

平面移动式立体车库运载系统载荷谱编制与应用

陈怡芝, 贺拥军*

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 平面移动式立体车库容量大、形式多样,对车位分配的要求更高,载荷形式更加多样。因此在研究立体车库的载荷谱时,以平面移动式立体车库为代表进行研究,运用概率统计方法,结合车辆存取策略建立了适用于立体停车结构的交变载荷谱;之后,采用四点雨流计数法对载荷谱进行统计和边缘分布拟合。结果表明:载荷均值服从均值为9.876 kN、标准差为0.493 kN的正态分布;幅值服从形状参数为1.603、尺度参数为2.048的双参数Weibull分布。通过参数外推得到整个生命周期的载荷频次,而后建立了对应的8级二维载荷谱和一维载荷谱。基于Miner线性损伤准则,应用本文提出的载荷谱进行移动载荷下型钢柱-牛腿节点疲劳寿命预测,实际疲劳寿命符合假定,假定合理。

关键词: 立体停车结构; 车辆存取策略; 交变载荷谱; 雨流计数法; 疲劳寿命预测; 参数外推; Miner线性损伤准则

中图分类号: U491.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0095-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240131001

Compilation and Application of Load Spectrum for Planar Mobile Three-Dimensional Garage Transportation System

CHEN Yizhi, HE Yongjun*

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

*Corresponding author: hjj0087@163.com

Abstract: The planar mobile three-dimensional garage has a large capacity and diverse forms, with higher requirements for parking space allocation and more diverse load forms. Therefore, to study the load spectrum of a three-dimensional parking garage, a planar mobile three-dimensional parking garage was taken as a representative case. Probability and statistical methods were used to establish an alternating load spectrum suitable for three-dimensional parking structures based on vehicle access strategies. The four-point rain flow counting method was further used to statistically analyze the load spectrum and fit the marginal distribution. The results show that the mean load follows a normal distribution with a mean of 9.876 kN and a standard deviation of 0.493 kN. The amplitude follows a dual parameter Weibull distribution with a shape parameter of 1.603 and a scale parameter of 2.048. By extrapolating parameters, the load frequency of the entire life cycle was obtained, and corresponding 8-level two-dimensional load spectrum and one-dimensional load spectrum were established. Based on the Miner linear damage criterion, this paper applies the load spectrum to predict the fatigue life of steel column bracket joints under moving loads. The actual fatigue life is consistent with the assumption, demonstrating the reasonableness of assumption.

Keywords: three-dimensional parking structure; vehicle access strategy; alternating load spectrum; rain flow counting method; fatigue life prediction; parameter extrapolation; Miner linear damage criterion

收稿日期: 2024-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(51878261, 52478170)

作者简介:

陈怡芝(1999—),女,硕士研究生,主要从事钢结构及大跨空间结构方面的研究。E-mail: chenyzhi9901@163.com。

通信作者:

贺拥军(1970—),男,博士,教授,主要从事钢结构及大跨空间结构方面的研究。E-mail: hjj0087@163.com。

立体车库结构服役过程中承受的车辆活荷载以及运载系统频繁搬运的情况使其长期处于交变荷载受力状态。结构受力情况复杂,且随库内车辆停放情况的变化而变化,因此需研究与实际情况相符的荷载谱。

在结构的服役过程中,荷载谱是具有统计属性的荷载时间进程,是进行疲劳寿命预测和疲劳特性设计的基础。国内针对荷载谱编制的研究主要集中在乘用车、轨道列车及工农业机械等领域。高云凯等^[1]提出了一种可以简化加速车辆车体台架疲劳测试的程序荷载谱编制方法。张英爽等^[2]编制了反映装载机传动系5种典型工况的程序荷载谱。刘博等^[3]提出一种采煤机牵引系统的荷载谱编制方法。郑国峰等^[4]提出基于极值外推的特种车辆疲劳耐久性多轴服役荷载的编制方法。陈卓等^[5]基于驱动电动机以及同步轴转矩计算出的齿轮齿条荷载,构建了包含受力齿面、荷载循环次数的齿条荷载谱。针对荷载作用下的疲劳问题,RETTENMEIER等^[6]研究了起重机轨道受移动轮荷载时的裂纹扩展情况,利用剪切强度因子计算了裂纹扩展的循环次数。WARDENIER等^[7-8]研究了钢吊车梁腹板与翼缘在集中荷载和线荷载作用下的疲劳裂纹评定问题。

平面移动式立体车库存取车作业需要多个设备共同完成,相比于其他类型的立体车库,其对车辆存取策略的要求也相对较高。本文在利用概率统计方法的基础上,以平面移动式立体车库为研究对象,创新性地结合了立体车库的实际情况与车辆存取策略,建立了立体停车结构横移荷载谱,通过参数外推得到整个生命周期的载荷

频次,反映了实际情况下结构完整生命周期的载荷情况,应用该荷载谱对型钢柱-牛腿节点进行疲劳寿命预测。本文提出的荷载谱可为立体车库抗疲劳设计、疲劳寿命计算提供参考。

1 平面移动式立体车库

1.1 结构示意

停车功能的不同使得钢制停车结构的配置与普通住宅有很大区别。钢制停车结构需要满足设置提升井及停车位的需求,考虑经济性,一般依据车辆尺寸和完成存取车辆过程所需通道尺寸对其进行柱网定位,平面尺寸相对固定且紧凑。结构中安装有自动机械化设备,可将提升井中的汽车提升,载车板上配置的搬运机器人沿固定的移动轨道移动至车辆下方并搬举车辆,实现车辆的转移,载车板将车辆运载至停车位处。

车库结构内部不存在填充墙及楼板,存取车辆的荷载通过载车板作用于结构。本文依据文献^[9]及工程实例对平面移动式立体车库进行设计,如图1a)所示,车库容量为5×18列,共170个车位,由左侧90个和右侧80个车位构成。在结构形式方面,整体为五层钢框架,x方向为6榀框架,y方向为3榀框架。

在车辆横移期间,中间横向导轨受荷次数多,两端弯矩大,节点处为疲劳分析的关键部位,焊缝处为疲劳破坏部位^[10],因此本文重点关注节点连接焊缝处。立体车库的平面布置图、基本单元、中间横向导轨和连接焊缝示意如图1b)~e)所示。

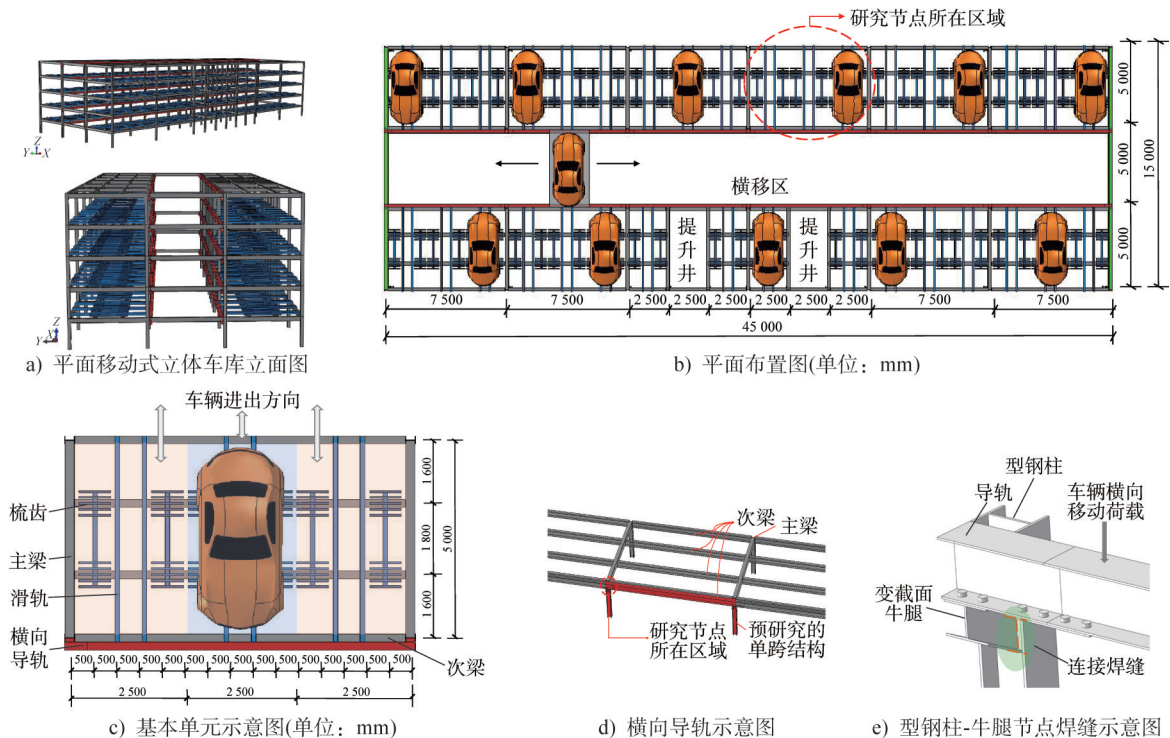


图1 立体停车结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional parking structure

1.2 立体停车结构型钢柱-钢牛腿节点

立体停车结构通常是装配式结构,导轨通过螺栓固定在牛腿上,载车板通过横移装置在导轨上横向移动。导轨采用H型钢,截面尺寸为腹板高度250 mm,腹板厚度8 mm,翼缘宽度200 mm,翼缘厚度8 mm,长度为7 500 mm。立柱采用HW型钢,截面尺寸为腹板高度224 mm,腹板厚度12 mm,翼缘宽度200 mm,翼缘厚度12 mm。节点尺寸如图2所示,盖板、牛腿腹板及翼缘厚度均为8 mm。

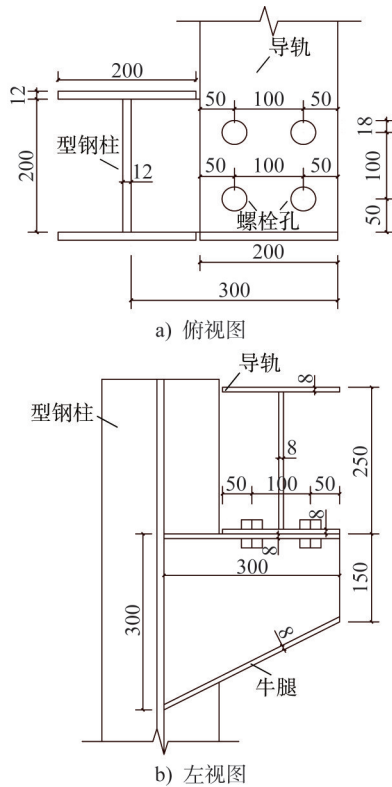


图2 型钢-钢牛腿节点详图(单位:mm)

Fig. 2 Detailed drawing of section steel-steel bracket joint (unit:mm)

2 车辆横移载荷谱建立

载荷谱是研究立体停车结构疲劳性能的重要手段。本节首先通过对某学校实测停车数据^[9]的分析,基于车辆存取策略,模拟一个周期内的负载频次特征;其次根据该学校所在区域汽车的车型销量及质量^[11]确定了载荷的分布规律;最后依据横移载荷的频次特征和分布规律建立了车辆横移载荷谱。

2.1 车辆存取数学模型

取文献[12]中的P-4车库车流量进行分析,P-4车库所辐射的出入口按车位数量占比进行车流量分配,计算得出的车库车流量变化如图3所示。

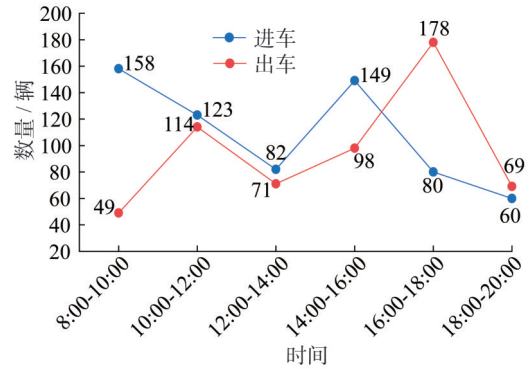


图3 车库出入流量动态分析

Fig. 3 Dynamic analysis of garage access flow

利用MATLAB软件基于车库车流量和以下原则模拟存取过程:

- (1) 存车按编号从小到大的顺序进行存入,先存放满一层再逐层向上;
- (2) 取车视为随机过程;
- (3) 下一次存车按空余车位编号从小到大存入;
- (4) 重复模拟30次,得出一个周期内(30天)载荷横移频次。

2.2 横移载荷谱计算

载车板载荷设为2.5 kN^[10],横移载荷幅值为载车板荷载的0.5倍与车辆荷载的0.6倍之和,其中车辆荷载为行李质量与汽车自身质量总和,通常行李质量预设50 kg^[11],汽车质量因具体型号不同而有所差异,呈现较明显的随机性。汽车质量参考所在地区汽车车型销量及质量情况,该质量采用文献[11]的汽车质量概率密度函数来表示:

$$f(x) = 0.2356e^{-\frac{(x-1262)^2}{73.25}} + 0.09489e^{-\frac{(x-1505)^2}{54.2}} + 0.1314e^{-\frac{(x-1647)^2}{542.05}} \quad (1)$$

式中: x 为随机变量汽车质量的可能取值。

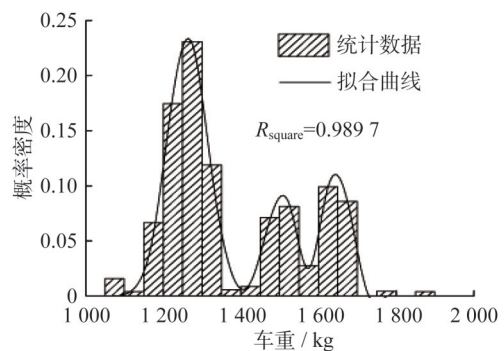


图4 汽车质量概率密度函数^[11]

Fig. 4 Probability density function of automobile quality

根据式(1)汽车质量的概率分布,通过MATLAB进行蒙特卡洛随机抽样来模拟随机停取过程中的汽车质量。根据2.1节中的存取规则,中间导轨横移次数最多,故选取该导轨建立基于横移载荷加载频次特性与汽车质量分布规律的车辆横移载荷谱,如图5所示。

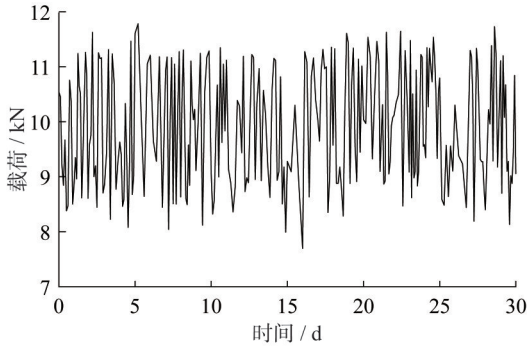


图5 车辆横移载荷谱

Fig. 5 Vehicle lateral load spectrum

2.3 横移载荷分布规律

利用MATLAB基于四点雨流计数法,获取载荷的均值-幅值-频次数据,如图6所示。编写python脚本进行载荷谱全疲劳寿命扩展,利用SciPy库中的curve_fit和Weibull_min函数根据拟合参数生成随机样本,拓展载荷均值及幅值原始数据。扩展后的拟合分布如图7所示,样本总体的精确拟合度可以借助概率检验(P-P)图进行判断。图8a)和图8b)分别描绘了载荷数据的均值和幅值的P-P图。从图中可以观察到,载荷数据与相应的分布拟合曲线呈现出较为接近的趋势。基于这一观察,可以认为扩展后的载荷均值总体服从正态分布,而幅值总体则服从Weibull分布。

均值拟合概率分布公式为:

$$f(x_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_1-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: x_1 为实测样本载荷均值; σ 为正态分布标准差,取0.493 kN; μ 为正态分布均值,取9.876 kN。

幅值拟合概率分布公式为:

$$f(x_2, \beta, \lambda) = \frac{\beta}{\lambda} \cdot \left(\frac{x_2}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x_2}{\lambda}\right)^\beta} \quad (3)$$

式中: x_2 为实测样本载荷幅值, β 是形状参数,取1.603; λ 为尺度参数,取2.048。

结合前文均值、幅值的边缘分布,为得到载荷总体的概率分布函数。根据Fisher定理,需要对均幅值进行 χ^2 独立性检验以确定幅值和均值相互独立。如果均值、幅值分布相互独立,由式(4)所示的随机变量近似服从自由度 $k=(r-1)\cdot(s-1)$ 的 χ^2 分布。

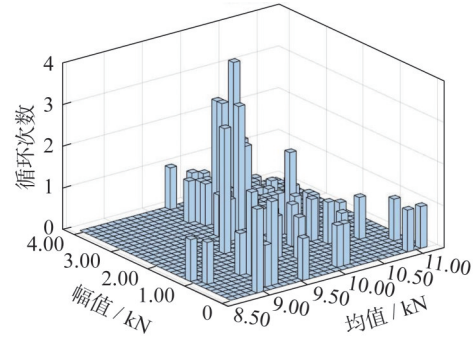
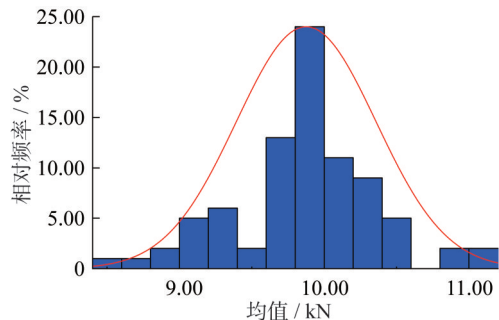
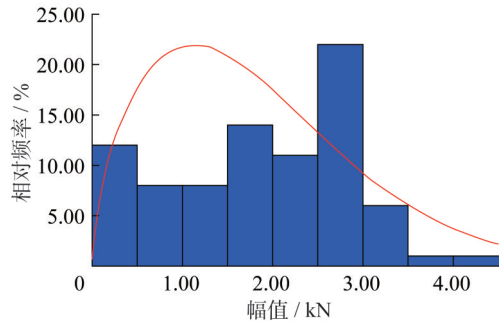


图6 均幅值三维柱状图

Fig. 6 3D histogram of mean value and amplitude



a) 正态分布



b) Weibull分布

图7 载荷均值、幅值分布拟合

Fig. 7 Fitting of load mean value and amplitude distribution

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{\left(n_{ij} - \frac{n_i \cdot n_j}{n}\right)^2}{n_i n_j} \quad (4)$$

式中: n 为总的样本载荷数据; r 为均值划分的等级数, $r=83$; s 为幅值划分的等级数, $s=83$; n_i 为均值所占 i 级的频次; n_j 为幅值所占 j 级的频次; n_{ij} 为第 i 级均值和第 j 级幅值交叉区域所占的频次。

当 n 较大时, χ^2 分布又可将其看作正态分布 $N(k, 2k)$ 分析。由此,得 χ^2 分布上分位点:

$$\chi_\alpha^2(k) \approx \sqrt{2k} U_\alpha + n \quad (5)$$

式中, U_α 为标准正态分布的上分位点,取 $\alpha=0.05$, $k=(r-1)\cdot(s-1)=6\ 724$ 。若按式(4)计算的 χ^2 小于式(5)计算的值,则均值、幅值相互独立,反之则不独立。计算得到

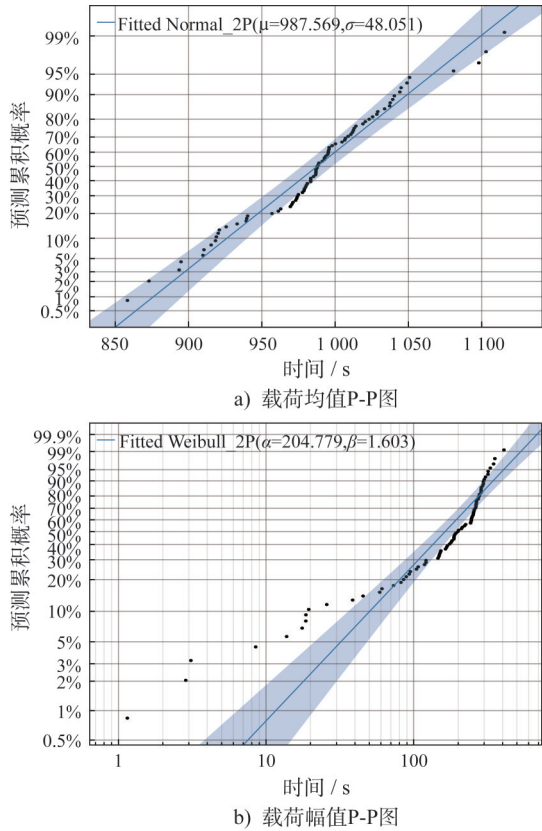


图8 载荷均幅值 P-P 图

Fig. 8 Load mean value and amplitude P-P diagram

$\chi^2=6\ 806$, 小于 $\chi_{0.05}^2(6\ 724) \approx 6\ 915$ 。故当检验水平为 0.05 时, 均值和幅值相互独立, 从而可得二者的联合概率密度函数:

$$f(x_1, x_2) = f(x_1) \cdot f(x_2) \quad (6)$$

2.4 二维载荷谱编制

为准确模拟实际工况及指导后续的疲劳损伤分析, 本小节通过编制二维载荷谱以反映载荷数据均幅值与频

次之间的关系。二维载荷谱能够更全面地反映结构或部件在实际使用过程中受到的载荷情况; 可以更准确地评估结构在复杂载荷作用下的疲劳寿命和损伤累积情况。

由于实测载荷只采集了校区 08:00-20:00 的数据, 有可能漏测极少出现的极值载荷, 故不能反映立体车库全寿命周期内可能出现的载荷历程。由于载荷均值和幅值相互独立, 因此求载荷的极值就可以转化为求均值和幅值的最大值。假设 X_{1max} 为均值极值、 X_{2max} 为幅值极值, 计算公式如下:

$$X_{1max} = \mu + \mu_p \sigma \quad (7)$$

$$X_{2max} = \epsilon + \beta \sqrt[\alpha]{-\ln P} \quad (8)$$

式中: μ_p 为标准正态偏差; ϵ 为 Weibull 分布阈值参数; P 为极值发生概率, 为 10^{-6} 。可得均值最大值为 11.15 kN; 幅值最大值为 4.08 kN。

在得到均幅值的极值后, 采用等间隔分级法将均值分为 8 级; 考虑到较大的载荷幅值对疲劳寿命影响较大, 将幅值分成不等间距的 8 级, 采用 Conover 比例系数进行划分; 组成 8×8 的二维载荷谱, 如表 2 所示。表 2 各级均幅值对应的循环次数见式 (9):

$$n_{ij} = Q \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{b_j}^{b_{j+1}} f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (9)$$

式中: i 为均值所对应的级数; j 为幅值所对应的级数; a_{i+1} 为第 i 级均值上限; a_i 为第 i 级均值下限; b_{j+1} 为第 j 级幅值上限; b_j 为第 j 级幅值下限。

基于统计学相关理论, 认为 $Q=10^6$ 次循环能够覆盖最严重情况在内的全部载荷^[3], 即在整个生命周期内出现概率为 10^{-6} 的载荷为最大值, 来确定理论极值。由于本文中单个周期数据较少, 采集的数据可能没有生命周期内的最大值, 有必要进行数据扩展, 扩展至 10^6 个载荷循环, 扩展后的二维载荷谱如表 1 所示。

表 1 二维载荷谱

Table 1 Two-dimensional load spectrum

谱值/频次 载荷均值/kN	载荷幅值/ kN							
	1.327	2.905	4.484	6.062	6.641	8.956	10.008	10.535
8.583	1 406	18 997	92 195	158 976	97 977	21 469	1 649	44
9.094	1 553	20 988	101 855	175 635	108 244	23 718	1 822	48
9.605	514	6 947	33 714	58 135	35 829	7 851	603	16
10.116	95	1 280	6 211	10 711	6 601	1 446	111	3
10.627	11	150	727	1 253	773	169	13	0
11.138	1	11	55	96	59	13	1	0
11.649	0	1	5	8	5	1	0	0
12.160	0	0	0	1	0	0	0	0

2.5 一维载荷谱编制

在需要简化分析过程并快速进行疲劳分析的情况下,一维载荷谱更为合适。但当载荷均值的变化对结构性能产生重要影响时,或者需要更全面地模拟实际载荷情况时,二维载荷谱更为合适。因此,需要根据具体需求选择使用一维载荷谱还是二维载荷谱。当需要使用一维载荷谱时,可采用变均值法将二维载荷谱降维为一维载荷谱,通过计算确定一维载荷谱中各级幅值所对应的均值:

$$M_j = \frac{\sum_i (N_i n_{ij})}{\sum_j n_{ij}} \quad (10)$$

式中: M_j 为一维载荷谱第 j 级幅值对应的均值; N_i 为二维载荷谱第 i 级均值; n_{ij} 为二维载荷谱第 i 级均值第 j 级幅值所对应的循环次数。

由此编制出一维载荷谱,如表2所示。

表2 一维载荷谱

Table 2 One-dimensional load spectrum

载荷等级	均值/kN	幅值/kN	频次
1	8.999	1.327	3 580
2	8.999	2.905	48 374
3	8.999	4.484	234 762
4	8.999	6.062	404 715
5	8.999	6.641	249 488
6	8.999	8.956	54 667
7	8.999	10.008	4 199
8	8.993	10.535	111

3 有限元模型

由于结构部件截面尺寸均远小于杆件长度,整体框架模型采用ABAQUS中的线单元进行模拟,通过设置不同的线单元截面形式与尺寸来赋予各部件截面属性。在ABAQUS主程序接口中,插入使用Fortran语言编写的DLOAD子程序,在子程序中,通过设置车轮的位置、速度和压强分布实现移动载荷的布置。在分析载车板在导轨上的移动过程时,本节取载车板在导轨上完成一跨的移动为一个分析步,如图9所示。当移动载荷作用于某跨时,本跨节点产生的应力较大,而对其相邻跨节点产生的应力较小,为节省算力,忽略相邻跨载荷的影响,采用单跨局部模型进行模拟。

采用实体单元C3D8R模拟导轨、柱、盖板、螺栓和焊缝,并在焊缝和螺栓孔处加密模型网格。焊缝与型钢柱、牛腿的接触部位通过采用Tie绑定约束连接来模拟,摩擦系数为0.3。网格尺寸非加密区为5 mm,加密区为10 mm,如图10所示。螺栓栓杆与螺孔、螺帽与垫板、垫板与导轨、导轨与牛腿接触面均采用面对面接触,摩擦系

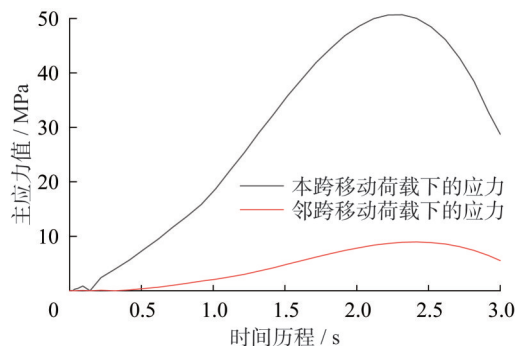


图9 本跨与邻跨移动荷载下首层中间节点的应力曲线对比

Fig. 9 Comparison of stress curves under moving loads between the current span and adjacent spans

数为0.3。材料弹性模量取210 GPa,泊松比取0.3。钢材为Q355B,屈服强度取355 MPa。采用强度等级8.8级M24高强螺栓,屈服强度640 MPa,创建螺栓中面,于螺栓模型中面施加预紧力155 kN。

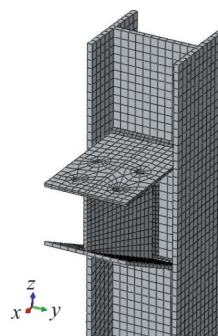


图10 模型网格划分图

Fig. 10 Model mesh division diagram

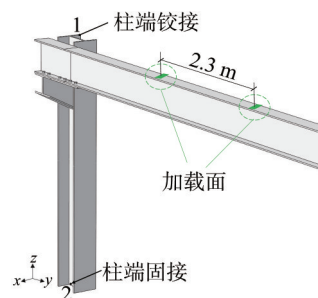


图11 载荷布置示意图

Fig. 11 Load layout diagram

假定车辆存、取过程对结构的作用效果相同。如图11所示,分析步采用静力通用分析步,利用ABAQUS用户自定义子程序DLOAD将相距2.3 m的两个0.1 m宽的竖向均布荷载布置在导轨上,以模拟载车板轮胎的移动,均布荷载幅值根据载荷谱分布规律而变化,以模拟不同质量的汽车横移。

基于断裂力学理论,在车辆移动载荷下,应力幅值较

大位置处易产生裂纹扩展从而发生疲劳破坏。单个移动载荷作用下,变截面牛腿部位存在2个应力集中细节,分别为危险焊接疲劳细节1(牛腿上翼缘上部与柱腹板连接焊缝)和细节2(牛腿上翼缘下部与柱腹板连接焊缝),如图12所示。应力幅值较大处为焊缝处,牛腿与柱连接处焊缝为最危险部位,提取该构造细节在单个载荷均值下的名义应力时程如图13所示。

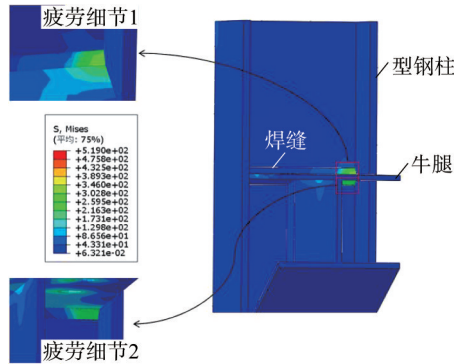


图12 牛腿与柱连接处焊缝应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Stress contour of the weld at the connection between bracket joint and column (unit:MPa)

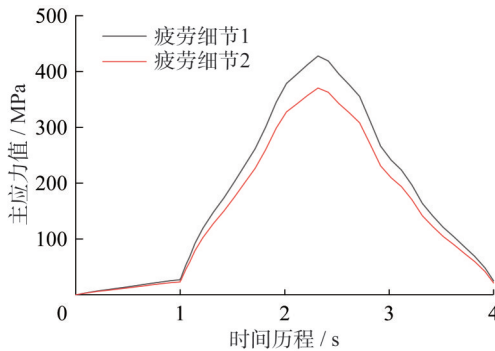


图13 疲劳细节的名义应力时程曲线

Fig. 13 Nominal stress time-history curves of fatigue detail

4 疲劳细节寿命预测

二维载荷谱中的载荷均值数据和一维载荷谱中的频

次数据能有效反映实际工况下的载荷条件。在疲劳分析的过程中,首先,通过前文ABAQUS对一跨立体车库结构在移动载荷作用下的结构动力响应进行数值模拟,以获取型钢柱-牛腿节点的应力幅值谱。随后将应力幅值谱导入疲劳分析软件Fe-safe中,用于进一步的疲劳寿命评估。

在Fe-safe中,由不同构造细节疲劳类别的S-N曲线,计算得到各疲劳细节于各载荷均值下的疲劳寿命。S-N曲线是描述应力幅值与疲劳寿命之间关系的经验公式,它考虑了材料特性、应力集中等因素对疲劳寿命的影响。对本文采用的普通钢材和焊缝进行疲劳计算分类^[13],为19项次Z8。

基于一维载荷谱中的频次数据,可计算各载荷均值对应的损伤量。损伤量是一个量化指标,用于描述材料在给定载荷条件下的疲劳累积程度,采用应力幅值和相应的循环次数(即频次)进行计算。

为了更准确地预测疲劳细节的疲劳寿命,本文采用了线性累积损伤理论。该理论假设损伤是可以线性累加的,即不同载荷条件下的损伤可以简单地相加。因此,根据各载荷均值的频次,将相应的损伤量进行累加,从而得到结构在整个寿命周期内的总损伤量。

最终,通过比较总损伤量与材料的疲劳极限,可以预测出各疲劳细节的疲劳寿命。这一过程不仅考虑了不同载荷条件下的损伤累积,还结合了材料的疲劳特性,因此能够提供更准确、可靠的疲劳寿命预测结果。累积损伤计算公式如下:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (11)$$

式中: D_i 为累积损伤; n_i 为应力水平*i*下的试验循环数; N_i 为应力水平*i*下的总寿命,累积损伤达到1时,发生失效: $\sum D_i = 1$ 。

计算结果如表3所示,经上述分析得到的预测疲劳寿命数量级为 10^6 ,与本文在进行载荷谱编制时认为 10^6 次循环能够覆盖所有载荷在内的初始假定相符,证明该假定合理。

表3 疲劳寿命预测

Table 3 Fatigue life prediction

载荷均值/kN	8.583	9.094	9.605	10.116	10.627	11.138	11.649	12.160	
频次	3 580	48 374	234 762	404 715	249 488	54 667	4 199	111	
疲劳次数/万次	333.493	217.329	143.659	101.707	74.314	54.658	42.089	33.073	细节1
	1 000.000	709.578	440.555	295.121	206.538	145.211	107.647	81.658	细节2
细节1损伤因子	0.001 1	0.022 3	0.163 4	0.230 8	0.335 7	0.100 0	0.010 0	0.000 3	总计 0.863 6
细节2损伤因子	0.000 4	0.006 8	0.053 3	0.137 1	0.120 8	0.037 6	0.003 9	0.000 1	总计 0.360 0
									细节1疲劳寿命 115.790 万次
									细节2疲劳寿命 277.780 万次

5 结论

本文以平面移动式立体车库为研究对象,基于四点雨流计数法进行载荷谱的编制,并将所提出的载荷谱应用于型钢柱-牛腿节点的疲劳寿命计算中。通过本次研究,可得出以下结论:

(1) 通过对某学校的车流量分析,并考虑停车策略得到立体停车结构横移载荷谱。应用四点雨流计数法对横移载荷进行循环统计分析,确定了载荷均值服从均值为9.876 kN、标准差为0.493 kN的正态分布;幅值服从形状参数为1.603、尺度参数为2.048的双参数Weibull分布,并且两个分布相互独立。

(2) 通过参数外推法,得出均值和幅值的最大值,通过计算联合概率密度函数得到了8级二维载荷谱,利用变均值法得到一维载荷谱。

(3) 在车辆的横移载荷作用下,牛腿上翼缘与柱腹板连接处焊缝为最易发生疲劳破坏的敏感部位。

(4) 基于Miner线性损伤准则和S-N曲线,应用本文提出的载荷谱,分析计算得出移动载荷下两处疲劳细节的疲劳寿命数量级为 10^6 ,与编制载荷谱初始假定 10^6 次循环能够覆盖所有载荷在内相符,证明该假定合理。

参考文献:

- [1] 高云凯,徐成民,方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 92-98. DOI: 10.3901/JME.2014.04.092.
- GAO Yunkai, XU Chengmin, FANG Jianguang. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 92-98. DOI: 10.3901/JME.2014.04.092. (in Chinese)
- [2] 张英爽,王国强,王继新,等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 179-183. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.031.
- ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Compilation method of power train load spectrum of engineering vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 179-183. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.031. (in Chinese)
- [3] 刘博,庄德玉,邱锦波. 基于雨流计数法的采煤机牵引系统载荷谱编制[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 219-223. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.10.049.
- LIU Bo, ZHUANG Deyu, QIU Jinbo. Compilation of load spectrum of shearer traction system based on rain flow counting method [J]. Coal Technology, 2023, 42(10): 219-223. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.10.049. (in Chinese)
- [4] 郑国峰,杨思宇,陈柏先等. 基于极值外推的特种车辆疲劳耐久性多轴载荷谱编制[J]. 兵工学报, 2024, 45(7): 1-13. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0431.
- ZHENG Guofeng, YANG Siyu, CHEN Boxian, et al. Compilation of multiaxial load spectra for fatigue durability of special vehicle based on extreme value extrapolation [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(7): 1-13. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0431. (in Chinese)
- [5] 陈卓,师陆冰,阎晓青,等. 基于载荷谱的三峡升船机齿条疲劳寿命评估[J]. 机械传动, 2023, 47(5): 158-166. DOI: 10.16578/j.issn.1004.2539.2023.05.024.
- CHEN Zhuo, SHI Lubing, YAN Xiaoqing, et al. Fatigue life evaluation of racks for the Three Gorges ship lift based on the load spectrum [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(5): 158-166. DOI: 10.16578/j.issn.1004.2539. 2023.05.024. (in Chinese)
- [6] RETTENMEIER P, ROOS E, WEIHE S, et al. Assessment of mixed mode crack propagation of crane runway girders subjected to cyclic loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 153: 11-24. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.12.018.
- [7] WARDENIER J, DE VRIES P, TIMMERMAN G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 163-173. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2017.10.027.
- [8] WARDENIER J, DE VRIES P, TIMMERMAN G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a line load in compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128: 210-218. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.08.022.
- [9] 王小农,李建国,贺云鹏. 平面移动式立体车库车位分配的建模与仿真[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1): 54-62. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.01.008.
- WANG Xiaonong, LI Jianguo, HE Yunpeng. Modeling and simulation of parking space allocation in plane mobile stereo garage [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(1): 54-62. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.01.008. (in Chinese)
- [10] 贺拥军,周绪红,何佳琦. 隔层桁架式立体停车结构地震倒塌易损性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2014.04.002.
- HE Yongjun, ZHOU Xuhong, HE Jiaqi. Seismic collapse fragility analysis of the 3D parking structure with alternation story-height truss lateral-load-resisting system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(4): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2014.04.002. (in Chinese)
- [11] 罗春波,贺拥军,向思宇. 钢制立体停车结构梁柱节点抗疲劳性能研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2023, 55(3): 87-94. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2022065.
- LUO Chunbo, HE Yongjun, XIANG Siyu. Research on fatigue resistance of beam-column joint in steel tridimensional parking structures [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2023, 55(3): 87-94. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2022065. (in Chinese)
- [12] 黄佳儒. 存量条件下湖南大学南校区立体车库布点规划研

- 究[D].长沙:湖南大学,2021.
- HUANG Jiaru. The research on location planning of stereo garage in the south campus of Hunan university under the condition of stock [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)