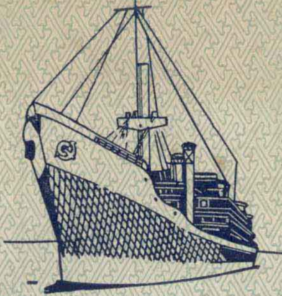
船舶动力系　　教学参攷丛书



船舶汽輪机

原理与热計祘

Л. И. 庫金 著

王希季
应凌翔 編譯

上海造船学院

1957 上海

船舶汽輪机

原理與熱計算

Л. И. 庫金 著
王希季
应凌翔 編譯

前　言

1954年12月——1955年6月苏联專家 Л.И. 庫金(Кутьин)在大連工學院造船系及交通大學造船系講學，并担任船舶蒸汽發动机教研室主任顧問期間，曾將其在列宁格勒高等海运學院为學生講授船用蒸汽透平課程时所用的講稿一份供給教研室使用。專家这一份講稿的基本內容是船用透平的理論及热計算，除此以外还包括一小部份强度計算的內容。講稿的特点是簡潔明了，并着重地介紹了 B.A. 謝密卡(Семека)的关于商船透平的热計算卡方法。船舶蒸汽發动机教研室認为庫金專家这一份講稿可以作为船舶蒸汽發动机及裝置專業和动力裝置專業的高年級學生的理論教學，課程設計及畢業設計的参考資料。

1956年9月蒸汽發动机教研室会議上决定將專家講稿中的主要部份——理論及热計算部份翻譯整理出來作为校內資料排印。并把这份資料称为“船用透平原理和热計算”。这本資料在編譯时基本上保留庫金專家講稿原有的風格与內容而不加改變；但是在过于簡略的地方和有些表格加以尽可能簡要的説明与补充，圖样也是重新繪制的。

在學生缺少参考資料，特别是中文的参考資料的情况下，相信印出这一本書是符合客观形势的要求的。

根据本書的特点一般説來它不適宜于直接当做教材或講議使用。本書的附圖是嚴震同志繪制的，特此誌謝。

編譯者

目　　錄

第一章　蒸汽透平工作过程的理論

1. 在透平中蒸汽的稳定工作过程

在透平中進行蒸汽热能轉變为透平机軸上的机械能的过程时具有这样的特点，就是蒸汽汽流不断地流过透平的流动部分（噴嘴或導汽葉片及工作葉片）。因此研究流动过程对于透平理論的研究有重要的意义。

流动过程是很复雜的过程。但是为了簡化起見，在研究实际問題时認为过程是穩定的。穩定流动的特点是在流道截面上的任一点的蒸汽狀态参數及其速度在整个的时間內保持不變。只有当蒸汽从流道的一个截面流到另一个截面时，蒸汽的参數及速度才会發生變化。

在实际上流动过程是不穩定的，汽流在流动部分中流动时經常遭受到各方面的擾动，一般用一个总的損失係數來計算由于汽流不穩定而引起的不良作用。

2. 在流道中的流动方程式

（一）連續方程式

在流动时 G（流量），v（比容），c（速度）及 f（垂直于速度 c 的截面面積）之間有一定的关係。

在 1—1 截面上流过元面積 df 的流量为

$$dG_1=\frac{df_1\cdot c_1}{v_1}\text{公斤/秒。}$$

流过截面 1—1 的总流量为

$$G_1=\int_F \frac{c_1}{v_1}df_1$$

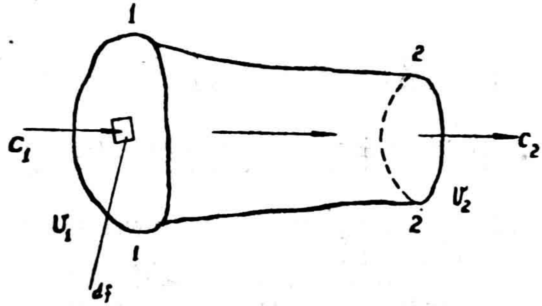


圖 1—1. 汽流的簡圖

以 $c_1{}^*$ 和 $v_1{}^*$ 表示蒸汽速度及比容的加权平均值，在 1—1 截面上是常數，則可得

$$G_1=\frac{c_1{}^*}{v_1{}^*}\int_{F_1}df=\frac{c_1{}^*}{v_1{}^*}\cdot F_1 \ ,$$

同样

$$G_2=\frac{c_2{}^*}{v_2{}^*}\int_{F_2}df=\frac{c_2{}^*}{v_2{}^*}F_2 \ 。$$

因为 $G_1=G_2=$常數，所以可得

$$F_1\frac{c_1{}^*}{v_1{}^*}=F_2\frac{c_2{}^*}{v_2{}^*}。$$

在实际情况下均用平均值計算，則可以去掉 * 符号得

$$F_1\frac{c_1}{v_1}=F_2\frac{c_2}{v_2} \ ,$$

或 $$F\frac{c}{v}=G=\text{常數}。$$

寫成对數方程式得

$$lnG+lnv=lnF+lnc$$

寫成微分方程式得

$$\frac{dv}{v}=\frac{dF}{F}+\frac{dc}{c},$$

或 $$\frac{dF}{F}=\frac{dv}{v}-\frac{dc}{c};$$

即 (流道面積的變化)=(比容的增量比)−(速度的增量比)。

假如在流动时这个条件没有满足，則將發生汽流滞緩或是汽流与流道壁分离的現象。

(二) 流動方程式

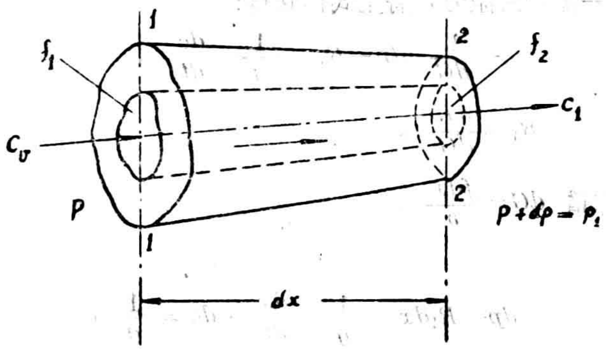


圖 1—2. 靜流道簡圖

利用(1)力的平衡条件或(2)能量守恒定理的条件來求流动方程式。

首先按力的平衡条件求流动方程式。

(1) 在噴嘴中(靜流道中)的流动方程式。

參看圖 1—2，f_1，c_v 及 p 为流道始端之面積，速度及压力，而 f_2，c_1 及 p_1 則为末端之参數。由于 dx 很小，則可以認为管道兩端的面積 $f_1\approx f_2=f$，即保持不變。而 p 值則按管道長度和因时間而變，$p=f(x,t)$。压力變化对于时間的全微分为:

$$\frac{dp}{dt}=\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{dx}{dt}。$$

对于穩定流动，$\frac{\partial p}{\partial t}=0$，則

$$\frac{dp}{dt}=\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{dx}{dt}$$

或 $$dp=\frac{\partial p}{\partial x}dx$$

取元容積中流体的質量为 dm，則 $dm=\dfrac{dG}{g}$。

作在速度方向上的力的平衡方程式

$$fp-f(p+dp)-dR=dm\,\frac{dc}{dt}=\frac{dG}{g}\,\frac{dc}{dt},$$

式中 dR——流动的阻力，將上式簡化得:

$$-\frac{1}{dG}fdp-R_1=\frac{1}{g}\,\frac{dc}{dt},$$

而 $$R_1=\frac{dR}{dG}。$$

我們知道 $dG=\dfrac{fdx}{v}$，

代入上式得

$$-vdp-R_1dx=\frac{1}{g}\,\frac{dx}{dt}\cdot dc=\frac{1}{g}\,cdc。$$

積分式为

$$\frac{1}{g}\int_{c_v}^{c_1}cdc=-\int_{p}^{p_1}vdp-\int_{x_1}^{x_2}R_1dx。$$

積分得

$$\frac{c_1^2-c_v^2}{2g}=\int_{p_1}^{p}vdq-\sum_{x_1\to x_2}R,$$

上式中，x_1 为流道起点之坐标，x_2 为終点之坐标，$\sum\limits_{x_1\to x_2}R$，为流道整个長度內摩擦力所作的功之总和。

在理想情况下，阻力为零，

則 $$\frac{c_v^2-c_v^2}{2g}=\int_{p_1}^{p}vdp,$$

式中，c_0 为理想情况下的流动速度。

如忽略 c_v（因为在有些情况下 $c_v \ll c$）則

$$\frac{c_0^2}{2g}=\int_{p_1}^{p} v\,dp。$$

（三）在工作葉片中的流動方程式

参看圖 1—3，W 为汽流的相对速度，r 为葉片的平均半徑，u 为葉片的輪周速度，在相对速度W方向上的力的平衡方程式为:

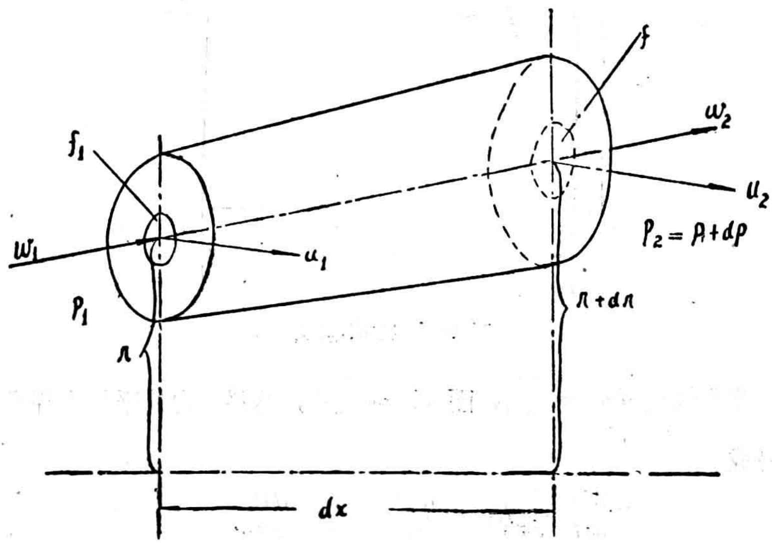


圖 1—3. 動流道簡圖

$$f_1 p_1 - f\,(p_1 + dp) - dR + dT = dm\frac{dW}{dt}$$

式中dR—— dx段上的阻力；

dT——在W方向上的汽流的慣性力。由圖 1—4 可以看出質量 dm的离心力为

$$d\tau = dm\omega^2\left(r + \frac{dr}{2}\right)。$$

这样 $dT=d\tau\cdot Sin\alpha=dm\cdot\omega^2\left(r+\frac{dr}{2}\right)\cdot Sin\alpha$，而 $Sin\alpha_1=\frac{dr}{dx}$。

將 $Sin\alpha_1$ 之值代入上式，并略去高次項得

$$dT=dm\cdot\omega^2\cdot r\ \frac{dr}{dx}\ 。$$

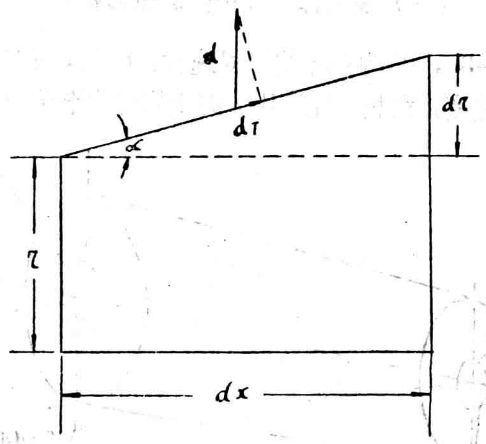


圖 1—4. 轉動慣性力

我們知道 $dm=\frac{dG}{g}$，而 $dG=\frac{fdx}{v}$，这样，力的平衡方程式可以寫成

$$-\frac{fdp}{dG}-R_1+\frac{dT}{dG}=\frac{1}{g}\ \frac{dW}{dt}\ 。$$

將 dT 之值代入得

$$-\frac{fdp}{dG}-R_1+\frac{1}{g}\omega^2 r\ \frac{dr}{dx}=\frac{1}{g}\ \frac{dW}{dt}\ ,$$

兩边各乘 dx，得

$$-\frac{fdx}{dG}dp-R_1dx+\frac{1}{g}\omega^2 rdr=\frac{1}{g}\ \frac{dx}{dt}dW\ 。$$

而 $\frac{fdx}{dG}=v$，$\omega^2 rdr=udu$，代入得

$$-vdp-R_1dx=\frac{1}{g}Wdw-\frac{1}{g}udu\ ,$$

$$-\int_{p_1}^{p_2}vdp-\int_{x_1}^{x_2}R_1\,dx=\frac{1}{g}\int_{W_2}^{W_1}Wdw$$

$$-\frac{1}{g}\int_{u_1}^{u_2}udu\ ,$$

積分得
$$\frac{W_2^2-W_1^2}{2g}-\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}=\int_{p_2}^{p_1}vdp-\sum_{x_1\to x_2}R\ ;$$

式中，$\sum_{x_1\to x_2}R$ ——为在 1—2 段內消耗于摩擦的总功。如忽略阻力不計，則 W_2 變为 W_{20}，

$$\frac{W_{20}^2-W_1^2}{2g}-\frac{u_2^2-u_2^1}{2g}=\int_{p_2}^{p_1}vdp\ 。$$

在軸向流动的透平中 W 方向上 u 是不變的，即 $u_1=u_2=u$，所以

$$\frac{W_{20}^2-W_1^2}{2g}=\int_{p_2}^{p_1}vdp\ 。$$

（四）由能量守恒定理求流動方程式

(1) 在靜流道的情况下：

已知
$$A\left[\frac{c_o^2}{2g}-\frac{c_v^2}{2g}\right]=i_0-i=h_{ad}\ 。$$

当 $c_v<<c_o$ 时，可得

$$A\frac{c_o^2}{2g}=h_{ad}\ 。$$

由热力學得知，$h_{ad}=-A\int_{p_1}^{p}vdp$，代入上式則得流动方程式

$$\frac{c_o^2}{2g}=-\int_{p_1}^{p} vdp\text{。}$$

(2) 在动流道的情况下:

圖 1—5 示出动流道中能量平衡的情况。在 1—2 段內，截面 1 上的參數为 W_1, i_1 及 p_1，截面 2 上的参數为 W_2, i_2 及 p_2；加入的热量爲 Q_{1-2}， 加入的 功为AL_{1-2}， ΣR_{1-2} 为 1—2 段內的阻力功。这样可得能量方程式如下:

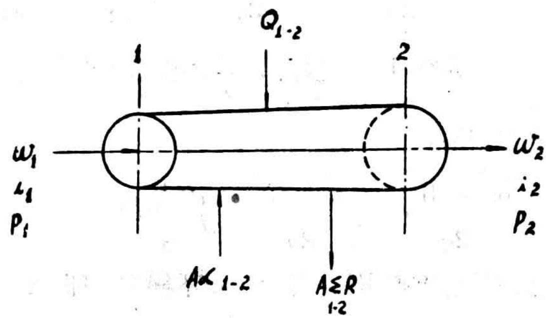


圖 1—5. 動流道內的能量平衡簡圖

$$i_1+A\frac{W_1^2}{2g}+Q_{1-2}+AL_{1-2}-A\,\Sigma R_{1-2}=i_2+A\frac{W_2^2}{2g}\text{。}$$

在透平中$Q_{1-2}=O$,而外力功L_{1-2}只有慣性力所作之功。如以dL_m表示在元長度 dx 段內慣性力所作之功，則可得

$$dL_m=dTdx\text{。}$$

已知 $dT=dm\omega^2r\dfrac{dr}{dx}$，則

$$dL_m=\frac{dG}{g}\,\omega^2rdr=\frac{dG}{g}\,udu\text{。}$$

对于 1 公斤蒸汽而言，

$$dL=dL_m/dG=\frac{1}{g}\,udu\text{。}$$

在 **1—2** 段内之慣性力功为

$$L_{1-2}=\int_{L_1}^{L_2} dL=\frac{1}{g}\int_{u_1}^{u_2} u du=\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}。$$

將 $Q_{1-2}=O$ 及 L_{1-2} 之值代入上面的能量方程式得

$$i_1+A\frac{W_1^2}{2g}+A\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}-A\sum_{1-2}R=i_2+A\frac{W_2^2}{2g}$$

加以整理之后得:

$$A\frac{W_2^2-W_1^2}{2g}-A\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}=i_1-i_2-A\sum_{1-2}R$$

这一个公式不論对于軸流式透平和徑流式透平都適用。

我們知道 $i_1-i_2=h_{as}$——工作葉片槽道中的熱差;

$$\frac{h_{as}}{h_a}=z \text{——透平級的反动度。}$$

因此可得

$$A\frac{W_2^2-W_1^2}{2g}-A\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}=h_{as}-A\sum_{1-2}R。$$

在軸向流动透平中$(u_2=u_1=u)$則

$$A\frac{W_2^2-W_1^2}{2g}=h_{as}-A\sum_{1-2}R。$$

如果沒有阻力$(W_2=W_{20})$則

$$A\frac{W_{20}^2-W_1^2}{2g}=h_{as}。$$

流出工作槽道的汽流的速度为

$$W_{20}^2=\frac{2g}{A}h_{as}+W_1^2;$$

或
$$W_{20}=91.5\sqrt{h_{as}+\frac{W_1^2}{91.5^2}},$$

$$W_{20}=91.5\sqrt{2h_a+\frac{W_1^2}{91.5^2}}\text{。}$$

如果在工作葉片中没有膨脹，則

$$W_{20}=W_1$$

3. 速度和流量的計算公式

研究噴嘴(靜流道)中的情況。分析汽体压力由 p_1 下降至 p 的情况。根据流动理論可得

$$\frac{c^2}{2g}=\int_p^{p_1}v\,dp\text{。}$$

在絕热过程下

$pv^K=$常數

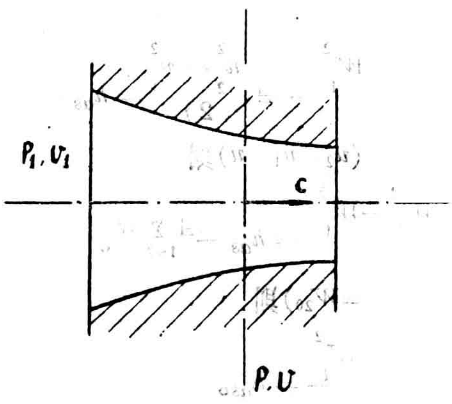


圖 1—6. 汽體在噴嘴中的流動

对于过热蒸汽 $k=1.3$;

对于乾飽和蒸汽 $k=1.135$;

对于濕蒸汽一般可以用下列公式求 k 值:

$$k=1.035+0.1x$$

式中，x 为蒸汽的乾度。

根据絕热方程式得

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

代入流动方程式得

$$\frac{c^2}{2g}=v_1p_1^{\frac{1}{k}}\int_p^{p_1}p^{-\frac{1}{k}}dp=v_1p_1^{\frac{1}{k}}\Big/p^{\frac{k-1}{k}}\Big/_p^{p_1}\frac{k}{k-1}$$

$$=\frac{k}{k-1}v_1p_1^{\frac{1}{k}}\left[p_1^{\frac{k-1}{k}}-p^{\frac{k-1}{k}}\right]$$

$$=\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right],$$

所以 $$c=\sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}。$$

流量可以由連續方程式求出：

$$Gv=Fc$$

$$G=\frac{F\cdot c}{v}。$$

由絕热方程得 $v=v_1\left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{1}{k}}$，將 c 值及值 v 值代入連續方程式得

$$G=F\cdot\frac{1}{v_1}\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}\sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1-\frac{p}{p_1}^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

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

使压比 $\frac{p}{p_1}$ y，令 $Z=y^{\frac{2}{k}}-y^{\frac{k+1}{k}}$ 。可以看出当 $y=0$ 时，

$Z=0$，$G=0$；当 $y=1$ 时，$Z=0$，$G=0$，因此在 $y=0$ 及 $y=1$ 之間必有一 y 值使 Z 值为最大，因而 G 也为最大。求 $Zmax$ 时之值。使

$$\frac{dZ}{dy}=\frac{2}{k}y^{\frac{2-k}{k}}-\frac{k+1}{k}y^{\frac{1}{k}}=0$$

則得 $$2y^{\frac{2-k}{k}}=(k+1)\,y^{\frac{1}{k}},$$

移項得

$$y^{\left(\frac{2-k}{k}-\frac{1}{k}\right)}=\frac{k+1}{2},$$

化簡之后得

$$y^{\frac{1-k}{k}}=\frac{k+1}{2},$$

$$y=\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{1-k}}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}。$$

在这个压力比下其流量最大，因而它称为臨界压力比以 y_{kp} 表示之。相应于这个压力比的 $Zmax$ 值为

$$Zmax=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}\cdot\frac{2}{k}}-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}\cdot\frac{k+1}{k}}$$

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

將 $Zmax$ 代入流量方程式可得最大流量

$$Gmax=F\cdot\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\cdot\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\right]},$$

$$Gmax=F\cdot\sqrt{2g\frac{p_1}{v_1}}\cdot\sqrt{\frac{k}{k-1}}\cdot\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{1-\left(\frac{2}{k+1}\right)}$$

$$=F\cdot\sqrt{2g\frac{p_1}{v_1}}\cdot\sqrt{\frac{k}{k-1}}\cdot\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}$$