

体育场罩篷的结构选型与造型

Stadium Roof Types and Strcuture System Design

撰文 中国建筑设计研究院体育建筑研究小组¹

摘要 通过探讨体育场罩篷的形（传力方式）与质（结构形式）来概括体育场结构选型的基本类型。并在此分类的基础之上，划分了建筑造型的流派，意图通过流派的分类在结构选型与建筑设计间建立连接。

关键词 传力方式 结构形式 建筑造型基本流派

1 体育场的跨度与传力方式问题

“stadium”一词曾作为古希腊的计量单位，大约相当于185m（607英尺），而大跨度结构是指单跨长度超过30m的各种结构形式，而这个标准与目前体育场的巨大尺度相比，实在是算不了什么了。随着体育场观赛标准的提高，体育场罩篷的覆盖面积也越来越大，面对体育场罩篷日益增大的跨度问题，体育场通常会采用以下5种传力方式作为体育场罩篷的传力方式。

（1）单挑。这种罩篷常应用于60m以下的跨度范围。当跨度较小时，罩篷可通过型钢从看台后部直接出挑，典型案例有意大利的Stadio San Nicola体育场。当跨度较大时，罩篷通常采用一拉一压两个杆件来平衡罩篷出挑的自重（图1），典型案例有北京奥体中心体育场、柏林奥林匹克体育场（屋面改造工程）等诸多案例。由于此种传力方式跨度不大，较为经济，在体育场罩篷设计中最为常见。通常为了平衡罩篷出挑的自重，也常采用高杆加拉锁的传力方式（图2）。

（2）双挑。这种罩篷利用向两个方向的出挑来平衡对支撑结构的扭转（图3），但向后出挑的罩篷下方不宜布置座席，比较浪费故比较少见。现有案例有苏黎世Letzigrund体育场和墨西哥Estadio Chivas体育场。也有采用拉锁平衡罩篷自重的案例，如台州体育场（图4）。

（3）两点支撑。这种罩篷传力方式需要为罩篷找两个支撑点，在实际情况中即以巨拱横跨整个看台（图5）。典型案例为雅典奥林匹克体育场。此种传力方式的问题是巨拱自身的失稳问题，通常会采用高杆加斜拉的方式对巨拱进行约束，如葡萄牙Estadio Algarve体育场。

（4）边缘受力，即整体受力的传力方式（图6）。不论是刚性罩篷还是柔性罩篷，整个罩篷需要形成一个稳定的整体。打个比方说，当屋盖为刚性时，屋盖就像一个盖在锅沿上的锅盖；而当屋盖是柔性时，屋盖就像绷在鼓壁上的鼓面一样。刚性屋盖的典型案例有鄂尔多斯东胜体育场，柔性屋盖的典型案

例有基辅欧洲杯体育场。

（5）半边缘受力，即把1、3两种传力方式结合（图7）。此种受力方式避免了方式3中的失稳问题，也简化了方式1中的受拉杆件，典型案例有韩国大邱体育场。

2 体育场罩篷的结构形式

体育场罩篷的结构形式从应力状态上可分为无预应力与有预应力两大类，其中又可分为型钢、桁架、网架、网壳、张拉膜5小类。其中在常规情况下，按用钢量排序有以下顺序：

结构形式	张拉膜	网壳、网架	桁架	型钢
用钢量（kg/m ² ）	20~60	30~90	50~180	60~200

（1）张拉膜。此处所指的张拉膜结构不包括骨架膜这类以其他结构形式为依托的膜结构。张拉膜是一种用钢量很少的结构形式，通常会应用在边缘受力（整体受力）的传力方式情况下，如上文所说，就像绷在鼓壁上的鼓面一样。在少数情况下也会应用在半边缘受力，如韩国济州世界杯体育场。

（2）网壳、网架。网壳和网架也是一种用钢量很少的结构形式，其中网壳对于形的要求比较严格，若罩篷形状不规整，则会大大增大用钢量。此种结构多用于边缘受力（整体受力），比如深圳龙岗体育场采用了空间折板单层网格（网壳）的形式，深圳南山体育场（其最大出挑长度达38.8m^[1]）采用了封闭且构件为箱型截面的空间网壳。而双层（或多层）网架刚度较小、杆件较多，但可塑性较强，典型案例为株洲体育中心等。

（3）桁架。桁架是最为常见、适用性最强的结构形式，可适用于上述5种传力方式。由于桁架的使用性很广，因此以桁架为基础能够发展出丰富多彩的结构造型。

（4）型钢。通常用在跨度较小的罩篷中，如泉州海峡体育中心为型钢加单挑的模式。此外在雅典奥林匹克体育场的罩篷设计中采用的巨拱与钢梁也可归为型钢这一类型。

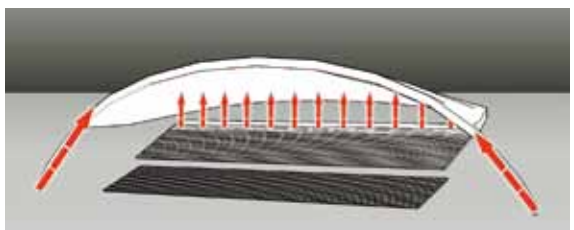
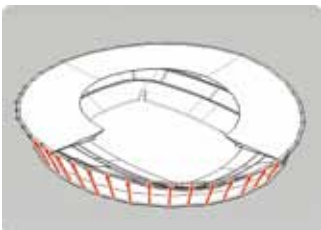
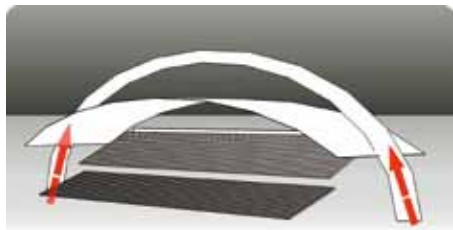
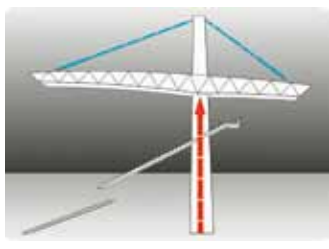
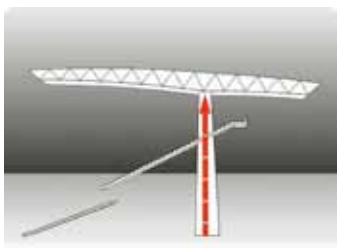
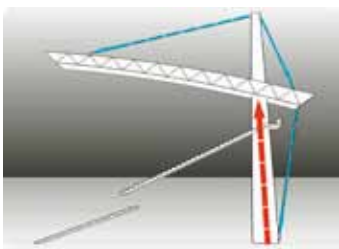
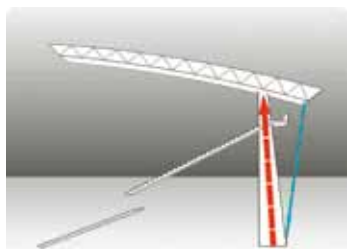


图8 柏林奥林匹克体育场(屋面改造工程)

图9 苏黎世Letzigrund体育场

图10 苏黎世Letzigrund体育场

如表1所示,显示了传力方式与结构形式排列组合后所得结构选型类型,表中面积越大代表在已建成的体育场中应用频率越高。

	恒拉膜	单层网壳	双层网壳	桁架	型钢	典型案例
单拉						济南奥体体育场
双拉						德意志体育中心 广州大学城体育场 泰州海陵体育场
两点支撑						台州体育场 青岛胶州湾跨海大桥 北京国家体育场 瑞典奥委会体育场
拉撑受力						希腊雅典奥运会体育场 深圳湾体育中心 国家体育场（鸟巢）
半拉膜受力						新加坡国家体育场 深圳体育场 香港大球场

表1 体育场结构选型基本类型列表

3 基于结构选型的建筑造型基本流派

体育场结构部分的传力方式与结构形式排列组合所产生的体育场结构体系会呈现出多种不同的逻辑形式，而此时的建筑设计就是在这基础上对其进行发挥以及改造。在此，本文把结构逻辑与建筑设计协同考虑的设计方法称为内化流派，把建筑造型优先于或脱离于结构逻辑的设计方法称为外化流派（其中亦有优秀案例如安联体育场），而本文的重点则是讨论内化流派的各个分支与其所体现出的特点。

(1) 精一流——精于心，简于形。这是一种仅以结构最简练的本体作为建筑效果表现重点，把结构的精巧与工艺做到极致的流派。在此做法中，通常要为极限状态的结构花费很多代价。这种流派的体育场不以花哨取胜，是一种很低调、谦逊的设计状态。典型案例如下：

柏林奥林匹克体育场屋面改造工程（图8）：拉压单挑加桁架。罩篷造型简练大方，与电声、灯光结合很好。最值得一提的是，长达60多m的罩篷其主要支撑杆件直径只有25cm，且整个罩篷只有20个支撑杆件。杆件呈树状造型，在上1/3处由一根杆件分为4根杆件连接至罩篷之内的钢结构环梁上，有效地解决了支撑杆件过小、过稀疏所带来的反力集中问题。体育场通过减少支撑杆件的数量与尺寸的方法，成功获得了典雅精致的体育场建筑效果。

苏黎世Letzigrund体育场（图9，10）：双挑加型钢。作为瑞士最富裕的城市，苏黎世体育场透露着一种低调的奢华。下沉式的观众座席造就了体育场较为低矮的外观体量。屋顶采用型钢双挑模式，型钢梁呈倒三角形，两根立柱呈外倾趋势，木条吊顶与金属屋面布置在倒三角形下部的两个边上。从场内观看，室内效果完整且震撼；从屋顶看，屋面形成一个个下沉的隔仓，用来放置太阳能光伏板与体育场的其他设备。

(2) 衍生流——守本质，巧变化。即在不改变结构受力方式的前提下，通过增强韵律、扰乱秩序、变形结构体造形的手



图11 济南奥体中心体育场



图12鸟巢



图13 深圳宝安体育场



图14 南非德班大球场



图15 鄂尔多斯东胜体育场



图16 万州体育场

法进行造型优化。这种流派比较适用于设计周期较短的情况，以一种合理且常用的结构体系为基础加以衍生，如果使用的巧妙则可达到意想不到的好效果。典型案例如下：

济南奥体中心体育场（图11）：拉压单挑加桁架。该设计为了达到连续折面这一造型，最终完成“西柳”的建筑，采用了折板型悬挑空间密排桁架的结构受力体系。每片罩篷由64根径向主桁架和9根环向次桁架组成，落地墙面结构为屋面折板结构的延伸。这种体系以一榀桁架为基本单元，通过结构构件的衍生，描绘出柳叶的造型。

国家体育场（图12）：边缘受力加桁架。它有一个比较特殊的结构名称，叫做“超大跨度交叉编织方形管桁架”。主桁架围绕屋盖中间的开口放射形布置，经交叉编织与屋面及立面的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型。大跨度屋盖支撑在周边的24根桁架柱之上，主桁架尽可能直通或接近直通，并在中部形成由分段直线构成的内环。

深圳宝安体育场（图13）：边缘受力加张拉膜。该设计采用轮辐式张拉膜结构，其特点是内部受拉环与外部受压环共同受力。外部受压环由周边支撑的外倾钢柱支撑，完成了结构的基本形态。在此基础上为形成竹林的建筑效果，又增加了与支撑钢柱的等粗的装饰钢柱，再通过颜色的差别混淆主要结构与装饰钢柱，同时增加了视觉上的丰富性。

（3）巨构流——强构件，醒目。这是引入巨型结构构建且改变或改善结构受力的一种流派，是需要竖立明显的地标建筑

时常用的建筑手法。它之所以能成为一个流派，关键是能够把夸张、强化的建筑造型纳入结构的合理性之内，进一步对结构体系进行优化。典型案例如下：

南非德班体育场（图14）：边缘受力加张拉膜。由于该体育场是世界杯主场，又位于海边，因此体育场被设计了一个100m高的三叉主拱（可自平衡）。罩篷采用帐篷式与轮辐式膜结构相结合，膜结构的边缘由外部受压环与内部受拉环共同固定，所有高点均用拉索高高拉起，固定至主拱的节点之上。

鄂尔多斯东胜体育场（图15）：边缘受力加桁架。体育场设有开合屋盖，可以满足全天候使用要求，建成后将成为我国目前国内规模最大的开闭顶体育建筑。本工程建筑方案结合内蒙古草原弓箭造型，巧妙地采用钢管拱桥的设计理念，通过钢索将屋盖大部分重力荷载传给大拱，使大跨度屋盖桁架高度大大降低，水平荷载则由下部刚度较大的混凝土看台结构承担。

重庆市万州体育场（图16）：半边缘受力加桁架。该方案位于长江沿岸，以其65m高的大拱丰富了长江岸边的天际线。体育场采用空间钢结构桁架体系，桁架外侧支撑在看台最高的环梁上；屋面覆盖张拉膜。场地南北方向屋顶结构边缘形成两端落地的空间拱桁架。

（4）精构流——整优化，精构造。通常此种结构为空间受力体系，体系中没有多余的装饰性构件，结构体系本身的形态就是建筑的造型。这就要求建筑师对空间结构有深入的了解，能选定适当的结构形式加以应用。对于国内建筑专业与结构专

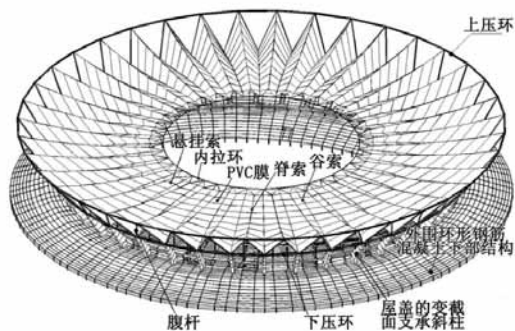


图17 佛山世纪莲体育场



图18 深圳龙岗体育场



图19 深圳湾体育场

业较为分化的现状，这一流派在国内尚有很大的发展空间。典型案例如下：

佛山世纪莲体育场^[2]（图17）：边缘受力加张拉膜。其屋盖结构为一种源自车轮辐概念的全张拉式结构。该结构由周边强大的上下受压环和一系列的径向谷索、脊索以及内部受拉环索组合而成，而谷索和脊索之间通过细小的悬挂索和PVC薄膜连接。因此外压环、内压环和各种索、膜组成了一个承受自重和风荷载的稳定结构体系，从而达到了体育场莲花这一造型。

深圳龙岗体育中心^[3]（图18）：边缘受力加单层网壳。屋盖采用单层折面空间网格结构，由20个形状相似的结构单元通过空间相互作用联系在一起。这种结构充分发挥了钢管的受拉、受压特性，将单层三角形网格通过空间折面的方法，把形状各异的三角形网格以多种倾斜角度组合在一起而形成。

深圳湾体育场（图19）：边缘支撑加单层网壳。对于单层网壳这种结构形式而言，如何能够使这种结构成立是设计最大的难点。虽然网壳与网架能够应对大部分的形体，但单层网壳如能够找到一个良好的曲面形态，对于网壳的优化会起到很大作用。

4 结语

无论是上述什么流派，想要选择合适的结构形式并表达出想要的建筑场地与当地文化的特殊气质，都需要以设计师精心的考量、准确的判断为基础。本文仅为“体育建筑研究小组”《体育建筑科研》一文中的一小部分，由于篇幅有限，有很多例子没有列举在内，亦有一些类型没有总结在内。在此，只是想探讨一种方向、一个建筑与结构联动的体育场罩篷的设计思路，与同行交流。

注释

1小组成员：李燕云、赵丽虹、王斌、赵梓藤、任毅伟、陈曦、罗洋

图片来源

图1~7，图12、15、16、18、19、表1：“体育建筑研究小组”；图17：文[2]；图8：gmp主页，图9：www.panoramio.com，图10：www.letzigrund.ch，图11：筑龙网，图13：搜房网，图14：forum.skyscraperpage.com。

参考文献

- [1] 郭宇飞，陈彬磊，张勇等. 深圳湾体育中心钢结构屋盖设计[J]. 施工技术，2010，39增刊：377-384.
- [2] 孙文波. 佛山世纪莲体育中心体育场屋盖索膜结构. 华南理工大学建筑设计研究院. 工程档案
- [3] 刘琼祥. 深圳大运中心主体育场钢屋盖结构设计[J]. 施工技术，2010，39增刊：58-60.