

ACM2 与 CWELD 焊点模型工程应用

王 力¹, 杨 蔓¹, 田 晟²

(1. 广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘 要:为了提高汽车白车身有限元焊点的建模效率和易用性,研究了 ACM2 和 CWELD 这 2 种焊点模型的原理、计算精度和易用性。并利用这 2 种模型模拟焊点分析了白车身的模态、弯扭刚度和动刚度性能,分别与试验结果进行比较。研究表明:ACM2 和 CWELD 焊点单元都具有较高的计算精度;ACM2 焊点单元比 CWELD 焊点单元的计算精度更高,且 ACM2 焊点单元在计算精度上具有更好的稳定性;ACM2 单元的易用性更好,工程应用时效率较高,而 CWELD 单元格式要求更加严格,导致模型调试时间较长,效率较低。通过计算精度和易用性方面的对比研究,为这 2 种焊点模拟方法在工程上的应用提供参考。

关键词:汽车工程;焊点;ACM2;CWELD;模态分析;刚度分析;白车身

中图分类号:U462.3

文献标志码:A

Application of ACM2 and CWELD spot weld models

WANG Li¹, YANG Man¹, TIAN Sheng²

(1. Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co Ltd, Guangzhou 510640,

Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and facility of finite element spot weld models of automotive BIW (body in white), this paper studied the principle, accuracy and implementation of ACM2 and CWELD models of spot weld. Furthermore, by using the simulation models of spot weld, the natural frequency, the bending and twisting stiffness, and dynamic stiffness of the BIW model were analyzed and compared with the test results. The results show that the ACM2 and CWELD spot weld models are both accurate in simulation, and the ACM2 model is more precise and stable than the CWELD model. The ACM2 models have better ease of use and higher efficiency in engineering application, while the CWELD models have strict format and waste much time in debugging model. By comparing the two spot weld models, this paper provide some reference for the spot weld modeling in engineering application. 5 tabs, 18 figs, 8 refs.

Key words: automotive engineering; spot weld model; ACM2; CWELD; modal analysis; stiffness analysis; body in white

0 引 言

当前,以计算机辅助工程(CAE)技术为核心的仿真驱动设计技术广泛应用于汽车车身的设计,使得整车制造中新产品的开发周期大为缩短,开发效率大幅提高^[1]。设计人员通过大量的工作以使有限元模型越来越能精确模拟车身结构,并以此来改进设计。在点焊模拟方面,最常用的有限元模型是 ACM2 模型和 CWELD 模型。早期的焊点模型中 RBE2 和 CROD 也广泛使用,但是,由于 RBE2 和 CROD 模型模拟焊点时,要求网格的节点对齐,对于拥有 4 000~6 000 焊点的白车身而言,这会带来大量的工作,甚至会影响开发进度^[2]。而 ACM2 和 CWELD 模型则不严格要求网格节点的对齐,使效率大大提高。因此,RBE2 和 CROD 类型的点对点焊点模型不建议使用。

由于白车身焊点众多,且不同模拟单元的精度也会有所差别,因此会对白车身的计算结果带来显著的影响。Matteo 等通过 1 个双帽型结构,对比研究了 ACM2 和 CWELD 模型的各项参数和灵敏度^[3];高书娜等通过焊接钢板的试验模态和分析模态的对比分析,讨论了 3 种焊点单元的模拟精度^[4],但其研究的 3 种焊点模拟方式均较复杂,建模效率不高,不适用于白车身的大规模焊点模拟;Liang 等对比验证了 4 种焊点模型对白车身模态的计算精度,认为 ACM2 和 CWELD 模型都具有较高的计算精度,适合在白车身结构动态分析中应用^[5]。但是关于 ACM2 和 CWELD 焊点模型在工程中的应用,没有进行全面的比较研究。

为此,本文应用 ACM2 和 CWELD 焊点建立白车身模型,分别进行了弯扭刚度、模态和动刚度分析,并与试验结果进行对比,验证了 2 种焊点模型的计算精度;同时结合两者在建模上的特点,分析了两者在工程应用上的易用性。

1 焊点模型描述

1.1 ACM2 模型

ACM2 焊点模型最早由 Heiserer 等提出,该模型生成 1 个处于 2 层焊接件之间垂直于焊接表面的六面体单元,六面体单元的节点通过 RBE3 单元与上下 2 层面片单元(即与焊点单元连接的壳单元)连接,实现上下 2 个焊接板的联结^[6]。载荷通过

RBE3 单元分配到被焊单元的节点上,分配的大小由 RBE3 单元的权重系数决定。该模型不需要上下 2 层面片单元之间节点对齐,具有很高的效率,如图 1 所示。

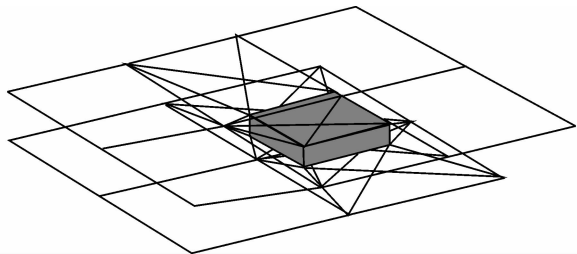


图 1 ACM2 焊点模型
Fig. 1 ACM2 model

1.2 CWELD 模型

CWELD 模型是由 Fang 等提出,该模型由 1 个具有 2 节点和 12 个自由度的特殊剪弹性梁单元构成^[7]。梁单元每个节点的 6 个自由度与对应的每个板节点的 3 个平动自由度按照 Krichhoff 壳理论的约束进行联结,将上下 2 层单元联结在一起,这些联结将产生 12 个约束方程。CWELD 模型也不需要上下面片之间单元节点对齐,建模效率也较高,如图 2 所示。

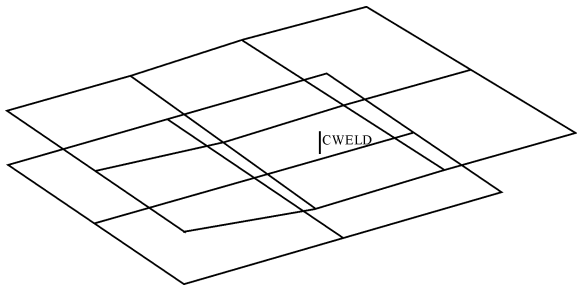


图 2 CWELD 焊点模型
Fig. 2 CWELD model

2 仿真分析及试验验证

分别应用 ACM2 和 CWELD 焊点模型,建立白车身的有限元模型。该模型共划分 722 680 个单元,其中四边形单元 687 299 个,三角形单元 35 381 个,节点总数为 75 5240 个,三角形单元所占比例为 4.9%。

通过对白车身模型进行弯扭刚度、模态以及动刚度的分析,并与试验结果比较,研究这 2 种焊接单元的计算精度。根据设计要求,本文中研究的 ACM2 和 CWELD 模型的焊核直径均设置为 6 mm。

2.1 白车身弯扭刚度分析

反映车身承受载荷与变形关系的车身整体刚度设计是满足车身结构动力学要求的基础,它主要包括车身的弯曲刚度和扭转刚度 2 个方面。

白车身的扭转刚度分析,是先将白车身固定,然后在前减振器支座处施加一个扭矩 T ,最后测量加载点处产生的垂直位移,将此位移进行换算,计算得到扭转角度。然后将相关数据代入到扭转刚度计算式(1)中,从而计算出车身的扭转刚度。扭转刚度有限元计算的载荷与边界条件示意图如图 3 所示。

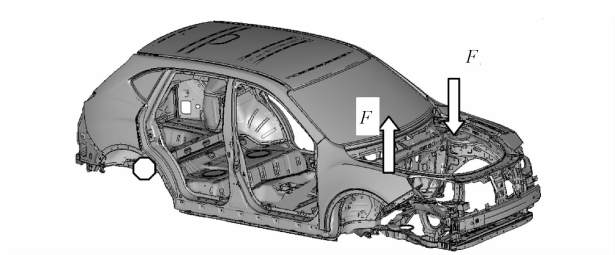


图 3 白车身扭转刚度分析
Fig. 3 Boundary of the twisting stiffness analysis of BIW

扭转刚度 K_T 的计算公式为

$$K_T = \frac{T}{\alpha} = \frac{FL}{\arctan(\Delta d/L)} \tag{1}$$

式中: T 为扭矩($N \cdot m$); F 为施加在前减振器支座的力(N); Δd 为左右前减振器支座 Z 向相对位移(m); L 为左右前减振器支座之间的距离(m); α 为扭转角(rad)。

白车身弯曲刚度分析的加载方式一般有 2 种:其一是在 H 点加载,在汽车总布置中, H 点是指二维或三维人体模型样板中人体躯干与大腿的连接点即胯点(HipPoint),在人体模板中为髋关节,在确定驾驶室布置工具在车身中的位置时常以此点作为定位基准点。二是按照乘员载荷加载。本分析中采用第 2 种加载方式,即按照乘员载荷分别在前后排座椅处加载,然后沿车身纵向测量各点的变形。通过计算变形位置最大的点的刚度值,作为白车身弯曲刚度性能的参考,如图 4 所示。

弯曲刚度 K_B 为

$$K_B = \frac{F'}{\Delta Z_1 - \Delta Z_2} \tag{2}$$

式中: F' 为施加在加载点的力(N); ΔZ_1 、 ΔZ_2 为考察点的垂向位移(mm)。

白车身弯扭刚度试验的约束和加载方式与仿真一致。图 5、图 6 分别为扭转刚度和弯曲刚度试验加载示意图。

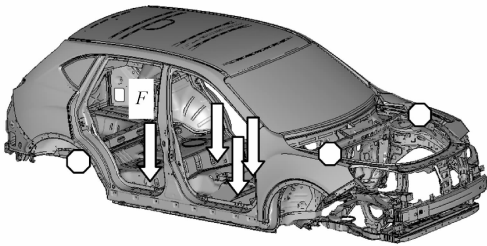


图 4 白车身弯曲刚度分析
Fig. 4 Boundary of the bending stiffness analysis of BIW

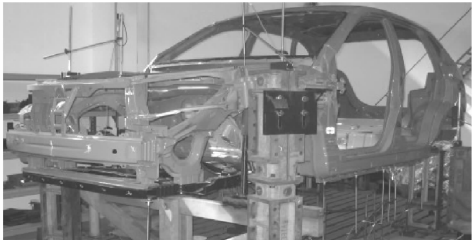


图 5 白车身扭转刚度试验
Fig. 5 Experimental setup of the twisting stiffness of BIW

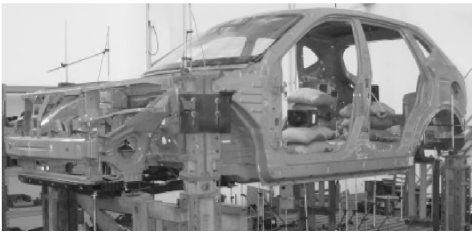


图 6 白车身弯曲刚度试验
Fig. 6 Experimental setup of the bending stiffness of BIW

分别对应用 ACM2 和 CWLD 焊点的白车身有限元模型进行弯扭刚度分析,并将得到的分析结果与试验结果进行比较。结果数据进行归一化处理,将试验结果设定为基准 1,仿真计算的结果与试验结果进行比较,得到一个比数。该数值与 1 越接近,表明计算结果与试验结果越接近,计算精度越好;反之亦然,如表 1 所示。

表 1 白车身弯扭刚度分析结果对照
Tab. 1 Results contrast of the twisting and bending stiffness analysis of BIW

类 别	扭转刚度	弯曲刚度
试验	1.00	1.00
ACM2 模型	0.97	0.97
CWELD 模型	0.92	0.92

从表 1 中可见,ACM2 和 CWELD 焊点模型的计算结果均与试验结果有一定的误差,但是误差范围在 8%以内,其中 ACM2 焊点模型的计算误差仅为 3%,两者的误差均在工程允许范围之内。ACM2 和 CWELD 焊点模型计算结果也有 5.2%的

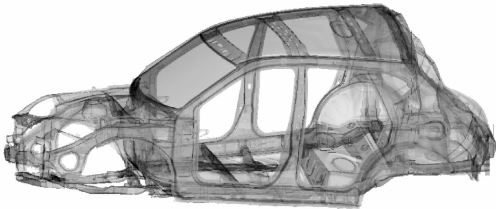
误差,前者计算结果的绝对数值更大,即刚度更大。通过与试验结果的对比,表明 ACM2 和 CWELD 焊点模型均能较好地模拟实际焊点的力学行为,ACM2 焊点具有更高的计算精度。

2.2 白车身模态分析

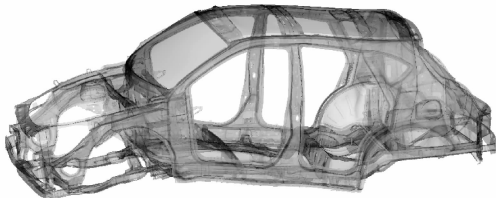
白车身结构动态分析最基本、最重要的内容就是自由模态分析,是整车 NVH 开发的基础。通过模态分析能够了解白车身的基本结构特性,并以此为依据来优化模态频率和模态振型,以满足设计要求。

汽车在轮胎上的振动频率及发动机在其悬置上的振动频率等,与车身的低阶模态频率很接近,因此车身工程中非常注重结构低阶模态频率的设计。通过修改结构优化设计,使车身的模态频率避开激励频率,防止产生共振。本文主要研究白车身的 2 个最重要的也是工程设计要求最严格的 2 个低阶模态,车身一阶扭转和一阶弯曲模态。

分别将 ACM2 和 CWELD 这 2 种焊点的白车身模型进行模态分析,提取其 1 阶弯曲和扭转模态,模态振型如图 7、图 8 所示。同时,也进行了试验模态测试,试验的模态振型如图 9 所示。



(a) 白车身第1阶模态振型 (扭转)

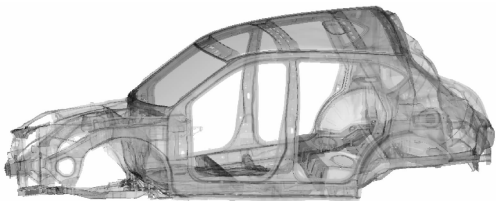


(b) 白车身第2阶模态振型 (弯曲)

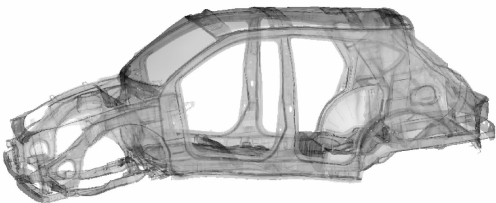
图 7 ACM2 焊点模型白车身模态分析振型
Fig. 7 Normal mode of BIW in ACM2 model

从以上的模态振型图来看,有限元分析结果模态振型与试验基本一致。对于具体的计算结果,同样进行了归一化处理,表 2 给出了结果的对比。

从计算结果可见,ACM2 和 CWELD 焊点模型对于模态的计算结果误差可控制在 6% 以内。CWELD 模型的计算精度相对于弯扭刚度分析有了提升,表明在模态计算中,CWELD 模型的计算精度更高。同时,ACM2模型始终保持相同的较高的计

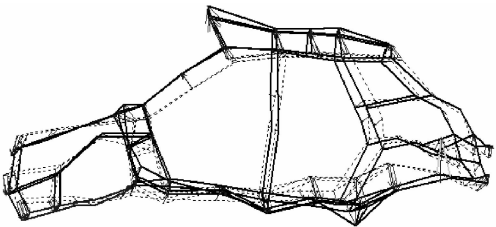


(a) 白车身第1阶模态振型 (扭转)

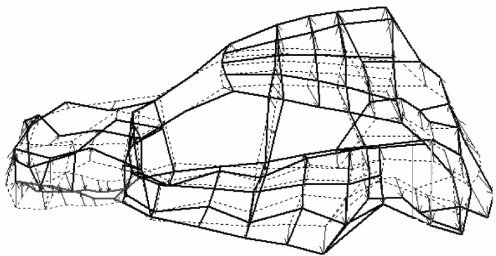


(b) 白车身第2阶模态振型 (弯曲)

图 8 CWELD 焊点模型白车身模态分析振型
Fig. 8 Normal mode of BIW in CWELD model



(a) 白车身试验模态第1阶振型 (扭转)



(b) 白车身试验模态第2阶振型 (弯曲)

图 9 试验模态振型
Fig. 9 Normal mode of BIW in experiment

表 2 白车身模态分析结果对照表

Tab. 2 Results contrast of the normal mode analysis of BIW

类 别	1 阶扭转模态频率	1 阶弯曲模态频率
试验	1.00	1.00
ACM2 模型	0.97	0.97
CWELD 模型	0.94	0.95

算精度,具有很高的稳定性,且精度均较 CWELD 模型更好。

2.3 白车身连接点动刚度分析

连接点局部动刚度 IPI (Input Point Inertance) 分析,用于考察这些连接点附近的局部动刚度^[8]。分析对象包括白车身上的减振器连接

点、发动机连接点、排气挂钩等所有的接附点。由于在汽车的激励源中,发动机和路面激励是 2 个主要的激励源,这些激励是通过连接点传递到车内,所以局部连接点的动刚度性能,是整车 NVH 性能的重要影响因素。

IPI 分析的方法是:白车身模型无约束,为自由状态。将分析点的 X、Y、Z 这 3 个方向的激励分别定义一个载荷工况,载荷大小为 1 N,频率范围一般设置为 0~500 Hz 的中、低频范围。同时,将激励点定义为响应点,且响应自由度与激励自由度相同,得到相应的加速度响应,通过数据处理得到 IPI 曲线。

对白车身上左前减振器支座进行 IPI 分析,得到 ACM2 和 CWELD 这 2 种焊点模型的动刚度计算结果。然后,分别处理该连接点 3 个方向的加速度响应,得到对应的 IPI 曲线,如图 10~图 12 所示。

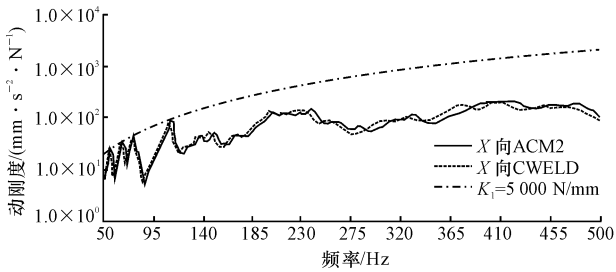


图 10 左前减振器安装点 X 方向 IPI 曲线

Fig. 10 IPI curves in the X direction on the front left shock mount

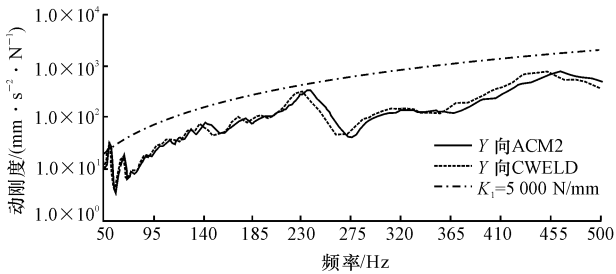


图 11 左前减振器装点 Y 方向 IPI 曲线

Fig. 11 IPI curves in the Y direction on the front left shock mount

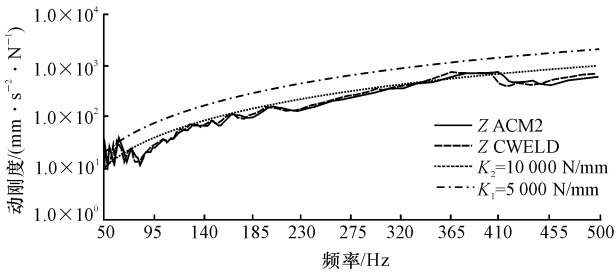


图 12 左前减振器安装点 Z 方向 IPI 曲线

Fig. 12 IPI curves in the Z direction on the front left shock mount

根据工程经验,该位置的动刚度需要满足 X、Y 方向大于 5 000 N/mm、Z 方向大于 10 000 N/mm

的条件。从图 10~图 12 可以看出,该位置动刚度均满足设计要求。在 230 Hz 附近,Y 向 IPI 曲线产生了峰值,但该峰值在设计目标之内。作为主要方向的 Z 向,IPI 曲线趋势较为平缓,无明显的峰值,满足设计要求。ACM2 和 CWELD 焊点模型的 IPI 曲线基本一致。

同时进行了相应的动刚度试验,用力锤分别对左前减振器支座进行 X、Y、Z 方向激励,测量响应点的频响曲线,并与目标曲线对比。传感器布置如图 13 所示。该位置的动刚度试验结果 IPI 曲线如图 14 所示。

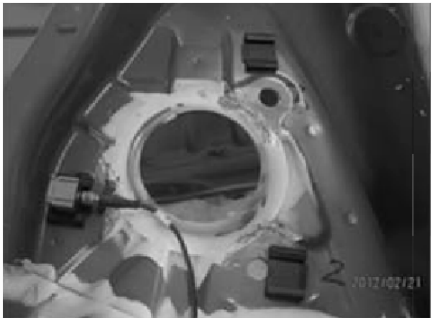


图 13 左前减振器支座动刚度试验

Fig. 13 Experimental setup of dynamic stiffness on the front left shock mount

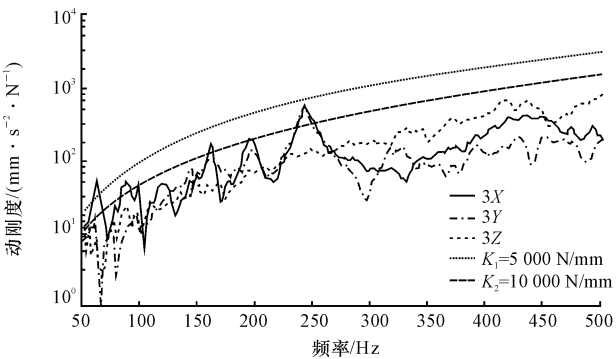


图 14 左前减振器支座动刚度试验结果 IPI 曲线

Fig. 14 IPI curves on the front left shock mount by experiment

图 14 所示的 IPI 曲线上,在 230 Hz 处,X、Y 向均出现了明显峰值,而仿真结果中 X 向的峰值不明显,这可能是由于仿真模型更理想化所致,但 X 方向并非主要关注方向,不影响结果评价。Z 向 IPI 曲线同样比较平缓,没有明显的峰值出现。试验表明该点三向动刚度满足设计要求。总体趋势来看,仿真结果与试验接近。

综上所述,ACM2 和 CWELD 焊点模型,对于 IPI 分析,具有基本一致的分析精度,且通过试验结果比较可见,两者的仿真计算结果均在工程可接受的范围内。在白车身弯扭刚度和模态分析中,两者

的计算精度均可接受,ACM2 焊点模型更加稳定,且具有更好的计算精度。

3 易用性特点

在搭建有限元模型时,一般是先对钣金件进行网格划分,然后通过焊点单元连接在一起,其流程如图 15 所示。

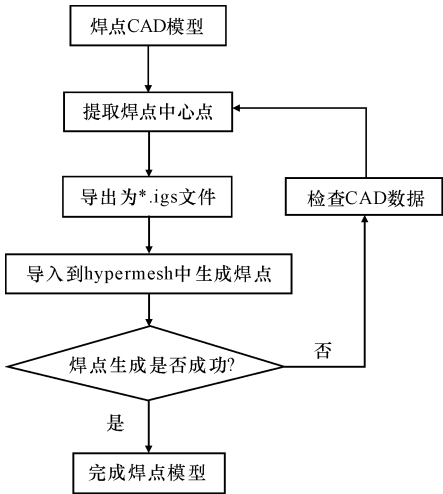


图 15 创建焊点模型流程
Fig. 15 The flow of spot welds modeling

ACM2 和 CWELD 这 2 种焊点模型,建模效率都比较高,但在实际使用过程中,也并非完美。总结起来,主要有 3 个方面的问题值得探讨。

(1)ACM2 焊点单元的 RBE3 单元与周围节点相连,会占用过多的节点。在螺栓孔处创建 SPIDER 连接模拟螺栓连接时,根据工程经验一般需要选取孔周围 2 层以上单元,如果 RBE3 单元已经占用该节点,则 SPIDER 连接不能选取该点,无法实现 2 层单元的连接。如图 16 所示,箭头所示的点正好被旁边的 ACM2 单元占用,如果仍然选择该点生成 SPIDER 连接,则在计算时模型会出错,如果只选择一圈单元连接,则可能会导致局部应力过大,影响计算结果的准确性。

(2)CWELD 焊点单元对于上下 2 层面片单元的夹角有限制。CWELD 焊点单元要求所连接的 2 层壳单元之间的夹角不能大于 20° (Nastran 的默认值)。如图 17 所示,焊点位置的上下面片的夹角达到了 32.6° ,直接计算后会出错。

白车身有 4 000~6 000 个焊点,调试模型时,很难在短时间内发现所有的焊点问题,影响工作效率,如果打开 NASTRAN 的 SWLDPRM 开关,忽略角度的影响,将导致 CWELD 焊点模型计算精度降低。而 ACM2 焊点不会有此限制,如图 18 所示。

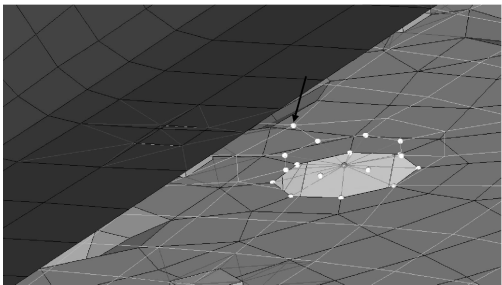


图 16 ACM2 焊点占用节点示意图
Fig. 16 ACM2 model associate with occupied nodes of the patch elements

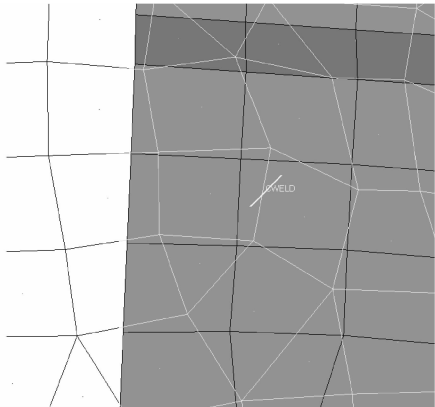


图 17 面片不平行的 CWELD 焊点
Fig. 17 CWELD model with malalignment patch elements

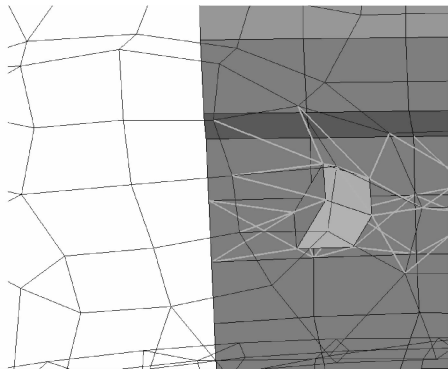


图 18 面片不平行的 ACM2 焊点
Fig. 18 ACM2 model with malalignment patch elements

(3)对称复制单元时,ACM2 单元可直接使用,CWELD 单元则不能。白车身中有很多零件和总成是左右对称的,因此在建立白车身 CAE 有限元模型时,可以采用对称复制的方法建立对称零件或者总成的模型,这样可以减少重复性工作,大大提高建模效率。

NASTRAN 中 CWELD (GA-GB ELEMENT ID)单元的格式见下页表 3,每个数据卡片中都必须有准确的数值 CWELD 单元才能正确定义,否则无法计算。

表 3 NASTRAN 软件中 CWELD 单元格式
Tab. 3 The format of CWELD element in Nastran

CWELD	EWID	PWID	GS	ELEMID	GA	GB
	SHIDA	SHIDB				

例如,对称复制之前,所建立的 CWELD 焊点单元在 NASTRAN 的计算输入文件中的格式见表 4。对称复制后,该单元格式变成表 5 所示的描述。由表 5 可见,对称复制后,单元 ID 发生变化,SHIDA 和 SHIDB 为空,单元无法正确定义,将导致模型无法计算,必须重新生成。

表 4 对称复制前 CWELD 单元描述
Tab. 4 The format of CWELD element before reflection

CWELD	462476	45		ELEMID	4 548	4 549
	74	399 931				

表 5 对称复制后 CWELD 单元描述
Tab. 5 The format of CWELD element after reflection

CWELD	495575	45		ELEMID	4 748	4 752
	0	0				

如果采用 ACM2 单元,则不会有此问题。因为 ACM2 单元是由 RBE3 与 1 个实体单元组成,RBE3 单元连接到 2 层面片单元的节点上,当对称复制后即使单元 ID 发生改变,RBE3 单元依然与周围单元节点保持连接,焊点直接可以使用,可大大提高效率。

总之,在工程应用的易用性方面,CWELD 模型要求更加严格,需要进行调试的时间更长,效率相对要低。而 ACM2 焊点模型较为稳定和开放,无特殊的限制,使用更加方便。

4 结 语

(1)通过应用 CWELD 和 ACM2 这 2 种焊点模型,对某 B 级 SUV 的白车身进行了弯扭刚度、模态和动刚度有限元分析,并将结果与试验进行对比,验证了 2 种模型均具有工程上可接受的计算精度,其中 ACM2 模型具有更好的稳定性,且更接近试验结果。

(2)在易用性方面,CWELD 模型相对于 ACM2 而言要求更加严格,模型调试的时间也会增加,因此计算效率低于 ACM2 模型。ACM2 模型如果避免了占用节点过多的问题,使用上将更加方便快捷,比较适合于时效性要求高的工程应用。

(3)在模态、刚度以及频响分析领域,建议采用 ACM2 焊点模型。本文仅限于讨论焊点本身,对于

焊点位置、焊核直径、焊核材料等的影响尚未涉及,有待于进一步的研究。

参考文献:
References:

[1] 黄金陵. 汽车车身设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
HUANG Jin-ling. Automotive body design[M]. Beijing:China Machine Press,2007. (in Chinese)

[2] 王玉超,王 力,宋 俊. 利用 CWELD 和 RBE2 模拟焊点模态及刚度分析[J]. 现代制造工程,2009(4): 116-118.
WANG Yu-chao,WANG Li,SONG Jun. A study for the welding elements CWELD and RBE2 based on the modal and stiffness model[J]. Modern Manufacturing Engineering,2009(4):116-118. (in Chinese)

[3] Matteo P,Michael I F,John E M,et al. Guidelines for the implementation of the CWELD and ACM2 spot weld models in structural dynamics[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2004,41(2):193-210.

[4] 高书娜,邓兆祥,胡玉梅. 车身点焊连接有限元模拟方法研究[J]. 汽车工程,2008,30(9):811-815.
GAO Shu-na,DENG Zhao-xiang,HU Yu-mei. A study on the finite element modeling for spot-welds of vehicle body[J]. Automotive Engineering,2008,30(9):811-815. (in Chinese)

[5] Liang J Y,Liang J,Fang G D,et al. Evaluation on spot weld models on structural dynamic analysis of automotive body in white[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2011(1):84-90.

[6] Heiserer D,Chargin M,Siellaff J. High performance, process oriented,weld spot approach[C]//. MSC. 1st MSC Worldwide Automotive User Conference, Munich, MSC 1999:135-140.

[7] Fang J,Hoff C,Holman B,et al. Weld modelling with MSC. Nastran[C]//. Second MSC Worldwide Automotive User Conference, Dearborn MSC, 2000: 233-239.

[8] 庞 剑,湛 刚,何 华. 汽车噪声与振动-理论与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.
PANG Jian,CHEN Gang,HE Hua. Automotive noise and vibration-principle and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2008. (in Chinese)