

# 应用仿真是实现电磁兼容过程的驱动 与消除断路器缺陷的保障

Application simulation is the guarantee to drive the emc  
process and eliminate the defect of circuit breaker

叶云燕

**摘要:** 本文以应用仿真技术解决电磁兼容和雷击保护的挑战与电网供电系统断路器载流能力的缺陷为典例作分析。

**关键词:** 仿真技术, 多物理场, 电磁兼容, 雷击防护, 断路器

**Abstract:** In this paper, the application of simulation technology to solve the challenges of electromagnetic compatibility and lightning protection and the defects of current carrying capacity of circuit breakers in power supply system are analyzed.

**Keywords:** simulation technology, multi-physics field, electromagnetic compatibility, lightning protection, circuit breaker

## 前言

仿真是一个利用三维环境进行制造过程验证的数字化制造解决方案, 制造商可以利用过程仿真在早期对制造方法和手段进行虚拟验证。仿真技术对产品和资源的三维数据的利用能力可极大地简化复杂制造过程的验证、优化和试运行等工程任务, 从而保证更高质量的产品被更快地投入市场。然而最初的时候, 仿真技术由于计算资源非常稀缺, 研究主要集中在各种孤立的物理效应。但现实世界中的物理现象并不是孤立发生的。为此过程仿真发展成物理场仿真, 它是一种卓越的多样化工具。因为现实世界在本质上是一个多物理场 (Multiphysics) 的世界。而计算机仿真中研究的耦合物理现象, 即对多个相互作用的物理属性之间的研究。其多物理场耦合方法从传递现象、电磁场理论和固体力学等第一性原理出发, 将其作为实现软件功能的基本构成要素, 根据具体的仿真需求, 用户可以条理清晰地将这些基本要素组合在一起来解决自己的问题。

有了多物理场仿真技术, 工程师就能处理传统方法难以解决或研究开发中过于滞后与昂贵的问题。由此开发出多物理场仿真技术在各领域 (包括电气、机械、流体和化工等) 产品设计及创新中的应用。

值此仅以应用仿真技术解决电磁兼容和雷击保护的挑战与电网供电系统断路器载流能力的缺陷为典例作分析。据此将工业电子系统面临的二个问题的挑战作说明。

\* 对电子设备及 IT 设备而言, 为确保其功能正常并在整个生命周期内保证可靠性, 则电磁兼容和电磁干扰及雷击保护的分会起到一个非常重要的作用, 尤其是电子系统处在一个具有挑战性的复杂电磁环境中时候, 这个工作和任务就会更加困难和关键。必须需要应用仿真技术是帮助工程师掌握电子系统的电磁影响与敏感度等问题, 为产品或系统可靠性设计提供保障。

当今对电子与 IT 设备而言, 尤其是多物理场仿真在雷击防护性能中的应用, 是应对电磁兼容挑战的重要举措也是实现电磁兼容过程中的提升驱动力的有效举措。为此对仿真技术在电磁兼容和雷击保护中的应用将作重点研讨。

\* 电网或发电厂中用断路器 (简称 GCB), 是能够保护供电与输送系统等免受电涌的侵害起着关键作用。但发电机系统由于引起短路故障电流时, 要求 GCB 能在同一时间上的在几十毫秒内切断电流以保护重要的电力资产免遭损坏是有难点, 这是断路器存在不同步的缺陷所致。为此必须在断路器在设计构建时用仿真技术来解决此缺陷。

对于上述工业电子系统面临的二个问题的挑战如何用仿真技术应对, 则分别作如下分析。

## 1 多物理场仿真在雷击防护性能中的应用

众所周知, 仿真可以应用于整个产品研发周期中, 可以随时比较不同概念和设计变化带来的影响, 它不仅包括

性能还具有电磁兼容的能力。这是因为随着产品的发展,能对电磁兼容进行分析,例如,计算系统上不同模块位置或者优化电缆走线路径从而减小耦合,这些均不是在事后再考虑电磁兼容的问题,该方法将有助于更容易地预测和电磁兼容问题。随着产品复杂性和密集度的提高以及设计周期的不断缩短,在设计周期的后期解决电磁兼容性(EMC)问题变得越来越不切合实际。由此仿真能深入了解电磁兼容在通过近场和表面电流的可视化等技术,从而为电磁兼容过程中的驱动制定更为有效的解决方法。

这是因为在设计阶段,电磁兼容仿真可以通过计算获得设备在电磁方面的行为,从而实现对风险的预测,也可以在最初的原型设备没有出现之前就提出一些相应的解决方案。尽管仿真不会替代测试,但它会有助于预测出一些潜在的缺陷,也会有助于探索一些技术问题和新的概念。

应该说电磁兼容仿真有多种举措,在此仅用雷击引发、雷击预测的分析与雷击仿真等多个工作流程。由此举措涵盖了环境的电磁效应。

\* 雷击引发 雷电是一种雄伟壮丽却又令人生畏的自然现象,它在带来视觉震撼的同时,也会造成巨大的危害。雷击的产生主要有云内放电、云间放电、云地放电这三种形式。其中超过 50% 的雷击由云内放电形成。所以云地放电的数据通常被作为雷电防护的设计依据。

当今雷击与电磁环境实验室(以下简称“雷电实验室”)作为独立的检测机构,可为航空、航天、船舶、风电等领域的客户提供雷电防护检测和产品设计等服务。目前,将物理试验与多物理场仿真分析相结合,用于提升装置雷击防护问题的分析及预测能力。

\* 雷击预测的分析 雷击初始附着区域可能对各类电子设备造成多种伤害。首先,雷电可以直接对设备的结构产生破坏。这是因当雷击发生非导电材料上时,由于能量无法释放而造成炸裂。此外,雷击产生的空间电磁场会在设备内部的电缆、电子器件内产生感应电流,从而导致电子设备的损坏。当遭受雷击时,会因时变电流的集肤效应而引起缝隙打火现象,就很可能造成难以想象的后果;当电子设备遭受雷击时,其设备中会产生感应电流或感应电压,进而可能导致设备因过高的电流而损坏。因此,一套可靠的雷电防护系统,对于电子设备来说,是不可或缺的安全保障。

值此以高大的金属物体装置为例。通常作为一个高大的金属物体装置尤其容易遭受雷击。为此,一般会被几个通过电缆连接起来的接地的金属塔环绕起来。这些金属塔会起到避雷针的作用,从而降低遭受雷击的可能性。

而通过对雷击引发的分析,可使工程师能够对防雷系统的有效性进行计算。某给定位置遭受雷击的可能性与雷雨

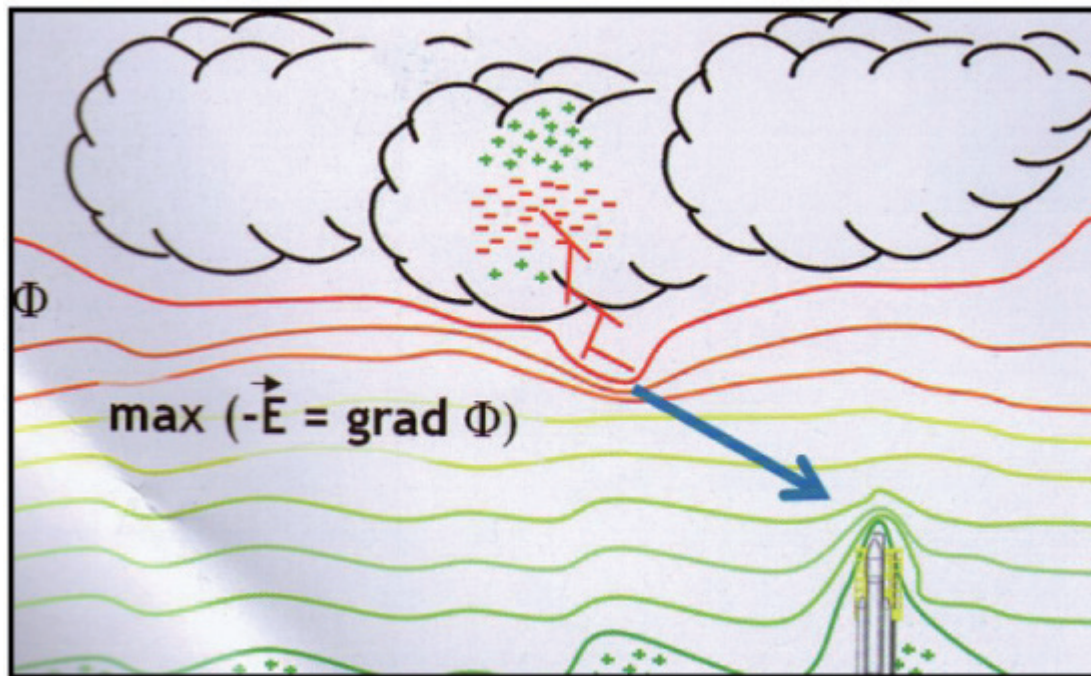


图 1 所示为最大的电场强度会出现在高大的金属物体装置的周围



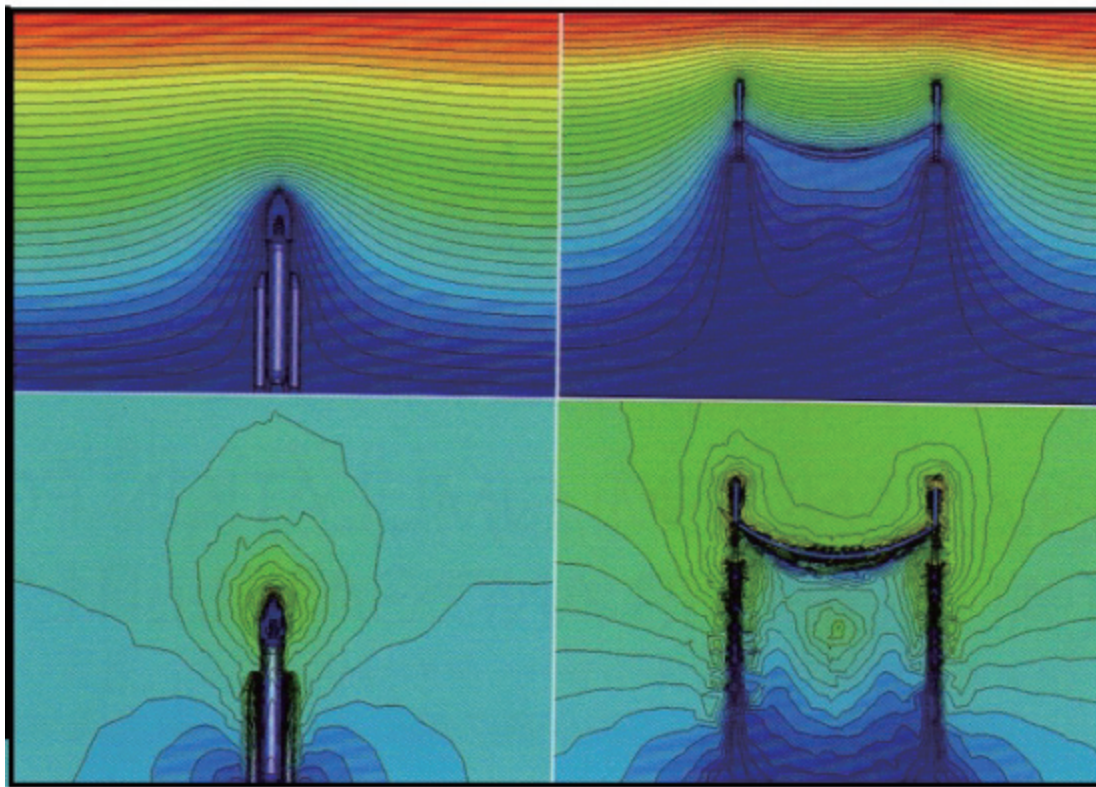


图 2 为电子设备结构的静电仿真计算得到的雷击引发仿真结果示意图

期间该位置周围的电场有关。电荷的积累意味着在大地和云层之间会产生很强的静电电位。这个电位的梯度就是电场强度，最大的电场强度会出现在尖锐的金属物体周围（如图 1 所示）。因此，该位置也是雷电先导最有可能击中的地方。

**\* 雷击仿真** 上述过程可以通过静电仿真的方法进行建模和分析。为此，可以将需要分析的系统的模型导入到仿真环境中，并设定一个静电电位。由此，通过静电仿真可以很快的计算出电子设备结构体周围的电位梯度和电场强度。图 2 给出电子设备结构的静电仿真计算得到的雷击引发仿真分析的结果。结果显示，防雷系统将高大的金属物体装置（如尖端）的电场强度降低了 44%，雷击引发的射装置可能性也因此明显减小。需要指出的是该结果是用静电仿真的静电求解器计算而得。

静电仿真是整个雷击仿真的一个很好的起始点。雷击产生的是一个瞬态的电流脉冲，其波形可以通过双指数函数进行建模。显然，该瞬态电流脉冲是一个宽带的电流脉冲（雷击电流的频谱最低到直流，最高可达 10MHz）。这

就意味着在时域对雷击进行仿真是最好的选择。

上图 2 雷击引发仿真的结果会给出雷击通道最有可能附着的位置，该位置会被建模成导线，并被设定为雷击接触的区域。而雷击则会依照 MIL-sTD-464 的规定，被建模为一个双指数函数。雷电流的传播会经过一些非常精细的结构，例如：结构体中构成电缆装置的棒杆、接缝和通风孔以及设备内部的一些电缆等等。如果采用传统方法对这些精细的结构进行仿真，那么仿真工作将是非常具有挑战性的，因为这些精细结构相较于需要仿真的整个结构体的全尺寸而言是非常微小的，这就需要非常精细的网格剖分、非常短的时间步长。

如今对电子或 IT 设备结构体内精细部分的仿真来说，使用传输线矩阵（TLM）求解器中常见的简化模型会更加高效。在仿真中用简化模型替代那些精细模型，可以在维持相同精确度的情况下显著加快仿真的速度，见图 3 仿真出来的雷击过程中的电场分布结果。该方法还允许在模型中加入一些电路元件，例如瞬态电压抑制器件。

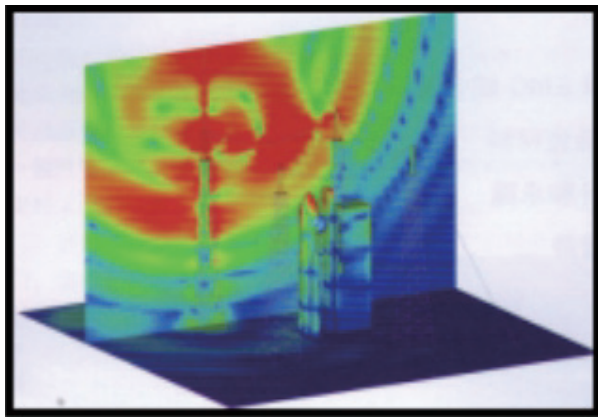


图3 仿真出来的雷击过程中的电场分布结果示意

上述是借助多物理场仿真的强大分析能力,拓展了多物理场仿真在雷击防护领域的应用。实际上仿真已成为电磁兼容过程中的驱动,从而能为电磁兼容问题制定出更为有效的解决方案。

## 2 基于仿真技术的供电系统断路器触保缺陷的解决

\* 脱颖而出势在必行 电网及发电厂是现代社会的支柱。发电系统的故障防护装置是其中不可或缺的重要部分。不管是核电、煤电还是水电,电网及发电厂都采用了同一种断路器(简称 GCB)作为保险与防护措施。因 GCB 能够保护上述供电系统免受电涌的侵害,在保护中起着关键作用。即 GCB 能够在几十毫秒内切断电流,保护重要的电力资产免遭损坏。

这是由于往往错误的布线或电网问题常会引起的短路故障电流而造成潜在危害。即使是最小的故障,也可能造成数千乃至数百万美元的损失。

\* 传统断路装置器的缺陷 因电网与发电机组等供电与输送系统用的断路器要具有极高的可靠性和非同一般的有效性。然而这恰恰是传统断路装置器设计与构建的缺陷难点。这是为什么呐?因为当供电与输送系统或发电机组正常运转时,GCB 只是电路中一个常规的低电阻零件,用于连接发电机组与变压器及电网,日常运行中以可靠的方式将产生的电能传输给高压输电系统。但在紧急情况下,它必须能够以瞬间(几十毫秒内)的可靠性并同步地中断高于正常工况数倍的电流将其消除,从而保护其他元件不

会受到损坏。由此新型断路器触设计构建方案中应用仿真技术将成为解决缺陷的关键。

\* 断路器设计方案中仿真技术的应用是关键 断路器装置只有不断改进现有设计,必须要经过大量的测试并满足相应标准才能进入商用,才能跟得上现代社会的需求。这些标准中很重要的一部分是针对断路器系统中的关键安全组件接地开关提出的,为此其开关实现系统接地是采用准确可靠结构式(又称郁金香式结构)接地模式,见图 2 所示。

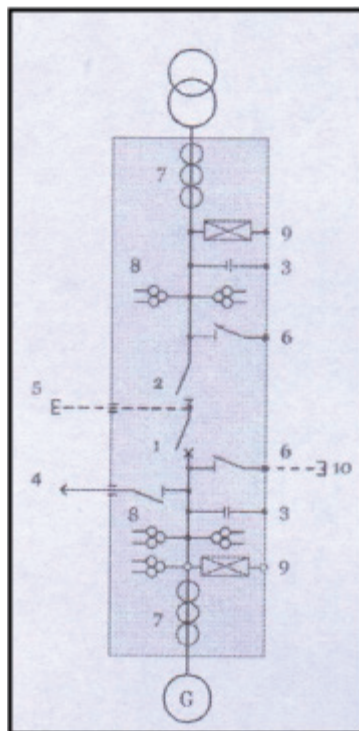


图2 为准确可靠结构式接地的设计模式(安全组件接地开关)示意图



从图 2 可知, 接地开关的任务是将系统的带电部分接地, 即与地面进行电串联, 同时也肩负着保护设备作业人员生命安全的责任, 所以不管处在多么恶劣的气候条件下, 接地开关都必须安全可靠。接地开关的设计需要达到一种微妙的平衡状态。

而所采用的接地开关设计构建的断路器装置, 见图 3 所示。它是准确可靠结构式模式: 即由表面镀银的固定栓以及可滑动的触指构成。这种装置设计提供了一种可分离的连接方式, 既能使电流顺利传输通过, 又能保证弹簧对每个触指施加静态压力。

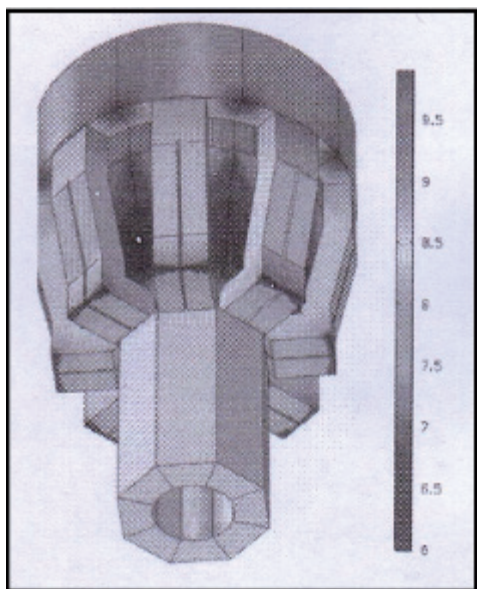


图 3 为接地开关设计构建的断路器是准确可靠式结构示意

采用准确可靠结构主要出于两方面的考虑: 一方面, 根据国际电工委员会制定的标准, 触指闭合时, 接地开关必须能够承受短路故障时的全部电流; 另一方面, 巨大的短路电流会产生非常大的电磁力, 随之带来的负面影响必须得到控制。尽管工程师最终关注的是接地开关触头系统的载流能力, 但触头上的接触力会影响载流能力。

利用仿真软件 (在可用如 COMSOL 仿真软件) 分析接触力对载流能力的复杂影响。应用了多物理场仿真由此对触头上的全部作用力进行了量化分析。即利用仿真软件构建了一个接地开关的准确可靠结构式触头模型, 借此模拟了触头上机电的耦合特性。

\* 新型断路器装置计算触点上的总力分析 该仿真技

术是应用耦合多种类型的多物理场仿真, 值此对其在计算触点上的总力作分析。

由于大多数电磁元件、设备和产品都会受传热、结构力学、声学等其他物理分支的影响, 所以为了尽可能准确地进行研究, 可以同时分析这些物理现象产生的影响。而多物理场 (Multiphysics) 平台可支持在一个软件环境中对多种物理效应进行耦合。

其耦合多种类型的物理场的含义是: 如电流在通过每个触指时, 都会产生磁场, 每个磁场又会对其他带电触指产生不同大小的作用力。借助多物理场仿真, 利用多种方式对力进行了计算。计算结果的鲁棒性和可信度经过了实验的验证。基于断路器系统的对称性, 简化了模型, 只需模拟单个触指即可捕获整个准确可靠结构式触头的特性, 从而将计算成本减少到全模型的 1/8。利用麦克斯韦应力张量公式, 计算了触指所受到的洛伦兹力。计算结果证实了触指受到的吸引力大于霍尔姆排斥力, 从而保证设计可以有效防止触指分离。在此基础上, 研发时利用模拟得到的合力数值, 进一步计算出了理论焊接电流值, 从而证明新型断路器系统能够承受更大的焊接电流。

\* 新型断路器在触保缺陷解决方案中应用特征 那么新型断路器在触保缺陷解决方案中应用特征是怎样的呢? 值此对新型断路器结构的触指、磁场与作用力作解析。

该新型断路器触头的触指将受到双重电磁力作用: 一种是由于接触位置存在电接触点而产生的霍尔姆力 (Holm force), 具有排斥作用; 另一种是洛伦兹力 (即载流体在磁场中所受到的力), 具有吸引作用。问题就在于要保证吸引力远远大于排斥力。如果触指之间的排斥力过大, 就会导致接触力减小, 从而可能造成触指分离。此时触头的电阻值会显著增加, 电阻损耗也会升高, 随之出现的情况是触头急剧升温。而高温可能将触头焊接在一起, 最终损坏 GCB 和接地开关。因此触头的接触力必须足够大。

而如今采用准确可靠结构式触头从本质上解决了这一问题。焊接电流承载能力进一步证明了维持强大接触力的必要性。该结构设计在获得足够大的焊接电流承载能力和消除排斥电磁力方面起着至关重要的作用。因为能够承受很高的焊接电流, 所以触头在消除大电流荷载时, 并不会被焊接到一起, 从而确保了整个 GCB 结构在极端条件下能够安全地运行。由于结构不仅仅是一种分离触头结

构, 这种设计还能使平板弹簧向触指施加静态径向压力。这是因为洛伦兹力的增大有助于增加接触力, 从而达到更高的焊接电流承载能力。

由此新型研发的 GCB 已问世可脱颖而出并在供电与输送系统广泛采用, 为发电站的运行提供保护。该 GCB 使用寿命至少能达到 30 年, 因此能够为电网及发电厂供电与输送系统提供安全可靠的连接。

### 3 后话

\* 由上述仿真设计软件用于电子系统电磁兼容的分析可知其用途, 包括 GCB 信号完整性、电源完整性和电磁辐射

协同仿真, 数模混合电路的噪声分析和抑制, 以及机箱系统屏蔽效能和电磁泄漏仿真, 确保系统的电磁干扰和电磁兼容性能满足要求。

\* 仿真提供了在产品研发过程中引入电磁兼容的平台, 借此增加通过最终电磁兼容认证的可能性, 同时减少物理原型的数量。在更宽范围的应用中, 这是我们对于仿真驱动设计的理解, 我们看到更多产品设计中使用这种模型从而走向新的未来。

当今多物理场仿真软件有多种, 在此仅以 COMSOL Multiphysics 软件在电磁兼容和及雷击保护及新型断路器装置中的应用为典例作分析。

上接 150 页

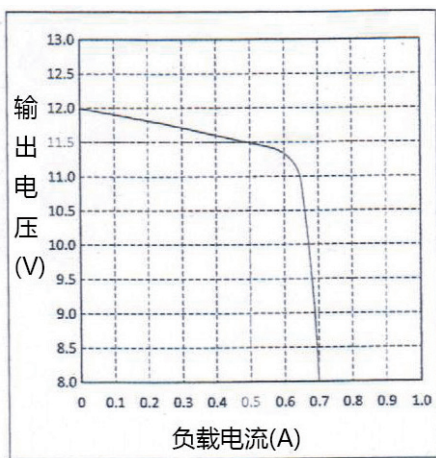


图 19 可变调节 DC 电源的负载调节曲线

图 17 所示为可变调节的 DC 电源电路。三端电压调节器 ( $IC_1$ ) 是为提供一可变的输出而特殊设计的, 故

LM317 的公共连线称之为“调节”连线。这是由上所述(图 5) 类似方式配置的电路。该电路能构成预整定式的, 或利用输入 / 输出接头  $ST_1$  的连接构成连续可变的调节 (参见图 18)。结合了由  $R_1$ ,  $TR_1$ , 和  $D_1$  形成的过流保护电路, 其中, 由接到 0V 线上的  $1\Omega$  电阻传感 (检测到) 输出电流。当电阻上的电压降超过 0.6V,  $TR_1$  开始导通, 取  $IC_1$  下面调节插头的电压。当  $IC_1$  导通时  $D_1$  则点亮, 提供有效可见的超载显示。图 19 所示为可变调节 DC 电源的负载调节曲线。

原文出处: Mike Tooley, Powering Electronics Part 2: Linear Voltage Regulators, 《Everyday Practical Electronics》, February 2019, P.44-50