

基于 ANSYS Workbench 的高扬程多级离心泵转子模态分析

付建国

(江西水利职业学院水利工程系,江西 南昌 330013)

摘要:多级离心泵因效率高、扬程大而应用广泛,但结构复杂,运行时,转子高速旋转,易引发振动产生破坏,影响安全运行.利用 ANSYS Workbench 协同仿真软件对多级离心泵转子进行模态分析,获得前十阶固有频率及振型.研究转子系统的振动特性,考察叶轮级数对模态的影响,分析预测叶轮级数变化引起振动的可能性.结果表明:D型五级离心泵在给定工况下振动特性良好,不会发生共振.增加叶轮级数,引发共振的可能性增加,应避开易引发共振的转速区间运行.分析结果为转子系统的振动故障诊断和预测、动力特性优化设计、动力学分析奠定理论基础,对减小振动、避免共振、安全稳定运行等具有重要意义.

关键词:多级离心泵;模态分析;ANSYS Workbench;转子结构

中图分类号:TH311 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2016)04-0244-05

0 引言

高扬程多级离心泵具有两个以上串联的叶轮,其效率高、扬程大,广泛应用于高层建筑、矿用排水、石油化工、森林消防、农田灌溉、城市给排水等国民经济的各行各业.但多级离心泵结构复杂,高速运转时,泵内流场与叶轮相互作用,容易引发振动产生破坏,影响安全可靠运行.当前,多级离心泵的研究主要集中于内流场的数值模拟,涉及压力分布、速度分布、流态分析,水力性能预测,压力脉动分析等^[1-5],针对多级离心泵转子结构的动力学分析则较少.

模态分析是动力学分析的基础,本文利用 ANSYS Workbench 协同仿真软件对多级离心泵转子系统进行模态分析,研究转子振动特性,为转子系统的动力特性优化及后续动力学分析奠定基础,对减小振动、避免共振、安全稳定运行等具有重要意义.

1 基本理论

1.1 模态分析有限元法

工程中对结构进行模态分析,主要用于确定结构的振动特性,即结构固有频率和振型,其模态与材料属性、

所承受的荷载以及支撑条件等因素有关.根据弹性力学有限元法,模态分析时,将转子结构离散为有限个单元体,可得结构的运动微分方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——结构质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;

$\{F(t)\}$ ——结构外荷载向量;

$\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ ——结构节点加速度向量、速度向量、位移向量.

工程中,阻尼对结构振动特性影响很小,可以忽略,即 $[C] = 0$,当结构无外荷载作用时,则 $\{F(t)\} = 0$,系统作无阻尼自由振动,其运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

认为结构上各点以相同频率 ω 和相位 a 作自由振动,其对应的特征方程为:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{0\} \quad (3)$$

求解式(3)的特征值 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$ 便可得到系统固有频率,回代后可得特征向量 $\{X\}_i^j (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$,即系统的振型.

1.2 模态分析求解方法

随着计算机软件技术的不断发展,模态分析中,可利用 ANSYS 求解结构系统特征方程的特征值 ω 与特

征向量 $\{X\}$,同时,ANSYS 提供多种模态提取方法,包括空间迭代法(Subspace),不对称法(Unsymmetric),兰佐斯法(Lanczos),缩减法(Reduced),阻尼法(Damped),Power Dynamics 法等,兰佐斯法(Lanczos)在工程中应用广泛^[6]。

Lanczos 法是一种将对称矩阵通过正交相似变换变成对称三对角矩阵的算法,以求出特征值 ω 。相较于与 Subspace 法,二者计算精度相当,但计算速度上,Lanczos 法更快,提取模态也更为有效^[7]。故本文采用此方法进行模态求解。

2 模型建立

2.1 多级离心泵结构参数

本文以某 D 型多级离心泵为研究对象,设计参数为:设计流量 $Q=280\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=215\text{ m}$,转速 $n=1\,480\text{ r/min}$ 。该泵叶轮共 5 级,首级叶轮与其后各级叶轮结构参数不同,见表 1。转子结构各部分材料为:首级叶轮 ZG1Cr13,中间级、末级叶轮 HT200,泵轴 45 号钢,各材料特性见表 2。

表 1 叶轮参数

结构	进口直径 /mm	出口直径 /mm	进口宽度 /mm	叶片数	叶片包角 /°
首级叶轮	175	360	26	7	200
中间级、 末级叶轮	156	360	26	7	192

表 2 转子结构材料特性

结构	材料	弹性模量/Pa	泊松比	质量密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
首级叶轮	ZG1Cr13	$2.16\text{E}+11$	0.281	7720
中间级、 末级叶轮	HT200	$1.48\text{E}+11$	0.31	7200
轴	45	$2.09\text{E}+11$	0.269	7890

2.2 建立数值模型

多级离心泵转子主要由轴、叶轮、平衡盘和轴套等组成,结构复杂,在实际建模计算中,对转子系统做适当简化,建立简化的有限元数值模型^[8]。应用三维建模软件 UG,分别建立首级叶轮、中间级叶轮、泵轴三维实体模型,通过 Workbench-Design Modeler 中的数据传递接口,导入 UG 中的模型数据,并在 DM 中实现轴与各级叶轮的装配,该五级离心泵转子总长 1 124 mm,叶

轮直径 360 mm,轴直径 75 mm,如图 1。

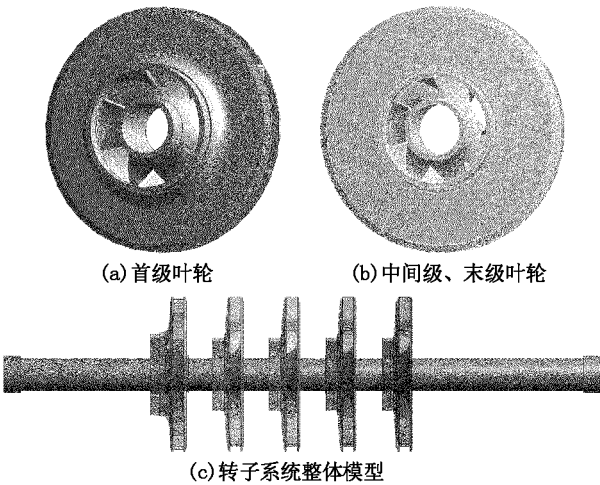


图 1 叶轮及泵轴三维模型

2.3 划分网格

叶轮采用自动划分网格法(Automatic)划分,网格为 SOLID187 四面体单元,泵轴采用扫掠法(Swept Meshing)划分网格,网格为 SOLID186 六面体单元。网格总数 73.4 万,节点总数 131 万,泵轴及首级叶轮网格见图 2。

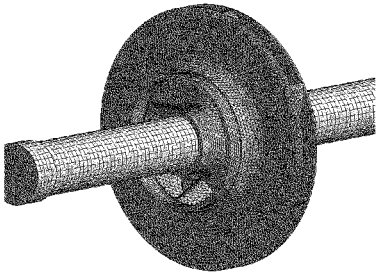


图 2 泵轴与首级叶轮网格

2.4 约束设置及求解

约束条件对结果会产生一定的影响,针对多级离心泵实际运行情况,将约束设置为圆柱面约束,叶轮进口侧轴承面设置为径向、切向受约,轴向自由,叶轮出口侧轴承面设置为径向、轴向受约,切向自由。

模态分析中,旋转离心力、水压力对结构振动特性影响微小,计算叶轮振动特性时可以不考虑旋转离心力及水压力的影响^[9-11],因此,本文按三、五、七、九级,仅计算分析空气中转子结构静止状态下的特征频率及振型。

3 转子结构模态分析

3.1 五级离心泵转子结构模态分析

通常,引起结构系统振动的是较低的特征频率^[12],

故本文在利用 ANSYS Workbench 求解以及扩展模态时,提取五级离心泵在空气中未运行状态下的前 10 阶

振动模态,转子结构固有频率、最大振幅与振型分别如表 3、图 3 所示。

表 3 空气中转子结构前十阶固有频率及最大振幅

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	117.19	117.2	195.75	339.96	339.98	467.49	551.45	551.49	609.74	609.79
最大振幅/mm	3.86	3.86	6.81	5.31	5.33	7.84	11.14	11.10	15.10	15.22

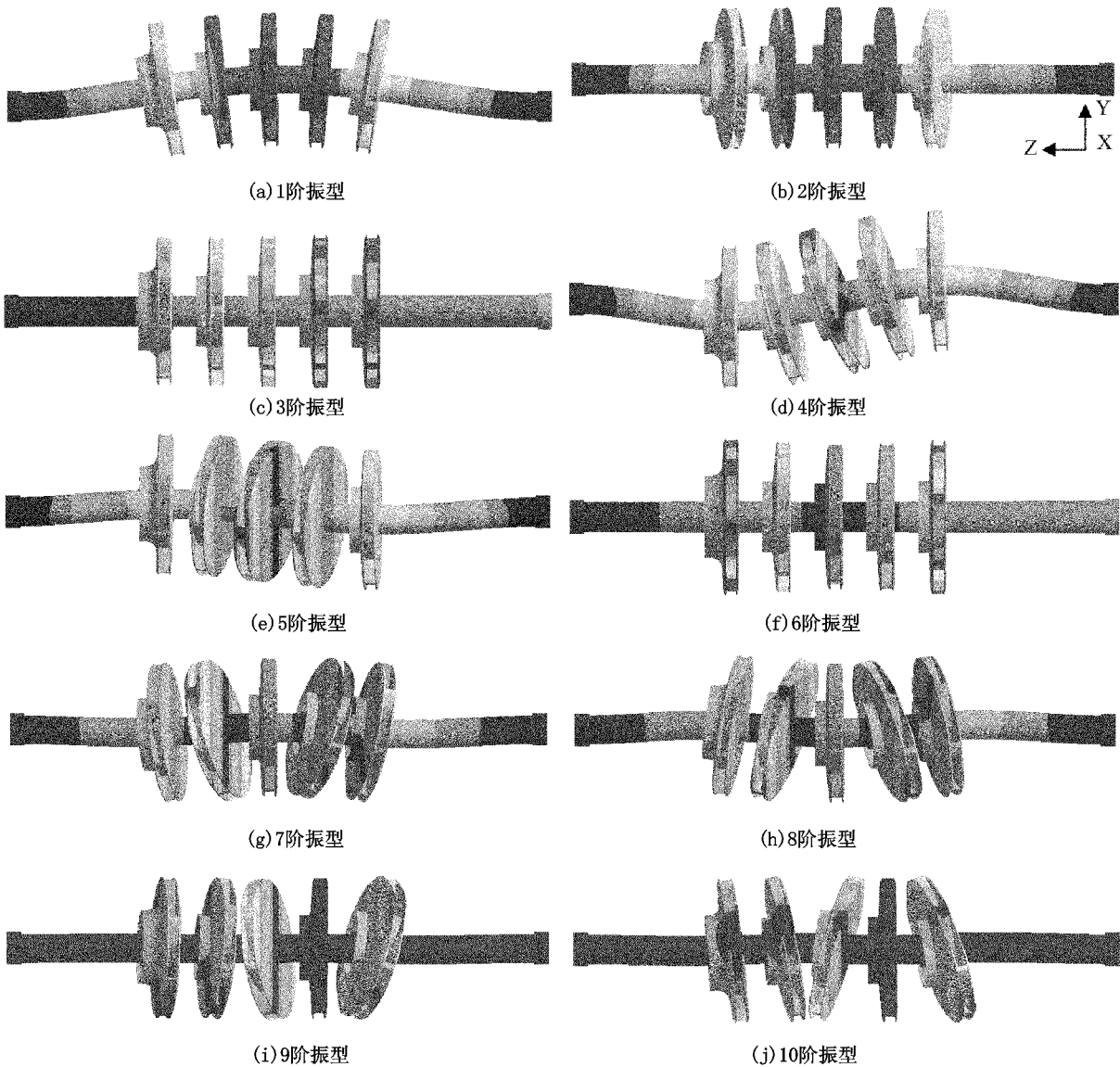


图 3 转子结构前十阶振型

由表 3 转子结构固有频率、图 3 转子振型,以及从 Workbench DM 模块中所查看到的各阶振型仿真模拟动画,对比模态分析的前 10 阶结果,可知转子结构的振型主要表现为摆动、扭转振动、弯曲振动、俯仰振动及复合

振动等。
1、2 阶固有频率分别为 117.19 Hz、117.20 Hz,振型分别表现为沿 Y 轴方向的上下摆动及沿 X 轴方向的前后摆动,二者摆动方向近乎垂直,是同一阶振动在相

互垂直的两个方向上的表现,且最大变形均发生在第三级叶轮外缘;3 阶固有频率为 195.75 Hz,振型表现为绕 Z 轴的扭转振动,扭转沿着轴线方向呈中心对称分布,最大变形发生在末级叶轮外缘;4、5 阶固有频率分别为 339.96 Hz、339.98 Hz,振型分别为 Y 方向的 S 型弯曲振动及 X 方向的 S 型弯曲振动,二者振动方向近乎垂直;6 阶固有频率为 467.49 Hz,振型与第三阶类似,表现为绕 Z 轴的扭转振动;7、8 阶固有频率分别为 551.5 Hz、551.49 Hz,振型复杂,属于两个垂直方向上弯曲振动与俯仰振动构成的复合振动;9、10 阶固有频率分别为 609.74 Hz、609.79 Hz,振型亦表现为两个相互垂直方向上俯仰振动。

3.2 不同叶轮级数时转子模态分析

多级离心泵在设计、制造中,增加叶轮级数可获取更高扬程。通过计算叶轮不同级数(按三、五、七、九级计算)时前六阶的固有频率,考察叶轮级数对转子模态的影响,分析预测叶轮级数变化引起振动破坏的可能性,计算结果如表 4。

表 4 不同叶轮级数时前六阶固有频率

阶次	三级	五级	七级	九级
1	175.46	117.19	75.29	55.45
2	175.47	117.20	75.30	55.45
3	243.56	195.75	150.78	128.48
4	464.79	339.96	215.68	157.24
5	464.87	339.98	215.70	157.27
6	537.40	467.49	336.11	277.77

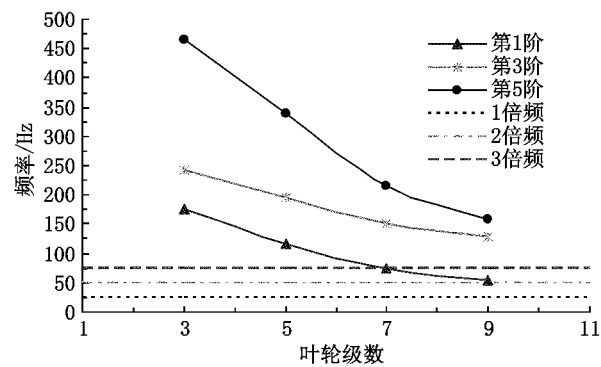


图 4 转子固有频率随叶轮级数变化图

由表 4 可知,增加叶轮级数时,同阶次结构固有频率呈减小趋势。由于共振发生时振动频率大多处于低阶模态特征频率范围内,第 1、2 阶及第 4、5 阶固有频率近乎相同,故可作出不同叶轮级数时第 1、3、5 阶固有频

率与结构 1、2、3 倍频的关系图,如图 4。
模态分析所获得的固有频率可以预测转子系统发生振动的可能性,当转频及倍频在固有频率附近时,结构容易产生共振。文中 D 型五级离心泵额定转速为 1 480 r/min,换算成转频为 24.67 Hz,以给定工况下的 1、2、3 倍频运行均能避开其固有频率,转子振动特性良好,不会引发共振。改变多级泵叶轮级数,三级时,转子结构以给定工况下的 1、2、3 倍频运行也避开了固有频率,不会出现共振;七级时,转子在给定工况下的 3 倍频与第 1、2 阶固有频率接近,易发生共振;九级时给定工况下的 2 倍频与第 1、2 阶固有频率接近,易发生共振。实际应用中,当需要提高多级离心泵总扬程而增加叶轮级数时,应避免易引发共振的转速区间运行。

4 结 论

- (1)利用 ANSYS Workbench – DM 模态分析模块,计算多级离心泵转子结构模态,获得前十阶固有频率及振型。
- (2)结合振型图及 Workbench 中模拟动画,直观分析多级离心泵振动特性,为后续转子系统的动力特性优化及后续动力学分析奠定基础。
- (3)文中 D 型多级离心泵在给定工况下振动特性良好,不会出现共振状况。增加叶轮级数,结构共振的可能性增加,实际运行时应避免易引发共振的转速区间。分析结果为转子系统的振动故障诊断和预报、结构优化提供理论依据,对多级离心泵安全稳定运行具有重要意义。

参考文献:

[1] 程云章,张伟国,骆宾海,等. 多级离心泵内部流场数值模拟与节能技术研究[J]. 水电能源科学,2010,28(10):115~117.
[2] 曹卫东,刘光辉,施卫东,等. 多级离心泵内部非定常压力分布特性[J]. 农业工程学报,2014(14):64~70.
[3] 饶昆,聂小林,崔宝玲,等. 多级离心泵内部流动分析及性能预测[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2016,35(3):385~391.
[4] 汪家琼,孔繁余. 多级离心泵叶轮与导叶水力性能优化研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(3):92~96.
[5] 蒋庆磊,翟璐璐,吴大转,王乐勤. 多级离心泵内叶轮出口压力脉动研究[J]. 工程热物理学报,2012,33(4):599~602.
[6] 付建国. 多级离心泵流固耦合动力特性分析[D]. 扬州:扬州大学,2014.
[7] 王晓华. 发动机曲轴的 CAD 参数化设计及其模态分析[D]. 太原:中北大学,2012.
[8] 田亚斌. 高速多级离心泵转子动力特性研究[D]. 兰州:兰州理工大

学,2012.

[9]张正阳,郑源,张新. 预应力与水介质对轴流泵叶轮模态的影响[J]. 水电能源科学,2015(4):160~163.

[10]袁启铭. 轴流泵叶轮流固耦合振动特性分析[D]. 扬州:扬州大学,2009.

[11]王玥. 汽轮机叶片的模态分析与寿命评估[D]. 杭州:浙江大学,

2004

[12]刘君,袁建平. 带预应力的高速离心泵转子模态分析[J]. 中国农村水利水电,2014(2):117~121.

编辑:张绍付

A modal analysis of the rotor of high – lift multistage centrifugal pump based on ANSYS Workbench

FU Jianguo

(Jiangxi Water Resources Institute, Department of Hydraulic Engineering, Nanchang 330013, China)

Abstract: The multistage centrifugal pump is widely applied because of its high effectiveness and lift. However, it also has several disadvantages, namely complex structure, and high-speed rotation of rotor during operation which can easily induce vibration, conduct damage and influence the safety operation. Employing ANSYS Workbench, together with simulation software, to conduct modal analysis toward the rotor of multistage centrifugal pump, so as to gain the intrinsic frequency and vibration model of the first ten steps. Researching the vibration characteristics of rotor system, examining the influence of impeller progression on the modal, as well as analyzing and anticipating the possibility of that impeller progression change induces vibration. The results show that: the D-type five-progression centrifugal pump has good vibration characteristics but no resonance under give operation condition. The increase of impeller progression will increase the possibility of inducting resonance that the operation shall keep away from the rotate speed range which can easily induce resonance. The analysis results lay theoretical foundation for the vibration fault diagnosis and anticipation of rotor system, optimization design of dynamic characteristics as well as dynamics, and have significant meanings toward decreasing vibration, avoiding resonance as well as keeping safety and stable operation.

Key words: Multistage centrifugal pump; Modal analysis; ANSYS Workbench; Rotor structure

翻译:付建国

《2015年江西省水资源公报》通过编委会审查

2016年8月17日,江西省水资源公报编委会在南昌召开会议,对《2015年江西省水资源公报》进行评审。省水利厅副厅长、省鄱建办主任朱来友主持会议,江西省水资源公报编委会成员和公报编制单位代表参加了会议。

与会领导、专家和代表认真听取了编制单位对公报主要内容和编制工作的汇报,并对公报数据进行了审核,对关键问题进行了讨论,一致认为《2015年江西省水资源公报》符合《水资源公报编制规程》,技术线路和分析方法正确,内容全面,编制质量进一步提升,基本满足国家及江西省实行最严格水资源管理制度要求。同时,各编委会成员也对公报内容提出具体修改完善的意见和建议。

朱来友副厅长要求编制单位尽快按照审查意见完成《公报》的修改完善,并按有关程序审定上报。

(江西省水利厅水资源处 高 宇)