

ICS 45.060.20
CCS S 51



中华人民共和国国家标准

GB/T 44511—2024

城市轨道交通车辆耐撞性要求及验证

Crashworthiness requirements and verification for urban rail transit vehicles

2024-09-29 发布

2025-04-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准管理委员会

发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 车辆耐撞性设计分类	2
5 典型碰撞场景	3
6 被动安全要求	3
7 耐撞性验证	11
附录 A (规范性) 15 t 可变形障碍物	13
附录 B (规范性) 3 t 刚性障碍物	15
附录 C (规范性) 7.5 t 可变形障碍物	16
附录 D (规范性) 冲击试验	19
附录 E (规范性) 低速压缩试验	22
参考文献	24

前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国住房和城乡建设部提出。

本文件由全国城市轨道交通标准化技术委员会(SAC/TC 290)归口。

本文件起草单位：中车唐山机车车辆有限公司、中国中车股份有限公司、大连交通大学、中车长春轨道客车股份有限公司、中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中南大学、西南交通大学、天津轨道交通集团有限公司、上海申通地铁集团有限公司、厦门轨道建设发展集团有限公司、河北雄安轨道快线有限责任公司、武汉地铁集团有限公司、郑州地铁集团有限公司。

本文件主要起草人：王志伟、王卉子、孙彦彬、谭沐、罗超、高晓英、朱建春、姜朝勇、张云峰、刘志盛、司大伟、贾旭杰、徐练、高广军、林建辉、王清永、王生华、陶云、王鹏、向清河、吴安伟、刘莉、高宁。



城市轨道交通车辆耐撞性要求及验证

1 范围

本文件规定了城市轨道交通车辆(以下简称“车辆”)的耐撞性设计分类、典型碰撞场景、被动安全要求和耐撞性验证。

本文件适用于钢轮钢轨系统的城市轨道交通车辆,包括地铁车辆、市域快速轨道车辆、轻轨车辆和有轨电车。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

CJ/T 353—2010 城市轨道交通车辆贯通道技术条件

TB/T 3453.3—2016 动车组词汇 第3部分:部件和系统

TB/T 3500—2018 动车组车体耐撞性要求与验证规范

ISO 6487 道路车辆 碰撞试验中的测量技术 测试设备(Road vehicles—Measurement techniques in impact tests—Instrumentation)

UIC 651 机车、动车、动车组和带司机室拖车的司机室布置(Layout of driver's cabs in locomotives, railcars, multiple unit trains and driving trailers)

3 术语和定义

CJ/T 353—2010、TB/T 3500—2018 和 TB/T 3453.3—2016 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

被动安全 passive safety

采用相关系统或措施减轻碰撞事故产生的影响。

[来源:TB/T 3500—2018,2.1]

3.2

耐撞性 crashworthiness

车辆以可控制的方式吸收冲击能量、减轻撞击后果和降低乘员受伤风险的能力。

[来源:TB/T 3500—2018,2.2,有修改]

3.3

碰撞场景 collision scenario

为评估城市轨道交通车辆的耐撞性能而规定的碰撞条件。

[来源:TB/T 3500—2018,2.3,有修改]

3.4

爬车 overriding

碰撞发生时,一节车辆爬上另一节车辆的现象。

[来源:TB/T 3500—2018,2.4]

3.5

防爬装置 anti-climb device

安装在车辆端部,在碰撞发生时能抑制车辆爬车行为的装置。

[来源:TB/T 3500—2018,2.5]

3.6

压溃区 crumple zone

车辆端部结构中能够以可控方式变形吸能的区域。

[来源:TB/T 3500—2018,2.6,有修改]

3.7

吸能结构 energy-absorbing structure

车体上能够以可控方式变形实现碰撞能量耗散的结构。

注:吸能结构包括元件、装置、部件以及压溃区的结构等。

3.8

生存空间 survival space

在碰撞场景下为了保证司乘人员和乘客安全保持的空间。

[来源:TB/T 3500—2018,2.9,有修改]

3.9

贯通道 gangway

安装在两车之间,用于保持相邻车辆连接密贴,防止风、雨等侵入,保护旅客安全通行或滞留的部件。

[来源:CJ/T 353—2010,3.1]

3.10

排障器 obstacle deflector

位于列车端车车体司机室端下方,用于排除轨道上障碍物的部件。

3.11

扫石器 stone sweeper

设置在车辆运行方向的前导向轮对外侧,用于清扫碎石等小型障碍物的装置。

[来源:TB/T 3453.3—2016 ,3.7,有修改]

3.12

临时占用区 area of temporary occupation

车辆上未设置乘客座椅,乘客只在上下车时经过且不会在车辆运行期间长期驻留的区域。

3.13

变形模式 deformation mode

具有变形吸能功能的结构、部件以及装置等在吸能期间发生的变形形态及其顺序。

3.14

壁障 barrier

用于模拟障碍物的固定或可移动的结构、装置或设施等。

4 车辆耐撞性设计分类

耐撞性设计分类应根据车辆运营线路基础设施情况以及车辆主要特征,按表 1 划分。

表 1 耐撞性设计分类

类型	分类依据	典型车辆示例
I	只在专享路权轨道线路上运行的城市轨道交通车辆,且该轨道线路与道路交通没有平交交汇	地铁车辆、市域快速轨道车辆、轻轨车辆
II	只在专享路权轨道线路上运行的城市轨道交通车辆,且该轨道线路与道路交通有平交交汇	市域快速轨道车辆
III	与道路交通车辆混行的有轨电车	有轨电车

5 典型碰撞场景

5.1 按表 2 定义各城市轨道交通车辆耐撞性设计类型的碰撞场景。碰撞场景中,城市轨道交通车辆编组列车的质量应为列车整备状态的质量与 50% 座席乘客的质量之和。其中,15 t 可变形障碍物应符合附录 A 的相关规定,3 t 刚性障碍物应符合附录 B 的相关规定,7.5 t 可变形障碍物应符合附录 C 的相关规定。

5.2 对于采用重联运营的列车耐撞性评估,可以单编组列车确定。

表 2 碰撞场景

碰撞场景	被撞击的障碍物	线路条件	撞击速度/(km/h)		
			I	II	III
1	相同的编组列车	所有城市轨道线路	25 或 15 ^a	25	15
2	15 t 可变形障碍物	带有平交道口的线路	不适用	25	不适用
	3 t 刚性障碍物	不与道路交通隔离的城市轨道线路	不适用	不适用	25
	7.5 t 可变形障碍物	不与道路交通隔离的城市轨道线路	不适用	不适用	15
3	较小、较低的障碍物	非全封闭线路、存在障碍物入侵风险的线路	不适用	表 6、表 7	不适用
注 1: 在同一线路上运营的不同种列车,以各自的耐撞性评估。 注 2: 所有碰撞场景中的列车都位于平直轨道上,撞击列车与被撞击物均不施加制动,被撞击物初速度为零。 注 3: 本文件只定义了典型碰撞工况,特殊碰撞工况由供需双方确定。					
^a 轻轨车辆采用撞击速度为 15 km/h。					

6 被动安全要求

6.1 通用要求

在规定的碰撞场景下,车辆的耐撞性应满足下列要求:

- a) 能量吸收有序可控;
- b) 降低爬车风险;
- c) 保持生存空间的结构完整性;

- d) 限制加速度;
- e) 减轻撞击轨道障碍物产生的后果;
- f) 降低脱轨的风险。

6.2 吸能部件

6.2.1 车辆各级吸能部件应为车辆碰撞动能耗散的主要部件,在碰撞中,应在车体主体结构发生较大区域的屈曲变形之前,触发启动其缓冲吸能功能。各级吸能装置宜安装于车辆的端部结构上。

6.2.2 车辆的各级吸能部件应按照设计方案有序可控地逐级触发其缓冲吸能功能,能量吸收应有序可控。每级吸能部件应按照设计方案发生有序可控的变形,能量吸收应有序可控。

6.2.3 在同一线路上运营的列车,列车前端吸能部件的安装位置及相关结构应具有兼容性,安装位置及相关结构不应影响吸能部件有效发挥吸能功能。

6.2.4 除具有可恢复式缓冲功能的部件之外,车辆各级吸能部件应仅在发生碰撞事故时触发其吸能功能,在车辆正常运营中不应触发其吸能功能。

6.3 防爬性能



6.3.1 车辆应具有防爬性能,在规定的碰撞场景下,列车间和车辆间不应发生爬车。

6.3.2 防爬性能应基于列车耐撞性验证步骤要求,基于表 2 中碰撞场景 1 开展碰撞数值仿真。在验证列车防爬性能时,两列编组列车在碰撞接触点处应有 40 mm 的初始垂向位移偏差,其中静止列车的水平位置应低于运动列车,编组列车自身的车辆间应无初始垂向位移偏差。

6.3.3 车辆的防爬性能满足下列两个要求:

- a) 吸能结构应能有序可控吸收能量;
- b) 在碰撞过程中,每个转向架应至少有一个轮对与轨道保持有效接触,即每个转向架应至少有一个轮对在轨道上方的垂直位移不大于轮缘名义高度的 75%;或在碰撞过程中车辆的防爬装置保持啮合,防爬装置能在撞击车辆间提供稳定的互锁,且可通过互锁面传递碰撞界面力,在此条件下,车轮与轨面之间最大垂向位移不应大于 100 mm。

6.4 生存空间

6.4.1 一般要求

6.4.1.1 生存空间对应的车体结构应能承受吸能结构在吸能变形过程中受到的外力并保持结构完整,但允许有局部塑性变形或局部屈曲。

6.4.1.2 生存空间应至少保留一条逃生路线,结构变形不应影响逃生路线的使用。

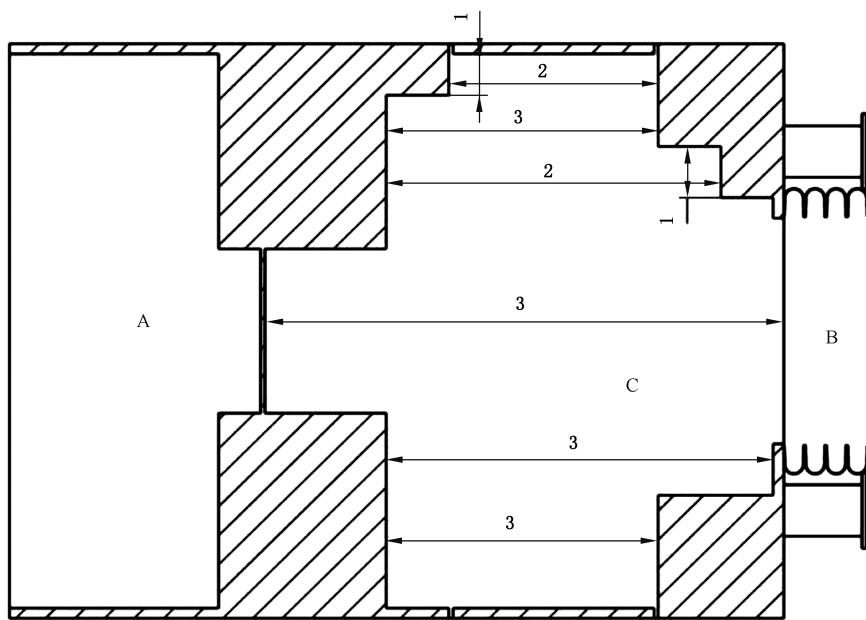
6.4.1.3 车辆端部的挡风玻璃和侧窗玻璃的内表面边缘应由司机室结构支撑,限制玻璃向车内突入。

6.4.2 乘客生存空间

6.4.2.1 乘客座位区域的车体结构纵向压缩变形量在任意 5 m 长度内不应大于 50 mm,或局部结构塑性应变不应大于 10%。

6.4.2.2 车辆结构端部区域作为乘客区时,车辆端部 5 m 长度内车体纵向压缩变形量不应大于 100 mm。

6.4.2.3 当车辆的乘客临时占用区作为撞击压溃区时,此区域内横向尺寸为 250 mm 及以下的区段,其车体纵向压缩变形量不做要求;此区域内横向尺寸超过 250 mm 的区段,其结构纵向压缩变形量不应大于原结构长度的 30%。车辆端部生存空间各区域示意如图 1 所示。



标引说明：

- A —— 座位区域；
- B —— 贯通道区域；
- C —— 乘客临时占用区域。
- 1 —— 不超过 250 mm 的横向尺寸；
- 2 —— 纵向压缩变形量不做要求的区段；
- 3 —— 纵向压缩变形量不超过 30% 的区段；
- 设备或结构占用区域。

图 1 车辆端部生存空间区域示意图

6.4.3 司机生存空间

6.4.3.1 在规定的每个碰撞场景下，应为司机室内人员提供足够的生存空间。在碰撞期间，司机生存空间应始终保持整体空间的整体性；车辆结构变形不应导致任何结构侵入司机生存空间；司机生存空间附近主要承载结构不应存在断裂风险或成为危险侵入物的风险。

6.4.3.2 司机室内至少保持下列两种司机生存空间情形中的一种：

- 每个司机座椅周围均应保持一个 6.4.3.3 和 6.4.3.4 中定义的司机生存空间；
- 紧邻司机座椅应保持一个长度和宽度至少为 750 mm、高度至少为地板面与顶板面间原始高度 80% 的生存空间。

6.4.3.3 可调司机座椅位置的生存空间应采用能共同包络当司机座椅调整至最远和最高位置时就座第 95 百分位男性和当司机座椅调整至最近和最矮位置时就座第 5 百分位女性的空间。该生存空间包络面的坐标原点应与司机座椅调整至最靠后和最高位置时的座椅基准点(seat reference point, SRP)重合，座椅基准点应按照 UIC 651 规定的信号观测时的 SRP 位置，该生存空间包络面的关键点坐标应采用表 3 中的数值，宽度采用表 4 中的数值，包络面如图 2 所示。

表 3 司机座椅位置的生存空间包络面关键点坐标

单位为毫米

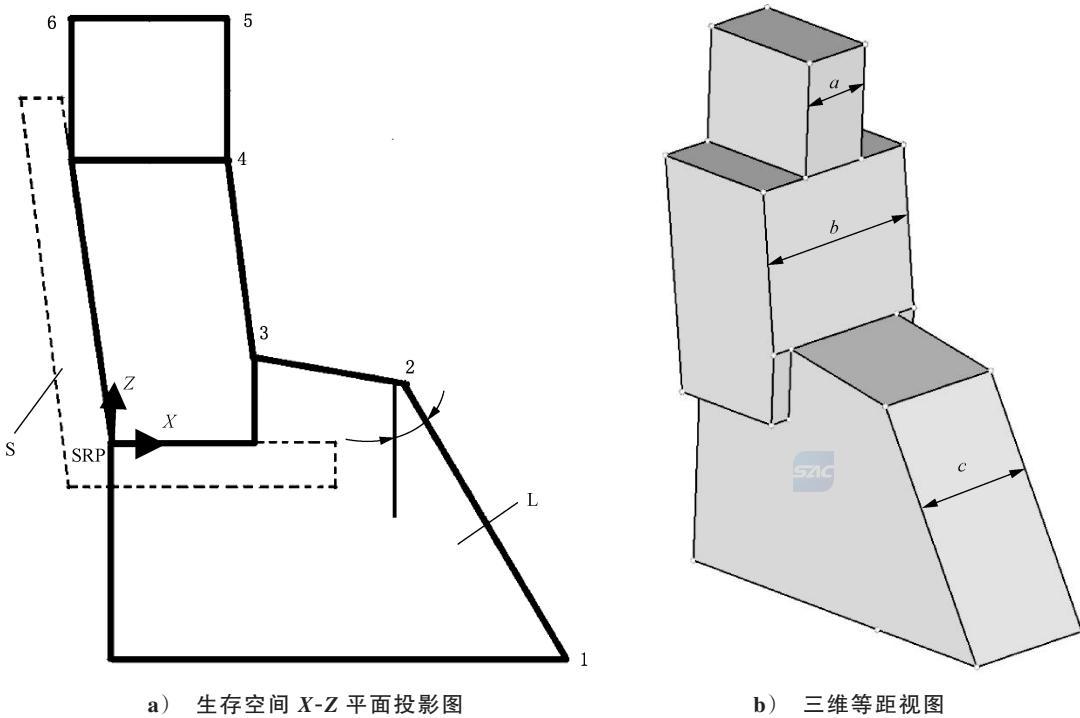
关键点或部位尺寸		可调司机座椅位置的生存空间外形尺寸		司机室内其他固定座椅位置的生存空间外形尺寸	
序号	相对于SRP的坐标	X	Z	X	Z
1	前腿位置	由点2与垂直方向夹角30°确定	-500或至地面	660	地面
2	上膝位置	676	130	660	130
3	大腿位置和躯干下部(前部位置)	自座椅靠背起向X方向移340	202	自座椅靠背起向X方向移264	202
4	躯干上部位置	自座椅靠背起向X方向移367	689	自座椅靠背起向X方向移294	689
5	头前部位置	与4点X坐标相同	980	与4点X坐标相同	980
6	头后部位置	椅背	980	椅背	980

表 4 司机座椅位置的生存空间包络面宽度

单位为毫米

人体部位	图中符号	数值
头部	a	220
肘宽	b	574
臀部	c	443





a) 生存空间 X-Z 平面投影图

b) 三维等距视图

标引说明：

S —— 司机座椅；

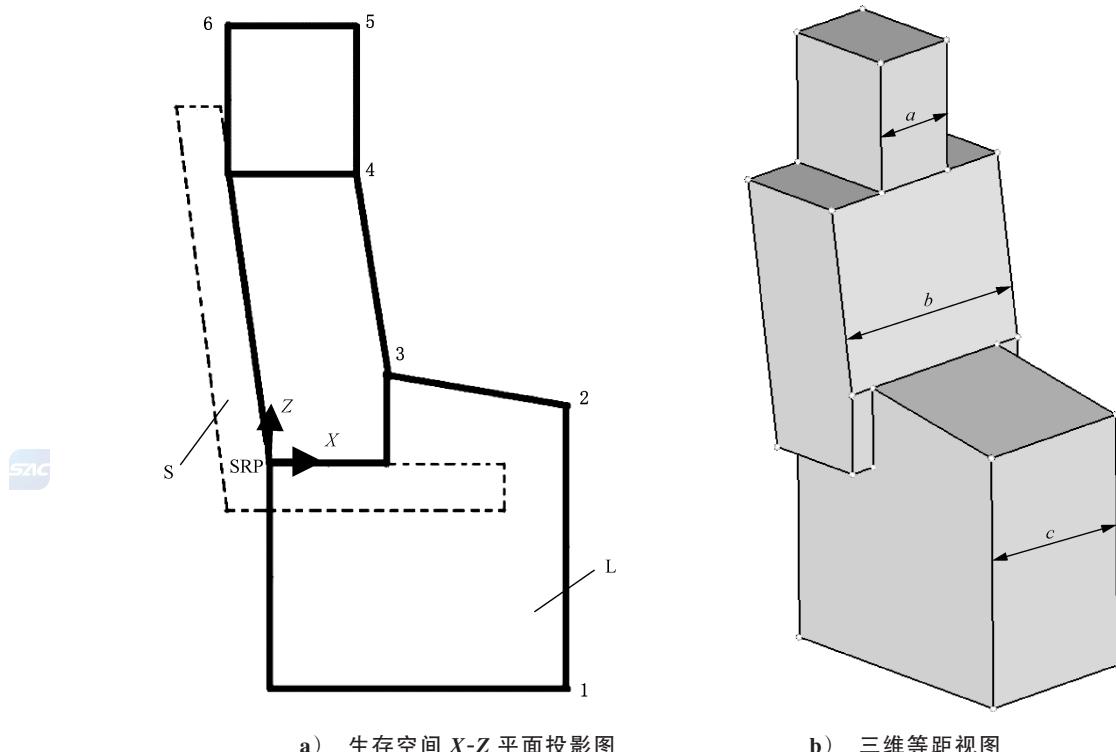
L —— 司机生存空间；

1~6 —— 司机生存空间包络面关键点，坐标值见表 3；

a~c —— 司机生存空间包络面宽度，数值见表 4。

图 2 带有脚搁架的可调司机座椅位置的生存空间包络面

6.4.3.4 司机室其他固定座椅位置的生存空间应采用第 95 百分位男性和第 95 百分位女性共同包络，司乘人员就座位置 SRP 与座椅设计就座位置相同。司机室其他固定座椅位置的生存空间包络面的关键点坐标应采用表 3 中的数值，宽度应采用表 4 中的数值，司机室其他固定座椅位置的生存空间包络面如图 3 所示。



标引说明：

S —— 司机座椅；

L —— 司机生存空间；

1~6 —— 司机生存空间包络面关键点, 坐标值见表 3；

a~c —— 司机生存空间包络面宽度, 数值见表 3。

图 3 司机室其他固定座椅位置的生存空间包络面

6.4.3.5 当司机室其他座椅为可调座椅时, 应采用可调司机座椅的生存空间包络面数据; 当司机室其他座椅为可调座椅且无脚搁架时, 可将图 2 中 1 点的 X 坐标值设为与 2 点的 X 坐标值一致, Z 坐标值为地面。

6.5 加速度

6.5.1 编组列车中每节车辆的加速度应在碰撞场景 1 中以平均加速度评估。可采用碰撞周期内作用于车辆两端纵向力的代数和计算平均加速度, 也可采用代表整车性能的单个或多个位置上的加速度值计算平均加速度。

6.5.2 在计算平均加速度时, 应采用移动平均法计算 30 ms 和 120 ms 的时间段的平均加速度值, 平均加速度最大值不应超出表 5 的限值。

表 5 平均加速度限值

移动平均持续时间/ms	平均加速度限值/(m/s ²)
30	10 g
120	5 g

6.5.3 加速度评估应从碰撞开始直到碰撞结束。碰撞开始时刻应为作用于车辆两端的纵向力的代数

和首次超过零的时刻;碰撞结束时刻应为车辆均具有相同速度时或者 95% 的碰撞能量已被吸收时。相对速度差小于初始速度 1% 的速度可视为相同速度。

6.6 排障器

6.6.1 当车辆端部结构达到表 6 的强度要求,具有抵御低小障碍物撞击的能力时,车辆前端可不安装排障器。

表 6 不同运行速度下作用在排障器上的静载和过载要求

最高运行速度 ^a /(km/h)	静载要求		过载要求 因变形吸收的能量/kJ
	作用在中心线的纵向静载荷/kN	作用在横向偏离中心线 750 mm 的纵向静载荷/kN	
≤80	60	50	7.2
100	120	100	14.4
120	180	150	21.6
140	240	200	28.8
≥160	300	250	36

^a 对于与给定值不同的运行速度,通过线性插值求出纵向静载荷和吸收的能量。

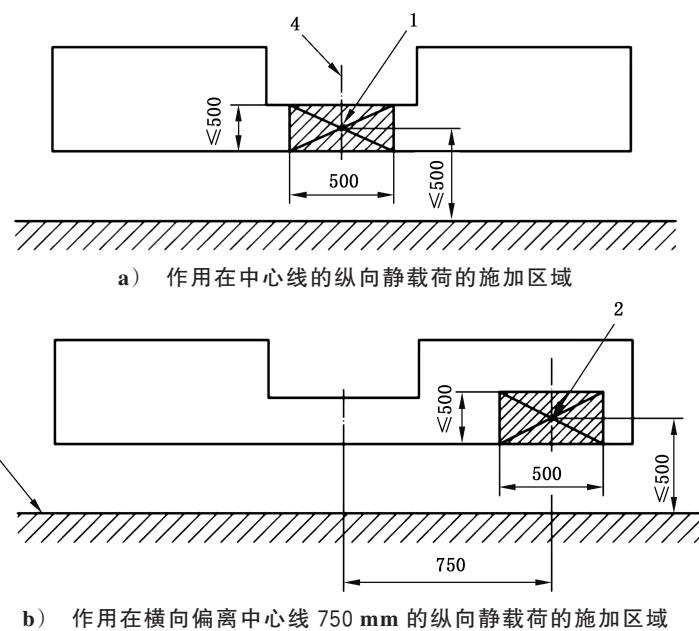
6.6.2 排障器应为连续的结构,其形状应有利于排除轨道障碍物,排障器的挡板剖面应类似“V”字形,其夹角不应大于 160°。在正常运行条件下,排障器应能扫除线路上的低小障碍物,被清扫的障碍物应向两侧推出,降低低小障碍物进入轮轨区域内的风险。

6.6.3 排障器结构应能承受表 6 中单独施加的纵向静载荷,排障器及其在车体上的安装结构不应产生明显永久变形。

注: 明显永久变形是指在规定载荷作用下,构件关键承载结构上发生区域性高于材料屈服极限的变形,其对构件功能会造成一定程度的损伤。明显永久变形不包含与应力集中有关的局部塑性变形,且卸载后不对构件的结构强度产生实质性影响。

6.6.4 排障器上纵向静载荷施加区域的投影宽度为 500 mm,投影高度距排障器下边缘高度不应大于 500 mm,当此高度受到车钩安装或其他设备结构的限制,可适当调整;力作用线应水平,且应经过施加区域的中心,力作用线距轨面高度不应大于 500 mm。排障器上纵向静载荷的施加位置见图 4。

单位为毫米



a) 作用在中心线的纵向静载荷的施加区域

b) 作用在横向偏离中心线 750 mm 的纵向静载荷的施加区域

标引序号说明：

1——中心载荷作用位置；

2——两侧单独作用的侧向载荷作用位置；

3——轨面；

4——车钩占用空间。

图 4 排障器纵向静载荷的施加位置

6.6.5 当发生过载时,排障器的变形方式不应导致其结构分离或其自身成为危险物,可采用在排障器上施加一定的纵向静载荷使其发生变形的方式评估。根据排障器的具体结构确定过载纵向静载荷的数值和施加位置,排障器因变形吸收的能量应达到表 6 中规定的能量值。

示例：

如车辆的最高运行速度为 160 km/h,在排障器的中心施加 360 kN 纵向静载荷时,排障器产生了约 100 mm 的纵向变形量,相当于排障器因变形吸收了约 36 kJ 的能量。此时,如排障器结构未发生撕裂、脱落等结构分离的变形方式,且其变形方式未对车辆运行产生影响,则排障器在过载条件下满足要求。

6.7 扫石器

6.7.1 当车辆运行时,任何情况下排障器下边缘都低于轨面上方 130 mm 时,可不设置扫石器。

6.7.2 在平直轨道上,扫石器下端距轨面的高度在车辆运行期间任何情况下均不应小于 30 mm,且不应大于 130 mm。

6.7.3 扫石器结构应承受表 7 中的纵向静载荷,扫石器及其在轴箱或构架上的安装结构不应产生明显永久变形。

表 7 不同运行速度下扫石器上的静载荷

运行速度 ^a /(km/h)	≤ 40	80	120	≥ 160
纵向静载荷/kN	5	10	15	20

^a 对于与给定值不同的运行速度,通过线性插值求出纵向静载荷。

6.7.4 当扫石器过载时,应确保扫石器不脱落在轨道上或不阻碍走行部,与车轮的任何接触不应造成脱轨风险。

6.7.5 扫石器基础结构应采用金属材料制成,极限伸长率不应低于 6%。

7 耐撞性验证

7.1 通用要求

7.1.1 应选择可有效表达吸能结构在车辆碰撞中动态响应特征的结构形式开展全尺寸实物试验验证。

7.1.2 车辆应采用碰撞数值仿真与碰撞试验相结合的方式,对第 5 章中规定的碰撞场景进行耐撞性验证评估。

7.2 验证步骤

7.2.1 步骤 1:吸能结构的功能验证试验

吸能结构应开展全尺寸实物冲击试验或低速压缩试验验证吸能结构的功能性,并获得吸能结构的力学性能。冲击试验应按照附录 D 的规定,低速压缩试验应按照附录 E 的规定。

7.2.2 步骤 2:数值仿真模型的校准

在步骤 1 测试完成之后,应通过对比试验和仿真的结果校准数值仿真模型,使吸能结构的数值仿真与试验具有良好的一致性,包括吸能结构各阶段的变形顺序和变形模式、最终的变形形态和变形量、力和位移数据。

7.2.3 步骤 3 :碰撞场景下的数值仿真

耐撞性数值仿真验证应构建与碰撞场景定义一致的三维列车碰撞数值仿真模型,该碰撞场景下的三维列车数值仿真模型应包括:

- 能发生弹塑性变形的车体结构模型;
- 按步骤 2 校准后的吸能结构的数值仿真模型。

7.3 简化验证

如车辆耐撞性设计关键特征先前已经实物试验验证过,其修改不会显著改变吸能结构的耐撞性能,新车辆设计方案的耐撞性验证可只执行 7.2.2 和 7.2.3。

7.4 试验验证

7.4.1 吸能结构功能验证试验应再现碰撞响应行为,并便于校准仿真模型。

7.4.2 对能量吸收中涉及的不同类型吸能元件均应进行单独测试,具有相同能量吸收原理的吸能元件可不再进行单独测试。

7.4.3 在由多个部件组成的吸能装置中,能独自完成吸能功能的吸能部件可进行单独测试,对有功能交互影响的吸能部件应在同一试验中测试。

7.4.4 速度敏感的吸能结构、部件和组件应采用冲击试验验证其耐撞性能,速度不敏感的吸能结构可采用低速压缩试验验证其耐撞性能。

7.4.5 吸能结构功能验证试验应采用合适精度等级的测试仪器,应记录试验初期和结束状态样件关键几何尺寸变化。冲击试验应记录包括但不限于撞击加速度、碰撞速度、撞击力、结构变形量和变形模式等。低速压缩试验应记录包括但不限于压缩速度、压溃力、结构变形量和变形模式等。

7.4.6 试验应保证被试件在试验中的吸能量不小于该被试件设计吸能容量的 80%。试验中的吸能量采用较低数值时,应证明采用该数值是合理的,且不应小于被试件设计吸能容量的 50%。

7.4.7 冲击试验应遵循下列原则:

- a) 接近表 2 中的一种碰撞场景;
- b) 便于校准数值仿真模型;
- c) 使被试件发挥出最大吸能能力;
- d) 体现被试件的主要设计意图。

7.4.8 冲击试验应具有足够的冲击能量确保满足以下要求:

- a) 试验中涉及的所有吸能结构及装置均应发挥作用;
- b) 动态试验的冲击速度应至少达到碰撞场景规定速度的 50%,对速度非常敏感的部件,例如黏性阻尼器元件等,应达到实现同等动态响应情形的冲击速度;
- c) 被试件所包含的所有吸能元件均应在试验中进行验证。

7.5 数值仿真验证

7.5.1 数值模型的校正

7.5.1.1 与试验相比,校准后的数值模型应符合下列规定:

- a) 整体变形模式基本相同;
- b) 碰撞阶段的顺序一致;
- c) 仿真获得的能量耗散值与试验值相比误差不大于 10%;
- d) 仿真获得的撞击力-位移曲线特征与相应的试验曲线相比总体趋势一致,特性相同,包括力曲线上的峰值、谷值和均值等曲线特征点。

7.5.1.2 对于单个吸能装置或碰撞系统所处的不同吸能阶段,校准的数值模型应符合下列规定:

- a) 仿真获得的位移与试验值相比,误差不大于 10%;
- b) 由仿真获得的撞击力-位移曲线确定的平均力与试验值相比,误差不大于 10%。

7.5.1.3 对于影响到试验和仿真结果对比误差的因素应予以说明。

7.5.2 列车数值模拟

7.5.2.1 三维列车仿真模型应正确地反映出列车碰撞冲击条件下的各车辆的动态力学响应行为,并展现车体结构动态变形情况,可采用有限单元数值方法进行碰撞场景条件下的列车碰撞数值仿真。

7.5.2.2 三维列车仿真模型中的吸能结构应采用经实物试验校准的建模技术。

7.5.2.3 视列车的动态响应情况,应将编组列车中至少第一辆或前两辆的车辆建为详细的、能发生弹塑性变形的车体结构三维模型,其他车辆可采用集中质量-弹簧系统代表整体性能。

7.5.2.4 应根据碰撞速度对结构材料、缓冲特性的影响,如车钩缓冲器所展现的力学特性取决于速度,部分材料具有应变率敏感的特点。列车碰撞数值模型中,压溃区的结构材料应采用其动态力学参数,其他部分可采用材料的准静态力学参数。

7.5.2.5 列车碰撞数值模型中,可忽略不会影响车体结构变形、生存空间评估的非车体主体承载结构,如车辆内装、贯通道等。

7.5.2.6 在列车碰撞数值模型中,走行部可为包含详细结构的三维有限元模型或质量-弹簧系统简化模型,视列车的动态响应情况,可忽略构架的详细结构,以及轮对、驱动结构等的转动惯量的影响。

7.5.2.7 对于仅以一维吸能缓冲参数建模的结构、装置,如车辆端部的吸能防爬装置,以及车辆间的钩缓装置等,应视其对车辆垂向防爬性和横向抗偏能力的影响,在碰撞场景数值仿真结果中关注垂向和横向的力学响应情况,其结果应在这些结构的承载能力之内,否则应进行详细的结构建模考察。

附录 A
(规范性)
15 t 可变形障碍物

A.1 通则

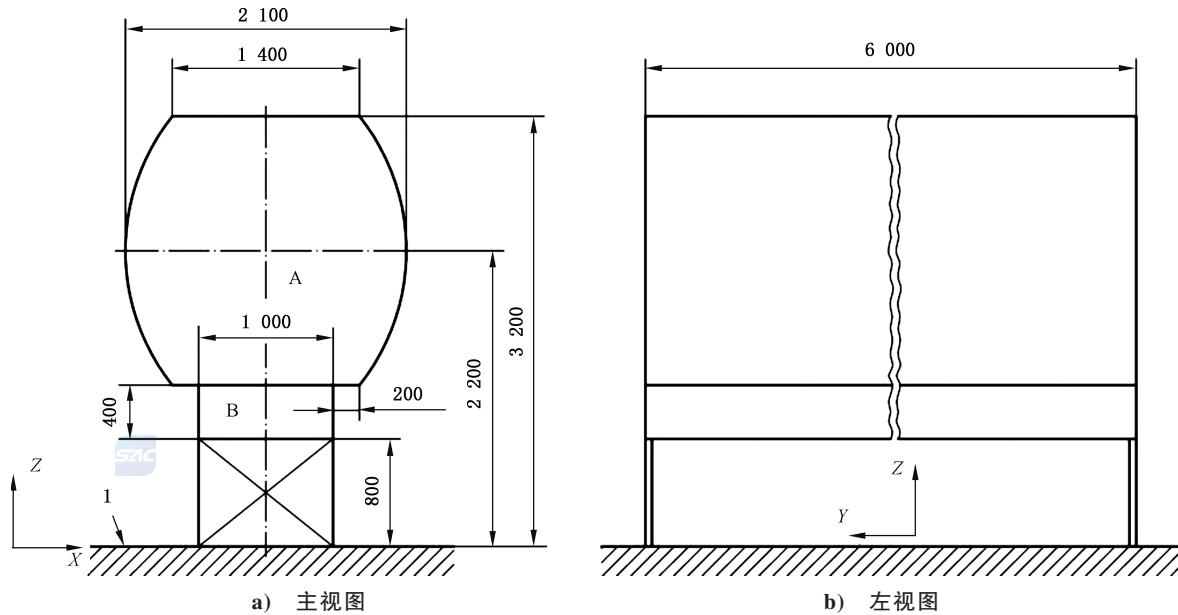
对于车辆在平交道口与大型障碍物发生的碰撞,在碰撞数值仿真中大型障碍物应采用 15 t 可变形障碍物数值模型等效代替。

A.2 可变形障碍物的特性

可变形障碍物符合下列特性:

- 几何形状应符合图 A.1;
- 质量应为 15 t;
- 质心应位于轨面上方 1 750 mm;
- A 部分和 B 部分在数值仿真模型建模时可忽略外层蒙皮;
- 密度和刚度应沿 Y 向连续均匀分布;
- 可变形障碍物应对地面无摩擦;
- 可变形障碍物的表面摩擦需建模模拟时,摩擦系数应取 0.2;
- 在碰撞数值仿真中,车辆不考虑司机室端部车钩;
- 为使数值模型达到性能要求,可改变障碍物数值模型在 Z 向上的密度和在 X 方向上的刚度;
- 可变形障碍物不应施加约束;
- 可依据实际条件对障碍物的特征作调整。

单位为毫米



标引说明:

- A —— 障碍物的上部分;
- B —— 障碍物的下部分;
- 1 —— 轨面。

图 A.1 可变形障碍物的几何形状

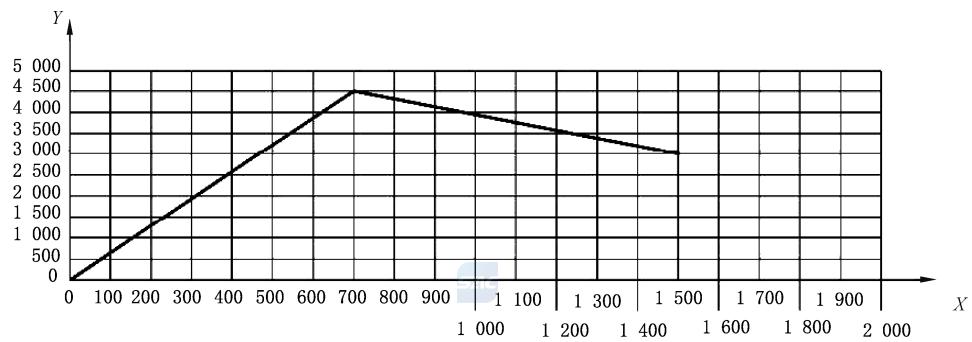
A.3 可变形障碍物特性的校正方法

当 15 t 可变形障碍物进行数值仿真模型校准时,应用一个均质实心球体撞击障碍物的中心,获得球体冲击过程中的纵向力-位移响应曲线,该曲线应与图 A.2 所示的“纵向力-球体的纵向位移”曲线相匹配,并高于图 A.2 中的曲线。

球体应满足以下要求:

- 球体为均质实心球体,直径为 3 000 mm,质心距轨面高为 1 500 mm;
- 球体的质量为 50 t;
- 球体的撞击速度为 30 m/s;
- 球体只有纵向移动自由度(X 方向)。

注:为了便于曲线比对,纵向力-位移响应曲线经 60 Hz 的低通滤波器滤波(接触力其他方向上的分量不做要求)。



标引符号说明:

X——球体的纵向位移,单位为毫米(mm);

Y——纵向力,单位为千牛(kN)。

图 A.2 “纵向力-球体的纵向位移”曲线

附录 B
(规范性)
3 t 刚性障碍物

B.1 通则

B.1.1 对于有轨电车与常见的城市道路交通障碍物之间的碰撞,在碰撞数值仿真中应采用3t刚性障碍物数值模型等效代替,有轨电车与3t刚性障碍物呈45°夹角撞击,如图B.1所示。

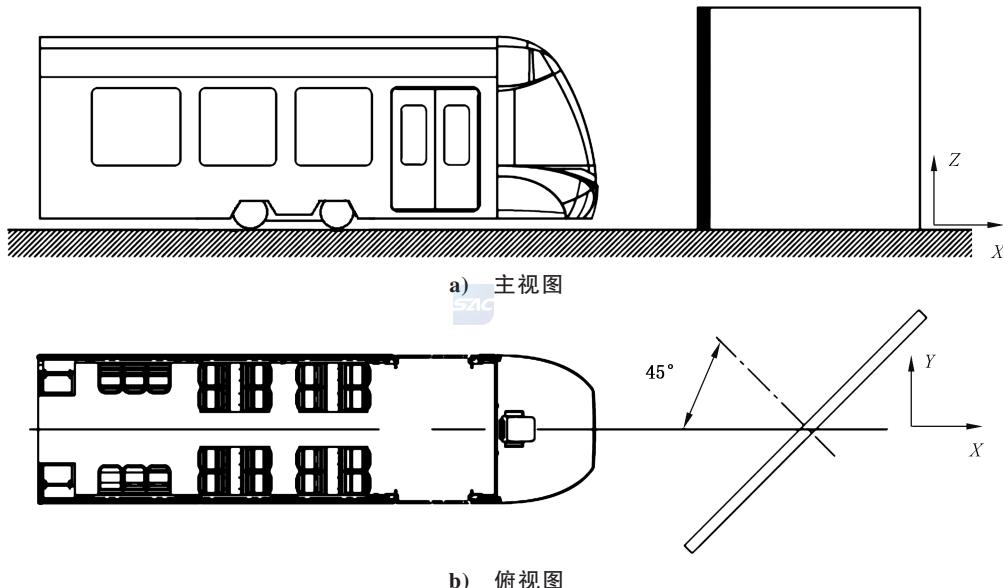


图 B.1 有轨电车有角度撞击障碍物

B.1.2 本碰撞场景仅适用于评估在车辆运行方向上的第一辆车第一个转向架中心之前的车辆前端结构性能。

B.1.3 在碰撞数值仿真中可进行简化模拟,限制车体与转向架连接位置和铰接位置的Y方向自由度,可不考察由此约束条件所产生的力、应力和变形的结果影响。

B.2 3t刚性障碍物的特征

B.2.1 刚性障碍物的质量为3t。

B.2.2 刚性障碍物应能覆盖整个车辆截面在其上的投影。

B.2.3 在数值模拟中,3t刚性障碍物模型仅有X方向和Y方向的位移自由度,没有旋转自由度。

附录 C
(规范性)
7.5 t 可变形障碍物

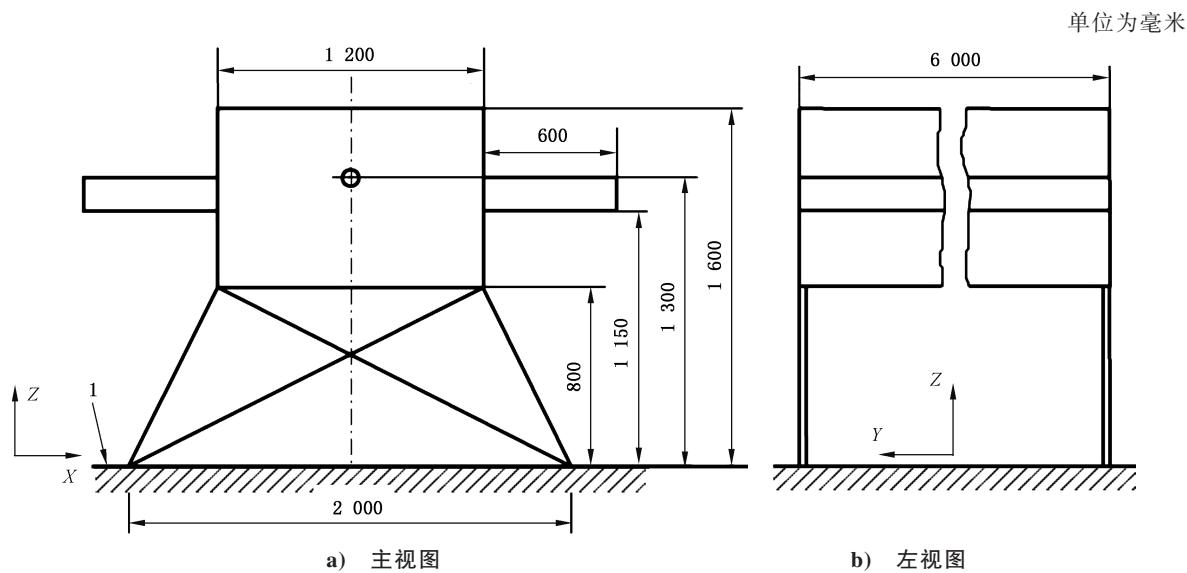
C.1 通则

对于有轨电车与大型城市道路交通障碍物之间的碰撞,在碰撞数值仿真中应采用 7.5 t 可变形障碍物数值模型等效代替。

C.2 7.5 t 可变形障碍物的特性

7.5 t 可变形障碍物符合下列特性:

- 几何形状应符合图 C.1, 角部应为半径 25 mm 圆角;
- 质量应为 7.5 t;
- 质心应位于轨面上方 1 300 mm;
- 数值仿真模型建模时可忽略外层蒙皮;
- 密度和刚度应沿 Y 向连续均匀分布;
- 可变形障碍物应对地面无摩擦;
- 可变形障碍物的表面摩擦需建模模拟时, 摩擦系数应取 0.2;
- 为使数值模型达到性能要求, 可改变障碍物数值模型在 Z 方向上的密度和在 X 方向上的刚度;
- 可变形障碍物不施加约束, 能在所有方向上移动和转动。



标引序号说明:

1——轨面或道路路面。

图 C.1 7.5 t 障碍物几何形状

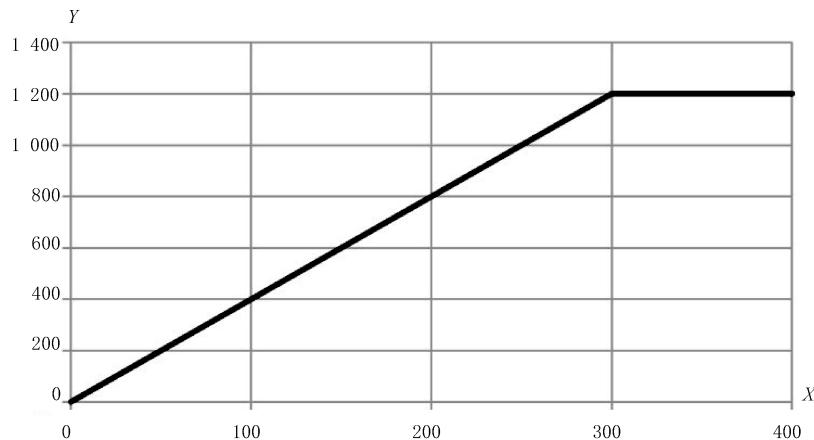
C.3 可变形障碍物特性的校正方法

在数值仿真模型校准时, 可变形障碍物不施加约束, 能在所有方向移动和转动。应采用一个高度方向与可变形障碍物的 Z 轴方向平行的均质圆柱体, 撞击可变形障碍物 Y 轴方向上的中心位置, 可变

形障碍物的 Y 轴方向应垂直于圆柱体高度方向。获得的圆柱体撞击过程中的纵向力-位移响应曲线应与图 C.2 所示的“纵向力-圆柱体的纵向位移”曲线相匹配，并高于图 C.2 中的曲线。

其中，圆柱体应满足如下要求：

- a) 圆柱体为均质实心立式圆柱体，其直径为 2 400 mm，高度为 2 600 mm；
- b) 圆柱体的质量为 40 t；
- c) 初始冲击速度为 40 km/h；
- d) 圆柱体仅有纵向平移自由度，即 X 方向。



标引符号说明：

X——圆柱体的纵向位移，单位为毫米(mm)；

Y——纵向力，单位为千牛(kN)。

图 C.2 “纵向力-圆柱体的纵向位移”曲线

C.4 碰撞场景

应进行如下碰撞场景的数值仿真。

- a) 向右侧横向偏移的正面碰撞，见图 C.3：
 - 1) 障碍物的重心相对于城轨交通车辆 X 轴向右侧的横向偏移为 1 000 mm；
 - 2) 障碍物 Y 轴向与城轨交通车辆 X 轴之间的碰撞角度为 90°；
 - 3) 碰撞速度为 15 km/h。
- b) 向左侧横向偏移的正面碰撞，与图 C.3 类似，但是障碍物向左侧横向偏移：
 - 1) 障碍物重心相对于城轨交通车辆 X 轴向左侧的横向偏移为 1 000 mm；
 - 2) 障碍物 Y 轴向与城轨交通车辆 X 轴向之间的碰撞角度为 90°；
 - 3) 碰撞速度为 15 km/h。



单位为毫米

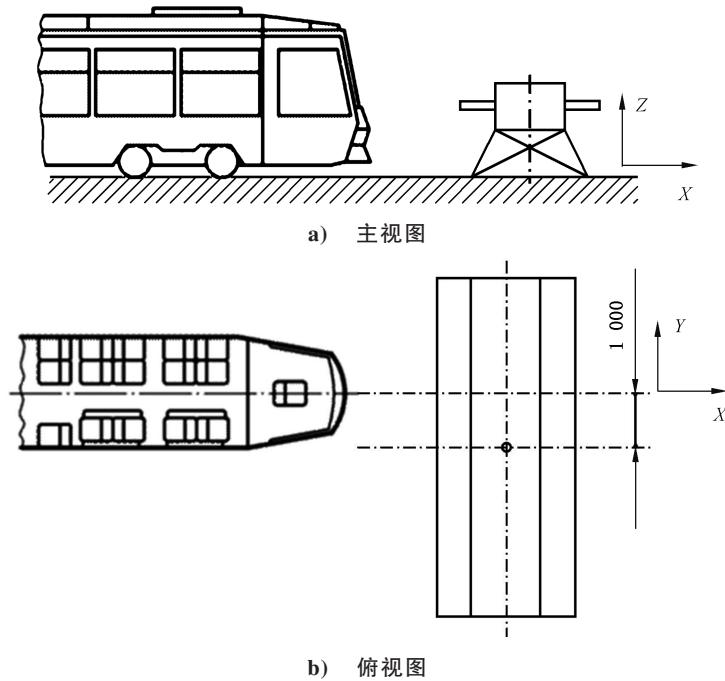


图 C.3 城市轨道交通车辆与 7.5 t 障碍物的正面碰撞(向右侧横向偏移)

C.5 碰撞场景的简化

如车体结构和司机生存空间均关于 $X-Z$ 平面对称, 可仅对其中一种横向偏移的正面碰撞场景进行数值仿真。

C.6 可变形障碍物模型的简化

可使用刚性体代替 7.5 t 可变形障碍物进行模型简化。

C.7 碰撞数值仿真的简化

在碰撞数值仿真中可进行简化模拟, 限制车体与转向架连接位置和铰接位置的 Y 方向自由度, 不必关注由此约束条件所产生的力、应力和变形的结果影响。

附录 D
(规范性)
冲击试验

D.1 试验方法

应在平直轨道线路的一端设置静止的壁障,另一端由驱动装置对试验台车施加动力,使试验台车在轨道线路上携带被试件加速运行,当试验台车运行至试验设定速度后撞击在壁障上。

D.2 试验测试内容

在冲击试验期间应测量以下数据:

- a) 加速度;
- b) 撞击力;
- c) 位移;
- d) 碰撞速度;
- e) 碰撞前后结构几何尺寸的变化,即结构的变形量;
- f) 碰撞期间结构的变形;
- g) 质量。

D.3 基本要求

D.3.1 全部测试设备应在校验的有效期内使用。

D.3.2 试验场地应符合测试设备的正常工作条件要求。试验场地附近应避免强磁场、强噪声以及振动等干扰,或以不影响测试精度为原则做相应技术性处理。发生碰撞的试验区域应设置防护装置,应制定防护措施,避免碰撞过程中对试验人员以及测试设备造成损伤。

D.3.3 当采用可移动式壁障开展冲击试验时,壁障的后方留应有足够长度的线路,满足撞击试验后可移动式壁障和试验台车实现运动停止的位移需求。

D.3.4 冲击试验前,应基于冲击试验系统情况进行被试件的数值仿真分析,防止被试件在冲击试验期间发生整体屈曲或其他意外事故。

D.3.5 被试件应牢固安装在试验台车上,确保冲击试验过程中被试件与台车保持可靠的位置关系。

D.3.6 试验台车和壁障应具有足够的结构强度与刚度。在冲击试验中,试验台车和壁障仅发生有限的变形,塑性变形的能量可以被忽略。

D.3.7 冲击试验前,应进行安装被试件和配重后的试验台车的称重测试。

D.3.8 获得位移、撞击力、加速度数据的测试应在同一次试验中进行,宜采用同步触发模式,触发方式应可靠。

D.4 数据测试

D.4.1 加速度

D.4.1.1 应采用加速度传感器测试碰撞过程中的冲击加速度。

D.4.1.2 加速度传感器应布置在被试件或试验台车的非破坏区域。试验台车上应布置不少于5个加速度测点,加速度测点布局和测试方向应反映出台车的整体动态响应情况。至少有1个加速度传感器应布置在台车的惯性质量中心位置或接近惯性质量中心的位置。

D.4.1.3 应使用高频性能较好的加速度传感器,加速度传感器性能应符合如下要求:

- a) 加速度传感器的自振频率为测量频率上限的 3 倍以上;
- b) 加速度传感器采样频率不低于 10 kHz。

D.4.2 撞击力

D.4.2.1 可采用测力传感器测试碰撞过程中的撞击力,也可通过测量被试件上或试验台车的加速度间接获得撞击力。

D.4.2.2 当采用加速度传感器间接测试撞击力时,加速度测点应布置在被试件或试验台车的仅发生弹性变形的大刚度区域且能呈现撞击力响应的位置,测得冲击加速度后按牛顿第二定律计算撞击力。

D.4.2.3 当采用测力传感器直接测试撞击力时,测力系统应能正确反馈出被试件的受压力学特征。

D.4.2.4 测力传感器数量及量程应根据碰撞数值仿真得到的被试件最大撞击力确定,每个测力传感器量程应预留 20% 冗余。

D.4.2.5 测力传感器应满足如下要求:

- a) 线性(FSO):在±0.5% 范围内;
- b) 静态标定误差:小于或等于 1.0%。

D.4.3 位移

D.4.3.1 应采用高速相机或其他方法测试位移,如采用拉线式位移传感器、光栅等。

D.4.3.2 应合理布置高速相机的机位和试验台车、壁障以及被试件的标识点,使各个高速相机都能够清晰拍摄到位移分析需要的场景图像和标识点。

D.4.3.3 应同时使用不少于 2 台高速相机对被试件在空间 3 个方向的位移进行测试。

D.4.3.4 高速相机应满足如下要求:

- a) 拍摄速率:大于或等于 1 000 f/s;
- b) 位移标定误差小于 1%。

D.4.3.5 为辅助高速相机拍摄,试验场地应具有足够的光照条件,平均照度不应小于 40 000 lx。当试验场地位于室内时,可采用辅助光源系统提供与太阳光类似的效果,应达到色温约 5 500 K,高显色性、高均匀性光照条件。当试验场地位于室外时,高速相机拍摄区域应具有均匀的光照条件,避免影子干扰或背光拍摄;当拍摄区域内明暗对比强烈影响图像数据处理时,应采用补光方式调节光照均匀性。

D.4.4 碰撞速度

D.4.4.1 应采用激光、光栅等测速仪测试碰撞前后的速度。

D.4.4.2 测速仪应安装在被试件接近壁障 1 m 以内的位置测试台车的碰撞速度。

D.4.4.3 测速仪的精度应在±0.5 km/h 以内。

D.4.5 变形量

应采用标尺等长度计量工具测量被试件碰撞前后的几何尺寸。

D.4.6 碰撞期间结构的变形

应采用高速相机捕捉的典型图像反映被试件在碰撞期间结构的变形情况。

D.4.7 质量

D.4.7.1 应采用称重设备对被试件和试验台车进行称重。

D.4.7.2 称重设备的测试精度应在±5% 范围内。

D.5 试验数据处理

D.5.1 试验数据的筛选

应排除因测试设备失灵、工作不正常、信号丢失等原因而出现的异常数据。

D.5.2 加速度数据处理

D.5.2.1 加速度测试数据处理的对象应包括加速度峰值、作用时间、平均加速度等。

D.5.2.2 加速度测试数据的滤波方法应满足 ISO 6487 的要求,宜采用 60 Hz 的低通滤波器滤波。

D.5.3 撞击力数据处理



D.5.3.1 撞击力测试数据处理的对象应包括撞击力峰值、作用时间、平均撞击力等。

D.5.3.2 撞击力测试数据应采用 180 Hz 的低通滤波器滤波。

D.5.3.3 当测力系统包括多个测力传感器时,应对各测力传感器的数据进行合成处理。

D.5.4 位移数据处理

D.5.4.1 应采用图像序列运动分析软件对高速相机获得图像数据进行位移数据处理,绘制出被试结构或试验台车标识点的位移-时间曲线。

D.5.4.2 图像序列数据处理的精度不宜低于 1 mm。

附录 E
(规范性)
低速压缩试验

E.1 试验方法

应将被试件安装在压缩试验机的工作平台或辅助工装上,压缩试验机的作动头应沿被试件压溃吸能的方向施加匀速的压缩位移。

E.2 试验测试内容

在低速压缩试验期间应测量以下数据:

- a) 压缩力;
- b) 位移;
- c) 压缩前后结构几何尺寸的变化,即结构的变形量;
- d) 压缩期间结构的变形。

E.3 基本要求

E.3.1 全部测试设备应在校验的有效期内使用。

E.3.2 位移、压缩力的测试应同步进行。

E.3.3 压缩量不应小于被试件有效压溃行程的 90%。

E.3.4 压缩速度不应大于 5 mm/s。

E.4 数据测试

E.4.1 压缩力

E.4.1.1 测力系统应能测试被试件整个截面上的压缩力。

E.4.1.2 测力系统应满足如下要求:

- a) 测量范围:压缩力峰值不超出测量量程的 90%;
- b) 线性(FSO):在±0.5% 范围内;
- c) 静态标定误差:小于或等于 1.0%。

E.4.2 位移

E.4.2.1 位移测试应稳定、可靠、连续,可采用拉线位移传感器、光栅等方式测量位移。

E.4.2.2 应采用摄像机记录被试件压溃变形的整个过程。

E.4.2.3 位移测试误差不应超过 1.0%。

E.4.3 变形量

应采用标尺等长度计量工具测量被试件压溃变形前后的几何尺寸。

E.4.4 压缩期间结构的变形

应采用相机、摄像机等设备拍摄典型图像反映试验期间结构的变形情况。

E.5 试验数据处理

E.5.1 试验数据的筛选

应排除因测试设备失灵、工作不正常、信号丢失等原因而出现的异常数据。

E.5.2 位移数据处理

应进行数值滤波清除高频瞬变,可根据压缩力数据判断合理的位移起始点。

E.5.3 压缩力数据处理

E.5.3.1 压缩力测试数据处理的对象应包括峰值、作用时间、平均压缩力等。

E.5.3.2 压缩力测试数据宜采用 180 Hz 的低通滤波器滤波。

E.5.3.3 当测力系统包括多个测力传感器时,应对各测力传感器的数据进行合成处理。

参 考 文 献

- [1] GB 146.1—2020 标准轨距铁路限界 第1部分:机车车辆限界
 - [2] GB 146.2—2020 标准轨距铁路限界 第2部分:建筑限界
 - [3] GB/T 10000—2023 中国成年人人体尺寸
 - [4] GB/T 12985—1991 在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则
 - [5] GB/T 37532—2019 城市轨道交通市域快线 120 km/h~160 km/h 车辆通用技术条件
 - [6] GB 50157—2013 地铁设计规范
 - [7] CJJ/T 114—2007 城市公共交通分类标准
 - [8] TB/T 3491—2017 电动车组司机室设计规范
 - [9] TB/T 3501—2018 机车车辆碰撞试验测试方法
 - [10] EN 15227 铁路应用 轨道车辆的耐撞性要求(Rail applications—Crashworthiness requirements for rail vehicles)
-



