

船用渦輪機通流部分 空气动力学

Г. А. 馬特維也夫 Г. Ф. 卡姆涅夫 著
Н. М. 馬尔科夫 В. С. 叶里查洛夫



國防工業出版社

7543.15/773

船用渦輪機通流部分 空氣動力學

Г. А. 馬特維也夫 Г. Ф. 卡姆涅夫 著
Н. М. 馬爾科夫 В. С. 叶里查洛夫
謝長豪、俞茂錚、翁澤民 譯
向一敏 校



國防工業出版社

1964

內容簡介

本书叙述船用渦輪机叶片的最常用空气动力研究方法及其結果。另外，本书还对船用渦輪机亚音速級和超音速級的叶片設計原理和热力計算方法作了詳細的介紹。

书中引用的材料可供船舶渦輪机制造部門的設計和研究人員采用，也可供船舶制造和动力机械制造专业的师生参考。

АЭРОДИНАМИКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СУДОВЫХ ТУРБИН

Г. А. Матвеев Г. Ф. Камнев Н. М. Марков

В. С. Елизаров

СУДПРОМТИЗ 1961

*

船用渦輪机通流部分空气动力学

謝长豪、俞茂鐸、翁澤民 譯

向一敏 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 11 279 千字

1964年5月第一版 1964年5月第一次印刷 印数：0,001—1,150 册

統一书号：15034·729 定价：(科八-1) 2.30 元

目 录

序言	5
各基本量的代表符号	8
第一章 渦輪机級中工质能量損失的分类	11
§ 1 渦輪机級的工作概述	11
§ 2 渦輪机級輪周效率所考虑的損失	13
§ 3 渦輪机級內效率所考虑的損失	14
第二章 船用渦輪机叶片的現代研究方法	17
§ 4 渦輪机叶圈的研究方法的概述	17
§ 5 用模拟法研究叶栅的繞流問題	19
§ 6 无粘性不可压缩流体繞叶栅流动的分析研究法	48
§ 7 叶型出口边为无限薄叶栅的損失的理論計算方法	75
§ 8 叶圈的試驗研究法	89
第三章 船用渦輪机的近代叶型	102
§ 9 船用渦輪机叶圈的工作特点	102
§ 10 船用渦輪机叶型系列化的几个問題	104
§ 11 由新叶型組成的叶栅的空气动力特性	111
第四章 各种因素对叶栅損失的影响	123
§ 12 叶栅損失系数与 Re 数及 M 数的关系	123
§ 13 叶栅損失系数与叶型外形的关系	129
§ 14 叶栅損失系数与栅距、叶型安装角和气流入口角的关系	137
§ 15 叶栅損失系数在叶型出口边厚度改变时的变化	140
第五章 各种因素对叶栅气流出口角和流量系数的影响	152
§ 16 用理論方法确定噴嘴叶栅的流量及气流出口角	152
§ 17 确定叶栅气流出口角和流量的試驗数据	159

第六章 叶栅中空间气流的研究	164
§ 18 拉筋对叶栅损失系数的影响	164
§ 19 叶片长度有限所引起的能量损失	167
§ 20 围带的倾斜角对叶栅损失系数的影响	170
§ 21 气流通过叶圈轴向间隙沿径向穿流的研究	172
§ 22 气流经过叶圈轴向间隙的周向穿流的研究	196
第七章 按照叶栅的空气动力特性数据设计涡轮机级的计算方法	208
§ 23 叶片的叶型和叶栅的参数选择	208
§ 24 最佳叶片宽度的选择	210
§ 25 涡轮机级的最佳过盖和反动度的选择	214
§ 26 确定涡轮机级中由于间隙和部分进汽所引起的能量损失	229
§ 27 涡轮机级周效率计算程序示例	243
第八章 工质作超音速流动的涡轮机级的空气动力学问题	250
§ 28 超音速气流绕流叶栅的一些特点	250
§ 29 各种因素对喷嘴工作效率的影响	258
§ 30 变工况时喷嘴气流出口方向的确定	266
§ 31 用特性线法设计喷嘴通道的型线	269
§ 32 涡轮机工作叶圈叶道型线的设计方法	280
第九章 用试验涡轮机研究叶圈	284
§ 33 工质作亚音速流动时对复速级的研究结果	284
§ 34 工质作超音速流动时对复速级的研究结果	294
§ 35 复速级在湿蒸汽区和超临界热降下工作的研究	319
§ 36 超临界热降下压力级工作情况的研究	321
§ 37 复速级鼓风损失的确定	323
§ 38 雷诺数对级效率的影响	327
第十章 用模型级特性换算法进行涡轮机级的近似计算	334
§ 39 模型级和所设计级的参数不同时, 其级效率修正量的确定	335
§ 40 级效率计算程序示例	341
参考文献	345

7543.15/773

船用渦輪機通流部分 空氣動力學

Г. А. 馬特維也夫 Г. Ф. 卡姆涅夫 著
Н. М. 馬爾科夫 В. С. 叶里查洛夫

謝長豪、俞茂錚、翁澤民 譯

向一敏 校



國防工業出版社

1964

內容簡介

本书叙述船用渦輪机叶片的最常用空气动力研究方法及其結果。另外，本书还对船用渦輪机亚音速級和超音速級的叶片設計原理和热力計算方法作了詳細的介紹。

书中引用的材料可供船舶渦輪机制造部門的設計和研究人員采用，也可供船舶制造和动力机械制造专业的师生参考。

АЭРОДИНАМИКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СУДОВЫХ ТУРБИН

Г. А. Матвеев Г. Ф. Камнев Н. М. Марков

В. С. Елизаров

СУДПРОМТИЗ 1961

*

船用渦輪机通流部分空气动力学

謝长豪、俞茂鐸、翁澤民 譯

向一敏 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 11 279 千字

1964年5月第一版 1964年5月第一次印刷 印数：0,001—1,150 册

統一书号：15034·729 定价：(科八-1) 2.30 元

目 录

序言	5
各基本量的代表符号	8
第一章 渦輪机級中工质能量損失的分类	11
§ 1 渦輪机級的工作概述	11
§ 2 渦輪机級輪周效率所考虑的損失	13
§ 3 渦輪机級內效率所考虑的損失	14
第二章 船用渦輪机叶片的現代研究方法	17
§ 4 渦輪机叶圈的研究方法的概述	17
§ 5 用模拟法研究叶栅的繞流問題	19
§ 6 无粘性不可压缩流体繞叶栅流动的分析研究法	48
§ 7 叶型出口边为无限薄叶栅的損失的理論計算方法	75
§ 8 叶圈的試驗研究法	89
第三章 船用渦輪机的近代叶型	102
§ 9 船用渦輪机叶圈的工作特点	102
§ 10 船用渦輪机叶型系列化的几个問題	104
§ 11 由新叶型組成的叶栅的空气动力特性	111
第四章 各种因素对叶栅損失的影响	123
§ 12 叶栅損失系数与 Re 数及 M 数的关系	123
§ 13 叶栅損失系数与叶型外形的关系	129
§ 14 叶栅損失系数与栅距、叶型安装角和气流入口角的关系	137
§ 15 叶栅損失系数在叶型出口边厚度改变时的变化	140
第五章 各种因素对叶栅气流出口角和流量系数的影响	152
§ 16 用理論方法确定噴嘴叶栅的流量及气流出口角	152
§ 17 确定叶栅气流出口角和流量的試驗数据	159

第六章 叶栅中空间气流的研究	164
§ 18 拉筋对叶栅损失系数的影响	164
§ 19 叶片长度有限所引起的能量损失	167
§ 20 围带的倾斜角对叶栅损失系数的影响	170
§ 21 气流通过叶圈轴向间隙沿径向穿流的研究	172
§ 22 气流经过叶圈轴向间隙的周向穿流的研究	196
第七章 按照叶栅的空气动力特性数据设计涡轮机级的计算方法	208
§ 23 叶片的叶型和叶栅的参数选择	208
§ 24 最佳叶片宽度的选择	210
§ 25 涡轮机级的最佳过盖和反动度的选择	214
§ 26 确定涡轮机级中由于间隙和部分进汽所引起的能量损失	229
§ 27 涡轮机级周效率计算程序示例	243
第八章 工质作超音速流动的涡轮机级的空气动力学问题	250
§ 28 超音速气流绕流叶栅的一些特点	250
§ 29 各种因素对喷嘴工作效率的影响	258
§ 30 变工况时喷嘴气流出口方向的确定	266
§ 31 用特性线法设计喷嘴通道的型线	269
§ 32 涡轮机工作叶圈叶道型线的设计方法	280
第九章 用试验涡轮机研究叶圈	284
§ 33 工质作亚音速流动时对复速级的研究结果	284
§ 34 工质作超音速流动时对复速级的研究结果	294
§ 35 复速级在湿蒸汽区和超临界热降下工作的研究	319
§ 36 超临界热降下压力级工作情况的研究	321
§ 37 复速级鼓风损失的确定	323
§ 38 雷诺数对级效率的影响	327
第十章 用模型级特性换算法进行涡轮机级的近似计算	334
§ 39 模型级和所设计级的参数不同时, 其级效率修正量的确定	335
§ 40 级效率计算程序示例	341
参考文献	345

序 言

近几年来船舶动力装置的发展特点是广泛地采用蒸汽輪机及燃气輪机。渦輪机已日益被用作船舶的主原动机，并用来带动輔助机械。甚至在原先专门采用其他类型原动机的船舶中也有这种趋势。

对船舶渦輪机装置的重量、尺寸和经济性的要求是因船舶的用途而有所不同。要满足这些要求得采取各种不同的措施。其中之一就是要合理设计渦輪机通流部分最重要的元件——叶圈。

固定式渦輪机和船用渦輪机的叶圈的热力计算原理及设计方法除了有共同之处外，后者还有许多特点。这是由于船舶渦輪机的特殊运行条件以及对其重量和尺寸特殊的高要求所引起的。譬如，船舶渦輪机的通流部分必需专门配置一些特殊的渦輪机級（低速航行級和倒車級），并且通流部分的各个渦輪机級应具有較大的热降（包括超临界的）。此外，还得采用特殊的叶型及許多其他措施。

设计船舶渦輪机时，只有充分利用叶片的空气动力学試驗研究結果，才能把这些措施最合理地配合起来。因而，渦輪机的设计人員应当了解叶片的研究方法以及由此得到的研究結果。

現今所用的渦輪机通流部分空气动力試驗装置和試驗方法极其繁多，各国有关这些問題的文献也非常丰富。要对它作詳尽的研究必須花費許多時間。无疑地，从事渦輪机实际设计的工作人員要熟悉这些資料也不总是可能的。

因此，本书作者力图为船用渦輪机设计人員编写出一本簡要的参考书，便于讀者通过它来了解渦輪机通流部分各种空气动力学問題的理論和試驗研究方法方面的原則。所涉及的問題都是目

前渦輪機葉圈研究方面的主要課題。書中對以上各問題的基本內容敘述得相當詳細，可以使讀者在按具體條件採用某種研究方法時，毋需再參考其他的資料。這些內容我們在第一章和第二章中討論。第三章至第五章研究葉柵的繞流，並分析各種因素對其能量損失係數及氣流出口角的影响。這些問題的研究基本上就是就船舶渦輪機的新葉型進行的。書中引用了在船舶渦輪機中廣泛應用的葉型。

第六章研究渦輪機級的葉圈中三維流動的某些現象。第七章討論按照葉柵的空氣動力試驗研究數據設計渦輪機級的方法。

由於許多原因，在船舶渦輪機中，宜於採用超音速渦輪機級，超音速渦輪機級葉圈元件的設計原理在第八章敘述。

在第九章中，說明了在試驗渦輪機上研究葉圈所得的一些研究結果。此處主要引用了工質作亞音速流動或超音速流動的復速級試驗數據。

第十章敘述怎樣應用換算模型級特性的方法來進行近似的計算渦輪機級。這種方法不是通用的；能否採用這一方法以及所得結果的準確程度如何，取決於模型級的尺寸和試驗時的工質參數與所設計的渦輪機級的差別。在船舶汽輪機裝置的實際設計中，現今已有的試驗數據已為較廣泛地採用這一方法提供了基礎。

當然，本書不企圖闡述船舶渦輪機葉圈的空氣動力學及其熱力計算理論的所有問題。書中主要收集了作者的研究結果，在討論某些問題時，其他作者的研究結果只作了必要的概括。

本書是為已經熟悉了空氣動力學教程（包括氣體動力學）基礎的讀者編寫的。因此在敘述問題時，逕直採用這些教程中已確切規定的一些量的符號，不再另加說明。所引用的一些基本方程，如“連續方程”、“能量方程”也不再推導。同樣，在提到像“附面层”、“環量”、“理想流体”、“可壓縮流体”、“不可壓縮流体”和“平面流”等一些概念時，也不作說明。

因为大部分所研究的问题既属于蒸汽轮机,也属于燃气轮机,所以书中采用了“工质”这一术语。

书中所用“导向叶片”的概念,其含义比过去广泛。它可以指反动式涡轮机的导向叶片,也可指第一级的或冲动式涡轮机中间级隔板的喷嘴叶片。

书中讨论的所有内容都是对轴流式涡轮机而言的。

各个作者所编写的章节如下:

Г. А. 馬特維也夫(Г. А. Матвеев)编写第二章 § 4~6, 第三章 § 10 及 11, 第四章 § 13 及 14, 第五章 § 16 及 17, 第六章 § 18 及 20, 第七章 § 23, 第八章 § 29~31, 第九章 § 34~37, 第十章 § 39 及 40。

Г. Ф. 卡姆涅夫(Г. Ф. Камнев)编写第二章 § 5, 第七章 § 25。

Н. М. 馬尔科夫(Н. М. Марков)编写第一章 § 1~3, 第二章 § 7, 第四章 § 12, 第六章 § 19, 第七章 § 24 及 27, 第九章 § 33 及 38。

В. С. 叶里查洛夫(В. С. Елизаров)编写第二章 § 8, 第四章 § 15, 第七章 § 26。

第六章 § 21 和 22 为 Г. Ф. 卡姆涅夫及 В. С. 叶里查洛夫合写。第三章 § 9 和第八章 § 28~32 为 Г. А. 馬特維也夫和 Г. Ф. 卡姆涅夫合写。

各基本量的代表符号

- p ——任意一点或截面上气流的压力, 公斤/厘米²
 p_a ——大气压力, 公斤/厘米²
 ρ ——工质的密度, 公斤·秒²/米⁴
 γ ——工质的重度, 公斤/米³
 ν ——工质的比容, 米³/公斤
 g ——重力加速度, 米/秒²
 ν ——运动粘性系数, 米²/秒
 A ——功的热当量, 大卡/公斤·米
 T ——绝对温度, °K
 k ——绝热指数
 i ——焓, 大卡/公斤
 δ ——附面层厚度, 米
 x ——蒸汽干度, %
 t ——栅距, 米
 b ——叶型弦长, 米
 $\bar{t} = \frac{t}{b}$ ——相对栅距
 l ——工作叶片或喷嘴叶片的高度, 米
 $\bar{l} = \frac{l}{b}$ ——工作叶片或喷嘴叶片的相对高度
 τ ——叶型出口边的厚度, 米
 B ——沿涡轮机轴向叶片的宽度, 米
 O ——叶道喉部的宽度, 米
 D ——涡轮机级叶圈的平均直径, 米
 ζ_{np} ——型线叶栅的损失系数
 S_o ——涡轮机级叶圈的轴向开式间隙^①, 米
 F ——通道(即气流)横截面的面积, 米²
 β_b ——叶型安装角, 度

① 不包括围带及隔板外伸部分的轴向间隙。

β ——工作叶片的气流方向（即相对运动中的气流方向）与栅轴的夹角，度

α ——喷嘴（导向）叶片的气流方向（即绝对运动中的气流方向）与栅轴的夹角，度

c ——喷嘴（导向）叶栅的气流速度（即绝对运动中气流的速度，米/秒

w ——工作叶栅的气流速度（即相对运动中的气流速度），米/秒

G ——通过叶栅的工质流量，公斤/秒

a ——气流的当地音速，米/秒

a_{00} ——气流的滞止音速，米/秒

a_{kp} ——临界音速（工质参数达到临界值时的速度），米/秒

$\lambda = \frac{w}{a_{kp}}$ 或 $\lambda = \frac{c}{a_{kp}}$ ——无因次速度

$M = \frac{w}{a}$ 或 $M = \frac{c}{a}$ ——马赫数

n ——转子的转数，转/分

u ——圆周速度或栅轴（见图1），米/秒

R ——涡轮机级的反动度

φ ——型线叶栅的速度系数

φ_p ——型线叶栅或叶圈的流量系数

ζ ——叶片叶栅的损失系数（考虑到端部损失）

ζ_k ——端部损失系数

ζ_{kp} ——由于叶型出口边厚度有限而引起的损失系数（即出口边损失系数）

$\zeta_{k.ct}$ ——进口弧端损失系数

η'_u ——部分进汽的涡轮机级效率（考虑了轮周上的损失、进汽弧端损失和间隙的漏气损失）

η''_u ——全周进气时的涡轮机级效率（考虑了轮周上的损失与间隙的漏气损失）

其它各量与参数的符号意义见正文中的说明。

标记与术语

kp——临界参数

00——滞止气流的参数

0——等熵过程的气流参数

H——导向叶圈的气流参数

p ——工作叶圈的气流参数

Bx ——喷嘴叶栅入口截面上的气流参数

1——渦輪机級喷嘴叶栅后截面上的气流参数;研究孤立叶栅时,表示叶栅前的气流参数。

2——渦輪机級工作叶栅后截面上的气流参数;研究孤立叶栅时,表示叶栅后的气流参数。

型綫(或叶片)叶栅^①——由同一种形状的叶型或叶片組成,它們彼此相隔同样的距离,并且与栅軸安装成相同的角度。

栅軸——各叶型的对应点連綫。

当上面所例举的文字与标记用来表示其它量与参数时,它們的意义将在正文中专门加以說明。

① 在譯文中,为了方便起見把型綫叶栅与叶片叶栅均簡称为叶栅,只在考虑叶栅的端部損失时,我們才特別将两者加以区别——譯者注。

第一章 渦輪機級中工質能量損失的分類

§ 1 渦輪機級的工作概述

渦輪機的葉片包括固定的與轉動的葉片圈^①。渦輪機級則由一導向葉圈與一工作葉圈組成。按照H. E. 儒柯夫斯基的假定，通過葉圈的工質是沿着與渦輪機軸綫同心的圓柱層流動的。同時還假定：沿半徑任一流層內，工質的流動不受其它各流層的影響。因此就可以單獨地研究任一圓柱面上工質的流動。文獻中通常把這個假定稱為圓柱截面假定。

上面所提到的同心層不是嚴格的圓柱面。但是工質在葉片較短的渦輪機級通流部分中流動時，其徑向偏斜很小；而目前在設計長葉片的渦輪機級時，也使徑向平衡條件得到保證，因此可以近似地把大部分氣流的流動表面當作圓柱面。把單個輪圈上的這種圓柱層展開到平面上，就可得到葉柵的平面繞流（圖1B）。

因此，可以把葉柵視為簡化了的渦輪機葉圈。

採用這種簡化方法，使得渦輪機級的研究與計算大為簡化，並可以根據葉柵平面繞流的研究，來解決一部份改進葉片的問題。

當葉片較長時（ $\frac{D}{l}$ 較小），柵距沿徑向有很大變化，因此氣流的參數也沿徑向變化，特別是在導向葉圈與工作葉圈的間隙中。

這時可把流過葉圈的氣流化為若干相應於不同半徑上圓柱截面的葉柵繞流來研究。但所取的各圓柱截面應與葉片兩端有一定的距離，以使氣流不受葉片端部的影響。靠近葉片端部的地方，圓柱截面的假定自然不成立，這部份的氣流應由專門的試驗來研究。

① “葉片圈”以下簡稱“葉圈”——譯者注。

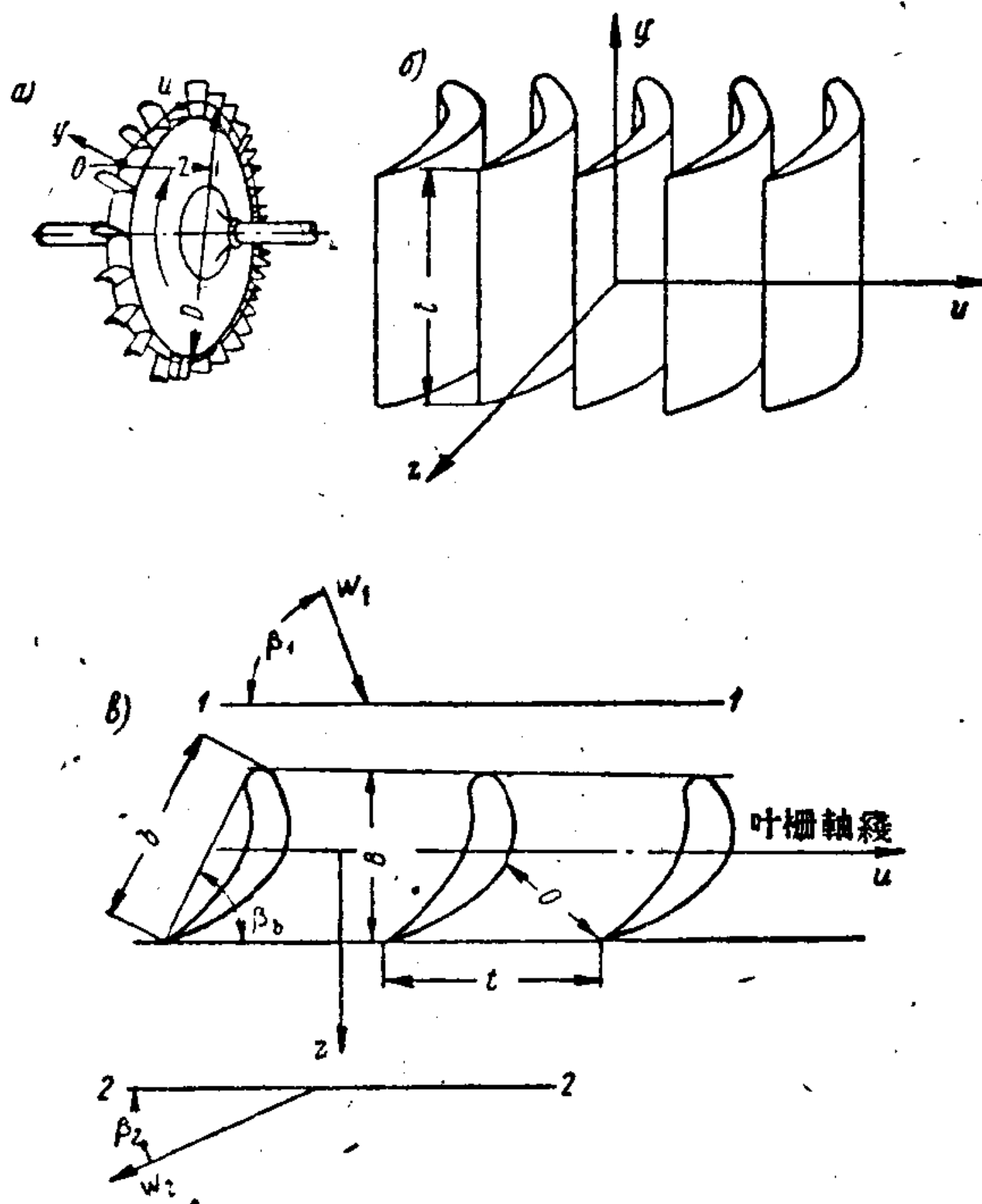


图 1 渦輪机工作叶圈与叶栅的簡图:

a —叶圈; b —叶片叶栅; c —叶型叶栅。

渦輪机級热力計算的基本問題之一，就是确定工质在通流部分內的能量損失。

大家知道，渦輪机級中只有一部分理想热降被有效地利用，其余部份消耗在克服摩擦力以及工质流經叶道时所产生的各种旋渦上。

此外，在渦輪机級通流部分內的間隙中有工质的泄漏，因此，此部分工质不作有效功，造成了相应的能量損失。

同样，由气流与叶片相互作用而得到的輪周功率，也不能完全利用。其中一部分的功率要用来克服轉子轉动而产生的机械阻力。此外，还有其它各种能量損失。