

比较UPS系统设计 配置方案

第 75 号白皮书

版本 4

作者 Kevin McCarthy, EDG2 Inc.
Victor Avelar, Schneider Electric

> 摘要

要从建筑物的市电电源为数据中心的关键负载配电，有 5 种主要的 UPS 系统设计配置方案可供选择。要为特定应用环境选择合适的配置方案，必须充分考虑该应用环境的可用性需求、风险承受能力、数据中心的负载类型、预算以及现有基础设施等情况。本文对这五种配置进行了说明，并逐一论述每种方案的优缺点。随后，分析了每种配置方案的可用性，并阐述了如何选择合适的设计方案。

简介

在多数发达国家中，公共配电系统已然相当可靠，但有研究表明，即使是最完美的市电网络也不可能完全满足那些不间断的重要数据处理运营中心的需求。面对市电电源有可能引起停机及数据处理错误这一情况，大多数公司都选择在公共配电系统与其关键负载之间安装不间断电源（UPS）系统。为应用环境选择何种 UPS 系统设计配置方案会直接影响到该应用环境中的 IT 设备的可用性。影响系统可用性的因素有多种，包括人为错误、设备的可靠性、维护水平以及恢复时间等等。而以上每种因素对整个系统的可用性所造成的影响，在很大程度上是由所选择的配置方案决定的。

长久以来，很多设计工程师都试图设计出完美无瑕的 UPS 解决方案为关键负载提供支持，不过他们的设计方案却往往不一定达到设计方案的可用性范围。譬如，并联冗余、串联冗余、分布式冗余、热连接、热同步、多路并联总线、双系统以及故障预警系统等等，这些都是设计工程师或制造商赋予不同 UPS 配置方案的名称。这些名称的问题在于，对于不同的用户，它们可能具有不同的含义，可以存在很多种解释方式。虽然目前市场上的 UPS 配置名目繁多且差别甚大，但最常用的不外乎五种。这五种方案包括：(1) 容量，(2) 串联冗余，(3) 并联冗余，(4) 分布式冗余，(5) 双总线系统。

本文对这些 UPS 系统配置方案进行了说明，并逐一论述每种方案的优缺点。选择系统配置方案时，应当根据负载的关键程度而定。此外，还要考虑停机所带来的影响以及公司的风险承受能力，这样才能更好地找到合适的系统配置方案。

本文还介绍了如何为特定应用环境选择恰当的配置方案的一些指导方针。

可用性等级与成本

可用性

数据处理中心日益增长的可用性需求，推动着 UPS 配置的不断发展。“可用性”即电源保持供电并正常运行以支持关键负载的时间百分比估算值。附录中的可用性分析对本文所介绍的几种配置之间的可用性差异进行了量化。如同其他任何模型一样，为简化分析过程，必须对模型做出一些假设，因此，本文中的可用性值要比实际应用中的可用性高。为便于比较这五种常用的设计配置，表 1 中给出了一个简单的可用性等级，根据附录中的分析结果对这几种方案的可用性进行了排名。详细了解这些不同配置之后，您会发现这种排列顺序是很显而易见的。

分级

一切 UPS 系统（以及配电设备）都需要定期进行维护。系统配置的可用性一方面取决于配置对设备故障干扰的免疫能力，另一方面取决于执行正常维护和例行测试以保证关键负载供电的能力。Uptime Institute 一篇名为《采用分类等级的方式定义场地基础设施性能的工业标准》¹的文章中进一步讨论了此主题。TIA-942 标准也对 Tier 分级提供了相应的信息²。Uptime Institute 文档中所述的等级涵盖了本文中提及的五种 UPS 结构，表 1 中对此进行了简要摘录。

以下术语常用于描述各种分级，也用于描述分布式冗余和双系统冗余的配置。

并行维护—为了进行维护或例行检查，能够关停任何电气组件，或子组件而不需要将负载转移至直接使用市电供电的能力。

单故障点—电气供配系统中的一个元件在某些时候会导致宕机时间，而在系统中没有开发相应方法来规避这种风险。一个 N 配置的系统就无可避免的具有一些列的单故障点。在设计上消除它们是冗余的重要一环。

¹ <http://www.upsite.com>

² TIA-942 《数据中心通信基础设施标准》，2005 年 4 月

加固—设计一个系统或者楼宇，并使之能够抵抗自然的破坏和抵抗各种接连发生于电气系统的故障的干扰。这种防错和容错的能力；例如，两个 UPS 系统不会安置在同一个房间之内，而且电池组不会和 UPS 模块在同一个房间之内。断路器的协调也是这些设计方案的重要一环。合理的断路器协调能够阻止楼宇中大的区域发生短路。

加固一个楼宇也意味着能让它抵抗各种突发事件，例如飓风，龙卷风和洪水，这还需要考虑到楼宇的选址。例如设计楼宇远离 100 年间发生洪水的平原，避免飞机的航线从上方经过，较厚的墙壁和无窗设计都会有助于提高抵抗力。

成本

配置的可用性等级越高，其成本也越高。**表 1** 列出了每种设计方案的大致成本范围。该成本指的是建造一间新的数据中心所需的成本，因此，其中不仅包括 UPS 结构的成本，还包括数据中心的整个网络关键物理基础设施 (NCPI) 的成本。后者包括发电机、开关装置、制冷系统、消防系统、活动地板、机架、照明设施、物理空间和整个系统的调试成本。这些还只是前期成本，还不包括运营成本，比如维护成本等。在计算上述成本时，我们假设每个机架平均占地面积为 2.8 平方米 (30 平方英尺)，且功率密度范围为每机架 2.3 kW 至 3.8 kW。如果分担成本的设备占地面积增大，每机架的成本也将随之降低。

表 1

UPS 配置的可用性等级与成本

配置	可用性尺度	Tier 分级	数据中心成本 (美元)
容量 (N)	1=最低	Tier I	每机架 13,500 - 18,000 美元
串联冗余	2	Tier II	每机架 18,000 - 24,000 美元
并联冗余 (N+1)	3		
分布式冗余	4	Tier III	每机架 24,000 - 30,000 美元
双系统 (2N, 2N+1)	5=最高	Tier IV	每机架 36,000 - 42,000 美元

什么是“N”?

说明：在 UPS 设计配置的计算过程中，通常采用字母“N”来指代 UPS 设计配置。例如，并联冗余系统也称作 N+1 设计，而双系统设计可以用 2N 来表示。“N”可以简单地定义为关键负载的“need (需求)”。换言之，即满足所保护设备供电量的电源容量。我们可以用 RAID (独立磁盘冗余阵列) 系统等 IT 设备来解释“N”的用途。例如，如果存储容量需要 4 个磁盘，且 RAID 系统正好包含 4 个磁盘，则称这是一个“N”设计。反之，如果 RAID 系统有 5 个磁盘，而存储容量只需要 4 个磁盘，则为“N+1”设计。

一直以来，在规划关键负载电源时，必须充分考虑以后的发展，以使 UPS 系统可以为负载提供 10 或 15 年的支持。事实证明，按照这一原则进行规划是很困难的。20 世纪 90 年代，为便于提供讨论框架并比较各种设施，曾提出了“瓦特/单位面积”的概念。但由于人们对“单位面积”的含义无法达成共识，这种电源度量指标造成了很多误解。近来，伴随着技术精简的大趋势，人们逐渐采用“瓦特/机架”的概念来表示系统容量。事实证明，由于单位空间内的机架数量很容易统计，因此这种度量方式的准确性更高。无论如何选择负载“N”，有一点很重要，那就是应当从一开始便选择好配置方案，使设计过程沿着正确的方向进行。

如今，涌现出了可扩展的模块化 UPS 系统设计，从而可以使 UPS 容量随着 IT 需求的增长而扩大。了解更多详情，请参见第 37 号白皮书 [《避免数据中心和网络机房基础设施因过度规划造成的资金浪费》](#)。

容量或“N”系统

简而言之，N 系统指由单个 UPS 模块或容量与关键负载规划容量相等的一组并联 UPS 模块构成的系统。迄今为止，这种类型的系统是 UPS 行业中使用最为广泛的配置。办公桌下的小型 UPS 即属于 N 配置。同样，对于规划设计容量为 400 kW，面积为 500 平方米（5000 平方英尺）的计算机房，如果采用单个 400kW 的 UPS 或在公共总线上采用两个并联的 200kW 的 UPS，那么也属于 N 配置。因此，可以将 N 配置视作为关键负载供电的最低要求。

虽然上述两例均可视为 N 配置，但其中的 UPS 模块设计却有所不同。与小型 UPS 不同，超出单相容量（大约为 20 kW）的系统都设置有内部静态旁路开关，以便在 UPS 模块出现内部问题时，将负载安全地转换到市电。UPS 到静态旁路的转换点都经过制造商的仔细选取，以便为关键负载提供最妥善的保护，同时也保护 UPS 模块本身不会受到损害。下面举例说明了这些保护措施中的一种措施：在三相 UPS 应用中，模块通常都具有额定过载能力指标。该指标的一种表述形式为“模块将承载 125% 的额定负载达 10 分钟”。因此，一旦负载达到额定值的 125%，模块将启动一个计时程序，其内部时钟将开始倒数 10 分钟。10 分钟后，如果负载仍未恢复到正常水平，则模块会将负载安全地转换到静态旁路。启用旁路的情况还有很多种，UPS 模块的规格说明中会对此进行详细阐述。

扩充 N 配置的一种方式是为系统提供“维护”或“外部”旁路。若采用外部旁路，那么在需要进行维护时，可以将整个 UPS 系统（模块和静态旁路）安全地关闭。维护旁路与 UPS 共用共用一个配电盘，并且与 UPS 输出端直接相连。当然，正常情况下这条电路处于断开状态，仅当 UPS 模块转换到静态旁路时才合上。在设计过程中，必须采取某些措施以防止当 UPS 未转换到静态旁路时，维护旁路电路接通。如果安装正确，维护旁路可确保 UPS 模块安全运行而无需担心负载停机，因而是系统中一个极为重要的组件。

大多数“N”系统配置，尤其是低于 100 kW 的配置，都用于对整个电力系统配置无特殊要求的建筑环境中。建筑物的电力系统一般都采用“N”配置，因此，“N”UPS 配置刚好可满足这种情况。图 1 显示了常用的单模块 UPS 系统配置。

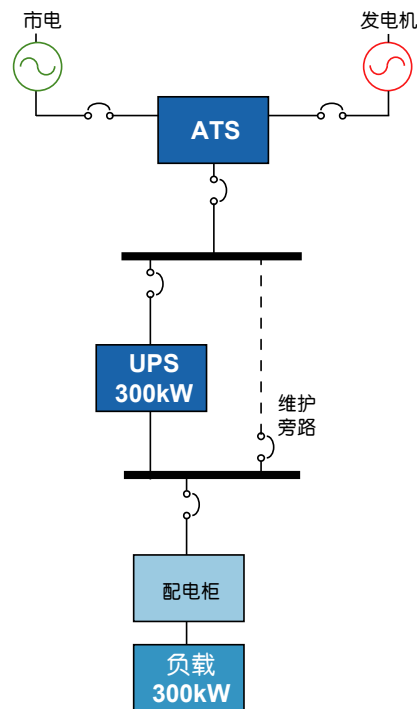


图 1
单模块“容量”UPS 配置

“N”系统的缺点

- 可用性有限，因为如果 UPS 模块出现故障，负载将转换到旁路供电，从而处于无保护电源下。
- 在 UPS、电池或下游设备维护期间，负载处于无保护电源下（通常，这种情况每年至少会发生一次，而且往往会持续 2-4 小时）。
- 缺乏冗余，限制了在 UPS 发生故障时对负载的保护能力。
- 存在多个单故障点，这意味着系统的可靠性由其最薄弱的环节决定。

串联冗余

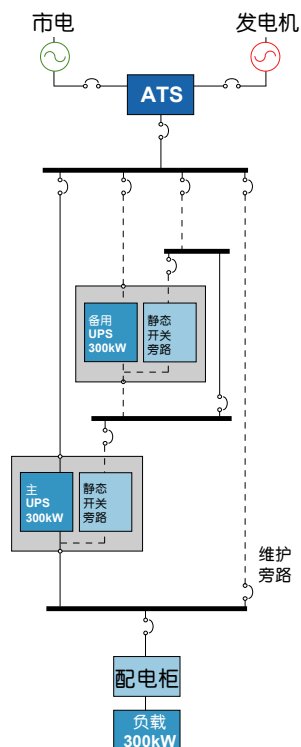
串联冗余配置有时也称为“N+1”系统，不过，它与通常情况下用 N+1 表示的并联冗余配置截然不同。串联冗余设计概念既不需要并联总线，也不要求模块的容量必须相同，甚至不要求模块来自同一个制造商。在该配置中，正常情况下由一个主要的或“主”UPS 模块为负载供电。同时，一个“串联”的或“辅助”的 UPS 为主 UPS 模块的静态旁路供电。该配置要求主 UPS 模块的静态旁路具有单独的输入电路。这种方式可以在保留现有 UPS 的情况下，对之前的无冗余配置进行扩充，以获得一定程度的冗余。图 2 显示了串联冗余 UPS 配置。

在正常运行条件下，主 UPS 模块将承担起全部关键负载的供电，串联模块不承担任何负载。一旦主模块负载转换到静态旁路上，串联模块将即刻接受主模块的全部负载。因此，必须仔细选取串联模块，以确保它能够迅速承担起负载。如果它不能完成该任务，它自身或许可以转换到静态旁路，但这样一来，便使得该配置方案所提供的冗余保护消失殆尽。

对于这两个模块而言，只需将负载转换到另一个模块，便可轻松提供服务。由于输出线路仍存在单故障点，因此，维护旁路仍然是一项重要的设计功能。整个系统每年需要停机 2-4 小时，以便对系统进行预防性的维护。虽然该配置方案的可靠性提高了，但往往却被开关装置及相关控件的复杂性所抵销。MTechnology Inc³，是一家专业高可靠性电气系统咨询公司。该公司曾今进行的可靠性比较分析。通过使用概率风险评估（PRA）技术，MTech 开发了用于量化串联冗余系统和非冗余系统的模型。最基本的故障树分析忽略了人为失误、元件老化和环境因素导致的故障，显示出串联冗余系统不会在物理上影响故障率（不可靠性）。两个系统的年故障率都是 1.8%。串联冗余最终得出 30 个故障模式（最小采样）而非冗余系统只有 7 个。尽管多额外的 23 个故障模式的发生几率较小，但是分析指出为系统增加复杂性和额外的组件不可避免的增加了潜在故障的概率。MTech 认为当考虑到人为失误和组件老化的影响，串联冗余的反面意义就变得更加明显。串联冗余系统的运维比非串联冗余系统要复杂得多，而且人为失误发生的几率也要高得多。串联冗余设计所带来的预防性维护程序的益处经不起严格仔细的推敲和审查。串联冗余 UPS 设计最重要的受益人是那些最初销售设备然后从对额外的 UPS 维护服务中获利的人或组织。客户的设备并不受益于高可靠性的供电。

³ MTechnology, Inc; 地址: 2 Central Street, Saxonville, MA 01701; 电话: 508-788-6260; 传真: 508-788-6233

图 2
串联冗余 UPS 配置



串联冗余的优点

- 产品的选择很灵活，可以混用不同制造商或不同型号的产品。
- 具备 UPS 容错功能。
- 不需要同步装置。
- 对于双模块系统而言，相对比较经济。

串联冗余的缺点

- 依赖于主模块静态旁路是否能从冗余模块正确接收电力。
- 如果电流超出逆变器的容量，则要求两个 UPS 模块的静态旁路都必须能正常运行。
- 主 UPS 模块转换到旁路时，辅助 UPS 模块必须能够处理突然的负载变化。（因为辅助 UPS 往往长期工作在 0% 负载的条件下。并非所有 UPS 模块都能执行该任务，因此旁路模块的选择至关重要。）
- 开关装置及相关控件不仅复杂，而且昂贵。
- 由于为保持电源不间断而设置的辅助 UPS 工作于 0% 负载情况下，因而运营成本提高了。
- 双模块系统（一个主模块，一个辅助模块）至少需要一个电路断路器，以便在市电与作为旁路电源的另一个 UPS 之间进行选择。这比只包含一条公共负载总线的系统要复杂得多。
- 两个或多个主模块需要采用特殊的电路来启用冗余模块或作为旁路电源的市电（静态转换开关）。
- 每个系统一条负载总线，因而存在单故障点。

“并联冗余或 N+1”系统

在并联冗余配置方案中，当单个 UPS 模块出现故障时，无需将关键负载转换到市电。所有 UPS 的用途都在于保护关键负载不受市电变化及断电的影响。随着数据重要程度的提高以及风险承受能力的降低，转换到静态旁路和维护旁路的理念已逐渐被视为应淘汰之举。但 N+1 系统设计仍需静态旁路，而且大多数 N+1 系统都具有维护旁路，因为它们仍起着举足轻重的作用。

在并联冗余配置方案中，多个并联的容量相同的 UPS 模块共用一条输出总线。如果“备用的”电量至少等于一个系统模块的容量，则系统为 N+1 冗余；如果备用的电量等于两个系统模块的容量，则系统为 N+2 冗余；以此类推。并联冗余系统要求采用同一制造商生产的相同容量的 UPS 模块。UPS 模块通过外部的系统并联电路板进行同步，有时 UPS 模块本身也嵌入这种功能。某些情况下，并联功能也控制模块间的电流输出。

各个 UPS 模块之间相互通讯，以产生完全同步的输出电压。并联总线应具备监控功能，以显示系统负载以及系统的电压与电流特征。此外，并联总线还必须能显示并联总线上的模块数量，以及需要多少模块才能保证系统冗余。一条公共总线上可以并联的 UPS 模块的数量存在一个逻辑上限，对于不同的 UPS 制造商而言，该最大值也不同。在正常运行条件下，并联冗余设计中的 UPS 模块均匀分摊关键负载容量。如果从并联总线上取下一个模块进行维修（或者如果某个模块因内部故障而停机），则剩下的 UPS 模块必须立即承担起发生故障的 UPS 模块的负载。由于有了此功能，因此可以从总线中取下任意一个模块进行修理，而无需将关键负载直接连接到市电。

N 配置示例中面积为 465 平方米（5000 平方英尺）的计算机房，如果采用该方案，则需要 2 个 400kW 的 UPS 模块，或 3 个 200kW 的 UPS 模块并联在一条公共输出总线上，以提供冗余。并联总线的设计容量为系统的非冗余容量。因此，包含 2 个 400kW 模块的系统，其并联总线的额定容量为 400kW。

在 N+1 系统配置方案中，UPS 容量可以随负载的增长而增长。应当设置容量触发机制，以便当容量百分比达到某个水平时，就应当订购新的冗余模块（某些 UPS 模块的交货时间可能需要几周甚至几个月）。UPS 容量越大，安装新 UPS 模块的难度越大。大型的 UPS 模块重达数吨，需要特殊的传动装置才能将它们安置就位。UPS 房间中通常会为这种大型模块预留位置。由于将大型 UPS 模块安放在任何房间中都存在一定的风险，因此，这种部署必须进行周密规划。

在设计冗余 UPS 系统时，系统效率是一个应当着重考虑的重要因素。一般而言，负载较轻的 UPS 模块的效率要低于负载接近于其额定容量的 UPS 模块。表 2 显示了为 240kW 负载供电时，采用不同容量 UPS 模块的系统的负载分配情况。如表所示，为特定应用环境所选的模块大小会严重影响系统效率。低负载情况下任何特定 UPS 的效率因制造商而异，在设计过程中应对具体数据进行调查。

并联的 UPS 模块	关键负载	UPS 系统总容量	每个 UPS 模块的负载百分比
2 x 240 kW	240 kW	480 kW	50%
3 x 120 kW	240 kW	360 kW	66%
4 x 80 kW	240 kW	320 kW	75%
5 x 60 kW	240 kW	300 kW	80%
2 x 240 kW	240 kW	480 kW	50%

表 2

N+1 配置

图 3 显示了一个典型的双模块并联冗余配置。从图中可看出，尽管该系统提供了单个 UPS 模块故障保护功能，但在并联总线中仍存在单故障点。与“N”配置方案一样，为了断开并联总线以进行定期维护，在设计该方案时也应着重考虑维护旁路电路。

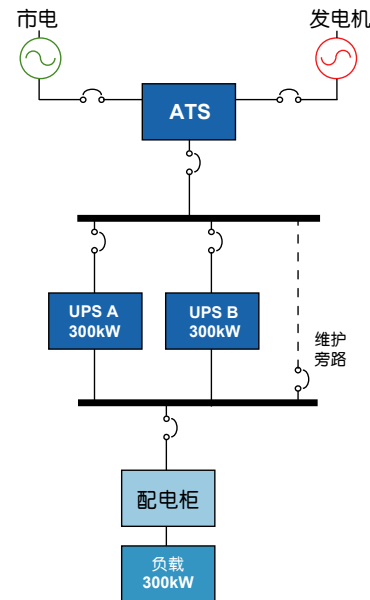


图 3

并联冗余(N+1) UPS 配置

“N+1”系统的优点

- 由于在一个 UPS 模块出现故障时有其他冗余容量可用，因此该方案的可用性要高于“N”配置。
- 由于使用跟梢的断路器，而且模块一直在线（无递增负载），与串联冗余相比故障率低
- 可根据电力需求的增长进行扩展。在同一装置中可以同时配置多个单元设备。
- 硬件的布置不仅设计概念简单，而且成本低廉。

“N+1”系统的缺点

- 两个模块必须采用相同的设计、相同的制造商、相同的额定值以及相同的技术与配置。
- UPS 系统的上游与下游仍存在单故障点。
- 如果在单个 UPS 系统模块和其电池以外的下游设备维护期间，负载会处于无保护电源下。如果并联连接板，或者并联控制器及其下游设备要求维护，负载会处于无保护电源下。
- 由于各个 UPS 设备的利用率均低于 100%，因此运营效率较低。
- 每个系统一条负载总线，因而存在单故障点。

分布式冗余

分布式冗余配置广泛应用于当今的数据中心行业，尤其是金融机构。20 世纪 90 年代末期，某家工程公司为了获得全方位的冗余，不惜花费任何高额成本，因而便开发出了这种设计方案。该设计以三个或更多个 UPS 模块及独立的输入和输出电路为基础。独立的输出总线通过多个三重冗余和 STS 与关键负载相连。从市电接入到 UPS，分布式冗余设计和双系统设计（将在下一部分中进行讨论）几乎是一样的。这两种方案均提供了并行维护功能，并将单故障点减至最少。二者最主要的区别在于，从 UPS 到关键负载的配电结构中，为关键负载提供冗余电源线路所需的 UPS 模块的数量不同。随着负载要求“N”的增加，UPS 模块的数量增加所带来的成本，以及反过来因此而产生的节约也在增加。

图 4、5 和 6 分别显示了同样为 300 kW 负载供电的两种不同的分布式冗余设计方案。图 4 采用 3 个 UPS 模块，在该配置中，模块 3 与每个 STS 的辅助输入电路相连，根据另外两个主 UPS 模块的故障情况投入系统并向负载供电。在该系统中，模块 3 通常不承载任何负载。

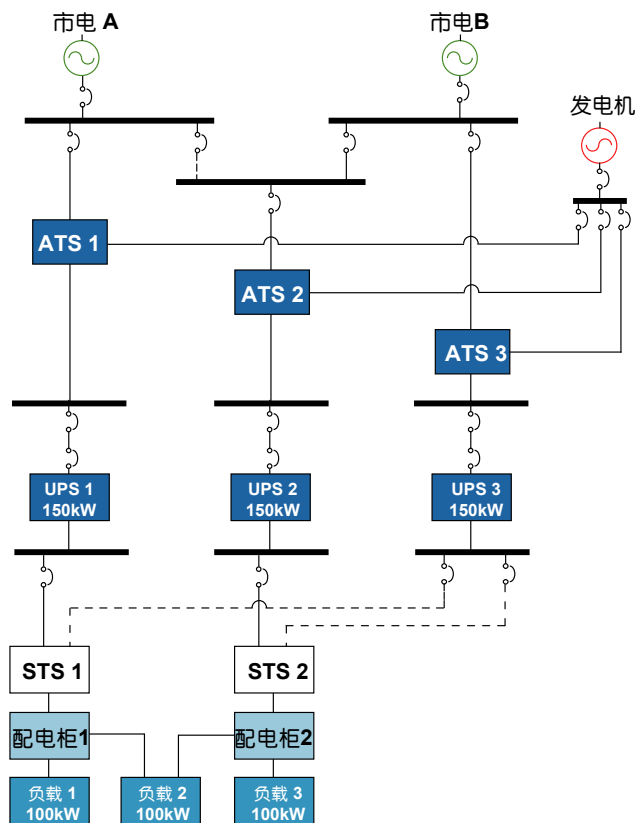
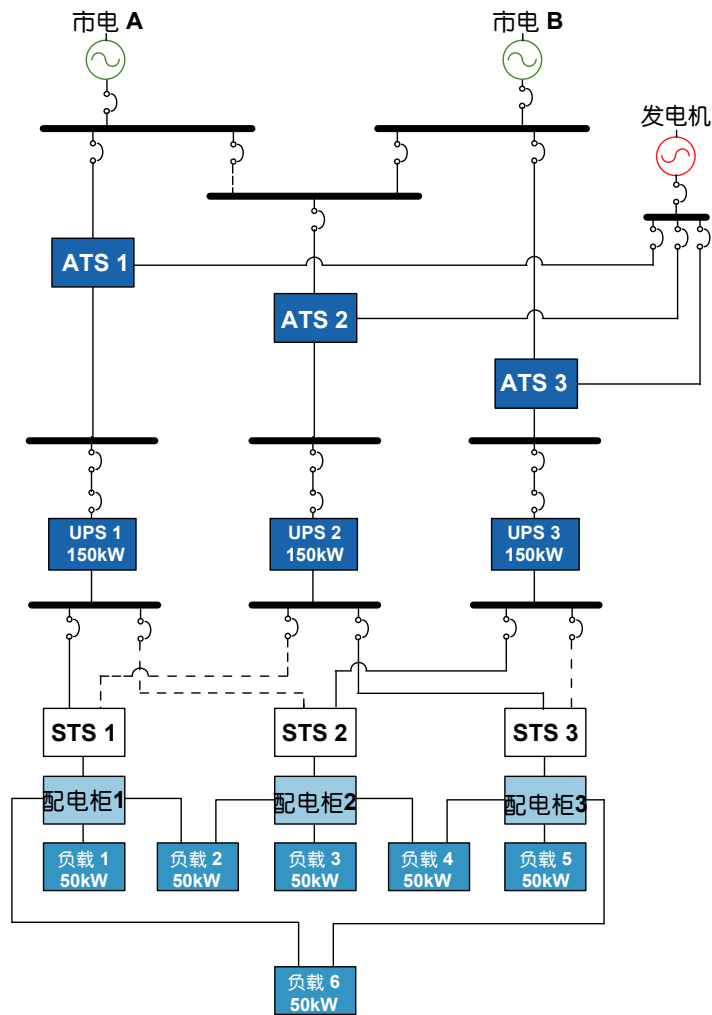


图 4
分布式冗余“备用”UPS 配置

图 5 的分布式冗余设计采用三个 STS，正常运行状态下，负载平均分配在三个 UPS 模块上。如果其中任何一个模块出现故障，则将强制 STS 将负载转换到为该 STS 供电的另一个 UPS 模块上。

图 5
分布式冗余 UPS 配置
(带 STS)



很显然，双电源负载与单电源负载的供电电路是不同的。双电源负载可以采用两个 STS 设备供电，而单电源负载只能由单个 STS 供电。因此，STS 便成为单电源负载的单故障点。在当今的数据中心中，单电源负载的使用数量日趋减少，因此，可以在单电源负载的附近安装多个小型转换开关，该方法既实际又经济。如果全部为双电源负载，那么该配置可以不采用 STS 设备。在 100% 双电源负载的情况下，这种配置还可以设计成完全没有 STS，如图 6 所示。这种设计典型表现为三重冗余和不适用静态转换开关。

图 5 显示一路 STS 系统，有着极高的电气系统可靠性要求的大型机构使用冗余的 STS 作为将电气维护活动从关键负载隔离的手段。例如，事件在这四层接连发生才会需要在 UPS 维护期间关停一个双电源的服务器。首先向市电 A 侧的 UPS 静态旁路的转换发生故障之后市电 A 侧的 STS 跟着发生故障，之后 B 侧的 UPS 也跟着发生故障，最后 B 侧的 STS 故障。这种层层保护的方式与其昂贵的成本相比提供了很小的可靠性收益——报酬递减规则。总而言之，最好的冗余是地理空间上的冗余，就是指冗余的数据中心相隔一定的距离的地点建造。但是，当前对金融机构而言实施地理上的冗余是很困难的，因为他们必须能够安全和快速地访问他们所有的数据。

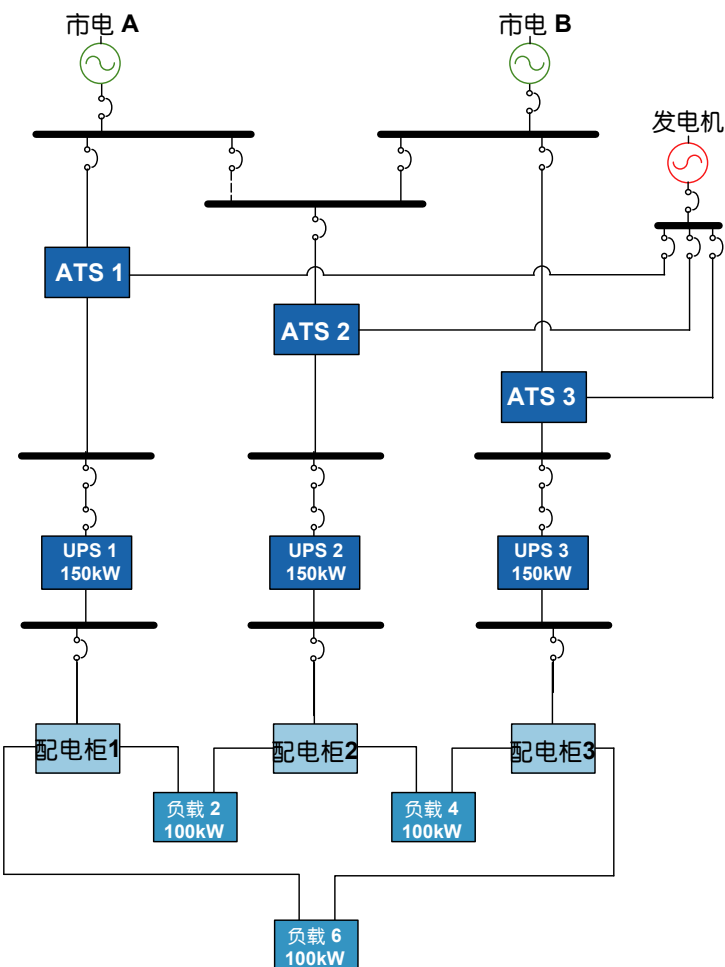


图 6

三重冗余 UPS 配置
(无 STS)

总体来看，对于那些需要进行并行维护，且大多数负载均为单电源负载的复杂的大型计算机室而言，分布式冗余系统是比较理想的选择。相对于 2N 架构，其在 UPS 模块上的节约也是这种配置的市场驱动。还有其他一些行业因素也推动着分布式冗余配置方案的发展：

静态转换开关 (STS) — STS 具有两路输入和一路输出。通常，STS 从两个不同的 UPS 系统接受供电，并根据某些条件将其中一路电源提供给负载。如果 STS 的主 UPS 供电电路出现故障，则 STS 将在 4 到 8 毫秒内将负载转换到辅助 UPS 供电电路上。STS 通过这种方式使负载随时处于受保护状态下。此项技术自 20 世纪 90 年代初期出现以来，已广泛应用于分布式冗余配置中。

冗余的双路架构的最家应用就是将两条路径隔离，因此各自独立的它们当一侧发生故障时不会影响到另外一侧。在双路架构中使用静态转换开关会妨碍两条冗余路径的隔离。因此，STS 选型取决于对静态开关的设计和现场性能的全方位调查是极为关键的。在市场上，有多种不同配置和不同可靠性等级的 STS 可供选择。如图 5 所示，STS 处于三重冗余的输入一侧（高电压一侧）。对 STS 逻辑和设计的改进已经改进了这种配置的可靠性，将 STS 置于两个三重冗余的输出一侧（低电压一侧）会更可靠一些，但是购买两套三重冗余的根本也会昂贵很多。但同时，将 STS 置于两个三重冗余的输出一侧（低电压一侧）会提供更高的额定电流。这种配置在第 48 号白皮书《[比较各种机架电源冗余配置的可用性](#)》做详细讨论。

单电源负载 — 如果数据中心全部由单电源负载设备组成，那么，每个 IT 设备只能由单个 STS 或安装在机架上的转换开关来供电。冗余结构要获得高可用性，必须将开关安置在靠近负载的位置，如第 48 号白皮书中所述。将数百个单电源设备与单个大型 STS 相连，是一个极其冒险的举动。如果采用多个小型开关分别为部分负载供电，则可以降低这种危险性。此外，分布的机架式转换开关也不会像大型 STS 那样，出现那种会波及到上游多个 UPS 系统的故障模式。因此，机架式转换开关得到了越来越广泛的采用，尤其是当单电源负载只占据全部负载的一小部分时。在

第 62 号白皮书《[为双路环境中的单路设备供电](#)》中详细讨论了 STS 和机架式转换开关之间的不同之处。

使用 STS 时 IT 设备不会受到因 A 或 B 侧的故障而导致的很短的转换时间的影响。

双电源负载 — 随着时代的发展，双电源负载日渐成为主流，因此，STS 已不是必不可少的设备。负载可以直接与两个单独的三重冗余相连，而三重冗余则分别由单独的 UPS 系统供电。

多个电源同步 — 如果数据中心采用 STS 设备，那么应当使两个 UPS 供电电路保持同步。如果没有同步控制，UPS 模块之间很可能出现相位差，尤其是当 UPS 采用电池模式时。当先很多 STS 能够转换没有进行同步的电源。这种能力应该会淘汰多电源同步装置。

一种解决办法是在两个 UPS 系统之间安装一个同步设备，使这两个 UPS 系统的 AC 输出同步。当 UPS 模块的输入电源断电，使用电池工作时，这一点尤其重要。同步设备可确保所有 UPS 系统在任何时候都保持同步，因此，在 STS 转换过程中，电源将保持完全同相，从而杜绝了异相转换以及可能对下游设备造成的损害。当然，在某一个 UPS 系统添加同步设备时，应当考虑会同时影响所有 UPS 系统的故障发生的可能性。

分布式冗余的优点

- 便于所有组件的并行维护（如果所有负载均为双电源负载）。
- 与 $2(N+1)$ 设计相比，UPS 模块较少，因而成本较低。
- 对于任何特定双电源负载而言，两条独立的供电线路自服务入口处便提供了冗余。
- 无需将负载转换到旁路模式（负载将处于无保护电源下），即可对 UPS 模块、开关装置和其他配电设备进行维护。大部分分布式冗余设计都不需要维护旁路电路。

分布式冗余的缺点

- 与之前几种配置相比，由于大量采用开关装置，因此成本相对比较高。
- 设计是否成功依赖于 STS 设备的运行是否正常，因为采用 STS 设备即意味着存在单故障点以及复杂的故障模式。
- 配置方案复杂。在包含众多 UPS 模块、静态转换开关和三重冗余的大型数据中心中，要保证各个 UPS 系统均分负载并了解哪些系统为哪些负载供电，是一项艰巨的管理任务。
- 无法预计的运行模式：UPS 系统具备多种运行模式，且各 UPS 系统之间存在多种可能的转换模式。要在预先定好的条件和故障条件下对所有这些模式进行测试，以检验控制策略和故障清除设备是否正常运行，是不切实际的。
- 由于未达到满负荷工作状态，UPS 效率低下。

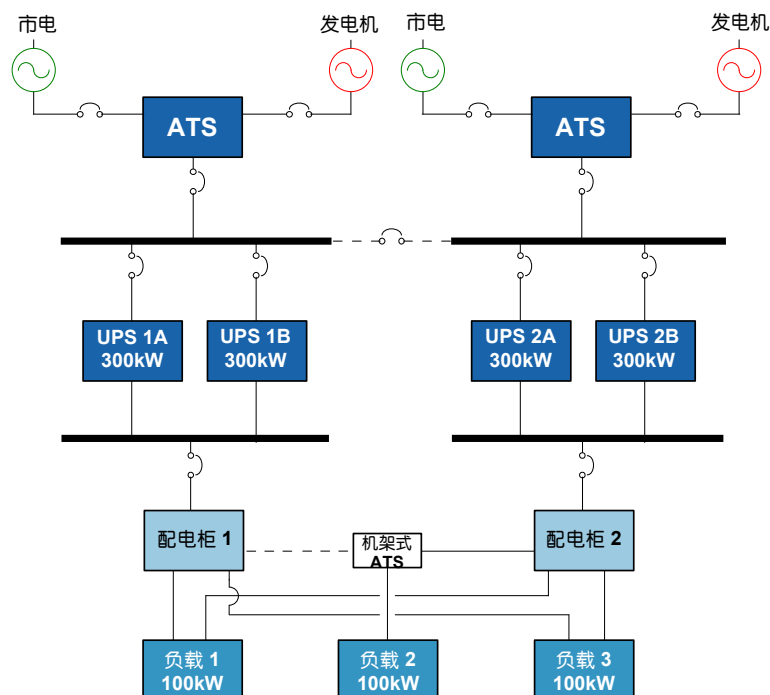
双系统冗余

双系统、多路并联总线、双输入、 $2(N+1)$ 、 $2N+2$ 、 $[(N+1) + (N+1)]$ 以及 $2N$ 全都指的是该配置的变体。借助这种设计方案，现在完全可以建立起根本无需将负载转换到市电的 UPS 系统。在设计这些系统时，可以尽量排除每一个可能的单故障点。不过，排除的单故障点越多，设计方案实施起来代价也越高昂。大多数大型双系统配置都位于专门设计的独立建筑物中。基础设施（包括 UPS、电池、制冷系统、发电机、市电和配电室）占据与数据中心设备同样大小的空间，是很平常的事情。

该配置是行业中最可靠也最昂贵的一种设计。根据工程师的理念以及客户要求的不同，它可以非常简单，也可以异常复杂。虽然采用的是同一个名称，但具体的设计细节千差万别，这也是由负责设计任务的设计工程师的理念与知识水平所决定的。图 7 显示了该配置的一种变体， $2(N+1)$ ，它由两个并联冗余 UPS 系统构成。理想情况下，可以采用单独的配电盘，甚至单独的市电和发

电机系统为这些 UPS 系统供电。虽然该设计方案的建造成本颇为不菲，但考虑到数据中心设备的重要程度以及宕机成本，还是物有所值的。全球许多家大公司都纷纷选择这种配置来保护其关键负载

图 7
2(N+1) UPS 配置



该配置的成本高低取决于设计工程师认为要满足客户的需求应当采用何种“深度和广度”的系统冗余。其基本设计概念，是允许每一个电气设备都可以在出现故障或手动关闭时正常运行而无需将关键负载转换到直接使用市电的条件下。2(N+1)设计的一个共同之处是采用旁路电路，以使部分系统可以被关闭或旁路至备用电源，从而保证了整个系统的冗余。图 7 即显示了这样一个示例：UPS 输入开关柜之间的电路连接，从而可以关闭其中一个市电接入，而不会使得任何一个 UPS 系统断电。在 2(N+1)设计中，倘若单个 UPS 模块发生故障，只会使该 UPS 模块从电路中断开，与之并联的另一个模块将承担起这部分负载。维护旁路在这种设计中并不是一个优势，因为它们有可能将整个系统完全“跨越”。

在图 7 的示例中，关键负载为 300 kW，因此，共需要四个 300kW 的 UPS 模块，两两组成两条独立的并联总线。每条总线分别为两条直接与双电源负载连接的电路供电。图 7 中的单电源负载显示了转换开关是如何为该负载提供冗余的。不过，Tier IV 等级的电源结构要求所有负载均为双电源负载。

一般而言，选择双系统配置的公司更关心配置是否具备高可用性，而不是其实现成本。这些公司的负载也大都为双电源负载。除了在分布式冗余配置部分中所讨论的因素之后，该配置方案还有以下几个因素：

静态转换开关 (STS) — 随着双电源 IT 设备的问世，在设计中无需再面对 STS 设备及其烦人的故障模式，从而使系统可用性得到了显著提高。

单电源负载 — 要充分利用双系统设计方案的冗余优势，应当将单电源负载与转换开关在机架处相连。这种做法的优势在第 48 号白皮书《[比较各种机架电源冗余配置的可用性](#)》中进行描述。

双系统冗余的优点

- 两条独立的供电线路，无单故障点，容错性极强。
- 该配置为从电力入口到关键负载的所有线路提供了全方位的冗余。
- 在 2(N+1)设计中，即使在并行维护过程中，也仍存在 UPS 冗余。
- 无需将负载转换到旁路模式（负载将处于无保护电源下），即可对 UPS 模块、开关装置和其他配电设备进行维护。
- 更容易使各 UPS 系统均分负载，并了解哪些系统为哪些负载供电。

双系统冗余的缺点

- 冗余组件数量多，成本高。
- 由于未达到满负荷工作状态，UPS 效率低下。
- 一般的建筑物不太适合采用可用性极高的双系统，因为这种系统需要对冗余组件进行分开放置。

如何选择合适的配置

应当如何来选择最适合自己的配置方案呢？让我们重温一下在选取合适的配置时应当考虑的注意事项：

- 宕机成本/影响 — 公司每分钟的流动现金有多少？如果发生故障，系统需要多长时间才能恢复？可以将以上问题的答案作为预算方案讨论的开篇。答案是 10,000,000 美元/分钟还是 1,000,000 美元/小时，讨论方向自然不同。
- 预算 — 从任何方面而言，实现 2(N+1)设计的成本都要比 N (容量)设计、并联冗余设计甚至是分布式冗余设计的成本高得多。让我们以一家大型数据中心为例来看看成本的差距。若该数据中心采用 2(N+1)设计，则可能需要 30 个 800kW 的模块（每条并联总线 5 个模块，共 6 条并联总线）。对于同样的负载，如果采用分布式冗余设计，那么只需要 18 个 800kW 的模块，显然成本要低得多。
- 负载类型（单电源负载与双电源负载）— 虽然双系统的设计概念在双电源设备出现之前便已产生，但双电源负载的确为这种利用冗余容量的设计方案提供了切实可行的实现机会。计算机制造商们在开始生产双电源负载之前，无疑会听取其客户的意见。数据中心内负载的特性会为设计者提供一些思路，不过其作用要远远低于上文所述的各种因素。
- IT 架构类型 — 虚拟化和网络带宽和速度突飞猛进的改善使整个数据中心能够无延迟的转换到另一个场地。这也在质疑原有的认知，具有最高可用性的数据中心是那些有着高度冗余的电力和制冷架构的设施。随着虚拟化技术的成熟，两个相隔遥远的“N”系统数据中心可能比一个高度冗余的数据中心具有更高的可用性。
- 风险承受能力 — 遭遇过重大故障的公司的风险承受能力往往比那些未曾有过此种体验的公司要强。聪明的公司将会从同行业其他公司身上获取经验数据。公司的风险承受能力越弱，就越倾向于采用可靠性更高、故障恢复能力更强的方案。
- 可用性表现 — 公司在一年之内能忍受多长时间的停机？如果回答是决不能停机，那么应在预算中选用高可用性的设计。不过，如果公司可以在每天晚上 10 点之后以及大多数周末停机，那么其 UPS 配置选择并联冗余设计就差不多了。每个 UPS 在某些方面都需要进行维护，而且 UPS 系统确实会间歇性地发生一些出人意料的故障。每年计划在维护方面所花的时间越少，系统需要的冗余设计组件就越多。
- 可靠性表现 — 一个 UPS 的可靠性越高，这个系统持续工作的概率也就越高。了解更多关于可靠性要求的知识，请参见第 78 号白皮书 [《平均故障间隔时间：说明和标准》](#)。

- 可维护性表现 — 简单的仅仅具有高可靠性并不能阻止的故障所导致长时间宕机的影响。维修所耗费的时间严重依赖于系统设计和维护技术人员的技能水平。识别延长维修时间的设计参数的同时减少人为失误是非常重要的。
- 对可维护性予以支持的表现 — “执行维护的组织的能力⁴”用来评估这项要素的最好的方法是研究其它公司与某个维护服务组织已经存在的体验。

上面最后四条可以归纳为一个词汇，叫作可信性。可信性，在《国际电工词汇 191-01-22 (IEV)》中的定义为“当需要时有能够依靠⁵”可信性包括了应该应用于 UPS 设计和其它支持数据中心的关键系统的重要因素。

在为特定应用环境选择合适的 UPS 系统设计配置方案时，可以将表 3 作为一个切入点。对于没有或很少冗余组件的设计而言，必然存在停机时段以进行维护。如果不允许停机，那么应当选择能进行并行维护的设计。只要依次回答流程图中提出的问题，便可顺利找到最合适的系统。

表 3

设计配置的选取

配置	过往使用	使用原因
无冗余 (N)	小型公司 具有多个本地办公地点的公司 具有地理冗余数据中心的公司	减少投资成本和能源成本 支持关键性较低的应用 简单配置和安装 允许停机维护
串联冗余	中小型企业 IT 容量通常小于 500 kW 的数据中心	与“1N”相比具有较好的容错性 允许使用不同型号的 UPS 允许未来增加负载
并联冗余(N+1)	有数据中心的大中小型公司，其 IT 容量通常小于 500 kW	与“1N”相比具有较好的容错性 允许未来增加负载
分布式备用冗余	有数据中心的大型公司，其 IT 容量通常大于 1 MW	允许使用不同型号的 UPS 允许添加更多容量 与 2N 相比更加经济
带 STS 的分布式冗余	有数据中心的大型企业，其 IT 容量通常远大于 1 MW	并行维护的能力 与 2N 相比更加经济
无 STS 的分布式冗余 例如，三重冗余	大型外包服务提供商	与 2N 相比更加经济 通过带有 STS 的设计可以节约成本
双系统冗余(2N, 2N+1)	大型 MW 级数据中心	在 A 侧和 B 侧之间完全冗余 更容易保持 UPS 系统平衡负载

⁴ <http://std.iec.ch/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-01-29> (访问于 2016 年 3 月 11 日)

⁵ <http://std.iec.ch/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-01-22> (访问于 2016 年 3 月 11 日)

结论


供电基础设施对于数据中心设备是否能正常运行至关重要。可供选择的 UPS 配置有很多种，每一种都有优势，也有不足之处。只有充分了解了公司的可用性要求、风险承受能力和预算范围之后，才能选择合适的设计方案。如本文中所分析，为双电源负载直接供电的 2(N+1) 结构可提供全面的冗余，并排除了单故障点，因此是可用性最高的一种配置。


关于作者

Kevin McCarthy 是 EDG2 的副总裁和 CTO，EDG2 是一家国际性的工程设计和项目管理公司，致力于关键任务设施（如数据中心和金融机构）的创新工程设计。他参与过超过 1500 座数据中心和机房的设计，规模从几十平方米到几万平方米，总面积超过 50 万平方米。Kevin 拥有俄亥俄州立大学（The Ohio State University）的电气工程和计算机科学双学士学位。他经常作为演讲嘉宾出席全国范围内的数据中心会议，他还是 7x24，AFCOM 和华盛顿建筑协会的成员。

Victor Avelar 是施耐德电气数据中心科研中心的高级研究员。Victor 致力于数据中心的设计和运营方面的研究。并且通过向客户提供风险评估和设计实践方面的咨询，来优化数据中心环境的可用性和能效。Victor 于 1995 年从伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute）获得了机械工程学的学士学位，然后在波士顿大学（Babson College）获得 MBA 工商管理硕士学位。Victor Avelar 是 AFCOM 和美国质量协会的成员。



 [避免数据中心和网络机房基础设施
因过度规划造成的资金浪费](#)
第 37 号白皮书

 [比较各种机架电源冗余
配置的可用性](#)
第 48 号白皮书

 [平均故障间隔时间：说明和标准](#)
第 78 号白皮书

 [浏览所有 白皮书](#)
whitepapers.apc.com

 [浏览所有 TradeOff Tools™ 权衡工具](#)
tools.apc.com

联系我们

关于本白皮书内容的反馈和建议请联系：

数据中心科研中心
dcsc@schneider-electric.com

如果您作为我们的客户需要咨询数据中心项目相关信息：

请与所在地区或行业的施耐德电气销售代表联系，或登录：
www.apc.com/support/contact/index.cfm

附录一 可用性分析

进行可用性分析的目的是为了对本文中所讨论的 五种配置之间的可用性差异进行量化。详细分析过程见下文。

可用性分析方法

美国可用性研究中心采用一种综合的可用性分析方法来计算可用性等级。该方法结合使用可靠性方块图 (RBD) 与状态空间模型，通过图形方式来求解这 五种配置的电 源可用性。其中，RBD 用于表示结构的子系统，而状态空间图（也称作 Markov 图）用于表示电力结构可能呈现的各种状态。例如，市电断开时，UPS 将转换到电池模式。分析过程所使用的所有数据均来自为行业所广泛接受的第三方，如 IEEE 和 RAC。这些统计的可用性等级均基于多个经过独立验证的假设条件。

Joanne Bechta Dugan, 博士, 弗吉尼亚大学教授

“我发现分析的可信和方法论的合理。可靠性方块图(RBD) 和马尔可夫过程随机概率建模(MRM) 相结合是将 RBD 简洁性和 MRM 的灵活性和准确性完美结合的一个绝佳选择。”

分析中使用的数据

用于为组件建模的数据均来自第三方。在此分析中包含以下关键部件：

1. 端接点
2. 断路器
3. UPS 系统
4. 三重冗余
5. 静态转换开关 (STS)
6. 发电机
7. 自动转换开关 ATS

配电柜细分为三个基本的子组件：断路器、隔离变压器和末端端子。分配电盘根据一个主断路器、一个支断路器和终接点全部在系列中进行评估。

分析中使用的假设

能否令读者正确理解这 五种配置的可用性数值至关重要。为了对复杂的系统进行可用性分析，必须做出一些假设，以简化分析过程。因此，此处提供的可用性会高于实际安装中预期的可用性。**表 A1** 列出了分析过程中所使用的基本假设条件。

表 A1

分析过程中所用的假设条件

假设	说明
组件的故障率	分析中的所有组件均表现出稳定的故障率。如果设备只是在设计的有效寿命内使用，这是最佳的假设。如果产品使用时间超过了其有效寿命，故障率中将需要加入非线性特征。
维修团队	对于系列中的“n”个组件，假定有“n”个维修人员。
系统组件仍可以运行	假定在维修出现故障的组件时，系统内的所有组件仍可以运行。
布线的故障率	架构中各组件之间的布线没有计算在内，因为布线的故障率太低，无法进行确定的和符合统计准确性的预测。以前的工作也表明，如此低的故障率对整体可用性影响非常小。大部分终接点仍考虑在内。
故障的独立性	这些模型假定所述架构的建立依据行业最佳方案。这样，因为物理和电气隔离产生常见原因故障的可能性非常低。此假设不完全适用于分布式冗余结构，因为静态转换开关会影响 3 个 UPS 中的 2 个，进而使整个结构出现故障。对于两个分布式冗余结构，应当为此常见故障建模。
人为失误	此分析中没有考虑因为人为错误造成的停机。尽管这是数据中心停机的一个重要原因，但是，这些模型针对的是比较电源基础设施的架构以及找出这些架构中的物理弱点。 此外，还缺乏与人为错误对可用性的影响有关的数据。
电源可用性是关键指标	此分析提供与电源可用性有关的信息。因为电源重新启动不会立即重新恢复业务可用性，业务流程的可用性通常会降低。IT 系统通常有一个重新启动时间，它会使不可用性加剧，此分析中没有考虑这个因素。
故障的定义摘自 IEEE Std 493-1997 (Gold Book) IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and commercial Power Systems (IEEE 对设计可靠的工业和商业 电源系统的建议)	造成以下任何事故的电源系统组件的任何问题： <ul style="list-style-type: none"> • 部分或整个系统停机，或系统运营达不到标准水平 • 用户设备的性能不可接受 • 电气保护继电器运行或电气系统处于紧急运行状态下 • 任何电路或设备断电

故障率和恢复率数据

表 A2 中列出了每个子组件的故障率 $\left(\frac{1}{MTTF}\right)$ 和恢复率 $\left(\frac{1}{MTTR}\right)$ 数据和来源，其中 MTBF 是平均故障时间，MTTR 是平均恢复时间。

表 A2

组件和值

组件	故障率	恢复率	资料来源	备注
市电	3.887E-003	30.487	EPRI — 收集了市电数据并计算了所有分布式电源事件的加权平均值此数据与地理位置有很大关系。	此数据与地理位置有很大关系。
柴油发电机	1.0274E-04	0.25641	IEEE Gold Book Std 493-1997 第 406 页	故障率取决于运行时间。根据第 44 页表 3-4，每次启动的故障率为 0.01350。
自动转换开关	9.7949E-06	0.17422	可靠性/可用性调查 — ASHRAE 第 4489 号文章	用于将电源从市电转换到发电机，或反之。
端子，0-600V	1.4498E-08	0.26316	IEEE Gold Book Std 493-1997 第 41 页	用于连接两根导线。
6 个端子	8.6988E-08	0.26316	6 x IEEE 值 使用 IEEE Gold Book Std 493-1997 第 41 页提供的值计算	变压器的输入部分，每根导线一个端子。因为组件之间有两组端子，所以，共有六个端子。
8 个端子	1.1598E-07	0.26316	8 x IEEE 值 使用 IEEE Gold Book Std 493-1997 第 41 页提供的值计算	变压器的输出部分，每根导线一个端子加上零线。因为组件之间有两组端子，所以，共有八个端子。
断路器	3.9954E-07	0.45455	IEEE Gold Book Std 493-1997 第 40 页	用于隔离组件和电源，以便进行维护或遏制故障。 固定式（包括模制壳体），0-600A
PDU 变压器，	7.0776E-07	0.00641	MTBF 来自 IEEE Gold Book Std 493-1997 第 40 页，MTTR 是 Marcus Transformer Data 与 Square D。	提供的平均值用于将 480VAC 输入降低到 208VAC 输出，以满足 120VAC 负载的需要。
降压	4.1600E-06	0.16667	北卡罗来纳州莱利市的 Gordon Associates	故障率中包括控件；ASHRAE 未给出此型号 STS 的恢复率，因此采用的是 600 - 1000A STS 的恢复率值
>100KVA	3.64E-05	0.125	故障率摘自 Power Quality Magazine 2001 年 2 月号，恢复率数据基于维修人员 4 小时到位并且用 4 个小时维修系统	假设 UPS 无旁路。MTBF 是 27,400 小时无跳转至旁路。根据 MGE “电源系统应用指南”

状态空间模型

状态空间模型用于表示这六种结构可能存在的各种状态。除可靠性数据之外，状态空间模型还用到了其他一些变量，其定义见表 A3。

表 A3
状态空间模型变量

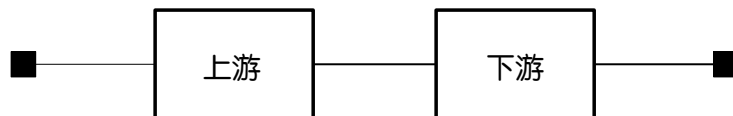
变量	故障率	资料来源	备注
PbypassFailSwitch	0.001	行业平均值	UPS 出现故障时旁路无法成功切换到市电的概率。
Pbatfailed	0.001	北卡罗来纳州莱利市的 Gordon Associates	切换到电池模式时 UPS 无法给负载供电的概率。包括控件。
Tbat	7 分钟		剩余电池运行时间，所有配置均相同。
Pgenfail_start	0.0135	IEEE Gold Book Std 493-1997 第 44 页	发电机无法启动的概率。故障率取决于运行时间。根据第 44 页表 3-4，每次启动的故障率为 0.01350。此数据也适用于 ATS。
Tgen_start	0.05278	行业平均值	断电后发电机的启动延时。等同于 190 秒。

可用性模型说明

本部分的目的在于简要介绍对“容量”配置的分析过程。图 A1 至图 A3 给出了图 1 所示的“容量”配置的可用性模型。其他几种 UPS 配置的模式可以依照同样的方法创建。

图 A1 描绘了“容量”配置的上游部分与下游部分之间的顺序关系。“上游”方块囊括了市电与整个 UPS 之间的所有组件。“下游”方块则表示 UPS 之后直到变压器输出断路器的所有组件（包括变压器输出断路器）。

图 A1
表示上游线路和下游线路的RBD



在“上游”方块中创建 Markov 图来计算为下游组件供电的上游组件的可用性。图 A2 上方的方块依次代表旁路、UPS 系统、发电机、自动转换开关（ATS）和市电的独立组件。这些组件的故障率和恢复率计入 Markov 图从而得出整个“上游”方块总的可用性。

图 A2

上游 Markov 图

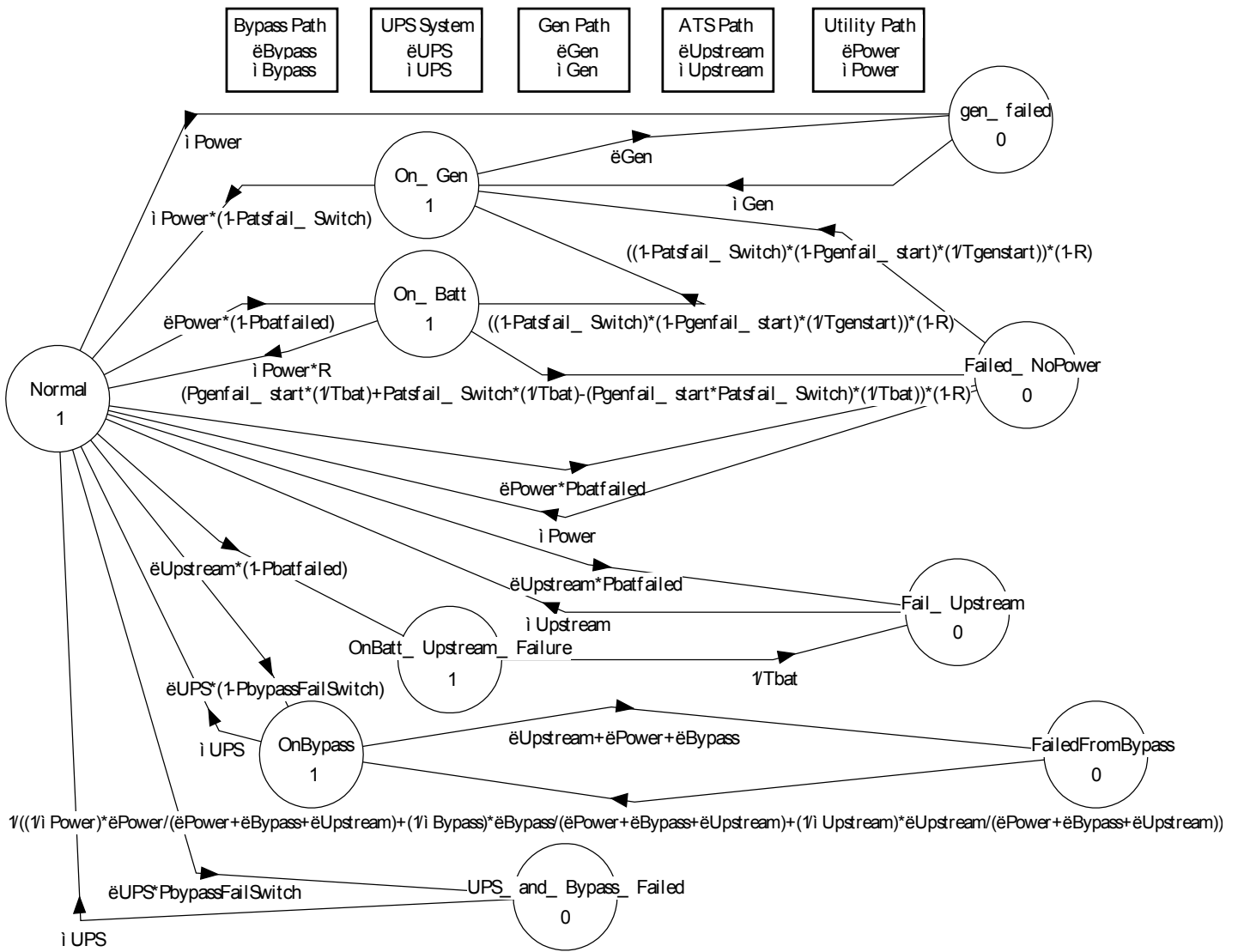
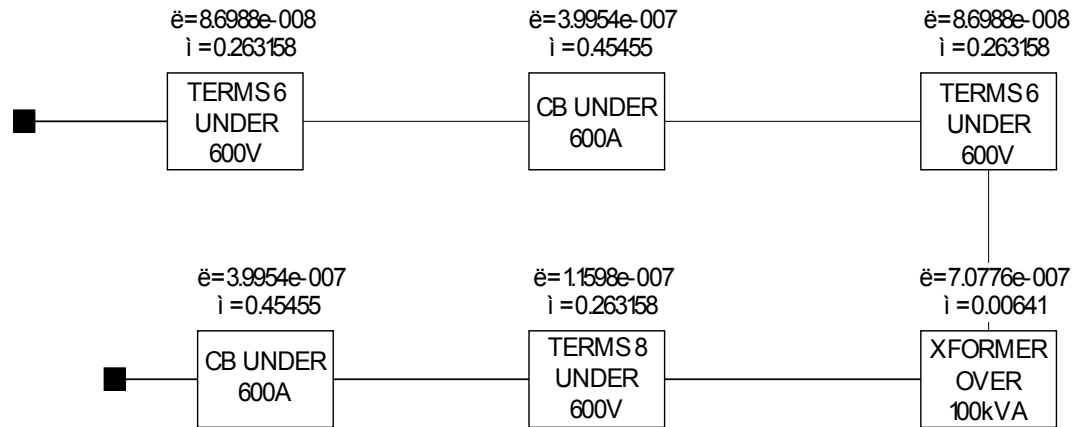


图 A3 描绘了图 A1 中所示的“下游”方块中的各个组件。对于分布式冗余配置（正文图 4 和图 5），应当在图中一系列组件的开始处添上 STS。

图 A3
下游图



结果

表 A4 列出了所有五种 UPS 配置的分析结果。请注意我们对两个版本的分布式冗余 UPS 进行分析（备用系统与使用 STS 系统）。

表 A4
分析结果

UPS 配置	图号	可用性
单模块“容量”UPS 配置	1	99.92%
串联冗余 UPS 配置	2	99.93%
并联冗余 (N+1) UPS 配置	3	99.93%
分布式冗余“备用”UPS 配置	4	99.9989%
分布式冗余 UPS 配置	5	99.9994%
2(N+1) UPS 配置	7	99.99997%