

# 基于 VIF 特性分析的电路板故障诊断方法研究

李光升<sup>1</sup>, 欧博<sup>1</sup>, 安斌来<sup>2</sup>, 魏宁<sup>1</sup>

(1. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 31700 部队, 辽宁 辽阳 111000)

**摘要:** VIF 特性曲线即伏特-安培-频率特性曲线; 分立元件或集成芯片是电路板故障的最小可隔离单元, 元器件的损坏或特性改变是电路板故障的最根本原因; 针对元件参数获取的问题, 采用基于 VIF 特性分析的方法, 对常见元器件进行了分析, 并模拟了常见的故障模式, 分析其 VIF 特性曲线特征, 总结了各类组合元件曲线变化规律, 针对某型灭火抑爆系统电路板的容性故障和感性故障进行了诊断, 效果显著。

**关键词:** VIF 特性曲线; 参数获取; 故障诊断

## Research on Circuit Board Fault Diagnosis Method Based on VIF Characteristic Analysis

Li Guangsheng<sup>1</sup>, Ou Bo<sup>1</sup>, An Binlai<sup>2</sup>, Wei Ning<sup>1</sup>

(1. Department of Weapons and Control, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. Chinese People's Liberation Army Unit 31700, Liaoyang 111000, China)

**Abstract:** VIF characteristic curve, that is, volt-ampere-frequency characteristic curve. Discrete components or integrated chips are the smallest quarantinable unit for board failures, and component damage or characteristic changes are the most fundamental cause of board failure. According to the problem of component parameter acquisition, the method based on VIF characteristic analysis is used to analyze the common components, and the common fault modes are simulated. The characteristics of VIF characteristic curves are analyzed, and the curve of various combinations of components is summarized. The capacitive faults and inductive faults of the circuit board of the fire suppression and explosion suppression system were diagnosed and the effect was remarkable.

**Keywords:** VIF characteristic curve; parameter acquisition; fault diagnosis

## 0 引言

随着微电子技术、微封装技术和印制电路板制造技术的不断发展, 电路板体积变得越来越小, 复杂程度越来越高, 传统的电路板故障检测方法使用万用表和示波器“探针”对电路板进行检测, 在电子元器件分布密度越来越高的电路板上, 已经无法精确采集到所需要的电路板的伏安参数<sup>[1-3]</sup>。电感、电容、半导体元件的使用在电路板上越来越多, 仅仅对伏安特性进行检测无法考虑到频率对电路参数的影响。本文采用的 VIF 特性分析使用集成的电路检测设备, 理论上能获取电路完整的 VIF 特性曲线, 能很快对电路板的故障进行定位, 达到对电路板的“心电图”进行诊断的效果。

VIF 检测技术是基于 VI 曲线测试基础上发展的一种新型电路检测技术, 相对于 VI 曲线技术, 它最大的改进在于在原有二维 VI 曲线的基础上加入频率维, 形成三维的 VIF

特性曲面, 这样的优势在于, 对电容、二极管等容性元件以及电感等感性元件检测时, 可以在较宽频率范围内扫描, 可以更全面地了解此类元器件是否发生故障。有的元件故障只在低频下对电路产生影响, 但当电路工作在高频时, 对电路几乎无影响, 而有的元件故障只在高频时影响电路的性能, 但是低频下对电路的影响可能会时时有时无。因此, 考虑频率对电路功能的影响, 可以更全面地对电路板的故障进行诊断, 从而发现电路板的隐藏故障。

## 1 VIF 特性分析的实现基础

进行 VIF 特性分析, 首先要对电路板的 VIF 特性进行采集。电路板上元器件密度越来越大, 虽然电路板在设计之初也会留下测点来进行检测, 但电路板存在组合故障和由于电子元件的容差引起的故障无法通过预留测点检测到。使用万用表和示波器进行检测时, 由于硬件条件的限制, 探针无法精确的对选取的测点进行波形采集, 甚至可能会在测试过程中由于探针的体积过大而造成元件之间的短路<sup>[4-6]</sup>。本文在实验时采用集成的 BM8500 多功能电路板故障诊断系统, 能通过较少的测试节点来采集到电路板全部的 VIF 参数, 基于 VIF 多路交叉矩阵扫描技术的电路板故障特性分析, 可以对电路板的各个节点的伏安特性的测试

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2019-12-30。

作者简介: 李光升(1972-), 男, 山东安丘人, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

欧博(1995-), 男, 湖南常德人, 在读硕士, 主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

拓展到全频率范围, 绘制出三维的 VIF 图象, 是 VIF 特性分析的硬件基础。

基于 VIF 的特性分析相对于其他故障诊断的方法而言, 更贴合与电路的本质, 采集到的 VIF 曲线(面)是电路板最基本的特征, 是从元件级来对电路板进行分析与故障诊断的方法。要进行电路板的 VIF 特性分析, 要对常见电子元件的伏安特性有所了解, 由于采集到的 VIF 图象不一定来源于单个的电子元件, 所以要对电路的板级进行划分, 在对产生异常的 VIF 图象分析时结合电路的原理图, 精确定位发生故障的元件, 是 VIF 特性分析的理论基础。

## 2 常见电子元件的 VIF 特性曲线特征及故障模式分析

电路板上常见的电子元件类型主要有电阻、电容、电感、二极管等, 这些元件的 VIF 特性曲线各有其特征。通过获取和分析分立元件的 VIF 特性图象, 积累不同特性的元器件的 VIF 图象特征, 根据各种分立元件发生不同故障时的 VIF 特性曲线的变化, 对元件的各种故障模式进行分析, 为后续进行电路板模块级 VIF 特性分析打下基础。

### 2.1 电阻

电阻是电路中最简单但必不可少的元件之一, 在电路板中应用十分广泛, 主要是在电路中起到限流的作用, 在电路中, 电阻中的电流与电路两端的电压成正比<sup>[7]</sup>。电阻的 VIF 特性曲线最为简单, 图 1 为使用 BM8500 检测仪采集到的电阻的 VIF 特性曲线。

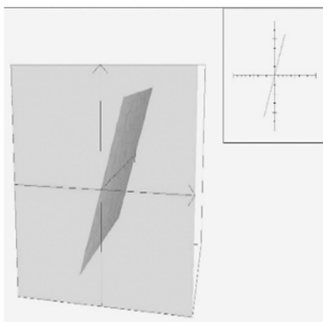


图 1 电阻 VIF 特性曲线

VIF 特性曲线中,  $y$  轴表示元件两端的电压,  $x$  轴表示流经元件的电流,  $z$  轴表示频率。由图 1 可知, 电阻的阻值基本上不受频率的影响, 所以在 VIF 特性曲线中表现为一个经过  $z$  轴的平面, 在任意频率下, 电阻的伏安特性曲线为一条直线, 电阻的阻值越小, 伏安特性曲线的斜率越大。电阻在电路中产生故障可能有两大类, 致命失效和参数漂移:

1) 致命失效。在灭火抑爆电路中常见的致命失效有断路、接触损坏、机械损伤、短路和击穿等。一般来说当电阻发生致命失效时, 电路的输入输出响应会发生较大变化, 可能引起电路整体工作状态发生变化, 诊断此类故障时使用万用表就能检测, 现象明显。

2) 参数漂移。从统计情况来看, 参数漂移在电路中发生的情况较致命失效更为频繁, 且其对电路的影响可能较

为隐蔽。在某型灭火抑爆电路板中常见的参数漂移故障主要有匝间短路、容性短路, 电路互感影响等。

匝间短路。在外界机械力的作用下, 会造成电阻的形变, 造成电阻丝匝间短路, 从而导致电阻的阻值减小。如图 2 所示。

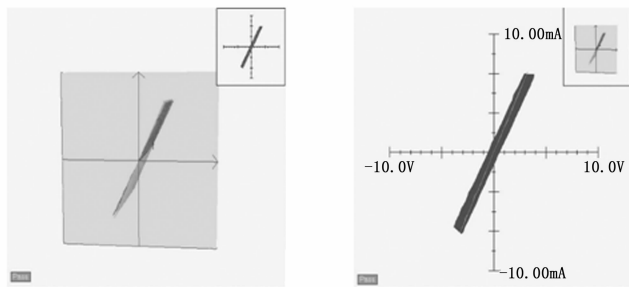


图 2 电阻匝间短路

图 2 中左图为 VIF 特性的 3D 曲线图象, 右图为该界面显示的某频率下的 VI 曲线。通常在进行 VIF 特性曲线分析时, 先观察 3D 曲面的特性, 从中截取异常的频率或频率段后, 观察异常频率或频率段的 VI 曲线特征, 应用 VIF 特性扫描, 进行对比分析时, 可以将完好的元件 VIF 特性曲线进行存储, 在 VIF 特性扫描时图中深色曲线(面)为存储的原始曲线, 浅色曲线为实测的曲线, 在右图中可以看到, 该深色曲线较浅色曲线宽, 这是由于在测试时预留了容差。电路的匝间短路故障会引起电阻的微弱减小, 在 VIF 特性曲线中的表现就是斜率的变化, 虽然发生匝间短路后的电阻阻值仍然在容差范围内, 但可以观察到浅色曲线的斜率已经偏离。

电阻容性短路故障。这种故障通常是由于电路设计的不合理, 正常电阻受旁路电容的影响, 导致电阻形成滞回曲线。

根据图 3 为模拟电阻被电容短路所截取的图象, 为使故障现象更明显, 便于观察故障规律。当电路被电容所短路时, VIF 特性曲线会形成滞回曲线并向  $y$  轴的方向偏转, 尤其在高频下, 电容被完全导通, 电阻将失去作用。

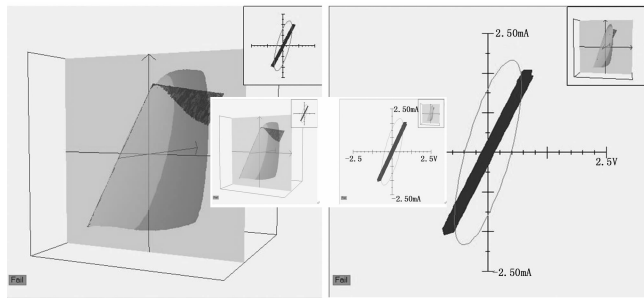


图 3 电阻容性短路

电路互感影响。当电路板中的线路布置过于密集或由于复杂电磁环境的影响, 会导致电阻受电路互感的影响, 模拟此类故障时将电阻与电感串联。

由图 4 可以观察到, 电感对电阻的影响与电容类似, 二者都在电阻原本曲线的基础上形成了滞回曲线, 不同之

处在于电感对电阻形成的滞后曲线会向  $x$  轴的方向偏转，使得导通性变差。造成此差异的原因是电容和电感对不同频率的电参数反应不同，而电容和电感对电阻参数漂移造成的影响通过常规检测手段无法对其进行诊断。

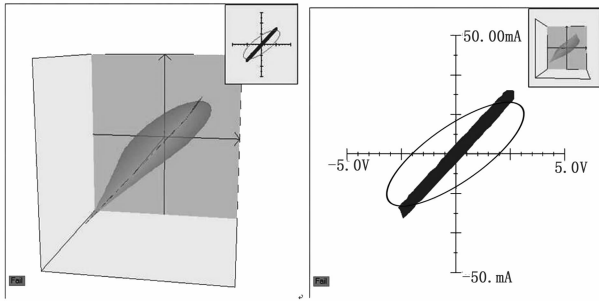


图 4 电路互感影响

### 2.2 电容

电容，是一种容纳电荷的容器，是电子设备中大量使用的电子元件之一，广泛应用于隔直通交、耦合、旁路、谐波、调谐回路、能量转换和控制等方面。它由两块金属电极之间夹一层绝缘电介质构成，是一个储能元件<sup>[8]</sup>。

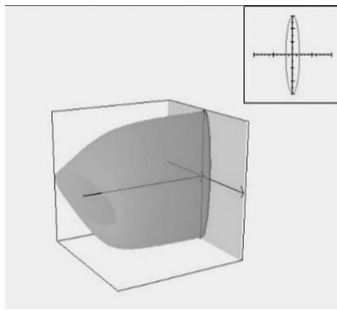


图 5 电容 VIF 特性

图 5 中对某型号的电容进行了 VIF 特性曲线扫描，扫描频率为 100 Hz~2 kHz。在图象中可以看到，同一电压下，电路的频率越低，该频率下的伏安特性曲线越趋近于  $x$  轴，即流经电容中流过的电流越小，反之，随着电路频率的升高，其图象越趋近于  $y$  轴，流经电容的电流越大。这一结果，反映了电容元件“隔直通交”的特性。此外，由图象可以知道，电容元件受电路频率的影响较大，有的电容元件损坏只在单一频率下使用伏安特性进行检测无法判断其是否发生故障，需要对电容元件进行一定频率范围的 VIF 特性扫描才能对其是否故障进行判断。

电容在使用过程中，通常产生的故障现象是容量变小，其故障模式一般有击穿、开路和参数退化。

1) 电容击穿。电容器彻底击穿后，将会失去电容的作用，电容的引脚之间为通路，电容失去隔直作用，使电路的直流电路出现故障从而影响交流的工作状态。电容击穿时相当于短路，在 VIF 特性曲线的表现为与  $yoz$  平面重合，没有形成椭圆曲面。

2) 开路。开路形成的原因一般是电极与引线接触点的氧化等原因造成接触不良或绝缘，或因工作电解质干枯、

冻结等。

3) 电参数退化。电参数退化相对于以上两种更为常见，且故障原因更为复杂，一般受环境因素影响更大，此为产生电参数退化的根本原因，但其本质是影响了电容的基本结构，如潮湿环境造成电极锈蚀、电解质老化或热分解等，其他的原因还有漏电和电容的机械形变。此类故障一般会造成电容的容值减小，如图 6 所示，其现象是 VIF 特性曲线收缩。

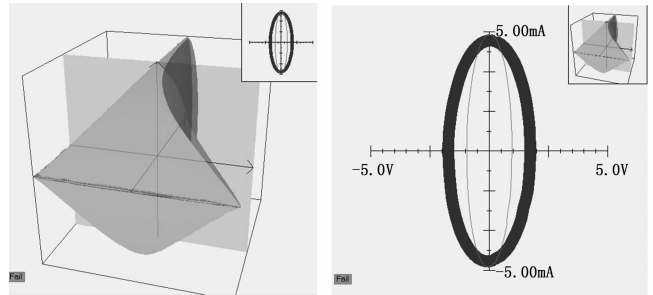


图 6 电参数退化

4) 输入短路故障。如图 7 所示，电容两端在并入电阻时，导致电容的图象发生偏转，且频率越低对电容的影响越大。

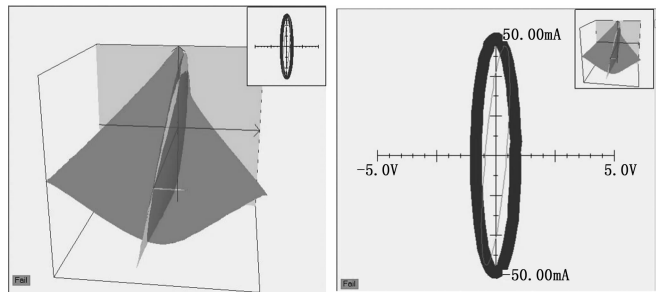


图 7 电容输入短路

### 2.3 电感

电感元件也是一种储能元件，它能将电能转化为磁能存储起来，在电路中的作用主要有滤波、震荡、延迟和限波等，此外还有筛选信号、过滤噪声、稳定电流及抑制电磁波干扰的作用<sup>[9]</sup>。其特性与电容特性正好相反，它具有阻止交流通过而让直流通过的特性。

图 8 是电感的 VIF 特性曲线的图象，电感与电容的 VIF 特性相反，它允许直流通而隔断交流通过，频率越高线圈阻抗越大，所以电感的 VIF 图象在低频下接近  $y$  轴，而在高频下接近  $x$  轴。因此，电感也是受电路频率影响的基础元件之一，对电感进行 VIF 特性扫描，能有更大几率检测其是否发生故障。

在电路板中，电感常见的故障有以下几种：

1) 铁芯消磁。铁芯消磁会导致电感线圈的磁通量减小，从而导致电感的电感量减小。

2) 匝间短路。匝间短路会导致电感线圈匝数减少，从而导致通过电感线圈的总磁通减少，电感值减小。

3) 电感受通性变差。电感受潮湿环境影响，导致电感线圈的阻值增大，导通性变差。

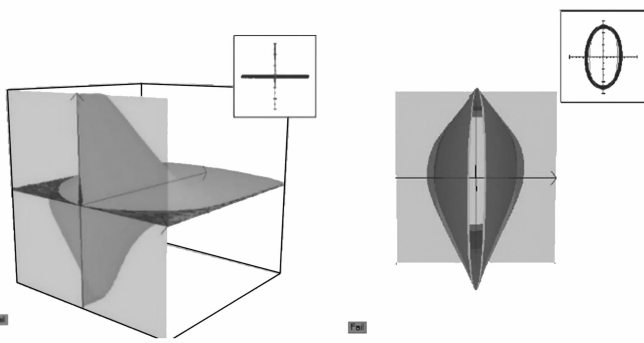


图 8 电感 VIF 特性

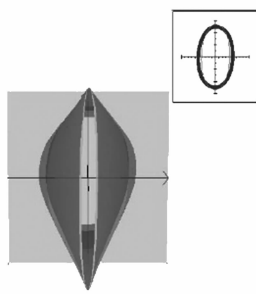


图 9 电感值减小

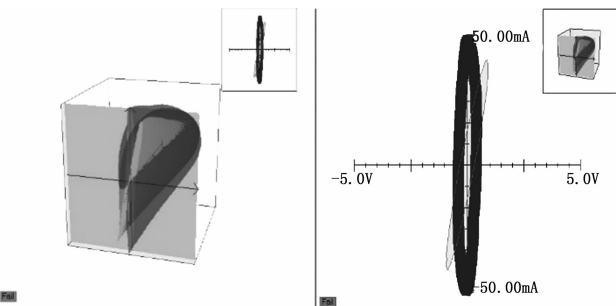


图 10 电感的导通性变化

## 2.4 二极管

二极管在电路板的应用中十分广泛, 它只允许电流由单一方向流过, 我们称这种特性为单向导电性, 这种特性使得二极管被大量应用于各种调制电路, 是一种重要的基础元件<sup>[10]</sup>。

由于 PN 结两端带有正负电荷, 与电容器极板带点相似, 因此在一定条件下, PN 结还具有一定的电容效应, 成为结电容。虽然结电容的数值不大, 但在高频电路中还要考虑结电容的影响。

对二极管进行 VIF 特性扫描, 得到图 11 中的 VIF 特性曲线图象。

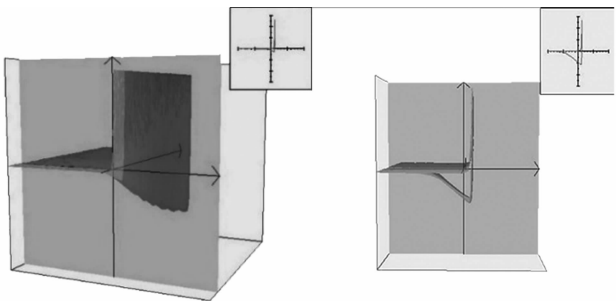


图 11 二极管 VIF 特性

由图中可以观察到由于结电容的存在, 二极管在高频下出现反向的电流, 且频率越高, 二极管结电容的作用越明显。二极管是一种相对稳定的元器件, 其故障模式主要由以下几种:

1) 击穿。当反向电压过高时, 会超过二极管的击穿电压, 造成二极管内 PN 结的击穿。图 12 为普通二极管, 其

结电容很小。在右图中可以看到二极管在反向击穿时的变化。

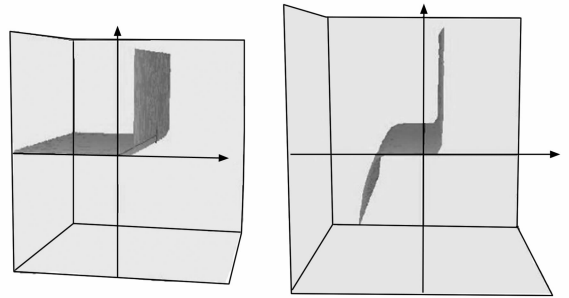


图 12 二极管反向击穿

2) 结电容变化。一般结电容的变化表现为节点容减小, 此故障模式可参考电容的故障, 不过多赘述。如图 13 的对比图象, 可以观察到明显的结电容减小, 滞回曲线收缩。

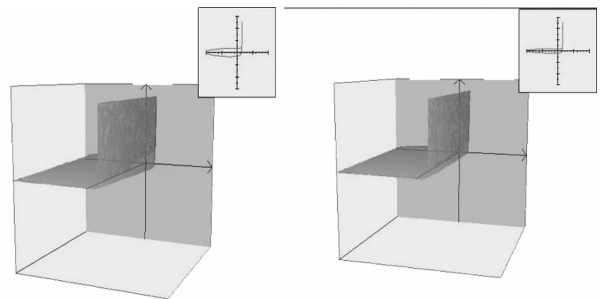


图 13 二极管结电容减小

根据对以上 4 种常见的基础元件进行 VIF 特性扫描分析, 频率会对电路中的电子元件产生影响从而产生故障, VIF 特性扫描对于实现电路板的故障诊断存在研究价值。根据以上元件的故障模式可以总结出以下规律:

- 1) 短路的故障曲线与  $yo z$  平面重合, 短路的故障曲线与  $xoy$  平面重合。
- 2) 电阻对电路造成影响主要是造成图象的偏移, 对滞回曲线影响不大。
- 3) 电容对电路的影响一般是造成曲面形成滞回曲线且向  $z$  轴方向偏移, 且频率越高影响越大。
- 4) 电感对电路的影响也会造成曲面形成滞回但偏移方向是向  $x$  轴。

## 3 基于 VIF 特性的模块级电路故障诊断

某型灭火抑爆系统在装甲装备上应用广泛, 但由于装甲装备上工作环境恶劣, 电磁条件复杂, 对火情反应不灵敏或灭火瓶误动作的故障现象也频繁发生。针对某型灭火抑爆电路板的故障诊断, 应用基于 VIF 特性分析的方法能有效诊断出容性元件或电路互感现象对电路功能的影响。

### 3.1 电爆管驱动电路

电爆管驱动电路接收从控制处理中心传来的启动信号, 经过滤波放大后输出到输出到灭火瓶的电爆管, 将其引爆使灭火瓶喷射灭火剂。该电路中, Q1 为达林顿晶体管,

R69 为 5.1 Ω 电阻，由于电阻阻值很小，所以在导通段斜率很大，在正常工作时输出大电流驱动引爆电爆管。其原理图如图 14 所示。

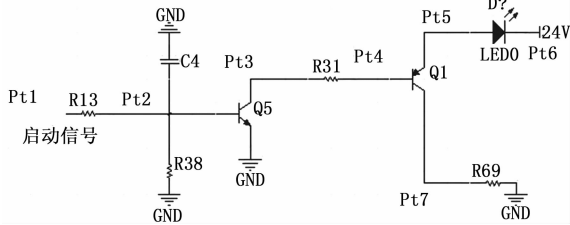


图 14 电爆管驱动电路原理图

对该电路进行 VIF 特性扫描，完好电路板的 Pt6 处扫描获得的结果如图 15 所示。

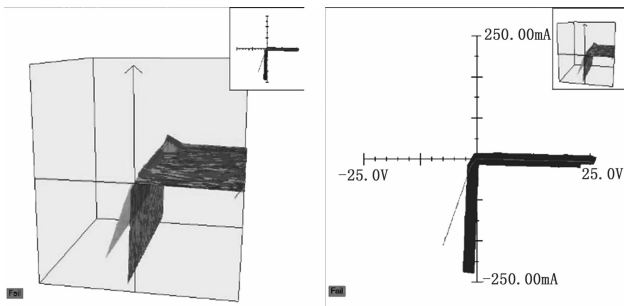


图 15 电爆管驱动电路 VIF 特性

对于电爆管驱动电路，最常见的故障是其输出电流值过小而无法引爆电爆管。通过调研，该模块产生的故障一般是经 Q1 达林顿晶体管放大后的强大电流将 R69 烧毁。电阻的结构是在碳膜上刻槽，保留碳膜条，电阻上的碳膜条由于某种条件（如电流过大导致过载），烧坏（氧化）了一部分，但又未完全烧断，相对原电阻变细的碳膜条阻值就变得很大。

为模拟电爆管无法被引爆的故障，对该驱动电路进行故障注入，增大在电路中串联一个 200 Ω 的电阻，对该驱动电路进行相同条件下的 VIF 特性扫描，截取到的 VIF 特性曲线可以明显看到由于电阻阻值的增加，在 Q1 导通时 VIF 特性曲线斜率减小，电流也无法达到引爆电爆管的值。

对于电爆管的驱动电路，还有一种故障是灭火器引爆延时的故障。按原定功能，在 IC5 发出启动电爆管的指令后应当在 30 ms 后引爆电爆管喷射灭火剂，但在实际操作过程中，经常出现电爆管引爆延时时长大于 2 s，而且此类故障发生的概率较低，将电路板从控制盒中拆离后检测时又能显示正常。在对其进行检查后，猜测是由于电爆管驱动电路输出的线路缠绕，出现互感，导致电流增大变慢，引爆电爆管延时较长。

为模拟该故障，在 Q1 输出端与电阻 R69 串联一个电感，并在测点 Pt6 处扫描截取到的 VIF 特性曲线如图 16 所示，在扫描频率范围内，发现由于电感的作用，导致在 Q1 导通时，需要一段时间后该处电流大小才能达到足以引爆

电爆管的 4A 电流。

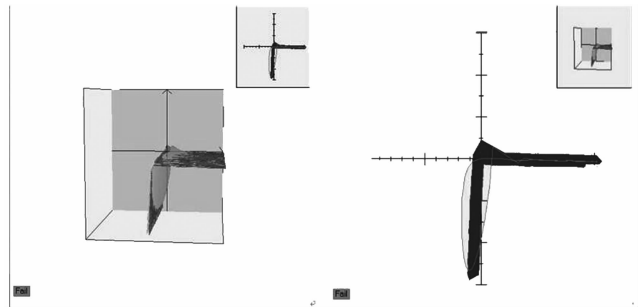


图 16 电感对电路的影响

### 3.2 灭火器指示灯控制电路

灭火器指示灯控制电路在受到旁路电容的影响时，会出现指示灯误动作，在正常工作时，若灭火器状况良好，D27 应当处于截止状态，灭火指示灯不亮。模拟旁路电容对该电路的影响，在 D27 两端并联一个电容，截取到完好电路和故障电路的 VIF 特性曲线如图 18 所示。

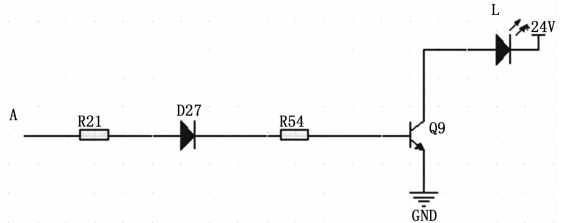


图 17 灭火器指示灯控制电路

根据图 18 中完好的 VIF 特性曲线，当没有并入电容时，二极管 D27 不会导通，指示灯不亮，但是并入旁路电容后，在二极管不导通的部分也出现了滞回曲线，尤其是在高频段更为明显。因此，故障电路中电流存在高频干扰时，会导致指示灯误动作的故障，无法正确判断灭火器的状况。

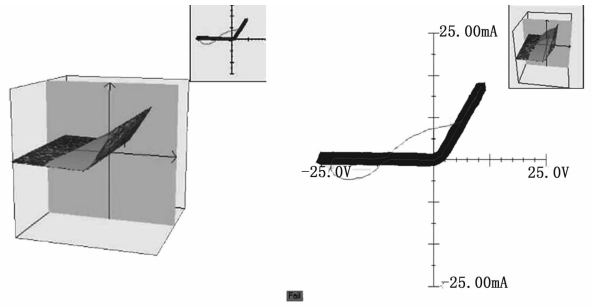


图 18 灭火器指示灯控制电路 VIF 特性

## 4 实验结果与分析

采用基于 VIF 特性分析的方法进行电路板故障诊断的具体步骤为：

- 1) 对电路原理图进行分析，划分模块，选择合适的测点；
- 2) 启动检测仪电源，存储完好电路板 VIF 特性图像；