

圓柱形網架結構

И. Г. 波波夫 著

建築工程出版社

圓柱形網架結構

蕭巽華 劉貽廳 合譯

建築工程出版社出版

• 一九五五 •

內容提要 圓柱形網架結構，是一種合理而經濟的剛性結構，它與圓柱形薄殼具有同樣的特徵。

這種網架結構在使用上是很方便的，因為它可以適合於多種支承條件，可以支承在房屋的四邊牆上或幾個支承點上；必要時，還可以支承在兩端的牆上。

本書從結構弧形肋梁上節點的剛度來說明各種結構的計算方法和某些便於裝配圓柱形網架結構的設計方法。

原本說明

書 名 Цилиндрические стержневые системы

編 著 者 Н. Г. Попов

出版者 Государственное издательство литературы по
строительству и архитектуре

出版地點 及日期 Москва-1952-Ленинград

書號 142 94 千字 850×1143 $\frac{1}{32}$ 印張 4 $\frac{1}{8}$ 插頁

譯 者 蕭 巽 華 劉 貽 驤

出版者 建 築 工 程 出 版 社
(北京市東單區大柵欄胡同 32 號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第 052 號

發行者 新 華 書 店

印刷者 北 京 市 印 刷 一 廠
(北京市西便門內南大道乙一號)

印數 0001—3,000 冊

一九五五年六月第一版

每冊定價 (9)1.04 元

一九五五年六月第一次印刷

目 錄

第一章 鋼製空間頂蓋	5
第一節 薄壳與網架結構的功能	5
第二節 網架結構簡史	7
第二章 圓柱形網架結構的應用	12
第一節 廠房	12
第二節 吊車軌結構	20
第三節 飛機庫	25
第四節 大跨度頂蓋	27
第三章 圓柱形網架結構的正確計算	29
第一節 桿件間鈍角的影響	30
第二節 節點剛度的計算	33
第三節 基本體系的選擇	35
第四節 一般的計算步驟	36
第五節 各平面邊橫向力的確定	38
第六節 力矩的九項方程式	39
第四章 各種不同節間數量的方程式解法	53
第一節 計算方程式的一般形式	53
第二節 計算力矩公式的確定	54
第五章 自由桿件和桁架桿件內力的確定	64
第一節 自由桿件的確定	64
第二節 係數的校核	66
第三節 弦上垂直應力的確定	69
第四節 應力的校核	77
第五節 平面桁架腹桿內力的確定	79

第六章 關於桁架計算和設計的一些問題.....	82
第一節 斜桿剛度的計算.....	82
第二節 計算的簡化.....	83
第三節 桿件斷面尺寸的規定.....	84
第四節 網架結構的穩定性.....	84
第五節 多波式圓柱形網架結構.....	87
第六節 關於圓柱形網架結構設計的一些問題.....	88
第七節 結構的製造和裝配.....	90
第七章 圓柱形網架結構計算例題.....	93
參考書一覽表	132

第一章 鋼製空間頂蓋

第一節 薄壳與網架結構的功能

飛躍發展中的蘇聯工業建築和民用建築，提出了大面積頂蓋的問題。事實上，寬度在 500 公尺和大於 500 公尺的廠房，已經建立起來了。由於汽車運輸事業的發展，需要建築大的汽車修理廠，由於對青年們身體健康的關懷，需要建築鍛鍊身體的大健身房，因此，在蘇聯建設工程中需要大面積的頂蓋，其中有大跨度建築物的頂蓋。在任何情況下，這些建築都是要消耗大量建築器材的。所以，在結構方面的任何改進，使建築物本身的重量減輕，對於蘇聯大規模的建設都是有重大經濟意義的。

爲了對圓柱形網架結構的經濟價值作一些說明，我們可以拿實體梁和梁式桁架來作比較。這兩種結構，當受外力作用時，都有同樣抵抗靜力的效果。當跨度較大時，實體梁本身重量要大於同樣跨度的梁式桁架的自重，這是衆所週知的。

實體梁自重大的主要原因之一，是由於它的厚度是不變的，也就是說，在整個跨長上，梁的厚度是一樣的。而在梁式桁架中，各個構件的尺寸可以依照作用在其中的內力來選配，這就是梁式桁架的本身重量要比實體梁爲輕的主要原因之一。

圓柱形薄壳和圓柱形網架結構（圖 1），從靜力的功能來說，有很多相同的地方。薄壳的構造只宜使用鋼筋混凝土，而圓柱形網架結構則符合於鋼的性能，是用鋼料建造的。由於鋼質壳體較薄，它的剛度和穩定性都不強，必須設置剛性肋梁來加固，所以製造圓柱形薄壳很少採用鋼料，在鋼筋混凝土薄壳結構中一般是沒有肋梁的。

根據上述關於梁和桁架的結論，就可斷定在相當大的跨度和大的荷重下，網架結構的自重，要比薄壳結構爲輕。大家知道，薄壳，尤其是鋼筋混凝土薄壳和在某些情況下的鋼質薄壳，是一種有

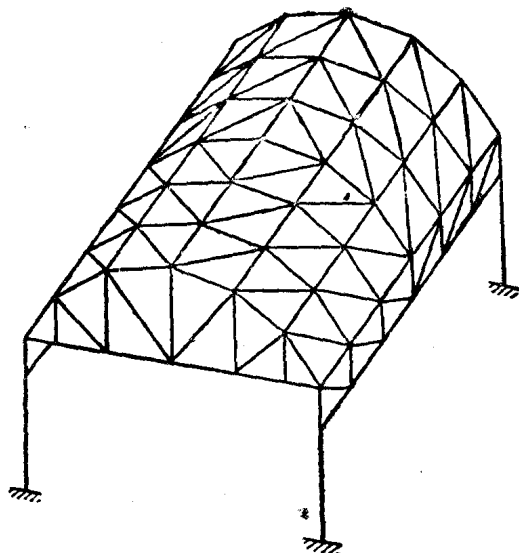


圖 1. 圓柱形網架結構頂蓋

很大經濟價值的結構形式；所以，圓柱形網架結構在很多情況下，也當然有很高經濟指標。

B. 3. 弗拉索夫 (B. 3. Власов) 教授，從事於圓柱形薄殼的計算的研究，並經試驗得出了結論。按照弗拉索夫教授研究的結果證明，當殼體有剛度很强的橫向肋梁時，在薄殼橫斷面上垂直應力的圖形，是近似一根直線的（圖 2）。同樣在圓柱形網架結構中，如果

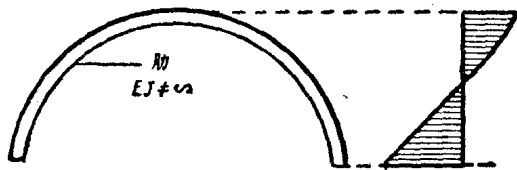


圖 2. 具有剛性肋梁的圓柱形薄殼斷面上垂直應力圖

橫向肋梁有足够的剛度，在橫斷面的平面上，垂直應力的分佈圖形，也是近似直線的；沿邊的構件（桁架）對這種應力的分佈，也是同樣地起了有利的作用。

在這種條件下，圓柱形網架結構，可當作空心斷面的梁來作初步計算。

第二節 網架結構簡史

鐵的空間頂蓋結構的建築物，是在俄國首先創造的。

這種結構最早的建築，應該認為是十九世紀初葉所建築的卡站斯基教堂（Казанский）的鼓形穹頂。穹頂的直徑是 17.7 公尺，在穹頂的表面有 128 根肋桿，在裏面有 32 根肋桿；這些肋桿是用扁鐵條來製造的，這些扁鐵條的結合是用鉚釘鉚接的。

於 1859 年在彼得堡建築了一座依沙克（Исаакиевский）教堂的穹頂，它的直徑是 27 公尺。這個穹頂是用螺栓連接的生鐵塊組成的雄偉建築物，穹頂上面支着鐵骨架和銅外壳的屋面，內部的下面吊有天花板。

一般穹頂結構，都是用磚或石頭來建築的，但是直徑這樣大的穹頂，如用磚石來建築，其重量就很大了；按照設計，它的重量是 454,000 普特。所以就有人建議採用當時認為是新的建築材料——生鐵。用這種新的建築材料，可以將它的重量減輕為 136,000 普特。這個採用生鐵製穹頂的創作，對整個建築事業都具有很重要的意義，致使建築穹頂時都喜歡採用生鐵。

當改建前沙皇別墅村的依卡切林斯克宮（Екатерининский）教堂的穹頂時，就採用了這種新創造的金屬頂蓋結構。這種空間頂蓋的金屬結構，是於 1863 年到 1865 年間，依照設計工程師 Г. Е. 鮑卡爾（Г. Е. Паукер）的設計圖樣和詳細指示建造的。

這個穹頂的形狀，在平面上是每邊長度為 11.1 公尺的方形的閉合拱。結構本身，約重 19.8 噸。支持穹頂的主要肋桿，是用 8×0.5 吋成對的扁鐵組成的。拱邊肋桿間之空隙，用垂直和水平桁架相摺連。桁架為角鐵和圓鐵所組成，節點的結合處，用螺栓和鉚釘加以固定 [2]。

1877 年在彼得堡建築的馬戲院所採用的斯維德列爾氏（Шведлер）式穹頂頂蓋，它的直徑是 48 公尺。

Ф. С. 雅辛斯基教授（Ф. С. Ясинский）研究用鋸齒形桁架建築工廠頂蓋時，曾指出這種桁架結構有兩項主要缺點，這就是這種

頂蓋具有長的幾乎是水平的橫向凹槽，不利於水的排泄；這種結構有很多的支柱，因而使內部容積狹窄 [3]。

爲了克服這些缺點，Ф. С. 雅辛斯基教授於 1899 年，在修建尼可拉也夫斯基鐵路 (Николаевская Железная Дорога) 車輛工廠時，建議採用具有同樣鋸齒形桁架的網架空間結構，但是僅支承在外牆上，而並無中間支柱的。

這個結構體系包括一系列的垂直桁架和傾斜的平面桁架，垂直桁架具有曲折外形的弦桿所形成的兩面斜坡；傾斜桁架的一端與一垂直桁架的上弦桿相連，另一端則與另一垂直桁架的下弦桿相連；各個垂直桁架的下面沿支柱處，用附加桿連系着。這就是首創的摺襞形結構系統，因其所有的桿件僅沿屋蓋表面排列着。Ф. С. 雅辛斯基教授說：“所有桿件當受溫度變化的影響時，它們的膨脹都是一樣的，所以雖然節點是剛性，溫度的變化也不會產生任何附加應力”。無疑地，這是這種結構系統的最大優點。

當時名譽院士 В. Г. 蘇和夫 (В. Г. Шухов) [4] 創作了幾種網狀空間結構：1) 吊式網架；2) 拱式網架；3) 拱式連續網架；4) 高形網架。作爲吊式網架結構的例子，可以舉出 1896 年在尼施尼諾弗哥洛德市 (Нижний Новгород) 舉行的展覽會中，建築工程陳列館中央大廳 68 公尺直徑的頂蓋。大廳中央以支架排成圓週，支架的上端以一個剛性金屬環來連接，下端也用一個環連接着並置於四週的牆上。

這兩環之間，用扁鐵條互相交錯編成網狀，扁鐵交叉點用鉚釘鉚住。網狀扁鐵條表面形成雙曲線體外形，上面直接鋪鐵皮爲屋蓋，或鋪上一層防寒層的屋蓋。

В. Г. 蘇和夫創造的吊式網架，不僅可用於圓形結構物，還可用於矩形或橢圓形的結構物上。這個展覽會的第三陳列館就採用了橢圓形的網架結構，它是由中間一個 51×47 公尺的矩形體及兩端 25 公尺半徑的半圓形體所組成的。

拱式網架也是 В. Г. 蘇和夫教授在尼施尼諾弗哥洛德市展覽會中作爲示範建築而展覽的，這種形式網架的跨度是 13 公尺至 22

公尺，總面積為22,500平方公尺。根據1895年發給蘇和夫的專利證明書中所載，此項結構是用彎成曲折形的扁鐵所組成；扁鐵在摺角處相連，在摺角處則用鉚釘鉚牢。

A. Э. 羅巴托 (А. Э. Лобато) 所著關於蘇和夫一書中說：“在三十年之後，這種網狀頂蓋的樣式，才被德國公司全部抄襲過去，用木料或金屬來仿造……”。這些所謂：“新發明”，就是我們所知道的左寧格式 (Цоллигер) 屋蓋和蔡斯式 (Цейс) 網架，雖然在他發明的時候，我們已經有幾十座這種蘇和夫網架結構建築物。在德國，他們是不肯將這種網架以其真正發明者的名字來命名的。

俄國工程師對發明這些結構的貢獻是不容爭辯的，但是，即在最近出版的教科書內，仍未重視到這一點。直至現在，這些發明，往往仍歸功於外國人，這是不能容忍的。^①

1898年B. Г. 蘇和夫設計的烏克仲斯基軋鋼廠的廠房和莫斯科巴利工廠中橋梁式的構架，以及其後設計的蒸汽透平工廠的結構，都是需要38公尺和25公尺跨度的頂蓋的。B. Г. 蘇和夫爲了提高這種結構的剛性和穩定性，決定採用雙曲線網狀拱頂。這項結構，從形狀與設計來論，就是有名的“烏茲別克斯坦” (Узбекистан) 薄壳最近似的範本。

B. Г. 蘇和夫設計了很多陳列館，這些陳列館的跨度都在13公尺至22公尺之間，網狀拱頂蓋則被合理地改爲木製拱壳。這種蘇和夫頂蓋，是用三、四層半吋厚的木板互相交叉重疊，用釘釘牢的；爲了加強這個薄的拱壳的穩定性，B. Г. 蘇和夫採用了斜拉桿系統，使其互相拉牢。

A. Э. 羅巴托論蘇和夫的一書[4]中曾寫道“德國工程師巴羅達 (Брода) 稍爲改換了此種拱式頂蓋結構的構件，其方法是在受力的拱壳板之間加了一些桁條；雖然這樣可以增加局部的、甚至大部的拱頂的穩定性，但另一方面，它的使用價值則大大地降低了”。

① A. Э. 羅巴托著“俄國傑出的工程師蘇和夫”蘇聯科學院出版社1951年版，第74頁。

“增加這些桁條，在受力拱壳板與桁條所形成的密閉空間內，造成了木料由於溫度和濕度而腐朽的有利條件，這種腐朽現象在頂蓋結構中是常可發現的。雖然如此，這種拱式屋頂形式的結構，在蘇聯已毫不考慮的被命名為蘇和夫——巴羅達式頂蓋結構（Шухов-Брода）。如是，很少人知道的巴羅達的名字，就與蘇聯偉大的工程師的名字並列起來了；反之在德國，蘇聯發明者的名字，就被刪掉了”。^①

二十世紀初葉，不斷地建築了很多的這種空間頂蓋結構物，其中有：莫斯科商場（Пассаж）頂蓋，列寧格勒郵政總局營業廳頂蓋，列寧格勒書局院子的頂蓋，前基也輔斯基（Киевский）商業專科學校大禮堂頂蓋，烏茲別克蘇維埃社會主義共和國（УССР）科學院大廳頂蓋等。

十月革命以後，空間網架結構的應用問題，有了很大的發展。

由於蘇聯的學者 А. А. 高福茲吉也夫（А. А. Гвоздева）、П. Л. 巴斯基拉卡（П. Л. Пастернака）、С. С. 高魯斯克非奇（С. С. Голушчевича）、及 Л. С. 基利門（Л. С. Гильмана）等教授，特別是 В. З. 弗拉索夫教授 [5] 對這問題研究的結果，擬定了薄壳的實用計算方法。

蘇聯中央工業建築科學研究院（ЦНИИПС）對薄壳使用的試驗，證明了弗拉索夫的計算方法，是有足夠的實用正確性。因此，也可適合於對圓柱形薄壳的計算。

1932 年蘇聯中央工業建築科學研究院木結構組，在 Г. Г. 卡爾生（Г. Г. Карлсейн）教授領導下，設計了木質肋梁拱式薄壳，其跨度為 100 公尺至 200 公尺。

在鋼製空間結構方面，也有人為實現網形頂蓋和壳體拱進行了研究。結果，我們有了克利幫斯基工程師（Клебанский）[6] 的網式拱，帶有縱向肋梁的金屬圓柱形薄壳及蘇聯中央工業建築科學研究院關於金屬壳創作的建議 [7] 等。

^① А. Э. 羅巴托著“俄國傑出的工程師蘇和夫”蘇聯科學院出版社 1951 年版，第 80 頁。

所有這些結構，通常對跨度不大的建築物是適合的。但是，跨度為 100 公尺至 200 公尺的木質肋梁拱式殼體的建造，就證明了如使用鋼質製造適當而合理的殼體，其跨度還可能較大，而決不會小於木質殼體的跨度。

第二章 圓柱形網架結構的應用

圓柱形網架結構具有很多優點：使用效率高，本身重量輕，設計變化靈活，可適合於各地的條件。圓柱形網架結構的這些特徵是很適合於廠房、飛機庫、室內運動場、大廳等頂蓋的。

圓柱形網架結構是屬於超靜定體系，即使某些部分受到損傷，整個網架仍具有抵抗能力，可以繼續使用。

我們只要將一個斷裂了一根斜桿的橋梁桁架來觀察一下，就可以看出它並不會顯出撓度。損失了一根斜撐的桁架之所以能夠繼續工作，是因為桁架的節點是剛性的；當我們計算節點的剛度時，桁架是作為超靜定的。當它損失了一根桿件時，不過僅僅降低了它的超靜定次數，其力學性能仍然保持如舊。

拉賓諾維契 (И. М. Рабинович) 教授在他的著作 [8] 中曾這樣說過：① “框架體系中超靜定性的優點，祇是在最近才被完全認識和理解；由於框架上所有的荷重都被分佈到結構物的很多的桿件上，框架的局部削弱或破壞就會自動地調整，結構物總的安全係數也就大大地提高了”。

圓柱形網架結構有很多贅餘的桿件，故在計算時並不把所有的桿件全都考慮。因此，前節所引拉賓諾維契教授的論述，對於這項結構體系是完全適用的。就是損壞了其中幾根桿件，也祇不過是減少了它的桿件數量，可是在整個結構體系中仍然還存在着很多的贅餘桿件，雖然應力增加了，還是可以繼續工作。

第一節 廠房

目前廠房結構的骨架，是具有某些本質上的缺點的，其中可指出如下幾項：

甲、支柱的間距多數採用 6 公尺，這不一定能夠適合經濟上

① И. М. 拉賓諾維契著“框架計算法”第一章第八頁。1934 年科學技術聯合出版社出版。

的要求：支柱（包括柱和基礎）的成本，應該與跨度間的結構（桁架和吊車梁）的成本成正比；

乙、支柱多就要減少廠房內的使用面積，這樣也就提高了結構物的成本；

丙、支柱的間距小，在改建廠房從事另一種新產品的生產時，就會成爲一個大的障礙，這是基本的缺點；

丁、廠房的支柱是要受吊車的動荷重影響的；當計算這種荷重時，一根間距爲 12 公尺的支柱（包括基礎），總要比兩根間距爲 6 公尺的支柱（包括柱子的兩個基礎）爲輕；此外，對於較大的構件單位，其每噸鋼鐵的製造成本就會減低；由於裝配單位重量的增加，每單位重量的裝配成本也會隨之降低。

戊、由於支柱過多就增加了裝配單位和基礎，這樣就要使工作複雜化，進度遲緩和增加裝配費用。

爲了解釋丁項，讓我們來作一個簡略的計算。設跨度 $l=30$ 公尺及兩台起重力爲 30 噸的吊車，則每根支柱所受活荷重影響下的壓力爲：

當支柱間距爲 6 公尺時 $R'_k=64$ 噸

當支柱間距爲 24 公尺時 $R''_k=103$ 噸

R_k^n = 由於靜荷重和雪重作用到支柱上的壓力（當間距爲 6 公尺）。

這樣在第一種情況，就必須用四根柱子，它的總壓力爲 $4R_k^n+256$ 噸；在第二種情況，只有一根柱子，它的總壓力爲 $4R_k^n+103$ 噸。壓力的減小又影響到基礎的尺寸。

顯然，倘若吊車梁的結構不太複雜，第二種支柱的排列方法就合適得多。

採用圓柱形網架結構，對消除上述缺點提供了極大的可能性。

假設一個廠房，當其縱向排列的柱子，每排的距離爲 $l=30$ 公尺時（圖 3），圓柱形網架結構可以沿縱向長度上佈置成爲波狀，使廠房的跨度爲 30 公尺。柱子間的距離，必須與殼體的寬度 B 相符合； B 可採用 12、18 或 24 公尺。

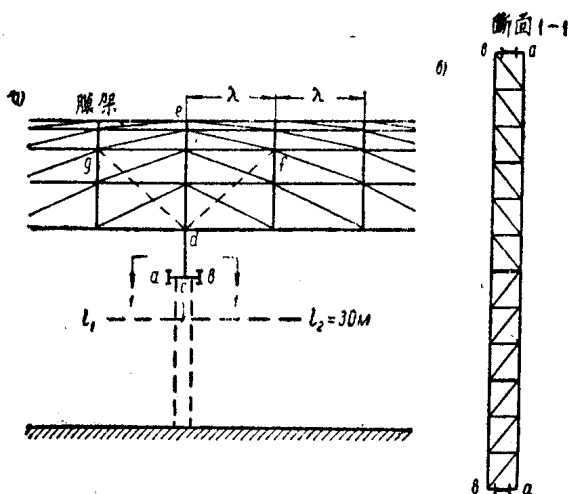


圖 3. 吊車軌吊在膜架上的廠房橫斷面

a) 橫斷面; b) 斷面 1—1.

顯然這種頂蓋結構是不被支柱間的距離所限制的，因為桁條可以支承在剛性的橫向肋梁上，也就是桁條的跨度與平桁架的節間長度 λ 相等（圖 3）。

所以，桁條是可以支承在剛性的橫向肋梁上的任何一點，而肋梁是能夠承受某些附加彎矩的。無疑地，這就使頂蓋的結構簡單化，並降低造價。

現在，讓我們再進一步來研究間距（用 B 代表）的大小，對空間桁架的性能和其重量的影響。圓柱形網架結構的性能與圓柱形薄殼結構的性能極為近似。當圓柱形薄殼的橫斷面有足够的剛度時，它的垂直應力與有同樣斷面的簡支梁的應力極為相似。所以，近似的計算法，尤其當我們對同樣結構用各種橫斷面來作比較時，是可以用圓柱形薄殼代替圓柱形網架結構來計算的；在決定橫斷面中的應力時，可以按照簡支梁的彎矩公式來計算。

假定橫斷面矢高為 $\frac{B}{4}$ ，薄殼的厚度根據 B 值的大小來決定，當桁架跨度為 30 公尺（結構中線的寬度）， B 的尺寸可以為 12、18 或 24 公尺。按照圖 4 決定下列各值：

矢高 $f = \frac{B}{4} = \frac{1}{4} \times \frac{8r}{5} = 0.4r,$

弧的半徑 $r = \frac{f}{2} + \frac{B^2}{8f} = \frac{B}{8} + \frac{B}{2} = \frac{5B}{8},$

弧長 $s = r \times 1.853,$

弧的重心至弧頂距離

$$z = r \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) = r \left(1 - \frac{B/2}{2r \times 1.853} \right) = r \cdot 0.136,$$

當 $a = r - f = 0.6r$ 時, 對 1-1 軸寬度為 δ 的慣性矩 (圖 4)

$$I_1 = 2\delta \int_0^\alpha y^2 ds = 2\delta \int_0^\alpha (r \cos \varphi - a)^2 r d\varphi = 2\delta \int_0^\alpha (r^2 \cos^2 \varphi - 2ar \cos \varphi + a^2) r d\varphi = \delta r^3 [0.5 \sin 2\alpha - 2.4 \sin \alpha + (1 + 0.72)\alpha] = \delta r^3 0.153.$$

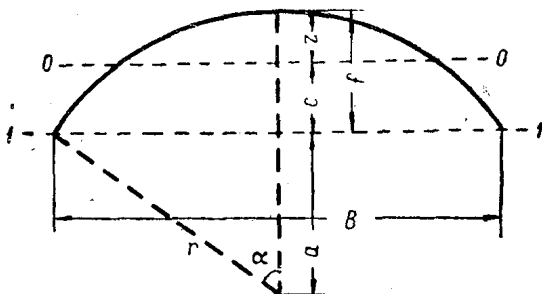


圖 4. 圓柱形薄壳橫斷面的幾何圖形

對中心軸寬度為 δ 的慣性矩

$$I_0 = I_1 - \delta s c^2 = \delta r^3 (0.153 - 1.853 \times 0.264^2) = \delta r^3 0.024.$$

最小斷面抵抗力矩

$$W = \frac{I_0}{0.264r} = \delta r^2 \frac{0.024}{0.264} = \delta r^2 0.091.$$

假設, 在水平投影面上為連續均佈荷重, 跨度中間的彎曲力矩為

$$M = p \frac{B L^2}{8} = [\sigma] W = [\sigma] \delta r^2 0.091.$$

由上述公式得出

$$\delta = \frac{pL^3}{8[\sigma]0.091} \times \frac{B}{r^3} = N \frac{B}{r^3},$$

式中:
$$N = \frac{pL^3}{8[\sigma]0.091}.$$

因為 $r = \frac{5}{8}B$, 所以

$$\delta = N \frac{64}{25B}.$$

因此, 壳體的厚度是與寬度 B 成反比的; 寬度 B 就是柱子間的間距。所以從頂蓋重量的經濟觀點來看, 則儘量採用較大的柱子間距為宜。當然, 其結果是要受某些條件的限制, 因為它必須使桁架橫斷面直線尺寸(弧高和圓柱形網架結構的寬度)的互相配合關係保持不變。

柱子間距的大小, 與吊車梁的結構有密切關係。當間距增大, 吊車梁的跨度也就增大, 它的重量也就要相應地增加。若採用輕型吊車則可裝置附加結構來減輕吊車梁的重量和改善其工作條件。在圓柱形網架結構的端部斷面上有個膜架 de (圖 1 及圖 3)。膜架的豎桿向下延伸的長度為 dc 。在 c 點裝置着兩根懸臂: cb 和 ca , 兩懸臂與豎桿 cd 堅固地相接。在兩懸臂的端部裝置工字鐵及軌道。豎桿 cd 可以每隔 3~6 公尺配置一根。工字鐵 a 、 b 可以是一根連續的梁, 長度為 B , 固定地支承在支柱上, 並彈性地支承在懸臂 bc 上。在 ab 平面上設置水平的加勁桁架 (圖 3, 6)。這項桁架在支柱處有較剛性的支承, 並在豎桿的下端有彈性支承。為了增強這些豎桿的剛度, 應裝置斜桿 df 和 dg , 斜桿的 d 點與圓柱形網架結構上的各節點相結合。

水平加勁桁架對吊車軌是必要的, 因為它可以支持由於吊車制動時產生的應力, 並可以增強吊車軌水平方向的剛度。在這種情況下, 豎桿 cd , 懸臂 ab 和斜桿 df 、 dg , 就是附加結構。這些附加結構給吊車梁 a 、 b 增加了中間支座並減少了吊車梁的彎矩值。這樣, 雖採用 18—24 公尺的支柱間距, 也不會使吊車梁的重量過分增大。