

# 信息技术行业所用发电机的基本原理

## 第 93 号白皮书

版本 1

作者 Randy Wyatt

### > 摘要

负责计算设备运转的每位信息技术专业人员都需要确保他所负责的数据中心或网络机房可以应对市电长时间断电。了解备用发电机系统的基本功能和原理，是 IT 专业人员顺利完成关键设施选型、安装和运转的坚实基础。本白皮书介绍备用发电机及其子系统，在市电无法供电时这些系统可以为设施的关键电气负载供电。

### 目录

[点击内容即可跳转至具体章节](#)

简介	2
原动机：内燃机	2
交流发电机：发电组件	4
调速器：交流输出频率和调节	6
电压调节	6
开关装置与电力分配	6
多台或并联冗余发电机系统	7
整体系统和兼容性设计	8
结论	9
资源	10

## 简介

备用发电机系统由两个基本的子系统组成：(1) 发电机，由原动机、交流发电机和调速器组成 (2) 配电系统，由自动转换开关 (ATS) 及相关的开关装置和配电线路组成。图 1 是一个典型的备用发电机。本白皮书介绍上述主要子系统及其基本功能。不过它只是围绕高级发电机系统主题展开的一系列 施耐德电气 白皮书的引言部分，仅供希望对该主题进行更全面了解 的读者参考。



图 1

备用发电机

### 资源链接 第 90 号白皮书

下一代数据中心的发电机系统基本要求

在购买发电机系统前，对于当今发电机系统具有的技术优势以及过去 10-15 年内 在可靠性和功能性方面取得的重大技术进步，您都应该有所了解。以前的发电机系统经过技术改造，通常也可以满足当前的要求。请参见 第 90 号白皮书《下一代数据中心的发电机系统基本要求》，进一步 了解现今任务关键设备对发电机系统的基本要求。

## 原动机：内燃机

什么是内燃机？比如，内燃机可为您的汽车提供动力。内燃机是 20 世纪后期发明的一种得力负载工具，在新的千年它也发挥着同样重要的作用。通俗地讲，内燃机是通过其内部的运动部件将燃料蕴含的能量转换为机械运动的动能。外部空气与引擎内部的燃料混合后，这些运动部件会点燃空气和燃料的混合物，在名为气缸的腔体内发生一个受控的内部爆炸（燃烧）。尽管内燃机引擎千差万别，但备用发电机系统最常用的是 4 冲程发动机。之所以称为 4 冲程，是因为每个燃烧循环都要经过四个不同的阶段。这些阶段包括吸入空气/燃料混合气体，压缩混合气体，燃烧或爆炸，以及排气。在谈到发电机时，发动机通常被称为原动机。下面介绍与原动机相关联的核心属性。

### 燃料

内燃机有以下四种常用燃料：柴油、天然气、液化石油气 (LP) 和汽油。可以依据存储条件、成本和可用性等不同的条件来选择使用的燃料类型。

## 废气、尾气排放和噪声

发电机系统排放是空气和噪音污染方面不可忽视的问题。尽管降低噪音、减少废气排放的概念很容易理解，但涉及到环境和监管问题时却不是这么简单。EGSA（发电系统协会）是一个全球性组织，为成员提供有关备用发电机排放及其他注意事项的大量信息。不同地区适用的环境法、建设工程规划许可证以及发电机使用年限都不尽相同。例如，美国联邦环保总署 (EPA) 为每个州指定了监管机构并赋予执行权力，目的是为了达到国家级空气质量标准。其他国家/地区也都有类似的订立发电机排放标准的监管机构。例如，英国环境食品与农村事务部 (DEFRA) 制订英国的环境保护政策。在印度执行此项职能的是森林和环境部 (MoEF)。如果要在管制严格的地区安装发电设备，在申请许可证的时候，可能要求您提供发电机系统的排放声明。行业专家通常非常熟悉他们所在地区的审批过程。

另一个需要得到监管机构许可的方面是噪声污染。通常是按 24 小时内监测到的可录制最高背景噪声订立本地噪声法规。排气消声器通常可以分为工业、民用或强力几种类型。强力型降噪效果最明显。为了节省技术改造费用，您应该在购买系统前就考虑其噪声级别，以便在设备规划阶段噪声就能满足当地监管机构的要求。另外，机械振动也会导致噪声增大，并使附近居民承受更严重的噪声污染。现有安装和绝缘技术可以将这种影响降到最低。

第三个要讨论的重要问题是关于外观美感，因为安装发电机可能要经过当地政府的许可。某些地区对发电机的安放位置有要求，包括要求将发电机安置在与主体建筑外观相协调的混凝土/砖结构建筑中。这样可以避免发电机露天放置，并使其与邻近建筑物在外观上相匹配。

## 燃烧空气进气口

发动机气流的冷却和清洁装置要与设备房的设计相融合，这一点非常重要。另外，我们还建议室内要有充分的新鲜冷空气，以达到一定的人员舒适度。这通常需要大的通风口，可能需要额外的风扇。另外，还要有一定的预防及过滤措施，防止雨、雪和碎屑杂物进入系统。

## 冷却

大多数发电用原动机的散热器冷却系统与汽车冷却系统非常相似。风扇用于使足够多的空气在冷却系统中流通，以维持适中的发动机温度。多余的热量通过散热器向外界排放，所用导气系统的截面积与散热器截面积相同。进气口（房屋天窗）面积通常要比此管道面积大 25-50%。必须对冷却系统进行认真维护才能确保设备的可靠运转。必须经常仔细检查冷却软管、冷却液量、水泵运转以及防冻保护措施，确保达到合格性能。

## 润滑

如今的 4 冲程发动机使用的是全流式过滤系统，该系统从安装在发动机外部的过滤器泵入润滑油，以防止有害微粒以及杂质损伤轴承的运动部件。润滑油补充罐用于维持合适的油量，外部润滑油冷却器有助于防止因高温造成的润滑油故障。

## 过滤器：空气和燃料

空气和燃料是原动机可靠运转的关键要素。遵循适当的维护计划非常必要。对于必须支持长时间运转的任务关键应用，使用带有双油管和过滤器的系统将具有很大优势。因为您可以在发动机维持运转的情况下隔离并更换油管和过滤器。如果过滤器和其他“消耗性部件”没有备用部件，可能会导致停机。

可以使用“差压指示计”主动监测这些过滤器。差压指示计可以显示发动机运转过程中过滤器进出口之间或两条油管之间的压力差。当用于空气过滤器时，这些主动监测设备也称为“限压指示计”。此类指示计可以在发电机引擎运转时显示是否需要更换干式进气过滤器。

## 启动电机

启动系统是发电机成功运转的最关键因素之一。任务关键负载通常附带的是只有几分钟电池运行时间的 UPS 系统，所以能够快速启动非常重要。检查电源问题、启动原动机、设置稳定的输出频率和电压并连接到负载，一般最少需要 10-15 秒钟时间。不过，由于诸如电池未充电或被窃等因素，许多在用系统无法可靠地完成这样快速的部署任务。还包括维护不当以及人为失误等其他因素。要达到一个令人满意的发电机系统启动成功率，认真设计和维护至关重要。

大部分发电机系统使用类似于汽车上用的由电池驱动的启动电机，不过有些大功率的原动机可能使用气动或液压发动机。毫无疑问，电池系统是传统启动电机的关键组件。例如，某些发动机上给蓄电池充电的发电机无法阻止电池闲置期间的放电。使用带远程警报的独立自动充电系统将是“最佳方案”。另外，为电池保温以及免受腐蚀也是非常必要的。

电池保温是通过一个维持铅酸蓄电池电解液温度的加热器来实现的。在寒冷天气条件下，这将会大大增加启动电机的启动电流。电池是以 CCA（冷启动电流）为额定值标准，该电流值表示在 -17.8°C (0°F) 的温度下 30 秒钟可用的安培数。如果温度低于 -17.8°C (0°F) 或高于 26.7°C (80°F)，可靠性将会很差。

另外，发动机保温加热器可以通过降低启动电机在点火时必须克服的摩擦力，来提高启动成功率。大量研究已经发现启动故障是导致发电机系统故障的最主要原因。

## 交流发电机：发电组件

交流发电机的功能就是将原动机的机械能转换为电能。这与汽车的交流发电机类似，不过汽车中的发电机通常由皮带驱动，而发电机是由原动机的主驱动轴驱动。一个金属线圈和一块磁铁可以构成一个非常简单的交流发电机。当金属线圈通过磁铁正负极形成的磁场时，就会产生电流。线圈保持静止而磁场移动也可以产生电流。这种类型的交流发电机产生的电流量显然非常小，不过其发电原理与大型交流发电机的发电原理相同。经过多年努力，交流发电机组件的某些特性已经得到改善，交流发电机的效率、功率和可靠性得以增强。下面逐一说明每种特性。图 2 说明发电机系统中的典型交流发电机的主要组件。

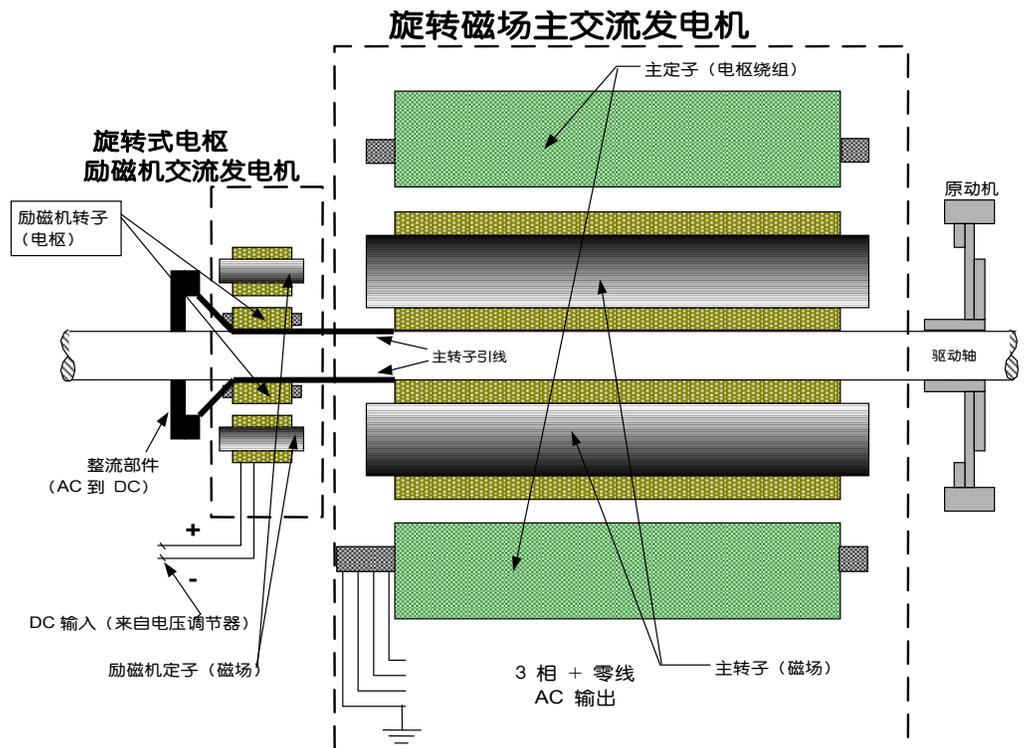


图 2  
横截面图：自激外调式无刷交流发电机

## 无刷

无刷设计是指在与旋转体之间传递电能时，无需任何接触。在电动机和小型交流发电机中使用电刷仍然是可以接受的设计方案，但是这些电刷会在使用中不断磨损，并且磨损情况无法预见。依靠电刷的大型发电机设计不能满足任务关键运转所必需的可靠性标准。

## 自激

在上面的示例中，磁铁用于产生磁场。对于大型交流发电机，需要一个更为强大的磁场，以产生大量电流。就像废料场使用小块磁铁不足以移动大块金属，而要使用起重机悬吊的电磁铁。电磁石是指由电流驱动的磁铁，如今的交流发电机使用的都是“自激”磁铁。自激是指用于形成电磁场的电流是交流发电机自身产生的，从而允许交流发电机仅使用由原动机提供的能量生成强大的电流。

## 主定子或转子绕组

主定子或转子绕组是产生感生电流并带动关键负载的静止线圈。生成的交流电的特性与线圈绕组的个数和几何属性有关。有多种配置可用于满足各种电流和电压需求。

三相绕组是围绕旋转轴且夹角 120 度的三个独立线圈。当交流发电机磁场只有一对正/负极时，原动机每旋转一圈，每个相位将产生一个周期的交流电。也就是说，要产生 60 Hz 的交流电，原动机需要以 3600 RPM（转/分）的速率旋转。对于柴油发电机系统，这是比较高的转速，其磨损量是以 1800 RPM 运转的发动机的两倍。通过使用四极交流发电机磁场，可以将原动机的 RPM 控制在 1800 RPM，同样能够生成 60 Hz 的输出电流。还可以选用 6 极或 8 极交流发电机，从而实现转速更低的设计（相应转速为 1200 RPM 和 900 RPM）。

## 接地

发电机系统接地和零线连接是一个非常关键的步骤。接地方法必须遵循所在地区的电气操作规范，以避免错误操作并保证电源质量。例如，美国使用国家电气标准 (NEC) 第 250 章中的第 4 条（或其他监管标准）。

在各种设施的接线方面，也许最常见的错误就是对接地操作的理解和实施。您可以从 IEEE<sup>1</sup> 标准 446-1995《IEEE 工业及商业设备用应急及备用供电系统推荐规程》（橙皮书）中获取相关信息。为敏感电气负载供电时，还需要认真遵循 IEEE 标准 1100-1999《IEEE 电子设备供电和接地推荐操作规程》（绿皮书）。

## 额定温度

交流发电机绕组的额定温度是另一个重要的规格，特别是对那些可能在极端环境条件（指海拔高度、环境温度或通风条件）下应用的设备。

增加大型发电机的外形尺寸有助于控制绕组温度。另外，也可以使用专用隔热材料来承受高温。特定操作环境中的湿度、温度、霉菌和害虫等不利因素可能会导致恶劣的运转条件。针对不利环境条件使用特殊设计和隔离设备，有助于保持绕组清洁并避免绝缘材料老化。

---

<sup>1</sup> IEEE（电气和电子工程师协会）是一家技术领域的权威机构，涉及包括电源技术的广泛技术门类。是一个非盈利性专业技术协会，有超过 360,000 名会员，分布在约 175 个国家/地区。网址为 [www.ieee.org](http://www.ieee.org)。

## 调速器：交流输出频率和调节

在各种不同运转条件下，调速器通过调整供给原动机的燃料量来维持恒定的原动机转速。产生的交流电必须具有稳定的频率，而交流电频率与调速器的精度和响应时间成正比。该设备是决定交流电输出电源质量的关键要素。

连接并使用稳定市电网络的用户无需担忧频率变动及其对电源质量的影响。但是，敏感电气设备却很容易被频率突变所造成的发电机电源扰动所破坏。发电机产生稳定频率的能力与由调速器控制的原动机的转速成正比。从简单的发条驱动机械到复杂的液压和电气系统，许多系统都可动态调整节流阀以保持原动机的恒定转速。只需通过增加/减少负载（或启动/关闭负载）创造调速器必须响应的条件即可。

不论负载大小如何变化，同步（转速相同）调速器都能使设备维持恒定转速。但原动机转速仍然会有小幅变化，变化幅度可以用来衡量调速器的稳定性。目前的调速器技术可使频率稳定在  $\pm 0.25\%$  范围内，对负载变化的响应时间约为 1 至 3 秒。如今，电子固态设计可以为敏感负载提供高可靠性及所需的频率调节能力。

当两台或多台发电机并联发电或用作备用电源时，必须使用市电或另一台发电机作为基准参考频率将其调整为相同的速度。这是因为如果两台发电机不同步，其中一台将承担大部分负载，并必须加以校正。

最近，已经为并联发电系统开发出精密的电子调速系统，用于在各种不同条件下协调频率并保持频率稳定性。因为这些新技术改进可以提高稳定性、减少维护和协调频率的工作，能很好地满足当今数据中心对高可用性的需求。

发动机的燃料类型以及负载变化幅度将影响调速器的选型。因为这两种因素都会影响原动机转速的精度和稳定性，所以在整体设计时必须加以考虑。

## 电压调节

电压调节器的基本功能就是控制交流发电机输出时产生的电压。对于依赖计算机电源供电的关键负载，使用电压调节器非常重要。其目标就是配置具有一定响应时间的系统，使负载变化时出现的电压骤降和浪涌都降到最低程度。另一个要明确的问题是当承受非线性负载（如老式开关式电源）时调节器的行为。非线性负载获取电流的波形与电压波形不同步，而电阻性负载（如白炽灯泡）会随着电压波形变化同步获取电流。非线性负载可以与发电机系统互相交换能量（产生无功功率），因此可能会在备用模式运行时危及关键负载的可用性。

EGSA 101E 第 5 节将电压调节的参数定义为“稳定状态无负载和全负载的电压差值，以全负载电压的百分比表示”。交流发电机有三个参数来决定电压：磁场强度、切割磁场的速率以及绕组的线圈数。在我们的讨论中假设后两个因素不变，也就是说电压调节是一种通过改变磁场获得所需电压的功能。

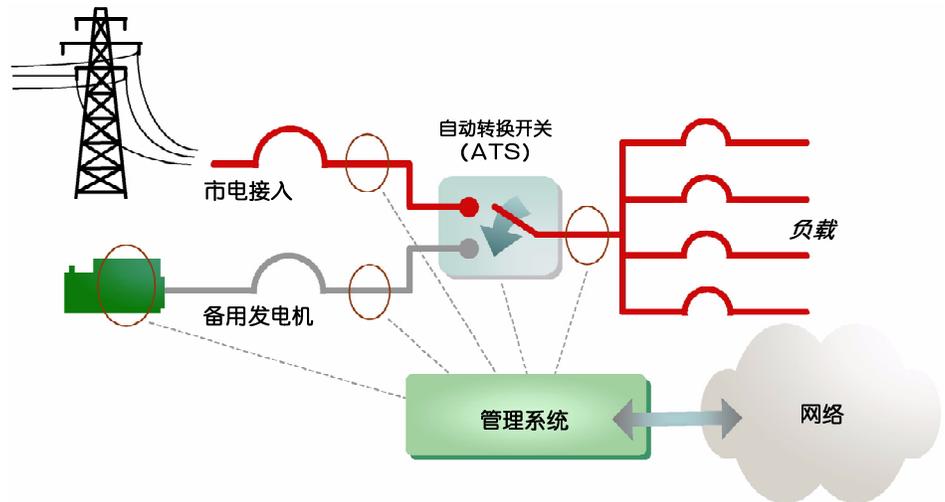
现在许多输出电压监测技术都能够保证为数据中心提供最适用的电源质量。不论电压调节器采用何种设计方案，都应保证在“最恶劣条件下”的电压变化小于可承受的最大电压变化范围。可能导致“最恶劣条件”的因素包括绕组温度过高造成的电压太低，或者连接大量非线性负载。因为普遍采用了功率因数校正 (PFC) 电源，所以如今数据中心包含的非线性负载非常少。不过，如果此发电机用作其他建筑系统的备用电源，那么应该事先确定所有非线性负载，以便选择正确的发电机系统。

## 开关装置与电力分配

为关键负载分配发电机的输出电能是系统设计的另一个重要方面。IEEE 绿皮书（IEEE 标准 1100-1999）是公认电源敏感设备领域权威标准。他们建议的做法就是根据 IEEE 橙皮书（IEEE 标准 446-1995）来设计系统。IEEE 橙皮书提供了自动系统的相关设计原则，自动系统的基本功能包括监测市电电源、启动发动机并在电压稳定后迅速将负载切换到发电机。此外还包括在市电恢复正常后将负载重新切换到市电。通常，所有这些功能都集成到名为自动转换开关

(ATS) 的系统中。其他常用功能还有发电机自检安排以及市电恢复后对发电机执行重要的停机降温程序等。过去有许多供应商都提供此类系统，包括发电机制造商、配电开关装置制造商以及 ATS 专业设计机构等。如今人们可从市场直接购得预先设计的系统，以避免自定义解决方案带来的缺陷（包括高总拥有成本 (TCO) 和复杂性）。图 3 说明 ATS 在一个建筑物配电系统中的作用。

**图 3**  
带自动转换开关的备用发电机系统



系统设计还必须考虑适当的过载保护。开关装置的触点必须可以承受突然增加的电流，不至于发生熔接故障。另外，开关还要避免在全负载运行时出现过热，并能够承载一定的短路电流（触发电路断路器等过载保护设备所需的电流），这也非常重要。不同的开关方案（称为开路切换和闭路切换）可用于将负载重新切换到市电。开路切换表示负载先从市电断开，然后再连接到发电机。闭路切换表示负载先连接到发电机，然后再从市电断开。这意味着在很短的一段时间内，设备同时连接市电和发电机。闭路切换类型具有更高精确度，可以将切换瞬间的扰动降到最低。

## 多台或并联冗余发电机系统

需要“多少台”发电机的问题与所需的系统功率和可靠性紧密相关。由多个（完全相同的）小型发电机单元来满足峰值负载，并由另一个单元提供冗余的配置，称为 N+1 冗余系统。图 4 所示为三台同步运转的 800 kW 发电机系统，为 1.6 MW 的设备负载供电，第三个 800 kW 处于备用状态。

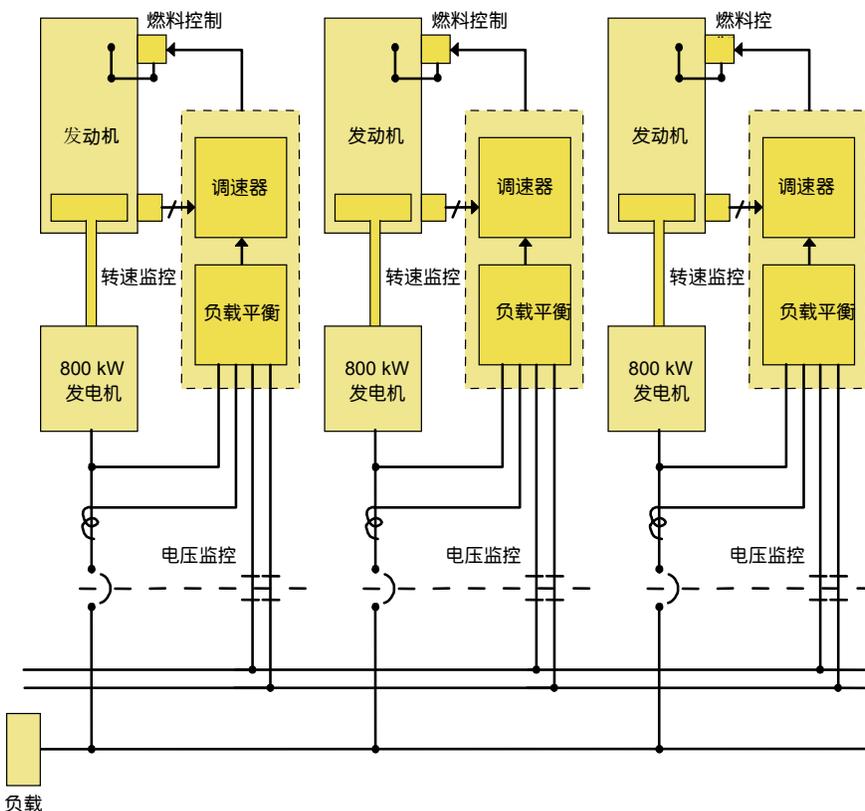


图 4

1.6 MW N+1 冗余同步发电机系统

最初启动顺序为三台发电机全部同时开始运转并保持同步。从而以 N+1 冗余系统配置方式为 1.6 MW 的负载供电。并联开关装置将会增加成本，但从统计学上来说，在可靠性方面要比单一原动机高。在此示例中，与单一发电机系统停机的可能性相比，多台发电机系统在给定时间同时停机的可能性非常小。当然，还要认识到常见故障（如燃料耗尽）可能会使看似可靠的系统失效。

积木概念（即使用多台小型发电机来为负载供电）的另一个重要优点是其可扩展性。如果设备数量会不断增多，则您应选择可逐渐增加负载容量的供电系统，按照最终负载预留设备空间并使电路能承受最终负载的电流。您可以等到关键负载产生足够效益之后，再追加供电设备的投资及相关维护费用。一定要仔细评估需求并将正确的判断应用于系统选型（要与以前的系统定义一致）。有关可扩展性的详细信息，请参阅第 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》。

资源链接  
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

## 整体系统和兼容性设计

一个特别重要的事情是强调功率因数、转换开关以及 UPS 对组合系统的整体影响。当牵涉到多家供应商时，所有参与项目的供应商都有必要参与复杂的安装测试和试运行过程。制订这样的计划可以在问题影响关键负载之前发现未预见的兼容性问题。应该在各种不同的负载下完成此测试（直至 100% 满负载）。通常，必须引入负载组来代替预定负载。请注意，使用负载组可能无法正确模拟计算机负载的功率因数。如果没有专门的电抗负载组，那么就需要在实际负载可用时使用实际负载进行附加测试。

有一种方法可以避免需要定制发电机、ATS 和 UPS 的解决方案所带来的复杂性以及多供应商测试步骤，那就是选择由单一供应商提供、符合 ISO 9000 标准、经过预先设计、生产和预测试的整体系统。选择预先设计的系统的另一个好处就是标准化制造技术提高了质量和可靠性，也称为“可靠性提高”。

## 结论

原动机为发电机系统提供能量，并需要一个精准的调速器来保证在负载变化时产生稳定的频率。交流发电机、电压调节器和其他控制元件用于生成高质量的交流电，将其传送至转换开关并驱动关键负载。传统发电机系统的结构很复杂，造成工程设计成本居高不下，并且出现故障的机率很大。预先设计的系统利用标准化的制造技术提供更高的可靠性，为您提高新的选择。



### 关于作者

**Randy Wyatt** 是施耐德电气发电和电力组件产品的产品线经理。Randy 在伦斯勒理工学院获得电力工程学硕士学位。而且在电力设施和工程服务的应用、销售和市场营销等领域拥有超过 20 年的丰富经验



点击图标打开相应  
参考资源链接



下一代数据中心的发电机系统基本要求

第 90 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

第 37 号白皮书



浏览所有 白皮书

[whitepapers.apc.com](http://whitepapers.apc.com)



浏览所有 TradeOff Tools™ 权衡工具

[tools.apc.com](http://tools.apc.com)

## 参考资料

1. NFPA 110, 应急和备用电力系统标准 1999 年版  
美国国家消防协会 1999 年 (<http://www.nfpa.org>)
2. NFPA 111, 储备电能应急和备用电力系统标准 1996 年版
3. 美国国家消防协会 1999 年
4. IEEE 标准号 446-1995 “IEEE 工业及商业设备用应急及备用电力系统推荐规程” (橙皮书) (<http://ieee.org>)
5. IEEE 标准号 1100-1999, “IEEE 电子设备供电和接地推荐操作规程”。(绿皮书)
6. IEEE 标准号 602-1996, “IEEE 保健设施中电气系统的推荐规程” (白皮书)
7. EGSA 标准号 100, 101, & 404 (<http://www.egsa.org>)  
“现场发电”, 发电系统协会, 1998 ISBN 0-9625949-3-8



## 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](mailto:DCSC@Schneider-Electric.com)

如果您是我们的客户并对数据中心项目有任何疑问:

请与您的 **施耐德电气** 销售代表联系