

# 城际动车组车钩方案及碰撞能量吸收配置

鲁青君, 郑伟

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:** 文章介绍了城际动车组车钩缓冲装置的特点, 并分别对前端全自动车钩缓冲装置、中间半永久车钩缓冲装置的主要结构型式、主要参数、作用原理, 以及车钩的吸能能力等进行了详细说明; 通过建立一维多体动力学模型, 对列车分别以 5 km/h、15 km/h、25 km/h 速度进行撞击时各车钩缓冲装置的车钩力等关键参数进行了分析计算, 结果满足设计要求。

**关键词:** 城际动车组; 车钩; 气液缓冲器; 后置压溃管; 吸能

## Coupler Draft Gear of intercity EMU and Collision Energy Absorption Configuration

Lu Qingjun, Zheng Wei

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** This paper introduces the characteristics of intercity EMU concept, and separately to the automatic couplers, semipermanent coupler main structure, main parameters, and the energy absorption ability of the coupler are described. Based on the one-dimensional dynamic model, the coupler force and other key parameters of each coupler buffer device were analyzed and calculated when the train impacted at 5 km/h, 15 km/h and 25 km/h respectively. The results meet the design requirements.

**Keywords:** intercity EMU; coupler; gas-liquid buffer; rear tube; energy absorption

### 0 引言

根据目前轨道交通的发展趋势, 为满足区域经济快速发展, 对城际轨道交通车辆的需求日益增加, 城际动车组逐渐成为大家研究的热点。城际动车组可实现与干线铁路的互联互通, 既能在城际线路上运营, 又能在客运专线上运营。满足区域经济快速发展和城市群崛起对城际轨道交通的要求, 满足快起快停、快速乘降、载客量大、城间城郊运营的特点。

城际动车组采用 6 辆编组, 设计运营速度为 140 km/h, 最高试验速度为 160 km/h。列车两端采用全自动车钩缓冲装置, 列车内部车辆之间使用半永久车钩缓冲装置。全自动车钩缓冲装置可以实现列车之间机械、风路和电气信号的自动连接、自动分解和手动分解; 半永久车钩缓冲装置在列车内部各个车辆之间用连接卡环连接成对使用, 用于列车内部各个车辆之间的机械的手动连接和手动分解。车钩配置如下:

配置: +TC—MP—MP—MP—MP—TC+ (+: 全自动车钩缓冲装置; -: 半永久车钩缓冲装置)

除了需要满足列车正常的功能之外, 城际动车组还设置了被动安全防护系统。被动安全防护系统主要由车钩缓冲器、压溃管和位于车端的防爬器组成, 列车在多种速度

条件下撞击而对车体结构不产生损坏, 并通过建立一维多体动力学模型对车钩缓冲装置的车钩力等关键参数进行了分析计算。

### 1 全自动车钩缓冲装置

全自动车钩缓冲装置安装在列车的两端, 主要用于列车之间的连挂, 如动车组重联、动车组救援、机车救援和回送等。主要由连挂系统、缓冲系统、安装吊挂系统、压溃装置、电气连接器等组成。

连挂系统采用了动车组普遍使用的 10 型机械车钩。缓冲系统采用气液缓冲器、环簧和橡胶轴承, 拉伸方向的缓冲通过环簧和橡胶轴承来实现, 压缩方向的缓冲通过气液缓冲器和橡胶轴承来实现, 可以满足列车运行过程中能量吸收功能; 安装吊挂系统采用橡胶支撑和机械对中方式, 可以提供车钩缓冲装置的水平支撑和机械对中, 同时保证车钩缓冲装置的转动性; 车钩后部的压溃装置可以在列车发生碰撞等突发事件时, 吸收冲击能量; 电气连接器用于实现列车之间的电气信号的连接。

#### 1.1 连挂系统

连挂系统用于实现车辆间的机械和风路的连接。分别由机械车钩、风管连接器等组成。

该机械车钩为欧洲 10 型车钩, 用于实现车钩之间的机械和风路的连挂分解。

10 型车钩上部安装有列车管连接器, 下部安装有总风管连接器、解钩风管连接器和连挂导杆, 该连挂导杆可以增加车钩可连挂的范围。主要包括连挂杆、钩舌杆、枢轴、

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-10-16。

作者简介: 鲁青君(1986-), 女, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事城轨车、城际车车体结构, 车钩缓冲装置等方向的研究。

拉伸弹簧、钩体、气阀等部件, 连挂面设有导向作用的凸锥、凹锥和导向杆。车辆连挂时, 车钩相互接近, 在凸锥、凹锥和导向杆的导向作用下相互进入对面车钩的凹锥内, 连挂杆、钩舌杆以枢轴为转轴发生旋转完成连挂。车钩在牵引状态, 车钩的连挂杆分别钩住对方车钩的连挂杆, 这样两钩连挂杆和两个连挂杆形成一个平行四边形, 由于该平行四边形两对边力大小相同, 产生的转动力矩方向相反, 因此该平行四边形机构总能保持平衡。通过这个稳定的四边形结构, 两个连挂杆可以将列车间的纵向牵引力传递到车钩的连挂杆, 并通过连挂杆的中心轴传递到钩体上。当车钩承受受压荷载时, 平行四边形结构不受力, 车钩间的压荷载通过车钩的连挂面顶靠进行传递<sup>[1-5]</sup>。

解钩气缸安装在机械车钩右侧, 主要在车钩进行自动解钩时使用。进行解钩操作时, 电磁阀得电, 解钩气缸充气, 气缸活塞在空气压力作用下向前伸出, 同时推动钩舌做顺时针旋转, 进行解钩<sup>[2]</sup>。

10 型车钩在解钩时, 司机可以远程操作向解钩气缸充气, 解钩气缸直接推动车钩内机构旋转实现解钩; 同时也可以人工拉动车钩侧面的解钩手柄实现解钩。

总风管连接器 (MRP) 用于实现两列车之间的总风连接, 解钩风管连接器 (UP) 可以实现两车钩之间解钩气路的连通, 这两个连接器分别安装于车钩连挂面下部。这两种连接器都具有自动开闭的机构。

列车管连接器 (BP 阀) 主要用于列车被普通机客车连挂牵引时提供制动信号。同时, 在列车运行过程中, 如果车钩出现意外分离, 该阀可以保持打开状态, 列车管中的空气压力会被迅速释放, 实现列车的停车制动。

## 1.2 压溃装置和缓冲系统

为满足高速碰撞时的能量吸收要求, 全自动车钩缓冲装置设有后安装的膨胀式压溃管, 其结构参见图 3。膨胀式压溃管具有较大的能量吸收能力, 当列车在运行或连挂过程中发生碰撞, 压载荷低于压溃管触发力时, 压溃管吸能元件不发生动作, 所有的冲击能量将由缓冲器来吸收; 压载荷大于设定值时, 压溃管就发生作用产生塑性变形, 最大限度吸收冲击能量, 以达到保证车辆安全和保护车辆设备目的。

车钩缓冲装置在牵引工况时, 牵引载荷会通过缓冲系统内部的气液缓冲器壳体压缩环簧实现传递, 变形元件不受到影响; 在压缩工况时, 车钩缓冲装置压载荷远低于压溃装置设定力值时, 变形元件不发生动作, 压缩能量由气液缓冲器来吸收, 当压缩载荷大于触发力值时, 压力通过气液缓冲器作用在气液缓冲器壳体上, 压溃管的膨胀元件发生作用, 压溃管发生变形, 同时吸收能量。

## 1.3 安装吊挂系统

安装吊挂系统由安装座、钩尾销、对中机构、支撑机构等组成。其作用是保证车钩缓冲装置能够在水平面和垂直面内一定范围内灵活转动, 并具有垂直面内自支撑功能

和水平面一定范围内自动对中的功能。

车钩缓冲装置的支撑与钩高调整是由支撑机构实现的。当需要调整钩高时, 先将支架下面锁紧螺母松开。如果车钩钩头下垂, 顺时针方向拧紧两侧螺栓相同的圈数, 直至车钩达到垂直对中要求, 重新拧紧螺母。如果车钩钩头上翘, 逆时针方向松动螺栓相同的圈数, 直至车钩达到垂直对中要求, 实现钩高的调整。当自动车钩在横向外力作用下将偏离纵向中心线, 外力撤销后通过对中机构中碟簧力的作用驱使自动车钩回复到纵向中心线位置, 从而实现车钩的对中。

## 1.4 连接卡环

连接卡环用于连接缓冲器和连挂系统, 当缓冲器和连挂系统的圆形法兰对齐后, 分别放入上下两半卡环, 然后将卡环螺栓螺母拧紧即实现连接。

## 1.5 电气连接器

电气连接器用于实现列车之间的电气信号的连接, 当机械车钩连挂完成后, 电气连接器自动推出实现电气连挂, 当机械车钩分解后, 电气连接器被自动推回实现电气分解。

该电气连接器的分左右两侧安装在机械车钩的上方, 由气缸推动伸出和回缩。

电气连接器气缸的推出和回缩由一套气路控制系统实现, 其原理如图 1 所示。

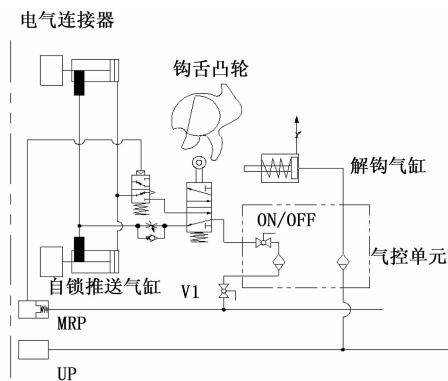


图 1 控制系统原理图

待连挂位时, 总风通过 V1 阀进入气控单元, 通过 ON/OFF 阀和二位五通阀, 再通过单向节流阀进入推送气缸前端, 电气连接器保持缩回。

连挂位时, 钩舌转动带动凸轮驱动二位五通阀换向, 总风通过二位五通阀和气控阀 V2 进入推送气缸后端, 电气连接器伸出, 实现连挂。调节单向节流阀可以调节电气连接器的伸出速度, 有效保护电气连接器。

解钩时, UC (解钩) 风压进入气控单元, 经过滤器后进入解钩气缸, 使钩舌转动带动钩舌凸轮驱动二位五通阀换向, 总风进入推送气缸前端, 电气连接器缩回, 实现分离。

如果车钩未进行正常连挂解钩操作, 而只是人为敲击车钩连挂触发器, 使车钩内部结构旋转至连挂位置, 系统能够识别出这种非连挂操作, 电气连接器不会被推出, 其

原理在于,未连挂状态下 MRP 阀前端与大气相通,不能推动 V2 换向,在此情况下,电气连接器推送气缸不充风,且与大气相连通,因此电气连接器不会推出,实现保护电气连接器的功能。

### 1.6 主要技术参数

纵向拉伸屈服强度: 1000 kN;

纵向压缩屈服强度: 1500 kN;

车钩总长: 1500 mm;

车钩回转中心距离车钩安装座底面距离: 140 mm;

最大水平转角:  $\pm 35^\circ$ ;

最大主动对中角:  $\pm 7^\circ$ ;

最大垂直转角:  $\pm 6^\circ$ 。

气液缓冲器: 行程为 100 mm, 初压力为 70 kN, 最大动态阻抗力为 1000 kN。

环簧: 行程为 30 mm, 初压力为 85 kN, 最大阻抗力为 600 kN。

压溃装置: 工作力为 1100 kN, 行程为 600 mm。

## 2 半永久车钩缓冲装置

半永久车钩缓冲装置由半永久车钩 A 和半永久车钩 B 组成,两种车钩成对使用。两车钩仅连挂面不同,两车钩之间采用连接卡环进行手工连接和分解,该连接卡环与头车全动车钩连接卡环完全相同。半永久车钩包括连接装置、压溃管和安装吊挂装置。

### 2.1 压溃管

为满足冲击车辆冲击能量吸收要求,带压溃管车钩配置了膨胀式压溃管,行程为 300 mm。列车在运行或者连挂过程中,车钩缓冲装置受到的纵向压载荷大于设定值时,压溃装置开始发生作用,吸收冲击能量,达到保护人身和车辆设备安全目的<sup>[6-7]</sup>。

### 2.2 安装吊挂装置

安装吊挂装置用于将车钩连接安装到车体上,该装置上的环形橡胶元件可以吸收连挂及运用过程的冲击。同时该装置可以提供垂直方向和扭转方向的旋转功能。

半永久车钩的垂向支撑结构为临时性的刚性支撑。车钩在装车之后、实现连挂之前,需要垂向支撑以便将贯通道保持在水平位置,此时应手动将支撑螺栓拧紧到位,使螺栓底部与安装板相接触,从而保证垂向的支撑刚度。连挂编组完成后,需要将支撑螺栓拧松到自由位置并将防松螺母拧紧,以保证半永久车钩在水平和垂直方向内的自由摆动,保持车钩的转动灵活性。

### 2.3 半永久车钩主要参数

纵向拉伸屈服强度: 1000 kN;

纵向压缩屈服强度: 1500 kN;

车钩总长: 3000 mm;

最大水平转角:  $\pm 15^\circ$

最大垂直转角:  $\pm 6^\circ$

环形橡胶吸能: 行程为 40 mm, 最大阻抗力为 1000 kN;

压溃管: 行程为 300 mm; 触发力为 1000 kN。

## 3 能量吸收

为了验证城际动车组概念车车钩缓冲装置技术方案是否满足顶层指标的要求,需要对动车组分别以一定速度进行撞击工况下的车钩力、缓冲器行程、压溃管行程等参数进行仿真分析。

### 3.1 计算模型

动车组在碰撞过程中始终沿着轨道方向运行,所以我们将该工况视为一维纵向动力学问题。我们把列车看作一个含有质量、弹性及阻尼的多刚体系统,每辆车简化为单个质点,该质点只有一个沿着纵向的自由度。以线路上的一点作固定纵向坐标系原点,列车从头至尾各辆车的位置、速度、加速度可分别用  $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i (i = 1, \dots, n)$  表示,列车纵向动力学微分方程表示如下:

$$m_i \ddot{x}_i = f_{ti} + f_{ci-1} - f_{ci} - f_{bi} - f_{dbi} - f_{\omega i}$$

式中,  $m_i$  为第  $i$  车的质量;  $f_{ti}$  为第  $i$  车的牵引力,作用于动车,切制动时该项为 0;  $f_{ci-1}, f_{ci}$  为第  $i$  车的前、后车钩力,特性曲线在落锤试验结果基础上给出;  $f_{bi}$  为第  $i$  车的电控制动力,作用于拖车,仅制动时有该项;  $f_{dbi}$  为第  $i$  车的电制动动力,作用于动车,仅在制动时有该项;  $f_{\omega i}$  为第  $i$  车的运行阻力。

车辆运行阻力一般用下列公式计算:

$$f_{\omega i} = m_i \cdot \omega_i$$

式中,  $f_{\omega i}$  为第  $i$  辆车的运行阻力;  $\omega_i$  为第  $i$  辆车的单位质量阻力,由下列各项组成:

$$\omega_i = \omega_{oi} + \omega_{si} + \omega_{ri}$$

其中:  $\omega_{oi}$  为第  $i$  辆车的单位基本阻力;  $\omega_{si}$  为第  $i$  辆车的单位坡道阻力;  $\omega_{ri}$  为第  $i$  辆车的单位曲线阻力。

列出动车组中每辆车的动力学方程,运用数值方法便可对列车的纵向运动规律进行研究。列车连挂撞击模型如图 2 所示。

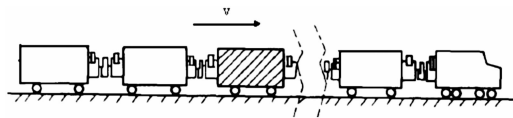


图 2 列车撞击模型图

### 3.2 计算条件及工况

#### 3.2.1 计算条件

列车 AW0 时重量  $\leq 270$  t

列车 AW2 时重量 (AW0+乘客重量)  $\geq 1332$  人/列

乘客人均重量按 60 kg/人计算,计算用质量系数取 90%,停放制动系数取 0.15。

缓冲器性能曲线见图 3。

#### 3.2.2 计算工况

一列 AW0 列车以 5 km/h 速度撞击停放在轨道上的相同的列车,此时缓冲器可以吸收全部撞击能量,压溃管不触发,车体结构无任何损坏;

一列 AW2 列车以 5 km/h 速度撞击停放在轨道上的相同的列车,此时缓冲器可以吸收全部撞击能量,压溃管不

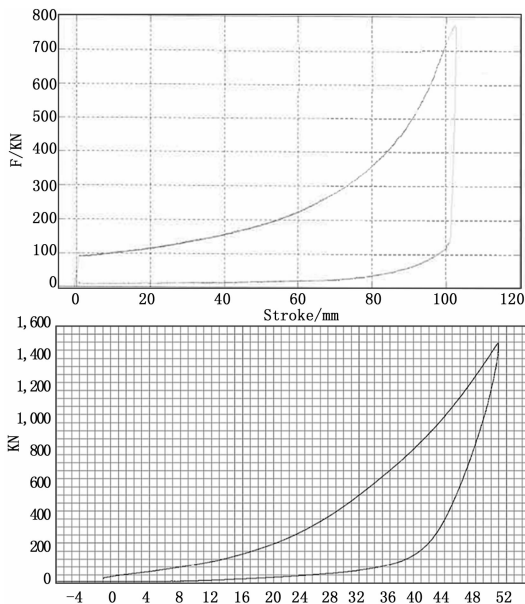


图 3 缓冲器性能曲线

触发, 车体结构无任何损坏;

—列 AW0 列车以 15 km/h 速度撞击停放在轨道上的相同的列车; 此时缓冲器和压溃管可以吸收全部撞击能量, 车体结构无任何损坏;

—列 AW0 列车以 25 km/h 速度撞击停放在轨道上的相同的列车, 此时缓冲器、压溃管与防爬器可以吸收全部能量, 车体结构无损坏。

### 3.3 计算结果

#### 3.3.1 AW0 连挂冲击速度为 5 km/h

图 4 是一列 AW0 的 6 辆编组的地铁列车以 5 km/h 速度与另一列静止并处于停放制动状态的 AW0 的 6 辆编组的地铁列车冲击后的编组。

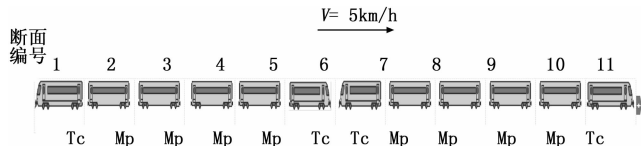


图 4 冲击速度为 5 km/h 时连挂后编组

对冲击过程进行仿真, 图 5 是各断面车钩力的时间历程曲线, 各断面处缓冲器的位移与车钩力的关系曲线如图 6 所示。

从计算结果可以看出, 最大车钩力发生在直接冲击的连挂断面上, 车钩压缩力峰值为 507 kN, 缓冲器没有走完行程, 最大撞击力小于压溃管的触发力。所有断面车钩力和缓冲器行程见表 1。

通过分析断面的缓冲器阻力与行程曲线图, 当列车以 5 km/h 的速度撞击时, 最大断面的车钩力未超过 600 kN, 行程未超过 70 mm, 表明该断面间的车钩力未达到压溃管的触发力, 压溃管没有发生变形, 缓冲器也未压死。压溃管的行程为 0, 没有触发变形, 缓冲器吸收了全部

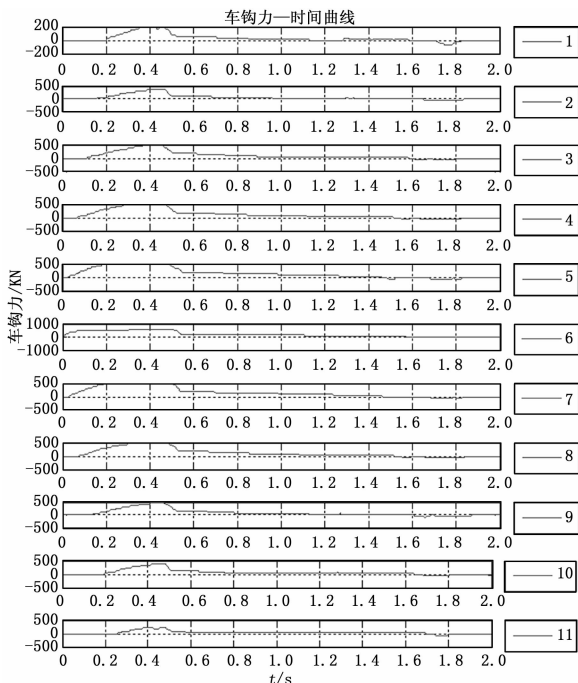


图 5 两列 AW0 列车以 5 km/h 撞击时车钩力的时间历程

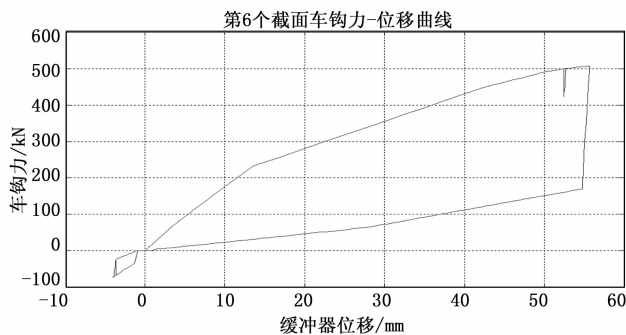
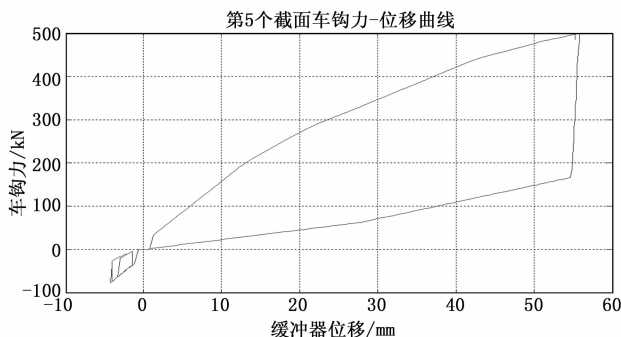


图 6 两列 AW0 列车以 5 km/h 撞击时冲击断面缓冲器阻力—行程曲线

表 1 两列 AW0 列车以 5 km/h 撞击时, 各断面最大车钩力、缓冲器行程

断面	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最大车钩力/kN	198	385	481	500	500	507	489	477	461	385	214
缓冲器行程/mm	12.9	35.2	51.2	55.9	55.9	55.8	53.3	50.3	47.1	35.2	14.4
断面吸收能量/kJ	1.0	6.0	11.4	13.2	13.2	13.7	12.2	11.1	9.9	6.0	1.2

的冲击载荷,车体结构受力没有超过设计载荷,未发生损坏。

### 3.3.2 AW2 连挂冲击速度为 5 km/h

一列 AW2 的 6 辆编组的地铁列车以 5 km/h 速度与另一列静止并处于停放制动状态的 AW2 的 6 辆编组的地铁列车冲击。

从计算结果可以看出,最大车钩力发生在直接冲击的连挂断面上,车钩压缩力峰值为 548 kN,中间断面缓冲器没有走完行程,最大撞击力小于压溃管的触发力。所有断面车钩力和缓冲器行程见表 2。

表 2 两列 AW2 列车以 5 km/h 撞击时,各断面最大车钩力、缓冲器行程

断面	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最大车钩力/kN	204	404	506	535	536	548	527	516	491	407	220
缓冲器行程/mm	13.4	37.8	57.5	66.3	66.8	67.4	63.0	60.1	53.8	38.3	15.0
断面吸收能量/kJ	1.0	6.6	13.7	17.4	17.6	19.0	16.0	14.7	12.2	6.8	1.2

通过分析表 2 可知,当列车以 5 km/h 的速度撞击时,最大断面的车钩力未超过 600 kN,行程未超过 70 mm,表明该断面间的车钩力未达到压溃管的触发力,压溃管没有发生变形,缓冲器也未压死。压溃管的行程为 0,没有触发变形,缓冲器吸收了全部的冲击载荷,车体结构受力没有超过设计载荷,未发生损坏。

### 3.3.3 AW0 列车连挂冲击速度为 15 km/h

一列 6 辆编组的 AW0 地铁列车以 15 km/h 速度与另一列静止并处于停放制动状态的 6 辆编组的 AW0 地铁列车冲击。

从计算结果中可以看出,最大车钩力发生在直接冲击的连挂断面上,车钩压缩力峰值为 1100 kN,冲击断面压溃管行程 281.2 mm,单侧压溃管行程为 140.6 mm。所有断面车钩力和缓冲器行程见表 3。

通过分析断面的缓冲器阻抗力与行程曲线图,当列车以 15 km/h 的速度撞击时,位于列车的第 1 和第 11 断面的车钩力较小,未超过 600 kN,行程未超过 70 mm,表明该断面间的车钩力未达到压溃管的触发力,压溃管没有发生变形,缓冲器也未压死。在第 2 至第 10 断面的车钩力较大,

表 3 两列 AW0 列车以 15 km/h 撞击时,各断面最大车钩力、缓冲器行程及压溃管行程

断面	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最大车钩力/kN	535	1000	1000	1000	1000	1100	1000	1000	1000	1000	545
缓冲器行程/mm	67.2	73	73	73	73	68	73	73	73	73	69.5
压溃管行程/mm	0	25.9	34.1	35.0	240.3	140.6	212.9	32.6	31.0	25.3	0
断面吸收能量/kJ	17.9	43.8	51.6	54.2	258.2	174.3	231.3	51.3	49.8	43.2	18.8

均超过 1000 kN,行程也超过或者接近 100 mm,表明该断面间的车钩力已达到压溃管的触发力,压溃管发生了变形,吸收了冲击功,车钩力处于 1000 kN 的行程越大,压溃管变形程度越大,吸收的能量越大。压溃管的变形程度由端部向中部逐步增大。压溃管的行程未超过设计行程,还留有一定的裕量,吸能装置吸收了全部的冲击载荷,车体结构受力没有超过设计载荷,未发生损坏。

### 3.3.4 AW0 列车连挂冲击速度为 25 km/h

一列 4 辆编组的 AW0 地铁列车以 25 km/h 速度与另一列静止并处于停放制动状态的 4 辆编组的 AW0 地铁列车冲击。

对冲击过程进行仿真,图 7 是各断面车钩力的时间历程曲线,各断面处缓冲器的位移与车钩力的关系曲线如图 8 所示。

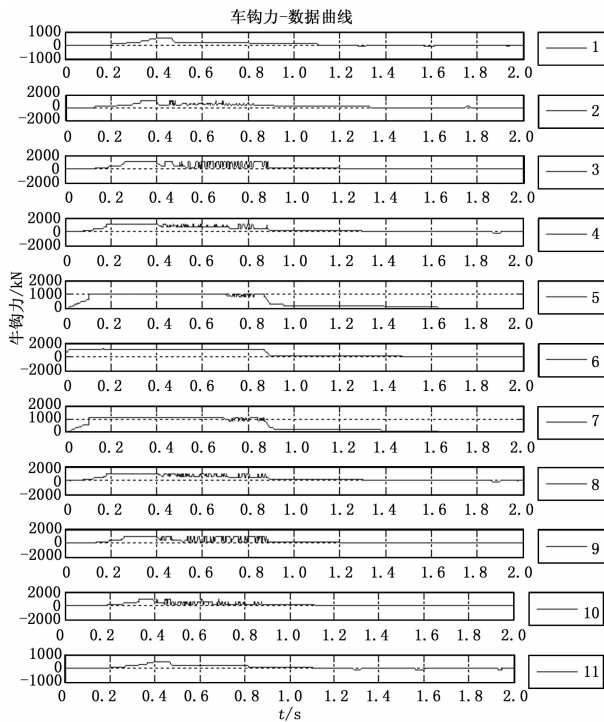


图 7 两列 AW0 列车以 25 km/h 撞击时车钩力的时间历程

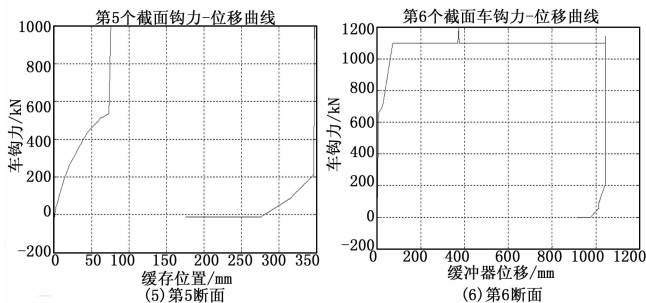


图 8 两列 AW0 列车以 25 km/h 撞击时冲击断面缓冲器阻抗力-行程曲线

从计算结果中可以看出,最大车钩力发生在直接冲击的连挂断面上,车钩压缩力峰值为 1200 kN,冲击断面压溃

管走完行程, 防爬器行程为 677 mm。所有断面车钩力和缓冲器行程见表 4。

表 4 两列 AW0 列车以 25 km/h 撞击时, 各断面最大车钩力、缓冲器行程及压溃管行程

断面	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最大车钩力/kN	535	1000	1000	1000	1000	1200	1000	1000	1000	1000	535
缓冲器行程/mm	67.6	73	73	73	73	68	73	73	73	73	67.6
压溃管行程/mm	0	26.0	32.2	35.2	273.6	300	273.6	35.2	32.2	26.0	0
断面吸收能量/kJ	19.3	45.6	53.5	55.6	296.7	1121.3	296.7	55.6	53.5	45.6	19.3

通过分析断面的缓冲器阻力与行程曲线图, 当列车以 25 km/h 的速度撞击时, 位于列车的第 1 和第 11 断面的车钩力较小, 未超过 600 kN, 行程未超过 70 mm, 表明该断面间的车钩力未达到压溃管的触发力, 压溃管没有发生变形, 缓冲器也未压死。在第 2 至第 10 断面的车钩力较大, 均超过 1000 kN, 行程也超过或者接近 100 mm, 表明该断面间的车钩力已达到压溃管的触发力, 压溃管发生了变形, 吸收了冲击功, 车钩力处于 1000 kN 的行程越大, 压溃管变形程度越大, 吸收的能量越大。压溃管的变形程度由端部向中部逐步增大。压溃管的行程未超过设计行程, 还留有一定的裕量, 吸能装置吸收了全部的冲击载荷, 车体结构受力没有超过设计载荷, 未发生损坏。

## 4 结论

通过对两辆列车以不同速度连挂时的仿真结果, 我们可以得出以下结论:

(上接第 174 页)

满足了视频处理设备小型化、集成化、低功耗发展需求, 通过设计实例验证了系统的有效性。本设计采用的基于可编程 SoC 视频图像处理技术, 将会是未来视频图像处理技术的发展方向, 在智能武器装备, 工业自动化生产等军民领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 杨晓安, 罗杰, 苏豪, 等. 基于 Zynq-7000 高速图像采集与实时处理系统 [J]. 电子科技, 2014.
- [2] Xilinx. Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual [J]. www.xilinx.com, 2013.
- [3] 陆佳华, 江舟, 马岷. 嵌入式系统软硬件协同设计实战指南: 基于 Xilinx Zynq [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 何宾. Xilinx. Zynq-7000 All Programmable SoC 设计指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [5] 孟繁星. 基于 ZYNQ-7000 的视频图像处理系统设计 [J]. 信息通信, 2015, 08: 60-62.
- [6] Neuendorffer S, Li T, Wang D. Accelerating OpenCV Applications with Zynq-7000 All Programmable SoC using Vivado HLS Video Libraries [J]. Xilinx Inc, 2013, 2013 (1): 32-43.

当两列 AW0 列车以 5 km/h 发生连挂时, 缓冲器系统吸收全部冲击能量, 压溃管不会被触发, 冲击断面最大车钩力为 507 kN。

当两列 AW2 列车以 5 km/h 发生连挂时, 缓冲器系统能够全部吸收冲击能量, 冲击断面最大车钩力为 548 kN。

当两列 AW0 列车以 15 km/h 发生连挂时, 缓冲器、压溃管吸收全部能量, 冲击断面压溃管行程 281.2 mm, 单侧压溃管行程为 140.6 mm。

当两列 AW0 列车以 25 km/h 发生连挂时, 缓冲器、压溃管和防爬器能吸收全部能量, 冲击断面压溃管走完行程, 防爬器行程为 677 mm。

通过计算分析, 城际动车组车钩缓冲装置的碰撞能量吸收配置满足设计要求。

## 参考文献:

- [1] 郑伟, 陈书翔, 等. CRH2A/CRH380A 统型动车组用车钩缓冲装置概述 [J]. 机车车辆工艺, 2015 (2).
- [2] 郑伟, 陈书翔, 等. 广深港动车组用车钩缓冲装置概述 [J]. 铁路技术创新, 2014 (4).
- [3] 王学亮, 姜晓东. 车钩缓冲装置用超载保护吸能装置综述 [J]. 机车车辆工艺, 2011 (3).
- [4] 杨调动, 陈凯. 引进 200 km/h 动车组车钩缓冲装置比较分析 [J]. 铁道车辆, 2006, 44 (9).
- [5] 李瑞淳. 高速列车及提速列车车钩缓冲装置研究 [J]. 铁道机车车辆, 2004 (6).
- [6] 刘凤刚, 张维坤, 王鑫. 地铁及城轨列车压溃式吸能装置研制 [J]. 铁道车辆, 2008, 46 (2).
- [7] 孙彦彬, 张伟, 陈秉智, 等. 折叠式压溃管的吸能仿真 [J]. 大连交通大学学报, 2008, 29 (5).
- [7] 郑荣. 基于 FPGA 的图像采集与预处理系统设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [8] 李佩斌, 黄莹, 赵誉婷. 基于 DSP+FPGA 的嵌入式图像处理系统设计 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (20): 96-98.
- [9] 孙咏. 基于 ARM 和 DSP 的嵌入式实时图像处理系统设计与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] 何宾, 张艳辉. Xilinx Zynq-7000 嵌入式系统设计与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016. 7.
- [11] 张海清. 基于 FPGA 图像处理系统的关键算法研究及硬件实现 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [12] Yuan P H, Hsiao C M, Ching C T. FPGA implementation of a real-time image tracking system [A]. SICE Annual Conference 2010, Proceedings of Taipei [C]. IEEE, 2010: 2878-2884.
- [13] 李明, 赵勋杰, 毛伟民. Sobel 边缘检测的 FPGA 实现 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (16): 44-46
- [14] 张磊, 杨维明, 宗爱华, 等. 基于 Sobel 算子的数字图像边缘检测与 FPGA 实现 [J]. 信息通讯, 2010, (6): 46-49.
- [15] 陆佳华. 嵌入式系统软硬件协同设计指南: 基于 Xilinx Zynq [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 132-144.
- [16] 孟繁星. 基于 ZYNQ-7000 的视频图像处理系统设计 [J]. 信息通信, 2015, 8: 60-62.