

# 纯电动汽车车身设计关键技术综述

李仲奎 李都 李炽

(东风汽车集团有限公司技术中心, 武汉 430058)

【欢迎引用】李仲奎, 李都, 李炽. 纯电动汽车车身设计关键技术综述[J]. 汽车文摘, 2023(3): 21-27.

【Cite this paper】LI Z K, LI D, LI Z. A Review on the Key Technologies of Pure Electric Vehicle Body Design[J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(3): 21-27.

**【摘要】**为了阐明纯电动汽车车身设计的关键技术,探讨了纯电动汽车车身设计的难点和对应的解决措施。首先从纯电动汽车与传统燃油汽车搭载的重要零部件角度出发,揭示纯电动汽车与燃油汽车的不同点,然后阐述纯电动汽车车身设计区别于燃油汽车车身设计的困难点,进一步对每项难点给出纯电动汽车车身结构设计的解决措施,包括车身地板梁系架构完整连续设计、侧面柱碰撞的结构耐撞性设计、车身后后悬架安装点设计、车身防水设计、铝合金车身设计、整车换电锁止技术和动力总成悬置技术。综上分析表明掌握这些关键技术,纯电动汽车车身结构设计易于达成预期目标。

**关键词:**纯电动汽车 车身设计 耐撞设计 防水设计

中图分类号:U463.82

文献标识码:A

DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220207

## A Review on the Key Technologies of Pure Electric Vehicle Body Design

Li Zhongkui, Li Du, Li Chi

(Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430058)

**【Abstract】**In order to clarify the key technology of pure electric vehicle body design, the difficulties of pure electric vehicle body design and corresponding solutions are discussed. Firstly, from the perspective of the important parts carried by electric vehicles and traditional fuel vehicles, the differences between electric vehicles and fuel vehicles are revealed. Then, the difficulties in the body design of pure electric vehicles are described, and the solutions of the body structure design of electric vehicles are given for each difficulty. It includes the complete and continuous design of the body bottom beam system structure, the crashworthiness design of the side column collision, the installation point design of the front and rear suspension of the body, the waterproof design of the body, the aluminum alloy body design, the locking technology of the whole vehicle electric change and the powertrain suspension technology. To sum up, the analysis shows that mastering these key technologies will make it easier to achieve the expected goal in the body structure design of pure electric vehicles.

**Key words:** Pure Electric Vehicle (EV), Body design, Crashworthiness design, Waterproof design

## 1 前言

随着世界各地对碳排放要求日益严苛,各国政府和各大车企均制定了应对战略,并投入巨资进行电动汽车研发,各种以纯电驱动的新能源汽车在国内出现了爆发式增长<sup>[1]</sup>。纯电驱动汽车的结构主要由电力驱动系统、底盘、车身以及各种辅助装置等部分组成,在传统燃油汽车基础上,用电力驱动控制系统替代了发动机<sup>[2]</sup>。与传统燃油汽车相比,由于其能量储存方式与汽车驱动形式不同,导致纯电动汽车与传统燃油汽车在整车布置和车身结构方面存在着较大的差异。

目前,在电机技术、电池技术和能量控制策略日

益完善的情况下,如何设计出满足纯电动汽车功能、性能要求的精致化纯电动汽车车身结构是车身设计领域的重点和难点<sup>[3]</sup>。本文梳理出纯电动汽车车身结构设计的难点及其对应的解决方案,旨在为电动汽车车身开发提供参考。

## 2 纯电动汽车与燃油汽车的区别

对于传统燃油汽车,一般前舱布置发动机、变速箱,中通道下方布置排气管,中地板下方布置燃油箱,后地板下方布置排气管消声器。对于纯电动汽车,通常采用的布置方式是前舱布置电机、变速箱、控制器,前地板和中地板下方布置动力电池(图1)。

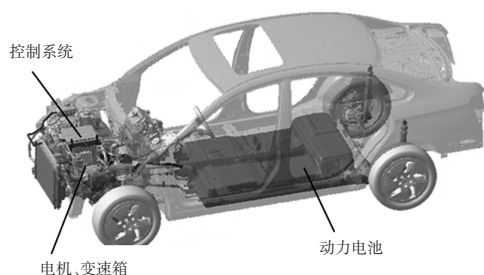


图1 纯电动汽车重要零部件布置

部分高级别的纯电动汽车采用的是前后双电机四驱方式,即前、后桥都布置有电机和变速箱。此外轮毂电机技术在纯电动汽车上也有所应用,其电机集成于轮毂内部<sup>[4]</sup>,对车身影响较小。从目前纯电动汽车重要零部件的布置来看,纯电动汽车的动力电池系统因体积大、质量重,影响车身地板结构布置,是纯电动汽车与燃油汽车的最大区别。

### 3 纯电动汽车车身设计难点分析

#### 3.1 车身地板梁系构架设计

纯电动汽车的动力电池箱若直接迁移到传统燃油汽车车身下方,其干涉状况见图2,动力电池箱体与车身后地板有大面积干涉,与车身中地板有小面积干涉。

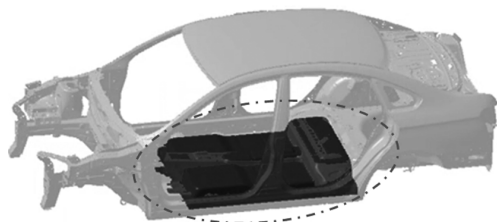


图2 动力电池箱与传统燃油车车身的关系

除了明显的动力电池箱与地板面的干涉,影响更大的是动力电池箱与车身地板上梁系结构的干涉,见图3。

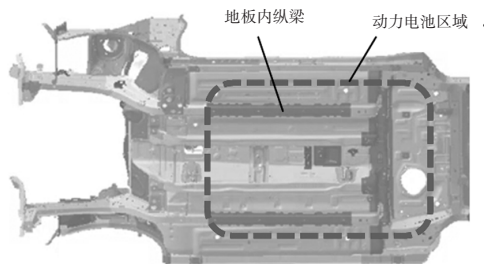


图3 动力电池箱与地板梁系干涉情况

当动力电池系统布置对原有的地板梁系方案造成严重影响时,如何构建车身地板梁系,实现载荷传递路径的连续性就成为车身设计的难点。此外,对于纯电动汽车车身专属平台,就需要综合考虑设置电池系统布置区域与设计车身地板梁系。

#### 3.2 车身结构耐撞性提升设计

纯电动汽车在碰撞安全保护方面不同于传统燃油车的是,纯电动汽车在碰撞发生时不仅要保护驾乘人员,还需要保护动力电池系统<sup>[5-6]</sup>。尤其是2021版的C-NCAP对碰撞要求更严格,增加对新能源汽车侧面柱碰撞试验的考核。对于传统燃油汽车来说,研究车身结构耐撞性本来就是一个难度很高的课题,故此提升纯电动汽车车身的结构耐撞性是车身设计的难点。

#### 3.3 车身上前后悬架安装点加强设计

纯电动汽车与传统燃油汽车比,其增加的动力电池系统是个大质量模块,质量约为400 kg。综合电机和控制器等部件与传统燃油车的发动机、燃油箱、排气管的质量相比,纯电动汽车的整备质量要比同级别的燃油车质量高出约300 kg。故此,从传统燃油车改款的电动汽车,其前后悬架或副车架在车身上的安装点需要做加强设计,以提升车身关键接点刚度<sup>[7]</sup>,否则前后悬架或副车架在车身上安装点处容易出现耐久开裂问题(图4)。对于现有的燃油车车身结构,其悬架、副车架在车身上安装点的加强设计本身难度就高。此外,因部分高级别纯电动汽车布置有后驱电机,以及轮毂电机版电动汽车,其相应的副车架、悬架在车身上安装点也需要额外的加强设计。

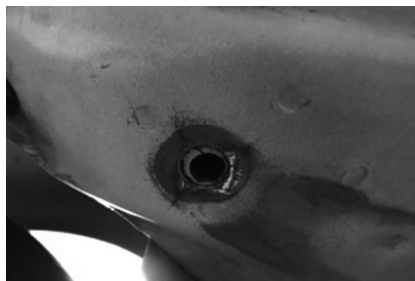


图4 耐久开裂后的车身后悬架安装点

对于前后双电机四驱车型,其车身结构设计难点主要体现在悬架、副车架的安装点上。除此之外,在该车型上增加后驱动系统主要影响行李箱空间,或者影响第3排人机工程设计,对车身结构设计的影响算不上难点。同样,对于轮毂电机版车型,车身结构设计困难之处也主要体现在悬架、副车架的安装点上。即使前舱取消原有的电机、变速箱等零部件,让出一定的空间,可以在前舱布局行李舱,也不是车身结构设计的难点。

#### 3.4 车身防水设计

纯电动汽车因配置有较多的电器件,包括控制器、线束、接头等,对密封防水有更高的要求。针对电动汽车防水,除了国标中做了较严格的规定外,一些地方也给出了更为严格的电动车涉水标准(如北京,上海),见表1。

表1 纯电动汽车涉水相关标准

涉水试验项目	水深/cm	涉水试验车速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	涉水距离/m	涉水时间/min
国家标准 <sup>[8]</sup> :防水要求	10	20	500	约1.5
北京地方标准 <sup>[9]</sup> :防水要求	20	$20\pm 2$	500	$\leq 10$
	30	$5\pm 1$	100	$\leq 10$
上海地方标准 <sup>[10]</sup> :防水要求	15	$30\pm 3$		10
	30	$\geq 5$ (前进倒车各1次)		10

从北京、上海地方标准来看,纯电动汽车防水都给出了深30 cm涉水的试验要求,这对于车身密封性能是个严峻的考验。故此,就车身防水设计而言,纯电动汽车车身设计明显难于燃油汽车。

### 3.5 铝合金车身结构设计

纯电动汽车与传统燃油汽车比,其续航里程较短,即使装载400 kg的动力电池系统,续航里程也只能达到500 km左右。因此,轻量化对于纯电动汽车来说更为迫切<sup>[11]</sup>,铝合金车身应用到电动汽车上比率也更高些<sup>[12]</sup>。但是,铝合金车身受工艺和成本的限制在设计上有较多束缚<sup>[13]</sup>,如何结合铝合金工艺水平和成本控制设计出较优的纯铝车身,部分零部件采用铝制件是面临的难题。

### 3.6 整车换电方案设计

纯电动汽车现阶段的一个弊端就是续航里程短,充电时间长。将电池箱快速更换,以充满电的电池箱替换电量耗尽的电池箱,实现车辆继续行驶,称之为换电技术。这样一种用车方式近年来也受到汽车行业的推崇。此外,换电电池箱单独充电有利于提升充电效率、节约充电成本和提高电池使用寿命<sup>[14]</sup>。但是企业要想研发出自身特有的能规避专利保护的快换锁止机构也是一项难题。

### 3.7 动力总成悬置方案设计

不同于燃油汽车的动力总成主要由发动机、变速箱构成,电动汽车的动力总成除了电机、变速箱之外,还有车载充电机、DC/DC、PTC加热器等辅助零部件。除了考虑自身的NVH性能<sup>[15]</sup>,不同的零部件对振动的抵抗力不同。对于电动汽车来说,动力总成的各系统零部件采用什么样的悬置方式固定来满足功能、性能要求,以及达到一定的轻量化和低成本目标也是一项难题。

## 4 纯电动汽车车身设计难点解决方案

### 4.1 车身地板梁系构架解决方案

纯电动汽车车身的地板梁系设计,首先要考虑的

是能够避开电池箱,并能形成完整连续的载荷传递路径,也能够自身成环形闭合结构;然后要考虑关键接头的连接和工艺;其次是电池箱固定点的布置和具体安装点的结构设计<sup>[16]</sup>。据此构建出一种纯电动汽车车身地板梁系方案,见图5。

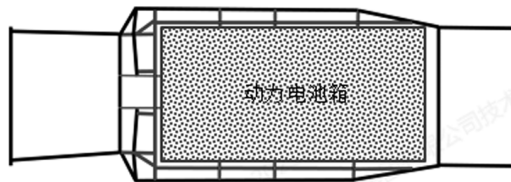


图5 电动汽车车身地板梁系方案

该种车身地板梁系的优点是,借助图6所示的三角架型结构布置于前地板前部,利用三角形具有稳定性功能在X向极短的路径范围内改变载荷传递路径,增加车身结构耐撞性,保护电池箱。此外,该梁系构架也极易实现车身“油改电”。



图6 应用于地板梁系的三角架型结构

按上述方案思路搭建的某纯电动汽车车身地板梁系方案见图7,该方案基于某燃油汽车改款而成,不仅可实现大电池箱安装固定,而且拥有良好的车身性能。在车身质量不增加的前提下,车身扭转刚度由燃油车的 $17\ 079\ \text{N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 提升到电动车的 $17\ 553\ \text{N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ ,车身弯曲刚度由燃油车的 $20\ 876\ \text{N}/\text{mm}$ 提升到电动车的 $21\ 356\ \text{N}/\text{mm}$ 。

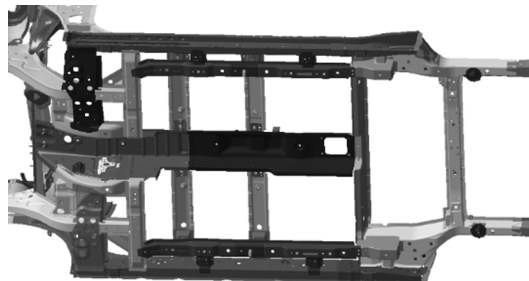


图7 某电动车型车身地板梁系方案

对于纯电动汽车车身专属平台,若是钢制车身,车身地板梁系可按图8所示的方案搭建;若是铝制车身,车身地板梁系可按图9所示的方案搭建,采用铝铸件作为车身后纵梁与前地板梁、前地板梁与后地板梁

之间连接的过渡件。

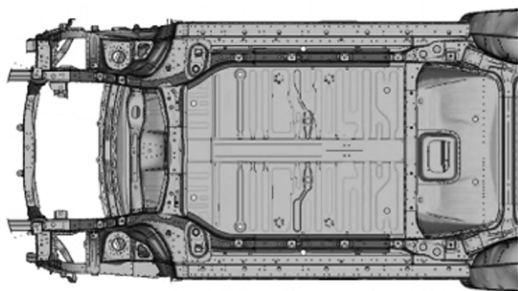


图8 某纯电动专属平台车身地板梁系方案

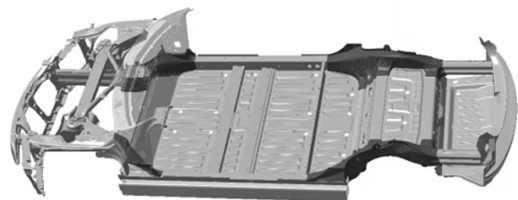


图9 某纯电动纯铝车身地板梁系方案

#### 4.2 车身结构耐撞性提升解决方案

关于纯电动汽车的车身结构耐撞性,除了关注正面碰撞、侧面碰撞和后碰撞,更要关注侧面柱碰撞的车身结构耐撞性。纯电动汽车车身地板下方装载质量为300~400 kg的动力电池,其整车重心相对于燃油汽车下移;当电动车辆发生正面碰撞或侧面碰撞过程中,其车身变形模式与燃油汽车略有不同,并且需考虑对动力电池系统的保护,这是电动汽车与燃油车不同的地方。但是对此按常规的思路通过加强车身关键件结构设计是可以解决的。

对于纯电动汽车,车身结构耐撞性的困难点是其侧面柱碰撞的车身结构耐撞性设计。侧面柱碰撞试验如图10所示,撞击接触区域非常小,极易造成车身局部塌陷,伤害到驾驶员和挤压到动力电池系统。

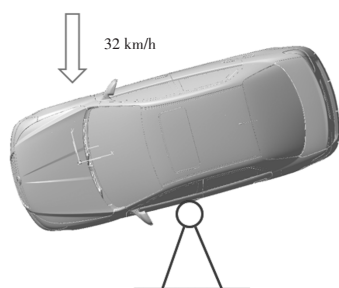


图10 侧面柱碰撞试验

由于车身侧面从底部到顶部呈弧形内收趋势,侧面柱碰撞试验时刚性柱首先撞击到的是车身前车门,其次是门槛梁和中支柱,最后才有可能接触到顶盖边部<sup>[17]</sup>,再加上前车门是安装到车身前支柱和中支柱上,车身前支柱、中支柱的底端和门槛梁相连,故此提升侧面柱碰撞耐撞性需优先加强门槛梁的耐撞性设

计。根据侧面柱碰撞试验规则,刚性柱撞击的区域对应于驾驶员座椅前、后横梁之间,位于后横梁与门槛梁搭接区域稍前方的位置,见图11。

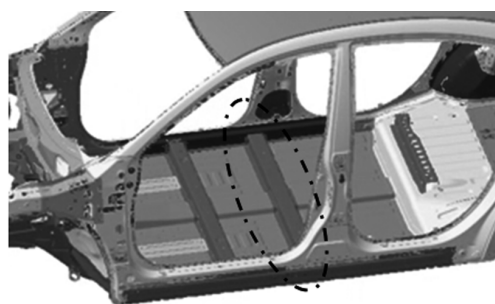


图11 刚性柱撞击的门槛梁区域

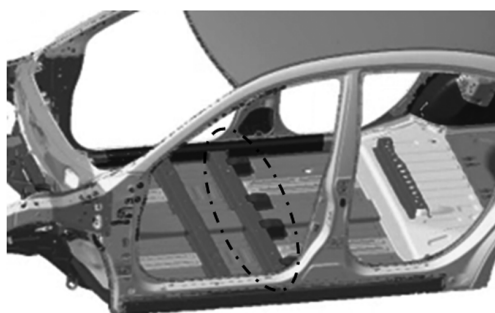
加强门槛梁的结构耐撞性设计可以从门槛梁断面、门槛梁内腔加强件和车身地板梁系3个方面入手,其中改变车身地板梁系方案是最行之有效的手段。具体方案主要有以下3种:

- (1)向前方加宽驾驶员座椅后横梁,实现刚性柱撞击到驾驶员座椅后横梁与门槛梁连接的区域;
- (2)将驾驶员座椅后横梁前移到刚性柱撞击对应的位置,额外增加驾驶员座椅后安装点支架;
- (3)增加斜撑梁连接门槛梁和驾驶员座椅后横梁,形成三角形结构,斜撑梁与门槛梁连接的位置正是刚性柱撞击的位置。

按照第2种方案对某纯电动汽车驾驶员座椅后横梁位置进行调整,见图12,并在梁内部进行加强,调整后门槛梁的最大侵入量由327 mm降低到228 mm,满足了对电芯的保护要求。



(a)原方案



(b)座椅后横梁前移方案

图12 某纯电动汽车车身地板梁系前后对比

### 4.3 车身上前后悬架安装点加强解决方案

针对纯电动汽车整车整備质量比同级别的燃油汽车质量高出约 300 kg 的现状,加强前后悬架、副车架在车身上安装点设计,主要是从安装点局部结构着手,避免安装点位置局部应力集中。传统燃油车的后悬架安装点采用图 13(a)示意的普通螺母即可固定,然而纯电动车的后悬架安装点通常需要改用图 13(b)示意的套管螺母才能达到要求。对比之下,普通螺母仅焊接在钢板一侧,容易出现应力集中;而套管螺母可以连接在并行的,有间距的 2 层板之前,形成工字型结构,不容易形成应力集中,故此强度更高。

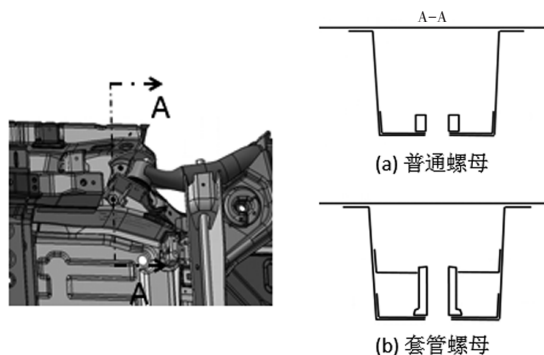


图 13 后悬架安装点结构

除了整车整備质量增加造成前后悬架、副车架在车身上安装点需强化设计之外,对于后驱车型、轮毂电机版车型其在对应的前后悬架、副车架安装点处也需要做强化设计处理,故此套管螺母就发挥出应有的效能。此外,在非承载式车身与车架连接点处,因承担重要安装点的固定功能,也推荐采用套管螺母。

### 4.4 车身防水解决措施

纯电动汽车防水主要是解决车身的密封问题,实现车身乘客舱、行李箱皆成为干区。车身密封途径主要分为以下 7 种类型<sup>[18]</sup>:

(1) 车身密封面上通过孔的密封,包括:转向轴过孔、制动器过孔、空调管路孔、线束过孔、电缆过孔、动力电池箱检修口等,这些通过孔只要采取措施都可以解决密封问题;

(2) 密封面上线束、护板、管路卡扣孔的密封,密封面上的卡扣固定点若不带有密封结构,很容易透过卡扣孔进水;

(3) 密封面上防转限位孔的密封,防转限位孔若设置在密封面上,极易成为进水的通道,见图 14,故此禁止在密封面上设置防转限位孔;

(4) 密封面上螺母孔、螺栓孔的密封,螺母孔、螺栓孔也有一定的进水量,因此密封面上也尽量减少螺

母孔、螺栓孔的设计。若不可避免,需要评估进水量是否可以接受,根据需要加强密封胶的应用;

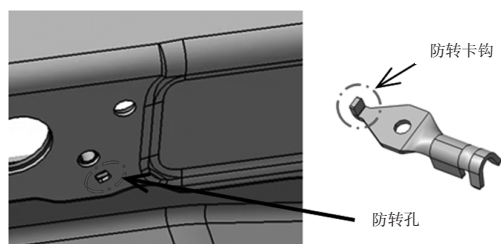


图 14 搭铁点防转结构

(5) 密封面上工艺孔的密封,密封面上的工艺孔在制造后期都需要用堵盖或堵片封堵,结合密封效果及成本选用对应的堵盖或堵片;

(6) 密封面上焊缝孔的密封,都需要涂抹焊缝密封胶或点焊密封胶封堵,对于车门止口处的密封,则需要通过钣金搭接结构进行改进<sup>[19]</sup>;

(7) 车身腔体的阻断,尤其是加强车身 A、B、C 柱底端膨胀片的密封,实现膨胀片的布置能完全达到腔体阻断的效果。

### 4.5 铝合金车身设计解决方案

铝合金车身设计考虑的关键因素在于铝材的选用、车身性能、制造工艺和成本。铝制车身的铝材种类一般有铝板、铝型材和铝铸件。铝型材多用于门槛梁、车身后纵梁、后纵梁、地板横梁及防撞梁上,见图 15。铝型材因截面形状较为自由,可为“日、田、目”形状<sup>[20]</sup>,较易满足使用要求。铝铸件多用于前后悬架安装点处,即前减振塔、后支柱,以及车身后纵梁与门槛梁连接过渡区、车身后纵梁与门槛梁连接过渡区,见图 16。此外,近 2 年大型一体式压铸件越来越受到行业重视,将后地板总成、前舱总成设计成一体式压铸件的车型逐渐增多。

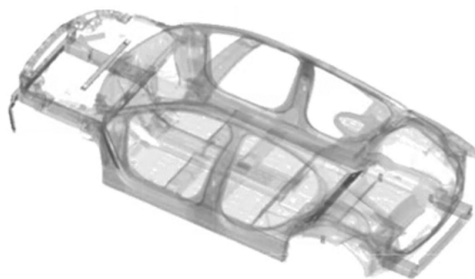


图 15 铝型材的应用实例

在性能设计上铝制车身与钢制车身相同,都需考虑正面碰撞、侧面碰撞、后碰撞及侧面柱碰撞时的车身结构耐撞性,前后悬架安装点强度,碰撞过程中对驾乘人员和动力电池系统的保护。

在制造工艺上需考虑铝板的拉延工艺性、铝型材

的拉弯工艺性,以及零部件之间连接工艺性。由于铝板的拉延性能偏低,仅能用在结构变化比较平缓的地方,否则需要考虑分件。由于铝型材的拉弯工艺精度比较难控制,必要的地方可采用二维拉弯,需尽量避免三维拉弯。在铝件之间的连接技术上,目前铝点焊技术尚未普及,多数情况下还是采用铆接、焊接和螺栓连接方式,也是设计时必须考虑的因素。此外,焊接无论是熔化极惰性气体保护焊(Melt Inert Gas welding, MIG)<sup>[21]</sup>,还是非熔化极惰性气体保护电弧焊(Tungsten Inert Gas welding, TIG),都容易造成尺寸偏差,也是需要考虑的因素。

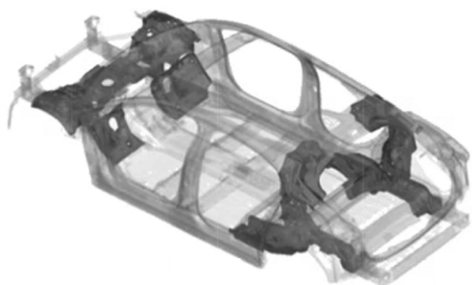


图16 铝铸件的应用实例

在成本控制上,由于铝铸件模具费用较高,能采用铝型材代替的地方,尽量减少铝铸件的使用率,除非提前预知开发车型有较大的产量可以分摊模具费用。

#### 4.6 整车换电锁止设计解决方案

市场上电动汽车的换电方案已出现多种,虽然换电方式差别较大,但是综合情况都相近,都有各自的优缺点。故此,换电技术发展尚未成熟,仍需改进和突破。

换电技术主要包括2部分:

- (1)动力电池的固定点锁止技术;
- (2)电池系统与电机、电控之间的连接器技术。

目前动力电池的固定方式多采用吊挂式(图17),也有采用抽屉式,2种方式都存在位置精度控制的问题。在连接器的设计上,通常都采用可浮动式,但是车辆在行驶过程中出现颠簸抖动时经常发生电路中断,也是目前换电技术不能回避的难题。因此,电池箱固定点锁止技术和连接器技术都需要进一步提升,亟待开发更好的换电锁止技术。

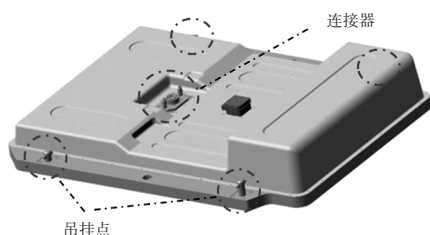


图17 换电车型的吊挂式电池箱方案

#### 4.7 动力总成悬置设计解决方案

电动汽车动力总成悬置技术,经过多年的发展大体上出现了3种常见的悬置方式(图18~图20)。图18示意的动力总成悬置方式是将动力总成各系统零部件捆绑到一起,然后采用类似于发动机总成的3点式悬置方案。其弊端是捆绑在一起的各系统零部件都会随着发动机、变速箱一起振动,容易出现耐久损坏问题。

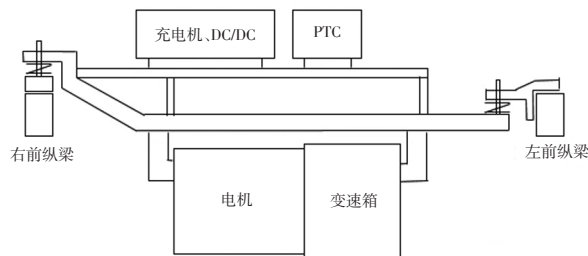


图18 动力总成一体式悬置结构

图19示意的动力总成悬置方式是在车身的左右前纵梁之间架起一个类似于桥梁的大型横梁,电机、变速箱采用3点式悬置吊挂在横梁下方,充电器、DC/DC、PTC等零部件固定在横梁上方。其弊端是横跨在车身左右前纵梁之间的横梁尺寸较大,成本较高;其次,电机、变速箱振动带动横梁微振动,也直接影响到横梁固定零部件的可靠性。

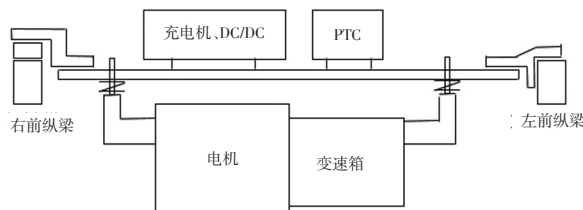


图19 动力总成吊桥式悬置结构

图20所示的动力总成悬置方式是电机、变速箱总成,仍像发动机那样采用3点式悬置吊挂在左右悬置支架上,在左右悬置支架上架起一个相对小些的横梁,实现对充电器、DC/DC、PTC的固定。相比之下,该方案横梁上方固定的零部件受电机、变速箱的振动影响最小,成本也最低。

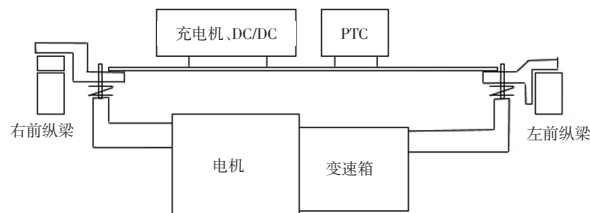


图20 动力总成分体式悬置结构

综上所述,图18示意的悬置方案算是第一代悬置

方案,不建议再应用。图19示意的悬置方案算是第2代悬置方案,略差些。图20示意的动力总成悬置方案作为第3代悬置方案,综合最优。

## 5 结束语

由于电动汽车搭载的重要零部件不同于燃油汽车,其车身结构设计也不完全等同于燃油汽车,有着自身的难点和相应的解决措施。其归纳如下:

(1) 纯电动汽车的车身地板梁系架构需要结合动力电池系统的布置做到载荷传递完整、连续。

(2) 可以从门槛梁断面、门槛梁内腔加强件和座椅横梁的布置、断面结构及加强方案方面提升纯电动汽车抗侧面柱碰撞的结构耐撞性。

(3) 可以通过运用工字型加强件提升车身后悬架安装点结构强度,避免使用开裂。

(4) 可以通过加强车身密封面上通过孔的密封等7种密封形式,提升电动汽车的车身防水能力。

(5) 可以通过应用铝合金材料提升电动车的轻量化水平,增加电动汽车的续航里程。

(6) 可以通过换电锁止技术,为解决电动汽车用户续航里程焦虑,提供另外一种解决方案。

(7) 可以通过合理的悬置方式,减轻动力总成及附件的振动,提升耐久性能和节约成本。

掌握以上这些纯电动汽车车身设计关键技术能大大提升纯电动汽车车身设计水平,同时也能大大促进传统燃油汽车车身设计能力的进步。

目前,制约纯电动汽车发展的瓶颈在于动力电池。如果电池技术有了重大突破,电池能量密度能提升3~4倍,那么纯电动汽车的电池箱就能做到和燃油汽车燃油箱一样的尺寸,未来纯电动汽车车身结构设计和燃油汽车车身结构设计的区别会越来越小。

### 参 考 文 献

- [1] 陈东平,王镛. 纯电动车车身架构及其宽带设计[J]. 上海汽车, 2019(2): 11-16.
- [2] 杨培善. 电动汽车关键技术研究[J]. 汽车实用技术, 2018(21): 22-41.
- [3] 王文伟,姜卫远,高丰岭,等. 基于拓扑优化的电动汽车车身结构概念[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(2): 182-187.
- [4] 王迪,尚秉旭,陈志新,等. 轮毂电机及其电动车技术发展综述[J]. 汽车文摘, 2019(11): 40-44.
- [5] 王骞,刘军,张亚军,等. 基于侧面碰撞安全性的电动汽车车身结构件轻量化设计[J]. 汽车技术, 2017(2): 44-50.

- [6] 雷正保,肖林辉,刘助春,等. 纯电动汽车车身结构耐撞性的整体拓扑优化[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(1): 15-21.
- [7] 廖抒华,刘利,李春楠,等. 车身关键接点刚度分析与改进[J]. 公路与汽运, 2013(5): 11-14.
- [8] 全国汽车标准化技术委员会(SAC/TC 114). 电动汽车安全要求-第3部分: 人员触电防护: GB/T 18384.3—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2015.
- [9] 北京市经济和信息化委员会. 北京市示范应用新能源小客车生产企业及产品审核备案管理规则[EB/OL]. (2014-02-11) [2023-02-09]. [http://jxj.beijing.gov.cn/zwgk/zcwj/bjszc/201911/t20191113\\_511221.html](http://jxj.beijing.gov.cn/zwgk/zcwj/bjszc/201911/t20191113_511221.html).
- [10] 上海市新能源汽车及应用标准化技术委员会. 电动乘用车运行安全和维护保障技术规范: DB31/T634—2020 [S]. (2020-12-17) [2023-02-09]. <https://dbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/59d8c73c38e985bf51a09079398b5b9bf8850dface4070f4397fe6a9a81f2f1e>.
- [11] 龙江启,袁章平,符兴锋,等. 基于正面碰撞安全性的增程式纯电动汽车车身轻量化研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(4): 466-471.
- [12] 赵治,郝志莉. 纯电动汽车车身材料轻量化应用现状浅谈[J]. 汽车实用技术, 2020(7): 22-24.
- [13] 李永兵,陈长年,浪利辉,等. 汽车铝车身关键制造技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2013(3): 50-58.
- [14] 吴倩,刘霞. 电动汽车充电技术与换电技术浅析[J]. 汽车实用技术, 2021(12): 8-10.
- [15] 朱鑫,刘晓昂,陈勇,等. 纯电动汽车动力总成悬置系统设计方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 36(2): 85-89.
- [16] 蔡扬扬,殷莎,赵海斌,等. 新能源汽车电池包箱体结构的轻量化研究现状[J]. 汽车技术, 2022(2): 55-62.
- [17] 李仲奎. 基于侧碰安全性的纯电动轿车地板构架设计的研究[J]. 汽车技术, 2016(9): 43-46.
- [18] 李仲奎,樊树军,徐泽彬,等. 乘用车车身水管理设计综述[J]. 汽车文摘, 2021(3): 40-46.
- [19] 李仲奎,李豫,舒培超. 基于水管理的乘用车门槛梁设计[J]. 汽车工程师, 2020(12): 18-22.
- [20] 乔鑫,刘莹,夏天,等. 全铝车身前纵梁耐撞性与轻量化优化方法[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(3): 199-206.
- [21] 黄兴,杨宏,陈东,等. 铝合金前防撞梁偏置可变形壁障碰撞性能优化[J]. 汽车工程师, 2020(11): 24-28.

### 【作者简介】

李仲奎(1981-),男,就职于东风汽车集团有限公司技术中心,正高级工程师,主要从事乘用车车体结构开发工作。  
E-mail:lizk@dfmc.com.cn