

[苏] И. И. 帕普欽科 著

透平叶片 振动强度

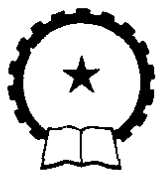
机 械 工 业 出 版 社

透平叶片振动强度

〔苏〕И. И. 帕普欽科著

朱家駒 胡梁发译

王錫祥校



机械工业出版社

本书介绍了透平叶片振动和各种因素对叶片自振频率的影响、测定叶片自振频率的方法、单个叶片和叶片组的疲劳研究方法，还讨论了在简单振动形式和复杂振动形式下，叶片中的应力分布问题。

本书的读者对象是：从事于蒸汽透平设计和运行工作的设计人员、科学工作者，以及透平制造厂和电站中的有关工程技术人员。

И. И. Папченко

ВИБРАЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТОК ТУРБИН

МАШГИЗ 1959

(根据苏联国立机器制造科技书籍出版社一九五九年版译出)

* * *

透平叶片振动强度

[苏]И. И. 帕普钦科著

朱家驹 胡梁发译

王锡祥 校

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同 141 号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 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·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $7^{11/16}$ ·插页 2·字数 203 千字

1965 年 6 月北京第一版·1965 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,800·定价 (科六) 1.20 元

*

统一书号: 15033·3667

序 言

近年来，透平叶片振动可靠性的試驗研究工作日益广泛。由于透平运行时，单个叶片、叶片組以及叶輪連同轉子一起振动的現象十分复杂，所以直到現在，还不能在理論上完全估計到影响透平叶片振动可靠性的各种因素。运行統計資料表明，在大多数情况下，透平中损坏的总是承受周期性作用力的零件。

現代透平采用了尽可能高的圓周速度，它的一些主要零件几乎都在极限应力下工作。这种情况就要求我們在透平零件的强度方面具有更全面的知識。

因此，目前对于在交变負荷下工作的透平零件，必須通过試驗来确定它們的振动可靠性。

关于叶片振动可靠性的理論研究，已有很多著作作过介紹。

在技术文献中，关于測定透平叶片振动可靠性的試驗技术和試驗方法，却闡述得很不够。

作者拟以本书部分地填补这方面的空白。书中介紹了叶片和叶片組自振頻率的測定，以及叶片和叶片組中的应力分布問題。

本书介紹了单个叶片和叶片組的疲劳研究方法；列出了振动試驗和疲劳試驗所用的設備的簡要特性；对这些試驗提出了基本的要求；研究了透平叶片和叶片組的复杂振动形式。

作 者

目 录

序言

第一章 蒸汽透平的动叶片	1
1. 动叶片的结构	1
2. 动叶片组	7
3. 动叶片的损坏类型	10
4. 引起叶片强迫振动的原因	15
第二章 透平叶片振动研究概述	17
5. 振动的基本概念	17
6. 确定叶片自振频率的计算方法	33
7. 叶片的振型	45
8. 各种因素对叶片自振频率的影响	49
9. 叶片的调频	68
第三章 透平叶片自振频率的测定	74
10. 概述	74
11. 用听觉来测定叶片振动频率	75
12. 用记录仪来测定叶片振动频率	76
13. 振子示波器的作用原理和结构简述	76
14. 用振子示波器记录振动时所用的电子管放大器	82
15. 用振子示波器测定叶片的自振频率	85
16. 用阴极射线示波器和音频发生器来测定单个叶片和叶片 组的振动频率	90
17. 测定透平叶片自振频率的共振法	96
第四章 透平的单个叶片和叶片组的疲劳研究	111
18. 影响叶片疲劳强度的因素	111
19. 叶片的疲劳极限	114
20. 对疲劳试验方法的基本要求	119
21. 透平叶片疲劳试验用的装置	120
22. 疲劳试验时叶片的激振	122

IV

23. 某几种鋼的疲劳极限·····	148
24. 透平叶片疲劳試驗的某些成果·····	152
25. 不同温度下的叶片疲劳試驗·····	154
第五章 測定高温下的彈性模数和剪切模数·····	160
26. 概述·····	160
27. 測定彈性模数的方法·····	160
28. 測定彈性模数所用的装置·····	167
第六章 透平叶片中振动应力的試驗研究·····	173
29. 概述·····	173
30. 透平叶片中的应力·····	174
31. 单个叶片和叶片組的固定与激振·····	176
32. 激振叶片組用的放大装置·····	181
33. 測定振动振幅和方向的測量楔·····	185
34. 应变計和应变測量装置·····	194
35. 在很广的頻率范圍內測量靜态变形和动态变形的装置·····	199
第七章 平板和叶片的复杂振型·····	207
36. 概述·····	207
37. 方形板和矩形板的复杂振型·····	208
38. 蒸汽透平叶片的复杂振型·····	218
39. 平板和叶片在复杂振型时的应力图·····	224
40. 叶片組自振頻譜和各元件的应力图·····	232
参考文献·····	241

第一章 蒸汽透平的动叶片

1 动叶片的结构

蒸汽透平的叶片组件一般是指：

- (1) 动叶片；
- (2) 围带；
- (3) 铆钉；
- (4) 束腰线；
- (5) 隔叶件；
- (6) 导向叶片。

在透平生产中，叶片组件，首先是动叶片的制造占有很重要的地位。

按照透平的两种基本工作原理，透平的所有动叶片可分为冲动式和反动式两种。叶片制造约占蒸汽透平制造工作量的20%。

蒸汽透平叶片的结构型式和尺寸是多种多样的，它的制造工艺复杂、成本高。因此，在选择叶片结构时首先应该考虑工艺问题。

叶片的毛坯大部分是方钢，只有一小部分（15%左右）是冷轧型材和模锻件。

用方钢制造叶片时，金属的利用系数很低，约25%左右，毛坯中75%的金属都成了切屑。因为叶片的毛坯多是方钢，所以采用机械加工（去除切屑）。用这种方法加工时，叶片制造分为机工工序和手工工序。机工工序占整个工作量的72~83%，手工工序占17~28%。叶片加工的机工工序中，铣工工序约占60~70%。

由于叶片的制造要求很高，所以在叶片生产中要配备大量专

用工夹具。根据叶片型式复杂程度的不同，制造叶片用的专用工夹具需要 40~120 种。

每个叶片的制造成本随其尺寸和形状复杂程度而不同，約 9~300 卢布。尽管蒸汽透平叶片的結構是多种多样的，但是所有动叶片都可以看作由三部分組成：根部（叶根）、叶身和叶頂，这些部分都有几种定型的結構（图 1、2、3）。

叶 根 型 式

叶根的結構对叶片的强度影响很大。叶根的类型决定毛坯的型式，从而也决定了叶片全部加工工序的特点。叶片靠叶根固定在叶輪上。叶片在叶輪上的固定方法有两种，一种是采用隔叶件，另一种是不用隔叶件。

叶片上所受的負荷不大时，叶片的叶根多数和隔叶件分开制造。当叶片上受到很大应力、特别是圓周速度很高时，叶片的叶根总是和隔叶件做成一体。隔叶件不仅用来固定叶片，同时还用来保持叶片之間应有的距离，即汽道寬度。

图 1 所示的是几种普遍采用的叶根型式。最简单和常用的一种是倒 T 形叶根。它用于不大的等截面叶片，这种等截面叶片大都用冷軋型材制造。叶身和叶根的截面相同。隔叶件和叶片是分开制造的。

为了固定倒 T 形叶根，在叶輪輪緣上車出和叶根型式一样的槽。叶輪輪緣上开有鎖口。叶片和隔叶件一个隔一个地由鎖口装入叶輪輪緣的槽中，然后在鎖口中装入鎖块。

这种叶根型式的缺点，首先是无法观察，所以很难檢查叶片在叶輪上的装配质量。其次是叶片在叶輪中的固定不牢固，因而这种叶根不能用在离心力很大的叶片上。在这种情况下叶輪輪緣会发生弯曲，叶根支承面也要受到很大的挤压应力。为了不使叶輪輪緣发生弯曲，就要把輪緣做得十分笨重。

如果要减小叶輪輪緣的弯曲应力和叶根支承面的挤压应力，

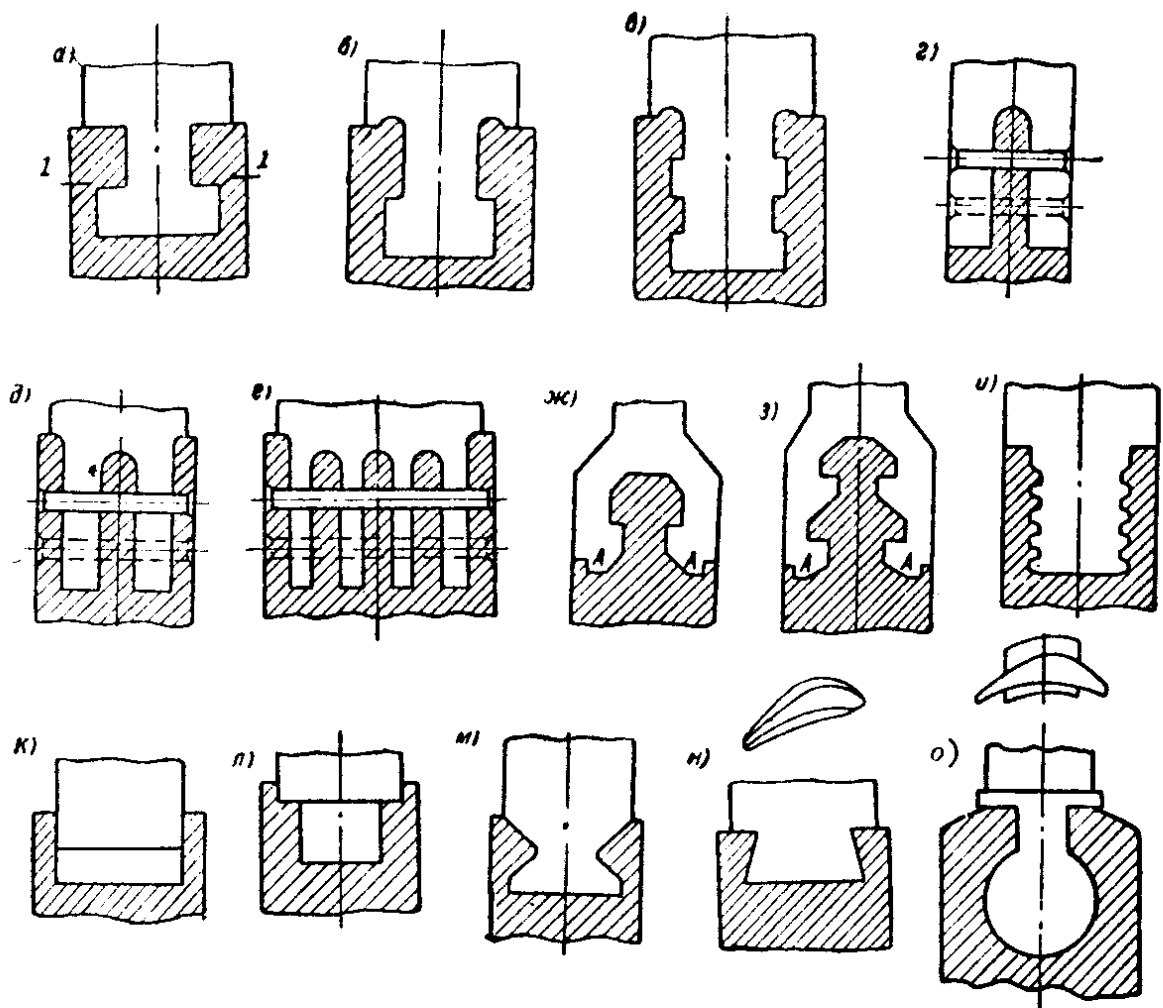


图1 各种叶根型式:

a—倒T形叶根; *б*—带卡脚的倒T形叶根; *и*—带卡脚的双T形叶根; *з*—外包式双叉形叶根; *д*—内插式双叉形叶根; *е*—多叉形叶根; *ж*—菌形叶根; *з*—双层菌形叶根; *и*—齿形叶根; *к*—墩粗式叶根; *л*—嵌配式叶根; *м*—X形叶根; *и*—燕尾形叶根; *о*—拉伐尔型叶根。

就把叶根做成带卡脚的倒T形和双T形(图1*б*和*и*)。卡脚使叶輪輪緣不会張开。不論是等截面叶片或变截面叶片,这种型式的叶根都和隔叶片做成一体。

外包式双叉形叶根(图1*з*)和内插式双叉形叶根(图1*д*)用于圓周速度很大的等截面和变截面輕型叶片。大功率机組上負荷很大的叶片采用多叉形叶根(图1*е*)。叉形叶根的叶片和隔叶片做成一件。这种叶片用鉚釘固定在叶輪輪緣上,鉚釘在鉸孔后装入,然后鉚紧。鉚釘和孔用迫配合。

增加叶根叉数就是增加鉚釘剪切平面的数量。叉形叶根的叶片可以从叶輪上部分地拆換。

菌形叶根 (图 1 ж) 和双层菌形叶根 (图 1 з) 用于轉速和負荷都很高的叶片, 叶片和隔叶片做成一体。菌形叶根单靠配合固定在叶輪上, 而不另用鉚釘。凸肩 A 用来减小叶根上的弯曲应力。

菌形叶根便于观察, 能檢查叶片在叶輪上的装配质量。这种叶根的缺点, 是掉換叶片时必须將叶輪上的叶片全部拆除。

齿形叶根 (图 1 и) 的叶片是在离心力很大的情况下采用的。

墩粗式叶根 (图 1 к) 及嵌配式叶根 (图 1 л) 用于中等負荷。

X形叶根 (图 1 м) 和燕尾形叶根 (图 1 н) 用于小負荷。

拉伐尔型叶根 (图 1 о) 用在圓周速度非常高的叶片上。这种叶根可以从叶輪上部分地拆換。

以上所列举的叶根型式, 沒有包括目前所有的各种結構型式。还有一些其他型式的叶根, 不过它們用得比較少。

叶根型式的可靠性主要取决于: 依据叶片的大小及其工作条件正确选择的叶根尺寸; 叶根的制造精度; 表面加工质量; 叶根截面剧变处和叶根与叶身过渡处的加工质量; 以及叶片在叶輪上的装配质量。叶根制造的精度高和表面加工的质量优良, 能保証相邻叶片之間或者叶片和隔叶件之間完全貼紧, 这样能阻止振动傳入叶根深处, 也就防止了交变应力。

如果叶根在不同截面的过渡地方留有尖角, 将会产生很大的局部应力, 降低叶根强度。透平运行时, 动叶片的叶根受到离心力的作用, 产生拉伸、弯曲、剪切和压縮应力。如果振动傳到叶根深处, 叶根就会受到交变应力。

由于叶根截面在不同高度上变化很大, 所以在計算时应把叶根看成是由几个部分組成的。

叶根計算要考虑到由离心力引起的拉应力、压应力和剪应力。倒T形叶根的危险截面是 $I-I$ 处的狹窄截面 (图 1 а), 这个截

面应按拉应力来计算，这个拉应力是由该截面以上的整个叶片质量（包括一个节距的围带和束腰线）产生的总离心力所引起的。

叶根的支承面应按压应力计算，而它的凸肩则按同一离心力产生的剪应力来计算。叉形叶根的危险截面是被上部铆钉所削弱的截面（图 1 z），这个截面按铆钉以上的叶身（包括围带和束腰线）的离心力所产生的拉应力来计算。

各种型式的叶根的计算，见参考文献[1~2]。

叶身（叶片工作部分）型式

叶身通常有着各种不同的型线。

最常见的几种叶身型式如图 2。

叶身型线按应用范围分为冲动式和反动式；还有一种组合的叶身型线，具有二者的特点。

叶身的形状，无论是从强度观点来看，还是把动能有效地转变为机械能来看，都应当具有最合理的型线。

图 2 a 和 б 是横截面沿叶身整个高度不变的冲动式叶片的简图。内弧面型线可以是一段圆弧形，也可以有一个比较复杂的轮廓。

有时，在穿束腰线的地方把背弧面加厚（图 2 в）。

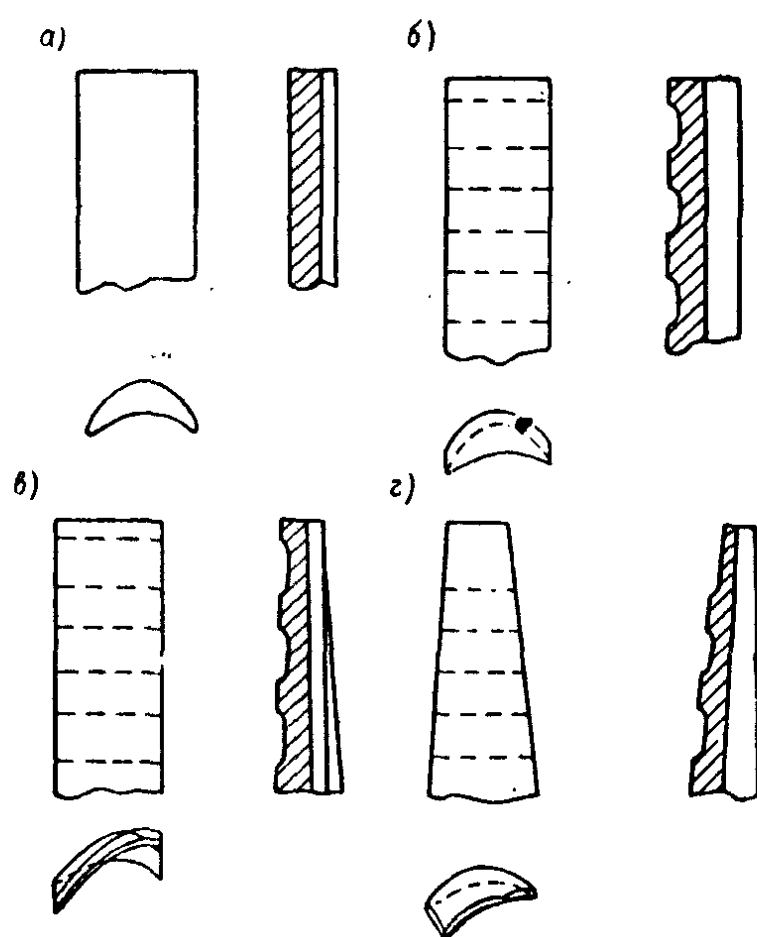


图 2 各种叶身型式：

a、б—等截面叶片；в、з—变截面叶片。

图 2 6 和 2 7 所示是截面沿叶高变化的反动式叶片。图 2 6 所示叶片的进汽边和出汽边是平行的，图 2 7 叶片的进、出汽边则是不平行的。

变截面叶片上穿束腰线地方的背弧面同样也可以加厚。各种变截面叶片的截面积沿叶高的变化规则是极不相同的，而且在大多数情况下，也无法用分析式表示。所以在计算叶身时，面积变化曲线照例用图示出。

由离心力引起的叶片拉伸和弯曲，以及由蒸汽力引起的静弯曲的计算，在参考文献[1~3]都有详细的介绍。

叶顶型式

如图 3 所示，有各种叶顶型式。

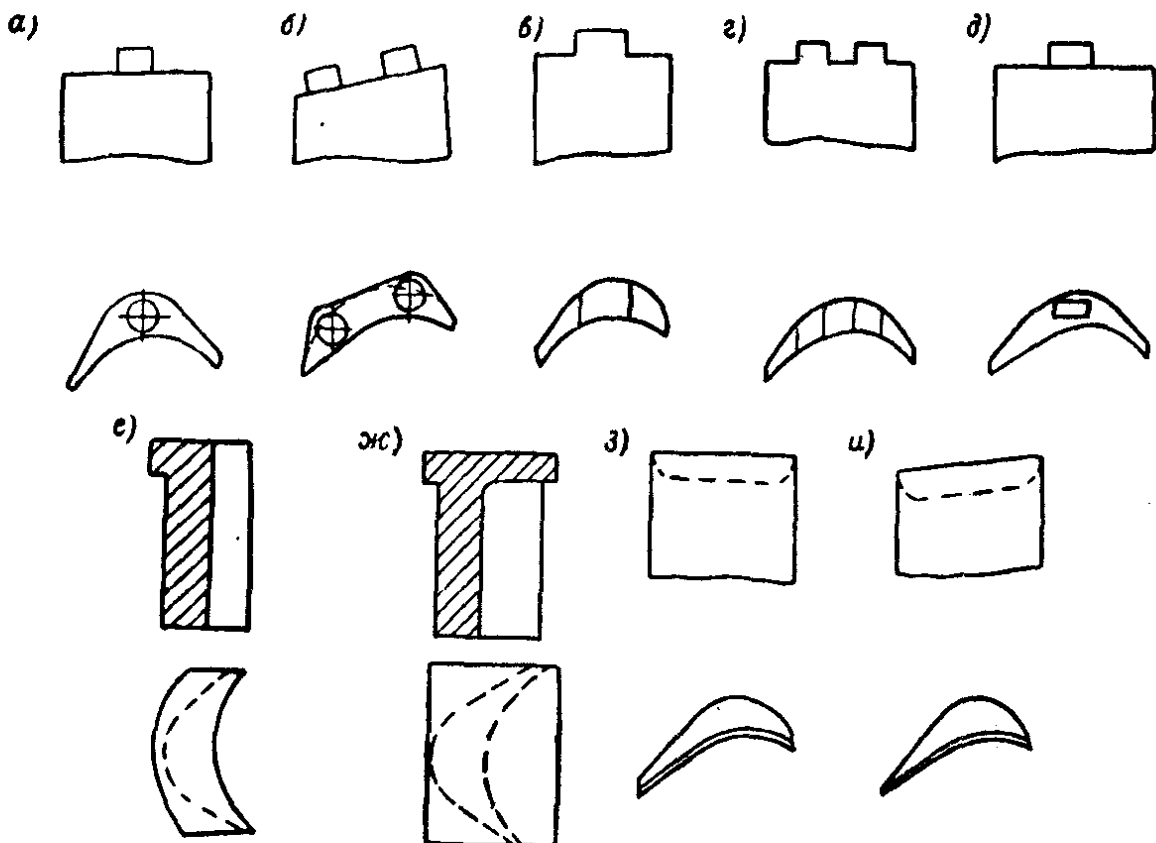


图 3 叶顶的各种型式:

a—圆端钉；b—斜叶顶上的双排圆端钉；B—不切方的直边端钉；
z—不切方的双排直边端钉；d—切方的直边端钉；e—单向圆带盖
叶顶；sk—双向圆带盖叶顶；3—铣薄的平叶顶；u—铣薄的斜叶顶。

为了安装圍带，要在叶頂（頂端）上加工出裝圍带的端釘。端釘有圓的（图 3 a、б）和直边的（图 3 в、г、д）。直边端釘可以不切方（图 3 в、г），也可以切方（图 3 д）。端釘可以同叶片頂面垂直，也可以傾斜。端釘按圍带离心力来計算拉应力。

有的叶片做成带单向（图 3 е）或双向（图 3 ж）圍带盖的形式。

不用圍带时，叶頂就做得較薄（图 3 з 和 и）。

2 动叶片組

动叶片組是指由联接件紧固在一起的叶片的組合。在透平上，很少見到单个叶片。叶片組是承受应力的基本元件。所謂联接件，通常是指圍带环和束腰綫。圍带环就是带加强肋或不带加强肋的板条。

冲动式叶片一般都用圍带环。端釘先穿过圍带环上的孔，然后鉚在叶頂上。反动式叶片多数只用束腰綫来固定。束腰綫先穿入叶片的孔中，然后和叶片焊牢。

叶片組有各种不同的結構型式。它們的区别在于組合的叶片数、联接件型式、联接件数目及联接件之間的相互配置。每个叶片組通常有七个或七个以上的叶片。

按联接件型式和数目的不同来分，叶片組有由一个圍带环联接的，有由一排束腰綫联接的，也有由一个圍带环配合几排束腰綫联接的。

按叶片組联接件之間的相互配置来分，有交叉式的联接，也有环式的联接。

采用分組連固时，用圍带和束腰綫把叶片联接成独立的叶片組，各叶片組之間沒有机械联系，它們能够各自独立地振动。

图 4 表示用圍带和一排束腰綫联接的叶片組；图 5 表示用三排束腰綫分組連固的叶片組。

在交叉式連固时，圍带和束腰綫相互交錯地把叶片联接在一

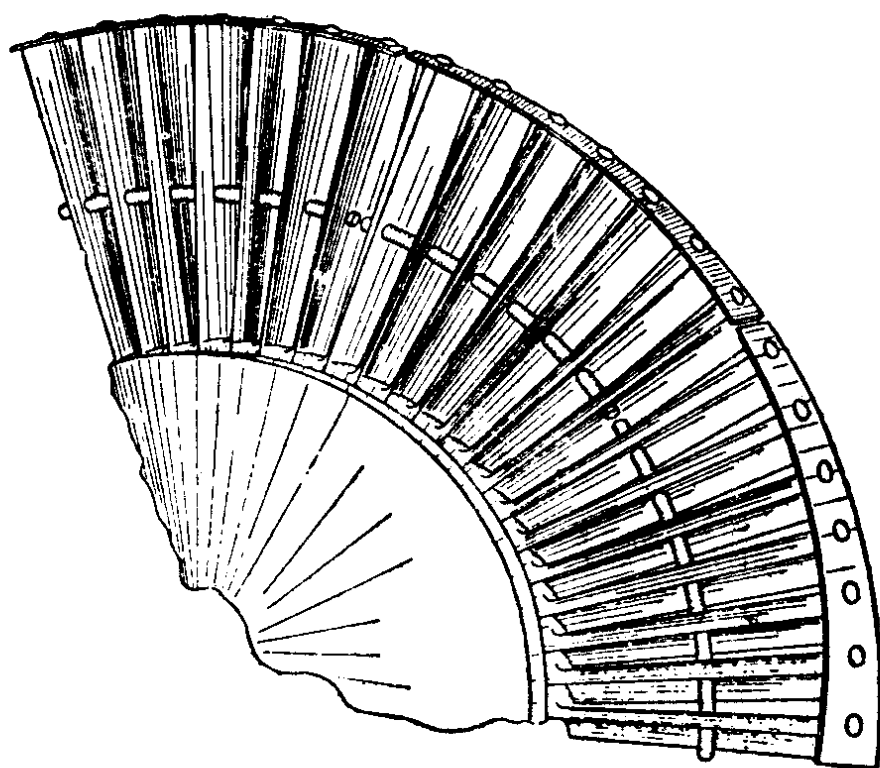


图 4 用圍帶和一排束腰綫的叶片分組連固簡图。

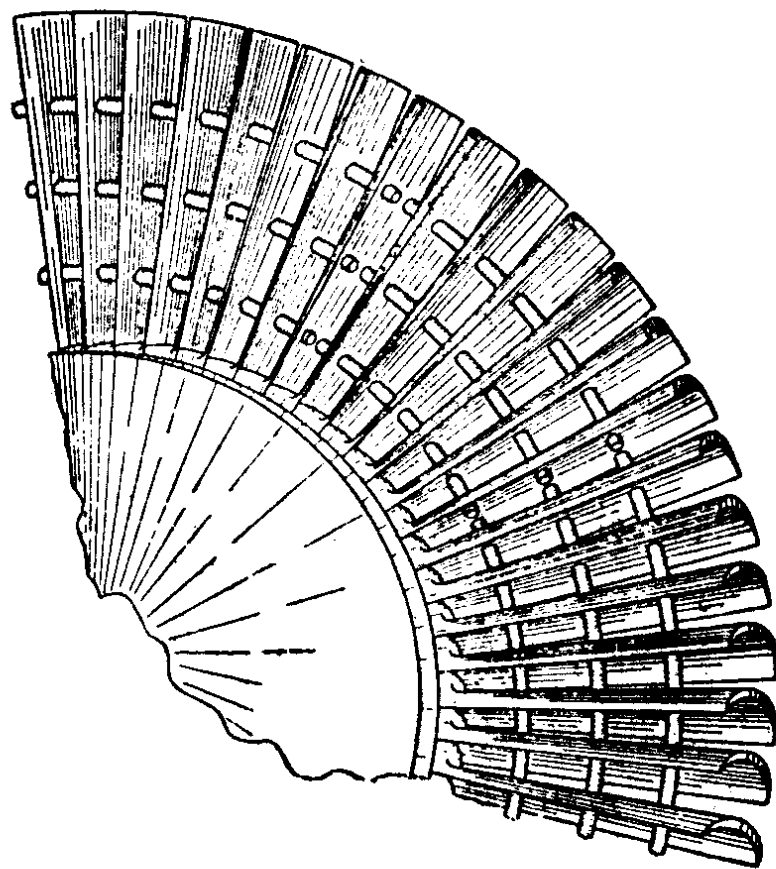


图 5 用三排束腰綫的叶片分組連固簡图。

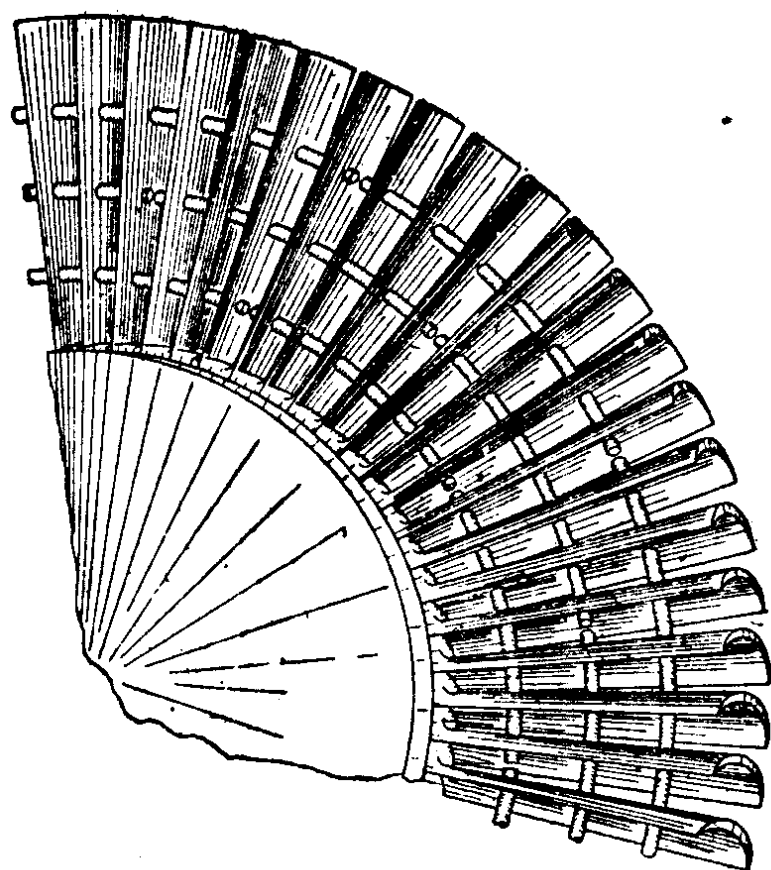


图 6 用三排束腰綫的叶片交叉式連固簡图。

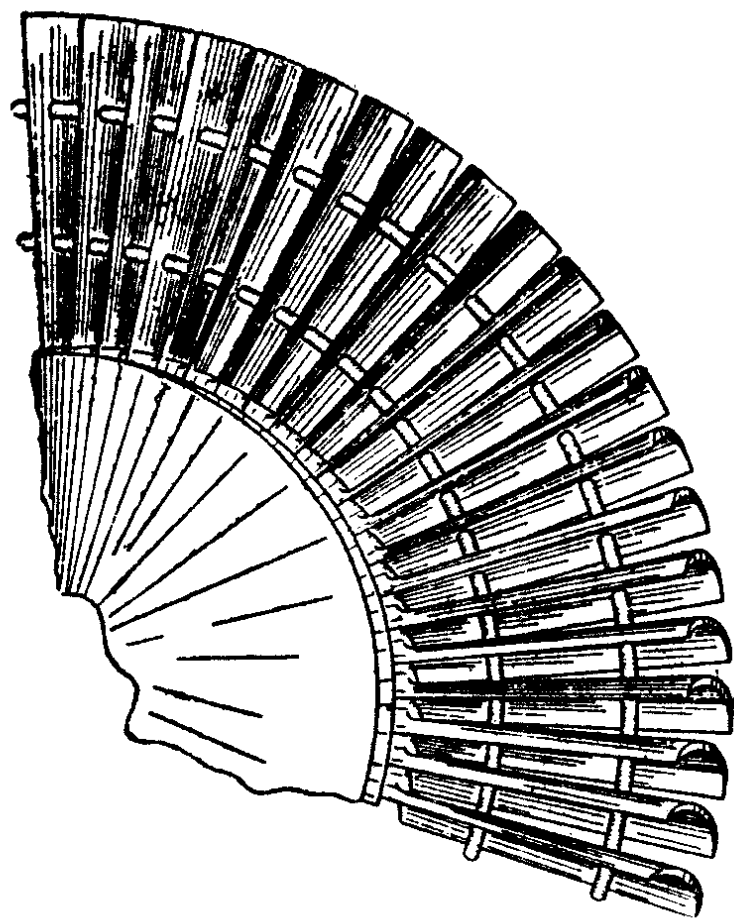


图 7 叶片的环形連固簡图。

起；各条联接綫上的“断点”相互錯开。

图 6 表示用三排束腰綫的交叉式連固。

图 7 表示叶片的环形連固。在这种联接形式中，各排束腰綫以整环形式固結叶片。

叶片組除上述各种型式之外，也有采用带单向或双向圍带盖的叶片。各个叶片的圍带盖与叶片本体一起合并成一圈完整的圍带环。

斯各达厂的叶片采用带单向圍带盖的形式。圍带盖形状和叶片型綫相同，这样就能保証相邻叶片的圍带盖完全貼紧，代替了整圈的圍带。

这种型式的叶片結構表示在图 3 e 上。如图 3 ж 是带双向圍带盖的叶片。

后二种带圍带盖的結構适用于叶身短和断面剛度大的叶片。

3 动叶片的损坏类型

現代透平已經发展到最完善的机器的程度，然而它在运行中仍然避免不了故障。

与蒸汽机相反，透平中承受摩擦并因而磨損的零件很少：每个汽缸有两个支持軸承和一个止推軸承，再加上調节部分——这就几乎是产生剛体摩擦的全部零件了。而且透平在正常运行时，軸承中甚至并不发生金屬之間的摩擦，因为現代軸承可以保証在軸頸和軸瓦之間保持油膜。

蒸汽机中的所有摩擦部分几乎都能直接观察到，甚至还能摸到，故障一开始就比較容易被发现出来，从而就能防止事故扩大。而在蒸汽透平中，所有的主要运动部分都是封閉的，运行时无法观察，只能根据声音、測量讀数或者監視仪表来判断是否产生故障。

按照透平的工作原理，只要零件的强度承受得了，可以采用尽量高的圓周速度。

蒸汽机的运行速度很低，强度安全系数很大，有时它可以长期运行而不必大修。因为强度安全系数本身就是潜在的储备。

透平的最主要零件——尤其是动叶片——几乎是在极限应力下运行。叶片的损坏大都是由于振动。叶片断裂面的金属疲劳征象证明了这一点。在大多数事故中，叶片振动的原因还没有弄清楚。各种型式的透平毫无例外地都受到叶片振动损坏的危害。

这种情况使得现在不得不把叶片振动作为整个透平技术的关键来研究。

根据叶片事故的统计资料和对这些资料的分析，以及国内外科学研究机关和制造厂的系统研究，可以对叶片振动强度方面的设计和计算进行某些适当的修正，以提高叶片的运行可靠性。

然而还不能说，叶片振动方面的理论探讨和试验研究，已经完善到使设计师能够知道和防止所有引起叶片振动断裂的原因。

至于叶片在透平运行时的自振频率的确定，目前还没有足够准确的理论方法。计算中有时也不能预计到所存在的激振力及其频率。

在透平中，存在有引起叶片振动，也就是使叶片作强迫振动的情况。

如果单位时间内叶片强迫振动的次数与叶片的自振次数相同，就会引起共振。

强迫振动的振幅一般都很小，其本身并不足以造成任何事故。但在共振时，振幅便大大增加，足以造成事故。

要是引起共振的激振力很大，透平在运行几小时以后就会发生事故。如果这个激振力不大，在运行几年之后也会出现事故。当叶片振幅大于相邻的不动部分之间的间隙时，叶片就会跟不动部分碰撞，引起损坏。

即使振幅没有大于整个间隙，损坏还是不能避免。因为叶片振动会产生附加的应力，这个应力总在改变自己的数值和符号，也就是一会儿是拉应力，一会儿是压应力。所以，运行一个时期