

哈 尔 滨 工 业 大 学 讲 义

汽 輪 机 主 要 零 件 的 强 度 計 算

Н. Д. 格 里 亞 茲 諾 夫 編 著

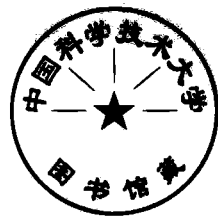
1958

汽輪機主要零件的 強度計算

H. A. 格里亞茲諾夫

焦德勇譯

林俊榮校



1958

哈爾濱工業大學
俄國機械工程
機械工程
機械工程
機械工程

編者：尼·德·格里亞茲諾夫
譯者：焦 德 勇
校者：林 俊 燦
出版者：哈爾濱工業大學
印刷者：哈爾濱工業大學印刷廠

印數 1—800 冊 工本費 1.20 元
1958 年 3 月

前 言

本讲义系根据苏联专家、科学技术副博士尼·德·格里亞茲諾夫副教授为我校汽轮机专业研究生及本科学生讲授“汽轮机主要零件的强度计算”课程时的讲稿译出。鉴于目前国内尚缺乏这方面的中文教本，经尼·德·格里亞茲諾夫副教授的同意，将其译成中文，以供本校和兄弟学校涡轮机专业以及其他有关专业教学参考之用。

值此讲稿出版之际，我们谨向尼·德·格里亞茲諾夫副教授表示衷心的感谢。

本讲义由焦德勇同志翻译，由林俊祭同志校对。由于译者和校对者的专业知识及俄文水平有限，译文中错误和不妥之处在所难免，希望读者指正。

哈尔滨工业大学动力机械系
汽轮机教研室
1957年10月

緒 論

本講義是以比較簡短的篇幅來討論汽輪機主要零件的強度計算問題。

對葉片和葉輪的振動問題的分析作了一些壓縮，因為許多理論性問題將在“振動原理”課程內進行專門而詳盡的分析。

此外，許多公式的推導都是根據“材料力學”中的眾所周知的原理，因而在本講義中不再作詳細的分析。由於汽輪機的大多數葉輪是在相當低的溫度下工作，所以在計算葉輪時沒有考慮溫度變形。同時，在計算主軸時也沒有把葉輪的回轉力矩考慮在內，因為在汽輪機的一般結構內，這一問題沒有什麼重要的意義。因此，為燃氣輪機專業的学生講授這門課程時，就必須根據對燃氣輪機的個別零件所提出的要求，按另外一些方法來分析這些問題。

為了減少篇幅起見，在本講義中對於汽輪機零件的結構沒有加以敘述。

編 者 1957 年

目 录

緒 論

第一章 汽輪机叶片的强度計算

§ 1—1	汽輪机的叶片	1
§ 1—2	軸流式汽輪机叶片的受拉計算	3
§ 1—3	變截面叶片及其强度計算	6
§ 1—4	汽流作用在叶片上的力	11
§ 1—5	叶片截面積、重心及断面系数的確定	19
§ 1—6	帶有圍帶的叶片的抗弯計算	21
§ 1—7	圍帶的計算	26
§ 1—8	叶根及輪緣的計算	28
§ 1—9	塑性變形	30
§ 1—10	叶片的振动	33
§ 1—11	叶片組的振动	42
§ 1—12	叶片振动时的应力	46
§ 1—13	叶片材料	50

第二章 汽輪机的叶輪

§ 2—1	汽輪机叶輪的結構特点	52
§ 2—2	計算叶輪的一般微分方程式	53
§ 2—3	双曲線叶輪的一般微分方程式的解	58
§ 2—4	等厚度叶輪內的应力的確定	61
§ 2—5	叶輪厚度突變处的应力變化	67
§ 2—6	兩次計算法	70
§ 2—7	任意形狀叶輪的計算	73
§ 2—8	松脫轉數	79

§ 2—9	叶輪的振動.....	87
§ 2—10	叶輪材料及其許用應力的選擇.....	93

第三章 汽輪機的主軸

§ 3—1	轉子的類型及其尺寸的選擇.....	96
§ 3—2	主軸臨界轉數的概念.....	98
§ 3—3	等截面軸的臨界轉數.....	103
§ 3—4	計算汽輪機主軸的能量法.....	107
§ 3—5	確定臨界轉數的圖解解析法.....	109
§ 3—6	汽輪機主軸直徑的近似確定.....	114

第一章 汽輪機葉片的強度計算

§ 1-1 汽輪機的葉片

汽輪機的功率變化範圍很大，工質（蒸汽）的初參數和終參數的變化範圍也很大。當蒸汽容積很大時，即當蒸汽容積流量很大時，則隨着汽輪機功率的增加，葉片和葉輪都會達到很大的尺寸。例如，在列寧格勒金屬工廠出品的汽輪機中，最末級的 $\frac{d_n}{l_n} = 3.0$, $l_n = 665$ 公厘。

最末級的出口面積是由轉數和最末級葉片材料的許用應力決定的。

現在來研究一徑向放置的葉片（圖 1）。作用

在葉片上的離心力為：

$$C = f l \rho \omega^2 r_{ц.т.}$$

由於此力而在半徑 r_1 處產生的拉應力為：

$$\sigma_{раст} = \frac{C}{f} = l \rho \omega^2 r_{ц.т.}$$

若葉片為變截面的，則在半徑 r_1 處的應力可用下式表示之：

$$\sigma_{раст} = K l \rho \omega^2 r_{ц.т.}$$

式中 $K < 1$ 。（ K 為拉應力縮減係數，以後詳述——校者）

因
$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

故
$$\sigma_{раст} = K l \rho r_{ц.т.} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \cdot \frac{d_{cp}}{d_{cp}}$$

由此得
$$l \cdot d_{cp} = \frac{\sigma_{раст} \cdot 30^2}{K \rho (\pi n)^2 \cdot \left(\frac{r_{ц.т.}}{d_{cp}} \right)}$$

當
$$r_{ц.т.} = \frac{1}{2} d_{cp} \text{ 時}$$

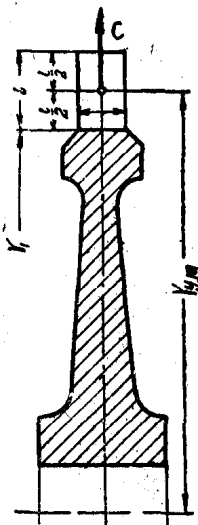


圖 1

或
$$l \cdot d_{cp} = \frac{G_1 v_n}{\pi c_2 \sin \alpha_2} = \frac{\sigma_{\text{пакт}}}{\rho n^2 K} \cdot \frac{2 \cdot 30^2}{\pi^2}$$

由上式可知，叶片的尺寸（出口面積）与强度問題有关，所以有一極限值。

按結構特征來說，叶片是多种多样的。工藝問題在選擇叶片結構上具有極其重大的意义。

叶片有等截面叶片和變截面叶片。根据叶片的工藝加工原則，叶片又可分为軋制成的、銑成的和模鍛成的。此外，叶片也可按叶片根部的結構來区分。

a) 光軋叶片最为經濟，金属消耗也最小。利用光軋方法軋制成一固定型線的長条，其余的工作就是加工叶根和圍帶下的凹槽。

中間塊也可用光軋方法制造。如圖 2 所示的叶片就是常用的帶有 T 形叶根的光軋叶片。

采用中間塊式的等截面叶片也有是銑成的。該类型叶片一般是用于

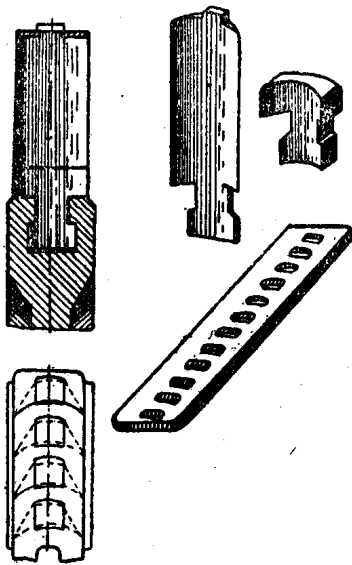


圖 2

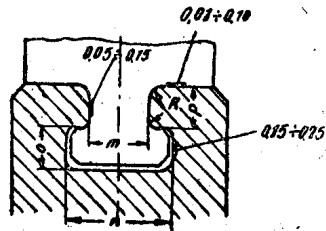


圖 3

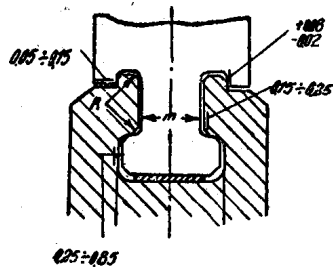


圖 4

受力小的短叶片中。对于长叶片，由于这种类型叶片的根部较弱都不采用。

叶片在叶轮上的固定如图 3 所示。

受力大的等截面叶片都是和中间块做成一体。为了减小叶轮槽两侧所受的弯矩，叶槽两侧及叶根经常做成如图 4 所示的形状。

上面分析的叶根结构和类似这种结构的叶根有这样的缺点，就是不能简便地调换个别的叶片，而需要拆下和重装许多叶片。

除此之外，在该类型叶根结构中，由于离心力而在叶槽两侧产生弯矩（见图 5）：

$$M_{\text{根}} = \frac{C}{2} \cdot a \cdot$$

对于受力大的叶片则采用叉尾形叶根结构。视叶片受力的大小，可以增加叶根承受剪切面的数目，这样就得到了多叉尾形的叶根结构。

对于上述的叶根结构，在叶轮顶部不会由于离心力引起弯矩，同时也可以简便地调换个别的叶片。

前面已经讲过，变截面叶片照例是应用于 $\frac{d}{l}$ 比值小的长叶片。截面的变化（叶片截面由根部至顶部逐渐减小——译者）有可能使叶片内的应力减小。

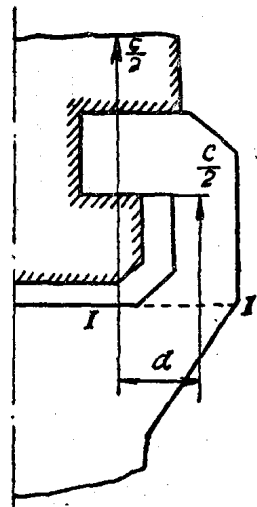


图 5

§ 1—2 轴流式汽轮机叶片的受拉计算

下面求由于等截面叶片 ($f = \text{常数}$) 本身重量而产生的离心力。

在任意半径 r 处截取一微元段 dr (图 6)，由此微元段产生的离心力 dc 等于

$$dc = f \cdot dr \cdot \rho \cdot \omega^2 r \quad [\text{公斤}]$$

这时，作用在任意截面 I—I 处的离心力为

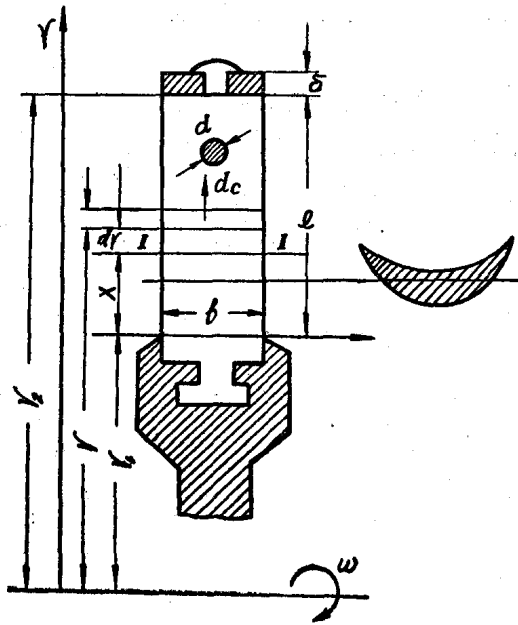


圖 6

$$C_{nr} = \int_{r_1}^{r_2} f dr \rho \omega^2 r = \frac{f \omega^2 \rho}{2} (r_2^2 - r_1^2) \quad \text{【公斤】}$$

离心力沿叶片高度的变化如图 7 所示。

由图可以看出，当 $x=0$ 时，离心力为最大，即在叶根处的离心力为最大。

若以 $r=r_1$ 代入上式，则得到作用在叶片上的整个离心力为

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{f \omega^2 \rho}{2} (r_2^2 - r_1^2) = \frac{f \omega^2 \rho}{2} \cdot l \cdot (r_2 + r_1) \\ &= \frac{f \omega^2 \rho}{2} \cdot l \cdot 2 \cdot \left(r_1 + \frac{l}{2} \right) = f \rho \omega^2 l \cdot r_{cp} \end{aligned}$$

以 $\xi_n = \frac{d_{cp}}{l}$ 代入，则

$$C_n = \frac{2f\rho u_{cp}^2}{\xi_n}$$

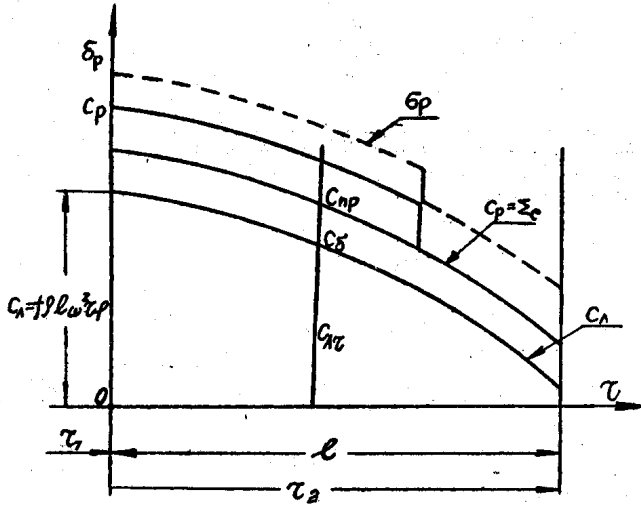


圖 7

除叶片本身的离心力外，还有圍帶及拉金產生的离心力。若只討論一節距長度的圍帶和拉金时，則作用在一个叶片上由圍帶和拉金產生的离心力可用下式確定：

$$C_\delta = \frac{2\pi r_2}{z} \cdot b \cdot \delta \cdot \rho \omega^2 \cdot \left(r_2 + \frac{\delta}{2}\right) \quad \text{[公斤]}$$

及
$$C_{np} = \frac{2\pi r_{np}}{z} \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \rho \omega^2 r_{np} \quad \text{[公斤]}$$

由圖可見，离心力的合力随半徑 r （即座標 x ）而變化，因为

$$C_p = C_n + C_\delta + C_{np} = f(x)$$

則拉应力为

$$\sigma_p = \frac{C_p}{f}$$

若 $f = \text{常数}$ ，即把它看作變截面叶片的特例，則得到最大应力產生在叶片根部且等于：

$$(\sigma_p)_{\max} = \frac{(C_p)_{\max}}{f}$$

或

$$(\sigma_p)_{\max} = 2\rho \frac{u_{cp}^2}{\xi_n} + \frac{C_\delta}{f} + \frac{C_{np}}{f}$$

圖7中虛線所示即為拉應力 σ_p 隨 x 變化的曲線。式中 C_δ 及 C_{np} 往往甚小，可以忽略，則得到

$$(\sigma_p)_{\max} = 2\rho \frac{u_{cp}^2}{\xi_n}$$

以上得到的關係式表明，在該特殊條件下（即 $f = \text{常數}$ ），拉應力與葉片的截面面積無關。也就是說，在一定的 $\frac{D_{cp}}{l}$ 比值和平均圓周速度 u_{cp} 的條件下，若最大拉應力 $(\sigma_p)_{\max}$ 超過許用應力 $\sigma_{\text{доп}}$ ，則改變葉片截面面積不能減低拉應力。

在其他條件不變的情況下，減小拉應力的唯一方法就是採用變截面葉片。

§ 1—3 變截面葉片及其強度計算

變截面葉片的截面面積在不同的截面處不等，它是變數 x 的函數。

和等截面葉片的計算相似，某一微元段葉片的離心力等於（圖8）

$$dC = f dx \rho \omega^2 (r_1 + x)$$

在半徑 r 處的離心力等於

$$C_r = \int_r^{r_2} f dx \rho \omega^2 (r_1 + x) = \rho \omega^2 \int_r^{r_2} f r dr$$

為了積分此式，需要知道

$$f = f(x)$$

在許多情況下，這一關係式是可以找到的。例如 f 和 x 之間存在下列關係：

$$f = f_1 - a x^m$$

若任意二截面的面積 f 为已知，則系数 a 和指数 m 即可求出。例如，若在半徑为 $r'(x_1)$ 和 $r''(x_2)$ 处的面積分別等于 f' 和 f'' 时，則

$$f' = f_1 - a x_1^m$$

及 $f'' = f_1 - a x_2^m$

由此
$$\frac{f' - f_1}{f'' - f_1} = \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^m$$

或
$$m = \frac{\lg \frac{f' - f_1}{f'' - f_1}}{\lg \frac{x_1}{x_2}}$$

以上假設指数 m 沿叶片長度不變。

系数 a 也是容易求得的。例如，已知 $x=0$ 时， $f=f_1$ 及 $x=l$ 时

$f=f_2$ ，則
$$a = \frac{f_1 - f_2}{l^m}$$

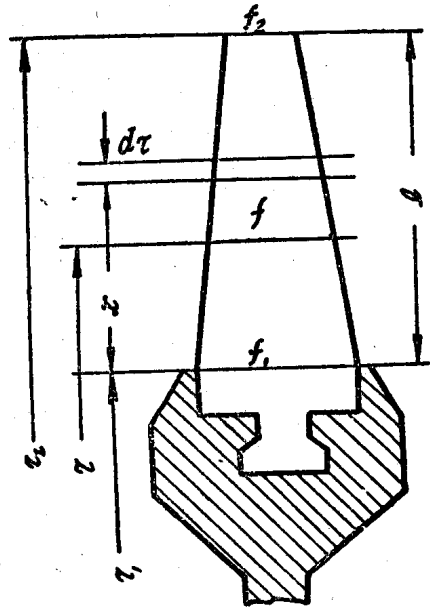


圖 8

將系数 a 代入，即可將前面的公式改寫为：

$$f = f_1 - \frac{f_1 - f_2}{l^m} \cdot x^m = f_1 - (f_1 - f_2) \left(\frac{x}{l}\right)^m$$

或
$$f = f_1 \left[1 - \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \left(\frac{x}{l}\right)^m \right]$$

若以 μ_x 和 μ 分別表示 $\frac{f}{f_1}$ 及 $\frac{f_2}{f_1}$ ，則

$$\mu_x = \frac{f}{f_1} = 1 - (1 - \mu) \theta^m$$

式中 θ 为相对座标，其值由 0 到 1。最后得到：

$$\mu_x = 1 - (1 - \mu) \theta^m$$

对于不同的 m 值，上式所代表的曲线如图 9 所示。

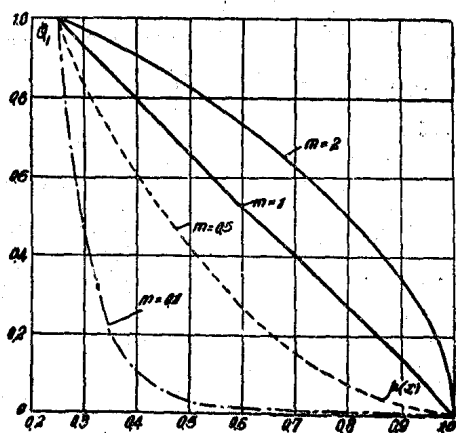


圖 9

当指数 m 的值较小时，叶片的截面积在离根部不远的高度内急剧减小，而在其余的高度内变化则很小。

指数 m 的值是根据沿叶片高度的应力分布来选择的。

确定或选取叶片截面面积 f 的变化规律之后，即可求出每一截面上离心力：

$$C_{nr} = \rho \omega^2 \int_r^{r_2} f r dr = \rho \omega^2 \int_r^{r_2} (f_1 - a x^m) r dr$$

或

$$\begin{aligned} C_{nr} &= \rho \omega^2 \int_x^l (f_1 - a x^m)(r_1 + x) dx = \\ &= \rho \omega^2 \left[f_1 r_1 x - r_1 a \frac{x^{m+1}}{m+1} + f_1 \frac{x^2}{2} - a \frac{x^{m+2}}{m+2} \right]_x^l = \\ &= \rho \omega^2 \left[f_1 r_1 (l - x) - \frac{a r_1}{m+1} (l^{m+1} - x^{m+1}) + \frac{f_1}{2} (l^2 - x^2) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{a}{m+2} (l^{m+2} - x^{m+2}) \right] \end{aligned}$$

在根部当 $x=0$, 离心力为最大

$$C_{\pi r_1} = \rho \omega^2 \left[f_1 r_1 l - \frac{a r_1}{m+1} l^{m+1} + \frac{f_1}{2} l^2 - \frac{a}{m+2} l^{m+2} \right]$$

离心力沿叶片高度而變化, 且由根部至頂端逐漸減小。若叶片截面積不變, 則立即得出, 最大应力產生于根部。但因叶片截面積也是逐漸改變的, 所以沿叶片高度的应力變化可能有各种不同的規律, 这完全由离心力和截面積的變化來確定。

在任一截面上的应力为

$$\sigma_x = \frac{C_{\pi r}}{f} = \frac{\rho \omega^2 \left[f_1 r_1 (l-x) - \frac{a r_1}{m+1} (l^{m+1} - x^{m+1}) + \dots \right]}{f_1 - a x^m}$$

若以无因次量, 即以相对量表示上式时, 則得:

$$\sigma_x = \frac{\rho \omega^2 l \left[r_1 (1-\theta) - \frac{r_1}{m+1} (1-\mu)(1-\theta^{m+1}) + \frac{1}{2} (l-x\theta) - \frac{(1-\mu)l}{m+2} (1-\theta^{m+2}) \right]}{[1-(1-\mu)\theta^m]}$$

或

$$\sigma_x = \frac{\rho \omega^2 l^2 \left[\theta_1 (1-\theta) - \frac{\theta_1}{m+1} (1-\mu)(1-\theta^{m+1}) + \frac{(1-\theta^2)}{2} - \frac{1-\mu}{m+2} (1-\theta^{m+2}) \right]}{1-(1-\mu)\theta^m}$$

因 $\rho \omega^2 l^2 = \rho \omega^2 \frac{l^2 r_{cp}}{r_{cp}} = \sigma_k \frac{1}{\theta_{cp}}$, (此处 σ_k 为等截面叶片根部的应力), 則得到

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_k} = \frac{1}{1-(1-\mu)\theta^m} \left[\frac{\theta_1}{\theta_{cp}} (1-\theta) - \frac{\theta_1 (1-\mu)}{\theta_{cp}(m+1)} (1-\theta^{m+1}) + \frac{(1-\theta^2)}{2 \theta_{cp}} - \frac{(1-\mu)}{(m+2) \theta_{cp}} (1-\theta^{m+2}) \right]$$

令 θ_{cp} 、 μ 和 θ_1 为定值，取不同的 m 值，作出 $\frac{\sigma_x}{\sigma_k}$ 随 θ 而變化的曲線（圖 10）。

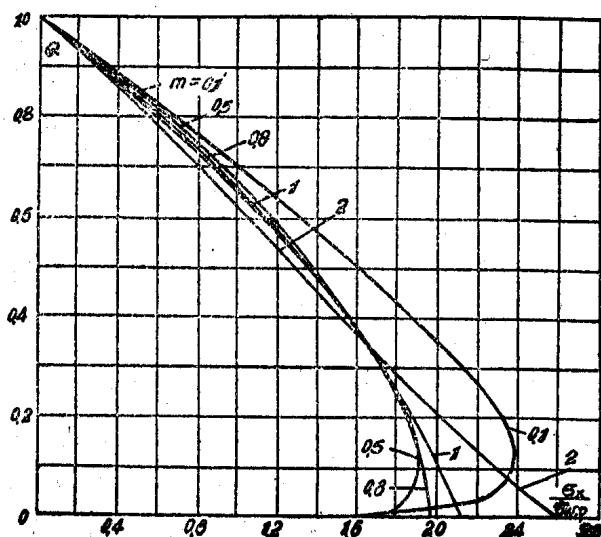


圖 10

由圖 10 曲線可以看出，根部截面的應力隨着指數 m 的減小而急劇減小。此外，也可看出，當指數 m 大約小於 0.8 時，最大應力不是在根部截面而是在大於半徑 r_1 的某一半徑 r 處。所以，應盡量選取 $m \geq 0.8$ ，因為在這種情形下最大應力在根部截面，而且由於其他截面上的應力小於根部截面的應力，故只需要計算根部截面上的應力。

在文獻中都指出， μ_{MHH} 大約可以取為 0.2。

若 $\mu \geq 0.5$ ，對於銹成的葉片，則可採用葉片截面積按直線關係變化的規律，即取 $m=1$ 。

若以 σ_p' 表示變截面葉片中的拉應力和以 σ_p 表示等截面葉片中的拉應力時，則拉應力縮減係數 $K = \frac{\sigma_p'}{\sigma_p}$ 為 m 、 μ 及 $\frac{D}{l}$ 之函數。對於上面所採用的葉片截面積的變化規律，係數 K 與 m 、 μ 及 $\frac{D}{l}$ 之間的