



圓柱形及槽形壳体实用計算法

W. 泰茲拉夫 著

建 筑 工 程 出 版 社

德意志建筑科学院
建筑技术研究所

圆柱形及槽形壳体实用计算法

建筑工程部设计总局 译
朱 振 德 校

建筑工程出版社出版

• 1959 •

內容提要 本書簡要地敘述了壳体理論及其实际应用。作者就一些实用方面最著名的壳体理論論著进行了研究，并提出了計算壳体的建議。

本書供从事实际工作的工程师、結構設計師参考之用。

原本說明

書名 Die praktischen Berechnungsverfahren für tonnen- und trogartige Schalen

著者 Dipl.-Ing. W. Tetzlaff

出版者 VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

出版地点及年份 BERLIN—1953

圓柱形及槽形壳体实用計算法

建筑工程部設計总局 譯

*

1959年5月第1版 1959年5月第1次印刷 4.065册

850×1168 $1/32$ 150千字·印張5 $5/8$ ·插頁1·定价(11) 0.96元

建筑工程出版社印刷厂印刷 新华書店发行 書号: 989

建筑工程出版社出版(北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

原序 (摘要)

現在已是人們進入闡明這種富有意義的壳体理論从而使工程師們在实际工作中能够加以应用的时候了。這在我們迅速的建設中，是非常重要的。由于实际工作者仅有很少的時間去研究复杂的理論，因此，本書只能采取尽量簡要的形式。虽然如此，作者仍竭力注意科学上的严格要求，并重視这方面的許多理論探討，例如丁兴格尔 (Dischinger) 教授、芬斯脫瓦特 (Finsterwalder) 博士、夫盧革 (Flügge) 博士和其他学者的論著。要在有限的篇幅內，对有关本課題的全部專門文獻进行研究是不可能的。所以作者只能就实用方面最著名的一些論著，进行研究，力求其适合于目前的技术水平，并必要加以补充。但是，由于常常需要采取与原来不相同的方法和資料供应的不足，还需要进行許多推演，才能达到本書的目的。

埃勒斯 (Ehlers) 的褶結構理論在这一方面是簡單而富有創造性的著作。可是这一理論对于若干实际情况來講，还是不够令人滿意的，这里根据戈登普拉特 (Goldenblatt) 及拉茨 (E. Raiz) 所發表的論文以及作者的研究作了些补充。此外，本書还采用了符拉索夫 (Wlassow) 教授的实用方法，这种方法实际上是壳体結構原始的实用弯矩理論，提供了进一步精确分析壳体的可能性。因为符拉索夫所提出的是一种用三角級数的解法，所以它的結果是与級数的收斂性有关，而且局限于一种荷重 (均布荷重)。因此，还須寻求其它的方法。作者發展一种采用固定数值的解法，这种方法是一种扩展的实用弯矩理論，考虑到各种不同的荷重，包括集中荷重在內。这里还須引証高茲夫 (Gwosdew) 教授的有关壳体精确弯矩理論的最早的一篇論著。

作者提出了計算壳体（穹頂）的建議，在這種壳体上拉力跡綫是得不到正常的变化圖形。這種情况在由兩種材料制成的穹頂（用鋼筋混凝土作箍的砧穹頂）或只在边梁和拉桿中配筋的穹頂中可以找到。

关于这种穹頂的試驗，部分是由萊德博(Ledderboge)工程师进行的，部分是由作者进行的，都还未能提出完整的理論，可是穹頂的一般受力情况大致已經获得了闡明。此外，在本書內也曾提到了 $b:l > 2$ 的短壳体。

目 录

1. 引言	10
1.1 定义	10
1.2 用途和經濟性	11
1.3 形狀	11
1.4 計算方法	11
1.5 無弯矩的圓柱形壳体 (薄膜理論)	12
2. 壳体基本理論	14
2.1 一般原理和演算	14
2.2 对称性的利用	19
2.3 T-力圖形	19
2.4 壳体的橫向計算	20
2.5 附加支撐	21
2.6 应力圖形	23
2.7 适用范围及缺点	27
3. 实用弯矩理論	27
3.1 基本概念	27
3.2 未知数及其函数	28
3.3 荷載函数	30
3.4 条件、公式和系数	31
3.5 系数和荷載項的演算	34
3.6 單位数值	43
4. 扩展的实用弯矩理論	45
4.01 基本概念	45
4.02 荷載形式及受力情况	47

4.03 第一种荷载形式——均佈荷载	48
4.031 R, Q 和 M 間的关系	48
4.032 R_{nq} 值的演算	51
4.033 R_{nm}^m 值的演算	51
4.034 R_{nm}^U 值的演算	52
4.035 ϕ_{nm}^m 值的演算	57
4.036 ϕ_{nm}^U 值的演算	57
4.037 ϕ_{np} 值的演算	58
4.04 公式的編列	58
4.05 有边梁的圓柱形壳体的特点	60
4.06 第二种荷载形式——区段荷重	60
4.061 R_{nq} 值的演算	62
4.062 R_{mn}^m 值的演算	62
4.063 R_{mn}^U 值的演算	64
4.064 ϕ_{mn}^U 值的演算	66
4.065 ϕ_{mn}^m 值的演算	66
4.066 荷重分佈	66
4.07 应力 σ_x 沿着壳体的分佈	67
4.08 剪应力	69
4.09 横向力矩圖形	70
4.10 配筋	70
4.11 評語	71
5. 苏联的經驗	73
5.1 本理論在弯曲壳体上的应用	73
5.11 板的厚度和帶肋的壳体	74
5.12 連續壳体	74
5.2 对苏联“鋼筋混凝土壳体計算及配筋指示”的研究和摘要	76
5.3 实际工作中的一些提示	79

6. 附录	81
6.1 精确壳体理论的标准	81
6.2 非匀质材料制成的薄壳(穹顶)	93
6.3 短壳体	97
6.4 带天窗的短壳体	102
7. 例题	103
7.1 根据基本理论的壳体计算	103
7.2 根据符拉索夫实用弯矩理论的壳体计算	109
7.3 扩展实用弯矩理论的应用	115
7.4 壳体屋顶的计算	119
7.5 受集中荷载的壳体屋顶计算	129

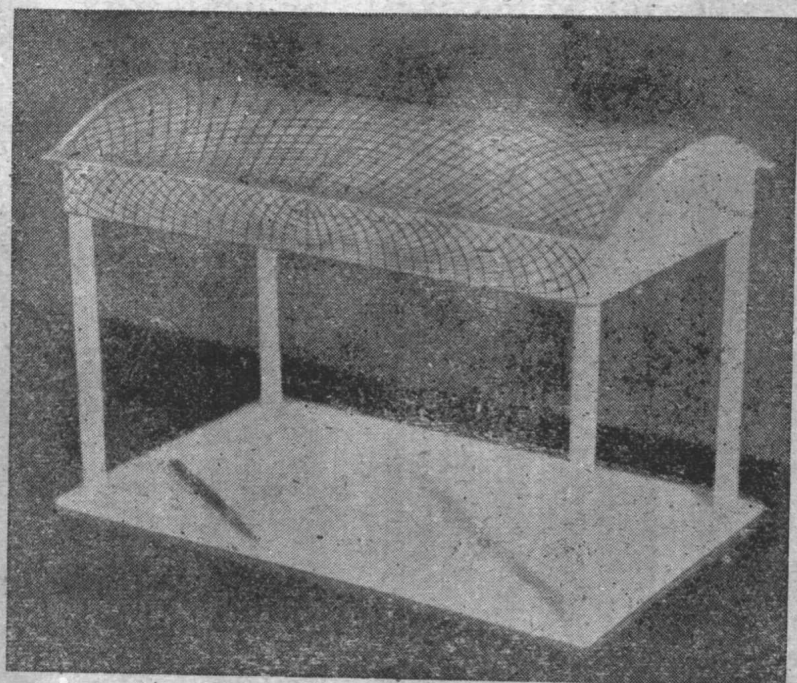
几个重要符号

符号在書中随时說明，但在这里仍然列出若干，以备查考。

其所以有多种符号的原因，是由于我們想儘可能不使其失却与原始文献的連系，以便有助于閱讀。

A, B	支承压力或截面	R , 或 r	在假設支座桿件內的力
a, b, c, d 等	褶縫或边	R, r 和 ρ	半徑
a	板的寬度	S	剪力
b	壳体寬度	T	法向力，以及褶縫力
c	微体的厚度	U	褶縫伸展
d	板的厚度	U, V 和 W	变形分値
E	彈性模量	u, v 和 w	变形分量
F	面积	X, Y, Z	分力
G_1	縱向弯矩	α	褶角
G_2	橫向弯矩	β	中心角
g	豎向荷重	δ	撓度
H	扭轉弯矩	θ	旋轉角，或中心角
J	慣矩	x	換算系数
l	壳体長度 = 跨度	λ	比率 $\lambda = \frac{l}{n\pi}$
M	縱向弯矩	ξ	比率 $\xi = \frac{x}{R}$
M	橫向弯矩	π	数 π
N_n	橫向力和法向力	φ	各塊板对水平綫的傾斜角
p	垂直于板的荷重	Φ	函数的符号，亦用 F
Q	橫向力		
q	平行于板平面的力		

註：符号的角註的意义；第一角註表示所在地点，第二角註表示关系地点，上角註表示原因。当只有两个角註时，第二角註表示原因（見公式39）。



圆柱形壳体上的应力迹线

1. 引 言

1.1 定 义

圓柱形壳体或槽形壳体，是指由一种曲折板（褶結構）或弯曲板（壳体）所組成的空間結構（圖1）。在其兩個隔板（框架或拱）之間可以設置中間支柱或加固肋，亦可不設置中間支柱或加固肋，因此褶結構与薄壳基本上是没有区别的。横隔板在其平面的横方向內是很脆弱的，因此在这个方向內不能起多大的抵抗作用。

板厚度与跨度 l 比較起来應該是很小的。此外，还必須符合 $l > b$ 和 $f > \frac{1}{6} \cdot b$ 的条件。板的厚度可以是順变的，也可以是突变的。

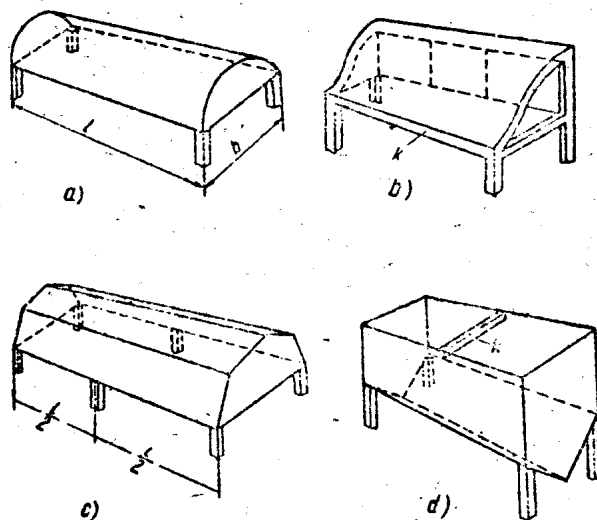


圖 1 最常見的壳体类型示意图

圖 1 所示為最常見的壳体結構類型的示意圖。所有這些結構的共同點在於缺乏獨立作用的中間構件，如小梁、大梁、剛架等，而只根據實際需要採用加固構件，如圖 1, b 和圖 1, d 中的 k 梁。

1.2 用途和經濟性

圓柱形壳体或槽形壳体常用於貯倉建築物或大跨度建築物的覆蓋。壳体結構各部份間的空間共同作用，使一般梁剛架和拱等形式的單獨作用的承重構件失去了一部份的採用價值，因而就發展了簡單的壳体模壳和最近採用的裝配式薄壳（根據現有數據看來，薄壳結構的優越性還遠遠沒有完全發揮）。這種結構已奠定了經濟基礎，並且使其使用範圍不斷擴大。

其餘部份可參照書末列舉的（可惜也不是全部）參考文獻，尤其是列舉了許多應用例題的丁·格爾和芬·斯脫瓦特的著作。

1.3 形 狀

凡符合圓柱形或筒形壳体的定義的各種形式均可採用。壳体形狀是按照使用目的根據各種不同觀點來決定的，所以不是單純從房屋工程學規律出發，而是相反地，使使用目的和形狀，符合壳体理論的規律。同時，正如以後可以看到的，也可以應用各種附加構件，如加固梁等。甚至在必要時還可以設計一種對溫度影響不敏感的壳体形狀。

根據工程學理論，理想的形狀是一種彎矩應力最少的形狀。因此就應當盡量使圓柱形壳体或槽形壳体橫向斷面符合索多邊形，亦即組成索或連桿形狀，以避免任何由支座或附加邊緣構件所引起的內力綫的干擾。

1.4 計算方法

一般以兩個平行於橫截面和兩個平行於母綫的截面在壳体上切下一勻質的壳体微體，並根據彈性理論的方法加以研究。在這

微体上作用着应力分力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ 和 τ_{yz} ，这些应力是沿着截面并且在板的厚度内变动的。这些应力的作用亦可用截面内力 $T_1, T_2, N_1, N_2, S_1, S_2$ 和弯矩 G_1, G_2 和 H 来代替（圖 2）。

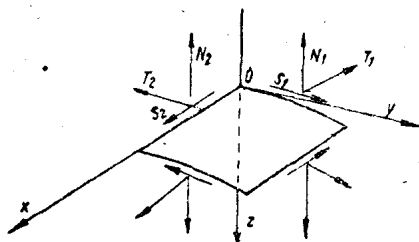


圖 2a 法向力、橫向力和剪力

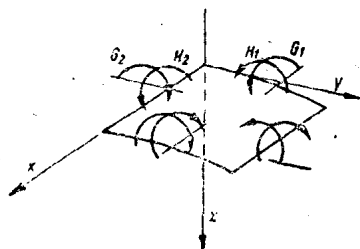


圖 2b 弯矩和扭矩

作用在無限小的微体上的截面内力

附註：这里所用的符号中也有用其它符号来代替的，如用 M 代 G_1 ，用 M_2 代 G_2 。

这些截面内力是不能采用一般方法来計算的。

因此，必須設法从平衡条件和相容条件出發，列出若干微分方程式，然后进行解算，并使它們符合边界条件。虽然引用了各种簡化方法，这个方法仍然是極其繁瑣的，只能有条件地予以采用，并且在实际应用上还是行不通的^①。所以只好另行从实用方面寻求計算公式。

1.5- 無弯矩的圓柱形壳体（薄膜理論）

所謂“無弯矩的圓柱形壳体”可理解为只有法向应力的原始壳体，即弯矩 G_2 或 $M_n = 0$ （圖 2）。整个的圓筒可以看作一根簡支梁，它当然有弯矩的，不过这些弯矩在薄壳中也只会引起法向应力（圖 5, c）。因此第一个条件是薄壳橫截面的适当形式。如果薄壳橫截面在一定荷載情况下形成連桿形式或悬索形式时（圖 3），則在适当的支承情况下壳体是無弯矩的。

严格地說，如圖 3 所示的向心式荷載，只有在豎立的容器中

① 較詳細的說明見 6.1 节

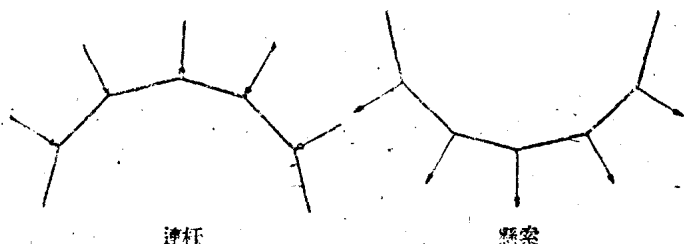


圖 3 連桿及懸索

才是可能的。对于屋頂或涵洞要按压力綫去組成截面是很困难的。連桿或懸索可以按已知方法处理。对于具有向心均佈荷載的弯曲壳体的应力計算已有了下列

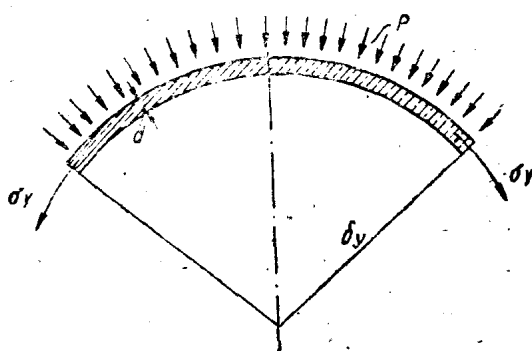


圖 4 具有向心荷載的壳体(薄膜)

公式: 对双曲壳体为 $\frac{\sigma_x}{\rho_x} + \frac{\sigma_y}{\rho_y} = \frac{p}{d}$; 对圆柱形壳体为 $\frac{\sigma_y}{\rho_y} = \frac{p}{d}$; 这些公式也可从平衡条件直接导出(圖4)。

丁兴格尔教授在設計薄壳結構时是从鮑尔斯費爾脫 (Bauersfeld) 博士的理論出發的。根据这个理論, 在具有端隔板和自由支座并仅承受自重的圓管中, 沿中間壳体母綫的力 T_1 和 T_2 (參看圖 2) 等于零 (圖 5, a, b 和 c)。

从这一事实可以得出結論, 即管体可用一个沿中綫的截面將它分割为兩部分, 而应力綫并不受到严重的干扰。这样获得的半圓柱体在采用附加的構造措施 (邊緣構件) 后, 与完整圓柱体的受力关系是相同的, 因此, 为完整圓柱体所导出的微分方程式也同样适用于半圓柱体。芬斯脫瓦特博士証明: 对于某些一定形狀

壳体（以刚性圈梁加高的圆柱体）在薄壳和边缘区的分界线上的剪力及纵向边缘力会在壳体上引起一种局部干扰。

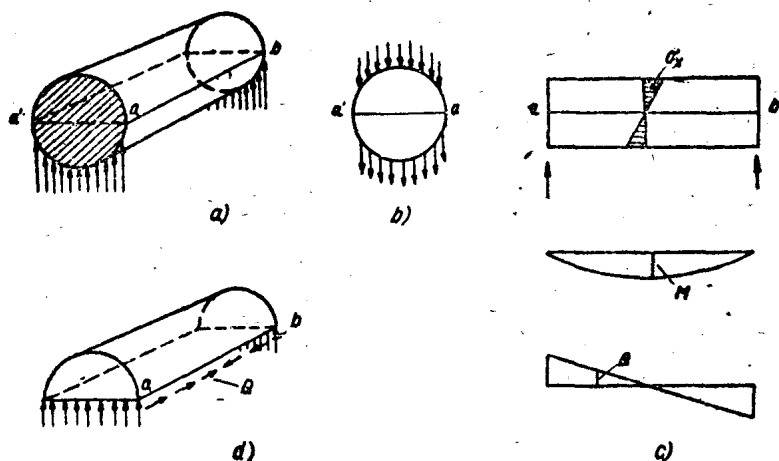


圖 5 具有隔板的自由支承管的应力状态

这些稍带冒险性的结论促使了丁兴格尔和芬斯脱瓦特两氏創造了许多巨型的建筑物，从而使这种结论在实践获得了惊人的验证。

由于边缘应力的干扰影响不够明确，因而使设计受到了形式的限止，而只好根据个人经验去掌握，所以，我们觉得其它不太受壳体形式限制的计算方法，使我们可能在构造方面有一个較好的概念，且更清楚、更精确、更有利些。因此我们对薄膜理论不拟多所阐述，容后讨论壳体精确理论时再予补充。

2. 壳体基本理論

2.1 一般原理和演算

引言内已经说过，褶結構和薄壳結構基本上是没有区别的。事实上，每个壳体都能足够精确地用一个内接多角形来代替（圖

6)。因此，埃勒斯所闡明的褶結構理論也可应用于壳体。埃勒斯是从下述观点出發的：

1) 褶結構中的一个板件 bc (圖 7) 在其本身平面內受荷載后，其撓度与隣接板件無關。

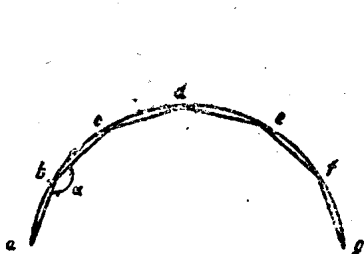


圖 6 帶內切褶結構的壳体

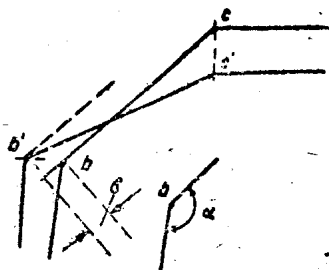


圖 7 板件撓度所引起的 α 角的变化

所以，如果板件 bc 在其平面內得到一个撓度 δ 时，則其新的位置为 $b'c'$ 。由于这里討論的是極小的变形，所以薄板的橫向扭轉和抗弯强度可以不予考虑。这种情形严格地說來是不对的，而仅有条件地适用于 $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ 的情况。但是这个假定在許多情况下却是可能的。

2) 褶結構中各板件間的相互影响是沿着連接褶縫由褶縫切力所产生的。

我們举一个例子來說明这一点，为了簡單起見，取一个由兩塊板件組成的褶結構来加以研究 (圖 8)。首先假定板件是彼此分开的。兩塊板都自由支承于端隔板上，板件 bc 在本身平面內受着均佈荷載 q 吨/平方公尺的作用。

这时板件 bc 得到一个撓度，結果是使板件的下緣伸長了。如果現在再把這兩塊板件連接在一起成为一个整体，則相隣板的边緣也应获得同样的伸長。这种情况是由于板 ab 的作用使板 bc 的下緣稍受压缩而形成的。 ab 板的上緣將不断伸長，直至該兩板的应力分力在 bb' 边的任一地位均相等时为止。这是可以理解的，因为这个褶縫同时是属于兩塊板件，并且在一个物体內应力

曲綫是不会有突变的。这种接合是借助于褶縫剪力 T_n 的产生而达成的。 T 力常作为剪力在相反方向內成对地作用，并且对于兩塊隣接板來說是相等的。在跨度中央 $M_2 = \frac{q_2 l^2}{8}$ 。当 W_1, W_2 为抵抗力矩， F_1, F_2 为截面面积时， bc 的下緣的应力为：

$$\sigma_{b2} = \frac{M_2}{W_2} - \frac{T_b \cdot h_2}{2 \cdot W_2} - \frac{T_b}{F_2} \quad (\text{参閱圖 9}) \quad (1)$$

M_n 和 T_n 可以绝对值代入公式(1)。从公式(1)中各項符号可以看出：各該項所表达的应力是拉应力(正的)还是压应力(負的)。由于矩形截面的抵抗力矩可用面积来表达

$$W = \frac{dh^2}{6} = \frac{F \cdot h}{6} \quad (2)$$

故

$$\sigma_{b2} = \frac{M_2 \cdot 6}{F_2 \cdot h_2} - \frac{3T_b}{F_2} - \frac{T_b}{F_2} = \frac{M_2 \cdot 6}{F_2 \cdot h_2} - \frac{4T_b}{F_2} \quad (3)$$

同时板 ab 上緣的应力

$$\sigma_{b1} = + \frac{4T_b}{F_1} \quad (\text{拉力}) \quad (4)$$

因为 $\sigma_{b1} = \sigma_{b2}$ ，故也可写为：

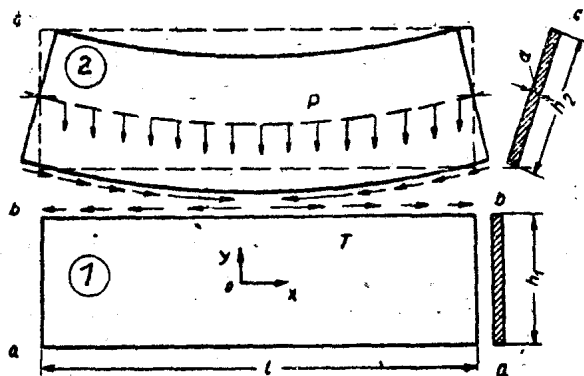


圖 8 褶縫力的平衡作用