



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

基于 2015 版 C-NCAP 后排
Hybrid III 型 5%假人的约束系统优化分析

姓名：桑瑞刚

学号：1021180063

所在院系：汽车学院

职业类型：工程硕士

专业领域：车辆工程

指导教师：朱西产 教授

副指导教师：陈勇

二〇一六年九月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**Optimization Analysis of Rear
Constrained System Based on C-NCAP 2015
Hybrid III 5% Dummy**

Candidate: Sang Ruigang

Student Number: 1021180063

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Vehicle Engineering

Supervisor: Prof. Zhu Xichan

Vice Supervisor: Chen Yong

Sep., 2016

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

对于汽车安全系统而言，前排安全约束系统的开发技术和经验已较为成熟，在相关的安全标准评估中能够得到较好的分值。相较下，我国后排乘员的安全意识较为薄弱，后排约束系统的开发经验也相对不足。对于后排安全系统性能的提高，后排约束系统还有较大的改善空间。

本文通过 C-NCAP 官方已公布的得分进行统计分析，结果表明后排正面碰撞的分值普遍较低，即正面 100%重叠刚性壁障碰撞（50FF）和正面 40%重叠可变形壁障碰撞（64ODB）两种工况，主要失分原因为后排乘员胸部压缩量和颈部张力 F_z 伤害指标超标及假人发生下潜，据此背景展开研究。

首先，基于 2015 版 C-NCAP 评价规程对后排的要求，对后排女性假人进行正面碰撞伤害动力学理论研究，建立简化动力学方程，得出后排女性假人的理想运动姿态。结合后排乘员约束系统的配置，建立理想运动姿态与约束系统之间的关联性。初步建立理论的后排约束系统的设计指导原则。

然后，本文基于具体某车型 50FF 和 64ODB 两种工况进行了基础实车碰撞数据分析，建立了 MADYMO 碰撞系统动力学仿真模型。根据建立的后排约束系统的设计指导原则进行了仿真优化。经过滑车和实车碰撞验证，最终使后排约束系统得到了优化。这样，以某车型为载体进行完整后排约束系统开发，有效地验证了设计原则的有效性，对优化方案的成本进行了分析，建立了优化方案与成本之间的对应关系。可为不同车型在兼顾成本的情况下选择恰到好处的优化方案提供一定参考。

本文研究分析了后排约束系统的动力学机理和设计规律，有利于设计人员深入理解各配置参数对保护效果的影响机理，为其提供设计方向，并缩短设计周期。此外，通过对某车型的开发，不仅积累了实际开发经验，还罗列出一系列的具体后排约束系统配置方案，能够为后续后排约束系统的开发提供方案参考。

关键词：安全系统，后排乘员，碰撞，系统仿真，滑车试验

ABSTRACT

For automobile safety system, the development technology and experience of front safety system has been mature, and can get a high score in the evaluation of relevant safety system. In contrast, the safety awareness of the rear occupant in our country is relatively weak, and the development experience of the rear constraint system is relatively insufficient. For the improvement of the performance of the rear security system, the rear constraint system also has a larger space for improvement.

This paper analyzes the official score released by C-NCAP authority, and the results show that the rear crash score is generally low under positive 100% overlap rigid barrier crash (50FF) and positive 40% overlap deformable barrier collision (64ODB) cases. The main reason is that chest deflection and neck tension compression exceed the standard index and the occurrence of dummy dive.

First, according to the 2015 C-NCAP definition, to study the front collision dynamics based on rear female dummy, give a simplified dynamic equation of motion and the ideal posture of the dummy. Based on the configuration of the rear restraint system, the relationship between the ideal motion posture and the constraint system is established. They would be the theoretical design guideline of the rear restraint system.

Then, to analyze the basic real car crash data under 50FF and 64ODB cases, the establishment of the MADYMO simulation model is performed and the rear system design guidelines are simulated and optimized. Finally, the results of the sled and real crash test show good optimization effect. In this way, we effectively verify the effectiveness of the design principles, cost analysis and summarize the specific system configuration.

This paper analyzes the dynamic mechanism and gives design guideline of rear restraint system that is conducive to in-depth understanding mechanism of the configuration parameter influence on the protective effect for designer, and provide design direction and shorten the design cycle. In addition, through the development of certain models, not only accumulated practical experience, also lists a series of configuration of rear restraint system, can provide reference for the subsequent development of rear restraint system.

Keywords: safety system, rear occupant, collision, system simulation, sled test

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 后排约束系统发展及研究现状.....	1
1.3 NCAP 对后排安全系统的试验要求.....	5
1.3.1 国外 NCAP 对后排安全系统的试验要求.....	5
1.3.2 我国 C-NCAP 后排试验要求及分析.....	7
1.3.2.1 C-NCAP 后排乘员要求.....	7
1.3.2.2 C-NCAP 后排得分统计分析.....	10
1.4 主要研究内容和技术路线.....	12
1.5 本章小结.....	13
第 2 章 后排约束系统设计方案的建模及验证.....	15
2.1 正面碰撞基础试验.....	15
2.2 仿真基础理论.....	19
2.3 仿真模型的建立.....	19
2.3.1 整车模型的建立.....	19
2.3.2 座椅特性定义及假人模型加载.....	20
2.3.3 安全带特性定义.....	20
2.3.4 模型 Pulse 加载.....	21
2.3.5 模型验证.....	23
2.4 本章小结.....	30
第 3 章 后排乘员动力学响应及伤害值影响因素分析.....	31
3.1 后排女性假人碰撞运动及动力学分析.....	31
3.1.1 后排女性假人伤害整体动力学分析.....	31
3.1.2 头部二次碰撞判断方法研究.....	32
3.1.3 颈部张力伤害动力学分析.....	33
3.1.4 胸部运动动力学分析.....	36
3.1.5 下潜分析.....	39
3.1.6 后排力学分析总结.....	41
3.2 后排力学参数与约束系统相关性分析.....	42
3.2.1 降低胸部加速度.....	42
3.2.2 增加胸部刚度.....	42
3.2.3 降低头胸部运动差和骨盆位移量.....	43
3.2.4 影响因素汇总.....	45
3.3 约束系统影响因素的仿真验证.....	46

3.3.1 钢支架带扣.....	46
3.3.2 增加动态锁舌.....	48
3.3.3 锚点向外移动.....	50
3.3.4 带扣固定点下移.....	53
3.3.5 加强防下潜梁.....	56
3.3.6 预紧及限力式安全带.....	58
3.3.7 结果汇总.....	63
3.4 本章小结.....	64
第4章 后排约束系统配置的滑车与实车验证.....	65
4.1 系统方案.....	65
4.2 滑车试验验证.....	65
4.2.1 方案1 滑车试验.....	66
4.2.2 方案2 滑车试验.....	67
4.2.3 方案3 滑车试验.....	70
4.2.4 方案4 滑车试验.....	73
4.2.5 方案5 滑车试验.....	76
4.2.6 方案结果汇总.....	79
4.3 方案实车验证.....	80
4.3.1 50FF 方案实车验证.....	81
4.3.2 640DB 方案实车验证.....	84
4.3.3 结果汇总.....	86
4.4 方案性价比分析.....	87
4.5 本章小结.....	89
第5章 总结与展望.....	91
5.1 总结.....	91
5.2 展望.....	91
致谢.....	93
参考文献.....	94
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	96

第1章 绪论

1.1 课题背景及意义

当汽车发生碰撞时，后排安全约束系统对后排乘员的安全有着十分重要的保护作用。当前，因为汽车内部结构的特征和空间大小的限制，后排安全系统一般只含有后排三点式安全带，具体包括肩带和腰带以及后排坐垫。与发展较为成熟的前排安全系统相比，没有像前排一样配有正面气囊、侧面气囊和膝部气囊等。总之，后排约束系统相对前排而言比较简单，也即对后排乘员的保护也不如前排充分。

在并不多的安全配置中，后排安全带就成为了乘员安全保护系统中至关重要的一环。在目前应用的车型中，后排安全带大部分是采用普通三点式安全带，而且还有一大部分车辆的后排安全带没有配置限力机构。此外，对于安全带的固定和连接，由于空间的限制，后排安全带距离乘员也会更近。再加上，我国公民后排乘员安全意识相对较弱，实际情况中佩戴后排安全带的比例很少，在发生事故的时候，后排乘员的伤亡几率非常大^[1]。

在中国，汽车后排座椅的使用率非常高，而且女性和儿童的比例最多，然而相应的安全意识却始终处于低位，随着技术的不断完善和相应产品的出现，如何更好地保护后排乘员，逐渐成为需要探讨和研究的热点课题。

1.2 后排约束系统发展及研究现状

汽车安全系统发展早期，相关法规和标准的关注点基本上集中在前排乘员的伤害状态。在测试过程中不管是正面碰撞还是侧面碰撞，仅仅在前排设置假人，采取收集相关传感数据，综合计算假人伤害指标。随着开发技术在不断革新和安全意识持续提升，各研发机构开始关注后排乘员的人身安全问题，随之相应的碰撞法规也进行了更新。当前，国内外对于汽车正面碰撞的评估测试通常有两种：正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验（50FF）和 40% 重叠可变形壁障碰撞试验（64ODB）。虽然这两种碰撞工况，对于假人伤害指标的评估重点各有所侧重，但是两者均是通过安置在前排主驾驶和副驾驶位置上的假人进行数据采集和分析评估。综合考虑，我国的 C-NCAP 将后排女性假人的评价列入评估体系^[2]。

从 2015 年 7 月份开始，《C-NCAP 管理规则(2015 年版)》正式启用^[3]。2015

版的评估标准的评分方式有所更新，量化了后排假人的伤害指标。在实际开发过程中发现，在当前新的评价体系下，后排乘员的伤害指标很容易超标，失分严重，即使对于那些实车系统安全性能比较优异的车型，后排得分也很难得到满分。研究正面碰撞工况下的后排女性假人的碰撞动力学机理以及安全约束系统的优化设计已经成为当前被动安全领域的研究热点之一。

由于后排约束系统配置较为简单，对乘员的保护效果也不佳。针对此问题，为了减少后排乘员在碰撞事故中的受伤风险，国内外相关研发机构提出了各种解决方法，比如限力式安全带、带预紧安全带、充气式安全带以及后排安全气囊等。然而，由于成本和技术多方面的限制，依旧留有很大的改善空间。

Jason Forman 等研究人员在 2008 年开展了一系列的实车碰撞实验，包括 24km/h 和 48km/h 的正面全宽碰撞。在该碰撞工况下，对传统三点式安全带和带预紧与限力的安全带进行对比实验，实验用假人为包括 Hybrid III 50% 男性和 Hybrid III 5% 女性等四种。实验结果表明，预紧加限力组合的安全带比传统安全带有明显的胸部保护作用，比如 Hybrid III 50% 男性假人的胸部压缩量减少了 30%。由此可见，安全带的合理配置能够有效地保护后排乘员^[4]。

吉林大学张君媛^[5]等人建立了国内某客车乘员约束系统的碰撞模型，针对安全带和安全气囊在正面碰撞过程中的保护作用进行了理论分析，并且对于安全带和安全气囊之间关键参数的响应关系作了动力学仿真研究，最终得出乘员的碰撞响应曲线。

吉林大学张君媛、林逸^[6]等人研究了汽车智能约束系统对乘员在碰撞过程中的保护作用进行了仿真分析，具体以安全气囊低能量触发为研究对象，系统地分析了气体发生器分级点爆技术、传感技术等对安全系统保护作用的影响。

中国汽车技术研究中心的朱海涛^[7]等人基于 C-NCAP (2012)，对总共 29 款乘用车的后排 5% 女性假人的碰撞数据进行统计分析，分析女性假人头胸颈等各个部位的伤害原因，最后提出在车内空间允许的条件下使用带限力和预紧的安全带可以有效抑制乘员伤害。

清华大学的唐亮^[8]等人针对当前还没有准确评估下潜是否发生的准则的现状，研究给出腰带在骨盆上的相对位置 LBOP 和髌骨所受力矩与力的比值 IMFR 的准则，然后基于 Hybrid III 5% 女性假人进行了该原则合理性的仿真验证，也提出座椅靠背夹角与坐垫刚度也可以通过 LBOP 和 IMFR 准则进行分析与优化。

吉利汽车研究院的李月明^[9]等人在开发某款具体车型时，基于 C-NCAP 试验评价规程进行 50km/h 正面 100% 刚性壁障碰撞试验，第一轮试验中后排座椅变形较大，并发生下潜，导致后排乘员的胸颈部失分严重，经过理论分析，并改进了座椅支架的约束系统，以解决下潜现象。最终使得分从 0.82 提高到 1.10 分。

东方久乐汽车安全气囊有限公司和上海电机学院的商恩义^[10]等人对 11 款乘用车进行了 C-NCAP 2012 版的 50FF 和 64ODB 碰撞,通过对后排女性假人的试验结果进行对比分析研究后,发现由于下潜的发生,颈部和胸部得分普遍偏低,这也意味着在后排安全系统开发中下潜的控制非常关键。

泛亚汽车技术中心的瞿喆文^[11]根据 C-NCAP 的要求对某车型进行约束系统开发,通过研究提出将正面刚性墙试验的约束系统参数作为关键输入,而将正面偏置可变形壁障试验的约束系统参数作为约束条件,并且分析安全系统的具体参数在两种工况下的乘员伤害指标。具体运用了 CAE 和 DOE 的方法,减少了滑车与实车的试验数量,有效降低开发成本。

重庆理工大学和重庆科学技术研究院的胡远志^[12]等人根据某车型正面碰撞试验数据,建立了后排女性假人的仿真模型,并进行对标调整,然后基于 C-NCAP 2012 版进行伤害指标评估和得分分析,发现胸颈部得分较低。之后,对安全带模型进行优化,主要集中在限力等级、预紧装置和固定位置这三个方面,最后优化仿真的结果表明这三方面均能够在一定程度提升后排系统得分。

江苏大学葛如海^[13]等人在研究中为了优化后排乘员在偏置碰撞中的得分,使用 MADYMO 软件构建了含有车身、座椅、安全带、地板、后排女性假人的约束系统仿真模型,并将其与实车碰撞数据对标,保证模型的准确性。然后基于此模型,探究前排座椅和安全带对后排乘员的影响,提出安全带固定方式的改善方法,最终使得后排乘员头部伤害值降低 14.2%,颈部张力降低 14.4%。

Stephane Couturier, Jacques Faure^[14]等人研究了正碰情况下前排乘员的下潜问题,首先对下潜滑脱现象进行了介绍,对下潜造成的腹部损伤进行了描述。然后,定义了完整了滑车试验和流程,并且基于真实事故数据验证了试验定义的准确性。

Kenji Kawaguchi, Naoki Kaneko, Tatsuhiko Lwamoto^[15]等人基于日本碰撞事故数据研究发现颈部和头部是人体最容易受伤的地方,而儿童和女性乘员受伤率最高。为了减少后排乘员的损伤,研究提出要通过控制安全带负载尽量地减少头胸部相对速度差,所提方案通过仿真验证有效。

美国国家公路交通安全管理局的 Alope Prasad, Doug Weston^[16]等人收集了一系列的后排乘员碰撞试验数据,该数据包含 NCAP 定义的各种测试模型,包括成人约束系统和儿童约束系统。文章探讨了坐垫参数(形状,刚度,厚度)和碰撞脉冲与人员伤害的关系,其中坐垫厚度对假人伤害的影响最大。

KATHLEEN D. KLINICH, CAROLA C. FLANNAGAN^[17]等人在文章中系统地阐述了后排座椅乘员的损伤模式,分析了新的安全技术,提出助推式座椅能够有效地优化安全带肩带和腰带的形状,带预紧限力安全带和充气式安全带能够有

Koji Mizuno, Takahiro Ikari, Kenich Tomita^[18]等人对正面全宽碰撞工况 Hybrid III AF05 和 3YO 假人在系安全带和不系安全带两种情况, 假人的伤害情况进行分析, 发现 AF05 假人在系安全带时, 伤害值较低。反之, 头部和腿部伤害非常高。对于 3YO 而言, 区别更加明显, 系安全带时仅与驾驶员椅背有接触, 未系安全带的假人甚至撞到前排仪表板。

福特汽车研发出了一系列专门用于后排的气囊式安全带, 综合了传统安全带和安全气囊的优势。当车辆发生正面或侧面碰撞时, 加大直径的安全带能够有效减少乘员受到的猛烈冲击, 以降低后排乘员头部、胸部以及颈部的伤害程度。2010 年, 福特将该技术应用于 Explorer 车型中。2013 年, 福特又将其应用在新蒙迪欧上, 有效地实现了技术市场化, 如图 1.1 所示。



图 1.1 气囊式安全带技术

气囊式安全带的工作原理为, 当车辆受到外部撞击时, 传感器接收到碰撞信号, 在电子处理模块的判断下, 将卷折在安全带内部的气囊充气展开, 充气后的安全带将控制头颈部转动和胸部的压缩, 最终实现保护乘员的目的。

除了安全带的优化改进, 一些研究机构也开发出了后排安全气囊。比如, TRW 开发出新型车顶安装式后排安全气囊技术和新型前排安装式后排安全气囊技术, 为后排安全系统提供了更多的保护措施, 如图 1.2 和 1.3 所示。



图 1.2 新型车顶安装式后排安全气囊技术



图 1.3 新型前排安装式后排安全气囊技术

1.3 NCAP 对后排安全系统的试验要求

1.3.1 国外 NCAP 对后排安全系统的试验要求

1) 欧洲 E-NCAP^[19]后排试验要求

基于市场提出的新要求，欧洲在 NCAP 2015 版中增加了初速度为 50km/h 的正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验工况。评价为分别是在车辆前排驾驶员侧和乘员侧，以及前排乘员后排的 Hybrid III 5% 女性假人的伤害评价指标，如图 1.4 所示。

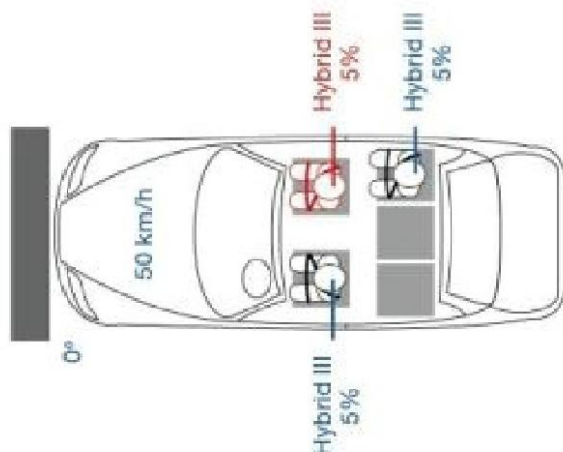


图 1.4 欧洲 E-NCAP 正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验工况

表 1.1 E-NCAP 后排女性假人评分指标

部位	伤害指标	高限值	低限值	得分
头部	伤害 HIC15	500	700	4
	A3ms	72g	80g	
颈部	颈部剪切力 F_x	1200N	1950	1
	颈部张力 F_z	1700N	2620	1
	颈部伸张弯矩 M_y	36Nm	49Nm	2
胸部	压缩量	23mm	48mm	4
	VC	0.5m/s	1.0m/s	
腿	大腿力	2.6kN	6.2kN	4

2) 日本 J-NCAP^[20] 后排试验

日本 J-NCAP 也在 2009 年加入了后排乘员安全性试验。后排乘员分值权重占总分(208 分)中的 7.211%，具体试验要求是正面 40% 偏置碰撞工况中后排左侧 Hybrid III 5th% 女性假人的伤害情况，如图 1.5 所示。其评价方法如表 1.2 所示。

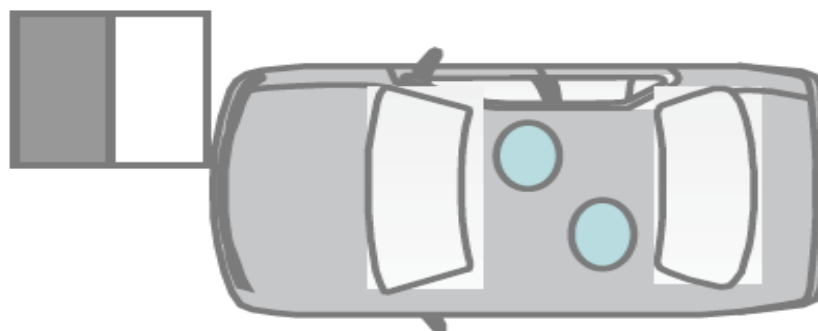


图 1.5 日本 J-NCAP 正面 40% 重叠可变形壁障碰撞试验工况

表 1.2 J-NCAP 后排女性假人评分指标

部位	伤害指标	高限值	低限值	权重	得分
头部 ^(a)	伤害 HIC15	500	700	0.8	3.2
颈部	颈部剪切力 F_x ^(b)	1200N	1950	0.2	0.8
	颈部张力 F_z	1700N	2620		
	颈部伸张弯矩 M_y ^(b)	36Nm	49Nm		
胸部	压缩量	23mm	48mm	0.8	3.2
腹部	缺省状态为 4 分			0.8	3.2
腿	大腿力	4.8kN	6.8kN	0.4	1.6

注：(a) 头部未发生二次碰撞时为 4 分；(b) 头部发生二次碰撞时考虑。

1.3.2 我国 C-NCAP 后排试验要求及分析

我国 C-NCAP 实施于 2006 年，在研究及借鉴其他国家 NCAP 发展经验，并结合我国具体情况如汽车标准和技术发展水平的综合基础上建立起来的。C-NCAP 开展六年来，依次在 2006 年版、2009 年版和 2012 年版进行了更新。C-NCAP 管理中心在 2012 版的基础上又作了进一步的完善，形成《C-NCAP 管理规则（2015 年版）》^[21]。

1.3.2.1 C-NCAP 后排乘员要求

1) 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验（50FF）

该试验碰撞速度不得低于 50km/h。对于后排乘员伤害程度的评估，是通过放在后排左侧位置的 Hybrid III 型第 5 百分位女性假人和最右侧位置的 P 系列 3 岁儿童假人来测量的。

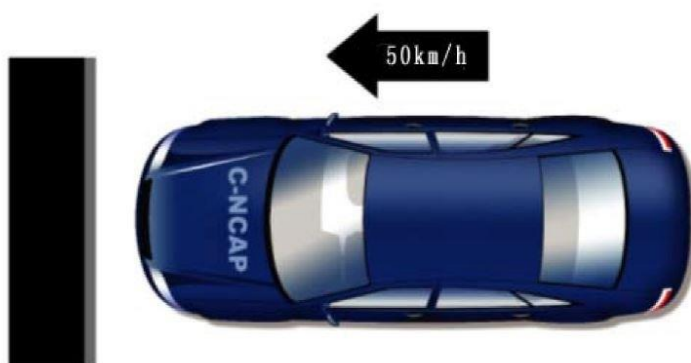


图 1.6 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验

在该碰撞试验中，能够获得的最分数值是 18 分，其中后排女性假人能够得到的最高分是 2 分，头部、颈部、胸部对应的最高分值分别为 0.8 分、0.2 分、1

分。最低分为 0 分。

a. 头部伤害评分

头部伤害最高得分为 0.8 分，最低为 0 分。如果没有发生头部二次碰撞，直接为满分 0.8。如果发生二次碰触，则假人的头部分值需要经过测量相应的指标进行评估，评价指标为头部伤害指数 (HIC_{15})，该指标最高分值也为 0.8 分，使用高性能限值和低性能限值来评估，高性能限值的 HIC_{15} 为 500，低性能限值的 HIC_{15} 为 700，对应 0.8 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

b. 颈部伤害评分

颈部伤害最高分值为 0.2 分，最低为 0 分。如果没有发生头部二次碰撞，评价指标为张力 F_z ，最高分值为 0.2 分。如果发生二次碰触，颈部的评价指标包括剪切力 F_x 、张力 F_z 和伸张弯矩 M_y ，各个指标对应的最高分值都是 0.2 分。对于高性能限值而言，剪切力 F_x 为 1200N，张力 F_z 为 1700N，伸张弯矩 M_y 为 36Nm。对于低性能限值而言，剪切力 F_x 为 1950N，张力 F_z 为 2620N，伸张弯矩 M_y 为 49Nm。对应的得分分别是 0.2 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

c. 胸部伤害评分

胸部得分最高为 1 分，最低为 0 分。其评价指标为胸部压缩变形量。对于高性能限值而言，压缩变形量为 23mm。对于低性能限值而言，压缩变形量为 48mm。对应的分别是 1 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

除了以上的三项评分外，后排女性假人的约束如果出现安全带织带断裂，安全带带扣、调节装置、连接件之一断裂或脱开，卷收器不能正常工作的失效，直接减去 1 分。如果假人骨盆发生单侧下潜，减去 0.5 分。如果发生双侧下潜，减去 1 分。对于假人下潜的判断是通过假人髌骨力来进行分析的。另外，通过车载摄像机的视频数据和安全带腰带力曲线也可以辅助判断。

2) 正面 40% 重叠可变形壁障碰撞试验 (64ODB)

该试验碰撞速度为 64km/h。对于后排乘员伤害程度的评估，是通过放在后排左侧位置的 Hybrid III 型第 5 百分位女性假人来测量的。

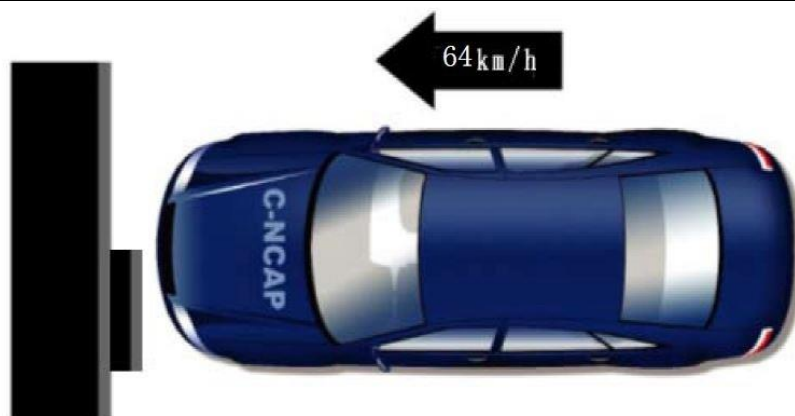


图 1.7 正面 40%重叠可变形壁障碰撞试验

在该碰撞试验中，能够获得的最高分值是 18 分，后排女性假人能够得到的最高分是 2 分，根据女性假人身体部位划分为 2 组，每组最高得分都是 1 分，第 1 组为头颈部，第 2 组为胸部。

a. 头部伤害评分（第 1 组）

该组最高得分为 1 分，最低为 0 分。如果没有发生头部二次碰撞，则头部得分直接为满分 1。如果发生二次碰撞，则假人的头部分值需要经过测量相应的指标进行评估，评价指标为头部伤害指数（HIC15），该指标最高分值也为 1 分，使用高性能限值和低性能限值来评估，高性能限值的 HIC15 为 500，低性能限值的 HIC15 为 700，对应 1 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

b. 颈部伤害评分（第 1 组）

颈部伤害最高分值为 1 分，最低为 0 分。如果没有发生头部二次碰撞，颈部的评价指标为张力 F_z ，最高分值为 1 分。如果发生二次碰撞，颈部的评价指标包括剪切力 F_x 、张力 F_z 和伸张弯矩 M_y ，对应的最高分值都是 1 分。对于高性能限值而言，剪切力 F_x 为 1200N，张力 F_z 为 1700N，伸张弯矩 M_y 为 36Nm。对于低性能限值而言，剪切力 F_x 为 1950N，张力 F_z 为 2620N，伸张弯矩 M_y 为 49Nm。对应的得分分别是 1 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

c. 胸部伤害评分（第 2 组）

胸部得分最高为 1 分，最低为 0 分。其评价指标为胸部压缩变形量。对于高性能限值而言，压缩变形量为 23mm。对于低性能限值而言，压缩变形量为 48mm。对应 1 分和 0 分，如果位于两者中间，就采用线性插值。

除了以上的三项评分外，后排女性假人的约束如果出现安全带织带断裂，安全带带扣、调节装置、连接件之一断裂或脱开，卷收器不能正常工作的失效，直接减去 1 分。如果假人骨盆发生单侧下潜，减去 0.5 分。如果双侧下潜，减去 1 分。对于假人下潜的判断是通过假人髌骨力来进行分析的。此外，通过车载摄像机的视频数据和安全带腰带力曲线也可以辅助判断。

由以上描述可知，在正面 100%重叠刚性壁障碰撞和正面 40%重叠可变形壁障碰撞两种碰撞试验中，C-NCAP 对后排女性假人的评分方式和相关参数的定义方式均一致，只是分数分配不同。相对于 50km/h，64km/h 更难拿高分，如表 1.3 所示。

表 1.3 后排女性假人评分指标

评价指标	50km/h完全正面碰撞			64km/h偏置碰撞		
	高限值	低限值	得分	高限值	低限值	得分
头部伤害 (HIC15)	500	700	0.8	500	700	1
颈部剪切力 (F_x)	1200N	1950	0.2	1200N	1950N	
颈部张力 (F_z)	1700N	2620		1700N	2620N	
颈部伸张弯矩 (M_y)	36Nm	49Nm		36Nm	49Nm	
胸部压缩量	23mm	48mm	1	23mm	48mm	1

1.3.2.2 C-NCAP 后排得分统计分析

本小节统计了 C-NCAP 官方目前已经公布的 41 辆试验车辆的后排乘员约束系统配置情况。后排约束系统并不像前排有用于正面碰撞保护的安全气囊装置。由于后排结构限制导致比较难以布置其他特征及装置，主要依靠安全带和座椅进行约束。从安全带配置情况来看，如表 1.4 所示，针对 2015 版 C-NCAP 后排配备预紧和限力安全带的占总量的 23%，单独使用限力的分别为 41%，2015 版使用普通三点式安全带为 32%。总体来说，后排相对前排而言，预紧和限力安全带的配置还是远远低于前排的 98%的。可见，后排的约束系统情况还是明显低于前排。

表 1.4 C-NCAP 试验车辆安全带配置情况

安全带配置	2015 C-NCAP	
	后排使用率 (%)	前排使用率 (%)
普通三点安全带	32	0
预紧+限力	27	98
仅限力装置	41	0
仅预紧装置	0	2

同时，统计了 C-NCAP 官方现已经公布的 2015 版后排 Hybrid III 5%女性假人的平均得分情况，如表 1.5 所示。正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验 (50FF) 中，后排头部平均得分 0.78，得分率 97.5%，颈部平均得分 0.09，得分率 45%，胸部平均得分 0.48，得分率 48%，该试验项目总平均分 1.35，得分率 67.5%。正面 40%重叠可变形壁障试验(64ODB)中，后排头颈部平均得分 0.4，得分率 40%，

胸部平均得分 0.56，得分率 56%，该试验项目总平均分 0.96，得分率 48%。侧面可变形移动壁障碰撞试验（侧面 MDB）中，后排头颈部平均得分 0.97，得分率 97%，胸部平均得分 0.96，得分率 96%，该试验项目总平均分 1.94，得分率 97%。

表 1.5 2015 C-NCAP 试验车辆后排平均得分情况

50FF	头部	颈部	胸部	总分
	0.78	0.09	0.48	1.35
64ODB	头颈部		胸部	总分
	0.4		0.56	0.96
MDB	头颈部		胸部	总分
	0.97		0.96	1.94

如以上统计结果所示，MDB 的试验得分率高，平均分均接近满分，但正面 100%重叠刚性壁障试验（50FF）和正面 40%重叠可变形壁障试验（64ODB）得分情况较低，特别是 40%ODB 平均得分率没有过半。在 50FF 碰撞工况中，颈部和胸部失分较多。64ODB 的碰撞工况中，由于头颈部是合在一起进行评价得分的，大部分车型头部时未发生二次碰撞的，即 64ODB 工况实际主要失分也是来自颈部和胸部。

另，对得分情况与安全带配置情况进行了对比分析，如图 1.8 所示。结果表明，即使采用限力或者同时采用预紧和限力安全带，虽然可以有效降低颈部和胸部伤害，提高得分，但也无法像侧面 MDB 碰撞那样取得满分或接近满分。还是有不小的提升优化空间。

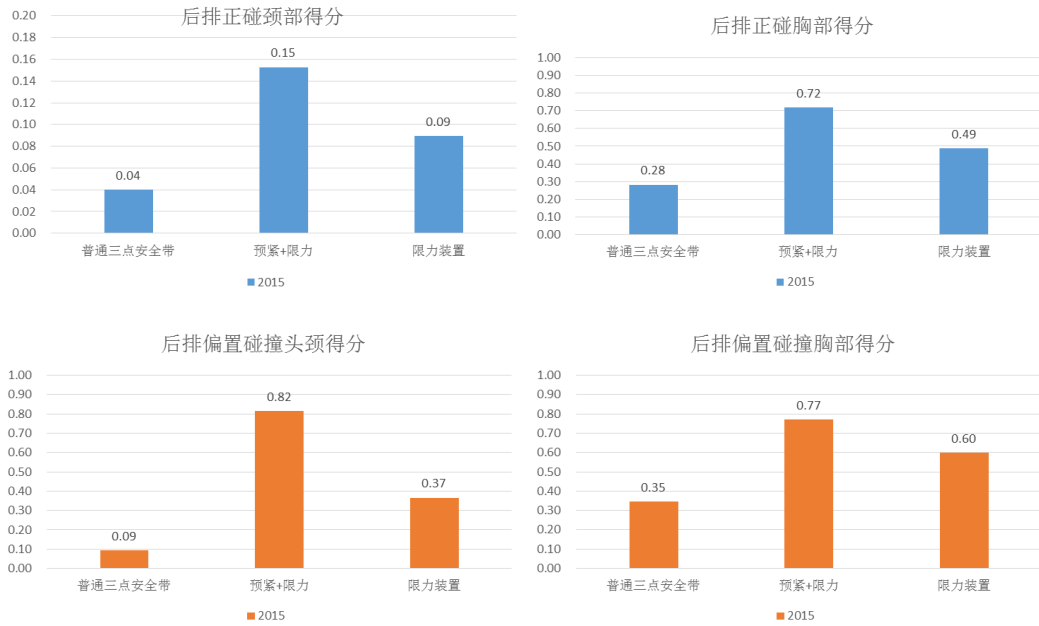


图 1.8 后排颈部和胸部平均得分与安全带配置关系

通过以上 C-NCAP 官方已公布的得分进行统计分析，表明后排的正面碰撞分值普遍较低，即正面 100%重叠刚性壁障碰撞（50FF）和正面 40%重叠可变形壁障碰撞（64ODB）两种工况，大部分失分为后排乘员胸部压缩量和颈部张力 F_z 伤害指标。为降低后排乘员伤害和提高得分，本文就正面 100%重叠刚性碰撞和正面 40%ODB 这两种碰撞工况下如何优化颈部和胸部进行展开研究。

1.4 主要研究内容和技术路线

本文基于 2015 版 C-NCAP 评价规程，就 50FF 和 64ODB 这两种碰撞工况下如何优化颈部和胸部得分进行展开研究及兼顾头部的优化，尝试建立理论的后排约束系统的设计指导原则。然后，基于具体以某车型为载体进行完整的系统开发，验证后排约束系统设计原则的有效性及其开发过程优化方案的总结。主要包括如下：

(1) 通过查阅相关文献，了解国内外汽车后排约束系统的现状，介绍本文课题的研究背景及意义，明确本文的主要研究内容。

(2) 通过 C-NCAP 官方已公布的得分进行统计分析，表明后排的正面碰撞的得分普遍较低，即正面 100%重叠刚性壁障碰撞（50FF）和正面 40%重叠可变形壁障碰撞（64ODB）两种工况，主要失分为胸部压缩量和颈部张力 F_z 伤害指标。

(3) 基于 2015 版 C-NCAP 评价规程对后排的要求，对 50FF 和 64ODB 工况下的颈部伤害指标 F_z 、胸部伤害指标压缩量以及髌骨力进行了动力学分析，建立简化动力学方程，得出后排女性假人的理想运动姿态。结合后排乘员约束系统的

配置，建立理想运动姿态与约束系统之间的关联性。初步建立理论的后排约束系统的设计指导原则。

(4) 针对具体某车型 50FF 和 64ODB 两种工况进行了基础实车碰撞数据分析，建立了 MADYMO 碰撞系统动力学仿真模型。根据建立的后排约束系统的设计指导原则进行了仿真优化，提出了 5 种具体优化方案。

(5) 经过滑车验证和结果分析，最终锁定一组优化方案进行了实车碰撞。验证了后排约束系统设计原则的有效性和针对开发过程具体优化方案进行了总结。技术路线如图 1.9 所示。

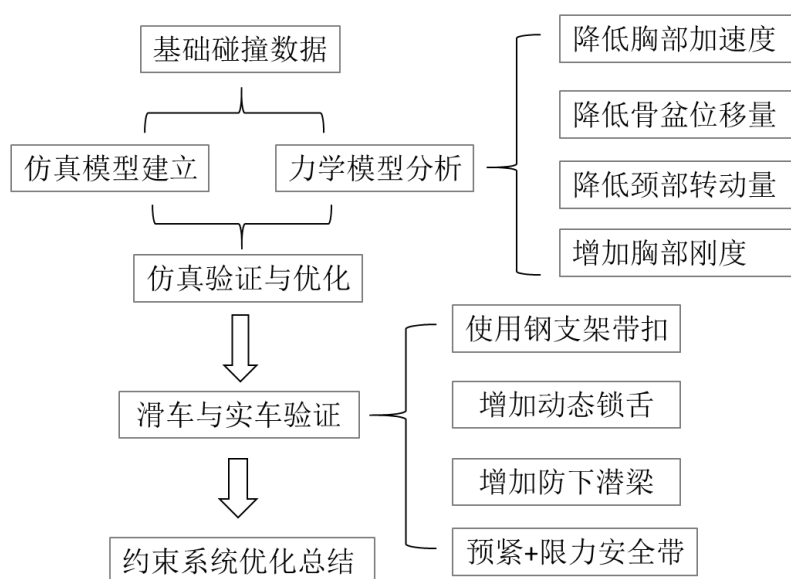


图 1.9 技术路线框图

1.5 本章小结

本章首先介绍了本课题研究的背景和意义，然后针对后排约束系统的研究现状以及 C-NCAP 的评分体系进行了汇总分析，提出本文课题具体研究目标，旨在优化后排约束系统的颈部和头部得分。最后，梳理出本文主要研究的内容和技术路线。

第2章 后排约束系统设计方案的建模及验证

本章基于国内某乘用车进行正面 100% 重叠刚性壁障碰撞(50FF)和正面 40% 重叠可变形壁障碰撞(64ODB)碰撞,得到后排乘员主要失分项。然后,在 MADYMO 环境下建立约束系统仿真模型,并与实车碰撞试验数据进行对比,验证仿真模型。

2.1 正面碰撞基础试验

如表 2.1 所示,是国内某乘用车基于 C-NCAP 的 50FF 和 64ODB 碰撞两种工况下的实车碰撞试验的得分,50FF 和 64ODB 得分分别为 0.64 分和 0 分,总分为 0.64 分,远低于满分 4 分。下面就分别对两种工况的试验和得分情况进行分析。该车型后排采用的是高限力等级安全带。

表 2.1 基础试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015		备注
			F _{x+} (N)	F _{x-} (N)	F _z (N)	M _{ocv} (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础试验	50FF	440		1514	2708	53.2	39.5	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	585		1311	2845	68.2	40.3	-0.5	0		左侧肋骨力超标

备注: 红色填充为超过低性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

1) 正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验 (50FF)

试验前后及过程中未出现安全带织带断裂、安全带带扣、调节装置、连接件断裂或脱开或卷收器不能正常工作的失效。试验前和试验后假人整体姿态如图 2.1 和图 2.2 所示。



图 2.1 50FF 碰撞工况试验前假人整体姿态

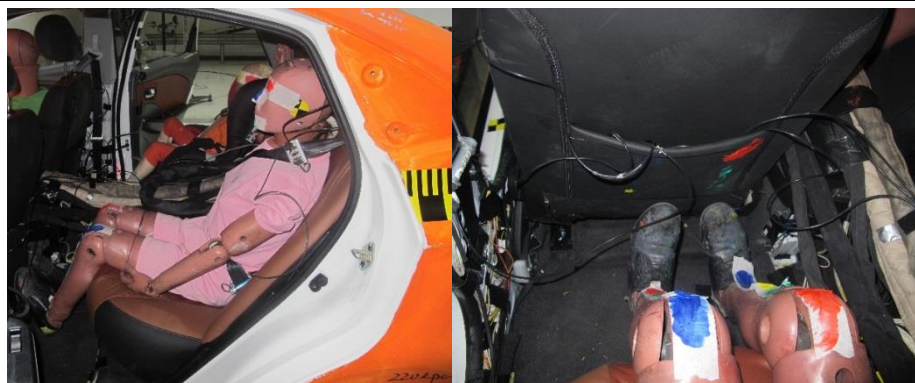


图 2.2 50FF 碰撞工况试验后假人整体姿态

根据试验录像观察，在 50FF 碰撞工况下后排女性假人头部均没有发生二次接触如图 2.3 所示，因此头部可直接获得 0.8 分。



图 2.3 50FF 碰撞工况的假人头部姿态

对于颈部由于头部未发生二次碰撞，仅考虑颈部张力 F_z ，值为 2708N，超过了 C-NCAP 规定的最低限值，颈部得分为 0 分。胸部压缩变形量为 39.5mm，采用线性插值计算得出 0.34 分。

此外根据实验录像和左侧肋骨力分析，假人存在下潜现象，扣 0.5 分。最终 50FF 基础碰撞试验得分为 0.64 分。50FF 碰撞工况下颈部张力与胸部压缩量曲线，如图 2.4 所示。

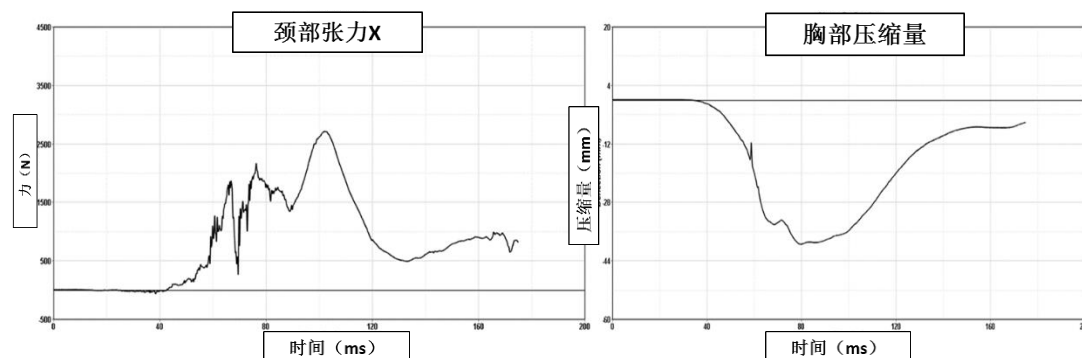


图 2.4 50FF 颈部张力与胸部压缩量曲线

50FF 碰撞工况下的左右髌骨力曲线，如图 2.5 所示。

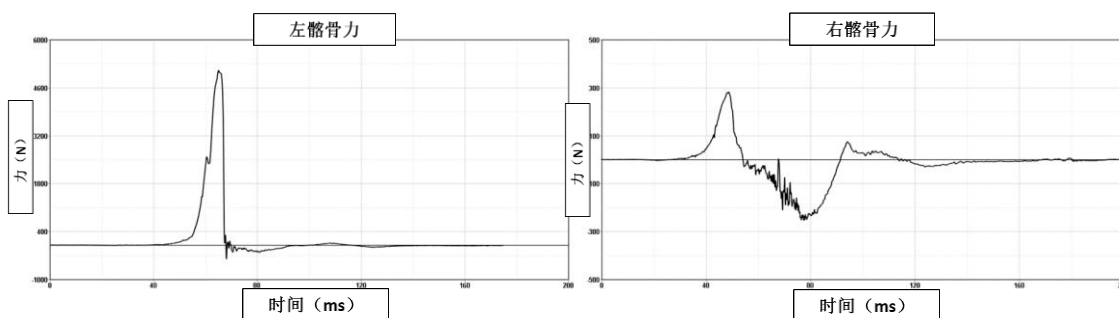


图 2.5 50FF 髌骨力曲线

初步分析，由于假人向前滑动较多，造成颈部张力超标。可能座椅骨盆前端的刚度不够，导致支撑较小，致使假人发生下潜，引起了安全带滑落到腹部导致胸部压缩量较大，是失分的主要原因。针对基础试验 50FF，需要解决颈部张力、胸部压缩变形量及髌骨力超标即假人盆骨发生下潜的问题。

2) 正面 40%可变形壁障碰撞试验（64ODB）

试验前后及过程中并未出现安全带织带断裂，安全带带扣、调节装置、连接件断裂或脱开或卷收器不能正常工作的失效。64ODB 碰撞工况试验前后排 Hybrid III 型 5% 女性假人试验前和试验后假人姿态如图 2.6 和图 2.7 所示。

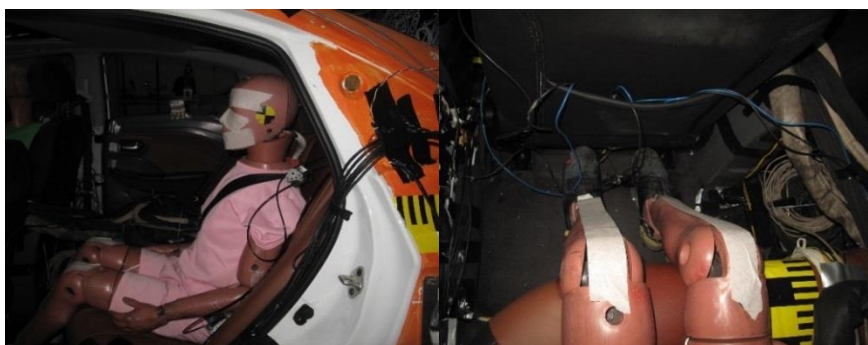


图 2.6 64ODB 碰撞工况试验前假人整体姿态

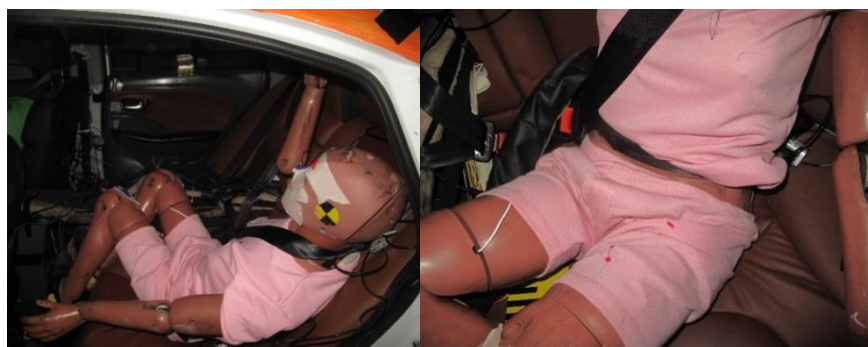


图 2.7 64ODB 碰撞工况试验后假人整体姿态



图 2.8 64ODB 碰撞工况的假人头部姿态

对于颈部由于头部未发生二次碰撞，如图 2.8 所示。由于颈部张力 F_z 超标，头颈部合计得分为 0 分，胸部压缩变形量为 40.3mm，采用先线性插值计算得出 0.3 分。

此外根据实验录像和左侧髌骨力分析，假人存在下潜现象，扣 0.5 分，试验最后得分为 0 分。64ODB 碰撞工况下颈部张力与胸部压缩量曲线，如图 2.9 所示。

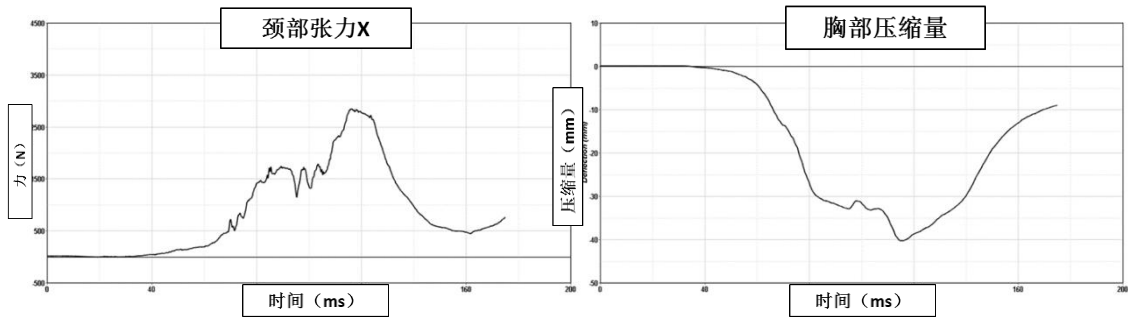


图 2.9 64ODB 颈部张力与胸部压缩量曲线

64ODB 碰撞工况下的左右髌骨力曲线，如图 2.10 所示。

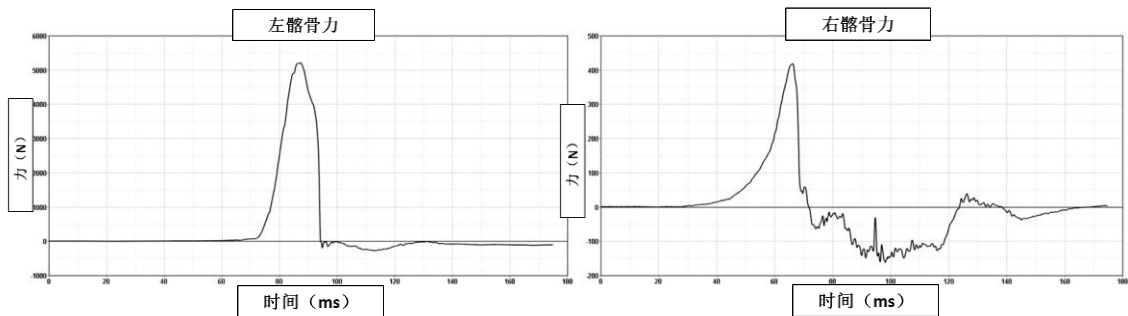


图 2.10 64ODB 髌骨力曲线

初步分析，可能由于座椅骨盆前端的刚度不够，导致支撑较小，引起假人向前滑动较多，假人发生下潜，安全带滑落到腹部导致胸部压缩量较大。颈部张力 F_z 超过临界值，头颈部得分为 0 分，是失分的主要原因。针对基础试验 64ODB，

需要解决颈部张力、胸部压缩变形量及髌骨力超标即假人盆骨发生下潜的问题。

以上试验结果表明，在 50FF 和 64ODB 两种工况下的基础实车主要失分集中在颈部和胸部及假人发生下潜。特别是 64ODB 出现了 0 分的情况。需要对颈部和胸部进行优化，以及考虑如何防止假人发生下潜。

2.2 仿真基础理论

本课题研究的碰撞动力学内容以及使用的 MADYMO 软件是基于有限元理论和多体动力学理论进行的^{[22][23][24]}。有限元计算的基本思路是物体离散化，在实际划分中，需要根据分析目标及应用场合综合权衡网格划分的方法，做到在已有的硬件资源下得到尽可能有价值的分析结果^[25]。

对于汽车碰撞仿真而言，由于相关车身结构多为钣金件，所以在壳体单元、实体单元和梁单元中，壳体单元能够有效地描述其变形特性。汽车碰撞属于高速碰撞，研究此类工况的方法一般有三种。欧拉法在流体力学分析中比较常见，在固体动力学分析中用得较少；ALE 法能够很好地用于研究固体和流体之间相互作用的研究，适用于高速碰撞的分析，但是由于其理论结构和算法机理都比较复杂，在具体分析中比较繁琐复杂；对于拉格朗日方法而言，同样能够很好地处理高速碰撞问题，而且在定义复杂的约束和加载条件以及材料本构关系的精确匹配时较为简便。由此，拉格朗日方法是当前固体高速碰撞研究领域中最成熟的方法^{[26][27]}。

广义的多体系统是对某一类客观事物的高速抽象，这一类系统可以描述为一系列“体”通过一定的“铰链”连接起来相互作用，并施加外力，最终形成一个能够实现某种功能的多体系统，这一系列体可以是刚性体也可以是柔性体，基于这一系统内体的类型可以将多体系统分为多刚体系统、多柔体系统以及刚柔耦合系统^{[28][29][30]}。碰撞分析多采用多刚体进行分析。

2.3 仿真模型的建立

MADYMO 软件结合了多刚体动力学以及有限元计算方法，在仿真优化、损伤预测、生物学损伤机理研究以及事故现场还原等领域应用十分普遍。本章仿真是在 MADYMO V7.3 环境中进行的。

2.3.1 整车模型的建立

根据已有的车型 CAD 数模建立 MADYMO 模型，主要包括多体模型、地板

同济大学 硕士学位论文 基于 2015 版 C-NCAP 后排 Hybrid III 型 5% 假人的约束系统优化分析模型。在实车碰撞过程中没有发现后排假人与车顶碰触，该模型中不含车顶。要建立的模型主要包括车身、前后排座椅、地毯和安全带模型等，如图 2.11 所示。

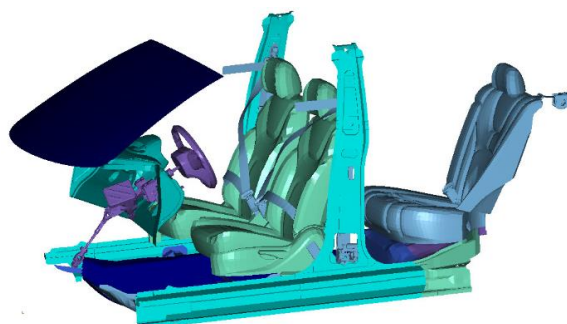


图 2.11 CAD 模型

2.3.2 座椅特性定义及假人模型加载

座椅模型是 MADYMO 软件中的多刚体模型，根据 CAD 模型创建了形状和位置信息，并进行相应处理。根据实际车型的配置情况，对座椅固定装置、座椅调节装置、靠背以及头枕的刚度进行具体定义，并加载坐垫刚度曲线。

本课题使用的是 Hybrid III 型 5% 女性椭圆假人。对假人与车体的相互作用进行定义，定义假人的脚部和地板接触，臀部与坐垫接触，背部与座椅靠背接触等。并且定义各接触区域的摩擦系数和阻尼系数，如图 2.12 所示。

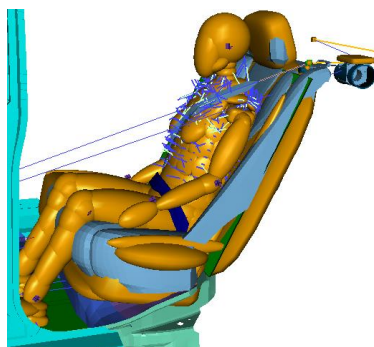


图 2.12 MADYMO 后排假人模型

2.3.3 安全带特性定义

对于后排安全系统而言，安全带是十分关键的配置结构，本节对安全带模型进行定义。安全带为三点式安全带，将与人体接触的区域使用有限元建模，对没有接触的部分使用多刚体模型。此外，考虑到在碰撞瞬间织带会有伸长变形的影响，对织带材料也进行了定义。在软件中的具体参数设置，如图 2.13 所示。



图 2.13 MADYMO 后排假人安全带约束定义

2.3.4 模型 Pulse 加载

该系统模型采用 6 自由度的 Motion，加载参数如图 2.14 所示。

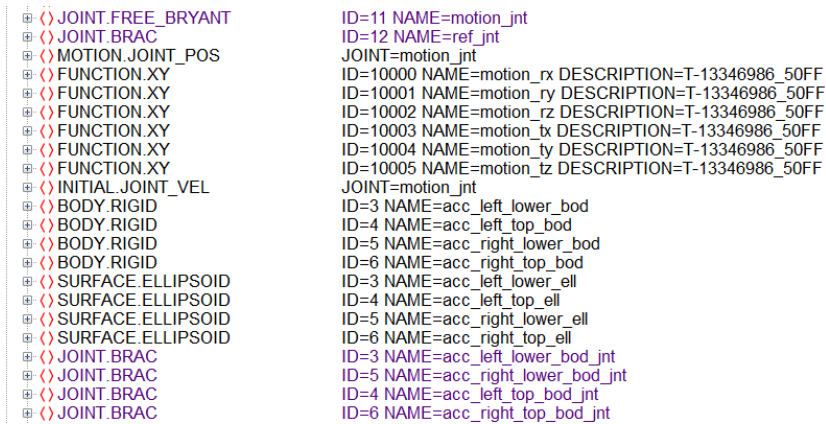


图 2.14 MADYMO 模型 Pulse 加载参数

以实车碰撞测量的 50FF 和 64ODB 碰撞 B 柱加速度响应作为模型输入，得到初始的仿真模型。50FF 和 64ODB 碰撞 B 柱加速度曲线如图 2.15 和 2.16 所示。MADYMO 环境下的仿真模型，如图 2.17 所示。

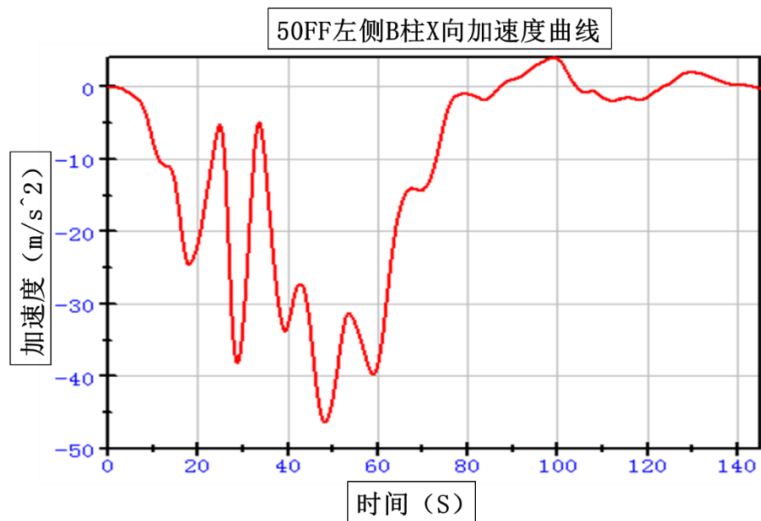


图 2.15 50FF 左侧 B 柱 X 向加速度曲线

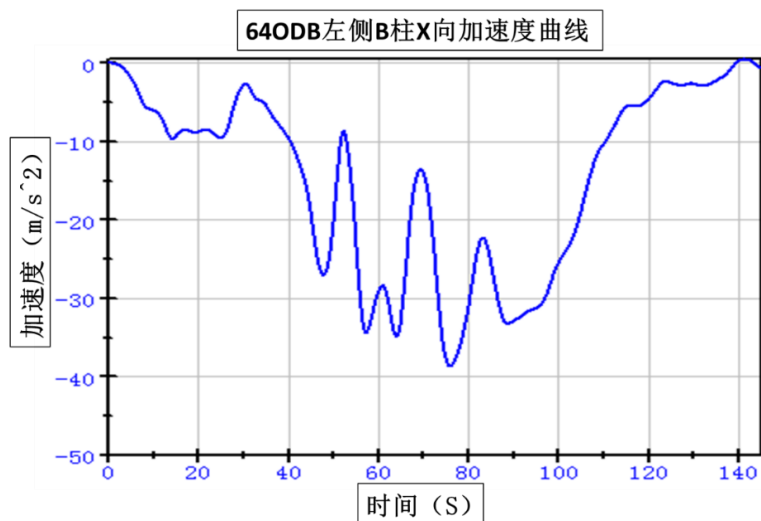


图 2.16 640DB 左侧 B 柱 X 向加速度曲线

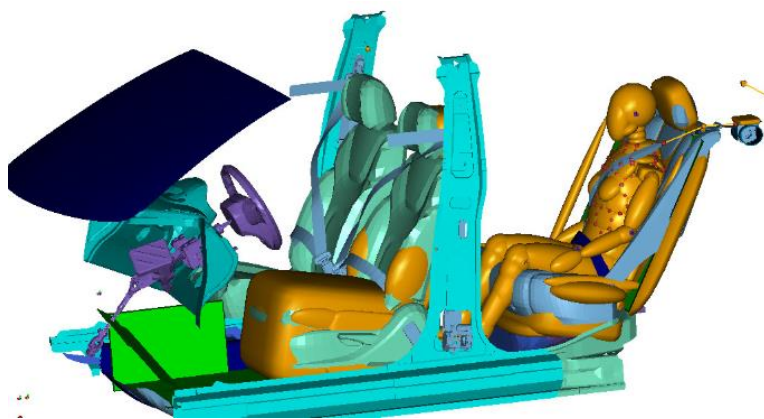


图 2.17 MADYMO 环境的碰撞仿真模型

2.3.5 模型验证

为了保证仿真模型的有效性，仿真根据实车（约束系统配置与仿真的相同）50 FF 和 64 ODB 的试验数据对基础的 CAE 模型进行了调整和精度的提高，此模型作为约束系统优化的基础仿真模型。

在本课题汽车碰撞仿真调整中，首先，通过调整假人和座椅的摩擦系数，接触刚度信息，以及对限力器大小、膝盖接触时间进行了分析；然后对安全带受力以及大腿处受力进行分析，具体包括受力起始点、形状、接触时间、峰值时间以及脉宽等；最后，进行头部、胸部、臀部加速度分析比对，分析参数具体包括形状、峰值位置和时间、脉宽以及 HIC 值等。

1) 正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验（50FF）

50FF 碰撞工况的头部 X、Y、Z 向及合成加速度曲线，如图 2.18 所示。

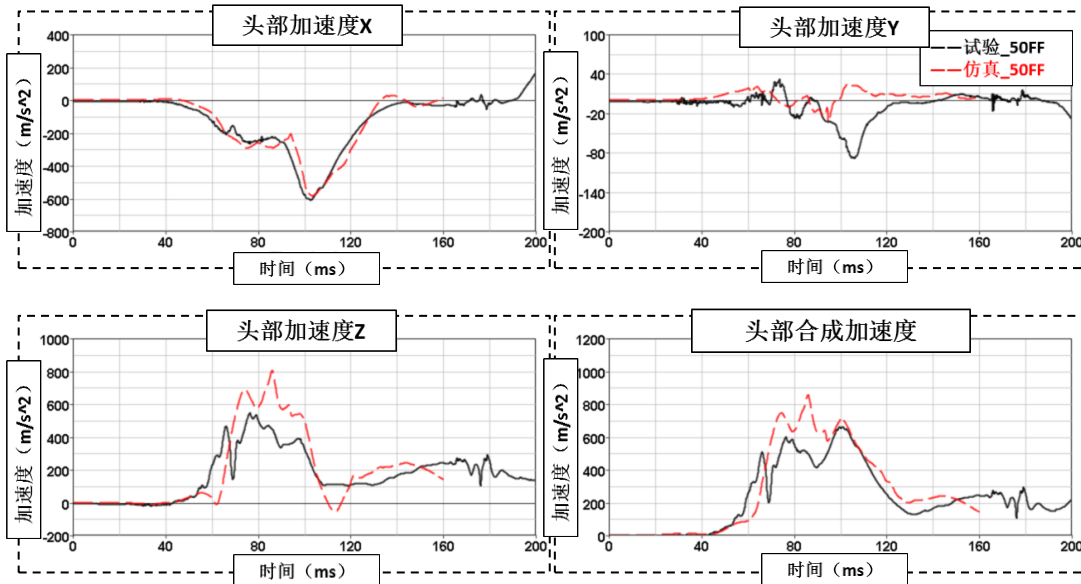


图 2.18 头部加速度仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况的胸部 X、Y、Z 向加速度及合成加速度曲线，如图 2.19 所示。

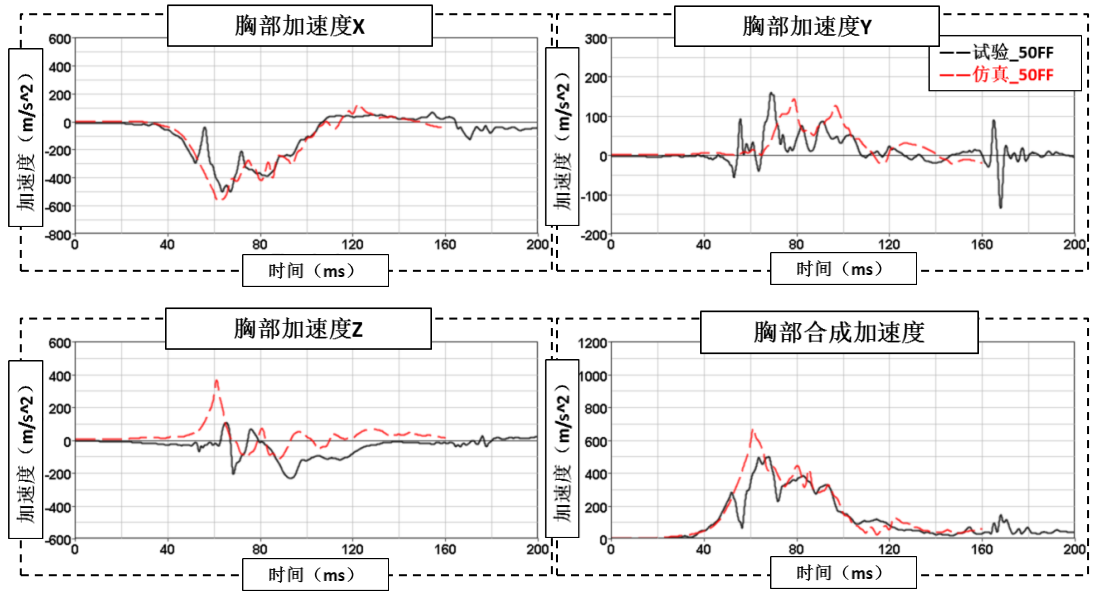


图 2.19 胸部加速度仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况的胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩曲线，如图 2.20 所示。

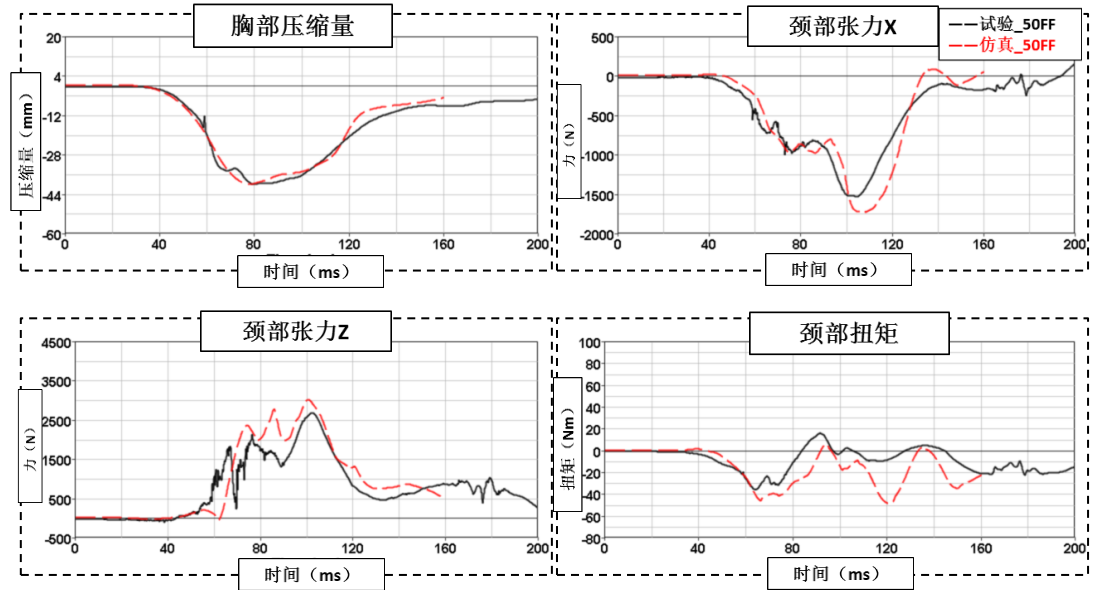


图 2.20 胸部压缩量与颈部受力仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况的肩带力和腰带力曲线，试验的腰带力曲线由于传感器有异常，40ms-80ms 区间不正确，如图 2.21 所示。

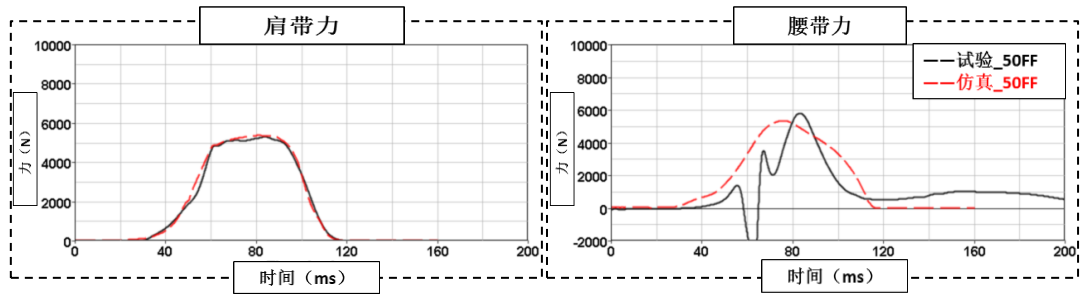


图 2.21 肩带力和腰带力仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况的骨盆 X、Y、Z 向及合成加速度曲线，如图 2.22 所示。在基础实车试验时骨盆加速度传感器存在异常，曲线失真。

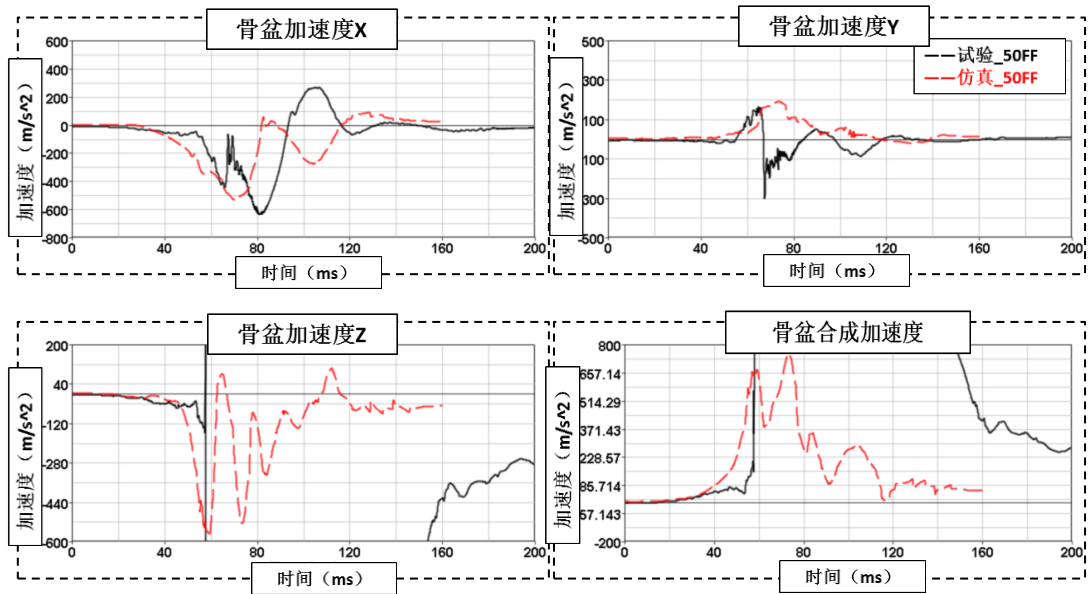


图 2.22 骨盆加速度仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况的左右髌骨力曲线，如图 2.23 所示。

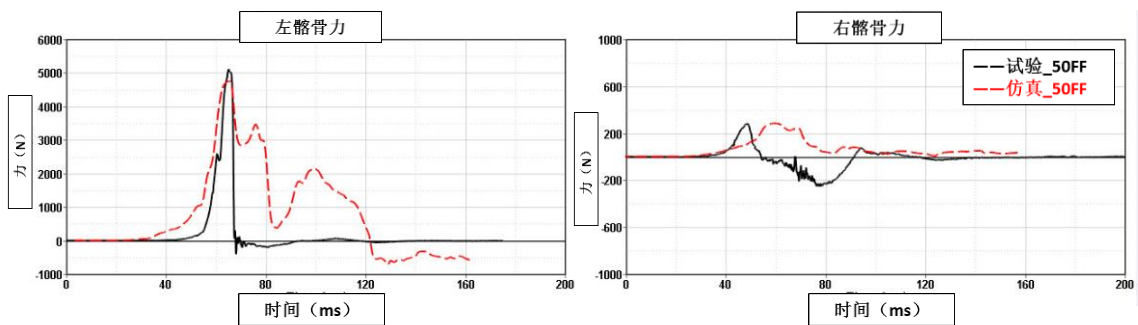


图 2.23 髌骨力仿真与试验对比曲线

50FF 碰撞工况在 76ms 时的试验假人和仿真模型中假人运动姿态对比，如图 2.24 所示。

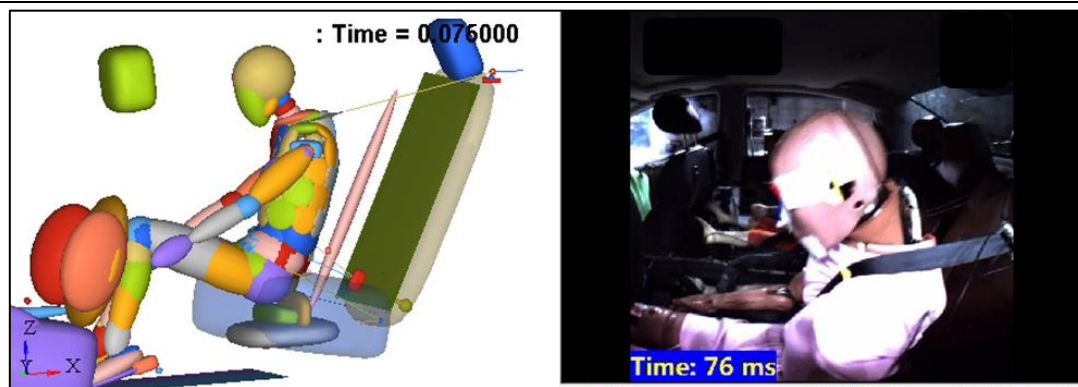


图 2.24 76ms 试验动画与仿真模型对比

2) 正面 40% 重叠可变形壁障碰撞试验 (64ODB)

64ODB 碰撞工况的头部 X、Y、Z 向加速度及合成加速度曲线，如图 2.25 所示。

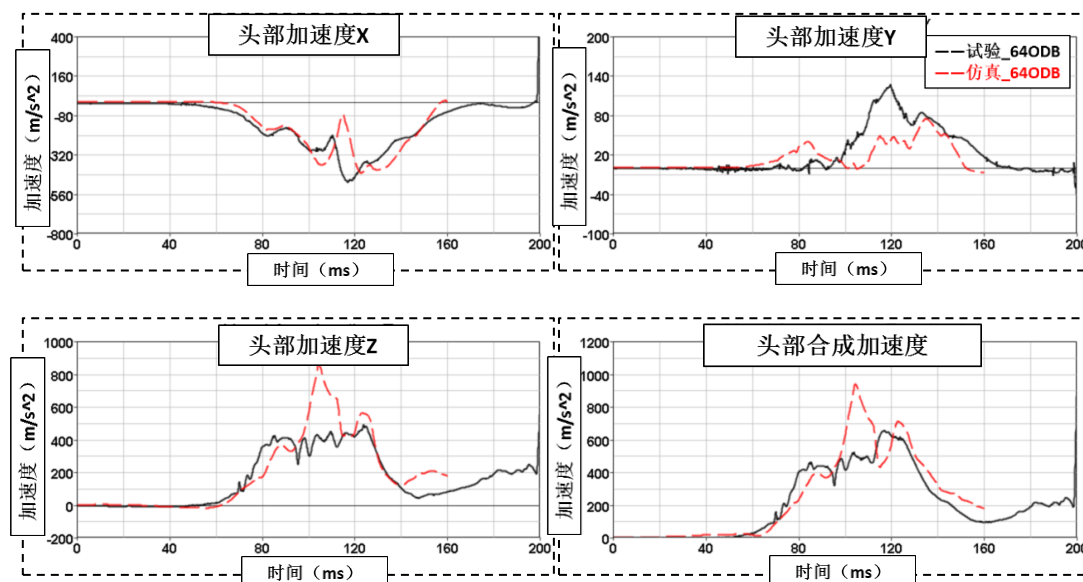


图 2.25 头部加速度仿真与试验对比曲线

64ODB 碰撞工况的胸部 X、Y、Z 向加速度及合成加速度曲线，如图 2.26 所示。

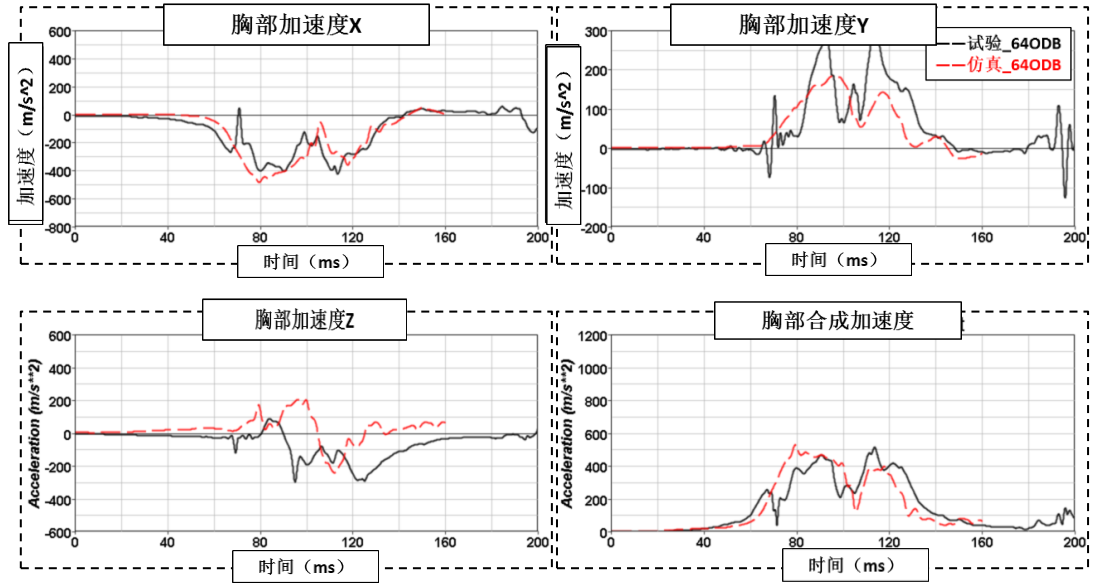


图 2.26 胸部加速度仿真与试验对比曲线

640DB 碰撞工况的胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩曲线，如图 2.27 所示。

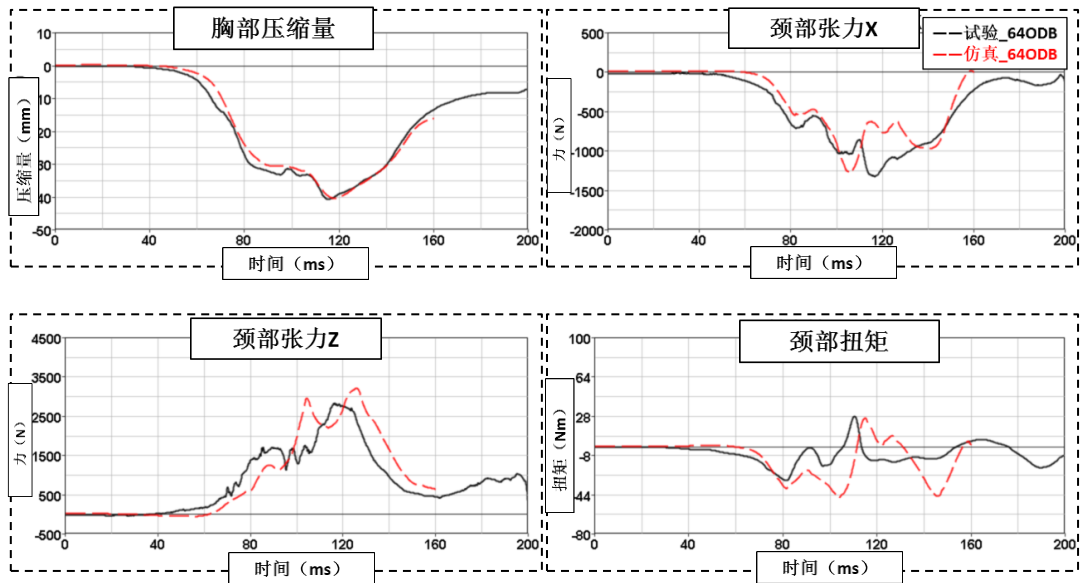


图 2.27 胸部压缩量与颈部受力仿真与试验对比曲线

640DB 碰撞工况的肩带力和腰带力曲线，如图 2.28 所示。

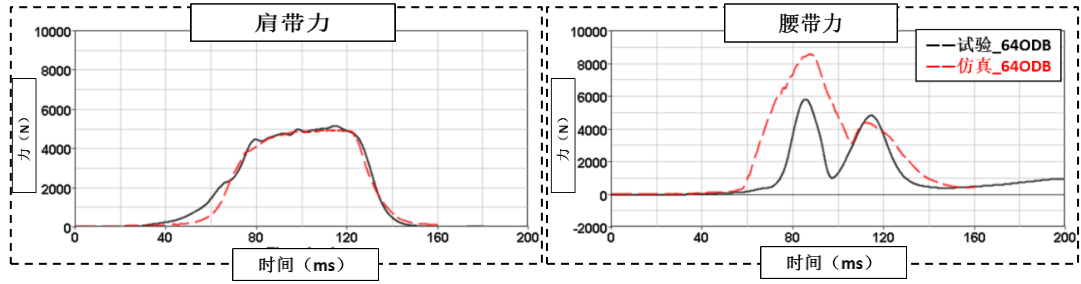


图 2.28 肩带力和腰带力仿真与试验对比曲线

640DB 碰撞工况的骨盆 X、Y、Z 向及合成加速度曲线，如图 2.29 所示。在基础实车试验时骨盆加速度传感器存在异常，故曲线失真。

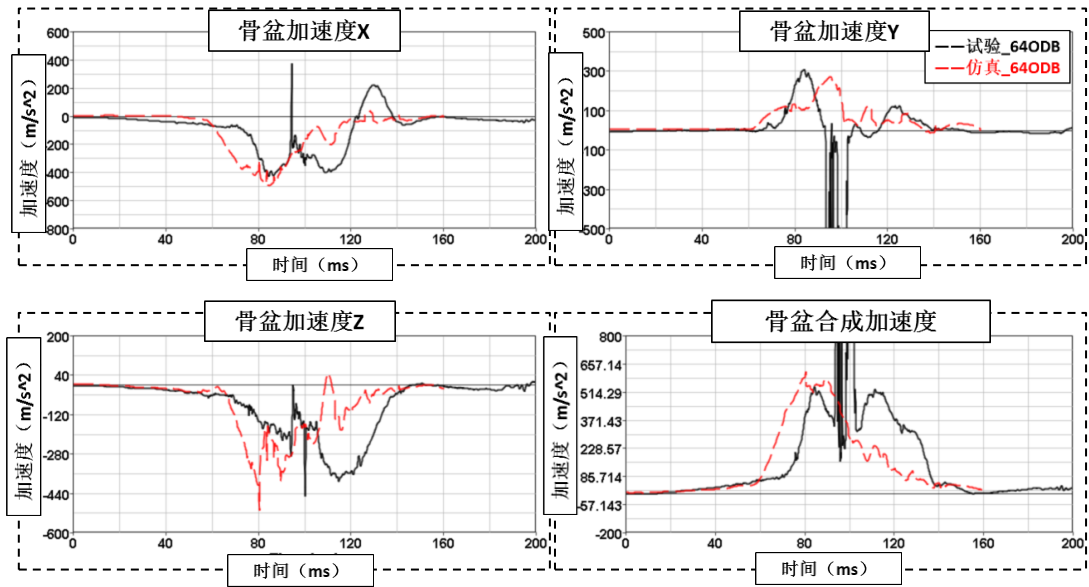


图 2.29 骨盆加速度仿真与试验对比曲线

640DB 碰撞工况的左右髌骨力曲线，如图 2.30 所示。

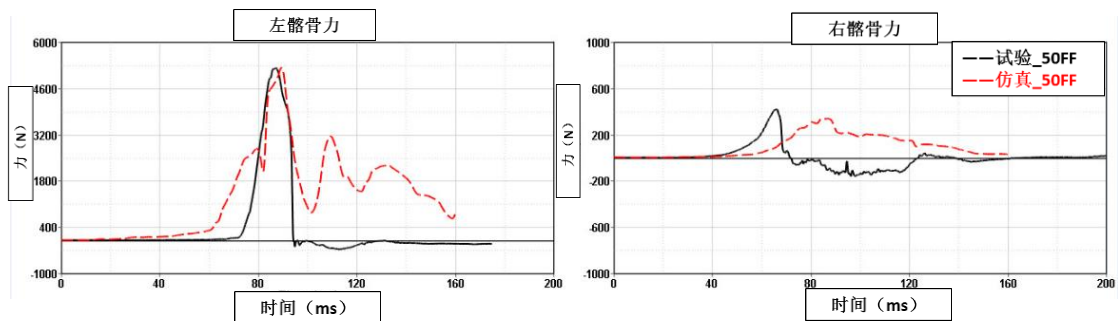


图 2.30 髌骨力仿真与试验对比曲线

640DB 碰撞工况在 79ms 时的试验假人和仿真模型中假人运动姿态对比，如图 2.31 所示。

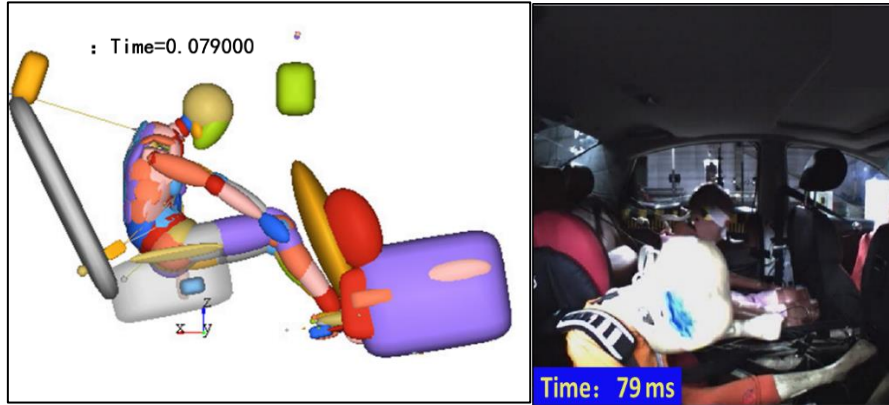


图 2.31 79ms 试验录像与仿真模型对比

以上是 MADYMO 模型的假人伤害响应曲线和实车碰撞试验数据对比, 仿真动画和试验视频中假人姿态接近, 仿真和试验各指标的形状、起始点、峰值、峰值时间及脉宽等接近, 在部分区域仍有一定的偏差^{[31][32][33]}。基于在仿真和试验数据, 对 2 种工况下的标定数据进行 C-NCAP 评分, 整理如表 2.2 和 2.3 所示。

表 2.2 50FF 碰撞仿真和试验假人伤害值对比

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髌骨力 罚分	C-NCAP 2015 得分	备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)				
C-NCAP	50FF	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2	
基础试验	50FF	440		1514	2708	53.2	39.5	-0.5	0.64	左侧髌骨力超标
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	左侧髌骨力超标

备注: 表中红色填充数值为超过低性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

表 2.3 64ODB 碰撞仿真和试验假人伤害值对比

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髌骨力 罚分	C-NCAP 2015 得分	备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)				
C-NCAP	64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2	
基础试验	64ODB	585		1311	2845	68.2	40.3	-0.5	0	左侧髌骨力超标
基础模型	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0	左侧髌骨力超标

备注: 红色填充为超过低性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

从表 2.2 和 2.3 的数据能够看出, MADYMO 仿真结果与试验数据相比, 存在一定的偏差, 从假人头部、胸部、盆骨以及大腿骨的伤害指标来看, 误差小于 10%。关键指标与试验结果吻合, 可作为基本模型进行深入研究^[35]。

2.4 本章小结

本章基于某乘用车的基础配置的 50FF 和 64ODB 两种工况下的碰撞试验结果进行分析，试验的主要失分集中在颈部和胸部及假人盆骨发生下潜。特别是 64ODB 出现了 0 分的情况。需要对颈部张力和胸部压缩量进行优化，以及防止假人下潜。

对应的 CAE 模型是根据整车几何模型构建的 MADYMO 约束系统仿真模型，根据实车碰撞试验数据对 CAE 模型进行了调整，验证了模型的准确性和精确性，为后续优化提供了基础的仿真模型。

第3章 后排乘员动力学响应及伤害值影响因素分析

本章通过正面碰撞时后排女性假人运动及动力学研究，分析其伤害来源，明确影响伤害指标的参数或结构特征，据此提出后排约束系统的设计规律，为后排约束系统的设计及优化提供理论指导。然后，基于此设计规律和上一章建立的仿真模型，对约束系统进行了仿真验证。

3.1 后排女性假人碰撞运动及动力学分析

根据 C-NCAP 中乘员伤害指标的评估方法。其中，在 50FF 工况下，如果头部未发生二次碰撞，则头部指标得满分，而如果发生二次碰撞，分值需要重新计算评估，而且此时后排女性假人的伤害程度更大，伤害评价准则也随之对其的评价指标会更严苛，这样得分也会更低。因此，头部二次碰撞是设计中需要极力避免的，实际上在配置 3 点式安全带的车型上 Hybrid III 5 % 女性假人的二次碰触也很少发生。本课题，主要针对未发生头部二次碰撞的情况下，后排假人的颈部和胸部伤害指标以及下潜现象进行研究。

3.1.1 后排女性假人伤害整体动力学分析

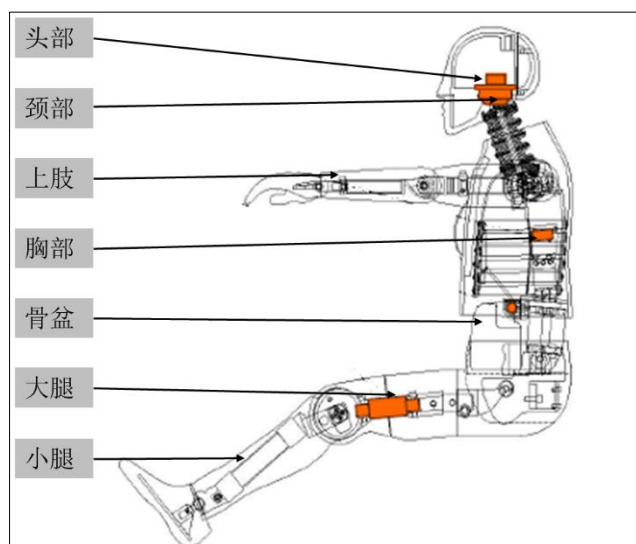


图 3.1 假人结构示意图

根据 Hybrid III 5 % 标准假人结构，可以把假人身体划分为下面几个主要独立模块，具体包括头部，颈部，上肢，胸部，骨盆，大腿和小腿，如图 3.1 所示。

当车辆发生正面碰撞之前，车内假人同车体的速度相同，在汽车发生正面碰撞时，车体本身及后排座椅急剧减速，但是后排的女性假人在惯性作用下，依然保有继续向前运动的趋势，此时就会与后排座椅发生相对运动，在运动过程中，安全带对假人身体产生约束力 F_{belt} ，致使胸部肋骨受到挤压变形，该挤压力是胸部压缩量形成的主要因素^[36]。假人的头部与躯干通过柔性结构相连，在碰撞过程中处于一定的自由状态，只受到颈部的力；颈部作为上躯干和头部的连接部分，由于安全带只作用于上躯干，这会导致上躯干和头部之间运动速度不同而引起相对运动，最终造成假人颈部产生张力 F_z 、剪切力 F_x 和伸张弯矩 M_y ，在 C-NCAP 规定中，若发生二次碰撞，每个指标都需要评估，若不发生，颈部评价指标仅为张力 F_z ；上肢也未受到专门的约束，同样也会在惯性下与胸部出现运动差而产生锁骨力 F_{arm} ；骨盆受到安全带腹带的约束作用和座椅对臀部的摩擦限制作用，会出现骨盆与胸部的运动差而产生的腰椎力 F_{lumbar} 。

3.1.2 头部二次碰撞判断方法研究

C-NCAP 管理评估体系中，对头部二次碰撞进行了明确定义，即头部与车体零部件有接触的痕迹，此外按照 SAE2052 中的第五条款，通过计算头部接触区域负重超过 500N，然后女性假人二次碰撞的情况不在此范围内包含，比如胸部、头部和膝部等。通过此规定可以看出，借用数据处理可以判断出女性假人是否发生二次碰撞，但是还需要基于实验后碰撞区域的核查确认、车载高速摄像机采集的图像数据进行综合判断。一般而言，碰撞过程中如果头部和前排座椅发生二次碰撞，作用点一般为头部上端，而若是与自身发生碰触，作用区域则为头部下部，也就是二次碰撞的方向为 Z 向。所以，如果需要对头部是否发生二次碰撞进行判断，一般计算头部 Z 向受力的数值（是否超过 500N）以及受力方向即可。

当发生碰撞时，后排女性假人头部将受到自身的惯性力、和其他结构（车体或者自身躯干）碰撞产生的外力 F_{oz} 及颈部张力 F_z 。女性假人头部 z 向加速度为 a_z ，头部质量为 m_h ，则惯性力为 $-m_h a_z$ ，根据达朗贝尔原理^[37]，有

$$F_{oz} + F_z + (-m_h a_z) = 0 \quad (3.1)$$

取 $m_h = 3.73 \text{Kg}$ ，则

$$F_{oz} = 3.73 a_z - F_z \quad (3.2)$$

由于头部加速度 a_z 、颈部张力 F_z 可在试验过程中采集得到，因此依据式 (3.2) 可以计算出女性假人头部 z 向所受外力。

基于以上分析可以看出，当发生碰撞时，如果后排女性假人的头部 Z 向力是负值时，说明该外力是通过假人的下颌向上作用导致的，这种碰撞是自身发生的

二次碰撞，并不再 C-NCAP 所定义的二次碰撞范围之内；如果 Z 向受力是正值而且大于 500N 时，这说明头部受到的力来源于头顶外部，而且已经超标，可以认为是发生了二次碰撞；如果 Z 向受力是正值而且小于 500N，那么按照 SAE2052 的定义，就可以分别计算出 X 向何 Y 向所承受的外力，最后可以算出合成头部 x, y, z 三个方向的合力，根据该数值是否大于 500N 来判断是否发生“二次碰撞”，据此进行后面的深入分析。

据统计如果乘员佩戴了三点式安全带，正面碰撞过程中后排乘员与车内零部件发生二次碰撞的概率很低，即 C-NCAP 的评价指标中描述的，Hybrid III 5% 女性假人很少发生二次碰撞接触^[38]。

3.1.3 颈部张力伤害动力学分析

正面碰撞中，后排乘员的颈部不大可能会与车体内其他零部件有碰撞接触，其伤害机理主要是来自处于自由端的头部和被安全带约束的胸部之间具有运动差。颈部在碰撞过程中受力情况如图 3.2 所示。由于本课题是基于未发生二次碰撞的情况进行的，故颈部伤害评估指标仅为张力 F_z 。

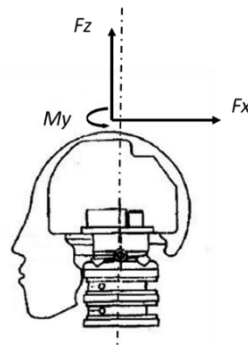


图 3.2 假人颈部受力分析

因此，假人颈部张力 F_z 可以描述为：

$$F_z = m_h \cdot a_z \quad (3.3)$$

其中， F_z 为颈部张力， a_z 为假人头部 z 向加速度， m_h 为 Hybrid III 5% 女性假人头部质量。

如图 3.3 所示，为某车型实车试验正面 100% 重叠刚性壁障碰撞和正面 40% 重叠可变形壁障碰撞两种碰撞的曲线。因为正面 100% 重叠刚性壁障碰撞和正面 40% 重叠可变形壁障碰撞均符合上述规律，本节仅针对正面 100% 重叠刚性壁障碰撞进行分析^[39]。

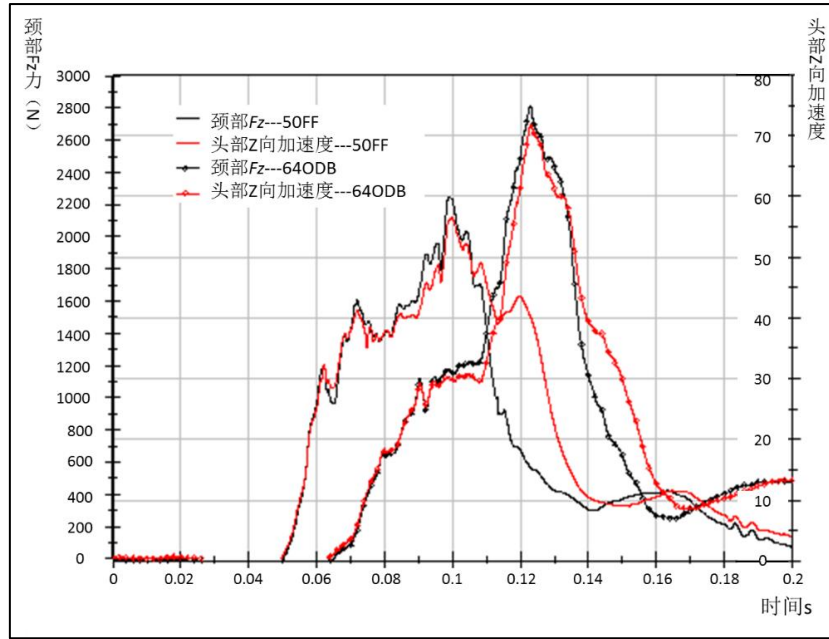


图 3.3 颈部 F_z 与头部 z 向加速度关系

基于假人运动过程的姿态变化，对 F_z 进行力学分析。为了分析便利，本处将后排女性假人胸部和头颈部简化为两个质心^[40]。运动过程可以简化为胸部的平动和头部相对于胸部的转动，颈部也会有一定的弯曲，如图 3.4 所示。由于头部只受到颈部的作用，故将头部作为分析对象，以头部受到的合力作为对 F_z 的评估。

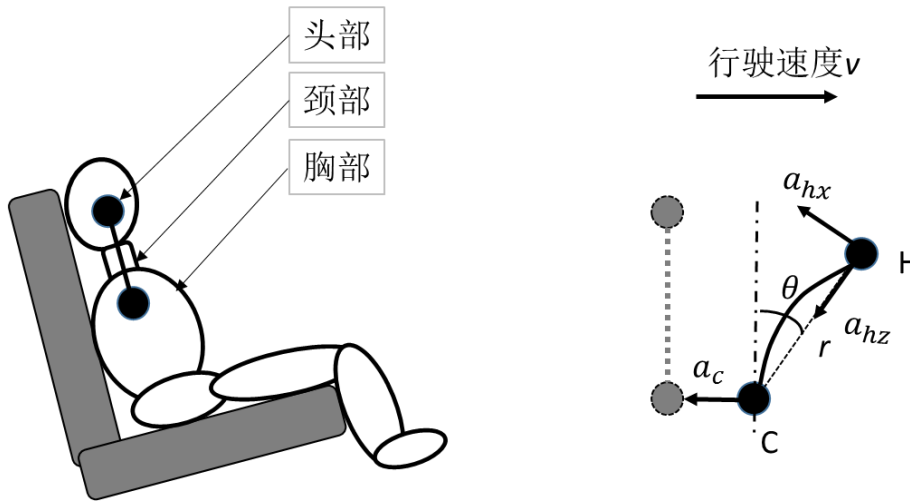


图 3.4 后排乘员头颈部与胸部运动姿态及力学简化模型

其中， H 点为头部质心点， C 为胸部质心点，曲线示意颈部在碰撞过程中的实际姿态， r 为头部质心到胸部质心的直线距离， θ 为头部绕胸部旋转角度。

头部的运动可分为两部分，一是随同基点 C 的平移（牵连运动），二是绕基点 C 的转动（相对运动）。于是， H 的运动也由两个运动合成，它的加速度通过加速度合成定理计算得出。由于牵连运动为平移， H 点的绝对加速度为牵连加速

度和相对加速度的矢量和^[41]。

H 点的牵连加速度等于基点 C 的加速度 a_c ，H 点的相对加速度 a_{hc} 为该点绕基点 C 转动的加速度，能够分为法向加速度和切向加速度两部分。因此，能够得到 H 点的加速度矢量合成公式

$$a_h = a_c + a_{hx} + a_{hz} \quad (3.4)$$

其中， a_c 为胸部质心加速度， a_{hx} 为头部相对于 C 的切向加速度， a_{hz} 为头部相对于 C 的法向加速度。

a_{hx} 方向与 HC 垂直，大小为

$$a_{hx} = r\ddot{\theta} \quad (3.5)$$

a_{hz} 方向指向基点 C，大小为

$$a_{hz} = r\dot{\theta}^2 \quad (3.6)$$

将式 (3.5) 和 (3.6) 代入 (3.4)，即可得出头部加速度为

$$a_h = a_c + r\ddot{\theta} + r\dot{\theta}^2 \quad (3.7)$$

由牛顿第二定律，可得到颈部张力

$$F_z = m_h a_h = m_h a_c + m_h r\ddot{\theta} + m_h r\dot{\theta}^2 \quad (3.8)$$

根据 F_z 等效计算公式可以得知， F_z 主要来源于胸部加速度、颈部转动量（转动角速度和角加速度）。

一般而言，胸部加速度主要由安全带约束所致，而安全带的约束力由安全带织带力和其所呈夹角 α_{SB} 共同决定，如图 3.5 所示。安全系统开发中，可通过降低织带力和提供较大的安全带夹角来实现胸部加速度的降低。此外，由于骨盆与胸部相连，假人下潜也会导致胸部加速度增加，考虑限制假人下潜以限制骨盆移动也是设计中需要考虑的一个因素。

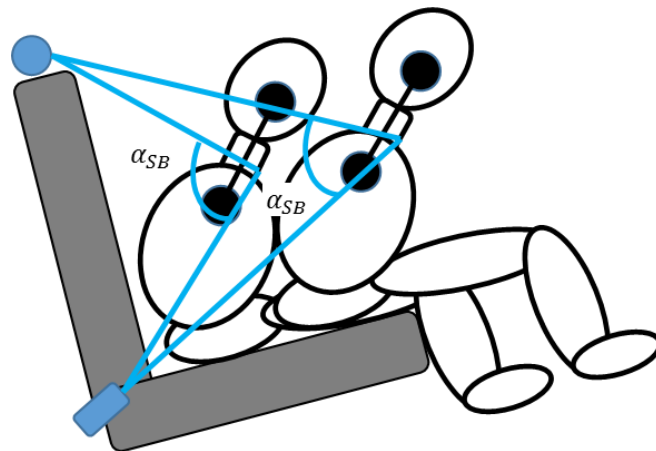


图 3.5 安全带约束力分析示意图

基于以上对颈部伤害的动力学分析,为了有效降低颈部伤害指标颈部张力 F_z ,在设计上主要考虑降低胸部加速度、限制骨盆位移量和限制头胸部运动差,如图 3.6 所示。

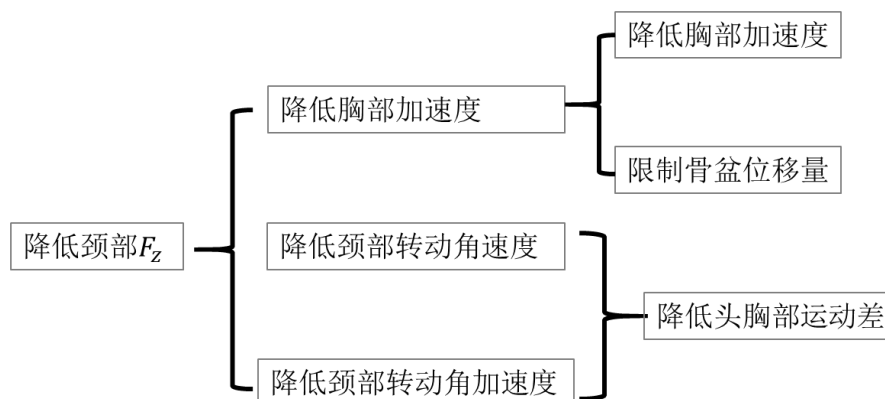


图 3.6 颈部伤害指标影响分析示意图

3.1.4 胸部运动动力学分析

为了对后排女性假人的胸部运动进行动力学分析,首先需要了解女性假人的内部结构,并且需要明确假人的胸部压缩量在假人结构上是如何反应的。当前,C-NCAP 管理规则中定义的 Hybrid III 型第 5 百分位假人都是基于人体解剖学理论,而且在进行了大样本的尸体试验设计得出的,能够很好地满足力学仿真结构的真实性、接近性和重用性,这样就可以尽可能准确地判断出碰撞阶段假人的躯体各区域受伤情况^[42]。

如图 3.7 所示,Hybrid III 型第 5 百分位女性假人的胸部主要由胸部皮肤、六根肋骨、肋骨后支撑及其他附属零件组成,后端固定在脊柱框架上,前端通过铁板相连,是一个弹性结构。

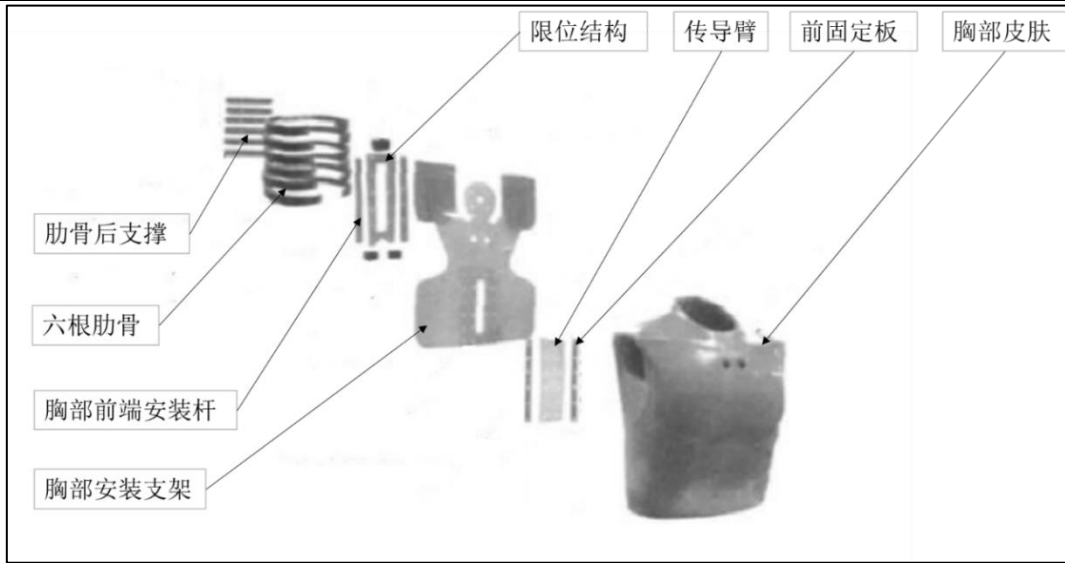


图 3.7 假人胸部结构图

当车体发生正面碰撞时，假人胸部结构会受到十分复杂的外力及内力的综合作用，不但受到安全带的约束作用力，而且头部、下躯干以及肋骨变形都会对其产生复杂的作用力。而且，各力基本都有各自的空间坐标系，需要复杂的空间转换，基于分析需要和假人胸部结构的动作原理，通常只考量 X 向的胸部位移情况。因此，通常只关注对 X 向有影响的相关力。为了便于分析，将假人胸部结构简化为一维弹簧阻尼质量模型，分为胸部前端、胸部内部和胸部后端三个部分，如图 3.8 所示。

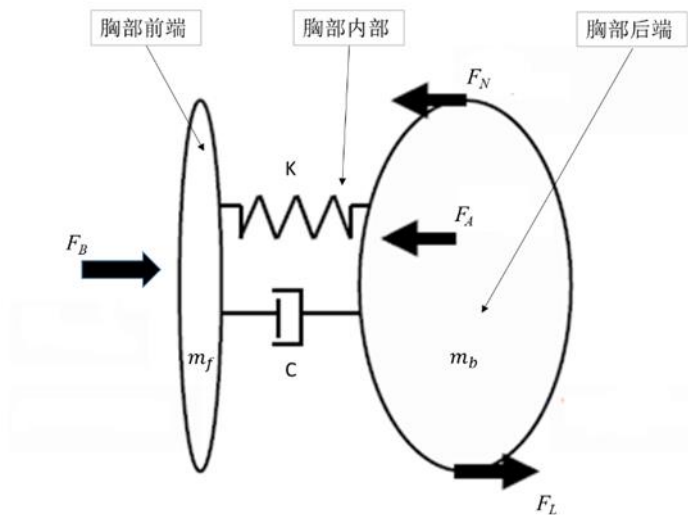


图 3.8 胸部受力分析示意图

其中， m_f 为胸部前端重量， m_b 为胸部后端重量， K 为胸部内部等效弹性刚度， C 为胸部内部等效阻尼系数。

在碰撞过程中，假人胸部前端会受到安全带 X 向作用力 F_B 和胸部内部结构的约束力，假人胸部后端会受到由假人头部和胸部运动差产生的下颈部力 F_N 、上肢和胸部运动差产生的锁骨力 F_A 以及由于座椅约束导致的骨盆和胸部的运动差产生的腰椎力 F_L 。

此时，胸部压缩量可以定义胸部前端和胸部后端的质量块相对运动量为

$$d_{st} = d_b - d_f \quad (3.9)$$

其中， d_b 为胸部后端运动位移量， d_f 为胸部前端运动量。

基于牛顿第二运动定律，下面分别对胸部前端和后端进行动力学分析，可得出下面胸部压缩动力学方程

$$\begin{cases} m_f a_f = F_B - K d_{st} - C v_{st} \\ m_b a_b = F_L + K d_{st} + C v_{st} - F_A - F_N \end{cases} \quad (3.10)$$

其中， v_{st} 为胸部压缩量变形速率，能够经由 d_{st} 求导得出。 a_f 为胸部前端加速度， a_b 为胸部后端加速度。

由于分析目标为最大压缩量，当 d_{st} 最大时也就是胸部前端和胸部后端相对运动为零的时候，即 $v_{st} = 0$ 的时候，仅针对胸部后端分析，可得到

$$m_b a_b = F_L + K d_{st} - F_A - F_N \quad (3.11)$$

也即

$$d_{st} = \frac{m_b a_b - F_L + F_A + F_N}{K} \quad (3.12)$$

由于 m_f 质量较小， $m_f = 0.434 \text{ kg}$ ，在整个胸部质量中仅占 5.7%，所以在简化模型建立中，将其忽略，对整个胸部系统进行分析得到

$$F_B + F_L - F_A - F_N \approx m_c a_b \quad (3.13)$$

也即

$$a_b \approx \frac{F_B + F_L - F_A - F_N}{m_c} \quad (3.14)$$

其中， m_c 整个胸部的重量， a_{st} 为胸部压缩加速度，可由 v_{st} 求导得出。

将式(3.14)代入式(3.12)可得到

$$d_{st} \approx \frac{m_b \left(\frac{F_B + F_L - F_A - F_N}{m_c} \right) - F_L + F_A + F_N}{K} \quad (3.15)$$

对于 Hybrid III 5th% 标准女性假人配重， $m_b = 5.633 \text{ kg}$ ， $m_c = 7.555 \text{ kg}$ 。胸部最大压缩量简化为

$$d_{st} = \frac{0.75F_B - 0.25F_L + 0.25F_A + 0.25F_N}{K} \quad (3.16)$$

根据式 (3.16) 可以看到，后排乘员胸部压缩量受到安全带作用力 F_B 、骨盆腰椎力 F_L 、上肢锁骨力 F_A 和头颈部下颈部力 F_N 以及胸部内部刚度系数 K 的综合

影响。所以，为了降低胸部压缩量，要降低 F_B 、 F_A 和 F_N ，增大 F_L 和 K 。需要说明的是， F_B 带有更大的系数，其贡献作用更大。

基于以上对胸部压缩伤害分析，将设计原则定义为降低胸部加速度、限制骨盆位移量和限制头胸部运动差，如图 3.9 所示。

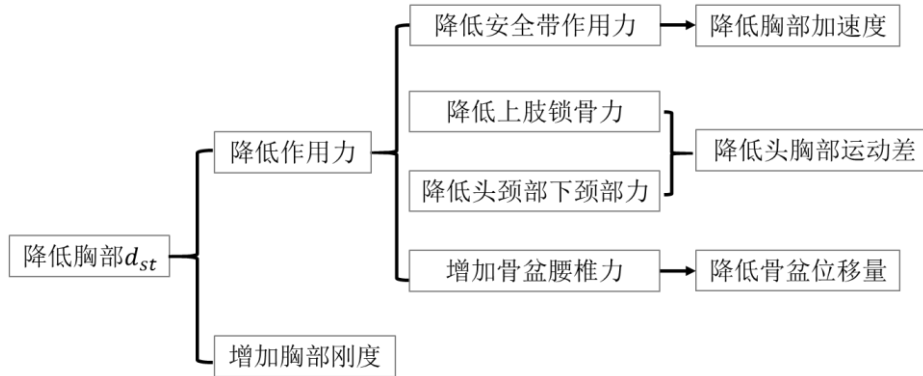


图 3.9 胸部伤害指标影响分析示意图

3.1.5 下潜分析

下潜现象是指在碰撞减速时，假人因骨盆处的作用力不均衡或座椅不能支撑骨盆向前和向下的压力而导致的前端下陷，致使安全带腰带滑动，并脱离正常位置，从骨盆处滑倒腹部，肩带从胸部滑倒颈部，最终使乘员向前向下滑动的现象。下潜通常会对乘员腹部软组织或颈部造成伤害，设计中需要尽量避免^[43]。

判断后排女性假人是否发生下潜需要依据髌骨的受力来判断：当假人的骨盆向前运动，在 1ms 的持续时间阶段内，如果髌骨力以大于 1000N/ms 的速率减小，说明发生了下潜；当假人骨盆回弹时，如果髌骨力以大于 1000N/ms 的速率减小，但是如果髌骨力处于 2400N 以下时除外。此外，当髌骨力处于不稳定状态时，可以通过完全卸载时的信号来评估。当然，照相机的录取的视频和腰带力曲线也可以作为辅助判断的输入，如图 3.10 所示。所以，也相应的增加了对骨盆加速度 $A_{X,AZ}$ 和髌骨力 F_X （左/右）的测量要求。细化下潜判定，如图 3.11 所示。



图 3.10 假人下潜现象示意图

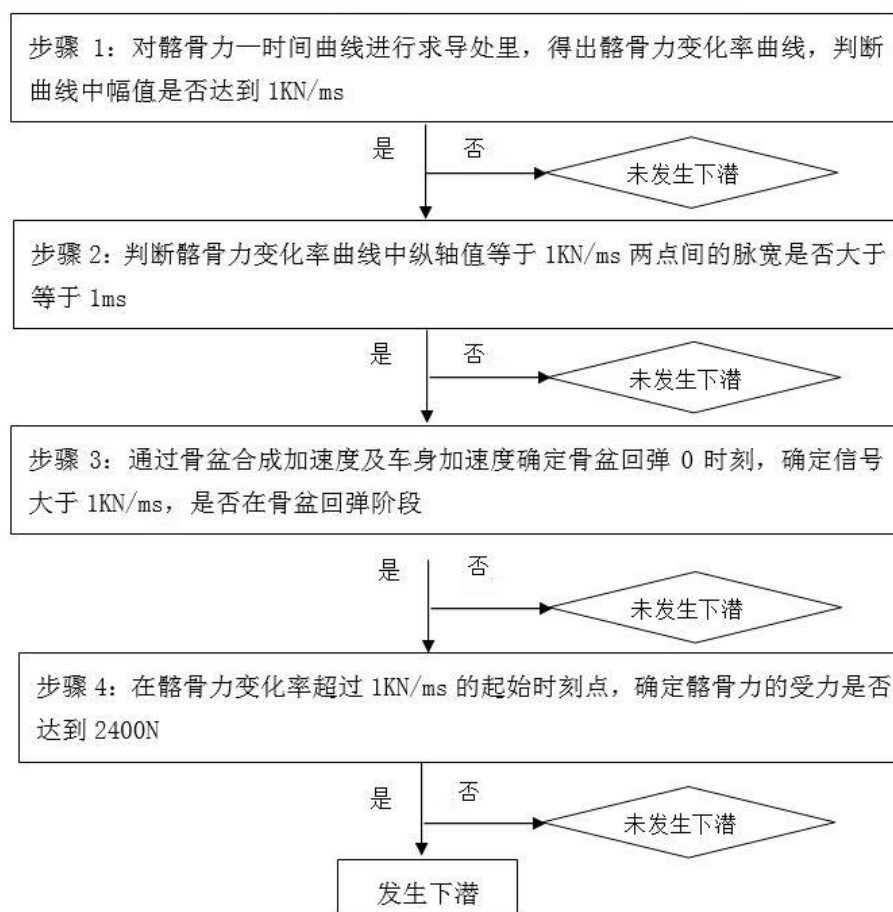


图 3.11 假人下潜判定框图

当前, 后排安全带是按照 50% 人体结构设计的, 安全带固定的位置、几何形状的设计与 5% 人体尺寸存在差异, 所以在碰撞试验中, 后排女性假人极易发生下潜现象^[1]。

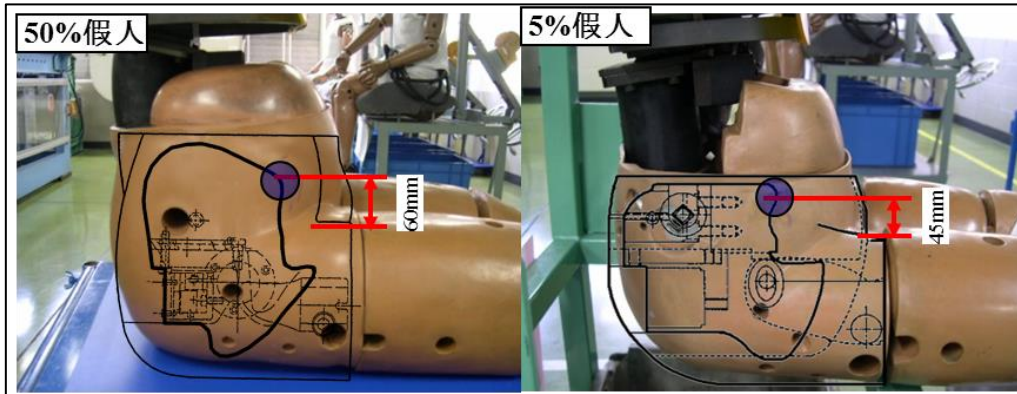


图 3.12 50%和 5%假人结构图示

5%女性假人大腿根部与骨盆交汇处的外侧皮肤到腹部上边缘皮肤间的高度为 45mm 左右，安全带的腰带就是作用在该区域来对假人进行约束的。碰撞时，如安全带腰带相对于腹部处的皮肤发生滑动，当腰带下边缘到大腿根部与骨盆交汇处皮肤的距离大于 45mm 是，腰带已经脱离骨盆胯骨结构，完全陷入腹部的软组织中，导致“下潜”现象发生。

通过下潜发生机理可知，一般可以通过调整安全带腰带位置来防止下潜。碰撞发生时，当假人骨盆发生快速位移时，安全带腰带与假人的相对位置容易发生变化。需要在设计是考虑如何降低头胸部运动差和降低骨盆位移量。

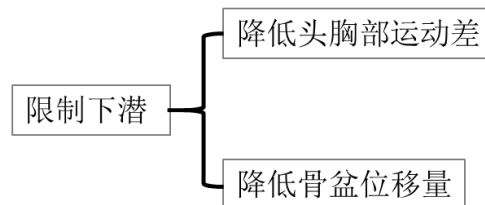


图 3.13 假人下潜影响分析图示

该分析主要根据下潜发生的机理因进行了分析，其它部位力学参数的改变对假人下潜也会有相应的影响，将在后续章节中进行分析。

3.1.6 后排力学分析总结

基于以上运动及动力学分析，可以发现 Hybrid III 5 % 女性假人颈部伤害指标 F_z 和胸部压缩量 d_{st} 的动力学过程不尽一致，但设计原则具有基本相同的方向。按照假人的碰撞运动趋势分析，减少颈部和胸部伤害均需要降低胸部加速度、降低头胸部的运动差、增加胸部刚度和降低骨盆位移量。如图 3.14 所示。

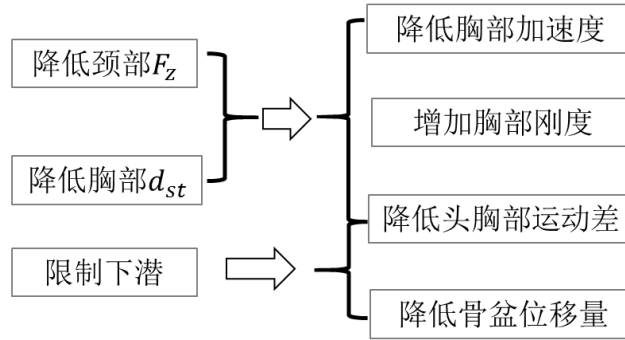


图 3.14 伤害指标影响分析示意图

3.2 后排力学参数与约束系统相关性分析

本节结合具体的后排约束系统配置进行分析，以建立后排力学参数与后排约束系统的具体结构或零部件的相关性。

3.2.1 降低胸部加速度

后排安全系统中，仅安全带为乘员胸部提供作用力，针对降低胸部加速度来研究，可以从安全带力学特性来分析，力学特性包括安全带限力等级和预紧量^[44]。

研究发现，降低安全带卷收器的限力等级能够有效降低胸部加速度，但在设计中需要考虑避免二次碰撞。针对此风险，可以为卷收器增加预紧装置以限制乘员头颈部运动量，在实际设计中需要对卷收器限力等级和预紧装置进行良好的配置平衡^{[45][46][47]}。由 3.1.3 分析可知，可以通过增加安全带夹角来降低胸部加速度，因此可以通过降低带扣固定点或者缩短织带式带扣长度实现。此外，钢支架带扣具有较高的刚性和较小的延伸率，可以有效改善安全带的松弛量。在假人前移时，钢支架带扣相比织带不会弯曲，不会施压在坐垫上，如将织带式带扣改为钢支架也具有同样的作用。

3.2.2 增加胸部刚度

安全带几何特性一般是指其固定点、锚点和带扣。安全带上固定点的位置决定安全带肩带与胸部的接触位置，为了评估安全带肩带位置对假人胸部刚度的影响，进行了对比研究，肩带高中低三种位置如图 3.15 所示。

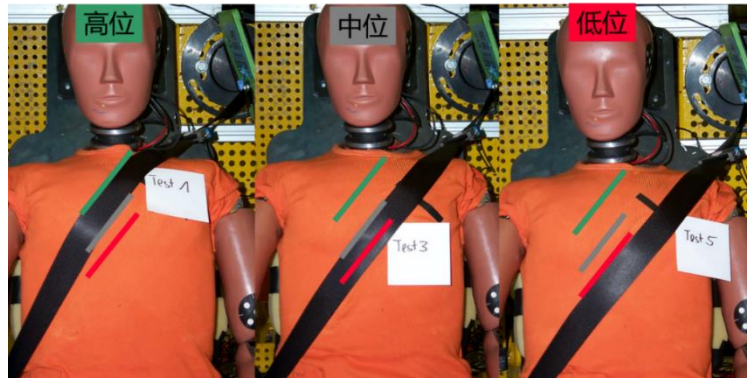


图 3.15 安全带肩带位置设置

三种肩带位置下,安全带肩带力值和胸部压缩量的关系曲线如图 3.16 所示。为避免试验设置等的影响,对每个位置进行了两次试验。

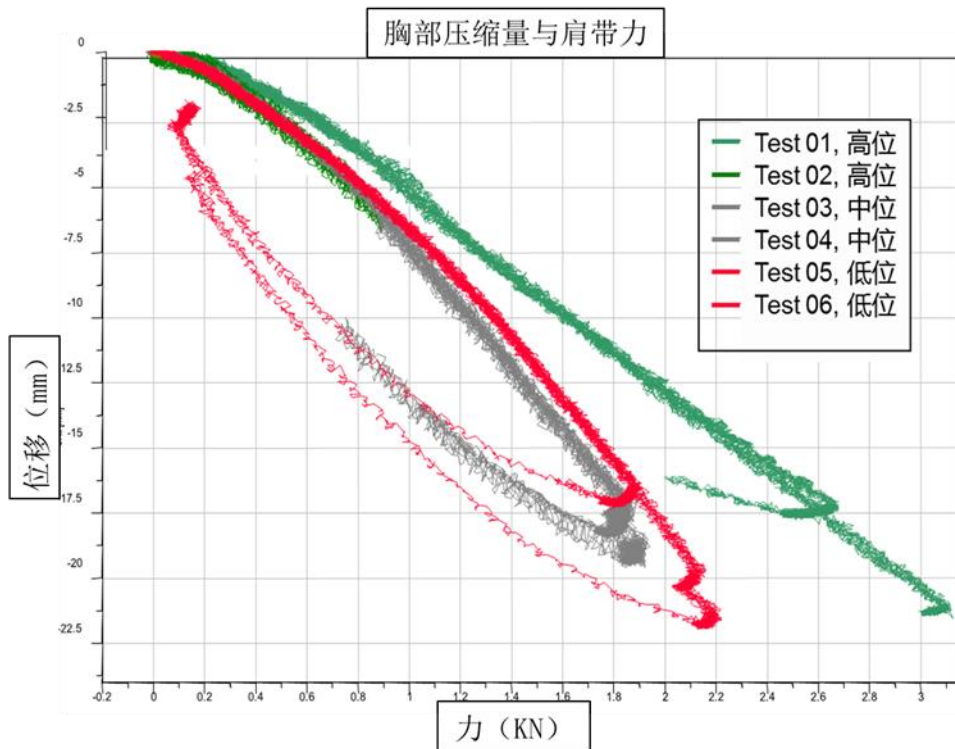


图 3.16 三种安全带位置下力与胸部压缩量关系

由此研究发现,肩带的接触位置越高,假人的胸部等效刚性系数越大,越能够减小假人胸部压缩量。但这样就减小了安全带肩带与颈部的距离,颈部受力相应增大,使颈部伤害风险增加。

3.2.3 降低头胸部运动差和骨盆位移量

根据动力学分析,降低头胸部运动差可以有效的降低颈部张力和胸部位移量,

同济大学 硕士学位论文 基于 2015 版 C-NCAP 后排 Hybrid III 型 5% 假人的约束系统优化分析

减小骨盆向前的位移量可以有效的防止下潜。一种新型的锁止装置：动态锁舌有助于降低头胸部运动差和减少骨盆位移量。

动态锁舌是一种巧妙紧凑的结构，其中含有凸轮和弹簧部件。当锁舌未被扣好时，安全带织带可以在锁舌中自由滑动；当锁舌插入带扣安全带正常使用时，锁舌起常规连接固定作用，而织带依旧可以在锁舌中穿过，以保证乘员使用的舒适性；当发生紧急制动或者意外碰撞时，安全带受力大于某阈值，就会触发动态锁舌从而卡紧安全带织带，防止安全带肩带向腰带滑动而对胸部约束过紧。动态锁舌工作原理如图 3.17 所示。

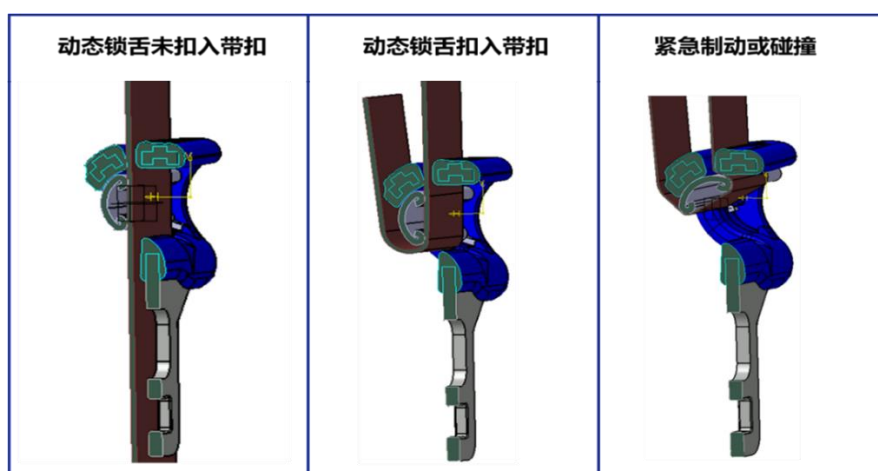


图 3.17 动态锁舌工作原理

动态锁舌的工作原理表明，能有效的降低肩带力，增加腰带力，从而减少胸部压缩量和头胸部运动差以及减少骨盆运动量，对安全带受力进行的 50km/h 正碰工况下的测试也验证了动态锁舌这个特性，如图 3.18 所示。

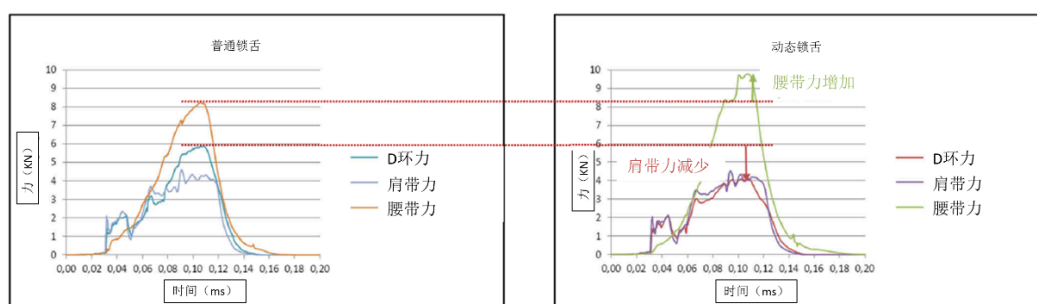


图 3.18 50km/h 正面碰撞的安全带受力情况

针对降低骨盆位移量的目标，还可以通过调整安全带腰带位置来实现。对于安全带腰带而言，安全带带扣点与锚点位置会直接影响到腰带与乘员的接触位置。研究发现，锚点和带扣点位置会改变腰带与骨盆重心的距离，当腰带与骨盆重心距离越远，就越会增加骨盆绕腰带的转矩，下潜可能性也越大，而下潜会导致骨

盆位移量增大，也会造成腹部伤害，这是设计中需要避免的，可通过调整锚点和带扣点位置来让腰带尽可能靠近骨盆重心^{[48][49]}。

钢支架带扣一般长度更短（约为115mm），可以改善安全带的松弛量。而且对于织带式带扣而言具有更高的刚性，即在假人前移时，钢带扣相比织带不会弯曲，不会因施压在坐垫上而改变安全带腰带约束轨迹。将织带式带扣更换为钢支架带扣可以有效改善骨盆位移量，降低假人下潜的风险。

3.2.4 影响因素汇总

根据动力学理论分析及结合后排乘员约束系统的配置，建立理想运动姿态与约束系统之间的关联性。初步建立理论的后排约束系统影响因素。整理设计原则及相关影响因素^{[50][51]}，如图3.19所示。

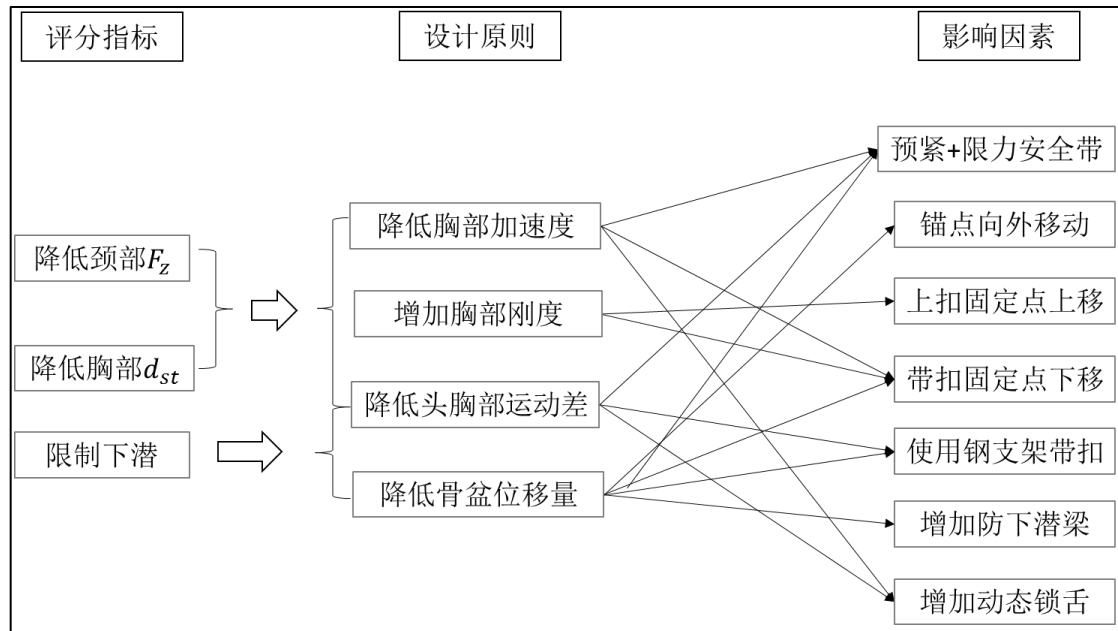


图 3.19 后排约束系统影响因素汇总

另外，坐垫的角度和深度对骨盆也会有相应的影响。坐垫座深度越深，假人初始状态的骨盆角度则会越大，导致假人有下潜趋势，设计中应尽量避免。由于假人的伤害受到约束系统和车体的共同作用，车体的结构也会对后排乘员的伤害起到影响。通常认为，当车体前端刚度较大时，假人相对运动的发生将相对提前，且相对速度的提升也将较快。安全带在碰撞过程中是被动起约束作用的，当假人的相对运动提前时，安全带的约束作用也将提前，则后期的相对冲击将得以缓解。当车体前端的刚度偏大时，安全带对后排女性假人胸部的伤害将得以降低^[52]。

3.3 约束系统影响因素的仿真验证

本节根据上一节得出的影响因素, 基于已建立的基础仿真模型进行仿真计算, 以验证力学分析结果和约束系统影响因素的有效性。另, 对于上扣固定点上移, 由于受后排安全带布置限制, 很少在实际中调整上扣的位置, 故在仿真验证中不做进一步分析。

3.3.1 钢支架带扣



图 3.20 钢支架带扣

50FF 和 64ODB 工况, 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的对比曲线如图 3.21 和图 3.22 所示。

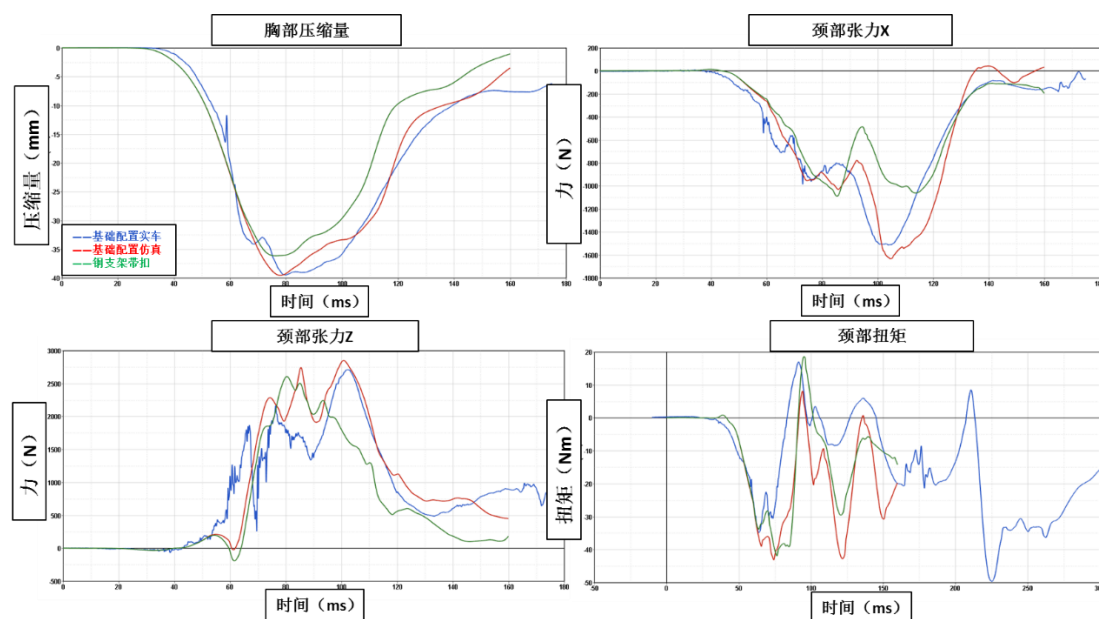


图 3.21 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩 (钢支架带扣)

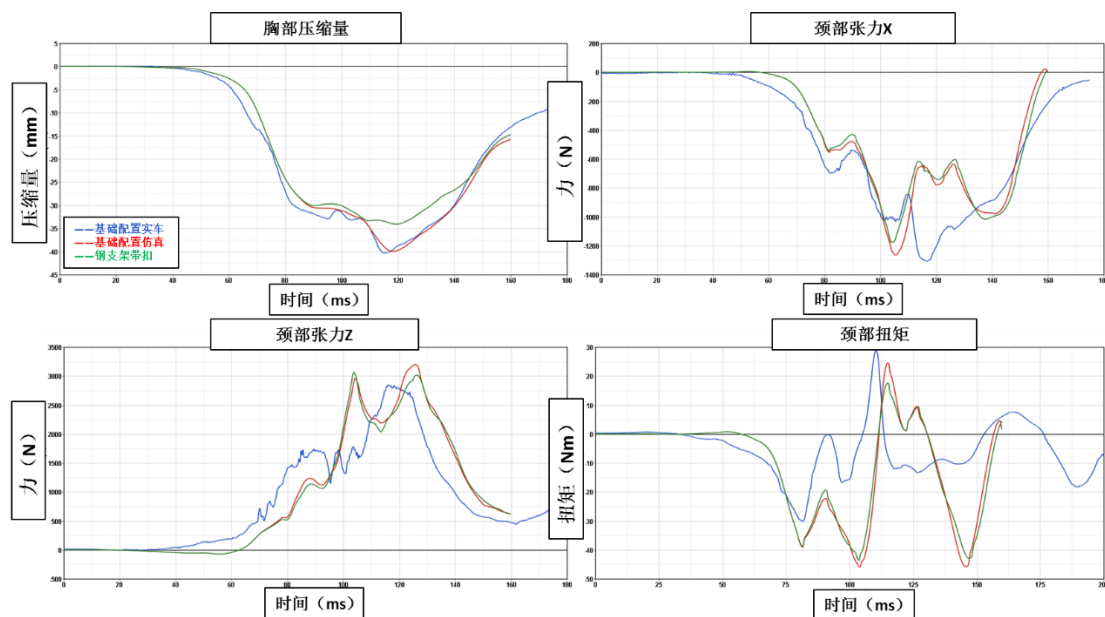


图 3.22 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（钢支架带扣）

针对钢支架带扣，50FF 和 64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.23 和图 3.24 所示。

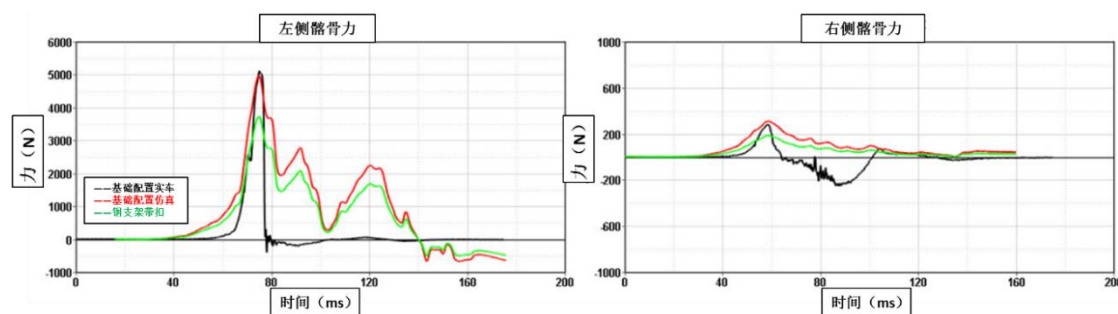


图 3.23 50FF 左右肋骨力（钢支架带扣）

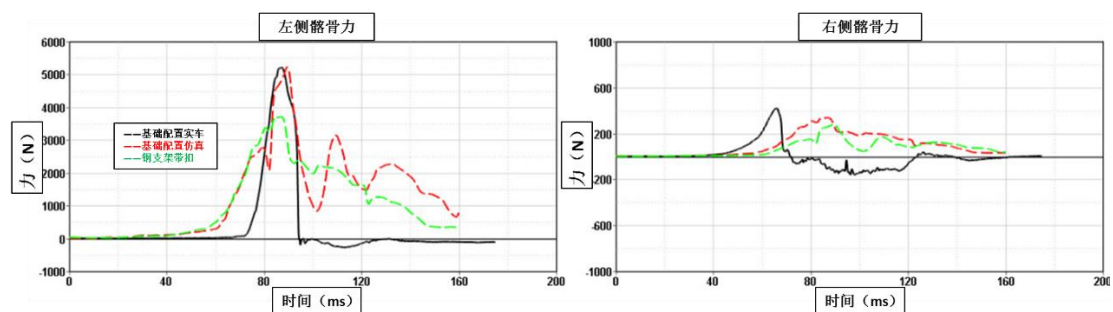


图 3.24 64ODB 左右肋骨力（钢支架带扣）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.1 所示。

表 3.1 使用钢支架带扣评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	髌骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧髌骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧髌骨力超标
钢支架带扣	50FF	620.0		1091.1	2604	27.2	36.2	-0.5	0.77	1.33	左侧髌骨力超标
	64ODB	654.0		1177.4	3062.6	29.2	34.1	0	0.56		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

使用钢支架带扣改善情况分析：50FF 颈部胸部及髌骨力均有改善，左侧髌骨力依然超标；64ODB 最大改善是假人左侧没有明显下潜，胸部压缩量从 40.6mm 降低到 34.1mm，颈部略有改善。

3.3.2 增加动态锁舌

该方案是采用动态锁舌，当碰撞发生后，在假人向前运动的过程中锁止安全带带扣上的织带，防止肩带向腰带处滑动，增加腰带力和减少肩带力，以此来降低胸部加速度和头胸部运动差，以及减少骨盆运动量。

50FF 工况下，胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果如图 3.25 所示。

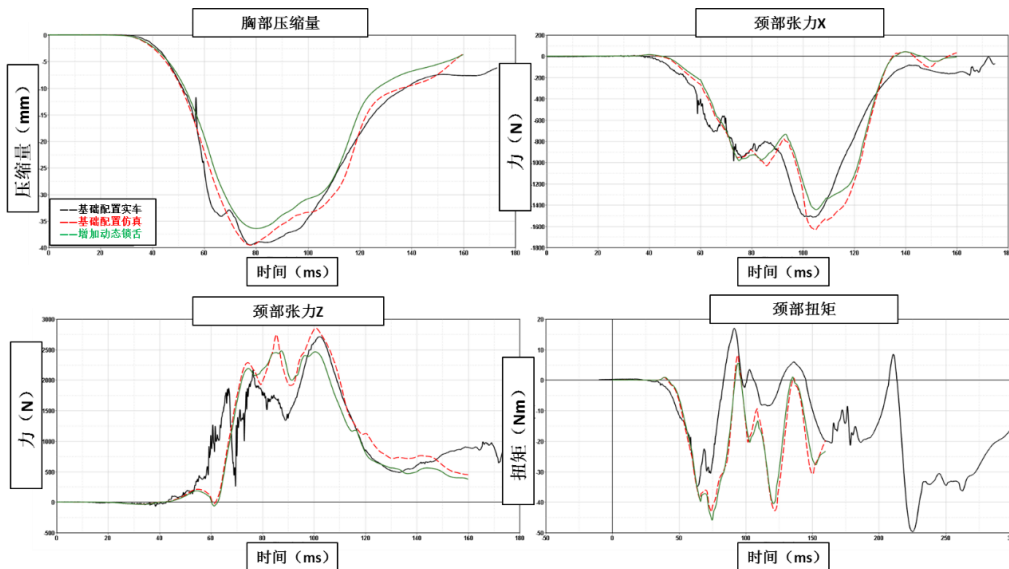


图 3.25 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（增加动态锁舌）

对应的 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果如图 3.26 所示。

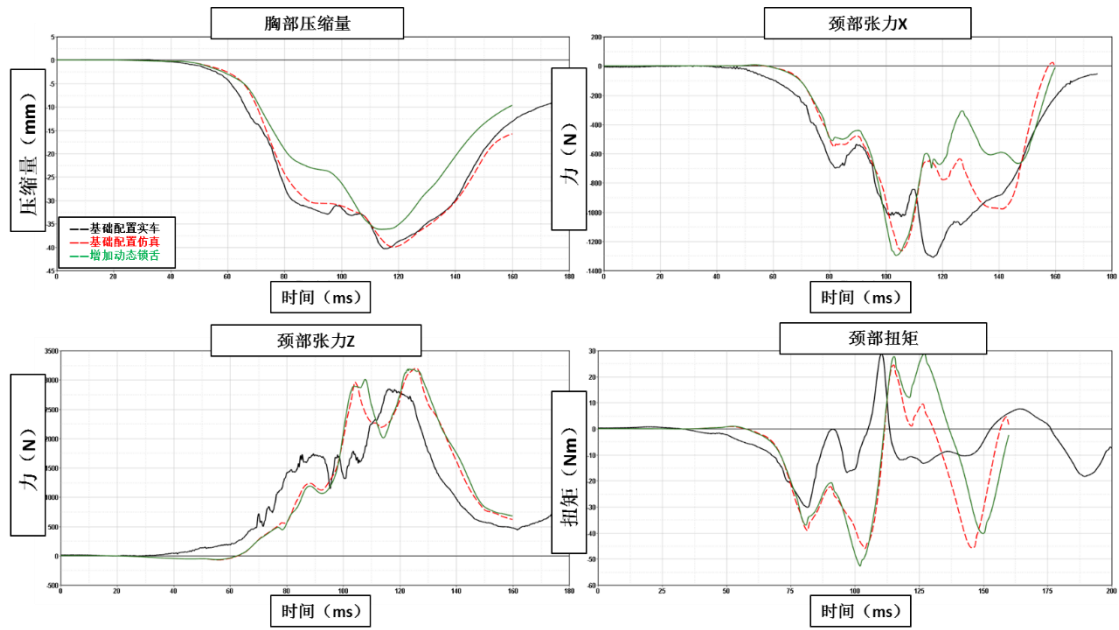


图 3.26 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（增加动态锁舌）

针对增加动态锁舌，50FF 左右肋骨力的优化结果，如图 3.27 所示。

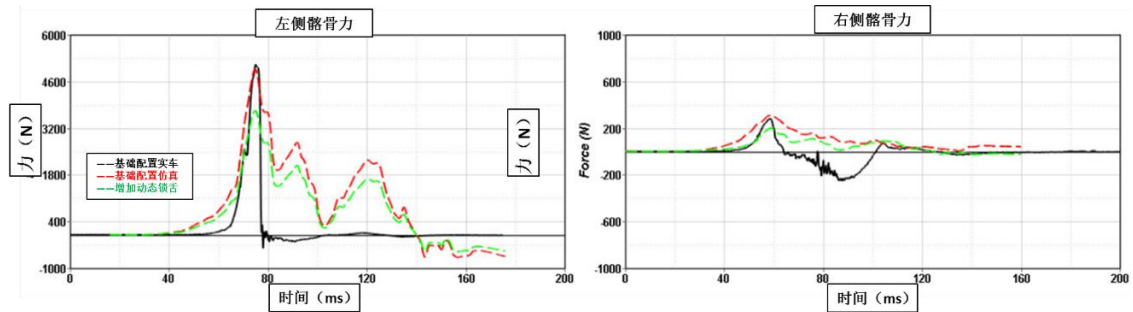


图 3.27 50FF 左右肋骨力（增加动态锁舌）

针对增加动态锁舌，64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.28 所示。

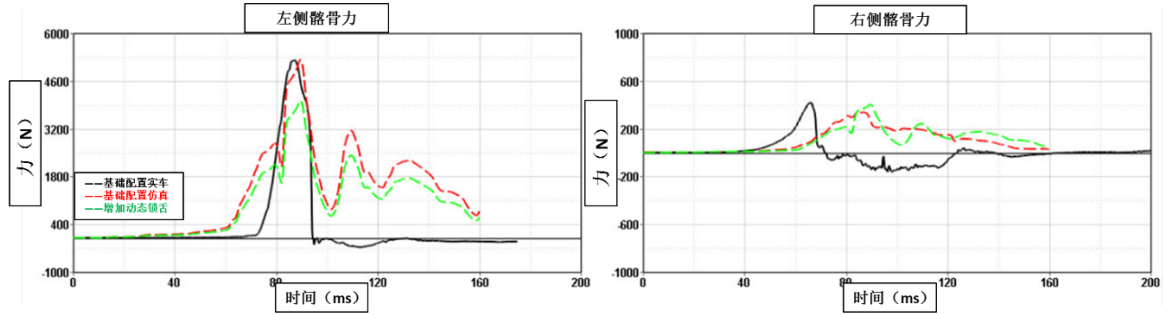


图 3.28 64ODB 左右肋骨力（增加动态锁舌）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.2 所示。

表 3.2 增加动态锁舌评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	肋骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧肋骨力超标
增加动态锁舌	50FF	687.6		1444.4	2478.5	29.9	36.4	0	1.26	1.73	
	64ODB	938.8		1298.2	3187.8	30.4	36.2	0	0.47		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

增加动态锁舌后的改善情况分析说：增加动态锁舌的最大改善是假人没有明显下潜和胸部压缩量的改善，50FF 颈部有所改善。

3.3.3 锚点向外移动

该方案将其移动至后门槛附近，是通过锚点位置的改变去调整腰带与骨盆中心的相对位置，以减少骨盆绕腰带的转矩，减少下潜的可能性，减少骨盆位移量。为了得到较优的锚点移动量，选择了移动 20mm、40mm、60mm、80mm 和 100mm 五种情况，设置调整如图 3.29 所示。

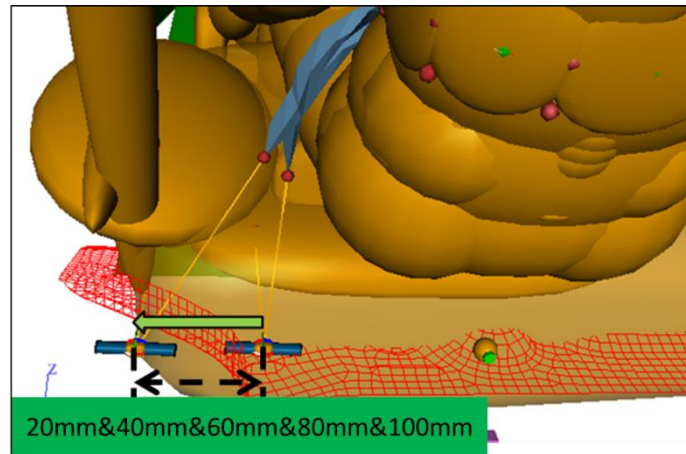


图 3.29 安全带锚点外移

针对安全带锚点外移，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.30 所示。

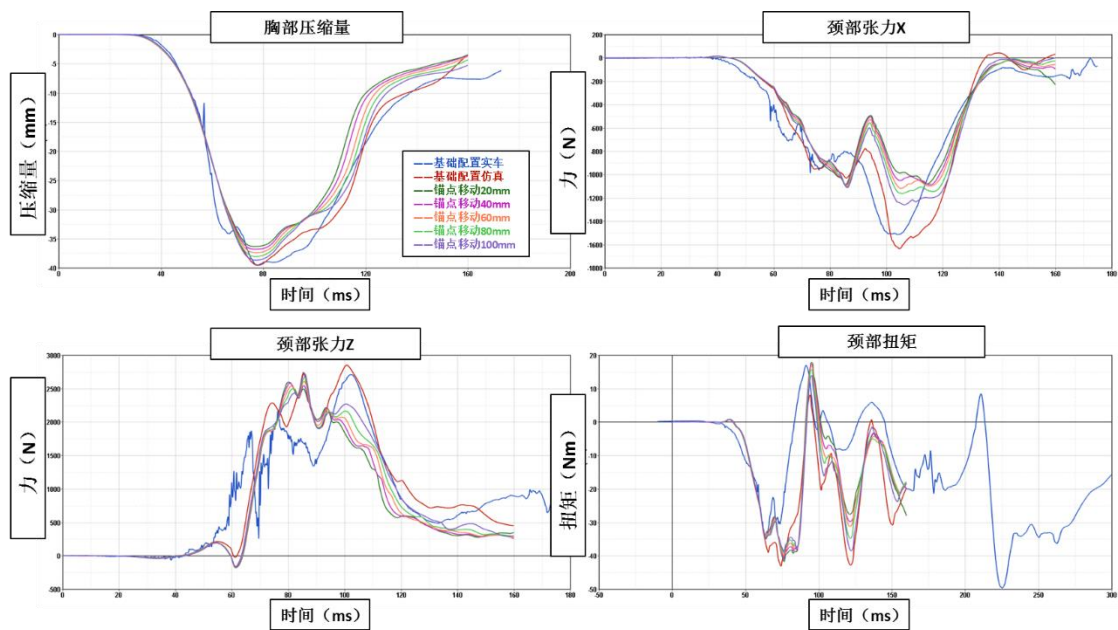


图 3.30 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（安全带锚点外移）

针对安全带锚点外移，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.31 所示。

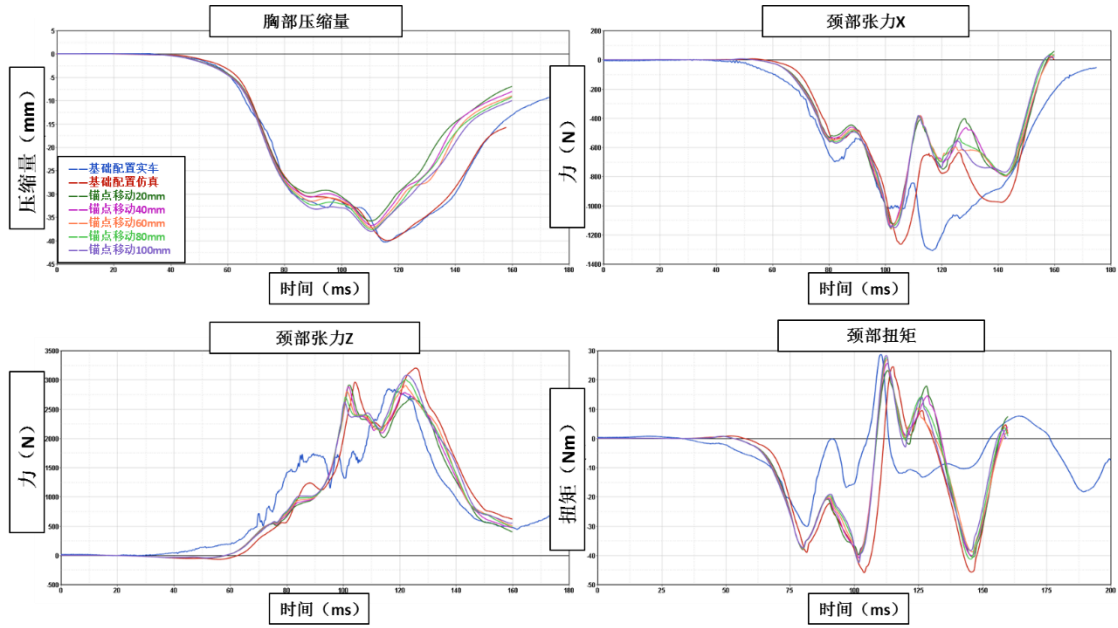


图 3.31 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（安全带锚点外移）

针对安全带锚点外移，50FF 左右肋骨力的优化结果，如图 3.32 所示。

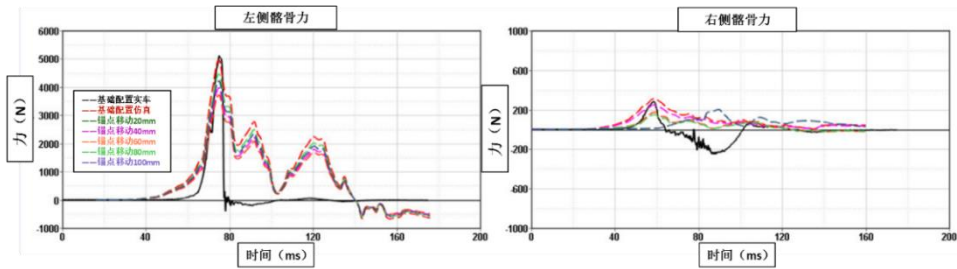


图 3.32 50FF 左右肋骨力（安全带锚点外移）

针对安全带锚点外移，64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.33 所示。

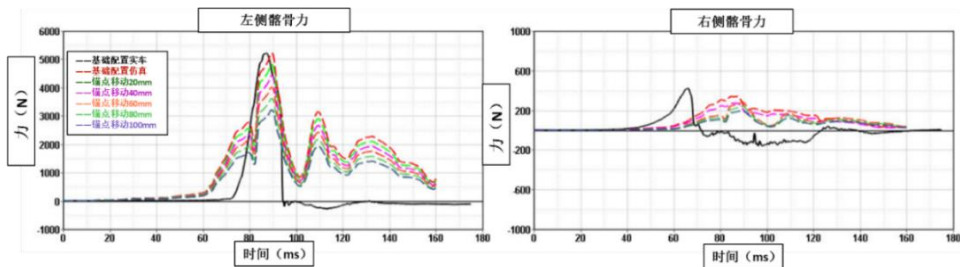


图 3.33 64ODB 左右肋骨力（安全带锚点外移）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.3 所示。

表 3.3 安全带锚点向外移动评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髌骨力 罚分	C-NCAP 2015 得分		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			2/2	4	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧髌骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
移动 20mm	50FF	741.2		1084.4	2595.9	27.2	36.3	-0.5	0.77	0.77	左侧髌骨力超标
	64ODB	750.3		1127	2910.2	28.7	35.8	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
移动 40mm	50FF	736.8		1089	2579.7	27.3	36.8	-0.5	0.75	0.75	左侧髌骨力超标
	64ODB	733.1		1149.1	2880.2	28.3	36.8	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
移动 60mm	50FF	729.4		1119.9	2608.8	27.3	37.4	-0.5	0.72	0.72	左侧髌骨力超标
	64ODB	727.6		1163.3	2901.5	28.1	37.3	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
移动 80mm	50FF	723.9		1164	2665.7	27.4	38.1	-0.5	0.7	0.7	左侧髌骨力超标
	64ODB	726.1		1155.3	3001.6	28.9	37.7	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
移动 100mm	50FF	718.2		1259.5	2726.3	27.5	38.7	-0.5	0.67	0.67	左侧髌骨力超标
	64ODB	718.6		1151.5	3078.2	27.6	38	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标

备注：红色填充为超过低性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

由评分可知移动量为 20mm 时效果最好，而且随着移动量的增加得分降低。50FF 颈部胸部及髌骨力均有改善，64ODB 仅胸部压缩量略有改善，颈部及髌骨力改善不明显。锚点外移 20mm 刚好错开安全带织带与坐垫的干涉，安全带的腰带与假人贴合更紧密，从而有更好的约束。

3.3.4 带扣固定点下移

该方案是通过下移带扣固定点来增加安全带夹角以降低胸部加速度。选取移动 10mm、20mm 和 30mm 三种情况对固定点位置就行优化，如图 3.34 所示。

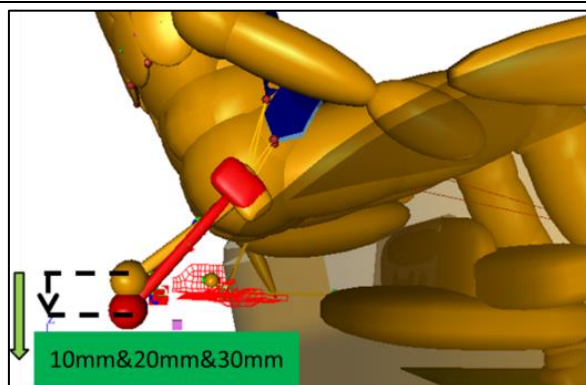


图 3.34 带扣固定点移动

针对带扣固定点下移，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.35 所示。

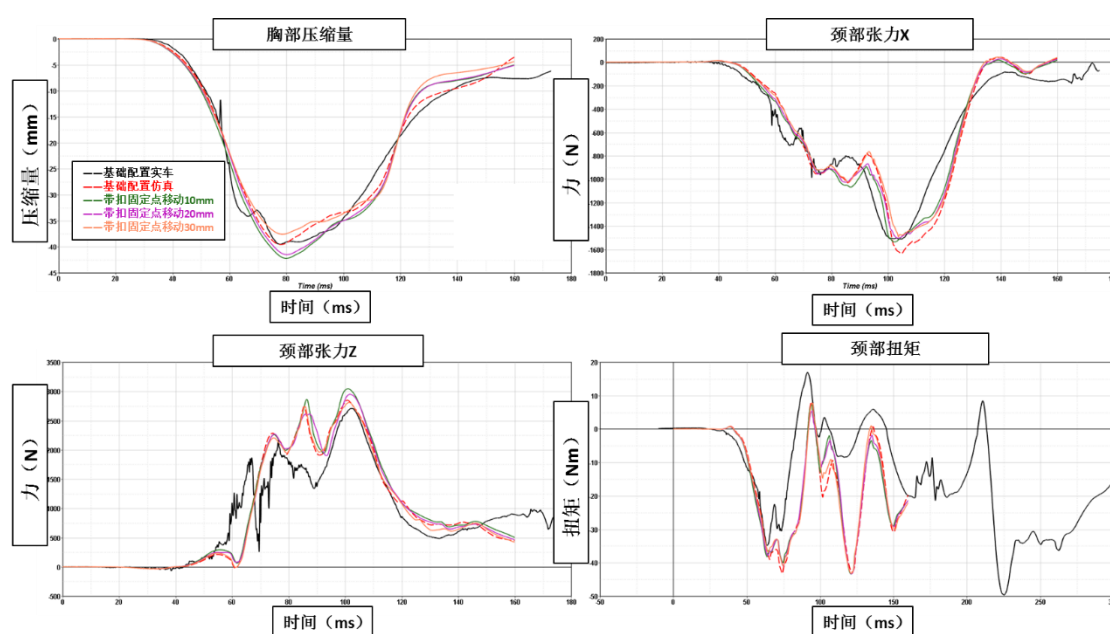


图 3.35 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（带扣固定点下移）

针对带扣固定点下移，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.36 所示。

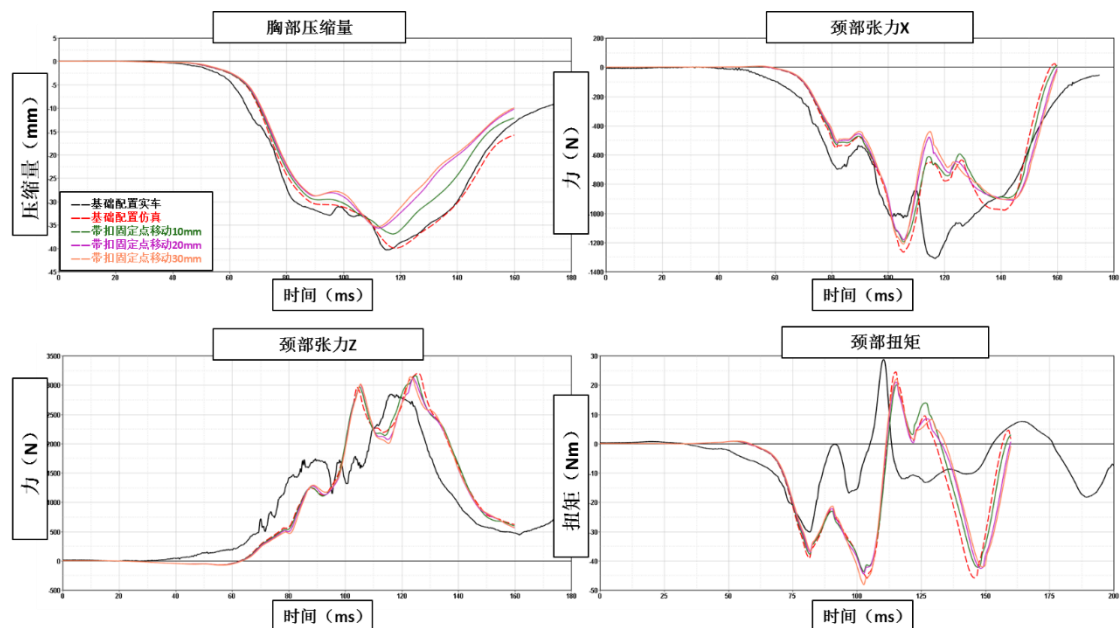


图 3.36 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（带扣固定点下移）

针对带扣固定点下移，50FF 左右肋骨力的优化结果，如图 3.37 所示。

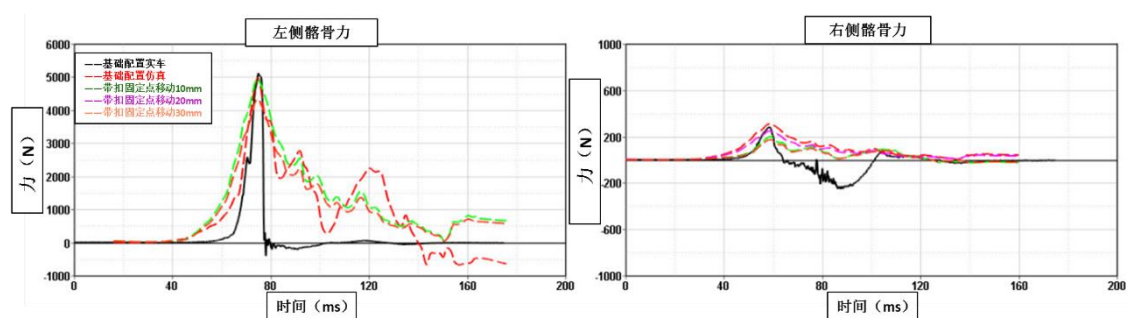


图 3.37 50FF 左右肋骨力（带扣固定点下移）

针对带扣固定点下移，64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.38 所示。

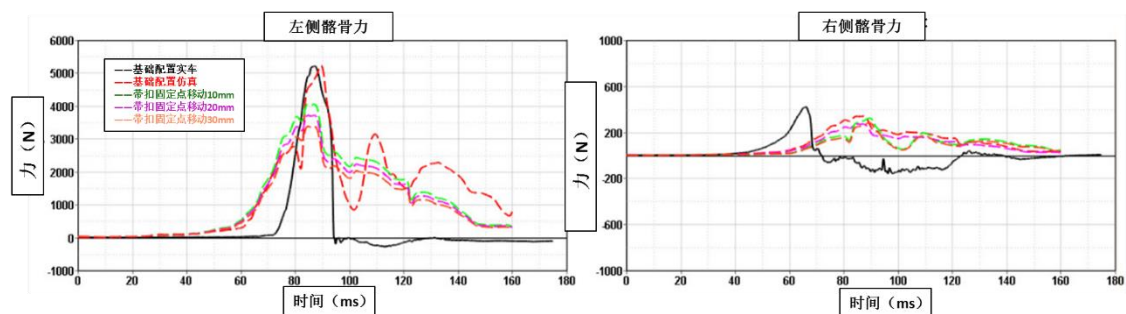


图 3.38 64ODB 左右肋骨力（带扣固定点下移）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.4 所示。

表 3.4 不同移动量评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	髌骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧髌骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧髌骨力超标
带扣固定点下移 10mm	50FF	727.1		1536.6	3045	29.4	42.2	-0.5	0.53	0.53	左侧髌骨力超标
	64ODB	805.3		1196.1	3159.4	28.7	36.9	-0.5	0		左侧髌骨力超标
带扣固定点下移 20mm	50FF	710.5		1503.7	2951.6	29.1	41.5	-0.5	0.56	0.56	左侧髌骨力超标
	64ODB	793.7		1183	3120.7	29	35.7	-0.5	0		左侧髌骨力超标
带扣固定点下移 30mm	50FF	670.7		1495.2	2810.2	28.9	37.6	-0.5	0.72	0.72	左侧髌骨力超标
	64ODB	782.6		1211.3	3139.5	28.7	35.4	-0.5	0		左侧髌骨力超标

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

由评分可知移动量为 30mm 时效果最好，而且随着移动量的增加得分有增加的趋势。50FF 颈部胸部及髌骨力均与改善，64ODB 最大改善是假人没有明显下潜，胸部压缩量有明显改善，颈部张力改善不明显。带扣固定点下移 30mm 刚好错开安全带织带与坐垫的干涉，安全带的腰带与假人贴合更紧密，从而有更好的约束。

3.3.5 加强防下潜梁

文中，该车基本配置中已经装有防下潜梁，通过额外增加补片将其加强，以减少骨盆位移量，具体设置如图 3.39 所示。

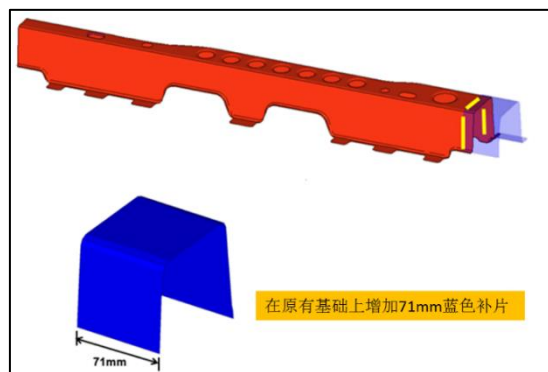


图 3.39 加强防下潜梁

针对影响因素 4，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结

果，如图 3.40 所示。

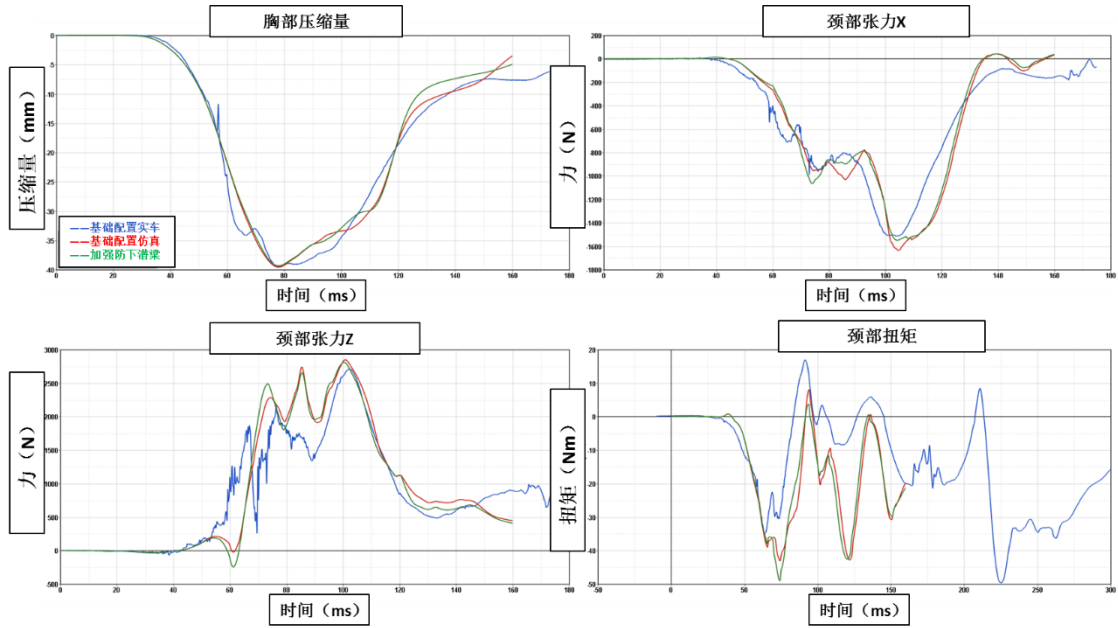


图 3.40 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（加强防下潜梁）

针对加强防下潜梁，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.41 所示。

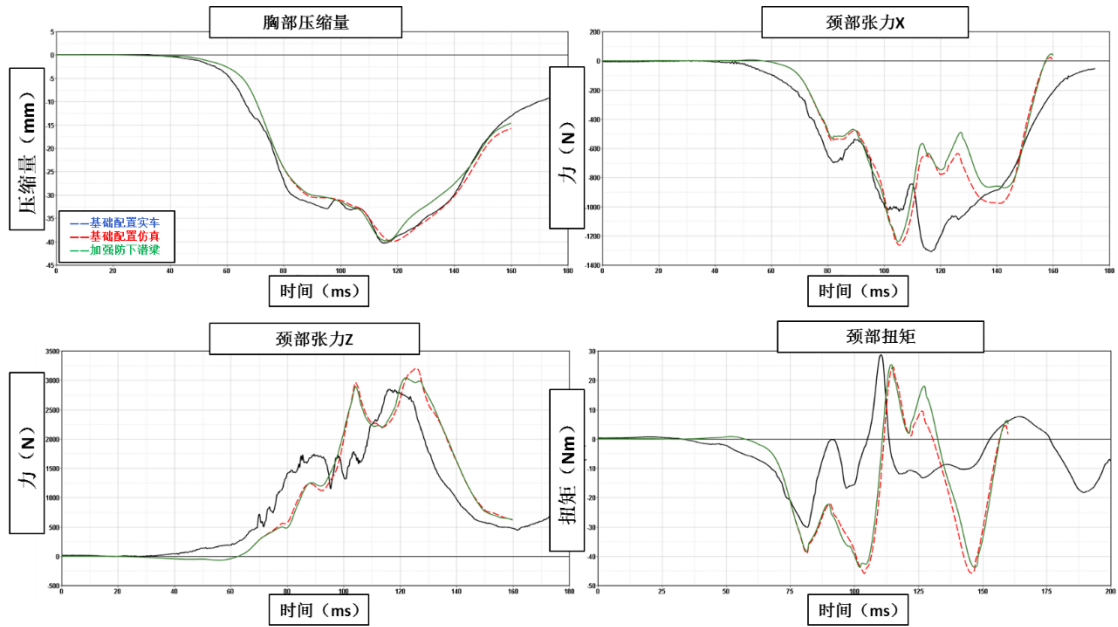


图 3.41 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（加强防下潜梁）

针对加强防下潜梁，50FF 左右肋骨力的优化结果，如图 3.42 所示。

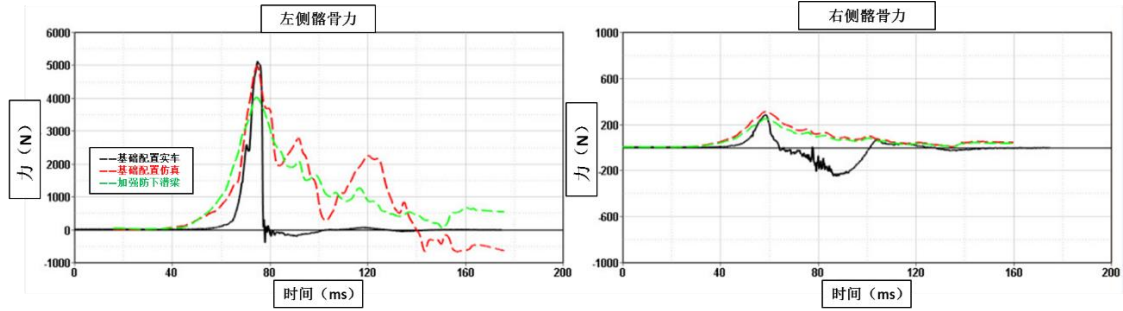


图 3.42 50FF 左右肋骨力（加强防下潜梁）

针对加强防下潜梁，64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.43 所示。

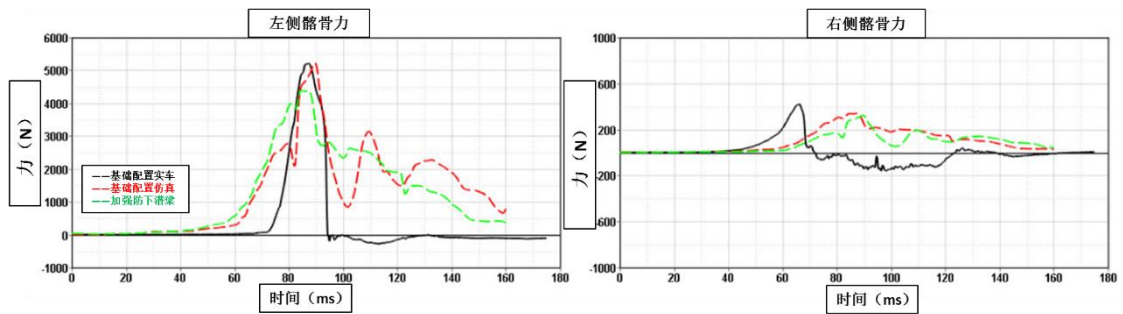


图 3.43 64ODB 左右肋骨力（加强防下潜梁）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.5 所示。加强防下潜梁最大改善是假人不再下潜，颈部和胸部压缩量略有改善。

表 3.5 加强防下潜梁评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	肋骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧肋骨力超标
加强防下 潜梁	50FF	664.4		1549.9	2811.9	30.1	39.3	0	1.15	1.45	
	64ODB	769.8		1239.5	3038.7	30.6	39.9	0	0.33		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

3.3.6 预紧及限力式安全带

该方案采用预紧式安全带，尝试使用不同等级的限力，以降低胸部加速度和头胸部运动差。卷收器限力等级曲线如图 3.44 所示。

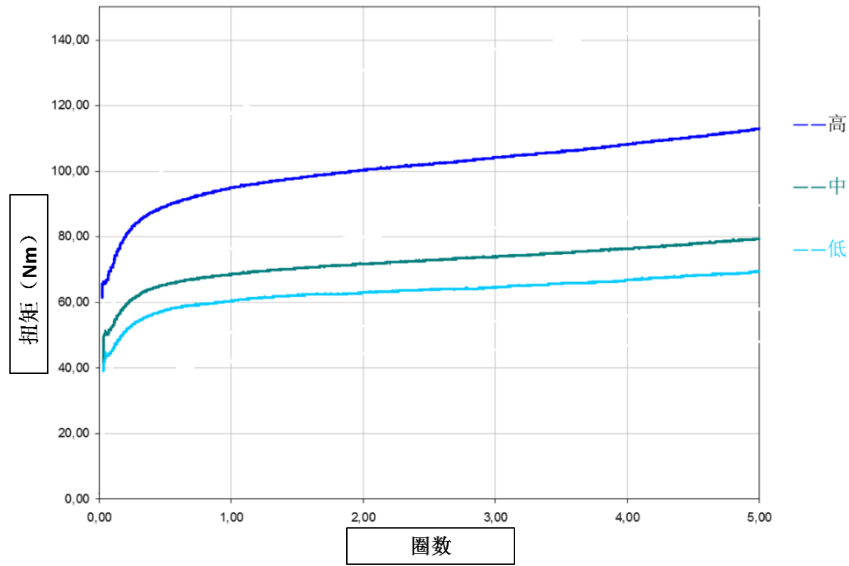


图 3.44 卷收器限力等级曲线

针对预紧及限力式安全带，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.45 所示。

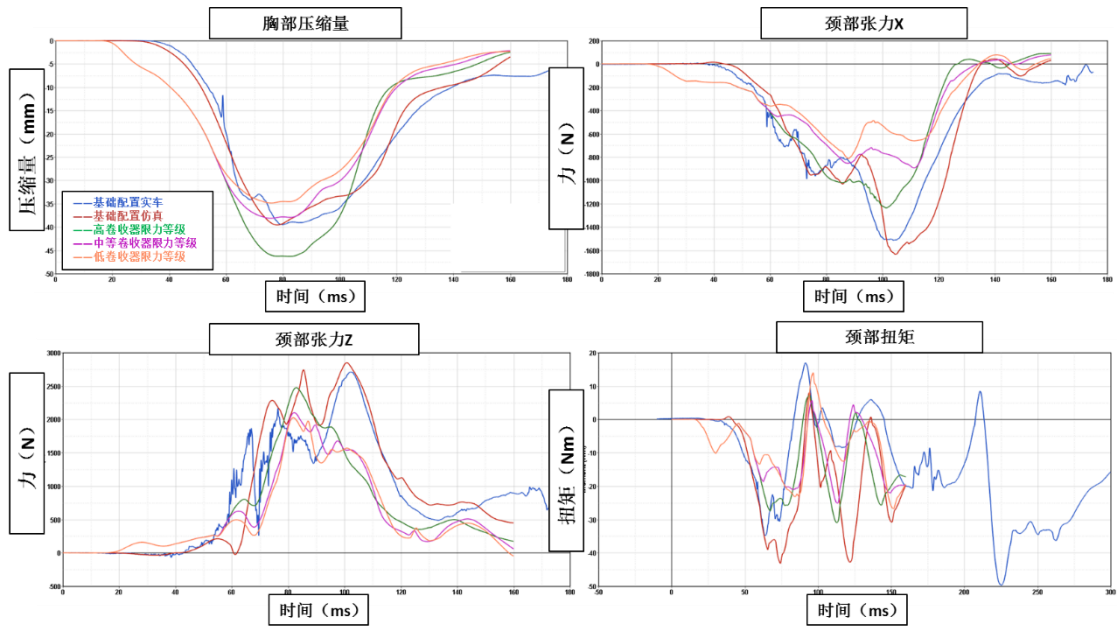


图 3.45 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（预紧及限力式安全带）

针对预紧及限力式安全带，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.46 所示。

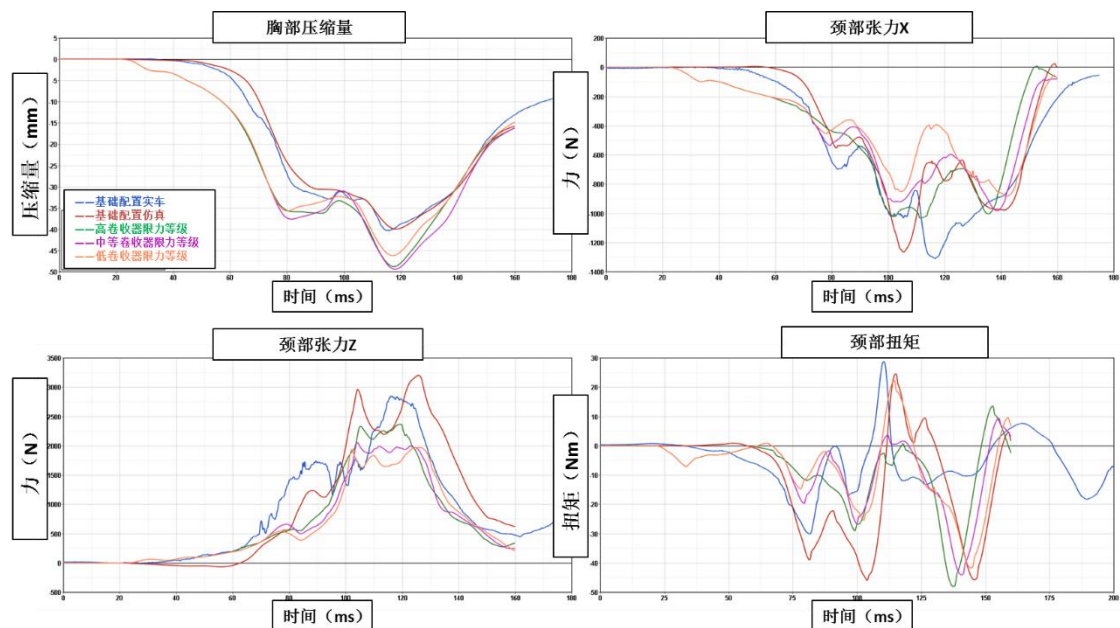


图 3.46 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（预紧及限力式安全带）

针对预紧及限力式安全带，50FF 左右肋骨力的优化结果，如图 3.47 所示。

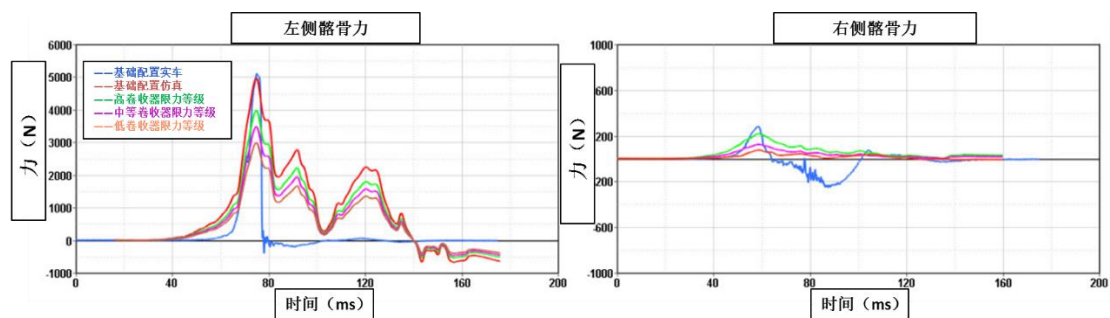


图 3.47 50FF 左右肋骨力（预紧及限力式安全带）

针对预紧及限力式安全带，64ODB 左右肋骨力的优化结果，如图 3.48 所示。

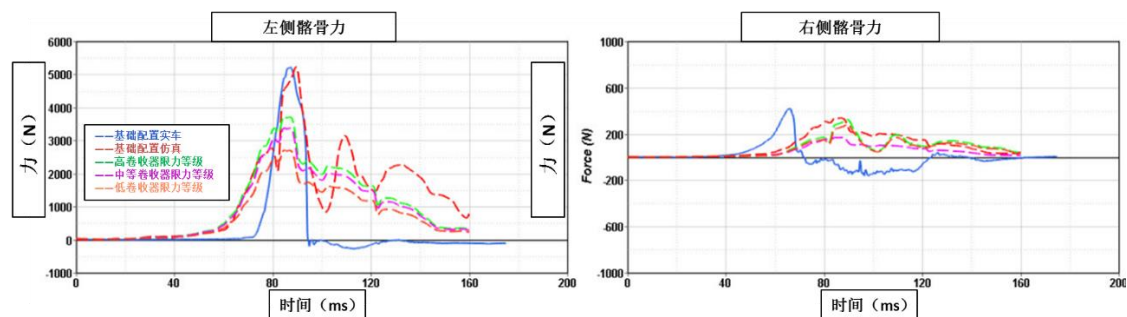


图 3.48 64ODB 左右肋骨力（预紧及限力式安全带）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.6 所示。

表 3.6 预紧及限力式安全带评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧肋骨力超标
预紧+低限力	50FF	354.4		811.9	2024.2	26.1	34.9	0	1.33	2.11	
	64ODB	321		882.1	1966.4	27	46.2	0	0.78		
预紧+中限力	50FF	417.9		892.5	2100.6	22.2	38.1	0	1.19	1.81	
	64ODB	313.6		982.3	2056.2	27.6	49.4	0	0.61		
预紧+高限力	50FF	591.9		1236.7	2474.3	25.2	46.3	0	0.87	1.15	
	64ODB	403		1033.7	2361.6	31.3	48.8	0	0.28		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

由结果可知预紧及限力式安全带限力越低得分越高。需要注意的是，在 3C 认证标准 GB 14166《机动车成年乘员用安全带和约束系统》中要求胸部前移量不能超过 300mm，这个矛盾需要进行合理权衡。

这些相对单一的方案优化效果不是特别明显，有必要就行组合优化。根据力学分析结果和工程经验，针对低限力等级和增加动态锁舌进行仿真验证，以确定组合方案的有效性。即配置方案为：预紧+低限力式安全带+动态锁舌。

针对预紧/限力/动态锁舌，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果，如图 3.49 所示。

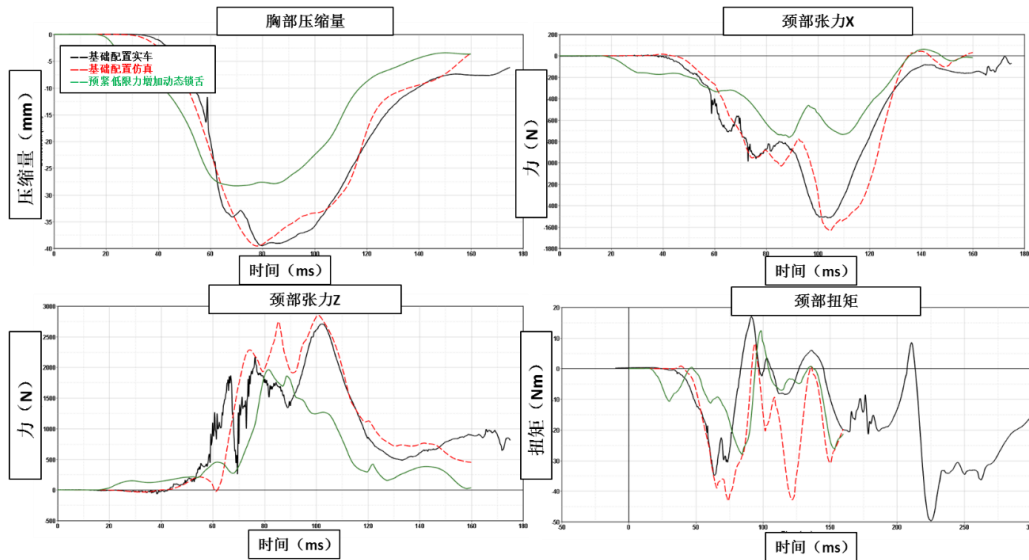


图 3.49 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（预紧/限力/动态锁舌）

针对预紧/限力/动态锁舌, 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的优化结果, 如图 3.50 所示。

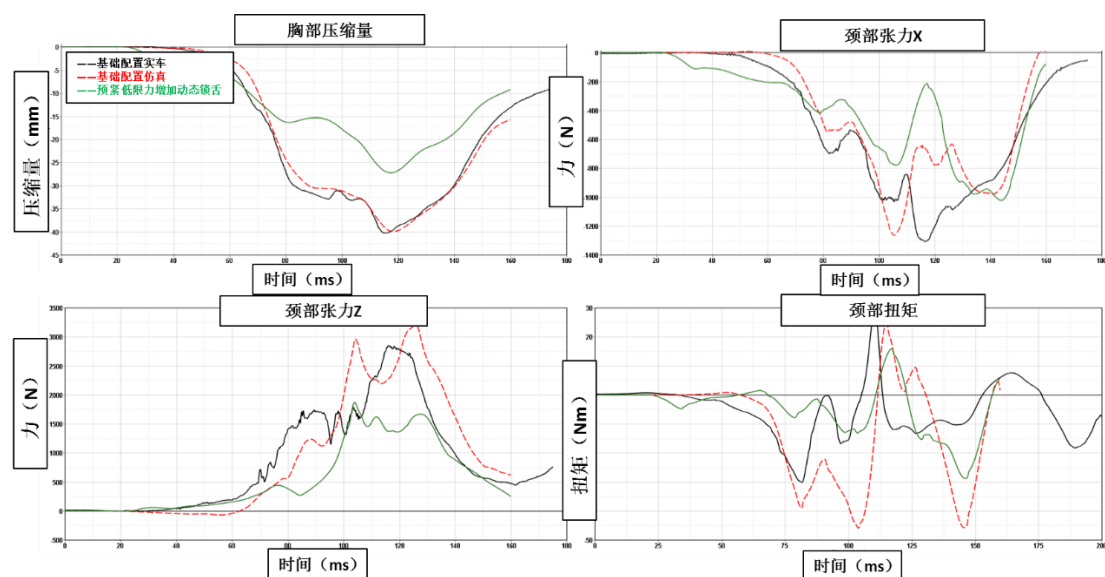


图 3.50 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩 (预紧/限力/动态锁舌)

针对预紧/限力/动态锁舌, 50FF 左右髌骨力的优化结果, 如图 3.51 所示。

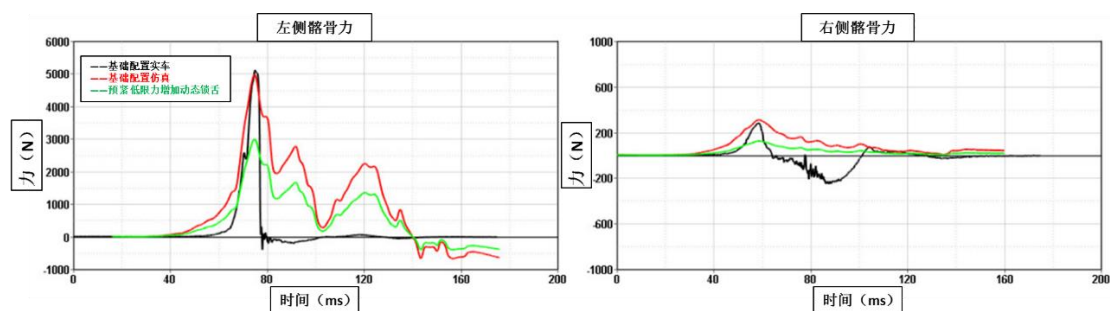


图 3.51 50FF 左右髌骨力 (预紧/限力/动态锁舌)

针对预紧/限力/动态锁舌, 64ODB 左右髌骨力的优化结果, 如图 3.52 所示。

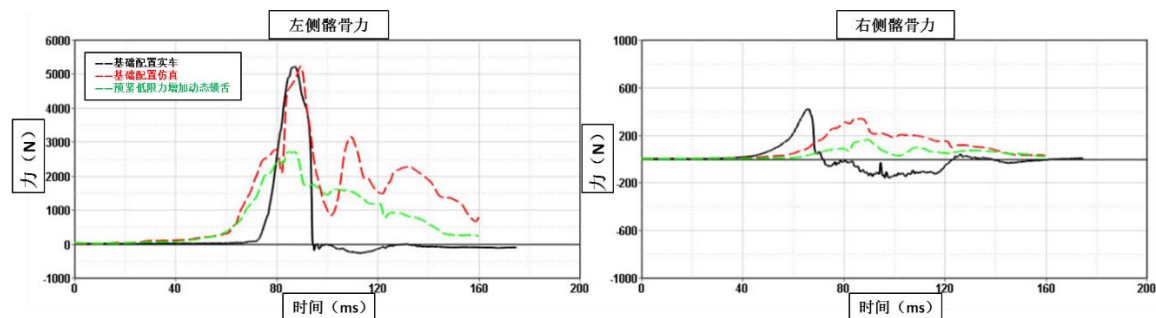


图 3.52 64ODB 左右髌骨力 (预紧/限力/动态锁舌)

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 3.7 所示。

表 3.7 预紧/限力/动态锁舌评分结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧肋骨力超标
预紧/低限力/动态锁舌	50FF	360.7		762.3	1764	25.1	28.3	0	1.59	3	
	64ODB	343.4		1023.8	1967	28.4	27.3	0	1.41		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

采用预紧+低限力式安全带+动态锁舌的组合方案，就后排假人的颈部张力和胸部压缩量有很大改善，假人也无明显下潜。

3.3.7 结果汇总

基于计算数据进行 C-NCAP 评分，最后汇总结果如表 3.8 所示。

表 3.8 6 种影响因素优化分值表

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	髌骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础模型	50FF	685.1		1610.1	2851.1	50.9	39.6	-0.5	0.64	0.64	左侧髌骨力超标
	64ODB	583.6		1281.7	3191.2	60.2	40.6	-0.5	0		左侧髌骨力超标
钢支架带扣	50FF	620.0		1091.1	2604	27.2	36.2	-0.5	0.77	1.33	左侧髌骨力超标
	64ODB	654.0		1177.4	3062.6	29.2	34.1	0	0.56		
增加动态锁舌	50FF	687.6		1444.4	2478.5	29.9	36.4	0	1.26	1.73	
	64ODB	938.8		1298.2	3187.8	30.4	36.2	0	0.47		
移动 20mm	50FF	741.2		1084.4	2595.9	27.2	36.3	-0.5	0.77	0.77	左侧髌骨力超标
	64ODB	750.3		1127	2910.2	28.7	35.8	-0.5	0		左侧髌骨力超标
带扣固定点下移 30mm	50FF	670.7		1495.2	2810.2	28.9	37.6	-0.5	0.72	0.72	左侧髌骨力超标
	64ODB	782.6		1211.3	3139.5	28.7	35.4	-0.5	0		左侧髌骨力超标
加强防下潜梁	50FF	664.4		1549.9	2811.9	30.1	39.3	0	1.15	1.45	
	64ODB	769.8		1239.5	3038.7	30.6	39.9	0	0.33		
预紧+低限力	50FF	354.4		811.9	2024.2	26.1	34.9	0	1.33	2.11	
	64ODB	321		882.1	1966.4	27	46.2	0	0.78		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

综上所述，以上 6 种验证相对于基础模型均有一定的得分改善，从而验证了设计优化理论与系统配置的相关性。这 6 种系统配置可作为约束系统滑车试验的方案，进行进一步试验验证。

3.4 本章小结

本章基于 2015 版 C-NCAP 评价规程对后排女性假人的正面碰撞过程进行了运动学分析，对头部未发生二次碰撞的情况下的颈部伤害指标 Fz 和胸部伤害指标压缩量进行了动力学研究，建立了简化动力学方程，得出后排女性假人的理想运动姿态。结合后排乘员约束系统的配置，建立理想运动姿态与约束系统之间的关联性，并通过仿真验证了其有效性，为滑车优化和实车验证提供了方案。

第4章 后排约束系统配置的滑车与实车验证

在第3章中，针对6种影响因素的有效性进行了仿真验证。本章基于6种影响因素并结合实车实际情况得出了5种优化方案，通过滑车或实车进行了验证，以实现后排约束系统的优化。

4.1 系统方案

结合第3章的6种影响因素仿真结果和该车型的实际情况，得出初步优化方案。由于该车型总布置已经基本锁定，安全带锚点和带扣固定点位置调整比较困难，故这两种优化不再考虑。滑车试验的方案，首先是针对适用的单一方案的有效性进行验证，即在基础配置上使用钢架带扣及动态锁舌。另，考虑到加强防下潜梁主要是防止下潜，故不再单独进行滑车验证。然后，考虑到试验成本和单一滑车试验结果的分析，方案3将考虑安全带调整为带预紧和中限力，有助于降低骨盆位移量和降低头胸部的位移差。为进一步对伤害情况进行优化，方案4在方案3的基础上增加了加强防下潜梁。方案5是在方案4的基础上对安全带限力等级进一步降低，尝试对胸部压缩量进一步优化。以上综合分析汇总出5种系统优化方案，如表4.1所示。

表 4.1 约束系统优化方案汇总

序号	约束系统配置
方案1	高限力式安全带+钢架带扣
方案2	高限力式安全带+动态锁舌
方案3	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣
方案4	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁
方案5	预紧+低限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁

4.2 滑车试验验证

为确保滑车试验结果的有效性，首先基于基础实车试验结果对基础滑车进行验证，然后基于验证后的滑车进行优化配置和试验验证。64ODB滑车与基础试验颈部张力存在差异，在优化验证中会将此因素考虑进来。

表 4.2 基础滑车与基础试验对比

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015		备注
			F _{x+} (N)	F _{x-} (N)	F _z (N)	Moc _y (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础试验	50FF	440		1514	2708	53.2	39.5	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	585		1311	2845	68.2	40.3	-0.5	0		左侧肋骨力超标
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧肋骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧肋骨力超标

备注：红色填充为超过低性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

4.2.1 方案 1 滑车试验

方案 1：高限力式安全带+钢架带扣

由于试验安排的局限性，该方案仅进行了 64ODB 工况滑车验证。

针对方案 1，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.1 所示。

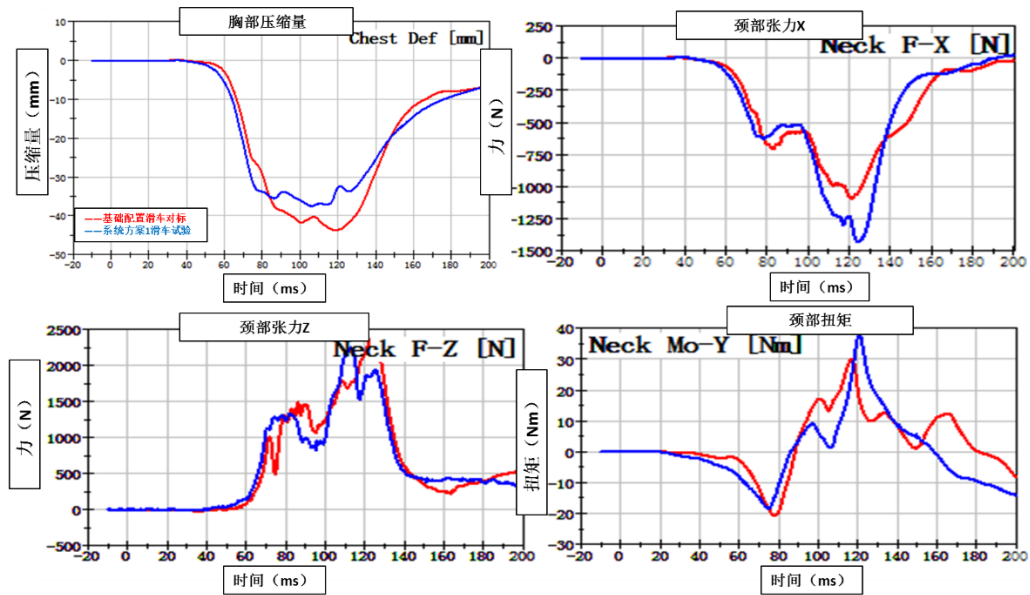


图 4.1 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 1）

针对方案 1，64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.2 所示。

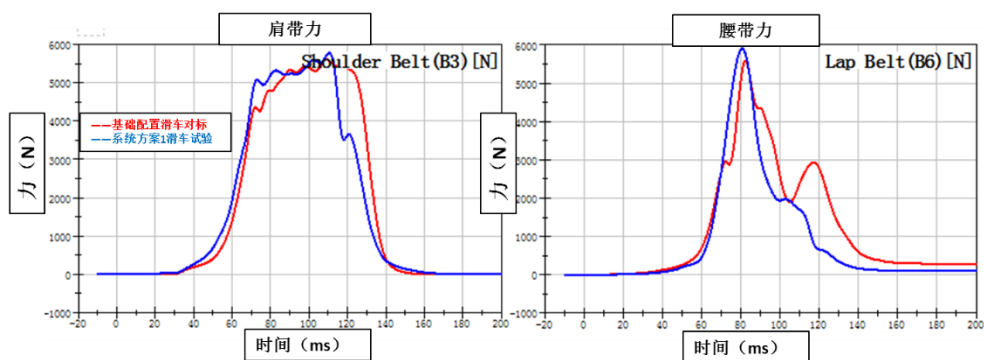


图 4.2 64ODB 安全带肩带和腰带力 (方案 1)

针对方案 1，64ODB 左右髂骨力的试验结果，如图 4.3 所示。

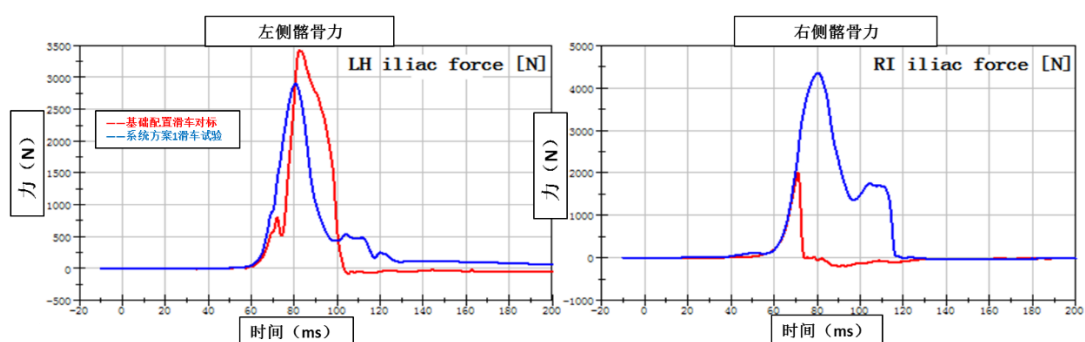


图 4.3 64ODB 左右髂骨力 (方案 1)

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 4.3 所示。

表 4.3 方案 1 试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髂骨力 罚分	C-NCAP 2015 得分	备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocv (Nm)				
C-NPCAP	64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2	
基础滑车	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	左侧髂骨力超标
方案1	64ODB	418		1431	2248	18.6	37.5	0	0.82	

备注：绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

通过曲线以及伤害指标分值可以看出，颈部张力减少和胸部压缩量均减少，伤害均降低。另外，左右侧髂骨力均未超标，没有明显下潜。从结果来看，将织带式带扣改为钢支架具有更好的效果。

4.2.2 方案 2 滑车试验

方案 2：高限力式安全带+动态锁舌

该方案用于验证动态锁舌的影响效果。

针对方案 3，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.4 所示。

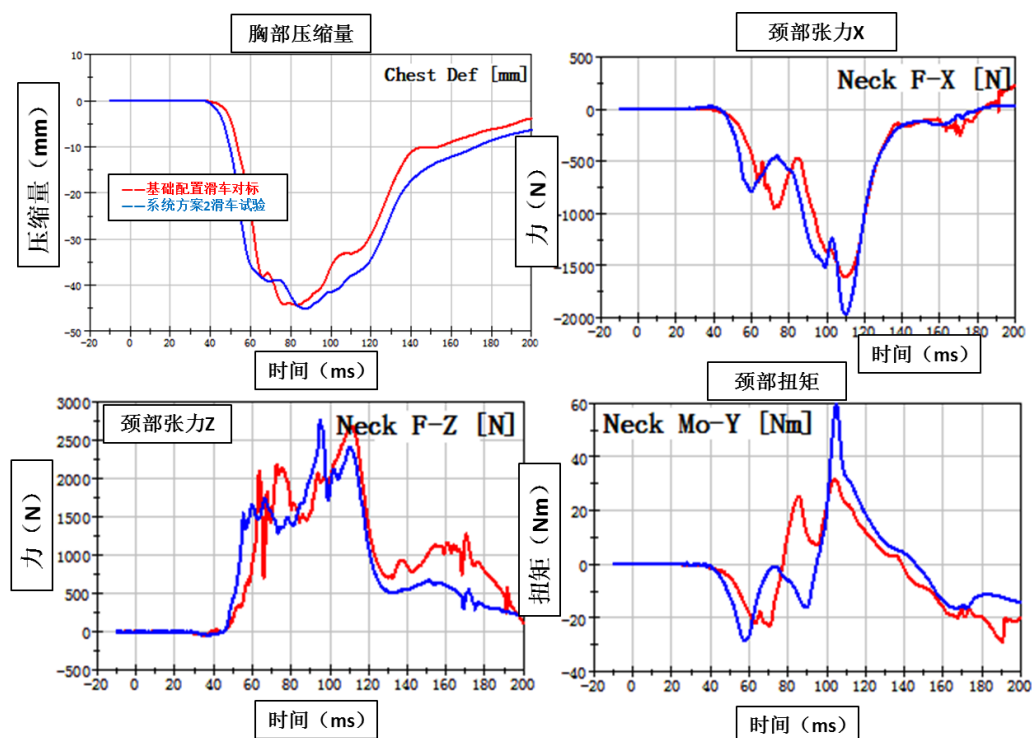


图 4.4 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 2）

针对方案 2，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.5 所示。

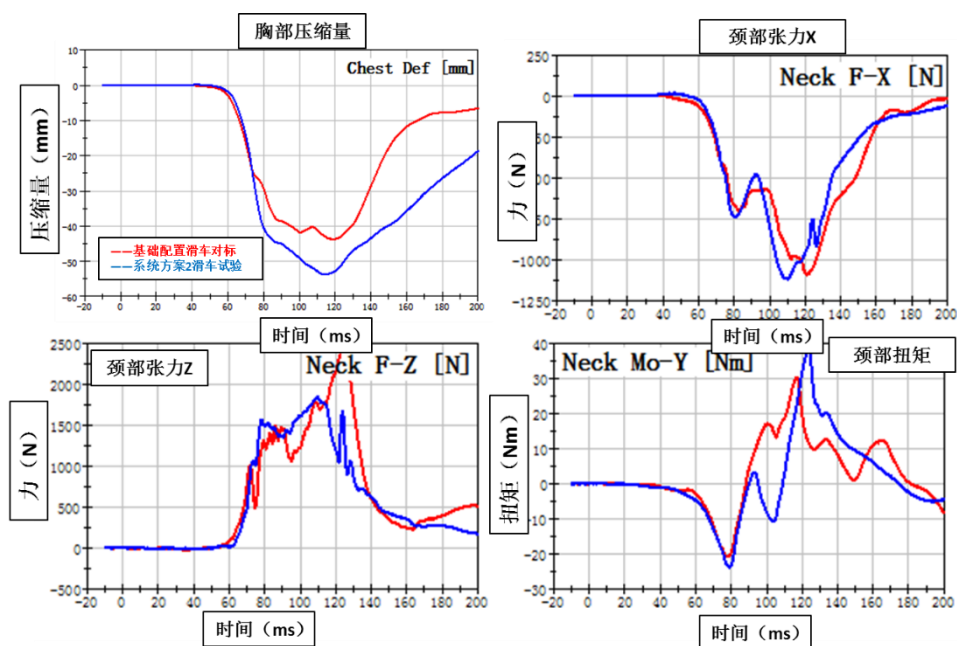


图 4.5 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 2）

针对方案 2，50FF 和 64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.6 所示。

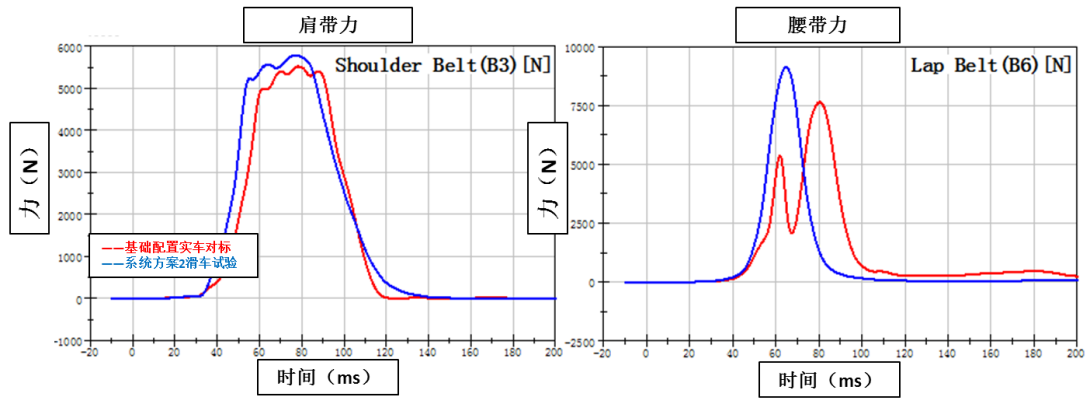


图 4.6 50FF 安全带肩带和腰带力（方案 2）

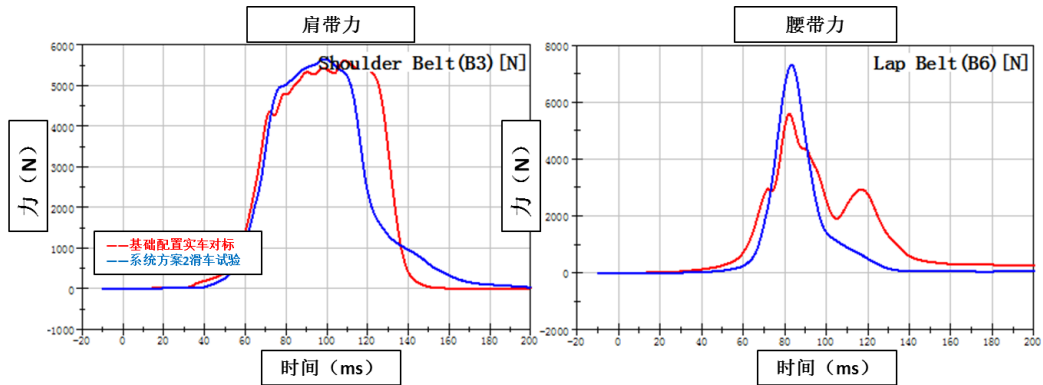


图 4.7 64ODB 安全带肩带和腰带力（方案 2）

针对方案 2，50FF 左右髂骨力的试验结果，如图 4.8 所示。

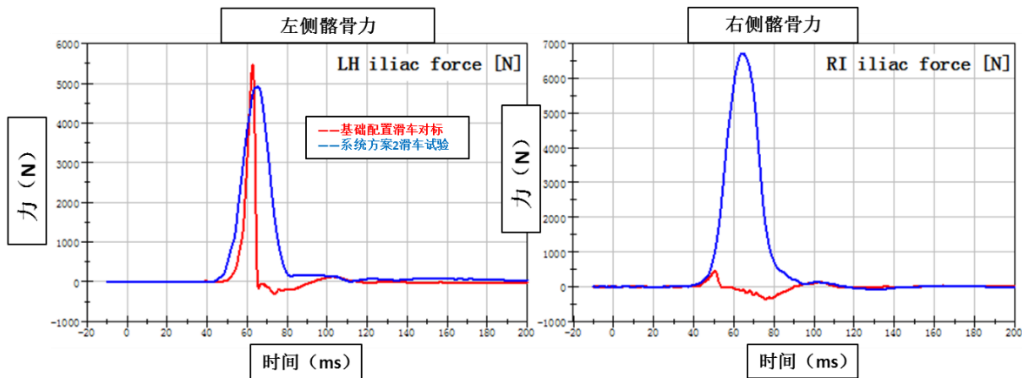


图 4.8 50FF 左右髂骨力（方案 2）

针对方案 2，64ODB 左右髂骨力的试验结果，如图 4.9 所示。

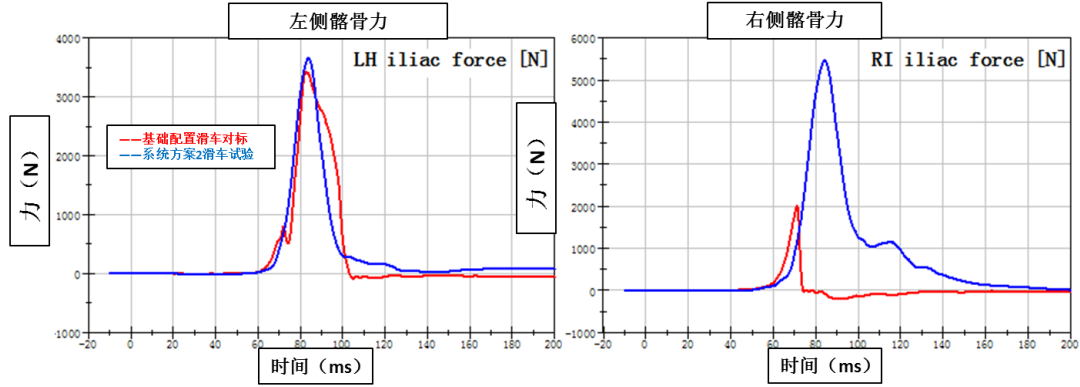


图 4.9 64ODB 左右髌骨力 (方案 2)

整理数据并进行 C-NCAP 评分, 如表 4.4 所示。

表 4.4 方案 2 试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髌骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧髌骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
方案2	50FF	513		1962	2764	28.5	45.1	0	0.92	1.77	
	64ODB	354		1160	1840	23.8	53.8	0	0.85		

备注: 红色填充为超过低性能限值, 绿色为满足高性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

通过曲线以及伤害指标分值可以看出, 相对于对标结果, 颈部张力减少和胸部压缩量均减少, 伤害均降低。另外, 左右侧髌骨力均未超标, 未出现下潜。从结果来看, 动态锁舌可以有效防止下潜。

4.2.3 方案 3 滑车试验

方案 3: 预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣

针对方案 3, 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果, 如图 4.10 所示。

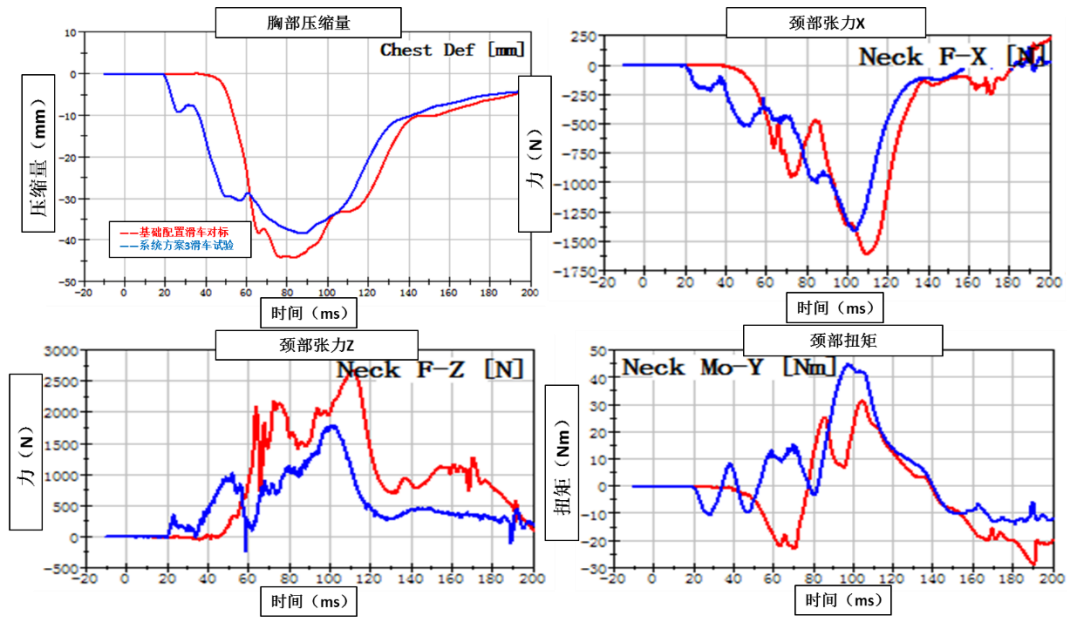


图 4.10 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 3）

针对方案 3，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.11 所示。

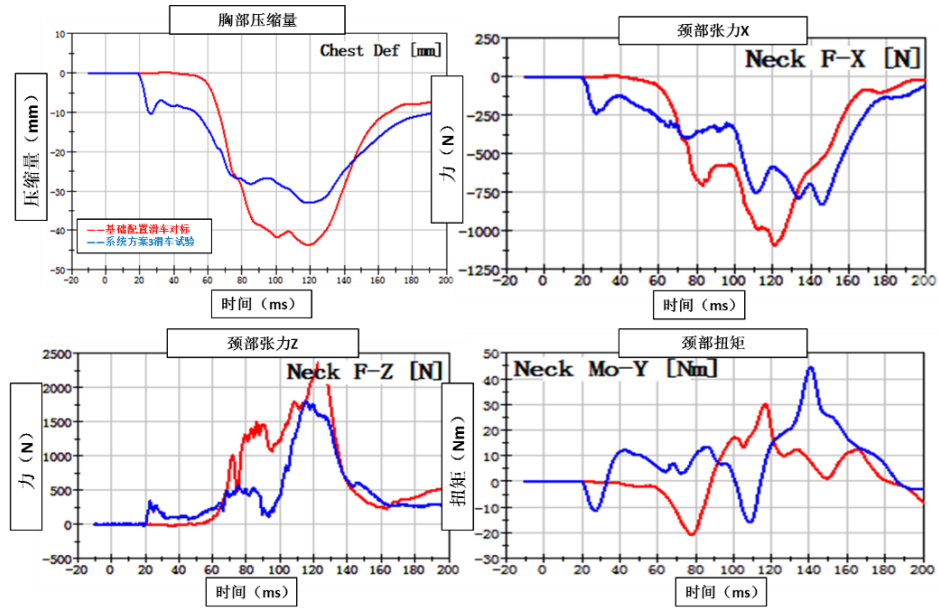


图 4.11 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 3）

针对方案 3，50FF 和 64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.12 所示。

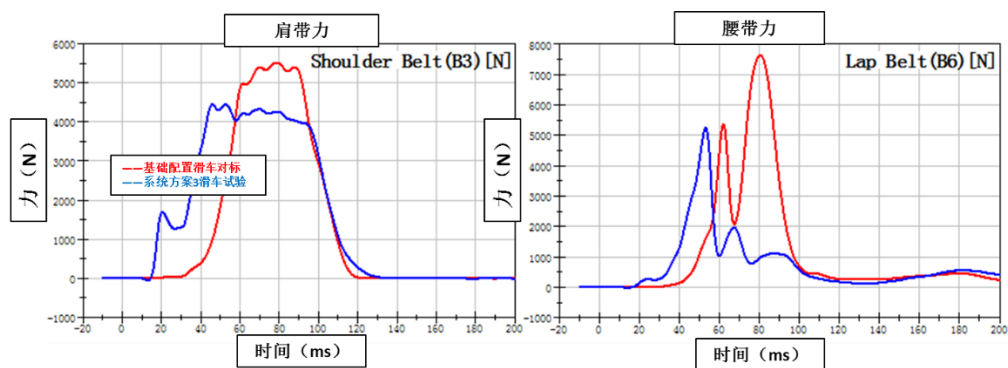


图 4.12 50FF 安全带肩带和腰带力 (方案 3)

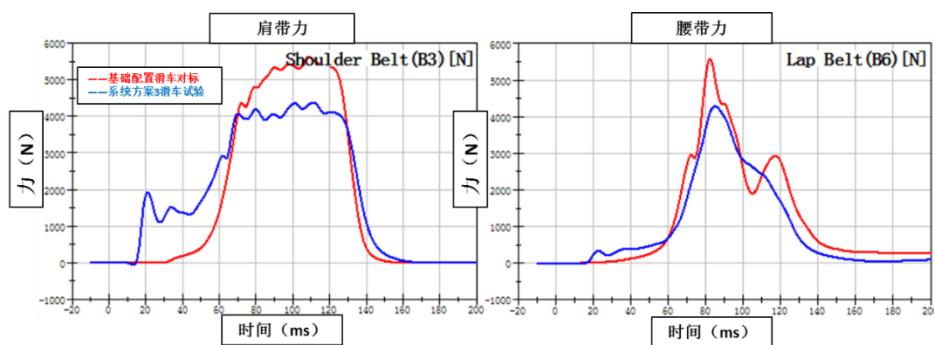


图 4.13 64ODB 安全带肩带和腰带力 (方案 3)

针对方案 3, 50FF 左右髂骨力的试验结果, 如图 4.14 所示。

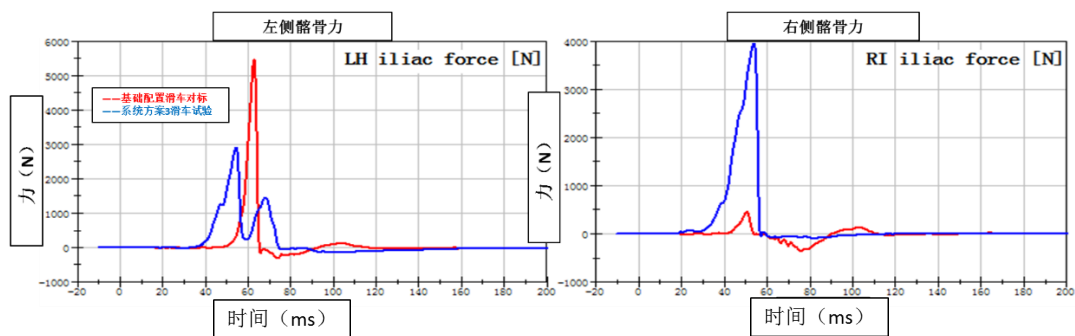


图 4.14 50FF 左右髂骨力 (方案 3)

针对方案 3, 64ODB 左右髂骨力的试验结果, 如图 4.15 所示。

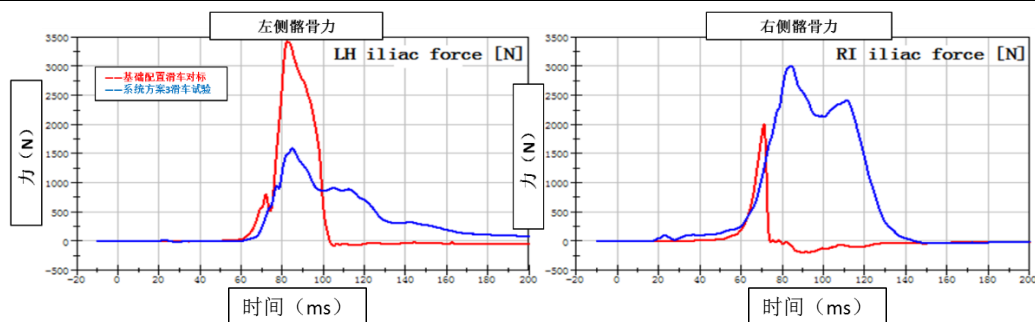


图 4.15 64ODB 左右髂骨力的试验结果（方案 3）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 4.5 所示。

表 4.5 方案 3 试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髂骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧髂骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧髂骨力超标
方案3	50FF	214		1415	1782	13.9	38.4	-1	0.37	1.87	试验次数过多， 防潜梁安装孔位 滑牙，导致试验 失效
	64ODB	258		829	1796	16	33	0	1.5		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

50FF 试验时，由于前面进行了太多的试验，导致安装座椅防下潜梁的固定孔多数滑牙，导致此次试验结果失效，无实际参考意义。从 64ODB 的结果来看，颈部张力和胸部压缩量均得到了有效改善，无明显下潜发生。另，虽然方案 3 在 50FF 试验中因试验失效不能反映真实得分情况，就对比方案 2 的配置情况，该方案应该不会发生假人下潜情况，若仅考虑没有下潜发生其他伤害评价部位按照目前试验结果来计算，可以得到 1.37 的得分，加上 64ODB 的 1.5 分，方案 3 后排共得分 2.87 分。

4.2.4 方案 4 滑车试验

方案 4：预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁。

针对方案 4，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.16 所示。

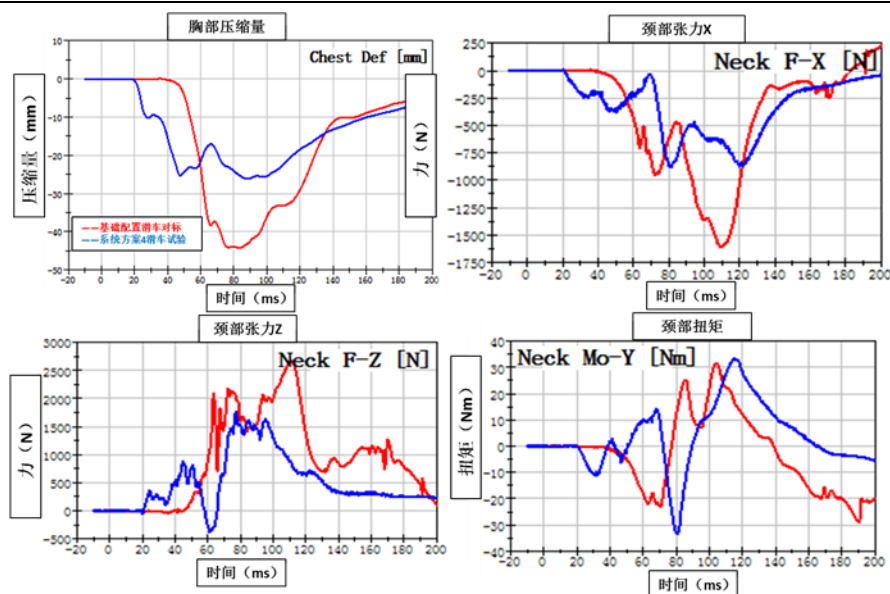


图 4.16 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 4）

针对方案 4，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.17 所示。

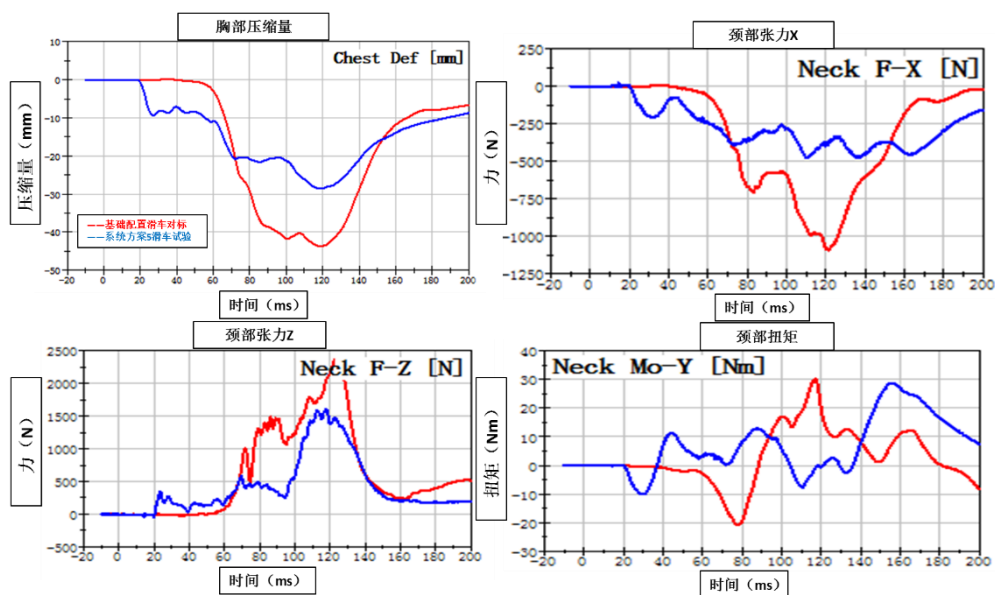


图 4.17 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 4）

针对方案 4，50FF 安全带肩带和腰带力如图 4.18 所示。

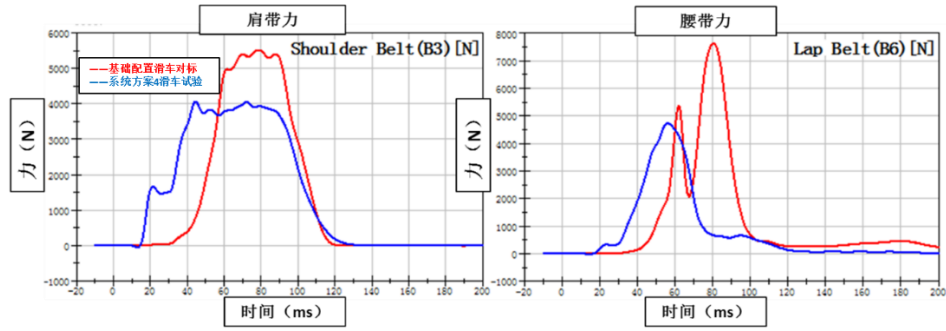


图 4.18 50FF 安全带肩带和腰带力（方案 4）

针对方案 4，64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.19 所示。

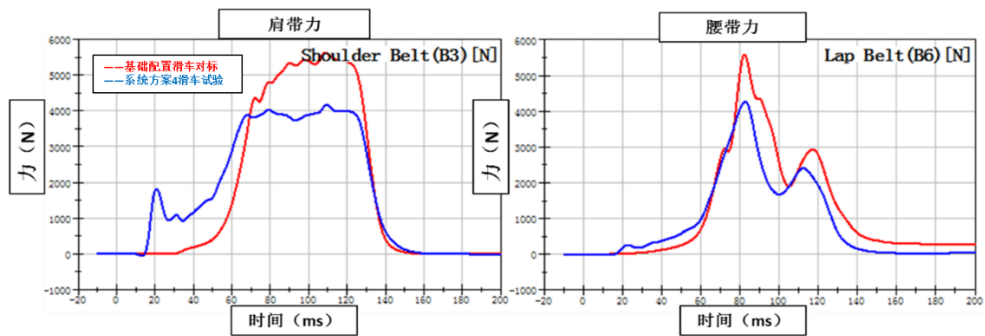


图 4.19 64ODB 安全带肩带和腰带力（方案 4）

针对方案 4，50FF 左右髂骨力的试验结果，如图 4.20 所示。

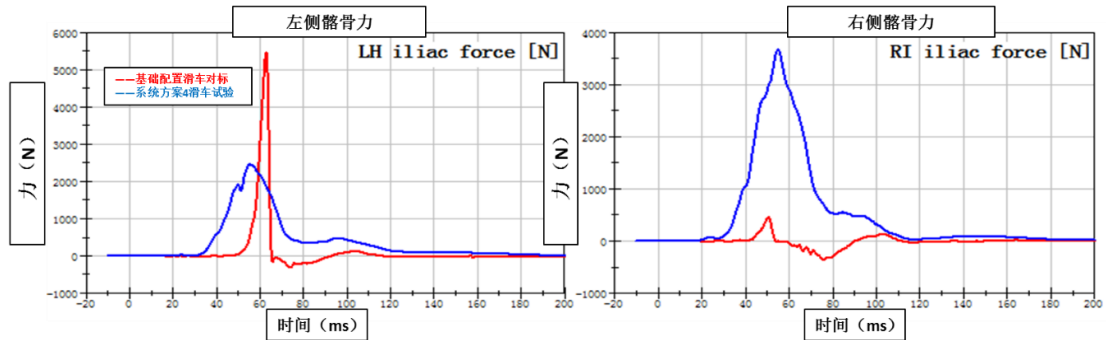


图 4.20 50FF 左右髂骨力（方案 4）

针对方案 4，64ODB 左右髂骨力的试验结果，如图 4.21 所示。

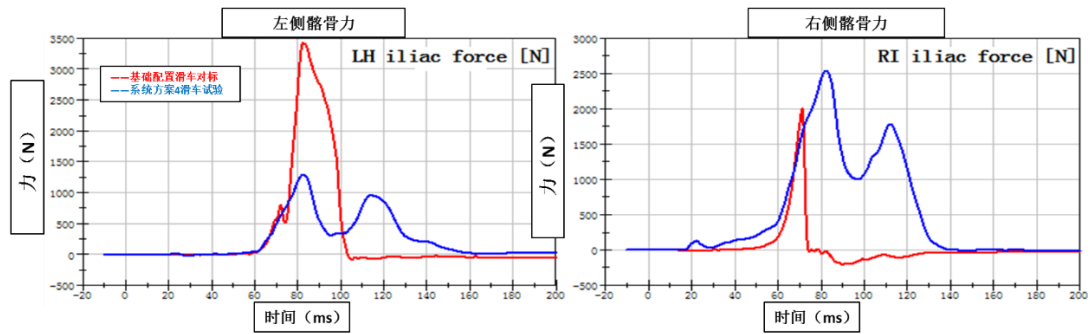


图 4.21 64ODB 左右髂骨力（方案 4）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，如表 4.6 所示。

表 4.6 方案 4 试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髂骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocv (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧髂骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧髂骨力超标
方案4	50FF	373		1195.8	1861.1	38.2	29.9	0	1.69	3.3	
	64ODB	240		722.3	1750.7	13.2	31.4	0	1.61		1.61

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

通过曲线以及伤害指标分值可以看出，相对于验证结果，50FF 和 64ODB 工况下颈部张力减少和胸部压缩量均减少，伤害均降低。另外，左右侧髂骨力均未超标，没有明显下潜。两工况得分总和为 3.3 分，得分率为 82.5%，整体效果表现良好。从假人胸部位移量来看，离 3C 限值 300mm 还有约三分之一的余量，安全带限力有继续下降的空间。

4.2.5 方案 5 滑车试验

方案 5：预紧+低限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁

基于方案 4 的验证结果，在此基础上进一步下调限力杆等级，从中等限力等级下降到低限力等级。针对方案 5，50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.22 所示。

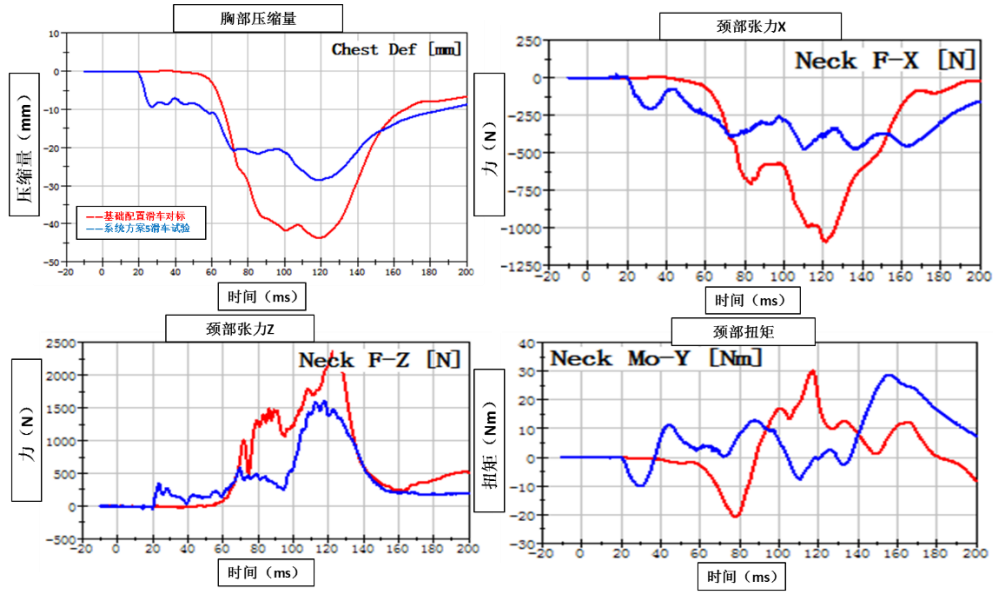


图 4.22 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（方案 5）

针对方案 5，64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果，如图 4.23 所示。

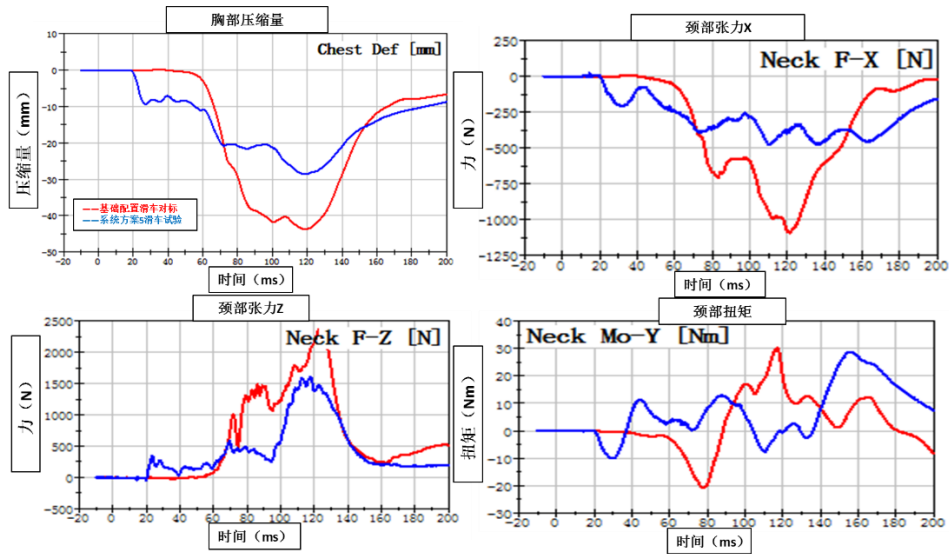


图 4.23 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的试验结果（方案 5）

针对方案 5，50FF 安全带肩带和腰带力如图 4.24 所示。

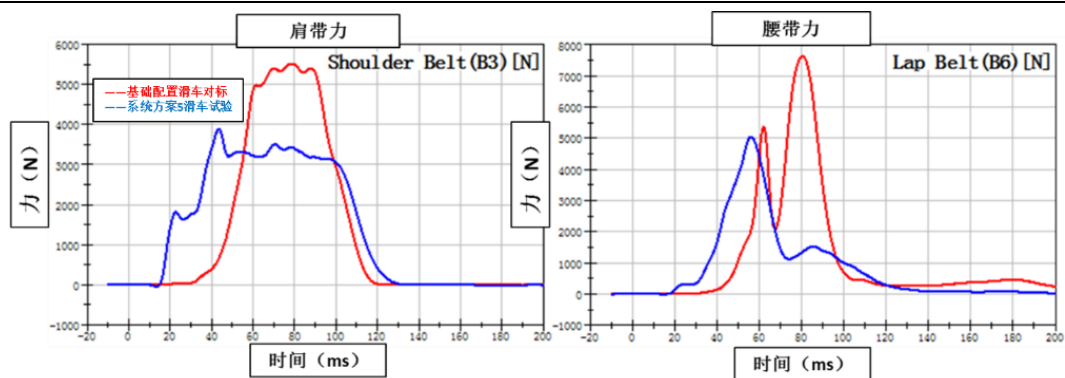


图 4.24 50FF 安全带肩带和腰带力 (方案 5)

针对方案 5, 64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.25 所示。

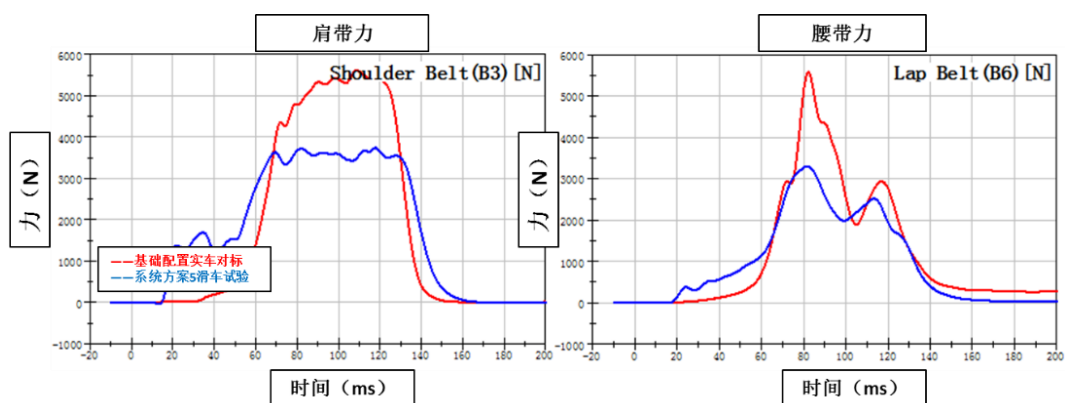


图 4.25 64ODB 安全带肩带和腰带力 (方案 5)

针对方案 5, 50FF 左右髂骨力的试验结果, 如图 4.26 所示。

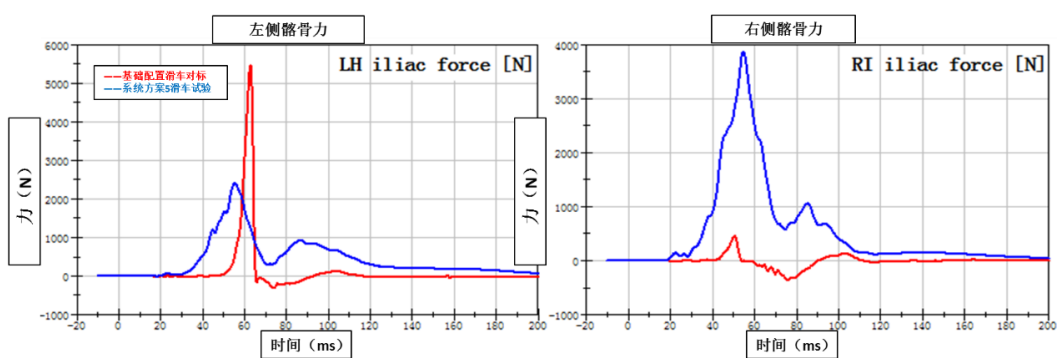


图 4.26 50FF 左右髂骨力的试验结果 (方案 5)

针对方案 5, 64ODB 左右髂骨力的试验结果, 如图 4.27 所示。

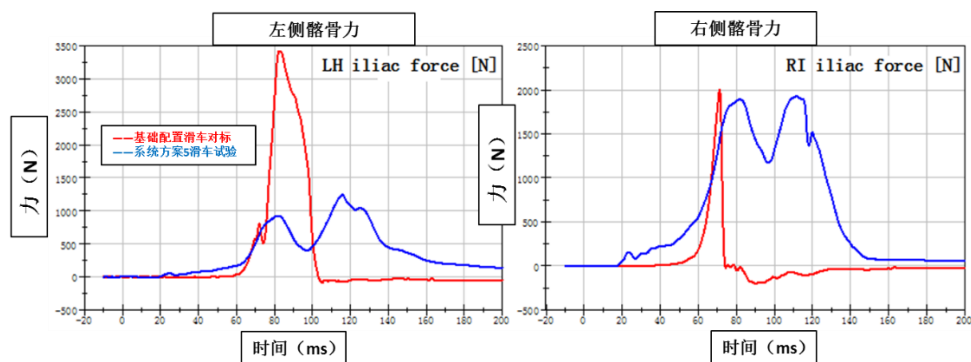


图 4.27 64ODB 左右髂骨力 (方案 5)

整理数据并进行 C-NCAP 评分, 如表 4.7 所示。

表 4.7 方案 5 试验结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髂骨力 罚分	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)			得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧髂骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧髂骨力超标
方案5	50FF	204		880	1760	33.2	26.2	0	1.86	3.82	
	64ODB	157		450	1450	7.4	23.9	0	1.96		

备注: 红色填充为超过低性能限值, 绿色为满足高性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

通过曲线以及伤害指标分值可以看出, 相对于对标结果, 50FF 和 64ODB 工况下颈部张力减少和胸部压缩量均减少, 伤害均降低。另外, 左右侧髂骨力均未超标, 未表现出下潜。两工况得分总和为 3.64 分, 得分率为 91%, 整体效果表现良好。针对该方案进行了 3C 摸底测试, 胸部位移 290mm 左右, 在 300mm 限值之内, 符合要求。

4.2.6 方案结果汇总

综合以上 5 种方案, 汇总结果如下:

表 4.8 5 种方案试验结果汇总

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	髌骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分		
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础滑车	50FF	500		1609	2674	49	44.3	-0.5	0.45	0.45	左侧髌骨力超标
	64ODB	441		1092	2378	58.7	43.7	-0.5	0	0	左侧髌骨力超标
方案1	64ODB	418		1431	2248	18.6	37.5	0	0.82	/	
方案2	50FF	513		1962	2764	28.5	45.1	0	0.92	1.77	
	64ODB	354		1160	1840	23.8	53.8	0	0.85		
方案3	50FF	214		1415	1782	13.9	38.4	-1	0.37	1.87	试验次数过多，防潜梁安装孔位滑牙，导致试验失效
	64ODB	258		829	1796	16	33	0	1.5		
方案4	50FF	373		1195.8	1861.1	38.2	29.9	0	1.69	3.3	
	64ODB	240		722.3	1750.7	13.2	31.4	0	1.61		
方案5	50FF	204		880	1760	33.2	26.2	0	1.86	3.82	
	64ODB	157		450	1450	7.4	23.9	0	1.96		

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

由得分评价可知，以上 5 种的优化方案相对于基础配置均有不同程度的改善，都有效的防止了假人下潜，对颈部张力和胸部压缩量有不同程度的优化。其中方案 5 得分最高，对乘员的保护效果最佳，其配置为钢支架带扣、动态锁舌，并使用带预紧及低限力等级的卷收器，座椅防下潜梁进行加固。

4.3 方案实车验证

为了深入验证该方案的有效性，对方案 5 进行了 50FF 和 64ODB 的实车验证试验。

为了保证该方案验证中的实车与基础实验时的实车整体状态具有一致性，首先对实车进行 B 柱曲线对比，50FF 和 64ODB 分别如图 4.28 和 4.29 所示。

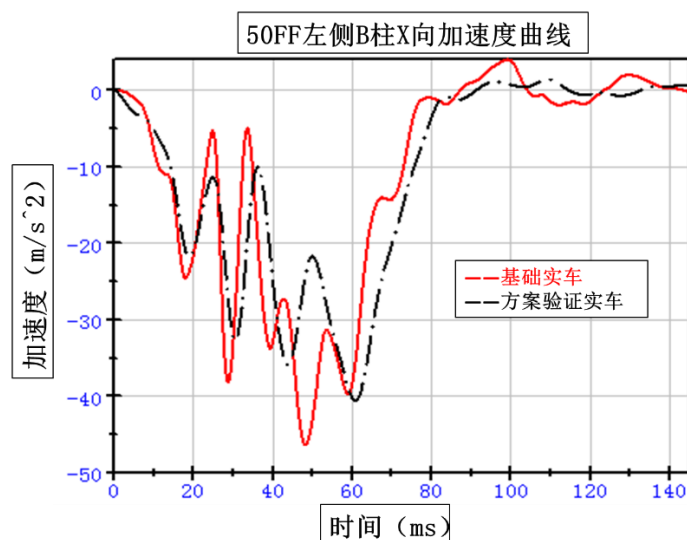


图 4.28 50FF 下左侧 B 柱 X 向加速度曲线对比

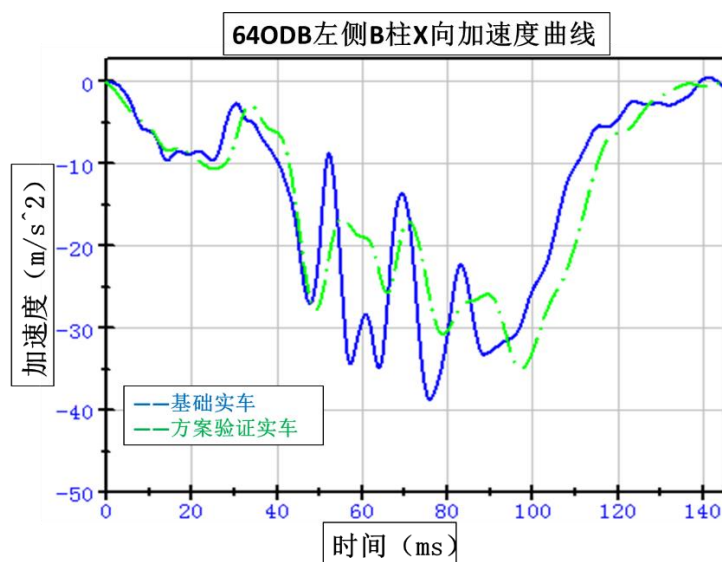


图 4.29 64ODB 下左侧 B 柱 X 向加速度曲线对比

根据曲线对比可知，方案验证实车与基础试验实车的 B 柱曲线接近，因此基础实车和验证实车具有一致性，可用来验证后排约束系统的优化情况。

4.3.1 50FF 方案实车验证

50FF 实车试验后后排约束系统表现，如图 4.30 所示。



图 4.30 50FF 实车试验后后排约束系统表现

50FF 头部 X、Y、Z 及合成加速度的实车验证结果，如图 4.31 所示。

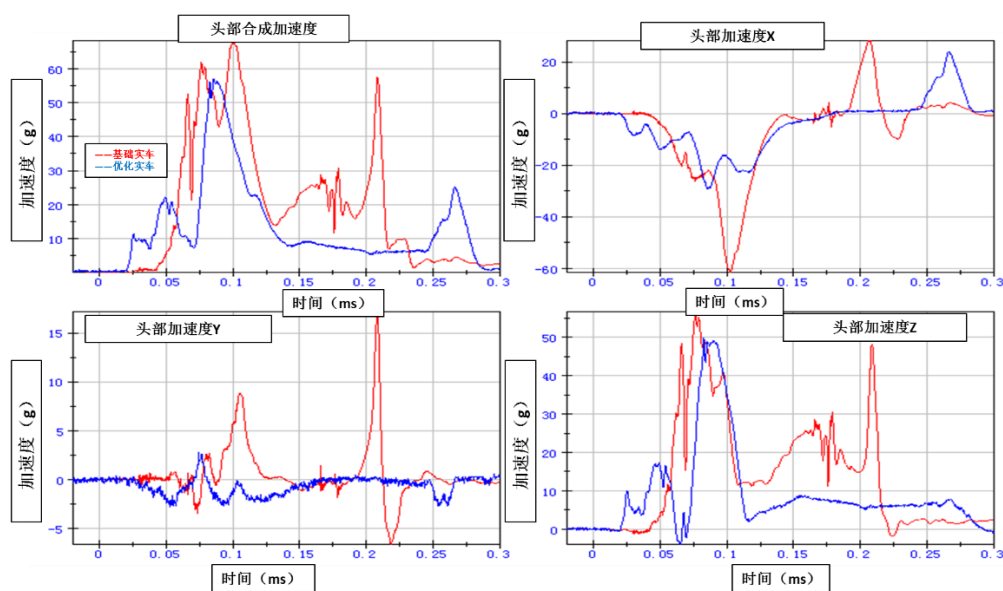


图 4.31 50FF 头部 X、Y、Z 及合成加速度（优化实车）

50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的实车验证结果，如图 4.32 所示。

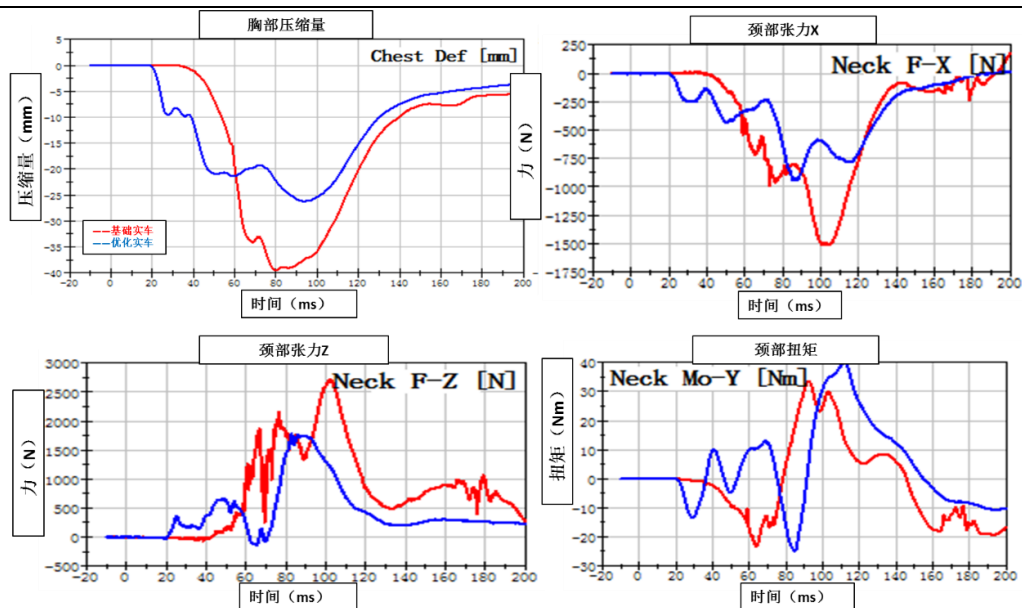


图 4.32 50FF 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（优化实车）

针对方案 5，50FF 安全带肩带和腰带力如图 4.33 所示。

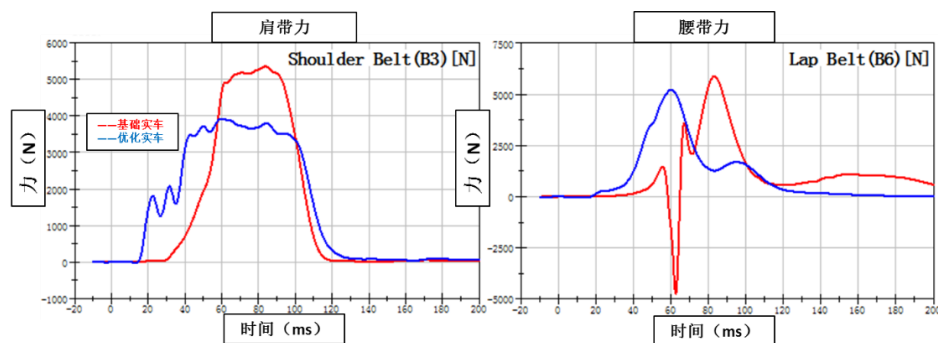


图 4.33 50FF 安全带肩带和腰带力（优化实车）

50FF 左右肋骨力的实车验证结果，如图 4.34 所示。

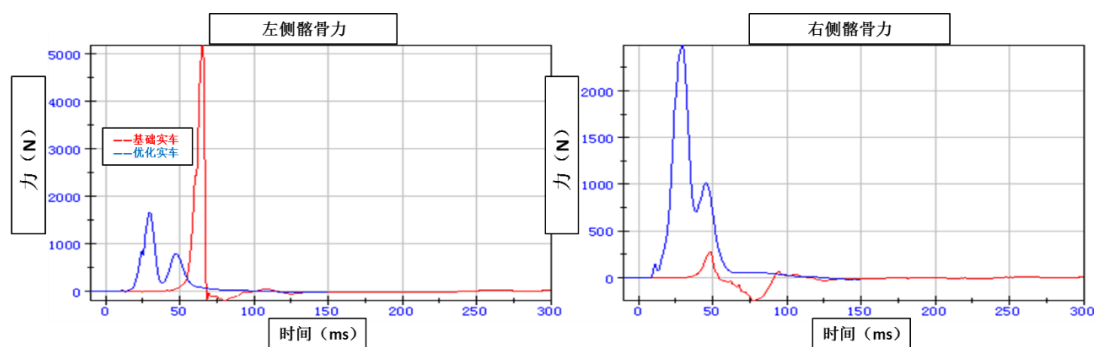


图 4.34 50FF 左右肋骨力（优化实车）

整理数据并进行 C-NCAP 评分，结果如表 4.9 所示。

表 4.9 50FF 优化实车验证结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部 压缩量 (mm)	髌骨力 罚分	C-NCAP 2015 得分	备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)				
C-NPCAP	50FF	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2	
基础试验	50FF	440		1514	2708	53.2	39.5	-0.5	0.64	左侧髌骨力超标
实车验证	50FF	308		941	1782	25	26.2	0	1.85	

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

由评分可知，在 50FF 碰撞工况下，使得得分从 0.64 增加到 1.85，效果显著。

4.3.2 640DB 方案实车验证

640DB 实车试验后后排约束系统表现，如图 4.35 所示。



图 4.35 640DB 实车试验后后排约束系统表现

640DB 头部 X、Y、Z 及合成加速度的实车验证结果，如图 4.36 所示。

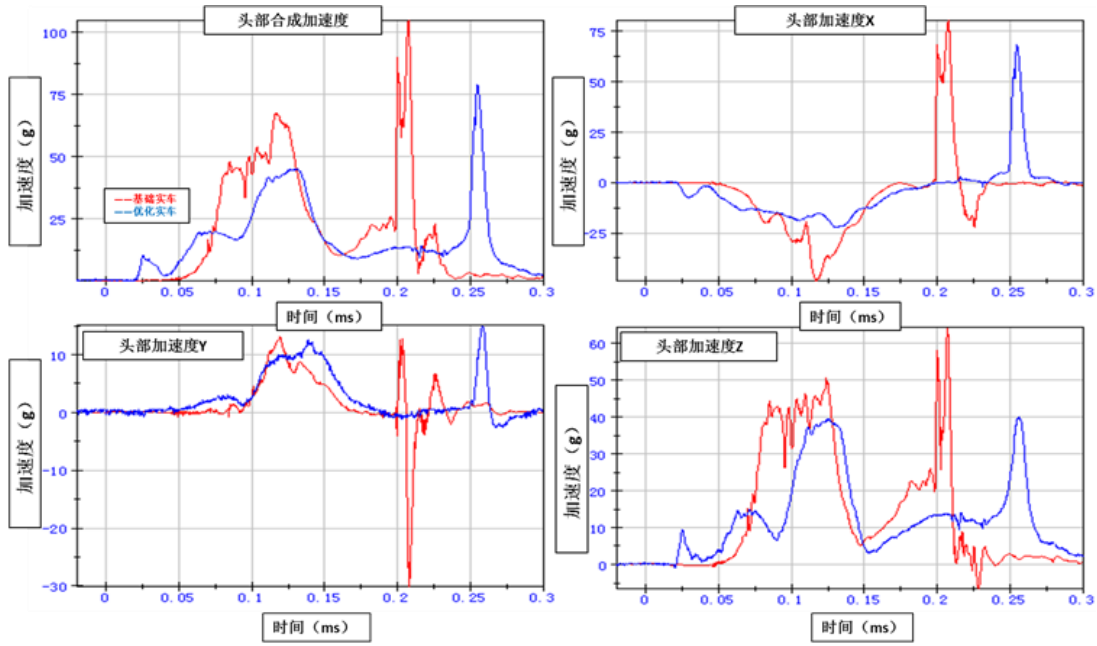


图 4.36 64ODB 头部 X、Y、Z 及合成加速度（优化实车）

64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩的实车验证结果，如图 4.37 所示。

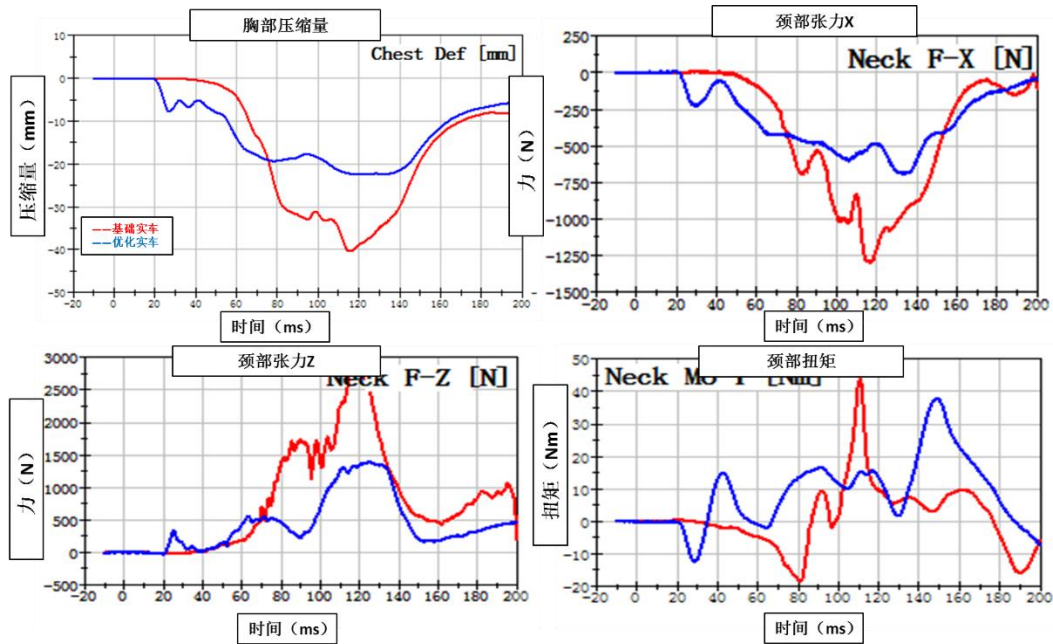


图 4.37 64ODB 胸部压缩量和颈部 X、Z 向力及所受扭矩（优化实车）

针对优化实车，64ODB 安全带肩带和腰带力如图 4.38 所示。

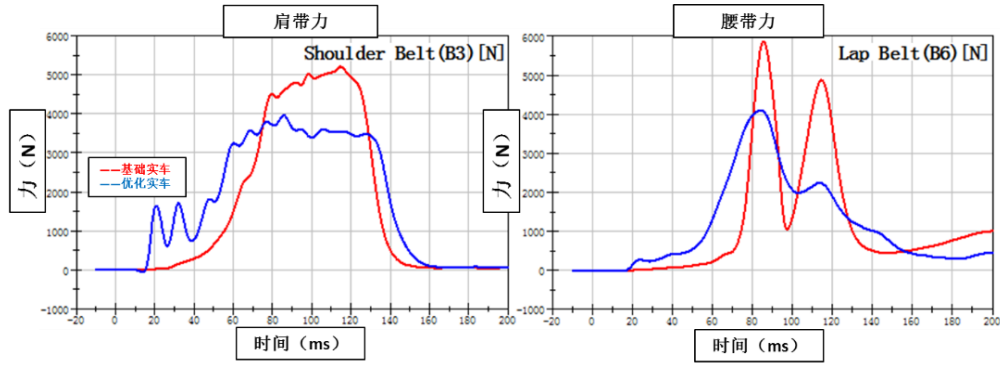


图 4.38 64ODB 安全带肩带和腰带力 (优化实车)

64ODB 左右肋骨力的实车验证结果, 如图 4.39 所示。

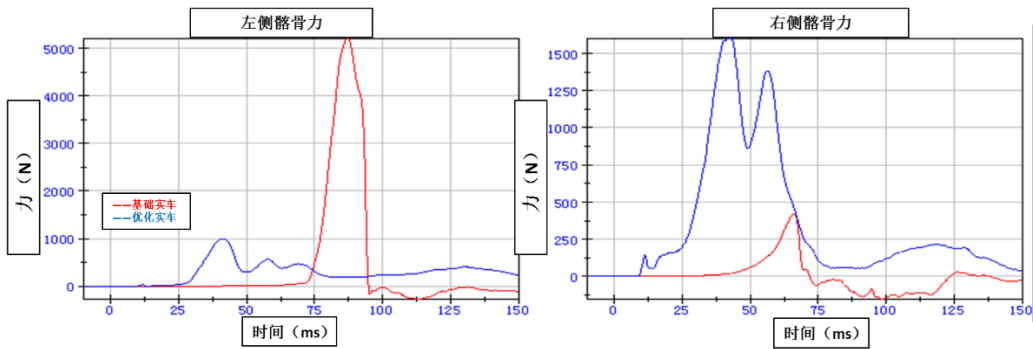


图 4.39 64ODB 左右肋骨力 (优化实车)

整理数据并进行 C-NCAP 评分, 结果如表 4.10 所示。由评分可知, 在 64ODB 碰撞工况下, 使得得分从 0 增加到 2, 优化效果显著。

表 4.10 64ODB 优化实车验证结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015	备注
			F _{x+} (N)	F _{x-} (N)	F _z (N)	M _{ocv} (Nm)				
C-NCAP	64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2	
基础试验	64ODB	585		1311	2845	68.2	40.3	-0.5	0	左侧肋骨力超标
实车验证	64ODB	191		835	1394	37.8	22.4	0	2	

备注: 红色填充为超过低性能限值, 绿色为满足高性能限值, 橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

4.3.3 结果汇总

汇总 50FF 和 64ODB 的试验数据并进行 C-NCAP 评分, 结果如表 4.11 所示。

表 4.11 优化实车验证结果

方案	碰撞类型	头部	颈部				胸部	肋骨力	C-NCAP 2015		备注
			Fx+ (N)	Fx- (N)	Fz (N)	Mocy (Nm)	压缩量 (mm)	罚分	得分	得分	
C-NPCAP	50FF&64ODB	500-700	1200-1950		1700-2620	36-49	23-48	0/-0.5/-1	2/2	4	
基础试验	50FF	440		1514	2708	53.2	39.5	-0.5	0.64	0.64	左侧肋骨力超标
	64ODB	585		1311	2845	68.2	40.3	-0.5	0	0	左侧肋骨力超标
实车验证	50FF	308		941	1782	25	26.2	0	1.85	1.85	
	64ODB	191		835	1394	37.8	22.4	0	2	2	

备注：红色填充为超过低性能限值，绿色为满足高性能限值，橙色为介于高性能限值和低性能限值之间。

从采集的曲线及试验后车身与约束系统的实际表现，可以看出 50FF 和 64ODB 下后排女性假人坐姿良好，安全带腰带对骨盆约束较好，无陷入假人腹部迹象，无下潜现象，假人与前排座椅也无接触。最终，在实车验证中，50FF 后排得到 1.85 分，64ODB 后排得到 2 分满分，总分 3.85 分，相比于第 1 轮基础配置的实车实验的 0.64 分，得分提高了 3.21 分，得分率 96.25%，接近满分。后排约束系统得到了优化。

4.4 方案性价比分析

在性能提升的同时，往往同时关注成本的变化，即通常所说的性价比。考虑成本的因素，整车厂家在开发车型时，根据车型的定位不同，对后排得分设定的目标也不相同。为理解不同优化方案和成本之间的关系，就各个方案的成本展开分析，结合现有后排约束系统零部件产业的能力提出不同性价比的解决方案。该分析仅针对后排约束系统优化方案中涉及的零部件展开分析。

零部件成本的构成比较复杂，如由于不同零部件制作厂家的规格型号不同也会有成本的差异，还涉及到车型的年量、物流等因素对成本的影响。为方便分析，本文选取市场上常见的规格和型号仅针对产品自身成本即通常所说的产品制造成本进行分析，不考虑车型年量、物流、管理等的成本。文中车型的基础配置是高限力式安全带，为方便对比分析，故以高限力式安全带为成本的基础，其他优化方案的成本基于基础配置的成本进行变化。各个优化方案的成本变化如表 4.12 所示。

表 4.12 后排优化方案成本变化

序号	约束系统配置	成本变化
基础	高限力式安全带	1
方案 1	高限力式安全带+钢架带扣	1.125
方案 2	高限力式安全带+动态锁舌	1.25
方案 3	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣	1.625
方案 4	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁	1.75
方案 5	预紧+低限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁	1.75

表 4.12 所示为各个优化方案相当于基础配置的成本变化一览，需要说明的是方案 4 和方案 5 的不同仅是安全带的限力等级不同，限力等级通常是通过调节安全带卷收器内部的限力杆扭力不同而产生不同的限力值，而限力杆扭力的变化对成本影响很小可以忽略不计，因此方案 4 和方案 5 的成本基本相同。

为建立不同方案与成本之间的对应关系，将各个方案的成本变化与得分进行对比，如表 4.13 所示。

表 4.13 后排优化方案成本与得分对比

序号	约束系统配置	成本变化	后排得分
基础	高限力式安全带	1	0.64
方案 1	高限力式安全带+钢架带扣	1.125	1.27
方案 2	高限力式安全带+动态锁舌	1.25	1.77
方案 3	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣	1.625	2.87
方案 4	预紧+中限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁	1.75	3.3
方案 5	预紧+低限力式安全带+动态锁舌+钢架带扣+加强防下潜梁	1.75	3.82

表 4.13 表面，方案 5 得分最高需要的成本也最高，在基础配置的基础上有 75% 的涨幅。另，方案 3 的得分 2.87 是基于方案 3 的分析描述中假设试验没有失效即假人为发生下潜而计算的分值，详细分析见 4.2.3 方案 3 的分析。

为分析对比分析方案的性价比，将后排的得分与成本变化进行对比，得到单位得分成本概念，即单位成本能所能达到的分值是多少。也就是单位得分成本中数值最高的方案其性价比最好，如图 4.40 所示。

$$\text{单位得分成本} = \text{后排得分} / \text{成本变化} \quad (4.1)$$

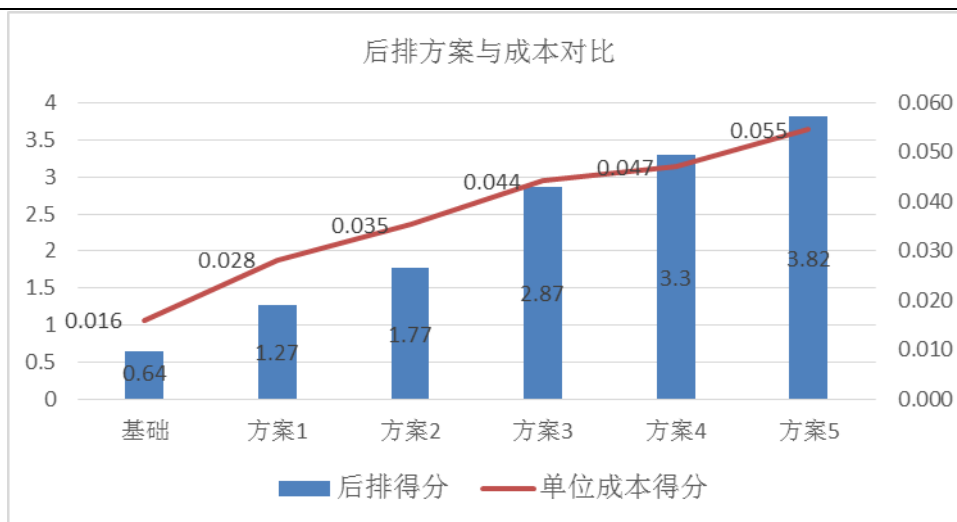


图 4.40 后排方案与成本对比

如图 4.40 所示，方案 5 单位成本得分为 0.055 即所投入的单位成本可以有 0.055 分的回报，而方案 1 虽然总投入仅在基础方案上增加了 12.5%，但单位成本得分的回报也相对较低，是 0.028；优化方案的成本与后排得分基本呈线性递增关系，即成本的投入越大得分也越高。

如在第 3 章中提及的，安全带锚点、上下固定点的变化也会对后排乘员保护起到相应的影响。建议在车型总布置初期，应考虑后排安全带的布置情况，如安全带上下固定点位置及带扣固定点位置，这些位置的调整通常不会涉及到成本的变化。如果在布置初期考虑进来，可以起到优化后排乘员保护效果的作用。另，钢支架带扣因需根据具体车型的结构进行调整，可能需要投入相应的模具及工装费用，而织带带扣结构相对简单容易实现标准化。织带带扣成本较钢支架带扣有一定成本优势。在后续具体车型开发中，可以考虑使用相当长度的织带带扣进行分析，可以节省相关成本。

可能会出现后排安全约束系统配置相同而车型相同，成本有差异的情况。以上成本分析是基于文中分析的车型所考虑使用的配置方案进行的，可以作为后续开发车型的参考。针对不同市场定位即后排得分目标不同的车型，在兼顾成本的情况下选择合适的优化方案。

4.5 本章小结

本章根据第 3 章得到的后排约束优化方案，进行滑车试验验证和实车碰撞验证，验证出方案 5 具有最佳的效果，得分率为 96.25%，后排约束系统得到了优化。同时，对优化方案的成本进行了分析，建立了优化方案与成本之间的对应关系。可为不同车型在兼顾成本的情况下选择合适的优化方案提供一定参考。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文基于具体车型对后排安全系统进行了一系列的评估和优化。主要内容总结如下：

(1) 调研国内外汽车安全系统相关资料，对汽车被动安全系统安全性能的评估机理和评估标准进行系统的阐述和分析。并介绍了 C-NCAP 中 50 km/h 100% 完全正面碰撞和 64 km/h 正面 40% 重叠可变形壁障碰撞两种工况下，假人各伤害指标的定义原理和评估方法。

(2) 针对某车型进行 50FF 和 64ODB 的实车和滑车碰撞试验，发现后排假人失分严重，主要集中在颈部张力和胸部压缩量超标以及假人发生下潜，明确了本文研究的主要方向。然后，在 MADYMO 环境下建立了碰撞系统仿真模型，并与实车试验数据对标，得到精确的基础分析模型。

(3) 针对头部未发生二次碰撞的情况，对后排女性假人的伤害动力学进行理论分析，提出设计规律，并结合该车型的实际配置情况明确了后排安全系统的 5 种基本优化方案。然后，利用系统仿真基础模型对该影响因素的有效性以及设计规律的正确性进行仿真验证。

(4) 综合考虑该车型的实际情况，对基础方案重新组合了 5 种方案，进行了滑车试验验证及结果分析后，最终得到最佳保护效果的方案，得分率为 96.25%，后排约束系统得到了优化。

(5) 结合现有的后排约束系统零部件产业化能力提出了不同性价比的解决方案，可为不同车型在兼顾成本的情况下选择恰到好处的优化方案提供一定参考。

本文对 50FF 和 64ODB 下后排女性假人的胸部压缩量和颈部张力 F_z 进行了系统的动力学解析，得出设计规律和具体优化措施。然后，进行了多轮的仿真计算和滑车试验以及实车验证确认，最终得到优化方案。在项目进行中，积累了大量的宝贵经验，能够为类似车型的开发提供一定参考。

5.2 展望

综合考虑该项目的进行情况和所得到的成果，依然存在一些未尽工作和不足：

(1) 本文的研究是在假人未发生头部二次碰撞的前提下进行的，并且只研究了 50FF 和 64ODB 碰撞下的胸部、颈部和髌骨力的伤害指标，后续工作需要全

面考虑；

(2) 本文基于工程经验将设计理论规律转化为具体优化措施，尽管工程经验有相当的参考价值，但未进行量化的数学分析和匹配；

(3) 本文在进行方案试验设计配置时，筛选了主要影响因素，进行了方案试验验证，尽管最终获得了表现良好的配置方案，但在学术完整性及试验设计方法上还有完善的空间；

(4) 本文是针对具体车型进行的安全系统优化设计，推荐的方案在相关车型上具有的一定的局限性，后续开发需要进行评估

(5) 随着自动紧急制动（AEB）的普及，也需要进行分析评估对后排假人约束系统的影响。

总之，本项目的研究为汽车后排安全系统提供了一定的理论支撑和工程经验，但由于研究的广泛性和深入性不是足够充分，后续的研究中需要不断完善和修正，这也是汽车安全系统技术革新的基本思路。

致谢

本论文是在导师朱西产教授、马志雄博士的悉心指导下完成的。在论文进行过程中，导师渊博的专业学识、敏锐的学术嗅觉、严谨的科学态度都很大地影响了我，论文中的点点滴滴无不渗透着老师的汗水。借此机会，对您表示衷心的感谢和真诚的敬意。

在此也感谢院办的武老师、赵老师在论文流程格式等的细心指导，此外感谢我的校外导师陈勇博士，我的同事张三、李俊、杨群印、袁文华、刘二勇、杨修文、廉树明，感谢你们的细心指导，给予的大力支持和帮助。

2016年9月

参考文献

- [1] 孙振东, 刘玉光. 汽车正面碰撞试验中后排乘员伤害特性的研究[J]. 汽车工程, 2011, 08:664-668
- [2] 吕恒绪, 仲衍慧, 李向荣, 王凯. 正面碰撞试验后排女性假人伤害研究[J]. 交通标准化, 2011, 29-32
- [3] 商恩义, 乌秀春, 李楠. 两种正面碰撞试验中后排女性假人伤害对比研究[J]. 汽车技术, 2013, 18-22
- [4] 吴云腾. 正面碰撞时轿车后排乘员的伤害研究[D]. 硕士论文, 2011
- [5] 张君媛, 林逸, 赵英如. 微型客车约束系统参数对乘员碰撞响应的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2002, 6-10
- [6] 张君媛, 林逸, 华伟, 张敏. 汽车智能乘员约束系统效能的仿真研究[J]. 设计计算研究, 2003, 9-11
- [7] 朱海涛, 白鹏, 张向磊. 100%正面碰撞中第二排女性假人伤害统计与分析[J]. 2012 中国汽车安全技术国际研讨会
- [8] 唐亮, 刘晋浩, 程鹏乐, 周青, 王青春. 乘员下潜倾向判断准则的研究[J]. 汽车工程, 2014, 694-608
- [9] 李月明, 韩刚, 刘卫国, 吴成明, 赵福全. 后排座椅下潜对假人伤害的影响及其改进[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 23-26
- [10] 商恩义, 乌秀春, 李楠. 两种正面碰撞试验中后排女性假人伤害对比研究[J]. 设计计算研究, 2013, 18-21
- [11] 瞿喆文. 面向 C-NCAP 的正面乘员约束系统优化设计[J]. 设计计算研究, 2010, 11-14
- [12] 胡远志, 黄杰, 刘西, 蒋成约, 冯擎峰, 刘卫国. 某车型正面碰撞后排乘员伤害的仿真优化, 科学技术与工程, 2015, 259-264
- [13] 葛如海, 陆子波, 杜亮. 正面 40% 偏置碰撞时后排乘员安全性的仿真分析, 计算机应用与软件, 2015, 113-116
- [14] Stephane Couturier, Jacques Faure. Procedure to assess submarining in frontal impact [J]. 2007.
- [15] Kenji Kawaguchi, Naoki Kaneko, Tatsuhiko Lwamoto. Optimized Restraint System for Rear Occupants in Frontal Crash [J]. 2003.
- [16] Alope Prasad, Doug Weston. NHTSA's Rear Seat Safety Research [J]. 2011.
- [17] Klinich K D, Flannagan C A C. Identifying priorities for improving rear seat occupant protection [J]. 2009.
- [18] Koji Mizuno, Takahiro Ikari, Kenich Tomita. Effectiveness of seatbelt for rear seat occupants in frontal crashes [J]. 2007.
- [19] The Official Site of European New Car Assessment Programme [EB/O].
<http://www.eurocap.com/test/ratings.aspx>
- [20] New Car Assessment Japan 2013 [EB/O]. Japan: National Agency for Automotive for Automotive Safety & Victim's Aid, 2013. <http://www.nasva.go.jp/mamoru/en/>
- [21] 中国汽车技术研究中心 C-NCAP 管理规则(2015 年版), 2015
- [22] MADYMO Version 6.2.2. Theory Manual [M]. TNO Road-vehicles Research Institute, 2005
- [23] 郭九大, 林逸, 靳春宁等. 汽车碰撞仿真的三维人体模型及应用[J]. 中国汽车工程学会第十届学术年会论文集. C96007
- [24] Gert Nilson etc, The Potential Injury-Reducing Benefits of a Well[C]. Designed Car Seat, Proceeding of 4

- International MADYMO User's Meeting, 1993
- [25] LS-DYNA970 Theoretical Manual,[M],LIVERMORE SOFTWARE CO 卷收器带预紧, 1998
- [26] 刘海琳.乘员约束系统的优化设计与分析[D]. 硕士学位论文, 2001
- [27] 郝琪, 邓慧琪, 刘颖.安全气囊的数值分析方法研究,[J],机械设计与制, 2009, 9:215-216
- [28] Fokin D. On Airbag Simulation in LS-DYNA, [M], 2000
- [29] 朱西产. 汽车正面碰撞试验法规及其发展趋势的分析 [J]汽车工程 2002,24 (1): 1-5
- [30] 何文, 钟志华, 杨济匡. 汽车安全气囊工作性能仿真试验验证技术研究, [J],机械工程学报, 2002, 4:127-129
- [31] 田玉耕. 基于台车试验的汽车安全气囊优化, [J], 农机使用与维修, 2009, 6:28-30
- [32] 马志雄, 朱西产.假人主要伤害值对等效双梯形减速带曲线的灵敏度分析,[J], 汽车工程 2009, (02): 165-169
- [33] 万鑫铭. 基于虚拟试验的汽车前碰撞安全气囊防护效率的研究,[D],湖南大学 2006
- [34] 章剑雄. 安全气囊防护的仿真模型及实验系统研究,[D], 上海交通大学 2007
- [35] USA Society of Automotive Engineers(USA SAE).User's Manual for the 5th Percentile Female Hybrid III Test Dummy. Version 1998[S].USASAE,1998.
- [36] MADYMO Application Manual(Version6.2), [M], TNO Road-Vehicle Research Institute, 2004: 1-55
- [37] 包永刚. 降低第二排女性假人伤害值的优化研究[C]. 中国汽车工程学会第十六届汽车安全技术学术会议
- [38] 张绍卫, 杜亮, 刘意, 马志雄. 正面碰撞第二排女性假人伤害影响因素研究[J]. 上海汽车, 2012, 1007-4554
- [39] 黄栋. 轿车正面斜角碰撞车身结构安全性改进研究[D]. 硕士学位论文, 2010
- [40] 刘亚东, 商恩义, 张凯, 陈现岭, 师玉涛, 杨劲松.C-NCAP 正面碰撞试验中后排女性假人伤害统计研究[J]. 汽车工程师, 2013, 13-16
- [41] 马伟. 四轮差动全方位移动机器人路径跟随技术研究[J]. 硕士学位论文, 2012
- [42] 刘卫国, 光玲玲, 王纯, 张海洋. 正碰假人胸部保护性能的影响因素分析[J]. 计算机辅助工程, 2012, 45-48
- [43] 张君媛, 兰海涛, 杨秀坤, 等. 汽车正面气囊充气过程仿真技术, [J], 吉林大学学报(工学版), 2008, 38 (6)
- [44] 胡远志, 黄杰, 刘西, 蒋成约, 冯擎峰, 刘卫国. 某车型正面碰撞后排乘员伤害的仿真优化[J]. 科学技术与工程, 2015, 259-264,275
- [45] 杨忠伟. 基于滑台试验的安全气囊参数优化方法的研究, [D], 吉林大学, 2007
- [46] 商恩义. 车体“刚度”在正面碰撞中的影响及台车试验中的应用研究, [C], 中国汽车安全技术国际研讨会, 2009
- [47] 商恩义, 陈宏民. 正面全宽碰撞试验中后排女性假人下潜问题的研究.p.365-369.第十五届汽车安全技术学术会议论文集.2012 年.
- [48] 瞿喆文. 面向 C-NCAP 的正面成员约束系统优化设计[J]. 汽车技术, 2010 (9): 11-15.
- [49] 葛如海. 汽车正面碰撞乘员约束系统匹配研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2007.
- [50] Matthew R Maltese. The performance of advanced airbag-equipped vehicle in frontal crashes,[C],18th ESV-00414,2001: 1-5
- [51] Williwam Mu. Advanced restraint features development-approach of driver out-of-position thoracic injury mitigation[C] SAE Papers,2000-01-2685: 3-6
- [52] 商恩义, 陈现岭, 师玉涛. 正面碰撞试验中后排女性假人胸部损伤的影响因素[J]. 汽车安全与节能学报, 2013: 238-243.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

桑瑞刚，男，1982年11月生。

2005年7月毕业于陕西科技大学 机械设计制造及自动化专业 获学士学位。

2010年3月入同济大学读硕士研究生。

已发表论文:

[1] 桑瑞刚，庞静，马志雄. 汽车安全气囊浇口位置的优化设计，2013，(12):15-19

待发表论文:

[1] 桑瑞刚，张三，朱西产，马志雄. 正面碰撞试验中后排女性假人下潜的改善研究