

前弯式离心泵变速运行特性及相似定律偏差分析

胡洪¹, 张伟程¹, 张文杰²

1.上海建筑设计研究院, 上海 200041

2.上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093

DOI:10.61369/WCEST.2025060009

摘 要 : 搭建前弯式离心泵性能试验台, 测试六种不同转速对比实验, 通过逐步调节出口阀门开度 (从全开到全闭), 获得不同转速及流量下对应的扬程、轴功率及效率数据, 绘制出性能曲线; 并验证相似定律在泵变速运行中的适用性。结果表明: 扬程-流量 ($H-Q$) 曲线、轴功率-流量 ($P-Q$) 曲线及效率-流量 ($\eta-Q$) 曲线均随转速呈现规律性变化。相似定律对其扬程预测的相对误差在4%以内, 对轴功率预测因机械损失等因素影响出现偏差, 且在低转速下偏差显著增大。因此, 当转速基准值偏离越小, 相似定律对泵轴功率的预测结果越具有参考意义。

关 键 词 : 性能曲线; 相似定律; 相对偏差

Analysis of Variable-Speed Operation Characteristics and Deviation from Similarity Laws for Forward-Curved Centrifugal Pumps

Hu Hong¹, Zhang Weicheng¹, Zhang Wenjie²

1.Shanghai Architectural Design & Research Institute, Shanghai 200041

2.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

Abstract : A performance test rig for forward-curved centrifugal pumps was established to conduct comparative experiments at six different rotational speeds. By gradually adjusting the outlet valve opening (from fully open to fully closed), data on head, shaft power, and efficiency corresponding to different rotational speeds and flow rates were obtained, and performance curves were plotted. The applicability of similarity laws in variable-speed operation of the pump was also verified. The results indicate that the head-flow rate ($H-Q$) curve, shaft power-flow rate ($P-Q$) curve, and efficiency-flow rate ($\eta-Q$) curve all exhibit regular variations with rotational speed. The relative error in head prediction by similarity laws is within 4%, while deviations occur in shaft power prediction due to factors such as mechanical losses, with significant increases in deviation at low rotational speeds. Therefore, the smaller the deviation from the reference rotational speed, the more meaningful the shaft power predictions by similarity laws become.

Keywords : performance curves; similarity laws; relative deviation

前言

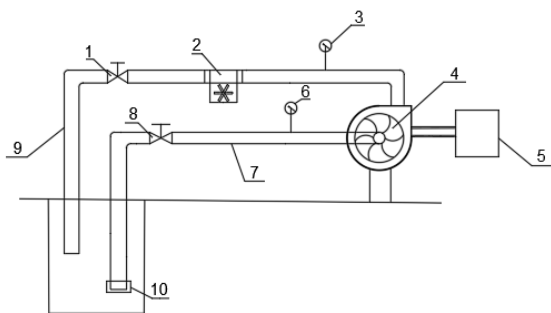
离心泵是现代生产生活中实现能量转换和流体输运的流体机械, 具有大流量、低扬程、高效率 and 运转可靠等特点, 在石油、化工、电力和冶金等行业均广泛应用。离心泵的性能通常以额定转速下的特性曲线来描述。然而, 在工程应用中, 为适应不同运行需求, 常用变频调速的方式进行调节。但现有研究多集中于额定工况下的性能特性, 其在变频运行条件下的性能变化规律尚缺乏系统研究, 因此有必要实验研究前弯式离心泵在变速调节过程中的运行特性, 进一步验证前弯式离心泵在变速条件下的水力特性是否符合相似定律的理论预期。

一、实验装置及方法

(一) 实验装置

如图1所示, 离心泵试验台由变频离心泵、管路系统、进出口阀门、进出口压力传感器和涡轮流量计等组成。变频离心泵为一款单级单吸蜗壳式离心泵^[1], 配备半开前弯式叶轮, 额定设计参

数为: 转速1800r/min、流量9m³/h、叶轮直径16.51cm、叶片数12片。为精确地监测和分析泵的性能, 利用可编程自动化控制器 (Programmable Automation Controller, PAC) 承担数字与模拟信号的转换。再通过数据采集模块对流量、压力等基本性能参数进行记录, 并将数据实时上传到上位机, 用于后续分析。



1 出口阀门；2 涡轮流量计；3 出口压力传感器；4 前弯式离心泵；5 上位机；6 进口压力传感器；7 进口管道；8 进口阀门；9 出口管道；10 止水阀

图1 离心泵性能试验台示意图

(二) 实验方法

通过上位机程序将转速设定到1800r/min，调节阀门开度使体积流量按照0.4542m³/h等差递减，从最大流量逐渐减小至流量几乎为零^[2]。运行稳定后，记录工况点的流量、进出口压力、电功率等性能数据。再将转速降低200r/min进行实验测定，直至800r/min。根据记录的实验数据，计算每个工况点的扬程、轴功率和效率，绘制不同转速下的H-Q、P-Q和 η -Q曲线图^[3]。

二、数据处理

(一) 扬程(H)的测定^[4]

在离心泵进口压力传感器和出口压力传感器之间，根据流体能量方程：

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + z_2 - z_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \quad (1)$$

其中， $z_2 - z_1$ 为泵进口和泵出口之间的高度差，0.3m； P_1, P_2 分别为离心泵流体进、出口压力(kPa)； ρ 为流体密度(kg/m³)； g 为重力加速度，9.81m/s²； u_1, u_2 分别为离心泵流体进、出口流速(m/s)； z_1, z_2 分别为离心泵进出口传感器的安装高度(m)。

(二) 轴功率的测定

离心泵由变频电动机直接驱动，传动效率 k 取0.95，轴功率的计算公式为：

$$N = N_{\text{电}} \times k \quad (2)$$

其中， $N_{\text{电}}$ 为电动机功率，kw。

(三) 效率 η 的计算

离心泵有效功率 N_e 与轴功率 N 的比值为离心泵效率 η ：

$$N_e = HQ\rho g \quad (3)$$

$$\eta = \frac{N_e}{N} \quad (4)$$

其中， H 为离心泵的理论扬程(m)； Q 为离心泵流量(m³/s)。

三、特性曲线及数据分析

数据处理后，绘制出不同转速下的离心泵H-Q、N-Q和 η -Q曲线。图2所示，前弯式离心泵H-Q曲线在不同转速下均呈现出随着流量增加扬程逐渐下降的趋势，观察到曲线前半段扬程下降较为平缓，运行相对稳定，后半段则出现明显下降，且随着转速的增大，该区段的下降趋势愈显著。因此，在应用中，离心泵在中等流量区间运行有利于维持扬程的稳定性，提高运行效率。

从泵N-Q曲线图可得出：在恒定转速下，随着流量的增加，轴功率呈递增趋势。在相同的流量点上，转速越高，轴功率的需求也越高。与泵的性能特征相一致。在泵 η -Q曲线图中各个转速呈现先上升后下降的驼峰状，最佳效率点的流量值会随着转速的升高而增大。例如，在1800r/min时，效率峰值出现在流量为10m³/h，且效率达到45%；而在800r/min时，效率峰值出现在流量为5m³/h，且最高效率不足30%。因此泵的最佳效率点随转速增加向大流量方向移动，且整体效率水平也随转速提高而显著改善，符合泵的运行特性。

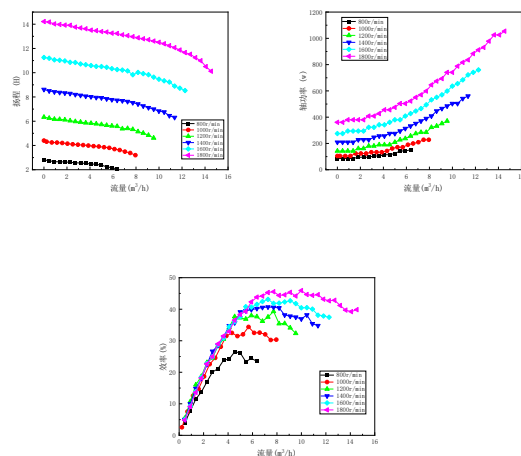


图2 前弯式离心泵特性曲线

四、相似定律验证

(一) 验证方法

以额定转速下的实测性能曲线作为基准。根据相似定律将不同转速下的实验数据折算至额定转速下的等效流量、扬程和功率，各参数符合方程(5)-(7)，并绘制相应的H-Q曲线与N-Q曲线的叠加图，以便于直观对比相似定律^[5]预测结果与实测数据之间的一致性。

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (7)$$

同时,为量化分析计算折算值与实测值的偏差,绘制 H-Q 偏差图与 N-Q 偏差图。步骤为:对额定转速下的 H-Q 曲线和 N-Q 曲线分别进行多项式拟合^[6]。式 (8)-(9) 为拟合关系式:

$$H = 14.02955 - 0.03302q_v - 0.01349q_v^2 \quad (8)$$

$$N = 360.79629 + 9.56285q_v + 1.44724q_v^2 + 0.3004q_v^3 - 0.01427q_v^4 - 0.0000505078q_v^5 \quad (9)$$

拟合相关系数的平方 R^2 均达到 0.99 以上,拟合度精度高,可代替实测曲线在离心泵实际应用中使用。随后,将折算得到的预测流量点与拟合曲线上对应的扬程和轴功率进行比对,计算其扬程与轴功率相对误差,以量化不同转速下相似定律的适用性与偏离程度。

扬程相对误差:

$$\delta_H = \frac{|H_{pre} - H_{act}|}{H_{act}} \times 100\% \quad (10)$$

其中, H_{pre} 是各个转速下折算至额定转速下的预测流量值, H_{act} 是各个转速下折算至额定转速下的预测流量点对应拟合曲线上的实测扬程值。

轴功率相对误差:

$$\delta_N = \frac{|N_{pre} - N_{act}|}{N_{act}} \times 100\% \quad (11)$$

其中, N_{pre} 为各转速下折算至额定转速下的预测轴功率值, N_{act} 为各个转速下折算至额定转速下的预测流量点对应拟合曲线上的实测轴功率值。

(二) 扬程验证与结果分析

图3表明由相似定律折算后的不同转速实验数据点(800r/min至1600r/min)在 H-Q 曲线上均较好地重合于基准转速下的参考曲线。整体趋势:随流量增加,扬程逐渐下降。不同转速折算后的曲线与基准曲线吻合度较高,表明前弯式离心泵在变速条件下的实测扬程基本符合相似定律的理论预期。

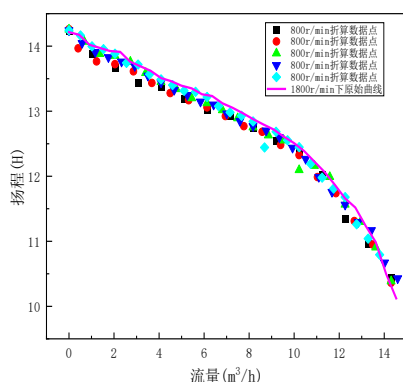


图3 不同转速换算至额定转速的 H-Q 曲线对比图

图4展示了不同转速折算至基准转速下的扬程与实测参考曲线之间的相对偏差。整体而言,误差幅度控制在 $\pm 4\%$ 以内,大部分流量区间误差集中在 0-2%, 验证了相似定律对该泵变速性能预测

的有效性。

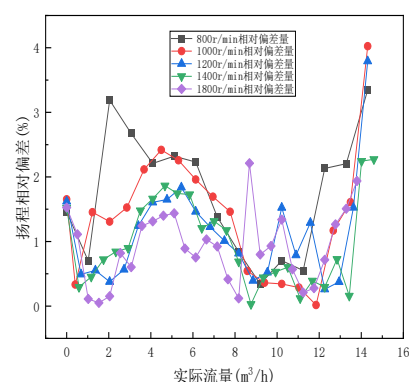


图4 扬程相对误差随流量的变化曲线

(三) 轴功率验证与结果分析

如图5,随着转速升高,折算曲线与基准曲线的重合度逐渐改善,整体偏差减小,通过图6表明转速越接近基准转速,误差越小。其中转速 1600r/min,多数点落在约 5%-12% 范围内, 1400r/min 多在约 10%-20%, 而其他转速下偏差显著偏大。表明相似定律在高流量区域且近邻基准转速下具有良好的适配性。相反,在低转速和小流量区,受雷诺数与损失非相似等影响,偏差明显增大。

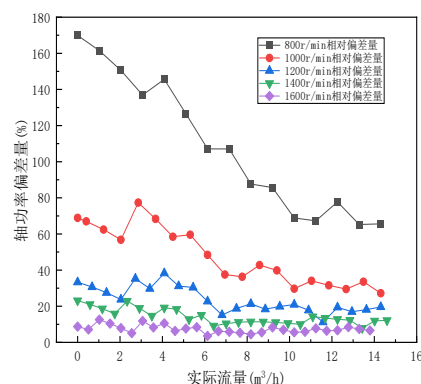


图5 不同转速换算至额定转速的 N-Q 曲线对比图

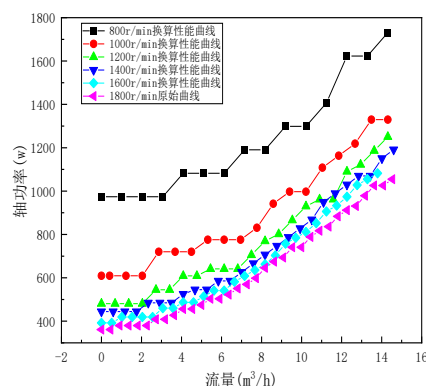


图6 轴功率相对误差随流量的变化曲线

五、结论

前弯式离心泵的扬程 – 流量 ($H-Q$)、轴功率 – 流量 ($N-Q$) 及效率 – 流量 ($\eta-Q$) 曲线均随转速呈现规律性变化。揭示了前弯式离心泵的变速流体输送性能规律。同时验证并量化了相似定律的适用性和局限性。研究表明：相似定律对不同转速下前弯式离心泵的扬程预测准确，其相对误差可控制在 4% 范围内。然而，

由于机械损失等因素的影响，轴功率的预测存在一定偏差，且该偏差在低转速条件下显著增大，而在靠近基准转速的有限范围内适用性好。综上所述，本研究不仅划定了相似定律的可靠应用边界，更从物理机理上揭示了其对于不同性能参数的预测精度差异，为前弯式离心泵在变频系统中的优化设计与高效稳定运行提供了关键的理论和实践指导。

参考文献

- [1] 木家康, 盛健. PID 控制下前弯式离心泵流量特性试验研究 [J]. 实验科学与技术, 2025, 23(01): 103–108.
- [2] 杨晓珍. 不同转速对离心泵性能影响的试验研究 [D]. 湖南农业大学, 2004.
- [3] 陈国奋, 陈秀宇, 余美琼. Origin 在化工原理离心泵特性曲线测定中的应用 [J]. 福建师大福清分校学报, 2012, (05): 62–68.
- [4] 陈子明. 离心泵性能参数曲线的探究实验 [J]. 内燃机与配件, 2019, (12): 68–69.
- [5] 齐济, 河星武. 离心泵转速对工作点参数的影响 [J]. 大连民族大学学报, 2016, 18(05): 478–481.
- [6] 方清华. 离心泵调速时流量关于扬程和转速的回归分析 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(05): 97–98.