

第 1 章 现代通信电源概述

1.1 通信电源基本概念

通信电源作为通信系统的核心部分之一，在通信工程中具有无可比拟的重要地位。它包含的内容非常广泛，不仅包含常用的开关电源、UPS 电源、通信用蓄电池和油机发电机组，还包括太阳能电池等绿色通信电源。通信电源的核心基本一致，都是以功率电子器件为基础，通过稳定的控制环设计，再加上必要的外部监控，最终实现能量的转换和过程的监控。现代通信设备需要稳定、可靠的电源设备来提供电源，电源的安全、可靠是保证通信系统正常运行的重要条件。

1.1.1 现代通信对通信电源的要求

现代通信设备由于其自身的工作特性，对通信电源的保障提出了越来越高的要求。

1. 可靠性高

一般的通信设备发生故障影响面较小，是局部性的。但电源系统发生直流供电中断故障，其影响几乎是灾难性的，往往会造成整个电信局、通信枢纽的通信中断。数字通信设备对电源的要求则更高，电源电压即使有瞬间的中断也不被允许。

在数字程控交换局中，信息存在存储单元中，重要的存储单元都是双重设置的。若电源中断，两套并行工作的存储器会同时丢失信息，信息需通过磁带、软盘等重新输入程序软件，导致通信将长时间中断。因此，通信电源系统需要在各环节多重备份，配置“多路、多种、多套”（简称“三多”）的备用电源。在暂时还没有条件达到“三多”配置的地方，至少应有后备电池，以保证通信设备电源的稳定供给。

2. 稳定性好

各种通信设备都要求电源电压稳定，不允许超过容许的变化范围，尤其是计算机控制的通信设备。数字电路工作速度快、频带宽，对电压波动、杂音电压、瞬变电压等非常敏感。

所以，供电系统必须有很好的稳定性。

3. 效率高

能源是宝贵的，电信设备在耗费巨资完成设备投资后，在日常的费用支出中，电费是一笔比重很大的开支。尤其随着通信容量的增大，一个局的各种设备有上百、上千安培的用电量已是司空见惯，这时效率问题就显得特别突出。因此，电源设备（主要指整流电源）应有较高的转换效率，即要求电源设备的自身功耗要小。

4. 低压、大电流、多组供电电压需求

低压、大电流、多组供电电压需求增多，功率密度大幅度提升，供电方案和电源应用方案设计呈现出多样性。

5. 模块化

模块化为设备自由组合扩容、互为备用、提高安全系数提供了保障。模块化有两方面的含义：一是指功率器件的模块化，二是指电源单元的模块化。实际上，由于频率的不断提高，致使引线寄生电感、寄生电容的影响愈加严重，对器件造成更大的应力（表现为过电压、过电流毛刺）。为了提高系统的可靠性，常把相关的部分做成模块。把开关器件的驱动、保护电路也装到功率模块中去，构成“智能化”功率模块（IPM），这样既缩小了整机的体积，又方便了整机设计和制造。

多个独立的模块单元并联工作时，采用均流技术，所有模块共同分担负载电流，一旦其中某个模块失效，其他模块再平均分担负载电流。这样，不但提高了功率容量，在器件容量有限的情况下满足了大电流输出的要求，而且通过增加相对整个系统来说功率很小的冗余电源模块，极大地提高了系统可靠性。即使出现单模块故障，也不会影响系统的正常工作，而且还为修复提供了充分的时间。

现代通信要求高频开关电源采用分立式的模块结构，以便于不断扩容、分段投资，降低备份成本。它不像习惯上采用的 1+1 全备用（备份了 100% 的负载电流），而是要根据容量选择模块数 N ，配置 $N+1$ 个模块（即只备份了 $1/N$ 的负载电流）即可。

6. 实现集中监控

现代通信运行维护体制要求动力机房的维护工作通过远程监测与控制来完成。这就要求电源自身具有监控功能，并配有标准通信接口，以便与后台计算机或与远程维护中心通过传输网络进行通信、数据交换，从而实现集中监控，提高维护的及时性，减小维护工作量和人力投入，提高维护工作的效率。

7. 自动化、智能化

现代通信设备要求电源能进行电池自动管理、故障自诊断、故障自动报警等，自备发电机应能自动开启和自动关闭。

8. 小型化

现在各种通信设备的日益集成化、小型化，要求电源设备也相应地小型化，作为后备电源的蓄电池也应向免维护、全密封、小型化方面发展，以便将电源、蓄电池随小型通信设备布置在同一个机房，而不需要专门的电池室。

9. 采用新的供电方式

对应于电源小型化，供电方式应尽可能实行各机房分散供电，设备特别集中时才采用电力室集中供电，大型的高层通信大楼可采用分层供电（即分层集中供电）。集中供电和分散供电各有优点，因条件不同应斟酌选用。

对于集中供电，电力室的配置包括交流配电设备、整流器、直流配电设备、蓄电池。各机房从电力室直接获得直流电压和其他设备、仪表所需的交流电压。这种配置有它的优点，如集中电源于一室，便于专人管理，蓄电池不会污染机房等。但它有个致命的缺点，传输损耗大，线缆投资大浪费电能。因为直流配电后的大容量直流电流由电力室传输到各机房，传输线的微小电阻也会造成很大的压降和功率损耗。

对于分散供电，电力室成为单纯交流配电的部分，而将整流器、直流配电和蓄电池组分散装于各机房内。这样，将整流器、直流配电、电池化整为零，使它们能够小型化，相对减小容量。但有个先决条件，蓄电池必须是全密封型的，以免腐蚀性物质挥发而污染环境、损坏设备（现行的全密封型的电池已经能达到要求了）。

分散供电最大的优点是节能，因为从配电电力室到机房的传输线上，以前传输的大直流电流转变为 380 V 的交流。计算表明，在传输相同功率的情况下，380 V 交流电流要比 48 V 的直流电流小得多，因传输线上的压降造成的功率损耗只有集中供电的 $1/49 \sim 1/64$ 。

1.1.2 现代通信电源技术的应用比较

随着半导体工艺技术的不断升级，电路板上的元器件运行速度越来越快、体积越来越小，设备要求也越来越多，如更低的供电电压和更大的供电电流。最终系统的功能不断增加，而平均售价却不断下降。此外，用户对电源的故障修复时间、电源运行状态的感知与控制的要求越来越高，电源设计人员不再满足于实时监控电流、电压、温度，还提出了诊断电源供应情况、灵活设定每个输出电压参数的需求。这些需求对于目前的模拟解决方案已难以满足。因此，作为电源管理发展新思路的数字电源应运而生，其目标就是将电源转换与电源管理架构用数字方法集成到单芯片中，实现智能、高效的转换、控制和通信。

1. 数字电源的定义

数字电源是采用数字方式实现电源的控制、保护回路与通信接口的新型电源技术。可编程、响应性好和数字环路控制是数字电源的 3 个主要特征。数字电源有几种不同的定义，实现方式也各不相同。

第一种定义是数字检测，包括监视开关电源的状态，如温度、输入/输出电流、输入/输出电压、开关频率（占空比）等，并根据需求向主机报告。故障状态信息、时间标记等信息可存储在非易失性存储器中，并在将来某个时间上报这些信息。

第二种定义是在数字检测的基础上通过数字接口控制开关电源，一般是通过 I²C 或类似的数字总线控制输出电压、开关频率、多通道电源的（上/下电）排序、上升斜率、跟踪、（软）启动、裕度控制、故障保护等。实际上，目前市场上很多电源管理集成电路都以这种方式工作。

第三种定义是用数字电路彻底取代开关电源中的所有模拟电路，这是真正的原生数字电源。只需编写几行简单的代码，一个核心数字电源集成电路就可以配置成升压稳压器、降压稳压器及负输出、SEPIC、反激式或正激式转换器。它将使开关电源更容易设计、配置，而且更稳定。但要实现这点从目前看来是相当困难的，因为从物理定律上来说，电流是模拟信号，即使数字开关电源用 ADC（模数转换器）和 DSP（数字信号处理器）取代误差放大器和脉冲宽度调制器，但它仍然需要电压基准、电流检测电路和 FET（场效应管）驱动器，这些组件目前只有模拟形式的产品。此外，电感器、变压器以及电容器等模拟元器件在实现数字电源时也是不可缺少的。

传统的模拟电源是以模拟控制环路为基础的，如果在模拟控制环路外添加模拟量采样和量化电路，并辅以通信电路，即可构成上面第一种定义中所指的带数字检测的比较初级的数字电源。

目前的数字电源大都是按照上面第二种定义（即数字控制+数字检测）实现的，电源内部的模拟控制环路由数字控制环路替代。未来是属于数字电源的，但数字化是个渐进的过程，其发展很可能由使用模拟和数字技术的混合系统开始，进而演进到全数字实现。以前，数字化是以采用高成本的复杂多芯片电路方案为代价的。例如，一个具有电压、电流监视及控制能力的应用可能需要很多集成电路，如高稳定度基准源、高精度多通道 ADC（模数转换器），DAC（数模转换器）和专用微控制器等，此外还需要不小的软件开发工作量。如果再考虑成本、复杂性、线路板空间限制和严苛的产品上市时间要求，以数字方式管理电源的确需要付出不菲的代价。

随着电源系统性能和功率的不断提高，实现电源性能指标所必需的元件数量和成本也随之增加，越来越多的控制需要通过具有成本效益的数字电路实现。一般认为，在设计 DC-DC 变换器时，通常 100 W 以上的系统中会采用数字控制技术；而在设计 AC-DC 变换器时，250 W 以上的系统会采用数字技术，这样电源的经济性会更高一些。因此，在未来的电源系统中，模拟与数字技术将共存相当长的一段时间。以前，电源行业转向开关电源是一个很大的变化，而电源数字化趋势将会是一个更大的变化。

2. 模拟电源的优势与不足

目前，除了一些专门用于微处理器的转换器外，市场上大多数砖形转换器、中间总线转换器及负载点（PoL）转换器仍采用模拟控制。这是因为许多模拟电源系统经过了多年的检验，可靠性还是很高的。

当前，尽管模拟电源解决方案的成本、性能（如负载变化时的电源响应时间）、占板面积等指标都优于数字电源解决方案，但对开发人员来说，它完全是一种固定模式的黑盒应用，

抑制了开发人员创造力的发挥，使得开发人员对电源进行同步跟踪、电压排序、故障诊断及适应环境变化的能力还是比较差的。

许多高性能的 DC—DC 转换器仍通过简单的无源器件产生的模拟信号进行设置和控制。即使是具有最先进拓扑结构的高性能转换器，也还需要使用外部电阻、电容来确定诸如启动时间、输出点值及开关频率等参数。这些电阻、电容的值都是设计调试时确定的，制造完成后不可轻易更改。因此，自适应的电源管理方案还不可能实现。而且，为实现更多功能，就要设计更多的直接反馈电路，所以模拟控制环路会变得非常复杂。

传统的模拟控制架构已经使用多年，模拟控制电路因为使用许多元器件而需要很大空间，这些元器件本身的值还会随使用时间、温度和其他环境条件的变化而变动，从而对系统稳定性和响应能力造成负面影响。模拟控制的控制-响应特性是由分立元器件的值决定的，它总是面向一个范围狭窄的特定负载，因此无法为所有电压值或负载点提供最优化的控制响应。换句话说，如果需要一个可以在很多产品中重复使用而不必更换部件的设计平台，模拟方案难以胜任。除此之外，模拟系统的测试和维修都非常困难。

3. 数字电源的应用优势比较

数字电源正是为了克服现代电源的复杂性而提出的，它实现了数字和模拟技术的融合，提供了很强的适应性与灵活性，具备直接监视、处理并适应系统条件的能力，能够满足几乎任何电源要求。数字电源还可通过远程诊断确保持续的系统可靠性，实现故障管理、过电压（流）保护自动冗余等功能。由于数字电源的集成度很高，系统的复杂性并不随功能的增加而过多增加，外围器件很少（数字电源的快速响应能力还可以降低对输出滤波电容的要求），减小了占板面积，简化了设计制造流程。同时，数字电源的自动诊断、调节的能力使调试和维护工作变得轻松。

数字电源管理芯片易于在多相及同步信号下进行多相式并联应用，可扩展性与重复性好，能轻松实现负载均流，减少 EMI（电磁干扰），并简化滤波电路设计。数字控制能把电源灵活地组合成串联或并联模型，形成虚拟电源。而且，数字电源的智能化可保证在各种输入电压和负载上都具有最优的功率转换效率。

相对模拟控制技术，数字技术的独特优势还包括在线可编程能力、更先进的控制算法、更好的效率优化、更高的操作精确度和可靠性、优秀的系统管理和互联功能。数字电源不存在模拟电源中常见的误差、老化（包括模拟器件的精度）、温度影响、漂移、补偿等问题，无须调谐、可靠性好，可以获得一致、稳定的控制参数。数字电源的运算特性使它更易于实现非线性控制（可改善电源的瞬态响应能力）和多环路控制等高级控制算法，更新固件即可实现新的拓扑结构和控制算法，更改电源参数也无须变更板卡上的元器件。

数字控制还能使硬件平台重复使用，通过设计不同固件即可满足各种最终系统的独特要求，从而加快产品上市，降低开发成本以及元器件库存与风险。

数字电源已经表现出相当多的优点，但仍有一些缺点需要克服。例如，模拟控制对信号状态的反应是瞬时的，而数字电源需要一个采样、量化和处理的过程来对负载的变化做出反馈，因此它对负载变化的响应速度目前还比不上模拟电源。数字电源的占板面积要大于模拟电源，精度和效率也比模拟电源稍差。虽然数字控制方法的优点在负载点（PoL）系统中非

常明显,但模拟电源在分辨率、带宽、与功率元件的电压兼容性、功耗、开关频率和成本(在简单应用中)等方面仍然占有优势。不过,如果考虑到数字电源解决方案具有的优点,使用模拟电路搭建功能相似的电路,成本并不一定就比数字电源低。

数字电源中包含的技术无疑是复杂的,但它的使用并不一定复杂。它要求设计人员具有一定的程序设计能力,而目前的电源设计人员普遍都是以模拟设计为主,缺乏编程方面的训练,这对数字电源的推广也造成了一定的障碍。

人们对数字电源还有一个担心,就是它还不像模拟电源那样经过了多年应用的考验,因而可靠性不高。但就像数字电路在概念上优于模拟电路一样,可靠性是设计的问题,而不是数字化的问题。成本显然也是约束数字电源广泛应用的一个主要因素。由于数字实现方式的成本看似高于相似的模拟实现方式,而且人们对于数字电源产品的使用存在顾虑,从用户的角度来说,只有当数字电源的成本等于或低于模拟电源(因为成本是市场考虑的第一因素),同时又能提供模拟电源无法实现的先进功能的时候,数字电源才会被考虑。

综上所述,在简单易用、参数变更不多的应用场合,模拟电源产品更具优势,因为其应用的针对性可以通过硬件固化来实现。而在可控因素较多、需要更快的实时反应速度以及管理多个电源的复杂系统应用中,数字电源则具有优势。

4. 数字电源的发展

最近出现的数字电源产品的集成度和易用性已经达到一个更高的高度。包括传统的模拟电源厂商和新兴的数字电源芯片设计厂商在内的大部分厂商都在着手解决电源转换以外的问题,包括添加监测功能、提供可与系统通信的数字接口,以及建立数字控制反馈环路,即在模拟变换器外面使用“数字外壳”。常见的方案有两种,即单芯片控制器方案和通过高性能数字芯片对电源实现直接控制的方案。

1) 单芯片控制器方案

通过外接 A/D 转换芯片进行取样,取样后对得到的数据进行运算处理,再把结果通过 D/A 转换后传送到 PWM(脉冲宽度调制)芯片,从而实现单芯片控制器对开关电源的控制。这种方案的技术目前已经比较成熟,设计方法容易掌握,而且对单芯片控制器的要求不高,成本比较低。但是整套电路采用多个芯片,电路比较复杂;而且经过 A/D 和 D/A 转换等步骤,会造成比较大的信号延迟,进而影响电源的动态性能和稳压精度。有些单芯片控制器整合了 PWM 输出,但一般单芯片控制器的运行频率有限,无法产生足够高的频率和精度的 PWM 输出信号。

2) 通过高性能数字芯片对电源实现直接控制

通过数字芯片(如 DSP 或 MCU)完成信号采样、处理和 PWM 输出等工作。由于数字 PWM 输出的信号功率不足以驱动开关管,一般还需增加一个驱动芯片,即数字控制器与功率级之间的接口由 MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管)驱动器提供。由于这些数字芯片有较高的取样速度(DSP 片内的 A/D 转换器完成一次 A/D 转换只需数百纳秒,相较之下,一般 8 位 MCU 控制器要数微秒之久)和指令周期,输出的 PWM 信号的分辨率仅数百皮秒,过流检测和关闭电源仅需数十纳秒,可以快速有效地实现各种复杂的控制算法,使设计具备较高的动态性能和稳压精度。此外,在微处理器的支持下添加 RS-232/RS-485、DSP、以太网

等扩展通信手段也非常方便。数字控制的电源产品能够实现大部分数字电源的功能需求，但如果不添加一些额外部件，还实现不了全部功能需求。

这种“数字外壳”的架构存在以下问题：为了保证电源有较高的稳压精度，A/D转换器必须有较高精度的取样，但高精度的取样频率需要更长的A/D转换时间，造成回路的实时反应能力变差。而且，高速的采样和运算将产生巨大的运算量，能达到实时要求的核心处理器还是很少的。虽然在要求比较高的场合一般都会用DSP芯片，其运算和取样速度快，功能强大，但DSP芯片结构复杂，成本比较高，而且DSP控制技术较难掌握，对设计者要求比较高。通用DSP芯片不是专门作为电源控制芯片使用的，一般的电源应用对通用DSP芯片资源的利用率不高。不过，目前以DSP为主要处理单元的数字电源芯片厂商，都在优化其作为数字电源核心的DSP的结构，同时努力降低成本，并改善开发手段（提供评估板、IP模块等），以帮助开发人员轻松地完成开发。除了DSP的方案，有的厂商还提供基于MCU或状态机的方案，MCU控制功能强大，而状态机的优点是低功耗。鉴于DSP和MCU两种方案各有长处，现在有的厂商开始将硬件DSP和辅助MCU同时集成到芯片中，使系统性能最优，效率已经可以与模拟电源相媲美。

软件设计对数字电源设计人员而言是另一个挑战。为降低数字电源的设计门槛，很多半导体厂商推出了不需要进行软件编程或者支持图形用户接口（GUI）的数字电源解决方案，设计人员通过GUI界面就能设定电源特性参数，而不需要任何编程技能。此外，还可根据具体系统的情况，设定每个输出电压的跟踪、升压时间和延时等。有的数字电源管理芯片允许设计人员通过芯片引脚配置电源特性参数。许多数字电源芯片允许在系统运行中通过电源管理总线来实时更改电源输出特性。系统控制算法的设计通常是在专用的集成开发环境（IDE）中进行。

目前，数字电源芯片的集成度已经达到较高的水平，适合复杂系统（如服务器、通信设备等）使用。芯片中一般集成了数个同步控制器和自适应驱动器，有的还集成了MOSFET或功率驱动模块、LDO、电荷泵及电源管理（包括热管理）模块，提供可编程中断输出、看门狗等其他功能。

先进的半导体制造工艺在数字电源芯片上也得以利用，其中数字电路应用0.18~0.25 μm VLSI（超大规模集成电路）工艺，而模/数混合电路应用高压BiCMOS工艺也比较常见。有的厂商借鉴大功率芯片的成功设计，在数字电源芯片上采用先进的封装技术，使芯片可以在工业级的温度范围内可靠工作。

毫无疑问，随着数字控制技术的发展和市场需求的驱动，电源领域里数字电源的技术优势将会越来越明显。由于从模拟电源到数字电源的完全转换还需要很长时间，因此模拟和数字控制技术将在未来较长时间内共存。数字电源技术为电源设计领域注入了新的活力，同时也对电源设计人员提出了更高的要求。如何在传统技术的基础上不断创新，进而设计出满足未来市场需求的电源系统将成为电源设计人员必须面对的新课题。