基于CAD系统的离心泵叶轮轴面投影绘型

王艳艳，李　红，季柳金
（江苏大学，江苏 镇江 212013）

摘要：在CAD系统中，离心泵叶轮的轴面绘型一般均采用试凑法，即通过反复的数据修改给出轴面流线而得到轴面绘型．这种设计方法使设计存在一定的盲目性．针对上述问题，结合离心泵优秀水力模型，利用数理统计的方法对不同比转数的优秀水力模型的流道中线进行了统计分析，并利用非线性回归对统计结果进行了处理，拟合出了平均比转数与流道中线上点的函数关系．在此基础上，采用 $F-L$ 曲线的给定方法，推导了前后盖板流线的方程，从而给出了轴面绘型的全过程．经实例验证，该方法是可行的，并且具有较高的实用价值．

关键词：离心泵；叶轮；轴面投影；CAD；流道中线；$F-L$ 曲线；数理统计
中图分类号：TH311　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-6254(2006)03-0005-04

Research based on CAD system of drawing meridional plane in impeller of centrifugal pump

WANG Yan-yan, LI Hong, JI Liu-jin
(Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The method of drawing the centrifugal pump impeller meridional plane in the CAD system is by trying and collecting, that to say is, by modify the data again and again to adapt the design. This method causes blindness. In this article, the author puts forward to the method of flow path center line to design impeller from the flow path center line of excellent hydraulic model, and meanwhile using mathematics statistic and non-linear regression to deal with the data. The function between the numbers of average n_s and the points of flow path center lines can be obtained. On this foundation, the $F-L$ curve and educe the equation of front and behind blades were deduced, which provides the whole course of drawing meridional plane. Examples show that method is feasible and has very high practical value.

Key words: centrifugal pumps; impeller; drawing meridional plane; CAD; flow path center line; $F-L$ curve; mathematics statistic

离心泵叶轮的结构是复杂的，不管是二维造型还是三维造型，其绘型的好坏直接影响到整个离心泵的水力性能．二维造型是三维造型的基础．在二维造型过程中应用CAD的二次开发工具可以更好地优化绘型结果．

基于CAD软件的叶轮轴面绘型是进行叶轮造型的关键步骤之一，基于一元理论的叶轮轴面绘型的方法有：①先绘制前后盖板流线，再绘制流道中线，即用直线和圆弧给定前盖板流线和后盖板流线，通过反复校核 $F-L$ 曲线（液流过水断面面积变化规律曲线）求出流道中线，最后绘出后盖板流线和前盖板流线；②先给定流道中线，然后根据实际要求给定 $F-L$ 曲线，最后求出前后盖板流线[1,2]．这两种方法都有准确性差，精度低，计算繁琐费时，容易

收稿日期：2006-03-16
基金项目：江苏省科技计划资助项目（BM2002805）
作者简介：王艳艳（1980-），女，河北衡水人，硕士研究生，主要从事中高浓度纸浆泵总体设计及数值模拟．

受到人为因素的影响,具有很大的盲目性等缺点,因此很难保证设计叶轮的质量.

针对上述问题,本文对离心泵叶轮的轴面绘型原理进行了深入的研究,在方法②的基础上,利用现有优秀水力模型的流道中线统计方法结合 CAD 二次开发工具来设计模型流道中线,经过实例验证了其可行性与实用性.

1 流道中线数学模型的建立

对已有的优秀水力模型[3]的流道中线进行了统计分析,在此基础上利用非线性回归拟合建立了流道中线上的点与比转数之间的函数关系.

1.1 数学模型构造原理

轴面流线绘制原理如图 1 所示[4], R_2 代表叶轮出口半径, L_x 代表叶片轴向长度, L 代表流道中线最下端距轴线的距离, L_y 代表流道中线垂直参考线;以 BC 作为参考轴,将 L_y 平分为 10 段,作水平线,将它们与流道中线的交点距参考轴的距离分别定为 L_0, L_1, L_2,…,L_{10}.

从图 1 可知,确定某一特定比转数的流道中线,需知 $L_x,R_2,L,L_0,L_1,L_2,\cdots,L_{10}$,而 R_2 在水力计算时便可确定,又 $L_y=R_2-L$,从而流道中线的求取可通过 $L_x,L,L_0,L_1,L_2,\cdots,L_{10}$ 这些量得到.

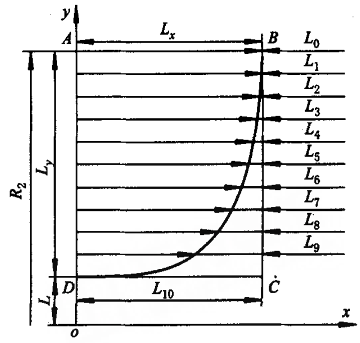

图 1 数学模型构建原理图

1.2 基于统计理论的数学模型

将不同的优秀水力模型均作如图 1 处理,可得到相应的 $L_x,R_2,L,L_0,L_1,L_2,\cdots,L_{10}$ 的值,以这些值为变量,以所对应的比转数为自变量,利用统计的方法即可得出 $L_x,R_2,L,L_0,L_1,L_2,\cdots,L_{10}$ 与比转数之间的函数关系. 为了处理方便,本文对 $L_x,L,\frac{L_0}{L_x},\frac{L_1}{L_x},\frac{L_2}{L_x},\cdots,\frac{L_{10}}{L_x}$ 的值进行了统计,统计结果见表 1[4].

表 1 统计数据列表 %

平均比转数	L/mm	L_x/mm	L_0/L_x	L_1/L_x	L_2/L_x	L_3/L_x	L_4/L_x	L_5/L_x	L_6/L_x	L_7/L_x	L_8/L_x	L_9/L_x	L_{10}/L_x
200.00	41.30	58.00	0.00	0.00	0.17	1.03	3.97	8.79	15.86	25.52	38.97	58.62	100.00
186.50	35.00	53.30	0.00	0.19	0.47	1.13	2.44	5.07	9.47	16.60	27.49	44.65	100.00
167.50	36.45	60.50	0.00	0.00	0.08	0.33	1.74	4.05	8.10	14.30	23.88	39.50	100.00
143.00	28.40	52.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	2.31	6.15	12.88	32.08	40.00	100.00
130.83	39.35	51.27	0.00	0.23	0.52	0.91	1.62	3.26	6.73	13.07	23.67	41.38	100.00
125.50	27.80	47.50	0.00	0.11	0.21	0.63	1.47	3.89	7.68	14.32	25.05	42.53	100.00
119.00	32.83	56.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	2.27	5.53	11.42	21.95	40.15	100.00
93.20	22.74	40.48	0.00	0.25	0.54	0.84	1.28	2.37	4.64	9.54	19.17	37.06	100.00
85.20	25.95	45.50	0.00	0.00	0.33	0.99	1.98	5.05	8.46	14.95	26.04	44.40	100.00
79.00	23.00	46.35	0.00	0.32	0.65	0.97	1.29	2.37	4.21	8.95	18.66	36.89	100.00
66.20	20.58	47.42	0.00	0.34	0.76	1.10	1.43	1.94	3.29	7.00	15.48	32.86	100.00
60.50	13.35	34.50	0.00	0.43	0.87	1.30	1.59	2.03	2.61	5.51	14.93	34.06	100.00
46.33	16.50	36.73	0.00	0.46	0.90	1.55	1.91	2.45	3.46	5.80	12.88	30.41	100.00
33.13	16.20	35.30	0.00	0.76	1.89	2.75	3.68	4.62	5.58	7.00	10.48	23.88	100.00

根据表1中的数据,以平均比转数 n_s 为横坐标,分别以 $L_x,L,\frac{L_0}{L_x},\frac{L_1}{L_x},\frac{L_2}{L_x},\cdots,\frac{L_{10}}{L_x}$ 的值为纵坐标,作散点图. 结果如图 2 所示.

根据散点图,选取二次函数、指数函数和幂函数等形式作回归函数,其非线性回归的结果如表 2 所示[4].

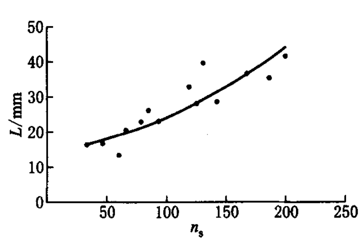

图 2 $L-n_s$ 散点图

表2　回归函数表

名称	拟合函数方程	相关系数
1	$y=4.0\times10^{-7}x^2-0.0001x+0.0105$	0.7817
2	$y=1.0\times10^{-6}x^2-0.0003x+0.0248$	0.8160
3	$y=2.0\times10^{-6}x^2-0.0005x+0.0391$	0.8100
4	$y=3.0\times10^{-6}x^2-0.0008x+0.0536$	0.7689
5	$y=4.0\times10^{-6}x^2-0.0008x+0.0618$	0.6503
6	$y=5.0\times10^{-6}x^2-0.0006x+0.0614$	0.7451
7	$y=0.0476e^{0.0075x}$	0.7955
8	$y=0.0119x^{0.6262}$	0.8607
9	$y=0.0791x^{0.3444}$	0.7828
L_1	$y=-0.0006x^2+0.2752x+25.796$	0.7828
L	$y=0.1495x+9.985$	0.8922

1.3　修　正

流道中线是由一些关键的离散点构成的,由于所用的优秀水力模型在设计方面有所差异,回归函数所得曲线有曲折不圆滑的情况,故需修改. 经分析后笔者给出L_2,L_4,L_6的修正函数:对于L_2,当$n_s\geqslant100$,L_2 = 回归函数所得值 $\times L_x-[0.1+(n_s-100)\times0.005]$;对于$L_4$,当$n_s\geqslant60$,$L_4$ = 回归函数所得值 $\times L_x-[0.1+(n_s-60)\times0.01]$;对于$L_6$,当$n_s\geqslant150$,$L_6$ = 回归函数所得值 $\times L_x+[0.1+(n_s-150)\times0.02]$.

2　$F-L$曲线的给定

$F-L$曲线的变化规律一般有两种,一种是高抗汽蚀情况,另一种是高效率情况.

假设模型具有高抗汽蚀性能[3],则$F-L$曲线为抛物线型分布,此时先利用二次函数拟合$F-L$曲线,再利用插值的方法求出半径的变化规律. 但由于实际设计叶轮时考虑高抗汽蚀性能极少,本文不予讨论.

假设模型具有高效率,则$F-L$曲线呈线性分布,设入口和出口过水断面面积为F_1和F_2,l为流道中线的全长,F_i和l_i为流道中线上某一点(x_i,y_i)的过水断面面积和弧长(如图3所示),则有下面关系式成立:

$$F_1=\frac{\pi}{4}(D_0^2-d_h^2) \tag{1}$$

$$F_2=\pi D_2b_2 \tag{2}$$

$$F_i=\frac{F_2-F_1}{l}l_i+F_1 \tag{3}$$

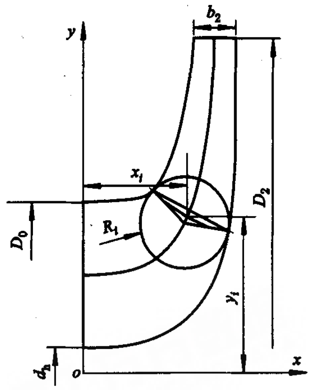

图3　轴面流线的基本参数

用$2R_i$近似代替过水断面线的长度,则:

$$F_i=2R_i\times2\pi y_i=4\pi R_iy_i \tag{4}$$

从而得到半径变化规律:

$$R_i=\frac{4D_2b_2l_i+(D_0^2-d_h^2)(l-l_i)}{16y_il} \tag{5}$$

式中D_0为叶轮进口直径,D_2为叶轮出口直径,b_2为叶轮出口宽度,d_h为轮毂直径.

3　前后盖板流线数学模型的建立[6]

单参数曲线簇的包络线其一般方程式为

$$\begin{cases}F(x,y,\lambda)=0\\F_\lambda(x,y,\lambda)=0\end{cases} \tag{6}$$

对于圆簇来说,以(x_i,y_i)为圆心,R_i为半径的圆簇方程为

$$F(x,y,\lambda)=(x-x_i)^2+(y-y_i)^2-R_i^2=0 \tag{7}$$

设x_i,y_i,R_i均为λ的函数,随λ的变化而形成圆簇,即存在下面的关系式:

$x_i=x_i(\lambda)$;$y_i=y_i(\lambda)$,$R_i=R_i(\lambda)$

式(7)对λ求导得

$$F_\lambda(x,y,\lambda)=2(x-x_i)(-\frac{dx_i}{d\lambda})+2(y-y_i)(-\frac{dy_i}{d\lambda})-2R_i\frac{dR_i}{d\lambda}=0$$

化简得

$$x-x_i=\frac{(y-y_i)\frac{dy_i}{d\lambda}-R_i\frac{dR_i}{d\lambda}}{\frac{dx_i}{d\lambda}} \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)中,整理得

$$\left[\left(\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2\right](y - y_i)^2 +$$

$$2R_i\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}\lambda}\frac{\mathrm{d}R_i}{\mathrm{d}\lambda}(y - y_i) + R_i^2\left[\left(\frac{\mathrm{d}R_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2 - \left(\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2\right] = 0 \tag{9}$$

解式(9)得

$$y = y_i + \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{10}$$

前盖板取“+”;后盖板取“-”.

式中 $a = \left(\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)^2$

$$b = 2R\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}\lambda}\cdot\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\lambda}$$

$$c = R_i^2\left[\frac{\mathrm{d}R_i}{\mathrm{d}\lambda} - \left(\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}\lambda}\right)\right]$$

对于叶轮的前后盖板流线来说,$x_i = x_i(\lambda)$,$y_i = y_i(\lambda)$,$R_i = R_i(\lambda)$ 的关系式,由流道中线的形状和过水断面面积的变化规律确定,因此由式(10)即可求得前后盖板流线.

4 运行实例

通过下列算例,证明了本方法的可行性以及实用性.

4.1 原始参数(见表3)

表3 原始参数表

算例	Q/(m³/h)	H/m	n/(r/min)	$NPSH$/m	n_s
1	25	32	2 900	1.6	66

4.2 叶轮轴面投影图及木模截线图的生成

根据计算的比转数 $n_s = 66$,再结合表2中的回归函数可得出 $L_x, L, L_0, L_1, L_2, \cdots, L_{10}$ 的值,从而得到设计模型流道中线的离散点,用 Bezier 曲线处理[5-8],便可求得流道中线,如图4所示.

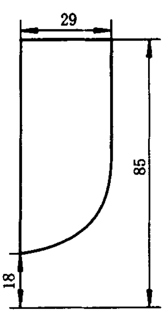

图4 设计模型的流道中线

按照高效率的要求给定 $F-L$ 曲线的变化规律,如图5所示;进而求得前后盖板流线如图6所示;最终生成的模型截线图如图7所示.

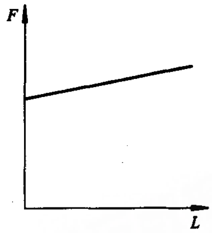

图5 $F-L$ 曲线

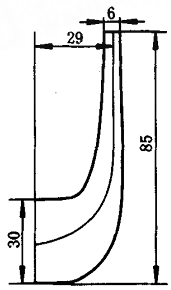

图6 设计模型的前后盖板流线

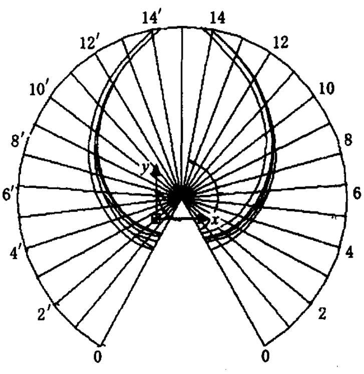

图7 设计模型的木模截线图

4.3 设计模型的试验验证

其性能曲线如图8所示.从设计模型的性能曲线可看出通过该方法设计的叶轮高效区的范围很宽,能满足实际应用.

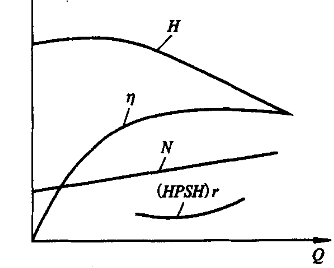

图8 泵性能曲线(n=2 900 r/min)

(下转第23页)

的又一重要的技术经济指标,与同类产品相比,在相同的适应流量(80～140 m^3/h)范围内,本研究过滤器的水头损失相当于同类产品的32.5%～68.6%,节能效果十分突出.

设备造价是衡量设备的一个重要经济指标,本研究过滤器总重不足140 kg,仅相当于国内同类产品总重的30%～40%,且结构构造简单,保守估算,其成本造价最高也仅相当于同类产品的30%～40%.

3.3　生产考核

为检验一体式过滤器在实际生产中的应用效果,于2005年3月～6月在运城市万荣县汉薛镇南景村9号机井上进行了实地考核,通过近3个多月计405 h的运行观察,结果表明在该井1/18 500含砂水质情况下,其滤砂效果与试验室试验状况基本相符,可放心用于生产中.

4　结　语

一体式微灌过滤器的研制成功说明将筛网过滤器置于离心过滤器之内的结构型式是可行的,试验结果及生产考核表明,滤砂效果不但达到了国内同类产品的水平,且适应的下限流量还略较同类产品为低.同时,水力损失大大低于同类产品,成本造价仅约为同类产品的30%～40%.另外,由于构造简单,占地少,也为管理维护带来极大方便,是一种新的先进的微灌过滤设备.2005年10月13日,由山西省科学技术厅组织国内有关专家对该研究成果进行了技术鉴定[5],鉴定认为:该"研究成果具有广阔的推广应用前景,达到同类研究的国内领先水平".

当然,该项研究只是针对适于80 ～140 m^3/h 流量范围段过滤器的试验研究结果,为使之形成系列化、产品化,还应对其他不同的流量范围进行试验研究.同时,对结构形式还需进行进一步深入研究,使之达到经济效果与水力效果的最佳组合.

参考文献(References)

[1] 辛　舟.基于滴灌的黄河水泥沙分离试验研究[J].排灌机械,2005,23(3):32－34.

[2] 付　琳,董文楚,郑耀泉,等.微灌工程技术指南[M].北京:水利电利出版社,1988:66～67.

[3] 杨　天.节水灌溉技术手册[M].北京:中国大地出版社,2002:716.

[4] 陈　益.给水排水设计手册(第十册)[M].北京:中国建筑工业出版社,1986:701～702.

[5] 山西省科学技术厅.科学技术成果鉴定证书(晋科鉴字[2005]第227号)[C].离心筛网一体式微灌过滤器的研究与应用项目鉴定会,运城,2005.

(责任编辑　侯素娟)

(上接第8页)

5　结　论

(1) 在方法②的基础上,提出了用优秀水力模型的流道中线衍生设计模型流道中线的方法,从而克服了方法②的缺点.

(2) 给出了轴面绘型的全过程,为离心泵叶轮 *CAD* 轴面绘型的实现提供了依据.

(3) 通过实例验证,该方法是可行的,并且具有较高的实用价值.

参考文献(References)

[1] 曹立新.在AutoCAD For Windows平台下开发水泵CAD系统的软件编程技术[J].排灌机械,1998,16(4):38－42.

[2] 戴玉姝,王　霄,蔡　兰.离心泵叶轮扭曲叶片参数化实体造型方法探讨[J].排灌机械,2004,22(1):20－22.

[3] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1995:203－204.

[4] 王艳艳.深井泵的设计[D].邯郸:河北工程大学,2004.

[5] 赵文生,罗京翔,范玉青.NURBS方法设计离心泵叶轮轴面流线[J].航空精密制造技术,1996,32(6):20－23.

[6] 赵林明,习华勇.数据拟合方法程序设计及其应用[M].石家庄:河北科学技术出版社,2002:31－37.

[7] 陈　田,殷国富,戈　鹏,等.Bezier曲线在水泵叶轮CAD中的应用方法[J].计算机集成制造系统－CIMS,2001,7(1):55－59.

[8] 张人会,杨军虎.基于样条曲线的水泵叶片流线控制方法[J].排灌机械,2005,23(1):7－9.

(责任编辑　张文涛)