基于 ANSYS/PDS的泵轴可靠性分析

施卫东, 颜品兰, 蒋小平, 孙相春, 李启峰
(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为提高泵轴的可靠性, 设计时按照工程实际, 将泵轴的几何尺寸、载荷、应力以及疲劳极限等各参数视为随机变量, 采用蒙特卡罗模拟技术, 通过 Pro/E三维实体建模、模型导入 ANSYS进行静应力分析、生成概率分析文件、使用 PDS模块计算可靠度等步骤, 可以得到比传统设计方法精度高的泵轴失效概率及可靠度. 以 DLY25—270/9—37型立式多级油泵的泵轴为例进行计算, 在置信度为 95%时, 该泵轴的可靠度为 99.87%; 表明这种利用 ANSYS/PDS模块对泵轴进行可靠性分析的方法是可行的, 为泵轴的可靠性设计提供了新的思路, 具有一定的工程应用价值.

关键词: 泵轴; 概率设计; 可靠度; ANSYS/PDS模块; 蒙特卡罗模拟
中图分类号: TH311 文献标志码: A 文章编号: 1005-6254(2008)05-0001-04

Probabilistic analyse of pump shaft based on ANSYS/PDS

SHI Wei-dong, YAN Pin-lan, JIANG Xiao-ping, SUN Xiang-chun, LI Qi-feng
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The geometric dimensions, load, stress and fatigue limit are taken as random variables to establish the pump shaft model. The 3D solid model is established by Pro/E software and imported into ANSYS to make the static stress analysis. The probability analysis files are created and the reliability of pump shaft with PDS module is calculated by Monte Carlo simulation technique. The method can obtain higher precision of failure probability of the pump shaft than the traditional design. A reliability assessment for the DLY25—270/9—37 to the model of vertical multi-stage pump shaft is demonstrated as a numerical example. The reliability of the pump shaft is 99.87% in the confidence level of 95%. It shows that the method is feasible and has important application values.

Key words pump shaft; probabilistic design; reliability; ANSYS/PDS; Monte Carlo simulation

泵轴是泵传递扭矩的关键零件之一, 其工作性能直接关系到泵是否能正常工作. 在泵工作过程中, 主轴的失效将导致整个机组停机[1]. 泵轴的传统设计方法是以材料力学为基础, 根据轴的强度计算初定其直径, 然后用安全系数法校核其强度. 这种设计方法的特点是将泵轴的强度极限、几何尺寸以及载荷等参数视为常量, 计算中只要安全系数大于或应力小于某一给定的经验值就认为该零件是安全的, 这显然有较大的经验性和盲目性, 而且为了追求零件安全性, 设计中不惜取用优质材料或加大零件尺寸, 造成生产成本过高. 针对上述问题, 本研究采用 ANSYS软件的 PDS设计模块, 将轴的强度极限、几何尺寸以及载荷等定义为随机参数, 采用蒙特卡罗法以一根实际使用情况比较好的水泵主轴为例, 应用应力-强度干涉理论, 在应力和强度的概率密度函数为正态分布情况下, 给出了同时承受弯矩和扭

收稿日期: 2008-03-17
基金项目: 江苏省"333高层次人才培养工程"基金资助项目; 国家 863计划项目(2007AA05Z207)
作者简介: 施卫东(1964—), 男, 江苏南通人, 研究员, 博士生导师(wdsh@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及工程研究.
颜品兰(1981—), 女, 江苏常熟人, 硕士研究生(yanpinlan_9@hotmail.com), 主要从事 ANSYS软件研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矩的复合载荷的轴的可靠性分析方法, 计算它的可靠性.

1 可靠性设计的基本原理及方法

1.1 基本原理

由强度理论可知, 假设在泵轴的使用过程中, 不允许应力超过强度极限的事件发生, 如果超过则认为失效, 判断的准则为

$$\sigma_{max} \geqslant \sigma_r$$

式中 σ_{max}为泵轴在使用过程中出现的最大应力; σ_r为材料的强度极限. 极限状态函数为

$$g(\boldsymbol{X}) = \sigma_r - \sigma_{max}$$

其中 $\boldsymbol{X}$ 为所有不确定量组成的向量, 如果 $g(\boldsymbol{X}) \leqslant 0$, 则判断为失效.

对泵轴进行可靠性设计[2,3], 实际上就是在将泵轴的强度极限、几何尺寸和载荷等参数设置为随机变量的条件下, 先求出 $g(\boldsymbol{X}) \geqslant 0$的概率数值, 然后根据该数值来完善泵轴的结构设计.

1.2 蒙特卡罗法

蒙特卡罗模拟技术是概率分析中最常用的传统方法, 它能模拟实际问题的真实行为特征. 一个仿真循环代表一个加工制造的零件, 该零件承受一个特定系列的载荷和边界条件的作用. 在 ANSYS中, 蒙特卡罗模拟技术可以选择直接抽样法或拉丁法进行抽样处理.

蒙特卡罗模拟技术的主要优点是对有限元模拟的适应性非常好, 无论什么样的实际物理模型, 都不需要输入参数的假设性条件限制 (当条件成立时模拟加速, 否则导致概率设计结果完全无效). 蒙特卡罗模拟技术的假设前提是, 确定模拟必须是正确的, 并且仿真循环的次数必须足够多, 这样得出的概率设计结果将总是正确的.

1.3 ANSYS及其 PDS模块

ANSYS集结构、热、流体、电磁和耦合场分析功能于一体, 功能体系完整强大, 在航空航天、军工、能源动力、船舶、车辆以及通用机械等各领域应用广泛[4]. ANSYS提供的 PDS技术 (Probabilistic Design System) 又称概率设计或可靠性设计, 是用来评估输入参数的不确定性对于系统输出的影响行为及其特性的一个模块[5]. 该技术主要应用于两种情况: 一是关心系统的可靠性; 二是用户对产品质量和可靠性的满意程度[6,7]. 其主要应用方向有[8-10]:

1)考察有限元模型的输入参数对有限元输出结果的影响, 包括 ANSYS计算的所有结果项的响应参数的置信度.

2)考察输入参数的不确定性决定响应参数的不确定性. 目标产品满足设计要求的概率及其工作失效的概率.

3)确定对于目标产品最容易引起其工作失效的输入参数. 响应参数对输入参数变化的灵敏度.

2 泵轴的可靠性设计

以 DLY 25—270/9—37型立式多级油泵的泵轴为例, 流量 $Q = 25\ m^3/h$, 总扬程 $H = 270\ m$, 单级扬程 $H_i = 30\ m$, 功率 $P = 37\ kW$, 转速 $n = 2\ 950\ r/min$, 轴的材料为 1Cr18Ni9Ti, 轴类零件的材料屈服强度极限 σ_r的均值和标准差应由大子样试验统计得到, 如有试验结果则可直接选用. 如没有试验统计结果, 则可参照常用国产材料的物理性能加以确定, 其材料强度极限 $\sigma_r = 520\ N/mm^2$. 油泵结构如图 1所示, 泵轴模型简化图如图 2所示.

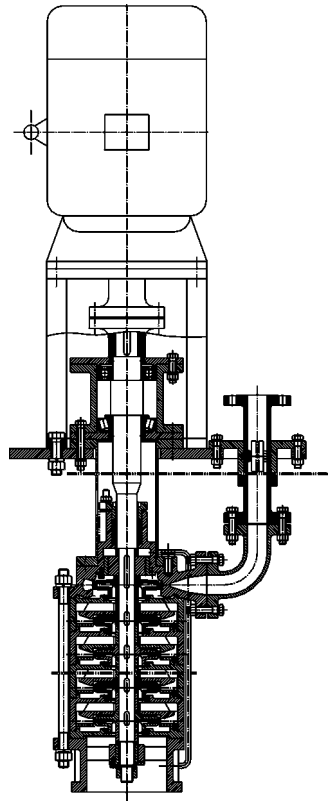

图 1 DLY25—270/9—37型油泵结构图
Fig. 1 Structure of DLY 25—270/9—37

首先使用 Pro/E建立该泵轴的三维实体模型并另存为 IGES文件, 然后将文件导入 ANSYS, 划分网格后, 施加载荷并求解, 计算得到泵轴应力分布, 泵

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轴的最大应力出现在轴段过渡处.

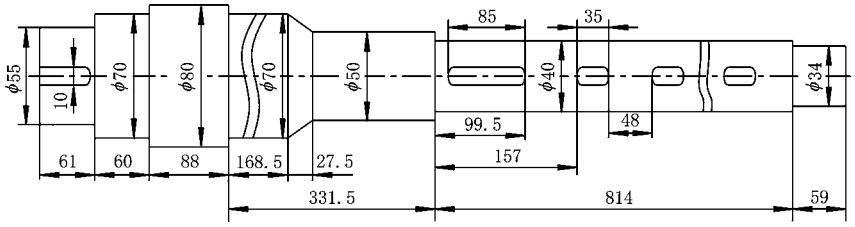

图 2　DLY25—270/9—37型泵轴模型简化图

Fig 2　Pump shaft model figure of DLY25—270/9—37

用命令提取最大节点等效应力, 并定义极限状态方程, 最后生成概率分析文件. 进入 ANSYS/PDS 进行可靠性分析, 读入概率分析文件, 随机输入变量统计值如表 1所示, 随机输出变量统计值见表 2

表 1　随机输入变量统计值

Tab 1　Statistics of random input variables

输入参数	均值	标准离差	偏离度	峰度	最小值	最大值
D_1	55	0.993	0.018	-0.211	52.53	57.46
D_2	70	1.014	-0.100	0.134	66.93	72.40
D_3	80	1.002	0.001	0.002	77.25	82.76
D_4	70	0.991	0.003	-0.188	67.66	72.62
D_5	50	1.002	-0.001	-0.005	47.37	52.64
D_6	40	0.994	-0.001	-0.165	37.49	42.48
D_7	34	1.000	-0.006	-0.009	31.31	36.33
F	67	1.001	0.004	-0.134	64.60	69.67
σ_r	520	1.999	-0.007	-0.005	514.50	524.70

表 2　随机输出变量统计值

Tab 2　Statistics of random output parameter

输入参数	均值	标准离差	偏离度	峰度	最小值	最大值
最大等效应力	94.25	107.4	2.289	5.581	13.64	582.3
$g(\boldsymbol{X})$	425.7	107.1	-2.274	5.761	-58.87	508.5

输入变量均设为正态分布类型, 其概率密度函数和分布函数曲线如图 3所示.

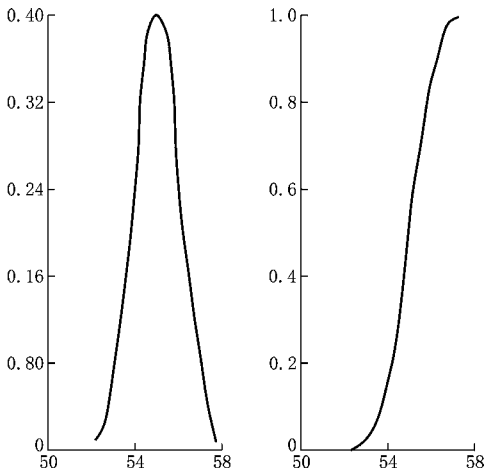

图 3　概率密度函数曲线

Fig 3　Curve of probability density function

选择蒙特卡罗方法来进行概率设计, 选择拉丁抽样方法, 模拟样本数为 100, 得到图 4所示的均值趋势图, 从图中可看出趋向相对平稳, 说明样本数目足够多.

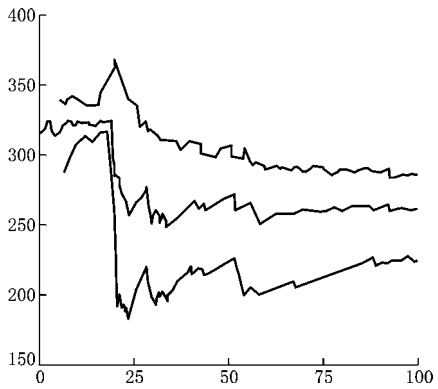

图 4　均值趋势图

Fig 4　Mean values of samples

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

经过计算分析后,可以查看极限方程小于 0,置信度为 95%时的概率.对于本算例的泵轴,在置信度为 95%的情形下,极限方程小于零的概率平均为 0.13%,由此可得出该泵轴的可靠度为 99.87%.

3 结 论

采用 ANSYS/PDS可靠性设计模块,根据工程实际,将泵轴的疲劳极限、几何尺寸以及载荷等定义为随机变量,采用蒙特卡罗法,以一根实际使用情况比较好的水泵主轴为例,计算得到了它的可靠性,达到了比较满意的结果.证明先将极限状态视为一个随机变量的概率统计分析过程,同时认为所设计的机械零件存在一定的失效可能性,然后通过 ANSYS/PDS定量地计算出零件在工作过程中的失效概率或可靠度的这种可靠性设计方法是可行的,具有一定的实际应用价值.

参考文献(References)

[1] 沈永娟,施卫东,张德胜.ANSYS二次开发在泵轴强度计算中的应用[J].排灌机械, 2007,25(4): 18-21.
SHENG Yong-juan, SHI Wei-dong, ZHANG De-sheng. Application of the development of ANSYS in calculating the shaft intensity of pumps[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(4): 18-21. (in Chinese)

[2] 熊珍兵,罗会信.基于 HyperMesh的有限元前处理技术[J].排灌机械, 2006,24(3): 35-38.
XIONG Zhen-bing, LUO Hui-xin. Preprocessing technology of FEA based on Hyper Mesh software[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(3): 35-38. (in Chinese)

[3] 叶 勇,郝艳华,张昌汉.基于 ANSYS的结构可靠性分析[J].机械工程与自动化, 2004, 127(6): 63-65.
YE Yong, HAO Yan-hua, ZHANG Chang-han. Probabilistic design of structure based on ANSYS[J]. *Mechanical Engineering and Automatization*, 2004, 127(6): 63-65. (in Chinese)

[4] 博弈创作室.ANSYS9.0经典产品高级分析技术与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社, 2005.

[5] Wei D, Rahman S. Structural reliability analysis by univariate decomposition and numerical integration[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2007(22): 27-38.

[6] Ching J, Beck J L. Real-time reliability estimation for serviceability limit states in structures with uncertain dynamic excitation and incomplete output data[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2007(22): 50-62.

[7] Chen Nianzhong, Guedes C. Reliability assessment for ultimate longitudinal strength of ship hulls in composite materials[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2007(22): 330-342.

[8] 刘善维.机械零件的可靠性优化设计[M].北京:中国科学技术出版社, 1993.

[9] 王东育.工程机械零件的可靠性优化设计[J].科技情报开发与经济, 2005, 15(20): 274-275.
WANG Dong-yu. The optional design of reliability for engineering mechanical parts[J]. *Sci/tech Information Development & Economy*, 2005, 15(20): 274-275. (in Chinese)

[10] 蒋德平,刘有平.可靠性理论在 GZB-1300型灌注泵泵轴中的运用[J].石油工业技术监督, 1998, 14(7): 58-59.
JIANG De-ping, LIU You-ping. Application of reliability theory in GZB-1300-infusion pump shaft[J]. *Technical Supervision of the Oil Industry*, 1998, 14(7): 58-59. (in Chinese)

(责任编辑 贾国方)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net