

基于虚拟模型的车辆座椅优化研究

撰文 / 运城职业技术学院 李小龙 周燕

本文以车辆座椅的靠背曲面作为研究对象, 目的在于寻求一种更加适合人体背部曲面的座椅方案以提高现有车辆座椅舒适度。综合运用人机工程学、三次均匀 B 样条曲线能量法和机械工程的多学科优化理论, 设计出符合人机工程学且曲面光滑的车辆座椅。利用 MATLAB 软件对曲面曲率进行有限元分析和优化, 根据优化后的曲面建立车辆座椅的虚拟模型。

一、引言

近年来, 随着汽车的广泛使用, 汽车不仅要满足实用要求, 同时要求汽车座椅更适合人机功能的实现。因此, 汽车座椅产品设计要求运用多学科系统工程的方法求解最优人机界面的方案, 使得汽车座椅工作界面达到最佳状态。

本文综合运用人机工程学理论和三次均匀 B 样条曲线能量优化法, 给出一种新的曲线曲面优化方法, 在车辆座椅曲面设计中验证了此法的有效性。

二、曲面优化

根据对人体脊柱(图 1)和座椅与人体的尺寸关系的研究(表), 进行数据整合、分析和优化, 利用 MATLAB 软件对曲线进行曲线优化数据拟合, 得到更符合人体曲线的靠背设计曲线数据, 从而为提高了座椅的舒适度。

车辆座椅的研究首要是对人体进行结构分析, 如图 2 所示, 采用三坐标测量仪, 对人体脊柱进行数据采集, 模拟出人体脊柱曲线的拟合图形, 利用 MATLAB 软件结合能量法对原始曲线进行曲面优化, 得到人体脊柱优化曲线, 如图 3 所示。

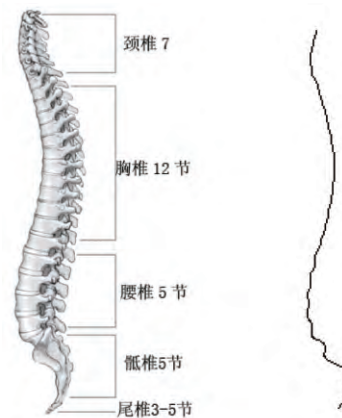


图 1 人体脊柱曲线图

表 座椅与人体尺寸关系表

参数项目	设计依据
靠背与座椅之间的夹角 105°	驾驶室人体躯干与大腿夹角 $90 \sim 102^{\circ}$
座椅与水平夹角 10°	防止身体滑动的不稳定因素
座垫深度 450mm	人体坐姿座深(臀部至膝盖内侧)
座垫高度 385mm	人体坐姿小腿加足高, 同时考虑膝关节舒适角度带来的尺寸变化
靠背高度 630mm	坐姿肩高, 同时考虑坐姿眼高

(续表)

座垫宽度 480mm	坐姿臀宽以及座垫侧面支撑不能压迫人体股骨
靠背宽度 480mm	与座垫宽度相同
头枕高度 650mm	人体坐姿颈椎点高
腰靠高度 245mm	人体坐姿腰椎高度

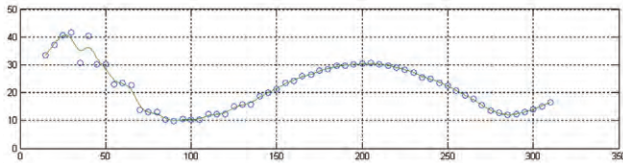


图2 人体脊柱拟合前图

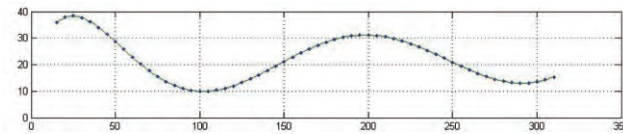


图3 拟合后的人体脊柱曲线

三、能量法曲面优化

对三次 B 样条曲线, 曲线不光顺性的原因在于三阶导数的不连续性, 因此可将数据修改至 “更好” 的位置, 使其三阶导数差为 0, 达到光顺曲线。

设 $P(t)$ 是插值于型值点列 $P_i (i=0, 1, \dots, n)$ 的三次均匀参数样条曲线, 与 P_i 对应的参数为 i 。并设 P_i 是坏点, 则光顺修改方法如下:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{2}(P_{i-1} + P_{i+1}) + \frac{1}{4}(P'_{i-1} - P'_{i+1})$$

从公式中可以看出, 提高曲线在坏点处的三阶连续性, 可以达到光顺曲线的目的; 同时, 如果我们采用 $\int (P''(t))^2 dt$ 作为 $P(t)$ 的能量, 此光顺方法降低了曲线的能量, 基于这个理论, 本论文采用了三次 B 样条曲线局部能量最优法。

在对以上方法的分析中, 首先在 P_{i-1} 与 P_{i+1} 之间寻找一条局部能量最小的三次插值曲线, 使它与原曲线在 P_{i-1} 点与 P_{i+1} 点处达到一阶连续; 再将参数 j 对应的位置作为 P_i 的新位置。然而, 由于 P_i 是坏点, 插值后它必然影响邻近点 P_{i-1} 与 P_{i+1} 点处的切矢 P'_{i-1} 与 P'_{i+1} , 同时离 P_i 越远的点的切矢受到的影响肯定越小。基于这种思想, 对上述曲线光顺问题提出如下修改方法。

步骤 1 取 $2k$ 个邻近点位矢 $P_{i-k}, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_{i+k}$ ($1 \leq k \leq \min(i, n-i)$) 并计算出切矢信息 P'_{i-k} 和 P'_{i+k} 。

以这些条件连同未知点 可以写出插值曲线的表达式 $P(t)$ 。即可求出 $\bar{P}_i$ 。

$$\min \int_{i-k}^{i+k} [P''(t)]^2 dt$$

步骤 2 令 $P_i = \bar{P}_i$, 在对修改后的型值点列重新插值, 可以得到修改后的三次 B 样条曲线。

设 $V_{i-k-1}, V_{i-k}, \dots, V_i, \dots, V_{i+1}, V_{i+k+1}$ 为插值于 $P_{i-k}, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, \bar{P}_i, P_{i+k}$ 并满足端点切矢条件 P'_{i-k} 和 P'_{i+k} 的三次均匀 B 样条曲线 的控制点列。则有:

$$\frac{1}{6} \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ 1 & 4 & 1 \\ & 1 & 4 & 1 \\ & & 1 & 4 & 1 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & & & -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{i-k-1} \\ V_{i-k} \\ \vdots \\ V_{i-1} \\ V_i \\ V_{i+1} \\ \vdots \\ V_{i+k} \\ V_{i+k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{i-k} \\ P'_{i-k} \\ \vdots \\ P'_{i-1} \\ \bar{P}_i \\ P'_{i+1} \\ \vdots \\ P'_{i+k} \\ P'_{i+k} \end{bmatrix}$$

简记为:

$$AV = P + C_0 \bar{P}_i$$

其中, $C_0 = (0, 0, \dots, 1, \dots, 0, 0)^T$;

$$P = (P'_{i-k}, P'_{i-k}, \dots, P'_{i-1}, 0, P'_{i+1}, \dots, P'_{i+k}, P'_{i+k})^T$$

而能量可以表达为:

$$\begin{aligned} E &= \int_{i-k}^{i+k} [P''(t)]^2 dt \\ &= \sum_{l=i-k+1}^{i+k} \int_{l-1}^l (P''(t))^2 dt \\ &= \sum_{l=i-k+1}^{i+k} [V_{l-2} \ V_{l-1} \ V_l \ V_{l+1}] \int_{l-1}^l [B''(t)]^T dt [V_{l-2} \ V_{l-1} \ V_l \ V_{l+1}]^T \\ &= \sum_{l=i-k+1}^{i+k} [V_{l-2} \ V_{l-1} \ V_l \ V_{l+1}] c [V_{l-2} \ V_{l-1} \ V_l \ V_{l+1}]^T \\ &= V^T C V \end{aligned}$$

此处 C, K 均为对称阵。

$$\min: E = V^T C V$$

$$= [P + C_0 \bar{P}_i]^T [(A^{-1})^T K A^{-1}] [P + C_0 \bar{P}_i]$$

设 $[(A^{-1})^T K A^{-1}] = G$, 并令 $\frac{dE}{d\bar{P}_i} = 0$, 可得出方程:

$$(C_0^T G P) + 2(C_0^T G C_0) \bar{P}_i + P G C_0 = 0$$

$$\text{从而 } \bar{P}_i = -\frac{C_0^T G P}{C_0^T G C_0}。$$

由此可以得出当 $K = 1$ 时有:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{2}(P_{i-1} + P_{i+1}) + \frac{1}{4}(P'_{i-1} - P'_{i+1})$$

即为 Kjellander 方法；当 $k = 2, 3$ 时分别有：

$$\bar{P}_i = \frac{4}{5}(P_{i-1} + P_{i+1}) - \frac{3}{10}(P_{i-2} + P_{i+2}) - \frac{1}{10}(P'_{i-2} + P'_{i+2})$$

$$\bar{P}_i = \frac{3}{4}(P_{i-1} + P_{i+1}) - \frac{1}{3}(P_{i-2} + P_{i+2}) + \frac{1}{12}(P_{i-3} + P_{i+3}) + \frac{1}{36}(P'_{i-3} - P'_{i+3})$$

在调整控制点的过程中，目标函数的值逐渐下降，使得调整后的曲线 $P(t)$ 比原曲线 $P_0(t)$ 光滑，利用这种方法多次调整控制顶点，最终对曲线优化，如图 4 所示。

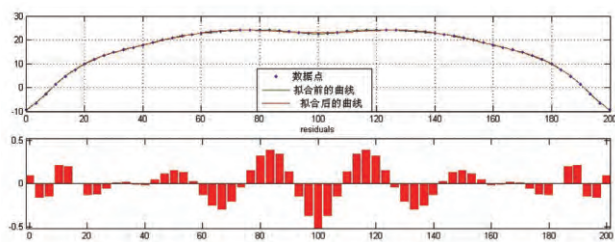


图 4 拟合后的横向某曲线图

从数据上看，横向曲线的数据变化趋势：当 $x=73.36$ 时曲线上升到最高点，然后开始下降；当 $x=100$ 时曲线的单调性发生变化，直到 $x=126.64$ 时曲线再次达到最高点，因此我们可以推断出 $x=73.36$ 、 $x=100$ 和 $x=126.64$ 为曲线的拐点，即在点 P_{23} 、 P_{31} 、 P_{39} 。

由此可以建立人机工程学和能量法得双学科优化得数学模型：

$$\min : E = V^T C V$$

$$= [P + C_0 \bar{P}_i]^T [(A^{-1})^T K A^{-1}] [P + C_0 \bar{P}_i]$$

约束条件：

$$\text{St: } \bar{P}_i = \frac{3}{4}(P_{i-1} + P_{i+1}) - \frac{1}{3}(P_{i-2} + P_{i+2}) + \frac{1}{12}(P_{i-3} + P_{i+3}) + \frac{1}{36}(P'_{i-3} - P'_{i+3})$$

$$|P_i - P_i^0| \leq 0.5 \quad (i \neq 1, 23, 31, 39, 61)$$

$$-9.35 \leq P_1^0 \leq -9.2;$$

$$24 \leq P_{23}^0 \leq 24.08;$$

$$22.4 \leq P_{31}^0 \leq 23;$$

$$24 \leq P_{39}^0 \leq 24.08;$$

$$-9.3 \leq P_{61}^0 \leq -9.2;$$

四、虚拟模型建立

根据人体纵向脊柱和横向多条曲线的研究结果，建立空间曲线族的分布图，把横向曲线和纵向曲线在空间上组成一体，这样就初步形成了空间曲面的框架，如图 5 所示。

通过对人体背部曲线的拟合分析，我们可以利用纵向脊柱曲线和横向曲线建立起人体的背部曲线的网格图，利用



图 5 空间曲线族示意图

CATIA 可以 Loft 出一个背部曲面，比较两个面可以看出拟合前后的光滑度，如图 6 所示。

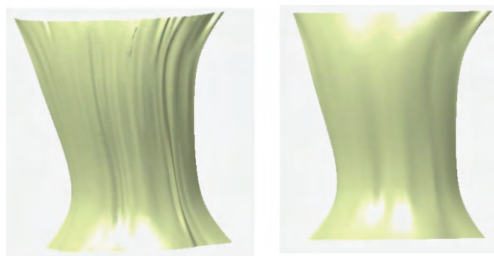


图 6 曲线族曲面优化前后示意图

五、结果分析

利用优化后的曲面建立虚拟三维农用汽车座椅模型，如图 7 所示，对汽车座椅曲面进行分析，验证了采用人机工程学理论和三次 B 样条曲线能量法的多学科优化理论在农用汽车座椅上的运用可以解决实际问题。

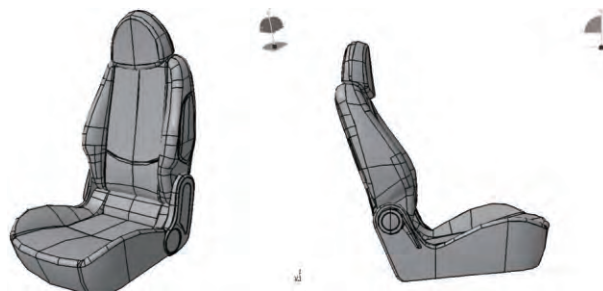


图 7 农用座椅虚拟模型

六、结语

本文根据多学科优化理论，对农用汽车座椅进行曲面优化分析，建立数学模型和虚拟模型，最终结合曲面制作出适合人机的汽车座椅模型，使座椅更适合人体背部的要求，具有一定的市场竞争力。