

日 利 茨 基 著

汽 輪 机 零 件 的 結 構 与 强 度 計 算

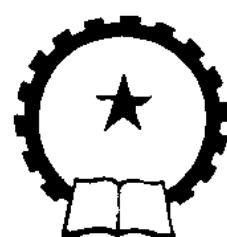


机 械 工 業 出 版 社

汽輪機零件的結構与 強度計算

日利茨基著

李啓思、应凌翔譯



机械工業出版社

1958

出版者的話

本書有系統地敘述了汽輪機各部零件的結構及強度計算方法。全書取材較為廣泛，除着重地闡明汽輪機轉子、葉片、轉盤、轉軸等特殊零件的強度與振動計算外，尚以相當的篇幅介紹近代汽輪機軸承的計算方法和潤滑的流體動力學理論。其他如葉片、轉盤、汽缸螺栓的塑性形變計算，輪轂的撓形變，轉盤孔的應力集中，轉盤和軸的配合過盈，鬆動轉速的確定，焊接轉子的計算，回轉效應對機軸振動的影響等問題均有清楚的敘述。

全書的理論計算部分適合高等工業學校學生的水平，在計算方法上採取簡單實用而在工程應用上又足夠精確的方法。

書中概括地描述了蘇聯近代汽輪機零件的典型結構、這些零件的製造工藝的例子、材料的選擇和試驗以及公差和加工光潔度。全書充分反映出蘇聯在汽輪機製造方面的巨大成就。

本書可供汽輪機設計部門、製造工廠、發電廠的工程師和技術員們參考，也可以作為汽輪機專業、機械製造專業及動力專業等各系學生的教材。

蘇聯 Г. С. Жирицкий 著 'Конструкция и расчет на прочность деталей паровых турбин' (Госэнергоиздат 1955 年第一版)

* * *

NO. 1704

1958 年 6 月第一版

1958 年 6 月第一版第一次印刷

787×1092^{1/16} 字數 377 千字 印張 16^{5/8}

0,001—2,500 冊

機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷

新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號

定價(10) 2.60 元

目次

前言	5
----	---

上篇 汽輪机轉子及其零件

0-1 汽輪机轉子的类型	7
第一章 工作叶片的結構	9
1-1 工作叶片的类型	9
1-2 工作叶片的叶型	12
1-3 叶片成型部的加工工艺范例	13
1-4 叶片的頂部及包箍 (結構及加工方法)	16
1-5 叶片根部的类型; 根部尺寸的公差; 加工方法	18
第二章 叶片強度的計算	22
2-1 計算叶片強度的基本原則	22
2-2 軸流式汽輪机叶片成型部的拉伸計算	22
2-3 軸流式汽輪机單独叶片的撓曲計算	26
2-4 用包箍相联的叶片的撓曲計算 (根据列文的著作[14])	29
2-5 叶型要素的确定; 叶片重量和重心的确定	34
2-6 叶片的包箍和端釘的計算	37
2-7 叶根与輪緣的計算 (根据列文的著作[14])	38
2-8 徑流式汽輪机叶片的結構与計算特点	41
2-9 金屬的蠕变及叶片塑性变形的决定	43
第三章 叶片的振动	46
3-1 基本概念	46
3-2 汽輪机叶片的振动原因	47
3-3 單独叶片的振动	48
3-4 單独等截面叶片的固有振动頻率	48
3-5 單独变截面叶片的固有振动頻率	51
3-6 叶片組的振动形狀	55
3-7 等截面叶片組的固有振动頻率	56
3-8 变截面叶片組的固有振动頻率	58
3-9 叶片振动时的应力	60
3-10 振动时叶片可靠性的保証	64
第四章 工作叶片的磨蝕和損坏。叶片的材料。容許应力的选择	66

4-1 工作叶片的磨蝕和損坏	66
4-2 对于叶片材料的要求	69
4-3 工作叶片材料	71
4-4 垫塊, 包箍和端釘的材料	74
4-5 容許应力的选择	74
第五章 轉盤与轉鼓的結構和制造工艺范例	75
5-1 轉盤与轉鼓的結構	75
5-2 轉盤与轉鼓在軸上的套裝及固定方法	77
5-3 轉盤、轉鼓制造概述	80
5-4 轉鼓与轉盤的叶片; 轉子的裝配与平衡	82
第六章 轉鼓与轉盤的強度計算	83
6-1 轉鼓的計算	83
6-2 計算轉盤的一般公式	84
6-3 等厚度轉盤	85
6-4 溫度不变的等厚度轉盤之計算	87
6-5 溫度沿半徑变化的等厚度轉盤之計算	89
6-6 溫度不变的錐形轉盤之計算	92
6-7 等强度轉盤 (無溫度应力)	93
6-8 具有輪緣和輪轂的等厚度、錐形、等强度轉盤的計算 (溫度不变)	96
6-9 任意剖面形狀的轉盤的計算	101
6-10 任意剖面形狀的轉盤的計算举例	103
第七章 計算轉盤強度的若干特殊命题。轉盤与轉鼓的材料。容許应力的选择	105
7-1 輪轂撓形变的計算	105
7-2 轉盤孔邊緣上的应力集中	106
7-3 轉盤与轉軸的裝配过盈。松动轉速	106
7-4 按給定的松动轉速計算轉盤的程序和例子	109
7-5 焊接轉子的計算	112
7-6 計及金屬之蠕变的轉盤之計算基础	115
7-7 轉盤与轉鼓的材料。容許应力的选择	121

第八章 轉盤的振動 123

- 8-1 轉盤的振動類型和振動的起因 123
- 8-2 確定轉盤固有振動頻率的一般方法 126
- 8-3 轉盤振動時的勢能 126
- 8-4 轉盤振動時的動能 130
- 8-5 轉盤的振動靜頻率的決定 131
- 8-6 轉盤旋轉時所引起的內力的功 132
- 8-7 轉動轉盤的振動頻率的決定。振動綫圖 135

第九章 汽輪機軸的結構、材料與製造工藝的舉例。軸的強度計算 137

- 9-1 汽輪機軸的結構特點 137
- 9-2 汽輪機軸的材料和主要製造工藝的舉例 138
- 9-3 軸的強度計算和容許應力的選擇 139

第十章 汽輪機軸的振動 140

- 10-1 軸的臨界轉速的概念 140

- 10-2 無轉盤的等直徑軸的振動頻率 143
- 10-3 具有一個或數個轉盤的等直徑軸的臨界轉速的決定 145
- 10-4 多級汽輪機機軸的能量計算法 146
- 10-5 確定軸的臨界轉速的例子 148
- 10-6 三支点軸的臨界轉速 151
- 10-7 附帶因素對機軸臨界轉速的影響 152
- 10-8 計及轉盤回轉效應的轉軸計算 155
- 10-9 決定軸的臨界轉速的近似方法 157
- 10-10 軸的工作轉速與臨界轉速之間的必要比率 157

第十一章 聯軸節 157

- 11-1 對於聯軸節的一般要求 157
- 11-2 剛性及半剛性聯軸節 158
- 11-3 爪式聯軸節與齒輪聯軸節 159
- 11-4 撓性聯軸節 160
- 11-5 蛇形彈簧聯軸節的計算 161

下篇 汽輪機的固定部分及其零件

第十二章 汽輪機機殼 164

- 12-1 對機殼結構的一般要求 164
- 12-2 機殼結構的例子 165
- 12-3 機殼的強度計算 174
- 12-4 機殼的材料和容許應力的選擇 175
- 12-5 機殼製造工藝的簡要知識 178

第十三章 噴嘴弧，隔板和導向葉片 179

- 13-1 噴嘴弧 179
- 13-2 隔板 183
- 13-3 隔板計算 188
- 13-4 隔板的材料和許用應力的選擇 190
- 13-5 導向葉片 191

第十四章 汽封 193

- 14-1 端部曲徑汽封 193
- 14-2 碳精汽封 196
- 14-3 水隔汽封 197
- 14-4 端部汽封的管路 198
- 14-5 隔板汽封 200

第十五章 軸承 201

- 15-1 軸承的工作原理 201
- 15-2 流體動力學的潤滑理論的原理 202

- 15-3 運用流體動力學的潤滑理論計算支持軸承 205
- 15-4 選擇間隙的大小和支持軸承的計算程序 212
- 15-5 支持軸承的構造、材料和主要的製造工藝方法 215
- 15-6 運用流體動力學的潤滑理論計算止推軸承 217
- 15-7 按雅諾夫斯基方法計算止推軸承 219
- 15-8 推力環的計算 223
- 15-9 止推軸承的結構 223

第十六章 潤滑油系統及其設備 229

- 16-1 汽輪機用的潤滑油 229
- 16-2 汽輪機的潤滑油系統 231
- 16-3 油槽 232
- 16-4 潤滑油泵 234
- 16-5 冷油器 244
- 16-6 潤滑油路的管制件 246

參考文獻 248

附錄 (決定葉型轉動慣量用的列綫圖) 250

中俄名詞對照表 255

譯者更改意見表 258

前言

汽輪机的基本課程可分为三大部分: 1) 汽輪机热力过程的原理和結構; 2) 汽輪机零件的結構与强度計算; 3) 汽輪机的調节。

我国出版机构所出版的苏联作家們的汽輪机教程都是这样分类的。

目前我們有許多非常合用的关于第一和第三兩部分的書籍, 但是近年来所出版的属于第二部分的書籍都只是关于船舶汽輪机那一方面的, 不能反映出固定式汽輪机制造業的现代成就, 这些書所采用的專門名詞大都不很習見, 所根据的技术规范也都是造船工業上所采用的那些資料。

确实, 近年来所出版的某些汽輪机普通教程中, 包括了所有的部分, 但是这些教程不免失之过于簡略, 特别是第二、第三兩部分, 不能包括为深入地研究和設計汽輪机所必需的一切資料。

本書闡述汽輪机課程的第二部分, 即目前已出諸書中最少涉及的一部分, 它可以作为机械制造学院和动力学院学生的教学参考書, 也可供工厂和发电厂的工程技术人员使用。

本書叙述汽輪机最主要的零件的强度計算方法, 并扼要地說明其構造。

調节系統的零件及齒輪减速器本書完全未予討論, 因为前者属于課程的第三部分, 而后者在固定式汽輪机中很少应用, 况且在机械零件教程中对齒輪减速器有頗为詳尽的叙述。

汽輪机轉子的零件——叶片、轉盤、轉軸是最重要最特殊的零件, 書中予以最大的注意。确定这些零件的固有振动頻率是設計汽輪机时所必需的, 書中也給出足够詳細的計算方法。汽輪机的軸承占了很多篇幅; 由于目前还没有十分滿意的計算方法, 因此書中詳細地討論了潤滑的流体力学理論所依据的原則。

著者認為有必要使本書的理論計算部分易于为具有高等工業学校教学大綱范围以內的数学知識的学生們所了解。許多近代的計算方法所要求的数学知識超出了工業学院教学大綱的范围。这些方法只得放弃不講或仅給出若干算式而不加引証, 介紹有兴趣的讀者去参考專門的文献。

在同时有数种价值差不多相同的計算方法时, 著者不采用准确性最大的而采用最簡單的, 但其准确度在工程計算中可以接受的方法。

由于篇幅的限制, 書中有关零件構造的圖表資料尽量減縮, 仅列举近代的几乎完全是苏联工厂的典型構造。

在汽輪机課程中本書首次对汽輪机各特殊零件的基本尺寸的公差、表面的加工光潔度和制造工艺过程的基本原理作了概括的介紹。著者認為, 为了估計零件的劳动量, 这样做是必要的, 特别是因为本書应该作为学生們設計汽輪机时的参考書的緣故。

所采用的各种資料的專門名詞按照国家标准 (ГОСТ) 給出。

著者在編写本書时采用了許多苏联学者和工程师的著作, 包括出版的單行本和期刊。

著者最常引用下列諸書: 1) 列文 (А. В. Левин), [汽輪机的工作叶片和轉盤], 国立动力出版社, 1953; 2) 雅諾夫斯基 (М. И. Яновский), [汽輪机零件的設置与强度計算], 苏联科学院出版社, 1947。在構造方面, 大都采自下列各書: 1) 屠比揚斯基 (Л. И. Тубянский), [列宁格勒斯大林金屬工厂 (ЛМЗ) 中压汽輪机的管理], 国立动力出版社, 1949; 2) 屠比揚斯基和佛联凱尔 (Л. Д. Френкель), [列宁格勒斯大林金屬工厂的高压汽輪机], 国立动力出版社, 1953; 3) 斯維尔契柯夫 (А. Н. Сверчков), [汽

輪機的檢修和校準》，國立動力出版社，1951。在材料方面，著者參考：奧勤格（И. А. Одинг），《蒸汽鍋爐、汽輪機與汽輪發電機的金屬強度學基礎》，國立動力出版社，1949；在製造工藝學方面，參考沙赫拉依（М. Л. Шахрай）教授主編的集體著作，汽輪機製造工藝學，國立機器製造書籍出版社，1948。

列寧格勒斯大林金屬工廠以及國內其它的工廠和學校的同仁們：列文、濟別爾曼（А. С. Зильберман）、茲維雅庚采夫（В. В. Звягинцев）、利斯（В. Ф. Рис）、柯德尼爾（Д. Ш. Коднир）、馬里寧（Н. Н. Малинин）等人的科學工作給予著者很大的幫助。

書末列有本書所引用的全部參考文獻（以著作者姓名為序）。

列寧格勒斯大林金屬工廠的總設計師，斯大林獎金獲得者，格陵別爾格（М. И. Гринберг）教授供給我許多圖樣，著者謹向他表示深厚的謝意。

著者熱烈地感謝喀山航空學院葉輪機教研室的同仁們：巴蘭諾夫（Т. В. Баранов）、鮑杜諾夫（М. Н. Бодунов）、扎納德沃羅夫（В. Н. Занадворов）、馬克蘇托夫（М. К. Максудов）、慕哈密佳諾夫（Л. М. Мухаметзянов）和斯特隆金（В. А. Стрункин）對本書的編寫所給予的幫助。

著者謹向工程師列文表示特別的謝忱，他極其仔細地校閱了作者的手稿並作了許多修改和寶貴的指示，給予著者很大的幫助。

著者

上 篇

汽 輪 机 轉 子 及 其 零 件

0-1 汽輪机轉子的类型

轉子是汽輪机最重要的零件之一。轉子上裝有工作叶片，工作叶片与导向叶片組成汽輪机的通流部；轉子傳遞作用在叶片上的蒸汽的圓周分力所产生的扭矩。

通常轉子由軸、轉盤或轉鼓、工作叶片、曲徑軸封或別种軸封以及其它安于軸上的小零件（調速器傳动齿輪、联軸节及擋油圈等）組合而成。

轉子的典型結構示于圖 0-1 上。軸上裝有

轉盤，每个轉盤上裝有一列工作叶片。这种結構主要是用于冲击式汽輪机上，虽然个别的尤其是最后的几級也可能有相当大的反应度。

叶片直徑不大时，轉盤有时可和轉軸由一整塊大型坯件旋成。这种結構常見于高压汽輪机的为首几个冲击級中。圖 0-2 示这种結構的例子。整塊地鍛成的轉子由轉軸的前端部分、具有兩個速度級的轉盤、諸压力級的等厚度冲击式轉盤以及軸的后端部分組成。轉盤之間軸上的突棱是隔板曲徑軸封的一部分。

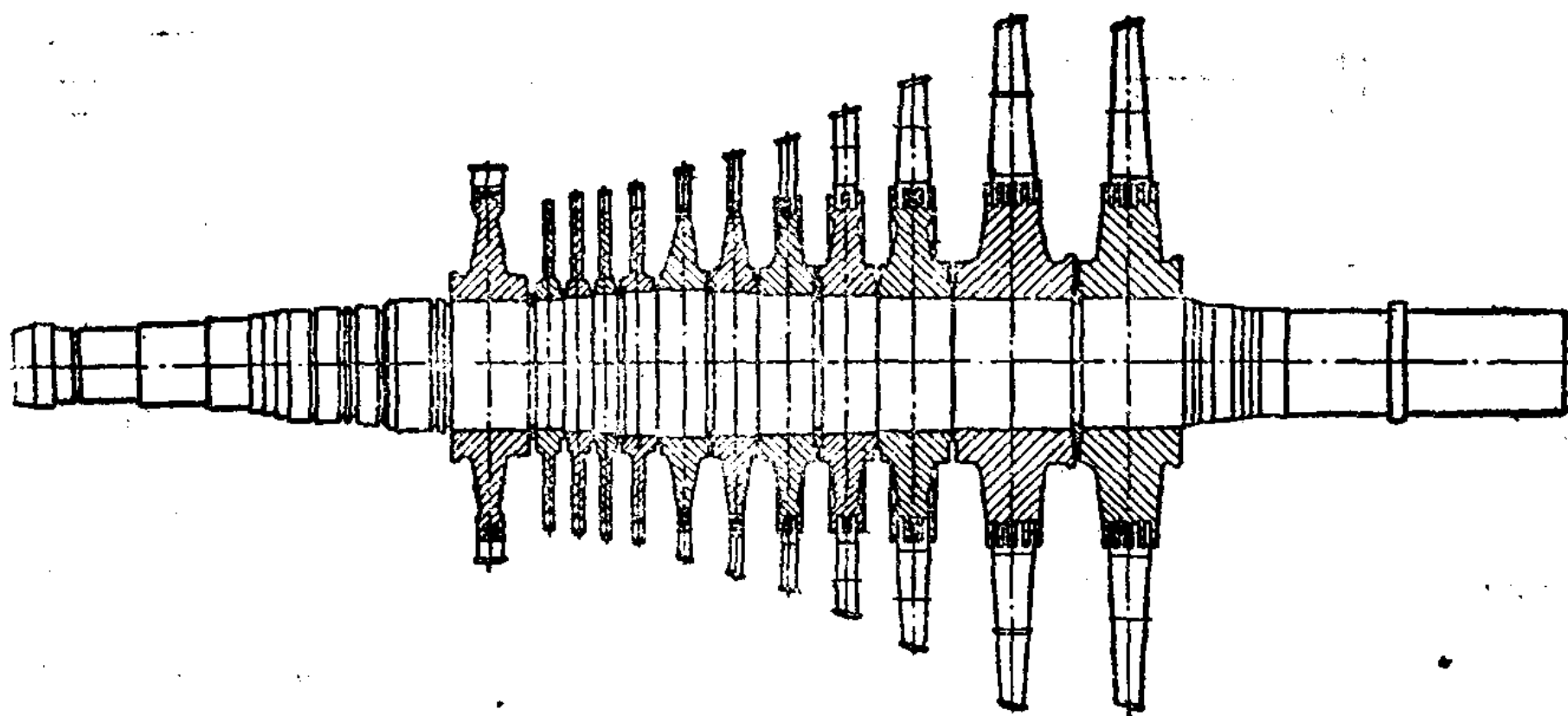


圖0-1 列宁格勒大林金屬工厂 (JIM3) 所产 AK-50-2 型汽輪机的轉子。

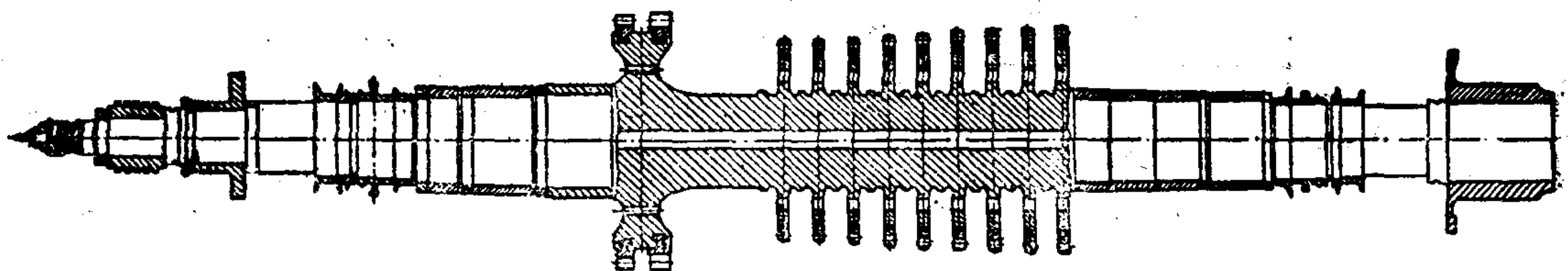


圖0-2 JIM3所产BP-25型前置汽輪机的轉子。

自然, 这种結構只限于在轉盤直徑不大(不超过 1 公尺) 时采用, 因为: 1) 毛坯直徑太大了不易保証鍛件的質量; 2) 轉子加工时, 任何操作过程中的大意可能使昂貴的鍛件变成廢料; 3) 鍛件的材料常需选用合金鋼, 这对头几級的轉盤才屬必要, 余下各級可用普通的碳鋼, 这样, 全鍛轉子就要消耗大量昂貴的合金鋼。

圖 0-3 示上述兩種轉子的混合結構: 高压級轉盤(包括第一調速輪在內) 与轉軸系整塊地旋成, 后面各級是套裝在軸上的。

反应式汽輪机的轉子常采用鼓式結構。圖 0-4 所示的轉子系由一双列速度級轉盤、4 个具有大量反应級的轉鼓及一个用以平衡軸向推力的減荷轉鼓(左首第一个) 組成。

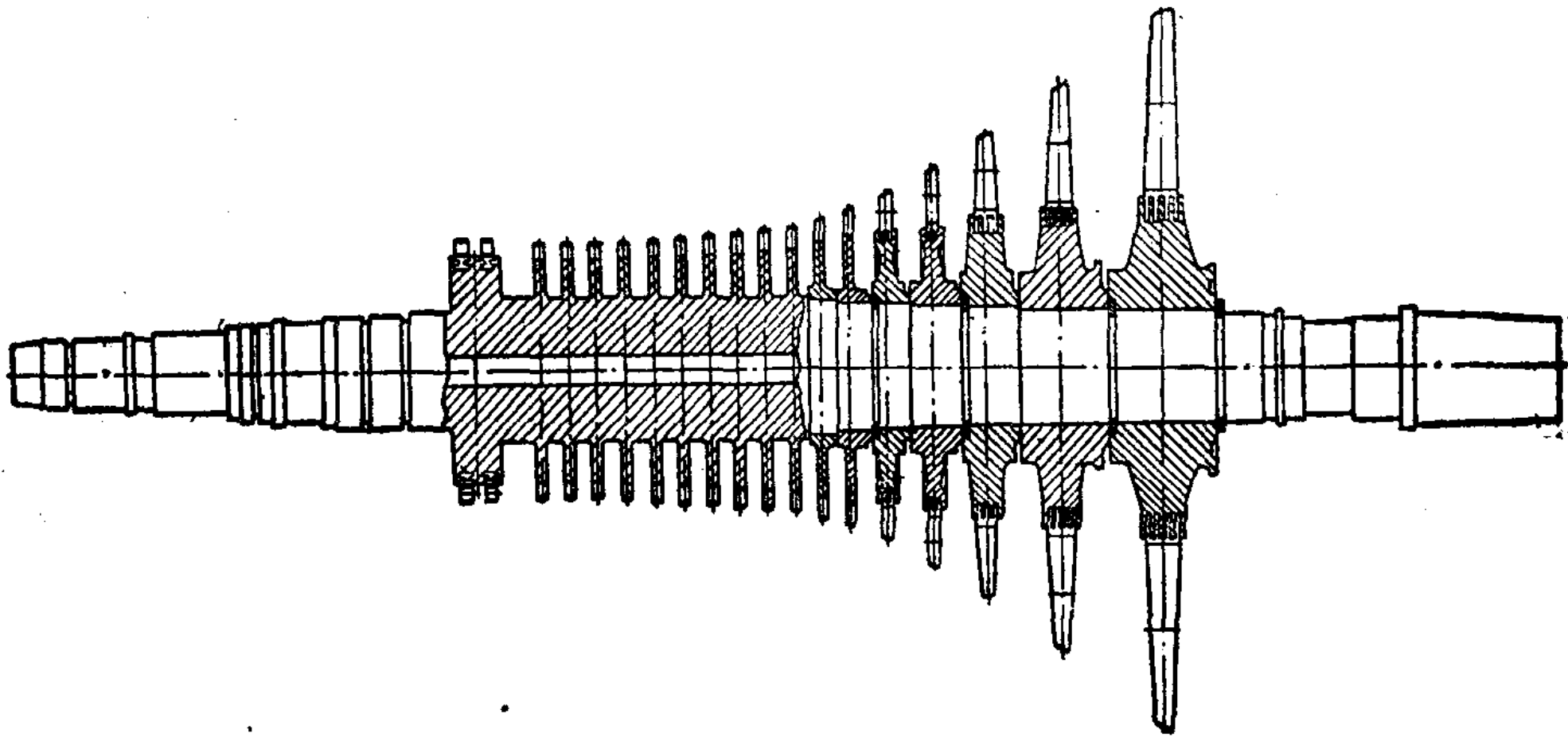


圖0-3 JM3所产BK-50型汽輪机的轉子。

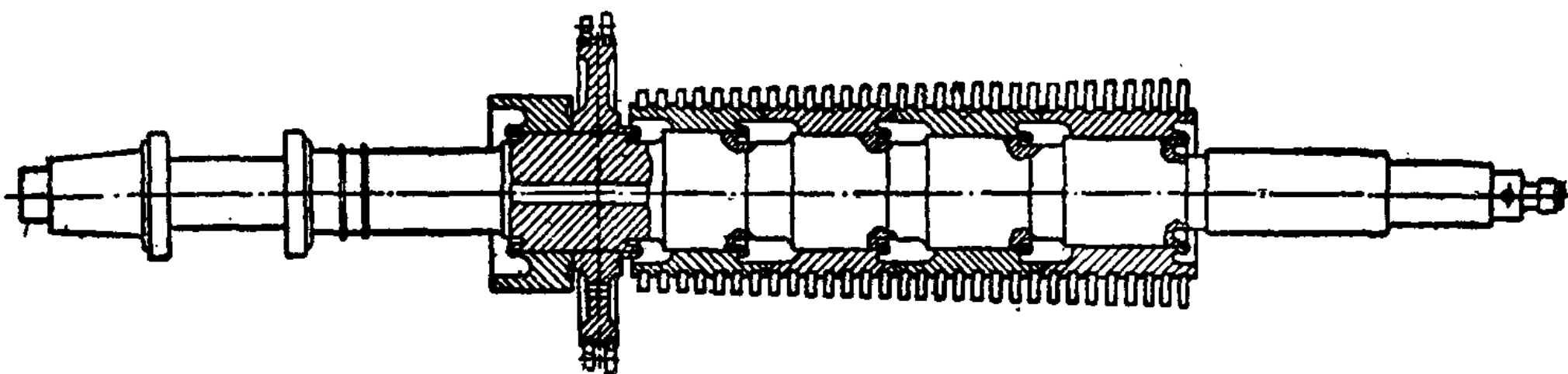


圖0-4 高压轉子。

所有的轉鼓, 包括減荷轉鼓在內, 都套裝在軸上, 并借轉鼓殼部及軸上的突出薄环將轉鼓及軸相互焊接起来。轉盤也用同样的方法固定在轉軸上。

圖 0-5 所示是一空心的鼓形轉子。轉鼓左側被用作船舶汽輪机的順車部分, 它由冲击式轉盤、減荷轉鼓及与轉盤鍛成一体轉軸前端組合而成。这部分轉子用螺栓与裝有順車用反应級的空心轉鼓联接。轉軸的后端部分与轉鼓鍛成一体, 上面裝有两个倒車用轉盤。

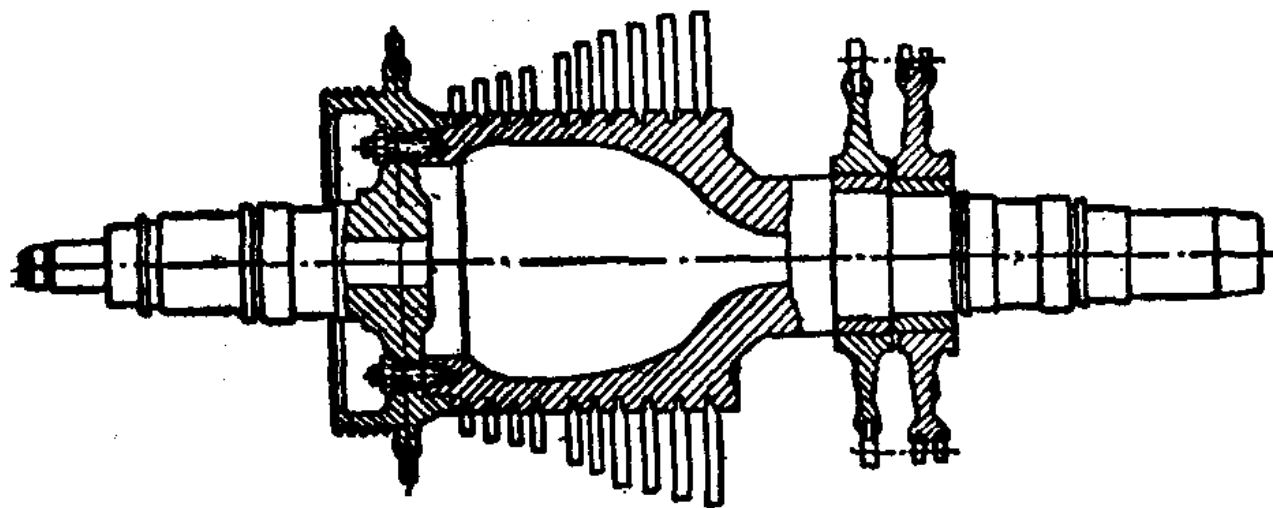


圖0-5 涅夫斯克列宁机器制造厂(H3Л)的船舶汽輪机轉子。

后面將要講到, 按强度条件來說, 空心轉鼓仅在圓周速度不大(約150~200公尺/秒) 时适用, 因而它們被用在反应式汽輪机的圓周速度不大的高压級及中压級中。

有时轉鼓被制成厚重的結構, 仅鑽有一直徑不大的軸孔作为檢驗材料之用。圖 0-6 示这种轉子的結構, 它用在大功率反应式汽

輪機的高壓汽缸中。這種結構僅適合於直徑不大的轉子，即高壓汽輪機的為首數級，同時也適合作為級與級之間沒有隔板的反應式轉子之用。

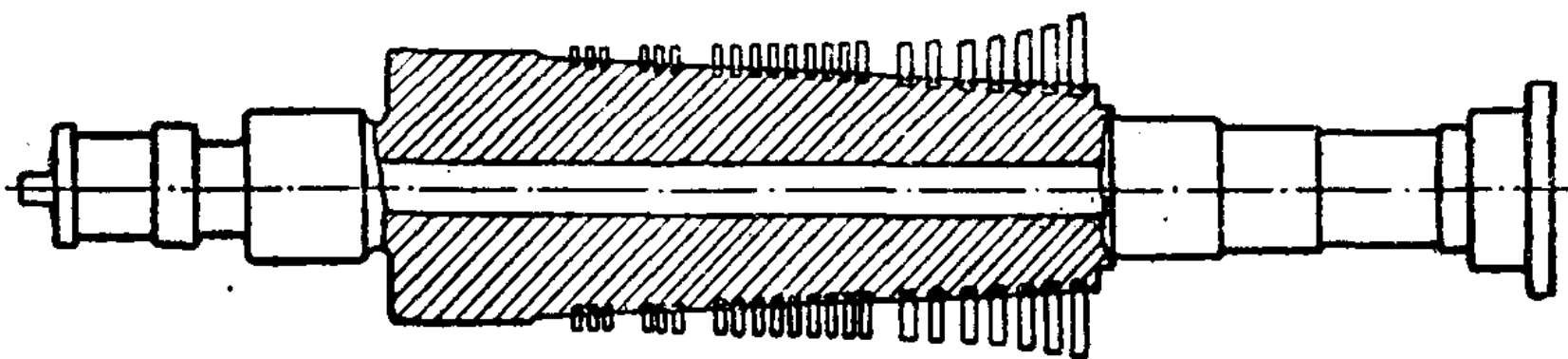


圖0-6 反應式汽輪機的轉子。

直徑大的反應式汽輪機轉子可以做成轉盤-轉鼓式聯合結構，如圖0-7所示。這種轉子的特點也在于它的各部分是用電焊焊接的。在與空心轉鼓鍛成體的轉軸之前端裝有減荷轉鼓和速度級轉盤。這兩個零件用突出的薄環與轉軸焊固，如圖0-4所示。再後面，轉子是由5個互相焊接並與空心轉鼓外緣焊合的圓盤所構成，外緣焊合如焊縫細圖所示。轉軸的後端與最後一個圓盤鍛成體。在低壓級中採用轉盤式結構使得這些級能以高的圓周速度工作。這種轉子的結構比較輕，但同時又具有必要的強度。焊縫的質量當

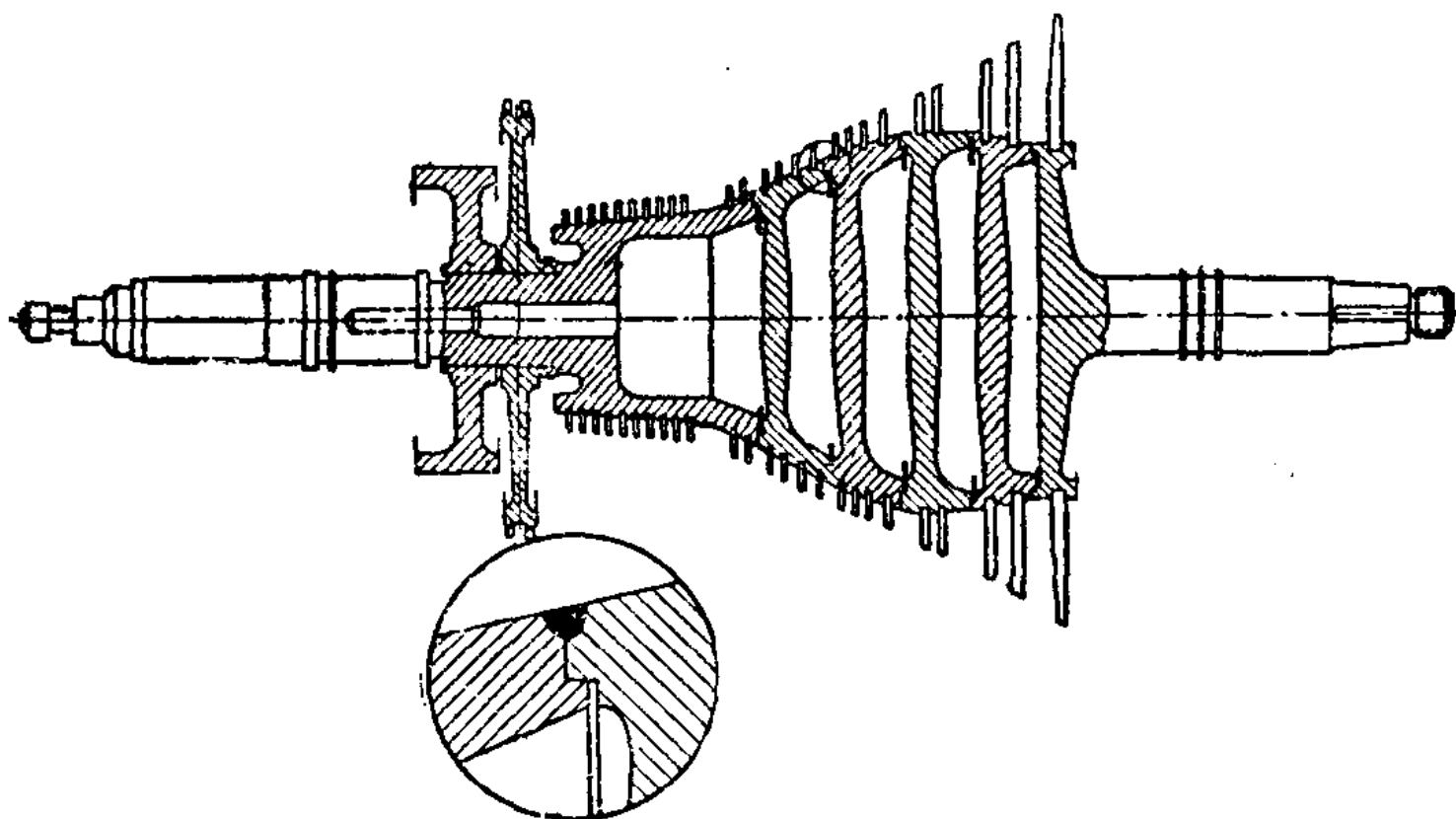


圖0-7 反應式汽輪機的焊接轉子。

然應該是無疵可求的。轉子焊接後應經受熱處理，然後進行最終的機械加工。

第一章 工作葉片的結構

1-1 工作葉片的類型

汽輪機的工作葉片可按不同的標志分類。

葉片可按工作過程的性質分為衝擊式和反應式兩類，而以10~15%以下的反應度工作的葉片（由於葉片的反應度隨高度而變，一般均以葉片中部的反應度作為依據）也應列入第一類。

葉片按其工藝過程可分為模鍛的、軋制的、銑制的（或一般用切削工具加工的）及澆鑄的（在汽輪機製造中試用澆鑄葉片還只是剛才開始）。

最後，葉片還可分為形狀不隨高度而變的等截面葉片和形狀隨高度而變的變截面葉片。

圖1-1所示為衝擊式汽輪機的工作葉片及

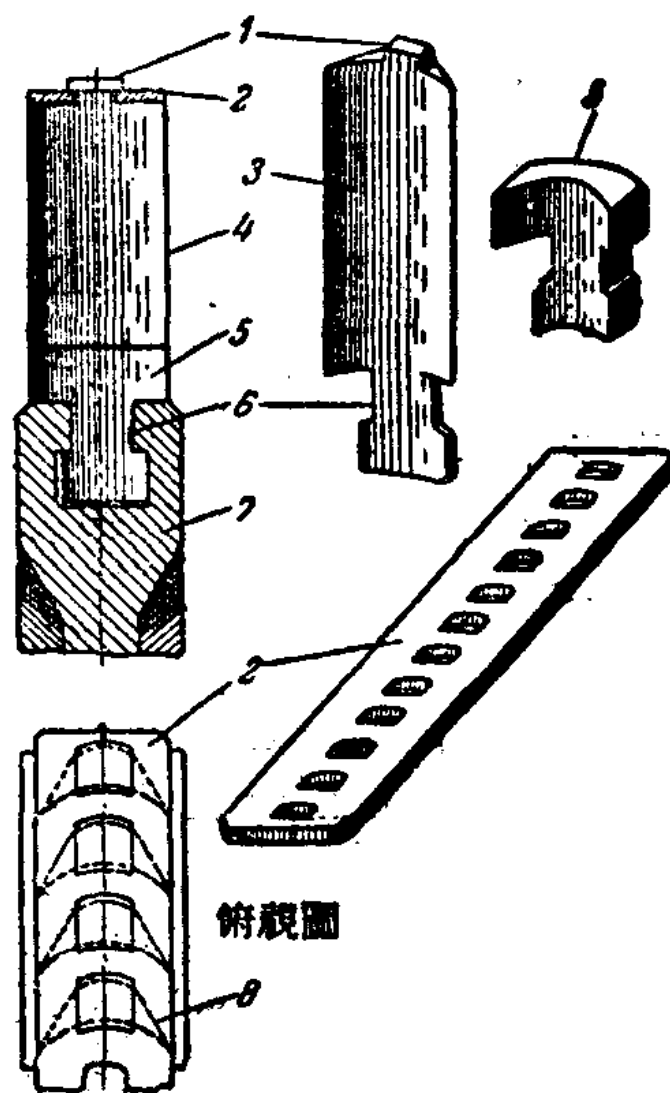


圖1-1 衝擊式汽輪機的工作葉片及其固定方法。

其所屬零件。葉片具有不隨高度而變的剖面形狀（以下簡稱為葉型——譯者），因而可用冷軋

(所謂冷軋葉型)或銑切制成。

葉片本身可分為成型部4、根部6及頂部1。葉片的凹面3有時叫做工作面，凸面8叫做背面。

葉片借助根部6固定在轉盤7(或轉鼓)上，葉片與葉片之間嵌入墊塊5，它決定葉片節距的大小並限制了葉片間工作槽道的高度。正對墊塊的槽道端面為套裝在葉片端釘1上的包箍2，這裡端釘形成了葉片的頂部；包箍裝好後，即將各端釘鉚牢。包箍沿葉輪周長分為數段，各段間留有不大的余隙以補償包箍的受熱膨脹。

這種葉片的根部最小截面遠較成型部的截面為小，因而這種結構只能用於離心力不大，亦即葉片短而圓周速度低的場合。

原則上同於上述結構，但墊塊不是另行製造而是與葉片制成體的葉片根部強度較高。這種葉片(圖1-2)是銑出來的，對高壓級來說，

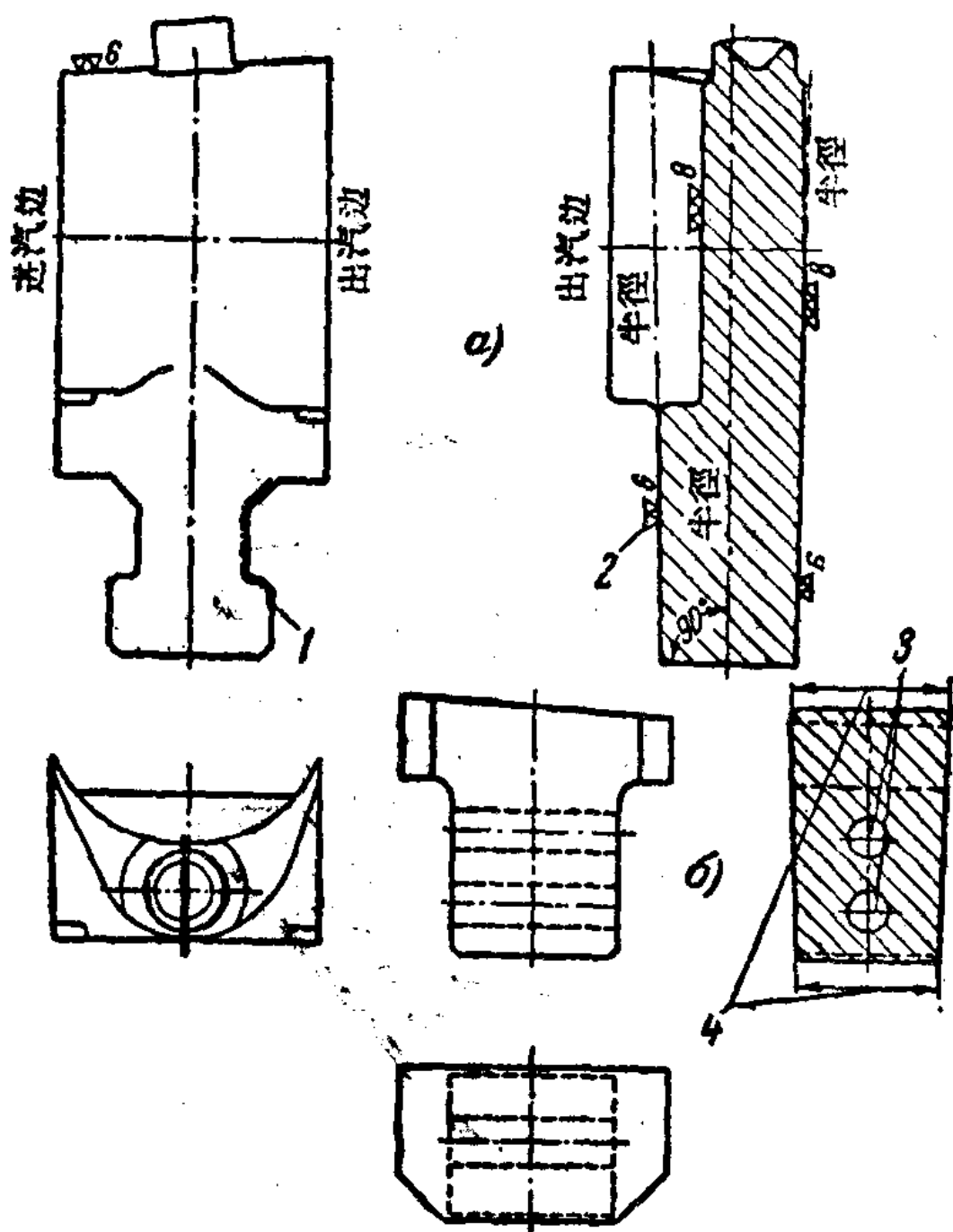


圖1-2 JM3所產汽輪機的沖擊式工作葉片及其固定方法。

a—根部整塊銑成的葉片；b—鎖塊。
1—根部所有的邊緣做成圓角， $R \approx 1$ 公厘；2—按着色在校驗平板上配准；3—裝配後鎖釘孔同輪緣一起鑽出並鉗成最終尺寸；4—這些尺寸按相鄰葉片的根部精確地配准。

包括調節級在內，這種結構是最普遍的一種。這種葉片與圖1-1所示的區別在於葉片端釘的截面是圓形並帶有一錐形孔以方便於鉚接並提高端釘的強度。

兩種葉片(圖1-1、1-2)都是從輪緣的圓柱面上直徑上相對的兩個切口插入輪緣槽道中。切口的寬度等於葉根的最大寬度。在排裝葉片時，應保證葉根與葉根(或與墊塊)緊密貼合到0.05公厘的塞規不能插入的程度。

圖1-2所示用於調節級的葉根系按着色互相配准。為節省勞動力起見，可按寬約10公厘的帶條範圍配准，如圖1-3所示。葉根的配准部分不容許有余隙，而非接觸部分之間的余隙又不應超過0.1公厘。

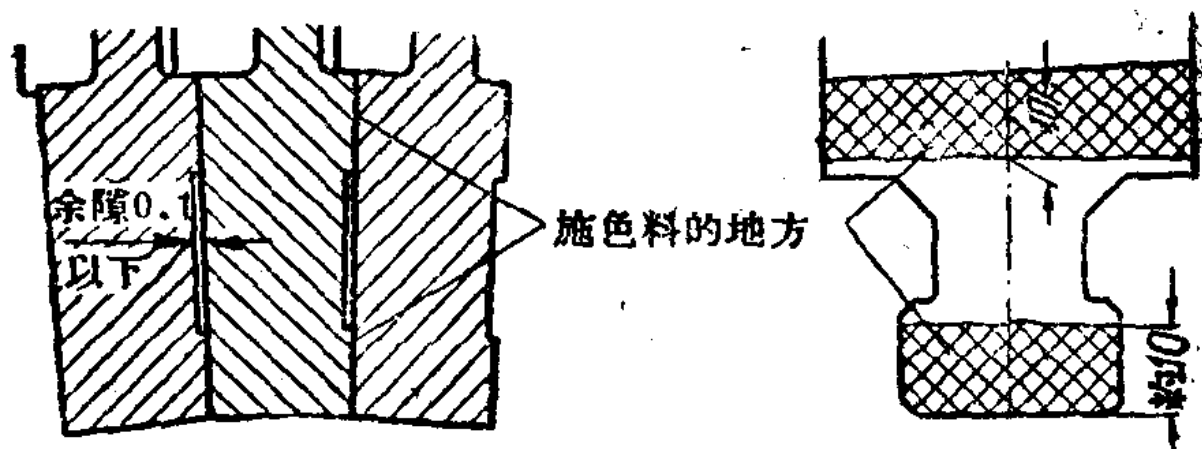


圖1-3 T形葉根的配准。

葉片裝配後，在轉盤的切口中嵌入鎖塊(圖1-2)，鎖塊沿輪周上的長度應按其相鄰葉片間所余尺寸配准(此處葉片節距允許有 ± 2 公厘以內的出入)。鎖塊用鎖釘固定在轉盤上(尚有一些別的固定鎖塊的方法)。

圖1-4所示葉片結構與圖1-2所示者相同，但其鎖釘形狀則與圖1-1所示者相似。

圖1-5示變截面葉片的一種結構。這裡採用所謂叉形葉根，葉片借助此種葉根用鎖釘

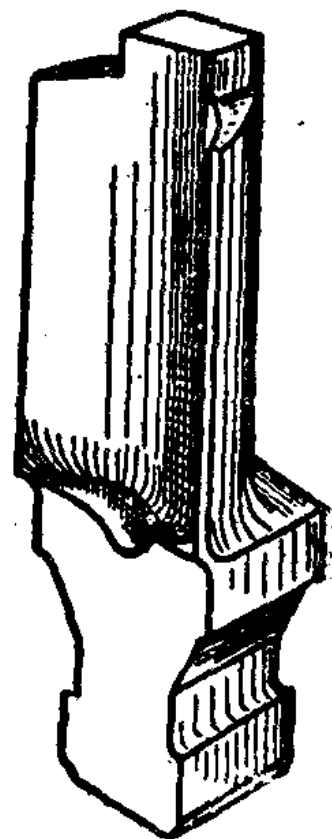


圖1-4 銑制的沖擊式葉片。

固定在轉盤上。葉片的出口角不沿高度而變化，但進口角則沿葉片高度與圓周速度的大小相適應而變化。葉片寬度不沿高度而變，但厚度則沿高度減小，如此在根部原為沖擊式的葉

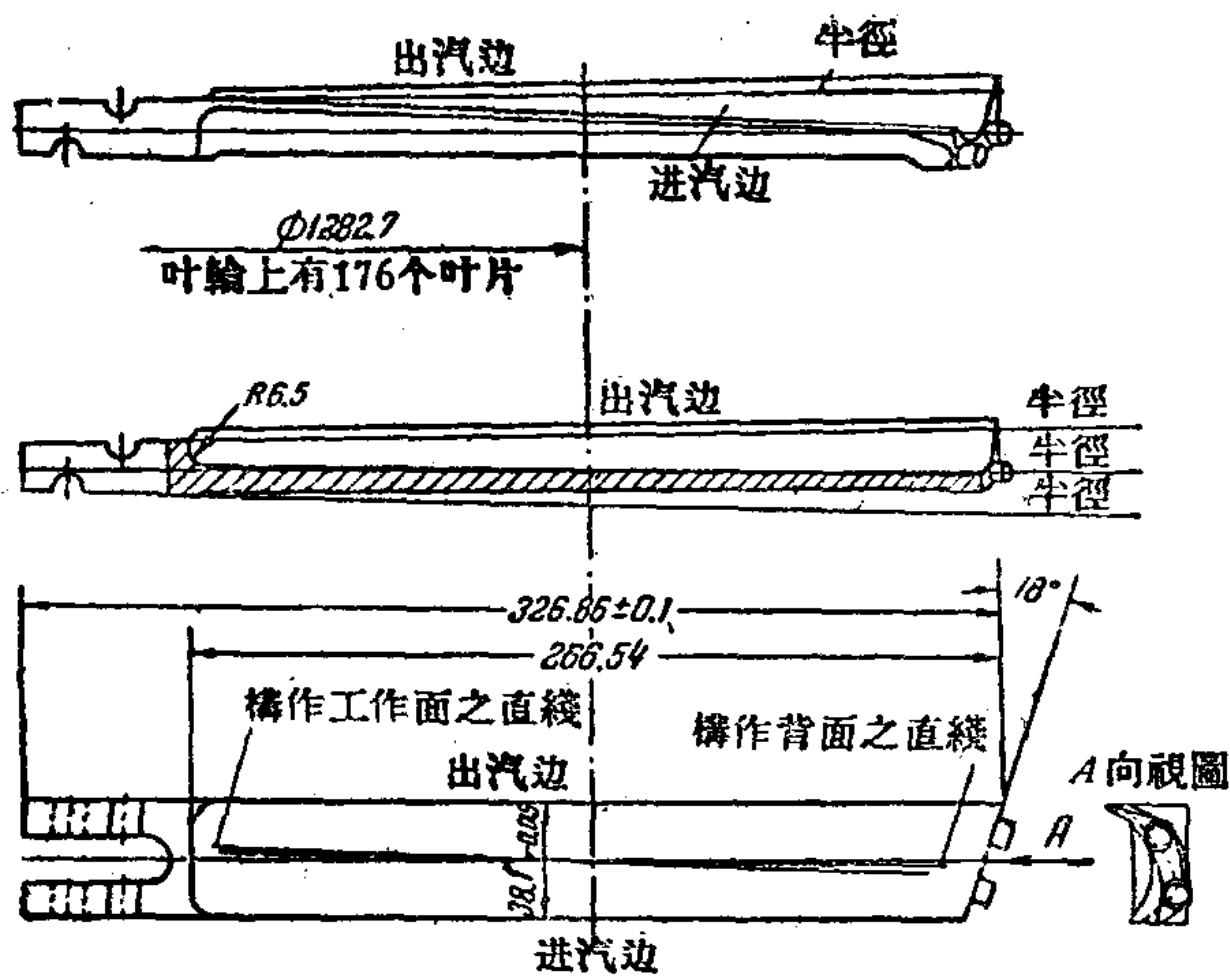


圖1-5 IM3所产的变截面叶片。

型，到了頂部，其形狀變成與反應式葉片相似。沿葉片高度各截面上形成工作面與背面的各圓弧中心都在一直線上，如葉片的平面圖所示。葉片頂部的剖面加厚了，以便在頂部安置兩個圓柱形端釘。

圖 1-6 所示系一種蘇聯出產的汽輪機的長葉片（ $l = 762$ 公厘）。葉片的所謂菌形根部借助面 A 及 B 緊靠在轉盤上相應的突緣部分。支承面 B 同時可防止在葉片離心力作用下的葉根的撓曲；葉根的此種撓曲可能使尺寸 m 擴大。葉根橫截面成為矩形。

沿葉片高度各個截面上，葉型的出口角都

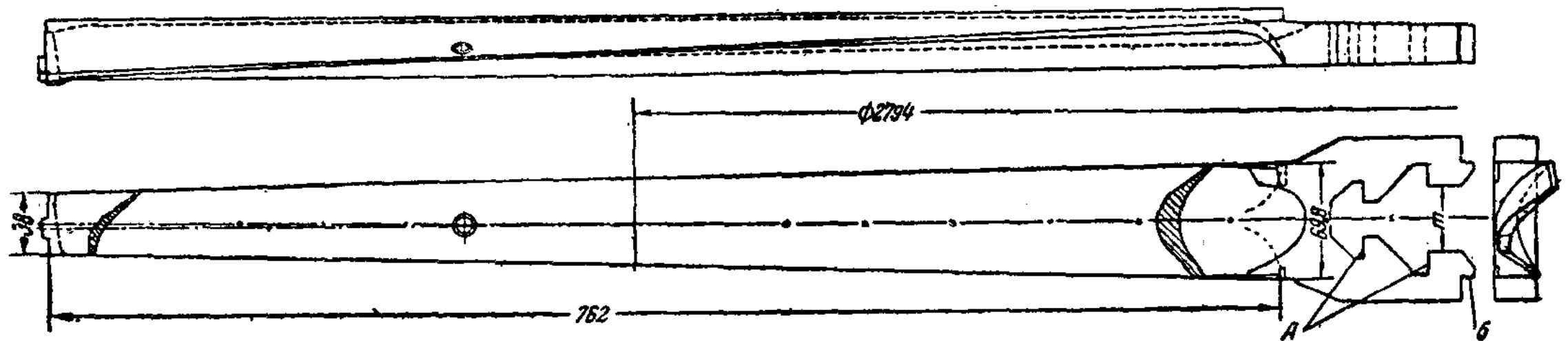


圖1-6 XTF3所产50000千瓦（1500轉/分）汽輪機的末級葉片。

相同，但進口角則隨高度而變，而且進口邊即使在外圓周上也顯著地比出口邊要厚一些。葉片頂部加厚了，以便安置尺寸較大的端釘。

圖 1-6 所示各葉片除包箍外尚用直徑 10 公厘的拉筋相聯；拉筋鑲焊在葉片的孔中，葉片孔如平面圖所示。拉筋和包箍一樣，將一系列葉片聯成一組，提高該葉片組的振動頻率。

圖 1-7 示 IM3 大功率汽輪機的數種變截面葉片。所有的葉片都有帶 3~4 個叉尾的叉形根部。葉片頂部被削尖以防與汽缸相碰。葉片沒有包箍，但備有三排拉筋。凡有拉筋孔的地方，葉型都加強了。葉片外緣靠近進汽邊的地方首先受到磨蝕，故為預防起見，在此處鑲焊了司太立合金的薄板，葉片磨蝕現象將在第四章第一節中敘述。

AK-100-1 型汽輪機第 11 級的葉片是雙層的。經葉片頂部的蒸汽通往凝汽器，而同時流經第一層（靠葉根）的蒸汽則被導入汽輪機的末級，並僅能自末級通往凝汽器。

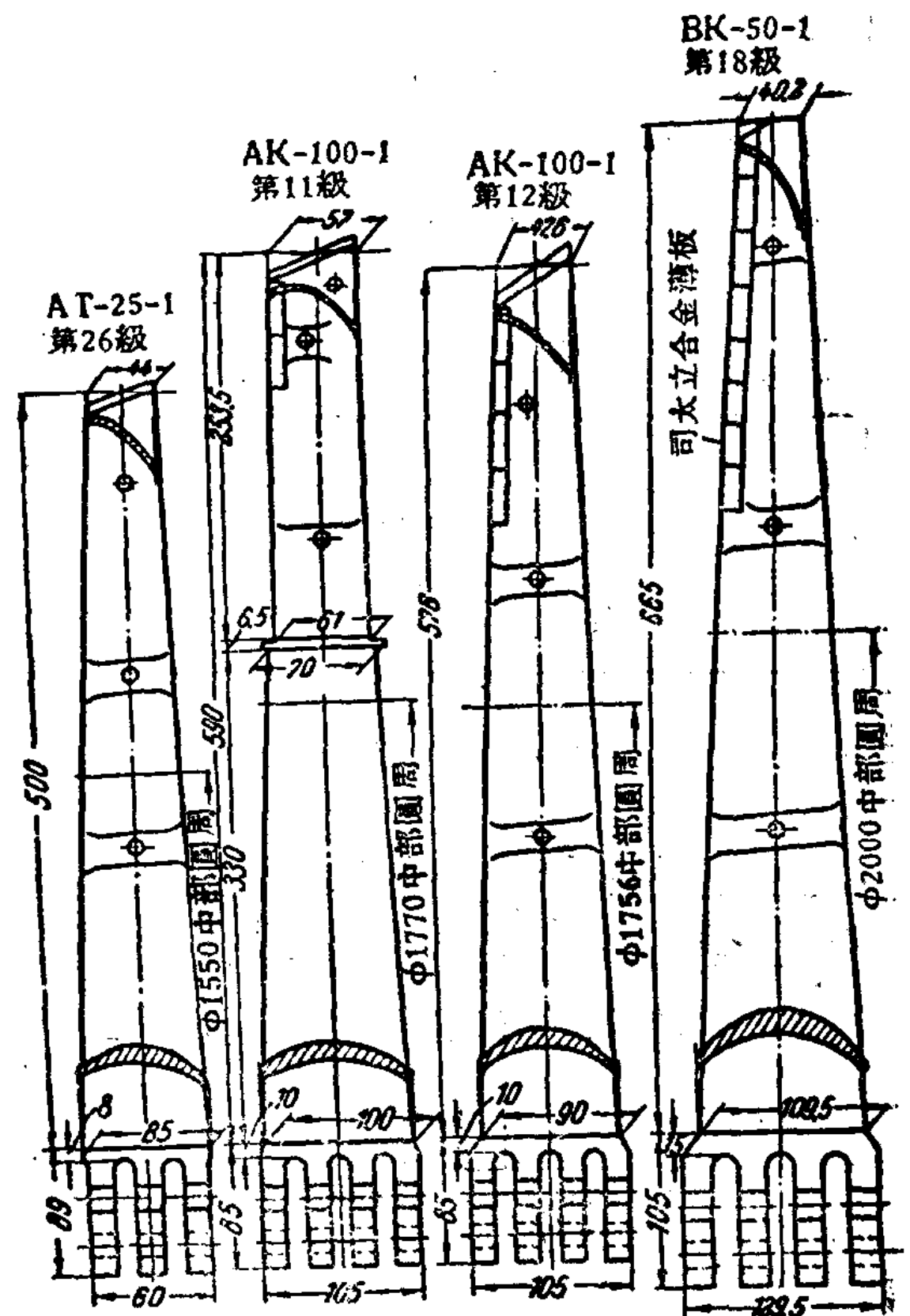


圖1-7 IM3所产大功率汽輪機最后數級的葉片。

1-2 工作叶片的叶型

工作叶片的叶型設計在研究汽輪机的热力过程时講到，这里我們介紹几种典型的叶型。

圖 1-8 示普遍使用的冲击式叶片的叶型，在表 1-1 中列举了苏联某工厂所采用的几种这类叶型的主要尺寸[34]。

圖 1-9 所示叶型的特点是：叶背用圓弧繪成，而且沒有直綫段。在这种情况下汽流脱离叶背的可能性較小，而汽流的脱离在圖 1-8 所示的叶片中則是常見的。

另一方面，圖 1-8 所示叶型的特点是汽流

槽道自进口至出口略成逐漸收縮的形狀，而在圖 1-9 上，槽道的最大寬度系在其中部达到。

叶片真实（平均）出口角的正弦由槽道的最小寬度与叶片节距之比，亦即比值 a/t (圖 1-9) 求得[7]。

圖 1-10 所示是一典型的反应式叶型。也有采用如圖 1-11 所示的叶型，其出口边在背部上有一直綫段，有时甚至在凹面上也有（圖 1-11）。現代的叶型設計法建議在叶背上避免直綫段，因为在直綫与曲綫部分的交接处常常要發生汽流的脱离現象。按照圖 1-11 制成的数种叶型的尺寸列如表 1-2[34]。

表 1-1 冲击式叶型尺寸表（照圖 1-8）

b (公厘)	β_1	β_2	r_1 (公厘)	r_2 (公厘)	s_1 (公厘)	s_2 (公厘)	e_1 (公厘)	e_2 (公厘)	m (公厘)	t (公厘)	叶型 面积 (公分 ²)	最小轉 动慣量 (公分 ⁴)
20	25°	20°	11.0	7.0	0.5	0.5	—	—	7.74	—	—	—
33	30°	26°	19.0	11.5	0.5	0.5	7.1	12.0	9.52	17.0	2.15	0.3
40	25°	20°	22.5	15.0	0.5	0.5	9.8	15.7	13.31	20.0	3.93	1.01
40	30°	26°	22.6	14.0	1.1	1.1	9.2	15.0	12.06	24.0	3.46	0.88
40	50°	35°	28.0	12.8	1.0	1.0	6.9	10.5	8.76	23.0	2.23	0.29
48	33°	26°	28.5	18.0	0.9	0.9	9.7	16.1	12.57	22.0	4.33	1.16
48	35°	32°	29.0	17.5	0.9	0.9	8.7	15.0	10.96	23.4	3.52	0.76
55	40°	36°	36.0	20.0	1.0	1.0	9.1	15.2	11.58	27.0	4.19	1.02
20	22°	22°	10.0	6.2	0.5	0.5	—	9.4	7.2	13.0	0.98	0.079
20	31°	31°	12.2	6.8	0.5	0.5	—	6.6	5.5	11	0.75	0.034
20	33°40'	33°40'	13.0	5.8	0.5	0.5	—	5.9	5.0	10	0.61	0.023
20	45°	45°	14.2	6.4	0.5	0.5	—	4.8	3.8	9.5	0.46	0.0125

表 1-2 反应式叶型尺寸表（照圖 1-11）

b (公厘)	β_2	r_1 (公厘)	r_2 (公厘)	x_1 (公厘)	y_1 (公厘)	x_2 (公厘)	y_2 (公厘)	s (公厘)	m (公厘)
21	19°30'	10.0	23.0	15.40	16.53	24.85	1.27	1.0	4.94
25	21°	11.0	26.0	18.21	20.09	28.56	1.84	1.2	5.98
27	25°	11.0	26.0	19.63	18.92	28.68	-0.02	1.2	5.98
29	31°	11.0	26.0	20.94	15.82	27.96	-3.95	1.2	5.98
29	36°30'	11.0	26.0	20.38	11.41	25.47	-9.28	1.4	6.31
35	45°	11.5	33.0	25.06	12.48	29.02	-17.65	2.6	8.90

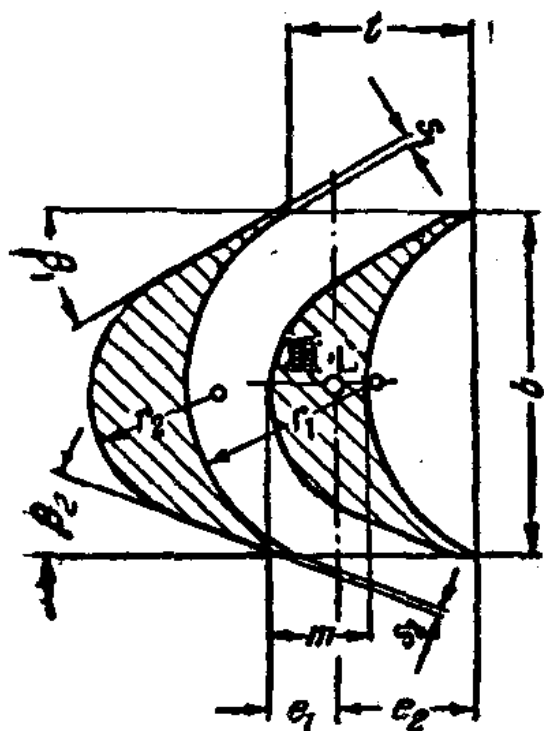


圖 1-8 冲击式叶型。

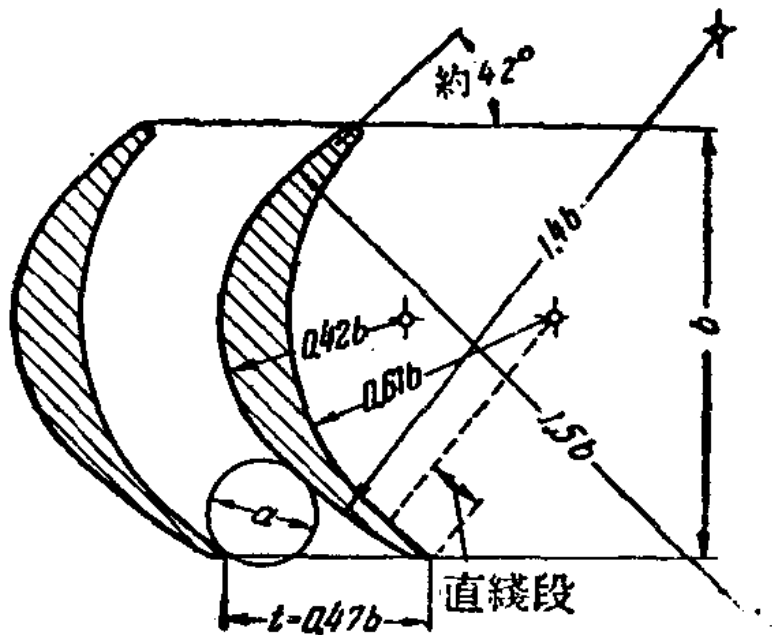


圖 1-9 冲击式叶型。

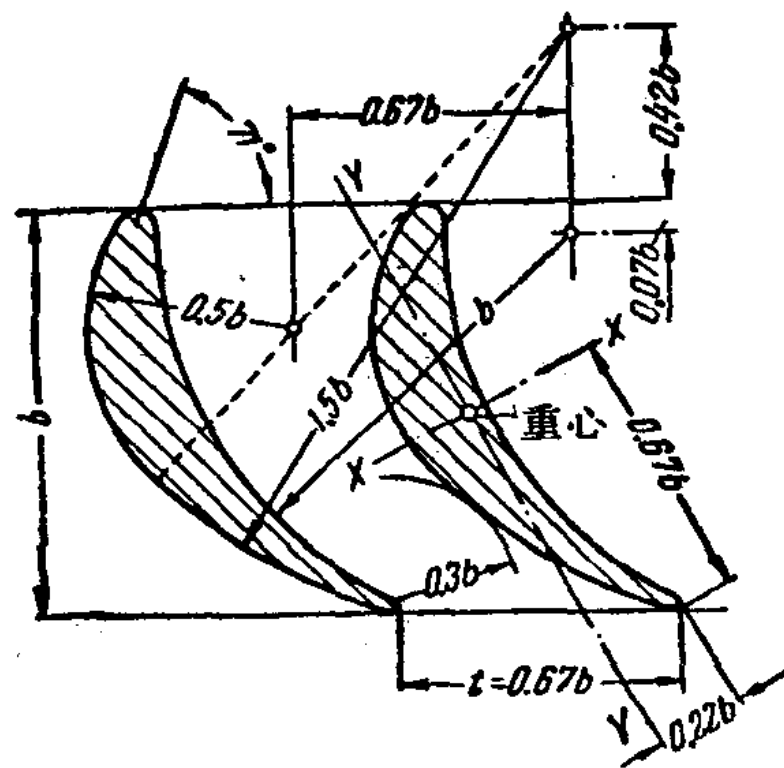


圖 1-10 反应式叶型。

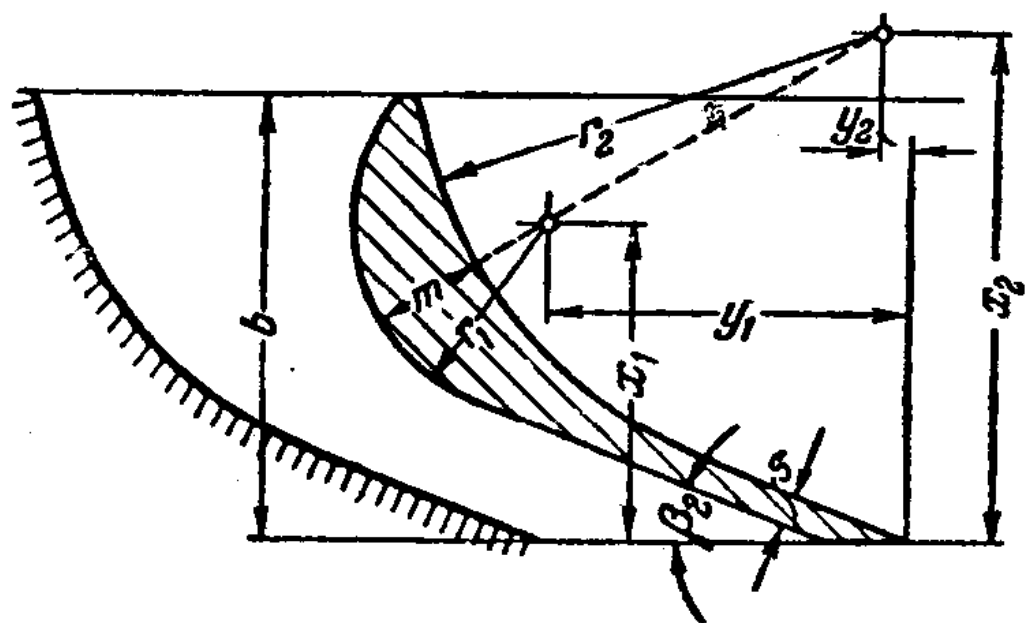


圖1-11 反应式叶型。

圖 1-11 上的叶片，其进汽边的圓角半徑應該認為是不够大的。根据这个观点以及其它的一些指标来看，圖 1-12 所示的叶型較為优越，这种叶型完全呈曲綫形，其曲率半徑自进口到出口逐步增加，而进汽边的圓角半徑較大。

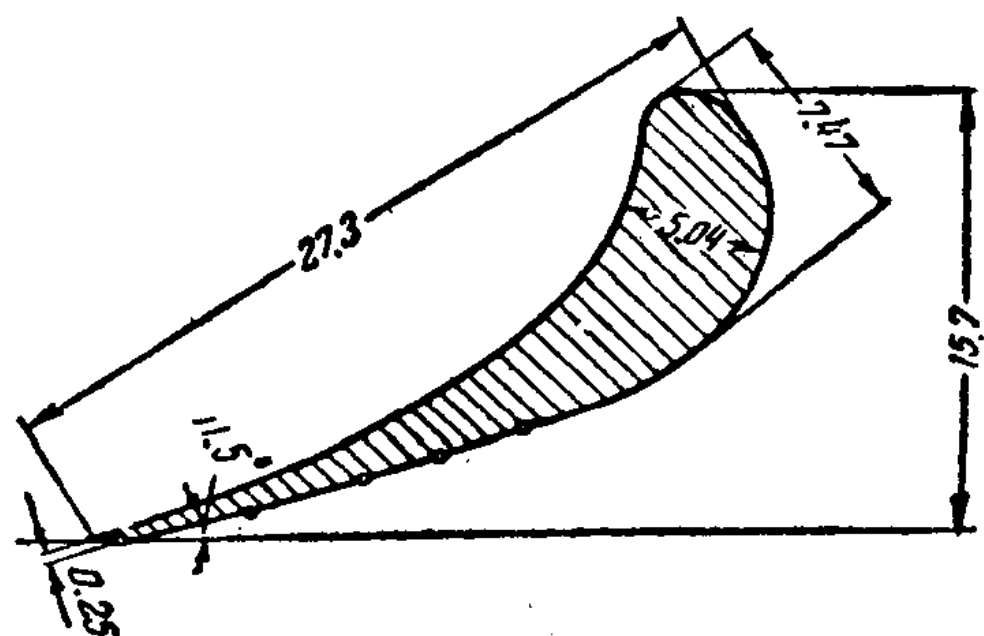


圖1-12 反应式叶型。

每个工厂都拥有一套标准叶型，在設計新的汽輪机时推荐采用为数有限的标准叶型可以大大降低生产成本，使我們能在机床上应用同样的夾具、切削工具及量具（样板、卡規等）。

最好在全苏范围有一套統一的汽輪机叶片的叶型，因为这就使我們能建立叶片專業生产工厂并使应用汽輪机的各个企業便于訂購备用叶片。

目前由于叶栅的气体动力学研究的成就，出現了再从根本上研究現有叶型的問題（这些叶型有很多显然是不能滿足气体动力学上的要求的），因此在今天来研究出一套統一的优良标准叶型是完全合乎时宜的。

1-3 叶片成型部的加工工艺范例

上面已經述及，叶片可按下列方法制造：

1) 精密模鍛；2) 鑄造；3) 用棒料或模鍛坯件切削加工；4) 用光軋（冷軋）型鋼帶切制。

用精密模鍛或精密鑄造（随后再拋光）的方法制作叶片無疑地是适当的，而且可大大降低叶片的制造成本。鑄造的叶片在航空汽輪机的制造上已經应用成功。我們的某些科学研究机构和工厂正在順利地进行着制造汽輪机的模鍛叶片和鑄造叶片的試驗。可以断言，在最近的將來，这种制造叶片的方法必然会在許多汽輪机制造厂中得到广泛的采用。

光軋叶型可以应用在根部具有适当結構的等截面叶片上，例如圖 1-1 所示。这种叶片由制就的成型鋼条切下来，并只須加工（銑切）叶片的根部与頂部。叶片成型部不再需要任何加工，也無需拋光，因为光軋叶型的表面光潔度很高，而叶型尺寸的厚度公差不到 ± 0.1 公厘，宽度公差不到叶型宽度的 1~2%。

光軋叶片的制造成本远較銑制叶片为低，因此在任何場合，只要是强度条件許可的話，都宜于采用。

技术科学碩士馬克西莫夫(С. К. Максимов) [61]建議將光軋叶片与墊塊焊合（圖1-13）。实验所用的叶片 1 由 Ж1 号不銹鋼制成，墊塊 2 由 C30 号碳鋼制成；焊料用熔点为 910°C 的銅鋅合金，熔剂用工業用硼砂。实验結果表明，这种結構是完全可靠的，在强度上它和根部整个地銑出的叶片（圖1-2、1-4）相仿，但造价則較后者低得多。

等截面叶片最通用的加工方法是用成型銑刀銑制，其示意圖如1-14、1-15。叶片固定在銑床台面上，台面沿垂直于銑刀軸的方向移动。毛坯用矩形截面的棒料、熱軋鋼帶或模鍛件；后两种毛坯加工裕量較少。通常先加工叶片的內弧，而后加工背弧。

用同一半徑描繪出来的叶片凹面也可以用鑽床加工，为此，將两个叶片的毛坯豎直固定在鑽床上，然后用半徑等于凹面半徑的鑽头一次加工两个叶片的表面。

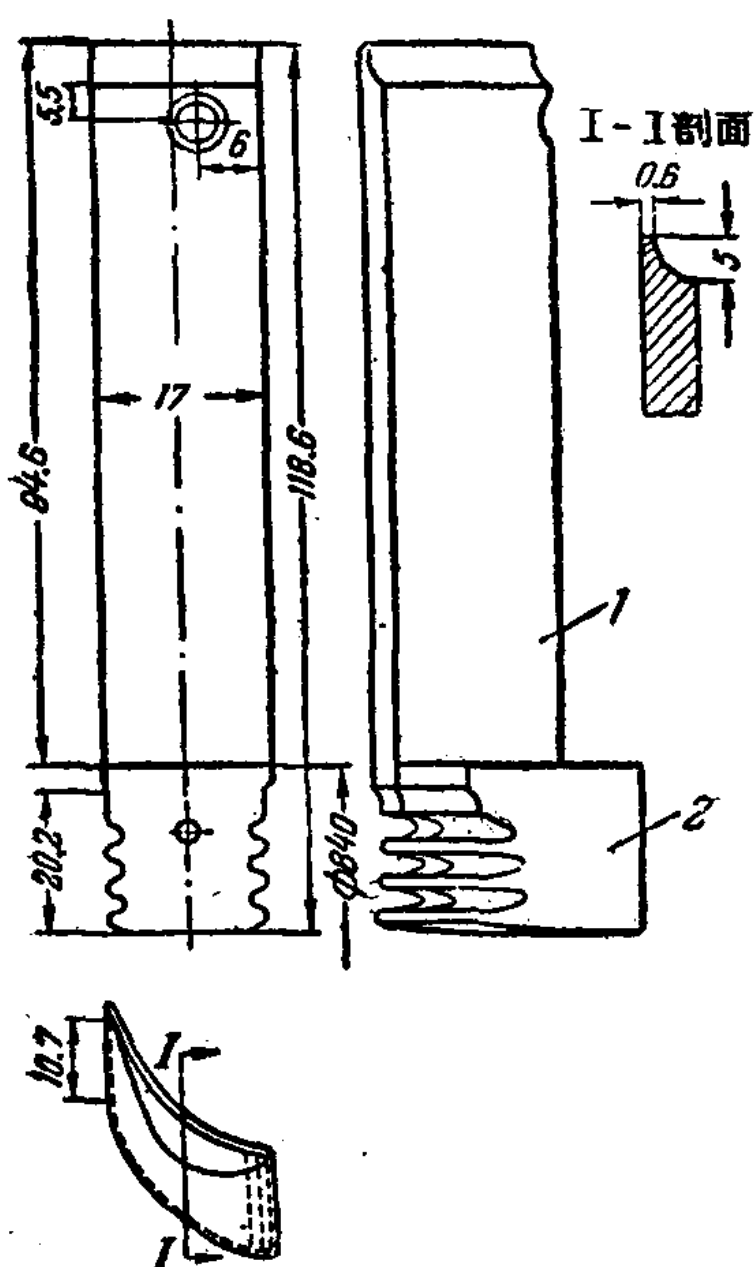


圖1-13 与垫塊焊合的叶片。

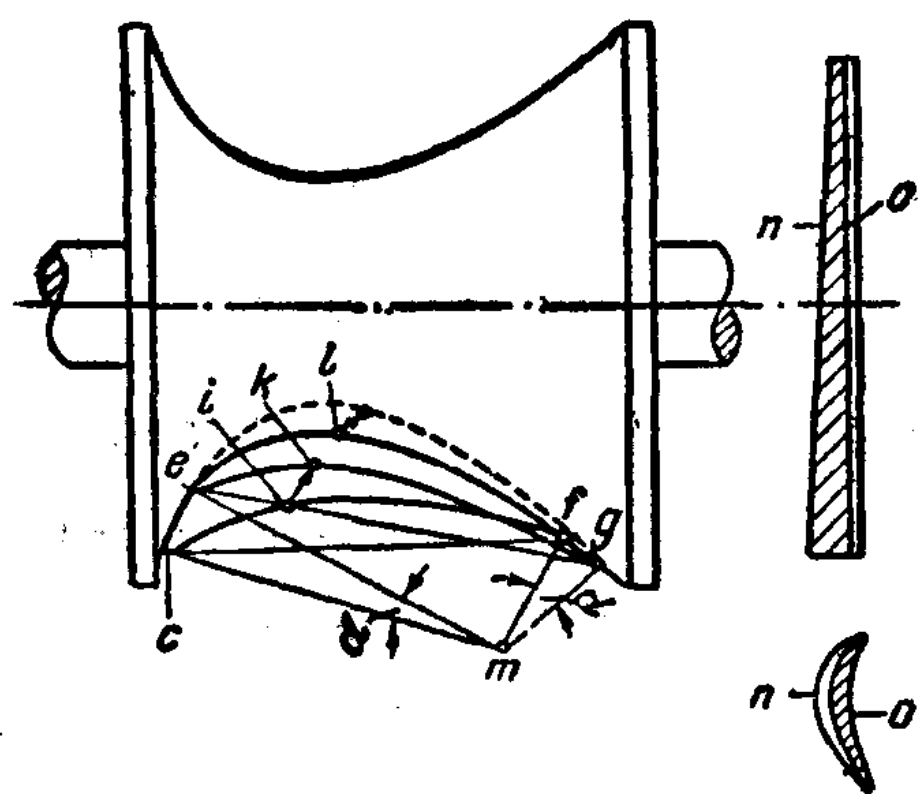


圖1-14 叶片背弧加工銑刀。

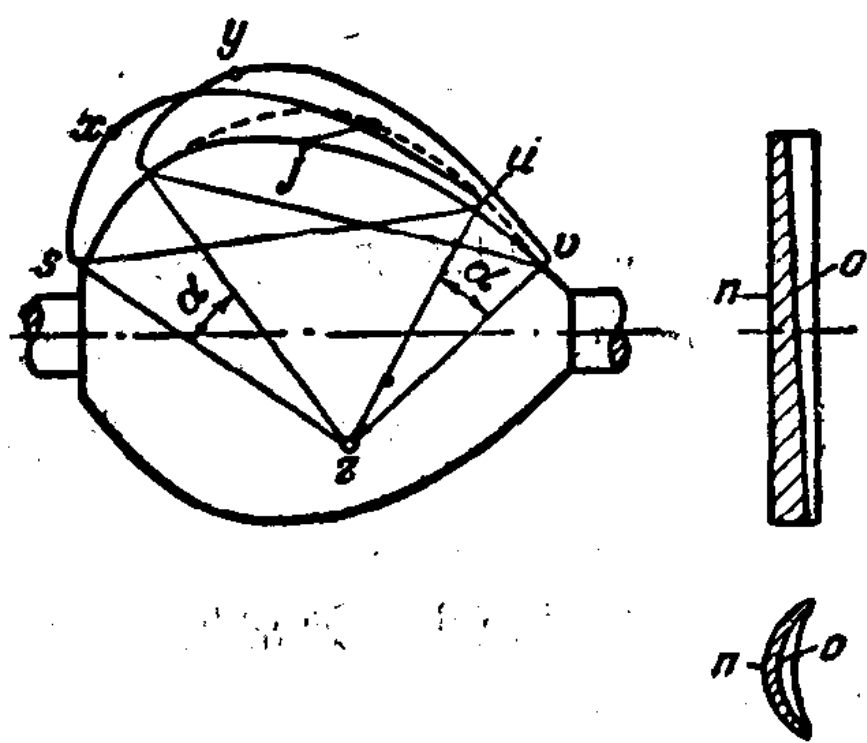


圖1-15 叶片內弧加工銑刀。

通常設計變截面葉片的葉型時，都使葉片表面成為圓柱體或圓錐體的一部分。最簡單的一種變截面葉型示於圖1-16。這裡葉型的工作

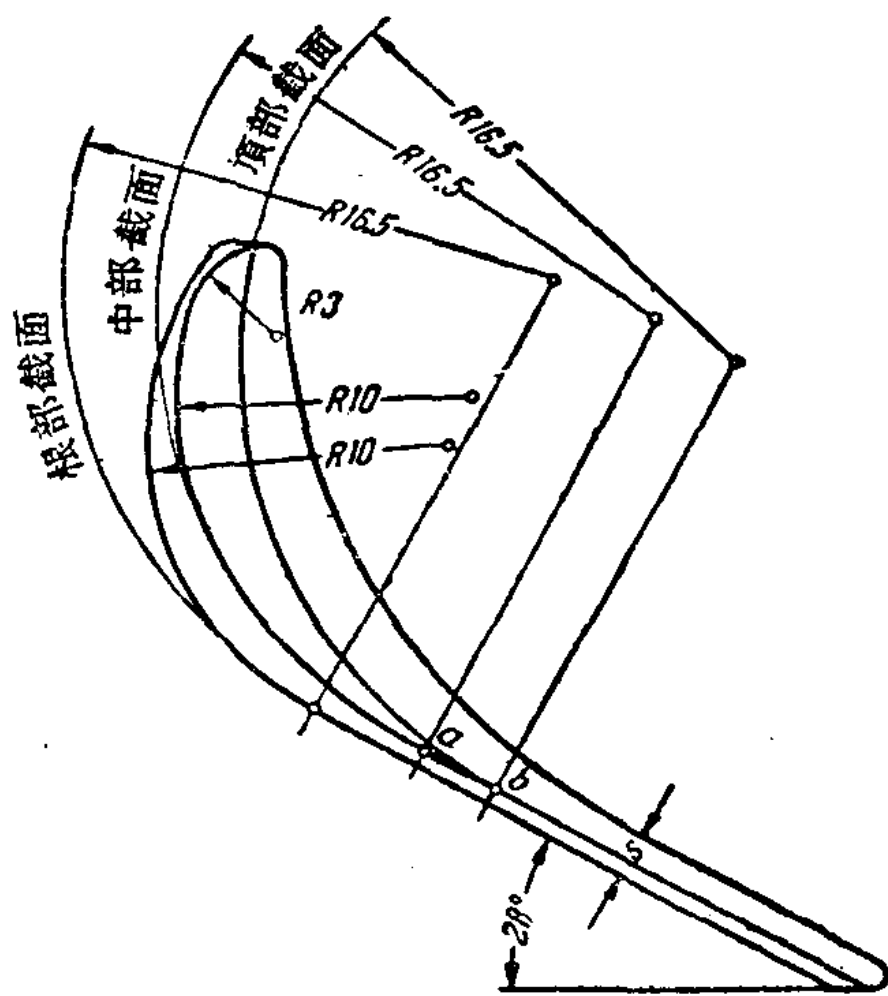


圖1-16 反應式變截面葉型。

面仍不隨葉片高度而變，但背面則在從葉頂銑至葉根時向左移動，而且背面的直線段先延長 ab 一段，而後，與直線段加長的同時，邊緣厚度增加到 s 。安置葉片縱軸使之與銑床台面的運動方向成不大的角度，並在銑刀自葉片中部截面過渡到根部截面時放低台面就可以得到這種葉型。

圖1-14示一種類似的加工方法。這裡面積 $clfi$ 代表葉片的根部截面。銑切時，葉片繞 m 點轉動，而在行程終了時到達 $elgk$ 的位置，結果銑刀銑掉了用虛線表示的葉型部分，於是葉片背部 n 被削薄了，如右圖所示。當葉片轉動時，葉片上各點都沿着以 m 點為中心的圓弧移動，如點 i 、 k 及 l 所示。

同樣，圖1-15上的葉片繞 z 點轉動， yvj 相當於靠根部葉型的原始位置，而 xus 是終點位置（靠近葉頂）。葉型自凹面一側削薄；為便於看清起見，葉型的 xus 與 yvj 綫（其工作面用虛綫畫出）被重合地表示出來了。

β_2 角為常數的葉片的銑制方法如示意圖1-17所示。這裡和圖1-16一樣，背面及凹面半徑 (r_2 、 r_1) 不隨葉片高度而變。這些半徑的中心都落在和葉片軸綫（徑向綫） $Y-Y$ 成傾斜的直綫 AB （對背面而言）及 CD （對凹面而言）上。銑切背面時，葉片應沿 AB 的方向

移动，銑切凹面时——沿 CD 的方向移动。中心綫也和通过叶片根部截面处出汽边的基面成傾斜。基面的断面綫示于圖1-17。凹面的中心

綫对于基面的傾斜度用綫段 a_1 、 a_2 、 a_3 測量，背面中心綫的傾斜度用 b_1 、 b_2 、 b_3 測量。在銑切时，叶片應該裝置得与机床台面成适度的傾斜。

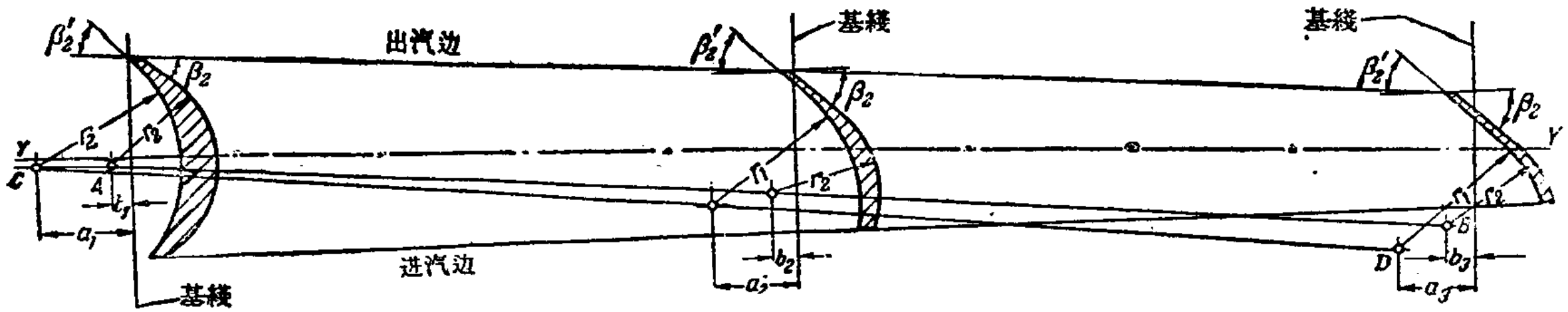


圖1-17 銑制 β_2 角为常数的叶片的示意圖。

如果叶型是用几种半徑描繪成的，如示意圖1-18所示的那樣，則最好使同一弧面的諸中心綫互相平行。这时就可按与圖1-17相同的方法銑制叶片。

無論是等截面叶片，或是变截面叶片，都可以用簡單的圓柱形或圓錐形銑刀滾銑而得。滾銑等截面叶片时，銑刀軸的位置与叶片軸平行，滾銑变截面叶片时，銑刀軸与叶片軸略微傾斜。叶片在夾具中繞联接各截面曲率中心的縱向綫轉动，一次可加工整个叶片。叶型直綫段系借助台面的縱向送进而銑成。

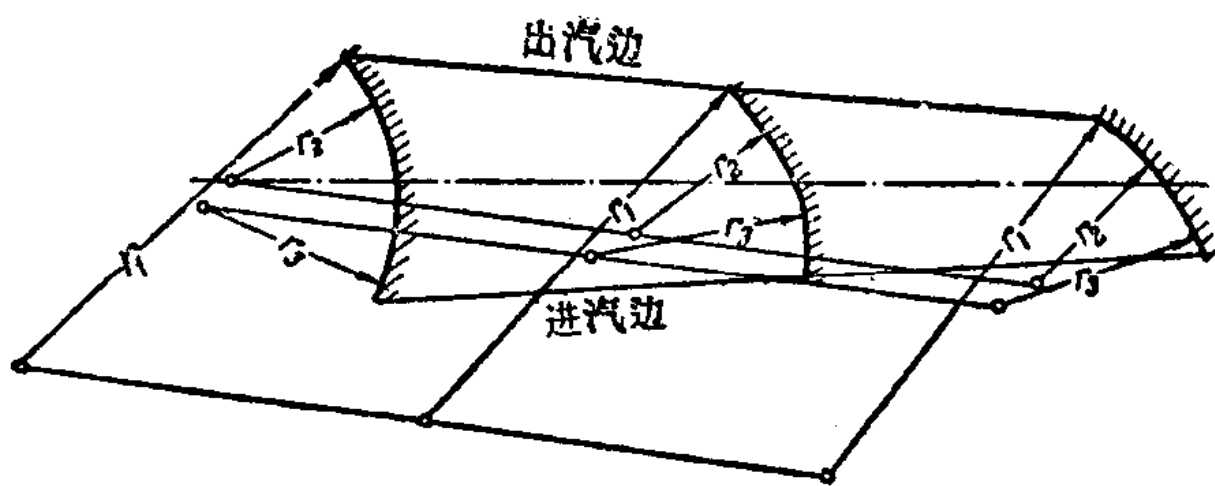


圖1-18 銑制用三种半徑繪成的叶片工作面的示意圖。

圖1-19示滾銑叶型背面的示意圖〔3〕。位置1相当于加工过程的起点。先使台面縱向送进以銑切 a 段。在位置2上，縱向送进被关断，叶片即开始繞 o 点旋轉。在位置3上，半徑为 r 的弧面滾銑完畢，台面重新作縱向送进以銑切 b 段。最后一段操作在位置4上完成。

滾銑时不用圓柱形銑刀而用圓錐形銑刀，可得到半徑 r 沿高度而变的叶型。

叶型部分用半徑不太小的圓弧画成的叶片，可以在車床上車出，沿車床軸同时可裝置

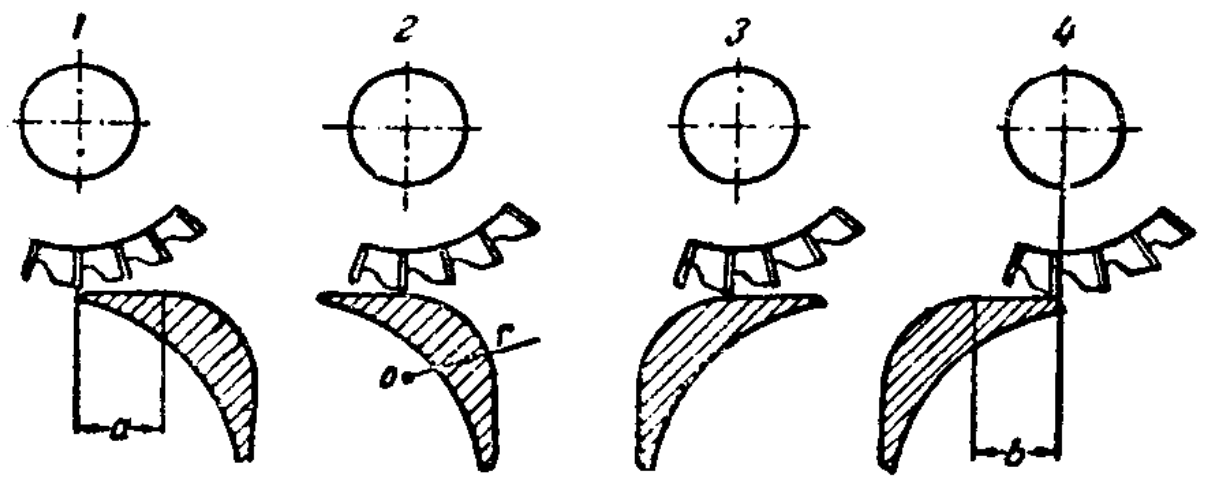


圖1-19 用滾銑刀銑制叶型的示意圖。

数个叶片（所加工的叶型部分的曲率中心当然應該在車床軸綫上）。

厚度改变的叶片最好用圖1-20所示的靠模加工。加工在立式銑床上进行。叶片固定在縱向送进台面的夾具2中。夾具借助彈簧1使滾子4压紧固定在銑床導軌上的靠模5。当台面沿与圖面垂直的方向运动时，靠模使夾具2在圖面內移动，于是銑刀3切出与靠模外形相同的厚度渐变的叶型。

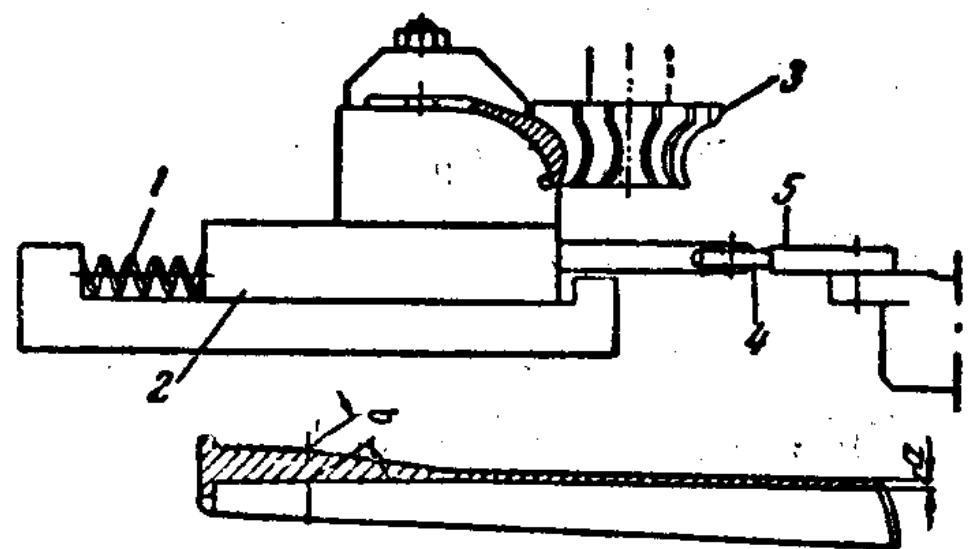


圖1-20 叶片背面加工示意圖。

所有上述的加工方法都要求按直綫規律变化的叶片表面，但用最后一种方法則尚可得到按曲綫規律变化的表面。

由以上所述可見，仅当叶片有「工艺性」的結構时，才有可能进行簡單的、成本較低的

机械加工。在这种结构中，构成叶型的圆弧半径或者不沿叶片高度而变，或者按照直线规律变化。最好是使圆弧中心都落在沿叶片高度互相平行的一些直线上。

然而应该指出，借助于靠模铣床虽可加工沿叶片高度具有任意变化规律的任意叶型。但是加工成本自然是相当大的。

叶片铣成后，其工作面需加以磨削和抛光。这样做的必要性不仅在于减少叶片槽道中的气流损失，而且还在于增加不锈钢的防锈能力和提高叶片材料的疲乏极限。大家知道，刻痕和划线的存在是会降低疲乏极限的。抛光后的表面光洁度应当等于8~9级（▽▽▽8~▽▽▽9）。

叶型的尺寸用样板来校验，样板通常分成两部分——校验叶片内弧用的和校验背弧用的。变截面叶片用一套配置在夹具中的样板来校验，校验叶片各别截面的样板彼此保持一定的间距。叶片成型部相对于叶根的位置也在这个夹具中校验。对于宽度在20公厘以下的叶片，样板的容许间隙为 ± 0.05 公厘，对于宽度为50公厘以上的叶片，则为 ± 0.20 公厘。通常边缘的厚度公差为 $\pm 0.05 \sim \pm 0.1$ 公厘（后面的数字用于边缘厚度超过1公厘的叶片）。叶型最大厚度的公差在 ± 0.05 （当厚度小于2公厘时）至 ± 0.20 公厘（当厚度为8公厘或更大时）的范围内选取。

制作进口角和出口角时，可以有 $\pm 30'$ 的公差，叶片宽度的公差通常为 -0.05 公厘。所以要求这样高的精确度是由机械制造上的各种情况决定的，因为叶片的侧面是加工及测量叶型的基面。

1-4 叶片的顶部及包箍（结构及加工方法）

叶片顶部结构的例子示于图1-1~1-7。这些结构综合地示于图1-21上[3]。

形式 α 常见于光轧叶片中。叶顶是铣出来的，一组叶片的顶部可以一次同时从两面铣出。

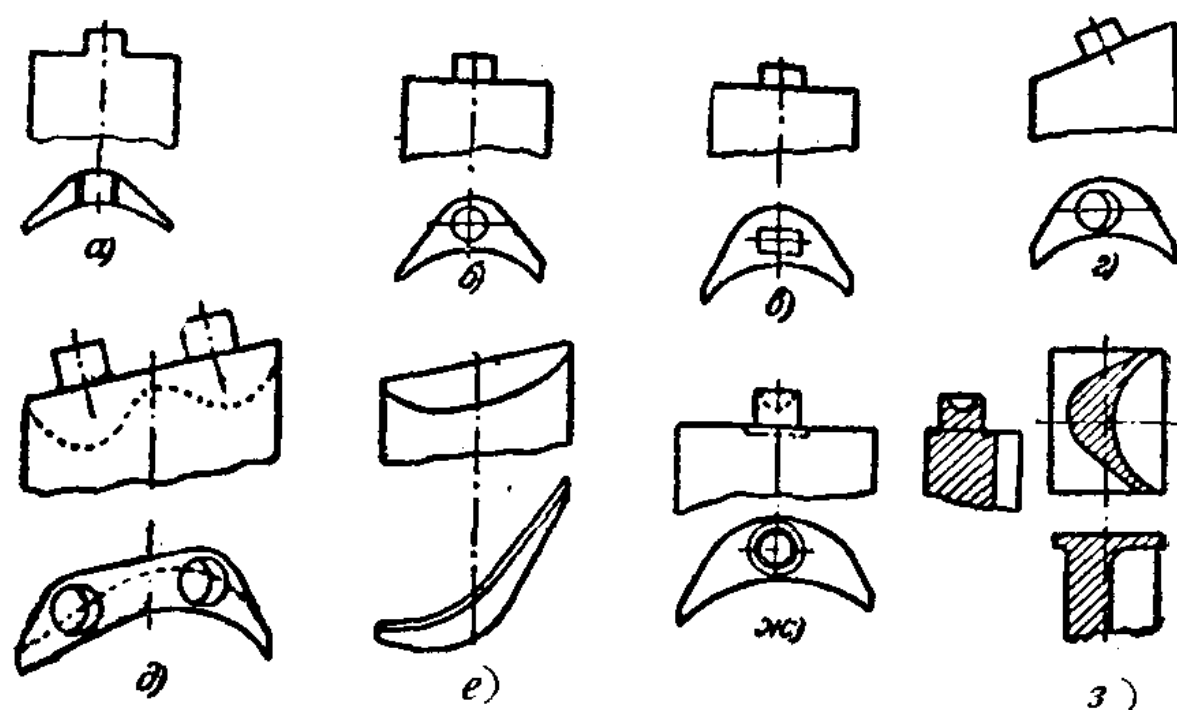


图1-21 叶片顶部及端钉的结构。

形式 δ 用在叶型较厚的叶片中。端钉在铣床上用夹在特殊卡盘中的刀具加工。圆形端钉能简化包箍的制造。端钉的直径按照转合座的4级精确度制作。

形式 θ 用于节距小而叶型厚的叶片中。

形式 ϵ 具有斜叶顶，因此在加工端钉时，应将叶片斜置在夹具中。

形式 ϕ 用于宽度颇大而靠近顶部的叶型较薄不允许安置端钉的叶片中。

形式 θ 是不带包箍而叶片与汽缸壳之间的径向余隙较小的反应式叶片的典型结构。这种叶片的顶部通常在转动的心轴上（如果叶片凹面是用一个半径绘成的话）或用靠模铣至0.5公厘厚。

形式 κ 用于端钉直径较大的场合下。端钉的周围做出一环形凹槽以防端钉头埋入孔过深而使包箍松脱；在这种结构中，端钉头埋入孔深度可以小些。

形式 β 是一与叶片铣成一体的矩形顶板。这种顶板盖住叶片槽道并成为叶片的包箍。在有些结构中，一系列叶片的顶板互相焊合，把叶片联成一组（图1-35）。

包箍的结构可自图1-1清楚地看出。用包箍联成一组的叶片数量在5~20个之间，它随转子直径的减小和蒸汽温度的增高而减少。

在汽轮机头几级中，各段包箍之间的温度余隙为0.3~1公厘，后面各级的为1~1.5公厘[30]。

包箍应与叶片端面紧密地贴合，余隙不容