

交通系統中等專業學校試用教材

平透船舶

黑龍江交通學院編



人民交通出版社

交通系統中等專業學校試用教材

船舶透平

(河船輪機管理專業用)

黑龍江交通學院編

人民交通出版社

本書是根据交通部1959年在大連召开的交通系統院校教學會議通过的船舶机械类专业船舶透平試行教學大綱，由黑龍江交通學院輪機科編寫，付予同志具体執筆的。

本書內容簡要，以期在有限的篇幅里，使讀者对船舶透平能獲得一个比較概括的、基本的認識。本書包括理論和結構两部分：前一部分除着重分析了气流在透平叶栅中的流动原理外，并对各项损失的物理本質、流程实验的基本概念以及船舶透平的变动工况和速度特性等作了必要的闡述。后一部分列举了船舶透平的主要零件、操纵和調節設備，并重点介紹了一些大、中、小，重、輕型船舶主輔机蒸汽透平和燃气透平的典型結構。

本書可作为交通及造船学校船舶机械专业的教材，并可供同性質的高等学校學員以及从事工业透平的工程技術人員参考之用。

交通系統中等专业学校試用教材

船 舶 透 平

黑龍江交通學院 編

※

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号

新华书店科技发行所发行 全国新华书店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

※

1961年4月北京第一版 1961年4月北京第一次印刷

开本：787×1092毫米 印張：8張 插頁6

全書：158,000字 印數：1—2,560册

統一書号：15044·6195

定价(10)：1.35元

目 录

引 言	1
-----	---

第一篇 透平原理

第一章 初步概念	5
§1 船舶透平装置的类型	5
§2 船舶透平的结构特点	6
§3 透平的工作原理	7
第二章 工质在透平级中的流动原理	9
§4 工质在导向器中的流动	9
§5 工质在工作叶片中的流动	15
§6 单级透平与多级透平	22
§7 轴流式透平叶片的定型	26
第三章 透平的损失及效率	33
§8 透平损失的种类	33
§9 管阀中的损失	33
§10 叶型损失	35
§11 端部损失	36
§12 部分进气(汽)损失	37
§13 转轮摩擦损失	39
§14 湿汽损失	40
§15 叶栅轴向和径向间隙中的损失	41
§16 叶片的冷却损失	42
§17 曲径密封的漏泄损失	43
§18 透平的内效率	46
§19 透平的有效功率和耗气(汽)率	47
§20 透平流程的实验	47
第四章 船舶透平的变动工况和特性曲线	50
§21 耗气(汽)量对多级透平热降分布的影响	51
§22 级的初终参考数对级的流量的影响	52
§23 变动工况对透平效率的影响	53

§ 24透平的速度特性	53
第五章 透平的热力计算	56
§ 25基本概念	56
§ 26单级透平的计算方法	59
§ 27柴油机增压透平的计算特点	65
§ 28多级透平的计算方法	68

第二篇 船舶透平的结构

第六章 透平的流程	70
§ 29喷管和隔板	70
§ 30工作叶片和导向叶片	80
§ 31流程的型式	86
第七章 转子	88
§ 32转轮型转子	88
§ 33转鼓型转子	91
第八章 固定部分	92
§ 34气(汽)缸	92
§ 35喷管箱	98
§ 36密封设备	100
§ 37轴承	101
§ 38燃气透平的燃烧室	103
第九章 船舶透平的操纵及调节设备	106
§ 39船舶蒸汽透平的操纵阀和喷管阀	106
§ 40船舶自由活塞发生器燃气透平的正倒车操纵阀	109
§ 41船舶燃气透平的燃油调节机构	110
§ 42极限调节器和调速器	111
§ 43调压器	114
第十章 船舶透平的实例	115
§ 44蒸汽透平	115
§ 45燃气透平	120

引 言

透平是一种先进的动力机械，它已经愈来愈为交通运输业所重视。这主要有两方面的原因：首先，透平在短短的实践中就已表明了自己的许多显著优点，如形体小、结构好、重量轻、运转平稳、可应用各种燃料、维修费用较少①等等；其次，透平的潜力还未得到充分发挥，效率有待继续提高。

蒸汽透平在巨型海船上的优越地位是世界所公认的，然而，这并不排斥大功率蒸汽透平将随参数的提高，系统和结构的改善而精益求精。在中小功率的沿海船舶及内河船舶上，蒸汽透平由于效率无法与活塞式内燃机匹敌而未能得到推广，但其效率仍可借改善系统和结构、提高参数、采用单缸带动多个可变螺距螺旋桨等方法予以提高，以便为产煤地区采用中小功率的蒸汽透平作为船舶主机创造有利条件。据苏联对一系列新设计的内河顶推船的试验证明，2400马力的蒸汽透平内河顶推船的营运成本甚至比同马力的柴油机顶推船低20~25%②。由此可见，在我国沿海和长江适当采用中小功率的蒸汽透平船还是可以考虑的。

燃气透平在船上的应用还处在试验阶段，目前存在的主要问题是效率低、寿命短。倘若耐高温材料和冷却方法获得圆满解决，燃气初温提高至1200°C时，其效率即能超过低速柴油机的水平。而燃烧煤粉、消除积炭和腐蚀等问题研究成功后，燃气透平在我国河船上的应用可望出现一个崭新的局面。如能设计和制造出轻巧而又可靠的原子反应堆，那末，透平在船舶上的应用必将获得空前的发展。苏联列宁号原子能破冰船不久前的试航成功就标志着这一天已经指日可待。我国的透平制造业虽然解放之后才开始兴建，但在不到十年的时间内，已经得到了相当的发展。

处在我国这种史无前例的大跃进年代，我们必须高瞻远瞩，注视我们时代的飞跃发展，探索发展中的新生事物，以便投身于轰轰烈烈的技术革命，为改造旧有设备，创制和掌握材料省、重量轻、效率高、成本低、寿命长、使用灵活的新型船机而献出全部热情和智慧。

附 注

①参考下列各表:

400/800馬力河船主机主要性能

表 1

船 型		船 重 吨	主 輔 机 总 重 吨	制造成本 %	营运費用 % 每馬力晝夜	耗 油 率	
						燃 油 公斤/馬力时	滑 油 克/馬力时
自 动 驳 船	柴油透平電動船	261.4/436.2	30.5/46.6	102/109.3	101.2/98.5	0.280/0.260	0.84/0.73
	煤气透平電動船	283.7/474.4	41.3/64.7	110/108	112.3/108	0.500/0.470	1.5/1.3
	柴 油 机 船	255.5/426.7	26.8/41.9	100/100	100/100	0.195/0.193	13.6/13.5
	柴油机电動船	263.4/440.6	33.4/53.6	106.5/106	109.0/108.5	0.218/0.212	15.2/14.8
	煤 气 机 船	289.6/486.7	44.1/69.5	114/111.3	120/120	0.535/0.520	24.0/23.0
	柴油透平船	259.8/431.7	29.5/44.5	102.3/100.5	95.2/92.5	0.251/0.237	0.76/0.71
拖 船	煤气透平電動船	127.5/186.7	40.2/63.3	79.2/77	88.5/81.3	0.500/0.470	1.5/1.3
	蒸 汽 机 船	185.8/275.5	55.3/83.5	100/100	100/100	0.850/0.750	3.0/3.0
	煤 气 机 船	134.6/205.7	43.0/68.1	84.5/83.3	94.5/93.0	0.535/0.520	24.0/23.0
	煤气机电動船	149.7/226.6	52.5/84.8	95.2/94.5	103/97	0.585/0.520	24.0/23.0

各式主机的重量和尺寸特性

表 2

主 机 型 式	功 率 (馬力)	总 容 积 (米 ³)	总 重 量 (吨)	容 积 功 率 (馬力/米 ³)	單 位 重 量 (公斤/馬力)
T 型 低 速 柴 油 机 装 置	3,240/4,860	117/153	98/141	27.7/31.8	30.2/29
V 型 高 速 增 压 (60%) 柴 油 机 装 置	2,500/5,000	51/92.5	52.5/92	49.0/54.0	20.9/18.4
自由活塞发生器透平装置 (包括所有輔助設備)	1,000/5,000	14.5/61.5	20.5/78.5	71.0/81.3	20.5/15.7

1200馬力頂推船营运成本

表 3

主 机 型 式	柴 油 机	煤 气 机	蒸 汽 机	蒸 汽 透 平	燃 气 透 平
营 运 成 本	100	122	136	117	121

10000吨干貨船营运成本

表 4

耗 費 項 目	蒸 汽 透 平	柴 油 机	
		低 速	高 速
船 員 工 資	100	100	100
航 行 耗 費	100	100	100
折 旧 提 成	100	142-162	136
修 理 費 用	100	136-155	130.5
供 应 物 資	100	119-136	114.5

10000吨 (13000馬力) 干貨船制造成本

表5

主机型式 制造成本		蒸汽透平	低 速 柴 油 机			高速柴油机
		2 只鍋爐 1 台主机	1 台主机	1 台主机 (增压)	1 台主机 (增压)	2 台主机
船	人 民 币 (元)	23,000,000	31,700,000	27,800,000	29,000,000	26,600,000
体	百 分 比	100.0	136.0	119.1	124.6	114.5
船	人 民 币 (元)	8,170,000	16,110,000	13,150,000	14,120,000	12,150,000
机	百 分 比	100.0	197.5	161.2	172.6	150.7

②参看苏联“河运”杂志, 1956, №3。

符 号 索 引

- A — 功的热当量, $A = \frac{1}{427}$ 仟卡/公斤米
 a — 音速, 米/秒
 a_k — 导向器最小截面处的音速, 米/秒
 b — 叶片弦长
 C_o — 透平入口的工质绝对流速, 米/秒
 C_l — 导向器出口的工质绝对实际流速, 米/秒
 C_{lt} — 导向器口出口的工质绝对理想流速, 米/秒
 C_k — 工质的临界流速, 米/秒
 C_a — 工质流速的轴向分速, 米/秒
 C_u — 工质流速的周向分速, 米/秒
 C_p — 工质的定压比热, 仟卡/公斤 $^{\circ}$ C
 C_v — 工质的定容比热, 仟卡/公斤 $^{\circ}$ C
 D_{cp} — 叶轮平均直径, 米
 D_e — 透平的耗气率, 公斤/馬力时
 f — 导向器或工作叶片的通路面积
 g — 重力加速度, 米/秒 2
 G — 工质流量, 透平耗气量, 公斤/秒
 G_y — 工质的漏泄量, 公斤/秒
 H_a — 透平的理想分配热降, 仟卡/公斤
 H_o — 透平的实际分配热降, 仟卡/公斤
 H_i — 透平的內热降, 仟卡/公斤
 h_a — 一級的分配热降, 仟卡/公斤
 h_{ad} — 导向器的分配热降, 仟卡/公斤
 h_{as} — 工作叶片的分配热降, 仟卡/公斤
 h_u — 級的輪周热降, 仟卡/公斤
 h_i — 級的內热降, 仟卡/公斤
 h_c — 导向器出口高度
 i — 工质的热焓, 仟卡/公斤
 k — 工质的絕热指数
 l — 叶片的高度
 m — 气体分子量
 M — 馬赫数
 M_u — 工质对叶輪的作用力矩, 公斤米/公斤/秒
 N_e — 透平的有效效率, 馬力
 N_i — 透平的內功率, 馬力
 N_B — 鼓风损失, 馬力
 N_m — 轉輪摩擦损失
 n — 透平轉速, 轉/分
 P_l — 导向器入口压力; 透平进气压力, 公斤/米 2
 P_m — 透平前的滯止压力, 公斤/米 2
 P_k — 临界压力, 公斤/米 2
 P_z — 透平背压, 公斤/米 2
 P_u — 輪周力, 公斤/公斤/秒
 Q_B — 重获热量, 仟卡/公斤
 q_a — 余速损失, 仟卡/公斤
 q_B — 鼓风损失, 仟卡/公斤

q_d — 导向器中的损失, 仟卡/公斤
 q_o — 叶片冷却损失, 仟卡/公斤
 q_s — 叶片中的损失, 仟卡/公斤
 q_n — 驱气损失, 仟卡/公斤
 q_x — 湿汽损失, 仟卡/公斤
 R — 重热系数
 R_e — 雷诺数
 S — 爐竈叶片寬度
 T_1 — 导向器入口温度; 透平进气温度, °K
 T_{1n} — 透平进口滞止温度, °K
 t — 叶栅节距
 t_1 — 导向器入口温度; 透平进气温度, °C
 u — 輪周速度, 米/秒
 v — 工质比容, 米³/公斤
 W_1 — 工质流入工作叶片的实际相对速度, 米/秒
 W_{1t} — 工质流入工作叶片的理想相对速度, 米/秒
 W_2 — 工质流出工作叶片的实际相对速度, 米/秒
 W_{2t} — 工质流出工作叶片的理想相对速度, 米/秒

Z — 透平級数; 曲径密封縫隙数
 α_1 — 导向器流出角
 α_2 — 工质流出工作叶片绝对速度的方向角
 β_1 — 工质流入工作叶片相对速度的方向角
 β_{1n} — 工作叶片的入口角
 β_2 — 工作叶片的流出角
 γ — 工质的重度, 公斤/米³
 δ — 导向器斜切口处的气流偏轉角
 ε — 进气度
 ζ_B — 鼓风损失系数
 ζ_n — 驅气损失系数
 ζ_x — 湿汽损失系数
 η_e — 透平有效效率
 η_i — 級的內效率
 η_{it} — 透平內效率
 η_u — 輪周效率
 ν — 速度比
 ρ — 反动度
 φ — 导向器速度系数
 ψ — 叶片速度系数
 β_k — 临界压力比

第一篇 透平原理

第一章 初步概念

§ 1 船舶透平装置的类型

船舶透平装置因工质的不同而区分为：

1. 蒸汽透平装置（图 1）；
2. 燃气透平装置（图 2）；
3. 自由活塞发生器燃气透平装置（图 3）；

其中蒸汽透平装置的循环与蒸汽机装置的相似；燃气透平装置的循环又有开式和闭式之分：

1) 开式燃气透平装置——压气机将吸自大气的空气压至燃烧室与雾化燃油混合燃烧所得燃烧产物经透平做功后排入大气。

2) 闭式燃气透平装置——作为工质的空气在压气机中提高压力、在空气锅炉中从燃料（与工质隔绝）获得热量，经透平做功后排至冷却器冷却，冷却后进入压气机。可见闭式燃气透平装置的循环与蒸汽透平装置的并无什么原则性的差

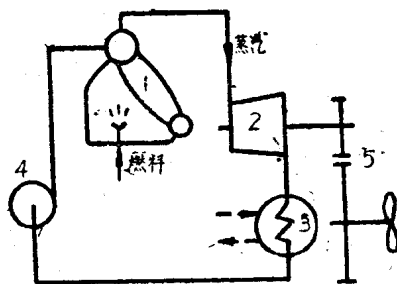


图 1 蒸汽透平装置

1. 蒸汽锅炉；2. 蒸汽透平；3. 冷凝器；4. 给水泵；5. 减速齿轮

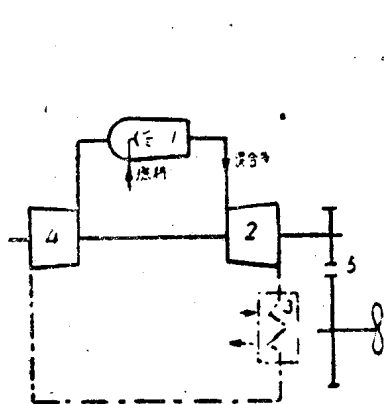


图 2 燃气透平装置

1. 燃烧室（或空气锅炉）；2. 透平；3. 空气冷却器；4. 压气机；5. 减速齿轮

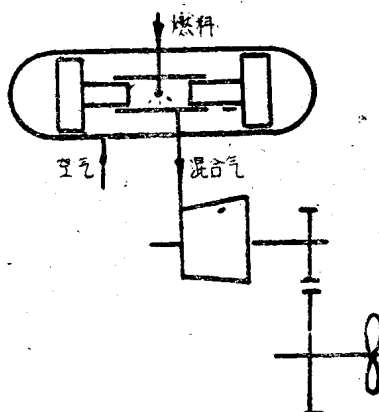


图 3 自由活塞发生器燃气透平装置

別。

自由活塞发生器燃气透平装置也是开式装置，它的特点是压气机与燃烧室构成一体，形成所谓自由活塞发生器，为透平不断提供工质。

各种装置的位能都在透平中转变为机械功，但不同工质获得位能（提高压力和温度）的场所各有不同：蒸汽透平借给水泵提高压力，在蒸汽锅炉中获得热量；燃气透平借压气机提高压力，在燃烧室或空气锅炉中获得热量。

工质的压力和温度的提高以及膨胀做功等工作在透平装置中由专业化的机械分别担任，而在活塞式发动机（内燃机）装置中，则在气缸内由“多面手”活塞一手包办。故前者连续做功，工作稳定；而后者如四冲程柴油机仅四分之一的时间做功，四分之三的时间忙于吸气、压气和排气，因此工质不能连续不断地流动，同一地点的参数又时刻变化，不仅工作不稳定，而且也难以获得较大的功率。

§2 船舶透平的結構特点

各种透平装置的透平在结构上均具有共同的特点。

1. 透平的主要部分有：

1) 轉子——轉子有轉輪型和轉鼓型的区别，但在轉子的外圆柱面上都装有工作叶片。

2) 固定部分——由气（汽）缸、内套、隔板、密封设备、轴承等组成。在气缸或内套或隔板中装有导向器①。

3) 流程——流程是工质流过的部分，主要包括导向器、工作叶片、进排气管节等设备。

4) 倒车部分——倒车部分亦由流程、轉子等部分组成，专司倒车之职责。

2. 透平的主要型式有。

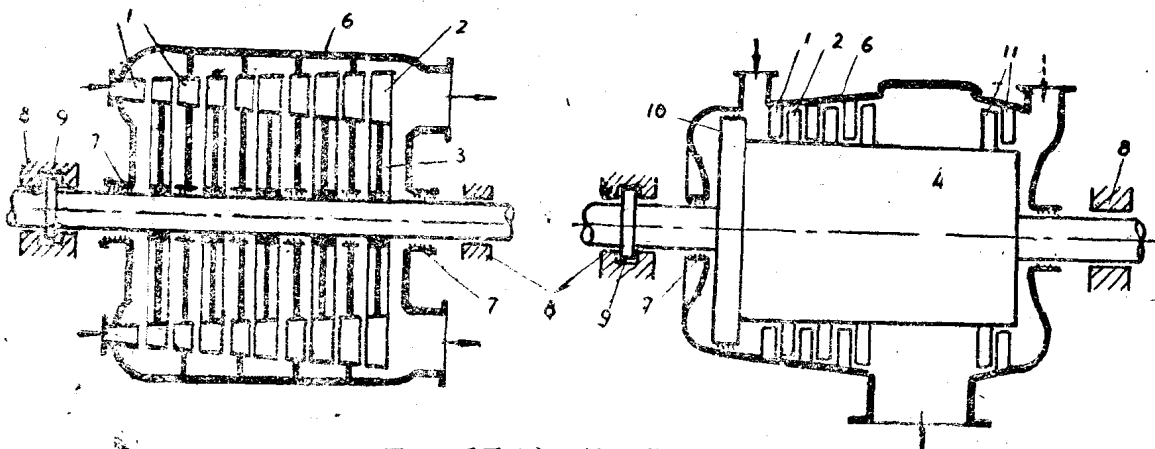


图4 透平的主要部分（軸流式）

A. 冲动式透平

B. 反动式透平

1. 导向器；2. 工作叶片；3. 轉輪；4. 轉鼓；5. 隔板；6. 汽（气）缸；7. 密封设备；

8. 支持轴承；9. 止推轴承；10. 平衡活塞；11. 倒车級

①冲动式透平的导向器普通称作喷嘴，反动式透平的导向器普通称作导向叶片。

1) 按工質流向可区分为:

(1) 軸流式——工質沿轉子軸向流动 (图 4);

(2) 輻流式^①——工質沿轉輪輻向流动 (图 5)。

2) 按工作原理可区分为:

(1) 冲動式——通常軸流冲動式透平的轉子做成轉輪型, 导向器裝在气缸及隔板中 (图 4, a)。

(2) 反动式——通常軸流反动式透平的轉子做成轉鼓型, 导向器裝在气缸或內套內 (图 4, B)。

輻流式透平无冲動式和反动式之区别。冲動式和反动式透平的工作原理将在下一章中闡述。

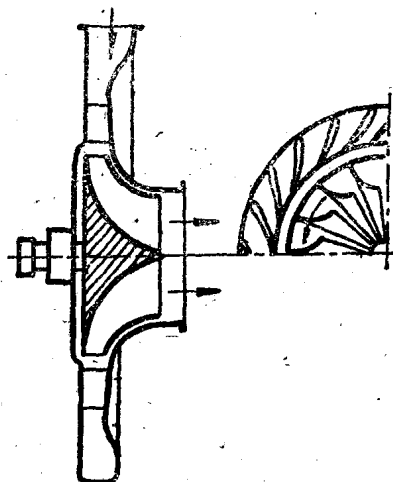


图 5 輻流式透平

§3 透平的工作原理

透平內工質所流过的部分叫做流程, 流程主要由每圈导向器和每圈工作叶片依次交替組成。一圈导向器和一圈工作叶片所形成的单元叫做透平級。工質的位能就在透平級中轉变为机械功。

工質在透平級中不象在活塞式发动机的气缸中那样, 直接依靠工質的位能推动活塞做功, 而是将位能轉变为动能, 依靠动能所产生的冲动力和反动力推动叶輪旋轉。

具有相当位能的工質流过导向器时, 压力和溫度不断下降, 而速度則相应的增大, 即位能不断轉变为动能。

假如当工質进入工作叶片后, 位能不再减小, 即压力和溫度保持不变, 則工質在工作叶片內的流动速度并不增加, 即位能不再轉变为动能。可是已經在导向器中获得相当动能的高速工質, 流经工作叶柵的曲线形槽道时, 却产生了离心慣性力, 推动叶輪旋轉 (图 6), 即作出了机械功。根据能量守恒定律, 工質在工作叶柵內的位能既然保持不变, 那么, 它要作出机械功, 势必丧失与所作机械功相当的动能, 因此, 实际上工質流出工作叶柵时的绝对速度, 与流入工作叶柵时的绝对速度相比, 显然已經降低了許多。这种仅仅依靠工質对叶輪的冲动力 (即离心慣性力) 做功的透平級叫做純冲動級。

假如当工質流入工作叶柵后, 位能繼續减小, 即压力和溫度繼續降低, 則工質在工作叶柵內的速度理應繼續增加, 即位能繼續轉变成动能。工質在其运动方向的速度大小之所以能够增加, 还必须克服它本身質量为維持等速的慣性力, 这个慣性力的方向恰好与工質流速的方向相反 (故称为反动力), 它与工質为維持定向运动的离心慣性力同时作用在工作叶片上, 迫使工作叶片繞轉子軸旋轉 (图 7)。这种既以冲动力 (即被迫改变流速方向而产生的慣性力)、又以反动力 (即被迫改变流速大小而产生的慣性力) 做功的透平級叫做反动級。

^①本書只介紹船舶上所采用的向心輻流式透平。

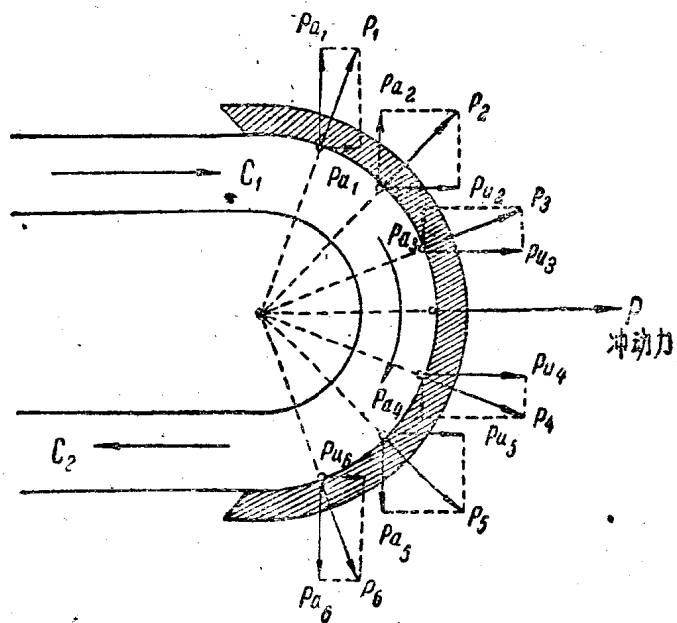
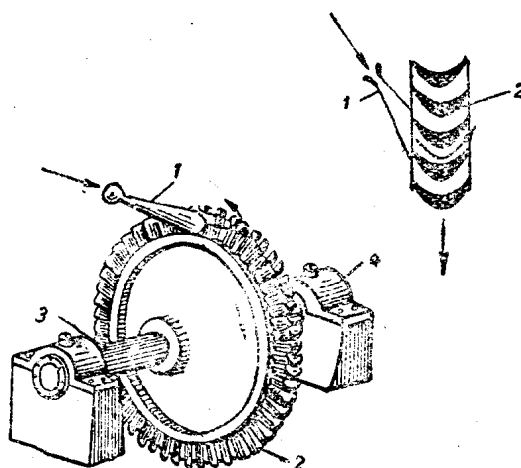


图 6 冲动式透平原理

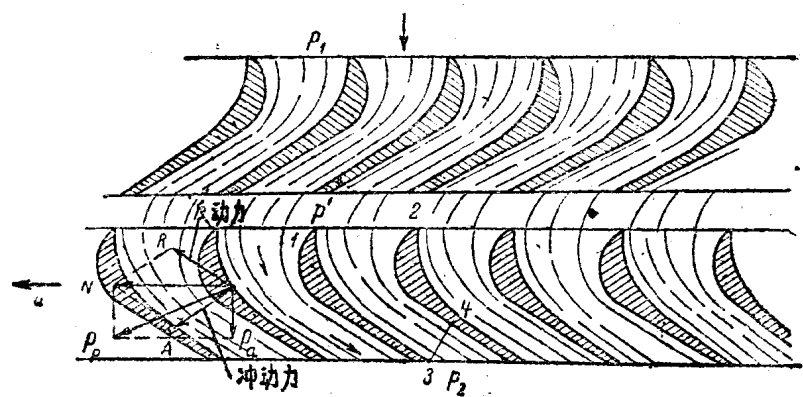


图 7 反动式透平原理

第二章 工質在透平級中的流动原理

§4 工質在导向器中的流动

导向器的首要任务是，使工質的热能变为动能。我們的目的則是研究这些能量和表达这些能量的参数（压力 P 、溫度 T 、比容 V 、速度 C 等）的变化規律以及这些参数与导向器的几何尺寸（通路面积 f 等）之間的关系。具体來說，我們打算解决两个主要問題：

1、確定工質在导向器內、特別是导向器出口处的流动速度。后面这个速度就是往后工質在工作叶片中以冲动力作功的因素。

2、確定导向器的通路截面积、特別是喉部截面（如果有的話）和出口截面的尺寸。只有当导向器的尺寸做得合理时，才有可能保証工質的位能有效的轉变为动能。

1) 工質的流动速度：

采用下列符号表示工質在导向器各部分所具有的能量和参数：

名 称	單 位	导向器入口截面	导向器內任意截面	导向器出口截面
压 力	公斤/米 ²	$p_1 = \frac{RT_1}{V_1}$	$p = \frac{RT}{V}$	$p_2 = \frac{RT_{2t}}{V_{2t}}$
溫 度	°K	T_1	T	T_{2t}
比 容	米 ³ /公斤	V_1	V	V_{2t}
速 度	米/秒	C_0	C	C_{1t}
热 焓	仟卡/公斤	$i_1 = C_{p1} T_1$	$i = C_p T$	$i_{2t} = C_{p2t} T_{2t}$
动 能	公斤米	$C_0^2/2g$	$C^2/2g$	$C_{1t}^2/2g$

并設工質在导向器內流动时沒有摩擦等損失以及与外界并无能量的交换。

根据能量守恒定律，工質在各个截面所具有的总能量應該相等，即：

$$i_1 + \frac{AC_0^2}{2g} = i + \frac{AC^2}{2g} = i_{2t} + \frac{AC_{1t}^2}{2g} = \text{常数}, \text{其中功的热当量 } A = \frac{1}{427} \text{ 仟卡/公斤米。}$$

由于工質流經导向器时压力、溫度不断下降，即焓 i 不断减小，故速度 C 則不断增加，流至出口时，

$$C_{1t} = \sqrt{\frac{2g}{A} (i_1 - i_{2t}) + C_0^2}, \text{ 米/秒} \quad (2-1)$$

如将 $i = \frac{k}{k-1} pV$ 代入，并考虑 $pV^k = \text{常数}$ ，則

$$C_{1t} = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] + C_0^2}, \text{ 米/秒} \quad (2-1')$$

工質初速 C 。一般較小，常可略去不計。公式(2-1)中的等熵焓差($i_1 - i_{2t}$)利用焓熵图来求极为簡便(图8、9)。

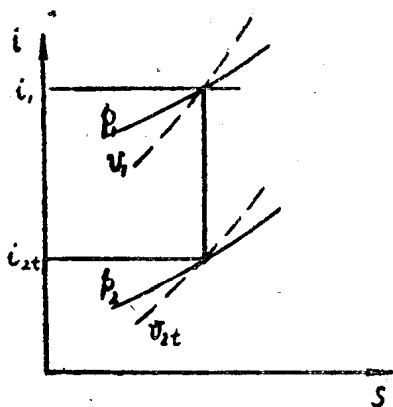


图8 水蒸汽的焓熵图

i ——焓，仟卡/公斤；
 V ——比容，米³/公斤；
 S ——熵，仟卡/公斤 $^{\circ}C$

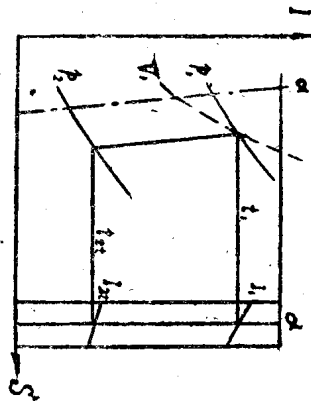


图9 混合气的焓熵图

I ——莫尔焓，仟卡/莫尔；
 S ——莫尔熵，仟卡/莫尔 $^{\circ}C$ ；
 V ——莫尔容积，米³/莫尔；
 α ——余气系数

混合气(燃烧产物)的絕热指数 k 值可查图10。各种工質的 k 的近似值为：

工 質	过 热 蒸 汽	饱 和 蒸 汽	湿 蒸 汽	空 气
k	1.3	1.135	$1.035 + 0.1X$	1.4

其中 X 为蒸汽的干度。

2) 导向器的通路截面：

根据質量守恒定律，流过导向器任意截面的流量

$$G = \frac{f C}{v} = \text{常数} \quad (2-2)$$

其中 f 为导向器的通路截面。将该截面上的速度

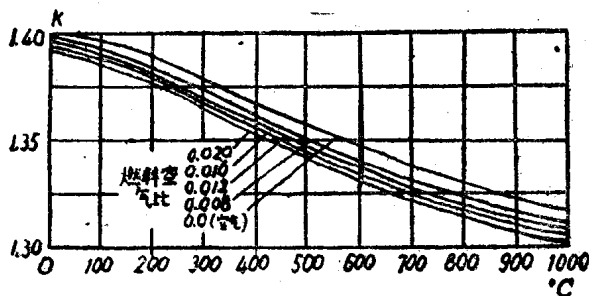


图10 混合气的絕热指数

$$C = \sqrt{2 g_{\frac{k}{k-1}} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2-3)$$

及比容

$$v = \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{k}} v_1$$

代入公式(2-2)：

$$G = f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2-4)$$

即 $G = f \cdot \Pi \left(\frac{p}{p_1} \right)$ 。

由此可見：

(1) 当工質在导向器中流动时，函数 $\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right)$ 随压比 $\frac{p}{p_1}$ 的不断下降而变化。为使流量 G 保持常数， f 必作相应的变化。

(2) 当 $\frac{p}{p_1} = 0$ (即 $p = 0$ 处) 和 $\frac{p}{p_1} = 1$ (即 $p = p_1$ 处，即入口处) 时，函数 $\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right) = 0$ 。为保持 $G = \text{常数}$ ， f 必趋向无穷大。根据函数 $\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right)$ 和 f 的連續关系，在 $\frac{p}{p_1} = 0$ 和 1 之間， f 必有一个最小值与 $\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right)$ 的一个最大值相对应 (图

11)。因此，为保证工質在初压为 p_1 ，背压为零这样大的压降范围内連續的膨胀和流动，导向器的通路截面必須先縮小，后扩大，其中还有一个过渡的最小截面 (又称喉部截面)。这种截面先縮小、后扩大的导向器就是通常的所謂縮放噴管 (扩张噴管) 或拉伐尔噴管。

(3) 如果工質只需从初压 p_1 膨胀到 $\geq p_k$ (設 $p_k = \beta_k p_1$) 的背压，那末，导向器就不需做出扩张的部分了。通常的漸縮噴管和导向叶片都属于这类导向器。

3) 工質的临界参数和临界速度：

縮放噴管的最小截面是工質特性发生变化的一个轉折点，即工質在最小截面前后的特性具有根本性的差别。因此，我們把最小截面上的参数定为临界参数。

(1) 最小截面上的压力即临界压力 p_k 是选用导向器型式的准繩。从图11可以見到，工質在导向器中膨胀終了背压：

$p_2 < p_k$ 时，导向器的截面应先收縮，后扩张；

$p_2 \geq p_k$ 时，导向器的截面只需收縮，不用扩张。

換句話說：如果希望工質从初压 p_1 膨胀到低于 p_k 的背压 p_2 ，則应采用縮放噴管；如果只需从 p_1 膨胀到 $\geq p_k$ 的背压 p_2' ，則应采用漸縮噴管或导向叶片。因此，要选择导向器的型式，应先確定 p_k 的数值。

既然已知 p_k 发生在最小截面 $f_{\text{最小}}$ 上，那么，为保持

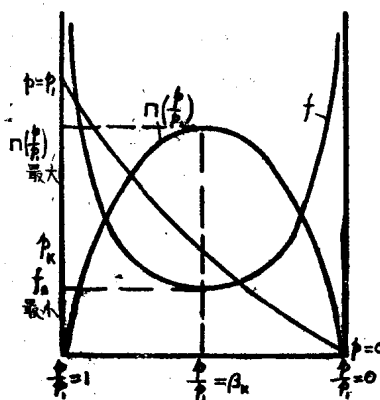


图11 导向器通路截面与工質压力的相依变化規律

$$G = f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \text{常数},$$

当 f 为最小时 (即 $f = f_{\text{最小}}$)，函数

$$\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right) = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

必为最大。这时的 p 显然就是临界压力 P_k 。满足函数 $\Pi \left(\frac{p}{p_1} \right)$ 为最大的条件是：

$$\frac{d}{dp} \Pi \left(\frac{p}{p_1} \right) = 0$$

即

$$\frac{2}{k} \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}-1} - \frac{k+1}{k} \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}-1} = 0$$

将 $P = P_k$ 代入并化简，得：

$$\frac{P_k}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \beta_k \quad (2-5)$$

由此可见，临界压力 P_k 只与初参数 (P_1) 和工质状态 (k) 有关。各种工质的临界压比 β_k 可根据 k 值计算出来：

工 质	二原子气体	过热蒸汽	饱和蒸汽	湿 蒸 汽
绝热指数 k	1.4	1.3	1.135	$1.035 + 0.1X$
临界压比 β_k	0.528	0.5457	0.5774	$\lambda(X)$

(2) 最小截面上的工质速度即临界速度 C_k 是一个具有特征性的速度。先确定它的大小，然后说明它的特征。

将最小截面的条件即公式 (2-5) 代入公式 (2-3) 即得临界速度：

$$C_k = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \frac{2}{k+1} \right]} = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} P_1 v_1} \quad (2-6)$$

$$\text{即} \quad C_k = k \sqrt{P_1 v_1} \quad (2-6')$$

所以，临界速度 C_k 也取决于工质的初参数和状态。

各种工质的状态系数 K 为：

工 质	二原子气体	过热蒸汽	饱和蒸汽
状态系数 k	3.38	3.33	3.23