

离心叶轮过流截面沿流程变化的计算方法

陈莹, 李廷涛, 高慧颖

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 经过对叶轮流道几何分析和严格的数学推导, 给出了离心叶轮过流截面沿流程变化的计算方法, 实现过流截面解析求解。根据工程实例, 采用了其设计方法, 调整了叶轮设计, 取得了较好的效果, 气流分离现象消失, 叶轮效率提高。

关键词: 离心压缩机; 通流设计; 过流截面

中图分类号: TH452 文献标识码: A

1 引言

离心压缩机叶轮的通流设计是离心压缩机设计中最难和最关键的步骤之一, 它也是许多科技工作者研究的主要课题。离心叶轮内部气体流动十分复杂, 气流方向由轴向流动转变为径向流动过程中, 会造成某些局部气流的扩压, 进而产生附面层的增厚

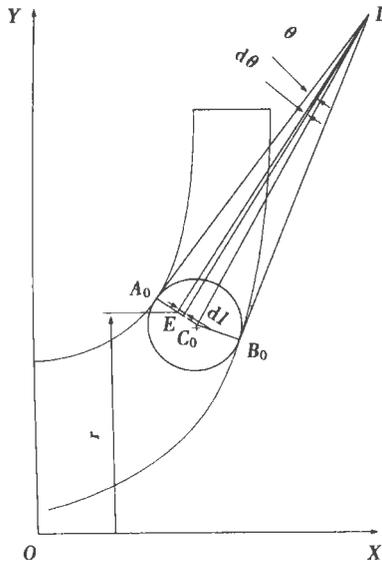


图 1 子午面投影

和可能的分离, 带来分离损失; 在流道内部, 轮盘和轮盖以及叶片压力面和吸力面之间的气流的差异性所产生的压力梯度带来了二次流动损失。如何降低流动损失, 提高叶轮运行效率是我们

设计离心压缩机叶轮中所关心的问题。离心叶轮过流截面沿流程变化是影响叶轮流道内部流场的一个重要因素, 因此精确计算过流截面面积以及合理设计过流截面沿流程变化是本文将要讨论的问题。

2 过流截面的计算方法

建立 XOY 坐标系, OX 轴为叶轮旋转轴, 得到叶轮子午面投影图形, 如图 1 所示。

沿子午面轮盘和轮盖的型线作外公切圆, 分别交于 A_0 、 B_0 两点, 公切圆圆心为 C_0 , 以 A_0 、 B_0 两点为切点, 做轮盘和轮盖型线的切线, 交于点 D_0 点。以 D_0 点为圆心, 以 A_0D_0 (或 B_0D_0) 为半径, 做圆弧 A_0B_0 , 设轮盘和轮盖曲线斜率分别为 K_{A_0} 和 K_{B_0} , 则圆心 D_0 的坐标的计算公式:

$$X_{D_0} = \frac{Y_{A_0} - Y_{B_0} + K_{B_0} X_{B_0} - K_{A_0} X_{A_0}}{K_{B_0} - K_{A_0}} \quad (1)$$

$$Y_{D_0} = Y_{A_0} + K_{A_0} (X_{D_0} - X_{A_0}) \quad (2)$$

其中: A_0 点坐标为 (X_{A_0}, Y_{A_0}) , B_0 点坐标为 (X_{B_0}, Y_{B_0})

圆弧 A_0B_0 半径:

$$R_0 = \sqrt{(X_{D_0} - X_{A_0})^2 + (Y_{D_0} - Y_{A_0})^2} \quad (3)$$

圆弧夹角:

$$\theta_{A_0B_0} = \text{tg}^{-1} \left| \frac{K_{A_0} - K_{B_0}}{1 + K_{A_0} K_{B_0}} \right| \quad (4)$$

从轴向看叶轮, 如图 2 所示。叶片是弯曲的, 叶片 β 角从进口到出口是变化的。以叶轮旋转轴为中心, 任意作一半径为 r 的圆, 分别交两相邻叶片于

收稿日期: 2002-05-22; 修订日期: 2002-09-29

作者简介: 陈莹(1964-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 哈尔滨·第七〇三研究所高级工程师。

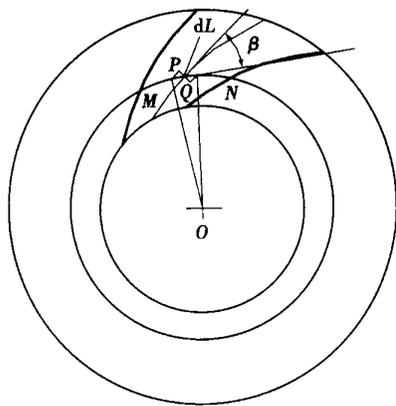


图 2 轴向图

M、N 两点，则圆弧 MN 上各点的 β 角是一致的。在圆弧 MN 上任取微元段 dL ，根据过流截面应与来流方向垂直定义，过流计算需以 PQ 为准。

从图 2 中所表述的几何关系中我们不难得到：

$PQ = \sin\beta \cdot dL$ 关系式。

假设叶轮叶片数为 Z ，叶片厚度（切向）为圆周长 $2\pi r - Z\delta$ 进而得到半径为 r 的回转面上过流线段长度的计算公式：

$$l = \int_0^{2\pi r - Z\delta} \sin\beta \cdot dL = (2\pi r - Z\delta) \cdot \sin\beta \quad (5)$$

在图 1 中得到的圆弧 A_0B_0 上取一微元段 dl ，

则： $dl = R_0 d\theta$

该微元段所在位置的叶轮旋转半径为 r 。微元段叶片弯曲角为 β 。过流面积计算采用下面方法，则该微元段占过流截面 dF ：

$$dF = (2\pi r - Z\delta)\sin\beta dl \quad (6)$$

沿圆弧 A_0B_0 积分，得到叶轮过流截面 F

$$F = \int_{A_0B_0} (2\pi r - Z\delta)\sin\beta \cdot dl \quad (7)$$

进一步化成：

$$F = \int_0^\theta (2\pi r - Z\delta)\sin\beta \cdot R_0 \cdot d\theta \quad (8)$$

式中： r 、 β 值沿圆弧 A_0B_0 是变化的，要想精确求得积分值，需建立 r 值、 β 值与 θ 值之间的函数关系式。

首先建立 r 值与 θ 值的关系式。

在圆弧 A_0B_0 上任意取一点 $E(X, Y)$ ，直线 A_0D_0 、 ED_0 的斜率分别为 $K_{A_0D_0}$ 、 K_{ED_0} 。整理上式得：

$$K_{A_0D_0} = \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} \quad (9)$$

$$K_{ED_0} = \frac{Y - Y_{D_0}}{X - X_{D_0}} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)求得两直线夹角 θ 。

$$\theta = \arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \arctg \frac{Y - Y_{D_0}}{X - X_{D_0}} \quad (11)$$

推得：

$$Y = Y_{D_0} + (X - X_{D_0}) \cdot \text{tg}(\arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \theta) \quad (12)$$

又根据圆弧 A_0B_0 方程：

$$(X - X_{D_0})^2 + (Y - Y_{D_0})^2 = R_0^2 \quad (13)$$

联立式(12)和式(13)，消去变量 X ，得到 Y 值与 θ 值的关系式：

$$Y = Y_{D_0} + \frac{R_0 \text{tg}(\arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \theta)}{\sec(\arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \theta)} \quad (14)$$

由于 OX 轴为旋转轴，则有 $r = Y$ ，也就得到 r 值与 θ 的关系式：

$$r = Y_{D_0} + \frac{R_0 \text{tg}(\arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \theta)}{\sec(\arctg \frac{Y_{A_0} - Y_{D_0}}{X_{A_0} - X_{D_0}} - \theta)} \quad (15)$$

其次还要找到 β 值与 θ 值之间的函数关系。

我们知道对于空间型叶轮叶片其 β 值在轮盘和轮盖之间往往是不等的，因此，沿圆弧 A_0B_0 叶片 β 角是变化的， β 角的变化规律常常与设计人员的经验和气动设计要求有关。假定圆弧 A_0B_0 上某些点的 β 值已经确定，我们就可以应用数学方法（样条插值或傅氏级数）拟合出 β 值与圆弧上坐标点变量之间的函数关系，联立圆弧方程(13)，从而也就可以建立 β 值与 θ 值之间的函数关系，得到：

$$\beta = f(\theta) \quad (16)$$

式中： f 代表相应的函数表达式。

将上面求得的 r 值与 θ 值之间的函数关系式(15)以及 β 值与 θ 值之间的函数关系式(16)全部代入过流截面计算的积分式(8)，可以对过流截面进行精确求解。

沿流道子午面中心线作一系列公切圆，并用上面所述方法就可以计算得到过流截面沿流程变化的情况。

3 影响过流截面沿流程变化因素及计算过流截面的意义

过流截面沿流程变化是叶轮设计过程中的重

要的通流设计参数之一。从上面所给出的过流截面的计算方法可以看出, 影响过流截面沿程变化的因素主要有轮盘和轮盖型线曲率和叶片 β 角度的变化。理想的通流设计过流截面从进口到出口应渐进增加。因此, 我们在设计叶轮过程中, 应综合考虑轮盘和轮盖型线设计定型同时照顾到叶片 β 角变化, 对于每一种设计方案都应进行过流截面的沿程变化计算。可以通过编制计算程序来完成大量的计算工作。

过流截面沿流程变化对叶轮内速度场的影响是比较大。如果过流截面沿流程变化过大, 则叶轮流道内将会产生我们所不期望的气流分离, 从而增加叶轮内的流动损失, 严重的气流分离可能会造成喘振。

4 工程应用

我们在为某大型化肥厂离心压缩机的改造设计过程, 由于忽视了叶轮流道设计过程中叶轮沿流程截面变化对流场和效率的影响, 叶轮流道中部面积

过大, 设计过程中只注重了子午面投影截面的变化, 忽视了 β 角对沿程截面的影响, 因而在流场计算过程中发现流道内有气流分离现象, 叶轮效率受到一定程度的影响。通过采用上文中提到的算法, 调整叶轮设计, 从而得到了较好的效果, 气流分离现象消失, 叶轮效率也提高了。

在与泵设计的过流截面算法比较中, 文中这套算法考虑的因素更全面, β 角对截面的影响被充分重视, 并给出相应的解析算法, 计算更加精确和完善。

文中给出了过流截面的精确计算方法, 并指出了影响过流截面变化的相关几何参数, 希望能为离心压缩机叶轮设计人员提供有益的帮助。

参考文献:

- [1] 张永曙. 计算机辅助几何设计的数学方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1982.
- [2] 李 斯. 离心压缩机机械[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

(辉 编辑)

冷却叶片的设计

据《Глобальнeр етика》2002 年 9 月号报道, 借助于描述叶片内热力过程的先进模型, ЦИАМ (俄罗斯中央巴拉诺夫 П.И. 航空发动机制造研究所) 制定了高性能燃气轮机冷却叶片的设计方法。

为了解决与冷却叶片有关的问题, 利用了下述数学模型:

用于冷却叶片系统通路内空气流动及其沿液力网络分支分布的一维计算模型(液力模型, GIDR—M 程序);

叶片各截面内温度的计算模型(几何模型和传热模型, Prep—Key 和 KW3D 程序);

冷却系统通路内热交换模型;

阻隔膜计算模型。

利用数值方法求解数学模型的方程组。

制定了燃气轮机冷却叶片设计所需要的全套实用的程序, 它们包括平面(二维)的、轴对称的、准三维的和三维的模型。每一套程序原则上都由下列模型组成:

几何模型的构作及其自动划分成有限元;

液力模型的构作;

几何模型与液力模型之间对应关系的调整;

液力网络的计算;

叶片表面上热交换边界条件的计算;

稳定的或不稳定传热方程的求解(二维的或三维的);

热力状态原始资料和计算结果的形象化(平面的和三维的图像), 以及冷却空气流量沿液力网络分布的形象化。

ЦИАМ 应用所制定的方法设计远景的冷却叶片, 并用于建立系列冷却叶片热流体状态模型库。

(思娟 供稿)

ture of a Membrane Water-wall [刊, 汉] / LI Zhi-hong, LIU Shi (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LIU Wen-tie (College of Energy Sources under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 173—176

By using a finite difference method a numerical calculation was performed of the temperature field distribution of membrane water-walls with rectangular fins and fillet welded fins. Concerning the above two kinds of finned tube waterwall the influence of such factors as fin size, heat flow density, working medium heat-exchange factor on wall temperatures are analyzed. Also discussed is the relationship between tube pitch and allowable wall temperature. Moreover, pertinent calculation procedures were worked out. All of the above may serve as reference information for the design and operation of boilers. **Key words:** membrane water wall, heat transfer, temperature field

离心叶轮过流截面沿流程变化的计算方法 = A Method for Calculating the Changes of Flow Channel Section of a Centrifugal Impeller along Its Flow Path [刊, 汉] / CHEN Ying, LI Yan-tao, GAO Hui-ying (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 177-179

A method for calculating the variation of flow channel section of a centrifugal impeller along its flow path was obtained through a geometric analysis and strict mathematical deduction of the impeller flow path, thus providing an analytical solution of the flow channel section. In a specific engineering case a design method based on the above approach was employed followed by an adjustment of the impeller design. With the elimination of gas-flow separation phenomenon and the realization of higher impeller efficiency one can conclude that relatively good results have been achieved. **Key words:** centrifugal compressor, flow path, flow channel section

用 FCGA 优化的锅炉给水自适应模糊控制系统的设计 = The Design of a FCGA (Fuzzy Control Genetic Algorithm) Optimization-based Self-adaptive Fuzzy Control Scheme for a Boiler Feedwater System [刊, 汉] / DOU Chun-xia (Electric Engineering Institute under the Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei Province, China, Post Code: 066004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 180—182

Taking account of the specific features of the water feeding process for a drum boiler, the authors have designed a type of self-adaptive fuzzy controller with its subordinate parameters being optimized by the use of a fuzzy control-based genetic algorithm. The results of a theoretical analysis and simulation indicate that the control scheme under discussion is highly effective in solving a variety of problems. The latter include the delay of inner perturbation characteristics of boiler feedwater and the emergence of "false water level" during steam flow rate and thermal load disturbances. The method features rapid adaptability and exceptional robustness, enjoying a high potential for engineering applications. **Key words:** self-adaptation, fuzzy control, genetic algorithm, robustness

变偏置双交叉限幅燃烧控制系统设计及应用研究 = The Design and Applied Research of a Combustion Control System Featuring Variable Offset and Dual-crisscross Amplitude Limit [刊, 汉] / LI Lai-cun, YANG Ming-ji (Survey and Communications College under the Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150040), DEN Cai-xia (Automation College under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 183—186

Based on a combustion system featuring dual-crisscross amplitude limit and in the light of high frequency and wide range of load changes specific to the main boiler of a steam propulsion plant the authors have designed a combustion control system characterized by a variable offset and dual-crisscross amplitude limit. In addition, the application of the above-mentioned control system in the combustion control of a marine main boiler has been studied through simulation tests with an