

文章编号:1000-582X(2004)02-0024-04

涡轮钻具新型叶片型线研究及其计算机辅助设计*

林元华^{1,2},曾德智¹,李润方²,黄万志¹,施太和¹

(1.西南石油学院石油管力学和环境行为重点实验室,四川南充 637001; 2.重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:分析了液体在涡轮钻具叶片表面流动规律,得出高效率涡轮钻具叶片型线设计应该满足的必要条件。由此提出了一种满足条件的叶片型线模型,并根据叶片的几何关系给出了数学模型的求解方法,为提高现有涡轮钻具的工作效率提供了一种参考叶型。并应用Pro/E进行了三维特征建模,基于这种参数化的模型,直接和高级语言编写的应用程序接口,可实现自动修改实体特征。在此基础上,编制了涡轮钻具叶片设计软件,实现了涡轮钻具叶片的自动设计,提高了涡轮钻具的设计质量和设计效率。

关键词:涡轮钻具;叶片;叶型;计算机辅助设计
中图分类号:TE821

文献标识码:A

随着我国国民经济的发展,油气资源的需求量日益增加,这就要求我们加大油气资源的开发力度,而我国油气钻井成本普遍偏高,建井周期较长。实践表明,使用涡轮钻具可以大大提高钻井速度,缩短建井周期。如图1所示,涡轮钻具利用高速高压泥浆冲击叶片,使其获得能量,从而带动与之相连的钻头旋转破岩。涡轮钻具主要由涡轮定子、涡轮转子、主轴、止推轴承、中部轴承、下部轴承和外壳组成。与其它钻具相比,涡轮钻具具有这样一些优点:高钻速、大扭矩的软特性;将能量集中在井底,驱动钻头旋转破岩;钻井时钻杆不动,减少了钻杆、套管的磨损及事故的发生。因此,涡轮钻井特别适合于水平井、定向井、丛式井及侧钻等作业。近年来,国外涡轮钻具钻井技术发展迅速,国外使用涡轮钻具钻井一般能节省钻时50%,节约成本1/3^[1]。我国涡轮钻具钻井也取得了一定的经济效益,但不够理想,因此有必要在我国研究和推广涡轮钻井技术。

涡轮钻具的叶片是为涡轮钻具提供动力的能量器官,因此,叶片的水力特性,决定了涡轮钻具的工作性能。现有涡轮钻具,大都存在转速高、扭矩较低的问题。并且,水力损失较大,特别在较高扭矩时,水力损失更大。这样,涡轮钻具的效率一般在50%~60%之间^[2-3]。因此,对涡轮钻具的叶片进行研究,提高涡轮钻具的转化效率十分必要。

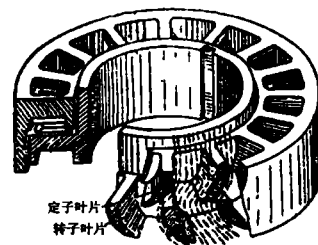


图1 涡轮钻具工作原理图

本文对涡轮钻具叶片进行了研究,分析了涡轮钻具效率损失的因素,通过研究叶片型线对流动的影响规律,指出了传统涡轮钻具叶片存在的不足,认为叶片型线上存在不连续的曲率是传统涡轮钻具效率低下的原因之一。因此,提出了以三次多项式构造叶型,并给出了求解方法及检验要求,并应用Pro/E对涡轮钻具叶片进行了参数化特征建模,编制了涡轮钻具叶片的自动设计软件。

1 液体在涡轮钻具叶片间流动的运动分析

1.1 涡轮钻具叶片几何特性

涡轮钻具叶片几何特性参数包括:型线、中弧线、弦线、弦长、楔角、出口边厚度 Δ 、额线、安装角、叶片距、叶片高度、相对节距、几何入口角和出口角,如图2所示。

* 收稿日期:2003-10-25

基金项目:中国石油天然气集团公司“九五”应用基础研究项目“钻具动力学研究及现场应用”(970409-01)

作者简介:林元华(1971-),男,四川人,西南石油学院副教授、博士,重庆大学机械传动国家重点实验室博士后研究人员,主要从事石油管、石油钻井工艺方面的科研和教学工作。

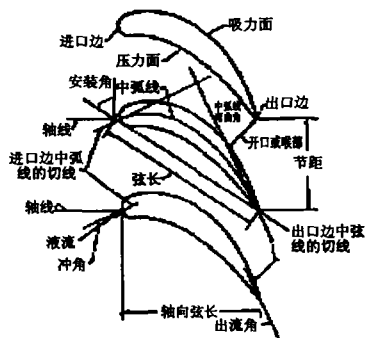


图 2 叶片几何参数图

1.2 水力损失与涡轮钻具叶片

1.2.1 附面层摩擦引起的损失

附面层中摩擦损失的大小与表面压力分布有密切的联系：若在叶型表面某一段沿液流方向压力降落较快，则液流受到加速，加速液流倾向于使附面层的厚度变薄，使摩擦损失减小。反之，加速较小的液流将使附面层增厚，从而使摩擦损失增加。

1.2.2 脱流引起的损失

流体沿叶片轴向的压力分布如图 3 所示^[4]。脱流的边界情况如图 4 所示^[4]， x 为沿固体表面方向坐标， y 为法线坐标， u 为 x 方向的速度。叶片表面的前部分，液流加速流动，压力梯度 $dp/dx < 0$ ，为顺压区；叶片表面的后部分是液流减速区，压力梯度 $dp/dx > 0$ ，为逆压区。降压的叶片边界层所具有的速度分布没有脱流的危险，没有脱流损失；由式^[5] $\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = g \frac{dp}{dx}$ 可知，负的 dp/dx 对应负的 $\partial^2 u / \partial y^2$ ，即有 $\partial^2 u / \partial y^2 < 0$ ，所以比存在一个 $\partial^2 u / \partial y^2 = 0$ 的点，它就是叶栅边界层速度分布的拐点，因此，在逆压梯度区中可能发生脱流，导致脱流损失。

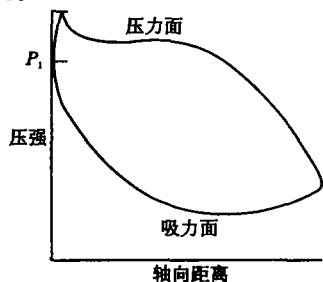


图 3 流体压力分布图

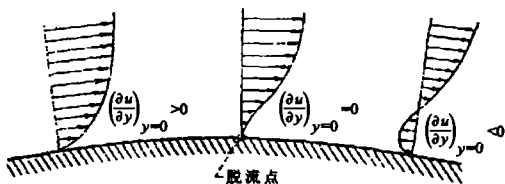


图 4 液体脱流

1.2.3 端部损失

由于叶片流道内叶型内弧上的压力大于背弧上的

压力，在此压差作用下，经流道的液流要产生从内弧向背弧的横向流动。实验表明，凡是能使横向压力梯度增加的因素都会造成端部损失增加。

综上所述，当液体的速度梯度和压力梯度不平稳时，流体的能量损失增加。因此，设计涡轮钻具叶片时一般希望叶片表面的速度和压力分布应平稳变化。为了研究叶片型线对流体在叶片中流动规律的影响，建立如图所示的二维正交曲线坐标系。如图 5 所示，流场内 P 点的坐标为 (x, y) ， x 表示沿叶片表面以 O 为起点的弧长， y 为 P 点沿叶片壁面法线到壁面的距离，对应方向的速度用 u 和 v 表示。这样，由不可压缩流定常边界层流动的基本运动方程式^[5]，可得

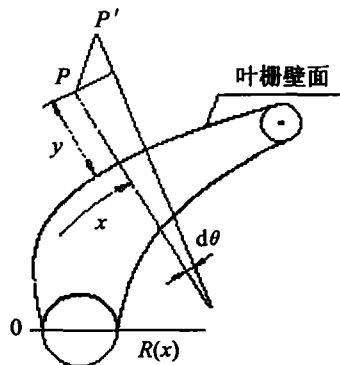


图 5 叶片边界层正交曲线坐标系

质量守恒的连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(1 + \frac{y}{R} \right) v \right] = 0 \quad (1)$$

边界层动量方程为：

$$\begin{aligned} \frac{Ru\partial u}{(R+y)\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{uv}{R+y} = -\frac{R\partial p}{(R+Y)\rho\partial x} + \\ v \left[-\frac{R}{R+y} \frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{R\partial u}{(R+y)\partial y} + \right. \\ \left. \frac{R\partial v}{(R+y)\partial x} - \frac{u}{(R+y)^2} \right] \quad (2) \\ \frac{Ru\partial v}{(R+y)\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{u^2}{R+y} = -\frac{\partial p}{\rho\partial y} + \\ v \left[-\frac{R\partial^2 u}{(R+Y)\partial x\partial y} - \frac{R\partial u}{(R+y)^2\partial x} + \left(\frac{R}{R+y} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \right. \\ \left. \frac{R}{(R+y)^2} \frac{dR}{dx} \left(\frac{u}{R+y} + \frac{y\partial v}{(R+y)\partial x} \right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

式中： ν —流体的运动粘度； p —压力； ρ —流体的密度； R —叶片壁面上某点的曲率半径。

1.3 涡轮钻具叶片型线对流动参数的影响

通过对涡轮钻具叶片的边界层流动分析可知，在叶片参数中，边界曲率半径 R 对流动参数有较大影响。边界曲率半径 R 通过影响叶片表面附近的速度和压力分布来改变叶片流道内的流场。一般情况下，叶片表面的速度和压力分布变化平稳时，流体的损失较小，由式(1)、(2)和(3)可知，要使叶片表面的速度

和压力分布变化平稳,即速度梯度和压力梯度连续可导,这就要求叶片表面型线须具有连续的曲率导数。设叶片型线为 $y = f(x)$, 则其曲率为^[6]

$$C = \frac{1}{R} = \frac{y''}{[1 + (y')^2]^{3/2}} = \frac{f''}{[1 + (f')^2]^{3/2}} \quad (4)$$

要保证叶片表面具有连续的曲率导数,其必要条件是叶片表面型线具有三阶导数,即

$$C' = \frac{f'''[1 + (f')^2] - 3(f'')^2 f'}{[1 + (f')^2]^{5/2}} \quad (5)$$

在传统的叶片型线构造中,压力面和吸力面曲线有圆弧线、抛物线、双纽线、对数螺线等曲线。在这些型线中,由单一的方程曲线形成的型线一般不能满足叶片进口角、出口角及叶片流道连续收缩的要求。因此,传统型线设计主要采用组合型线,由式(5)可知,各种曲线的组合显然不能满足连续曲率的要求。因此,按传统型线设计的涡轮钻具水力损失较大,效率较低。

2 涡轮钻具叶片造型新方法

2.1 叶片型线设计

叶片型线应具有连续曲率,这是选择叶片型线的原则之一。为了构造满足几何参数要求的叶片型线,高阶多项式是主要选择对象。下面以三次多项式为型线方程进行叶片造型设计。

2.1.1 数学模型的建立

令叶片的压力面和吸力面型线分别为 $Y_p = f(X)$ 和 $Y_s = g(X)$ 他们具有如下形式:

$$Y_p = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (6)$$

$$Y_s = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 \quad (7)$$

其一阶导数为:

$$Y'_p = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2$$

$$Y'_s = b_1 + 2b_2x + 3b_3x^2$$

设压力面上第一点的坐标和一阶导数分别为 $(x_{p1}, y_{p1}), y'_{p1}$ 。最后一点的坐标和一阶导数分别为 $(x_{pn}, y_{pn}), y'_{pn}$ 。吸力面上第一点的坐标和一阶导数分别为 $(x_{s1}, y_{s1}), y'_{s1}$ 。最后一点的坐标和一阶导数分别为 $(x_{sn}, y_{sn}), y'_{sn}$ 。将这些坐标和一阶导数分别代入以上各式即可得压力面型线方程组和吸力面方程组为

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{p1} & x_{p1}^2 & x_{p1}^3 \\ 1 & x_{pn} & x_{pn}^2 & x_{pn}^3 \\ 0 & 1 & 2x_{p1} & 3x_{p1}^2 \\ 0 & 1 & 2x_{pn} & 3x_{pn}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{p1} \\ y_{pn} \\ y'_{p1} \\ y'_{pn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{s1} & x_{s1}^2 & x_{s1}^3 \\ 1 & x_{sn} & x_{sn}^2 & x_{sn}^3 \\ 0 & 1 & 2x_{s1} & 3x_{s1}^2 \\ 0 & 1 & 2x_{sn} & 3x_{sn}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{s1} \\ y_{sn} \\ y'_{s1} \\ y'_{sn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.1.2 数学模型的求解

求解上述线性方程组,即确定待定系数的值。建

立坐标如图6所示,以叶片前缘线为Y坐标,以叶片距的一半, $t/2$ 处为原点,沿轴向为X方向建立坐标系。叶片前缘和后缘的圆心坐标分别为 O_1 和 O_2 , 前缘圆 O_1 与Y轴相切于d点,后缘额线与圆 O_2 相切于k点,弦线分别切圆 O_1 和圆 O_2 于f点和h点, y_s 和 y_p 表示吸力面和压力面上某点的Y坐标,记前、后缘半径分别为 r_1, r_2 , 叶片入口角和出口角为 β_{1k} 和 β_{2k} , 安装角为 β_m , 前缘楔角 $\angle BAC$ 记为 φ_1 , 后缘楔角 $\angle FEG$ 记为 φ_2 。

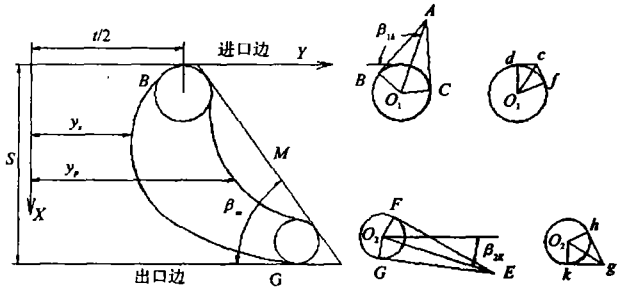


图6 叶片坐标关系图

1) 定前缘和后缘的圆心坐标

首先确定前缘的圆心坐标,然后再导出后缘的圆心坐标。选取圆心 O_1 的坐标为

$$x_{o1} = r_1$$

$$y_{o1} = \frac{1}{2}t$$

则切点f的坐标为

$$x_f = x_{o1} - r_1 \cos \beta_m$$

$$y_f = y_{o1} + r_1 \sin \beta_m$$

圆心 O_2 的坐标为

$$x_{o2} = s - r_2$$

$$y_{o2} = y_f + (s - x_f) \cot \beta_m - r_2 \cot(\beta_m/2)$$

切点h的坐标为

$$x_h = x_{o2} - r_2 \cos \beta_m$$

$$y_h = y_{o2} + r_2 \sin \beta_m$$

2) 确定吸力面和压力面上第一点的坐标及其导数

吸力面第一点B的坐标及导数为

$$x_{s1} = x_{o1} + r_1 \cos(\beta_{1k} + \varphi_1/2)$$

$$y_{s1} = y_{o1} - r_1 \sin(\beta_{1k} + \varphi_1/2)$$

$$y'_{s1} = \text{ctg}(\beta_{1k} + \varphi_1/2)$$

上式中, r_1, φ_1 分别是关于 x_{s1} 和 y_{s1} 的参变量,以下各式中有关 r, φ 均视为参变量。

压力面上第一点C的坐标及导数为

$$x_{p1} = x_{o1} - r_1 \cos(\beta_{1k} - \varphi_1/2)$$

$$y_{p1} = y_{o1} + r_1 \sin(\beta_{1k} - \varphi_1/2)$$

$$y'_{p1} = \text{ctg}(\beta_{1k} - \varphi_1/2)$$

3) 确定吸力面和压力面上最后一点的坐标及导数吸力面最后一点G的坐标及导数为

$$x_{sn} = x_{o2} + r_2 \cos(\beta_{2k} - \varphi_2/2)$$

$$y_{sn} = y_{o2} - r_2 \sin(\beta_{2k} - \varphi_2/2)$$

$$y'_{sn} = \text{ctg}(\beta_{2k} - \varphi_2/2)$$

压力面最后一点的坐标及导数为

$$x_{pn} = x_{o2} - r_2 \cos(\beta_{2k} + \varphi_2/2)$$

$$y_{pn} = y_{o2} + r_2 \sin(\beta_{2k} + \varphi_2/2)$$

$$y'_{pn} = \text{ctg}(\beta_{2k} + \varphi_2/2)$$

将以上计算数据代入方程组即可解出叶片型线的方程。

2.1.3 检验要求

由此解出叶片型线不一定能满足型线设计要求,正确的型线方程还应满足在吸力面曲线上曲率必须同号,在压力面曲线和吸力面曲线上不能有拐点,吸力面和压力面构成的流道应该连续收缩。如果型线不满足要求,应修改叶片的叶型参数,重新设计叶片型线,直到满足要求为止。

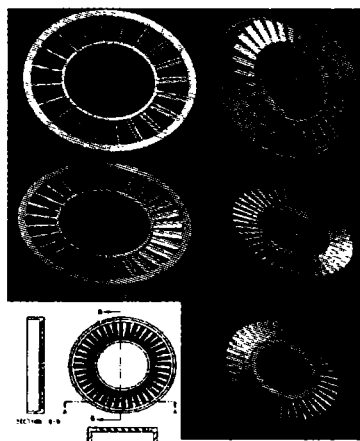


图 7 定子转子在不同参数时的实体图及工程图

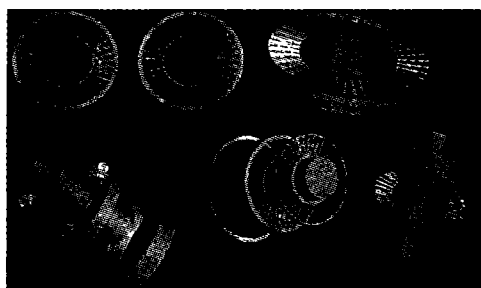
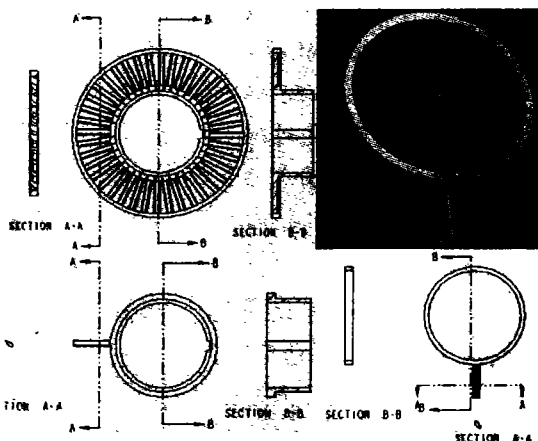


图 8 单级涡轮工作部分零件及装配图

3 涡轮钻具叶片造型软件

软件由四部分组成:叶片进出口工作角设计模块,能对提出的涡轮钻具工作性能要求自动进行工作角度的设计计算;解析造型模块,根据工作角等叶片几何参数绘出叶片形状,并作初步检验;数据接口及存储模块,自动存储到 Excel 工作表,并实现各模块之间的数据接口;三维实体造型模块,首先建立涡轮钻具的实体特征,再修改 Pro/E 的 Pro/Program 程序,并使之与数据模块接口,自动生成新的实体特征,基于该实体可自动获得平面工程图;性能参数计算模块,根据各数据计算出涡轮钻具的理论工作参数。这四部分相互独立,可实现相互之间的数据传递,采用了 VB 制作,操作界面友好。

2.2 涡轮钻具叶片实体特征建模

对于涡轮钻具涡轮造型,首先建立基准面和基准坐标系,再根据计算出的已知涡轮钻具叶片几何参数,画出涡轮钻具叶片,然后作出涡轮轮缘,再建立涡轮转子和定子的实体模型,再作出涡轮钻具中心轴连接键和外壳。这样,就完成了涡轮钻具的部分零件,针对每一个零件可作出对应的工程图。最后,将所得的零件装配起来就得到涡轮钻具工作部分的实体模型,如图 7、图 8 所示。并利用了 Pro/E 的二次开发工具 Pro/Program 与高级语言接口,通过人机交互的方法来控制系统参数、特征出现和特征的具体尺寸,使设计自动化程度大大提高。

4 结论

1) 指出了传统涡轮钻具叶片型线的不足是造成涡轮钻具效率低下的原因,进而指出高效率涡轮钻具叶片叶型应满足的必要条件,认为叶片型线须具有连续的三阶曲率导数,提出了一种高效率的叶型模型,并给出其求解的方法,为提高现有涡轮钻具提供了一种参考叶型。

2) 利用 Pro/E 的特征建模技术,将计算数据与 Pro/E 的 Program 接口,使设计自动化。

3) 编制了设计软件,实现了涡轮钻具的计算机辅助设计,φ240 型涡轮钻具的设计实例表明,该软件能较好地应用于工程实践,所采用的设计方法可提高涡轮钻具的设计质量和设计效率。

参考文献:

- [1] 符彦惟. 涡轮钻井技术与新型涡轮钻具的产业化[J]. 石油矿场机械, 2001, 2: 1-5.
- [2] 石油矿场水力机械教材编写组. 石油矿场水力机械[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [3] W. 台拉斯波尔斯基. 井下液动钻具[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [4] A. J. 格拉兹曼. 涡轮设计与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [5] 刘惠枝. 边界层理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [6] 王元. 数学手册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.

(下载 39 页)

The Application of P80C552 Microcontroller in Microwave Remedial Instrument

GU Xing-zhi, ZOU Jian, PAN Ying-jun

(The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems under the State Ministry
of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper states the application of a microcontroller (P80C552) that has ADC internally using on the Microwave Remedial Instrument, briefly introduces the composing principle and function of the instrument, and further describes in detail the design of the system's software and hardware. At the same time, the paper describes some components of the Microwave Remedial Instrument, and the basic and the new functions of the microcontroller (P80C552). The intelligent automatic control system makes the instrument more stable and reliable via controlling the Microwave Remedial Instrument intelligently. The testing result shows that this design is realizable.

Key words: microcontroller; microwave - remedial - instrument; hardware; software

(编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第27页)

## On the New Blade Shape of the Turodrill and Its CAD

LIN Yuan-hua<sup>1,2</sup>, ZENG De-zhi<sup>1</sup>, LI Run-fang<sup>2</sup>, HUANG Wan-zhi<sup>1</sup>, SHI Tai-he<sup>1</sup>

(1. Southwest Petroleum Institute, Sichuan Nanchong 637001, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Based on the research on the motion law of the drilling fluid along the blade, the necessary condition of the blade shape for a high efficiency turbodrill is obtained. Hence a mathematical model how to design a blade shape has been put forward, and the solution method of the model is obtained, which helps to design a high efficiency turbodrill. What's more, a 3 dimension model of the blade has been set up using Pro/E software, which can link with the advanced computer language by a interface routine and modify the 3 - D blade model automatically. Based on the theory, a software has been compiled to design the blade automatically, which can improve the design efficiency and the design quality of the turbodrill.

**Key words:** turbodrill; blade; blade shape; CAD

(编辑 张小强)