

机载电子设备电源质量测试方法

如何满足 MIL-STD-704 / GJB181 标准要求，
对各种飞机电子设备进行电源质量测试？



多样的机载电子设备电源：

单相 / 三相交流，400Hz，115 V

单相 / 三相变频交流，115 V

单相交流，60Hz，115 V

直流，28V / 270V

前言

军用飞机的供电质量影响航空电子设备的工作和寿命。MIL-STD-704 是关于航空电子设备供电及用电方面的协调文件。MIL-STD-704 规定的测试要求用于考察航空电子产品中电子设备与军用飞机供电设备之间的兼容性。本文共分三部分，总结了军用飞机的电气工作条件以及 MIL-STD-704 中定义的供电类型，同时还对的美军标 704 测试指南《考察军用飞机电子设备与供电电源兼容性的测试指南》中所规定的直流 28 V 直流的航空电子设备的兼容性测试进行了论述。对造成电源质量的变化以及这些变化对航空电子电子设备的影响进行详细的说明。在文章的最后还对测试系统的软件以及硬件实现做了说明。

第一部分：军用飞机的电气工作条件以及 MIL-STD-704 测试方法概述

MIL-STD-704

MIL-STD-704 是一个协调文件，它定义了军用飞机上电子设备电源输入端口上的特性要求。军用飞机上的供电系统必须按照 MIL-STD-704 标准的要求为电子设备供电，同时军用飞机上的电子设备在规定的电源质量条件下必须能够正常工作。A 到 F 的所有版本的 MIL-STD-704 现今均还有效。究竟采用哪个版本一般应在设计和制造军用飞机阶段做出决定。

美军标 704 测试指南

美军标 704 测试指南《考察军用飞机电子设备与供电电源兼容性的测试指南》中已经给出对军用飞机电子设备的测试方法。指南针对几种供电电源类型，对军用飞机电子设备提供了测试指南，用于考察电子设备与 MIL-STD-704 的 A 到 F 版所规定的军用飞机供电电源特性的兼容性。提出这些测试要求的目的是给出一个合理的保证来确认通过测试的军用飞机电子设备可以直接将其安装在军用飞机上应用，这样会大大减少电子设备的设计者和军用飞机生产厂商在设计和制造方面的压力。美军标 704 测试指南分为 8 个部分。第 1 部分是关于兼容性测试，电源分类，军用飞机电气工作条件以及电子设备规格的一般性的指导。第 2 到 8 部分是对应各类供电类型的电子设备所进行兼容性测试的指南。指南的第 8 部分对 28V 直流电子设备提供了测试指南。本文中我们着重讨论第 8 部分，并论述了各类电源质量方面的干扰来源以及模拟方法。同时也针对这些模拟方法的软件时间做了简要说明。对应于 28V 直流的电源质量问题的来源以及相应的测试方法进行比较的详细介绍。其他类型电源测试请与千里顺风公司工程师联系。

军用飞机的电气工作条件

MIL-STD-704 详细说明了六种电气工作状态：

1. 正常工作状态
2. 电源中断（转换）状态
3. 非正常供电状态
4. 应急供电状态
5. 启动状态
6. 电源故障状态

针对六种截然不同的军用飞机工作状态，必须明确地定义出对电子设备的性能要求，这就要求设计者除必须考虑到负载临界特性外也必须折衷考虑每一个军用飞机电子设备的重量、容量、成本和可靠性之间的平衡。

下面分别讨论这六种状态：

正常工作状态：在正常负载条件下时，军用飞机电气系统中各项功能均可正常地实现。军用飞机电气负载可以为电阻性的，电感性的，轻微容性的，非线性的，开关性质的以及（或）脉冲性质的。发动机的冲击电流和电源的冲击电流都是在正常的负载条件下的。在正常工作状态下，所有电子设备必须能在性能和功能两个方面满足要求。

电源中断（转换）状态：当电气负载在供电电源之间转换时，就会发生电源中断。对于交流系统，转换可以发生在外接地面电源、外接辅助电源单元，接入多功能军用飞机交流发电机或变换器；对直流系统，转换可以发生在外接地面电源，外接辅助电源设备，外接多功能军用飞机用直流发电机、直流变换器或变压整流器之间，在上述状态下军用飞机电气系统应当能正常运行。同时根据设备的重要程度，电子设备对电源干扰的兼容性要求可能会有所不同。

- **重要设备：**在电源转换发生之前、发生之间以及发生之后，电子设备性能应完全符合要求。
- **次重要的设备：**设备可以在电源中断期间被关闭，但是在电源从中断恢复之后要求设备快速并且自动地恢复到原有的工作状态（没有数据等的丢失）。
- **非重要设备：**设备准许关闭，并且可能会通过很长的时间恢复到所有性能要求的状态（丢失数据也允许重新启动）。为了将飞行员的工作负荷降到最低，强烈建议要在飞行员不干预的条件下电子设备在中断之后自动恢复设备性能。

非正常供电状态：当军用飞机电气系统中发生故障时，即进入非正常供电状态。非正常供电状态可能在保护装置动作消除故障之前的短暂时间内持续存在，也可能会持续一段更长的时间。在非正常供电状态时发电和供电系统的内置保护功能应该立即启动并且在故障发生过程中将供电限制在 MIL-STD-704 相对应版本所规定的当前（非正常供电）状态的限值之内。瞬变的限值通常也参考 MIL-STD-704 中各版本中有关过压、欠压的限值，以及过频和欠频频限值部分。能够导致非正常供电状态的故障有：

- 发电机控制单元故障
- 发电机故障、绕组损坏、失磁等。
- 线路以及（或）电流接触器故障
- 电气过载
- 短路

根据设备的重要程度，设备对非正常供电状态下的性能要求可能会有所不同。

应急供电状态 :应急状态是指主供电电源失效并且军用飞机电气系统在有限容量的备用源供电时的一种工作状态。备用源可以是电池、低压空气驱动的发电机（ADG）将来也可能是燃料电池。军用飞机此时应脱掉大多数电气负载（只留下保障飞行的重要负载）。根据电子设备的重要程度，设备在紧急状态下的性能要求可能会不同。

启动状态 :是指当电池启动辅助电源时，或当推进发动机的电气系统启动时的状态。对大部分军用飞机而言，启动状态只发生在采用直流供电的系统中。根据电子设备的重要程度，设备在启动状态下的性能要求可能会不同。

电源故障状态 :是指当电子设备电源中断大于 50 毫秒而小于 7 秒时的工作状态。对于三相交流系统，电源故障可以发生在一相，二相，或三相上（一相和二相电源故障持续的时间可能是无限期的）。根据设备的重要程度，对电源故障时电子设备的性能要求可能会不同。大部分的设备不要求在发生电源故障时进行工作。在电源故障状态下对电子设备的要求的不同之处在于设备充分恢复性能的时间及设备中数据保持的状况。一些三相交流设备可能会要求在发生一相乃至二相电源故障时继续工作。

电子设备的供电类型

MIL-STD-704 的不同版本共定义了七种可选的供电电源形式。根据电子设备的供电要求，美军标 704 测试指南分别为下面七种供电类型提供指导方法：

测试项目	电源种类
Section2	单相交流，400Hz, 115 V
Section3	三相交流，400Hz, 115 V
Section4	单相变频交流，115 V
Section5	三相变频交流，115 V
Section6	单相交流，60Hz, 115 V
Section7	直流，270V
Section8	直流，28V

首选的供电类型因军用飞机不同而不同。在为电子设备选择供电电源类型时必须考虑军用飞机的安装平台以及军用飞机上的电气系统容量，同时也应注意一个军用飞机的供电系统并不一定包含全部七种供电类型。

美军标 704 测试指南规定的电子设备的兼容性测试方法

美军标 704 测试指南的 Section2 到 Section8 提供对应 7 种供电类型的电子设备的兼容性测试指南。

表一归纳了相关的 Section2 和 Section8 中规定的测试方法：

美军标 704 测试指南针对七种供电类型及电子设备的六种工作状态，每项测试都是通过有规律的命名方法来命名，这样可以规范测试并易于记忆，具体测试的定义方法如下：

供电类型+供电状态+状态内的测试编号

表一 美军标 704 测试指南中规定的 section2 以及 section8 的测试项目

Section2 115V 400HZ 交流		Section8 28V 直流	
测试方法	描述	测试方法	描述
正常工作状态			
SAC-101	负载测量以及电流谐波测量	LDC-101	负载测量
SAC-102	稳定状态下的电压限值和频率限值	LDC-102	稳定状态下的电压限值
SAC-103	无测试要求（为了与三相交流对应）	LDC-103	电压失真频谱
SAC-104	电压调制	LDC-104	纹波总量
SAC-105	频率调制	LDC-105	电压瞬变
SAC-107	总电压失真		
SAC-108	交流中的直流分量		
SAC-109	电压暂态		
SAC-110	频率暂态		
电源转换状态			
SAC-201	电源中断	LDC-201	电源中断
非正常供电状态			
SAC-301	稳定状态电压限值	LDC-301	稳定状态电压限值
SAC-302	电压瞬变（过电压、欠电压）	LDC-302	电压瞬变（过电压、欠电压）
SAC-303	频率瞬变（过频或者是欠频）		
应急供电状态			
SAC-401	电压以及频率限值	LDC-401	电压限值
启动状态			
SAC-501	为了和直流测试对应，不做测试，除非设备性能中有规定	LDC-501	启动时电压瞬变
电源故障状态			
SAC-601	电源故障	LDC-601	电源故障
SAC-602	没有测试，这是为了与交流三相对应	LDC-602	极性反接
SAC-603	相位翻转		

例如测试 LDC-101,编号中的 LDC 部分代表了 28 V 直流的电子设备测试方法，第一个 1 代表供电状

态为正常工作状态，MIL-STD-704 测试指南将正常工作状态到电源故障的电气工作状态分别用相应的编号 1 到 6 来表示，同时最后的两位编号 01 则是代表在这个供电状态下的第一个测试项目。读者也可以通过上述描述以及《表一》来了解各种供电以及各种工作状态下的测试项目。

图 1 是从美军标 704 测试指南 Section8 中截取而来的一个测试方法的设备配置图，给出了完成 LDC-101 的测试配置。其他工作状态及相应状态下测试方法的设置极其类似。一个可调电源为待测设备提供电源。一套仪器用来测量以及（或）记录测试中所感兴趣的电气参数。电压测试是在待测设备的输入端的 10 厘米距离内进行的。激励和监视设备为待测单元（UUT）提供输入信号并监视待测设备的性能。对应每种电子设备，其激励和监视设备都是不相同的。测量部分对应的真有效值电压表、功率计、频谱仪、示波器以及失真度分析仪等可能是单个仪器、多个仪器或者几个仪器组。

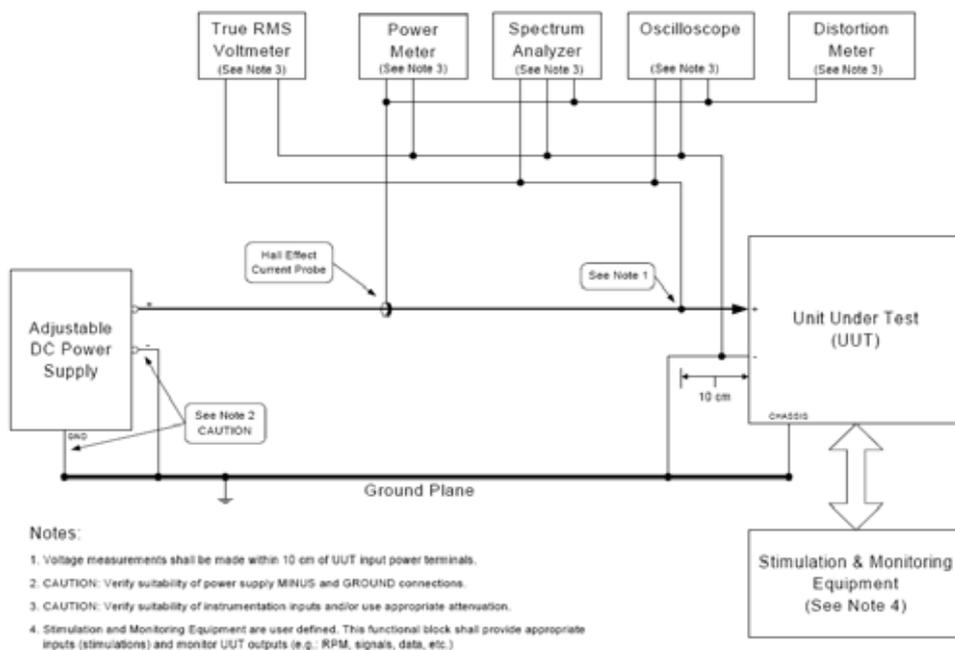


图 1 LDC-101 测试系统原理框图

激励和监视设备（Stimulation & Monitoring Equipment）：激励和监视设备是用来为 UUT 提供信号并监视电子设备响应的一套设备。当电子设备按 MIL-STD-704 要求供电时，激励和监视设备用来模拟军用飞机上真实的信号传递及响应过程，通过这些来验证电子设备的性能并考察其是否通过兼容性测试，通常意义上我们可以将它理解为测试台架。

- **激励设备：**是能够精确再现除电源供电之外的所有军用飞机的输入信号和输出信号的设备。可以是模拟信号、数字信号、继电器、液压、气动、传感器以及测试数据等等。其目的是要用最相近的方式复制 UUT 输出到军用飞机上其它系统的输入以及军用飞机上其它单元到本单元输出。必须保证激励设备能精确地复制军用飞机的有效工作环境，来满足 MIL-STD-704 中兼容性测试要求，特别是在电源与正常特性有偏差并且偏差持续只有几毫秒的暂态测试中尤为重要。
- **监视设备：**监视设备对每一种电子设备和军用飞机而言都是独有的。监视设备能在测试过程中掌握电子设备是否运行在所规定的性能水平之内。监视设备必须包含一种方法以监视、交换测量和（或）记录采样数据、显示测试样本和机械输出等等。必须要注意监视设备一定要能够精确掌握电子设备的性能，特别是在电源与正常特性有偏差并且偏差持续只有几毫秒的暂态测试中尤为重要。

第二部分：28V DC 电子设备的兼容性测试方法

28V DC 测试方法 这里对每种测试方法进行了相应的介绍,并对引起军用飞机供电状态变化的发电以及负载情况进行详细描述。测试步骤的细节部分请参阅-美军标 704 测试指南的有关这些测试方法的具体描述。

- **LDC-101 (28 V DC) 负载测量**：测试方法 LDC-101 用于测量军用飞机 28V 直流设备负载和电流参数。电子设备的电气负载特性是军用飞机电气系统诸多潜在的不利因素之一,28V 直流电子设备规格中必须包括相应的要求以减少或消除这些不利因素对军用飞机电气系统的影响。电子设备规格必须规定负载特性限值,包括负载(一般测试负载功率)、冲击电流,电流失真总量,以及电流失真频谱(失真的各分量频率分量)。如果电子设备性能规格方面有要求,除测量在输入电源 28V 直流处于正常工作状态时的负载特性、电流失真总和以及电流失真频谱,还要测量启动过程中的冲击电流,对于能运行多种状态的电子设备而言,每种运行状态下的特性都应重复测量。
- **LDC-102 (28V DC) 电压限值(正常工作状态)**：正常工作状态下电压变化是由军用飞机供电系统内线路阻抗以及电子设备的负载变化所造成的直流发电机和变压整流器的响应以及(或)引擎驱动发电机的机械驱动电压变化和跌落引起的。过电压和欠电压都会加重军用飞机电子设备中那些尺寸和耗电不合理的器件的负担。电压变化可以引起器件发热。欠电压会导致一些设备供电不足。电压变化还会造成直流电机以及相应的风扇,泵,绞盘等的速度和(或)扭矩的变化。LDC-102 用于考察输入电源电压在对应于的 MIL-STD-704 版本所要求的限值(低于,等于,以及高于)条件下 28V 直流电子设备的性能。电子设备可以在每种电源输入的条件下工作一段时间,时间长短的选择是为了考察设备能否在正常工作状态下连续运行,测试同时也可以考察器件的承受力(特别是热承受力)。每种测试的时间必须不少于 30 分钟。同样,也应考察每种电源输入状态下的设备再起动情况。
- **LDC-103 (28Vdc) 电压失真频谱**：对于直流供电系统,电压失真是指交流纹波的含量。直流电压失真(纹波)主要是由于变压整流单元的输出纹波或直流发电机的电刷和换向开关造成的;同时供电电源之间的相互作用,供电系统内由于供电负载变化的失真电流也会产生电压失真(纹波)。电压失真可以干扰电路和数据传输,引起滤波器的发热,更甚者,如果设备具有谐振点,会由于设备在这些谐振点上对电压失真极为敏感而导致不安全的工作状态。电压失真还会引起直流电动机的发热。LDC-103 要求在相应的 MIL-STD-704 版本规定的限值内,在足够宽的带宽内给电子设备注入不同幅度和频率的电压失真来考察 28 V 直流电子设备的性能。设备运行过程中输入电源电压失真(纹波)的幅度和频率缓慢变化,同时也要求在特定电压失真(纹波)上驻留一定时间。
- **LDC-104 (28 V DC) 总纹波(电压)**：测试方法 LDC-104 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对总的电压纹波的反应。纹波电压是“混叠”在直流电压上的交流波形成分。图 2 给出了一个军用飞机上的变压整流器在带负载时的直流上的纹波。电压纹波主要是由于变压整流器的交流整流、交流发电机内的交流整流单元以及(或)直流发电机的电刷和换向单元的失真所引起的。纹波是对交流波形进行整流的固有结果,纹波的特性和幅度取决于所用整流器的类型、滤波器的输出、交流输入端的特性(400 Hz、60Hz 或变频)以及电气负载状况。6 个脉冲整流,12 个脉冲整流后的直流输出会有不同的纹波特点。同时负载的失真电流与电源相互作用以及电网上的失真电流均会造成纹波电压。总的纹波就是这些个体纹波成分的累计总和。电压纹波可以干扰电路和数据传输,引起滤波器的发热,更有甚者,如果设备具有谐振点,在这些谐振频率点的电压失真会使电子设备抗干扰能力下降,而导致不

安全的工作状态。电压纹波还会引起直流电动机的发热。给电子设备的电源输入端注入 MIL-STD-704 相应版本规定的限值内的电压纹波用于考察 28 V 直流电子设备性能。总的电压纹波是那些规定用于测试的个体电压纹波分量的累计结果。设备在每种电源输入的情况下都要运行一定的时间。每种测试条件下电子设备运行时间都必须不少于 30 分钟。

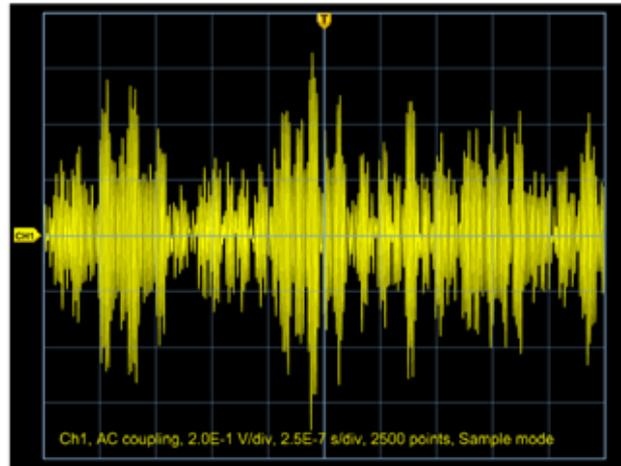


图 2 28V 直流电压纹波的波形

- **LDC-105 (28 V DC)电压瞬变：**测试方法 LDC-105 用于考察军用飞机 28V 直流电子设备对电压瞬变的反应。正常工作状态下电压瞬变主要是由于负载的切换（接通和断开）以及脉冲型负载造成的。发生在交流输入端的电压瞬变也可以通过变压整流器耦合到直流端，从而造成在变压整流器输出端的直流电压瞬变。正常工作状态下的电压瞬变包括过压和欠压两种类型。

图 3 给出了军用飞机上的直流电压瞬变波形，可以看出如果电子设备没有足够的储能元件，在瞬变发生过程中可能就会造成设备异常关闭，这时数据传输和存储单元会遭到破坏。电子设备大的单位冲击电流一般发生在电压瞬变发生过程中或之后以及供电电路断路器动作的时候。这个测试方法是在 MIL-STD-704 相应版本所要求的正常工作状态的电压瞬变限值内，指定幅度和持续时间的过压和欠压条件下考察电子设备的性能。每种瞬变作用于电子设备的次数至少为 5 次。电压瞬变的测试是在各种 MIL-STD-704 相应版本所规定的正常工作电压限值中的高电压或者低电压当作初始供电电压下进行的。电子设备应该同时能够在每隔 0.5 秒重复发生的电压瞬变状态下工作一定的时间。重复的电压瞬变作用于电子设备测试的总的时间必须不少于 30 分钟。

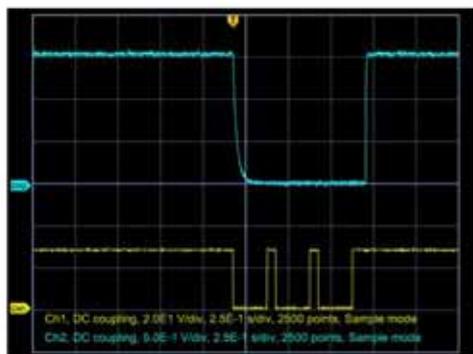


图 3A 28V 电压中断时 DC-DC 输出（没有外接储能电容）

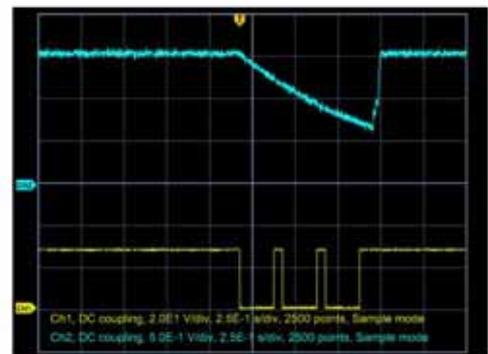


图 3B 28V 电压中断时 DC-DC 的输出（接 900uF 储能电容时）

图 3 28V 直流到 15V 直流的 DC-DC 输出端两种储能电容条件下的输出端响应

- LDC-201 (28 VDC)电源中断**：测试方法 LDC-201 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对电源中断（短于 50 毫秒的电压中断）的响应。当电气负载在两个供电电源之间转移时就会产生电源中断。电源中断也可能产生于操作员的负载轮换的操作。正常工作状态下的电压瞬变发生在电源中断结束时。图 4 给出了交流电压中断引起的变压整流器输出端的电压变化波形。电源中断时设备性能要求应根据负载的重要程度不同而不同。电源中断会加重电子设备中各个器件的负担。如果没有足够的储能元件（如图三），电子设备在电源中断时会发生意外关闭。数据传输和存储也会遭到破坏。在电压中断过程中或快结束时，会产生很大的单元冲击电流，供电电路中断断路器也可能动作。电子设备此时可以关闭，不用自动重启而且允许丢失数据和存储的数据。这一测试用于考察在施加电压中断干扰时电子设备的性能。应在待测单元（UUT）的电源输入端并联一个虚拟负载，电源中断过程中，如果电子设备自身不能阻止其储能馈送到其它的军用飞机负载时，虚拟负载会消耗待测设备所存储的电能。不同持续时间的电源中断测试是在 MIL-STD-704 相应的版本所规定正常工作电压限值中的高电压或者低电压当作初始供电电压下进行的。电源中断还包括发生在电源中断结束时的正常工作状态电压瞬变。各种电源中断作用于电子设备应不少于 5 次。

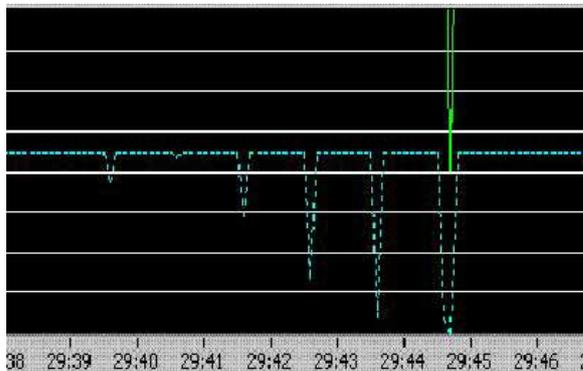


图 4A 变压整流器输入端 115V 有效值随时间变化曲线

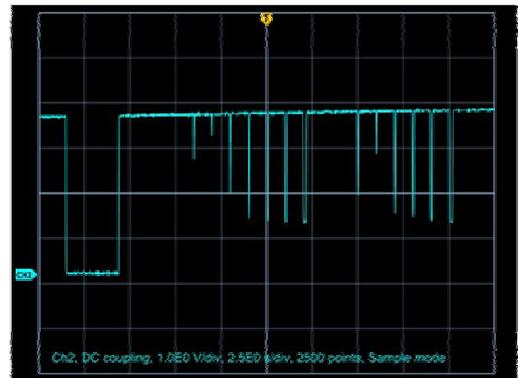


图 4B 变压整流器的输出随时间变化曲线

图 4 交流电压中断引起的变压整流器输出端的电压变化

- LDC-301 (28 VDC)非正常供电状态电压限值**：测试方法 LDC-301 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对非正常供电状态的电压限值的响应。发电和供电设备以及（或）军用飞机电气过载等会造成供电电压超过军用飞机电气系统正常（正确地运行）状态的稳态电压限值。军用飞机非正常供电状态虽然非常少见但确实会发生。内置在供电和发电系统内的保护电路会发挥作用将电压限定在 MIL-STD-704 各种版本所对应的限值之内。设备在非正常供电状态下的性能根据负载的重要程度不同而不同。电子设备在非正常供电状态下可能会意外关闭。稳态的高电压和低电压会加重电子设备内那些耗电以及尺寸不合适的器件的工作负担。电压变化会造成器件的发热。低压还会导致一些设备处于供电不足的工作状态。在非正常供电状态时准许关闭的电子设备在电源恢复到正常时可以不自动重新启动。此测试方法用于考察当输入电源满足 MIL-STD-704 相应版本所规定的稳态限值（高电压和低电压）时电子设备的性能。电子设备要在每种电源供电状态下以及电源恢复到正常工作状态时持续工作一段时间，所选择的时间要能够考察设备可否继续工作，如果条件可行，还应让电设备连续工作在非正常供电状态来考察器件承受力（特别是热承受力）。每种测试状态的测试时间至少为 30 分钟。如有要求，还应考察电子设备在每种供电状态下的再启动情况。

- **LDC-302 (28 VDC)非正常供电状态的电压瞬变**：测试方法 LDC-302 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对非正常供电状态下的电压瞬变的响应。非正常供电状态的电压瞬变发生在供电系统中存在故障时。短路可以造成电压瞬变超过正常工作状态的电压瞬变限值。发生故障的变压整流器，发电机或发电机控制单元都可以造成电压瞬变超过正常工作状态的电压瞬变限值。发生在交流输入端的非正常供电状态的电压瞬变还会通过变压整流器耦合并在直流输出端造成直流电压瞬变。非正常供电状态的电压瞬变包括过压瞬变和欠压瞬变。军用飞机非正常供电状态虽然非常少见但确实会发生。内置在供电和发电系统内的保护电路会发挥作用将电压限定 MIL-STD-704 相应各种版本所对应的限值之内。非正常供电状态限值包括稳态限值和瞬变限值。电子设备在非正常供电状态下的性能要求会根据负载的重要程度不同而不同。电压瞬变会加重电子设备中器件的工作负担。电子设备在非正常供电状态下可能会意外关闭，数据传输和记忆可能会遭到破坏。在瞬变（软启动电路的失败）过程中或快结束时，会产生很大的单元冲击电流，供电电路中的断路器也会动作。在非正常供电状态准许关闭的电子设备在电源恢复到正常时可以不自动重新启动。此测试方法用于考察当输入电源满足 MIL-STD-704 相应版本所规定的瞬态限值（高电压和低电压）时电子设备的性能。同样还应考察供电返回到正常工作状态时设备的性能。应对电子设备至少施加 5 次非正常供电状态压瞬变。
- **LDC-401 (28 VDC) 应急供电状态下电压限值**：当主电源失效并且军用飞机由一个具有有限容量的备用电源供电时，就称之为应急供电状态。电压变化军用飞机供电系统内线路阻抗以及电子设备的负载变化带来的供电能力、控制单元相应以及电压跌落引起的。对应急供电状态下的设备性能要求由于负载的重要程度不同而不同。应急供电状态下稳态的高电压和低电压会加重电子设备内那些耗电以及尺寸不合适的器件的工作负担。电压变化会导致器件发热，低压还会导致一些设备处于欠供电状态。在应急供电状态发生过程中，电子设备可能会意外关闭。如果在应急供电状态下电子设备准许关闭，那么在电源返回到正常工作状态以后，也不要求电子设备自动重新启动。此测试方法用于考察满足 MIL-STD-704 相应版本所规定的应急供电状态电压限值时 28 V 直流电子设备的性能。电子设备要在每种供电状态下以及电源恢复到正常工作状态时持续工作一段时间，所选择的时间要能够考察设备可否继续工作，如果条件可行，还应让电子设备连续工作在应急供电状态以考察器件承受力（特别是热承受力）。每种测试状态的测试时间至少为 30 分钟。如有要求，还应考察电子设备在每种供电状态下的再启动情况。
- **LDC-501 (28 VDC) 启动状态电压瞬变**：测试方法 LDC-501 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对启动状态电压瞬变的响应。在附属电源单元启动或推进式发动机启动时会发生启动状态电压瞬变。这种电压瞬变会加重电子设备中器件的负担。对电子设备启动状态的性能要求会根据负载的重要程度而有所不同。在瞬变（电子设备没有足够的储能）过程中，电子设备可能会意外关闭，数据传输和记忆也会被破坏。在瞬变发生过程中以及结束的时候，会产生很大的单元冲击电流，电子设备的电源供电断路器会动作。当电源恢复到正常工作状态以后，在启动状态下关闭的设备可能不会自动重新启动。此测试方法用于考察当输入电源满足 MIL-STD-704 相应版本所规定的启动状态电压瞬变时电子设备的性能。同样还应考察供电返回到正常工作状态时电子设备的性能。应对电子设备施加至少五次的启动状态电压瞬变。
- **LDC-601 (28VDC)电源故障**：测试方法 LDC-601 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对电源故障（电源故障持续时间大于 50 毫秒而小于 7 秒）的响应。电源故障可以来自变压整流器的故障、发电机故障、电流接触器的故障、电路断路器的故障、连接线的故障以及连接器的故障。电源故障会加重电子设备中各器件的工作压力。大部分的电子设备允许在电源故障的过程中关闭，一些设备必须不能丢失数据或存储。在电源恢复时，会产生很大的单元冲击电流，同时电子设备供电的断路器会动作。

当电源再次恢复时，设备可能不必自动地重启。此测试方法用于考察不同电源故障持续时间下电子设备时的性能。对电子设备的性能要求根据负载的重要性会有所不同。每种电源故障作用于电子设备的次数至少为 5 次。

- **LDC-602 (28 VDC)极性反接**：测试方法 LDC-602 用于考察军用飞机 28 V 直流电子设备对极性反接的响应。如果使用一个正确的物理方法来阻止输入电源极性反接，电子设备就能够充分满足测试的要求。极性反接是由不正确的布线或不适当的安装所引起的。极性反接会加重器件的负担，还会造成马达反方向旋转。测试方法 LDC-602 用于验证电子设备是否有一个正确的物理方法来避免极性反接，或在发生极性反接时，电子设备不会发生损坏。如果需要的话，可能会要求电子设备在极性反接的条件下运行一定的时间，然后再接入正确极性以确认电子设备没有发生损坏。

第三部分：满足美军标 704 测试指南的测试系统的硬件及软件实现

图一是满足美军标 704 指南要求的测试系统。这个测试系统包含硬件和软件两大部分，硬件部分保证能够满足产生 MIL-STD-704 相应版本要求的各种供电电源类型以及各种供电状态下的电源质量仿真波形，同时必须包含相应的硬件设备来完成对负载特性进行精确测量；MIL-STD-704 是一个非常复杂的测试标准，在美军标 704 测试指南中规定了多种测试项目，对应与版本 A~F 的测试又有所不同，因此系统软件必须能自动完成全部的测试，这样既保证了测试结果的重复性，同时也提高测试效率。

硬件

图 5A 是根据美军标 704 测试指南中采用的满足 28V 直流电子设备测试的电源质量模拟器，图 5B 是以宽频四象限功率放大器为核心的实现的测试系统框图（同时满足图 1 的测量要求要求）。图 5C 为实用单相交流（兼容直流）测试系统的实物照片：

系统组成

通过图一可以知道，一个完整的 MIL-STD-704 测试系统组由多个模块组成：

- **模拟源**：宽频四象限功率放大器及信号源，所起的作用和特点如下：
 - 该设备用以模拟标准中各种电压波动相关的抗扰度测试波形，例如纹波，电压瞬变等各类复杂波形
 - 该设备可以提供一个纯净的源，用以辅助其他各种设备测试 UUT 在工作过程中对外发射的各种干扰信号。
 - 宽频四象限功率放大器由于采用推挽输出，可以驱动各种负载特性如容性、阻性和感性负载。因为频率范围宽，容易控制，波形精度高等特点，使测试结果的重复性大大提高。
 - 对于 28VDC 系统的测试要求，其 LDC-104 及 LDC-105 要求测试的抗干扰信号的频率范围涵盖 10Hz – 16.8kHz。而 LDC-302 的抗干扰测试电压最高达到 80V。因此为了能较好的还原指南要求的测试要求，测试设备，四象限功率放大器的频率和电压范围至少要能覆盖 10Hz-33.6kHz / 80VDC(频率至少为原要求的 2 倍)的范围。
 - 而其他电源环境测试系统的要求各有不同，根据不同的电源环境对模拟源的要求也不一样。如 115V, 400Hz 系统要求最低测试频率从 1Hz 开始。其最高短时测试电压为 180V，因此其峰值电压必须达到 255V 才能满足标准测试要求。
- **监控模块**：在 MIL-STD-704 标准测试过程中，需要按照指南要求提供各种监视数据，并且根据某些监视结果来控制测试过程：
 - RMS 电压测量模块；
 - 功率测量模块；
 - 频谱测量模块；
 - 波形显示模块；
 - 失真测量模块

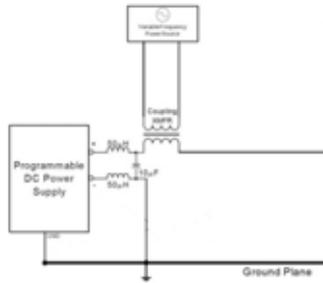


图 5A 测试指南建议的测试图

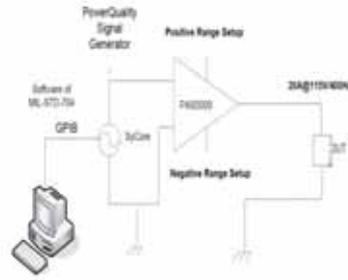


图 5B 系统实现原理图



图 5C 系统实物照片

图 5 系统的硬件实现

软件：软件是实现完整测试的核心，通过软件用户可以进行各项测试的设置，进行连续无人工干预的连续测试、完成动态波形显示以及负载状态的测试。

- **MIL-STD-704 版本选择：**由于当前美军标 704 的各个版本依然有效，因此软件中必须为用户提供一个选择来确定针对那个版本进行测试，这里图 6 中可以选择 MIL-STD-704A 到 F；
- **测试项目选择** 根据电子设备的工作状态来选择相应的测试项目，在图 6B 中的 SAC 是关于 115V（400Hz）电子设备在各种工作状态下需要完成的测试，从 SAC-101 一直到 SAC-603；图 6A 是单一 LDC-302 测试的细节截图。
- **测试窗口：**根据测试项目的不同，测试窗口能够显示测量的信息，包括各种负载状况以帮助测试者对电子设备的情况进行判断。
- **报告生成：**在测试进行完毕后，软件会自动生成测试报告，报告中包括各种负载测量参数以及各个测试状态下的电压和电流波形，报告浏览窗口可以方便的查看所生成的报告，同时在生成窗口中，使用者可以输入例如测试单位、测试人员、温度湿度以及送检单位等诸多参数来形成一个完整的测试报告。
- **测试设备设置：**可以对测试系统中的各测试模块进行各项设置，以便系统可按设定要求自动完成各个测试项目。

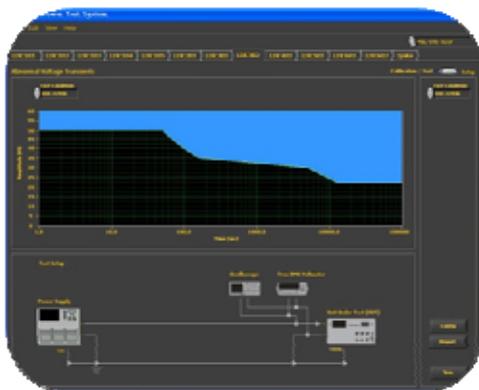


图 6A LDC-302 直流 28V 非正常供电状态的电压瞬变测试

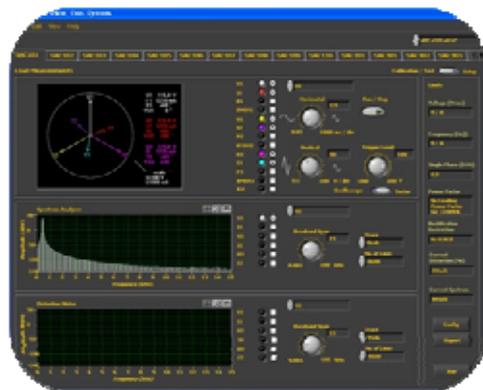


图 6B 交流 115V@400Hz SAC-测试全景图

图 6 美军标 704 测试软件截图

千里顺风公司代理的 MIL-STD-704 测试系统包含标准里要求的各种模块,其测试能力根据不同的要求可以涵盖 DC-200kHz / 500V / 150kW, 能够所有机载用电设备的测试要求。一些测试系统举例:



500W - 2kW MIL-STD-704 Sys.



5 - 10kW MIL-STD-704 Sys.



15kW MIL-STD-704 Sys.



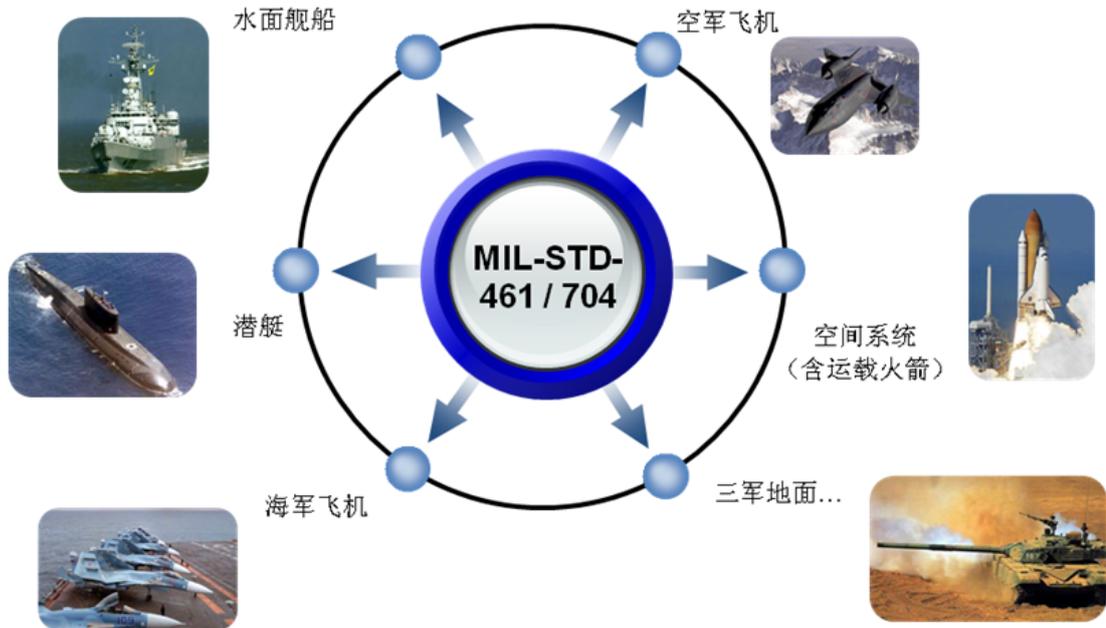
30kW MIL-STD-704 Sys



90kW MIL-STD-704 Sys

关于千里顺风公司 KiloSense :

作为多家欧美知名 EMC 公司的中国代理，千里顺风公司能够提供全面的满足军标，民标和汽车测试要求 EMC 测试系统。我们对标准深刻的理解能力，丰富的系统设计经验以及成功的案例，都为客户组建经济而全面的 EMC 测试系统提供了可靠的保证。



千里顺风公司能够为客户提供的不同军标测试领域的 EMC 测试系统

更多信息请登陆千里顺风电讯技术有限公司网站：

www.KiloSense.com

