用于空分装置的整体齿轮式压缩机技术创新

Lukas Biyikli，产品线研发经理

西门子能源整体齿轮式、CO_2 与热泵压缩机

多年来，整体齿轮式压缩机（IGC）一直是空分工厂适用的首选压缩机型，主要由于机器的高效率，使分离氧气、氮气和惰性气体的成本更低。社会对去碳化的日益关注，对整体齿轮式压缩机提出了新的要求，尤其是在压缩效率和负荷调节范围灵活性方面。设备投资仍然是空分设备投资者考虑的一大重要因素，尤其是在中小型应用中。

在过去的几年中，西门子能源启动了多项研发项目，旨在增强整体齿轮式压缩机的能力，以满足空分市场不断变化的需求。本文重点介绍了我们针对压缩机产品所做的一些具体设计改进，并探讨了这些改进如何切实地帮助客户实现降低成本和减少碳足迹的目标。



作者：Lukas Biyikli，西门子能源整体齿轮式、CO_2 与热泵压缩机产品研发经理

空分压缩机应用概览

目前大多数空分工厂都配备有两台压缩机：一台主空压机（MAC）和一台增压机（BAC）。主空压机通常用于将空气从大气压力压缩至约 6 巴压力。然后，压缩空气的一部分经过增压机进一步压缩至 60 巴。

根据动力源的不同，压缩机通常由汽轮机或电机驱动。当采用汽轮机驱动时，两台压缩机由同一台汽轮机通过双轴端驱动。在常规布置中，汽轮机与增压机之间安装有中间齿轮（图 1）。

在电机和汽轮机驱动的应用中，压缩机效率是实现脱碳目标的有力杠杆，因为它直接影响整体机组的能耗。对于由汽轮机驱动的整体齿轮式压缩机而言，这一点尤为重要，因为产生蒸汽的大部分热能来源于化石燃料燃烧的锅炉。

相对于汽轮机驱动，电机驱动提供了更可持续的替代方案，但通常更加需要压缩机具有负荷调节灵活性。如今，许多建设中的现代空分工厂都与可再生能源高占有率的外部电网相连。例如，澳大利亚正在规划建设多座绿色合成氨厂，使用空分装置（ASU）生产用于氨合成的氮气，计划将从附近的风能和太阳能开发项目中获取电力。在这些工厂中，压缩机负荷调节灵活性对于补偿风光发电的波动性至关重要。

设计面向未来的整体齿轮式压缩机

西门子能源于 1948 年开发出了第一台整体齿轮式压缩机（当年命名为 VK）。如今，西门子能源在全球已有 2,300 多台的业绩，其中许多用于流量超过 400,000 m^3/小时的空分装置中。

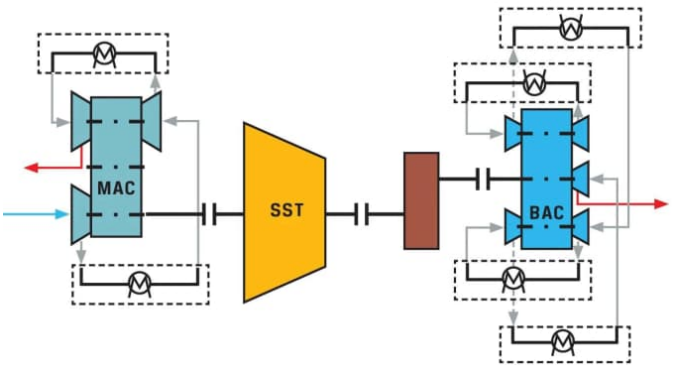


图 1 空分工厂中的汽轮机组（双轴端）布置

我们的现代整体齿轮式压缩机产品单机可处理流量高达 120 万 m^3/小时。其中包括无齿轮悬臂式压缩机型，单级压力比可达 2.5 或更高，串联设计的压比可达 6。

为了满足压缩效率、负荷调节灵活性和资金投入方面不断增长的需求，我们近年来针对整体齿轮式压缩机产品进行了一些显著的设计改进，如下所述。

高速/高效叶轮

通过改变叶片型线，提高叶轮家族的多变效率（通常用于主空压机第一级）。采用这种新型叶轮，与传统 LS 型扩压器配合，多变效率可达 89%，而与新一代混合型扩压器配合，效率超过 90%。

此外，新型叶轮的马赫数高于 1.3，可使压缩机第一级实现更高的功率密度和压比。这种新型叶轮还可以降低三级空压机应用中需要通过齿轮来传递的功率，这样就可以在直驱第一级时使用更小直径的大齿轮和齿轮箱。

新一代混合扩压器

与传统全高度叶片 LS 型扩压器相比，新一代混合扩压器的级效率最高可提高 2.5%，负荷调节能力最高可提高 3%。混合叶片（即混合使用全高度和部分高度叶片）的使用实现了性能提升。在这种结构中，部分高度叶片比传统 LS 扩压器的叶片更靠近叶轮，叶轮与扩压器之间的流量脱离会减小。叶轮与扩压器之间的相互作用会损伤叶片，将全高度叶片的前缘与叶轮的间距设计得相同，可以规避这种相互作用，就像传统的 LS 扩压器一样。

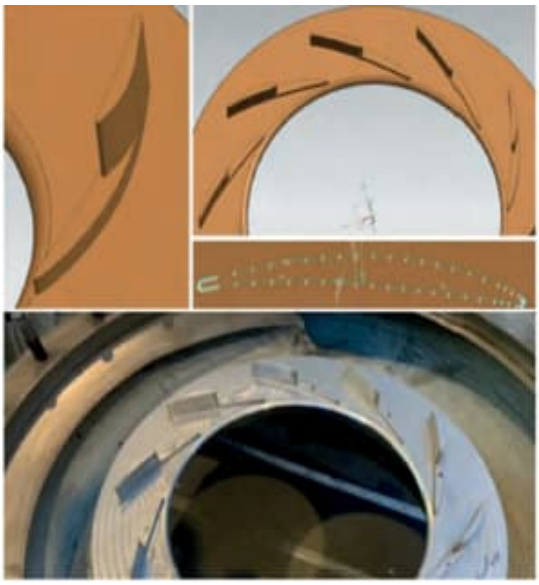


图 2 混合扩压器

部分高度叶片更靠近叶轮也有助于改善这个区域靠近喘振区的导流。由于全高度叶片的前缘仍与传统 LS 扩压器的直径相同，堵塞线不受影响，可以带来更宽的应用/负荷调节范围。

湿压缩（例如，水喷淋）

水喷淋为在进气管路中喷入水滴。水滴会蒸发并从工艺气流中吸收热量，从而降低压缩级的进口温度。可以降低等熵功率的需求，将压缩效率提高超过 1%。

齿轮强化

强化小齿轮轴，增大单位面积的容许应力，可以使齿轮的面宽减小。齿轮内的机械损失可降低高达 25%，整体效率可提高 0.5%。此外，由于使用更少的大齿轮原材料，可降低 1%的核心压缩机成本。

大流量/高能头叶轮

新型叶轮流量系数（φ）可达 0.25，能头比 65 度出口角叶轮高 6%。此外，0.25 流量系数对应的实际体积流量可达 120 万 m^3/小时，通过双吸布置，单台整体齿轮式压缩机的吸入流量可达 240 万 m^3/小时。

更高的 φ 值，使得对于相同的体积流量可使用更小尺寸的叶轮，最高可带来 4%的核心压缩机成本降低。第一级的叶轮直径可减小 5%以上。

75°出口角叶轮可获得更高的能头，出口速度的周向分量更大，根据欧拉方程，可达到更高的能头。

由于蜗壳损失较高，这种叶轮的效率与高速/高效叶轮相比略有降低。但可通过采用中等尺寸的蜗壳来补偿损失。然而，即使不使用这种尺寸的蜗壳，在马赫数为 1.0 和流量系数为 0.24 的情况下，多变效率也可以达到 87%。

紧凑型蜗壳

采用较小尺寸的蜗壳，可避免在大齿轮直径减小时与其他蜗壳发生干涉。通过把电机的设计从 6 级改为更高转速的 4 极（1,000 rpm 至 1,500 rpm），可以节省电机采购成本，且不会超过最大允许的大齿轮节线速度。此外还可以降低蜗壳和大齿轮的材料成本。

总体而言，核心压缩机投资成本最高可节约 2%，同时还可节约电机成本。由于紧凑型蜗壳的效率确实有所降低，因此，是否采用紧凑型蜗壳很大程度上取决于客户的优先考虑事项（成本与效率），需要基于具体项目进行评估。

多个可调进口导叶（IGVs）

为了提高负荷调节能力，可以在多级前安装 IGV，与以往的在第一级前安装 IGV 的设计不同。

在早期的整体齿轮式压缩机运行变化时，无论流量是正预旋（IGV 角度> 0，能头降低）还是负预旋（IGV 角度< 0，能头增加），预旋系数（即第二个 IGV 的角度与第一个 IGV[1] 的角度的比值）都保持不变。当角度在正预旋和负预旋之间变化时，这种信号是有缺点的。

[1] 示例：预旋系数为 *0.7* 时，当第一个 *IGV* 角度为 *30°*时第二个 *IGV* 角度为 *21°*

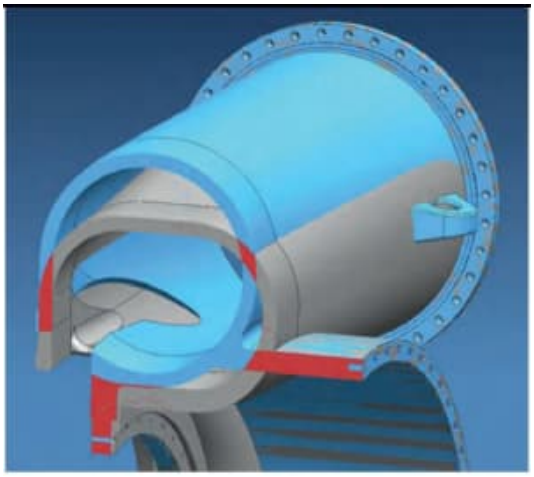


图 3

紧凑型蜗壳有助于降低材料和电机成本

新的设计可在机器在正预旋和负预旋运行下有两种不同的预旋系数，从而在恒定效率下将负荷调节能力提高 4%。

减少增压机级数，将主空压机与增压机组和到一台机器中

通过对增压机的典型应用叶轮使用 LS 扩压器，单级多变效率可提高至 89%。再结合其他效率改进措施，使得减少增压机的级数，也可保持同等水平的机组总效率。

减少级数，可节省中间冷却器、相应的工艺气体管道以及转子和定子部件，可使增压机的成本节约 10%。此外，在有些情形下还可以进一步将主空压机和增压机组合在一台机器中。

四个小齿轮轴设计

如前所述，典型的设计在汽轮机与增压机之间通常需要安装中间齿轮箱。在新设计中，通过在小齿轮轴与大齿轮之间增加一个中间轴，可将该中间齿轮集成到压缩机齿轮箱中。这样可将增压机（核心压缩机加辅助设备）成本降低 4%。

此外，在大型主空压机设计中，如果蜗壳间发生干涉或超出最大允许的大齿轮节线速度，四轴齿轮设计还可用作紧凑型蜗壳的有效替代方案，将 6 极电机改为 4 极电机。

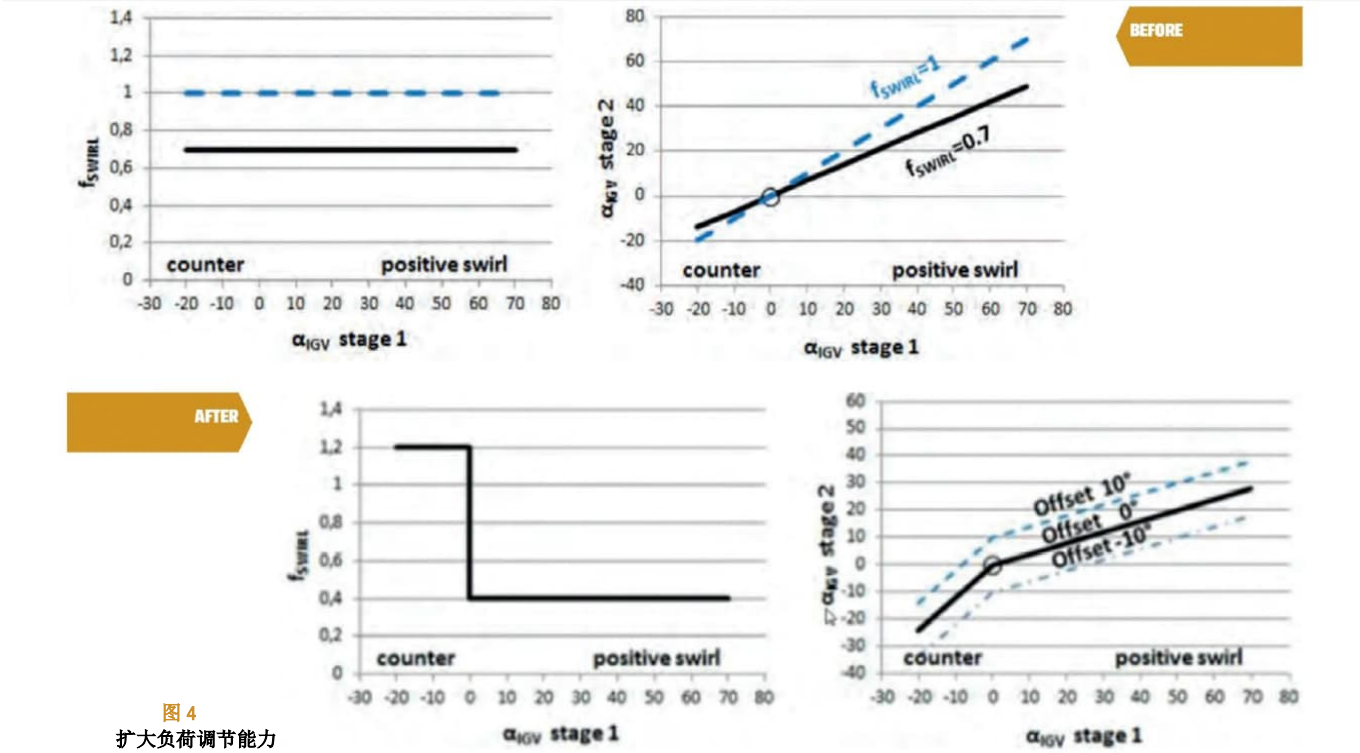


图 4

扩大负荷调节能力

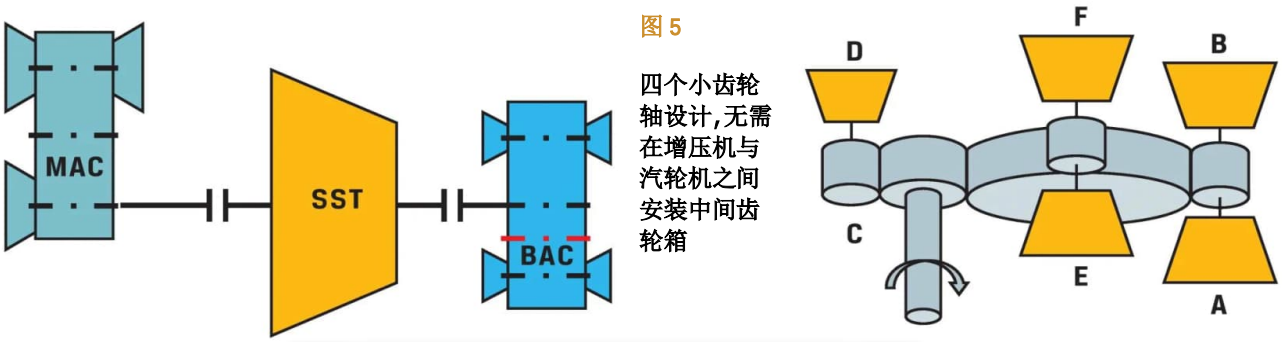


图 5

四个小齿轮轴设计，无需在增压机与汽轮机之间安装中间齿轮箱

结论

整体齿轮式压缩机在空分应用中仍然是单轴压缩机的高效可替代机型。

在对工业脱碳至关重要的几大市场领域，包括热泵和蒸汽压缩，以及在碳捕集、利用和封存（CCUS）开发项目中的 CO_2 压缩，整体齿轮式压缩机的使用也越来越普遍。

西门子能源在设计和运行整体齿轮式压缩机方面拥有丰富的经验。正如上述（及其他）研发成果所证实的那样，我们致力于压缩机产品的不断创新，支持独特的应用要求，并满足不断增长的市场需求，以降低成本、提高效率和增强可持续性。