

第 1 章

赛车总体设计

1.1 中国 FSAE 赛事简介

大学生方程式汽车大赛(Formula SAE,FSAE)是一项面向大学生的综合性工程教育赛事。中国大学生方程式系列赛事(Formula Student China)成立于 2009 年,属于非营利社会公益性事业,旨在为国内汽车人才的培养与选拔运营搭建公共平台^[1]。

中国大学生方程式系列赛事组成及发展历程如图 1.1 所示,4 个分赛项分别为:

- (1) 中国大学生方程式汽车大赛,2010 年首次举办,简称 FSCC。
- (2) 中国大学生电动方程式大赛,2013 年首次举办,简称 FSEC。
- (3) 中国汽车工程学会巴哈大赛,2015 年首次举办,简称 BSC。
- (4) 中国大学生无人驾驶方程式大赛,2017 年首次举办,简称 FSAC。

截至 2021 年,系列赛事注册参赛院校有 244 所,车队注册总数 420 支,约有 5 万名来自各高校的学子参赛,他们不仅完成了 1600 余台赛车的设计,还组成了 58 支比赛队伍,并且在国内外共计取得了 35 项荣誉,同时还发表了上万篇技术论文。

各大学生团队每年都会独立自主地设计、制造、调试一辆方程式赛车。在这个过程中,团队不仅需要展现出自己的工程实践能力,还需要考核团队的工程管理、商业营销、成本控制、宣传招商等全方位能力。目前赛事培养人才涵盖汽车机械工程师、电气工程师、整车测试工程师、CAE 分析工程师、无人系统架构工程师、成本造价师、车辆营销策划人员、新媒体传播人员、技术管理人员、项目管理人员、科研人员等。为加强专项人才培养,做到精准培养,赛事衍生成立了诸多专项能力培训平台,包括中国大学生方程式系列赛事全国队长会、中国大学生方程式电气系统安全员培训、中国大学生方程式整车试验员培训、线上竞赛等。

赛事紧跟行业的发展路径,深度促进产教研全方面合作,为行业培养急需人才,已得到了社会各界的支持和认可。

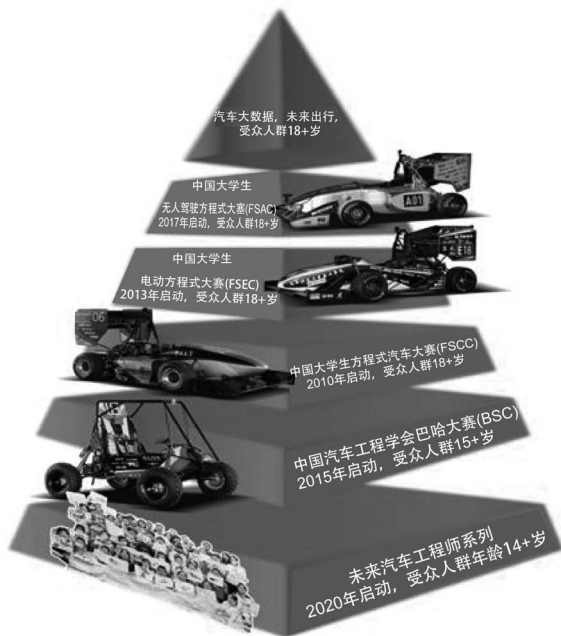


图 1.1 中国大学生方程式系列赛事发展历程

1.2 赛车总体布置

1. 总体布置的意义

FSAE 赛车的主要设计流程为：赛车总体布置→各子系统设计→总体装配设计→可靠性和稳定性测试。在完成总体布置的前提下，各子系统的设计可以并行展开，相互协作。总体布置持续整个过程。从汽车造型效果图设计开始，总体布置就必须针对客户提出的需求，收集竞争车型，提供汽车造型的总体设计参数。作为赛车设计全过程的协调和监控机制，通过总体布置逐渐确定设计硬点，直至最后的精确装配，保证所有子系统之间的相互配合关系，同时能将产品的成本和结构的工艺性有效地结合在一起。总体布置在整车开发过程中起着举足轻重的作用，利用好并行工程的思想，能更好地协调各个子系统的工作，缩短开发周期，提高工作效率，提高产品开发的成功率。因此做好总体布置工作对整车开发具有重要意义^[2]。

2. 总体布置的内容

在进行总体布置时，应基于中国 FSAE 赛事规则，并参考汽车总体布置方法、汽车理论和汽车设计的相关知识。对关键零部件（如发动机、差速器、轮胎、悬挂等）进行选型设计，确

定赛车的基本参数(包括尺寸、质量和性能等),为后续的设计和计算奠定基础,以便进行整车建模。另外,在总体布置中,需要考虑各个分系统的规划与目标,明确关键节点的零部件选择和基本参数,以使整个团队在新车的研发过程中更具目的性,避免只关注局部而忽视整体。从一个赛季的开始到结束,赛车的设计和表现都应和总体布置相比较。这样可以在检验赛车是否达到设计目标的同时,考虑设计目标是否合理,记录赛车存在的缺陷,为制定来年的新车总体布置提供服务^[2]。

3. 总体布置的原则

1) 符合赛事规则

在方程式赛车中,Formula一词的原意是惯例、常规、准则和方案。赛车必须遵循国际汽车联合会发布的车辆技术规则,根据统一的规则和限制进行制造,这样制造出来的赛车就是方程式赛车,比赛称为方程式汽车赛。简而言之,“方程式”指的就是“规则”。在大学生方程式赛车的设计、制造、测试和竞赛过程中,中国大学生方程式汽车大赛的赛事规则被视为最基本的约束,并可作为大家普遍参考的文件。本书参考的赛事规则是《中国大学生方程式汽车大赛规则(2023)》^[3],简称“规则”。

2) 基于成本考虑

在赛车比赛中,经费始终是一种稀缺资源。每个车队都会最大限度地利用能筹集到的资金,以追求更好的成绩。因此,预算和成本直接影响零部件选型和加工工艺的决策。不同品牌、型号的零部件以及不同的制造方法,其性能和尺寸肯定存在差异,因此这些因素会影响到总体布置的决策。

1.3 整车形式的选择

1. 赛车基本式样

规则第二章第二节 2.1 对赛车式样作出了要求:

2.1 赛车式样

赛车必须车轮外露和座舱敞开(方程式赛车式样),并且四个车轮不能在一条直线上。

对“车轮外露”的定义——车轮外露即须满足以下要求:

- 1) 从垂直车轮上方看,前后车轮上半部分(上半 180°)不允许被遮挡。
- 2) 从侧面看,前后车轮不允许被遮挡。

3) 在转向轮指向正前方时,赛车的任何部分都不能进入排除区。从赛车侧面看,排除区长边界由车轮前后各75mm的竖直延伸的两条线组成,宽边界为从轮胎外侧平面到轮胎内侧平面。“排除区”见图2.1。

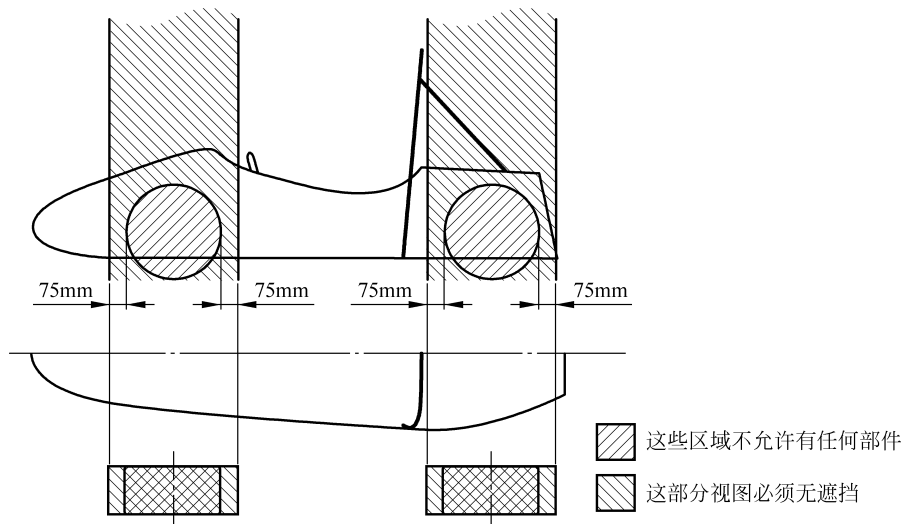


图 2.1 车轮周围排除区

4) 必须同时符合第二章第九节空气动力学装置的尺寸和要求。

备注：所有的检测都使用干胎。

规则第二章第二节 2.2 对车身作出了要求：

2.2 车身

除了驾驶舱必须开口以外,从赛车最前端到主防滚架(或者防火墙)的这段空间里,不允许车身上有深入驾驶舱的开口。允许在前悬架的零件处有微小的开口。

2. 赛车驱动形式

1) 中置后驱

主流的驱动形式为发动机中置后驱(middle-engine rear-drive, MR)。在方程式赛车的范围里,发动机中置后驱貌似成为了一条最基本的形式,因为它可以使赛车前后质量分配均匀、车手视野良好、动力传递路线最短、汽车动力性较佳,但容易产生转向过度或有甩尾倾向。在一辆结构紧凑、寸土寸金的方程式赛车上,中置后驱可谓最优化的设计。

2) 四轮驱动

四轮驱动(4 wheel drive, 4WD)可以充分利用所有车轮与地面间的附着力,提高动力性,但在单个发动机提供动力的方程式赛车上,需要加装传动轴、分动器和轴间差速器等部件,存在结构复杂、质量大、重心过高等较多缺陷;而在安装了轮毂电动机的纯电动方程式赛车上,无须复杂的传动机构,四轮驱动得到了普遍的应用。

3) 其他驱动形式

一般汽车的驱动形式还有前置前驱(front-engine, front-drive, FF)、前置后驱(front-engine rear-drive, FR)和后置后驱(rear-engine rear-drive, RR)。在 F1 赛事诞生之初,曾出现过 FR 的布置形式,但由于其车头过重过长、传动系统过长、传动轴将车手垫高等缺点,很快被 MR 形式所取代。FF 形式由于传动布置复杂且困难,转向不足明显,制动后轮易打滑,前轮轮胎寿命短、动力性略差,一般不予考虑。

3. 赛车整车架构

燃油方程式赛车整车架构如图 1.2 所示,主要由车身、车架、车轮、动力系统、传动系统、电控系统、制动系统、转向系统、悬架系统及空气动力学装置组成。

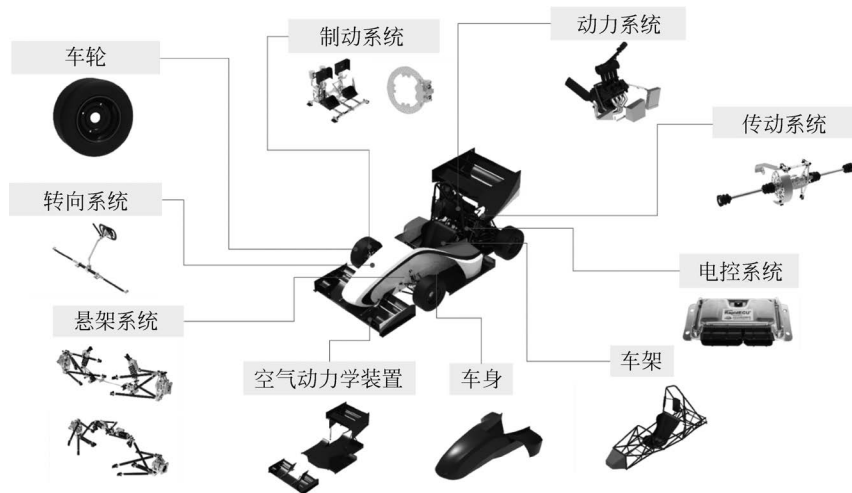


图 1.2 赛车整车架构

1.4 重要部件选型

一辆大学生方程式赛车需要进行选型和采购的主要部件包括发动机、轮胎、轮轴、电子控制单元(electronic control unit, ECU)、差速器、减振器、转向器、制动主缸、制动轮缸、消声器、座椅、安全带和缓冲块等。一些优秀的车队会自行制造这些部件(除了安全装备),或者在较大程度上改造购买的零部件。而赛车上的其他部件通常需要车队成员自行设计和加工。在总体布置的设计中,首先需要确定重要的部件选型,主要包括发动机、轮胎和轮轴。因为发动机是赛车的核心,也是技术含量最高的部件,而轮胎则是赛车释放动力的最终途径,它不仅影响发动机性能的发挥,还提供机动性的保障,它的尺寸在很大程度上影响行驶系统、悬挂系统的设计以及整车造型。因此,赛车的设计者应该同等重视轮胎和发动机的重

要性。

1. 发动机

1) 单缸发动机

从理论上讲,单缸发动机具有一些优点:构造简单,尺寸较小,质量轻,易于设计进排气系统、油路和冷却系统,并且在燃油经济性方面具有优势。然而,单缸发动机也存在一些缺点:随着燃烧室容积的增大,燃烧效率会不断下降;发动机排量越大,活塞就越大、越重,从而限制了最高转速和大功率输出。

相对于四缸发动机,单缸发动机在使用过程中会遇到更多的麻烦。如果原厂的单缸发动机采用化油器,需要自行将其改为电喷;同时,在安装了 20mm 的限流阀后能否正常点火也是一个问题;即使能够运转起来,更换电喷并满足标定的功率要求,这也是一个巨大的挑战;此外,即使在台架上调试了 6 个月,也不能保证它在赛场上能够良好地工作。另一个挑战是为了发挥单缸发动机的优势,必须将车辆质量降低,使整车质量在 170kg 左右,抑或更轻,否则将失去竞争力。

2) 四缸发动机

直列四缸发动机具有以下优点:工作流畅度高,振动较少,发动机部件轻巧,燃烧效率高,有利于发挥高转速下的功率,并具备良好的散热性能。然而,它的缺点是相对较重、体积较大、结构较复杂,造价和燃油消耗都较高。

尽管四缸发动机具有较大的转矩,但在 FSAE 赛事中直线赛道较少,高功率可能并没有太多发挥余地。一辆最大功率为 40kW 的单缸车与 60kW 的四缸车之间的差距并不大,甚至更轻的单缸车很有可能在弯道上超越四缸车。

四缸发动机可靠稳定,振动较小。大多数四缸发动机采用电喷技术,需要进行的改动较少,只需正确连接线束,即使加上限流阀并使用原厂数据,通常也能正常点火。随后的挑战是如何进行标定以实现更大的功率输出。对于首次参赛的车队来说,四缸发动机是一个不错的选择,它具备足够的功率来弥补质量减轻的不足,点火方面也比单缸发动机容易得多。

3) 三缸发动机

三缸发动机是一种相对较少见但正越来越受欢迎的发动机类型。它具有以下特点:

(1) 尺寸较小和质量较轻:相比于四缸发动机,三缸发动机体积更小、质量更轻。这使得它在安装和布局上更加灵活,适合用于小型车辆或需要轻量化设计的应用。

(2) 高效燃烧和燃油经济性:三缸发动机通常采用较高的压缩比和先进的燃烧技术,这使得它们能够实现更高的燃烧效率和燃油经济性。相对于较大的四缸发动机,在提供相同性能的情况下,三缸发动机燃油消耗更低。

(3) 较低的振动和噪声水平:由于发动机的平衡性更好,三缸发动机通常具有较低的振动和噪声水平。这有助于提高驾乘舒适性,并为车辆提供更平稳的动力输出。

(4) 较低的成本和复杂度: 相对于更复杂的四缸发动机, 三缸发动机通常具有更简单的设计和较低的制造成本。这使得它们更具竞争力并适用于经济型车型或市场。

需要注意的是, 虽然三缸发动机具有许多优点, 但在提供更高功率和转矩时可能相对受限制。因此, 对于需要更高性能的车辆或特殊应用, 较大的四缸或更多缸数的发动机可能更为合适。

2. 轮胎

作为赛车与地面之间的唯一接触点, 轮胎承担着传递动力、提供附着力和转向响应的关键任务^[4]。因此, 轮胎的重要性堪比发动机。在 FSAE 赛事中, Hoosier 是最主流的轮胎品牌, 其次还有 Continental、Goodyear 和 Giti 等品牌。

赛车轮胎采用全热熔胎技术, 具有轻量化的特点。其胎面配方相对较软, 使得轮胎在升温时能够快速达到工作温度, 并且胎面在高温下容易熔化, 从而有效地黏附在地面上, 提供出色的附着力。这种设计能够产生显著的加速、制动和转弯性能。

1) 外径

FSAE 赛事主流轮胎外径有两种: 10in 与 13in(1in=25.4mm)。10in 轮胎尺寸更小, 质量更轻, 整个行驶系统和悬架系统的几何尺寸都要缩小, 一共可减重约 10kg, 这是一个十分可观的减重量。直观上来说, 要行驶同样的距离, 小轮胎需要转动更多的圈数, 磨损也会更大。但是传动系的减速比(输入转速与输出转速之比)变小了, 动力损失也会减小。10in 轮胎最大的挑战是: 在更小的轮毂内部布置立柱、制动盘和制动卡钳等零部件; 更小的制动盘尺寸对制动系统提出了更严苛的要求; 在转向或跳动过程中, 更容易发生运动干涉等。因此, 建议经验较少的车队可以从 13in 直径的轮胎开始设计, 等技术成熟一些后再向 10in 轮胎发展。减小轮胎的尺寸, 不仅会影响上述两个系统的设计, 且车架、传动、空气动力学装置均会波及, 可谓牵一发而动全身。

13in 轮胎的优势在于内部空间大, 方便布置轮系零部件。在相同的宽度下, 13in 轮胎的接地面积更大, 可以有更大的附着力。缺点是转动惯量大, 需要更强的转矩加速, 所以 13in 轮胎一般匹配四缸发动机。

2) 宽窄选择

确定了品牌、轮胎直径和配方后, 接下来需要具体选择轮胎和轮辋的型号。规则中列出了常用的轮胎和轮辋型号及其参数。选择时, 原则上希望轮胎和轮辋更轻、胎面更宽、胎壁更低, 但为了满足互换性和适配性需求, 可能需要作出一些妥协。更宽的胎面直接提高了轮胎的附着力, 因此许多车队选择宽胎。然而, 宽胎也会带来质量增加和转向力增加等问题。因此, 在选择轮胎和轮辋时需要综合考虑各个方面的因素。

1.5 整车参数选取

赛车的重要参数可以分为外形参数和质量参数。外形参数包括轮距、轴距、总长、总宽、总高和离地间隙等。质量参数包括整备质量、质心高度和轴荷分配等^[5]。

外形参数主要用于建模方面,例如车身车架、空气动力学套件的设计等。质量参数主要用于计算方面,例如制动力计算、主减速器减速比计算、悬挂系统的运动仿真计算等。

对于初次参赛的车队,在设计这些参数时,首先应该与历届优秀车队的参数进行比较,然后进行适当的计算^[6]。而对于往届车队来说,还需要对比本队历届赛车的参数,并在权衡利弊之后进行适当的选择。通过借鉴历届优秀车队和本队的经验,可以更好地设计和调整这些重要参数。

1. 外形参数

1) 轴距与轮距

规则第二章第二节 2.3 对轴距,2.4 对轮距作出了要求:

2.3 轴距

赛车的轴距至少为 1525mm(约 60in)。轴距是指在车轮指向正前方时前后车轴轴线在地面上的投影之间的距离。

赛车的轴距是指轮轴中心线之间的距离(图 1.3)。轴距越长,赛车的高速稳定性越好。而轴距越短,在相同条件下,前后轴荷的转移越大,容易导致高速制动或进入弯道时操控不稳定。然而,轴距越长,赛车的最小转弯半径也越大,因此在迅速转弯或需要小转弯半径的机动性方面会变差。

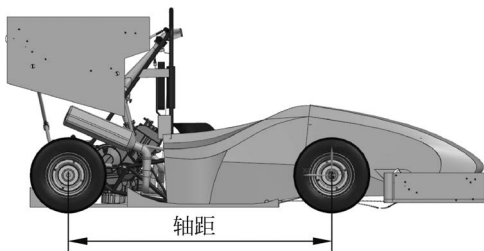


图 1.3 轴距

一般而言,赛车的最小转弯半径为轴距的 2~2.5 倍。因此,在讨论轴距时,要根据具体赛道的特点来进行考虑才更具指导意义。对于 FSAE 赛车来说,为了适应高速弯道和低速弯道频繁变换的赛道特点,最高速度一般不超过 120km/h,故轴距应该较短,接近 1525mm。

然而,轴距的长短会对赛车内部零部件的布局产生影响。较短的轴距会增加设计的难

度,轴距小于 1700mm 时,内部部件如发动机、传动系统、转向系统和人机布局等的布置压力会增大。

2.4 轮距

赛车较小的轮距(前轮或后轮)必须不小于较大轮距的 75%。轮距和重心必须结合起来以提供足够的侧翻稳定性。

轮距指的是赛车左右两侧车轮在车辆支撑平面上留下的轨迹的中心线之间的距离(图 1.4)。一般而言,轮距较小时,车体宽度较小,转弯时更容易绕过障碍物。而较宽的轮距能够减小转弯时车轮的荷载转移,使得外侧车轮能够提供更好的支持,在弯道中车辆的倾斜角度较小,外侧车轮的极限状态出现较晚,从而提供更好的稳定性。

对于后轮驱动的赛车而言,如果前轮距大于后轮距,车辆的转向能力就会偏低,这种转向特性在弯道中更加安全。然而,增大前轮距会增加车辆的转弯半径,因此,前轮距较大的车辆需要相应增大前轮的转向角度,以抵消对转弯半径的不利影响。另外,前轮距大于后轮距的车辆还具有一个额外的优势,即在绕桩过程中,只要前轮通过桩桶,后轮通常不会碰到桩桶。

根据历届中外车队的数据,主流的轮距通常选择在 1200mm 左右,前轮距相较于后轮距增加的值不超过 50mm。

2) 最小离地间隙

最小离地间隙,是指赛车停放在水平地面上,在额定满载条件下,底盘最低点与地面之间的距离。通常这个距离是指主环最低点下方车身或扩散器(空气动力学套件的一种)下表面与地面之间的距离。赛车规则要求最小离地间隙不小于 30mm,并要求赛车除了轮胎以外的部件不得接触地面。

较小的离地间隙可以降低赛车的重心,减小空气阻力,提高车速和高速过弯的稳定性。然而,如果离地间隙过小,悬架系统的刚度不足,赛车在高速转弯时底盘容易与路面接触造成损坏。

一般推荐的最小离地间隙取值在 30~50mm。在赛车组装完成后,可以通过调整前后部分的离地间隙来微调赛车的前后轮荷分配。这样的调整可以对赛车的性能和操控进行一定的优化。

2. 质量参数

在确定赛车的质量参数时,需要考虑整备质量、轴荷分配和重心高度的选择。准确地估

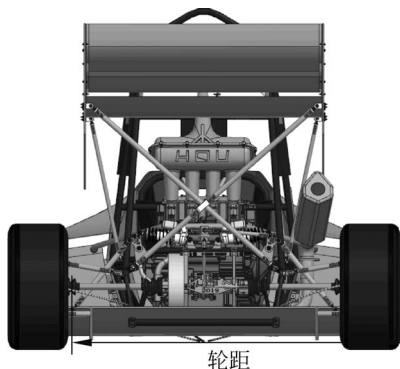


图 1.4 轮距

计赛车的质量参数对于后续设计制动力、主减速器传动比、悬架刚度等方面提供了重要的参考。此外,在分析各个零部件的质量时,还可以找到减轻质量的潜力。对于赛车而言,减重的意义甚至超过增加发动机功率和转矩的意义。因此,在赛车设计中,质量的减轻是一个重要的优化方向。

1) 整备质量

整备质量是指赛车在符合参赛要求的技术条件下装备齐全,加满各种油和水,并且没有驾驶员的情况下的质量。对于过去的车队而言,估计各个零部件的质量应参考上一年度的赛车数据。因此,记录赛车的各种数据非常重要,这些数据将成为设计新赛车的基础。

2) 重心高度和轴荷分配

重心高度和轴荷分配是根据赛车在满载状态下,在纵向平面内的质心位置确定的。通常情况下,轴荷分配会稍微偏向后轴,前后轴荷比一般为 43 : 57 ~ 49 : 51。这样可以增加后轮的附着力,提高加速性能,减少瞬间转向过度,并使赛车保持轻微的转向不足。在赛车装配完成后,可以通过调整推杆、拉杆或弹簧预载来微调前后轴荷比,但同时会改变前后的离地间隙。

重心高度一般在 300 ~ 400mm,重心越低,赛车的动态性能越好。有两种测试重心高度的方法:一种是在三维建模时确定所有部件的质量和位置,从而计算出整车装配体的重心位置;另一种是在实际车辆装配完成后,使用平面测重法或斜面测重法找出赛车的实际重心位置。