高等学校教学用書

船舶強度

亚·亚·庫尔久莫夫著

高等教育出版社

高等学校教学用书

船舶強度

亚·亚·庫尔久莫夫著
張孝鏞 李学道 史联芳
郭可評 陈鉄云 合譯

高等教育出版社

本书系根据苏联国立造船工业出版社（Государственное союзное издательство судостроительной промышленности）出版、亚·亚·庫尔久莫夫（А. А. Курдюмов）著“船舶强度”（Прочность корабля）一书1956年版譯出。原书經苏联高等教育部多科性工学院与机器制造高等学校主管司审定为船舶制造高等学校教学参考书。

原书系根据苏联高等教育部批准的造船专业“船舶結构力学”教学大綱編写，专門論述海船强度的基本問題，并特别注意了計算方案的分析和选擇。

本书与我社已出版的“杆件与杆系之弯曲及稳定性”、“板与圓筒形壳的弯曲及稳定性”和“船舶振动”三书都是高等学校造船专业“船舶結构力学”課程的教材，不仅供教学上使用，并可供造船工程师在进行船舶結构的强度計算时利用。

本书緒論及第五、六章由張孝鏽譯，第一章由李学道譯，第二、三章由陈鉄云譯，第四章由陈鉄云和史联芳合譯，第七、八章由郭可评譯，第九、十章由史联芳譯，最后由桑国光、李学道总校。

船 舶 强 度

亚·亚·庫尔久莫夫著

張孝鏽　李学道　史联芳　郭可评　陈鉄云　合譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

（北京市书刊出版业营业許可証出字第054号）

京华印书局印装　、新华书店发行

統一书号 15010·866　开本 850×1168　1/32 印張 12 7/16

字数 319,000　印数 0001—1,200　定价（7）¥1.40

1960年2月第1版　1960年2月北京第1次印刷

序

本书是根据苏联高等教育部批准的船舶制造高等学校“船舶結构力学”教学大綱而編写的。

作者認为在教程中充滿各种不同計算方案的詳細分析是不适宜的，这些計算方案可以在手册性的参考书籍中找到，所以作者力求闡述所討論到的各种問題的本质。当然，所列举的这些問題不能認为是詳尽无遺的。經驗証明，最严重的差錯并不是計算上誤差的結果，而是由于选擇了不符合結构物实际工作情况的不正确計算方案所致。因此，在本书中特别注意計算方案的分析和选擇。

同时，作者認为教学参考书的內容应該与学生时間的安排相适应，因此力求对所提到的各种問題作尽可能簡要的叙述。

作者将接受关于本书的一切意見，并致謝忱。

目 录

緒　論

所有的工程建筑物，包括船舶在内，都应該具有足够的强度和剛度，也就是有能力抵抗在營运过程中可能受到的各种外力，而不致破坏完整性及产生較大的变形。

保証强度条件（不破坏性条件）是主要的；至于剛度，則在大多数实际情况下，如果强度条件能滿足，剛度总是足够的。只有在个别的特殊情况下，已保証有足够强度的建筑物；由于必要剛度的要求而須再增大其尺度。

因此，我們以后将討論足够强度的条件，而对于必要剛度的条件，則仅在結构物的工作情况引起这一問題时才来討論。

足够强度的条件（建筑物的不破坏性条件）是：

$$\max S^{\text{實际}}_{\text{實际}} \leqslant \min S^{\text{极限}}_{\text{結构材料}}, \tag{1}$$

即在使用过程中的实际荷重下（符号的上角），建筑物中的最大实际内力（符号的下角）不超过相应于結构材料最小可能极限强度的最小可能内力。

建筑物的强度是按作用在建筑物中的各种应力数值来衡量的，为了确定这些应力，需要知道当使用建筑物时作用在其上的各种外力，并需要能根据作用力借助于計算求出应力。这些应力应該与結构材料的危險应力相比較，然后才可能判断建筑物的强度是否获得保証。

在造船工程中估計船体强度的现有方法是以預先規定某一計算荷重作为基础的。根据这一荷重用計算方法求出应力，并把它与許用应力相比較，許用应力則等于以所謂安全系数除危險应力所得的商（按“名义”安全系数計算）。如果外力与应力之間并不存在綫性比例关系，則将計算荷重乘以安全系数（即得危險荷重），然后将（按危險荷重求得

的)应力与危險应力相比較(按"实际"安全系数計算)。

根据这种計算方法,在船舶結构力学中就分成外力問題、内力問題和强度校核問題。

現时发展最快的部分是內力問題,卽按給定力求应力的各种問題。这是因为,內力問題(彈性理論、梁、剛架、板架、板、壳等等的計算)是以不多的一些为試驗所証实的基本原理作为基础的,而新結果的获得又主要与利用数学工具有关。同时必須指出,所有已得到的解都是对于理想化的結构图式而言的,这种結构仅具有眞实結构的一些主要特性,而自然不能把它的特性的多样化全部反映出来。

船舶强度教程的任务是研究营运过程中作用在船体及其各个部分上的各种外力,确定是否可能利用現有的計算方案对眞实結构进行計算以及討論有关选擇危險应力和許用应力的問題,卽有关选擇安全系数的問題。

安全系数的选擇对整个强度計算的可靠性具有决定性的意义,因为不破坏性的条件能否实現就决定于安全系数。

应該指出,安全系数本身作为危險应力与許用应力之比或危險荷重与計算荷重之比,并不能明确地判断結构强度是否得到保証,卽有无可能实現不破坏性条件(1)。

事实上,如果在营运条件不变的情况下对任何建筑物增加計算荷重,則为了保持其强度不变,就应該相应地也提高許用应力,卽减小安全系数。因此,仅仅按照这个安全系数来判断强度,也如同認为在計算中安全系数取得較小就是所用計算方法的完善性的指标一样,都是不可以的。

当进行强度計算时,如上所述,我們先选擇某一計算荷重,假定其构成与破坏荷重的构成相同,而后根据这一荷重用計算方法确定結构中的內力。后一計算通常带有假定性質,因为所采用的計算公式是对結构的理想化图式而导得的,而且只考慮了它的一些主要特性,这就不

可避免地将导致某些誤差。

应該指出，在船舶結构力学的书籍中普遍应用的名詞“假定性計算”，不能訊为是适当的，因为有时候会将計算的假定性理解成不可能正确估計强度的意思。事实上，这里所指的是近似的計算，即仅反映現象的最主要方面，同时随着計算方法的改进，計算的正确性总是不断地在提高的；下面将特别注意在用計算确定內力时实际上需要怎样的精确度。

直到現在，关于如何选擇安全系数的問題还解决得非常粗糙，它的大小是以某些研究人員对建筑物已有的营运实际情况的主观分析为基础来选定的。

以运用数学統計方法为基础的、分析这种实际情况和选取安全系数的客观方法，在結构力学的許多著作中得到了发展①，这无疑地是所有已知方法中最先进的一种。

这一方法在造船界中暂时还沒有得到应用，但是每一个工程人員有必要了解它的原理，因为它能培养对强度計算的正确看法并指出其进一步改进的道路。

現在談一下統計方法中一些最簡单的問題，并确立安全系数的大小与实現不破坏性条件(1)的可能性之間的关系。

設$S^{\text{計算}}_{\text{計算力}}$为所討論的內力，是根据假定性計算（符号的下角）对計算荷重（符号的上角）而决定的：$S^{\text{額定}}_{\text{材料}}$則为同一結构中的額定危險內力。

这一額定內力与材料的額定应力$R^{\text{額定}}_{\text{材料}}$(屈服极限、疲劳极限等等)

---

① Н. С. Стрелеций, Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений, Стройиздат, 1947, 以及 Сборник вопросы безопасности и прочности строительных конструкций, ЦНИИПС, Гос. издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952, 在該书中可找到关于此問題的許多論文的索引。

之間有下列关系:

$$S^{\text{額定}}_{\text{材料}}=\Phi R^{\text{額定}}_{\text{材料}},$$

式中 Φ 为剖面的几何要素(面积、剖面模数等等);

$R^{\text{額定}}_{\text{材料}}$ 卽指与ГОСТ等等中所列的材料机械性質相符的那一数值。

假定

$$S^{\text{實際}}_{\text{實際}}=kS^{\text{計算}}_{\text{計算力}}; \tag{2}$$

$$S^{\text{極限}}_{\text{結構材料}}=cS^{\text{額定}}_{\text{材料}}, \tag{3}$$

不破坏性的条件(1)便化为

$$kS^{\text{計算}}_{\text{計算力}}\leqslant cS^{\text{額定}}_{\text{材料}} \tag{4}$$

或

$$k_0S^{\text{計算}}_{\text{計算力}}\leqslant S^{\text{額定}}_{\text{材料}}, \tag{5}$$

式中

$$k_0=k:c. \tag{6}$$

量 k_0 卽为所討論的安全系数。为了要确立一种合理的方法来規定安全系数以保証不破坏性条件,現在便分別地来討論系数 k 和 c。

根据恒等的演化

$$\frac{S^{\text{實際}}_{\text{實際}}}{S^{\text{計算}}_{\text{計算力}}}=\frac{S^{\text{實際}}_{\text{計算力}}}{S^{\text{計算}}_{\text{計算力}}}\cdot\frac{S^{\text{實際}}_{\text{實際}}}{S^{\text{實際}}_{\text{計算力}}}. \tag{7}$$

可将系数 k 写成两个乘数的积:

$$k=k_1k_2,$$

式中

$$\left.\begin{aligned}k_1&=S^{\text{實際}}_{\text{計算力}}:S^{\text{計算}}_{\text{計算力}}\\ k_2&=S^{\text{實際}}_{\text{實際}}:S^{\text{實際}}_{\text{計算力}}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$S^{\text{實際}}_{\text{計算力}}$ 为按假定性計算方法对实际荷重而决定的內力。

系数 k 也可以写成更多乘数的形式,但这将使以后的討論更加复杂,而且也不一定能使計算更为精确。

問題是这样的,多变量(变量为偶然量)的函数一般均較单变量的函数显現較小的变化性。因此,由几个偶然量所决定的那些系数 k_i,将显得較稳定些。

在內力正比于外力的这种最簡单情况中,內力和外力在計算状况

下的性質实际上是一样的，系数 k_1 应該认为是实际荷重与計算荷重之比

$$k_1 = Q^{\text{實際}} : Q^{\text{計算}}, \tag{9}$$

即 k_1 表征着荷重的状况。至于系数 k_2（实际內力与用假定性計算方法对同样荷重所求得的內力之比），則表征着决定內力时所用方法的精确性，而在所討論的这种最簡单情况中应认为与系数 k_1 无关。

系数 k_1 之値应該根据对建筑物在营运过程中所受的荷重大小进行长期观察来决定。系数 k_2 之値則应根据专門进行的实驗，并把实驗所得內力和应用假定性計算所得內力① 相比較来决定。根据这些資料应繪制相应的系数之値的頻率曲綫。

例如，假定 $k_1^{(0)}$ 和 $k_1^{(n)}$ 为比値 k_1 的最小和最大値，是由观察結果所得的；N 为观察的总次数。将量 k_1 的变化范圍等分成 n 个間隔：$(k_1^{(0)}, k_1^{(1)})$，$(k_1^{(1)}, k_1^{(2)})$ 等等，而每一間隔的长度等于 $\delta = \frac{k_1^{(n)} - k_1^{(0)}}{n}$，并算出在間隔 $(k_1^{(0)}, k_1^{(1)})$ 中观察到的 k_1 値的次数 N_0，依此类推。

取观察的总次数 N 为 100%，并在每一 $(k_1^{(i)}, k_1^{(i+1)})$ 綫段上繪制高为 $\frac{N_i}{N}100\%$ 的矩形，这样就得出頻率曲綫，如图 1 所示。全部矩形的高度之和等于 100%。

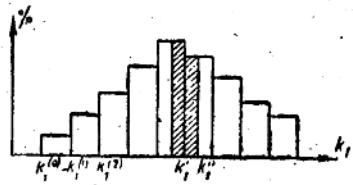

图 1

利用这一曲綫可以决定在范圍 $(k_1^{(i)}, k_1^{(i+1)})$ 內的 k_1 系数出現的次数在总次数中占多大部分。

某一"期待"的事件出現的次数与事件总次数之比称为或然率；因此根据頻率曲綫可以确定系数 k_1 的观察値位于 $(k_1^{(i)}, k_1^{(i+1)})$ 范圍內的或然率。

显然，在所論間隔中 k_1 値出現的或然率，不但可由相应矩形的高

① 关于这些問題，我們以后将不止一次地講到。

度来决定，同时也可以認为是等于这一矩形的面积与頻率曲綫所包含的总面积之比。后一种求法更方便些，因为在用連續曲綫来代替阶梯曲綫时(卽当减小間隔的长度 δ 使之接近于零时)，这仍然是正确的。

利用图1所示的頻率曲綫，就有可能来判断在任何范圍 k_1' 和 k_1'' 之間系数 k_1 值过去出現的或然率。为了使观察的結果有可能引伸(外插)到今后的事件中去，应根据頻率曲綫繪制理論分布曲綫，如图2所示①。分布曲綫的面积取为一，所以在間隔 $(k_1^{(a)}, k_1^{(b)})$ 之間 k_1 值出現的或然率在数值上等于图2中繪有斜綫部分的面积。

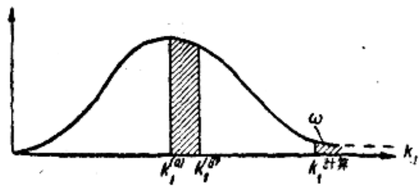

图 2

由理論分布曲綫看出，它是漸近于横軸的，所以 k_1 值可以任意地大，虽然，出現很大 k_1 值的或然性是很小的。因此，卽使計算的其余部分做得完全精确，卽 $k_2 = c = 1$，但在理論上仍不可能实現不破坏性条件(5)。所以，只可以这样說，在計算中选定的安全系数 k_1 計算之下，結构遭受破坏的或然率 ω(破坏率) 是怎样，或者不破坏性的保障程度 $\Gamma = 1 - \omega$(安全度)是怎样。

如果建筑物在营运过程中所出現的值 $k_1 < k_1^{計算}$，則結构不致破坏；如果 $k_1 > k_1^{計算}$，則它将受到破坏。結构的破坏率显然将决定于图2上的斜綫面积 ω。在利用系数 k_1 值的分布曲綫时应該注意，它是对某給定的外力分布方法而繪制的，因此在計算中所选取的安全系数，也就应該是指这一种外力分布方法而言的。

应該指出，如果值 $k_1 = k_1^{計算}$ 已处于分布曲綫的漸近部分，則継續增大安全系数不可能有助于降低破坏率；分布曲綫愈平坦，則給定的破

① 我們不可能在此叙述繪制分布曲綫的方法，因为这样就需要先叙述許多有关或然率理論的問題。

坏率 ω 所相应的安全系数也就愈大。

实际上可取的破坏率大小，或者說得更确切些，不破坏性条件(1)遭到破坏的或然率，只能根据对在营运过程中經过考驗的結构的分析来确定，并且其大小卽使对同一結构物而言亦随所討論的究竟是哪一个构件而在一定的范圍內变动。显然，例如，应力超过屈服极限的可能性对于分布于結构材料大部分体积中的总应力来講，就較局部应力更危險。在第一种情况中可能出現总的剩余变形，此后結构就破坏了；而在第二种情况中，如果是塑性材料，則仅产生应力的重新分布。

各种条件(指那些在滿足时对某些特性是有利的条件)的破坏率的容許值，应視各該条件遭受破坏所引起的后果如何而定。

例如，一百只胡桃中发現一只空心的，卽出現空心胡桃的或然率等于0.01，这并不足以成为这批胡桃报廢的理由，但一百頂降落伞中发現一頂不能張开就必須将整批降落伞报廢。

确定了安全系数与結构破坏率的关系后，現在来談繪制系数 k_0 的分布曲綫問題，該系数就是我們主要感兴趣的。設 $c=1$，卽 $k_0=k_1k_2$，然后来建立繪制 k_0 分布曲綫的方法，并認为 k_1 和 k_2 的分布曲綫为已知。知道了繪制两个量的乘积的分布曲綫，就可以繪制任意多个量的乘积的分布曲綫。

如上所述，系数 k_1 和 k_2 在最簡单的情况中是互不相关的[①]。由此可見，在討論繪制系数 k_0 的分布曲綫时，我們实际上应該求解两个独立量的乘积处在某个間隔中的或然率問題。为解此問題，須熟悉一下或然率理論中某些最簡单的概念。

假定我們同时进行两桩独立事件，例如投擲骰子及从全副紙牌中抽出一張牌。試問同时在骰子中擲出两点并在全副紙牌中抽到黑桃皇后的或然率是多少？

① 在一般情况下，k_1和k_2两量之間将存在着所謂相关連系(корреляционная связь)，对此我們不加討論。

对于精确的正方体而言；擲出一点到六点之間任何点数的或然率是同样的，所以，擲出两点的或然率为 $p_1=\frac{1}{6}$。从全副紙牌中抽到任何一張的或然率都是同样的，所以，抽到黑桃皇后的或然率等于 $p_2=\frac{1}{52}$。

骰子中的每一点数可以和全副紙牌中的任何一張配合，因此总共可有 $6\times 52=312$ 种或然率相等的組合情况，即观察到的情况，而其中只有一种是所期待的。所以，同时出現两点和黑桃皇后的或然率等于 $\frac{1}{312}$，即 $p=p_1p_2$。由此可見，两个独立事件同时出現的或然率等于每一事件出現的或然率之乘积。

不应該認为，进行 312 次投擲骰子及抽出一張紙牌的試驗一定能够得到我們所期待的組合情况。但是如果我們无限地增加試驗的次数，則試驗次数与成功次数之比将趋近于 312。

如果 $y_i(k_i)$ 是量 k_i 的分布曲綫方程式，則按定义，在間隔 $(k_1', k_1'++dk_1)$ 中量 k_1 出現的或然率等于 $y_1(k_1')dk_1$。所以，如果討論两个独立量 k_1 和 k_2，則这两量在間隔 $(k_1', k_1'+dk_1)$ 和 $(k_2', k_2'+dk_2)$ 中同时出現的或然率将等于 $y_1(k_1')y_2(k_2')dk_1dk_2$。

k_1 和 k_2 两量同时出現在間隔 (k_1', k_1'') 和 (k_2', k_2'') 中的或然率相应地由下列积分决定：

$$F=\int_{k_1'}^{k_1''}\int_{k_2'}^{k_2''} y_1(k_1)y_2(k_2)dk_1dk_2. \tag{10}$$

为了确定乘积 $u=k_1k_2$ 出現在某个間隔中的或然率，亦即要从两个乘数的所有可能乘积的总数中选出等于 u 的乘积来，我們就在积分式(10)中替换变量，取 u 作为自变量。設

$$u=k_1k_2;$$

$$v=k_2$$

或

$$k_1=\frac{u}{v};$$

$$k_2=v.$$

根据在重积分中替换变量的法則,(10)式应改写为

$$F=\iint y_1\left(\frac{u}{v}\right)y_2(v)\,|D|\,dudv, \tag{11}$$

式中D为所謂雅可宾(Якобиан, Jacobian),由下式决定:

$$D=\begin{vmatrix}\frac{\partial k_1}{\partial u}; & \frac{\partial k_1}{\partial v}\\ \frac{\partial k_2}{\partial u}; & \frac{\partial k_2}{\partial v}\end{vmatrix}$$

而在所討論的情况中

$$D=\frac{1}{v}=\frac{1}{k_2}.$$

因此,在(11)式中使$v=k_2$并将D的数値代入,得

$$F=\int\limits_u\int\limits_{k_2} y_1\left(\frac{u}{k_2}\right)y_2(k_2)\,du\,\frac{dk_2}{k_2}, \tag{12}$$

按推导的意义而言,式中对k_2的积分是对k_2的所有可能値进行的,而对u的积分則仅在我們所需的区間内进行。

如果$y(u)$是我們所需要的u的分布曲綫,則按定义

$$F=\int\limits_u y(u)\,du,$$

于是

$$y(u)=\frac{\partial F}{\partial u},$$

并且根据(12)式

$$y(u)=\int\limits_{k_2} y_1\left(\frac{u}{k_2}\right)y_2(k_2)\frac{dk_2}{k_2}. \tag{13}$$

根据(13)式就可以繪制乘积$k=k_1k_2$的分布曲綫,該乘积就是上

面用 u 代表的。

作用在某个一定建筑物上的外力(系数 k_1)的分布曲綫，应該認为是給定的，所以我們并不能对它有所影响。系数 k_2 的分布曲綫决定于所用計算方法的精确性，因此我們是能够对它有所影响的。

但是应該指出，并且可以用計算来証明，决定內力的方法更精确一些的結果，在許多情况下对所得的分布曲綫影响不大，因此，为了保証应有的安全度所应取的安全系数，实际上与应用更粗略的計算方法时相同。

我們談这些問題的目的有两点。

第一，需要在一开始就防止一种常見的傾向，即不顧劳动量的消耗，而采用极其精确的方法根据給定的外力去决定应力，忘了这些給定的外力及許用应力都是非常近似的。

第二，或許这才是主要的，上述关于安全系数結构的見解之发展(这种見解在本教程全书中将不止一次地重复提到)，将有助于理解許多已确立的船舶結构力学的原理，指出船舶强度上各种問題的发展途徑及确定造船工程的理論与实际之間的正确联系形式。