

(京)新登字054号

汽轮机叶片的安全可靠不仅取决于叶片的设计、制造和材质，而且还涉及汽轮机在使用场所的系统布置、安装、调试和运行。本书全面论述了这些因素对叶片安全的影响，重点围绕着用振动和强度结合考虑的新设计方法，对国内、外各类型叶片事故进行分析、处理，并介绍了近年来叶片技术中的若干新观点、新进展。

本书主要读者对象是汽轮机设计、研究、制造部门和使用汽轮机的电厂及石油、化工、轻工等企业中的有关工程技术人员，也可供高等院校动力机械专业师生参考。

汽轮机叶片的安全防护

杨光海 编著

责任编辑：王琳 范兴国 责任校对：张 佳
封面设计：娜 毅 版式设计：胡金瑛
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业性许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张9¹/₄·字数 242 千字

1992年9月北京第1版·1992年9月北京第1次印刷

印数 0,001—1,300·定价：9.50元

ISBN 7-111-03152-0/TK·124

前 言

近40年来,中国电力工业的发展突飞猛进,发电量由建国初期的占世界第27位上升到1987年的第4位。发电能力1949年仅为184万kW,1987年底已突破1亿kW,其中3/4为火电。作为火电主导设备的汽轮机,从1955年制成第一套国产6千kW机组,发展到1987年的60万kW。

汽轮机行业的高速发展并不是一帆风顺的,曾经出现过叶片事故频发、停机和停产时期,为此各制造厂、各地区电力试验中心和研究机构做了大量工作,时至今日形势已大为改观。电站汽轮机的叶片事故率大幅度下降,叶片事故已不再是电站强迫停运的主要原因。由于制造和使用部门共同协作,对大量叶片事故采用先进技术和观点进行全面分析,得出了更能保障安全的新的设计方法。同时,还认识到叶片安全不仅取决于设计,还与加工、装配、质检、安装、调试、运行及维修密切相关,必须采取综合治理。

这些付出沉重代价换来的经验、教训是值得汲取的宝贵财富,也是本书的主要素材。本书分九章。前4章分别介绍叶片概论、叶片和轮系振动、叶片材料、制造和运行等。概论综述了叶片结构和事故处理,还涉及到可靠性和监控技术的进展;叶片的一般振动和强度问题,有关论著已不少,故第二章着重讨论叶片与转子相耦合、转子与电网相耦合、振动与气动相耦合所引发的新问题。后5章论述新的叶片设计准则和国内外不同类型机组各级次的代表性叶片事故及其处理,并介绍了若干国外设计准则供参照。

本书承姚福生仔细审阅全稿,并提出了很中肯的意见。第三章主要内容承孙惠连指正,有关断口分析内容曾请钟群鹏审改,

第四章制造及运行问题则请陶鼎文过目，在此表示衷心感谢。在书稿的完成过程中还得到了罗时德和许楚镇的帮助，也均此致谢。

杨光海

1987年于上海

目 录

前 言

第一章 概论	1
一、叶片安全可靠的重要意义	1
二、叶片的结构特点	8
三、叶片的损坏	20
四、叶片损坏的原因分析	22
五、叶片事故对策	26
第二章 叶片振动和轮系振动	33
一、概述	33
二、叶片振动	35
三、轮系振动	49
四、叶片的受力分析	66
五、动态响应和动应力	74
六、长叶片和颤振	86
七、轴系扭振	103
第三章 叶片材料	117
一、叶片材料的基本要求	117
二、疲劳强度和耐振强度	120
三、腐蚀和疲劳	124
四、断口分析	130
五、钛合金	136
第四章 制造和运行问题	140
一、制造问题	140
二、叶片制造中的检查和试验	145
三、运行条件	149
四、水击	155
五、水蚀	158

六、表面处理	164
第五章 汽轮机叶片的设计准则	167
一、概述	167
二、汽轮机不调频叶片振动强度安全准则	168
三、调频叶片的设计准则	177
四、叶片安全准则的应用	181
五、国外准则比较	191
第六章 调节级叶片事故	197
一、300MW汽轮机调节级叶片事故	197
二、法国KT1501型工业汽轮机调节级叶片事故	204
三、背压12MW汽轮机叶片事故	212
四、英国Parsons汽轮机高压调节级叶片事故	214
五、喷嘴叶片的断裂	215
第七章 中间级叶片事故	219
一、中压50MW机组5级叶片事故	219
二、169叶片事故	225
三、再热300MW12级和125MW14级叶片事故	231
第八章 过渡区叶片事故	237
一、中压25MW末3级叶片事故	237
二、323(333)mm叶片事故	245
三、核电站1300MW饱和蒸汽轮机低压缸第6级叶片事故	252
第九章 末级长叶片事故	257
一、700mm自由叶片事故	257
二、665mm叶片事故	263
三、长叶片颤振事故	265
四、长叶片的应力腐蚀开裂	268
五、1.5MW小型高速汽轮机末级叶片事故	269
附录	272
附录A 汽轮机叶片可靠性调查表	272
附录B 常用曲线图	279
参考文献	283

第一章 概 论

一、叶片安全可靠的重要意义

1. 叶片问题的由来和发展

叶片是汽轮机的心脏，也是事故最多的关键部件，它的安全可靠直接关系到汽轮机和整个电站的安全、满发。由于电力是国民经济的命脉，全世界的电力约有75%来自火电站中的锅炉-汽轮机-发电机以及核电站中的核反应堆-汽轮机-发电机。因此，提高汽轮机叶片的安全性对于满足不断高涨的电力需求，适应国民经济的发展，有着不容忽视的作用。在诸如石油、化工、轻工等重要经济部门中，采用工业汽轮机作为全厂关键动力设备的现代大型企业日渐增多，而由于汽轮机叶片损坏造成工厂全面停产、引起严重后果的事例，在国内外也不少见。

自1884年汽轮机诞生迄今已有百余年，在这期间，汽轮机经历了巨大变化。最突出的是单机功率增长了10万倍以上——由不到10kW发展到136万kW——平均每6年翻一番。同时，蒸汽参数也由初压1MPa左右、初温200℃左右，分别提高到最高达34MPa、600℃以上的水平，使热效率提高了3倍。这些成就的取得在很大程度上依赖于叶片的开发和研究。首先，单机功率的飞速增长，要求汽轮机通流能力相应提高。而通流能力又取决于叶片高度所构成的通流环形面积，因此，增加叶片高度是扩大单机功率的必由之路，成为各国汽轮机技术发展的共同方向，末级长叶片也就成为衡量汽轮机技术水平的主要标志。图1-1所示为国外生产3000r/min汽轮机的单机功率及其长叶片构成的单个排汽口环形面积同步发展的历程，图1-2所示是我国的相应经历。

由于叶片高度和蒸汽参数的提高，叶片的工作条件也愈来愈

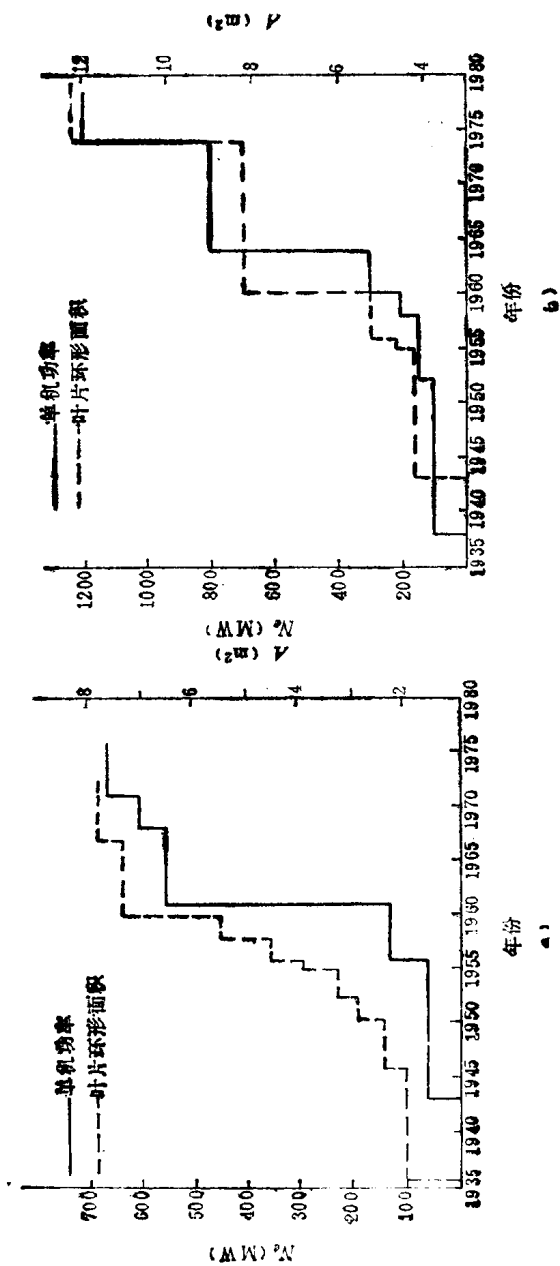


图 1-1 英国和原苏联全速汽轮机单机功率和长叶片的进展

a) 英国 b) 原苏联

严酷：在进汽端的调节级叶片，要承受最高近600℃的高温 and 喷嘴弧段的巨大冲击力；在排汽端，则是巨大的离心力和接近两倍音速的湿蒸汽流的冲刷；而且所有动叶片都承受着多种形式的周期性或随机性激振力作用而处于强迫振动之中。正是这些不利条件使叶片长期成为汽轮机中影响安全。满发的最主要的因素。根据1970年前后英国、法国、原苏联等国的统计，汽轮机事故约有45~72%是叶片造成的^{〔1〕}。美国和联邦德国近期统计表明，叶片事故在汽轮机各部件中仍居首位，美国电力研究所EPRI (Electric Power Research Institute) 指出，美国电站汽轮机强迫停运率的70%与叶片损坏有关。各国统计还一致反映，叶片事故引起的损失往往占全部损失的一半左右^{〔2〕、〔3〕、〔4〕}。

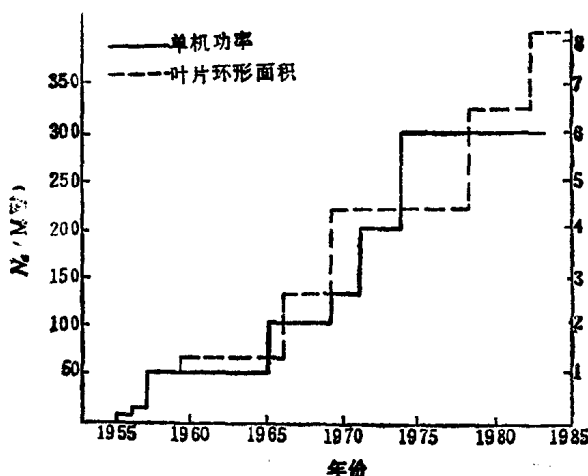


图1-2 中国汽轮机单机功率和长叶片的进展

中国也不例外，根据研究机构对国产6MW和进口10MW以上电站汽轮机的统计，从1973年到1977年这段时期，每年发生叶片事故的机组不下100台次，电站汽轮机的叶片事故率(每年事故台数占总台数的百分率)最高达11%，其中进口机组的事故率还高于国产机组。对照国际上的最先进水平，这样的事故率是偏高的。从1978年开始，事故台数、事故台次、损坏的总级次以及事故率

均有明显的持续下降趋势,如图1-3所示。特别是机组叶片事故率已不在国外一般水平之下。这是重新制订并大力推行新的“汽轮机叶片振动强度安全准则”的结果〔1〕、〔5〕。

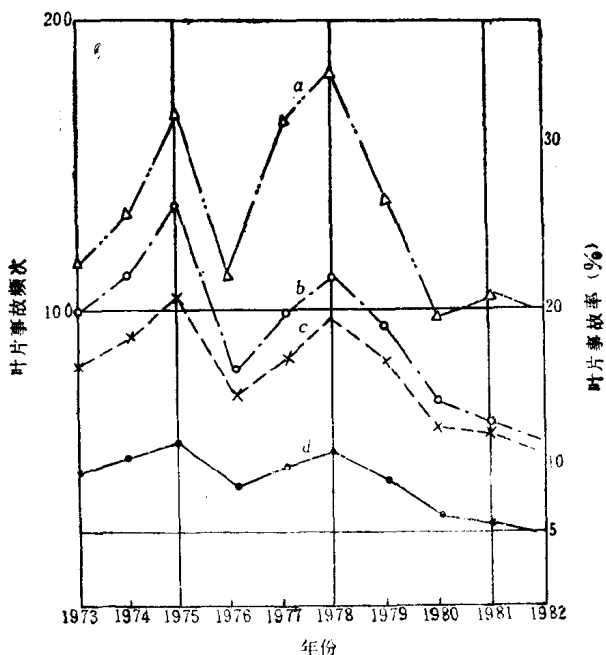


图1-3 1973~1982年中国电站汽轮机叶片事故动态
a—事故总级次 b—事故台次 c—事故台数 d—叶片事故率

2. 叶片安全和可靠性

叶片安全一词泛指叶片状态良好、没有故障,可以正常使用。为了定量评定一个系统、一台设备、一个零件在不同时间的安全程度及其变化规律,需要引入可靠性工程学,它包括可靠性管理、可靠性分析和设计以及可靠性试验等广泛内容,它是建立在概率论等数理统计理论基础上的。这些内容都不是本书的主旨所在,故只简单介绍一点基本概念。需深入了解,可参阅文献〔6〕、〔82〕〔83〕、〔84〕等。

(1) 可靠性和失效 (Reliability and Failure)

参照国标GB3187—82,汽轮机叶片的可靠性可定义为:“叶

片在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”。

叶片的功能就是将工质的能量转换为机械功。叶片丧失这一功能就称为“失效”。失效的具体界限国内还没有统一的规定。如果把单个叶片视为不可修 (Non-repairable) 部件即失效就得更换, 则可把叶片合格与报废的规定作为失效的界限; ——这符合日本标准中的提法: “失效是一种不合格状态”(JIS Z8115-1970)。

可靠性学科中, 衡量可靠程度和失效规律的主要指标有可靠度、失效分布函数、累计失效概率和失效率等。

1) 可靠度 R (Reliability) 叶片可靠度是叶片在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率。这里的规定时间常指工作寿命。通常愈接近寿命的极限, 累计失效的叶片数愈多, 失效的概率愈大, 可靠度就愈小。可靠度是随时间变化的函数, 记为 $R(t)$ 。图1-4a是典型的 $R(t)$ 曲线。

2) 失效分布函数 $f(t)$ (Failure Distribution Function) $f(t)$ 表示叶片失效概率随寿命长短而变化的规律, 又称寿命的概率密度函数 (Probability Density Function)。图1-4b是叶片失效中常见的威布尔 (Weibull) 分布曲线。

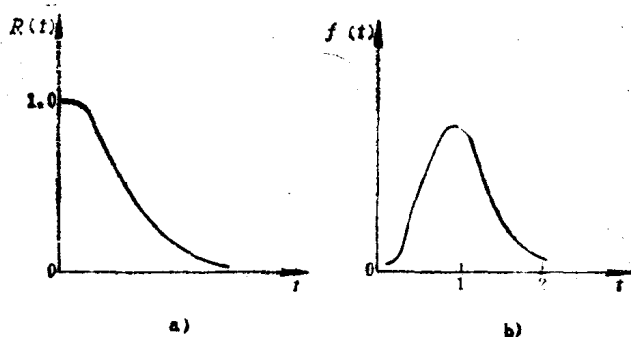


图1-4 常见的可靠性曲线
a) 可靠度 $R(t)$ b) 失效分布函数 $f(t)$

把 $f(t)$ 按时间积分, 可得累积失效概率 $F(t)$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-1)$$

$F(t)$ 和 $R(t)$ 之间有如下关系

$$F(t) = 1 - R(t)$$

3) 失效率 $\lambda(t)$ (Failure Rate) 失效率指工作到时刻 t 尚未失效的叶片在其后的单位时间内发生失效的概率。图1-5是常见的产品失效率曲线, 又称浴盆曲线 (Bath tub Curve)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-2)$$

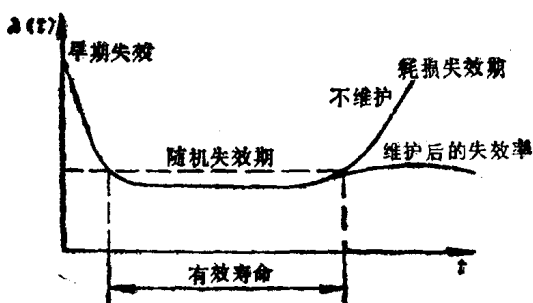


图1-5 机械产品的典型失效率 $\lambda(t)$ 曲线(浴盆曲线)

(2) 发电行业中常用的可靠性指标

在发电行业中, 常用的衡量产品可靠性的指标有4种:

1) 强迫停运率FOR (Forced Outage Rate, 简称迫停率)

$$FOR = \frac{FOH}{FOH + SH} \times 100\% = \frac{\text{强迫停运小时}}{\text{强迫停运小时} + \text{运行小时}} \times 100\% \quad (1-3)$$

FOR愈低, 可靠性愈高。据统计, 美国1982年电站汽轮机的FOR平均约为2%, 其中38%由叶片引起。1973~1982年火电站中叶片引起的FOR及停机频次NOC (每台机组年平均停机次数) 分布如表1-1。

2) 可用系数AF (Availability Factor)

$$AF = \frac{AH}{PH} \times 100\% = \frac{\text{可用小时(运行及备用小时)}}{\text{统计期间小时}} \times 100\% \quad (1-4)$$

表 1-1

机组容量等级(MW)	1~99	100~199	200~299	300~399	400~599	600~799	>800
FOR (%)	0.14	0.08	0.24	0.31	0.62	0.37	0.17
NOC (次/台年)	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04	0.05	0.02

图1-6示出了1973~1982年美国火电、核电站AF及FOR动态，其中汽轮机的FOR约占整个火电站的20%，核电站的18%。^{〔7〕、〔8〕、〔9〕}

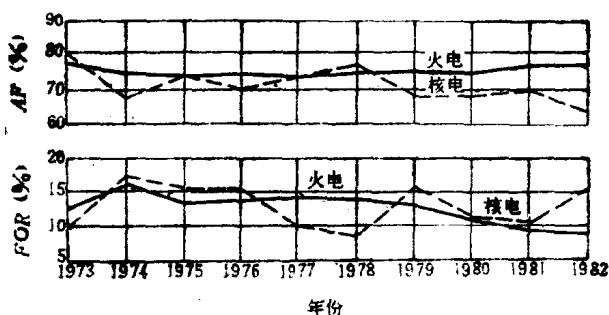


图1-6 1973~1982年美国火电、核电站AF及FOR动态

3) 平均失效间隔时间MTBF(Mean Time Between Failures)

MTBF指一次失效到下次失效的平均时间。对于不可修部件如叶片也就是其平均寿命

$$MTBF = \frac{\text{运行小时}}{\text{失效次数}} \quad (1-5)$$

可靠性差的产品或零件，MTBF就低。发电设备中，MTBF达到几千小时是可以做到的。也有采用平均迫停间隔时间MTTFO (Mean Time To Forced Outage) 指标的，因为象叶片等失效了不一定就迫停，故其MTTR很难算准。

4) 平均修复时间MTTR(Mean Time To Repair)

$$MTTR = \frac{\text{失效修复时间之和}}{\text{失效次数}} \quad (1-6)$$

MTTR愈短愈好，说明失效的后果轻。同样道理，也有人改

用平均迫停延续时间MFOD(Mean Forced Outage Duration) 它们之间的关系如下

$$\text{FOR} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (1-7)$$

当产品处于失效稳定期, 失效率 λ 保持不变时, 则有

$$\text{FOR} = \frac{\lambda(\text{MTTR})}{1 + \lambda(\text{MTTR})} \quad (1-8)$$

3. 安全可靠带来的效益

发电设备提高安全可靠性的效益是巨大的, 有直接经济效益也有社会效益。特别在普遍供电紧张的情况下, 备用容量小, 叶片事故往往引起停机以致大面积停电, 社会影响极大。以1980年某电厂300MW机组因11级围带飞脱造成停机和地区停电为例, 停机40天, 少发电约2.6亿度, 电费直接损失约2600万元; 该地区每度电社会产值约为5元, 则社会间接损失达1.3亿元。相比之下, 几十万元的抢修费只是一个零头了。

根据美国通行的电力系统可靠性评价法, 设备提高可靠性的经济效益包括三方面的节约: ①替代能源耗费; ②备用能源费用; ③修理费用。^{(9)、(10)}估算结果, 美国火电站如能将可用系数提高0.05, 则第①项每年可节省84亿美元, 第②项相当于省装备用机组34000MW。EPRI的最新调查还表明, 美国每年平均发生的40余起重大叶片事故, 平均每起的修理费用为20万美元, 因每次停机引起的替代能源耗费为250万美元, 自1970~1981年因汽轮机叶片事故造成的直接损失为14亿美元⁽¹¹⁾。

二、叶片的结构特点

叶片的结构由简单发展到复杂, 型式繁多, 其目的都在于在经济合理的基础上确保安全可靠和提高效率。这里的经济考虑包括材料消耗、加工难易、装配要求、维修便利等。

图1-7是一只典型长叶片。主体是叶身, 它的横截面常呈月牙形, 是根据风洞试验精确成型的——称为型线 (Profile), 故叶

身又称叶型部分。将叶身和转子连接一起的是叶根，中间过渡段是台肩。拉筋和铆头都是附件，前者使叶片相互联系，后者藉围带将叶片外圈围好。

较短叶片的型线沿叶高不变，称为等截面叶片或直叶片；较长叶片的型线则常沿叶高逐渐改变，顶薄底粗，称为扭叶片，图1-8是一只较长扭叶片各截面型线的叠合图。

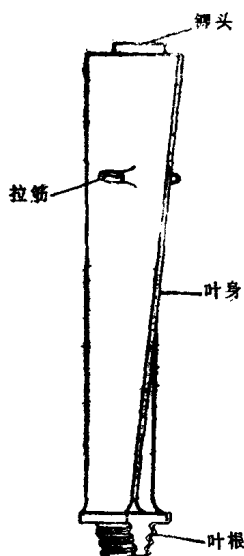


图1-7 典型长叶片

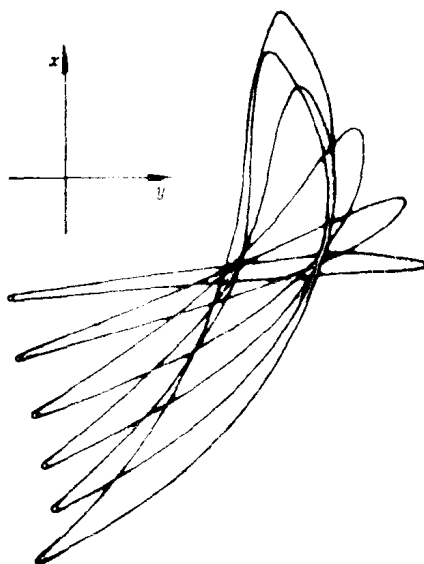


图1-8 扭叶片各截面的叠合
x—轴向 y—周向

以上所述是装在转子上旋转的动叶片，另外还有装在隔板、持环或喷嘴室中的静叶片。静叶片受力较小，极少成为事故的根源，所以在本书中除非特别说明，讨论的都是动叶片。

1. 叶根 (Blade Root) (12) (13) (14)

叶根是叶片结构的重要部分，由于工作条件复杂——应力高、应力集中严重、缝隙中易形成腐蚀环境以及振动自叶身渗透而下，已日益成为事故多发的薄弱环节。

叶根结构可大体分为三类：①隔叶件式；②常用嵌入式；③整体式。应用最普遍的是第②类，因此将重点介绍并就其承载能

力、工艺要求、应力集中等进行分析比较。

(1) 隔叶件式结构 (Blade Root With Spacer Piece)

它的特点是加工简单、省料，但承载能力最差，且在隔叶件与叶片间易产生微振腐蚀。在容量不大的反动式机组中应用较普遍，现已趋于淘汰。图1-9分别示出其代表性结构^[12]。

a) 锻粗叶根 BBC(瑞士勃朗-鲍弗利公司)用于反动式最轻载直叶片。

b) 嵌条叶根 Parsons (英国帕生斯公司)用，特点同上。

c) 光轧叶片 叶根可以是T型或其它型。

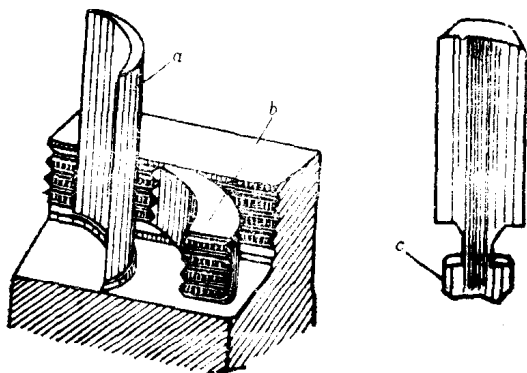


图1-9 隔叶件叶根

a—锻粗叶根 b—嵌条叶根 c—光轧叶片

(2) 常用嵌入式结构 (Conventional Entry Type)

按其嵌入方向可分为周向和轴向。按叶根形状分大体有T型、菌型、叉型、枞树型和齿型等。

1) T型叶根 (T-Root) 图1-10 a、b、c是最常见的几种T型叶根。其特点是承载能力从小到中等，加工、装配都比较简便，但锁口叶片工艺要求较高，应力集中也比较严重。根底一般应有垫片，以便紧配。

a) 单T型 (Single T) 普遍用于中、小型机组中。由于叶身的振动难免渗入叶根，故叶根的动强度很差。目前限用于短叶片轻载级。

b) 外包T型(Straddled T) 又称带小脚T型, 是国内应用较广的叶根型式。因两只小脚卡住轮缘, 减少了轮缘的弯应力, 提高了承载能力, 并可减轻振动渗入的可能, 可用于大、中型机组, 但卡得太紧不易装配, 太松则不起作用, 且小脚和对应的轮缘处还有微振腐蚀的可能。

C) 双T型(Double T) 通常都带小脚及垫片, 其承载能力高于前者, 但加工及装配要求略高, 应力集中情况则稍好。

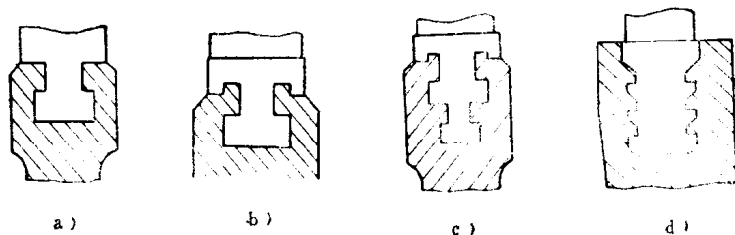


图1-10 常见的T型和齿型叶根

a) 单T b) 外包T c) 双T d) 齿型

2) 齿型叶根 (Toothed Root) 加工、装配简便, 但承载能力较小, 齿尖应力集中严重, 动强度差, 偶用于小型机组 (图1-10d)。

3) 菌型叶根 (Inverted T-Root) 叶根肥大, 骑在轮盘的凸缘上, 它的承载能力较高, 应力集中较低, 且对轮缘起保护作用, 但轴向尺寸较大, 影响转子长度, 叶片离心力较大。加工要求相当高, 锁口十分困难, 有时不得不缺空一只末叶片, 影响效率。多用于中、短叶片。

图1-11示出了单菌、双菌、三菌型叶根, 其承载能力也依次增加。

4) 叉型叶根 (Fork or Pinned Root) 叉型叶根分叉插入轮缘上车出的周向叉形槽道, 并用轴向销钉固定, 这种结构目前仍为厂商所乐用。从单叉到9叉, 可以达到最高的承载能力。应力集中不算高, 更换时只需拆动少数叶片。但加工、装配要求高,

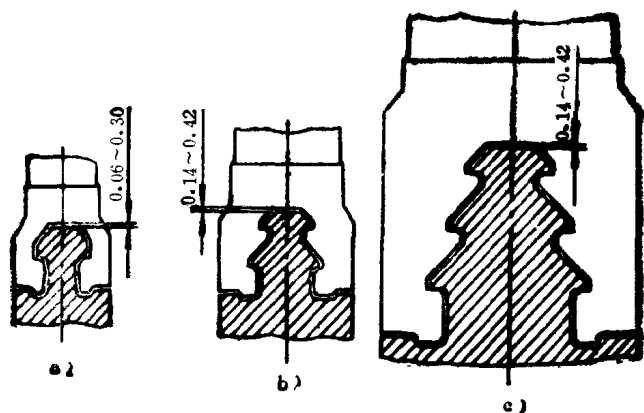


图1-11 常见的菌型叶根
a) 单菌 b) 双菌 c) 三菌

如销钉孔的钻铰在整体转子的场合就很困难，需要专用机具。

图1-12 a、b 分别是 4 叉和 3 叉型叶根；图1-13是国产850mm 叶片所用的 5 叉型叶根，它也具有外包小脚起辅助作用。

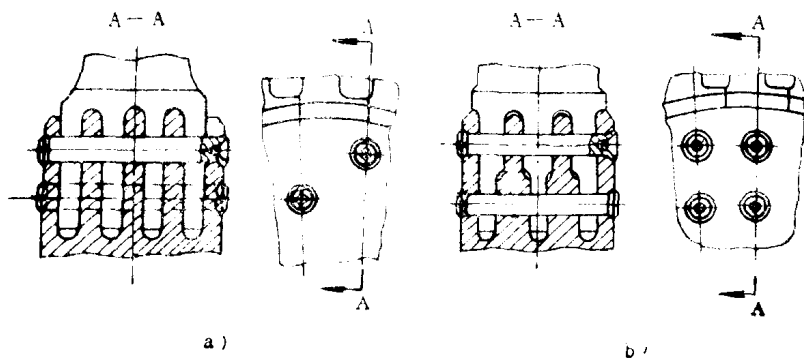


图1-12 常见叉型叶根
a) 4 叉 b) 3 叉

5) 枞树型叶根 (Fir-Tree Root) 由于枞树型叶根承载能力最强，安装十分方便，可单独拆修，尺寸小，应力集中也不大，因此这种结构在大型机组中应用日益广泛。通常都是轴向嵌入，故也可称为轴向嵌入式 (Side-entry Type)。其缺点是加工要求