

汽轮机直叶片及叶轮设计计算一体化研究与应用

张海林 贾丹 朱曙光

洛阳中重发电设备有限责任公司, 河南 洛阳 471003

[摘要]通过分析直叶片传统设计流程中的不足之处,借助程序编写,改变直叶片的设计流程,把设计流程末端的强度校核改为强度计算,并放置在流程的最前端。把依据结构设计尺寸的强度校核改为由强度计算确定结构尺寸。通过编写程序操控作为中转站及叶片数据库的 excel 表格,实现叶片的快速设计计算及查询。直叶片设计完成后,由编写的程序驱动三维软件,完成直叶片的三维参数化模型的创建。叶轮强度采用二次算法,把叶轮轮体划分为十二段,并推导出每段内外直径及宽度与叶轮外形结构数据之间的数学表达式。根据所推导的公式,利用 VB 语言编写叶轮应力及过盈量的计算程序,并把叶轮的外形结构数据输入到叶轮数据库中,同时查找数据库中有无相同结构尺寸的叶轮,以避免叶轮的重复设计。叶片的叶根装于叶轮的叶根槽中,叶片的强度计算涉及到叶轮的轮缘尺寸,叶轮强度计算中的径向外载荷主要来源于叶片的离心力,在强度计算过程中,两者之间相互关联。以相互关联的内容为纽带,把两者的强度计算整合为一体,极大的简化了整个计算过程。引入 excel 表格作为数据库,采用二次开发技术,利用 VB 编程,把叶片、叶轮强度计算、数据及叶片三维建模融为一体,实现汽轮机直叶片及其叶轮一体化设计计算。

[关键词]汽轮机;直叶片;三维参数化模型;套装叶轮;过盈量;二次算法 1;绪论

DOI: 10.33142/ec.v5i6.6098

中图分类号: TQ050.2

文献标识码: A

Research and Application of Integration of Design and Calculation of Steam Turbine Straight Blade and Impeller

ZHANG Hailin, JIA Dan, ZHU Shuguang

Luoyang Zhongzhong Power Generation Equipment Co., Ltd., Luoyang, He'nan, 471003, China

Abstract: By analyzing the shortcomings of the traditional design process of straight blade, with the help of programming, the design process of straight blade is changed, and the strength check at the end of the design process is changed to strength calculation, which is placed at the front of the process. The strength check based on the structural design size is changed to the strength calculation to determine the structural size. By programming and controlling the excel table as the transfer station and blade database, the rapid design, calculation and query of blades are realized. After the straight blade design is completed, the written program drives the three-dimensional software to complete the creation of the three-dimensional parametric model of the straight blade. The impeller strength adopts the quadratic algorithm, divides the impeller body into twelve sections, and deduces the mathematical expression between the inner and outer diameter and width of each section and the impeller shape and structure data. According to the deduced formula, the calculation program of impeller stress and interference is written in VB language, and the shape and structure data of the impeller is input into the impeller database. At the same time, it is necessary to find out whether there are impellers with the same structure size in the database, so as to avoid repeated design of the impeller. The blade root of the blade is installed in the blade root groove of the impeller. The strength calculation of the blade involves the rim size of the impeller. The radial load in the strength calculation of the impeller mainly comes from the centrifugal force of the blade. In the process of strength calculation, the two are interrelated. Taking the interrelated contents as the link, the strength calculation of the two is integrated into one, which greatly simplifies the whole calculation process. The excel table is introduced as the database, the secondary development technology is adopted, and the VB programming is used to integrate the blade and impeller strength calculation, data and blade three-dimensional modeling, so as to realize the integrated design and calculation of steam turbine straight blade and its impeller.

Keywords: steam turbine; straight blade; three dimensional parametric model; suit impeller; interference; quadratic algorithm; introduction

1.1 叶轮、叶片概述

动叶片是汽轮机的主要原件之一,它的作用是将高速汽流的能量转化成机械功。为了保证能量顺利地、最大限度地转化为有用功,不仅要求叶片具有良好的气动、热力性能,而且应具有足够的安全性。动叶片的工作条件和工作环境比较恶劣,既有工作在高温高压蒸汽中的,也有在

湿蒸汽中工作的,它不仅受到离心应力,蒸汽弯应力等静应力和蒸汽激振引起的叶片振动交变应力的作用。针对以上所述,叶片设计时,要进行精确的强度计算,以确保其安全运行。

叶轮是轴对称回转体,其外径装有动叶片,内径可靠的与轴连接在一起,以传递功率。它承受着叶片的径向离

心力、本身材料在旋转时产生的离心力、传递功率的扭矩；在轮盘受热不均匀时，它还承受着热应力。在内孔处还承受着过盈配合所产生的压应力。设计叶轮时，强度计算是必不可少的。

1.2 叶轮、叶片设计计算研究的意义

关于叶轮及叶片的计算，众多的汽轮机设计手册及汽轮机教材中都有详细的陈述。依据公式人工进行计算，过程极其繁琐。传统的按公式手工计算，已经不能满足快节奏、模块化设计需求。

2 叶片设计

2.1 直叶片的结构及受力状况

直叶片分为型线工作部分、叶根安装部分及阻止漏汽的围带部分，直叶片常用的叶根分为 TG 型、BG 型及叉型。叶片通过叶根与叶轮装配到一起，叶轮套装到主轴上或与主轴合为一体，组成能量转换的转子部分。叶片不但影响着汽轮机的安全运行，而且还影响着汽轮机效率的高低。直叶片的具体安装结构如图 1 所示：

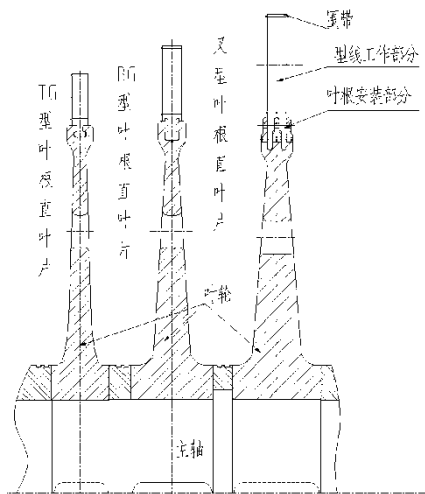


图 1 直叶片安装结构

直叶片工作时受力主要来自两个方面：一是在高转速下叶片产生的离心力；二是汽流的作用力。

离心力在叶型部分的各横截面上引起的拉应力，当离心力的作用方向不通过截面形心时，还会引起弯应力。叶片全部的离心力都要由叶根来承受，并通过叶根传递到轮缘上，因而在叶根和轮缘不同的截面上分别作用着由离心力引起的拉伸、挤压、剪切、弯曲等应力。

叶片所受的汽流力是随着时间而周期性地变化着的，这是由于喷嘴叶片的出口具有一定的厚度等原因造成的。因而汽流一方面对叶片产生弯矩，在叶片中引起静弯应力，同时又迫使叶片发生震动，在叶片中引起交变的震动应力。

在叶片承受的诸应力中，主要是离心拉应力、汽流弯应力和震动应力这三种。

叶片的离心力、汽流弯应力计算公式，在《汽轮机强度计算手册》上已有详细陈

述，本文不再赘述。

2.2 直叶片传统设计计算流程

根据热力计算确定的叶片型线等参数，由主任设计师通过转子装配结构设计来确定叶片及其对应安装叶轮的结构尺寸，然后交由相应设计人员进行设计，最后根据设计的具体结构尺寸进行强度校核。校核不合格，重新进行结构设计和强度计算，直至强度能满足设计要求。其设计计算流程如图 2 所示：

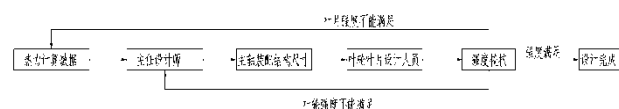


图 2 直叶片传统设计计算流程

传统的设计计算流程存在以下三点不足。

第一：影响设计进度

由于强度校核是依据叶片、叶轮的具体外形结构尺寸，因此在传统的设计流程中，强度校核放在最后。当叶片强度不能满足要求时，需重新进行设计计算。反复的设计计算影响了设计进度。

第二：增加成本

由于设计人员在没有计算数据为依据的前提下进行设计，因此，材质及叶根类型完全靠设计人员的经验确定。强度校核保证了叶片的安全运行，但在保证安全运行的前提下，叶根类型、叶片及叶轮的材质选择不当会造成成本的增加。如每片 BG 型叶根叶片的加工成本要比 TG 型叶根叶片高 18 元左右，每套叶片大都有 200 片右片；材质成本差价高达 2 万/吨。一套叶片、叶轮设计不当，时常会增加数千元甚至上万元的成本。

第三：设计资源的浪费

公司现存叶片种类已有数千种，每年新设计的叶片常达数百种之多。没有详细的叶片数据库，相同结构的叶片时常会出现重复设计的现象。重复设计费时费工，还给图纸的存放及生产带来了诸多不便。

2.3 直叶片新设计计算流程

针对传统直叶片设计计算存在的不足之处进行研究。通过编写程序，把依据直叶片结构尺寸进行的强度校核，改由设计计算确定直叶片结构尺寸及材质。利用 excel 表格建立了叶片及叶轮数据库，通过编程对数据库时时更新，从根本上避免叶片的重 复设计。具体设计计算流程如图 3 所示：

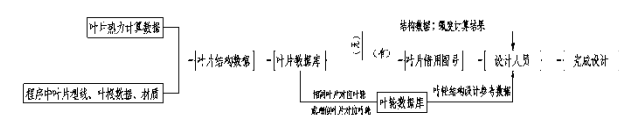


图 3 直叶片设计计算流程

2.3.1 直叶片强度计算及结构设计

把公司直叶片常用的几十种型线及二十种标准叶根进行特征提取,并编写相应程序。依据材料手册,把材质对于温度的机械性能离散点数值拟合成数学方程式,以便于程序的调用。

使用时,根据热力计算所确定的型线类型,程序自动提供几种叶根供选择。计算所需的热力计算数据,通过 excel 作为中转站,有程序从 excel 表中直接提取。根据计算结果调整叶根类型及材质,进行精细化设计^[3],在确保叶片安全运行的情况下,限制成本。计算完成后,程序输出强度计算结果和结构设计所需数据。

2.4 直叶片三维参数化模型的创建

为了确保叶片的安全运行,在叶片设计计算完成后,建立叶片的三维模型,利用相应的有限元软件进行应力及频率分析。对于建立三维,通过综合对比分析,汽轮机直叶片的拓扑结构大都相同,仅有型线和叶根类型略有区别。可依据公司内部标准对型线及叶根类型进行分类,建立了汽轮机直叶片的三维参数化模块,利用 VB 语言,对三维绘图软件 Inventor 进行二次开发,实现由 VB 程序驱动 Inventor 三维软件,依据要求自动生成所需的直叶片三维模型,避免了重复性建模,极大的提高了工作效率。

2.4.1 Inventor 的二次开发

Inventor 为用户提供了强大的 API(Application Programming Interface)二次开发接口,其功能远远超过了传统的基于特征的造型系统。在 inventor 中使用 API 在于能够添加一些满足特定专业设计需求的自定义功能。

Inventor API 以面向对象的方式体现各对象的功能。其对象结构模型图显示了各个对象之间相互继承的关系,并且描述了如何找到特定的对象。对象结构模型如图 4 所示。

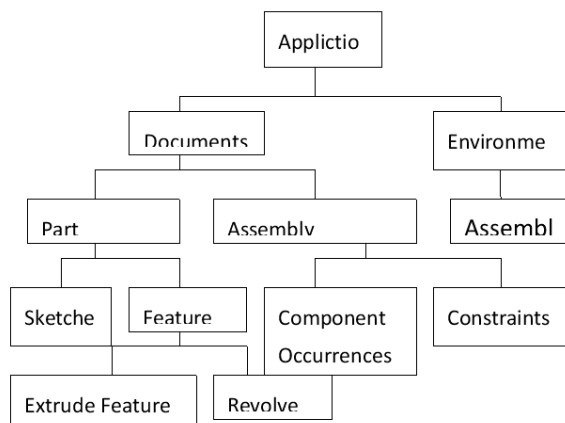


图 4 Inventor API 的对象结构模型

Inventor 提供了 3 种 API 开发途径: Add-in、standalone EXE 和 Apprentice Server,与 inventor 的关系如图 5 所示,本文采用 Standlone (EXE) 的途径对

inventor 进行二次开发。

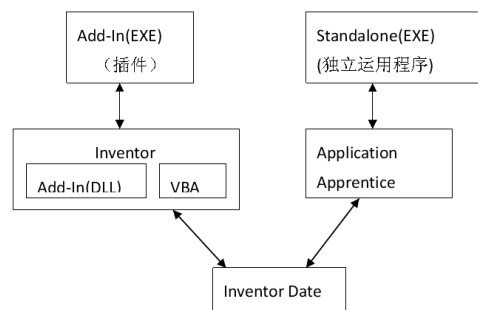


图 5 InventorAPI 与 inventor 的关系

2.4.2 Inventor 开发的基本思路

本文采用参数化技术对三维造型软件进行二次开发,并结合 inventor 中嵌入的 Excel 表,将汽轮机直叶片三维模型的尺寸数值存放在 excel 表格中,并把该表格与相应的三维模型建立连接。通过 VB 对 Excel 单元值进行修改,从而来驱动 inventor 三维模型。

2.4.3 汽轮机直叶片三维参数化过程

在 inventor 环境中,按照设计要求,建立正确的拓扑结构关系。对所需尺寸值进行参数化处理,并与 Excel 表格建立连接。通过在 VB 界面对话框中选择所用的型线和叶根类型来驱动相应的三维参数化模型及 Excel 表格。在界面对话框中填写相应的叶片参数值,根据汽轮机直叶片的理论设计公式,编写程序计算出所需的约束尺寸值。并把该值赋值给 excel 的相应单元格,再编写 VB 程序驱动 inventor 进行文档更新,生成所需的三维实体模型。

2.4.4 汽轮机直叶片三维实体建模

针对要建立的汽轮机直叶片的自身特征,根据 Inventor 创建三维模型的特点,确定合理的建模顺序,完整、详尽地表征出实体,并使特征参数尺寸数量和完成的步骤尽可能的简单,提高表格化处理和零件调用的尺寸驱动效率。根据分析结果利用 Inventor 的各种高效功能,如:拉伸、放样和旋转等功能创建出汽轮机直叶片的三维参数化实体模型,如图 6 示。

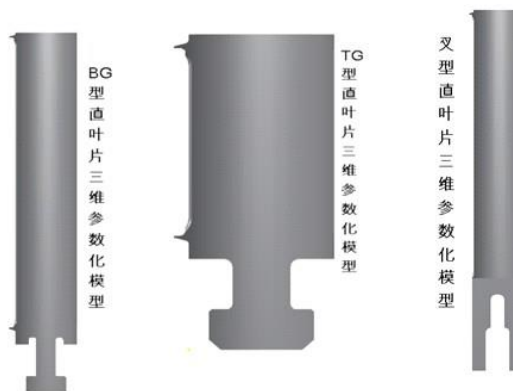


图 6 叶片结构

2.4.5 建立 Excel 链接

在 Excel 表格中为每种汽轮机直叶片输入叶片的高度、叶片安装个数、叶片节圆直径等。然后把该表格与 Inventor 参数功能表建立链接。当用户修改 VB 界面对话框中某一个参数大小时,有相应的 VB 程序根据模型尺寸和参数之间关系所建立的关联方程来进行计算,并把该计算结果赋值给 Excel 相应的单元格。从而来驱动相应的尺寸约束。参数表如图 7 所示:

参数名称	单位	表达式	公称值	公差	模型数值	注释
L1	mm	50 mm	20.000000	20.000000		
L2	mm	50.5 mm	50.500000	50.500000		
H1	mm	10 mm	10.000000	10.000000		
R	mm	100 mm	100.000000	100.000000		
P1	mm	6.28215181582585 mm	6.282152	6.282152		
P2	mm	3.14107590781283 mm	3.141076	3.141076		

图 7 参数表

2.4.6 编写程序代码

以 VB 作为工具实现 Inventor 二次开发,首先启动 Visual Basic,引用 Inventor 对象库和定义 Excel 对象。

声明 Inventor 应用对象库变量代码如下: Dim oApplication As Inventor.Application

Set oApplication = GetObject(, "Inventor.Application") Dim oDoc As Document

Set oDoc = oApplication.ActiveDocument Dim IR As Long

Dim sFile As String

IR = ShellExecute(m_hWnd, "Open", sFile, "", "", vbNormalFocus) If (IR < 0) Or (IR > 32) Then

Else

MsgBox "无法打开"

End If

定义 excel 对象代码

Dim xlApp As Excel.Application Dim xlBook As Excel.Workbook Dim xlsheet As Excel.WorkSheet

Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")

修改参数并生成相应三维实体模型部分代码

xlsheet.Cells(1, 2) = Val(L1) xlsheet.Cells(2, 2) = Val(L2) xlsheet.Cells(3, 2) = Val(H) xlsheet.Cells(4, 2) = Val(D1) / 2 xlsheet.Cells(5, 2) = Val(P1) xlsheet.Cells(6, 2) = Val(P2) xlBook.Save

xlBook.Close (True) xlApp.Quit

Set xlApp = Nothing

Dim oDoc As Document

Set oDoc = oApplication.ActiveDocument

oDoc.Update

End Sub

完成上述步骤,将生成所需的三维实体模型。

2.5 有限元的强度校核和频率分析

把用 inventor 软件创建的直叶片三维参数化模型,导入到专业的有限元分析软件中进行模态频率分析和应力强度分析。

设置材料的杨氏弹性模量、泊松比、密度等参数,依据安装情况添加叶片的固定约束。根据叶片的实际运行情况施加相应的作用力。频率分析如下图 8 所示:

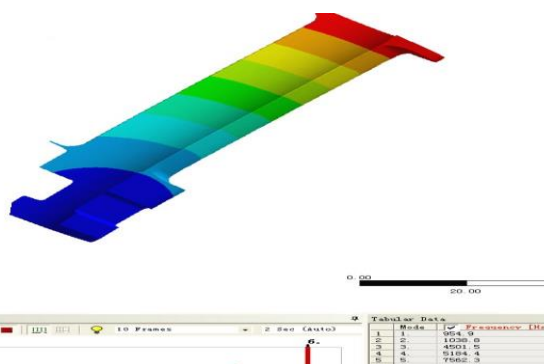


图 8 频率分析

3 叶轮设计

3.1 叶轮计算简介

叶轮的应力及过盈量通常采用传统的二次算法进行计算,但其计算过程繁琐,计算数据庞大;通过 VB 编程,可以简化计算。根据众多厂家的设计经验,查阅众多叶轮计算资料,把叶轮划分为十二段,计算精度足够满足设计要求,本文采用十二段划分法,对叶轮进行计算。首先对计算所需的叶根槽及材质数据进行汇总并写入程序中,通过选择形式加以调用;然后,通过相应公式的推导,把叶轮的基本结构尺寸作为输入量,由程序依据该数据来计算二次算法所需数据;计算结果满足设计要求时,查询用 excel 做的叶轮数据库,若有相同结构,则输出相应图号;若无则把新图号及其数据自动输入到叶轮库中,以便于后续叶轮的设计。具体计算流程如图 9 所示:

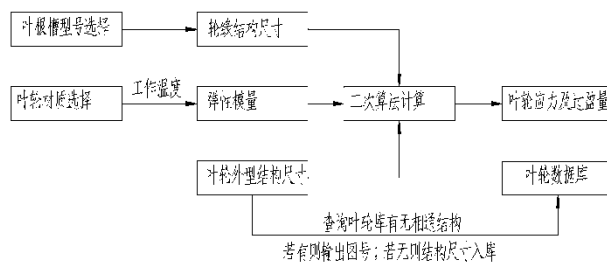


图 9 计算流程

3.2 叶轮装配过盈及应力理论计算

在设计计算中,通常按转动转速确定过盈量的大小。

松动转速是叶轮与主轴之间产生松动现象的最低转速，此时叶轮内孔的径向应力刚好为零。考虑到叶轮和主轴的加工公差以及过盈量的公差，通常选取最小松动转速为叶轮工作转速的 1.185 倍，最大松动转速为工作转速的 1.215 倍。

叶轮的应力分为径向应力和切向应力。计算时，根据外径及叶轮处的径向应力、叶轮转速和叶轮尺寸，采用二次算法，将叶轮近似划分为 12 段，每段近似看做等厚阶梯形状。由叶根槽底部向轮毂依次进行径向应力及切向应力计算。

3.2.1 二次算法

二次算法是建立在应力叠加的基础上，因为叶轮任意半径上的应力都是内径或外径上应力的线性函数，应力可以叠加计算。计算时，从叶根槽底部向轮毂内径逐段进行计算。计算过程如下：

一次计算

σ_{r1i} 为径向应力， $\sigma_{\theta 1i}$ 为切向应力，1 表示一次应力计算，i 为径向应力所属的段数。

d_i 为叶轮 i 段的宽度，i 的值为 1~12。

应力计算系数：

$$\beta' = \frac{\alpha'}{\alpha} = 0.5 \times \left(1 + \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 \right); \alpha'$$

$$\beta' = \beta' = 0.5 \times \left(1 - \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 \right)$$

$$\theta_{iiri}$$

$$\frac{R_{i+1}}{\theta_{iri}}$$

$$\frac{R_{i+1}}{\theta_{iri}}$$

$$\alpha = 2.69[2(1 + \mu)] \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 + (1 - \mu) \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^4 - (3 + \mu)$$

$$c_i$$

$$i+1$$

$$R_{i+1}$$

$$\beta = 2.69[2(1 + \mu)] \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 + (1 - \mu) \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^4 - (1 + 3\mu)$$

$$c_i$$

$$4R_2^2 n^2$$

$$R_{i+1}$$

$$R_{i+1}$$

$$T = i-1$$

$$i10002$$

各段应力计算公式为：

$$d$$

$$\left(\frac{d}{(i-1)} \right)$$

$$\alpha_{r1i} = \sigma_{r1}(i-1)$$

$$i$$

$$\alpha_{\theta 1i} = \sigma_{\theta 1}(i-1) + \mu(\alpha_{r1i} - \sigma_{r1}(i-1))$$

$$\sigma_{r1i} = \alpha_{ri}' \alpha_{r1i} + \alpha_{\theta ii}' \alpha_{\theta 1i} + T_i \alpha_{ci}$$

$$\sigma_{\theta 1i} = \beta_{ri}' \alpha_{r1i} + \beta_{\theta ii}' \alpha_{\theta 1i} + T_i \beta_{ci}$$

.....

二次计算

σ_{r2i} 为径向应力， $\sigma_{\theta 2i}$ 为切向应力，2 表示二次应力计算，

$$\sigma_{r21} = 0; \sigma_{\theta 21} = 100$$

$$\alpha_{r2i}$$

$$= \sigma_{r2i}$$

$$d$$

$$\left(\frac{d}{(i-1)} \right)$$

$$d_i$$

$$\alpha_{\theta 2i} = \sigma_{\theta 2i} + \mu(\alpha_{r2i} - \sigma_{r2}(i-1))$$

$$\sigma_{r2i} = \alpha_{ri}' \alpha_{r2i} + \alpha_{\theta ii}' \alpha_{\theta 2i}$$

$$\sigma_{\theta 2i} = \beta_{ri}' \alpha_{r2i} + \beta_{\theta ii}' \alpha_{\theta 2i}$$

.....

应力叠加：

$$K = -\sigma_{r112}$$

$$\sigma_{r212}$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta 112} + K1 \sigma_{\theta 212}$$

$$\mu^2$$

$$D = 197(1 -$$

$$\rho$$

$$)R1$$

$$2R1$$

$$\text{最大过盈量: } \Delta_{\max} =$$

$$\text{最小过盈量: } \Delta_{\min} =$$

$$E(2\sigma_{\theta} - D)n1$$

$$2R1(2\sigma - D)n$$

最大过盈时及工作转速下叶轮的应力：

$$E\Delta_{\max}$$

$$K2 =$$

$$2R1$$

$$-\sigma_{\theta 1i} + \sigma_{r1i} + D$$

$$\sigma_{\theta 2i} - \sigma_{r2i}$$

$$\sigma = \sigma$$

$$r1r1i$$

$$+ K \sigma$$

$$r2i$$

$$2$$

$$\sigma = \sigma$$

$$\theta_{i\theta 1i}$$

$$+ K \sigma$$

$$\theta 2i$$

$$2$$

装配后，静止叶轮内孔应力：

$$E \Delta \max$$

$$K3 =$$

$$2R13$$

$$\sigma \theta 212 - \sigma \theta 112$$

$$\text{径向应力: } \sigma_{rh} = K3 \sigma_{r212}$$

$$\text{切向应力: } \sigma_{\theta h} = K3 \sigma_{\theta 212}$$

在以上二次计算公式中，叶轮的外径径向应力 σ_{r11} 、各段的内外径 R_i 及宽度 d_i 、材料工作温度下的弹性模量 E 为已知条件。

3.2.2 叶根槽底部径向应力计算

叶根槽底部的径向应力是由叶片离心力和叶根槽的离心力引起的。叶根槽可以近似划分为几个圆环，其离心力之和即为叶根槽的离心力。

圆环离心力公式推导：

圆环微元体的离心力：

$$dc = dmR\omega^2$$

$$3$$

圆环的离心力为： $C =$

$$2\pi R1320000\pi$$

$$\rho R2\omega^2 y d\theta dR =$$

$$\rho y (R3$$

$$- R3)$$

$$\int_0^{\theta} \int R$$

$$3131$$

$R0$ 为圆环的外半径； $R1$ 为圆环的内半径，单位 mm；角速度 $\omega = 2\pi n$ ； n 为叶轮的转速；

y 为圆环的宽度，单位 mm； ρ 为叶轮材料密度，单位 Kg/m^2 ；

叶轮叶根槽如图 3-2 所示：直线 AB 以上部分的离心力即为轮槽的离心力 C_{rim} ，根据叶根槽类型把 AB 以上部分划分为相应的几个圆环，并根据叶根槽的结构尺寸分别计算出离心力 C_i 。叶根槽总的离心力为： $C_{rim} = \sum C_i$

$$C_y + \lambda C_{rim}$$

$$\text{叶轮外径向应力: } \sigma_{r0} =$$

$$C_y \text{ 为整套叶片的离心力}$$

$$2\pi R1D1$$

λ 为系数，当轮缘为整圆环时 $\lambda = 2$ ，当轮缘不是整圆环时 $\lambda = 13$

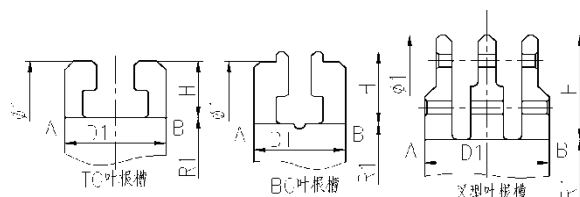


图 10 叶根槽结构

3.2.3 材料弹性模量方程拟合

套装叶轮多用于中、低温汽轮机，为了计算方便，忽略温度场的梯度分布，近似认为叶轮的溫度是均匀的，且仅考虑弹性模量随温度变化对过盈量的影响。对于叶轮常用的三种材质，拟合出弹性模量相对于温度的数学方程表达式。材料弹性模量如表 1 所示：

拟合 34CrMo 弹性模量 E 相对于温度 t 的方程式：

$$E = 8.985 \times 10^{-5} \times t^3 - 1.657 \times 10^{-1} \times t^2 - 3.362 \times t + 218060$$

拟合 35CrMoV 弹性模量 E 相对于温度 t 的方程式：

$$E = 2.344 \times 10^{-4} \times t^3 + 9.844 \times 10^{-2} \times t^2 - 58.906 \times t + 214141$$

拟合 34CrNi3Mo 弹性模量 E 相对于温度 t 的方程式：

$$E = 2.046 \times 10^{-4} \times t^3 + 1.842 \times 10^{-1} \times t^2 - 82.061 \times t + 222569$$

表 1 材料弹性模量

弹性模量 温度℃	20	100	200	300	400	450	500
弹性模量单位 (34CrMo)	21.8	21.6		20.5	19.5	19.2	18.6
弹性模量单位 (35CrMoV)		21.3	20.9	19.9			18.0
弹性模量单位 (34CrNi3Mo)		22.1	21.6	20.9	20.2		

4 叶轮、叶片一体化设计

4.1 强度计算一体化思路

叶片的叶根装于叶轮的叶根槽中，叶片的强度计算涉及到叶轮的轮缘尺寸，叶轮强度计算中的径向外载荷主要来源于叶片的离心力及其汽流弯应力，在强度计算过程中，两者之间相互关联。以相互关联的内容为纽带，分别建立叶片、叶轮的数据库，利用 VB 语言编程，把两者的强度计算整合为一体，计算资源共享，计算数据相互之间可以调用，极大的简化整个计算过程。

4.2 叶轮、叶片一体化步骤

首先根据热力计算计算直叶片的汽流弯应力及叶根的应力，依据计算结果调整选择叶根的类型，并确定叶片的结构尺寸及叶轮轮缘的宽度；根据所确定叶片结构尺寸到其数据库中查寻是否存在该叶片。若不存在则依据确定叶片结构尺寸，由程序驱动 Inventor 生产用于频率分析的三维模型。频率不合格时，通过调整叶片围带

的厚度 调整频率。叶片应力及频率均合格后, 把该叶片的结构数据录入到叶片数据库中。

然后根据转子部分, 初步确定叶轮的外形结构尺寸, 根据叶片的计算计算结果在 确定叶根槽的类型及轮缘的宽度。依据所定的外形结构尺寸, 到叶轮数据库中查找有无相同结构的叶轮。查询结果没有, 则通过到叶片数据库中调取其对应叶片的相关数据, 联合其结构数据来计算叶轮的强度。依据计算结果, 即使选择叶轮的材质及调整叶轮的外形结构尺寸。计算合格后, 把叶轮的相关结构数据数据输入到叶轮数据库中最后, 把所确定的直叶片、叶轮的的结构数据交于设计人员进行绘图。由于强度计算过程中顺带进行了质量计算, 设计人员按所提供的数据轻松完成设计。从根本上保证了设计质量。

4.3 叶轮、叶片设计计算一体化的实现的

4.3.1 编程思路

设计计算一体化, 是借助于 VB 语言, 利用 Excel 及 Inventor 的二次开发技术, 根据借用的及推导的计算公式, 编写相应程序实现的。编程思路如图 11 所示:

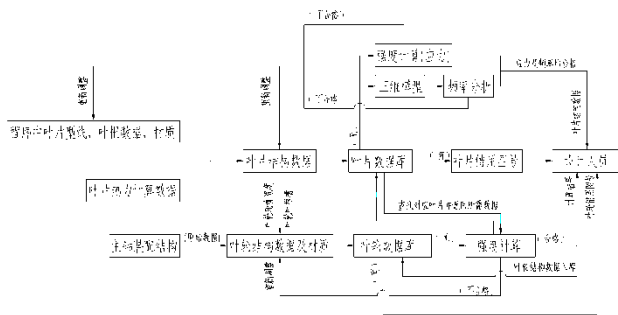


图 11 编程思路

4.3.2 Excel 数据的运用

Excel 为 VB 提供了二次开发接口, 工作之前, 首先要引用、声名 Excel 对象库根据计算需求, 分别调用作为叶轮叶、片数据库的工作表, 提取所需数据进行计算。在调用过程中, 遇到缺少数据或数据有问题时, 则通过消息对话框 (MsgBox) 告知, 调用叶轮数据库的部分代码如下:

```
Dim xlApp As Excel.Application
```

```
Dim xlBook As Excel.Workbook FileName = "\叶轮数据库.xls" On Error Resume Next
```

```
Set xlApp = GetObject(, "Excel.Application") If Err.Number <> 0 Then
```

```
Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")
```

```
xlApp.Visible = True
```

```
End If.....
```

4.3.3 叶片截面对话框使用说明

本对话框集设计与研发为一体, 对于常规设计, 直接在对话框上选择型线、叶根类型、材料及工作转速等参数, 有程序依据选择直接调用与之对应的计算所需数据, 提高

了工作效率。研发新的叶片时, 选择相应的其它选项, 直接把数据输入到对应的文本框中, 以便于计算过程中的修改。计算完成后, 点击“入库”按钮, 程序自动把数据输入到数据库中, 做到数据库的实时自动更新。数据在入库之后, 会对数据库中的数据进行自动对比, 若有相同的数值, 则在截面对话框中显示出来, 并删掉所输入数据, 以保持数据库的唯一性。从根本上杜绝了重复设计。图 12 为叶片计算对话框。



图 12 叶片计算对话框

5 结论

本文以公司大量的叶片、叶轮设计数据为基础, 把计算、设计和数据库融合到一起, 为设计者提供强度计算结果及部分设计数据, 该程序改变了公司叶片、叶轮的设计流程, 提高了工作效率。在满足设计要求的前提下降低成本, 同时从根本上避免了相同结构叶片、叶轮的重复设计。本文研究主要意义如下:

(1) 汇总常用计算所需叶根、叶根槽及材质数据并写入程序中, 通过选择叶根槽的类型来调用该数据; 通过公式推导, 以叶轮的外形结构数据作为程序的输入量; 此举简化了叶轮过盈量及应力计算的过程, 提高了计算效率。

(2) 依据计算结果, 调整面板中的选项及数据库的数据, 使叶片、叶轮的机构更加合理, 选材更加得当。

(3) 控制面板直接操控 excel 所作的叶轮数据库, 能即时查询叶轮库有无相同结构, 避免了重复设计。

(4) 经过验证, 该程序计算结果完全能满足设计需要, 确保叶轮的现场安全运行。

【参考文献】

- [1]郭瑞等. 套装叶轮应力直接求解算法研究[J]. 设计计算, 2011(4): 26-29.
- [2]张铜桥等. 汽轮机叶轮强度计算方法[J]. 汽轮机技术, 2008(1): 20-22.
- [3]洪灵等. 任意截面形状的转轮强度计算方法的研究[J]. 甘肃工业大学学报, 1994(1): 54-59.

作者简介: 张海林 (1982.9-) 男, 毕业院校: 长春工程学院; 现就职单位: 洛阳中重发电设备有限责任公司。