

编号:

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

项目名称: 张拉结构形态装置设计

项目负责人: 王悦然 学号: 1190500104

联系电话: 电子邮箱:

专业集群: 智慧人居环境与智能交通 辅导员: 程郡

指导教师: 董宇 职称: 副教授

联系电话: 电子邮箱

院系及专业: 建筑学院建筑学专业

哈尔滨工业大学基础学部制表
填表日期: 2019 年 11 月 11 日

一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
王悦然	女	智慧人居环境与智能交通	1190500104		
柳艳辰	女	智慧人居环境与智能交通	1190500102		
吴淑晶	女	智慧人居环境与智能交通	1190500105		
赵慕子	女	智慧人居环境与智能交通	1190500101		

二、指导教师意见

<div>签 名：_____</div> <div>年 月 日</div>

三、项目专家组意见

<div>批准经费：_____ 元</div> <div>组长签名：_____（学部盖章）</div> <div>年 月 日</div>
--

张拉结构形态装置设计立项报告

（一）立项背景

1.1 研究背景

众所周知，建筑的空间设计要对应于人的需求，当今许多建筑设施对穹顶的跨度有很高的要求，如体育馆、展览馆、大会堂等，都应满足人们在大尺度场合的活动需要。在满足大跨度需求的同时要使结构稳定，且尽可能降低结构自重，减少材料受压，实现结构的高效率，欲做到这一点，需设计良好恰当的结构，张拉整体正是一个目前国内外结构前进的方向，正因其结构的高效性上做到了极致。

纵观古今中外结构的发展历程，从较为厚重的混凝土、砖石等搭建的穹顶(如罗马万神庙)，到一根根相交的侧柱，再发展为更加轻便的结构，诸如弦支穹顶、索穹顶等，再到既受压又受拉的膜结构，这之中的诸多演变，使世界建筑结构愈发减少了施工的繁复，避免了造价的高昂，且达成了美观的目的。

张拉整体结构作为一种高效性、轻型性兼备达结构，目前却尚未受到广泛应用，但在桥梁方面仍有其体现（如布里斯班的 kurilpa 桥正是世界最大整体张力桥，奇迹般地创造出了异常坚固的轻型结构），为张拉整体结构在建筑中的应用奠定了基础。

综上，张拉整体结构仍待深入研究，为其在建筑中的应用提供相应的研究与设计基础。

1.2 案例

张拉整体概念自问世以来，已被应用于雕塑、桥梁、穹顶乃至生物模型等许多领域。在此简述张拉整体在雕塑、建筑等空间结构的应用。

1.2.1 张拉整体应用于雕塑

富勒（Fuller）最早提出张拉整体的概念，而斯内尔森的作品则开创了采用压杆和拉索组成空间结构的先河^[1]。

图 1 中“X”形的模型单元是斯内尔森获得专利的基本思想。此后，他又完成了许多张拉整体思想的雕塑。

张拉整体雕塑凭其强烈的视觉冲击力和艺术美感被世界各国广泛应用于城市雕塑。图 4 为中国的张拉整体雕塑。



图1 斯内尔森的雕塑，X-Shape，1948

（图片来源：《张拉整体——未来的结构体系》）



图2 斯内尔森的雕塑 Needle Tower，1968

（图片来源：搜狗图片）



图3 张拉整体城市雕塑

（图片来源：搜狗图片）



图4 中华钢结构

（图片来源：陈志华《弦支穹顶结构》图1-2）

1.2.2 张拉整体应用于建筑

（1）张拉整体桥梁

与传统桥梁相比，张拉整体桥不仅体量更轻，而且因连续拉间断压的特征而造型优美^[2]。

世界最大的张拉整体桥——Kurilpa Bridge，由澳洲 Cox Rayner Architects 昆士州分公司与 Arup 合作建成，长 470m，宽 6.5m，拥有数个观景平台与全长棚罩，皆由一个二级张拉整体结构支承^[3]。张拉整体的运用使桥梁不局限于连接布里斯班中央商业区与城市南岸的功能性，更成为新形式的公共空间，表达出城市的个性与活力，创造出公共空间的多样性^[4]。



图5 Kurilpa Bridge，昆士兰

（图片来源：A963.com）



图6 Kurilpa Bridge 夜景

（图片来源：A963.com）

然而，限于张拉整体结构运用到桥梁设计的力学原理尚不清晰，张拉整体结构在桥梁领域的应用并不广泛。

（2）索穹顶结构（cable dome）

索穹顶结构是 20 世纪 80 年代美国工程师盖格（Geiger）发展和推广富勒张拉整体结构思想后实现的一种新型大跨结构，是一种结构效率极高的张力集成体系或全张力体系。它采用高强度钢索作为主要受力构件，配合使用轴心受压杆件，通过施加预应力，巧妙地张拉成穹顶结构。该结构由径向拉索、环索、压杆、内拉环和外压环组成，其平面可建成圆形、椭圆形或其他形状。整个结构除少数几根压杆外都处于张力状态，可充分发挥钢索的强度，这种结构重量极轻，安装方便，经济合理，具有新颖的造型，被成功的应用于一些大跨度和超大跨度的结构^[5]。Geiger 体系索穹顶，又称肋环行网格索穹顶，荷载从中央的张力环通过辐射状的脊索、张力环和中间斜索传递至周边的压力环。代表作为 1988 年汉城奥运会体育馆和击剑馆。



图 7 汉城奥运会击剑馆



图 8 Levy 体系索穹顶

（图片来源：百度文库《张拉整体及索穹顶结构》）（图片来源：百度文库《张拉整体及索穹顶结构》）

受 Geiger 启发，M. Levy 对 Geiger 体系索穹顶进行研究，将 Geiger 索穹顶结构中辐射状的脊索改为联方形，提高了结构的几何稳定性和空间协同工作能力，也使索穹顶结构能够适用于更多的平面形状。这种结构形式叫作 Levy 体系索穹顶。其代表作为 1996 年亚特兰大奥运会的主体育馆屋盖佐治亚穹顶（Georgia Dome, 1992 年建成，椭圆形平面， $240.79\text{m} \times 192.02\text{m}$ ）

在中国目前已建成三个索穹顶工程，分别为无锡新区科技交流中心索穹顶、山西太原煤炭交易中心索穹顶和内蒙古伊金霍洛旗全民健身中心索穹顶。

无锡太湖国际高科技园区高科技交流中心屋盖 G 区平面为圆形，直径 24m，矢高 2.109m，采用刚性屋面索穹顶结构。该结构体系由上弦脊索、径向斜索、下弦环索、压杆、受压外环及刚性拉力内环构成，是典型的肋环型索穹顶结构体系。屋面覆盖材料为铝板和玻璃结合，采用刚性屋面与下部索穹顶结构体系结合，尚属首例。

鄂尔多斯市伊旗全民健身中心主体结构采用下部收紧、上部多层大悬挑结构体系，建筑总高度为 30m，期中篮球馆屋盖采用大跨度索穹顶结构。屋盖平面呈圆形，直径为 71.2m，矢高 5.5m，矢跨比 1/13。由外环梁、内环梁、环索、斜索、脊索及两圈撑杆组成，表面覆盖膜结构。该项目是我国第一个大型索穹顶结构工程。

太原煤炭交易中心展览中心庭院区采用索穹顶结构，该索穹顶结构平面为圆形，直径 36m，矢高 1.636m，结构中心点标高 25.848m。在索穹顶主结构的基础上，增加了上层屋面次结构索网。索穹顶主结构由脊索、斜索、环索、压杆、外环受压环及内环刚性拉力环构成，是典

型的肋环型索穹顶结构体系。屋面次结构索网由环索与径向索组成。^{〔6〕}



图 9 无锡太湖新区科技交流中心

（图片来源：中国建筑装饰网）



图 10 中国（太原）煤炭交易中心展览中心

（图片来源：搜狗图片）

（3）弦支穹顶结构（Suspension-Dome）

弦支穹顶是利用张拉整体概念产生的一种更高效结构体系。与索穹顶相比，弦支穹顶虽结构效能略低，但有着施工简化、总体结构的刚度更强和单层网格部分更稳定的优势。^⑦该结构体系是由上部的单层球面网壳和下部的索撑体系共同构成的。如图 15 所示，结构的上部采用单层球面网壳，下部采用逐环布置的径向斜索和环索，然后通过撑杆与上弦网壳连接，构成了弦支穹顶结构体系。^{〔8〕}

1993 年，日本川口卫教授（M.Kawaguchi）提出了这种新型结构体系，并对该体系进行了一系列理论分析与模型实验研究，于 1994 年首次在日本东京光丘穹顶屋盖中应用，1997 年又在日本长野建成了同为弦支穹顶结构的聚会穹顶。

光丘穹顶（Higarigaoka dome）跨度 35m，最大高度 14m，总质量约 130t。由于首次使用弦支穹顶结构体系，光丘穹顶只在单层网壳的最外层下部组合了张拉整体结构。

聚会穹顶（Fureai dome）跨度为 46m，屋盖高度为 16m。整个弦支穹顶支承在周围钢柱上，钢柱与下部钢筋混凝土框架连接，整体结构建筑荷载传递路线清晰。^{〔9〕}



图 1 聚会穹顶外景、内景（图片来源：陈志华《弦支穹顶结构》第 10 章）

我国学者积极消化吸收这一结构概念，并于 2000 年起采用这种体系先后设计了二十多座此类结构。2008 年建成的济南奥林匹克体育中心体育馆，直径为 122m；2011 年建成的大连体育馆，跨度达到 145.4m×116m，是目前世界上跨度最大的此类结构体系。平面也不仅限于圆形和椭圆形，如安徽大学新校区体育馆做成六边形，渝北体育馆设计成三角形，进一步体现出我国建造技术的日益进步与创新能力。

安徽大学新校区体育馆为安徽大学新校区的综合性体育馆，该工程屋盖的特点是上层为

单层六角锥形网壳，采用方钢管相贯焊接，屋盖高度 14.15m；撑杆采用圆钢管，与上层网壳铰接；下弦环向索布置成正六边形，径向采用钢拉杆，沿网壳的六条肋布置。

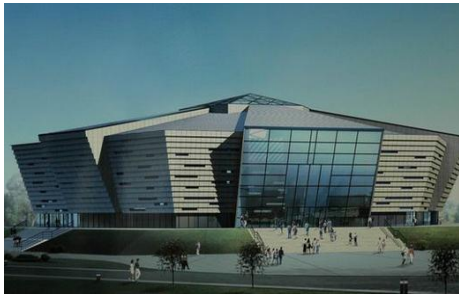


图 12 安徽大学新校区体育馆



图 13 大连体育中心体育馆

（图片来源：搜狗图片，《索结构典型工程集（上册）》第 4 章图 4.5.2）

大连体育中心体育馆位于辽宁省大连市甘井子区，是 2013 年全运会主赛馆之一。屋盖平面呈近似椭圆形，跨度 145.4m×116m，由于建筑造型需要，屋面较为扁平，矢跨比仅为 1/10，且屋盖平面与地面呈 10°夹角。通过多方案对比，决定结构上弦采用以三角形截面空间桁架为基本单元，以肋环行桁架布置方式的空间网格结构，称之为巨型网络弦支穹顶结构。该结构既解决了单层网壳的局部刚度偏弱问题，又避免了双层网壳杆件繁杂的问题，安装方便，更好地体现了大跨度结构的力度与美感。

渝北体育馆坐落在空港广场旁。屋盖结构的上层是由方钢管组成的倒圆角三角形底面的单层壳体，下层由环向索和径向钢拉杆组成，上下层之间通过圆钢撑杆连接。通过施加预应力，控制受弯构件的弯矩分布，减小构件的截面，控制结构变形；利用弦支穹顶结构的自平衡机制，使结构的水平推力为零或很小，减轻下部结构和基础的负荷，从而有效减小结构自重，并达到轻巧通透的建筑效果。^{〔10〕}

表 1 类张拉整体建筑参数

类别	名称	建成时间	平面形状	跨度	矢高	矢跨比
索穹顶结构	Georgia dome	1992	椭圆	240.79m×192.02m		
	无锡太湖新区科技交流中心	2009	圆形	24m	2.109m	1/12
	鄂尔多斯市伊旗全民健身中心	2010	圆形	71.2m	5.5m	1/13

	中国(太原) 煤炭交易中 心展览中心	2011	圆形	36m	1.636m	1/22
弦支穹顶结构	光丘穹顶	1994	圆形	35m		
	聚会穹顶	1997	圆形	46m		
	安徽大学新 校区体育馆	2008	正 六 边形	87.18m		
	渝北体育馆	2009	三 角 形	单边 81m	8m	1/10
张拉整体结构	Kurilpa Bridge	2009	长条	470m× 6.5m		

1.3 文献综述

文献方面,对张拉整体原理及应用方面都已有了较为系统的论述。

下表列出国内外张拉结构相关、供我们仔细学习的重要文献。

表 2 文献综述

名称	作者	出版社	出版时 间	主要内容
《张拉整体 ——未来的 结构体系》	[法] 勒内· 莫特 罗	中国建 筑工业 出版 社	2007	以深入浅出的方式阐述了张拉整体结构的概念、历史、应用及发展前景,系统全面地向读者展示张拉整体的昨天与今天,并前瞻性地揭示了未来的结构设计方法。
《现代空间 结构》	刘锡 良	天津大 学出版 社	2003	介绍了当代建筑工程领域中最新、最前沿的 5 种空间结构体系,张拉整体结构位列其中。书中对张拉整体结构的构造特点、设计理念、计算方法及施工技术等进行精练的阐述,并详细介绍了国内外最新研究成果和具有代表性的工程实例。

《索结构典 型工程集》	张 毅 刚, 秦 杰, 郭 正兴, 徐 瑞 龙, 王 德勤	中 国 建 筑 工 业 出 版 社	2013	涵盖了包括索穹顶和弦支穹顶在内的 10 种索结构, 对索穹顶结构和弦支穹顶结构的介绍图文并茂, 注重国内工程实例的分析, 对相关工程的参数、特点、施工特点都有清晰的阐述。
弦支穹顶结 构	陈 志 华	科 学 出 版 社	2010	通过对弦支穹顶结构的概念、形态及性能分析、实验研究、工程实例等各方面的论述, 清晰系统地对弦支穹顶结构进行了理论阐释和技术总结。

1.4 研究意义

张拉整体结构体系在实现大跨度同时减轻结构自重、保证结构稳定、提高结构效能方面具有重大意义。正如莫特罗所述, 张拉整体作为未来的结构体系, 有着广阔的应用前景。下面分述本研究的意义。

1.4.1 科学意义

无论是张拉整体索穹顶结构, 还是弦支穹顶结构, 均属于张拉整体体系范畴, 但由于它们还没有完全实现结构自支承、自应力的原则, 离开下部受压环梁则不能成立, 故可以说彻底的大跨度张拉整体结构还没有建成。因此对于张拉整体结构无论在理论分析方面还是施工技术及建筑材料方面都还有很多工作要做, 这些研究有助于推进未来结构的发展。

1.4.2 实践意义

通过对于张拉结构理论的研究以及模型的制作, 在动手实践的过程中, 我们既能加深对于理论的深入理解, 亦能提升手工技能, 有助于我们胜任今后的专业学习以及研究生及之后的项目。

1.4.3 应用意义

本研究致力于在特定场地环境下选择合适材料设计张拉装置, 使其与环境形成相辅相成的审美效果, 同时承担力学作用, 保证理论上的可行, 即基于已有案例, 设计较为合理、美观的结构。可用于校园环境布置, 争取创建更为有独特的校园文化。

(二) 研究内容及实施方案与进度安排

2.1 研究内容

2.1.1 张拉混合结构的基本原理

分析弦支穹顶，张拉膜结构，张拉结构桥以及一些拉压混合结构，了解张拉整体，进一步理解张拉混合结构的基本原理。

2.1.2 模型制作及材料的选择

采用多种不同强度，硬度，柔韧度的杆和索应用不同方法多次尝试搭建张拉结构的模型，选出最为合适的材料和构造模型的最合理的方案。

2.1.3 张拉结构应用于建筑的可能性探索

在对张拉结构有了更深一步的了解后，结合实际通过模型构建和一些软件模拟，寻找能应用于建筑的切入点。

2.2 实施方案

2.2.1 模型制作

在学习张拉力理论的基础上，我们将从各种材料中根据牢固程度、经济方面、适宜动手等角度，选取合适模型材料，压杆需要刚性，可选木杆，拉杆需要柔性，可选弹性松紧绳索。制作张拉整体四面体，张拉整体八面体，如果有时间的话再做张拉整体十二面体，重点制作四面体，以熟悉制作技术，子单元与母单元的关系，以及体会如何将压杆汇交处的顶点组织起来形成稳定结构。从简单模型到小型装置，逐渐认识张拉结构如何形成，如何达到平衡状态，理解自支撑、自应力的空间网格结构，平衡预应力提供刚度等等，制作后测试其稳定性及重量。

2.2.2 收集资料

学习国内外大跨建筑实例，查找相关资料，如美国亚特兰大 Georgia Dome，美国伊利诺斯州大学红鸟体育馆，台湾桃源县表演场，雷声穹顶，圣地亚哥会议中心等等。感性认识结构设置并运用张拉结构知识尝试理解构造原理，如荷载在结构上的分布，最重要的是理解如何在增加跨度的前提下不明显增加重量。思考这些实例如何启发我们改造自己的装置使其超越四面体八面体的限制，而能够组合成一个有应用价值的装置。

2.2.3 整理思路 初步归纳设计方案

整理各类张拉结构建筑的设计思路，记笔记，绘制结构图，记录每个穹顶、雕塑设计的特殊之处，如三角形网格构造。结合本研究所选择的特定建筑环境，选用合理的结构形态，综合各家之言，初步用软件(Rhiw 和 GH 等)表现张拉整体装置的设计方案。考虑适合的材料，为该装置的设计做材料准备。

2.2.4 应用实践 完善方案

进一步改善结构的外在，模拟建筑场地，实地考察所选择的场地限制等(如将我们的装置安放在校园)，用软件、快速设计等方式表达出張拉原理应用于建筑的设计方案，且搭建完成装置。

2.2.5 反思与延伸研究结果

进一步思考建筑与环境之间的关系，改进结构的内在，思考我们设计的装置如何同时满足物理特性(如可按照环境需求增加隔热膜结构等等)，并适应审美需求(如选用有金属光泽的材料等)，更合理地将该“多面体模型”安放于具体建筑环境。且在实用性等方面综合权衡施工难度，材料成本，经济环保等。

2.3 进度安排

表 3 进度安排

截止日期	主要任务	任务完成记录方式
2019.11.30	模型制作	笔记，拍照模型
2019.12.30	收集资料	笔记，电子文件
2020.3.30	整理思路 初步归纳设计方案	笔记，结构图，软件绘制，中检报告
2020.5.30	应用实践 完善方案	拍照，软件表现
2020.6.30	反思与延伸研究结果	笔记，拍照，结题报告

(三) 中期及结题预期目标

3.1 中期目标

(1) 理论与技术学习总结

了解张拉整体的结构体系的开端和基本结构思想，简要了解并学习前人基于张拉整体结构的构建思想，构建目的，构建优势，以拓展思维。

(2) 张拉整体结构模型搭建

查阅资料，深度学习张拉整体模型制作，掌握搭建张拉结构多面体知识与技巧，搭建简单张拉结构多面体的程度。

(3) 构思并准备搭建最终张拉整体应用性装置

构思具有创新性，实用性，建筑意义的基于张拉结构的多面体模型。灵活运用软件，最大限度地将在所构思的创新性张拉模型以动画的形式完整的展现出来。

查阅资料，准备搭建最终装置所需材料，制作结构单元。

(4) 撰写中检报告

3.2 结题目标

(1) 完成模型搭建

完成搭建张拉结构多面体模型。

(2) 完善模型设计

对多面体模型进行外形上的美观设计，完善细节。

(3) 拓展研究讨论

对作品进行基于现实使用意义的功能性研究与讨论，并针对实际应用情况对作品的实际应用材料进行拓展性讨论，挖掘本次张拉结构模型作品的建筑意义。

(4) 结题报告

绘制真实模型的图纸，拍摄照片，做成电子文件形式。

(三) 经费计划

表 4 经费计划

用途	费用（元）
模型及装置材料费	700
打印费	10
画图工具采买费	50
交通费	40

(四) 主要参考文献

^[1]【法】勒内·莫特罗.《张拉整体——未来的结构体系》.薛素铎、刘迎春译.中国建筑工业出版社.2007.7 至 31 页.

^[2]贾晓婵《张拉整体结构桥梁的静力分析基础研究》.哈尔滨工业大学.2015.

^[3]豆丁网.《世界最大整体张力桥 Kurilpa 步行桥已正式开放》.

^[4]A963.com《公共空间设计欣赏：Kurilpa Bridge》.

^[5]百度文库《张拉整体及索穹顶结构》<https://wk.baidu.com/view/29891bfd240c844768eae1e>

^[6]张毅刚《索结构典型工程集（下册）》.中国建筑工业出版社.2013-11.67 页至 87 页

^[7]刘锡良《现代空间结构》.天津大学出版社.2003-06.9 页至 27 页.

^[8]张毅刚《索结构典型工程集（上册）》.中国建筑工业出版社.2013-11.147 页至 149 页.

^[9]陈志华《弦支穹顶结构》.科学出版社.2010.199 页至 201 页.

^[10]张毅刚《索结构典型工程集（上册）》.中国建筑工业出版社.2013-11.168 页，173 页，198 页.

- ^[11] 张峰 索穹顶结构与施工研究现状 四川建材 2019-02-10
- ^[12] 冯晓东 赵容舟 黄世荣 刘圣威 具有约束支撑整体结构初始找形方法 绍兴文理学院报 (自然科学) 2018-08-28
- ^[13] 董石麟 涂源 索穹顶结构体系创新研究 建筑结构学报 2018-07-27
- ^[14] 张沛 张拉整体结构形态问题的若干研究与优化分析 东南大学 2017-06-30
- ^[15] 张渊 王兆村 张孝轮 钢铁企业封闭料场建筑结构设计及工程实例 2015 京津冀钢铁清洁生产、环境保护交流协会文集 2015-04-29
- ^[16] 陈志华 索结构在建筑领域的应用组发展 (三) 中国建设报 2012-09-10