

硕士学位论文

城市轨道交通梯形轨枕疲劳损伤
规律研究

2023年06月13日

摘 要

随着我国经济实力的不断增强，大城市的人口聚集和机动车数量的快速增长导致地面交通顺畅的需求激增。后来城市轨道交通的出现，有效改善了地面交通拥堵的情况。重庆是西部地区第一个开通轨道交通的城市，并且不断开通新型的轨道线路，某些线路站点所使用的梯形轨枕为一种新型轨枕，具有减振降噪、施工快等多方面的优点，相关技术人员对其静力性能已有较充分的研究，但对轨枕结构在列车荷载作用、温度循环下的疲劳性能研究很少。本文主要以某些站点所使用的梯形轨枕原型为研究对象，通过理论计算与试验数据，分析轨枕的疲劳性能，并从中得到梯形轨枕的疲劳损伤规律，论文主要工作与结论如下：

参照目前重庆其他已开通的轨道交通路线，结合预期的客流量和车流量，对研究站点所在线路的运行计划进行预估。通过 Midas/Civil 建立钢轨-梯形轨枕的结构分析模型，计算出移动荷载作用下梯形轨枕的弯矩包络图，以及最不利位置处的弯矩影响线，得到最不利截面的弯矩历程曲线，再采取雨流计数法和泄水法^[1]取弯矩历程曲线上的弯矩幅及其对应的循环次数，结合预估得到的运行计划，确定 100 年运营期内各弯矩幅及其总的循环次数。

针对重庆夏天的极端高温，在轨枕疲劳分析中首次引入温度梯度影响，采用轨道板的温度场模型，利用本地区多年分析得到的气温、辐射量等情况，计算出梯形轨枕上下表面的温度差，得到梯形轨枕上下表面在各月份的正负温度梯度及其最不利截面的弯矩循环情况。通过阅读大量文献发现以往的研究中大多数都只考虑了仅列车荷载作用，忽略了温度梯度对结构的影响，而本文结合列车荷载和温度梯度这两个因素对梯形轨枕的作用。

分别考虑仅列车荷载作用、列车荷载加上温度梯度共同作用两种情况。采用 Paris 公式将变幅弯矩循环等效为常幅弯矩循环，并通过混凝土的 S-N 方程和 Miner 线性损伤累积理论计算出在两种情况下，200 万次疲劳荷载下的常幅弯矩，然后将弯矩幅转化为作用在梯形轨枕上的试验荷载幅。

建立梯形轨枕 ANSYS Workbench 三维实体模型进行静力、动力与疲劳寿命分析，用预应力钢筋降温收缩的方式来模拟轨枕中的预应力，得到最不利截面下缘拉应力达到混凝土抗拉强度设计值时对应的弯矩 $40.39\text{kN}\cdot\text{m}$ ，与梯形轨枕静力破坏试验的实测开裂弯矩 $41\text{kN}\cdot\text{m}$ 基本一致，稍大于按规范计算的开裂弯矩值 $38.15\text{kN}\cdot\text{m}$ ；固有频率计算结果，为疲劳试验加载频率 3.5Hz 的最终确定^[2] 供了依据；前述两种情况下梯形轨枕的计算寿命，均符合规范要求。

根据两种情况在 200 万次疲劳荷载下的计算常幅弯矩，考虑弯矩幅分级及循

环次数的组合对 5 片梯形轨枕进行系列疲劳试验，以仅考虑列车作用的弯矩幅值为基础，初始循环次数分别为 200 万、150 万、75 万、50 万、25 万次后，对弯矩幅依次□ 高至基础幅值的 1.11 倍（列车荷载加上温度梯度共同作用）、1.3 倍、1.45 倍，再继续进行不同循环次数组合的疲劳试验直至破坏，得到梯形轨枕循环加载分 级组合直至疲劳失效过程的结构刚度、截面中性轴位置、代表性测点应变、疲劳寿 命、损伤度变化规律。以往的多数疲劳试验没有考虑荷载分级，因此采用弯矩幅分 级及循环次数的组合研究轨枕损伤变化规律是本论文的创新之处。

关键词：梯形轨枕，温度梯度， 累积损伤， 损伤规律，有限元分析

ABSTRACT

In recent years, with China's growing economic power, population to concentrate in large cities and the rapid growth of the motor vehicle number, lead to a surge in demand for smooth ground traffic. The emergence of urban rail transit has effectively improved the situation of traffic congestion on the ground. Chongqing is the first city in the western region to open rail transit, and has been opening new rail lines. The trapezoidal sleeper used by some line stations is a new sleeper, which has many advantages such as vibration and noise reduction, fast construction, etc. Relevant technicians have fully studied its static performance. However, there are few researches on the fatigue performance of sleeper structure under train load and temperature cycle. This thesis mainly takes the trapezoidal sleeper prototype used in some stations as the research object, the fatigue performance of sleeper is analyzed by theoretical calculation and test data, and obtains the fatigue damage law of the trapezoidal sleeper:

With reference to other rail transit routes that have been opened in Chongqing at present, combined with the expected passenger flow and vehicle flow, the operation plan of the line where the research station is located is estimated. By Midas/Civil rail - trapezoidal sleeper structure analysis model is established, and the trapezoidal sleeper under moving load bending moment of the envelope and the most unfavorable moment influence line position were calculated to obtain the bending moment history curve of the most unfavorable section. Then, the bending moment amplitude and the number of cycles on the bending moment history curve were extracted by the rain flow counting method and the drainage method. Combined with the estimated operation plan, the bending moment amplitude and the total number of cycles within the 100 years of operation were determined.

In view of the extreme high temperature in Chongqing in summer, the influence of temperature gradient was introduced into the sleeper fatigue analysis for the first time. The temperature field model of the track plate was used to calculate The temperature difference between the surface and under surface of the trapezoidal sleeper by using the temperature and radiation amount obtained from the analysis of the local area for many years. The positive and negative trapezoidal sleeper upper and lower surface temperature gradient of each month and the bending moment cycle of the most adverse section were obtained. Through reading a large number of literatures, it is found that most of the previous studies only considered the train load and ignored the influence of temperature gradient on the structure. However, this thesis combined the effect of train load and temperature gradient on the trapezoidal sleeper.

Two cases of train load alone and train load plus temperature gradient are considered respectively. Paris formula was used to equivalent the variable bending moment cycle to constant bending moment cycle, and the constant bending moment under 2 million fatigue loads under two conditions was calculated by S-N equation of concrete and Miner's linear damage accumulation theory, and then the bending moment amplitude was converted into the test load amplitude acting on the trapezoidal sleeper.

A three-dimensional solid model of ANSYS Workbench was established to analyze the static, dynamic and fatigue life of the trapezoidal sleeper. The prestress in the sleeper was simulated by cooling and shrinking the prestressed steel bar, and when the tensile stress in the edge of the most unfavorable section reaches concrete tensile strength design value, the concrete tensile strength corresponds to the bending moment. The cracking moment is basically consistent with $41\text{kN}\cdot\text{m}$ measured in the static failure test of trapezoidal sleeper, and slightly larger than $38.15\text{kN}\cdot\text{m}$ calculated according to the code. The calculation results of natural frequency provide a basis for the final determination of fatigue test loading frequency of 3.5Hz . The calculated life of trapezoidal sleeper in the above two cases is in line with the standard requirements.

According to the calculation of constant bending moment under 2 million fatigue loads under two conditions, a series of fatigue tests are carried out on 5 pieces of trapezoidal sleeper considering the combination of bending moment classification and number of cycles. Based on only considering the bending moment amplitude of train action, the initial cycles are 2 million, 1.5 million, 750,000, 500,000 and 250,000 times respectively. The bending moment amplitude is successively increased to 1.11 times of the foundation amplitude (combined action of train load and temperature gradient), 1.3 times, 1.45 times, and then continue to carry out fatigue test with different cycles until failure. The variation laws of structural stiffness, neutral axis position of section, representative measuring point strain, fatigue life and damage degree of trapezoidal sleeper were obtained during cyclic loading classification combination until fatigue failure. Most of the previous fatigue tests did not consider the load classification, therefore, it is the innovation of this thesis to use the combination of moment amplitude classification and cycle number to study the damage variation law of sleeper.

KEY WORDS: Trapezoidal sleeper, Temperature gradient, Cumulative damage, Damage law, Finite element analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 轨枕国内外研究现状	2
1.3 研究目的及意义	4
1.4 本文主要工作内容及技术路线	5
第二章 梯形轨枕疲劳损伤的分析理论及方法	7
2.1 预应力梯形轨枕的疲劳损伤	7
2.2 Miner 法则	8
2.3 疲劳循环荷载幅的取方法	9
2.3.1 雨流计数法	9
2.3.2 泄水计数法	10
2.4 等效荷载计算	11
2.5 本章小结	12
第三章 梯形轨枕等效荷载幅确定	13
3.1 梯形轨枕试件	13
3.2 标准疲劳荷载和弯矩历程例	15
3.2.1 标准疲劳荷载模型	15
3.2.2 列车作用下弯矩历程例的计算	16
3.3 梯形轨枕-钢轨系统温度分析	18
3.3.1 温度梯度取值	18
3.3.2 钢轨温度	22
3.4 等效荷载幅的计算	22
3.4.1 仅列车荷载作用	22
3.4.2 列车荷载+温度梯度共同作用	24
3.5 等效荷载的计算	28
3.6 本章小结	29
第四章 梯形轨枕结构计算分析	30
4.1 模型建立	30
4.2 预应力等效	32
4.3 静力分析	33
4.4 固有频率计算	36

4.5 疲劳寿命分析	38
4.6 本章小结	39
第五章 梯形轨枕试验分析	41
5.1 试验准备	41
5.1.1 试件安装	41
5.1.2 加载装置	42
5.1.3 测点布置及数据采集	43
5.2 梯形轨枕开裂荷载试验确定	45
5.3 疲劳试验	46
5.3.1 疲劳试验中的静力加载方案	46
5.3.2 疲劳试验流程及结果	47
5.4 本章小结	50
第六章 疲劳试验数据分析及疲劳损伤发展规律	52
6.1 荷载-跨中挠度变化	52
6.2 荷载-应变变化	53
6.3 刚度变化	55
6.4 跨中截面中性轴位置	57
6.5 跨中疲劳累积损伤规律	60
6.5.1 弹性模量法	60
6.5.2 最大应变法	61
6.6 疲劳寿命变化规律	62
6.7 本章小结	63
第七章 结论与展望	65
7.1 结论	65
7.2 本文创新点	66
7.3 展望	66
致谢	67
参考文献	68
在学期间发表的论文和取得的学术成果	71

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着我国经济的可持续发展、逐步加快城市化进程，城市人口总数呈上升趋势，城市交通的供给也日益紧张。为了提供安全、快捷、舒适的市民出行环境，城市轨道交通应运而生，其快捷及时的出行方式给人们的生活带来了很多的便利，有效的缓解了交通拥堵的情况。

重庆轨道交通目前已经开通了共计 10 条轨道交通线路，其中两条线路为单轨系统，剩余 8 条线路均为地铁系统。城市轨道交通的地铁系统主要由钢轨、轨枕、连接零件、道床、道岔以及其他附属设备组成，其中轨枕可以分为：木枕、钢枕、混凝土轨枕、合成材料枕等。

梯形轨枕是后来引进的一种新的轨枕类型，如图 1.1 所示。梯形轨枕有多方面的优点，比如：减振降噪、维修次数相对较少等，适用范围在桥梁、隧道、其他维修困难且需要减少振动传递的区域^[1]，而城市轨道交通列车对所在沿线的建筑物带来的振动和噪声也越来越受到关注，这表明减振降噪对于轨道交通也是必不可少的，因此梯形轨枕轨道被应用于我国各大城市的地铁工程^[2]，同时对于轨枕结构在列车荷载作用下的疲劳性能也受到了关注。

梯形轨枕的结构是由两片矩形截面的预应力混凝土纵梁和矩形钢管混凝土横梁组合而成^[3]，以纵向轨枕作为基础，在相等的间距之间加设横梁，组成形似梯子的混合结构，联结功能优于传统轨枕结构，并在其下设置了用于减振降噪的垫块。

梯形轨枕作为一种性能优良的轨枕结构，与一般横向轨枕的区别为梯形轨枕的长度是沿轨道方向延伸。这种梯形轨枕的构造使钢轨减少了由列车荷载造成的变形，同时起到减振降噪的作用，被各类轨道交通线路所吸引，包括桥梁、隧道、客运铁路、地铁等。目前，我国对于梯形轨枕的研究多数局限于静态分析、降噪，但是梯形轨枕由疲劳造成的破坏又是不容忽视的。

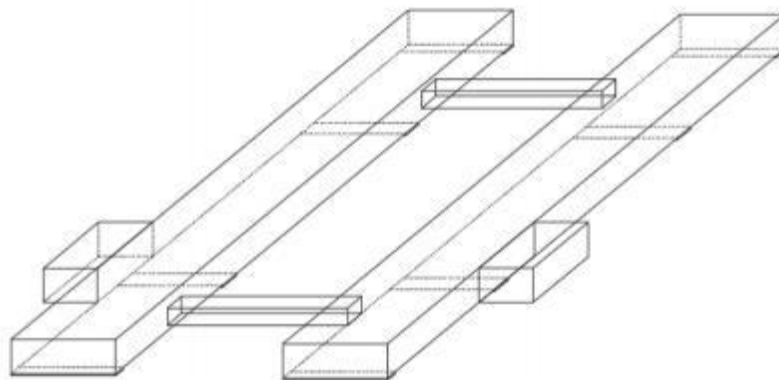


图 1.1 梯形轨枕

1.2 轨枕国内外研究现状

在我国的铁路发展中，木枕被最先开始使用，但是因为木枕耐腐蚀性差、寿命较低、轨道几何形位难以保持且我国木材资源的匮乏，不利于后期安全，木枕逐渐被其他轨枕所取代^[4-5]。因此我国第一个五年计划就提出将混凝土轨枕去代替木枕^[6]。在1955年，中国铁道科学研究院等单位对混凝土轨枕进行了研究开发^[6]。1956至1958年，铁路部门组织人员到国外考察，引进国外预应力混凝土轨枕生产工艺技术，并建成我国第一条预应力混凝土轨枕生产线，之后在我国各个地区相继建设了轨枕车间。1996年有文献讲述日本开始研制混凝土梯形轨枕，并将梯形轨枕用在常磐新线、羽田机场线、空港联络线等各个地方；美国也铺设有试验段^[7]。

我国是在日本之后的第二个生产并且将梯形轨枕使用在铁路中的国家^[8]。现在梯形轨枕已经成为轨枕轨道的一种流行形式，但是我国对梯形轨枕的使用范围并不广，而且对普通混凝土轨枕的研究较多，对梯形轨枕只是在一定范围内的试验段进行了研究。理论研究方面，已经取得了很大的进展，但是大部分研究都是围绕着梯形轨枕的减振降噪方面展开的，而对梯形轨枕自身的特性、疲劳特性等方面的研究还不够深入。

对于普通轨枕，很多学者对其开展了研究：

潘华、邱洪兴^[9]在2006年借助连续介质热力学和连续介质力学来进行力学研究，并分析和推导出混凝土疲劳损伤演变方程的基本形式，通过试验验证和确定方程中的参数，最终拟合成曲线，为了能够对疲劳荷载作用下的混凝土进行有限元分析，两位学者建立了一个关于耦合损伤变量的混凝土本构模型，继而为后来的研究奠定了基础。

Koh Taehoon, Hwang Seonkeun^[10]在2016年根据国际预应力混凝土轨枕标准，在实验室进行了试验，如静态试验、动态试验、疲劳试验和扣件垂直试验等试验，用于评估环保型预应力混凝土轨枕的结构性能；试验结果表明，环保型预应力混凝土轨枕不仅满足国际上对预应力混凝土轨枕的结构要求，而且与普通预应力混凝土轨枕相比，具有优越的结构性能。

Parvez Ahsan, Foster Stephen James^[11]在2017年对混凝土轨枕加入钢纤维，并对混凝土轨枕的耐久性、疲劳性和韧性等物理性能进行了研究，他们研究了使用钢纤维的轨枕的承载能力和疲劳性能效率。在恒幅荷载循环和静态荷载下，用八根纤维含量为0、0.25%或0.5%（按体积计）的预应力混凝土轨枕进行了试验。试验结果表明：与不含纤维的轨枕相比，含0.5%纤维的轨枕具有更高的静态承载力和更长的疲劳寿命、更低的挠度和更细的裂缝宽度。

Ruilin You 和 K.Sakdirat^[12]在2019年开展了预应力混凝土轨枕疲劳寿命的现场研究，分析了现场荷载条件、材料的时变和动态特性以及预应力混凝土轨枕的动

态弯矩，基于损伤累积的概念，提出了一种评估混凝土轨枕疲劳寿命的新方法，研究表明：混凝土轨枕的疲劳寿命受多种因素的影响；混凝土轨枕中心段的疲劳破坏由负弯矩控制。

郭润平、姜晓军、王建西^[13]在 2019 年将多孔火山岩骨料混凝土轨枕运用在东非地区铁路轨道工程的可行性做了对用的研究，对轨枕开展疲劳试验，通过仪器对裂缝进行测量，得到了轨枕疲劳裂纹扩展的规律；并发现裂纹扩展的速率为非线性，且特征明显，因此符合规范要求。

Bae Younghoon 和 Pyo Sukhoon^[14]在 2020 年超高性能混凝土（UHPC）首次应用于后张式轨枕，以延长轨枕的设计寿命、减少对轨枕的维护，充分利用了 UHPC 的材料优势，并基于应变协调性分析了轨枕的关键截面；制造 16 根 UHPC 轨枕。根据欧洲标准进行结构试验，最终结构试验表明：200 万次加载循环后，裂缝宽度不会增加；即使在初始裂纹形成之后，超高混凝土也使得结构稳定、并且具有很强的抗裂能力。

郭兆杰^[15]在 2020 年对预应力混凝土轨枕裂缝产生的原因做出了分析，并对裂缝提出了防治措施；主要原因有两点，一是由于荷载因素，二是由于非荷载因素造成的，例如温度变化；提出为了将混凝土轨枕的使用寿命延长，应当加强对结构裂缝的预防和控制、对结构材料的检测，制作之前应合理配置混凝土的原材料，做好养护工作，从而提高预应力混凝土轨枕的施工质量和技术水平。

Kraskiewicz C^[16]等人在 2020 年讨论了有砟轨枕轨道系统弹性振动声隔离器的静态和动态特性，对四个 USP 轨枕垫上进行了疲劳试验，这些轨枕垫具有不同的材料、晶粒尺寸或密度。结果表明：聚氨酯基垫片性能最好、橡胶基垫性能最差。本文研究的梯形轨枕采用的减振垫块材料就为聚氨酯发泡弹性体。

樊文波^[17]对重载作用在预应力混凝土轨枕上进行了研究，研制出适用于重载的重载轨枕，对结构开展了静载抗裂试验以及疲劳试验，将试验所得结果与现有的规范进行对比和分析，由此可见各项指标满足要求，得到预应力混凝土轨枕具有足够的承载能力，且该结构在耐久性、抗裂性等各方面的表现都较为良好。

对于梯形轨枕，很多学者对其开展了研究：

Okuda H^[18]在 2004 年提出了一种浮置式梯形轨枕结构，该结构被开发的目的是为了成为下一代无砟轨道，这种新型结构与其它轨道系统相比，减振降噪的效果更优。

2004 年，Kiyoshi Asunuma^[19]在美国佛罗里达的交通技术中心，采用重载货运列车对梯形轨枕进行试验研究，并将梯形轨枕放置在两种不同的轨道上，分别是有砟和浮置型，试验结果表明梯形轨枕的耐久性更强，在未来的使用中可以减少对轨道的维修工作，节约了人力等资源。

Meng^[21]在其实验室建立了两种类型的梯形轨枕轨道，即有砟轨道和无砟轨道，用于研究两种类型梯形轨枕的动力特性，分别对两种轨道开展了模态试验，然后比较这两种轨道的试验结果，最终研究表明，两种梯形轨枕轨道的减振效果都很好。

畅德师^[18]在 2006 年通过对北京地铁 5 号线中使用的梯形轨枕进行了研究，对梯形轨枕所用路段进行现场考察和相关的技术咨询，这是国内地铁中第一次用到梯形轨枕，对其具体情况进行概述，并对一块长 6.25m 的梯形轨枕完成了两项试验，分别是简谐荷载加载和冲击荷载加载，最终得到该梯形轨枕的减振性能较好。

马利英^[7]在 2008 年参照北京地铁 4 号线所使用的梯形轨枕，通过梯形轨枕的生产介绍了长线法的施工技术及其难点，该方法能够满足批量生产的需求，同时能够保证梯形轨枕满足尺寸、质量以及试验测试性能的要求，为梯形轨枕大量生产和广泛使用在轨道交通奠定了基础。

张珍珍^[23]在 2010 年[□]出对梯形轨枕轨道的连接部位进行改进，同时建议将连接部位的钢管改为混凝土结构，目的是为了[□]高梯形轨枕轨道结构的耐久性，后来对改进后的梯形轨枕轨道进行了分析，通过有限元计算，改进后的梯形轨枕轨道的轨枕位移为 0.38mm，采用混凝土代替钢管时，梯形轨枕应力增大，对其进行模态分析得到当轨枕发生扭曲带动钢轨变形时，容易导致轨道产生几何误差，对轨道安全造成不利影响。

付昆^[24]对北京地铁 10 号线所使用的梯形轨枕结构进行研究，从设计参数的角度分析了梯形轨枕在地铁 10 号线中表现出来的性能，同时建议对原工程的方案进行改进，研究表明，减振材料刚度增大会导致钢轨与轨枕竖向位移减小，同时轨枕下侧受拉弯矩减小，而上侧受拉弯矩会增大；梯形轨枕纵向长度不同，其他配置相同时，梯形轨枕的整体力学性能基本相同。

曾向荣^[25]等人在铁道科学研究院国家铁道试验中心采用 8 编组电动车组，采用半径为 1432m 的环轨道对梯形轨枕的性能进行研究，选择四种不同列车测试速度开展试验，将测试轨道分为两种：梯形轨枕、有砟轨道，且测试多种指标。对测量数据进行分析得到：梯形轨枕轨道所测各项指标数值都小于相关规范的极限值，与有砟轨道测试数据相近，说明梯形轨枕在各方面均满足规范中的要求。

综上所述，对于普通轨枕的研究集中在混凝土轨枕，对其进行了静力、动力、疲劳研究，得到轨枕在耐久性、抗裂性等方面的表现都比较好；但对梯形轨枕的研究大多数为结构的减振降噪，并采取试验研究的方式对梯形轨枕的降噪性能做出判断。在国内外对梯形轨枕的研究中，由疲劳引起损伤研究较少，为以后的研究[□]供了思路。

1.3 研究目的及意义

由前文可知，城市轨道交通的出现给人们的生活带来了很大便利，有效的缓解

了交通拥堵的情况。许多路线需要穿过住宅楼、学校和其他建筑，对于人口比较密集的区域，梯形轨枕在轨道系统中可以很大程度上发挥作用，因此对梯形轨枕的进一步研究是很有必要的。

虽然目前对梯形轨枕的相关数据有一定的了解，可以为更好使用梯形轨枕⁴供参考，但大多都是对梯形轨枕进行静态分析或者减振降噪分析。综合目前国内外对梯形轨枕的研究现状，对疲劳性能研究比较缺乏。疲劳分析对一个结构来说非常重要，如果不能准确估计结构的疲劳寿命，使结构在使用期间内发生疲劳失效，由疲劳破坏造成的损失非常严重，因此对梯形轨枕进行疲劳分析使得其在在使用期间健康、安全运营变得非常重要。

若能有梯形轨枕损伤发展规律，那么在未来的生活中，就能最大限度的避免由于结构的疲劳而引发的事故。就本文而言，一方面通过对梯形轨枕的疲劳试验和相应理论分析，了解其力学性能，判断结构是否满足要求；另一方面，根据本试验和研究的结论，得到梯形轨枕损伤的发展规律，及时发现结构是否出现问题，从而预防危险事故的发生。

1.4 本文主要工作内容及技术路线

本文主要以重庆轨道交通某些线路站点中的部分路段所铺设的梯形轨枕作为研究对象，研究该结构在轨道交通列车荷载作用下的疲劳损伤规律研究，主要工作内容如下：

(1) 结合已有线路预估运行计划，确定梯形轨枕的疲劳弯矩幅。利用有限元软件 Midas/Civil 建立钢轨-梯形轨枕的结构分析模型，确定列车荷载下的结构最不利截面，进而得到最不利截面的弯矩影响线，然后运用雨流计数法、泄水法将随机变幅弯矩转化为常幅弯矩，最终确定仅列车荷载作用下的疲劳弯矩幅。

(2) 温度梯度影响下内力分布情况。考虑温度梯度的影响下，梯形轨枕的内力分布情况，确定温度梯度引起的弯矩幅，得到列车荷载与温度梯度共同作用下的等效弯矩幅。

(3) 梯形轨枕进行结构计算分析。分别进行静力分析、固有频率计算、疲劳寿命分析。得到有限元计算的极限破坏荷载、疲劳试验加载频率以及两种情况下的疲劳寿命，寿命是否满足规范要求。

(4) 梯形轨枕静力破坏实验、疲劳试验研究。分别对六块梯形轨枕做试验，其中 1 块做静力破坏试验，剩余 5 块做疲劳试验。静力破坏试验得到结构实测的极限破坏荷载。然后继续开展剩余 5 块的疲劳试验，对每块梯形轨枕采用弯矩幅分级和不同荷载幅组合的疲劳加载方式进行试验，以此得出弯矩幅分级和不同荷载幅组合下的疲劳次数对寿命的影响。

(5) 对比数据，总结规律。得到结构破坏时的跨中挠度、应变随着荷载的变

化规律、刚度变化规律、中间截面的中性轴变化规律、跨中疲劳损伤规律，以及各块梯形轨枕的疲劳等效寿命情况，弯矩幅分级和不同荷载幅组合对梯形轨枕疲劳寿命的影响，得到梯形轨枕疲劳寿命变化规律。

(6) 总结本文的研究内容及成果，结合目前对梯形轨枕的研究^[1] 出展望。根据上述对梯形轨枕研究的主要内容，将绘制成如图所示的研究路线。

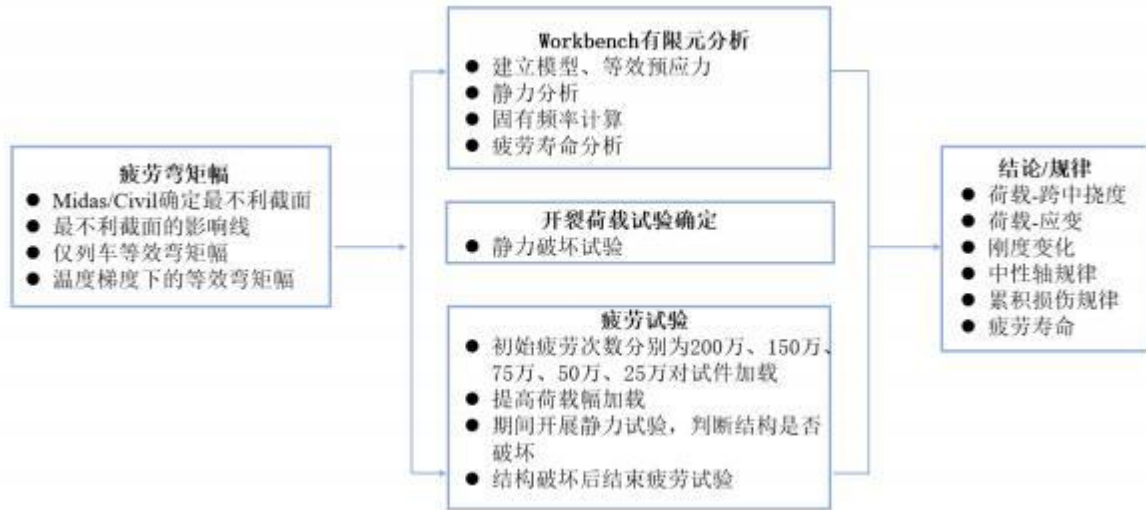


图 1.2 研究路线图

第二章 梯形轨枕疲劳损伤的分析理论及方法

前期在结构中的细微变化和在疲劳过程中引起的裂纹以及裂纹的不断扩展，被称为损伤。在疲劳加载过程中的每次循环都会对结构产生损伤，且损伤是当结构承受的应力比疲劳极限高造成的，所以最终结构的损伤是通过每次循环的损伤累积引起的。不同的研究学者根据累积时间的不同，做出了不同的假设，也提出了不同的疲劳累积损伤理论，可以被分为四大类：线性疲劳累积损伤理论、双线性累积损伤理论、非线性累积损伤理论、其他累积损伤理论^[26]。对结构进行疲劳试验一般

采取等幅荷载的加载方式。本节主要介绍使用比较广泛的 Miner 线性累积理论和两种取荷载幅的方法（雨流计数法、泄水法），以及等效荷载幅的计算方法。

2.1 预应力梯形轨枕的疲劳损伤

预应力混凝土结构具有节省材料自重小、刚度大、稳定性高、抗裂性好等特点，因此被广泛的运用于轨道交通中，将预应力混凝土结构分为全预应力混凝土结构和部分预应力混凝土结构^[27]。由于对全预应力混凝土的预应力高，且结构在疲劳加载的过程中，受压区的应力幅值较小，钢筋和混凝土在反复荷载作用下产生的应力较小，因此一般不会产生疲劳破坏^[27、28]；部分预应力混凝土的疲劳问题仍然不容小觑，部分预应力混凝土的疲劳效应主要是因为普通受力钢筋在疲劳过程中处于不利的状态。

对于本文所使用的梯形轨枕是一种在列车荷载作用下的预应力混凝土疲劳受弯构件，通过《结构设计原理》^[29]中将受弯构件从开始加载到结构发生破坏分为三个阶段，其中第一个阶段是混凝土弹性受力阶段，在这个阶段为混凝土的整个截面参与工作，混凝土的拉、压应力都表现为三角形分布，此阶段的混凝土此时处于弹性的工作状态。

在规范 CJ/T 401-2012《梯形轨枕技术条件》^[72]中，规定梯形轨枕在经过 200 万次疲劳加载后，利用仪器观察试件表面是否出现裂缝，结构的表面残余裂缝不得超过 0.05mm，同时也就表明梯形轨枕对于结构出现裂缝的要求十分严苛，基本上是不能出现裂纹。因此本文的研究对象梯形轨枕在设计年限内应该都处于弹性阶段，否则认为梯形轨枕因疲劳发生损伤。

对预应力混凝土疲劳性能的研究主要是进行等幅疲劳试验、变幅疲劳试验、随机疲劳试验。试验中常用的是等幅加载，一般来说都是基于疲劳试验前后等幅与变幅造成的结构损伤度相等，利用这种方式将变幅荷载转变为试验所需的等效常幅荷载，常用的理论方法为 Miner 线性损伤理论。

2.2 Miner 法则

线性疲劳累积损伤理论是指在疲劳循环荷载作用下，结构的疲劳损伤是线性叠加的，同时每个应力之间是相互独立、互不影响的，当结构的疲劳损伤累积到某一数值 D 时，结构就因疲劳发生破坏，这个理论简称为 Miner 法则。

根据材料吸收净功的原理，给出了疲劳线性累积损伤的数学表达式，设材料在应力幅为 $\Delta\sigma_1$ 时，结构破坏时吸收的净功为 W ，材料经 n_1 次应力循环吸收的功为 W_1 ，材料经 N_1 次应力循环后发生破坏，则有：

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N_1} \quad (2.1)$$

同理，设在应力幅为 $\Delta\sigma_2$ 时，经 n_2 次应力循环材料吸收的功为 W_2 ，且材料经 N_2 次应力循环后破坏，则有：

$$\frac{W_2}{W} = \frac{n_2}{N_2} \quad (2.2)$$

在材料破坏时有：

$$W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n = W \quad (2.3)$$

比较式 (2.1) ~ (2.3)，可以得到

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.4)$$

上式被称为 Miner 法则的数学表达式。

式中： n_i —应力幅 $\Delta\sigma_i$ 作用的次数；

N_i —用 $\Delta\sigma_i$ 作常幅应力循环试验时的疲劳破坏次数

通过 Miner 线性累积损伤理论认为，在变幅疲劳试验中各个应力幅 $\Delta\sigma_i$ 所造成的损伤都可用 n_i/N_i 来定量表示，同时是可以线性叠加的。因此，损伤度 D 可以用来定义任意应力幅 $\Delta\sigma_i$ 对结构造成的损伤：

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.5)$$

基于式 (2.1) 和 (2.5) 可知，当 $D \geq 1$ 时，经过循环后吸收的净功要大于材料吸收的净功，材料才会发生破坏； $D < 1$ 时，经过循环后吸收的净功要小于材料吸收的净功，此时材料未破坏。通过了许多的试验结果表明，当结构的损伤度为 1 时并不能说明结构发生疲劳破坏，而当损伤度为大于 1 或小于 1 时，结构也会发生疲劳破坏，这是与不同应力幅的加载顺序有关，因为 Miner 法则并没有考虑应力幅加

载顺序的问题。

2.3 疲劳循环荷载幅的提取方法

在平时的使用中，作用在结构上的循环荷载是随机的。随机荷载的循环计数法有多种，对于同一荷载随时间变化过程，如果使用不同的计数法进行计数，不同方法之间所得出来的疲劳寿命有可能会相差很大。常用的循环计数法有峰值计数法、泄水计数法和雨流计数法^[30]。

峰值计数法是将结构上荷载随时间变化曲线中的全部峰值和谷值都进行计数；泄水计数法是对历程曲线相邻的峰值和谷值之间的差值，或者是将此历程曲线中最大、最小荷载之间的差值进行计数；雨流计数法是根据所研究的应力-应变行为进行计数^[31]。

在对研究对象进行疲劳分析之前，需要确定作用在结构上的荷载大小，以及最不利截面的内力随时间变化情况，得到对应的历程曲线。通过历程曲线提取循环值以及数出各幅值循环次数，为了确定结构的疲劳荷载谱。本小节将主要介绍雨流计数法和泄水计数法这两种较为常用的提取方法。

2.3.1 雨流计数法

雨流法计数原理：将荷载-时间关系图中的时间轴朝下作为竖轴，荷载作为横轴，调整后的荷载-时间关系图就类似于房顶的屋面，雨水依次自上而下流动（如图 2.1），假设雨水向下开始流动，根据雨水的流动轨迹确定出荷载幅。

在对历程曲线采用雨流计数法之前，重新调整结构的历程曲线，将曲线中绝对值最大的点作为雨流计数法的起点。根据雨流计数法的原理将历程曲线进行变换后，就开始根据规则提取荷载幅，阐述具体规则：

- （1）雨流开始依次从首个最高峰值或最低谷值的内侧沿着斜坡向下流；
- （2）当雨流到达下一个峰值或谷值时，若比起始的峰值（谷值）小则继续垂直往下流；若比起始的峰值（谷值）大，则停止流动。例如下图 2.1 中从 a 流向 b 的雨流，流向 c 时，c 点的值小于起始峰值，则继续流动。
- （3）如果当雨流遇到其他因上述情况而垂直下落的雨流时，该雨流必须不再流动。例如图中从 e 点到 f 点的雨流与 d 垂直落下的雨流相遇时，d₁ 点的雨流就应该在此刻停止流动。
- （4）若没出现上述情况，则雨流一直从斜坡内侧一直流动直到结束，这形成一个完整的循环。
- （5）根据上述规则提取所有能构成循环峰值和谷值，得到该循环的幅值，然后记录下来。

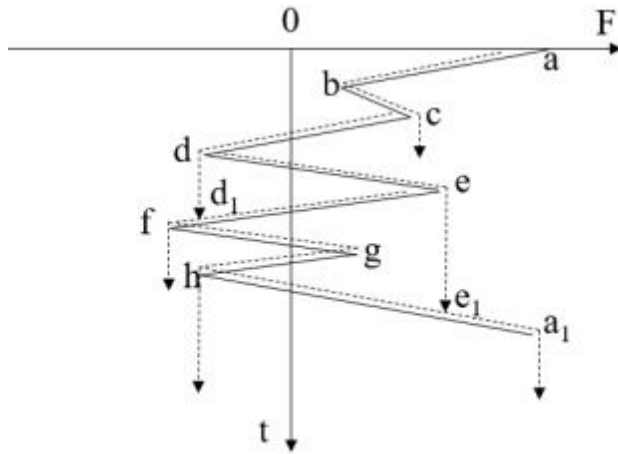


图 2.1 雨流计数法示意图

2.3.2 泄水计数法

泄水计数法简称泄水法，泄水法的意思就是将结构的历程曲线看作一个水池，在历程曲线中的谷值处将水放掉，从而得到结构的荷载幅值。与雨流计数法不同的是不需要将历程曲线进行调整，具体使用规则如下。

(1) 首先找到历程曲线中排名前二的峰值，用平行于横轴的线将这两个峰值连接起来，此时历程曲线与坐标轴就形成了一个封闭图形，将该图形看作是水池，若这两个峰值的大小不等，则根据其中较小值为准画线，例如图 2.2 中 mm_1 。

(2) 在水池的横断面中找到该断面的谷值，然后开始放水，若该断面中有两个及以上的谷值时，可以任意选择其中一个，将该水池中的水泄完后，荷载幅值是以峰值到谷值之间的差值。

(3) 将其他的峰值也可利用上述 (2) (3) 中的方法来构造，如果根据以上步骤未将整个水池中的水排泄完，则继续重复以上步骤，直至历程曲线中的水全部泄完后结束，每次都需记录对应的荷载幅值。

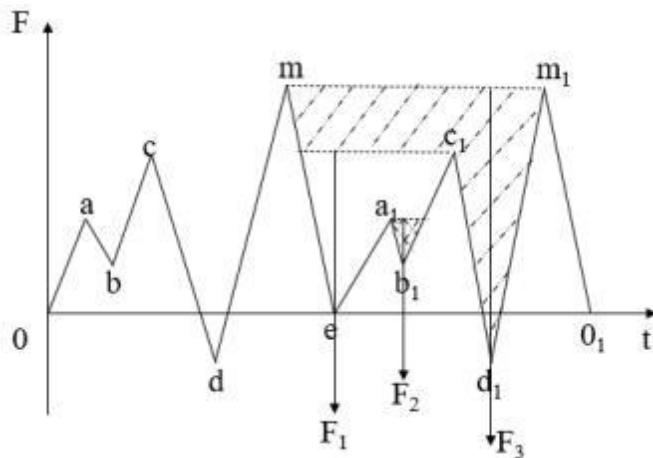


图 2.2 泄水计数法示意图

2.4 等效荷载计算

疲劳破坏是由裂纹产生到裂纹扩展直至结构发生断裂的过程。对结构进行试验一般采用的是等幅荷载循环加载的方式，因此要做疲劳荷载试验，就需要将得到的变幅荷载循环转化为实验所需的等效常幅荷载，使得在该等效常幅荷载的循环下，会产生与变幅荷载循环相同的裂纹扩展规律。

均方根等效荷载法（RMS）和基于 Paris 公式的等效荷载法（RMP）^[33]这两种是截至目前为止工程分析中计算等效荷载幅较为常用的方法，前者是通过数学关系推导得到的，没有确切的物理意义，而后者是以 Miner 准则为基础，物理意义较为清晰，所以疲劳试验研究中常用的是 RMP 法。因此本节将主要介绍基于 Paris 公式的等效荷载法的计算。

$$\Delta K_{eq} = \left(\frac{\sum (\Delta K_i)^m n_i}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.6)$$

式中：

ΔK_i —应力强度因子幅值；

ΔK_{eq} —等效应力强度因子幅值；

n_i — ΔK_i 的循环次数；

m —为材料常数。

通过翻阅文献获知，公式（2.6）中的指数 m 是与材料相关的已知参数。针对常用的普通混凝土和高强混凝土，分别为 $m = 10.6$ 、 $m = 8.6$ ^[34]。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.7)$$

式中：

a —裂纹深度或宽度；

N —应力循环次数；

C 、 m —为材料常数；

ΔK —应力强度因子幅值， $\Delta K = a\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ 。其中， a 为修正系数， a 为裂纹长度的一半， $\Delta\sigma$ 为应力幅值。

由上述可知，一旦裂纹的长度以及形状确定，应力强度因子与作用在结构上的应力为成正比关系，故（2.6）式可以变形：

$$\Delta K_j = a\Delta\sigma_j\sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

$$\Delta K_{eq} = a\Delta\sigma_{eq}\sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

将（2.8）代入（2.6）中得：

$$C\Delta\sigma_j\sqrt{\pi a} = \left(\frac{\sum (\alpha\Delta\sigma_i \sqrt{\pi a})^m n_i}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.10)$$

$$C\Delta\sigma_j\sqrt{\pi a} = C\sqrt{\pi a} \left(\frac{\sum (\Delta\sigma_i)^m n_i}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.11)$$

$$\Delta\sigma_j = \left(\frac{\sum (\Delta\sigma_i)^m n_i}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.12)$$

公式 (2.12) 便可以用于本文中的等效荷载幅的计算。

2.5 本章小结

本章主要介绍了疲劳损伤的概念，结合《结构设计原理》中的内容确定了梯形轨枕在设计年限内都应该处于第一个阶段（即弹性阶段），否则结构会因疲劳发生损伤；然后简要介绍了 Miner 累积损伤理论和结构损伤度的概念；介绍了雨流计数法、泄水计数法这两种疲劳循环荷载幅的提取方法的原理和具体使用的规则；得到工程分析中常用的两种等效荷载幅计算方法，并通过断裂力学中裂纹扩展相关知识将 Paris 公式进行推导，对于高强混凝土的 $m = 8.6$ ，最终得到等效荷载幅的计算公式，便于后文可以直接使用。

第三章 梯形轨枕等效荷载幅确定

本章对梯形轨枕的规格进行介绍，随后通过重庆轨道交通已有线路的运营情况以及车流量等做了统计，对 As 型列车做了对应的描述，通过查找文献得到了 As 型列车 6 编组地铁的加载示意图，最终得到 As 型列车的标准疲劳车加载图。利用 Midas/Civil 计算出梯形轨枕的弯矩包络图，从而找到最不利位置。运用第二章的雨流计数法和泄水法分别从弯矩历程中取出数据，得到列车完整通过梯形轨枕所需要的时间，运用第二章等效荷载计算的方法，计算出只有列车作用时的等效弯矩幅。考虑到温度荷载对结构的影响，将列车荷载与温度荷载共同作用下得到结构计算等效弯矩幅，同时运用 Miner 法则中的损伤度不变，将 100 年的设计年限内通过一个梯形轨枕的列车次数等效为 200 万次，从而计算出对应的弯矩幅，并将其转换为等效荷载。

3.1 梯形轨枕试件

梯形轨枕是位于轨道下方的道床上，侧面的限位凸台与底面连接，限制轨枕发生纵向移动，梯形轨枕的铺设情况如图 3.1 所示。

一般来说，模型试验被常用于结构试验研究中，然而由于制作生产过程和尺寸比例缩放的问题，有时只能考虑到主要因素，由此可知模型试验与原型试验相比力学性能会有所不同。因此，为了更准确地研究梯形轨枕的力学性能，本次试验决定采取梯形轨枕原型。重庆轨道交通某线路中的站点所使用的梯形轨枕有两种类型，设计长度分别为 3600mm、6000mm，而实际长度分别为 3500mm、5900mm，横截面的规格均为 $(580 \times 190) \text{ mm}^2$ ，两块梯形轨枕之间的净间距为 100mm。梯形轨枕是采用先张法施工，结构内部的预应力钢筋共有 18 根，两排各 9 根钢筋布置，两排分别距离梯形轨枕上下边缘 30mm，每根预应力钢筋由 $\phi 4.22$ 根 3 的钢绞线组成且每根预应力钢筋的张拉力均是 61kN。梯形轨枕底部由聚氨酯发泡弹性体为材料的减振垫块作为支承，且底部有两种不同长度减振垫块，分别为 200mm 和 100mm，其对应刚度为 14.4kN/mm、7.2kN/mm。梯形轨枕具体尺寸如下图 3.2-3.5 所示。

根据付昆对梯形轨枕的研究表明：轨枕长度不同其他配置相同时，力学性能相同，同时考虑到试验室的试验场地和加载试验机吨位（25 吨），因此选择设计长度为 3600mm 的单侧梯形轨枕进行试验。



(a)

(b)

图 3.1 梯形轨枕的铺设

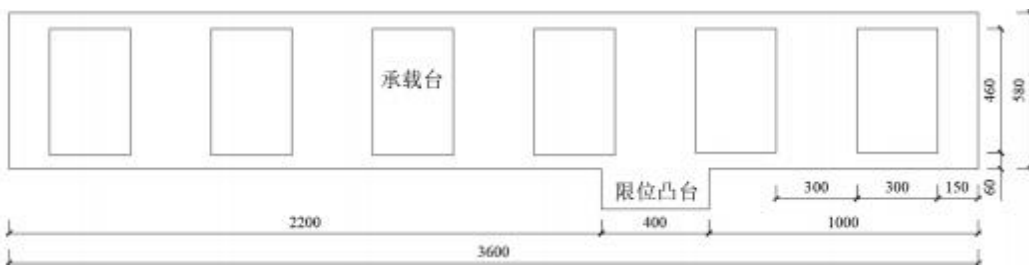


图 3.2 试件俯视图 (单位: mm)

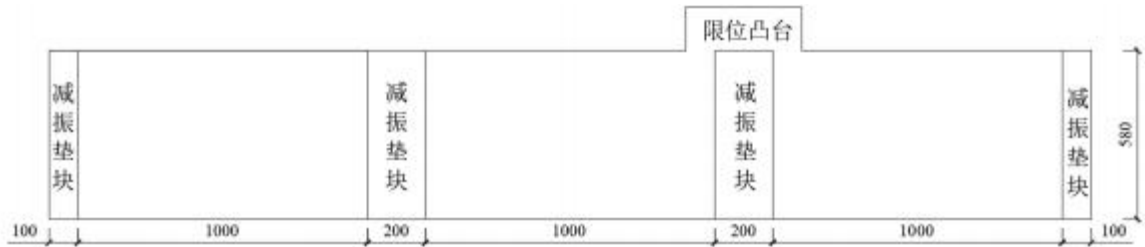


图 3.3 试件仰视图 (单位: mm)

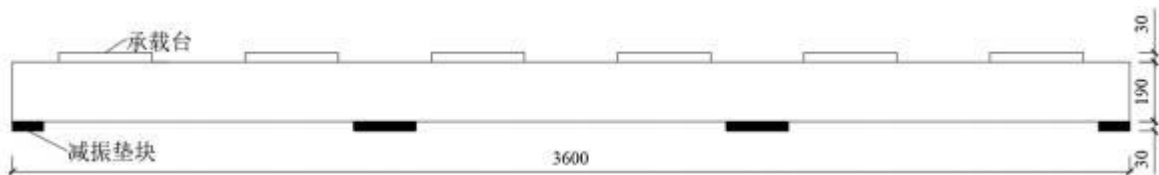


图 3.4 试件侧视图 (单位: mm)

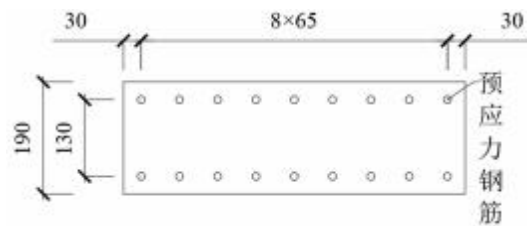


图 3.5 试件钢筋横截面图 (单位: mm)

3.2 标准疲劳荷载和弯矩历程例

3.2.1 标准疲劳荷载模型

在做试验之前选择参考重庆其他几条线路的交通运营数据，然后对该路线进行估计。到目前为止，许多研究者对重庆现有的轨道交通进行了研究和分析^[35-39]，已经取得一些研究成果。为了研究城市轨道交通的实际交通量，则需要从空间、时间、人流量这三个方面综合起来考虑线路的客流量。但是目前查找数据只能得到单独的客流量以及车流量，不能得到某时某列车具体的人数，因此需要将已知的数据整合起来，最终得到该线路的荷载谱。

该线路使用的车型为 As 型车，As 型车是介于 A 型列车和 B 型列车之间的新车型，属于国内首创，适用于山地环境，具有爬坡能力强、转弯半径小、载客量大的特点^[40]，最高运行速度可达 100 公里每小时，这特别适合重庆这种以山地、丘陵为主的城市。列车编组一共有三种，分别是 6 编组、7 编组和 8 编组，本文主要以 6 编组来进行试验和计算。

谭云峰^[41]针对不同的车型给出了相应的疲劳折减系数，A 型列车 0.65，B 型列车为 0.69，As 型车列车为 0.67，单轨车为 0.65。根据整合重庆其他路线的工作时间，如下表 3.1 所示。根据何沛建^[43]对于 As 型列车 6 编组地铁的加载示意图和单辆地铁标准疲劳车的示意图，并通过查找资料得到 As 型车的轴重 15t，需要利用折减系数将列车的设计轴重进行折减，根据《地铁设计规范》^[44]中冲击折减系数为 0.8，得到 As 型车的疲劳荷载模型，如下图 3.6 所示。

表 3.1 轨道交通最小行车间隔^[42]

地铁编号	工作日	双休日
1 号线	2 分 50 秒	4 分钟
4 号线	10 分钟	10 分钟
5 号线	6 分钟（一期北段）	9 分钟
	7 分钟（一期南段）	
6 号线	3 分 10 秒	5 分 20 秒
10 号线	6 分 30 秒	9 分钟
国博线	10 分钟	10 分钟
环线	4 分 30 秒	6 分钟

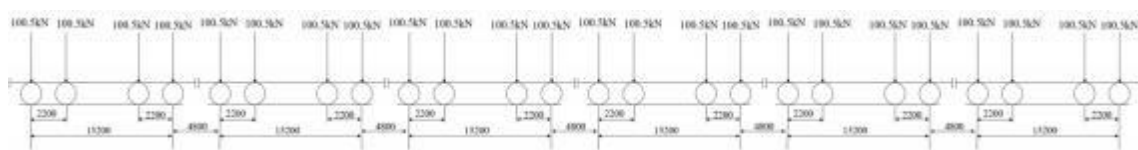


图 3.6 As 型车疲劳荷载模型（单位：mm）

3.2.2 列车作用下弯矩历程例的计算

上文已经将梯形轨枕的各个参数都已列出来，且已知作用在轨枕上的 As 型车疲劳荷载模型示意图，然后通过 Midas/Civil 计算出梯形轨枕的弯矩包络图，然后根据弯矩包络图找到最不利截面，得到最不利截面的弯矩影响线。但在对梯形轨枕建模的时候，除了要考虑梯形轨枕自身的受力情况，同时需要考虑钢轨对梯形轨枕的作用。因此，本文建立了梯形轨枕-钢轨的结构分析模型，如图 3.7 所示。扣件将钢轨与梯形轨枕连接起来，且梯形轨枕使用的钢轨是 60 轨，其刚度为 60MN/m。在列车运行过程中，近似认为两片梯形轨枕受到列车轴重为均匀分布，所以在试验中对单侧梯形轨枕加载时，应该把疲劳荷载模型对梯形轨枕造成的内力减半。

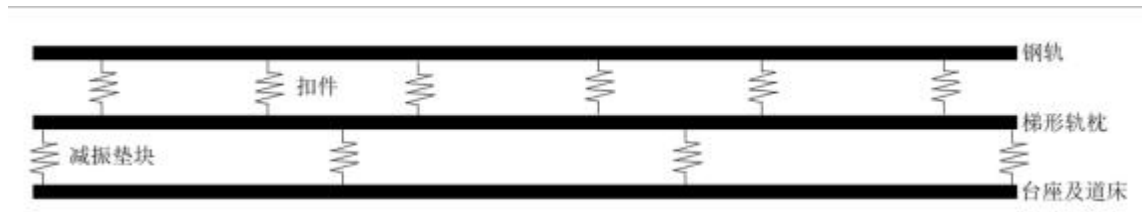


图 3.7 梯形轨枕-钢轨结构分析模型

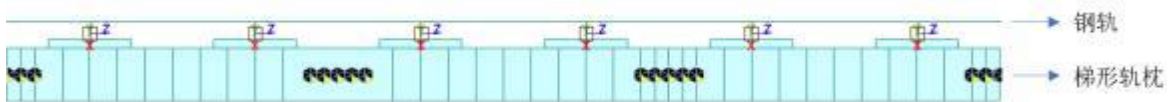
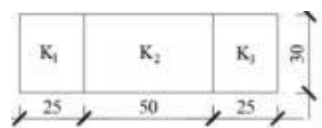
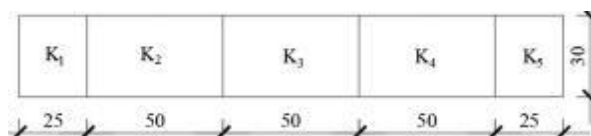


图 3.8 结构边界条件设置

将钢轨与轨枕、减振垫块与轨枕的连接都设置为弹性连接，如上图 3.8 所示，其中减振垫块的规格有两种，需要注意的是 200mm 的减振垫块刚度为 14.4kN/mm，100mm 的减振垫块刚度为 7.2kN/mm，若在 Midas 中将减振垫块划分为一个节点，则太过粗糙，因此将刚度根据减振垫块的长度线性分配，对两种长度的垫块按照不同类型切分，长度为 200mm、100mm 的减振垫块分别分为 5 个单元和 3 个单元使得相等长度的单元刚度也相等，且分别满足下面两个等式： $K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = 14.4\text{kN/mm}$ 、 $K_1 + K_2 + K_3 = 7.2\text{kN/mm}$ ，单元划分如下图 3.9 所示。



(a) 类型 1



(b) 类型 2

图 3.9 减振垫块刚度分配 (单位: mm)

在软件中添加移动荷载工况，模拟标准疲劳车从梯形轨枕上通过。当标准疲劳车的车头从梯形轨枕的一端驶入，疲劳车的车尾从另一端驶出为一个完整的加载例。由此便可以得到结构在荷载作用下的最不利截面，得到梯形轨枕的弯矩历程例。从图 3.10 中可以看出最大正弯矩和最小负弯矩均出现在梯形轨枕 20 号单元的j 端（1400mm-1500mm 为 20 号单元）。因此 20 号单元为梯形轨枕的最不利截面，即最不利截面在中跨处，于是计算出 20 号单元的弯矩影响线，如图 3.11。

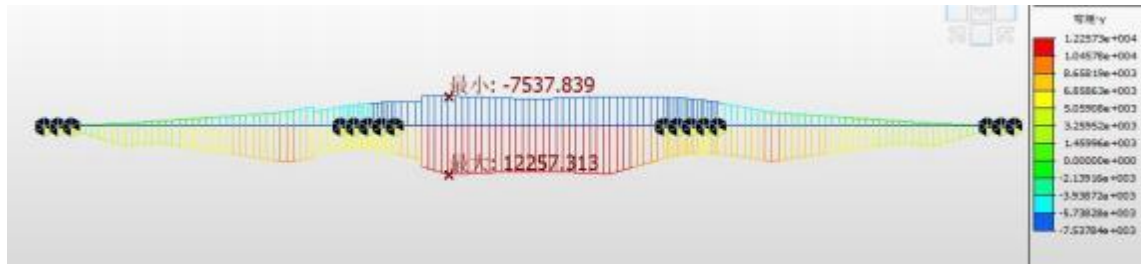


图 3.10 弯矩包络图



图 3.11 弯矩影响线

在计算出最不利截面的弯矩影响线后，在梯形轨枕的最不利截面的影响线上加载标准疲劳车。通过利用 Excle 来模拟 6 编组列车在结构上面行驶，6 编组列车每移动 0.1m 当作是一个时间间隔，将梯形轨枕上相应弯矩影响线的值记录下来，通过 Excle 计算，As 型车从进入一个梯形轨枕到完全离开一共需要 5.7s，因此 6 编组列车通过一个完整梯形轨枕的时间周期为 5.7s。作出最不利位置的弯矩历程曲线如下图 3.12。

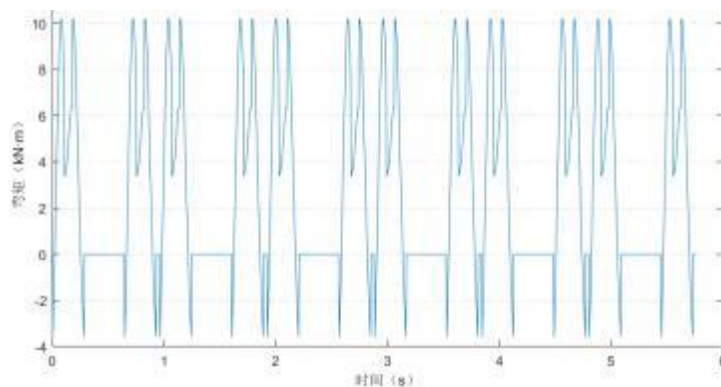


图 3.12 弯矩历程曲线

接下来就需要从弯矩历程曲线中取循环弯矩幅和对应的循环次数，然后通过使用前文中的雨流计数法以及泄水法这两种方法分别进行数据提取，进行整理得到下表。

表 3.2 雨流、泄水计数法提取的荷载循环（单位：kN·m）

方法	循环次数	峰值	谷值	循环幅值
雨流计数法	12	0	-3.56	3.56
	12	10.20	3.37	6.83
	12	10.20	-3.59	13.79
泄水计数法	12	0	-3.56	3.56
	12	10.20	3.37	6.83
	12	10.20	-3.59	13.79

3.3 梯形轨枕-钢轨系统温度分析

3.3.1 温度梯度取值

金晨建立了计算模型，综合考虑太阳辐射、风速、气温等气象因素对轨道板温度场的共同影响^[45]，并通过预测公式与现场实测数据进行对比，两者计算结果基本吻合，说明这种方法是可行的，具体分析过程如下。

对梯形轨枕温度场分布进行分析时，考虑到梯形轨枕只受到纵向力的作用，因此在考虑温度时，只需要研究混凝土内部任意一点所处的深度即可，所以将其近似简化为在 z 方向上的一维热传导，结构应该满足一维热传导微分方程：

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = a(z) \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

式中， $a(z)$ 为混凝土材料的导温系数， $a(z)=0.003\text{m}^2/\text{h}$ 。

已知传热基本原理中对热量传递的描述，其传递的基本形式有热传导、热对流、热辐射这三种^[46]，如图 3.13。

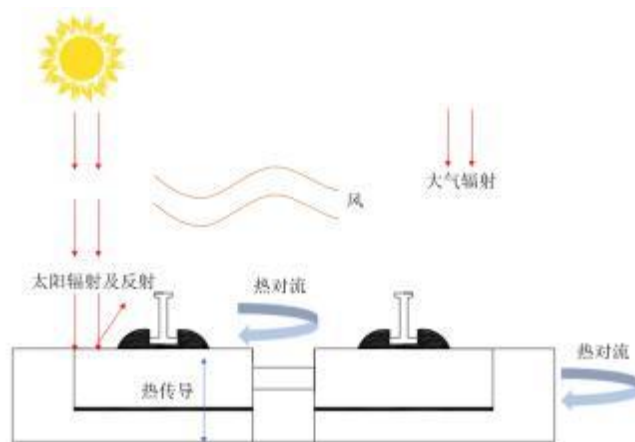


图 3.13 热交换示意图

只要物体表面温度比绝对零度高时，就会向大气中辐射能量，但这与热传导以及热对流不相同的地方是，辐射之间的换热是不需要介质的，混凝土在吸取了太阳辐射之后其结构表面温度升高，大气中产生的辐射为长波辐射，混凝土也会发出长波辐射，大气和混凝土发出的辐射构成了有效辐射。有效辐射在混凝土表面产生的热流密度可表示为^[47]：

$$q_r(t) = h_r [T_{air}(t) - T(t, 0)] \quad (3.2)$$

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.75(\bar{T}_{air} - 5)] \quad (3.3)$$

其中， q_r 表示由有效辐射所产生的热流密度， W/m^2 ； h_r 为长波热辐射系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； ε 为黑度系数，取值为 0.9； \bar{T}_{air} 为日平均气温， $^\circ C$ 。

对流换热引起的原因是由于结构表面与周围环境气温存在温差，基于牛顿冷却定律，通过对流换热进入到混凝土结构表面的热流密度为^[48]：

$$q_y(t) = h_y [T_{air}(t) - T(t, 0)] \quad (3.4)$$

其中， q_y 表示对流换热所产生的热流密度， W/m^2 ； h_y 为对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；当风速 $V > 5$ 时， $h_y = 7.4V^{0.78}$ ，当风速 $V < 5$ 时， $h_y = 6 + 4V$ ^[69]； $T(t, 0)$ 为结构表面温度。

根据大多数参考文献都将每日平均气温和每日的气温幅值作为气象因素的两个变量，因此采用两个正弦波线性叠加的方式来表达某天气温的变化^[47]：

$$T_{air}(t) = \bar{T}_{air} + \overline{T}_{air} [0.9 \sin \omega(t - t_0 - 6) + 0.14 \sin 2\omega(t - t_0 - 6)] \quad (3.5)$$

其中， \overline{T}_{air} 为每天气温最大值与最小值的差值， $^\circ C$ ； t_0 为一天中最高太阳辐射量与当日最高气温时刻之间的差值再加 1，如若最高太阳辐射量为中午 12 点、最高气温在下午 2:00，则 $t_0 = 14 - 12 + 1 = 3$ ； t 表示时间，h； ω 为角频率， $\omega = \pi/12$ ，rad/s。

根据文献中对太阳辐射强度随着时间变化的分布情况，通过傅里叶级数来表达：

$$Q(t) = \begin{cases} \left(\frac{Q_0}{\pi} + \frac{Q_0}{2} \sin \omega t + \frac{2Q_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1 - (2k)^2} \sin(2k\omega t + \frac{\pi}{2}) \right) \dots \dots n = 1 \\ \left| \frac{Q_0}{\pi} + \frac{2nQ_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi k}{2n}}{n - k} \sin(k\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{k\pi}{2}) \right) \dots \dots n \neq 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

式中， Q_0 为当日最大太阳辐射量， $Q_0 = 1.31nQ_d$ ， Q_d 为当日太阳辐射总量 W/m^2 ； n 为日照时间的比值， $n = 12/\mu$ ， μ 为一天中日照的时间。

根据图 3.11 的热交换示意图，结构不会完全吸收由太阳产生的辐射，其中一

部分辐射会被反射到大气中，而另一部分会被结构内部所吸收，被结构内部所吸收的辐射在结构表面所产生的热流密度为：

$$q_s(t) = C_s Q(t) \tag{3.7}$$

式中： q_s 为由太阳辐射所产生的热流密度， W/m^2 ； C_s 为太阳辐射吸收系数。基于能量守恒定律，结构内外的热量会保持动态平衡，即应该满足：

$$q_r(t) + q_y(t) + q_s(t) = 0 \tag{3.8}$$

把（3.2）、（3.4）、（3.7）带入（3.8）中，可得到结构表面在 t 时刻的温度表达式：

$$T(t, 0) = T_{air}(t) + \frac{C_s Q(t)}{h_y + h_r} \tag{3.9}$$

根据我国 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》^[50] 中给出的结构表面在 t 时刻的等效温度：

$$T(t, 0) = T_{air}(t) + \frac{C_s Q(t)}{h_y} \tag{3.10}$$

对比公式（3.9）与（3.10），这两个公式在形式上基本相同，但公式（3.9）相比公式（3.10）考虑得更加全面，更符合实际情况。

在传热学中一般把边界条件^[51]分为三类：（1）规定了在边界上的温度值，为第一类边界条件；（2）规定了物体边界上的热量输入或输出，为第二类边界条件；（3）规定了边界上的对流换热条件，为第三类边界条件。因此，本文研究的问题属于第一类边界条件，因此按此边界条件求解。根据公式（3.9）可得到结构表面温度的情况：

$$T(t, 0) = T_{air} + \bar{T}_{air}[0.9\sin \omega(t - t_0 - 6) + 0.14\sin 2\omega(t - t_0 - 6)] + \frac{\alpha_s}{h_y + h_r} \left[\frac{Q_0}{\pi} + \frac{Q_0}{2} \sin \omega t + \frac{2Q_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1 - (2k)^2} \sin(2k\omega t + \frac{\pi}{2}) \right] \dots \dots \dots n = 1 \tag{3.11}$$

$$T(t, 0) = T_{air} + \bar{T}_{air}[0.9\sin \omega(t - t_0 - 6) + 0.14\sin 2\omega(t - t_0 - 6)] + \frac{\alpha_s}{h_y + h_r} \left[\frac{Q_0}{n\pi} + \frac{2nQ_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi k}{n}}{n - k^2} \sin(k\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{k\pi}{2}) \right] \dots \dots \dots n \text{ 子 } 1 \tag{3.12}$$

当 $z > 0$ 时，得到结构一维热传导方程的解为：

$$T(t,z) = \bar{T}(t,0) + \bar{T}_{air}(0.96e^{-z\sqrt{\frac{q}{2C}}}\sin\theta_1 + 0.14e^{-z\sqrt{\frac{q}{C}}}\sin\theta_2) + \frac{T_s}{2}e^{-z\sqrt{\frac{q}{2C}}}\sin\theta_3 + \frac{2T_s}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{1-(2k)^2}e^{-z\sqrt{\frac{kq}{C}}}\sin\theta_4 \dots n = 1 \quad (3.13)$$

$$T(t,z) = \bar{T}(t,0) + \bar{T}_{air}(0.96e^{-z\sqrt{\frac{q}{2C}}}\sin\theta_1 + 0.14e^{-z\sqrt{\frac{q}{C}}}\sin\theta_2) + \frac{2nT_s}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\cos k\pi}{1-(2k)^2}e^{-z\sqrt{\frac{kq}{C}}}\sin\theta_5 \dots n \text{ 子 } 1 \quad (3.14)$$

式中, $\bar{T}(t,0) = \bar{T}_{air}(t) + \frac{\alpha_s Q(t)}{h_y + h_r}$, $T_s = \frac{\pi\alpha_s Q(t)}{2t_d(h_v + h_r)}$, $\theta_1 = \sqrt{\frac{q}{2C}}(t - t_0 - \delta) - z\sqrt{\frac{q}{2C}}$,

$\theta_2 = 2\sqrt{\frac{q}{2C}}(t - t_0 - \delta) - z\sqrt{\frac{q}{2C}}$, $\theta_3 = \sqrt{\frac{q}{2C}}(t - \delta) - z\sqrt{\frac{q}{2C}}$, $\theta_4 = 2k\sqrt{\frac{q}{2C}}(t - \delta) + \frac{\pi}{2} - z\sqrt{\frac{2kq}{2C}}$,

$\theta_5 = k\sqrt{\frac{q}{2C}}(t - \delta) - z\sqrt{\frac{kq}{2C}}$ 。

考虑到重庆四季的光照时间都在 12 小时左右, 因此上述公式中 n 的取值为 1, 选择 $n = 1$ 的情况对结构的温度梯度进行分析。通过对重庆每个月中某天的气象数据进行代入分析, 得到的数据如表所示:

表 3.3 各项数据

	春季		夏季		秋季		冬季					
月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
辐射量 (MJ/m ²)	9.2	11.4	11.1	12.7	15.9	16.6	11.7	8.8	6.5	4.6	5.0	7.0
某天最高温/°C	26	28	35	36	38	40	35	35	20	17	10	23
某天最低温/°C	8	12	15	16	21	19	17	10	5	2	0	6
风速 m/s	1.50		2.10		1.50		0.90					

根据《JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范》^[52], 正温度梯度的一半即为最大负温度梯度的值, 即可得到梯形轨枕的最大负温度梯度。通过各项数据可以得到重庆平均每个月混凝土的最大正温度梯度和负温度梯度:

表 3.4 梯形轨枕最大正温差、负温差 (°C)

	春季		夏季		秋季		冬季					
月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
正温差	12.6	14.7	14.9	16.7	19.8	21.1	15.4	13.1	9.2	7.1	6.8	10.0
负温差	6.3	7.4	7.5	8.4	9.9	10.5	7.7	6.5	4.6	3.6	3.4	5.0

上述正负温差与梯形轨枕高度的比值为结构竖向的温度梯度，认为每月中每日对梯形轨枕的正负温度梯度都相同，现将一年每日的温度梯度作为一个循环，则一年会有 365 个温度梯度循环，在设计年限 100 年内有 36500 次循环。

3.3.2 钢轨温度

在分析计算之前，需要将钢轨的温度情况做一个了解，根据《TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范》中□ 到钢轨的温度变化与气温有关，一般最高轨温要高于最高气温，最低轨温则与最低气温接近，并在规范中说明最高轨温为最高气温加 20℃，最低轨温与最低气温相同^[53]。因此在计算时设置对应的环境温度，将钢轨上添加单元温度荷载，由于正温度梯度常发生在白天，负温度梯度发生在夜晚，因此计算正温度梯度需添加最高轨温，负温度梯度添加最低轨温。根据每个月的气温情况得到最高轨温、最低轨温，如下表。

表 3.5 各月轨温情况

	春季			夏季				秋季			冬季	
月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
最高轨温℃	46	48	55	56	58	60	55	55	40	37	30	43
最低轨温℃	8	12	15	16	21	19	17	10	5	2	0	6

3.4 等效荷载幅的计算

为了考虑不同情况所产生的弯矩幅对结构的影响，将计算分为两种，分别为：仅列车荷载作用，列车荷载与温度梯度共同作用。

3.4.1 仅列车荷载作用

由表 3.2 可知，通过雨流计数法和泄水法得到的循环荷载幅以及循环次数都是相同的。后将上述数据利用公式 (2.12) 计算得到等效常幅弯矩 $\Delta M=12.15\text{kN}\cdot\text{m}$ ，其中本文使用的梯形轨枕是材料为 C60 的混凝土，且 C60 属高强混凝土，根据前文□ 到的 m 取值，故 m 值取 8.6。

梯形轨枕横截面惯性矩为： $I = bh^3/12 = 0.000331518\text{m}^4$ ，且 $\Delta M=12.15\text{kN}\cdot\text{m}$ 。由 TB / T 1878-2002《预应力混凝土枕疲劳试验方法》^[54]可知，疲劳荷载循环特征值 $p=0.2$ ，由此可以计算出结构横截面上，由等效常幅弯矩产生的截面最大正应力：

$$\sigma = \frac{\Delta My}{I} = 4.35\text{MPa} \quad (3.15)$$

梯形轨枕截面由预应力所产生的压应力为：

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{61\text{kN}\times 18}{0.58\times 0.19\text{m}^2} = 9.96\text{MPa} \quad (3.16)$$

因为 $9.96 > 4.35$ ，所以可知该混凝土在荷载作用下，梯形轨枕是全压构件，所以梯形轨枕是全预应力混凝土。因此对于本文研究的梯形轨枕，不考虑其表面混

土的抗拉疲劳问题。

根据前文 3.2.1 节中轨道交通的最小行车间隔，通过统计其他线路在工作日时每天会通行 188 列列车，在双休日每天会通行 163 列列车，然后运用到该线路中且设计年限为 100 年，那么在 100 年内列车一共运行次数为 6.08×10^6 列^[42]。雨流计数法和泄水法均显示一辆 6 编组列车通过一个完整的梯形轨枕会产生 36 个荷载循环，因此在 100 年的设计年限内列车通过一个梯形轨枕有 2.19×10^8 次荷载循环。为了将疲劳试验次数控制在 200 万次，因此需要将 2.19×10^8 次等效为 2×10^6 次的荷载循环。

铁道部科学研究院对受压混凝土的疲劳寿命得出了 S-N 方程^[55]；大连理工大学的宋玉普通过试验得到了混凝土拉压疲劳的 S-N 方程^[50、51]。因为梯形轨枕是全截面受压结构，因此本文选用对结构受压部分的混凝土进行分析，采用的是由铁道部科学研究院出的 S-N 方程，如下式所示：

$$\lg N = 14.7 - 13.5 \frac{\sigma_{c,\max} - \sigma_{c,\min}}{f_c - \sigma_{c,\min}} \quad (3.17)$$

其中， f_c 代表混凝土的轴心抗压强度设计值，为 $f_c = 27.5 \text{MPa}$ ^[58]； $\sigma_{c,\max}$ 、 $\sigma_{c,\min}$ 分别表示在疲劳荷载作用下由结构产生的最大、最小压应力； N 表示该应力下，当结构发生疲劳破坏时的次数。

由此可以计算出梯形轨枕的最大应力和最小应力分别为：4.35MPa、0.87MPa，则正截面上下边缘在仅列车荷载作用下的应力范围分别为 10.83MPa~14.31MPa、5.61MPa~9.09MPa，其中应力幅值的公式为 $\Delta\sigma = \sigma_{c,\max} - \sigma_{c,\min}$ 且循环特征值公式为 $\rho = F_{\min}/F_{\max}$ ，由此可得疲劳应力循环特征值分别为 0.76、0.62，最后得到正截面上下边缘关于疲劳寿命 N 和应力幅 $\Delta\sigma$ 之间的函数：

$$\lg N = 14.7 - 13.5 \frac{\Delta\sigma}{27.5 - 3.17\Delta\sigma} \quad (\text{正截面上边缘}) \quad (3.18)$$

$$\lg N = 14.7 - 13.5 \frac{\Delta\sigma}{27.5 - 1.63\Delta\sigma} \quad (\text{正截面下边缘}) \quad (3.19)$$

由 Miner 线性损伤累积理论可知，在变幅荷载与常幅荷载这两种荷载作用下，最终对结构造成的损伤度应该相等，因此需要将列车循环次数 2.19×10^8 次变幅荷载转化为试验所需的 2×10^6 次的常幅荷载，具体计算如下：

在 $n_1 = 2.19 \times 10^8$ ， $\Delta\sigma_1 = 3.48 \text{MPa}$ 时，由公式 (3.18) (3.19) 可以得到，梯形轨枕最不利截面的上边缘经过 $N_{\text{上}1} = 7.04 \times 10^{10}$ 次循环后发生破坏，且下边缘经过 $N_{\text{下}1} = 3.53 \times 10^{12}$ 次循环后发生破坏，可以计算出结构的损伤度 $D_1 = n_1/N_{\text{上}1} = 3.11 \times 10^{-4}$ ， $D_2 = n_1/N_{\text{下}1} = 6.21 \times 10^{-5}$ 。同理，当 $n_2 = 2 \times 10^6$ 时，结构损伤度 D_1 、 D_2 应该保持不变，得到 $N_{\text{上}2} = 6.43 \times 10^9$ 次， $N_{\text{下}2} = 3.22 \times 10^{10}$ 次。然后将 $N_{\text{上}2}$ 、 $N_{\text{下}2}$ 代入公式 (3.18) (3.19)，

可以得到在 2×10^6 下对应的应力变程 $\Delta\sigma_{上2}=4.62\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_{下2}=5.66\text{MPa}$ 。按照结构最不利的原则，得到 $\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_{下2}=5.66\text{MPa}$ ，所以单侧梯形轨枕在 $n_2=2 \times 10^6$ 次受到的弯矩幅为 $\Delta M_1=19.75\text{kN}\cdot\text{m}$ ，则 ΔM_1 为仅列车荷载作用下的荷载幅。

3.4.2 列车荷载+温度梯度共同作用

将表 3.4 中的正负温度梯度与表 3.5 中钢轨温度分别加入 Midas 模型中，计算得到在每个正负温度梯度下梯形轨枕的弯矩图。图中所展现的 3 月份正温度梯度弯矩表现为上表面受拉，下表面受压，与实际梯形轨枕上表面因温度比下表面高而发生翘曲的情况相符合。3 月负温度梯度弯矩图表现出下表面受拉，上表面受压，与实际梯形轨枕上表面温度低于下表面温度的情形一样。

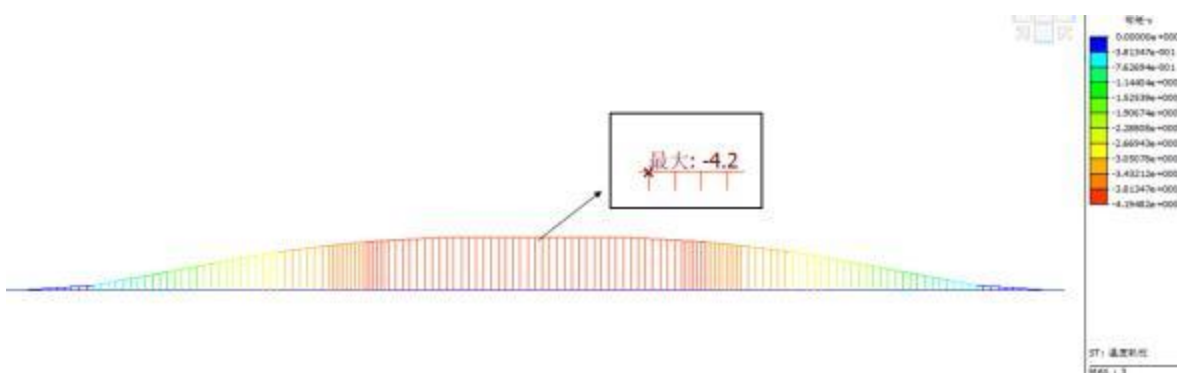


图 3.14 3 月某天正温度梯度弯矩图（单位： $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）

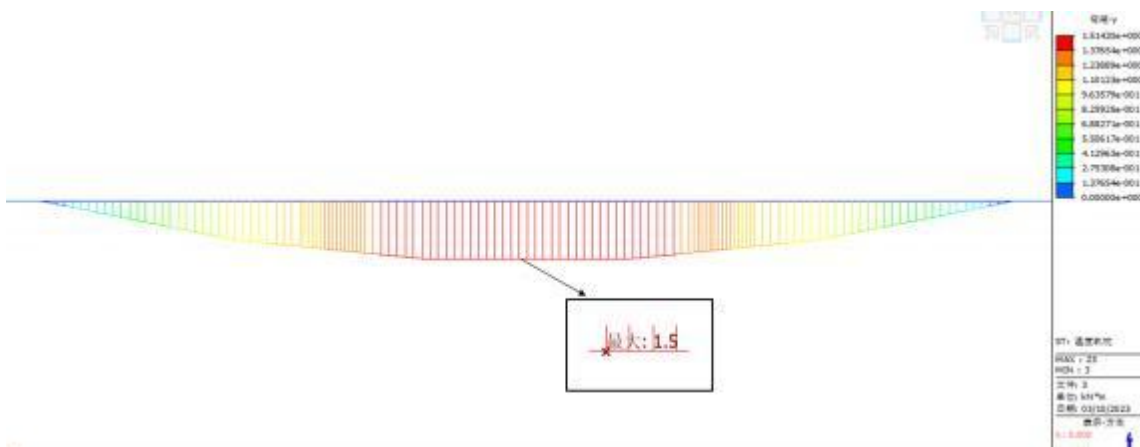


图 3.15 3 月某天负温度梯度弯矩图（单位： $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）

表 3.6 正负温度梯度弯矩幅值

季节	月份	正温度梯度最大弯矩 (kN·m)	负温度梯度最大弯矩 (kN·m)
春季	3	-4.2	1.5
	4	-4.9	1.8
	5	-5.0	1.8
夏季	6	-5.6	2.0
	7	-6.6	2.4
	8	-7.0	2.5
秋季	9	-5.1	1.9
	10	-4.4	1.6
	11	-3.1	1.1
冬季	12	-2.4	0.9
	1	-2.3	0.8
	2	-3.3	1.2

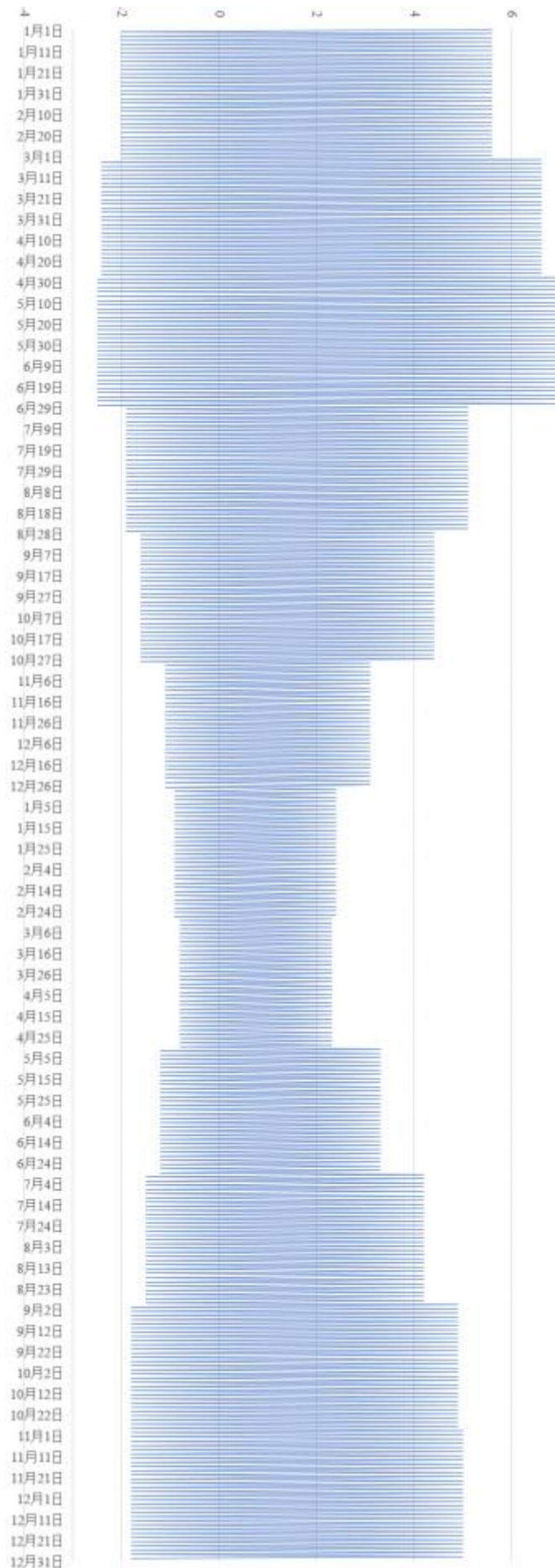


图 3.16 梯形轨枕一年的温度梯度弯矩历程例

由于每一天的温度梯度对梯形轨枕造成的影响不同，然而若考虑一年中每天的弯矩变化过于繁琐，因此取每个月最大的弯矩值，认为每天的弯矩都相同，则此情况为温度梯度对结构造成的最不利情况。通过利用雨流计数法将一年内由温度梯度引起的完整弯矩历程例绘制出来，如图 3.16，找到在一年内结构的弯矩循环次数，如表 3.7 所示：

表 3.7 雨流计数法提取的荷载循环

循环次数	弯矩幅 (kN·m)
31	5.7
30	6.7
31	6.8
30	7.6
31	9.0
31	9.5
30	7.0
31	6.0
30	4.2
31	3.3
31	3.1
30	4.5

同样利用公式 (2.12) 可以计算出一年内由正负温度梯度引起的等效弯矩幅为：7.72kN·m。则由正负温度梯度引起的应力大小为： $\Delta\sigma_{正负}=2.21\text{MPa}$ ，则正负温度梯度下的最大应力和最小应力分别为：2.75MPa、0.55MPa，得到在正负温度梯度荷载作用下梯形轨枕的上下边缘的应力值分别在 10.51MPa~12.72MPa、7.20MPa~9.41MPa，疲劳应力循环特征值分别为 0.83、0.77，则式 (3.17) 变为式 (3.24) (3.25)。

$$\lg N = 14.7 - 13.5 \frac{\Delta\sigma}{27.5 - 4.75\Delta\sigma} \quad (\text{上边缘}) \quad (3.24)$$

$$\lg N = 14.7 - 13.5 \frac{\Delta\sigma}{27.5 - 3.26\Delta\sigma} \quad (\text{下边缘}) \quad (3.25)$$

同样利用 Miner 线性损伤累积理论，将在设计年限 100 年内循环的次数 36500 转化为 2×10^6 次的常幅荷载，在应力变程 $\Delta\sigma_{正负}$ 内，对结构的损伤度 D 应该相同，具体计算如下：

在 $n_3 = 36500$ ， $\Delta\sigma_3 = 2.21\text{MPa}$ 时，由公式 (3.24) (3.25) 可以得到，梯形轨枕最不利截面的上边缘在经过 $N_{上3} = 8.8 \times 10^{12}$ 次循环后发生破坏，且截面下边缘经过 $N_{下3} = 1.7 \times 10^{13}$ 次循环后发生破坏，最终得到当 $n_3 = 36500$ 次时结构上下边缘的损伤度分别为 $D_3 = n_3 / N_{上3} = 4.14 \times 10^{-9}$ ， $D_4 = n_3 / N_{下3} = 2.14 \times 10^{-9}$ 。同理，当 $n_2 = 2 \times 10^6$ 时，结构损伤度 D_3 、 D_4 应该保持不变，得到循环 $N_{上4} = 4.83 \times 10^{14}$ 次， $N_{下4} = 9.30 \times 10^{14}$ 次。然

后再将 $N_{上4}$ 、 $N_{下4}$ 代回公式(3.24)(3.25)中，可以得到在循环 2×10^6 次时，结构上下表面的应力幅为 $\Delta\sigma_{上4}=0.03\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_{下4}=0.58\text{MPa}$ 。按照结构最不利的原则，取 $\Delta\sigma_4=\Delta\sigma_{下4}=0.58\text{MPa}$ ，最终得到当 $n=2 \times 10^6$ 次由正负温度梯度引起的弯矩幅为 $\Delta M_2=2.04\text{kN m}$ ，与仅列车荷载下的弯矩幅线性叠加得到由列车荷载与温度梯度共同作用下的荷载幅 $\Delta M_3=\Delta M_1+\Delta M_2=21.79\text{kN m}$ 。

3.5 等效荷载的计算

由于结构的最不利位置在中跨的承载台上，因此选择与之对称的承载台为加载点，使得两个承载台之间形成纯弯段。通过前文计算所得的等效弯矩幅，将等效弯矩幅转换为等效荷载，以便后期试验中进行加载，在仅列车荷载作用、列车荷载作用与温度梯度共同作用下的每个节点分别承受力的大小为：38.7kN、43.0kN。则可以计算出分配梁上作动器需要施加的荷载幅分别为：77.4kN、86.0kN。

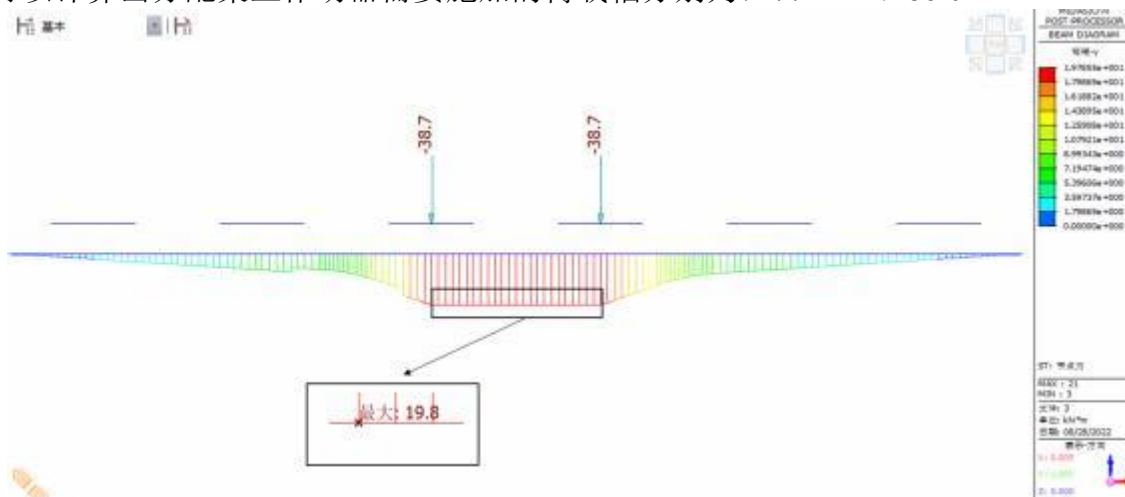


图 3.17 仅列车荷载-中跨等效荷载

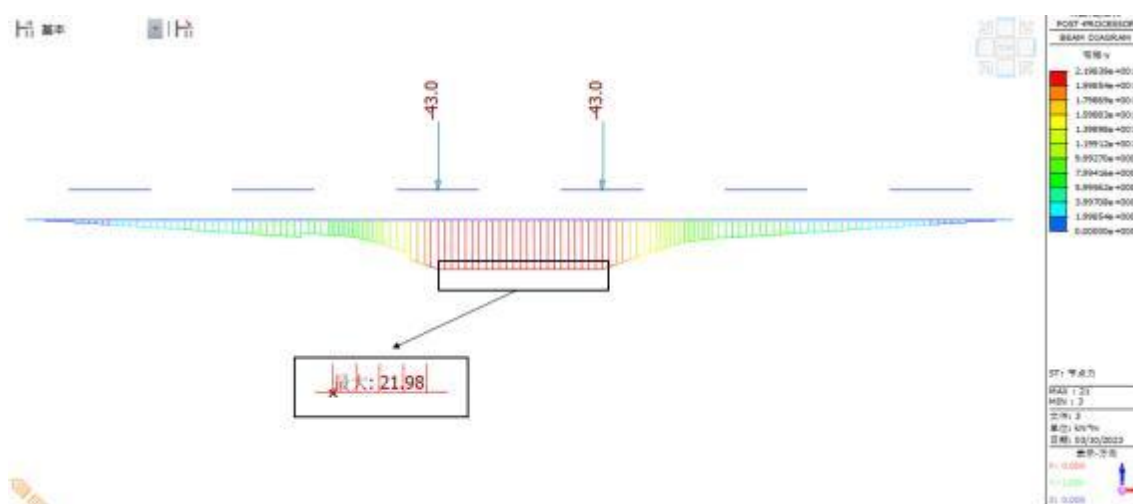


图 3.18 列车荷载+温度梯度-中跨等效荷载

3.6 本章小结

本章主要对梯形轨枕的规格进行了介绍，根据何沛建对于 As 型列车 6 编组地铁标准疲劳车的示意图，得到了作用在梯形轨枕上的标准疲劳车模型。将该标准疲劳车模型利用 Midas/Civil 模拟作用在梯形轨枕上，计算出梯形轨枕的弯矩包络图，然后找到了中间截面的最不利截面，将最不利截面的影响线导出，利用 Excle 模拟 As 型车从进入梯形轨枕到完全离开一共需要 5.7s。

基于第二章的雨流计数法和泄水法的原理，从弯矩历程曲线中取出弯矩的峰值和谷值及其对应的循环次数，运用本文 2.5 节中推导出等效荷载计算的方法，计算出了在仅列车作用时的等效荷载。后考虑结构在不同时期温度对结构的影响，将列车荷载与温度梯度共同作用在结构上，得到对应的弯矩值。同时运用 Miner 法则中的损伤度不变，将 100 年的设计年限内通过一个梯形轨枕的列车次数等效为 200 万次，同样将温度梯度的影响等效为 200 万次，从而计算出仅列车荷载作用、列车荷载作用与温度梯度共同作用下的等效荷载幅分别为： $19.75\text{kN} \cdot \text{m}$ 、 $21.97\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

最后运用 Midas 软件对结构加载上述等效荷载幅，得到了两种情况下的等效荷载幅值分别为： 77.4kN 、 86.0kN ，为后文的疲劳试验提供依据。

第四章 梯形轨枕结构计算分析

前文通过 Midas 软件找到了结构的最不利截面，并且对结构施加荷载幅的大小也分别计算出。本章将利用 ANSYS Workbench 对轨枕进行三维实体建模，通过静力分析得到控制截面基于设计规范的开裂弯矩值加载下的应力分布，进而找到试验加载的极限荷载值及其对应的竖向位移值，确定试验加载支承高度；固有频率计算的结果用于设定合适试验的加载频率；疲劳分析的目的是为了验证在仅列车荷载、列车荷载与温度梯度作用下的寿命是否满足规范要求，以便后期试验参考。

4.1 模型建立

参考前文利用Midas 计算所得结构的最不利截面，通过利用ANSYS Workbench 建立梯形轨枕的三维实体模型。在计算的过程中，将钢轨和紧固件换为相应的工作装置，使得加载段成为纯弯段。在模型中涉及到的材料参数如表 4.1 所示。

表 4.1 材料性能参数表

结构零部件	材料	弹性模型 (Pa)	泊松比	密度 (kg · m ⁻³)
轨枕纵梁	C60 混凝土	3.65×10^{10}	0.2	2551
减振垫块	聚氨酯弹性体	3.00×10^6	0.4	600
工作装置	结构钢	2.10×10^{11}	0.3	7850
加载装置	结构钢	2.10×10^{11}	0.3	7850
铰支座	12.9 级高强螺栓	2.10×10^{11}	0.3	7850
预应力钢筋	$\phi 4.22 \times 3$ 钢绞线	1.95×10^{11}	0.3	7850

在对梯形轨枕进行疲劳分析时需要用到将混凝土关于疲劳的相关数据，因此前将其进行完善，在前文 3.4.1 节中的公式 (3.17) 为梯形轨枕的 S-N 方程，由于混凝土的抗压不抗拉，因此采用截面下边缘的 S-N 方程，即公式 (3.19)，通过带入具体数值得到表 4.2，将表中的数据带入 Workbench 的工程数据中，最终得到梯形轨枕下边缘的 S-N 曲线，如图 4.10。

表 4.2 梯形轨枕下边缘 S-N 数值

循环次数 N	应变应力 σ
10	10.51
20	10.43
50	10.31
100	10.21
200	10.11

续表 4.2

循环次数 N	应变应力 σ
2000	9.77
10000	9.51
20000	9.39
100000	9.10
200000	8.97
1000000	8.64

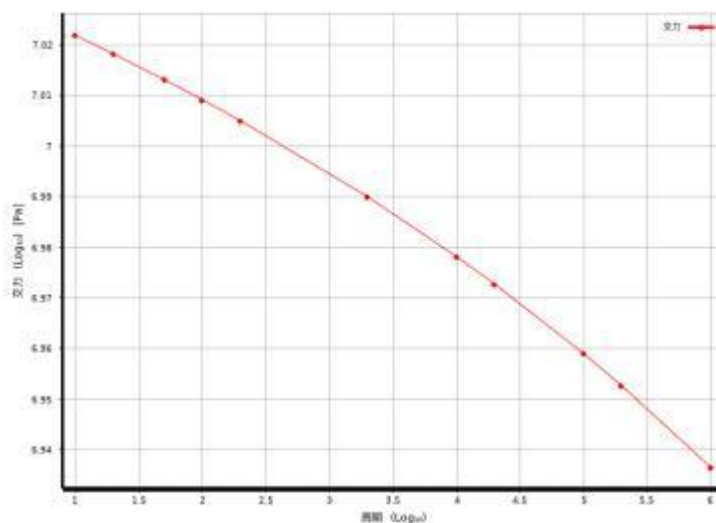


图 4.1 梯形轨枕下边缘 S-N 曲线

为了使加载段成为纯弯段，有需要为加载装置设计工装。工装的支座采用的是两根钢筋与一块钢板之间焊接作为底板，底板放置在梯形轨枕上，通过胶条限制底板滑动，然后在底板上添加一根螺栓作为销轴，并且销轴在试验中是可以转动的，形成滑动铰支座，只能传递竖向力，在两个铰支座上放置一个分配梁，在分配梁的中间利用作动器进行加载。

通过用 Workbench 中自带的 Space Claim 建模板块对梯形轨枕进行建模，打开模型后，Workbench 中已经自动的添加了各接触面的接触方式，且都默认为绑定，因此需要对梯形轨枕的各个零部件接触情况进行调整，对梯形轨枕的主体混凝土结构利用绑定的接触方式、预应力钢筋与梯形轨枕和铰支座与梯形轨枕采用绑定的方式，对铰支座与螺栓、螺栓与分配梁之间用无分离的接触方式（这种接触方式与绑定类似，但只适用于面，且不允许接触区域的面分离，但可以有小的无摩擦滑动）。

网格划分的方法有六面体网格、四面体网格。本文采用六面体网格的方法对梯形轨枕和工装进行了划分，由于六面体网格的优点是单元数量少，网格美观，计算精度高于四面体网格，计算收敛速度快，但是网格生成时间长，几何适应性弱与四

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/258044072014006057>