



# 17

## 舍弗勒主动差速器 用于未来传动桥的主动差速器

Dr. Tomas Smetana  
Thorsten Biermann  
Prof. Dr. Bernd-Robert Höhn, FZG Munich  
Franz Kurth, FZG Munich  
Dr. Christian Wirth, ZG GmbH Garching



## 前言

由于全球变暖以及化石燃料的减少，电动车日益成为新概念汽车研究领域的领跑者。在未来的十年内，德国联邦政府希望本国成为电动车领域的市场领先者，到 2020 年，一百万台可插电充电（Plug-in）的混合动力车将行驶在德国的大街小巷上。

在过去几十年中，首要发展的是内燃机技术，所以，目前电传动技术的发展还有很长的路要走。不仅仅技术方面，在工业结构和供应链方面也要做出相应改变，以应对电传动系统的大批量生产。大量专业的供应商，研究机构和院校必须联合起来，组成一个系统，这个系统可以更高效地使用现有的资源，这对于系统内所有的参与者都是有益处的，因为我们发展的是用于未来的汽车驱动的新技术。

不考虑电动车这个话题，我们知道目前汽车保有量在持续增加，导致交通密度不断升高。然而，为了降低事故率，电子安全系统得到了普遍的应用，欧盟把未来 10 年内道路交通死亡率降低一半作为目标，仅仅通过改善道路条件是不可能实现这个目标的。车辆传动系统，及其对应的控制系统必须更加智能化从而可以修正驾驶者犯的错误。

这样的辅助驾驶系统已经在开发当中，现在这种可以使用在电传动系统中的硬件是一个全新的、充满机会的革新性的领域。

## 引言

## 历史

舍弗勒在早期开发正齿轮差速器的时候，就已经激发了将差速器同轴的安装到一个电机上的灵感。最初的设计显示通过这种方式可以生产一种非常紧凑的传动系统。在此之前，舍弗勒并没有独到之处，因为在其它公司已有了相近设计的原型。

这个想法最终在和慕尼黑 FZG 的合作中得以发展，我们通过在变速箱上添加一个装置，可以将电动横向扭矩分配功能整合进这个系统。

因为可以显而易见地改善驾驶性能并提高传动效率，这种创新的传动系统因其所具有功能优势被称为主动电动差速器，可以整合进辅助驾驶系统中用来防止事故发生并主动地干预对汽车的控制。

因此，在纯电动车中，驱动桥可以实纵向和横向驱动力矩控制。测试车辆可以通过这些功能来实现紧急避让和制动力分配。

## 技术状态

### 轮边电机直接驱动

轮边电机曾在很多乘用车上使用，但随着矿物燃料的大规模工业化精炼和内燃机的广泛使用，轮边电机的应用逐渐淡出。

为了减少对油品的使用，近年来轮边电机技术再次成为被广泛关注的热点。例如，沃尔沃的一款四轮轮边电机驱动的概念车（沃尔沃充电概念），最大功率可以达到 480 千瓦。当

电池充满后，车辆在纯电动模式下可以行驶大约 100 公里。

三菱同样开发了一款基于蓝瑟的由轮边电机驱动的原型车，这个车型共装配了四个轮边电机，最大功率 200 千瓦，选用了永磁同步电动机，给每个车轮提供了最大 518 牛米的扭矩，最大时速可达到 180 千米/小时。

## 通过减速机构的轮边驱动技术

奔驰基于“SLS”超级跑车展示了一个新的设计，车辆的每个车轮都由一个电机通过减速机（速比  $i=5.5$ ）驱动。总功率为 392 KW。按计划车上将安装容量为 48 KWh 的高压电池，因此按照目前的情况看，车辆的续航里程将达到 150 至 180 公里奔驰仍然通过传动轴来驱动车轮，而米其林将电机和变速箱整合到被称为“主动车轮”的单元中。变速箱和未来的底盘部件将与 30 千瓦的电机一起装在车轮上。这还包括制动盘、制动卡钳、机电弹簧减震单元和附加的机械式底盘弹簧。

## 带有差速器的主减速机构

三菱最近准备开始量产一款纯电动汽车。该款四座汽车被称为“MiEV”，由输出功率为 47 千瓦的永磁同步电动机驱动。动力通过主减速单元和差速器传至后轮，最大设计时速 130 千米/小时，在城市混合工况（EUDC）下续航里程为 144 千米。

更多和变速箱、差速器整合在一起的电动驱动机构的例子包括雷克萨斯 RX-450-h，前桥由混合动力单元驱动，后桥由输出功率 50 千

瓦的电机驱动；还有 Tesla Roadster 跑车，是目前已经在量产的纯电动汽车，由两个 168 千瓦的电机通过行星齿轮驱动后轮。

## 横向分配扭矩（非电动）

第一个基于离合器的扭矩分配系统应用于三菱蓝瑟，相似的系统还有宝马 X6 和奥迪 S4。这些特殊设计的驱动单元拥有额外的变速箱零件和可控离合器，用于在车轮间主动的分配扭矩。

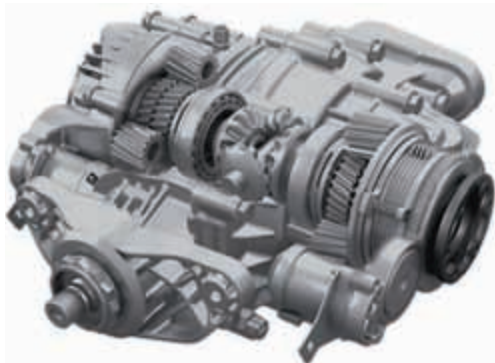


图1 宝马 X6 后桥差速器

通过使用这种系统，驾驶动力性能和驾驶安全都得到了提高。目前，集成电动执行机构和机械扭矩分配机构的一体化系统仅仅处于概念设计阶段，实际零件还没有实现。将该种系统作为一种主动系统的应用，例如紧急避让系统，还没有被认真考虑，现在，该类系统的主要目的还是用来提高驾驶动力性能和舒适度。

# 主动电动差速器

## 基本原理

这里我们用传统简单的锥齿轮差速器来描

述主动差速器的功能，由于特定的运动条件，车轮转速的算术平均值和主减速的转速是一样的。当车辆转弯时，在不同车轮上的速度差由差速器内的小行星齿轮旋转运动来补偿。扭矩也是通过差速器的行星齿轮均匀分配到各车轮上（不考虑自锁）。动力就像分布在杠杆的两边，只不过这个杠杆被行星齿轮取代，并确保两边拥有相同的圆周方向的力，因此，在差速器两边的半轴齿轮上有同样的扭矩。

如果，差速器行星齿轮的旋转运动和一个激励器连接，如图 2 所示。这个激励器将由差速器驱动。反过来，差速运动可以通过行星齿轮的转动引起，转速差由给定的激励器的速度决定。因为激励器产生的驱动扭矩使得杠杆（行星齿轮）不平衡，所以差速器的扭矩分配也会变化。这意味着可以在车轮上实现任何所期望的的扭矩和速度的理论定义值。

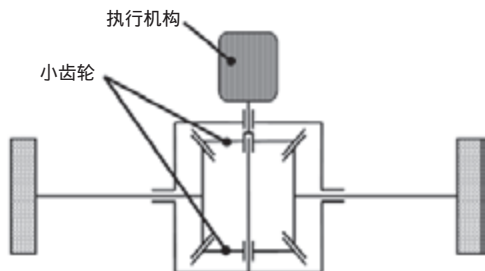


图 2 主动差速器原理

这种主动差速器设计在功能上的一个优势是不需要任何附件，因为扭矩分配是直接差速器内完成的。

当两侧车轮速度相同时，这个激励器是固定不动的，只有有主动的分配时，激励器才提供扭矩。

设计的不足之处如图 2 所示，是在激励器

扭矩和差速器扭矩间的传递比率较低。另外，激励器会跟着轮轴一起旋转。为了利用这种设计的优点，同时避免所提到的不足，下面介绍一种特别改良过的差速器。

## 横向扭矩分配原理

图 1 所示的传动系统可以保证扭矩单独分配到驱动桥每个车轮上。由于车轮上不同的圆周力，在车辆竖直轴上会产生一个偏航力矩，该力矩可以直接影响驾驶动力性能和驾驶稳定性。和 ESP 系统对比，车辆并没有因为控制系统的干涉而制动。这被称为扭矩定向传动，被用于车辆的后桥，可以和目前的 ESP 系统对比，有效的防止车辆前轮转向不足这样的情况发生，并因此提高车辆安全性和动力性。

车轮扭矩的控制总是通过控制车轮的速度实现。主导的滑动工况使车轮之间产生扭矩差。图 3 显示了车轮速度和驱动力矩的关系。在最初 A 状态下，车辆直线行驶，两个后轮以同样的速度和驱动力矩行驶。

同样的滑动产生在两个后轮上。这时左轮制动同时右轮驱动力矩增大许多，使车辆总的驱动力矩保持不变。状态 B 显示了左轮的制动力矩和必需的制动滑差之间的关系，然而，不论左后轮上的制动力矩是怎样的，右轮上的驱动力矩必须增大到状态 C 的程度以保证驱动力矩不变，图 3 的滑动曲线显示了右轮必须的工作点。

通过滑动曲线的工作点可以推导出驱动轴上驱动力矩的分配需要车轮速度的变化。反之亦然。因此，为了产生差速器中的扭矩差以实现扭矩定向传递的功能，必须使一个车轮相对另一个车轮加速。

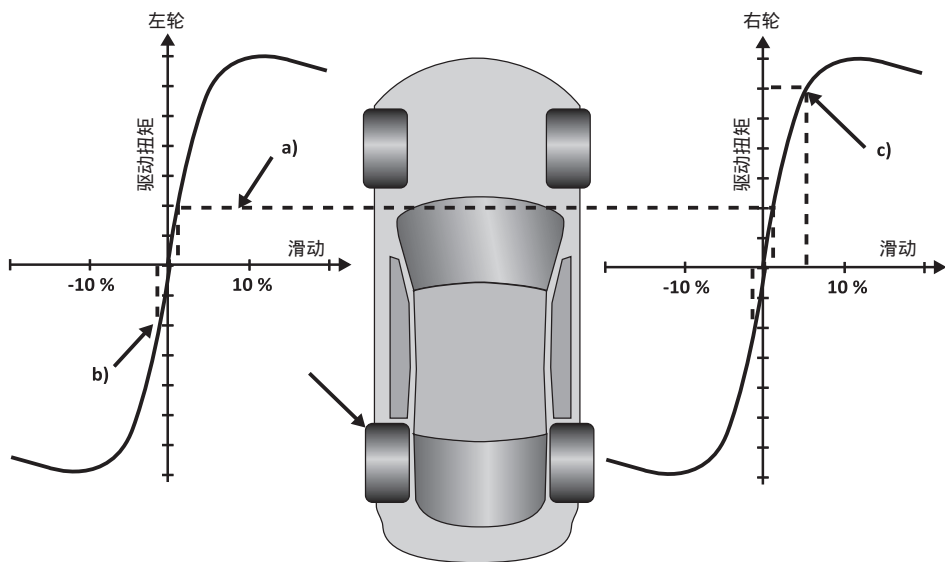


图3 车轮滑动和驱动扭矩的关系

## 主动差速器设计

### 总览

电动主动差速器和目前的差速器在基本原理上不同。下面设计中所描述的一种驱动单元先前并不为人所知，和耦合传动机构相结合的行星齿轮系也是新的。现在有很多种传动设计可以实现主动差速器的功能，根据应用情况不同，每种都提供了特殊的优势。

图4显示的驱动单元是给一款中型车

设计的，该车驱动桥有一个主驱动电机和一个控制电机，用以在对应的驱动桥的两个车轮间产生扭矩差。电动主动差速器可以细分成几个小总成，“主减速行星齿轮组”；“差速器”

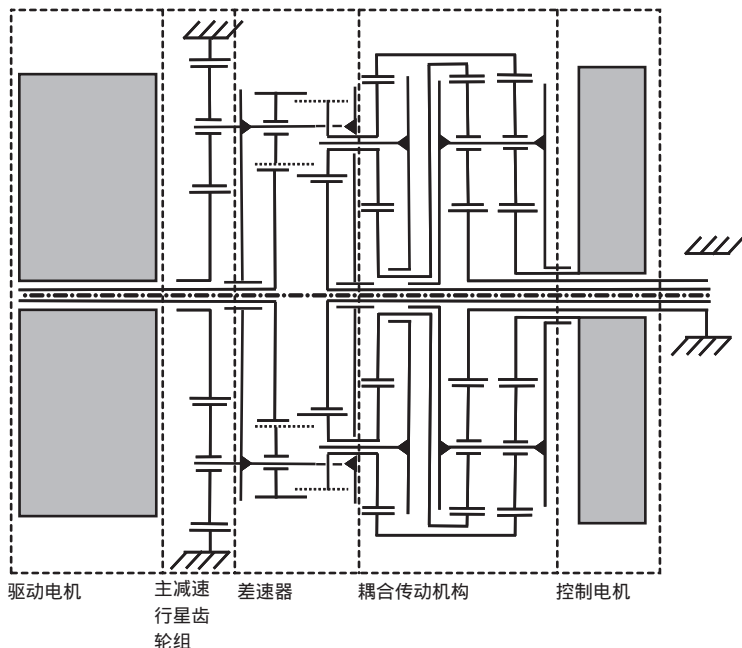


图4 主动差速器设计

和“耦合传动机构”。这些部件和牵引及控制马达组合在同轴上，并与差速器输出轴连接。

## 差速器

当控制部分不工作时，正齿轮差速器均匀地分配扭矩 [1]。如图 4 所示，这个差速器是由两个太阳轮和三个行星轮副相互啮合组成的行星齿轮系，当然，也有其它形式的差速器设计。牵引电机的驱动力通过主减速机构减速后输入变速箱，主减速可以采用行星轮系，主减速行星架和差速器相连。差速器的行星齿轮和与车轮相连的太阳齿轮啮合。非常重要的一点是，这种形式的直齿轮差速器可以附加额外的行星齿轮。直齿轮差速器中的三对差速行星齿轮和锥齿轮差速器中的行星齿轮拥有同样的功能。它们补偿了车轮间的速度差并相互反向旋转。

反过来说，根据图 2 的原理，通过诱导正齿轮差速器中的行星齿轮组产生相对运动，可以产生车轮间的速度差。在现在所展示的这个变速箱中，这个任务是由耦合变速机构实现的，当车辆沿直线行驶时，正齿轮差速器中的差速行星轮间没有相对转速。

## 耦合传动机构

耦合传动机构包含三组行星齿轮，其中两组的设计是相同的。如图 4，该机构中左边的行星齿轮系和差速器共用行星架和一个行星轮。这种设计使得可以相对简单的整合额外的行星齿轮，因此常被称为“简化耦合齿轮”，耦合齿轮用来为控制电机降低横向扭矩分配时从车轮传来的高扭矩。如果太阳轮相对于齿圈转动，就迫使正齿轮差速器中行星齿轮以相对应的速

度转动。这就是车轮上能产生速度差的原因。正齿轮差速器中内侧的行星齿轮的转速相当于图 2 中锥齿轮差速器中的行星齿轮的转速。

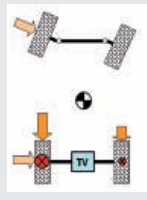
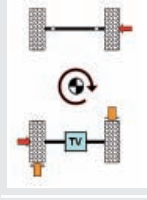
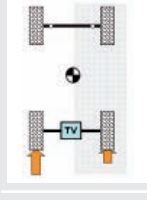

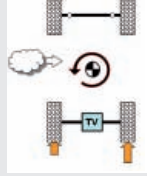
耦合传动机构中的两个中间变速组件共用行星架。一个行星齿轮系中的太阳轮固定在壳体上，另一个太阳轮和控制电机相连。第一个行星轮系的齿圈和耦合齿轮的太阳轮相连，第二个行星轮系的齿圈和耦合齿轮的内齿圈相连。

当控制电机输出扭矩时，耦合传动机构使行星齿轮系中的两个齿圈朝相反方向旋转，这样，在耦合齿轮的太阳轮上就作用了一个与其内齿圈反向的扭矩。如果控制电机固定，在差速器行星轮上产生差速运动是不可能的。因为此时联轴器齿轮的太阳轮和齿圈运动速度相同，当然车轮速度也就相同了。如果耦合传动机构不运转，就不会产生任何差速扭矩。车轮扭矩是一样的（不计传动损失）并且控制电机不提供任何扭矩。当车辆行驶过曲线时，控制电机也是被动的，此时控制电机在空载运转。如果传动系统无效（比如故障），该机构会像传统差速器一样运行，只是自锁率略高。

## 主动电动差速器的功能

发展“主动电动差速器”的目的是将车轮直驱的优势和通过差速器的驱动系统的优势结合起来，同时，避免相应的缺点。特别地，横向扭矩分配的实现可以获得一系列决定性的优势。

图 4 所示的传动系统概念是被开发出来以迎合一些特殊需求的。车轮直驱可以实现横向扭矩分配的功能，作为对照，创新的舍弗勒驱动单元有下述的特色。

	<p><b>效率和适用范围</b></p> <p>通过选择性的将扭矩分配到车轮上，驱动桥所产生的制动力矩可以得到增加。如果车轮的制动力矩受到限制，例如由于轮胎正压力的不足（转弯内侧的车轮），那么通过驱动桥内部的扭矩分配，仍然可以增大另一个车轮的制动力。这就意味着潜在的驱动力得到了再生，提高了系统效率。</p>
	<p><b>驾驶动力性能</b></p> <p>同一轴的不同车轮受到不同的驱动扭矩和制动扭矩可以在车辆的垂直轴上产生偏航扭矩。偏航扭矩可以在转弯中显著提高动力性能。这一更灵活、迅捷的驾驶表现不仅仅能提高驾驶舒适度而且也提升了驾驶安全性，比如在车辆做紧急避让或突然失控的情况下。</p>
	<p><b>牵引</b></p> <p>由于路面的不同摩擦系数，装有差速器的普通驱动桥并不能实现最大的牵引力，因为两侧车轮的扭矩是不一样的，并且能产生较低扭矩的一侧起到决定性作用。扭矩的选择性分配可以将两侧车轮的驱动扭矩都实现最大化，同时可以防止各个车轮的独立打滑旋转。</p>
	<p><b>辅助转向</b></p> <p>通过合理的车桥结构设计，作用在转向驱动桥两侧车轮上的不同的驱动力将在转向主销上产生一个扭矩。这就使得转向锁定或转向助力可以通过设定扭矩的横向分配来实现。其目标是取代现有的辅助转向系统，并且也可以实现自动的紧急避让动作。</p>
	<p><b>舒适性</b></p> <p>由于横风和路面沟槽等因素造成的负面影响，可以通过使用动态的横向扭矩分配系统来纠正。偏航扭矩可以实现始终如一的驾驶性能，例如对于一个给定的转向角，它的转弯半径可以是一定的，和车辆的载荷、速度无关，就像物理学理论上一样是可能的。</p>

牵引力由牵引电机单独提供，最终，只需要一个电动系统，考虑效率和质量后，通过选取合适的主减速比可以驱动电机最优化。

和轮边电机的设计相比，驱动单元稳固地和车辆联结并且通过半轴驱动车轮，因此簧下质量并没有增加。这有利于提高驾驶舒适度和驾驶动力性能。

控制电机和耦合传动机构可以在任何时候产生大约 1,000 牛米的差速扭矩。而对于轮边

电机直接驱动来说，电机功率必须根据车速相应的增加（例如，在正常速度范围内，每个车轮需要 80 千瓦的功率来获得正常的差速力）。

显而易见，为了分配扭矩，采用电动主动差速器所需的电力系统的功率，比在每个车轮上安装电机所需要的功率要小。车轮驱动扭矩的总和并不由耦合传动系统，即车轮间的差速扭矩决定。因此，控制系统可以相当简单。

在两个轮边电机驱动的情况下，一个电机



被遏制的驱动力不能被传递给另一个电机使用。但在耦合传动机构中，这个功能是可能的。各个电机可以根据它们不同的功能分别进行最优化（例如，牵引电机达到高效率，控制电机达到高控制精度）。

创新的驱动单元可以用于纯电动车和混合动力车。另外，传动系统也可以设计成没有控制电机和耦合机构的传统形式的驱动单元。

试验车的驱动系统设计是基于在各种情况下，拥有最大的系统灵活性以满足在各种情况下测试系统的扭矩分配和保持力。如图 5，我们将主动差速器和驱动机构组成一个组件，在前桥和后桥上各安装一套，这样就可以测试和比较前驱，后驱和四驱的状况，也可以和没有耦合传动机构的传统驱动系统比较。

我们选择了现款的斯柯达明锐作为试验车。该车有现成的四驱版本，这使得改造工作相对简单。和同级别的车辆比较，明锐在空间和有效载荷上也有优势。

最近几年，无数基于紧凑型轿车的电动原型车已经在生产，然而，到目前为止，始终没有基于可以作为家庭用车的中型电动车的设计，



图 5 试验车设计

这也是本项目的一大创新之处。

舍弗勒在纽伦堡中心区域为电动车建立了包括三个站点的充电站网络，以确保在实际应用和销售客户的条件下进行测试。在到 2012 年的这段时间，这辆车将会作为舍弗勒测试和运输用车。随后，该车将会用于地区公共服务。

## 技术风险

### 总览

汽车部门新开发的系统在开始时会有很高的要求。为了获得客户的认可，必须是低噪音且在功能和舒适度的优势上不能有任何限制。新的系统必须具备以下有点：较低的使用和维护成本，较高的驾驶安全性和舒适度，此外，法律规定的安全要求也必须遵守。对于生产商来说，低的生产成本、量产时稳定的质量和高度的成熟度以及与常见产品的竞争力都是很重要的。

因此，驱动技术的发展在很多方面有很大的技术风险。总的来说，风险来自于对整个系统的不熟悉，这可以通过每个系统零件的单个风险来证实。

### 传动系统概念和设计

图 4 中所示的传动系统设计是由舍弗勒和 FZG 合作开发的，该设计用于试验车进行功能验证。考虑到量产，现有的系统概念在零件数

量，设计尺寸和复杂度方面还有很大的改进潜力。最终的方案应该更简单，更具经济性，更小型和轻量化。经验显示，为了找到主减速单元和耦合系统的理想传动比率，必须根据试验项目中的发现得出一些最优循环。这可以改变设计中的一些基本原理，甚至一些总是符合图4中图表的观念也会得到修正。

## 机械系统

基本的机械设计比较简单，然而，迄今为止，还没有这样或相近的产品在制造。图4显示，传动系统由很多齿轮连接，并不是每个齿轮连接都在主传动流中，所以效率会减弱。

首先，和主减速有关的行星齿轮系统零件必须有尽可能高的效率，同时，在整个工作范围内使噪音处于较低水平。这对于相对传统车辆有更优噪音等级要求的电动车辆，是一个很

高的要求。我们必须开发高效的齿轮，在齿轮齿接触区域刚性不变的同时有低的滑动接触，同时，对整个传动系统的激励较低。

耦合传动系统的效率之所以在整个系统中所占的比重较小是因为相关的动力传输较小。在该系统中，它应该在噪音方面影响极小，同时又可以很经济地制造。横向扭矩分配系统的关键因素是在和差速器的整合中使用较小的间隙设计。大间隙会导致整个传动系统的抖动，也会造成高速动态控制系统和控制电机对迅速变化的扭矩反应延时。在自由间隙的设计中，动力路径的设计也会简化。一方面，为了防止功能失效；另一方面，为了避免因追求过高质量要求的不经济设计。所以，我们必须了解在怎样的程度自由间隙设计是可行的和必要的，但现在还不清楚。在慕尼黑 FZG，有一个关于这个主题的博士论文计划。

我们需要开发新的生产技术去实现特别经

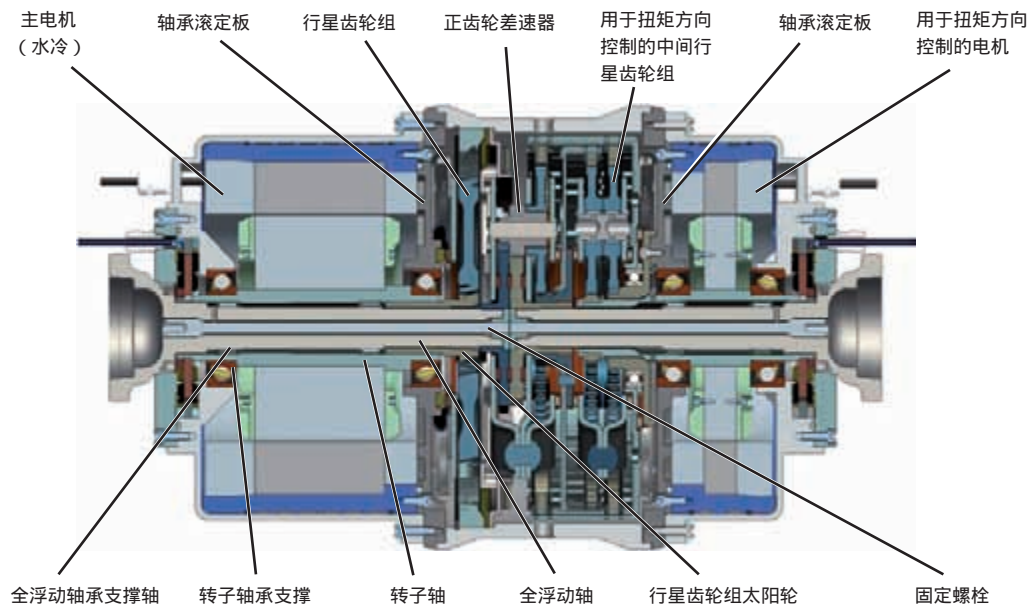


图6 原型样机设计

济的生产。在润滑系统上，我们也必须要有新的创新，在损失最小的情况下，保证零件的冷却和润滑满足产品性能。

## 电控系统和软件

正如本文开篇时所说，横向和纵向的扭矩分配的控制策略必须根据不同的驾驶条件匹配：

- 效率和范围：能量再生的最大值
- 驾驶动力性和驾驶安全性：“主动电动差速器”的作用
- 牵引功能
- 辅助转向功能
- 舒适功能

尽管，针对使用的离合器执行机构，已经有基于现有的控制方式来实现扭力定向功能的传统驱动系统（宝马 X6，奥迪 S4，三菱蓝瑟），但对用于电机的系统，并没有现有的控制方式。此外，上面提到的控制策略中的控制优先级也必须确认。

车辆的响应必须清晰，重复性好且易于操作。对于司机来说，在任何级别的动力再生情况下，制动感觉必须重复性好。其它车辆动力控制系统，诸如 ABS、ESP 不能被削弱。安全系统必须以适当的方式整合。

在电控系统方面，为提高车辆稳定性，需要高扫描率的传感器来保证系统高速运行以获得高操作灵敏性来应对路面状况不佳和侧风。为了精确的计算施加在车轮上的扭矩，一个办法是根据车轮速度和存储的性能曲线来计算车轮扭矩，但这样做的缺点在于不确定性，另一

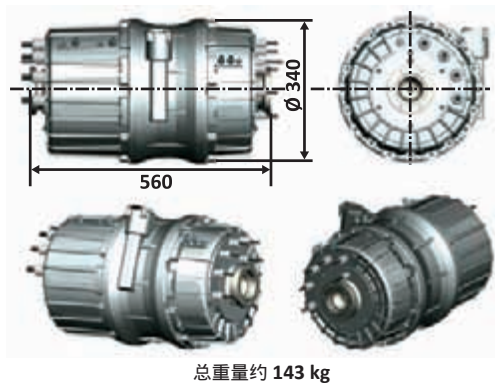


图7 原型样机的尺寸和重量

个办法是直接获取扭矩数值记录，但在此之前，必须开发出可以获取这样记录的系统。

此外，还必须根据传动系统相互匹配的关键数据开发合适的牵引电机。控制电机必须在低速区域拥有良好的动力性。而且，控制电机必须有足够的经济性，同时，能符合牵引系统的控制需求。

## 总结

主动电动差速器系统是适合未来控制策略的优化平台。带有智能横向扭矩分配系统的直齿轮差速器和传动单元结合在一起。如果在两个车桥上都使用主动电动差速器，也可以实现车辆径向扭矩分配。

舍弗勒并不想凭借这个创新的理念成为变速系统制造商，舍弗勒可以提供例如行星齿轮，以及安装了舍弗勒现有变速箱轴承的轻量化差速器这样的产品。零部件供应商对于驱动技术必须有核心理解，这样才能对他们的零部件进行有意义地开发并给客户适宜的技术支持。

未来，我们将以最优的方式将舍弗勒集团和大陆集团的技术整合以进一步实现这个传动系统。在这一点上，我们可以参考大陆集团和TU Darmstadt正在从事的“Proreta”项目。在这个项目中，自动制动和防止滑动系统被应用在由内燃机驱动的车辆上。这个项目的公布对于主动电动差速器的理念形成有很大贡献。最后，我们必须说明，主动电动差速器还没有实际的原型，只是在最初的设计阶段（图6，7），舍弗勒现在正处在开发的初期阶段，同时也在

寻找强大的开发伙伴来共同面对技术风险。

## 参考文献

- [1] Biermann, T.; Smetana, T.: Schaefflerlight-weight differentials – A family of differentials reduced in space and weight; 9th Schaeffler Symposium, 2010