

半开式叶轮离心压缩机气动性能优化设计研究

宋亮

(沈阳鼓风机集团股份有限公司 辽宁 沈阳 110000)

摘要：离心压缩机作为通用型机械设备，在众多领域都有着广泛的应用，其中石油化工、冶金、航空航天等领域比较多见。经济的发展和工业水平的提升，对离心压缩机应用有了更高的要求，因此需要对现有的离心压缩机进行优化设计，以满足节约能源的可持续发展要求。基于此，本文从节能的角度出发，对某半开式叶轮进行研究，以原始样机的不足为基础，采用 CFD 分析的研究方法，对原始叶轮的设计进行优化，以期提高叶轮的运行效率。

关键词：半开式叶轮；离心压缩机；气动性能；优化设计

0 引言

压缩机是一种通用性机械产品，它是对旋转的叶片进行利用，对工质做功以提升工质压力。压缩机的种类比较繁多，本文主要对离心压缩机进行研究。作为通用性设备，其最大的一个特点就是具备旋转式的叶片结构，叶片与工质之间的相互作用可以将流动动能转化为工质压力。离心式压缩机在很多方面都拥有较大的优势，让其在各个领域发挥出了重要的应用价值，尤其是在化工、冶金、电力等工业行业中。

1 半开式叶轮数值模拟与流场分析

1.1 叶轮数值模拟

原始的叶轮几何结构可以根据提供的图纸得知，具体结构尺寸如表 1 所示。将表 1 的几何尺寸作为依据，利用相关软件实现对原始叶片的三维实体造型。利用

表 1 原始半开式叶轮几何尺寸

叶片入口 直径/mm	叶片出口 直径/mm	叶片出口 宽度/mm	叶片出口 角度/°	叶片数
D_1	D_2	b_2	β_2	Z
0.12	0.21	0.013	45	9

NUMECA 系列软件对叶轮计算模型进行全六面体的结构化网格划分，将其处理成网格划分软件可以识别的格式文件，并对网格的质量给予保证。完成网格划分之后，需要将网格导入到 FINETURBO 软件中进行计算，在对具体的条件进行设置时，需要以实际运行情况为依据。以本次研究的离心压缩机为例，可以选 AIR (Perfect) 为工质，完成 CFD 数值的模拟。

1.2 叶轮流场分析

对叶轮流场进行详细分析可以发现，大量存在的回

流涡是对叶轮运行效率造成影响的最主要原因，尤其是靠近叶片入口的位置，流场会对叶片产生较大的冲击，从而导致该位置的压力负荷出现急剧增加的现象，容易给流动造成一定的损失。

此外，对相对速度的流动方向进行观察可以看出，叶顶间隙靠近叶片半弦长区域以及靠近流道出口的位置，都有回流涡占据大量的面积，两涡的交互影响会给叶轮顶部区域的流场带来严重的紊乱性问题，从而造成较大的流动损失。对于回流涡而言，叶片半弦长附近所占的面积越大该位置的叶轮内流动损失会越高。对叶片前缘的相对速度分布进行放大观察可以看出，压力面和吸力面附近回流涡的发展也呈现出增大的趋势，此处回流涡的出现会直接影响到叶轮转动，进而影响到运行的效率。

总体而言，回流涡会给叶轮的正常运行带来极大的影响，同时也影响到整体的运行效率。同时，不均匀的流场容易给叶片增加额外的拒力载荷，对叶轮的寿命造成不利影响，因此需要从流场因素出发对叶轮的性能进行优化，避免对离心压缩机的运行效率带来不良影响。

2 半开式叶轮叶片的优化设计

对半开式叶轮进行一定 CFD 数值模拟分析之后可以发现，回流涡的存在是影响叶轮运行效率的主要因素，它会对叶轮内部压力的提升幅度产生较大影响，因此需要对叶轮叶片进行优化设计，通过改善流场流动性的方式，促进叶轮运行效率的提升。

2.1 叶型的优化设计

以样机的半开式叶轮叶片前缘形状为例可知，其为圆形圆弧的形态。采用该种设计的原因在于这种叶型能够让靠近叶片前缘的压力和吸力面附近流场发生回流的可能性增大，对叶轮整体性能的实现具有一定的促进作用。在对样机的叶型进行优化设计时，可以将圆形圆弧

改进为椭圆形圆弧，此种叶型能够减少流动对叶片前缘所产生的冲击，发挥出改善流场流动状况的作用，对提升叶轮的运行效率具有重要的促进作用。

另外，原始叶轮靠近叶片面的位置比较容易出现回流现象，因此可以对叶片扭曲形式及厚度进行改进，一般是以叶片最小厚度为基础，对叶片的厚度作缩减处理。对于离心压缩机的叶轮设计而言，叶片的负载问题也是需要重点考虑的内容，0 ~ 0.7 是比较适合的范围，负载越小越好，过高会对叶轮寿命产生不良影响。

2.2 新叶轮流场分析

以原始的半开式叶轮结构与数据作为主要的依据，对其实施改进操作可以得到新型叶轮的具体参数。本次研究为保证新型叶轮与其他结构的适配度，将叶顶间隙值控制在 0.6mm 不变的情况下，对新型流场进行 CFD 数值模拟分析，其中的具体参数与原始样机相同。计算结果显示，新型叶轮的多变效率高于原始叶轮的 2.04%，这可以明显表明，新型叶轮的设计具有合理性，在提升叶轮运行效率方面发挥出了重要的作用。

新叶轮被设计在靠近叶顶位置处，因流动所产生的冲击相较于原始叶轮已经明显减弱。此外，经过改进的叶轮在靠近出口处的回流，也在面积和范围上表现出了一定的减少，回流涡的强度也随之出现了下降。从整个流面的角度而言，经过改进的叶轮在相对速度上呈现出了更为均匀的分布，使得流动的稳定性得到一定的强化，对叶轮整体运行效率的提升具有重要意义。

3 半开式叶轮背盘结构改型设计

对原始的半开式叶轮叶片型进行优化设计之后，能够让叶轮的运行效率得以提升。但是，将其与工程实际中的叶轮设计进行比较可以发现，其竞争力还是不够强大，有着较为明显的劣势，因此需要对其进行进一步的优化。以近些年的经验来看，原始的半开式叶轮叶顶间隙值为 0.6mm，该间隙值实际较大，容易对叶轮运行效率的进一步提升产生限制。由此，将主要从叶轮背盘型式的改进入手，以实现叶轮运行效率的进一步提升。

3.1 原始叶轮背盘结构分析

原始叶轮背盘结构也被称为“导力锥”结构，在减少叶轮质量和降低应力方面都可以发挥出重要的作用，是较为常见的一种结构设计形式。由于该结构存在相应的缺陷性问题，因此背盘结构的优化设计成为本次研究的重要内容，重点在叶轮变形量的减少和叶轮效率的提升两个方面。

3.2 新型叶轮背盘结构分析

以原始叶轮背盘结构为基础，对叶轮的应力和应变进行分析和计算可以发现，振动变形量较大是对叶轮运行效率产生影响的关键性因素。对原始叶轮背盘结构进

行观察可以发现，该结构设计在平衡性方面存在着一定的问题，易导致叶轮出现沿径向方向厚度逐渐减小的现象，同时还会伴有重量减轻的现象，直接影响到运行中的变形量。在离心压缩机运行的过程中，入口流动的不均匀性也会产生加大叶轮变形效应的问题，基于上述因素，本次研究得出了四种叶轮背盘结构的设计方案计算结果，如表 2 所示。

表 2 四种设计方案中叶轮应力与变形数据对比

方案	应力 /MPa	径向变形 /mm	轴向变形 /mm
方案一	0.0635 ~ 783.98	0 ~ 0.13225	-0.012992 ~ 0.23434
方案二	0.059645 ~ 836.22	0 ~ 0.14213	-0.014223 ~ 0.2163
方案三	0.061787 ~ 736.45	0 ~ 0.14054	-0.013691 ~ 0.20547
方案四	0.058126 ~ 774.01	0 ~ 0.14058	-0.013672 ~ 0.20489

从表 2 所列的四种方案计算结果可知，综合考量应力、应变等因素可以确定方案三为最优方案，符合叶轮背盘结构改进设计的主要原则，且该设计可以最大程度地减少叶轮振动变形量，为叶顶间隙值的精准控制提供一定的数值依据。

3.3 原始背盘结构与新型背盘结构的对比分析

对新型叶轮背盘结构设计进行对比可以发现，新型背盘结构叶轮的最大应力与原始设计没有较大差别，都符合叶轮材料所要求的强度，但是新型背盘结构的整体应力区域有一定的减少，在减少叶轮疲劳性方面具有一定的优势。另外，新型背盘结构叶轮径向和轴向变形量都比原始设计小，尤其是在轴向变形量上有着较大的变化幅度，比原始背盘结构叶轮小了近 1/2，可以延长叶轮的使用寿命，具有更高的经济性。

3.4 新型叶轮叶顶间隙设计

要对新型叶轮叶顶间隙设计值进行优化，需要将新型叶轮叶片靠近叶顶间隙处在径向和轴向上的变形量位置和大小作为主要关注点。对于新型背盘结构叶轮而言，径向接近最小变形量处在叶片前缘，而轴向接近最小变形量处叶片半弦长。

对两种背盘结构叶轮叶片的变形量位置和大小进行综合考量和分析之后，需将其与实际的生产加工情况结合在一起，对可能出现的数值误差问题进行关注，以最新的工程经验数据为依据来开展相关的设计工作。在对叶顶间隙值进行设计时，需要给予一定的安全余量，将叶轮叶片的入口径向与叶片的出口轴向作为依据，考虑其与叶顶间隙值的关系，同时还要关注新型背盘结构叶轮叶片靠近叶顶间隙处的轴向变形量，要与最大变形量保持接近的状态。

3.5 新型叶轮流场分析

最终的新型叶轮在叶顶间隙中的回流涡大小和强度都出现了一定的降低，相较于原始样机和第一次优化改

进的叶轮, 大部分的回流涡都只在叶顶间隙位置存在, 很大程度上减少了对主流道区域流场的不利影响。即便是叶顶间隙处的回流涡也有了极大的减弱, 整体的流动都变得更加均匀, 对叶轮运行效率的提升具有促进作用。

叶片表面的静压力分布情况是衡量叶片气动性能的重要参数之一。对原始开式叶轮各叶片表面静压载荷分

布进行分析可以得出, 它主要处在负压状态当中, 从叶根至叶顶, 其静压力载荷分布会逐渐呈现出紊乱的状态。对第一次改进的叶轮叶片表面的静压力载荷分布图(图 1)进行观察可以发现, 虽然没有出现负压的状态, 但是表现为越靠近叶根部位越接近负压的状态, 也会在很大程度上影响到气动性能, 同时也容易造成叶轮效率降低的问题。

对最终改进的新型叶轮(图 2)进行观察发现, 从根部至叶顶处, 叶片前缘静压载荷分布的跃升幅度保持在较为一致的状态当中, 表明流动具有一定的稳定性。总体而言, 最终的叶轮改进在静压力载荷方面的变化呈现出较为均匀的表现, 对改善叶轮运行性能具有重要意义, 是提高叶轮运行效率的重要改进。

4 结语

综上所述, 在社会经济快速发展的影响下, 各个行业对能源的需求不断增加, 机械设备运行效率的提升成为能源节约的重要组成, 只有综合性能优异的机械产品才能在激烈的市场竞争中得以生存。本文将某半开式叶轮作为主要的研究对象, 对其气动性能和运行效率的问题进行了研究和分析, 并提出了相应的优化设计方案, 实现了叶轮运行性能的优化, 同时也提升了叶轮多变效率, 对叶轮机械类产品的研发和销售都具有重要意义, 取得了环保、经济和社会等多重效益。

参考文献:

- [1] 林志华, 左志涛, 等. 离心压缩机轮盘空腔的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(12): 3140-3150.
- [2] 李琳. 浅析保证离心压缩机型环与半开式叶轮间隙的方法[J]. 中国设备工程, 2021(19): 121-122.
- [3] 冯帆. 受紊乱气流作用的压缩机叶轮动力响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [4] 张青扬. 半开式叶轮离心泵叶顶间隙泄漏流流动规律及其泵性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020. 23-25.
- [5] 郭正. 离心压缩机半开式叶轮小流量工况下气动载荷特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

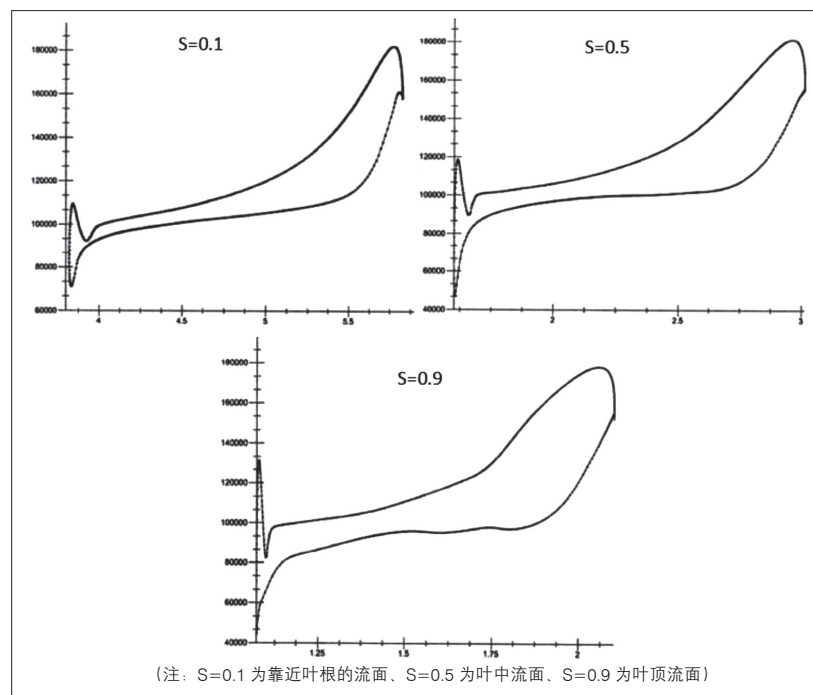


图 1 第一次改进叶轮叶片表面静压力载荷分布图

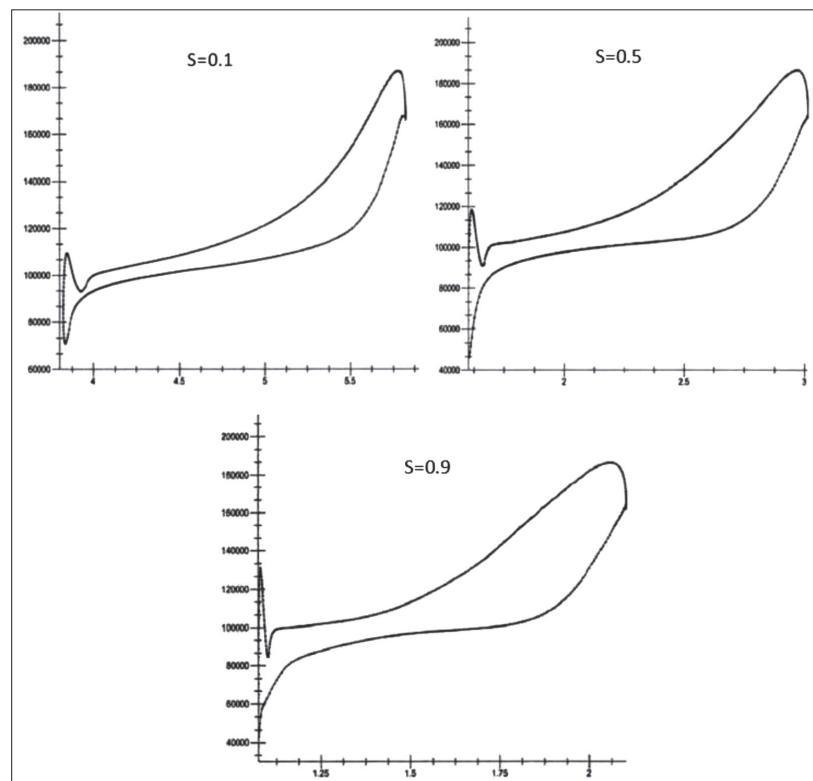


图 2 最终型叶轮叶片表面静压力载荷分布图