

诱导轮空化对流固耦合应力分析的影响

褚宝鑫, 须 村, 张晓娜, 姜绪强

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 采用 ANSYS FLUENT 软件仿真计算了某型号液体火箭发动机诱导轮在空化情况下的流场压力分布情况, 之后将其流体压力分布引入 ANSYS Workbench 中, 利用单向流固耦合技术进行了该诱导轮的有限元静应力分析, 获取了空化及非空化情况下诱导轮的叶片应力分布, 分析了空化对诱导轮应力分析结果的影响。

关键词: 诱导轮; 应力分析; 空化; 流固耦合

中图分类号: V434.21-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0044-05

Influence of inducer cavitation on fluid-solid coupled stress analysis

CHU Bao-xin, XU Cun, ZHANG Xiao-na, JIANG Xu-qiang

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: ANSYS FLUENT software was used to calculate the flow pressure distribution of a liquid rocket engine inducer under the condition of cavitation. The hydrodynamic pressure distribution was introduced into ANSYS Workbench software to perform finite element static stress analysis of the inducer by the one-way fluid-solid coupled technology. The stress distribution on the blades of a inducer was obtained under the conditions of cavitation and noncavitation. The effects of cavitation on the stress analysis result of the inducer are analyzed.

Keywords: inducer; stress analysis; cavitation; fluid-solid coupled stress analysis

0 引言

诱导轮是涡轮泵的重要部件之一, 其强度性能关系到涡轮泵的运行安全和可靠性。目前国内对于诱导轮强度均没有形成系统完善的经验及

一维计算方法, 因此在诱导轮设计阶段均采用有限元软件进行强度分析。受计算模型和硬件等的限制, 目前型号研制中对诱导轮的应力计算通常只考虑涡轮泵转速带来的离心力影响, 而不考虑流体压力和空化的影响, 但目前国内外的许多研究表明, 除转速带来的静应力外, 空化及流体压

收稿日期: 2011-11-12; 修回日期: 2012-01-17

基金项目: 国家高技术项目 (2008AA702302)

作者简介: 褚宝鑫 (1977—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵技术

力分布也是造成诱导轮叶片较高应力的主要原因。

本文采用 ANSYS 系列软件对某型号诱导轮进行了空化情况下的 CFD 流场计算, 得到了比不考虑空化更准确的叶片表面压力分布。利用单向流固耦合方法对诱导轮进行有限元结构应力计算, 分析了其设计工况下的静应力分布情况并与不考虑空化情况下的诱导轮静应力计算结果进行了比较, 为诱导轮的强度可靠性分析和改进提供了重要依据。

1 诱导轮流场的 CFD 仿真

1.1 计算方法及模型

诱导轮叶片的进口边对空化的影响较大, 因此编制程序对进口修圆及修磨进行了准确造型, 之后利用 Solidworks 软件构建了诱导轮的简化三维实体模型, 如图 1 所示。利用 Gambit2.2.30 软件建立了 CFD 仿真计算流道模型, 流道模型整体采用四面体进行网格划分, 网格的单元总数约为 55 万左右, 如图 2 所示。模型进行了如下假设和简化:

- 1) 计算区域只局限在诱导轮附近且不考虑离心轮对诱导轮内流场的影响;
- 2) 轴端螺钉部分简化为半球形和圆柱形, 壳体和导流套简化为圆柱形外壁, 诱导轮后流道简化为圆柱形;
- 3) 忽略诱导轮叶片与轮毂间圆角对流场的影响。

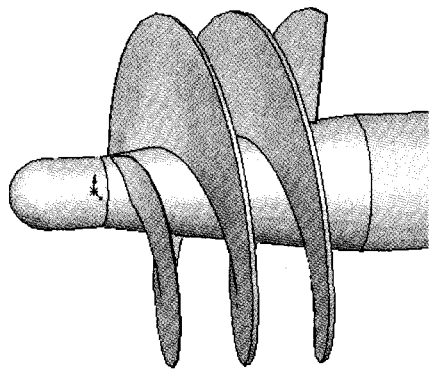


图 1 诱导轮的三维实体模型

Fig. 1 3D model of inducer

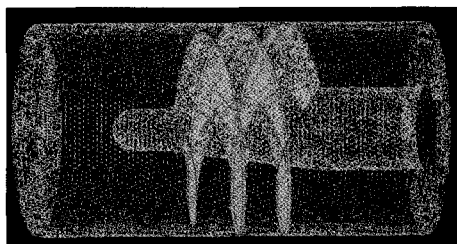


图 2 诱导轮流场的计算网格

Fig. 2 CFD grid of inducer flow field

流场计算采用 ANSYS FLUENT 12.0.16 软件进行, 计算介质为液氧和气氧, 并视为不可压缩性流体。边界条件设置为: 流道入口为速度进口; 流道出口为压力出口; 诱导轮和壳体等固体壁面给定无滑移壁面边界条件。计算模型及求解器设置如下: 湍流模型采用标准 K-epsilon 模型; 多相流模型采用 Mixture 模型; 空化模型选择 Schnerr-Sauer 模型, 模型中的系数均使用 FLU-ENT 默认推荐数值。模型公式和参数在 FLUENT 帮助文件中有详细说明, 不再详述。

1.2 计算结果

对该诱导轮在引入空化模型和不引入空化模型的情况下分别进行了计算, 两种计算工况下的边界条件完全相同。计算获得的诱导轮叶片流体压力分布对比见图 3, 诱导轮的扬程和效率结果对比见表 1。引入空化模型时计算获得的诱导轮流道内气相体积份额分布见图 4。

由图 3 和图 4 可知, 在额定进口压力、转速和流量下, 该型号诱导轮叶片进口的吸力面附近存在明显的空化区, 并且呈现出在叶片径向上较窄, 沿叶片周向延伸较长的狭长形态。计算获得的空化区位置与该型号诱导轮参加发动机试车后偶尔观察到的叶片轻微汽蚀麻点区域基本一致。

同时还注意到, 诱导轮的空化区位置主要集中在叶片进口打磨面后的叶尖附近, 与非空化流场计算中的叶片低压区位置不完全一致, 非空化流场计算中的叶片低压区位置位于叶片前缘叶尖处。这是由于考虑空化后, 空化改变了流场内的局部流动状态, 使得原低压区压力分布发生了变化, 从而导致空化区移至打磨面后。这个现象在我国其他研究所和美国 NASA 及法国宇航局的实验和数值研究中也得到了证实。

面流体压力高于非工作面,在流体压力的作用下进口边发生较大变形,向泵前倾斜,从而在叶片工作面根部产生较高的应力。

引入空化计算流体压力边界后,计算获得的 Von Mises 等效应力最大值位于诱导轮叶片进口边修圆与不修圆相接的工作面轮毂附近,为 149.5 MPa。最大位移发生在诱导轮叶片进口边修圆与不修圆相接的外径处,变形为 0.393 mm。最大应力和位移相比不考虑空化时均有所增加。这是由于考虑空化的情况下,由于叶片进口非工作面空化区的影响,降低了工作面与非工作面的压力差,从而降低了叶片的应力和变形。

以上计算结果表明该型号诱导轮的最大应力主要是由流体压力造成的,如不考虑流体影响而只在单一离心力载荷的条件下进行强度计算,那么计算结果将是不准确的。同时引入空化的影响后,计算结果均有所降低。

3 结论

针对某型号诱导轮进行了 CFD 三维定常流场的计算,并利用单向流固耦合方法对诱导轮进行了有限元强度计算。

流场计算结果表明,在额定工况下该型号诱导轮进口存在明显的空化区,由于该空化区的影响,诱导轮的扬程、效率和压力分布等计算结果

均与非空化流场计算结果存在较大差别,表明研制诱导轮性能和流场分析时均应考虑空化的影响。

对该诱导轮的有限元强度计算表明,考虑流体压力时的计算结果与不考虑流体压力时存在较大差异,空化也会对流固耦合计算结果产生较大影响。要获得准确的诱导轮叶片应力分布,计算时应考虑空化及流体的影响。

参考文献:

- [1] 丛小青,钱玉琴,袁丹青. 高速泵诱导轮静应力及模态分析[J]. 中国农村水利水电, 2010 (11): 135-137.
- [2] 陈晖,李斌,张恩昭,等. 诱导轮空化流动数值模拟[J]. 流体机械, 2007, 35(1): 21-28.
- [3] 刘志远,郑源,张文佳,等. ANSYS-CFX 单向流固耦合分析的方法[J]. 水利水电工程设计, 2009, 28(2): 29-31.
- [4] 张惟斌,赖喜德,王建录,等. 基于流固耦合的主油泵转子结构分析[J]. 水泵技术, 2009 (5): 15-18.
- [5] 袁丹青,刘吉春,丛小青,等. 变螺距诱导轮内流场空化数值计算[J]. 排灌机械, 2008, 26(5): 42-45.
- [6] HIROKI U. Numerical simulation of cavitating flow in inducers, AIAA-2004-4024[R]. USA: AIAA, 2004.
- [7] KIMURA T. CFD simulation of a turbopump inducer, AIAA2003-4770[R]. USA: AIAA, 2003.
- [8] 王和慧,于莉,周金水,等. 希罗装置复杂通道的 CFD 仿真和 FE 分析设计[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 231-239.

(编辑: 陈红霞)