

受内部空间约束的车身气动优化

韦 甘, 杨志刚, 李启良

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 把分步遗传算法和以车辆人机工程学为基础设计的车身内部空间约束算子相结合, 对车身进行受内部空间约束的气动优化, 得到满足不同结构和尺寸的空间约束的三维无轮优化车身。优化车身的气动阻力系数 C_D 值在 0.070~0.090 之间, 气动性能较优。其中一款 C_D 值为 0.073 的凸头车型优化车身和一款 C_D 值为 0.086 的凹头车型优化车身可以满足由长前舱、大乘员舱和高后舱构成的内部空间约束条件的要求。内部空间约束的尺寸越小, 结构越简单, 优化结果越佳。造型越复杂的车身受到空间约束的影响越显著。

关键词: 车辆人机工程学; 空间约束; 遗传算法; 气动优化
中图分类号: U467.1⁺3 **文献标志码:** A

Aerodynamic Optimization for Car Body Under Constraints of Inner Space

WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang
(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The process costing genetic algorithm combining with the constraint operator of inner space based on vehicle ergonomics is used to optimize the aerodynamic performance of car body. Three-dimensional optimizational car bodies without wheels satisfying constraints of inner space with different structures and sizes are obtained. The coefficients of aerodynamic drag (C_D) of those optimized car bodies are within the confines of 0.070 to 0.090, and their aerodynamic performances are all good. Under the constraints of inner space which comprises long fore-capsule, big crew capsule and high rear-capsule, a cheese head optimized car body whose C_D is 0.0728 and a socket head optimized car body whose C_D is 0.0860 are obtained. When the size of inner space constraint is smaller and the structure is simpler, the aerodynamic optimization result is better. When the style of the car body is more complex, the constraint of inner space makes a greater difference to the aerodynamic optimization results.

Key words: vehicle ergonomics; space constraints; genetic algorithm; aerodynamic optimization

在汽车总布置和车身总布置设计完成后确定的汽车基本尺寸是满足机件布置和乘员舒适性的基础, 也是传统汽车造型的基础^[1]。新兴电动汽车如美国概念车 Autonomy, 因为机件布置的特殊性^[1], 底板上的布置和车身造型可以不受限制, 但也必须满足车辆人机工程学的要求, 保证乘员空间。传统的低阻车身设计和求解往往只把汽车外部尺寸(如长、宽、高)作为约束条件^[2], 过于关注气动性能而忽略了车身内部空间尺寸对车身的影响, 导致设计出来的车身无法保证乘坐安全舒适、操作方便、视野良好等其他性能, 在实际工程应用时需要在后期开发过程中多次交替修改和优化。未来汽车允许车身造型更自由, 低阻车身实用化的可能性提高。如何在设计过程中确保车身符合人机校核是低阻车身实用化的重要问题。

本文提出了一种在车身气动优化的同时保证基本内部空间要求的优化方法, 把车身内部空间尺寸作为约束条件之一, 结合适用于气动非线性全局优化问题的遗传算法^[3-4], 求解低阻车身基本型。这种方法能够使车身气动优化效果在满足必须内部空间的约束下达到最佳。

1 优化方法

1.1 评估算子

把整车长 L 、宽、高、离地间隙作为外部尺寸约束, 用曲线段或直线段构建车身侧视图、俯视图和横截面, 参考前人“半车身”的构造方法^[5]和翼型中弯度线^[6]的概念, 构建三维无轮车身。用多参数组合控

收稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203); 上海市科学技术委员会重点实验室计划(11DZ2260400)

第一作者: 韦甘(1987—)女, 博士生, 主要研究方向为车身气动优化。E-mail: weigan87@163.com

通讯作者: 杨志刚(1961—)男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为流体力学。E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

制曲线关键点(图 1,2 中的空心点)的坐标位置. 调整图 1 中侧视图的控制点的个数和约束条件,得到凸头和凹头两种车型. 将侧视图参数作为优化对象进行整数编码. 俯视图和横截面参数则根据乘员舒适性等空间要求进行设计并固定,其外形如图 2 所示.

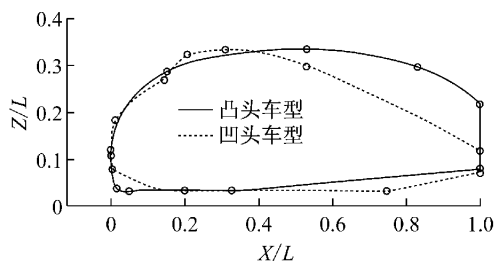


图 1 侧视图
Fig.1 Side views

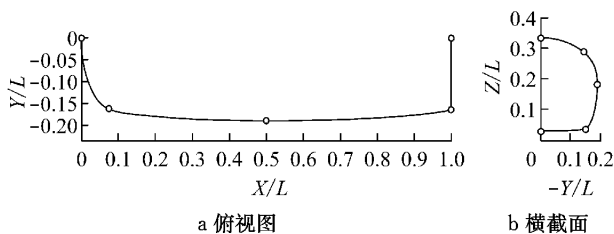


图 2 俯视图和横截面
Fig.2 Top view and cross section

调用 Gambit 软件的脚本功能批量生成网格,用 Fluent 商业软件并行求解得到车身气动阻力系数 C_D 作为性能评估值. 来流速度设置为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 湍流模型选用可实现 $k-\epsilon$ 模型. 用 1:12 和 1:15 的车身缩比模型在喷口面积为 0.123 m^2 的模型风洞中进行测力试验和表面测压试验,数值结果和试验结果误差在可接受范围内,证明了本文数值方法和优化方法的可靠性.

1.2 优化策略

使用分步遗传算法作为优化方法,除了评估算子,其他算子在 Matlab 软件中编程实现. 三维车身外流场网格数量为二维车身流场算例的 45 倍以上, CFD(computational fluid dynamics)计算量较大. 利用二维车身可以反映三维车身的气动变化规律的大致趋势这一特点,将优化过程分步进行以提高优化效率.

第一步:侧视图二维车身优化阶段. 本阶段主要起到全局搜索的作用. 其种群大小为 60,初始代使用试验设计做较大规模的全局计算,进化代数为 20 代,使用大交叉率、小变异率的优化策略.

第二步:三维车身优化阶段. 把二维优化结果结合俯视图和横截面参数构造的三维车身作为初始

代. 三维车身优化阶段主要起到局部微调的作用. 其种群大小为 10,进化代数为 15 代,使用大变异率和逐渐缩小变步长的优化策略.

无论是二维还是三维车身优化阶段,内部空间约束算子始终起作用,不满足内部空间约束的车身不进入 CFD 评估阶段,节约大量计算时间和资源.

把所有计算过的车身信息归入总库中,不同约束条件的优化算例可以调用总库中已有的车身信息,这样可以使后期优化算例的总时间减少至 5~10 d 之间. 凸头和凹头车型的优化参数个数分别为 12 和 18 个,基因水平数为 100,优化过程耗时约为 25~30 d.

2 内部空间约束算子

2.1 内部空间尺寸和空间约束条件

将车身内部空间分为前舱、乘员舱和后舱 3 个部分. 本文将乘员舱设计为正常双排四座,其空间尺寸主要根据汽车总布置^[7]和车辆人机工程学来确定,具体考虑了踏板布置、驾驶员 H 点布置、转向盘布置、仪表板布置、驾驶员视野设计、后排乘员乘坐空间布置、乘员头部空间和顶盖布置等^[8-9]. 除了内部空间尺寸,本文把部分板件或机件的厚度也作为约束空间的一部分. 例如乘员舱的空间包括了地板厚度、车顶厚度、座椅厚度等. 在保证相关规定和经验中必须空间的基础上,设计大、小两种乘员舱约束,其头部空间、仪表板布置空间和顶盖空间特点分别为“宽裕”和“狭窄”.

前舱、后舱是用来放置发动机、电机、电池、行李等机件和物品的区域,工程实际中主要根据设计需求来确定. 例如中级轿车的行李箱的有效容积约为 $0.4 \sim 0.7 \text{ m}^3$,高级轿车的约为 $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^3$ ^[9]. 将设计体积除以车宽得到前舱、后舱在侧视图的大致投影面积. 分别设计长、短两种前舱和高、低两种后舱作为空间约束条件.

不同车型的内部空间的结构和尺寸有明显差异. 把大、小乘员舱,长、短前舱和高、低后舱进行组合,得到如表 1 所示的 3 种车内空间约束条件. 其中约束 2 只有大乘员舱,约束 3 的乘员舱、前舱和后舱都分别比约束 1 的大.

2.2 内部空间约束算子的原理

内部空间约束算子的作用是在气动性能评估算子运行之前预先进行空间尺寸检验,淘汰掉不满足约束空间要求的车身外形. 以下以大、小乘员舱为约

表 1 空间约束条件

Tab.1 Constraints of inner space

内部空间	无约束	约束 1	约束 2	约束 3
乘员舱	无	小	大	大
前舱	无	短	无	长
后舱	无	低	无	高

束条件说明空间约束算子的工作原理。

(1) 根据车身内部尺寸硬点^[8-9]画出内部空间约束的上廓线。图 3 中的细实线和细虚线分别是小、大乘员舱的上廓线。

(2) 把内部空间约束上廓线和侧视图车身线进行对比。图 3 中的粗实线为某车身的侧视图车身线。内部空间的最低点不能低于车身的底板,只能从最低位置向上移动以及前后移动。先根据空间约束上廓线最高点的相对位置在车身侧视图上找到可能容纳最高点的位置范围,然后在这个范围内从左下方开始,由下至上,由左至右,逐一对比空间约束上廓线各个关键点和车身线的高度关系,直到找到第一个使所有关键点都低于当地车身线高度的位置。如果找不到这样的位置,则认为车身无法容纳该内部空间,即不满足内部空间约束。为了简化约束算子,脚部空间没有进行严格校验。因为图 2 所示的俯视图和横截面已经在考虑空间性能和气动性能的平衡关系的基础上尽量扩大了车身空间,所以不再进行这两个方向的人机校核和空间约束。

如图 3 所示,经过对比,小乘员舱的上廓线能被所示车身容纳,大乘员舱的上廓线不能被该车身容纳。没有通过内部空间约束算子检验的车身在进化过程中会被预先淘汰,不进入评估阶段。

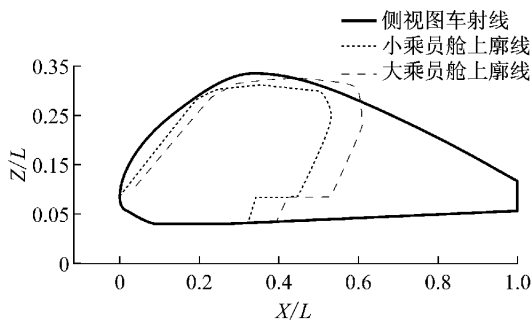


图 3 空间约束算子原理示意图

Fig.3 Diagram for the constraint operator of inner space

3 优化结果

表 2 中列出了两种车型的三维无轮车在不受空间约束和受空间约束的情况下,使用分步遗传算

法优化得到的低阻车身的 C_D 值。它们均满足相同的外部尺寸约束,整车长、宽、高和离地间隙为 A 级车范围内的某组固定值。不受空间约束的优化过程与 1.2 小节所述方法相同,只是空间约束算子不起作用,把 C_D 值作为唯一的进化评判标准。图 4 和图 5 分别为凸头车型和凹头车型的优化车身的侧视图。图 6 为部分优化车身的三维形体和表面压力系数云图。优化车身的 C_D 值范围约在 0.070~0.090 之间,与前人通过风洞试验得到的低阻车身相比^[2],属于低阻范围。

表 2 优化车身的气动性能

Tab.2 Aerodynamic performance of the optimized bodies

车型	C_D			
	无约束	约束 1	约束 2	约束 3
凸头	0.069	0.073	0.071	0.073
凹头	0.067	0.079	0.069	0.086

无论是凸头车型还是凹头车型,不受空间约束的优化结果明显比受空间约束的好。尺寸较小的约束 1 与尺寸较大的约束 3 相比,前者的凹头造型优化车身的 C_D 值比后者的低 0.007,这说明内部空间约束尺寸越小,优化结果越佳。只有乘员舱的约束 2 与类似与三厢车结构的约束 3 相比,前者的凹头造型优化车身的 C_D 值比后者的低 0.017,这说明内部空间约束结构越简单,优化结果越佳。

内部空间约束对凹头车型的气动优化的影响比对凸头车型的大。在不受内部空间约束的情况下,凹头车型的优化结果和凸头车型的优化结果的 C_D 值非常接近且略低;在受到约束 1 和约束 3 的情况下,凸头车型优化车身的 C_D 值只增长了 0.004,而凹头车型优化车身的 C_D 值则增长了 0.012 和 0.019,后者增长量约为前者的 3~5 倍。可见造型越是复杂的车身在气动优化过程受到空间约束的影响越大。

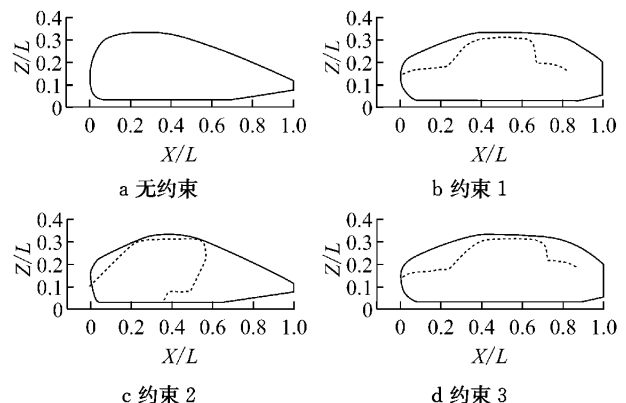


图 4 凸头车型三维车身优化结果

Fig.4 Optimized results of cheese head 3D car

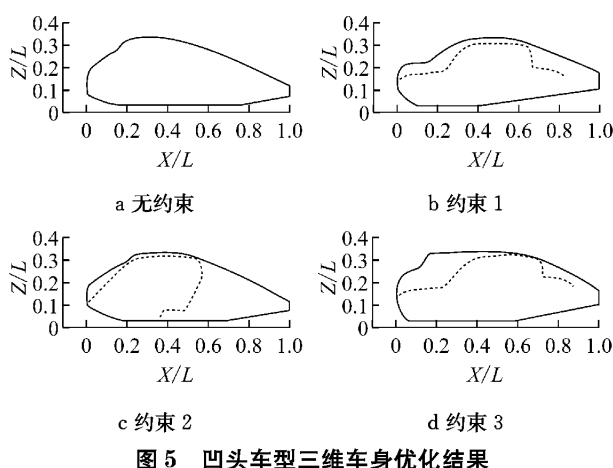


图 5 凹头车型三维车身优化结果

Fig. 5 Optimized results of socket head 3D car

约束 2 的凸头车型优化车身和凹头车型优化车身的 C_D 值都约为 0.070, 且侧视图外形也非常接近, 尾部都显得低而且长, 顶部位置都在 0.3~0.4 倍车长位置附近, 头部较饱满. 凹形车型优化车身的内凹点几乎移到了最高点, 使得头部内凹极不明显, 接近于外凸的造型. 这主要是因为尾部造型是影响车身气动性能的最重要因素, 约束 2 只有乘员舱, 长度比约束 1 和约束 3 都短得多, 在约束空间尽量前靠的情况下, 是可以实现低长的尾部的, 为此在该约束下得到的优化车身的特点都是约束空间非常靠前, 车身最高点几乎在同一位置. 而凹头车型的车头为了容纳乘员舱较宽的顶部, 内凹点非常高.

因为凸头车型三维无轮车身共用一个总库, 所以出现了约束 1 和约束 3 的优化结果相同的情况; 而凹头车型没有出现这种现象, 尺寸较小的约束 1 的优化结果明显比尺寸较大的约束 3 的优化结果的 C_D 值小. 这是因为凸头车型比凹头车型的外形简单, 不能根据空间约束外形特点的变化做过多的调整, 而凹头车型因为头部增加了内凹点和相应过渡点, 头部造型更加丰富, 可以根据空间约束的造型特点做更多的变化. 由图 5b 可见, 优化车身的内凹点位置和内凹形状与空间约束中的前舱和乘员舱之间的内凹折线存在明显的关联关系.

约束 3 由长前舱、大乘员舱和高后舱组成, 空间结构最复杂、尺寸最大. 约束 3 的凸头车型优化车身的 C_D 为 0.073, 与不受约束的优化车身相比, C_D 值只增大了 0.004, 但在外形上有较大差异. 如图 4 和图 6 所示, 后者为低长尾造型, 最高点偏前, 前者尾部高且短, 压力恢复程度低, 最高点接近中点, 顶部较平坦.

约束 3 的凹头车型优化车身的 C_D 值为 0.086,

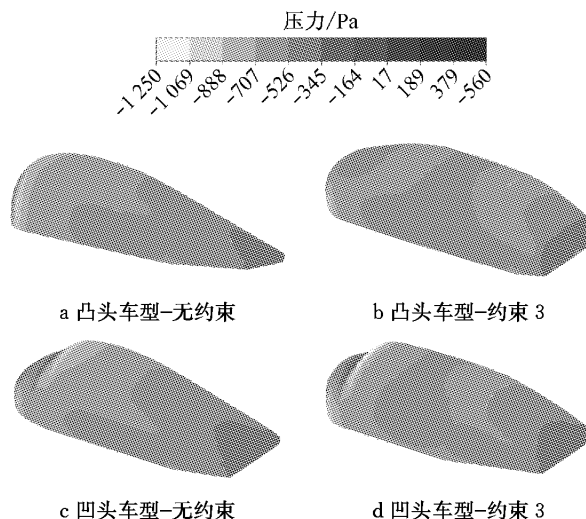


图 6 优化车身的表面压力云图

Fig. 6 Contour of static pressure on the surfaces of the optimized bodies

与不受约束的优化车身先比, C_D 值增大了约 0.019, 在外形上也有较大差异. 如图 5 和图 6 所示, 后者为低长尾造型, 后翘较短, 车头下部凸出部分较尖锐; 前者车顶较平, 背部较高, 后翘较长, 车头下部凸出部分较浑圆; 两者的相同点是最高点都偏前且位置接近, 尾部厚度相似.

4 结论

以汽车总布置和车辆人机工程学为基础, 设计车身的内部空间约束算子; 根据二维和三维车身算例的计算特点设计分步遗传算法. 把两者相结合, 对车身进行带内部空间约束的气动优化, 得到满足不同结构和尺寸的空间约束的三维无轮优化车身.

优化车身的 C_D 值在 0.070~0.090 之间的低阻范围内. 其中满足由长前舱、大乘员舱和高后舱构成的内部空间约束条件的凸头车型优化车身的 C_D 值为 0.073, 凹头车型优化车身的 C_D 值为 0.086.

受内部空间约束的优化, 车身的气动性能明显下降. 尺寸越小, 结构越简单的内部空间约束算子得到的优化车身的气动性能越好. 车身造型越是复杂, 优化结果受内部空间约束的影响越大.

参考文献:

- [1] 李卓森. 现代汽车造型[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LI Zhuosen. Modern automobile modeling[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.