

泵空化性能分析及优化设计

PTA 装置用 G-410A/B 泵空化性能分析及优化设计——PTA 装置是国内生产精对苯二甲酸最常用的装置之一，在其运行过程中关键设备 G-410A/B 泵频繁出现故障现象。本文以 G-410A/B 泵为研究对象，采用数值模拟和现场测试的方法对其内部流场进行了分析，提出了相应的改进措施。结果发现，该泵在设计工况下时，泵内部已出现少量气泡，随着流量的减小，气泡量明显增多；通过现场测试发现，该泵的振频主要体现在流体激振，在高频是出现了明显的波动，表现出明显的汽蚀现象；经过优化后的新泵，无论是内部流场，还是外特性均均能满足设计要求，汽蚀性能得到了明显改善。研究成果能够为类似泵高频振动分析提供参考。

文 / 陈海恩 杨巍 李岚翔

精对苯二甲酸（PTA）是合成聚酯的重要原料，主要是以对二甲苯(PX)为原料，醋酸为溶剂，在高温、高压下氧化生成的，广泛应用于日常生活中，是合成纤维的最主要的品种之一，占全球合成纤维总量的80%。近年来随着人民生活水平的不断提高，对精对苯二甲酸的需求量不断增大，这也给我国 PTA 装置提出了更高的要求。G-410A/B 进料加压泵是 PTA 装置提供进料、加压的关键动设备，其安全稳定运行对精对苯二甲酸的生产起到了基础保障作用，由某外资品牌商提供，该泵自安装运行以来一直存在高频振动，期间多次出现轴裂或断、叶轮开裂

等故障。深入研究发现，叶轮叶片设计不合理造成了在高速运转时，流体介质发生了空化，空化改变了主流的流体流动，诱发高频振动，长时间在这种环境下运行时，出现了空蚀加剧流体扰动，是造成上述故障的主要原因。基

于此，本文以某石化 PTA 装置中 G-410A/B 进料加压泵为研究对象，借助计算流体力学（CFD）数值模拟和现场试验测试技术对现有泵空化性能进行分析，找出空化产生的主要原因，提出相应的性能优化措施，为我国同类泵型国

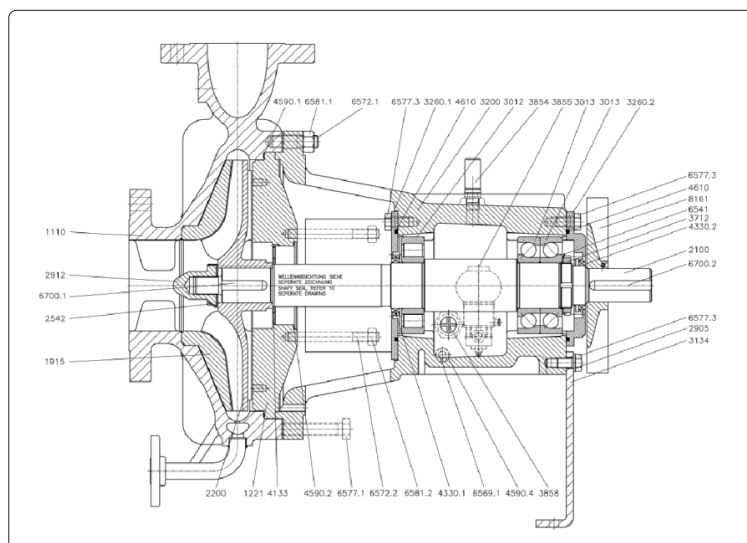


图 1 原泵 (FLOWERVE) 结构示意图

作者陈海恩供职于江苏虹港石化有限公司，杨巍、李岚翔供职于合肥华升泵阀股份有限公司。

PROCESS-Tip

× 更多信息请扫描二维码：



chem.vogel.com.cn

× 反馈编码：A200541

产化改造提供参考和依据。

问题描述

某石化 PTA 装置中 G-410A/B 进料加压泵的主要参数如下: 设计流量 $Q=690\text{ m}^3/\text{h}$, 正常流量 $Q=592\text{ m}^3/\text{h}$, 设计扬程 $H=98\text{ m}$, 转速 $n=1\,480\text{ r/min}$, 汽蚀余量 $\text{NPSHr}=3.3\text{ m}$, 叶轮外径 D_2 为 585 mm , 其外形结构示意图如图 1 所示。运行介质为未经处理的 TA 泥浆 (Untreated TA Slurry), 密度为 $\rho=1\,085\text{ kg/m}^3$, 介质最大温度为 $t_{\text{max}}=128\text{ }^\circ\text{C}$ 。

故障描述

数值模拟

PTA 装置中 G-410A/B 进料加压泵自 2015 年投入运行以来, 一直存在高振动而引起多次故障, 主

要体现在叶轮与耐磨盘接触、轴裂或断何叶轮开裂。深入研究发现, 该泵常温水工况运行振动正常, 当泵在工艺介质和工艺流量运行时, 泵的整体振动大幅升高。

通过上述分析发现, 泵的设计流量点为 $Q=690\text{ m}^3/\text{h}$, 而泵的实际运行流量为 $0.858Q$ ($592\text{ m}^3/\text{h}$), 该泵在小流量工况下运行。由泵基础理论可以知道, 当泵在小流量工况下运行时易发生汽蚀现象, 泵汽蚀余量计算公式如下:

$$\text{NPSH}_t = \frac{v_1^2}{2g} + \lambda \frac{w_1^2}{2g} \quad (1)$$

式中, v_1 为叶轮进口绝对速度, m/s ; w_1 为叶轮进口相对速度, m/s ; 式中的 λ 对进口流态较为敏感 ($\lambda=0.15\sim0.4$), 当液流冲角发生变化时, λ 取大值, 在 λ 的表达式中, w_k 为空化位置处相

对速度, m/s 。由公式 (1) 可知, NPSHr 与 v_1 和 w_1 有关, 减小 v_1 或减小 w_1 均能改善泵的汽蚀性能。由进口绝对速度

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi(D_1^2 - d_h^2)\psi_1}$$

可以看出, v_1 与轮毂直径 d_h 、叶轮进口直径 D_1 和进口排挤系数 ψ_1 有关。 d_h 和 ψ_1 值一般是不变的, 汽蚀与 D_1 有关。

为了验证理论分析的准确性, 本文借助计算流体动力学 (CFD) 技术对现场工艺条件进行数值模拟。主要采用有限体积法 (Finite volume method) 对 CG-410A/B 进料加压泵内部全流场进行计算, 流体介质的对流项采用高精度格式 (High resolution scheme), 其他函数项采用中心差分格式 (Central difference scheme)。边界条件: 进

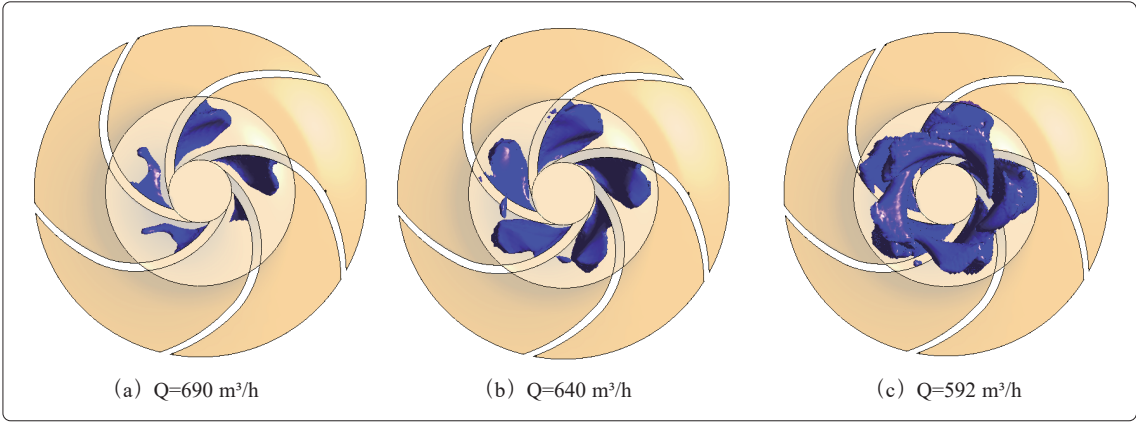


图 2 不同流量下泵的汽蚀分布图



图 3 泵的故障类型

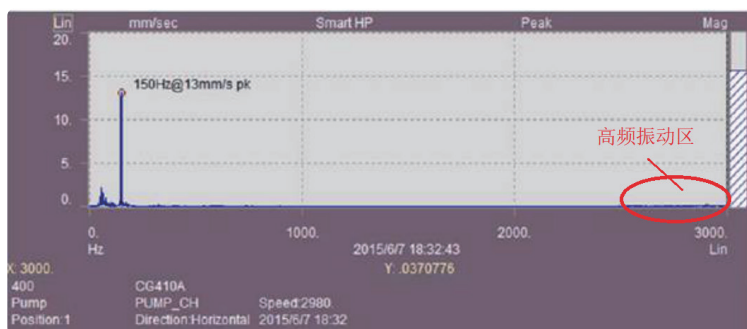


图 4 G-410A/B 泵谱图

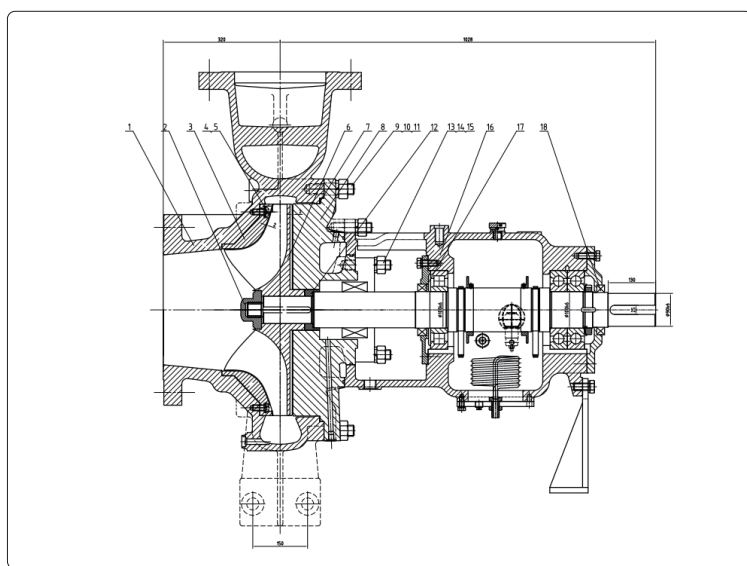


图 5 优化后的泵装备示意图

口为压力进口，通过改变进口压力获得泵的汽蚀性能；出口采用质量流量出口，改变出口流量可以得到不同工况下汽蚀性能；壁面函数采用无滑移壁面，参考压力为 0 Pa；旋转部件（叶轮）与静止部件（蜗壳）之间的能量传递采用“Frozen Rotor”方式连接，计算收敛标准设为 10^{-4} 。通过上述计算方法得到泵的空化性能，如图 2 所示。

从图 2 中可以看到，当泵在设计工况 ($Q=690 \text{ m}^3/\text{h}$) 下运行时，泵进口附近已经出现了汽蚀现象，有少量气泡在叶片进口附近出现，当流量减小至 $640 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，气泡明显增多，沿轴向和径向方向扩展。当流量进一步减小，减小至泵现场

工艺流量时 ($Q=592 \text{ m}^3/\text{h}$) 叶片内部出现了大量气泡，空化现象严重。

现场拆机检测

G-410A/B 泵自 2015 年以来多次出现了故障，其中由故障拆机 3 次，其中故障类型主要可以分为 3 类，一是叶轮与耐磨盘接触，如图 3 (a)；二是主轴断裂，如图 3 (b)；三是叶轮开裂，如图 3 (c)。通过对现场泵运行情况进行了测试，获得了 G-410A/B 泵的频谱特性曲线，如图 4 所示。

从图 4 中可以看到，G-410A/B 泵的主要振动频率为 6 倍频叶片通过频率，在 3 000 Hz 附近出现了高频振动，但此时的频率幅值相对较弱，说明此时泵内部已经发生汽蚀，但汽蚀不是很严重，还没有扰乱主

流，振动频谱尚未上升为主要因素。综上所述，经过数值模拟和现场测试，判断该泵在规定的介质和操作条件下，基本处于汽蚀状态。

汽蚀性能优化

优化措施

从上节可以得到，G-410A/B 泵反复出现故障的原因因为汽蚀引起的高频振动。所以，在性能优化方面，本文重新对泵头进行设计，叶轮采用高抗汽蚀水力设计方法，降低泵的必须汽蚀余量，借助 CFD 技术对泵内部流动进行性能预测，达到优化的目的。其中，在高抗汽蚀叶片水力模型设计时，主要采取的措施有：

(1) 增加了叶轮进口直径，减少进口流速；

(2) 增大了叶片进口安放角，减少叶片的弯曲，增大叶片进口过流面积，减少叶片的排挤；

(3) 增加了叶片进口宽度，进口过流面积增加，减少进口流速；

(4) 增加了前盖板的曲率半径，减少前盖板的流速和改善速度分布的均匀性；

(5) 叶片进口边适当向进口延伸并减薄，叶片提早接受液体的作用，增加叶片的表面积，减少叶片工作面 and 背面的压差。

另外，在汽蚀性能优化时，在保证现场工艺所需流量、扬程重要工艺参数的基础上，降低了设计流量 ($Q=530 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 $H=105 \text{ m}$)，改善运行过程中的泵的必须汽蚀余量 NPSH_r，降低至 NPSH_r=2.5 m。其中，优化后的叶轮外形尺寸示意图如 5 所示。

性能预测

本文采用数值模拟技术对优化后的泵内部流场进行了预测，如图 6 所示。其中图 6 (a) 为压

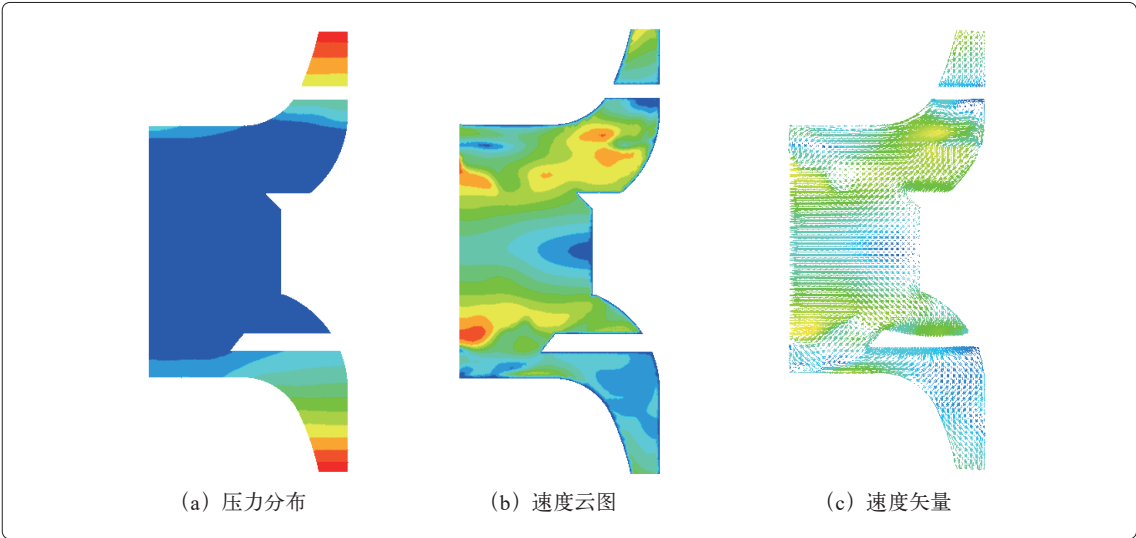


图6 优化后的泵叶轮内部流场分布

力分布，图6(b)为速度云图，图6(c)为速度矢量分布。从压力分布图可以看出，在叶轮进口附近存在低压区，随着流体从进口到出口的流动中，压力不断增大；从速度云图可以看出，整体速度分布相对较为均匀，高速区域主要出现在流体进入叶片以后，随着流道不断减小，速度逐渐增大；从速度矢量图可以看出，整体速度矢量分布较为合理，但靠近叶片附近仍存在局部回流现象，对应压力分布发现，该处的压力远大于临界空化压力，不会发生汽室现象。

图7为新G-410A/B泵的试验性能曲线图。从图中可以得到，优化后的泵扬程和汽室余量均能达到设计的要求。此泵在泵体内具有前后衬板（如图5所示），对在腐蚀、磨蚀程度高的工况中，只需更换前后衬板即可，增加了泵体、泵盖的使用寿命。前衬板为可调式衬板，后衬板的调整可通过调整轴承前后调整垫的厚度，在叶轮及衬板发生磨损而导致泵性能下降时，可以通过调节前衬板以及后衬板继续使用，增加易损件的寿命，从而达到节约成本的目的。

结语

本文以某石化PTA中的G-410A/B加压进料泵为研究对象，采用了数值模拟方法对泵现场运行工况下的汽蚀性能进行了分析，得到不同条件下的汽蚀分布，并对现场泵振动特性进行了测试，得到了泵的频谱特性曲线，获得了泵频繁故障的主要原因，并提出了相应的优化措施，主要结论如下：

(1) 当泵在设计工况下运行时，泵叶片进口附近已经出现了汽蚀现象，但气泡量较少。随着流量的减小，气泡明显增多，当流量减小至现场工艺工况时，泵内部已经出现了明显的汽蚀现象。

(2) 优化后的新叶轮内部流场分布相对较为合理，速度和压力分布较为均匀，经试验验证，无论是泵的扬程还是必须汽蚀余量均能满足设计要求。

综上所述，经过优化后的G-410A/B加压进料泵，自2018年10月装机运行后，运行平稳，运行状态良好，未出现任何故障现象。本文研究结果能够为类似的泵高频振动分析提供参考。

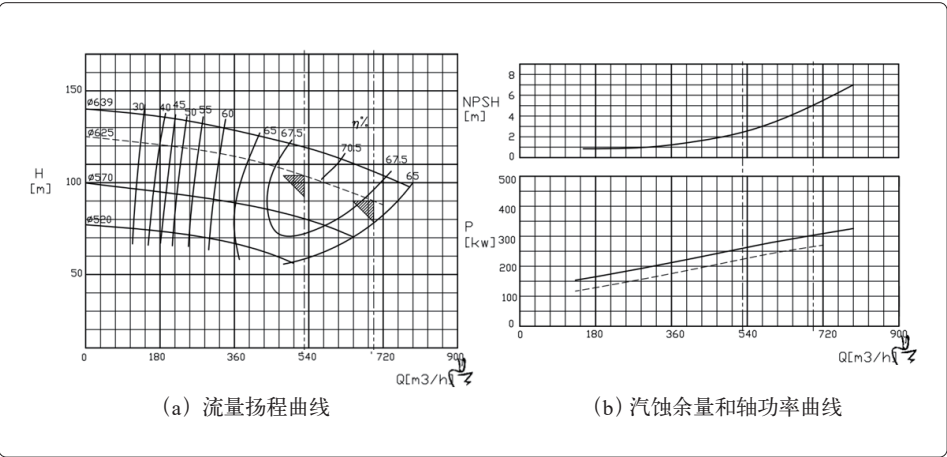


图7 外特性曲线