

弹性铰链对汽车风洞天平解耦性能的影响研究

赵峰, 张超, 朱喻成, 耿子海*, 张治乾

比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2024年5月17日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

为明确汽车风洞六分量天平机械解耦性能对测力试验结果的影响, 本文开展了针对汽车风洞天平简化模型的弹性铰链解耦性能仿真研究。该天平简化模型由浮动框、弹性连杆、弹性铰链、传感器以及固定框组合而成, 将无弹性铰链与其他五种不同型式弹性铰链的仿真结果进行对比研究, 结果表明, 使用弹性铰链能够大大的降低天平系统中的维间干扰, 并且在五种弹性铰链中, 单十字梁圆型铰链的综合解耦效果最好。接着对单十字梁圆型弹性铰链的两个特征尺寸开展具体的研究, 研究发现, 单十字梁圆型弹性铰链的支撑片高度和厚度是影响天平机械解耦性能的重要参数。

关键词

弹性铰链, 汽车风洞, 机械解耦, 天平

The Effect of Elastic Hinges on the Decoupling Performance for Vehicle Wind Tunnel Balance

Feng Zhao, Chao Zhang, Yucheng Zhu, Zihai Geng*, Zhiqian Zhang

BYD Automobile Industry Company Limited, Shenzhen Guangdong

Received: May 17th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

To investigate the impact of a six-component force balance in the automotive wind tunnel, a numerical simulation study was conducted on a simplified balance model with elastic hinges. The model consisted of a floating frame, elastic connecting rods, elastic hinges, sensors, and a fixed

*通讯作者。

文章引用: 赵峰, 张超, 朱喻成, 耿子海, 张治乾. 弹性铰链对汽车风洞天平解耦性能的影响研究[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 462-469. DOI: 10.12677/app.2024.146051

frame. Comparisons were made between simulations with no hinge and five different elastic hinges, revealing that the use of elastic hinges significantly reduced cross-axis coupling. The results showed that the single-cross circular hinge provided the best overall decoupling performance. Further analysis of the two characteristic dimensions of the single-cross circular hinge indicated that the height and thickness of the support piece for the single-cross circular elastic hinge are important parameters that affect the mechanical decoupling performance of the balance.

Keywords

Elastic Hinges, Automotive Wind Tunnel, Mechanical Decoupling, Balance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着环保意识的增强和政府政策的引导,新能源汽车受到越来越多消费者的青睐,行业内对于汽车的空气动力学性能的要求也在日益增加。目前降低汽车的空气阻力已经成为增加新能源汽车续航里程的重要手段[1]-[3]。汽车空气动力学的研究对于汽车美观、安全、舒适以及节能都有着非常重大的意义,也在很大的程度上影响着汽车的产品竞争力。汽车空气动力学-声学风洞是开展汽车空气动力学性能开发的重要平台,是目前验证汽车空气动力学特性的重要方式。而天平是关乎风洞试验测量结果的重要设备,天平系统的准度会直接影响到试验测试结果的准确性。

汽车风洞试验的目的是为了获得汽车或尺寸模型周围流场和其所受气动载荷(力与力矩)。而汽车或尺寸模型所受的气动载荷通过风洞天平进行测量,为了确保天平测量的准度、减少天平的维间干扰,需要在天平上安装弹性铰链。弹性铰链提供横向和径向的自由度,用以减少这两个方向上力的作用,确保与弹性连杆相连的传感器只测量弹性连杆所受的轴向载荷,提高天平系统的机械解耦能力[4]。段言路等人针对圆弧型柔性铰链的受力状态,构建出圆弧型铰链的等效方法,并通过有限元分析验证了方法的有效性[5]。马成聪和王卫英为旋翼试验台设计一种弹性铰链带有过载保护的盒式天平,有效地解决了天平耦合严重和易过载的问题[6]。杨中艳和解亚军对盒式天平整体结构进行有限元分析,提出了能够有效降低各载荷之间干扰的弹性铰链形式[7]。

目前针对风洞盒式天平的研究基本集中在航空航天领域,汽车行业内的相关研究相对少,具体的研究也存在着相应空白。天平机械解耦效果是天平研究的重点领域,机械解耦对于提高天平测量精度、减小测量误差、增强系统稳定性和优化动态性能等方面都有着重要作用。另外,开展天平机械解耦方面的研究对于后续风洞天平的建设和使用都有着重要的意义。

本文的研究使用 ANSYS 分析对比弹性铰链对于天平测量结果的影响,主要包括两个部分:1) 对比分析不同型式弹性铰链的解耦能力,在五种不同型式的弹性铰链中选一种综合解耦效果最优的铰链;2) 针对前一部分选出的铰链型式开展弹性铰链结构参数对于解耦能力的影响研究。

2. 天平结构与测量原理

此次研究依据汽车风洞天平尺寸设计天平简化模型(长宽高分别为 7000 mm、4000 mm、2260 mm),如图 1 所示。天平整体结构由固定框、浮动框、弹性连杆、弹性铰链和测力传感器构成,测力单元(传感

器)、弹性连杆以及弹性铰链组成天平测力分支,测力分支通过弹性连杆传递载荷,弹性连杆与传感器通过弹性十字铰链连接,弹性十字铰链结构提供径向的自由度以保证其主要传递沿轴向的拉压力载荷。天平固定框与浮动框之间通过7根弹性连杆相连(其中Z方向四根,Y方向两根,X方向一根,水平方向布置三个传感器并且处于同一水平面)传递汽车或尺寸模型所受的六分力载荷(三个方向的力与力矩: F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z)根据相关汽车车型测量的需求,天平各分量载荷的量程为: $F_x = -1000 \sim 6000$ N、 $F_y = \pm 6000$ N、 $F_z = \pm 6000$ N、 $M_x = \pm 8000$ N·M、 $M_y = \pm 6000$ N·M、 $M_z = \pm 6000$ N·M。

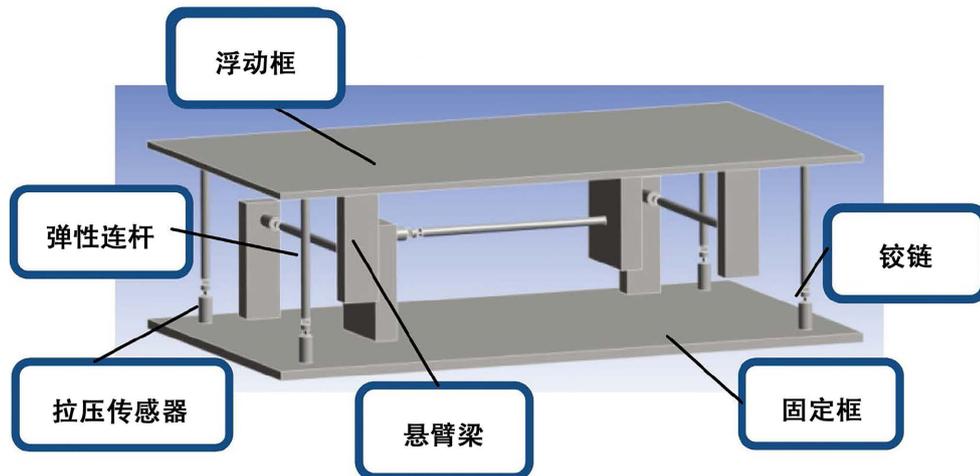


Figure 1. Automotive wind tunnel balance system structure and composition [8]

图 1. 汽车风洞天平系统结构及组成[8]

在理想的状态下天平的六分力通过下方所示的公式(1)进行计算,式(1)中 $R_1 \sim R_7$ 表示传感器 1~7 的力测量值, a 、 b 、 d 和 h 分别表示 $R_1 \sim R_4$ 传感器到 X-Z 平面的距离、 $R_1 \sim R_4$ 传感器到 Y-Z 平面的距离、 R_5 与 R_6 之间 Y 向距离、 $R_5 \sim R_7$ 传感器所在平面到天平转台表面(浮动框上表面)的距离,具体的值为 $a = 1400$ mm, $b = 2900$ mm, $d = 3800$ mm, $h = 950$ mm。理想状态下汽车六分量天平各载荷分量的测量值取决于该分量上施加的载荷,但是由于天平维间耦合的作用,使天平在单分量加载时会对其他分量的输出信号产生干扰影响。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -a & -a & a & a & h & -h & 0 \\ -b & b & b & -b & 0 & 0 & -h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d}{2} & -\frac{d}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \end{pmatrix} \quad (1)$$

为了比较不同弹性铰链的解耦效果,在相同的天平模型下更换不同的弹性铰链进行分析。所有铰链的主体尺寸相同(高为 200 mm,上下连接处圆柱直径为 102 mm),五种不同的弹性铰链结构如图 2 所示,从左到右分别为单十字梁方型铰链(单方型)、双十字梁方型铰链(双方型)、双孔十字梁方型铰链(孔方型)、单十字梁圆型铰链(单圆型)以及双十字梁圆型铰链(双圆型)。此次研究中的五种不同的弹性铰链,它们结构中的片体宽度皆为 10 mm,弹性铰链结构中上下片体的连接处厚度皆为 60 mm。在施加相同载荷的条件下,通过比较传感器所受的应变状态来分析比较不同弹性铰链的解耦能力。

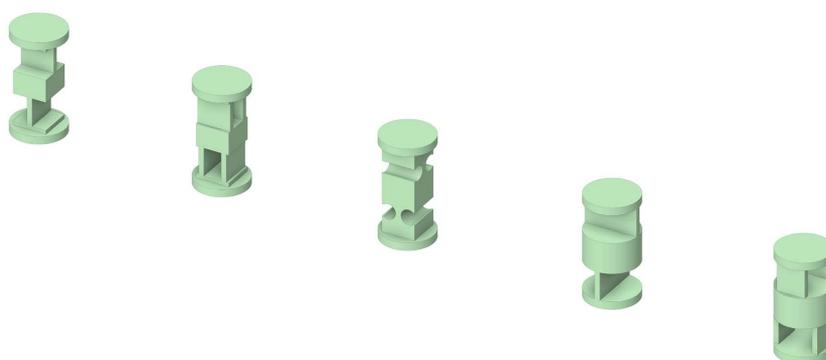


Figure 2. Different types of elastic hinges
图 2. 不同型式的弹性铰链

3. 弹性铰链结构与天平解耦性能

本文通过有限元的方法对天平整体结构进行研究,分析天平各测量单元应变用以评估天平单分量加载时对其他各分量之间的干扰。将天平简化模型作为一个整体导入软件 ANSYS 中,材料选择高强度低碳合金钢 F141,相关材料特性统计在表 1 中。此次研究中对弹性连杆、传感器和弹性铰链进行局部加密处理,整个天平总网格量为 400 万。

Table 1. Material properties of F141 (00Ni18Co8Mo5TiAl)

表 1. F141(00Ni18Co8Mo5TiAl)材料特性

弹性模量(Mpa)	泊松比	屈服强度(Mpa)	抗拉强度(Mpa)
187,250	0.3	1754	1850

在不考虑天平预紧力与重力的条件下按照最大量程使用单分量加载的方法对天平模型浮动端上表面施加载荷以分析弹性铰链结构对于天平解耦效果的影响。依据天平量程依次施加的载荷分别为 $F_x = 6000$ N、 $F_y = 6000$ N、 $F_z = 6000$ N、 $M_x = 8000$ N·m、 $M_y = 6000$ N·m、 $M_z = 6000$ N·m。

Table 2. Corresponding interference items for loading single component

表 2. 单分量加载时对应的干扰项

加载项	干扰项	平均干扰量
F_x	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$	$(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6)/6$
F_y	R_1, R_2, R_3, R_4, R_7	$(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7)/5$
F_z	R_5, R_6, R_7	$(R_5 + R_6 + R_7)/3$
M_x	R_7	R_7
M_y	R_5, R_6	$(R_5 + R_6)/2$
M_z	R_1, R_2, R_3, R_4, R_7	$(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7)/5$

不同弹性铰链的天平进行仿真模拟时对应的干扰量如图 3 所示,数据具体的处理方式:依据表 2 取某一单分量加载情况下所有干扰量的平均值作为此分量加载下的干扰量(表 2 的第三列)。观察图 3 中的结果可以很明显地发现,天平系统使用弹性铰链后能够显著的降低加载项与其他分量之间的干扰。此外,从图中也能发现单圆型和单方型弹性铰链的干扰量接近,要明显优于其他类型的弹性铰链的解耦效果,

孔方型的解耦效果次之。双方型和双圆型铰链的解耦作用也相近，但是效果要低于单方型、单圆型以及孔方型弹性铰链。综合考虑弹性铰链的解耦性能和加工方式，认为单圆型弹性铰链的综合性能最好，本文后续的工作也针对单圆型弹性铰链展开。

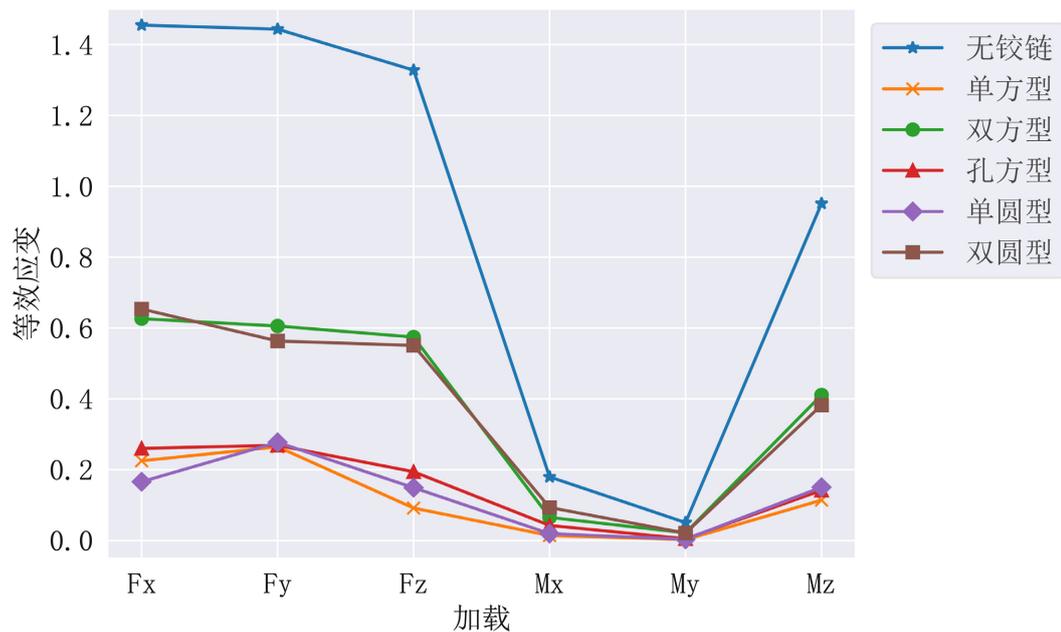


Figure 3. Average interference amount of each component for different hinge loading conditions
图 3. 不同铰链加载时各分量的平均干扰量

4. 单圆型铰链特征尺寸与天平解耦性能

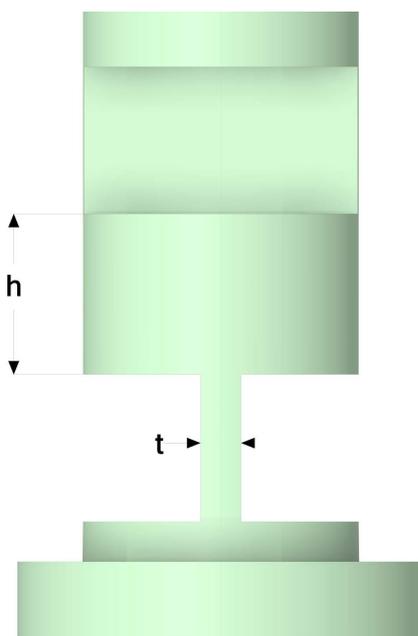


Figure 4. Characteristic structure of single-cross circular elastic hinge
图 4. 单圆型弹性铰链特征结构

上文的研究结果表明,在5种弹性铰链中单圆型铰链的解耦效果最佳。为进一步探究单圆十字型弹性铰链结构对于天平解耦效果的影响,本文对其开展进一步的分析研究。如图4所示,本文针对单圆型弹性铰链的特征厚度 t 和特征长度 h 开展分析。通过调整 t 和 h 的取值分析它们对于天平机械解耦性能的影响,依旧采用前文提到的分析处理方法去对比单分量加载时对应的干扰量的大小。

Table 3. Values of characteristic dimensions t and h for single-cross circular elastic hinge

表 3. 单圆型弹性铰链特征尺寸 t 与 h 的取值

$t \backslash h$	40	50	60	70	80
8	8~40	8~50	8~60	8~70	8~80
10	10~40	10~50	10~60	10~70	10~80
12	12~40	12~50	12~60	12~70	12~80
15	15~40	15~50	15~60	15~70	15~80

此次研究中参数 t 和 h 的取值如表3所示(共20组算例),对表中的参数进行横向和纵向的对比进而寻出两参数对于天平机械解耦性能的影响,具体的仿真结果如图5~8所示。从图5可以看出此时不同的特征长度 h 的取值只对 F_z 加载时的干扰量存在轻微的影响,表明在 t 取值为8时,改变 h 的值天平的解耦效果影响较小。图6所展示的是 $t=10$ 时, h 取值不同的情况下相对应干扰值的差别,在 F_x 、 F_y 、 M_y 以及 M_z 加载时,不同 h 值对应的结果差别很小,表明此时 h 取值的变化对于解耦效果的影响较小。此外,在 F_z 和 M_x 的情况下呈现出一种规律: h 对应的值越小其解耦性能越好。同样,图7结果也证明了此规律,只不过 $h=40$ 时的天平解耦能力要明显高于 h 取其他值的结果。从图8的Y轴坐标可以明显看出, t 取值15时的解耦能力要明显低于其他值,但是此时同样在不同高度 h 中,取值40时仍是工况下表现最优异的。通过对比图5~8也可发现,随着特征宽度 t 的取值增大,特征长度 h 对天平解耦产生的负面影响也就越大。

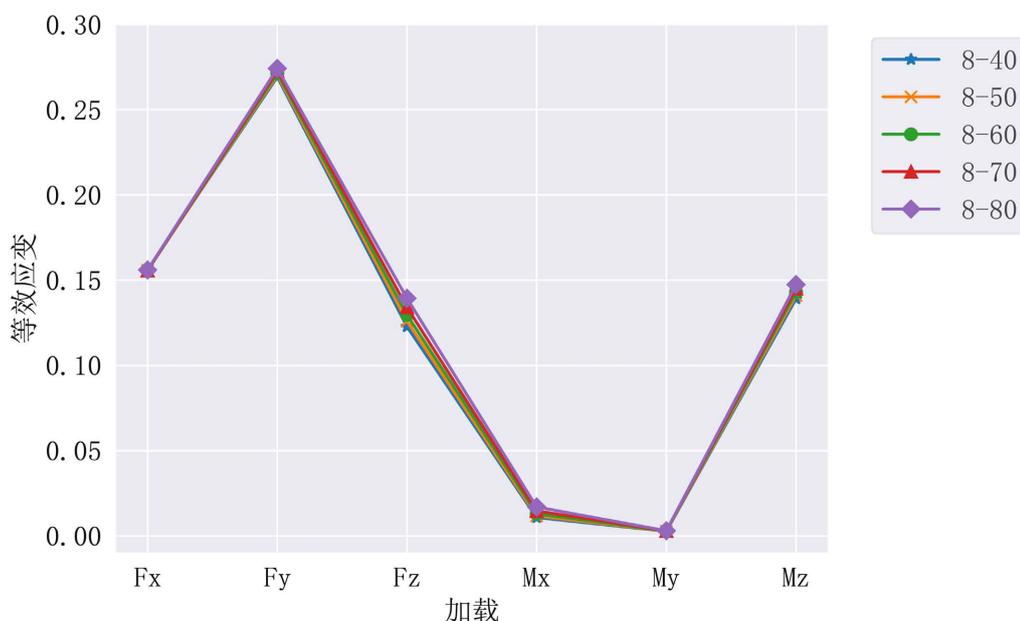


Figure 5. Comparison of interference terms of elastic hinges at $t = 8$

图 5. $t = 8$ 时弹性铰链干扰项对比

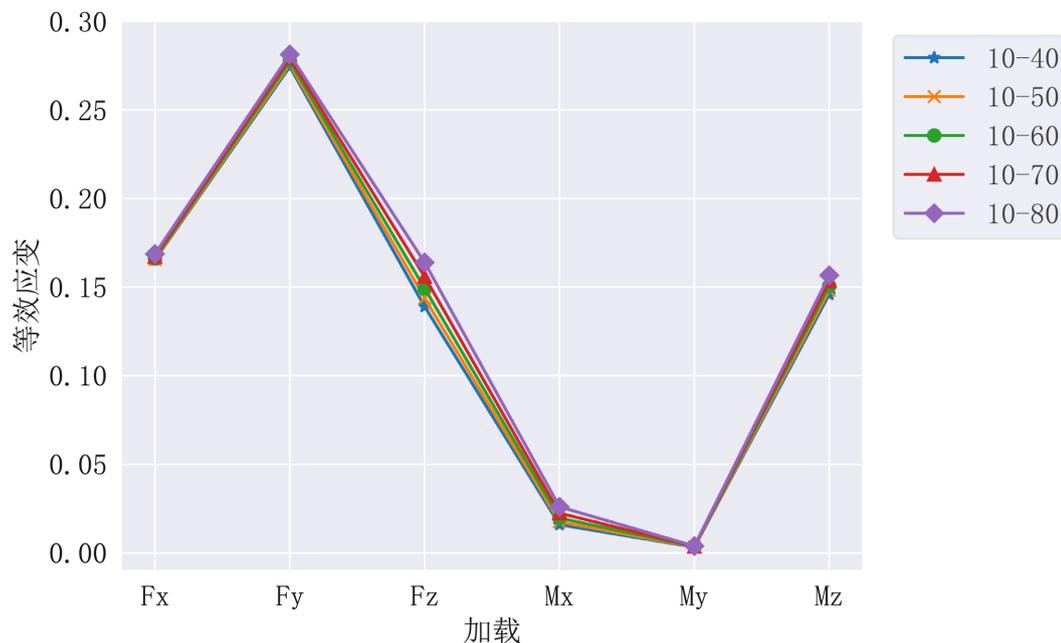


Figure 6. Comparison of interference terms of elastic hinges at $t = 10$

图 6. $t = 10$ 时弹性铰链干扰项对比

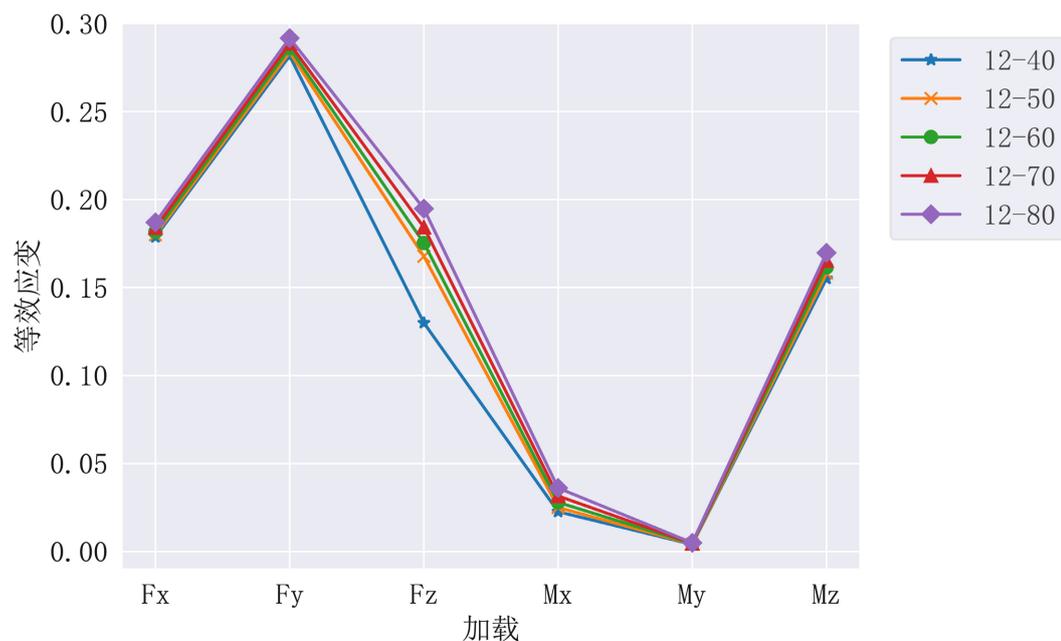


Figure 7. Comparison of interference terms of elastic hinges at $t = 12$

图 7. $t = 12$ 时弹性铰链干扰项对比

结合弹性铰链的原理和天平结构可以知道，弹性铰链支撑片的最主要的作用就是降低横向和径向力的干扰，使弹性铰链只传递轴向力。支撑片的厚度 t 越小弹性铰链受到的横向和径向力干扰就越小，弹性铰链也就能更大地发挥其只传递轴向载荷的作用，机械解耦的效果也就越好，这也与上面提到的结果相对应。同理，特征参数 h 取值的变大，意味着弹性铰链支撑片高度的降低，而支撑片的高度会直接影响到铰链抵抗横向和径向力干扰的能力(支撑片的高度越高，弹性铰链的解耦效果也就越好)。

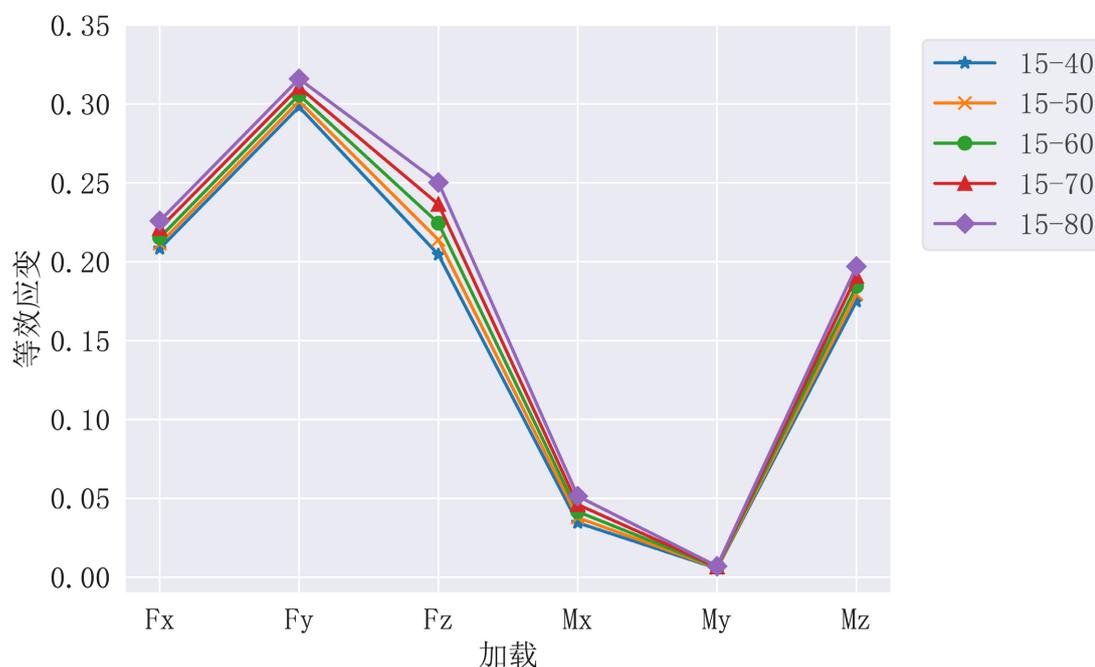


Figure 8. Comparison of interference terms of elastic hinges at $t = 15$
 图 8. $t = 15$ 时弹性铰链干扰项对比

5. 结论

本文依据汽车风洞天平简化模型开展有限元分析研究, 由仿真分析结果可知, 弹性铰链的使用会大大降低天平各个分量间的干扰, 并且单十字圆型弹性铰链综合解耦能力要优于其他四种弹性铰链。单十字圆型的弹性铰链的特征宽度 t 和特征长度 h 会对天平的解耦效果产生明显的影响, 增加 t 和 h 的取值会导致天平的解耦能力减弱。结合天平结构及机械解耦的原理, 对结果的进一步分析发现, 弹性铰链支撑片的高度和厚度是影响机械结构主要原因, 支撑片越薄、越高弹性铰链的解耦能力也就越强。但是, 在天平结构设计时, 需要考虑到天平系统的刚度与强度, 必须确保弹性铰链在施加载荷时不会超过载荷极限进而发生结构破坏。

此次研究加深了对于弹性铰链以及弹性铰链在天平系统中所发挥作用的理解, 此部分的相关工也能够风洞天平的建设提供一定的参考, 同时也对后续开展天平方向的工作研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 艾冰. 新能源汽车时代开启[J]. 企业观察家, 2017(10): 56-57.
- [2] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [5] 段言路, 欧开良, 孙银生, 等. 圆弧型柔性铰链应力分析[J]. 机械传动, 2016(5): 148-150.
- [6] 马成聪, 王卫英. 一种带过载保护的盒式六分量天平的研制[J]. 机械工程与自动化, 2020, 3(27): 22-24.
- [7] 杨中艳, 解亚军. 六分量盒式应变天平的有限元分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010(2): 201-204.
- [8] 张超, 张惠林, 赵峰, 等. 汽车风洞天平设计与校准方法研究[J]. 应用物理, 2024, 14(3): 76-88.