

多级泵级间导叶的优化与数值仿真

薛 睿, 李家文, 唐 飞

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 级间导叶是多级离心泵的重要组成部分, 对泵性能有重要影响。基于国内外研究提出了级间导叶的四种设计方法, 分别为改进径向式导叶设计法、四条流线包围流道设计法、中间流线矩形扫描法和中间流线圆形扫描法。为某多级液氢泵分别设计一种径向式导叶和四种流道式导叶, 验证了设计方法的可行性。对径向式导叶及四种流道式导叶进行了数值仿真研究, 结果表明中间流线圆形扫描法最优。

关键词: 级间导叶; 流道式导叶; 优化与仿真

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 05-0024-07

Optimization and numerical simulation for interstage crossover of multistage pump

XUE Rui, LI Jia-wen, TANG Fei

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The interstage crossover is an important component in multi-stage centrifugal turbopumps. It has a significant effect on the performance of pump. On the basis of investigating overseas' advanced configurations, four possible design methods for the vaned cross-over configuration are proposed. The cross-over region for a multistage liquid hydrogen pump is designed with these methods whose correctness is validated. Every configuration is analyzed with CFD. The Centerline Circle Section Method is the best one for reducing flow losses.

Keywords: interstage crossover; vaned crossover configuration; optimization and simulation

0 引言

由于氢氧发动机涡轮功率的 80%左右消耗在液氢泵上, 液氢泵的效率对氢氧发动机性能有很大影响, 特别是对于燃气发生器循环发动机和膨

胀循环发动机。这种高压液氢泵一般采用多级泵串联方案, 这样既可以减少叶轮的叶尖速度, 又可以增加级的比转速, 使多级泵的总效率有所提高。

级间导叶安装在前一级叶轮出口和下一级叶轮入口之间, 将前一级叶轮输出的液体扩压, 然

收稿日期: 2011-03-10; 修回日期: 2011-04-08

基金项目: 国家航天高技术项目

作者简介: 薛睿 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究领域为离心泵流场仿真及优化

后导入下一级叶轮入口。多级离心泵和单级离心泵的主要区别在于增加了级间导叶, 在设计和优化多级离心泵的过程中, 级间导叶应该是重点考虑的部件。

文献 [1] 给出了级间导叶的四种型式: 径向式导叶、流道式导叶、无正导叶的结构和空间导叶。本文基于某发动机两级液氢泵研究了径向式导叶和流道式导叶的设计方法, 通过数值仿真验证设计方法的可行性和优劣, 为后续优化设计提供依据。

1 径向式导叶与流道式导叶

1.1 径向式导叶

径向式导叶由正导叶、环形空间和反导叶组成。正导叶起压水室作用, 包括螺旋线部分和扩散段部分。环形空间的作用在于改变液流的方向。反导叶除起压水室作用 (降低速度、消除液体旋转分量) 外, 还起着把液体引入下级叶轮的吸水室。径向式导叶具有结构简单、轴向尺寸短的优点。

1.2 流道式导叶

径向式导叶为了降低加工难度, 正导叶和反导叶是独立的, 在正导叶和反导叶中间形成了一个没有叶片的区域, 这部分环形空间形状较复杂, 流体在流动过程中没有叶片约束。流体在环形空间的冲击、冲撞、旋涡的产生及其引起的阻力、径向速度环量的形成以及它们在反导叶中的消失和改变流动方向的水力损失等都消耗能量, 从而降低了泵的效率, 导叶中的能耗主要产生在环形空间。

在国外的研究工作中, 美国在先进液氢泵 (Advanced Liquid Hydrogen Pump) 的级间段设计中, 在 SSME/ATD 燃料泵上成功使用了流道扩散形式, 其特点是分为 13 个独立的流道, 这些流道的作用就是扩压和消除漩涡, 进而输送流体到下一级入口^[3]。欧洲的 VESCO 发动机 (后来改名为 VINCI 发动机) 两级液氢泵连续流道扩压级间段的设计方案可以提高氢泵效率 4%^[4-5]。

流道式导叶由于其进口部分和出口部分由有

叶片的通道连接成一个整体, 不存在径向式导叶的无叶片环形空间, 因此其水力性能比径向式导叶完善, 同样由于这个特点, 它比径向式导叶更难于加工。

2 流道式导叶设计方法

2.1 保角变换法

在扭曲叶片设计方法中, 保角变换法是一种很常用的方法。流面是个空间曲面, 直接在流面上画流线不容易表示流线形状和角度的变化规律。因此, 要设法把流面展开成平面, 在展开的平面上先画出流线, 再按预先作好的记号, 返回到相应的流面上, 这种将空间复杂的流线转换到平面上进行设计, 再返回空间获得空间流线的思路就是保角变换法的主要特征。

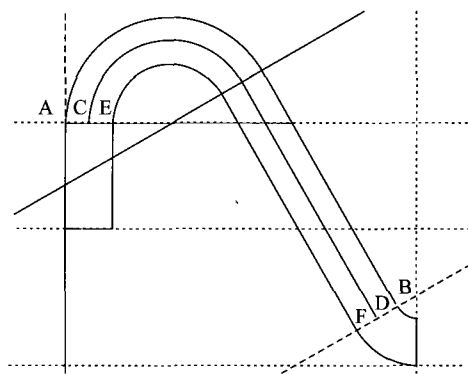


图 1 导叶轴面投影图

Fig. 1 Meridian projection of crossover

图 1 为导叶已知的轴面投影图, AB、EF 分别为前后盖板流面母线, CD 为中间流面母线, 将其绕旋转轴旋转一周即可得前后盖板流面和中间流面。现用一组夹角为 $\Delta\theta$ 的轴面和一组垂直轴线的平面去截流面, 使之在流面上构成小扇形格网, 并且令小扇形的轴面流线长度 Δs 和圆周方向长度 Δu 相等, 当所分的小扇形足够小时, 则可以把流面上的曲面扇形近似看作是平面上的小正方形。尽管流面上的小扇形从进口到出口有先增大后减小的变化规律, 但保角变换方法能保证空间流面上流线与圆周方向的角度不变, 因此将每一个小扇形格网编号存入数组, 即可获得与

编号相对应的平面坐标。空间流线的进、出口位置, 流线进口角出口角等参数也可转换为平面上的坐标、向量等参数, 从而实现在平面上进行流线设计, 完成后只须将各个点的坐标返回到空间格网编号, 即可获得流线上各点的空间坐标。图 2 为保角变换法方格网展开图。

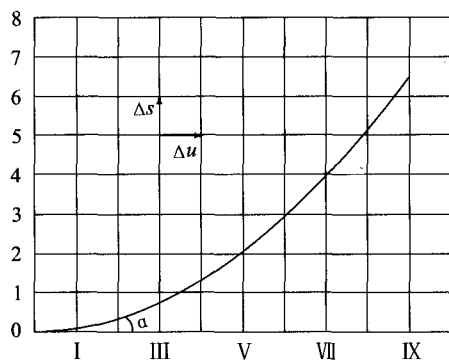


图 2 保角变换法方格网展开图

Fig. 2 Grid outspread plot of angle holding transforming method

2.2 流道式导叶的设计过程

欧洲的 VESCO 发动机液氢泵的级间导叶在进口部分采用了扩张段的设计, 使液流减速增压, 以较低的流速通过后面的流道, 能有效降低损失。在扩张段之后保持喉部截面矩形形状并以相同的截面面积变化规律进入转弯部分和出口部分, 实现改变液流方向、引导液流以轴向速度进入下一级叶轮的作用。经过分析发现, 由于液流速度与截面面积反相关, 在转弯部分使流道继续扩张, 有利于液流更通畅地通过转弯部分; 在出口部分使流道稍微收缩, 可以更好消除旋转分量, 稳定液流, 使出口流动更均匀, 有利于提高下一级叶轮进口流动条件。在同样的截面面积时, 圆形截面比矩形截面周长更小, 所以圆形截面的流道内壁面积更小, 可以减小摩擦损失。因此, 在参考国外多级泵级间导叶的设计方法的基础上, 本文提出改进设计方法, 获得以下四种流道式导叶。

(1) 保留径向式导叶的正导叶和反导叶的设计, 作为流道式导叶的第一、三部分, 然后用保角变换规律计算连接入口和出口的转弯部分叶片

的两个面, 一共四条流线 (每个流面两条), 每条流线的入口半径、入口角由正导叶出口决定, 而其出口半径、出口角则由反导叶入口决定, 用四条流线包围形成流道 (两个叶片加前后盖板约束) 从而获得完整的流道式导叶。对应每一条流线转到保角变换平面, 得已知条件有: 正导叶出口坐标 $(x_1, 0)$, 正导叶出口角 $f'(x_1)=k_1$; 反导叶入口坐标 $(0, y_2)$, 反导叶入口角 $f'(0)=k_2$ 。为使中间流线光滑连接正导叶出口到反导叶入口区域, 选用椭圆曲线, 目标函数为

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} - 1 \quad (1)$$

其中未知量为: x_0 、 y_0 、 a 、 b , 结合边界条件

$$\begin{cases} f(x_1)=0 \\ f'(x_1)=k_1 \\ f(0)=y_2 \\ f'(0)=k_2 \end{cases} \quad (2)$$

可解出所有未知参数, 得出一条流线在保角变换平面上的方程, 再按坐标变换规律转到空间即得一条空间流线。重复以上步骤完成一共四条流线的计算, 四条流线包围的区域形成转弯部分流道。本设计方法重在尽量延用现已非常成熟的径向式导叶设计经验, 保证流道式导叶进口和出口部分结构合理, 再在此基础上设计转弯部分, 利用保角变换法的保持空间流线与圆周方向夹角不变的特性, 确保转弯部分流道与进、出口部分流道光滑连接。

(2) 保留径向式导叶的正导叶设计, 作为流道式导叶的第一部分, 然后利用保角变换法计算从扩散段出口到流道式导叶出口的完整流道, 共由两个流面一共四条流线构成。正导叶出口部分参数与 (1) 相同, 同样已知: 正导叶出口坐标 $(x_1, 0)$ 和正导叶出口角 $f'(x_1)=k_1$, 与方法 (1) 不同的是, 这里没有使用径向式导叶的反导叶结构, 则转弯部分出口即为整个导叶的出口, 导叶出口坐标 $(0, y_2)$, 出口角取 90° , 其中 y_2 由导叶轴向长度和轴面投影图计算出。同样为了光滑连接转弯部分与正导叶出口, 且满足出口角为 90° 的约束, 选用椭圆曲线, 目标函数为

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^2}{x_0^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} - 1 \quad (3)$$

其中未知量为: x_0 、 y_0 、 b , 结合边界条件

$$\begin{cases} f(x_1) = 0 \\ f'(x_1) = k_1 \\ f(0) = y_2 \end{cases} \quad (4)$$

可解出所有未知参数, 得出一条流线在保角变换平面内的方程, 再按坐标变换规律转到空间即得一条空间流线。重复以上步骤完成一共四条流线计算, 四条流线包围的区域加上正导叶即构成完整的流道式导叶。该方法与 (1) 相比放弃了径向式导叶的反导叶段结构, 而从扩散段以后结构是一次性设计完成, 这种结构使整个流道式导叶更加连贯, 且外形易于约束, 但由于边界条件只关心转弯部分的进口和出口, 满足进出口约束, 要想改变流道中间部分结构, 必须对保角平面内设计流线做改变, 即修改目标函数形式, 导致中间部分截面面积变化规律等不易直接控制。

(3) 保留径向式导叶的正导叶设计, 作为流道式导叶的第一部分, 然后设计一条中间流线, 该流线起点为正导叶出口截面中点, 终点为整个导叶出口截面中点, 在保角变换平面中同样可以获得该条流线的两个端点约束, 以该条中间流线为扫描路径按照合适的面积变化规律展开成矩形流道, 从而获得完整的流道式导叶。流道出口截面参数可以通过泵参数及下级叶轮入口参数计算, 具体为: 导叶喉部速度

$$v_3 = Q / (z \times F_3) \quad (5)$$

其中 Q 为流量; z 为导叶叶片数, F_3 为扩散段进口面积; 导叶出口速度取

$$v_4 = (0.4 \sim 0.5) v_3 \quad (6)$$

出口面积

$$F_4 = Q / (v_4 \times z) \quad (7)$$

流道的空间形状由轴面图形状、流道截面面积变化规律和中间流线方程共同决定, 截面形状选取矩形, 中间流线方程确定以后, 流道截面面积变化规律就是关键设计因素。流道截面面积变化规律可以是直线、上圆弧线或下圆弧线 (如图 3

所示), 横坐标表示中间流线长度, 纵坐标表示流道截面面积。 F_1 为扩散段出口截面面积即转弯部分进口截面面积; F_2 为导叶出口面积。分别按 l_1 、 l_2 及 l_3 规律设计三种流道, 进行数值仿真研究发现, 截面面积按上圆弧线即 l_1 规律变化的流道损失最小, 因为当流道中线截面面积变化规律按上圆弧规律变化时, 在流道中部截面面积比按直线和下圆弧线规律变化时大, 这样在转弯部分流速较低, 能降低摩擦损失, 后来稍微收缩流道, 但从流道中部到出口截面面积变化不能太大, 这样有利于改善介质的流动条件^[9]。最终选定上圆弧型截面面积变化规律, 获得流道式导叶。

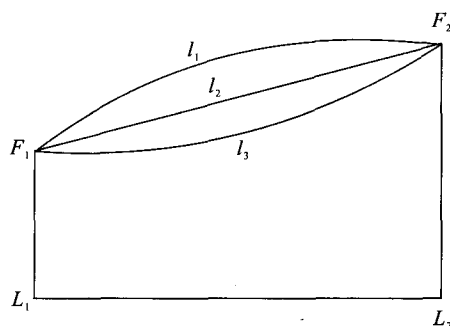


图3 流道截面面积变化规律

Fig. 3 Variation law of channel's section area

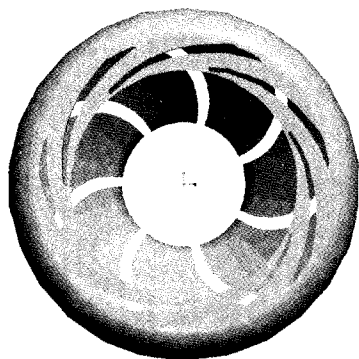
(4) 保留径向式导叶的正导叶部分结构获得进口段, 然后选择与方法 (3) 相同的中间流线条方程与截面面积变化规律, 截面形状选择圆形。为了使喉部的方形截面过渡到圆形, 先取一段中间流线做从方形到圆形的混合, 第 3、4 两种流道式导叶具有相似的面积变化规律和出口面积, 只是导叶 3 为矩形截面, 导叶 4 为圆形截面。

为进行对比分析, 对某液体火箭发动机的液氢泵用以上方法分别设计一种径向式导叶和四种流道式导叶, 进行数值仿真研究, 以讨论几种设计方法的可行性与优劣。

3 仿真计算与结果分析

3.1 级间导叶模型

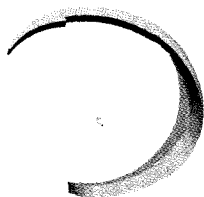
为进行数值仿真研究, 建立了如图 4 所示的流道模型。数值计算选用 RNG $K-\varepsilon$ 湍流模型。



(a) 径向式导叶



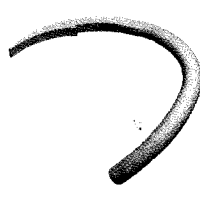
(b) 流道式导叶 1



(c) 流道式导叶 2



(d) 流道式导叶 3



(e) 流道式导叶 4

图 4 径向式导叶与四种流道式导叶模型

Fig. 4 Models of 1 radial diffuser and 4 continuous channel diffusers

3.2 径向式和流道式导叶计算结果分析

为了对径向式导叶和流道式导叶进行横向比较,考虑到四种流道式导叶中结构(1)与径向式导叶结构最为相似,因此选择流道式导叶(1)与径向式导叶仿真结果进行对比。图5为径向式导叶和方法(1)设计流道式导叶流道静压分布,这两种导叶在结构上进口和出口部分结构相同。径向式导叶在正导叶出口位置叶片背面有一个相对低压区,而在工作面是相对高压区,流体进入环形空间时流动规律复杂,而流道式导叶有光滑的单独通道,在转弯区域流体的冲击、冲撞、旋涡产生及其引起阻力造成的损失比径向式导叶小。

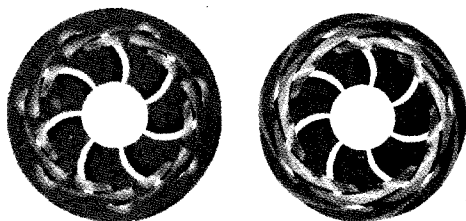


图 5 径向式导叶与流道式导叶静压分布

Fig. 5 Static pressure distribution of radial diffuser and continuous channel diffuser

图6为两种导叶从进口到出口总压变化曲线,其中曲线A代表径向式导叶,曲线B代表流道式导叶。比较两条曲线可以发现,流体在流出径向式导叶的扩散段进入环形空间后总压急剧下降,在此处损失较大,而流道式导叶总压相对平缓降低,说明有叶片的转弯空间能有效降低损失,最终径向式导叶总压损失大于流道式导叶。

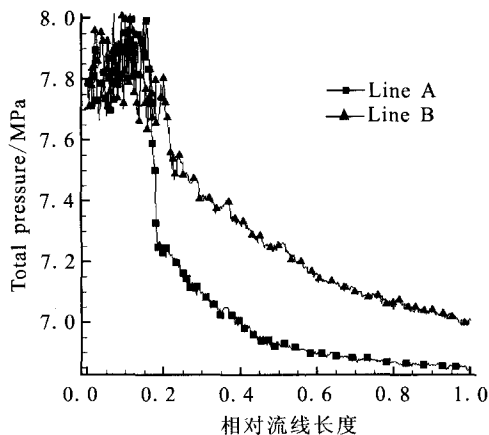


图 6 径向式导叶与流道式导叶总压变化规律

Fig. 6 Total pressure distribution of radial and continuous channel diffusers

3.3 四种流道式导叶的计算结果分析

图7为四种设计方法设计的流道式导叶静压分布图,从图中可以看出,结构(a)在出口部分压力梯度较大,在此处有局部回流现象,造成一定的损失,另外三种结构均较好实现了扩压导流作用,其中结构(d)由于扩散段矩形出口与之后圆形结构过渡流道设计困难,导致流动规律紊乱,造成一定损失,此处可以进行深入探讨以获得更优的流道式导叶结构。

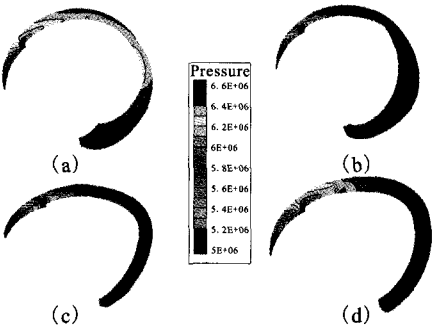


图 7 流道式导叶静压分布

Fig. 7 Static pressure distribution of continuous channel diffusers

图 8 是四种导叶工作过程中某一质点沿流动时总压从入口到出口变化曲线图, 其中曲线 A、B、C、D 分别代表流道式导叶结构 (1)、(2)、(3)、(4)。由图可见, 总压在入口部分保持相对稳定, 进入环形空间后开始持续下降。比较四条曲线可以发现, 结构 (1) 总压损失相对较大, 结构 (1) 中转弯部分与反导叶不能平滑过渡会造成额外的损失, 且可以得出径向式导叶出口段的设计经验用在流道式导叶中并不合适, 而用四流线方法和中间流线方法设计的矩形截面的流道损失相差不大, 考虑结构 (2) 是在前后盖板曲面上直接设计获得叶片, 而结构 (3) 在实际设计中还需对其进行局部修改以适合几何约束, 结构 (2) 在此较有优势。结构 (4) 损失最小, 因为对于同样过流面积, 圆形截面内表面积最小, 因此摩擦损失最低。

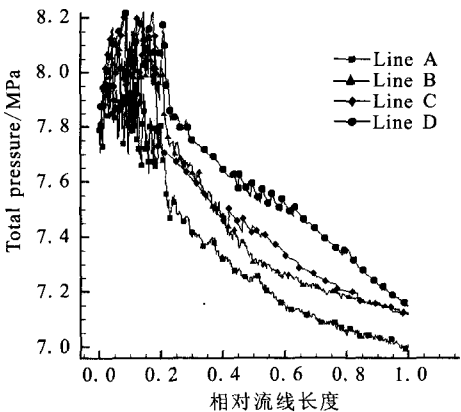


图 8 四种流道式导叶总压变化规律

Fig. 8 Total pressure distribution of continuous channel diffusers

五种导叶在相同进出口边界条件的设计工况工作条件下总压损失见表 1。可以看出, 径向式导叶总压损失最大, 圆形截面流道中间流线扫描法设计的导叶总压损失最小。

表 1 各导叶总压损失对比

Tab. 1 Total pressure losses of each configuration

导叶	总压损失/MPa
径向式导叶	1.004
流道式导叶 1	0.976
流道式导叶 2	0.946
流道式导叶 3	0.936
流道式导叶 4	0.927

4 结论

本研究获得以下结论:

- 1) 在考虑效率的前提下, 流道式导叶比径向式导叶更优, 因此在结构限制和制造工艺允许的条件下应尽量选用流道式导叶。
- 2) 保角变换法在扭曲叶片设计中是一种方便有效的方法, 可以用于流道式导叶的设计。但是由于流道式导叶的结构特点, 在用保角变换法设计时有较大误差, 在实际设计导叶时可以通过先计算一条中间流线再用一定面积变化规律以一定截面形状扫描中间流线获得流道的方法进行设计来控制此误差。
- 3) 流道截面面积变化规律相同时, 圆形截面流道的导叶比矩形截面的水力性能更优, 损失更小。

参考文献:

[1] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
[2] 李家文, 朱森元, 刘中祥. 多级液氢泵级间导叶的设计与改进[J]. 宇航学报, 2006 (5): 1072-1075.
[3] MINICK A, PEERY S. Design and development of an advanced liquid hydrogen turbopump, AIAA 98-3681[R]. USA: AIAA, 1998.

4.1 单元测试阶段

首先进行指令检测任务测试,以 tskEngine-SeqCmd 执行周期的测试为重点。在任务执行过程中插入数字量输出指令,并采用记录仪持续记录分析输出信号频率,应能观测到稳定的、周期为 2×7.5 ms 的方波。

其次进行状态机测试。对于每一个指令,构造指令信号,覆盖每一个状态,确认状态转换、状态处理过程无误。为了验证对异常信号的处理能力,在 FMEA 分析基础上,采用软件构造各种异常信号,通过指令模拟器发送执行,检查状态机对应的处理过程,将处理结果与预估结果比对确认。

4.2 组装测试阶段

激活指令执行任务 tskEngineAct,重复上述状态机测试过程。此阶段重点是确认指令检测过程和指令执行过程的协调性。

4.3 确认测试及系统联试阶段

对于每一个控制指令,监测指令执行过程和结果,分析控制系统软件发送的状态监测数据,反复确认指令检测、执行过程。

5 结束语

采用有限状态机设计的指令信号检测方法,能够可靠识别控制指令,且能有效屏蔽错误指令、干扰产生的伪指令、继电器触点失效产生的假指令等,为提高发动机工作状态控制的可靠性

创造了条件。有限状态机模型有助于解决复杂的实时性问题,值得推广。

参考文献:

- [1] (印度)卡莫尔 R. 陈曙晖等译. 嵌入式系统-体系结构、编程与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 王凌, 宋扬, 李国林, 等. 基于有限状态机的飞行器自毁系统时序控制设计[J]. 现代电子技术, 2009 (8): 8-11.
- [3] 杨瑞霞. 运用状态机提高嵌入式软件效率[J]. 单片机与嵌入式系统应用. 2009 (5): 20-25.
- [4] 李凌鹏, 孙文. 有限状态机在防空作战仿真中的应用[J]. 电光与控制, 2005 (5): 80-82.
- [5] 周新蕾, 刘正高. 航天软件可靠性安全性技术应用发展趋势[J]. 质量与可靠性, 2006 (3): 45-47, 53.
- [6] 杨军丽. 星载设备嵌入式软件可靠性仿真测试方法设计[D]. 北京: 中国科学院研究生院空间科学与应用研究中心, 2007.
- [7] CHAPMAN M. The final word on the 8051 [M/OL]. [2007-06-24]. <http://www.ebookee.net/The-Final-Word-on-the-8051>.
- [8] Texas Instruments. TMS320x281x DSP system control and interrupts reference guide [R]. USA: Texas Instruments, 2008.
- [9] Texas Instruments. TMS320 DSP/BIOS user's guide [R]. USA: Texas Instruments, 2004.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 29 页)

- [4] BOSSON R, GOIRAND B. Design of a high performance low cost hydrogen turbopump for VESCO engine, AIAA 99-2191 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [5] ALLIOT P, MARCHAL N, GOIRAND B, et al. The VINCI hydrogen turbopump development status, AIAA 2002-40 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [6] 马皓晨, 刘厚林, 关醒凡, 等. 双流道叶轮水力设计 CAD 中流道参数的确定[J]. 排灌机械, 2002 (2): 15-20.
- [7] 梁开洪, 曹树良, 陈炎, 等. 入流角对圆截面 90° 弯管内高雷诺数流动的影响[J]. 清华大学学报, 2009(12): 69-73.
- [8] GOIRAND B, GALLARDO J F, BOSSON R. VINCI hydrogen turbopump: a new step in safe, faster and cheaper developments, AIAA 2006-3156 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [9] KAUPERT K A. Comparison of a vaneless and vaned cross-over configuration for a cryogenic send-out pump, AIAA 2004-5629 [R]. USA: AIAA, 2004.

(编辑: 王建喜)