

基于 Bezier 曲线的涡轮叶片参数化造型及优化设计^{*}

MODELING AND OPTIMIZATION FOR TURBINE BLADES BASED ON BEZIER CURVE

张晓东^{**} 余世敏 龚彦 杨文武 周权

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

ZHANG XiaoDong YU ShiMin GONG Yan YANG WenWu ZHOU Quan

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

摘要 定、转子叶片的结构设计决定着涡轮钻具的工作性能。基于 Bezier 曲线理论方法,结合 Turbosystem 系统,提出了一套涡轮叶片参数化造型、性能预测到优化设计的完整数值模拟方法,并与试验数据对比验证了该方法的可行性。以 $\Phi 127$ 涡轮钻具为例,基于此数值模拟方法,根据速度场和压力场以及叶片输出特性对叶片进行了优化设计,结果表明,优化改善了涡轮叶片工作时压力面、吸力面的脱流和漩涡现象,输出扭矩平均提升了 $1.022 \text{ N} \cdot \text{m}$,效率平均提高了 6.14% ,涡轮钻具的整体工作性能得到改善。研究可为涡轮钻具叶片的设计和优化提供新的思路和科学依据。

关键词 Bezier 曲线 涡轮叶片 Turbosystem 系统 数值模拟 优化设计

中图分类号 TB126 TE921.2 TH122

Abstract The performance of turbodrill is determined by blade profile design. Based on Bezier curve, a complete numerical simulation method was proposed combined with Turbosystem, which was composed of blade modeling, performance prediction and optimization. Compared with test results, the numerical simulation method has been proved to be reliable. The turbodrill with diameter of 127 mm was taken for an example, to be optimized according to internal flow field and output characteristics. The simulation showed that the flow separation and vortex were decreased obviously under working condition, besides, the torque and efficiency were average increased $1.022 \text{ N} \cdot \text{m}$ and 6.14% respectively. Accordingly, hydraulic performance of turbodrill was improved. This study can provide a new perspective and basis for the design and optimization of turbodrill blades.

Key words Bezier curve; Turbine blades; Turbosystem; Numerical simulation; Optimization

Corresponding author: ZHANG XiaoDong, E-mail: zxd123420@126.com, Tel: + 86-28-83037223, Fax: + 86-28-83037223.

The project supported by the Open Funds of Key Laboratory of the Ministry of Education of Oil and Gas Equipment, Southwest Petroleum University of China (No. OGE201403-20).

Manuscript received 20140928. in revised form 20141029

引言

随着陆地油气资源开采的主战场转向深井、超深井领域,在高温、高压复杂地层,实现高效、可靠地钻进正面临着严峻的挑战。涡轮钻具作为一种不含橡胶元件、耐高温的井下动力钻具,自应用之初就备受重视,现已在多处油气田现场取得了良好的经济效益^[1-5]。作为涡轮钻具的核心组成部件,定、转子包含了许多复杂叶片,叶片的型线设计直接决定着涡轮钻具的使用性能,因此,涡轮叶片的结构设计至关重要。

得益于计算机技术的飞速发展,在理论设计方法

和试验的基础上,结合计算机辅助软件对涡轮叶片进行优化设计、性能预测的研究方法得到了众多学者的关注。早期,胡泽明等^[6]在一元流动理论基础上,利用 CAD 软件自主研发了一个软件包,对涡轮钻具叶片进、出口角进行了优化设计。随着理论方法研究的完善,目前,多数学者都基于二元、三元流动理论对涡轮叶片进行设计、优化,如:丁凌云等^[7]¹⁰⁹⁻¹¹⁰采用了专门的旋转机械造型设计软件对涡轮钻具叶片进行了造型设计;冯进等^[8]⁷¹⁻⁷²以 $\Phi 115$ 涡轮钻具为研究对象,运用 CFD 软件研究了跨叶片流道内的速度场和压力场;韩永志等^[9]提出了一种进行三维涡轮叶片气动优化

^{*} 20140928 收到初稿, 20141029 收到修改稿。石油天然气装备教育部重点实验室(西南石油大学)开放基金资助项目(OGE201403-20)资助。

^{**} 张晓东,男,1959年生,重庆涪陵人,汉族。西南石油大学教授及博士生导师,1995年获北京科技大学矿山机械专业硕士学位,主要研究方向为石油钻采设备新技术、现代设计理论与方法的教学及石油钻采工具,特别是井下动力钻具和井下工具的研发工作。

的多目标多约束方法;A. Mokaramian 等^[10]结合 CFD 软件模拟分析了用于连续油管的涡轮钻具涡轮性能;浙江大学学者结合 CFD 软件与 PIV 技术研究了叶轮机涡轮叶片的水动力学特性^[11]。尽管关于涡轮叶片设计的研究很多,但涉及参数化造型、性能预测到优化这一设计体系的研究较少,本文在 Bezier 曲线理论和 Turbosystem 系统的基础上,提出了一套涡轮叶片参数化造型、性能预测到优化设计的完整数值模拟方法,通过试验数据验证了该方法的可行性,并基于此方法对 F127 涡轮钻具进行了优化设计。

1 涡轮叶片造型设计

1.1 Bezier 曲线

Bezier 曲线^[12-13]早在 20 世纪 90 年代就形成了一套完整的理论方法,在几何造型设计方面有着强大的优势,特别是在汽车、航空等领域得到了广泛运用。给定空间 $n + 1$ 个控制点 $P_i(i = 0, 1, 2, \cdots, k)$, 这些控制点构成 n 阶 Bezier 曲线特征多边形,则此时 Bezier 曲线可表达为

$$P(u) = \sum_{i=0}^k P_i B_{i,k}(u) \tag{1}$$

式中, $0 \leq u \leq 1$, $B_{i,k}$ 为 k 次古典的 Bernstein 基函数

$$B_{i,k}(u) = C_k^i (1 - u)^{k-i} u^i = \frac{k!}{i!(k-i)!} (1 - u)^{k-i} u^i \tag{2}$$

可见,若知控制点的坐标和阶数就可以快速求出 Bezier 曲线拟合的叶片型线。

1.2 涡轮叶片造型

作为专业的旋转机械叶片交互式设计软件, BladeGen 为用户提供了一个直观且熟悉的设计环境。设计时,用户只需输入子午面流道参数和叶片典型的结构参数(见表 1)就可以快速设计出叶片模型。如图 1a 所示,本文采用三阶四控制点 Bezier 曲线用于涡轮叶片型线的设计,有四个控制点 $P_0、P_1、P_2、P_3$,理论上 $P_1、P_2$ 的坐标可以任意控制,由于叶片造型中叶型前缘几何角和尾缘几何角的约束^[12],故本文通过理论计算来确定控制点坐标。为方便计算,本文将叶片中弧线按如图 1b 布置,在二维坐标下,设控制点坐标 $d_0(x_0, y_0)、d_1(x_1, y_1)、d_2(x_2, y_2)、d_3(x_3, y_3)$, 其中 $x_1、x_2$ 主要控制最大挠度位置,最大挠度则由 y_1 决定。给定最大挠度位置 $x_1、x_2$ 和最大挠度值 y_1 ,由图 1b 可知, $x_0 = y_0 = y_3 = 0, x_3 = 1$, 由几何关系可得

$$y_2 = x_2 \tan(\alpha - \theta) \tag{3}$$

$$y_3 = x_3 \tan(\theta - \beta) \tag{4}$$

表 1 叶片主要几何结构参数
Tab. 1 Main parameters of blades

结构参数 Parameters	安装角 Stagger angle	进口结构角 Inlet structure angle	出口结构角 Outlet structure angle	前楔角 The leading angle	后楔角 The trailing angle
符号 Symbol	β_m	β_{1k}	β_{2k}	φ_1	φ_2
结构参数 Parameters	前圆半径 Leading radius	后圆半径 Trailing radius	相对节距 Relative pitch	叶片高度 Blade height	叶片数 Number of blades
符号 Symbol	r_1	r_2	t	b	z

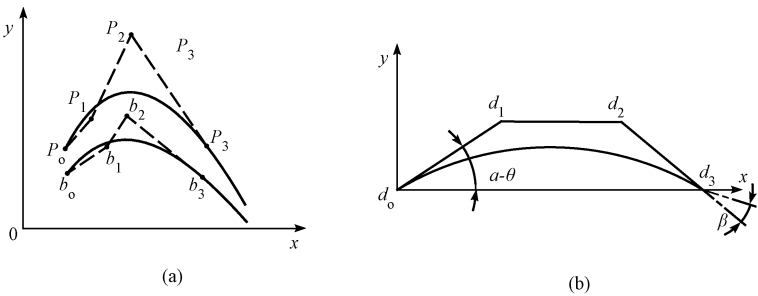


图 1 控制点与叶片型线
Fig. 1 Control points and Bezier curve

通过式(3)可得控制点坐标,从而可求出中弧线表达式

$$\begin{aligned} x(u) &= x_1 (1 - u)^3 + 3x_2 u (1 - u)^2 + 3x_3 u^2 + x_4 u^3, 0 \leq u \leq 1 \\ y(u) &= y_1 (1 - u)^3 + 3y_2 u (1 - u)^2 + 3y_3 u^2 + \end{aligned} \tag{5}$$

$$y_4 u^3, 0 \leq u \leq 1 \tag{6}$$

同样的方法,知道压力面和吸力面的四个控制点坐标,可求出吸力面和压力面曲线的表达式,分别如下

$$P_p(u) = (1 - u)^3 b_0 + 3u (1 - u)^2 b_1 + 3u^2 (1 - u) b_2 + u^3 b_3, 0 \leq u \leq 1 \tag{7}$$

$$P_s(u) = (1-u)^3 P_0 + 3u(1-u)^2 P_1 + 3u^2(1-u) P_2 + u^3 P_3, 0 \leq u \leq 1 \quad (8)$$

通过调整图中控制点的坐标,可修改、优化叶片吸力面和压力面曲线,进而对叶片进行参数化造型,得到的定、转子叶片三维模型如图 2 所示。

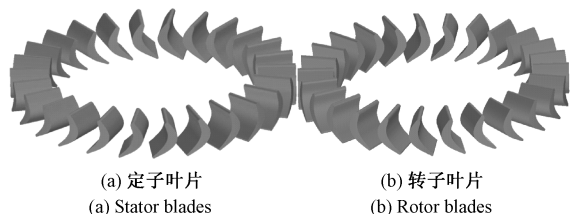


图 2 定、转子叶片三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of stator blades and rotor blades

2 涡轮叶片的数值模拟分析

基于 Bezier 曲线理论和 Turbosystem 系统,本文提出了一套涡轮叶片参数化造型、性能预测到优化设计的完整数值模拟方法,其具体流程如图 3 所示。Turbosystem 系统主要由 BladeGen、TurboGrid 以及 CFX-Turbo 三大模块组成。在 BladeGen 模块中,用户可以对叶片实现参数化控制,得到较好的参数化模型,为下一步 TurboGrid 得到高质量网格奠定基础。TurboGrid 是一款专门的旋转机械网格划分软件,具有自动化程度高、网格划分质量好、易于修改等特点,在旋转机械数值模拟中得到了广泛的应用^[14-16]。将 BladeGen 生成的叶片数目、叶片及轮毂和外罩等外形数据文件导入 TurboGrid 中,基于其特有的网格质量评价体系对网格进行改善、提高,可得到高质量的涡轮叶片三维流道网格模型,随后在 CFX-Turbo 模块中对涡轮叶片进行速度场和压力场分析,并得到叶片水力性能参数,将由 Turbosystem 系统分析得到的叶片水力性能参数与设计要求的性能参数进行比较,若不满足性能要求,则返回修改叶片型线,重复 Turbosystem 系统分析流程,直至得到满足性能要求的设计为止。

2.1 数值模型的建立

为了减小流体在入口与出口边界的流动与实际流动的差异,得到近似稳定解,特地的,在计算时将叶片流道入口和出口分别向上、向下延伸一定距离,为叶片高度的 2 倍^{[7]110}。将 BladeGen 生成的叶片数目、叶片及轮毂和外罩等外形数据文件导入 TurboGrid 中,经过修改、改善网格质量,得到的涡轮叶片三维流道网格模型如图 4 所示。

2.2 边界条件的设置

涡轮在工作时,认为流体是连续且非压缩的,流动时需遵循质量守恒和动量守恒定理。对于某一工况下的涡轮钻具来说,其流体介质为不可压缩的钻井液,密

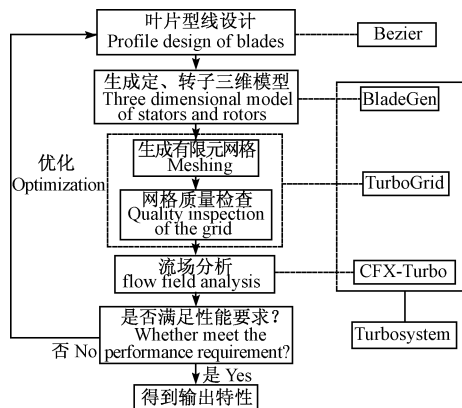


图 3 数值模拟方法流程

Fig. 3 Process of numerical simulation method

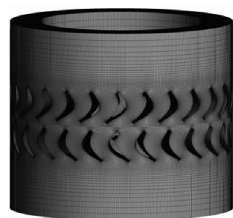


图 4 叶片三维流道网格模型

Fig. 4 Three-dimensional flow grid model of blades

度为常数,故其质量守恒方程为^[17]

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

由于 Navier-Stokes 动量守恒方程能比较准确地描述实际的流动,故在建立边界条件时,本文选用基于湍流模型理论的 Navier-Stokes 方程作为 CFX 求解的控制方程,使用 N-S 方程分析流场时需满足以下条件^[18]

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

其中, $R_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = 2\mu_i S_{ij} - \frac{2}{3}\mu_i \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho k S_{ij}$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right|$$

式中, R_{ij} 为雷诺应力张量, μ_i 为湍流黏性系数, k 为湍流动能, S_{ij} 为变形率张量。

在 CFX 求解过程中,转子旋转轴设置为 Z 轴,旋转方向为 Y 轴负方向,涉及到的边界条件包括:无滑移边界、周期边界以及进出口边界条件,见图 5。将轮毂、外罩、定转子前后缘、以及定转子壁面均设置为无滑移壁面边界条件;定转子周期边界条件设置为周期循环;在涡轮实际工作中,定子不旋转,转子旋转,它们之间的交界面有相互作用,则设置其交界面类型为 frozen rotor;在求解过程中,用清水替代实际采用的钻

井液,设置进口边界条件为质量流进口,出口边界条件为压力出口,定为一个标准大气压;采用湍流模型中的 $k-\varepsilon$ 模型,定义为中等湍流强度。

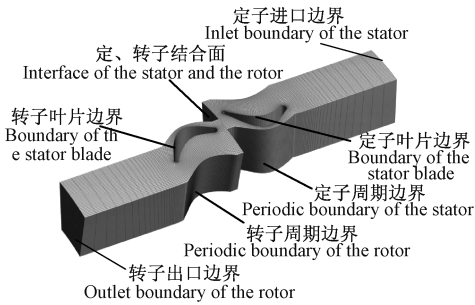


图 5 跨叶片流道计算模型
Fig. 5 Calculation model of flow across the blades

3 实例分析与试验验证

为了验证本文数值模型的可行性,进行了十级 F127 涡轮台架测试试验,以清水替代实际工况下的钻井液,在工作流量一定的情况下,测试涡轮在不同转速下的输出特性值,即扭矩 T 、压降 ΔP 、效率 η 等。然后以该试验涡轮叶片为基础,基于 Bezier 曲线建立涡轮叶片的参数化模型,将模型的外形数据导入 TurboGrid,待得到满足要求的网格后导入 CFX 进行三维流场分析。考虑容积损失和机械摩擦损失的影响,取容积效率和机械效率分别为 0.8 和 0.9^{[8]72-73},分析计算时,进口处的总质量流速为 16.8 kg/s,流体密度为 1 000 kg/m³,流体动力粘度为 8.899 × 10⁻⁴ N·s/m²。将其数值模拟结果与该涡轮台架测试结果进行了对比,结果如图 6 所示,数值模拟结果与测试结果一致性较好。可见,本文提出的数值模型可用于涡轮叶片造型、性能预测和优化设计。

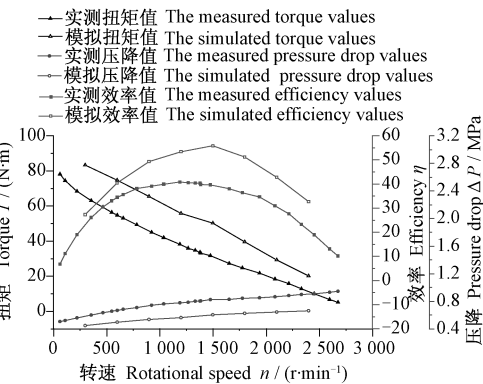


图 6 十级涡轮叶片计算结果与试验测试结果对比
Fig. 6 Comparison of computed result and experimental result of ten stages turbines

4 叶型优化

对初步设计的涡轮叶片进行数值模拟分析,根据叶片流场分布情况和输出特性,在 Turbosystem 里修改叶片结构参数(见表 1)、调整图 1 中的控制点坐标对叶片进行优化设计,并对其进行数值模拟及性能预测。图 7、图 8 分别是优化前后同一转速下的涡轮叶片在径向叶高 50% 处叶片截面的速度矢量图。

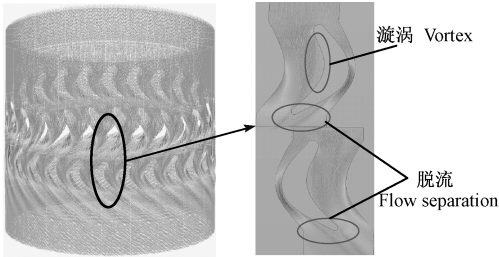


图 7 优化前涡轮叶片速度矢量图
Fig. 7 Diagram of velocity vector of turbine blades before optimization

由图 7 可知,流体进入涡轮后,分成两部分,一部分流向叶片压力面,另一部分则流向叶片吸力面。流向不同部位的流体对叶片表面的作用效果不一样,同样,在叶片不同位置的流体所呈现的流动特性也不相同。在叶片吸力面附近,速度变化明显,从叶片入口到出口,速度先增大后减小,并在靠近叶片最大厚度位置处速度达到最大值。在叶片压力面附近,速度变化趋于平缓,且出口处速度有增大的趋势。

但图 7 中,在定、转子吸力面接近尾缘处出现了流体脱流现象,在定子压力面上产生了漩涡。脱流和漩涡都会导致水力损失增大,从而影响涡轮工作性能。因此,在工程上,设计叶片时需尽量减小或避免脱流和漩涡现象的出现。

图 8 是优化后的叶片速度矢量图,流体速度分布得到改善,在吸力面附近无脱流现象,压力面上无漩涡存在,较好地改善了涡轮的工作状况。图 9 是优化前后转子叶片表面压力分布对比图,优化前的叶片吸力面和压力面两条压力线在前缘明显相交,优化后的叶

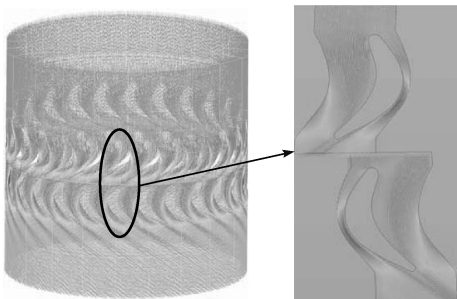


图 8 优化后涡轮叶片速度矢量图
Fig. 8 Diagram of velocity vector of turbine blades after optimization

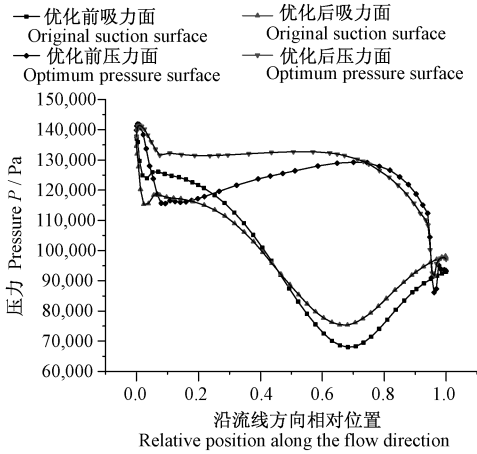


图9 某一转速下转子叶片表面压力分布对比
Fig.9 Comparison of surface pressure distribution of rotor blades under a certain speed

片压力线在前缘未相交,且优化后的叶片两条压力线围成的面积明显变大,可见,优化后的叶型优于优化前,输出扭矩增加,有效减少了水力损失。

涡轮钻具中最主要的工作元件是涡轮定子和转子,高压液体流过涡轮时,分别与定子和转子叶片相互作用,发生动量矩的改变,使液体能量转化为涡轮轴上的机械能。标志涡轮性能的参数有扭矩 T 、压降 ΔP 、效率 η 等,而涡轮钻具的特性主要是这些参数与转速 n 之间的关系。取一级涡轮叶片,对优化后的叶片模拟分析在不同转速下的涡轮的输出特性,与优化前的模拟数据进行对比,如图 10 所示。结果表明,优化后的叶片输出扭矩和效率明显较好,尽管优化后的压降稍微变大,但总体性能较好。

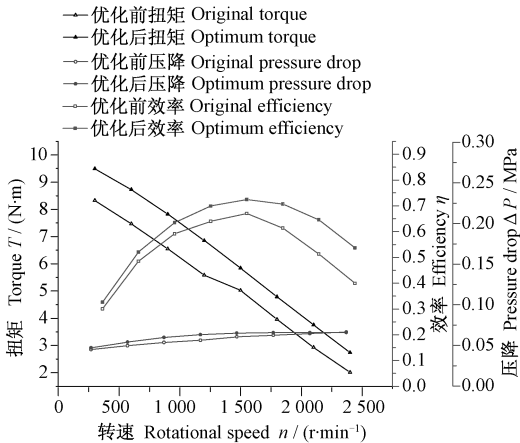


图10 优化前后单级涡轮叶片输出特性对比
Fig.10 Comparison of output characteristics of single stage turbine blades before and after optimization

5 结论

基于 Bezier 曲线和 Turbosystem 系统建立了涡轮叶片参数化造型、性能预测及优化设计的数值模型,通过与试验数据的比较,验证了数值模型的可行性,并根据速度场和压力场以及叶片输出特性,对叶片进行了优化,通过系统的研究,得出如下结论:

1) BladeGen 软件与 Bezier 曲线相结合的造型方法,在旋转机械造型方面具有很大的优势,可以节省大量的时间得到满足要求的模型,为涡轮叶片的造型提供了有力手段。

2) 本文提出的数值模拟方法可实现涡轮叶片从造型设计、性能预测到最终优化这一完整的数值模拟分析,与试验数据的对比验证了该数值模拟方法的可行性。

3) 基于 Bezier 曲线和 Turbosystem 系统的涡轮叶片参数化造型及优化设计方法改善了涡轮叶片工作时压力面、吸力面的脱流和漩涡现象,对于一级涡轮的输出扭矩平均提升了 $1.022 \text{ N} \cdot \text{m}$,效率平均提高了 6.14% ,可较好地改善涡轮钻具的工作性能,优化效果较好,可为今后涡轮叶片的优化设计提供新的思路和科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Jones, J. M., Bingman, W. E., Mitchell, et al. Experts Discuss Future of the Turbodrill [J]. SPE Journal, 1959, 03:14-18.
- [2] 杨世奇,薛敦松,蔡镜仑,等. 涡轮钻井技术的新进展 [J]. 石油大学学报:自然科学版, 2002, 26(3):128-132.
YANG ShiQi, XUE DunSong, CAI JingLun, et al. Progress and new development of turbodrilling technology [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2002, 26(3):128-132 (In Chinese).
- [3] 蒋金宝,孙 雪,赵国顺,等. 减速涡轮深部防斜打快技术 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 01:68-71.
JIANG JinBao, SUN Xue, ZHAO GuoShun, et al. Technology of deviation control and drilling fast by decelerating turbine in super-deep wells [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2011, 01:68-71 (In Chinese).
- [4] Peter Langille, Aron Deen, Jay Klassen. Minimizing Risks, Maximizing On-Bottom Drilling Time: Turbodrilling with Impregnated Bits Improves Efficiency and Circumvents Trouble Time, Southern Oklahoma. In: SPE/IADC conference on Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 2009:17-18.
- [5] Craig Staley, Greg Bruton, Chesapeake Energy, et al. Double Bend Turbodrill BHA Solves Build Section Challenges, Anadarko Basin. In: SPE/IADC conference on Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands, March 2011:1-3.
- [6] 胡泽明,刘志洲. 涡轮钻具涡轮叶栅的 CAD 优化设计 [J]. 石油学报, 1993, 14(1):109-115.

- HU ZeMing, LIU ZhiZhou. Optimization of turbodrill blades by means of CAD [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(1):109-115 (In Chinese).
- [7] 丁凌云,冯进,刘孝光,等. CFX-BladeGen 在涡轮叶片造型中的应用 [J]. 工程设计学报,2005,12(2):109-112.
- DING LingYun, FENG Jin, LIU XiaoGuang, et al. Application CFX-BladeGen in modeling turbine blade [J]. Journal of Engineering Design, 2005, 12(2):109-112 (In Chinese).
- [8] 冯进,张慢来,刘孝光,等. 应用 CFD 软件模拟 F115 mm 涡轮钻具机械特性 [J]. 天然气工业,2006,26(7):71-73.
- FENG Jin, Zhang ManLai, Liu XiaoGuang, et al. Application of CFD software to simulate the mechanical properties of F115 mm turbodrill [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7):71-73 (In Chinese).
- [9] 韩永志,高行山,尤莹,等. 三维涡轮叶片气动优化方法的研究 [J]. 机械强度,2008,30(1):63-67.
- HAN YongZhi, GAO HangShan, YOU Ying, et al. Study for aerodynamic optimization for turbine blade [J]. Journal of Mechanical Strength,2008,30(1):63-67 (In Chinese).
- [10] A. Mokaramian, V. Rasouli, G. Cavanough. Turbodrills Design and Performance Analysis for Efficient Drilling in Hard Rocks [J]. Petroleum and Mineral Resources,2012,81:121-132.
- [11] Chun-Yan Ge, Jia-Jun Wang, Xue-Ping Gu, et al. CFD Simulation and PIV Measurement of the Flow Field Generated by Modified Pitched Blade Turbine Impellers [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92:1027-1036.
- [12] 黄萍,安利平. 基于 Bezier 曲线的新型叶片造型技术研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究,2008,21(2):19-23.
- HUANG Ping, AN LiPing. Research of new blading technique using the bezier curve [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2):19-23 (In Chinese).
- [13] Damir Vucina, Zeljan Lozina, Igor Pehnec. Computational procedure for optimum shape design based on chained Bezier surfaces parameterization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(3):648-667.
- [14] Gao Hong, Lin Wanlai, Du ZhaoHui. Numerical flow and performance analysis of a water-jet axial flow pump [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(16):1604-1614.
- [15] M. H. Padzillaha, S. Rajoob, R. F. Martinez-Botas. Influence of speed and frequency towards the automotive turbocharger turbine performance under pulsating flow conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 416-428.
- [16] 刘安然,施晶,石祥钟,等. 基于 BladeGen 的混流水轮机转轮叶片优化研究 [J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(2):93-97.
- LIU AnRan, SHI Jing, SHI XiangZhong, et al. Optimization research for francis hydro turbine blade based on the BladeGen [J]. Journal of Hebei University of Engineering:Natural Science Edition, 2014, 31(2):93-97 (In Chinese).
- [17] 刘树红,吴玉林. 水力机械流体力学基础 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2007,39-50.
- LIU ShuHong, WU YuLin. Fluid mechanics foundation of hydraulic machinery [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. 39-50 (In Chinese).
- [18] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型 [M]. 南京:河海大学出版社,1987,23-66.
- Jin ZhongQing. Numerical solution and turbulence model of Navier-Stokes equation [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1987, 23-66 (In Chinese).