

# 张弦拱桁架结构体系的动力特性及抗震性能研究

贺增勋

北京市第三建筑工程有限公司 北京 100044

**摘要：**本文深入研究了张弦拱桁架结构体系的动力特性及抗震性能。通过模态分析、时程分析等方法，揭示了结构的自振频率、振型、阻尼比等动力特性参数，并评估其在不同地震烈度下的响应。同时探讨了结构参数、材料性能和场地条件等因素对张弦拱桁架抗震性能的影响。研究表明，合理的结构设计、材料选择和地基处理措施能够显著提升结构的抗震性能，为张弦拱桁架结构体系在地震多发地区的应用提供了理论支持和设计指导。

**关键词：**张弦拱桁架；动力特性；抗震性能

## 1 张弦拱桁架结构体系的基本原理与构造特点

### 1.1 张弦拱桁架的基本概念

张弦拱桁架是一种大跨度预应力空间结构体系，它将上弦刚性受压构件通过撑杆与下弦拉索组合在一起，形成自平衡的受力体系。这种结构体系结合了抗弯刚度较大的刚性构件和高强度拉索的优点，具有自重轻、承载能力强的特点。张弦拱桁架能够较好地解决承载及竖向刚度问题，适用于大跨度的屋盖结构。

### 1.2 构造特点与分类

张弦拱桁架的构造特点主要体现在几个方面：第一，结构体系。由刚性构件（如上弦拱）和高强度拉索组成，通过撑杆连接形成整体。第二，自重轻。由于采用了高强度拉索和轻质材料，整体结构自重较轻，便于施工和运输。第三，承载能力强。通过合理的预应力设计和结构布置，张弦拱桁架能够承载较大的荷载。分类：根据撑杆和张弦的组合方式，张弦拱桁架可以分为不同类型的结构，如张拉直梁、张拉拱和张拉人字型拱等。其中，张拉拱在撑杆减少拱弯矩的同时，由索抵消拱端推力，适用于大跨度结构；而张拉人字型拱则主要用弦来抵消拱端推力，适用于跨度较小的结构。

### 1.3 材料选择与施工要点

**材料选择：**通常采用低合金高强度钢，以提高结构的承载能力和耐久性。钢材的截面形式需根据受力情况进行选择，如上弦拱可能采用较大的截面尺寸以增强抗压能力。选用高强度低松弛镀锌钢丝束，以确保拉索在长期使用中保持稳定的拉力。

**施工要点：**（1）拼装与验收。桁架在胎架上拼装完成后，需解除所有约束并测量各项尺寸，以确保桁架的精度和稳定性。提交监理进行分段验收<sup>[1]</sup>；（2）支撑架施工。在桁架合拢时，下方需搭设支撑架进行支撑。支撑架的选择和安装需根据桁架的尺寸和重量进行精确计

算和设计；（3）穿索张拉。桁架合拢后，进行穿索和张拉工作。张拉过程中需严格控制拉索的预应力值，以确保结构的整体稳定性和安全性；（4）地基处理。支撑架底部需进行特别处理，如换土压实和铺设路基箱等，以避免支撑架沉降影响安装精度。

## 2 张弦拱桁架结构体系的动力特性分析

### 2.1 动力特性分析方法

张弦拱桁架结构体系的动力特性分析是评估其抗震性能、自振频率、阻尼比等动力响应特性的重要手段。该分析过程主要包括试验研究和理论分析两部分。试验研究通过振动台试验、激振试验等方式，直接测量结构的动力响应；理论分析则依赖于有限元分析软件，通过模拟结构的动力行为来预测其动力特性。在动力特性分析中，常用的方法包括模态分析、时程分析和频谱分析。模态分析能够揭示结构的自振频率、阻尼比和振型等固有特性，是动力特性分析的基础。时程分析则通过输入地震波等动力荷载，模拟结构在长时间内的动力响应，以评估其抗震性能。频谱分析则是对结构的动力响应信号进行频率域的分析，以获取结构的频谱特性。对于张弦拱桁架结构体系，由于其复杂的构造和受力特点，动力特性分析需要综合考虑结构的几何非线性、材料非线性以及连接节点的非线性等因素。因此采用高精度的有限元分析软件和先进的动力特性分析方法显得尤为重要。

### 2.2 有限元模型建立

有限元模型是动力特性分析的基础，其准确性直接影响到分析结果的可靠性。在张弦拱桁架结构体系的有限元模型建立过程中，需要关注几个方面；（1）几何建模：根据结构的实际尺寸和形状，利用三维建模软件或有限元分析软件中的几何建模功能，建立结构的几何模型。在建模过程中，需要特别注意结构的细节，如连

接节点的形状和尺寸,以及拉索和撑杆的布置方式等。

(2) 材料属性定义:根据结构的实际材料,定义材料的弹性模量、泊松比、密度等属性。对于钢材等金属材料,还需要考虑其屈服强度和抗拉强度等力学性能指标。(3) 边界条件设置:根据结构的实际约束情况,设置合理的边界条件。对于张弦拱桁架结构体系,通常需要考虑支座约束、拉索预应力等因素对结构动力特性的影响。(4) 单元划分与网格生成:根据结构的复杂程度和精度要求,对几何模型进行单元划分和网格生成。单元划分的大小和形状直接影响到有限元分析的精度和计算效率。在单元划分过程中需要综合考虑结构的几何特征、受力特点以及计算资源等因素。在完成有限元模型的建立后,需要进行模型的验证和校核。通过与实际结构的对比和分析,确保有限元模型的准确性和可靠性。

### 2.3 动力特性分析结果

通过对张弦拱桁架结构体系进行动力特性分析,可以得到以下主要结果:自振频率与振型,通过模态分析,可以得到结构的自振频率和振型。自振频率是结构在自由振动时的固有频率,反映了结构的刚度特性<sup>[2]</sup>。振型则是结构在某一自振频率下的振动形态,反映了结构的动力响应特性。对于张弦拱桁架结构体系,其自振频率和振型受到拉索预应力、支座约束、结构尺寸和形状等多种因素的影响。阻尼比是反映结构在振动过程中能量耗散能力的指标。通过激振试验或有限元分析中的阻尼模型,可以得到结构的阻尼比。对于张弦拱桁架结构体系,其阻尼比受到连接节点的阻尼、材料阻尼以及空气阻尼等多种因素的影响。通过时程分析或频谱分析,可以得到结构在动力荷载作用下的动力响应特性。这些特性包括结构的位移、速度、加速度等动力响应参数,以及结构的频谱特性等。对于张弦拱桁架结构体系,其动力响应特性受到地震波、风荷载等动力荷载的影响,同时也受到结构自身动力特性的影响。在实际工程中,动力特性分析的结果可以为结构的设计、施工和维护提供重要的参考依据。动力特性分析的结果还可以为结构的健康监测和故障诊断提供重要的技术支持。

## 3 张弦拱桁架结构体系的抗震性能评估方法

### 3.1 地震作用分析方法

张弦拱桁架结构体系作为大跨度空间结构的一种,其抗震性能评估的首要步骤在于准确分析地震作用。确定性分析方法以特定的地震波作为输入,通过时程分析来模拟结构在地震作用下的动力响应。这种方法能够直观地反映结构在特定地震波作用下的变形、应力和加速度等动力参数,适用于对特定地震事件下结构响应的详

细分析。在实际应用中,常采用实际记录的地震波或根据地震烈度、震源深度等参数人工合成的地震波作为输入。概率性分析方法则基于地震动的统计特性,通过考虑地震发生的概率和结构的易损性来评估结构的抗震性能。这种方法能够给出结构在不同地震烈度下的失效概率,为结构的抗震设计和风险评估提供重要依据。概率性分析方法通常包括地震危险性分析、结构易损性分析和风险评估三个步骤。在张弦拱桁架结构体系的抗震性能评估中,地震作用分析方法的选择应根据具体工程需求、地震活动特点和结构特点综合考虑。对于重要或复杂的结构,建议采用确定性分析方法和概率性分析方法相结合的方式,以全面评估结构的抗震性能。

### 3.2 抗震性能指标与评估准则

抗震性能指标是量化评估结构抗震性能的关键参数,对于张弦拱桁架结构体系而言,主要包括最大位移、残余变形、应力比、能量耗散等。最大位移反映了结构在地震作用下的整体变形情况,是评估结构刚度和稳定性的重要指标。残余变形则反映了地震作用后结构的永久变形,对于结构的可恢复性和使用功能具有重要影响。应力比是指结构在地震作用下的最大应力与屈服应力的比值,用于评估结构的强度和延性。能量耗散则反映了结构在地震作用下吸收和耗散能量的能力,是评估结构耗能机制的重要指标。抗震性能评估准则则是根据抗震性能指标制定的评估标准,用于判断结构在地震作用下的抗震性能是否满足设计要求。评估准则通常包括性能水准和性能目标两个方面<sup>[3]</sup>。性能水准是指结构在地震作用下所期望达到的性能状态,如基本完好、轻微损坏、中等损坏、严重损坏和倒塌等。性能目标则是根据结构的重要性、用途和经济性等因素确定的抗震性能要求,如确保结构在罕遇地震下不倒塌、在设防地震下轻微损坏等。在张弦拱桁架结构体系的抗震性能评估中,应根据具体工程需求、结构特点和抗震设防要求,合理选择抗震性能指标和评估准则,以确保评估结果的准确性和可靠性。

### 3.3 抗震性能数值模拟分析

抗震性能数值模拟分析是张弦拱桁架结构体系抗震性能评估的重要手段。数值模拟分析的关键在于建立准确的有限元模型和选择合适的动力分析方法。有限元模型的准确性直接影响到数值模拟结果的可靠性。因此,在建立有限元模型时,应充分考虑结构的几何非线性、材料非线性和连接节点的非线性等因素。动力分析方法则应根据具体工程需求和结构特点选择,如时程分析法、反应谱分析法等。通过数值模拟分析,可以得到

结构在地震作用下的位移、应力、加速度等动力响应参数,以及结构的耗能机制、损伤分布等信息。这些信息对于评估结构的抗震性能、优化结构设计、制定抗震措施等具有重要意义。数值模拟分析还可以用于研究不同地震波、不同支座约束条件、不同拉索预应力等因素对结构抗震性能的影响,为结构的抗震设计和优化提供重要参考。在张弦拱桁架结构体系的抗震性能评估中,数值模拟分析应与试验研究和理论分析相结合,以全面评估结构的抗震性能,数值模拟分析的结果应经过验证和校核,以确保其准确性和可靠性。

#### 4 影响张弦拱桁架结构体系抗震性能的因素研究

##### 4.1 结构参数影响

张弦拱桁架结构体系的抗震性能受到多种结构参数的影响,这些参数直接关系到结构的整体刚度、承载能力和耗能机制。首先,桁架的高度和跨度是影响其抗震性能的关键因素。高度的增加通常能够提升结构的整体刚度,从而减小地震作用下的变形,但过高的结构也可能导致地震力的集中,增加结构的破坏风险。跨度则直接影响结构的自重和地震响应,大跨度结构在地震中更容易产生较大的变形和应力集中。其次,桁架的截面尺寸和形状对结构的抗震性能也有显著影响。合理的截面设计能够提升结构的承载能力和延性,从而增强其在地震作用下的稳定性。另外,拉索的预应力和撑杆的布局也是影响张弦拱桁架抗震性能的重要因素。预应力的合理设置能够平衡结构的内力,提高结构的整体稳定性;而撑杆的布局则直接影响到结构的传力路径和耗能机制。

##### 4.2 材料性能影响

材料性能对张弦拱桁架结构体系的抗震性能具有不可忽视的影响。钢材作为张弦拱桁架的主要构成材料,其屈服强度、抗拉强度、韧性等力学性能直接关系到结构的承载能力和延性。高屈服强度和抗拉强度的钢材能够提升结构的承载能力,使其在地震作用下更难达到屈服状态;而良好的韧性则能够确保结构在地震中保持良好的塑性变形能力,从而吸收和耗散更多的地震能量<sup>[4]</sup>。拉索的材料性能同样重要,高强度、低松弛的拉索能够保持稳定的预应力状态,确保结构在地震作用下的整体

稳定性。材料的疲劳性能和耐腐蚀性也是影响张弦拱桁架长期抗震性能的关键因素,特别是在地震多发区域,这些性能的提升能够显著延长结构的使用寿命。

##### 4.3 场地条件影响

场地条件对张弦拱桁架结构体系的抗震性能具有重要影响。地震波在传播过程中会受到场地土层的影响,不同土层对地震波的放大和衰减作用不同,从而导致结构在地震作用下的响应差异。软弱土层或存在液化可能性的土层会放大地震波的能量,增加结构的地震响应,甚至导致结构的严重破坏。在进行张弦拱桁架结构体系的抗震设计时,必须充分考虑场地条件的影响,采取相应的地基处理措施,如加固软弱土层、设置隔震层等,以降低地震对结构的影响。场地的地形地貌、地下水位等因素也可能对结构的抗震性能产生影响,需要在设计和评估过程中予以考虑。通过合理的场地选择和地基处理措施,能够显著提升张弦拱桁架结构体系的抗震性能,确保其在地震作用下的安全性和稳定性。

##### 结束语

本文通过对张弦拱桁架结构体系的动力特性及抗震性能进行系统研究,不仅加深了对其抗震机理的认识,还为实际工程应用提供了有益的参考。未来,随着结构工程技术的不断进步和抗震设计理念的更新,张弦拱桁架结构体系的抗震性能将得到进一步提升,为构建更加安全、可靠的大跨度空间结构贡献力量。同时也期待更多学者和工程师加入到这一领域的研究中来,共同推动结构抗震技术的发展。

##### 参考文献

- [1]李明. 新型混凝土材料的抗震性能研究[J]. 建筑科学与工程,2022,39(3): 45-56。
- [2]王红,赵阳. 混凝土抗震设计中的材料选择与应用[J]. 建筑工程材料,2021,30(4): 78-89。
- [3]李刚. 抗震性能分析与评估在工程实践中的应用[J]. 结构工程师,2020,36(3): 45-53。
- [4]杨镜玄. 装配式混凝土填充墙对框架结构抗震性能的影响研究[J]. 砖瓦,2025,(01):51-53.DOI:10.16001/j.cnki.1001-6945.2025.01.024.