

基于 APDL 的多级离心泵泵轴强度有限元分析*

李 伟 施卫东 沈永娟 蒋小平 潘中永

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 基于 APDL 参数化设计语言开发了多级离心泵泵轴强度计算程序,通过调入自编模型程序的脚本文件,执行 SOLVE 命令进行计算,实现了零流量工况和设计点工况下泵轴的参数化自动建模、载荷施加与求解以及计算结果的三维参数化显示,清晰描述了泵轴在不同工况下不同截面上的应力分布情况及危险点位置,完成泵轴强度的精确计算。应用实例表明,设计的应用程序计算准确、操作简单,计算结果直观形象,大大提高了泵轴强度计算效率,减少了分析成本。

关键词: 多级离心泵 泵轴强度 APDL 语言 有限元分析

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0069-05

Finite Element Analysis of Shaft Strength of Multi-stage Centrifugal Pumps Based on APDL

Li Wei Shi Weidong Shen Yongjuan Jiang Xiaoping Pan Zhongyong

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to avoid the disadvantages of cumbersome, error-prone, long cycle of shaft strength calculation by traditional method, a multi-stage centrifugal pump shaft strength calculation program was developed based on parametric design language APDL. By transferring script file of the self model program and executing the command SOLVE to calculate, parametric automatic modeling, load application and solution, and the results of 3-D parametric display under zero-flow conditions and design point conditions were realized. The stress distribution of the shaft at different conditions on different sections and dangerous position were clearly described, and the accurate calculation of the shaft strength can be performed. Application examples showed that the design and development application program was used friendly and can get accurate calculations with visual results. This program of shaft strength calculation greatly improved the computational efficiency of shaft strength and reduced the analysis cost.

Key words Multi-stage centrifugal pump, Shaft strength, APDL language, Finite element analysis

引言

泵工作过程中,泵轴的强度、振动等直接关系到泵的运行稳定性和可靠性,甚至决定了整台泵的工

作状况和使用寿命。近年来随着水泵应用领域的扩展,工况条件愈加苛刻,对水泵动力性能及可靠性等提出了更高的要求,因而轴的强度计算问题显得尤其重要^[1~2]。由于多级离心泵泵轴在运转过程中的

收稿日期: 2011-08-28 修回日期: 2012-01-18

* 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011505)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏高等学校优秀科技创新团队计划资助项目(苏教科[2009]10号)、江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJD570001)和江苏省研究生创新计划资助项目(CX09B_196Z)

作者简介: 李伟,博士生,助理研究员,主要从事流体机械及工程研究,E-mail:lwjiangda@ujs.edu.cn

通讯作者: 施卫东,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail:wdshi@ujs.edu.cn

受力非常复杂^[3],通过传统手工完成的泵轴强度计算过程烦琐、易出错、周期长,且用到的各种参数及数据也缺乏有效管理。因此研究新的泵轴强度计算方法十分必要和迫切。

本文利用 ANSYS 的二次开发工具 APDL 对泵轴强度进行参数化有限元分析^[4-5]。

1 ANSYS 二次开发工具选择

ANSYS 为了满足用户的特殊需要,建立了开放的体系结构,提供了二次开发的接口 APDL(ANSYS parametric design language)、UIDL (user interfaced design language)和 UPFs(user programming features)等^[6-8]。APDL 参数化设计语言是进行 ANSYS 二次开发最常用的工具,而其中的参数、流程控制和宏则是其最重要的部分^[9-10];用户界面设计语言 UIDL 是编写 ANSYS 图形界面的专用语言;UPFs 允许用户将自己的 FORTRAN 代码连到 ANSYS 中去,或将 ANSYS 作为子程序调用,从而使 ANSYS 具备特殊的功能。

利用 APDL 的程序语言与宏技术组织管理 ANSYS 有限元分析命令,可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示,从而实现参数化有限元分析的全过程,大大提高分析效率,减少分析成本,是泵轴强度计算分析的合适工具。

2 泵轴强度计算 APDL 程序设计

进行泵轴强度有限元计算的程序框图和命令流如图 1 所示。

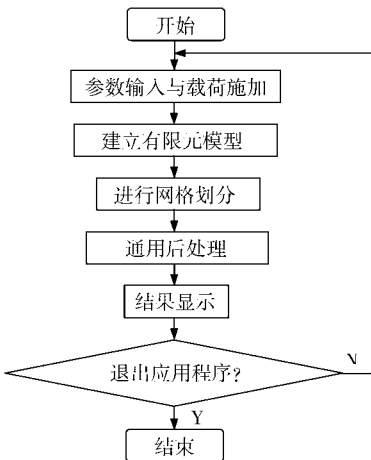


图 1 计算程序流程图
Fig.1 Flow chart of calculation program

利用 ANSYS 的操作命令写成程序序列并保存为 log 文件,用“/INPUT”命令读入 log 文件,依次执行文件中的每条命令,从而完成参数化的建模、网格划

分与控制、材料定义、载荷施加与边界条件设置以及结果显示,实现泵轴强度的有限元分析。

2.1 模型建立

通过自顶向下和自底向上相结合的方法,建立模型并确定了各受力面,编写各计算程序。在设计过程中把每一个值都进行参数化,利用 APDL 中人机交互的输入界面,让用户直接输入参数值,可以对不同的泵轴进行建模。在建模过程中简化了倒角和螺纹。

```
具体的自编程序如下：
！ 第一步 初始化 ANSYS 环境
FINISH
/CLEAR
/FILNAM, PUMPSHAFT
/TITLE, Static analysis of pump shaft
/TRIAD, LTOP
/PLOPTS, DATE, 0
.....
！ 各断面形成后定义各个约束点
* ASK, 1, first DOF long, 103.5
K,3001,0,D2/2,1
* ASK, m, second DOF long, 226.5
K,3002,0,D4/2,m
* ASK, r, third DOF long,1371.5
K,3003,0,D8/2,r
```

2.2 网格划分

泵轴选用 3-D 实体 SOLID92 四面体单元,每个单元体有 10 个节点。进行实常数定义及材料参数设置,在程序中定义了几种常用泵轴材料(如 45、1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9Ti 等)的参数,并假定材料是各向同性的;对于弹性材料,定义了弹性模量、泊松比等必要的参数。采用自由网格划分方式。

```
自编程序如下：
！ 实体定义
ET,1,SOLID92,
.....
* ENDIF
！ 网格划分
MAT,1
ET,1,SOLID92,
SMRTSIZE,4,
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3D
VMESH,ALL
```

2.3 施加载荷

对于泵轴而言,需要施加的是自由度约束和集

中载荷两类。支反力是由约束产生的,弯矩是由径向力和支反力产生的,并不是外部施加的力,所以在 ANSYS 分析中只要施加径向力、轴向力和扭矩这 3 类载荷。

为了简化计算,在定义载荷方向时,默认径向力为 Y 方向,轴向力为 Z 方向,叶轮进口方向为 Z 轴负向,即轴的末端为初级叶轮,轴的开始端为功率输入端。计算载荷的自编程序如下:

```
* ASK,n,'speed unit rpm',2950
* ASK,Q0,'quativity unit m^3/s',25/3600
.....
FK,2009,MZ,-Mn/i
FK,2010,MZ,-Mn/i
SOLVE
FIN
```

2.4 通用后处理

后处理数据主要来源于前处理和求解阶段的数据。若求解没有成功,则看不到任何求解结果。

在强度计算的后处理过程中,主要是显示轴的变形图、各种状态下的应力图等。读出各约束点的支反力,对节点的应力进行排序显示。从排序中可以看出应力最大的点,如果需要可以读取节点的应力值并进行强度计算。程序如下:

```
/POST1 ! 进入后处理
FILE,Result,log,
PLDISP,1
PLNSOL,S,EQV,0,1
.....
* ENDDO
FE,1,10000,1
FTCALC,1
FINI
```

3 多级离心泵泵轴强度有限元分析

以 DLY25-270-37 型多级离心泵为例,进行泵轴强度计算的有限元分析。泵性能参数如表 1 所示,从左到右泵轴直径及每段长度如表 2 所示。泵轴总长度为 1 455 mm,可分为 8 段,轴上有 10 个键,分别是电动机的连接端及 9 级叶轮安装处,每级叶轮间隔为 83 mm。另外,轴上共有 3 个支撑点,属于一阶静不定问题。

3.1 参数输入

程序执行后,首先调入计算模型程序的脚本文件,ANSYS 自动运行,通过弹出的单参数输入界面,输入泵轴段数后,单击确定按钮,弹出多参数输入界面,输入各段轴径和各段轴长。

表 1 泵主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters

参 数	流量 /m ³ ·h ⁻¹	扬程 /m	转速 /r·min ⁻¹	进口 直径 /mm	轮毂 直径 /mm	叶轮 外径 /mm	电动机 功率 /kW
数值	25	270	2 950	76	55	162	37

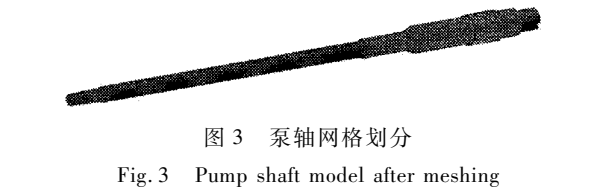
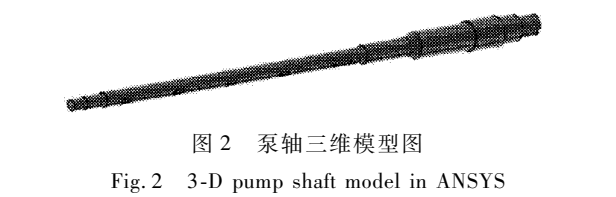
表 2 泵轴直径及每段长度

Tab.2 Shaft diameters and lengths of segments

直径/mm	30	34	40	50	70	80	70	55
长度/mm	41.5	59	814	135.5	196	88	60	61

3.2 模型建立及网格划分

完成参数输入后,系统自动建模。完整的泵轴模型如图 2 所示。模型建立后要进行单元属性定义及网格划分的属性定义,然后生成网格。划分后的网格如图 3 所示。



3.3 载荷施加与计算

施加载荷前先进行载荷的计算,选择静态分析和直接求解法。载荷计算结果如表 3 所示。

表 3 泵轴载荷计算结果

Tab.3 Pump shaft load calculation results

载荷	径向力/N	轴向力/N	离心力/N	扭矩/N·m
关死点工况	508.55	886.56	38.68	58.28
设计点工况	0	755.39	0.038	97.14

3.4 计算结果与分析

载荷加载完成后,执行 SOLVE 命令开始计算,获得不同工况下泵轴的变形如图 4 所示。经过开发程序对轴在静力条件下的应力计算,得到了不同工况点下泵轴的 3 个主应力图,清晰描述出了泵轴在不同工况下不同截面的应力分布情况。在两种不同工况下主应力的分布如图 5、6 所示。

通过数据和图形分析,可以找出最危险点,分别出现在 62 500 节点和 6 766 节点,如图 7 所示。

根据第三强度理论的基本假设:最大剪切力是

引起材料屈服的主要原因,可得到危险点 1 和 2 的相当应力 σ_{r3} ,根据第四强度理论的基本假设:畸变

能是引起材料屈服的主要原因,可得到危险点 1 和 2 的相当应力 σ_{r4} ,计算结果如表 4 所示。

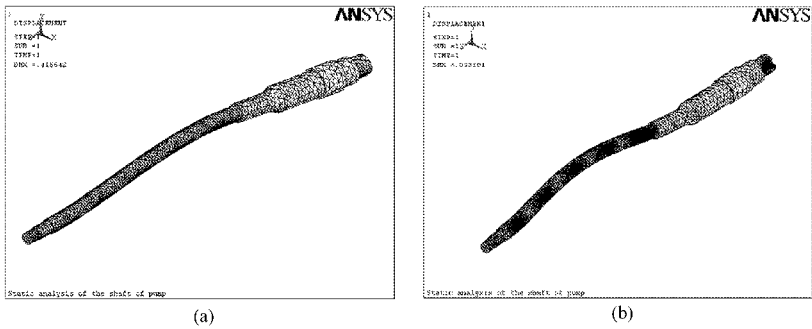


图 4 泵轴变形图
Fig. 4 Deformation of the pump shaft
(a) 关死点工况 (b) 设计点工况

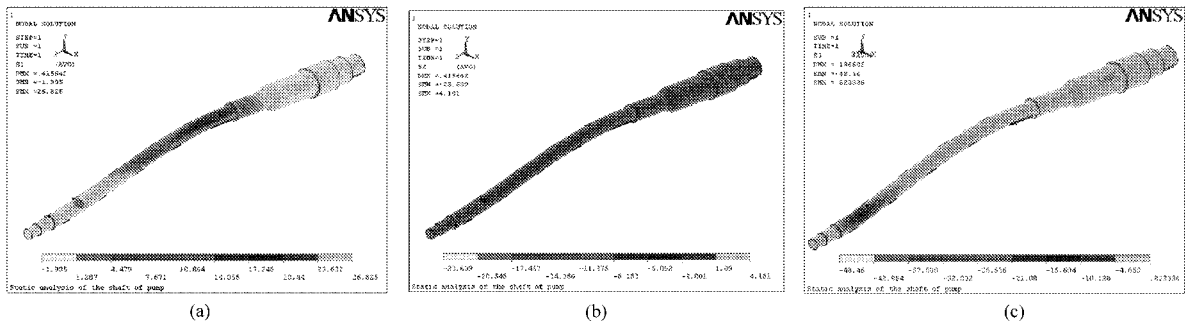


图 5 关死点工况下泵轴的主应力图
Fig. 5 Principal stress maps at zero-flow condition
(a) 第一主应力 (b) 第二主应力 (c) 第三主应力

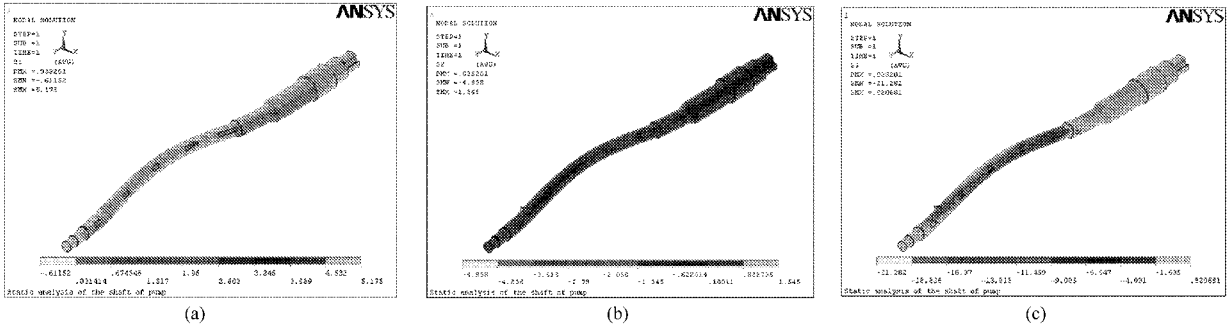


图 6 设计点工况下泵轴的主应力图
Fig. 6 Principal stress maps at design point condition
(a) 第一主应力 (b) 第二主应力 (c) 第三主应力

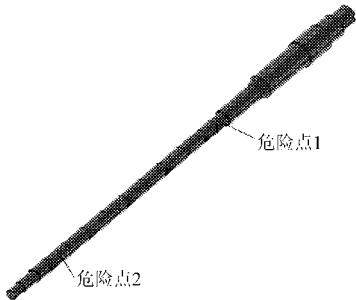


图 7 泵轴上的危险点
Fig. 7 Dangerous points on the pump shaft

该泵轴材料的许用应力为 450 MPa,从计算数据看,泵轴满足材料的静强度。在满足静强度要求时,再进行疲劳强度计算。从结果文件中读出关死点工况下疲劳系数为 1.1,最优工况下疲劳系数为 1.3,结果显示满足疲劳强度要求。

4 工程应用

对实际运行中的 DLY25-270-37 型多级离心泵进行测试,该泵在 2 950 r/min 工作转速下连续运行 5 个月,泵轴并未失效。拆开泵检查证实,在危

表 4 危险点相当应力

Tab. 4 Corresponding stress of the dangerous point

MPa

位置	关死点工况		设计点工况	
	σ_{r3}	σ_{r4}	σ_{r3}	σ_{r4}
危险点 1	342	335	125. 9	144
危险点 2	244	260	244. 0	259

险点 1、2 处,泵轴没有发现明显变形或裂痕,但泵轴中间支撑用的轴承有轻微磨损,由于是一阶不定问题,这可能与安装过程中泵轴的同心程度有关。实践证明,通过采用基于 APDL 语言开发的泵轴强度计算程序来分析泵轴强度的方法是可靠的,计算结果是准确的,具有一定的工程应用价值,可以广泛应

用于多级离心泵的设计和校核中。

5 结束语

利用 ANSYS 的二次开发工具 APDL 语言设计了多级离心泵泵轴强度计算程序,实现了关死点工况和设计点工况下泵轴的参数化自动建模、载荷施加与求解以及计算结果的三维参数化显示,完成了泵轴强度的精确计算。计算结果显示泵轴满足强度及疲劳强度要求,与工程实际应用结果一致。

应用本文方法进行泵轴强度校核,操作方法简单、具体,计算结果直观、形象,不仅可以看到不同工况下不同截面上的应力分布情况及危险点位置,还可以根据图形信息对逐个节点进行分析准确判断泵轴优劣。

参 考 文 献

1 Min-Chul Kim, Sang-Youn Bang, Ki-Won Lee, et al. Structural integrity assessment of the pump shaft assembly of the APRI400 reactor coolant pump [C]//Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division/K-PVP Conference, PVP2010-25941, Bellevue, Washington, USA, 2010.

2 施卫东,李伟,王准,等.水泵轴类零件强度校核的应用程序设计[J].江苏大学学报:自然科学版,2006,27(2):109~112.
Shi Weidong, Li Wei, Wang Zhun, et al. Design of strength calibration application program for pump shaft parts [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(2):109~112. (in Chinese)

3 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.

4 李红,王艳艳,夏长高,等.纸浆泵泵轴强度的有限元分析[J].中华纸业,2006,27(7):66~68.
Li Hong, Wang Yanyan, Xia Changgao, et al. A finite element analysis of the pulp pump shaft intensity [J]. China Pulp & Paper Industry, 2006, 27(7):66~68. (in Chinese)

5 Li Wei, Shi Weidong, Jiang Xiaoping, et al. Strength calculation software development and finite element analysis of pump shaft [C]//Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Hamamatsu, Shizuoka, 2011.

6 ANSYS Inc. ANSYS programmer's manual [M]. ANSYS Inc,2003.

7 张建业,杨甫勤,钱继锋.基于 APDL 和 UIDL 的 ANSYS 二次开发技术及其应用[J].中国制造业信息化,2006,35(23):79~81.
Zhang Jianye, Yang Fuqin, Qian Jifeng. Redevelopment and application of ANSYS based on APDL and UIDL [J]. Mie of China, 2006,35(23):79~81. (in Chinese)

8 龚曙光. ANSYS 操作命令与参数化编程[M].北京:机械工业出版社,2004.

9 白雪飘. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

10 徐学军.基于 APDL 根管预备器械力学分析及程序二次开发[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
Xu Xuejun. Mechanical performances of root canal instruments and parametric modeling based on APDL [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)

11 宫恩祥,黄铭科,巫建波,等.基于 APDL 参数化建模的轴系可靠性[J].排灌机械工程学报,2010,28(6):506~509.
Gong Enxiang, Huang Mingke, Wu Jianbo, et al. Probabilistic analyse of shaft based on APDL parametric modeling [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery, 2010,28(6):506~509. (in Chinese)