

预应力大跨度空间钢结构的应用与展望

董石麟

摘要:本文主要是阐述了我国预应力大跨度空间钢结构应用与发展的基本情况。这些预应力空间钢结构包括有预应力网格结构、斜拉网格结构、索穹顶结构、张弦梁结构、弓式预应力钢结构等。最后,本文展望了新世纪的预应力空间钢结构。

关键词:预应力结构 大跨度结构 空间钢结构 空间网格结构 索穹顶结构 弓式预应力钢结构 应用与发展 展望

1. 前言

预应力大跨度空间钢结构是把现代预应力技术引用到例如网架、网壳等网格结构、索、杆组成的张力结构、立体桁架结构等一类大跨度结构,而形成一类新型的、杂交的预应力大跨度空间钢结构体系。这一类结构受力合理、刚度大、重量轻,制作安装也比较方便,在近十多年来得到开发与发展,并在大跨度、大柱网的公共与工业建筑中得到应用,且受到国内外科技界和工程界的关注和重视,其推广应用和发展前景是无比广阔的^{[1][2][3]}。

采用预应力技术于大跨度空间钢结构具有如下的特色和优势。

(1)可以改变结构的受力状态,满足设计人员所要求的结构刚度、内力分布和位移控制。

(2)通过预应力技术可以构成新的结构体系和结构形态(形式),如索穹顶结构等。可以说,没有预应力技术,就没有索穹顶结构。

(3)预应力技术可以作为预制构件(单元杆件或组合构件)装配的手段,从而形成一种新型的结构,如弓式预应力钢结构。

(4)采用预应力技术后,或可组成一种杂交的空间结构,或可构成一种全新的空间结构,其结构的用钢指标比原结构或一般结构可大幅度的降低,具有明显的技术经济效益。

预应力空间钢结构预应力的施加方法通常有

两种:一种是在预应力索、杆上直接施加外力,从而可调整改善结构受力状态,致使内力重分布,或者形成一种新的具有一定内力状态的结构形式;另一种是通过调整已建空间结构支座高差,改变支承反力的大小,从而也可使结构内力重分布,达到预应力的目的。

预应力索、杆的材料通常可采用高强度的钢丝束、钢绞线,也可采用钢棒、钢筋。

2. 预应力网格结构

现代预应力技术与空间网格结构(包括网架与网壳)相结合便可构成预应力网格结构。通常施加预应力的方案有两种:一种是在网架的下弦平面下设置预应力索,如图1a所示,也可在网壳的周边设置预应力索,如图1b所示,通过张拉预应力索建立与外载作用反向的内力和挠度;另一种是通过网格结构支座高差强行调整就位(通常为盆式搁置就位,在使用阶段达到支座最终反力趋向于均匀化),使网格结构建立预加应力,如图1c所示。

预应力网格结构有下列特点:

(1)可采用高强度预应力拉索作为网格结构的主要受力杆件,以降低材料耗量。

(2)可采用多次分批施加预应力及加荷的原则(多阶段设计原则),使杆件反复受力,并在使用荷载下达到最佳内力状态;预应力网架结构的

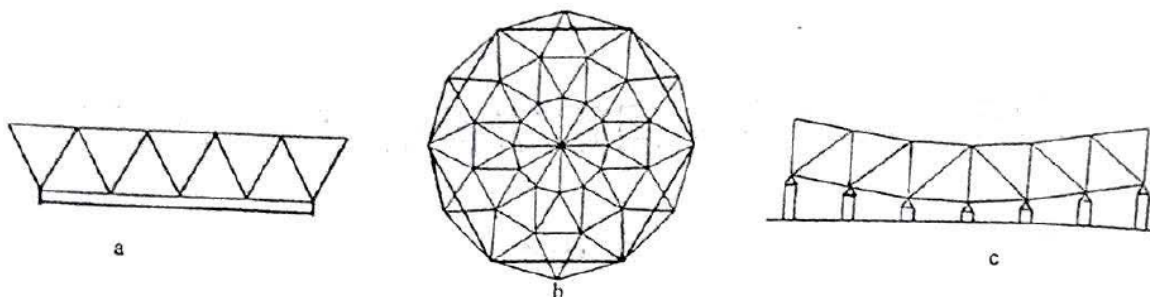


图1 预应力网格结构的预应力方案

简捷算法及施工张拉全过程分析可参见文献^[4]。

(3)通过预应力技术可提高整个网格结构的刚度,减少结构挠度。

(4)对于网壳结构可解决水平推力问题,适当配置支座滑动构造措施,利用预应力技术可形成无水平反力的自平衡结构体系。

(5)对于采用改变支座就位高差,调整结构内力分布的施加预应力方案,是一种最经济的预应力方法;此时,对网格结构无需增加任何杆件和零部件材料。

我国已建的预应力网格结构工程有十多幢,积累了丰富的设计与施工经验,其中有代表性的工程项目详见表1。

表1 预应力网格结构工程实例^{[5]-[6]}

序号	工程名称	网格结构形式	平面尺寸×厚度(m)	预应力技术特征	用钢指标或省钢率	建成年份	设计单位
1	天津宁河体育馆	正放四角锥网架	42×42×3	盆式搁置就位,角支座与边界中支座相对高差9cm	28.5kg/m ² 12%	1984	中国建研院结构所
2	重庆一中体育馆	斜放四角锥网架	37.8×37.8×2.34 四周悬挑5.4	盆式搁置就位,周边支座相对高差6.1m	23.1kg/m ² 9%	1993	重庆建筑大学
3	重庆南开体育馆	斜放四角锥网架	长六边形 33×66×2.2	盆式搁置就位,二对边及四斜边支座相对高差分别为2.8cm及7.3cm	19.8kg/m ² 11%	1993	重庆建筑大学
4	上海国际购物中心楼层	正放四角锥组合网架	27×27,截去12m腰边一角	下弦平面下20cm处增设四束高强钢丝铸锚束	48kg/m ² 32%	1993	上海建筑设计研究院
5	攀枝花市体育馆	三向短程线型双层球面网壳	74.8×74.8缺角八边形,矢高8.89m	八点支承,对角柱跨度64.9m,周边设八道预应力索,分二次建预应力值700kN	49kg/m ²	1994	攀枝花建筑勘察设计院
6	广东清远市体育馆	六块组合型三向双层扭网壳	边长46.82正六边形,矢高8.0	六点支承,对角柱跨度89m,周边设六道预应力索,每索建预应力值1600kN	44.3kg/m ²	1995	贵州工大设计院、清远市设计院
7	广东高要市体育馆	四块组合型三向双层扭网壳	54.9×69.3	四点(每边中点)支承,支承间共设四道预应力索,每索建预应力值1400kN	38.5kg/m ²	1995	贵州工大设计院
8	广东阳山市体育馆	双曲双层扁网壳	44×56	四角支承,周边共设置四道预应力索	43%	1996	贵州工大设计院
9	郑州碧波园	对角线局部三层(变高度)八面锥网壳	80×80(2.8~7.8)间等边八边形,矢高18.5	四对边端支座间沿边界共设四道预应力索,每索建预应力值700kN	43.5kg/m ² 15~20%	1996	云光建筑设计咨询开发中心
10	广东新兴县体育馆	四块组合型三向单层混合扭网壳	54×76.06	四点(每边中点)支承,支承间共设四道预应力索	28.2kg/m ² 43%	1997	贵州工大设计院
11	西昌铁路分局体育活动中心	矩形底球面网壳与外挑1至6m柱面网壳	59.7×42.7×1.25 矢高6.15	沿纵边七点支承,沿横向设置四道预应力索,分三次施加预应力	28.5kg/m ² 28%	1997	攀枝花建筑勘察设计院
12	江苏宿迁市文体馆	正放四角锥双层鞍形网壳	80×62.5×3椭圆平面	周边独立柱支承,在拱向沿下弦设十一道预应力索		1999	江苏省建筑设计研究院

从表1所列预应力网格结构工程可以看出:建筑造型和结构形式丰富新颖,结构跨度有逐年增大的趋势,预应力技术高科技含量显著,可大幅

度节省钢材耗量和工程造价。这表明预应力空间网格结构是一类方兴未艾,大有发展前途的空间结构体系。

3. 斜拉网格结构

将斜拉桥技术及预应力技术综合应用到网格结构而形成一种形式新颖、协同工作的杂交空间结构体系,可称为斜拉网格结构,它也是一种内部空间宽广、造型新奇、颇有景点特色的大跨度建筑结构。对于斜拉网格结构,这些年来结合工程和课题作了深入的研究^{[13]~[16]}。

斜拉网格结构有下列特点:

(1)通常由塔柱、拉索、网格结构三部分协调组合而成的杂交空间结构。

(2)可充分发挥钢拉索的高强度和施加预应力的优势,以降低钢材用量。

(3)可在网格结构区域内反向地面增加支承点,分割结构跨度,减小结构挠度,降低杆件内力峰值。

(4)通过张拉拉索,建立预加内力和反拱挠度,可部分抵消外载作用下的结构内力和挠变。

(5)在任意荷载工况下,不使拉索出现松弛,退出工作,为此通常需对拉索施加预应力。

(6)在承受向上、向下风荷载都很大且由风荷载控制设计时的斜拉网格结构,必要时尚应设置施加一定预应力的稳定索。

(7)拉索敷设宜多方位布置,切忌平面布索和单方向布索。

(8)拉索的倾角不宜太小,一般宜大于 25° ,否则将导致弹性支承作用减弱、内力过大和连接节点构造上的困难。

我国目前已设计和建成的斜拉网格结构十多幢,其中有代表性的工程项目详见表2。

表2 斜拉网格结构工程实例^{[17]~[21]}

序号	工程名称	网格结构形式	平面尺寸×厚度(m)	斜拉索布置及预应力技术特征	用钢指标或省钢率	建成年份	设计单位
1	北京亚运会综合体育馆	两块组合型人字剖面斜放四角锥柱面网壳	70×83.2	双塔柱,各柱向内至屋脊处设8根双索面单向拉索		1990	北京市建筑设计院
2	浙江大学体育场司令台	正放四角锥网架	24×40×1.2	四塔柱,每柱三根斜拉索及一根横向的水平索共14根拉索		1993	浙大空间结构研究中心
3	新加坡港务局(PSA)仓库A型	正放四角锥网架	4幢120×96	六塔柱,每柱四根斜拉索,每索由4Φ48不锈钢棒组成	35.2kg/m ² 20~30%	1993	中国冶建研究总院
4	新加坡港务局(PSA)仓库B型	正方四角锥网架	2幢96×70	四塔柱,每柱四根斜拉索,每索由4Φ48不锈钢棒组成	20~30%	1993	中国冶建研究总院
5	太旧高速公路旧关收费站	两块正放四角锥圆柱面网壳	14×64.718×1.5	独塔柱,共设有全方位布置斜拉索28根		1995	山西设计院浙大空间结构研究中心
6	浙江黄龙体育中心体育场	两块正放四角锥圆柱面网壳	2块244×50×3月牙形平面	两塔柱共四角,各肢至内环设9根斜拉索,在网壳上弦靠内环梁设备9根稳定索,锚固在外环梁	80kg/m ² (不含环梁)	2000	浙江省设计院与中国建研院结构所
7	深圳市游泳跳水馆	梭形主立体桁架及两侧各四道次立体桁架	120×80	沿主桁架成对布置四根桅杆,每桅杆有四根斜拉索(钢棒),使次桁架至少增加一支点		2001	澳cox建筑设计公司与深圳华森设计公司

从表2所列工程可以看出,浙江黄龙体育中心体育场为我国目前跨度较大的斜拉网壳,两塔柱间的距离达250米,每块月牙形网壳上弦面上巧妙地设置了九道稳定索以抵抗向上的风荷载,见图2。太旧高速公路旧关收费站为我国首次采用独塔式全方位面索的斜拉网壳。深圳市游泳跳水馆采用了由纵横向立体桁架系、四根桅杆及十

六根斜拉钢棒(其中四根又各再分为三根)组合的杂交空间结构,见图3。这些都表明我国的斜拉空间网格结构采用了较多的新技术,取得了长足的发展。

4. 索穹顶结构

由美国工程师盖格尔首次研究开发的索穹顶结构用于1988年韩国汉城奥运会体操馆(直径

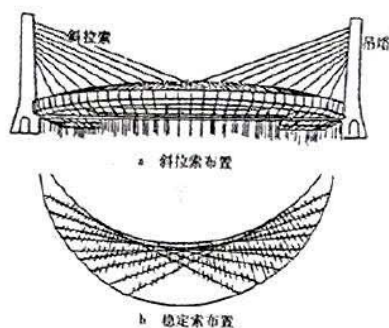


图2 浙江黄龙体育中心体育场挑蓬结构示意图

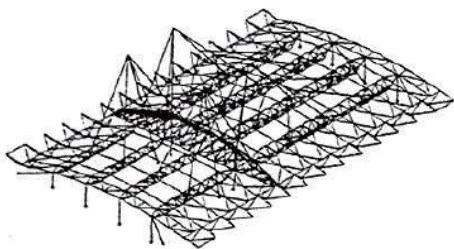
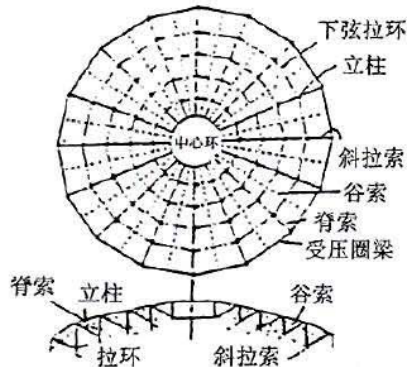
图3 深圳游泳跳水馆结构示意图
120m)和击剑馆(直径90m)^{[22][23]}。它由中心环、受压圈梁、脊索、谷索、斜拉索、环向拉索、立柱和

图4 索穹顶结构

结构,它可用于屋盖结构,见图6a,也可用于楼层结构,见图6b,还可用于墙体结构(如玻璃幕墙的立柱)。

张弦梁结构具有如下一些特点:

(1)张弦梁由下弦索、上弦梁和竖腹杆组成,索为受拉、杆为受压的二力杆,上弦梁为压弯杆件。

(2)通过拉索的张拉力,使竖腹杆产生向上的分力,导致上弦梁产生与外荷载作用下相反的内力和变位,以形成整个张弦梁结构及提高结构刚度,通常情况下弦索为一向下的圆弧线(实际上为折线多边形)。

扇形膜材所组成,见图4。此后,美国工程师李维进一步开发了双曲抛物面——张拉整体穹顶用于1996年美国亚特兰大奥运会主体育馆——乔治亚穹顶(240m×193m椭圆形平面)。它与索穹顶不同的有四点:一是适用于椭圆形平面,二是以两向斜交的上弦索网代替脊索与谷索,三是要增设中央桁架,四是以平面投影为菱形的膜材代替扇形膜材,见图5。

至今,包括双曲抛物面——张拉整体穹顶在内的索穹顶结构连同台湾在内的世界各地已建成了十多幢,然而在我国大陆尚未建成一幢。在技术封锁和缺乏资料的情况下,对索穹顶的理论分析和试验研究方面已做了大量的工作,相信不久在我国亦可建成自行设计与施工的这类新建筑。

5. 张弦梁结构

张弦梁结构是最近几年发展起来的大跨度钢

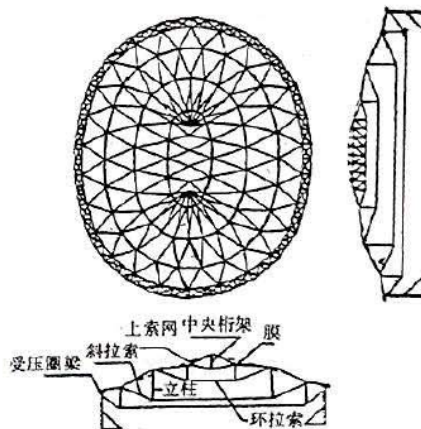


图5 乔治亚穹顶

(3)屋面应设置支撑体系以保证平面外的稳定性。

(4)宜采用多阶段设计,分析计算时应考虑几何非线性影响。

(5)在支座处宜采取必要的暂时的或永久的构造措施,在预应力及外荷载作用下(指自重等屋面荷载作用下)形成自平衡体系,不产生水平推力。

(6)上弦梁可改用立体桁架,此时张弦梁便成为带拉索的杆系张弦立体桁架,可使结构计算及构造得到简化。

(7)可从平面张弦梁结构发展到空间张弦梁

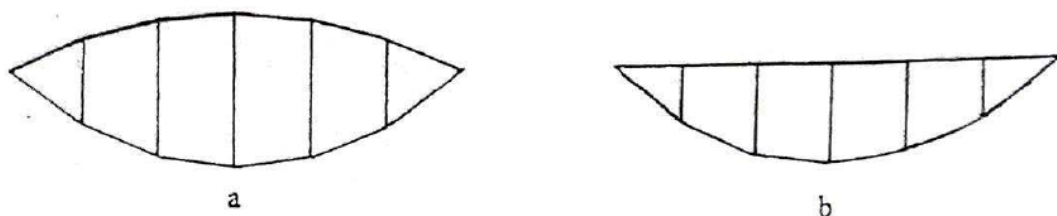


图6 张弦梁结构

结构,如两向正交正放张弦梁系结构等。

我国大跨度张弦梁结构刚开始采用。有代表性的工程有浦东国际机场航站楼屋盖²⁴,复盖进厅(R_1)、办票厅(R_2)、商场(R_3)和登机廊(R_4)四个大空间,其支点的水平投影跨度分别为49.3m、82.6m、44.4m和54.3m,张弦梁的间距为9m,纵向总长度 R_1 、 R_2 、 R_3 为402m, R_4 为1374m。张弦梁的上弦由一根平行方管组成,中间主弦为400×600焊接方管,两侧付弦为300×300方管,由两个冷弯槽钢焊成,主付弦之间由短管相连。腹杆为圆钢管,上弦与腹杆均采用Q345国产低合金钢,下弦为国产高强冷拔镀锌丝束,外包高密度聚乙烯。结构的平、剖面图详见图7(这里只给出 R_2 、 R_4 两跨结构)。斜钢柱为双腹板工字柱,按18m轴线间距成对布置,由于与张弦梁不在同一平面,在柱端及张弦梁间设置一宽度为1700mm、高度为1300mm的纵向空间桁架,上下弦及腹杆均为焊接方管。屋面的支撑体系和 R_2 斜柱间的支撑见图7。为抵抗风吸力,在 R_2 上弦梁的中部灌注水泥砂浆配重。为解决 R_4 整个结构系统横向不稳定状态和提高纵向刚度,采用群索设备方案,每4根为一组,每轴线处设两组,按空间倒四棱锥布索,每根索的上端锚固于两榀张弦梁之间的加强檩上,下端集中锚固于钢筋混凝土短柱上。下弦锚具及群索上下端锚具见图8a、b。上海浦东国际机场航站楼张弦梁结构是法国安特鲁的方案,但华东建筑设计院作了很大的改进和创新。

第二个有代表性的工程是广州会展中心屋盖,采用了张弦立体桁架结构,跨度为126.5m,间距15m,其结构简图如图9所示。广州会展中心由日本佐藤株式会社综合设计事务所设计,国内配合合作单位是华南理工大学建筑设计研究院,该工程预计在2002年建成使用。

6. 弓式预应力钢结构

弓式预应力钢结构是我国科技人员研制、开发的一种矩形截面格构式空间拱结构,连同纵向支撑和系杆檩条,可构成圆柱面屋盖结构^[25,26,27]。现已成为北京智维新弓式结构公司的专利产品,其结构特点如下:

(1)弓式预应力钢结构由两节间的预制拱片、水平系杆、起横膈作用的节点体及串段拉筋组成,两片拱片、上下水平系杆及两片节点体可构成一段矩形截面格杆式空间桁架(图10)。

(2)拱片、节点体等均可工厂制造,在现场地面施工,逐段组装,空中成形弓式预应力格构式拱结构。

(3)串段拉筋一方面可作为安装用的连接筋,另一方面又可作为预加应力的拉筋。

(4)在弓式预应力格构式拱结构间加上上弦系杆(檩条)及纵向支撑(交叉拉筋),便可形成圆柱面局部双层网壳结构。

(5)要进行施工安装阶段的全过程分析,施工安装阶段可按两端简支逐步增长的曲拱计算(使用阶段通常按两端固定的无铰拱计算)。

(6)可由小(轻)型杆件、且无需大型吊装设备,便可组装成大跨度空间结构,施工安装速度快。

(7)可适用于永久性建筑,也可适用于可装拆的临时性建筑。

(8)用钢量与同等跨度的柱面网壳结构相当,但水平推力减小,杆件均采用小型方钢管和圆钢筋,现场无焊接工作量,施工费用低廉,综合技术经济指标较好。

我国已建成的弓形预应力钢结构近20幢,其中有代表性的是:乌鲁木齐石化总厂游泳馆,跨度80m,用钢指标43.5kg/m²;北京国展中心八号馆,跨度60m,用钢指标31.7kg/m²;钓鱼台国宾馆网球馆,跨度40m,用钢指标32.5kg/m²;在东北还进行了165m跨度弓形预应力钢结构的试拼装。

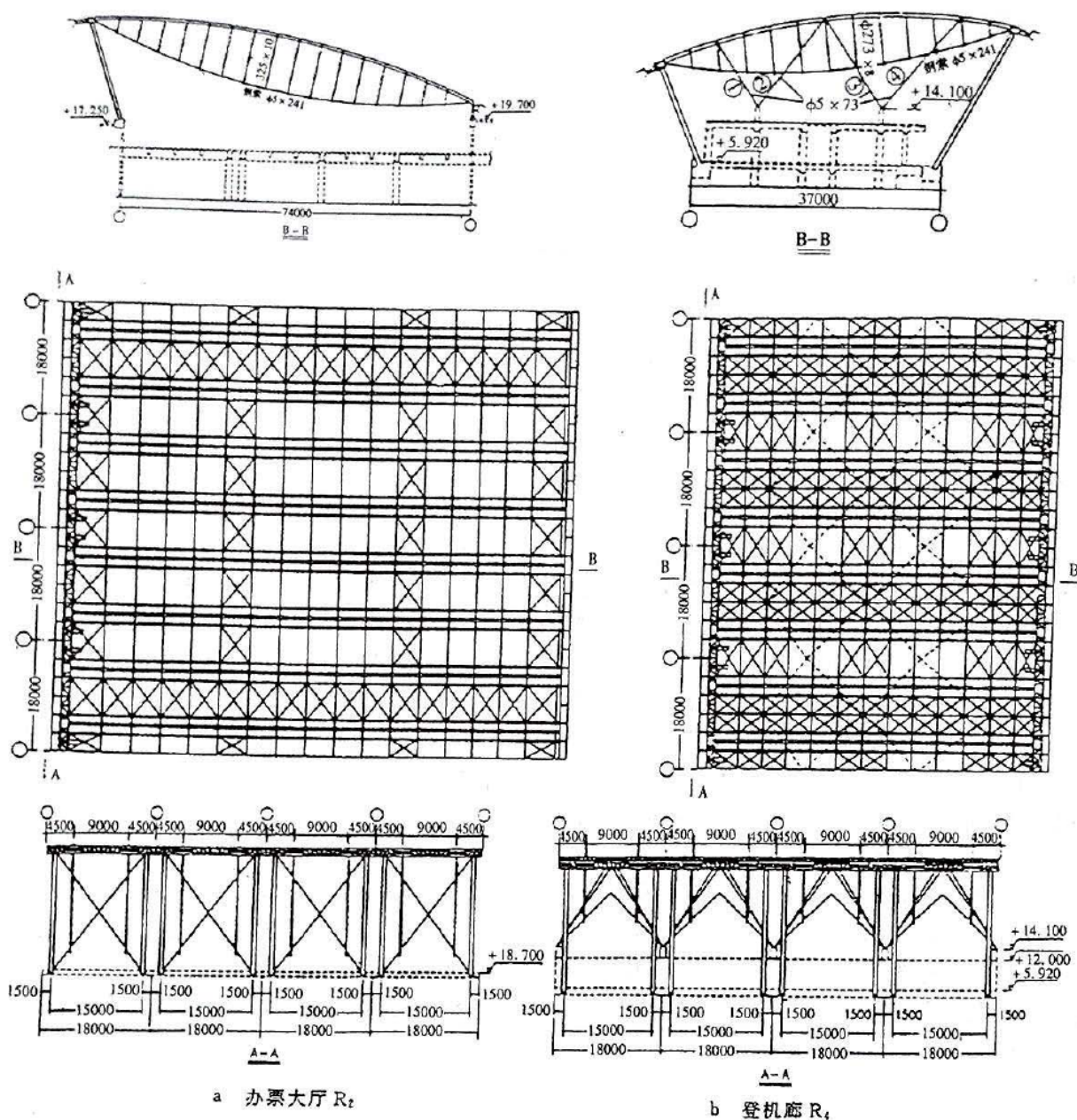


图7 浦东国际机场航站楼结构示意图

7. 展望

我国在二十世纪末期已研制、开发、采用各种形式的预应力空间钢结构约 80 幢,充分显示出这类结构的众多特点和优势,具有强大的生命力,是空间结构发展的一种新趋向。展望二十一世纪,预应力空间钢结构将会更加发挥其固有的特色和活力,获得更为广阔的应用和发展,在以下几方面是值得引起关注和重视的。

(1)我国目前预应力空间钢结构的最大跨度

是正在兴建的广州国际会展中心 126.5m 跨的张弦立体桁架结构,国际上英国伦敦的千禧穹顶已达 325m(域内多点支承)。看来,今后十到二十年内,跨度达到 200 - 300m 是会比较平常的,最大跨度可达到 400 - 500m。

(2)应进一步提高和完善在我国已有规模应用的预应力、斜拉网格结构、张弦梁结构和弓式预应力钢结构。

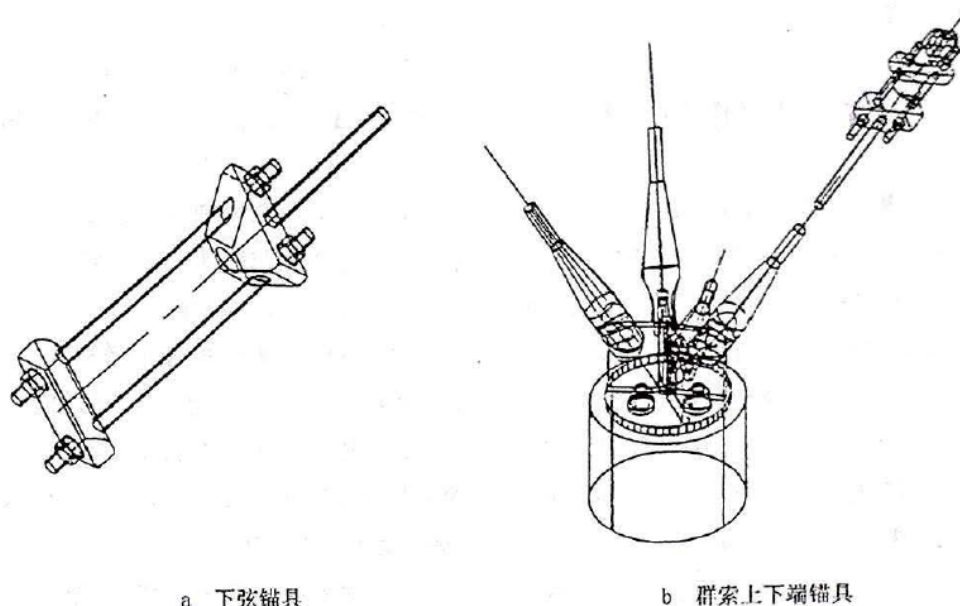


图8 浦东国际机场张弦梁结构主要节点示意图

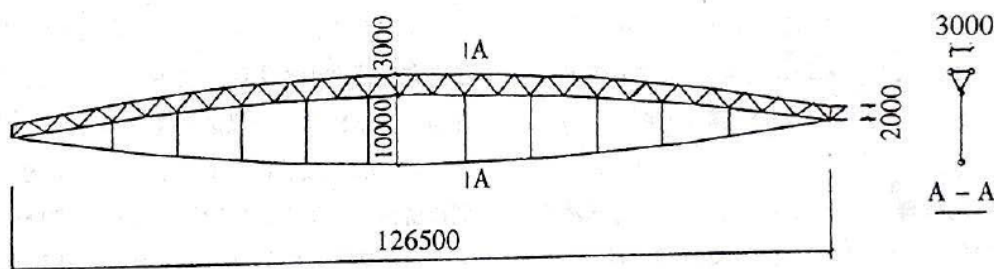


图9 广州会展中心张弦立体桁架结构

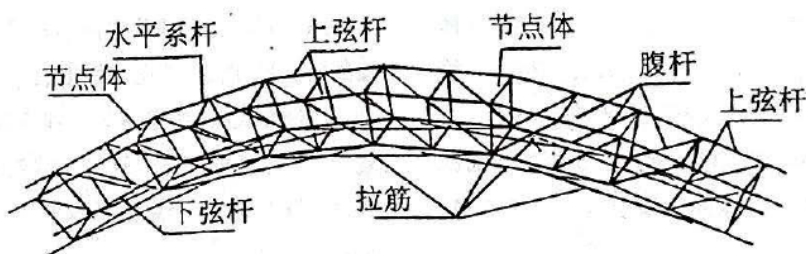


图10 弓式预应力钢结构局部示意图

(3)要集中力量并与承建单位一起研制、开发和推广索穹顶结构,特别要在最短期间内力争建成我国第一幢索穹顶,打破零的突破。

(4)要研究探索预应力空间钢结构的新材料(如膜材、粗钢棒等)、新结构、新节点、新工艺,在创新上下功夫。

(5)要研究解决预应力空间钢结构的尚未获得圆满解决的前沿课题:风振、抗震、结构控制、结构找形和优化,提供实用的分析设计计算方法及

其相应的程序系统。

(6)考虑到预应力大跨度空间钢结构常用于体育馆、航站楼、会展中心等一类公共性的窗口建筑,代表着一个国家和地区建筑技术水平的集中标志。因此,结构工程师与建筑师必须密切合作,多种技术学科也必须交叉、配合,这样才能创建具有时代特征的、高科技含量的新颖空间结构。

参考文献

- 1 陆赐麟. 预应力空间钢结构的现况和发展. 空间结构, 1995(1): 1-13
 - 2 董石麟, 赵阳, 周岱. 我国空间钢结构发展中的新技术、新结构. 土木工程学报, 1998(6): 1-11
 - 3 陆赐麟. 现代钢结构的发展与最新成就. 现代土木工程的新发展, 南京: 东南大学出版社, 1998: 157-166
 - 4 董石麟, 邓华. 预应力网架结构的简捷算法及施工张拉全过程分析. 建筑结构学报, 2001(2): 18-22
 - 5 熊盈川, 董石麟, 相永革, 吴鄂初. 天津宁河县体育馆的设计与施工. 建筑结构, 1985(6)
 - 6 陈良春, 支连芳, 何培斌, 熊洪俊. 盆式支承网架的合理应用. 空间结构, 1997(1): 25-28
 - 7 姚念亮, 李良勇等. 螺栓环节点与预应力组合网架的设计研究及应用. 空间结构, 1994(1): 39-46
 - 8 马克俭, 张鑫光等. 大跨度组合式预应力扭网壳结构的设计构造与力学特点. 空间结构, 1994(1): 55-63
 - 9 尹思明, 胡瀛珊, 苟克成, 董绍云. 预应力钢网壳的某些静力性能研究. 空间结构, 1995(2): 38-47
 - 10 朱坊云, 孙建设等. 郑州碧波园网架设计与施工. 第八届空间结构学术会议论文集, 1997, 开封: 439-443
 - 11 尹思明, 胡瀛珊, 刘旭, 董绍云. 西昌铁路分局体育活动中心多次预应力钢网壳空间结构设计与研究. 第八届空间结构学术会议论文集, 1997, 开封: 564-569
 - 12 尹士公, 樊德润, 周友根. 宿迁市文体馆双曲抛物面网壳结构设计. 第九届空间结构学术会议论文集, 2000, 肖山: 717-721
 - 13 董石麟, 罗尧治. 斜拉网架的简化计算. 建筑结构, 1993(8)
 - 14 唐曹明, 严慧, 董石麟. 斜拉网架静力性能的研究. 第六届空间结构学术会议论文集, 北京: 地震出版社, 1992
 - 15 周岱, 董石麟, 邓华. 斜拉网壳结构的动力特性和非线性地震响应分析. 第八届空间结构学术会议论文集, 1997, 开封: 208-214
 - 16 赵基达, 宋涛, 张维岳, 焦俭. 浙江黄龙体育中心体育场挑蓬结构设计分析. 第八届空间结构学术会议论文集, 1997, 开封: 139-144
 - 17 崔振平, 张国庆. 国家奥林匹克中心综合体育馆屋盖结构设计. 建筑结构学报, 1991(1)
 - 18 吴耀华, 张勇, 陈云波. 新加坡港务局(PSA)仓库斜拉网架设计. 第七届空间结构学术会议论文集, 1994, 文登: 467-471
 - 19 张宋升, 王昆旺, 严慧, 罗尧治, 董石麟. 太旧高速公路旧关主线收费站斜拉网壳结构设计. 空间结构, 1997(2): 40-45
 - 20 焦俭, 宋涛, 赵基达, 钱基宏, 冯济平, 张维岳. 浙江省黄龙体育中心主体育场挑蓬斜拉网壳结构设计. 第九届空间结构学术会议论文集, 2000, 肖山: 753-759
 - 21 浙江大学建筑工程学院空间结构研究中心. 深圳市游泳跳水馆钢结构验算分析报告, 2000
 - 22 蓝天. 空间结构的十年—从中国看世界. 空间结构论文选集(三), 北京: 中国建材工业出版社, 2000, 1-7
 - 23 刘赐良. 现代空间结构的新发展. 现代土木工程的新发展, 南京: 东南大学出版社, 1998: 139-148
 - 24 汪大绥, 张富林等. 浦东国际机场(一期工程)航站楼钢结构研究与设计. 海峡两岸及香港钢结构技术研讨会暨2000年上海钢结构技术交流会, 结构工程师, 2000增刊: 218-221
- (本文转自《第一届现代结构工程学术会议》论文集 2001年7月)