

预应力技术在钢结构中的应用

文 / 钟翔 广西建筑科学研究设计院

摘要: 本文系统探讨了预应力技术的基本原理与分类,并分析其在工业建筑(如厂房、仓库、桥梁等)与民用建筑(如高层建筑、公共建筑、景观结构等)中的典型应用。针对钢结构中的预应力设计,重点研究钢结构预应力设计的基本理论、钢桁架结构的预应力设计与优化方法以及相关施工技术。通过对梧州西江明珠塔钻石体网架的预应力支撑体系设计案例进行详细分析,探讨支撑体系的设计原理、预应力钢绞线的应用以及结构的刚度与强度验证。研究表明,预应力技术在提高钢结构性能、优化设计方案和减少材料浪费方面具有显著优势,对提升工程项目的安全性、经济性和施工可操作性起到了积极作用。

关键词: 预应力技术; 钢结构; 钢桁架

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.06.014

引言

预应力技术作为一种提高结构性能的有效手段,通过施加预应力钢绞线或钢筋来增强结构的稳定性、刚度和承载能力,已逐渐成为钢结构设计中的重要组成部分。在工业与民用建筑领域,预应力技术不仅能够优化结构设计、减少材料消耗,还能显著提升结构的抗震、抗风性能,满足复杂工程需求。尤其在钢桁架结构、桥梁、高层建筑等应用中,预应力技术的有效应用已被证明能够实现结构的轻量化与高效化。因此,研究和探索预应力技术在钢结构中的应用,具有重要的理论价值和实际意义。

一、预应力技术基本原理与应用发展

(一) 预应力技术的基本概念与分类

预应力技术是一种通过外加预应力作用于结构的构件,以改善其力学性能和延长使用寿命的工程技术。其基本概念是通过施加预先的应力,使结构或构件在使用过程中能够承受更大的外部荷载,或减少结构的变形与应力集中,进而提高其承载能力和稳定性。预应力技术的核心在于预先对构件施加一种内力(即预应力),这种内力可通过外部荷载、内部约束或两者结合的方式来实现,从而使得构件的受力状态在服役过程中始终处于一种优化的应力分布状态^[1]。

根据施加预应力的方法和所使用的材料,预应力技术可以分为几种不同类型。传统的预应力技术主要包括预应力混凝土和预应力钢结构两大类。预应力混凝土是通过钢筋或钢绞线的张拉施加应力,然后将其嵌入混凝土中,通过外加的预应力将混凝土的拉应力消除或降低,以提高混凝土构件的抗弯、抗剪和抗拉性能。而预应力钢结构则通常采用预应力钢绞线或高强钢丝等材料,通过张拉或其他方式施加预应力,以增强钢结构的稳定性和承载力^[2]。

(二) 预应力技术在工业与民用建筑中的典型应用

在工业建筑领域,预应力技术广泛应用于厂房、仓库、桥梁等结构的设计与施工。厂房作为工业建筑中最

为常见的类型,其结构通常需要承受较大的荷载与动态作用。采用预应力技术,可以有效减少结构自重,降低梁柱构件的截面尺寸,从而提高建筑空间的利用率。通过在屋盖梁、柱体等关键部位施加预应力,不仅能够改善结构的受力状态,减少由于自重引起的沉降和变形,还能有效抵抗外部荷载和震动对结构的影响,提高抗震性能和安全性。对于大型仓库而言,预应力技术的应用使得大跨度的结构设计成为可能,特别是在要求较大空间且不设置内柱的情况下,预应力钢筋混凝土的应用能够确保结构的稳定性和安全性。桥梁作为交通基础设施的重要组成部分,其设计要求尤为严格,尤其是在长跨度、大荷载的情况下,预应力技术被广泛用于桥梁的主梁、跨越支撑等部分。通过预应力钢绞线的合理配置与张拉,能够有效地优化桥梁结构的受力体系,减少材料的消耗,并提高桥梁的抗裂性能和耐久性^[3]。

在民用建筑领域,预应力技术同样发挥着重要作用,特别是在高层建筑、公共建筑和景观结构中。高层建筑在结构设计中面临着来自自重、风荷载、地震等多种外部因素的综合影响。采用预应力技术可以显著增强高层建筑的整体稳定性和抗风抗震能力,特别是在高层建筑的楼板系统和核心筒结构中,预应力技术能够有效减小建筑的变形和振动,提高结构的安全性和舒适性。在公共建筑中,如大型体育馆、展览馆、会议中心等,预应力技术常用于大跨度的屋盖和结构支撑系统。通过施加预应力,能够减少结构的自重,提升结构的承载能力,并确保建筑在使用过程中长期的稳定性与耐久性^[4]。

二、预应力技术在钢结构中的关键技术与设计方法

(一) 钢结构预应力设计的基本理论

钢结构预应力设计的基本理论涉及力学模型、分析方法以及构造形式和设计原则的综合运用。预应力钢结构的设计目的是通过施加适当的预应力,使结构在承受外部荷载时能够保持较为理想的受力状态,从而提高其整体性能,尤其是在承载力、刚度和稳定性方面^[5]。

预应力钢结构的力学模型通常基于弹性理论和结构力学原理，结合预应力施加的方式和钢材的物理力学特性进行分析。在设计过程中，需要建立合适的结构力学模型，考虑钢结构在外部荷载作用下的力学行为，并通过静力分析和动力分析相结合，研究预应力的分布规律与作用效果。静力分析主要用于确定预应力钢结构在受力下的内力分布和变形状态，而动力分析则用于评估结构在动荷载作用下的响应，包括风荷载、地震荷载等对结构的影响。常见的分析方法包括有限元分析（FEA）和刚度矩阵法，这些方法能够有效模拟预应力钢结构在复杂荷载作用下的行为，准确评估结构的强度和稳定性。

在构造形式与设计原则方面，预应力钢结构通常采用不同的构造形式，以满足特定工程的设计需求。常见的构造形式包括预应力钢梁、预应力钢桁架、预应力钢管桁架等。这些构造形式通过合理布置预应力钢绞线或钢丝，并将其施加到关键部位，能够在一定程度上减小结构的变形，增强结构的承载能力^[6]。

（二）钢桁架结构的预应力设计与优化

钢桁架结构的预应力施加方法主要是通过桁架的主要受拉构件中施加预应力钢绞线或钢丝，利用张拉产生的内力来抵抗外部荷载引起的拉应力，从而提高桁架的整体刚度与承载力。

在进行预应力钢桁架的设计时，强度与刚度分析是关键步骤。钢桁架结构在预应力施加后的受力状态复杂，需要通过精确的力学模型进行强度与刚度的分析。通常采用有限元分析方法，模拟钢桁架结构在预应力作用下的受力分布与变形情况。通过计算桁架的内力、变形以及应力状态，可以评估预应力钢桁架在外部荷载（如恒载、活载、风载等）作用下的性能。强度分析侧重于判断结构在各种荷载作用下的安全性，确保结构的各个构件不会超过其屈服强度或破坏极限；刚度分析则关注结构的变形情况，尤其是大跨度钢桁架在外部荷载作用下的挠度与变形程度，预应力的合理施加可以有效减少变形，提高结构的刚度，进而提高使用安全性与舒适性。

（三）钢结构中预应力的施工技术

结构中预应力的施工技术是确保预应力钢结构性能实现的关键环节，其质量直接影响到结构的承载能力、刚度与稳定性。施工过程中，预应力钢绞线的张拉与定位，以及应力监测与控制，均需严格按照设计要求进行操作，以确保预应力的合理分布与结构性能的优化。

在实际施工中，预应力钢绞线的张拉需要精确控制张拉力和张拉顺序，以确保钢绞线在施加预应力后能够均匀分布到结构的各个构件上。钢绞线的张拉过程通常由张拉设备（如液压千斤顶）进行控制，通过精确测量和控制施加的张拉力，确保钢绞线达到设计要求的应力

水平。在钢绞线的定位过程中，施工人员需要确保每根钢绞线按照设计的预定位置放置，以避免由于钢绞线位置偏差而导致结构受力不均或局部应力集中。在张拉和定位过程中，钢绞线的初始状态（如张拉前的预紧力）和张拉力的逐步施加必须严格监控，避免任何施工过程中的误差或偏差。

为了验证施加的预应力是否符合设计要求，并实时监控施工过程中的变化，应力监测系统在施工过程中起着至关重要的作用。常见的监测方法包括电阻应变计、光纤传感器和激光测距技术等，这些技术可以精确测量钢绞线的应力状态及钢结构的变形情况。通过应力监测系统，可以实时获取钢绞线的应力变化、变形幅度及其他相关参数，为调整张拉力和施工过程中的操作提供数据支持。

三、梧州西江明珠塔钻石体网架的预应力支撑体系设计案例

（一）项目背景与工程概述

梧州西江明珠塔作为一座标志性的城市地标，其设计理念与结构特点体现了现代建筑艺术与工程技术的高度融合。钻石状景观亮化网架作为西江明珠塔的亮点之一，是该项目中的一大技术挑战。钻石状网架的设计需求及其技术难点涉及多个方面，尤其是在其形态复杂性与功能要求之间的平衡。网架的外形呈现出一个高约30米、最大直径46米的钻石结构，既要满足美学上的独特性，也需承载相应的功能性要求。其主要任务是提供建筑物夜间的景观照明效果，同时也要与周围的城市环境相呼应，成为西江明珠塔的光学装置和文化象征。



图1 西江明珠塔模型

（二）支撑体系的设计与预应力应用

在梧州西江明珠塔钻石体网架的支撑体系设计中，支撑结构的提出与设计是项目中的关键环节。为满足钻石状景观亮化网架的结构需求与美学要求，设计团队提出了创新的交错双拱式钢桁架支撑结构。该结构不仅能有效支撑网架的自重与外部荷载，同时通过独特的几何

形态保证了网架造型的稳定性与美观性。交错双拱式钢桁架结构通过将高拱与低拱相结合，形成了一个空间交错的受力体系。设计过程中，双拱结构的组合方式巧妙地将支撑点集中于网架的八个交汇节点上，使得整个结构体系在满足承载要求的同时，也能有效避免传统支撑方式在复杂荷载作用下可能产生的局部失稳或变形。

在钢桁架的高拱与低拱设计中（如图2所示），重点在于合理计算其跨度与高度，以确保结构的强度与刚度。高拱的设计高度约为19.7米，跨度为22.3米，低拱的设计高度约为7.3米，跨度为33.7米，高低拱具有合理的比例关系，以满足网架支撑系统的力学要求。高拱与低拱的设计不仅考虑了结构的受力特性，还对抗风、抗震以及温度变化等外部环境因素进行了充分分析。通过对桁架各节点的力学性能进行优化计算，确保了桁架在荷载作用下能够均匀受力，避免了由于不均匀应力分布引起的局部屈曲或破坏。跨度与高度的计算严格依据钢结构的力学模型，结合结构的实际尺寸与功能要求，确保了支撑体系在工程实施中的可行性与安全性。

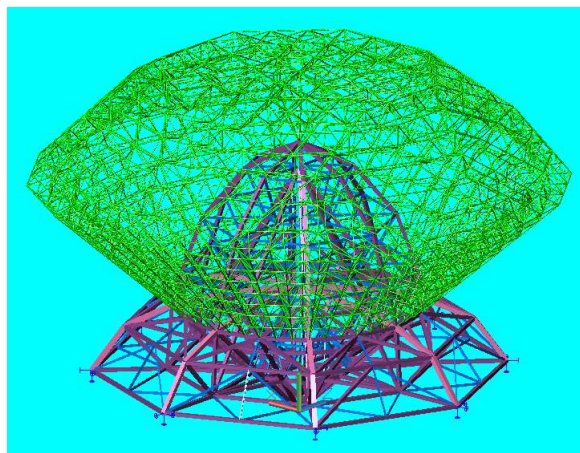


图2 钻石体和空间钢拱架三维图

在支撑体系的预应力应用方面，预应力钢绞线在低拱下弦杆的使用具有至关重要的作用。为提高低拱受力构件的稳定性并有效控制结构的变形，设计团队在低拱下弦杆的管内采用高强低松弛预应力钢绞线（ $1 \times 7-15.20$, $f_{pk}=1860\text{kN/mm}^2$ ）施加预应力。预应力钢绞线的应用不仅增加了下弦杆的承载力，还通过张拉过程调整了构件的应力状态、减少了下弦杆的拉应力，从而有效提高桁架的刚度与抗变形能力。钢绞线的张拉过程严格按照设计要求进行，通过液压千斤顶进行精确张拉，并通过监测设备实时监控张拉力的变化。

（三）钢桁架支撑结构的刚度与强度验证

通过有限元分析与结构力学计算，桁架结构的各个受力构件在不同荷载作用下的变形与应力状态得到了全面评估。设计团队对高拱与低拱的结构形式进行了详细的力学分析，确保桁架在常规荷载以及极限荷载下均能

够保持足够的刚度与强度。在高拱部分，结构的最大变形控制在允许范围内，且各节点的应力比均小于0.85，确保了桁架的安全性与稳定性。低拱部分通过施加预应力钢绞线，降低了下弦杆的拉应力，有效增强了下弦杆的刚度、减少了其变形。根据分析结果，桁架在施加预应力后，结构的强度和刚度均得到了显著提升，尤其是在荷载集中或结构变形较大的区域，预应力的应用有效防止了不均匀变形或局部屈曲现象的发生。

在抗风设计中，通过合理优化桁架的形状与支撑方式，降低了风荷载作用下结构的风振响应。而且，该项目还进行CFD（Computational Fluid Dynamics）数值模拟研究，在此基础上提供建筑表面风荷载体型系数分布供设计参考。钢桁架支撑结构通过其轻巧且高效的几何特性，确保了结构在强风条件下的稳定性。

在抗震性能方面，设计通过引入减震构件（采用抗震球铰形钢支座）与合理的支撑形式，增强了结构对地震荷载的适应能力。桁架结构的设计考虑了抗震规范的要求，通过对关键节点与连接部位的强化，使得整体结构在地震作用下能够保持足够的韧性与抗震能力，避免出现结构破坏或失稳现象。抗风与抗震性能的评估结果表明，设计方案在满足安全要求的前提下，表现出了卓越的抗风、抗震能力。

结语

本文通过分析钢结构的预应力设计理论、技术方法及实际案例，验证了预应力技术在提高结构性能、优化设计和降低施工成本方面的显著优势。然而，研究中仍存在一些不足之处，如对不同类型钢结构的预应力施加方法的深入探讨不足，尤其是在复杂环境下的长期性能和耐久性评估未做充分研究。未来的研究可以进一步拓展预应力技术在钢结构中的应用范围，特别是在极端气候和高震区的性能表现。

参考文献

- [1] 张宗霖. 分析高层民用建筑结构设计的主要点和常见问题[J]. 居业, 2020, (06): 106-112.
- [2] 张春海. 浅议预应力技术在工业与民用建筑中的应用[J]. 智能城市, 2019, (16): 66-67.
- [3] 孙维才. 民用房屋建筑工程预应力施工要点及质量控制探究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2022, (02): 56-58.
- [4] 赵淳. 民用建筑地下室预应力碳纤维板加固施工技术[J]. 四川建材, 2022, (01): 91-92.
- [5] 卞爱红. 预应力混凝土技术优势及其在工业与民用建筑施工中的应用[J]. 建筑技术开发, 2021, (20): 67-68.
- [6] 冯伟荣. 浅议预应力技术在工业与民用建筑中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019, (13): 132+97.