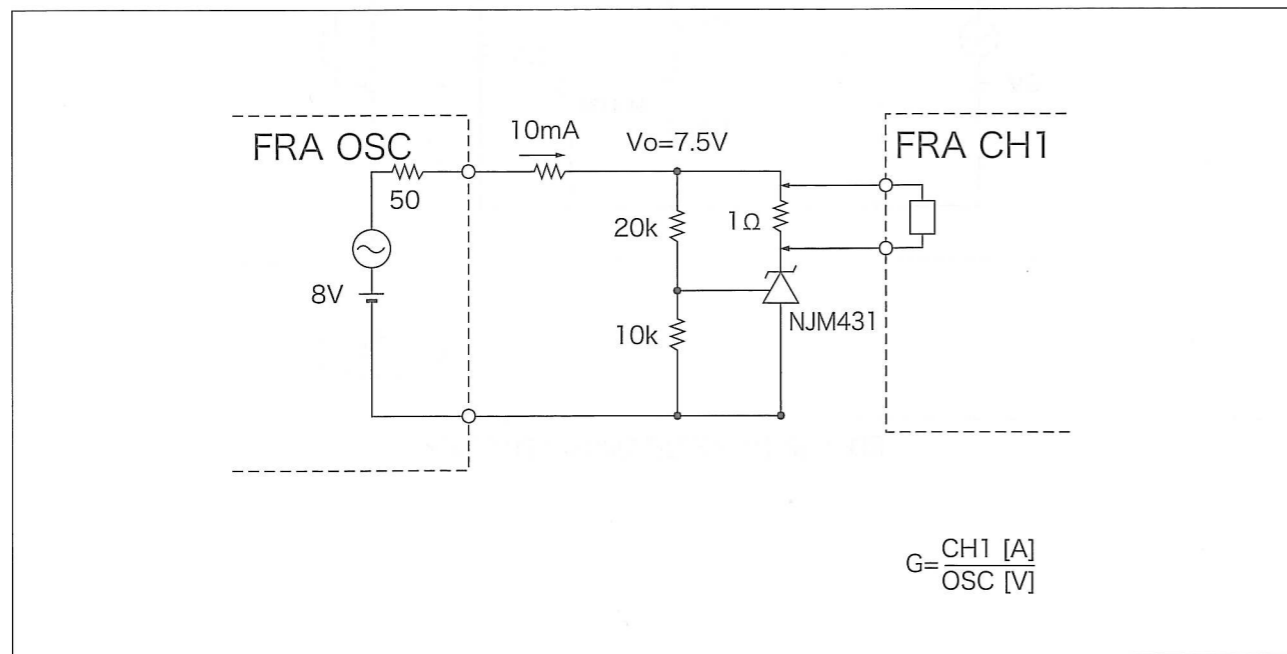


图3-3 由并联稳压器组成的误差放大回路例

■ 测量举例

测量结果如图3-4所示。

在低频区域的传输特性约为-1.8dB，这表示对于电压变动所产生的电流变动的大小，所以其传输特

性约为0.8[A/V]。可以看到在达到50kHz以上的高频区域时，传输特性恶化，作为误差放大器的功能逐渐丧失。

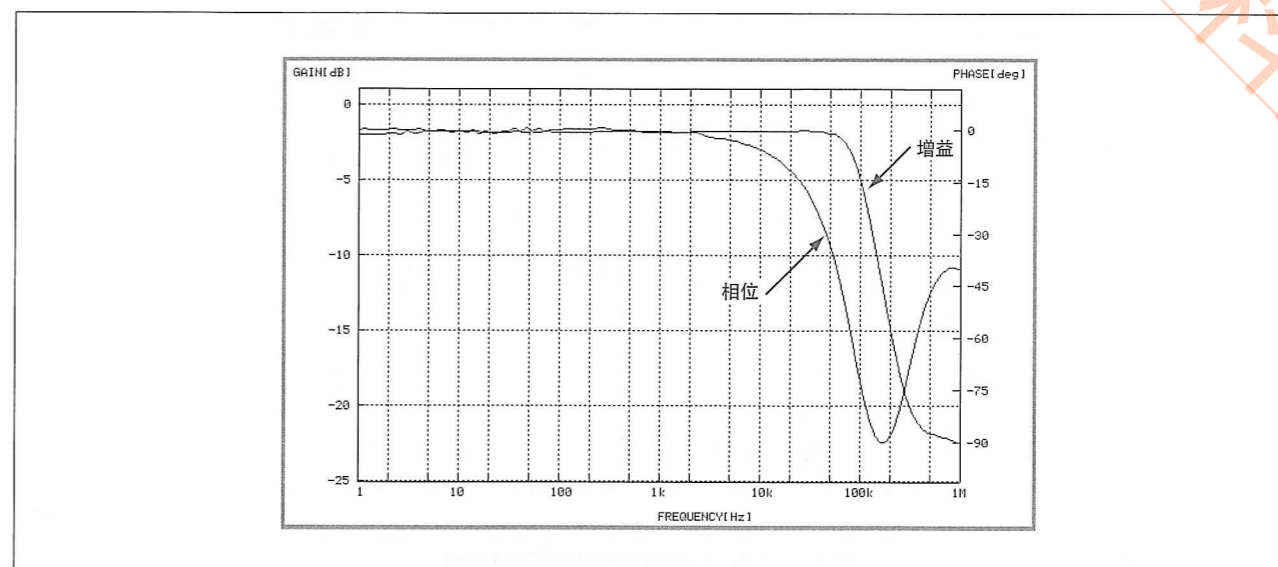


图3-4 由并联稳压器组成的误差放大回路的特性测量结果

2. 光电耦合器

光电耦合器的传输特性，可以用光晶体管的输出电流对于驱动光二极管的电流的比值的频率特性来表示。

■ 测量方法

测量时的回路例如图3-5所示。光电耦合器是在输出电流不饱和的区域（线性工作区域）中使用并进行测量的。驱动光电耦合器的电流能从FRA供给，所以只需要在晶体管一侧使用直流电源。对于光电耦合器的输入和输出电流，两者都采用电流限制电阻将电流转换成电压而被检测出来，再用FRA的

Weighting Factor（权重因数）功能转换成电流值。FRA的输入和输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外，因为对于直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅进行测量。

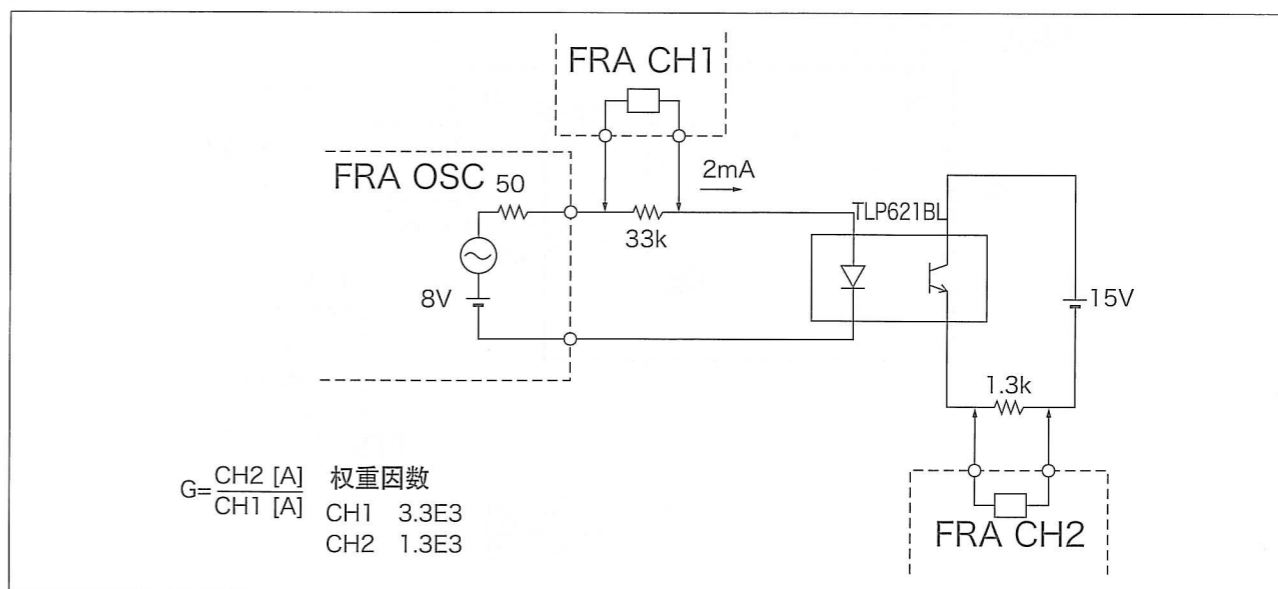


图3-5 光电耦合器的传输特性测量回路例

■ 测量举例

测量结果如图3-6所示。在低频区域的传输特性约为11dB，也即约为350%。在达到10kHz以上的高频区域时，传输特性逐渐恶化，信号传送能力也逐渐下降。

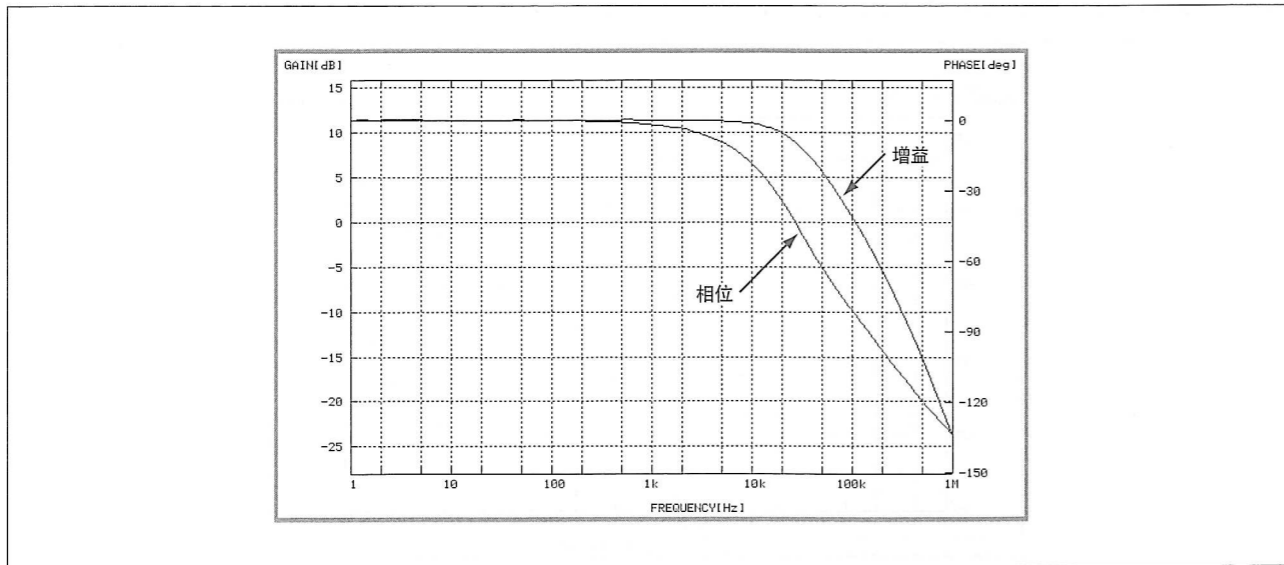


图3-6 光电耦合器的传输特性测量结果

3. 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路

这是一个将并联稳压器作为误差放大器使用以驱动光电耦合器的回路、测量其传输特性的例子。传输特性可以用相对于电压变动分量的光电耦合器的输出电压（射极跟随器）来表示。

■ 测量方法

测量时的回路例如图3-7所示。驱动并联稳压器和光电耦合器的电流可以由FRA提供，所以只需要在晶体管一侧使用直流电源。光电耦合器是以射极跟随器的方式运行的，能够检测其发射极的电压。FRA的信号输入和输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外，因为对于直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅进行测量。

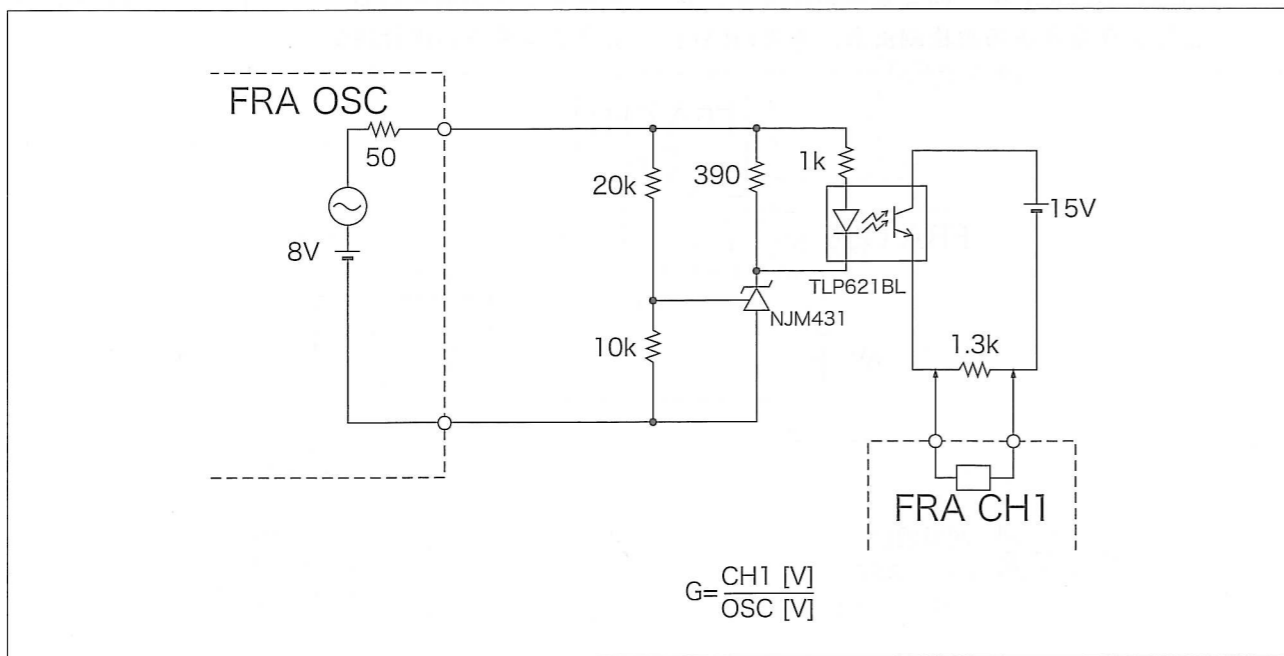


图3-7 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路的传输特性测量回路例

■ 测量举例

测量结果如图3-8所示。在低频区域具有大约55dB的增益。在达到5kHz以上的高频区域时，其性能逐渐恶化，作为误差放大器的信号传输能力逐渐下降。对于每1kHz频率，相位大约延迟9度左右，所以需要进行适当的相位补偿。

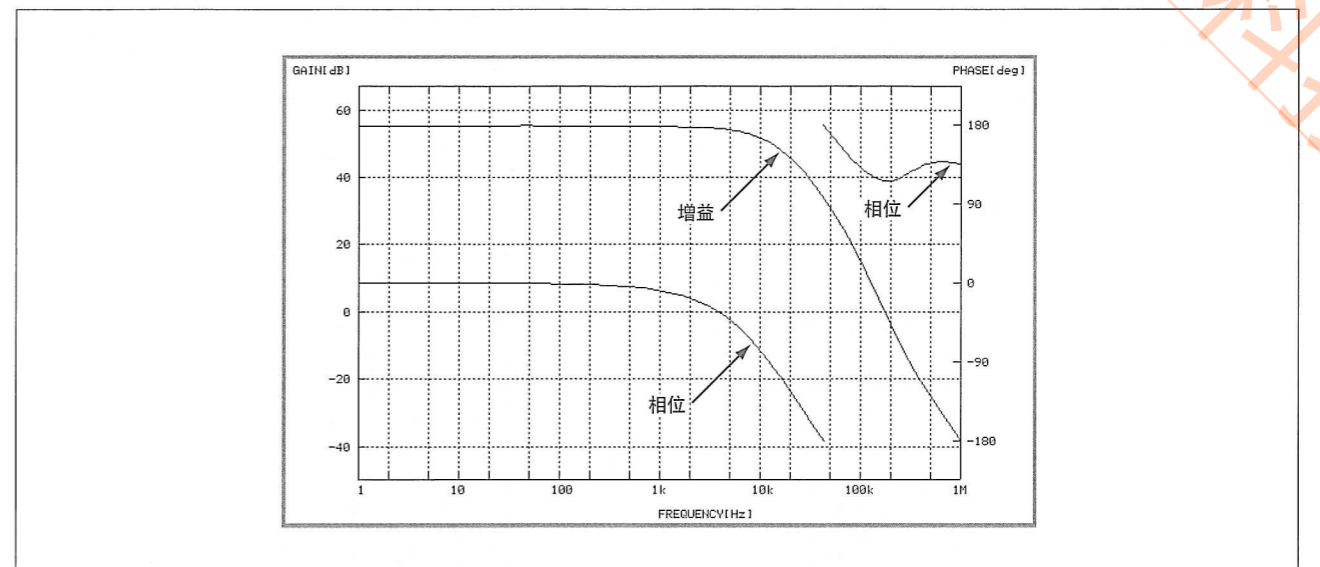


图3-8 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路的传输特性测量结果

4. LC滤波器

LC滤波器是作为用于去除输出中的脉动成分的低通滤波器而运作的。同时，作为在截止频率上的LC谐振电路也发挥作用，所以在截止频率（谐振点）附近产生增益。谐振的强度与L、C各零部件实际的阻抗有关，但是也随着负荷的轻重不同而有变化。传输特性可以用输出电压对于输入电压的比值来表示。

■ 测量方法

测量回路例如图3-9所示。如果改变负荷电阻的大小，其响应也随着变化。

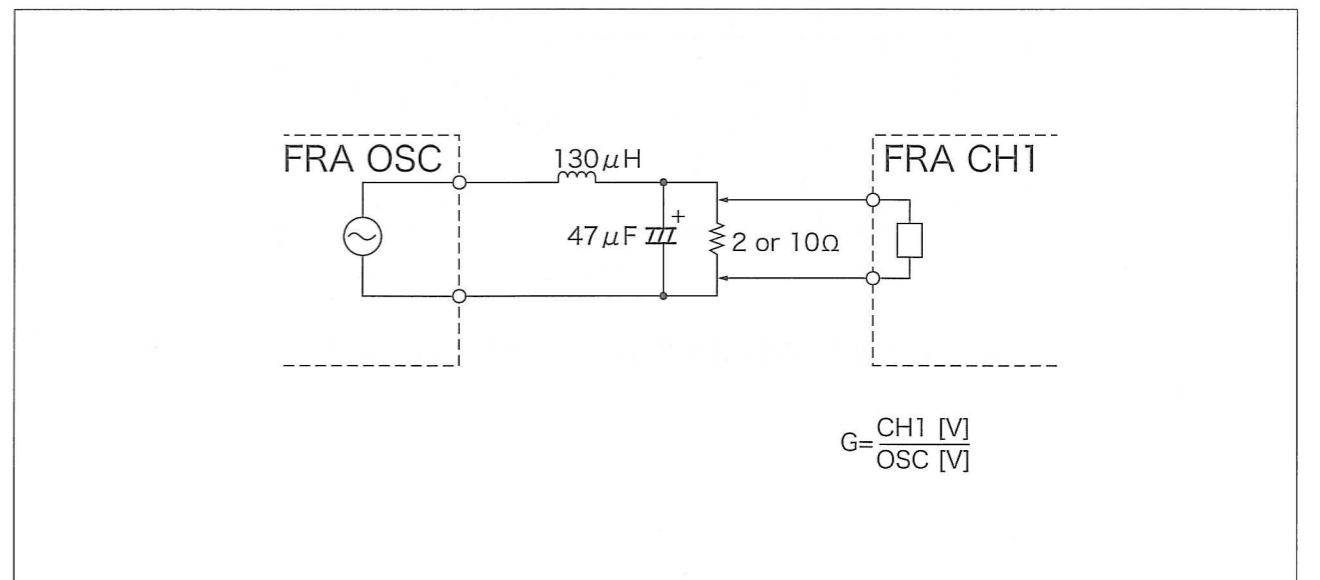


图3-9 LC滤波器的传输特性测量回路举例

■ 测量举例

测量结果如图3-10和图3-11所示。在低频区域的响应与负荷无关，为一个确定的值。但是，在截止频率（谐振频率）处所产生的峰值的大小则各有不同。这个峰值并不只限于在负荷较轻的时候产生。如果电容和电感的ESR（等效串联电阻）越小，也

就是一般来说采用高频特性越优越的零部件，其峰值也就越大。如果为了抑制谐振峰值而采用ESR（等效串联电阻）较大的零部件，则会导致输出阻抗增大，使电压稳定性能劣化，所以不是正确的对策。

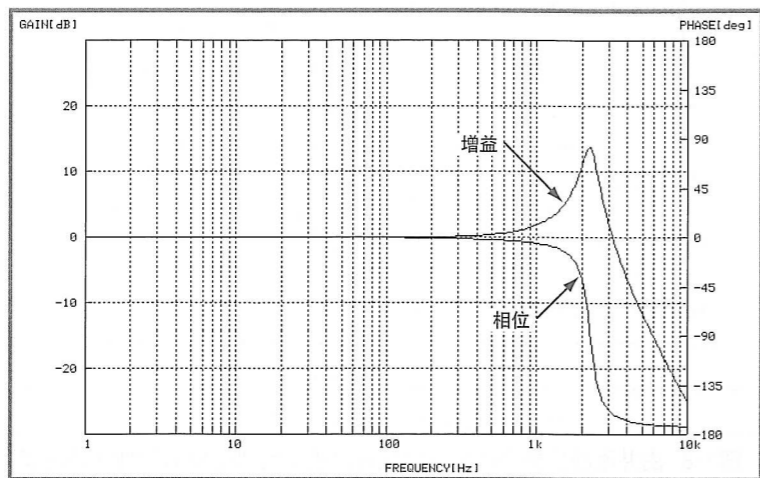


图3-10 LC滤波器的传输特性测量结果 负荷较轻时的情况 (10Ω)

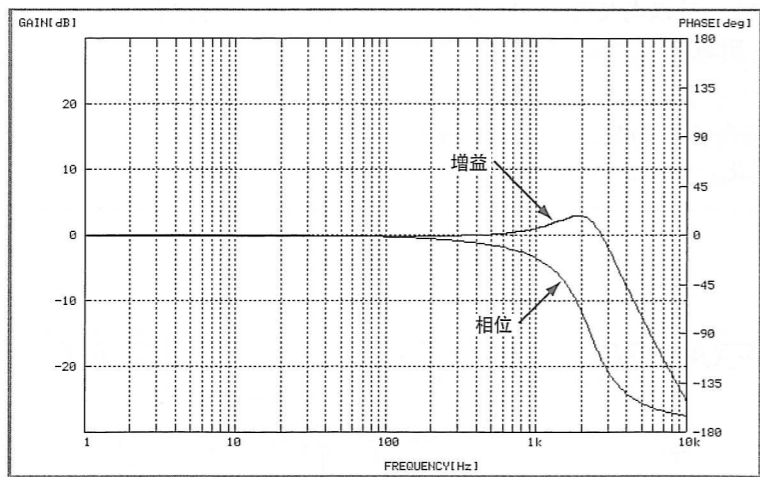


图3-11 LC滤波器的传输特性测量结果 负荷较重时的情况 (2Ω)

4. 用频率特性分析仪测量零部件的阻抗

1. 电解电容器

为了去除开关噪声而使用的电解电容器，对于开关电源的输出电压的质量优劣起着决定性的作用，称之为关键元件也决非言过其实。除了抑制噪声的目的之外，还具有降低输出阻抗的效果。即使是具有相同的静电容量和耐电压的电容器，由于其品种不同而会导致在高频下的阻抗有极大的差异。在高频条件下，电解电容器的阻抗一般用ESR（等效串联电阻）来表示。而实际上，由于频率的变化ESR保持为常数不变的情况几乎没有，而且当温度改变时ESR也会有很大的改变。如果不经慎重考虑，那么即使采用了大容量的电容器，在高频条件下其阻抗也会由于受到ESR的制约，而使静电容量的大小未必与开关噪声去除能力相一致。即使增大了电容量，如果开关噪声并未减弱，

那么就可能是由于所用的电解电容器在高频下的阻抗要比预想（期待）的更大。

此外，电解电容器的寿命主要是由温度来决定的。当有较大的脉动电流通过ESR较大的电容器时，所产生的焦耳热量就会使电容器的使用寿命显著缩短。即使为了确保开关电源本身的使用寿命和可靠性，掌握电解电容器的阻抗特性（包括ESR）也是非常重要的事项。

这里，采用与前面所述的测量开关电源的输出阻抗相同的方式，使用频率特性分析仪（FRA），介绍在频域范围内测量电解电容器的阻抗特性的方法。

■ 测量方法

在测量电解电容器的阻抗时，让用于测量的信号电流通过被测量的电容器，并测量由电解电容器的内部阻抗所引起的电压降落。也可以在电容器上施

加任意的偏置电压再进行测量，由此可以观察到由于偏置电压所引起静电容量和ESR的变化。

测量框图和接线图分别如图4-1和图4-2所示。

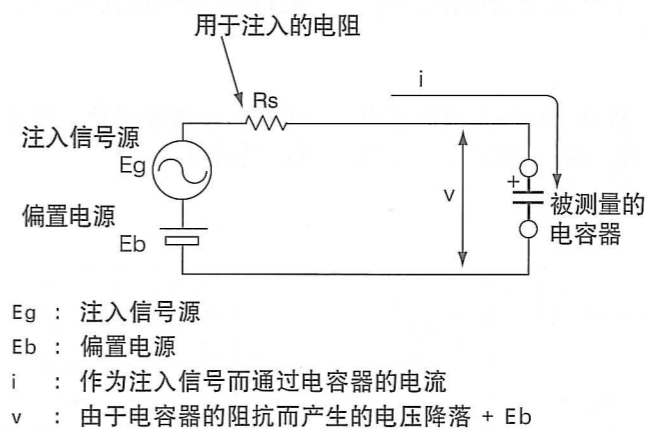


图4-1 电解电容器的阻抗测量框图

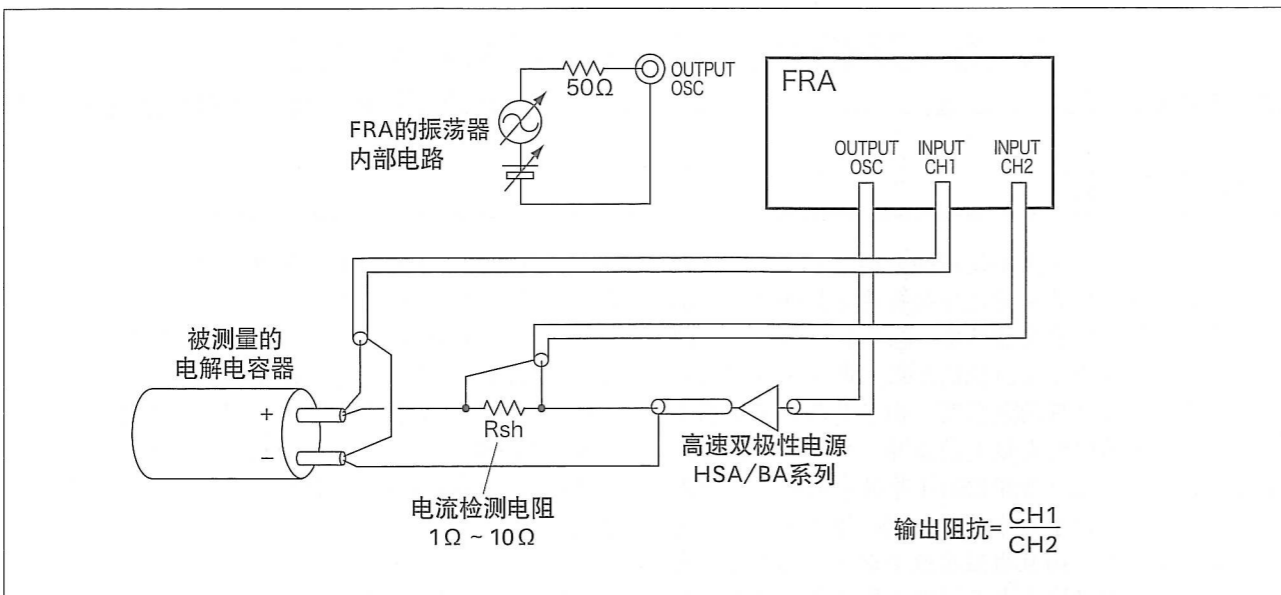


图4-2 电解电容器的阻抗测量接线图

在框图中，用于注入的电阻 R_s 可用电流检测电阻 R_{sh} 来代替。为了在被测量的电解电容器上施加偏置电压，将直流电源 E_b 与注入信号 E_g 用串联方式插入。FRA的振荡器中，有内置的用于测量的交流信号源和内置的直流偏置电压，能够输出合计最大10Vpeak的电压。如果10Vpeak仍然不够，那么可如图4-2所示使用功率放大器（高速双极性电源）。如果采用本公司的HSA/BA系列高速双极性电源，那么最大可达300Vp-p的放大。用电流检测电阻 R_{sh} ，

■ 测量举例

这里介绍使用频率特性分析仪（FRA）对各种电解电容器进行的测量例子（图4-3、图4-4）。相位

将流过电容器的电流 i 转换为电压，作为电压信号输入到FRA。在电容器两端所产生的电压 v ，也用FRA来测量，由此求得 v/i ，也就是阻抗。在 v 中，除了由测量信号 i 所产生的电压降落分量之外，还添加有偏置电压 E_b ，但是在FRA中会在内部将直流分量自动去除。

电流检测电阻 R_{sh} 的阻值越大，电流→电压的变换系数就越大，从而对于测量就越有利。但是，一般1Ω左右的值较为合适。

特性也可同时测量，但是这里仅讨论阻抗的绝对值 $|Z|$ 的特性。

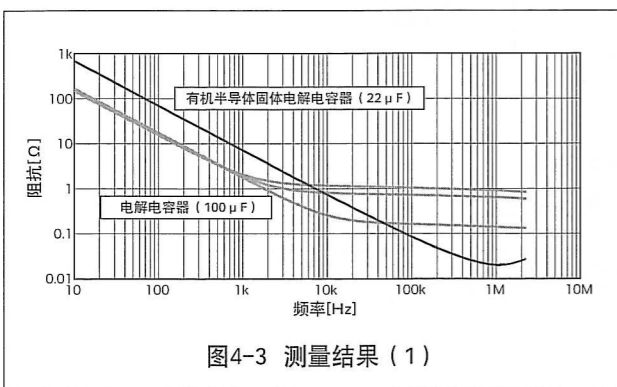


图4-3 测量结果 (1)

图4-3是静电容量为100 μF的3种铝电解电容器以及静电容量为22 μF的有机半导体固体电解电容器的阻抗特性。从图中可以看到，即使容量同样为100 μF，由于品种不同，在高频时其阻抗的差别可达5倍左右。另外，在100kHz以上的频率范围，静电容量较小的有机半导体固体电解电容器的阻抗相对的要低。

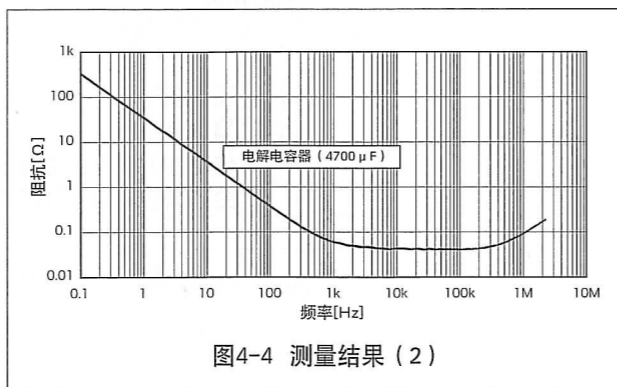


图4-4 测量结果 (2)

图4-4是静电容量为4,700 μF的铝电解电容器的测量结果。从图中可以看到，因为在大约200kHz处阻抗开始上升，所以在高频范围内有必要不是将其作为电容器、而是将其作为线圈来对待，不能够对它的噪声抑制能力再寄予希望。

2. 电感器

与前述的电解电容器一样，电感器也是对开关电源的输出电压有着重大影响元件。在理想情况下，电感器的阻抗应该随着频率的上升而成正比例地上升。但是，现实中的电感器，如果用等效电路来表示，那么就如图4-5所示。实际上，由于ESR（等效串联电阻）的作用，在某个频率以下它作为电阻起作用。此外，由于缠绕的导线之间的杂散电容等的作用，形成了谐振电路，在高于谐振频率的频率情况下，电感器的阻抗就表现出电容的性质，不能够希望它再起到电感的作用了。另外，由于通过电感器的直流电流的影响，电感器的阻抗也会随之变化，这也是已为人们所知道的。

与电解电容器一样，掌握电感器的阻抗特性，也是设计开关电源时的一个重要项目。

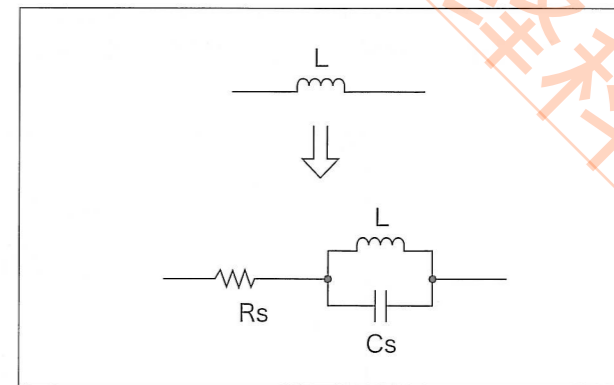


图4-5 实际的电感器的等效电路

2.1 频率的影响

■ 测量方法

测量框图如图4-6所示。使用FRA，通过阻抗显示功能和阻抗测量适配器能够如同阻抗分析仪那样地进行测量。因为也具有开路补偿功能，短路补偿功能，所以无论阻抗高低或频率高低，都能以较少的误差因素来进行测量。

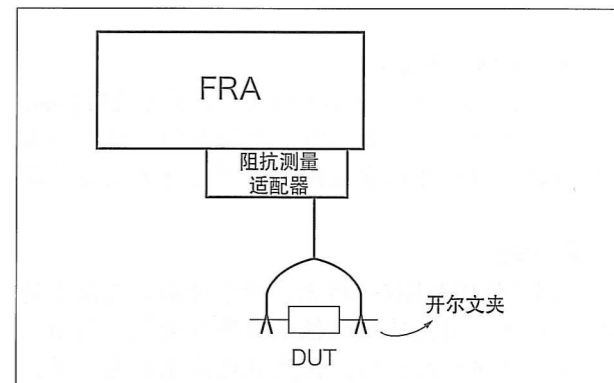


图4-6 电感器的阻抗测量框图

■ 测量举例

测量结果如图4-7所示。在10Hz以下区域，ESR起主导作用，阻抗体现为一个固定的值。谐振发生在600kHz附近。在比该频率更高的区域，因为电容

分量起着主导作用，所以阻抗减小，不再作为电感性元件起作用。

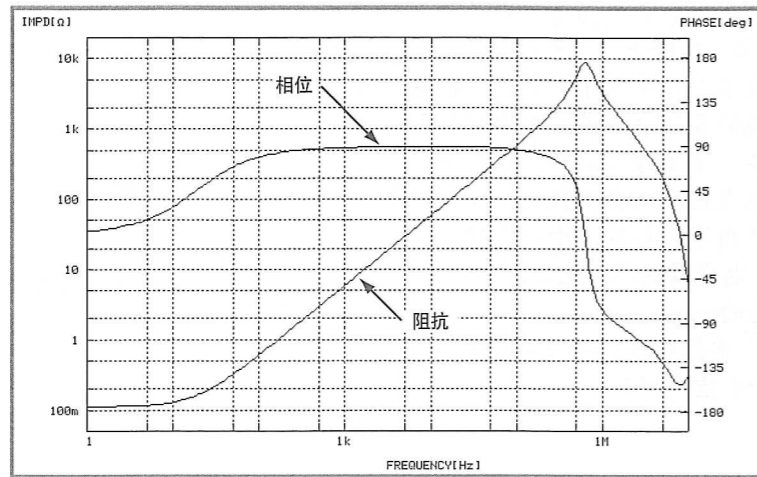


图4-7 电感器的阻抗测量结果

2.2 直流电流的影响

对于电感器而言，由于所通过的直流电流的影响，阻抗会发生变化，这是已为人们所知的事情。如果使用FRA，因为可以在电感器中流过直流电流的状

态下测量阻抗，所以可以知道直流电流对于电感器的影响。

■ 测量方法

测量框图如图4-8所示。对于叠加在直流上的FRA的信号，用高速双极性电源进行放大，与用在开关电源时同样的方法，使直流电流流过电感器，并在此状态下测量阻抗。采用分流电阻来检测电流，用I-V（电流-电压）测量法来测量电感量。

FRA的信号输入和信号输出端子相互绝缘，而且与机壳之间也绝缘，所以能分别与任意的电位连接，进行测量，并能对用于检测电流的分流电阻两端直接进行测量。此外，因为对于直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅进行测量。

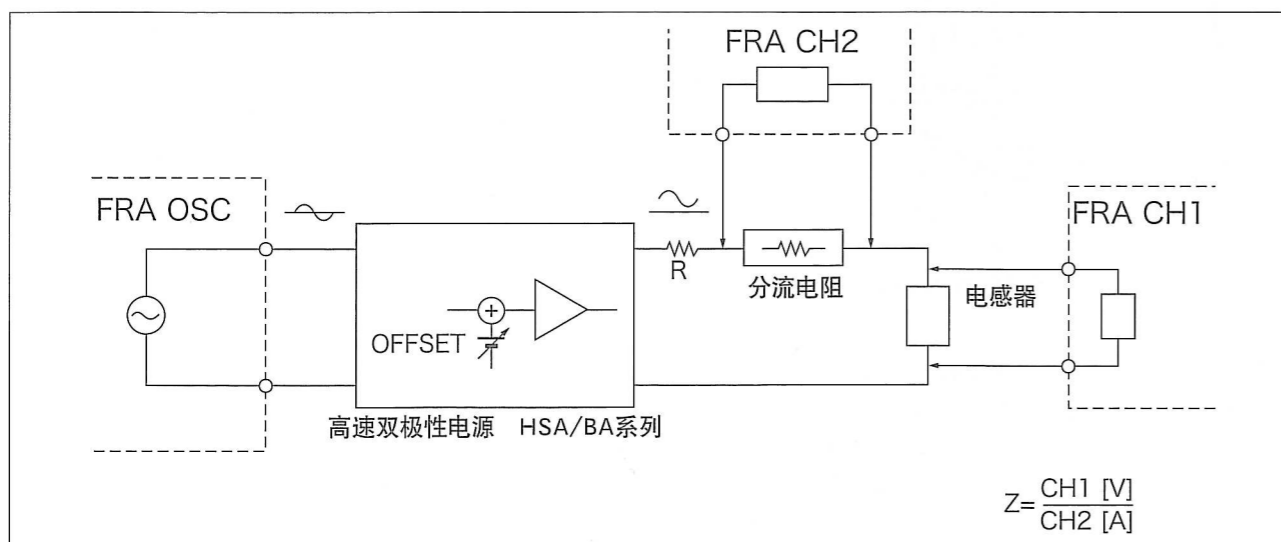


图4-8 重叠了直流的电感器阻抗测量框图

■ 测量举例

测量结果如下图所示。从图中可以看到，随着直流电流的增大，阻抗就随之减小，所以电感量也随之下降。由此，在LC滤波器的情况下，如果不选择

对于直流电流（=负荷电流）有一定富余量的电感器，那么就很可能使其作为滤波器的高频噪声滤除功能有所下降。

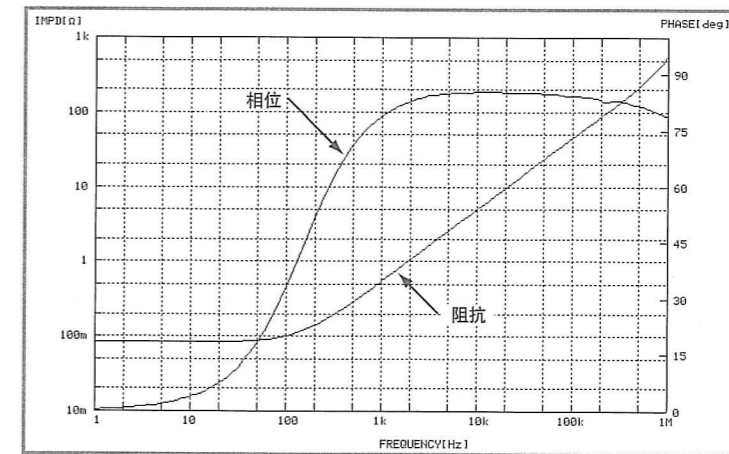


图4-9 重叠了直流的电感器阻抗测量结果（直流电流 小）

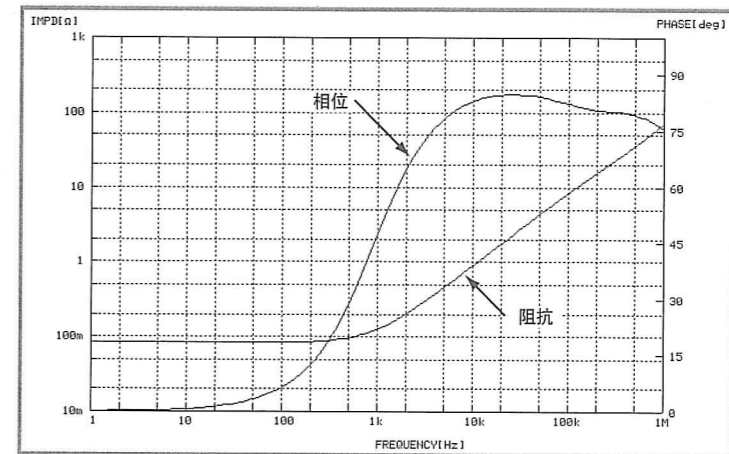


图4-10 重叠了直流的电感器阻抗测量结果（直流电流 大）

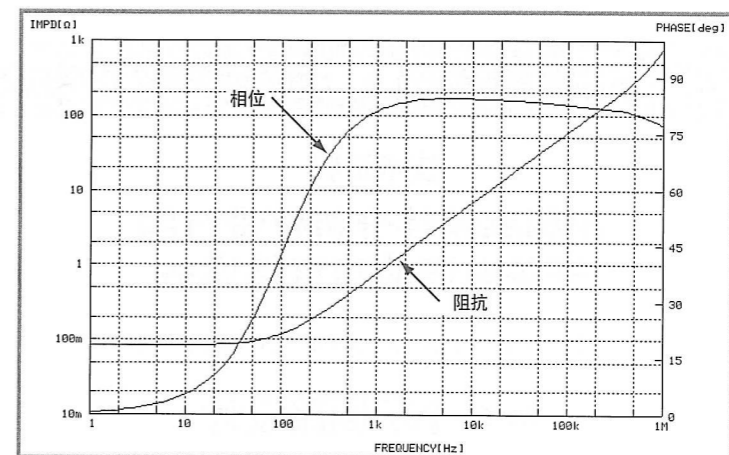


图4-11 不重叠直流时的电感器阻抗测量结果