

編 号: 0015

內 部

科学技术成果报告

首都体育馆空间网架屋盖

中国科学技术情报研究所出版

1972年7月

毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，
跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须
打破常规，尽量采用先进技术，在一个不
太长的历史时期内，把我国建设成为一个
社会主义的现代化的强国。

目 录

一、前言.....	(1)
二、方案比较.....	(8)
1. 国内外体育馆各类屋盖简况.....	(8)
2. 从调查研究中所得的初步概念.....	(11)
3. 具体方案比较.....	(13)
三、平板型空间网架设计.....	(17)
1. 应力分析及计算.....	(17)
2. 构件断面设计.....	(31)
3. 试验.....	(35)
4. 空间几何关系及构造.....	(45)
四、施工与安装.....	(51)
1. 屋架安装顺序.....	(51)
2. 高强螺栓的拧紧.....	(54)
3. 标高的控制和校正.....	(55)
4. 脚手架.....	(56)
5. 工程质量.....	(58)
6. 结点喷砂及中间防锈.....	(61)
五、经验教训.....	(63)

首都体育馆空间网架屋盖

北京市建筑设计院

一、前言

伟大的无产阶级文化大革命彻底摧毁了叛徒、内奸、工贼刘少奇的反革命修正主义路线,提高了广大革命群众的两个阶级、两条道路、两条路线斗争的觉悟,促进了思想革命化,用战无不胜的毛泽东思想武装起来的中国人民,发挥了无穷无尽的智慧和创造力,社会主义革命和社会主义建设都取得了辉煌的成就。

首都体育馆就是在无产阶级文化大革命中工人阶级和革命技术人员遵照伟大领袖毛主席关于“自力更生,艰苦奋斗,破除迷信,解放思想”的教导建成的。它是我国最大的综合性体育馆,同时也是我国第一座滑冰馆。这个馆占地七公顷,建筑面积四万 M^2 ,长122M,宽107M,高28.5M(图1)。东西六层,南北四层,首层是运动员和工作人员用房,二层是

观众休息厅,东、西三层以上除部分为灯光、扩声等机房外,皆为宿舍和办公室,南北三、四层全部为观众休息厅。中间的比赛大厅可容纳两万人左右(图2)。比赛场地长88M,宽40M,可以进行各种球类、体操、滑冰比赛、文艺演出或举行政治集会。

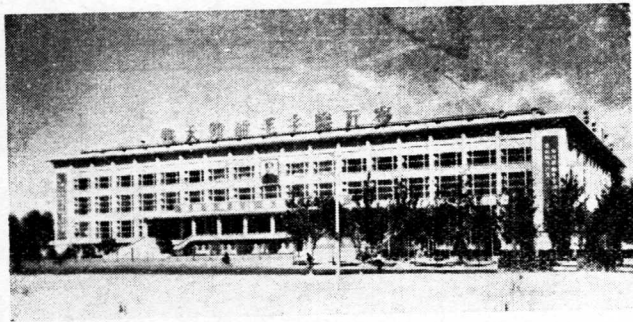


图1 建筑立面



图2 比赛大厅内景

比赛大厅的屋盖跨度为99M,长达112.2M,采用了“空间网架”的新结构(图3、4),这种结构是近年来才发展起来的,国内外都尚在研究,并开始应用于实际工程中。据当时了解,国内外同类型的空间网架结

构以美国加利福尼亚大学体育馆的屋盖为最大，其跨度为91M，长度为122M，用钢量为 $73.23\text{kg}/\text{M}^2$ 。而我们初次在首都体育馆中采用这种结构，跨度为99M，而用钢量仅为 $65\text{kg}/\text{M}^2$ 。这是与工业院金属结构室、中国科学院数学研究所、原建工部建筑研究院及华北金属结构厂、北京市机械施工公司等兄弟单位大搞现场“三结合”设计的成果，这是我国工人阶级和革命的技术人员在毛泽东思想光辉照耀下取得的胜利，是毛主席无产阶级革命路线的胜利，是无产阶级文化大革命的胜利。

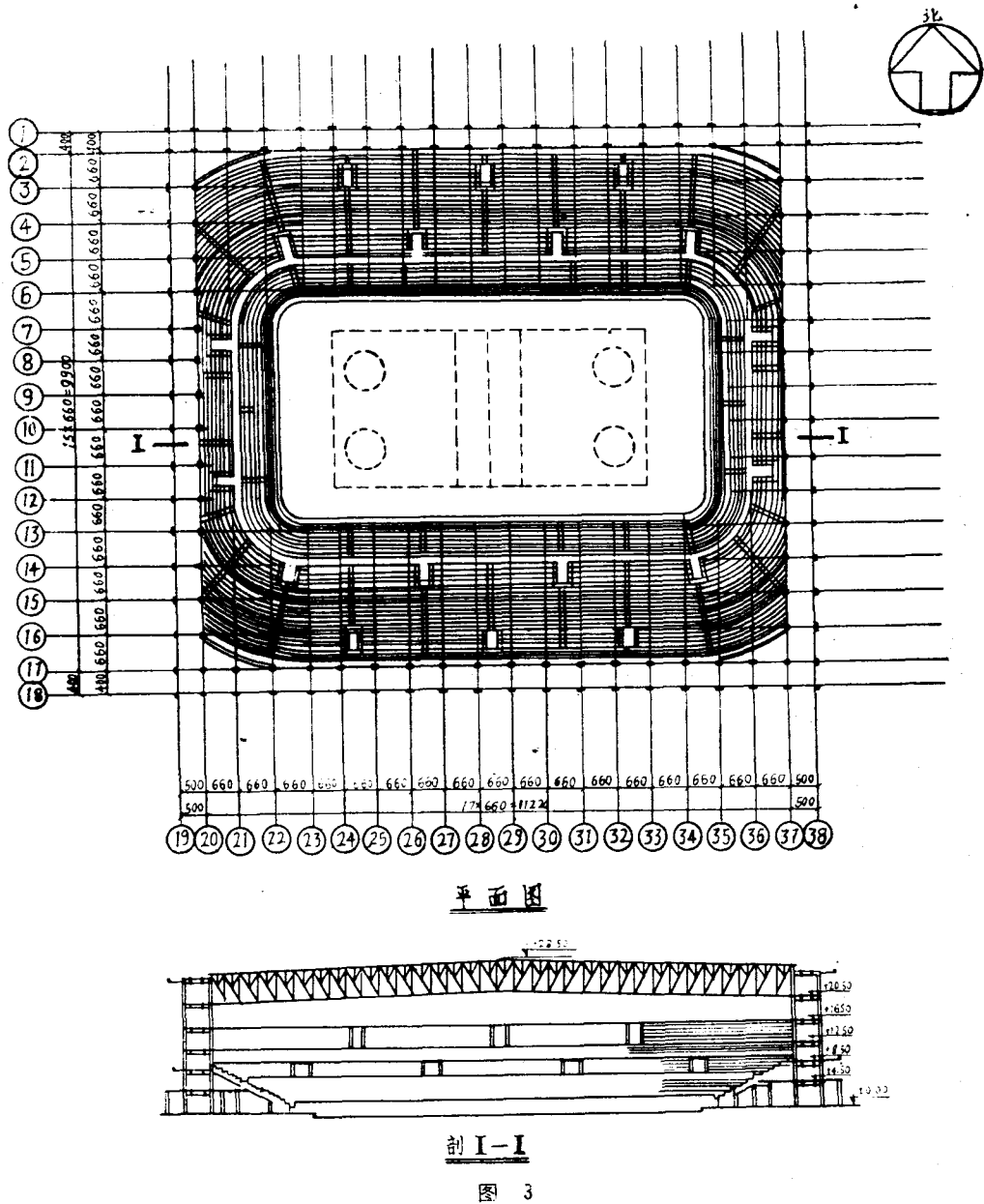


图 3

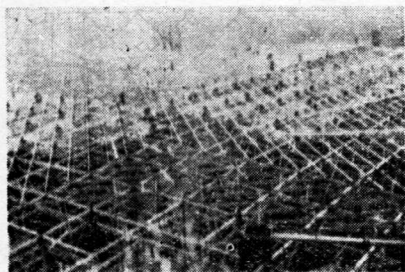


图 4

开始设计时，我们对这样大跨度的结构如何多快好省地完成，心里没有底，屋盖下是容纳两万名左右观众的比赛场地，万一出了问题怎么办？“革新”与“守旧”两种思想的斗争是很激烈的，一些资产阶级“专家”、“权威”主张做一百多年来一直沿用的“三铰拱”屋架，认为这样才“稳妥可靠”；另一些人则不管我国具体情况，主张照抄照搬外国杂志的洋玩艺儿，这

一套“爬行主义”、“洋奴哲学”遭到了广大工人和革命技术人员的坚决抵制和批判，他们决心在毛泽东思想指引下走我国自己的道路，“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”。

我们反复用毛主席关于“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”的伟大教导武装头脑，破除迷信，解放思想，发扬敢想、敢干的革命精神，坚持踏踏实实的科学态度，高举“鞍钢宪法”的旗帜，大搞现场“三结合”设计，大搞技术革新。我们首先按照毛主席关于“调查就是解决问题”和“有比较才能鉴别。有鉴别，有斗争，才能发展”的教导，分析了国内外几十个大型体育馆的资料，参考了国内几个有代表性的体育馆，经分析对比，对各种大跨度结构的特点由感性认识逐步提高到了理性认识。此外，对国内的材料、制作、安装、运输等情况进行了较全面的了解。在此基础上，发动群众举办了群众性的方案征稿，又着重地对其中三个结构方案做了分析比较，经过工人、革命领导干部、革命技术人员的反复讨论研究，决定采用平板型“空间网架”的结构方案。这种结构由于网状构造起了空间双向作用，不但刚度好，对抗震十分有利，并且比普通单向受力结构可节省钢材30%。

方案确定后，要使它变为现实，还须要克服一系列的困难。网架是多次超静定结构系，应力分析复杂。迅速、准确地提供在各种受力情况下的应力情况，这是一项繁重的工作。在中国科学院数学研究所、建筑研究院等单位协助下，全体工作人员怀着高度的政治热情，以严肃认真的科学态度，“发扬勇敢战斗、不怕牺牲、不怕疲劳和连续作战的作风”，仅用一个月的时间，就完成了全部应力分析工作。

在构造上，网架是由37种不同类型，544榀 45° 斜向正交的（高度为6M）单联、双联及三联（长度各为4.669M、9.338M及14.007M，见表1及图5、6）的小单元桁架所组成，四周围以双层平面桁架及垂直面上的斜杆组成空间桁架的边梁，置于六十四个柱头上的一般支座和角支座上，网架上装薄壁槽钢檩条，铺设木椽、保温层、望板防水层及铝板面层（见

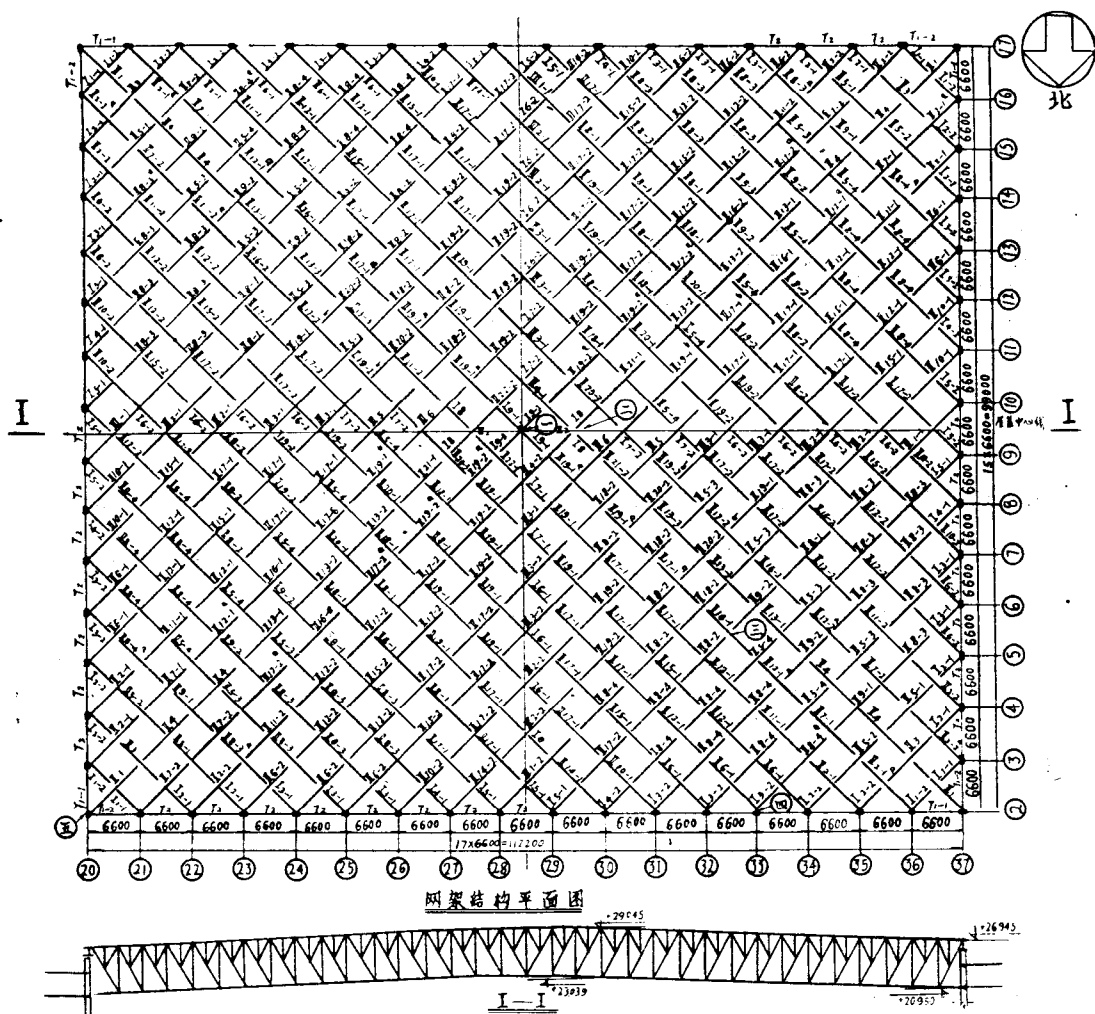


图 5

图7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20)。为了便于屋面排水，中央起拱2.1M，形成四坡顶的屋面，增加了构造上的复杂性（图21）。如何联结这些小单元桁架是个关键问题，在国外一般采用现场焊接的方式，但由于高空焊接量太大，焊接完成后就不好调整位置，焊接变形也不易控制，因此难以保证工艺和质量。另一种是将小单元桁架预制成大块，再在空中联接，但重量过大，吊装有困难。经过反复研究，找到了用高强螺栓联结小单元桁架的方法，这种联结受力好，施工较简便。网架的联结不仅是构造问题，并且必须保证节点的双向受力能力。为了确保双向受力节点的安全，在铁道研究所及清华大学试验、试用的基础上，又对高强螺栓做了一些拉力、扭矩及滑移试验。此外，还做了九个节点的足尺实物，进行了十一种受压破坏试验，通过试验不断总结经验，改进设计，保证安全系数为1.9。

表 1 小单元桁架件数表

单元号	形式	件数
I		8
2		16
3		20
4		8
5		12
6		16
7		8
8		4
9		4
II		4
2		16
3		4
4		8
5		34
6		20
7		8
8		80
9		12
10		12
11		8
12		32
13		12
14		4
15		16
16		8
17		64
18		12
19		44
20		10
21		4
22		2
III		4
2		8
3		10
4		2
5		2
6		2
共		544

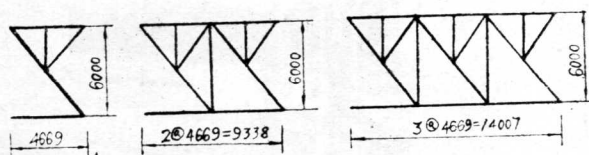


图 6

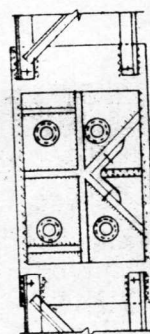
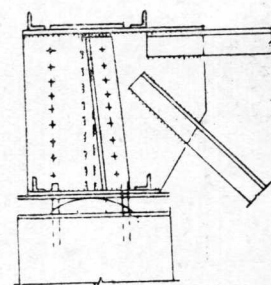
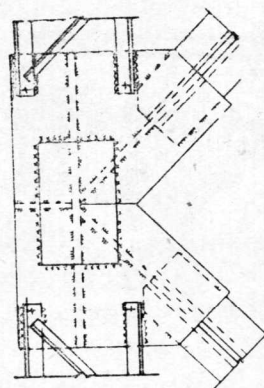


图 7 一般支座示意图

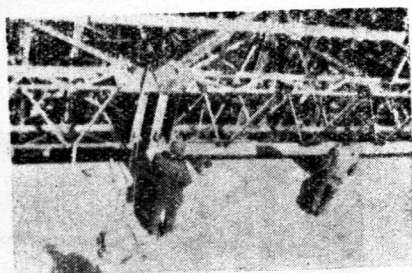


图 8 边梁及一般支座外观。支座是由两个半支
座在柱头上用高强螺栓拼成整体



图 9 边梁的下架

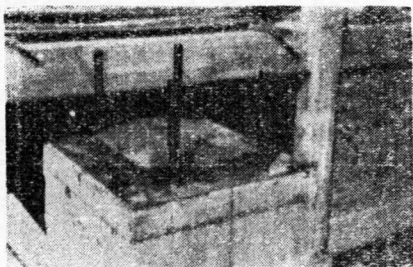


图10 一般支座的柱头滑板

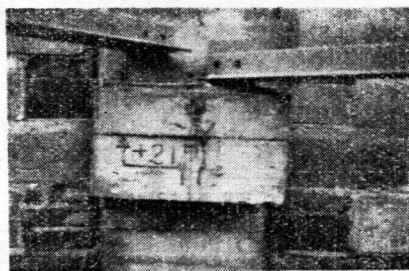


图11 钢网架下弦另杆与柱身伸出的牛腿用螺栓连接

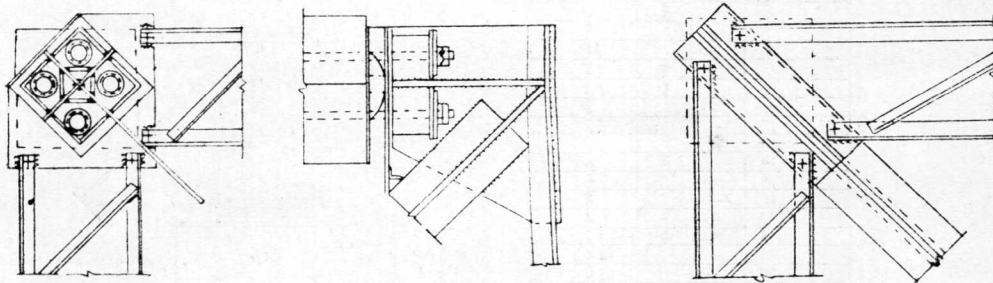


图12 角支座示意图

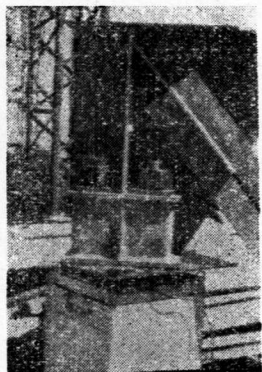


图13 角支座外观。用4M72方口螺纹锚栓承担147 T的拉反力

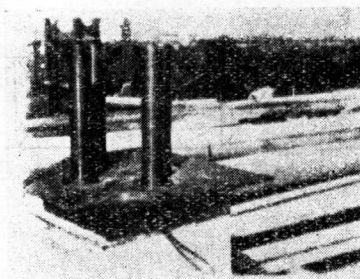


图14 角支座锚栓在浇主体结构时筑入角柱内

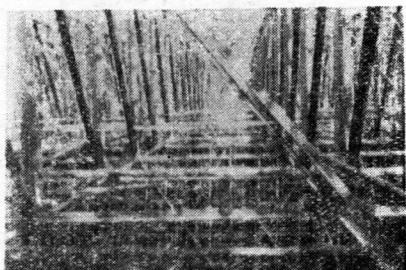


图15 网架的节间前视



图16 网架上节点

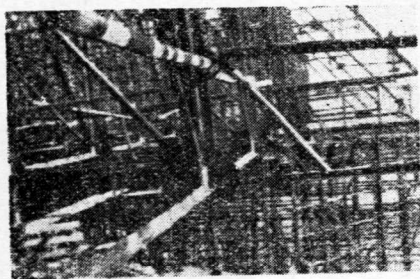


图17 网架下节点

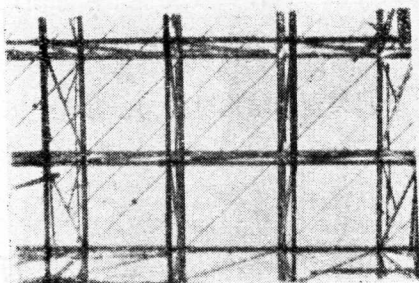


图18 钢网架仰视。斜线为薄壁槽形檩条，与网架组合成三角形，构成稳定的几何不变体系。

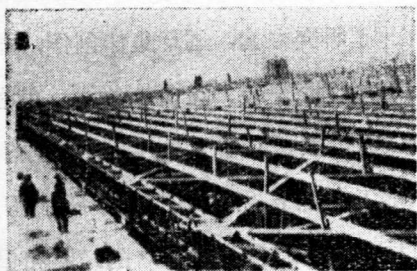


图19 檩条及边梁

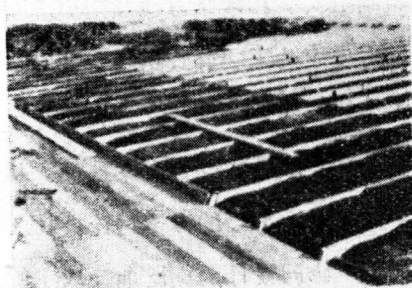


图20 椽上置木椽，木椽间放保温层，椽上钉望板，上做油毡及铝板。

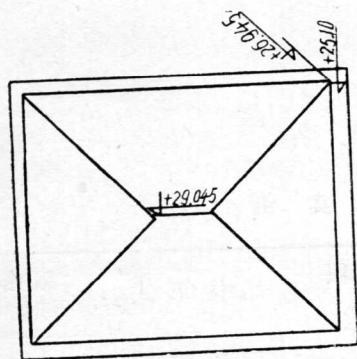


图 21

在安装上，面对着这样一个既没有干过也没有见过的新结构，安装工作也十分困难，544 榀小单元桁架要用两万多个螺栓联结，每榀都要求安装在十分准确的位置，否则螺栓孔对不上，整个网架就不能合拢。而大部分拼装工作都是在28米高空操作，困难很多，但是用毛泽东思想武装起来的中国工人阶级面前没有克服不了的困难，他们豪迈地说：“工作就是斗争，就是克服困难，没有困难还叫什么工作？困难再大，措也要把它措上去！”工人同志

的革命精神给了技术人员以极大鼓舞和教育，他们密切配合，万众一心，边安装，边测量，边校正，只用了51天就胜利地完成了整个网架的安装任务，安装质量十分良好。

首都体育馆的平板型“空间网架”屋盖经过四年的实际考验，还经历了二次地震，每年所作的检查表明，情况是正常的。事实证明这种新结构满足了建筑使用的要求，用钢量和造

价都比较经济,制作和安装也比较方便,符合多快好省的要求。

本报告除介绍设计的情况外,还扼要地介绍了安装情况,同时也总结了一些经验教训,以便建造同类型的结构时作为参考。

二、方 案 比 较

如何将 11000M^2 的大面积屋盖多快好省地如期建成,选择一个技术先进、经济合理、材料易得、制造安装和维修方便及造型美观的结构方案,是首先要解决的实际问题。我们遵照伟大领袖毛主席关于“群众路线”的教导,请老工人一起研究方案,进行集体创作,并对国内外体育馆的结构方案进行了调查研究,落实了材料、制作、安装、运输等条件。在这个基础上又举办了全院性的综合方案征稿。从66年3月到5月,共进行了九种屋盖结构方案的比较,开了大、中、小型的方案讨论会15次,并与建工部工业院金属结构室、数学所、建研院、华北金属工厂协同设计,广泛地吸取了广大的工人、技术人员、科研工作者的经验和倡议,结合使用单位的需要,最后才决定采用由平面桁架组成的斜向直交空间网架结构。

兹将调查研究、综合分析及方案比较的情况分述于后:

1.国内外体育馆各类屋盖简况

国内外几十个体育馆各类屋盖简况见表2、3*。

表2 国内体育馆实例

序 号	名 称	建造时间 (年)	屋 盖 面 积 (M^2)	结 构 形 式	用 钢 量 (kg/M^2)
1	北京体育馆	1954	54×71	三 铰 钢 架	55
2	天津体育馆	1956	52×68	网 壳	55
3	北京工人体育馆	1962	圆形直径94	圆形双层悬索	54
4	杭州体育馆	1966	椭圆形 60×80	马鞍形悬索	25
5	南宁体育馆	1966	54×66	三角形钢管 桁 架	30

* 本院技术情报组资料

表3 国外体育馆实例

序 号	名 称	建造时间	屋 盖 面 积	结 构 形 式	附 注
1	奥地利英斯 布鲁克溜冰馆	1962年动工	91M × 140M	钢桁架	用钢量 95kg/M ² 1964年奥运会 使用
2	捷克斯洛伐 克布拉格伏契 克公园体育馆	1962年改建	85M × 95M	拱形钢结构	同年3月世 界花样滑冰赛 及27届世界乒 乓球赛使用
3	西德陶塔蒙 特韦斯菲林体 育馆	1951年重建	椭圆形 长轴118M 短轴98M	悬臂钢架梁	
4	南斯拉夫卢 布尔亚那体育 馆	1965年4月	70M × 106M	钢桁架	28届世界乒 乓球赛使用
5	日内瓦体育 馆	1958年	80M × 94M	钢架	
6	印尼雅加达 体育馆	1962年	67.5M × 82.5M	钢桁架(三 角形断面)	新兴力量运 动会使用
7	日本武道馆	1964年	正八角形内 径80M	钢结构	
8	澳大利亚墨 尔本体育馆	1963年	76M × 97M	钢管桁架	
9	美国洛杉矶 体育馆	1960年	椭圆形 长轴131.1M 短轴96M	钢桁架	
10	苏联莫斯科 鲁日尼克体育 馆	1956年	90M × 144M	钢桁架	
11	苏联列宁格 勒大街溜冰馆	1962年报导	68M × 95M	钢桁架	

12	西班牙马德里体育馆	1959年	椭圆形 136M × 126M	圆弧顶三铰拱钢架	
13	意大利都灵市体育馆	1962年	圆形 内径77.5M	钢拱球形铰结	以上为钢桁架
14	巴西圣保罗体育馆	1956年	圆形 直径104M	钢结构穹顶	
15	美国霍斯顿体育馆	1965年	圆形直径 200M(高61M)	钢网架穹顶	
16	美国匹兹堡体育馆	1961年	圆形 直径125M		以上为网穹顶
17	美国加利福尼亚体育馆	1966年3月报导	91M × 122M (目前美国该类结构中最大者)	空间平板钢网架 正方形网格, 上下弦错开, 共238个接点, 9 × 12分格, 中央高30呎, 边缘高17呎	用钢量 73.23kg/M ² A—441钢 H形截面用 10WF, 14WF 屈服点=2953—3515 造价3.75 + 0.35美元/呎 ²
18	瑞典斯德哥尔摩约翰斯霍支体育馆	1962年	83M × 128M	组合悬索	上索φ58 下索φ48 R=80kg/mm ²
19	日本代代木大体育馆	1964年	34, 572M ²	螺旋形单层悬索金属屋盖	1964年奥运会使用
20	乌拉圭蒙得维地业体育馆	1958年	圆形 直径94M	单层悬索钢拉环直径35M	
21	加纳阿克拉体育馆	方案 (1963年)	圆形 直径126M	预应力单层悬索	
22	意大利热内约体育馆	1963年	圆形 外径160M	自行车轮式悬索屋盖	
23	美国渥克兰体育馆	1966年	圆形 128M	圆形悬索	

24	美国加利福尼亚奥运会滑冰场	1960年	75M × 91.5M	悬挂式人字钢屋盖	
25	美国奥克拉霍玛展览馆	1964年	椭圆形 120M × 96M	碟式悬索装配式壳板	
26	美国菲尼克斯展览馆	1965年	圆形 直径110.4M	马鞍形悬索装配式壳板	
27	日本静岡体育馆	1956年	3500M ²	马鞍形悬索	以上为悬索结构
28	意大利罗马大体育馆	1960年	圆形 100M	钢筋混凝土肋形穹顶	

2. 从調查研究所得的初步概念

经过对国内外几十个大型体育馆结构方案的调查研究和分析,以及对国内各重点体育馆的实地考察,我们归纳出下列几种结构形式。

(1) 悬索结构

最常见的为圆形悬索,因为圆形为极对称,索的内力和长度均一致。其中单层悬索如乌拉圭的蒙得维地亚体育馆,直径为94M,美国渥克兰体育馆直径为128M。这种单层悬索常做刚性面层,以加大屋盖的空间刚度,但这种屋面如锅底向下陷,室内有压抑感,而且屋面排水困难。

第二类为圆形双层悬索,形如卧置的车轮,以上索施加张力,造成下层承重索的预应力状态,以保证屋盖的必要空间刚度,一般可用柔性屋面,泄水比较方便。我国的北京工人体育馆(直径为94M)和意大利的热内约体育馆的屋盖采用这种结构。

第三类是由负高斯曲面组成的鞍形或鞍形截体的悬索屋盖,如我国杭州体育馆屋盖为椭圆形,长轴80M,短轴60M;美国奥克拉霍玛展览馆亦为椭圆形,尺寸为120M × 96M;美国菲尼克斯展览馆为圆形,直径为110.4M;日本静岡体育馆为方形平面的马鞍形悬索(在表面做刚性复盖,形成刚性的预应力壳体)。这几个体育馆均属此类,这是良好的大面积复盖形式,但刚性屋面造成屋盖重量过大,因而加大了材耗。而且鞍形悬索两端高,中间低,造型比较难处理。

悬索结构随着近年来高强线材的发展,建造跨度愈来愈大,形式亦有多种变化的可能,是一种颇有发展前途的大跨度结构形式。其特点是可以极小的结构自重(一般小于10kg/M²)实现极大跨度的复盖。但是为了承受索端的巨大水平张力,必须设置强大的外环或锚索,如

果索按径向布置则还要加设中心环。这样就会增加材料的消耗。另外高强线材的单价较普通碳钢为贵，因此其技术经济指标并非十分优越。如北京工人体育馆为直径94M的圆形双层径向布索的悬索屋盖，柔性屋面，复盖面积为7000M²，屋面标准荷载150kg/M²。材耗：下索为9.5kg/M²；上下索共15kg/M²；中心钢环17.2kg/M²；外环为2M×2M混凝土环，用钢量平均为14.3kg/M²；总耗钢54kg/M²，混凝土折合厚度17.2cm。又如1966年建成的杭州体育馆为80M×60M的椭圆形鞍形悬索屋盖，主索沿长向布置，复盖面积3780M²，柔性屋面，屋面计算荷载80kg/M²，耗钢25kg/M²，是比较经济的，但首都体育馆工程屋面荷重较大，且圆形或椭圆形平面均不能符合本工程的使用要求，所以没有选用悬索结构。

(2) 钢桁架

这是历史最悠久的结构形式，由于高强钢材及材型的发展，至今仍为常用的大跨度复盖结构。如1962年兴建的奥地利的英斯布鲁克溜冰馆跨度为91M，仍用了钢桁架，用钢量为95kg/M²。1963年兴建的澳大利亚墨尔本体育馆跨度为76M，采用钢管棱形桁架，法国某工厂的主桁架为钢管三角形的空间桁架，跨度为66M。1966年我国南宁体育馆也利用管材组成三角形的桁架，跨度为54M（设计荷载160kg/M²）。这些桁架是在旧有基础上逐步改进发展起来的，利用空间桁架的稳定性，减少了桁架间的支撑系统，并利用管材抗压的优越性能，但对于超过百米跨度的建筑使用这种类型结构，仍嫌占用空间高度太大。

(3) 网架

由复杂的杆系组成静不定次数极高的空间结构，具有各向受力的性能，改变了一般桁架平面受力的情况，因而空间网架结构是大、中跨度屋盖的一种合理的结构形式。近年来由于电子计算技术的发展和普及，从不能求解的高次静不定系统，获得应力分析的可能，把空间结构从应力分析的束缚中解放出来，应用于大面积刚性复盖。

就网架结构的组成来说，可分为单层网架和双层网架，就其外形而言，又可分为网板和网穹（即网壳）二种。其中网穹，利用结构一定的起拱度来实现外力的空间传布。如美国1965年建成的霍斯顿体育馆网穹直径达200M，高达61M。美国威司康辛82.3M直径的网穹，耗钢量为60kg/M²。但是这样的屋盖由于多余的上凸而增加了建筑容积，从而增加了建造费用，以及采暖通风、照明等项的常年费用。此外网格构造比较困难。对于经常遇到的矩形平面来说，单曲或双曲面空间结构还需要设置承受巨大推力的特殊设施，消耗大量材料，降低了整个结构空间受力获得的经济效果。天津体育馆的52M×68M网穹，由于设计是按单元截体的平面拱计算的，没有考虑网穹的空间受力性能，减低了优越性。网架包括下

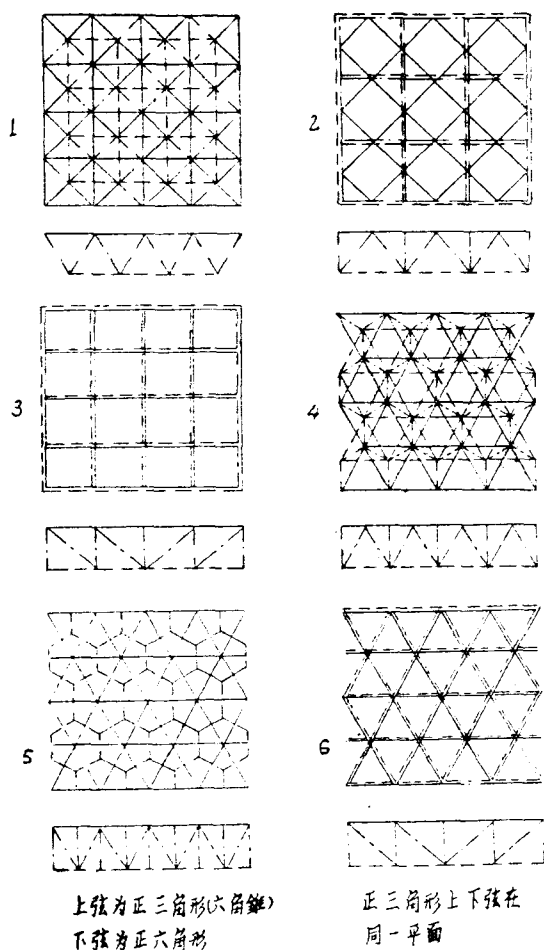


图 22

——上弦 ————下弦 —·—·—腹杆
 1-正方形, 上下弦错开(四角锥) 2-正方形上下弦斜交 3-正方形网格上下弦在同一平面 4-上下弦为正三角形 5-上弦为正三角形(六角锥), 下弦为六角形 6-正三角形上下弦在同一平面

部拉杆在内, 用钢量为 $55\text{kg}/\text{M}^2$ 。如按网穹计算, 穹体用钢量指标可能有所压缩, 但边梁指标肯定骤增, 总的指标不可能有大幅度降低。

平板型网架结构是一种无推力的空间结构, 目前在国内外已开始应用于建筑工程中, 这种结构采用互相交叉的平面或空间桁架组成空间受力体系, 其内力的传递与双向板极为相似, 可以区别情况, 分别按各向同性板或无扭矩平板或交叉梁系来求解。这种屋盖的跨度, 目前建成的以 $30\text{M}\sim 60\text{M}$ 为多, 更大的尚不多见。美国1965年建成的加利福尼亚大学体育馆, 跨度达 $91\text{M}\times 122\text{M}$, 用钢量为 $72.23\text{kg}/\text{M}^2$, 据其报导是当时世界上最大的平板型网架。日本某 $42\text{M}\times 48\text{M}$ 板型网架结构, 荷载为 $200\text{kg}/\text{M}^2$, 用钢量为 $55\text{kg}/\text{M}^2$ 。

这种板型网架的组成方式甚多, 由于上下弦杆所组成的网格不同, 以及腹杆的设置方式不同, 可有各种变化, 可归纳如图22的几种形式。

网架结构的节点构造比较复杂, 因为杆件是双向或三向的承重杆件, 有的节点有十余根杆件交在一起, 所以构造较平面桁架复杂, 如处理不当会影响安全及材耗。平板型网架

仅复盖面上的材耗指标较网穹等有推力的结构为大, 但由于没有推力, 边缘构件比较简单, 就整个材耗指标而言是经济的。其边界也可以根据实际需要有较强的灵活性, 为建筑面积的充分使用及建筑造型创造了较有利的条件。

3. 具体方案比较

我们虽从调查研究中得到一些概念认识, 又根据本工程的具体情况(建筑外型的朴素大

方、矩形平面等），选择下列三类结构方案作了具体计算来进一步分析比较。

(1) 由钢管组成的三角形拱架结构

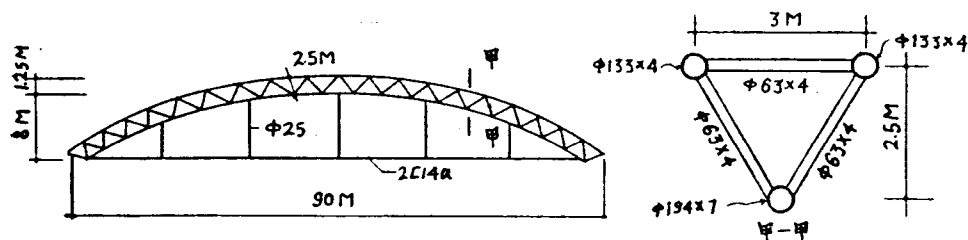


图 23

拱架的外形为抛物线（图23），计算荷载为 $200\text{kg}/\text{M}^2$ ，采用密排拱架（即每三米一个拱架），上弦最大压力为50.4T，由2φ133×4钢管组成，下弦最大压力为69.2T，用1φ194×7钢管，下弦一般压力为52.4T，用1φ194×5钢管，腹杆受力很小，按构造满足 $\lambda \leq 150$ ，用φ63×4钢管。拉杆76.5T，用2C14a。钢材使用情况如表4：

表 4 三角形拱架每樘用钢量（复盖面积 $90\text{M} \times 3.14\text{M} = 283\text{M}^2$ ）

杆 名	规 格	长 度 (M)	单 位 重 (kg/M)	重 量 (kg)
下 弦	φ194×7	7.75×2	32.28	500
	φ194×5	39.6×2	23.31	1860
上 弦	2φ133×4	46.9×2×2	12.73	2400
腹 杆	φ63×4	400×2	5.81	4600
拉 杆	2C14a	90×2	14.53	2600
下弦间连接杆	φ63×4	84	5.81	490
吊 筋	φ25	40	3.85	165
节 点 板	按20%计			2400
				共计15015

$$\text{折合每平米用钢量} = \frac{15015}{283} = 53\text{kg}/\text{M}^2 (\text{三号钢})$$

(2) 钢管梭形三角形桁架

桁架为正三角形的钢管桁架（图24），上弦呈直线，下弦为抛物线，每六米一樘（密排）跨中高度为8M，宽度为6M，计算荷载 $= 200\text{kg}/\text{M}^2$ ， $P = 200 \times 6 \times 6 = 7200\text{kg}$ 。钢材使用量如表5。