

基于铰接式观光架空游览车车体设计与研究

邓元岗

中铁宝桥集团有限公司 陕西 宝鸡 721006

摘要:介绍了一种铰接式观光架空游览车车体设计与研究过程,从大型游乐设施规范、车辆技术参数、车体结构、技术特点等方面进行分析;对车体进行结构设计,依据GB 8408-2018《大型游乐设施安全规范》及EN12663-1-2010《铁路应用 铁道车辆车体结构要求第1部分:机车和客车》相关标准要求,对车体静强度、挠度、模态、疲劳进行分析研究,对研发过程进行归纳总结;通过分析研究,各项指标性能完全满足设计要求及标准要求,该车体的设计研究对相关类型的观光架空游览车开发具有积极的指导意义。

关键词:铰接;车体;强度;挠度;疲劳;模态

1 研究背景

架空游览车作为一种新的旅游方式,能够为游客提供不一样的旅游体验。它隶属于大型游乐设施,本篇介绍了一种铰接式单轨架空游览车车体的设计研究,通过对车体、结构设计及机械性能计算,研究一种轻量化的铰接式单轨架空游览车车体。

2 车体结构设计及计算模型

车体作为车辆重要部分,它可承载旅客,也是车内外设备及装饰件安装的构架基础。车体在架空运行中承受永久载荷及活载荷,并承受各种载荷的组合,如驱动力、制动力、惯性力、风载荷、雪载荷、冲击载荷等,其结构静强度、挠度、疲劳、振动等直接与车辆安全和平稳舒适息息相关,本文通过对铰接式车体进行结构设计,并对机械性能静强度、挠度、模态、疲劳这几项指标进行计算研究,验证各项指标是否满足GB 8408-2018及EN12663-1-2010相关标准要求。

2.1 车体结构设计

列车采用3模块进行编组,承载16人/节,最高车速25km/h,列车车体之间由动力转向架进行铰接连接,Mc1车体I位端,Mc2车体II位端分别由非动力转向架与车体铰接支撑。车体采用承载焊接式整体结构,并通过模块化设计,每节车体分别由底架、侧墙、车顶、端墙铰接梁、牵引梁等组焊而成。车体断面采用倒“V”型,结构设计包含车内各设备安装接口,侧墙表面采用无蒙皮设计。

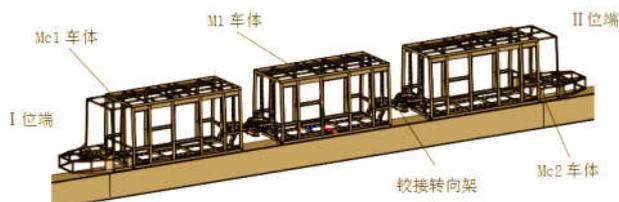


图1 车体布置

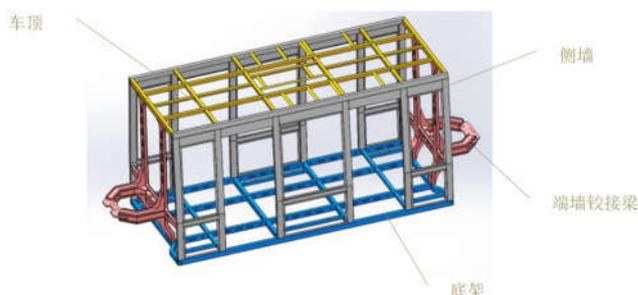


图2 M1车体构造

2.2 计算模型

车体计算按照Mc1、M1、Mc2分别独立计算,每节车体载荷工况及研究方法相同,因此本文只针对M1进行论述,车体采用薄壁型材、薄板、压型件混合焊接而成,在有限元模型中整体结构采用壳单元离散,建立车体有限元计算模型M1,单元数量155654,节点数量157354。



图3 M1有限元模型网格

2.3 材料参数

表1 材料性能参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
Q355B	2.06E5	0.3	7850	355	470~630

3 静强度工况和疲劳载荷工况

游乐设施的工况包括正常运行工况、非正常运行工况和极限状态工况。根据设备运行不同阶段,活载荷不

同分布,设备不同姿态等可能出现的极限工况条件,将车体结构所接受的永久载荷和活载荷等进行组合,形成多个复合工况,再进行分析计算。

$$P_1 = k_1 \sum (G_k + Q_1 + Q_5 + Q_7) + Q_9 + Q_{10} \quad (1)$$

P_1 —组合后的载荷;

G_k —永久载荷;

Q_1 —活载荷;

Q_5 —驱动力和制动力;

Q_7 —惯性力;

Q_9 —风载荷;

Q_{10} —雪载荷;

k_1 —冲击系数,1.2。

3.1 静强度载荷及工况

结合游览车实际运行情况,对载荷进行组合分析,归纳整理集结主要7种受力工况。

表2 静强度各工况及载荷组合

序号	工况类型	工况名称	载荷组合	说明
1	运行状态1	工况1	$G_k + Q_{1满} + Q_{5牵} + Q_7 + Q_{9常}$	正常运行
2	运行状态2	工况2	$G_k + Q_{1满} + Q_{5制} + Q_7 + Q_{9常}$	正常运行
3	运行状态3	工况3	$G_k + Q_{1偏} + Q_{5牵} + Q_7 + Q_{9常}$	正常运行
4	运行状态4	工况4	$G_k + Q_{1偏} + Q_{5制} + Q_7 + Q_{9常}$	正常运行
5	满载静止	工况5	$G_k + Q_{1满} + Q_{9常}$	正常运行
6	吊装工况	工况6	G_k	非正常运行
7	停运工况	工况7	$G_k + Q_{9天} + Q_{10}$	极限工况

表3 车辆各工况下载荷表

工况	$a_x / m \cdot s^{-2}$	$a_y / m \cdot s^{-2}$	$a_z / m \cdot s^{-2}$	G_k / N	Q_1 / N	Q_5 / N	Q_{10} / N
工况1	0.7×1.2	0.7×1.2	$1g \times 1.2$	8830	11760	2925	/
工况2	-2×1.2	0.7×1.2	$1g \times 1.2$	8830	11760	2925	/
工况3	0.7×1.2	0.7×1.2	$1g \times 1.2$	8830	5880	2925	/
工况4	-2×1.2	0.7×1.2	$1g \times 1.2$	8830	5880	2925	/
工况5	/	/	$1g \times 1.2$	8830	11760	2925	/
工况6	/	/	$1g \times 1.2$	8830	/	/	/
工况7	/	/	$1g \times 1.2$	8830	/	4680	2250

表3中定义坐标原点如图4所示。 G_k 为车体结构自重,重力加速度取 $g = 9.8m/s^2$; Q_1 按照750N/人; Q_5 按照加速度 a_x 加载,牵引时 $a_x = 0.7m/s^2$,紧急制动时 $a_x = -2m/s^2$; Q_7 按照离心加速度 $a_y = 0.7m/s^2$;风载分为运行状态和停运状态,按车速20m/s计算,对应基本风压250Pa;停运工况依据GB 50009按某地100年气候条件,风压按400Pa计算,面积取车体正交投影面积,可以计算出常风 $Q_{9常}$ 和大风 $Q_{9天}$ 对应风载;雪载荷根据某地50年一遇气象,雪压按

照250Pa计算;冲击系数取 $k_1 = 1.2$ 。



图4 车体坐标系

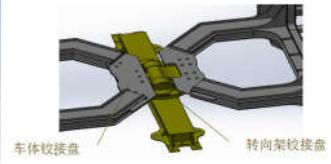


图5 车体铰接盘

3.2 疲劳载荷及工况

目前GB8408—2018对车体疲劳载荷及工况尚没有规范,国内城轨车辆车体结构疲劳设计均采用EN12663-1-2010中规定的客车疲劳载荷,该标准详细规定了不同类型客车在接受牵引和制动、惯性力、装载循环次数的影响因素下,车体的纵向、横向、垂向加速度载荷。在M1车体设计中,车体疲劳主要发生在与转向架铰接盘与车体铰接盘连接处,如图5。车体铰接盘作为受力关键部件,本文采用疲劳极限法着重对此关键焊缝进行疲劳分析,疲劳载荷工况组合如表4。

表4 3个方向的疲劳载荷组合工况

工况	纵向ax	横向ay	垂向az
工况1	0.15g	0.15g	1.15g
工况2	0.15g	-0.15g	1.15g
工况3	0.15g	0.15g	0.85g
工况4	0.15g	-0.15g	0.85g
工况5	-0.15g	0.15g	1.15g
工况6	-0.15g	-0.15g	1.15g
工况7	-0.15g	0.15g	0.85g
工况8	-0.15g	-0.15g	0.85g

4 计算结果评价依据

4.1 评价标准

根据GB8408—2018计算要求:静强度评价时零部件材料极限应力与其承受最大应力的比值为安全系数,采用许用应力法,安全系数应满足公式(2):

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{max}} \geq [n] \quad (2)$$

式中:

σ_b —材料的极限应力,单位兆帕(MPa);

σ_{max} —设计计算最大应力,单位(MPa);

$[n]$ —许用安全系数,构架 > 3.5。

挠度评价按TB/T 1335-1996,客车车体按照相当弯曲刚度(EJ),按照车体中梁 $EJ \geq 1.30 \times 10^9 N \cdot m^2$,侧墙 $EJ \geq 1.80 \times 10^9 N \cdot m^2$ 。

疲劳评价在GB8408—2018对没有明确要求,本文参照国际铁路联盟试验研究报告ERRIB 12/RP17提供的方法和规定,采用Good-man钢材疲劳极限图来评定车体铰

接盘关键焊缝疲劳强度及寿命，当车体铰接盘关键焊缝处在表4各工况下的平均应力 σ_m 和应力幅 σ_a 均位于疲劳极限图内，则车体铰接盘关键焊缝疲劳强度满足要求，属于无限寿命设计。

4.2 静强度计算结果

车体在实际运行中，车厢活载（游客）、内外设备及装饰质量等采用质量点模拟敷设在各结构受力面上；车体铰接盘与转向架铰接盘连接采用远程载荷，铰接盘自由度如下：

表5 约束边界条件

铰接盘方位	x分量/mm	y分量/mm	z分量/mm	绕x轴	绕y轴	绕z轴
I位端	自由	约束	约束	约束	自由	自由
II位端	约束	约束	约束	约束	自由	自由

本文仅列出工况1满载曲线运行工况TOP面和BOTTOM面应力云图，其余各工况得到静强度最大应力结果如表6所示

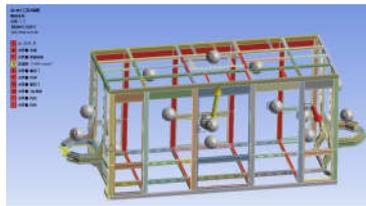


图6 工况1约束边界条件

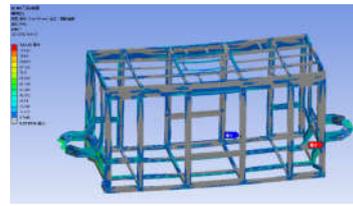


图7 工况1云图

表6 各工况下计算结果

工况	抗拉强度/MPa	TOP面最大应力/Mpa	BOTTOM面最大应力/Mpa	安全系数	受力位置
工况1	470	122.3	127.2	3.7	铰接梁下筋板
工况2	470	119.5	121.3	3.9	铰接梁下筋板
工况3	470	109	109.5	4.3	铰接梁下筋板
工况4	470	105.8	106.3	4.4	铰接梁下筋板
工况5	470	109.7	113	4.2	铰接盘
工况6	470	128.5	128.5	3.7	侧墙窗框角
工况7	470	82.9	83.6	5.6	铰接梁下筋板

4.3 挠度计算结果

经过计算M1车体刚度计算在各个工况下各处最大挠度值，以及中梁及侧墙的在七种工况下，各自垂向最大挠度值，按照公式（3）计算相当弯曲刚度。

$$EJ = \frac{WL_2^2}{384f} (5L_2^2 - 24L_1^2) \quad (3)$$

EJ - 相当弯曲刚度， $N \cdot m^2$ ，

W - 单位长度载荷， $N \cdot m^2$ ，

L_1 - 底架外伸部分长度， m ，

L_2 - 车辆定距， m ，

f - 底架中梁（ f_z ）或侧墙（ f_c ）中央挠度， m 。

通过计算，得出 $EJ_z = 2.3 \times 10^9 N \cdot m^2 > 1.3 \times 10^9 N \cdot m^2$ ，符合评定要求；

$EJ_c = 2.7 \times 10^9 N \cdot m^2 > 1.8 \times 10^9 N \cdot m^2$ 符合评定要求。

4.4 疲劳强度计算结果

车体铰接盘疲劳按照高周疲劳分析，根据表4工况组合，参照ERRIB 12/RP17提供的方法，求解车体结构铰接盘焊缝（熔透焊）位置每个节点在8个工况下的最大主应

力及最小主应力，按照疲劳极限法进行数据分析筛选处理，求出8种疲劳工况每个节点最大主应力中的极大值，最小主应力中的极小值，再计算平均应力 σ_m 、应力幅 σ_a ， σ_m 、 σ_a 按式(4)和式(5)计算。

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5)$$

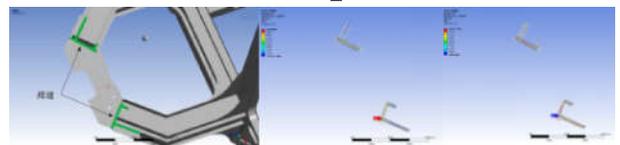


图8 铰接盘焊缝位置节点应力

求出焊缝处每个节点平均应力和应力幅后，疲劳极限图参照ERRIB 12/RP17规定，根据钢材疲劳极限图及《轨道车辆结构设计》章节中关于Good-man疲劳极限图的绘制方法。绘制Q355材料Good-man疲劳极限图，通过数据处理，铰接盘焊缝位置所有节点平均应力和应力幅对应坐标点均落在疲劳极限图内，即满足疲劳强度

设计要求，此处不会发生疲劳破坏。

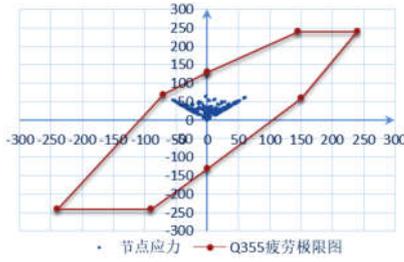


图9 车体铰接盘关键焊缝疲劳极限图

5 模态振动分析

为了避免车体整体或局部刚度不足、低阶固有频率过低，与来自二系悬挂的振动激励产生共振，同时对车体的刚度分布的合理性也进行检测，因此车体设计完成后需要进行模态分析，计算分析车体振型和固有频率。

5.1 M1车体自振频率计算

对于车体自振频率来说，高频率对车体影响不大，因此仅求车体前六阶自振频率。

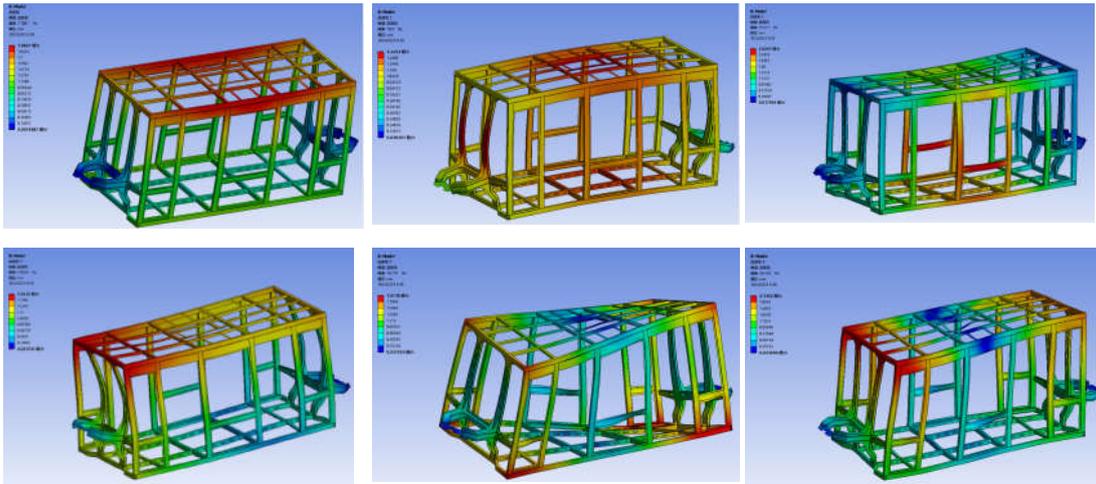


图10 一阶到六阶振型

5.2 M1车体自振频率结果

表7 前六阶固有频率

模态阶数	频率 (Hz)	振型
1.	7.1	车体纵向扭转变形
2.	10.9	车体局部横弯变形
3.	15.5	车体整体横弯变形
4.	16.0	车体垂向弯曲变形
5.	19.7	车体扭转变形
6.	20.1	车体扭转变形

结论

(1) 根据GB8408—2018设计计算基本要求及组合计算工况，按照评价标准，车体结构计算结果安全系数[n]均大于3.5，满足标准静强度设计要求；

(2) 车体挠度满足TB/T 1335-1996规定要求，刚性满足设计要求；

(3) 根据EN 12663-1-2010 给定的疲劳载荷工况，参照国际铁路联盟试验研究报告ERRIB 12/RP17提供的方法和规定，车体铰接盘焊缝处所有节点的平均应力 σ_m 和应力幅 σ_a 均落于材料疲劳极限图包络线内，因此车体铰接盘疲劳强度满足疲劳要求，无限寿命内，不会发生疲劳

破坏；

(4) 经过模态振动计算分析，参考TB/T 3451-2016《动车组车体结构强度设计及实验》中要求，车体结构的一阶垂弯自振频率不得小于10Hz，但对于该车辆最高运行速度仅有25km/h，二系悬挂的振动频率控制在1~1.5Hz，本计算所得的一阶垂弯频率为16Hz，因此车体不会发生竖弯共振。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局. 大型游乐设施安全规范:GB8408—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [2] 同济大学.赵洪伦,龚积球.轨道车辆结构设计[M].北京:中国铁道出版社,2009.
- [3] 动车组车体结构强度设计及实验.TB/T 3451-2016[S].
- [4] 铁道车辆强度设计及鉴定规范.TB/T 1335-1996[S].
- [5] 建筑结构荷载规范.GB 50009-2012[S].
- [6] EN 12663-1-2010.《铁路应用铁道车辆车体结构要求第1部分:机车和客车》.[S].
- [7] ERRI B12/PR17.《国际铁路联盟试验研究报告》[R].