

径流式涡轮机械 导风轮的设计与加工

李燕生 编著



国防工业出版社

径流式涡轮机械导风轮 的设计与加工

李 燕 生 编 著

國防工業出版社

内 容 简 介

本书是一本全面阐述径流式涡轮机械导风轮造型计算和制造工艺问题的专题著作。

书中首先系统地讨论了平基面、非可展直纹抛物面的几何性质，介绍了以此抛物面作为导风轮型面的设计方法并分析了此面所适用的气流流型。

书中提出了机械加工此种抛物面的方法——创成法并指出以传统的铣削方法加工非可展直纹面时所出现的问题。

本书可作为高等学校有关专业的教学参考书，也可供从事离心压气机、向心涡轮或离心膨胀机的设计与制造的工程技术人员参考使用。

径流式涡轮机械导风轮的设计与加工

李 燕 生 编 著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 4¹/₄ 87千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷 印数：0,001—1,800册

统一书号：15034·2416 定价：0.47元

前 言

随着我国国民经济的迅速发展，各种用途的径流式涡轮机械的设计与生产任务日益增多。无论在设计半开式离心压气机或者在设计向心式涡轮时，设计者必然会遇到的一个问题，就是它的导风轮叶片的造型问题。径流式涡轮机械的气动性能和强度性能均与此问题有着密切的关系。此外，采用合理的导风轮的成型方法，可使导风轮具有较好的工艺性和通用性。鉴于目前尚无讨论导风轮设计问题的专题著作，因此作者企图以近年来所进行的工作^(1,2,3)为基础，系统地阐述一下有关径流式涡轮机械导风轮的一种成型理论和对应的加工方法。

在本书的第一章中，以不同的坐标给出了其基面为平面的、非可展直纹抛物面的方程式。据此推导出导风轮叶片角的计算式，纠正了文献〔4〕中所存在的一些错误。此外，在本章中还讨论了这种直纹面的几何性质。

书中所讨论的抛物面叶型在一定的条件下适用于一定的气流流型。第二章的内容主要是讨论这方面的问题。

在本书的第三章中简单地分析了在铣削非可展直纹抛物面叶型过程中所产生的“切削干涉”的必然性。此现象长期以来从未引起人们的注意。通过对此问题的分析，揭示出传统的、非可展直纹面叶型铣削工艺的不合理性。针对此点，作者提出了一种机械加工任意一种非可展直纹面，其中包括

直纹抛物面叶型的新方法——创成法。

在第四章中给出了一些有关叶型抛物面的数学方程，以供进行叶轮中气流的三元流动分析时使用。

为了阐述方便起见，书中所讨论的内容大多是围绕离心压气机的导风轮展开的。当然，本造型方法同样也适用于向心涡轮或膨胀机的导风轮的设计。在本书的附录中，给出了向心涡轮导风轮的设计步骤。

使用平基面、以直的母线形成的这种直纹抛物面，在亚音速流动条件下，具有较好的气动与工艺性能。在强度方面它也能满足我们所提出的要求。因此，本书的讨论范围只局限于这种非可展直纹抛物面的几何性质以及其叶型的设计方法。在高压比（例如当压比超过6左右）的离心压气机中，所使用的导风轮应为超音速导风轮。这种导风轮的设计具有另外一些特点，这个问题在本书中就不准备讨论了。

本书是在上海机械学院涡轮机械教研室同志的关心与支持下写成的。同志们对初稿进行仔细地审阅并提出了宝贵的意见。我室沈炳正教授以及上海同济大学禹惠生同志于百忙中抽暇审阅了书稿。此外，陈庆庄同志也给予了具体的帮助。在此，作者一并致以由衷的谢意。

最后作者诚恳地期待读者对本书提出意见与批评。

作 者

目 录

符号表

第一章 导风轮抛物面叶型的设计

- § 1-1 对导风轮叶型的基本要求 5
- § 1-2 非可展直纹抛物面的方程式 9
- § 1-3 导风轮抛物面指数 t 的选择 18
- § 1-4 导风轮中心抛物面上各点的叶片角 23
- § 1-5 设计叶型中心抛物面的一些具体问题 32
- § 1-6 以二抛物面成型的导风轮叶片的强度特性 34
- § 1-7 导风轮叶片的造型 40

第二章 抛物面叶型适用的气流流型

- § 2-1 非移轴抛物面叶型的流型方程式 47
- § 2-2 抛物面的流型常数 56
- § 2-3 导流锥型线的设计 61

第三章 抛物面叶型的加工

- § 3-1 导风轮蜡模模块的手工加工 66
- § 3-2 非可展直纹抛物面铣削过程中的“干涉”现象 75
- § 3-3 “干涉”的危害性 80
- § 3-4 加工抛物面的创成法 84

第四章 与径流式涡轮机械叶轮三元流动 计算有关的一些问题

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| § 4-1 | 抛物面叶型的几个有关参量的计算式 | 89 |
| § 4-2 | 径向直叶片的一些方程式 | 99 |
| 附录 | 导风轮造型的计算程序及数值示例 | 101 |
| | 参考文献 | 129 |

符 号 表

| | |
|-----------|--|
| C | 气流绝对速度 |
| D | 直径 |
| F | 导风轮叶片截面积 |
| I | 任意等 x 面 |
| J | 任意等 z 面 |
| K | 常数 |
| K_z | 流道阻塞系数 |
| L | 叶型直线段 |
| M | 常数 $M = \frac{z_m^f}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \psi_m}$ |
| N | 叶片数 |
| P | 基面 |
| R | 半径 |
| S | 导风轮叶片截面静力矩 |
| T | 导风轮栅距 |
| U | 叶片周向速度 |
| W | 气流相对速度 |
| X, Y, Z | 直角坐标系的坐标 |
| a | 抛物面系数 |
| b | 抛物面上各根抛物线的原点坐标系数 $b = (x_p - x) \operatorname{tg} \theta$ |

- c 截面位置系数 $c = \frac{x - x_0}{x_p - x_0}$
- d 双叶线常数
- m 叶片 y 向厚度之半 (Q' 面上)
- n 叶片 y 向厚度之半 (Q 面上)
- \bar{n} 法线矢量
- \bar{n}_0 单位法线矢量
- q 叶间流道中的准正交线
- t 抛物面的指数
- x, y, z 斜角坐标系中的坐标
- x_0 抛物面的移轴量
- α 绝对气流角 $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{C_x}{C_u}$ (见图1-2); 三元流动分析中的子午流线倾角 $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{dR}{dz}$ (见图4-2)
- β 相对气流角 $\beta = \text{tg}^{-1} \frac{W_x}{W_u}$ (见图1-2)
- β' I 截面上的抛物线倾角 $\beta' = \text{tg}^{-1} \frac{\partial z}{\partial y}$ (见图1-6)
- β 三元流动分析中的 β 角 $\beta = \text{tg}^{-1} \frac{R \partial \varphi}{dm}$ (见图4-2)
- β_s 导风轮叶片中心抛物面的叶片角 $\beta_s = \text{tg}^{-1} \frac{\partial z}{R \partial \varphi}$
(见图1-8)
- γ 叶型参数
- Δ 叶片厚度
- $\Delta\beta$ 冲角 (或向心涡轮的滞后角)
- ΔR 半径差 $\Delta R = R - R_k$

- δ 叶片截面的半锥角
 ε 叶厚中心角之半
 ζ 导风轮内端面的倾角 (见图 2-1)
 θ 决定基面与抛物面相对位置的参数
 λ 双叶线极角
 ρ 双叶线极径
 ν 车床主轴中心线与导轨的夹角 (见图 3-6)
 μ 导风轮进气边子午面投影的倾角 (图 2-1)
 π 圆周率
 τ 导风轮任意截面上的气流转折角

$$\operatorname{tg} \tau_i = \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_{\substack{x = x_i \\ z = z_m}}$$
 φ 抛物面圆柱坐标系的周向坐标
 φ_m 叶型的包角
 Φ 抛物面的流型常数
 ψ 抛物面形成线和 X 轴的夹角
 Λ 叶厚比 $\Lambda = \frac{m}{n}$
 Ω 导风轮进气边的覆盖角

下 角 注

- 1 压气机叶轮进口截面的
 2 压气机叶轮出口截面的
 b 导风轮叶片背抛物面的
 c 平均直径的
 d 叶片截面锥顶的

- f 导风轮叶片腹抛物面的
 g 叶片的
 G 导流锥型线终点的
 i 任意等 x 面的
 j 任意等 z 面的
 k 叶片截面重心的
 K 叶根的
 m 最大的 (即 Q' 面上的)
 mer 子午面的
 N 两面角的
 O 中心抛物面轴的
 p 基面上的
 R 半径的
 s 实际的
 u 周向的
 v 垂直进气边的
 w 外径的
 z 轴向的
 φ 周向的
 ϕ 铣刀的

第一章 导风轮抛物面叶型的设计

§ 1-1 对导风轮叶型的基本要求

热力计算结束后离心压气机的主要气流参数和几何尺寸就都确定下来了。这时即可根据这些参数着手导风轮的造型设计。

在高速旋转的离心压气机中，气流从进气道经导风轮流入叶轮。在叶轮的叶间流道中，除了气流的速度不断发生变化外，气流的流动方向也在不断地朝着下列两个方向变化：

1. 气流的子午面分速 W_{mer} ，在流道底部及其顶部的机壳内壁限制下，从 W_{mer1} 逐渐转为 W_{mer2} (见图 1-1)。

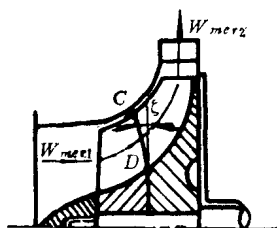


图1-1 叶轮流道的子午面形状

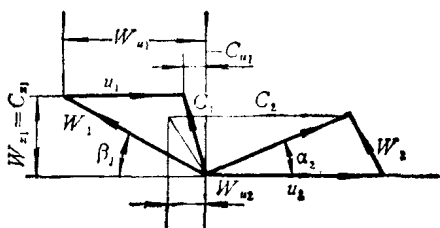


图1-2 叶轮进、出口的气流速度三角形

2. 在导风轮的入口处，气流以 β_1 角流入叶轮。气流在流道中由于受导风轮叶片的约束作用而逐渐偏转。在此过程中气流的周向分速从 W_{u1} 变为叶轮出口的 W_{u2} 。

当然，上面所给出的是经简化了的一元流动模型。实际上叶轮内部的流动是一种复杂的、具有空间性质的流动。导风轮叶片的形状和子午面上流道内、外轮廓线的几何形状共同决定着叶间流道中气流速度的分布情况。导风轮的设计方案对于导风轮内流场的形状具有很大的影响。

早期曾使用圆柱面、圆锥面或双圆锥面等曲面来设计径流式涡轮机械的导风轮叶片。目前这些曲面均逐渐被抛物面所替代。诚然，精密铸造工艺的发展为抛物面叶型的使用与推广提供了有利的条件，但是最主要的原因还是因为抛物面能够更好地满足高速径流式涡轮机械导风轮对其型面所提出的要求。根据过去生产与设计中的经验，这些要求大致可以归纳为：

1. 导风轮应具有良好的气动性能；
2. 导风轮进气边的几何形状应能适应给定的气流流型；
3. 导风轮叶片应具有良好的强度特性；
4. 叶型的加工方法应精确、简单。

在导风轮的叶片造型中，所使用的抛物面有许多种，但经常使用的抛物面可分为三类。

1. 根据抛物面的几何性质可分为：

(1) 直纹抛物面 这时抛物面由一根直的母线形成。此种叶型对钳工较易用手工刮制。另外，也可机械加工。

对于直纹抛物面，根据它的基面的形状又可分为：

a 基面为平面的抛物面 其基准抛物线就处在这个平面上。与基面平行的任一平面和此抛物面的截交线都是同方次的抛物线。因此这时测量样板上的型线极易绘制与制造。

b 基面为圆柱面的抛物面 其基准抛物线绘于某一圆柱面的展开面上。该种抛物面又简称为圆柱抛物面。在各个同心圆柱面上，叶片的中心抛物面和它们的截交线当展开至平面时皆为抛物线。但是叶片的背面或腹面与各同心圆柱面的截交线在展至平面后已经不再是严格的抛物线了。此外测量样板上的型线需经繁琐的数学计算才能得到。

(2) 非直纹的抛物面 这种型面不具有确定形状的母线，一般多由若干个（从理论上讲，应由无穷多个）指定的抛物线“叠加”而成。因此，这种型面只能按样板以手工的方式刮削出来而无法机械加工。

2. 按照抛物面轴和导风轮旋转轴的相对位置，还可将抛物面分为如下两类：

1. 非移轴的 上述两轴相互重合；

2. 移轴的 两轴的位置沿 x 轴方向相差 x_0 。利用移轴量 x_0 这个参数可以稍许调整一下导风轮进气边上叶片角 β_g 沿径向的变化梯度。但是一般来讲，参数 x_0 主要用来改善导风轮叶片的强度特性。

除了个别情况外，一般都不希望使用非直纹的抛物面叶型。因为这种叶型的模块只能靠钳工手工生产，不能利用机械加工，而且即使手工刮削出来也很难保证所有截面的几何形状。这是因为曲面是非直纹的，而控制截面的数目毕竟是有限的缘故。

基面为圆柱面的直纹抛物面叶片计算式，和非移轴的、平基面直纹抛物面一样，非常简单。因此某些生产单位曾采用过这种叶型。但是采用圆柱形基面却给样板型线的设计带来一些不必要的麻烦。因为这时需要将不同的控制截面上的

叶片背、腹面型线精确地投影到,即换算到测量样板平面上。在手工计算的条件下,绘制每付样板上的型线需要花费相当多的时间。此外,当圆柱抛物面设计成移轴的时候,除基面外,在其它与基面同心的圆柱面上都不能获得抛物线形状的截交线了。

3. 按照直纹抛物面的几何性质又可分为:

(1) 非可展的直纹抛物面 以上介绍的直纹抛物面均属非可展的。其进气边叶片角的变化规律可按入口流型来调整。

(2) 可展的直纹抛物面 这种抛物面和与其母线垂直的各平面的截交线都是基面上的那根抛物线。这种叶型甚易铣制,因此曾用于个别向心膨胀机的导风轮上。应当指出的是,这种抛物面叶型只对应于一种固定的流型,即

$$\operatorname{tg}\beta_g = \text{const.}$$

显然,这种流型不适于离心压气机导风轮叶片的造型。

平基面的、非可展直纹抛物面无论在气动、强度方面、或者在工艺性与通用性方面都具有良好的性质。这种型面能够较好地满足上述各项要求。

从原则上来讲,这种抛物面能适应压气机进气道出口截面上常见的各种气流流型。但是,由于导风轮进气边的子午面投影的形状多为一根直线,所以这种抛物面叶型仅具有一些对应的适用流型,而不能满足任意的气流速度分布规律的要求。这点可以利用下列措施来加以补救,即在设计导风轮叶型时,除了保证两个(或三个)指定截面上的气流冲角恰好等于规定的数值外,还设法使进气边上其它各点的冲角都处于许用范围之内。

对于向心涡轮的导风轮来讲，这一问题并不存在。因为在向心涡轮的设计中，其叶轮出口的气流可以按照设计者的意图进行组织。

后面将结合各章、节中所讨论的内容具体地分析这种平面非可展直纹抛物面是如何满足以上各种要求的。为了简便起见，在本书的后继章节中，凡未特别指明的抛物面均为本书所讨论的对象——其基面为平面的、非可展直纹抛物面。

§ 1-2 非可展直纹抛物面的方程式

1. 抛物面的形成 在图 1-3 上以 H 为原点给出一个直角坐标系 X 、 Y 、 Z 。在这个坐标系中，取一个与 ZHY 面平行且与之相距 X_p 的 P 平面。在 P 面上，从 A_p 点开始画一条抛物线，其方程式为

$$Y_p = a_p Z'^2 \quad (1-1)$$

式中的下角注 p 表示该参数是 P 面上的抛物线的。

另外在图 1-3 上还取了两个与 P 面垂直的平面 Q 及 Q' 。 Q 、 Q' 两面相互平行，彼此相距 Z_m 。

在空间取一根和 Z 轴平行的直线。此线和 Q 、 Q' 面分别相交于 O 及 O' 。 OO' 线上各点距 ZHY 面 X_0 。

如果在空间内始终平行着 Q 面移动一根直线，并且使这根直线的一端从 O 点开始沿着 OO' 线滑动，而另一端沿着 P 面上的抛物线滑动，则此线在空间内所形成的曲面即为一平基面的直纹抛物面。 OO' 称为此抛物面的轴， P 面称为它的基面。此处应当提醒的是， OO' 线只是形成抛物面的轴，而并不一定是未来导风轮的旋转轴。

离心压气机导风轮的叶片若按抛物面成型，除了 P 面与

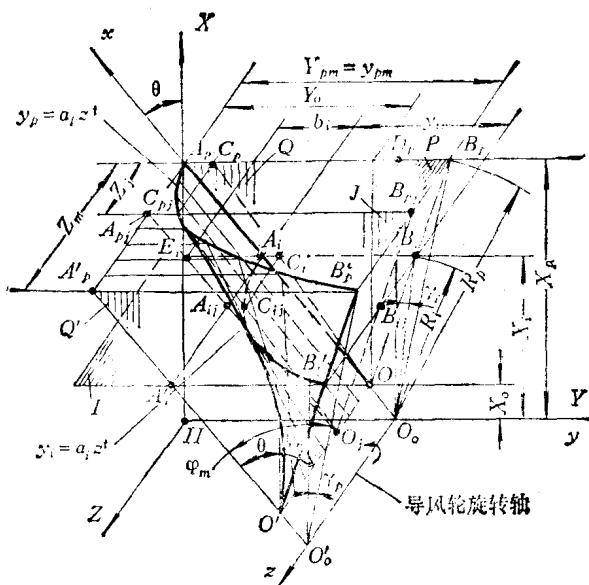


图1-3 抛物面的形成

此抛物面的交线是根抛物线外, 与 P 面平行的其它各个平面, 例如图 1-3 上的 I 面, 和该抛物面的截交线最好也都是抛物线。下面将会看到, 按上述方法形成的抛物面就具有这种重要的性质。

若令上述抛物面围绕某一固定的轴心线 $O_0O'_0$ 旋转, 此曲面即成为导风轮的一个叶片型面。对于向心涡轮的导风轮来讲, 其排气边座落在 Q' 面上的 B'_pO' 线上。其进气边为 A_pO , 而在离心压气机的导风轮上, 两者的位置正好相反。

从图上可以看到, 导风轮的旋转轴心线位于 ZHY 面上, 与抛物面的轴 OO' 平行。由于压气机导风轮的排气边 A_pO 必须处于径向线上, 以便与叶轮本体上的径向直叶片连结,