

FSAE 制动力分配系数优化研究*

池泽浩, 彭才望, 陈伟军, 魏源, 陈亚飞

(湖南农业大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为改变现有 FSAE 赛车制动效率不高的缺陷, 改善制动效果, 通过分析赛车前、后轮直线制动受力关系建立制动系统数学模型, 在 FSAE 赛事背景下, 分别采用极限值法、基于 MATLAB 的冗余值法和最大制动强度法对制动力分配系数 β 进行优化, 并以实车进行制动测试试验。结果表明, 制动力分配系数 β 为 0.642 6, 赛车初速度 50 km/h 时实施多次制动, 制动距离在最小为 13.9 m 时可实现四轮同时抱死, 满足 GB 7258—2017 的制动效率标准, 符合赛事要求。

关键词: 汽车; FSAE 赛车; 制动力分配系数

中图分类号: U469.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0011-04

按照赛事规则, FSAE 大学生方程式赛车比赛时需对制动系统进行动态测试, 要求赛车在规定的直道上加速至道路末端, 实现制动减速到静止, 同时实现四轮抱死且不跑偏。为满足赛事要求并提高比赛成绩, 何海浪等应用 ANSYS 软件对赛车紧急制动与连续制动工况下制动盘进行热分析, 为赛车制动盘选型及提高制动系统的可靠性提供理论依据。陈思宇等对制动力进行精确计算, 对比分析制动器制动力理想分配曲线和实际分配曲线, 结合仿真分析, 设计了一套新型赛车制动踏板系统。文献[4—9]围绕赛车制动踏板、再生制动、制动系统优化设计进行了大量研究。FSAE 赛车轴间制动力分配系数 β 的确定直接影响制动系的好坏和车手安全, 对 β 进行优化具有重要理论与实际意义。

1 FSAE 赛车整车结构参数

以湖南农业大学研发设计的湘农枫行方程式赛车为研究对象, 其整车技术参数及轮胎规格参数见表 1, 在水平路面直线制动时的受力情况见图 1。

表 1 FSAE 赛车的整车技术参数

| 参数名称 | 参数值 |
|------------------|---------|
| 质量(满载) m /kg | 320 |
| 轴距 L /mm | 1 600 |
| 前轴到质心的距离 a /mm | 880 |
| 后轴到质心的距离 b /mm | 720 |
| 质心高度 h_g /mm | 300 |
| 静态前后轴载荷分配比 | 45 : 55 |

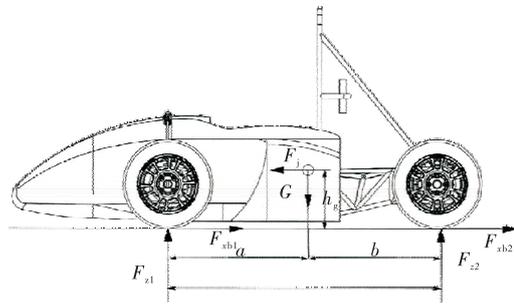


图 1 FSAE 赛车受力简图

赛车制动时, 前、后轴载荷发生转移, 前、后轴所对应的附着力发生变化。分析过程中忽略赛车的滚动阻力、空气阻力、旋转质量减速产生的惯性力矩及制动时车轮边滚边滑的过程, 附着系数选择一个定值 φ_0 。根据图 1, 以前、后轴接点计算力矩, 得:

$$\begin{cases} F_{z1}L = Gb + m \frac{du}{dt} h_g \\ F_{z2}L = Ga - m \frac{du}{dt} h_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为赛车和车手总质量(kg); du/dt 为赛车制动产生的减速度(m/s^2)。

令 $du/dt = zg$ (z 为制动强度), 得到前、后轴地

* 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5253); 湖南省教育厅资助科研项目(18B110); 2019 年湖南省大学生创新创业训练计划项目(2019015x)

面法向反作用力为:

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{G(b+zh_g)}{L} \\ F_{z2} = \frac{G(a-zh_g)}{L} \end{cases} \quad (2)$$

2 FSAE 赛车制动力分配系数的优化

赛车制动时,其制动力固定分配比、载荷转移情况及轮胎与赛道之间的附着系数等会影响赛车的制动性能。理想的前、后轮制动器制动力分配为:

$$F_{\mu 2} = 0.5 \left[\frac{G}{L} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{G} F_{\mu 1}} - \left(\frac{Gb}{h_g} + 2F_{\mu 1} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $F_{\mu 1}$ 为前制动器制动力。

将式(3)绘成曲线,简称为 FSAE 赛车的 I 曲线(见图 2)。

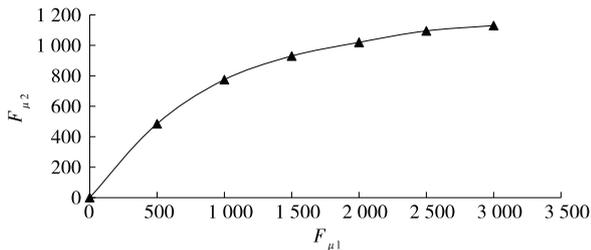


图 2 FSAE 赛车的 I 曲线

按一定比值将制动力分配给前、后车轮的制动器的分配线称为 β 线。制动力分配系数 β 为前制动器制动力与赛车总制动力 F_{μ} 之比,得:

$$\begin{cases} \beta = \frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu}} \\ F_{\mu} = F_{\mu 1} + F_{\mu 2} \end{cases} \quad (4)$$

β 线与 I 曲线交点处的附着系数为同步附着系数,用 φ_0 表示:

$$\begin{cases} \varphi_0 = \frac{L\beta - b}{h_g} \\ \beta = \frac{\varphi_0 h_g + b}{L} \end{cases} \quad (5)$$

赛车的地面附着系数理论上可达到 1.4,设 $\varphi_0 = 1.4$,由式(5)可得 $\beta = 0.7125$,此时 β 线与 I 曲线的相交情况见图 3。

在前、后轮刚要抱死(或前、后轮同时将要抱死)且制动强度为 z 时,赛车前、后轴利用附着系数为:

$$\varphi_f = \frac{F_{xbl}}{F_{z1}} = \frac{\beta L z}{b + zh_g} \quad (6)$$

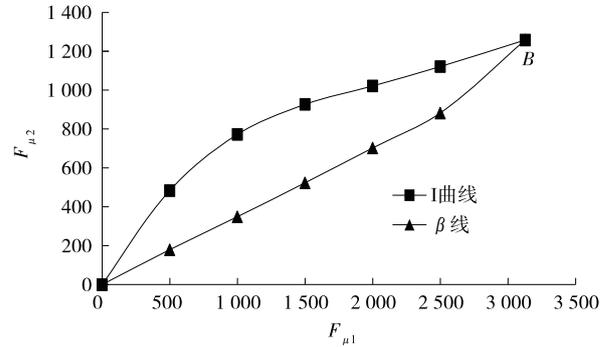


图 3 FSAE 赛车的 I 曲线与 β 线($\beta=0.7125$)

$$\varphi_r = \frac{(1-\beta)Lz}{a - zh_g} \quad (7)$$

2.1 基于极限值法优化制动力分配系数 β

由图 3 可得 I 曲线与 β 线($\beta=0.7125$)相交于点 B(3128.16,1262.24)(除原点外),且 I 曲线在区间 $[0,3128.16]$ 内存在极大值 $F_{\mu 2} = 1262.24$ 。由于极值点与 B 点的 $F_{\mu 2}$ 基本相等,前轮最大制动力 $F_{\mu 1max}$ 、后轮最大制动力 $F_{\mu 2max}$ 可视为在 B 点取得,此时 $F_{\mu 1max}$ 、 $F_{\mu 2max}$ 满足任何情况下前、后轮制动力要求,且满足后轮不先抱死的稳定工况。但制动力分配系数 $\beta=0.7125$ 时,对地面的附着系数利用率并不高,导致分配给前轮制动器的制动力远大于其实际抱死所需制动力,造成赛车前轮极易出现抱死。

2.2 基于 MATLAB 的冗余值法优化制动力分配系数 β

2.2.1 目标函数

根据附着系数的特性,前、后轴的利用附着系数 φ_f 、 φ_r 曲线与制动强度 z 曲线越接近, β 取值越合理,即地面附着条件发挥越充分,制动力分配越合理。赛车为单人驾驶,仅考虑单人驾驶工况,不考虑一般汽车空载和满载工况。当 $0.15(\text{滑溜}) \leq z \leq 1.4$ (赛道)时,以 φ_f 、 φ_r 曲线与制动强度 z 曲线之间差值的平方和最小值建立目标函数优化确定 β 值,目标函数为:

$$F(\beta) = \sum_{\varphi=0.15}^{1.4} |(\varphi_f - z)^2 + (\varphi_r - z)^2| \quad (8)$$

2.2.2 约束条件与优化计算

(1) 赛车制动强度 z 为 $0.15 \sim 0.8$ 时,前、后轴的利用附着系数满足下式:

$$\varphi_f, \varphi_r \leq \frac{z + 0.07}{0.85} \quad (9)$$

(2) 制动强度 z 为 $0.15 \sim 0.8$ 时,若后轮先抱死,易发生侧滑且赛车比赛时速度较高。因此,设计

中不允许后轮先抱死,即 $\varphi_f - \varphi_r \geq 0$ 。将式(6)、式(7)代入式(8),得:

$$\beta \geq \frac{b + zh_g}{L} \quad (0.15 \leq z \leq 0.8) \quad (10)$$

(3) 赛车制动强度 z 为 0.15~1.4 时,制动效率越高,则地面附着条件利用越充分,整车最小制动效率应大于 70%,即

$$E_{\min} \geq 70\% \quad (11)$$

编写约束函数并另存为 `constraint_function.m` 文件,使用 MATLAB 工具箱里的 `fmincon` 函数进行优化,得到 $\beta = 0.655 1$ 。按式(5)计算,得 $\varphi_0 = 1.094$ 。

2.3 基于 MATLAB 的最大制动强度法优化制动力分配系数 β

2.3.1 最大制动强度目标函数

在地面附着系数为 φ 、制动力分配系数为 β 时,制动强度最大值为 q ,制动效率为 E ,满足式(10)、式(11)的条件下,得:

$$q_f = \frac{b\varphi}{b + (\varphi_0 - \varphi)h_g} = \frac{b\varphi}{L\beta - \varphi h_g} \quad (12)$$

$$E_f = \frac{z}{\varphi_f} = \frac{q_f}{\varphi} \quad (13)$$

根据式(12),当附着系数为 $0.15 \leq \varphi \leq 1.4$ 时,最大制动强度函数可分段表达为:

$$q = \begin{cases} \frac{b\varphi}{L\beta - \varphi h_g} & (0.15 \leq \varphi \leq \frac{L\beta - b}{h_g}) \\ \frac{a\varphi}{\varphi h_g + L(1 - \beta)} & (\frac{L\beta - b}{h_g} < \varphi \leq 1.4) \end{cases} \quad (14)$$

最大制动强度 q 曲线与 $z = \varphi$ 曲线越接近,则赛车的制动效率越高,附着条件利用越充分。因此,以 q 曲线与制动强度 $z = \varphi$ 曲线之间差值的平方和最小值建立目标函数优化确定 β 值,目标函数为:

$$F_q(\beta) = \sum_{\varphi=0.15}^{1.4} |(q - \varphi)^2| \quad (15)$$

2.3.2 约束条件与优化计算

取与 2.2.2 节相同的约束条件,编写目标函数并另存为 `goalfunction_1.m` 文件。使用 `fmincon` 函数进行优化,得到 $\beta = 0.642 6$ 。按式(5)计算,得 $\varphi_0 = 1.027 2$ 。

2.4 不同 β 值对赛车车轮抱死的影响分析

由 β 线与 I 曲线之间的位置关系可确定赛车车轮抱死情况。3 种 β 线与 I 曲线的关系见图 4。

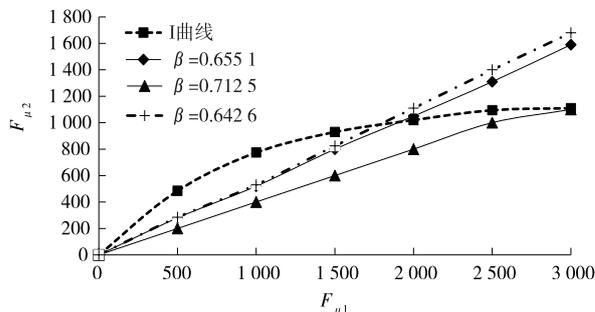


图 4 不同 β 线与 I 曲线之间的关系

根据文献[10], β 线在 I 曲线下方时前轮先抱死, β 线与 I 曲线相交时交点处四轮同时抱死或猛踩制动踏板使前、后轮制动器制动力均大于地面给车轮的附着力, β 线在 I 曲线上方时后轮先抱死。由图 4 可知: β 为 0.712 5 时, β 线与 I 曲线相交,赛车可能前轮先抱死或四轮同时抱死; β 为 0.655 1、0.642 6 时,车轮 3 种抱死情况都可能出现,车轮抱死情况由车手踩踏踏板力度及附着系数共同决定。

3 制动试验验证分析

FSAE 赛车制动性是指使下长坡的车辆保持速度一定、行驶中汽车停车距离相对较短且行驶方向维持稳定的能力。这里主要分析研究赛车的制动减速度及制动距离,不考虑制动时因摩擦使制动器温度升高导致制动热衰退的情况。考虑到赛车设计中缺乏具体特种车辆的相关文献,参考 GB 7258—2017 中对一般乘用车制动距离的要求及 ECE 制动法规,乘用车的制动距离要求见表 2。

表 2 乘用车的制动距离要求

| 制动初速度/ (km · h ⁻¹) | 制动距离要求/m | | φ |
|-----------------------------------|----------|-----|-----------|
| | 空载 | 满载 | |
| 50 | ≤19 | ≤20 | ≥0.7 |

参考文献[11],赛车制动距离计算公式为:

$$S = \frac{1}{3.6} \left(t_2 + \frac{t}{2} \right) v + \frac{v^2}{25.92 a_{\max}} \quad (16)$$

式中: v 为赛车制动时初速度; $t_2 + t/2$ 为制动器作用时间,取值范围为 0.2~0.3 s; a_{\max} 为赛车的最大制动减速度。

根据式(12)、式(13),当 $\varphi \leq \varphi_0$ 时, $a_{\max} = q_f g$; 当 $\varphi > \varphi_0$ 时, $a_{\max} = q_r g$ 。制动器作用时间取 0.2 s,通过表 1 和式(16)计算得到制动效能(见表 3)。

GB 7258—2017 对一般乘用车的制动距离要求为 $S \leq 20$ m。由表 3 可知:在附着系数为 0.7 的道

表3 3种 β 值对应的制动效能

| 制动力分配系数 β | 同步附着系数 φ_0 | 附着系数 φ | 制动初速度 $v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | 最大制动减速度 $a_{\max} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | 制动距离 S/m |
|-----------------|--------------------|----------------|---|---|-------------------|
| 0.642 6 | 1.027 2 | 0.7 | 50 | 6.16 | 18.6 |
| 0.655 1 | 1.094 0 | 0.7 | 50 | 6.02 | 19.1 |
| 0.712 5 | 1.400 0 | 0.7 | 50 | 5.29 | 21.0 |

路上制动时, β 取0.642 6和0.655 1均可满足要求, $\beta=0.642 6$ 时制动效能更理想。

为保证 FSAE 赛车制动系统设计的合理性,进行室外实车制动测试。赛车从原地起动车,沿道路直线加速至 50 km/h,车手分离离合器同时急踩踏板,测量赛车从踩下踏板到完全停止所经过的距离,分析赛车的制动效能和四轮抱死情况。制动力分配系数 $\beta=0.642 6$ 时制动测试结果见表 4。

表4 制动试验测试结果

| 测试次数 | 制动初速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 制动距离/ m | 四轮是否抱死 |
|------|---|------------|--------|
| 1 | 50.21 | 14.5 | 是 |
| 2 | 49.89 | 13.9 | 是 |
| 3 | 49.95 | 14.1 | 是 |
| 4 | 50.12 | 14.2 | 是 |

由表 4 可知:急踩制动踏板可保证四轮同时抱死且制动距离比理论计算值小,且满足 GB 7258—2017 的要求。

4 结语

针对 FSAE 赛车直线制动时受力情况进行分析,提出制动时力学数学模型,通过极限值法、基于 MATLAB 的冗余值法和最大制动强度法分别计算制动力分配系数 β ,分析不同 β 值对 FSAE 赛车制动的影响,并确定最佳 β 值。基于理论分析的最佳

β 值 0.642 6 匹配赛车制动系统并进行实车制动测试,结果表明, $\beta=0.642 6$ 时,以初速度 50 km/h 实施 4 次制动,制动距离的最小值为 13.9 m,并成功实现四轮同时抱死,满足 GB 7258—2017 的制动效率标准。研究结果对赛车制动系统的优化改进具有指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] 中国大学生方程式汽车大赛规则组委会.2011 中国大学生方程式汽车大赛参赛手册[Z].北京:中国汽车工程协会,2010.
- [2] 何海浪,郭潇然,田顺.基于 ANSYS 的 FSAE 赛车制动盘瞬态热分析[J].公路与汽运,2013(5):28—30.
- [3] 陈思宇,李传昌,魏嘉诚.新型赛车制动踏板系统的设计[J].上海工程技术大学学报,2018,32(1):53—57.
- [4] 薛科叙,李未,龚成义.大学生方程式赛车制动踏板拓扑优化设计[J].汽车实用技术,2020(9):138—140.
- [5] 曾广源,江汇,陈练思,等.FSAE 赛车的制动能量回收系统研究[J].农业装备与车辆工程,2017,55(7):10—13.
- [6] 乔军奎,陶文锦,孙博.FSAE 方程式赛车制动系统的设计[J].汽车工程学报,2012,2(2):139—146.
- [7] 王孝鹏,刘建军.弯道制动模式下 FSAE 赛车稳定性研究[J].机械设计与制造,2019(10):110—114.
- [8] 贺焕利,李亮.FSAE 方程式赛车制动系统设计[J].汽车实用技术,2019(2):45—49.
- [9] 邓召文,唐俊祥.FSAE 赛车制动系统优化设计[J].汽车实用技术,2015(11):3—7.
- [10] 余志生.汽车理论[M].5 版.北京:机械工业出版社,2017.
- [11] 朱为国.汽车制动过程时间的分析[J].北京汽车,2006(2):29—31.
- [12] 王甜甜,师忠秀,杨功正.基于 Matlab 的 FSAE 赛车制动比的优化[J].青岛大学学报(工程技术版),2014,29(2):54—58.

收稿日期:2020—06—17

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊没有官网,也从未以任何方式授权其他单位和个人在互联网上建立网站,互联网上以“公路与汽运”名义建立的网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊唯一的投稿邮箱是 gongluyuqiyan@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。