

Application of Approximate Model Method in Automobile Crash Safety Design

Liang XIA¹, Jianhua DAI², Jiang XIAO³, Weiguo LIU⁴

¹ School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

² Geely Automobile Institute, Zhejiang Key Laboratory of Automobile Safety Technology, Hangzhou, 311228

Email: xialiang_hfut@163.com

Abstract: Automobile crash safety design is an important part of whole design process. On the basis of summing up the overall process of the automobile crash safety design, commonly used approximate model method include Response surface method, Kriging model and Support vector regression are introduced in this paper. By using the approximate model, the calculation cost can be reduced and the design efficiency can be improved, which can provide reference for automobile crash safety design.

Keywords: Approximate model; Automobile crash safety

近似模型方法在汽车碰撞安全设计中的应用

夏梁¹,戴建华²,吕晓江³,刘卫国⁴

¹ 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥, 中国, 230009

² 浙江吉利汽车研究院有限公司浙江省汽车安全技术研究重点实验室, 杭州, 中国, 311228

Email: xialiang_hfut@163.com

摘要: 汽车碰撞安全设计是汽车设计流程中的重要环节。本文基于汽车碰撞安全设计的总体流程, 对汽车碰撞安全设计中常用的近似模型方法(响应面法、Kriging 模型、支持向量机回归)及其在汽车碰撞安全设计中的应用进行了介绍。通过近似模型的使用, 可有效降低计算成本, 提高设计效率, 对汽车碰撞安全设计具有一定的参考价值。

关键词: 近似模型; 汽车碰撞安全

1 引言

近年来, 随着汽车数量的急剧增加, 发生的交通事故也日益增多, 道路交通事故已经在全世界范围内成为威胁人类生命的严重公害。因此, 包括汽车用户、法律法规等对汽车的安全性提出了越来越严格的要求, 如何增强汽车的安全性研究在近几十年成为汽车工业的主要问题和攻关方向, 其中碰撞安全是汽车被动安全的重要研究内容^[1]。所谓碰撞安全, 即是指在

碰撞事故发生时, 能够尽可能地减小由于冲击载荷造成的乘员伤害, 提高乘员保护的性。这就要求车身结构必须具备吸能以及抗变形的能力, 即当碰撞发生时, 其碰撞能量必须能被车身结构的特定部位吸收, 并尽可能地减小碰撞所产生的加速度, 防止碰撞过程中乘员舱变形过快过大, 从而保证碰撞后车内的生存空间, 尽可能地挽救驾驶员及乘客的生命安全。

汽车碰撞安全的设计目标是要在各种非致命的碰撞事故中为乘员提供安全保护, 其耐撞性优化设计流程图如图 1 所示。近年来, 随着设计理论的创新以及计算机技术的不断发展, 采用计算机仿真方法研究汽车碰撞问题逐步受到设计人员的重视。然而, 单次仿真通常需要消耗大量的计算时间, 汽车碰撞安全设计通常是一个反复迭代的过程, 甚至在一次设计流程中需要调用成百上千次计算结果, 如果仅仅依靠仿真计算, 则将失去工程应用意义。为此, 将近似模型方法用于汽车碰撞安全设计已成为众多学者研究的课题, 并取得了一定的研究成

果。本文选取响应面法、Kriging 模型、支持向量机回归三种典型的近似模型，结合基本数学理论，对其在汽车碰撞安全设计中的应用进行了阐述和说明。

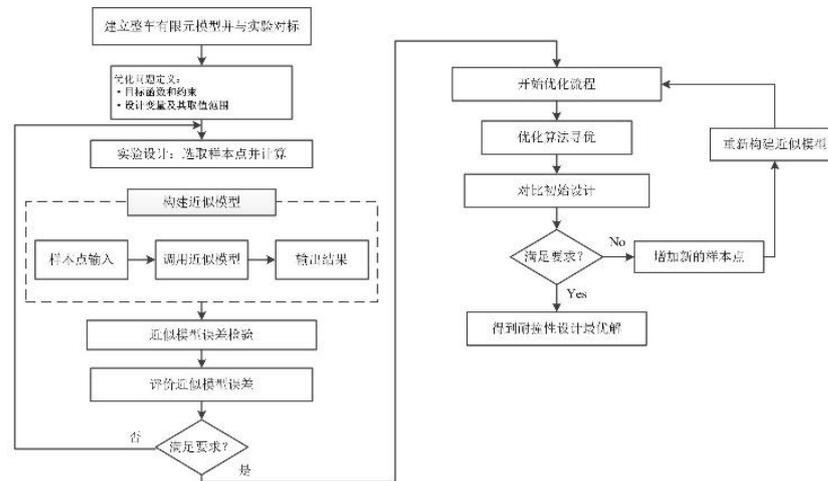


Fig.1 Flowchart of automobile crashworthiness optimization design
图 1 汽车耐撞性优化设计流程图

2 近似模型方法

近似模型方法是指以数理统计为理论基础，运用拟合或插值方法，利用已知的样本数据预测未知处的响应，以节约庞大的计算费用，代替真实模型进行设计的方法。常用的近似模型有响应面法、Kriging 模型及支持向量机回归等。

2.1 响应面法

响应面法（Response surface method, RSM）的基本思想是通过一系列确定性实验，用多项式函数来近似隐式极限状态函数。通过合理地选取试验点和迭代策略，来保证多项式函数能够在失效概率上收敛于真实的隐式极限状态函数的失效概率。响应面法的基本形式可写为^[2]：

$$y(x) = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

其中， $y(x)$ 为变量 x 的响应值； ε 为随机误差； $f(x)$ 为近似函数。根据 $f(x)$ 阶数的不同，响应面法又可分为一阶响应面法和多阶响应面法，在使用时应根据样本点的线性程度选择适当的拟合阶数构造响应面模型。

近年来，响应面法以其精度高、构造简单等诸多优点，受到了学者们的广泛关注。与此同时，部分学者基于传统的响应面法，提出了相应的改进措施，进一步扩展了其在汽车碰撞安全设计中的应用。如陈潇凯^[3]等提出了精确收敛于当前设计点的改进的响应面方法，并将该方法与最优拉丁方试验设计方法相结合，建立了汽车全宽正面碰撞过程中 B 柱加速度峰值的代理模型，基于该代理模型使用序列二次规划算法对多组结构参数进行优化。潘锋^[4]等提出了一种面向不等式约束函数的改进响应面法，使近似约束边界分布在可行域中，得到能够满足设计约束的优化解。将其应用到车身轻量化设计中的结果表明：所提出的改进响应面法的轻量化方案优于传统响应面法，整车耐撞性能得到提高的同时实现车身前部结构减重。崔杰^[5]等以某轿车的前纵梁为研究对象，采用拉丁超立方抽样方法和最小二乘方法创建碰撞响应的二阶多项式双响应面模型，并应用其进行稳健性优化设计。分析结果表明，该稳健性设计方法精度较高，经稳健性优化后，前纵梁碰撞性能的稳健性获得了显著提高，且整车质量有所下降。随着对响应面法研究的逐步深入，其在汽车碰撞安全设计中的作用也将更加突出。

2.2 Kriging 模型

Kriging 模型最早由南非地质学者 Daniel Krige 首先提出，此后广泛应用于地质和矿产分析。Kriging 模型是一种距离加权的插值近似方法，通常而言，Kriging 模型由一个参数化线性回归和一个非参数随机过程构成的，具体模型可以表示为^[6]：

$$y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x) + Z(x) \quad (2)$$

其中， $f_i(x)$ 为线性回归函数； $Z(x)$ 为随机分布的误差项。值得注意的是，试验点的选取对于构建 Kriging 近似模型非常重要，因此选择合理的试验设计方法有利于建立更高精度的 Kriging 模型。

近年来，Kriging 模型作为一种近似模型被引入汽车碰撞安全设计流程中，并逐渐受到人们的重视。王国春等^[7]以汽车前部结构主要板件的厚度为变量，采用拉丁超立方试验设计对汽车正面碰撞有限元仿真模型进行采样，对计算结果应用 Kriging 模型构建了前部结构的质量、B 柱加速度最大值和最大吸能的近似模型。利用模拟退火算法进行全局优化，最终得到一组前部板件厚度的最优组合，使 B 柱加速度值达到最小。崔杰等^[8]针对材料和制造工艺等不确定因素，采用基于 Kriging 代理模型的稳健性分析方法，研究材料不确定性对某款轿车前纵梁碰撞安全性能的影响。结果表明，材料特性的不确定性对前纵梁峰值碰撞力影响较大，基于 Kriging 模型的稳健性分析的精度和效率比采用有限元模型时要高。高云凯等^[9]基于 Kriging 模型建立汽车耐撞性评价指标的替代模型，并利用替代模型建立耐撞性优化的数学模型并进行耐撞性优化。结果显示，基于 Kriging 的替代模型的拟合精度较高，采用该模型进行的优化可提高汽车的耐撞性。以上研究表明：Kriging 模型已经在汽车碰撞安全设计中有了一定的应用，但对其进一步的改进以提高其插值精度、适应碰撞安全设计的需要仍是未来研究的重点。

2.3 支持向量机回归

支持向量机回归 (Support Vector Regression, SVR) 是支持向量机在回归领域的应用，其基本思想是寻找适当的预测函数，采用的最大边缘原则将初始数据分为两类。例如，给定一组独立同分布的样本：

$$D = \{(x_i, y_i) \mid x_i \in R^d, y_i \in R, i = 1, \dots, n\} \quad (3)$$

式中 x_i 和 y_i 是训练样本的变量值和响应值， R 是实空间， d 表明了实空间 R 的维数。为了实现训练样本分类的目的，需要使用一类特殊的函数，其基本形式如下：

$$F = \{f(x) \mid f(x) : R^d \rightarrow R\} \quad (4)$$

支持向量机回归模型的目的即是寻找形如 $f(x) \in F$ 这样一类函数，使得训练样本和实际值之间的误差小于给定的偏差值。在样本点数据线性可分的情况下，支持向量机回归的基本模型为^[10]：

$$f(x) = \langle \omega \cdot x \rangle + b \quad (5)$$

其中， ω 为预测函数的广义参数， x 为输入变量， b 为常数， $\langle \omega \cdot x \rangle$ 为 ω 和 x 的点积。

当样本点数据线性不可分时，则必须使用核函数的方法。核函数本质上是一种映射，选择不同的核函数，将会形成不同的算法，数据会映射到不同的空间，意味着采取不同的标准对数据进行评估。此时，支持向量机回归模型的形式为^[11]：

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (6)$$

式中 $K(x_i, x)$ 表示核函数， l 表示样本点的数目， $(\alpha_i - \alpha_i^*)$ 表示满足库恩-塔克条件的最小正则风险函数。在支持向量机回归模型中，典型的核函数类型包括线性核函数、多项式核函数、高斯核函数等，如表 1 所示。

由于支持向量机回归模型拥有较高的拟合精度和较小的标准差，近年来已有部分专家和学者开始对其进行研究和讨论，并逐步用于汽车碰撞安全设计。如 Pan 等^[10]基于汽车顶部挤压和侧向碰撞，使用支持向量机回归构建了近似模型，并进行耐撞性优化设计。其结果表明：数值优化结果与有限元仿真结果十分接近且 B 柱质量

有所减轻，同时证明了支持向量机回归对于高度非线性的碰撞问题具有良好的拟合效果。Zhu 等^[11]基于顶部挤压和正面碰撞两种工况进行汽车耐撞性设计，使用支持向量机回归构建碰撞响应近似模型。针对不同的响应，选择了不同类型的核函数和核参数来提高拟合精度。结果表明支持向量机回归可以用于结构耐撞性设计且相对其它近似模型具有更高的拟合精度。Wang 等^[12]提出了一种基于概率的最小二乘支持向量机回归的耐撞性优化设计方法，用于解决高度非线性问题，以及涉及几何、材料、接触并需要高成本评估的大型规划问题。在考虑结构风险最小化的条件下，以汽车正面碰撞为例说明了所提出的方法对解决优化设计问题的高效性。从以上研究结果中可以看出：支持向量机回归对于碰撞这类高度非线性问题具有良好的拟合效果，但由于其新颖性及复杂性，目前对这类近似模型的研究还有待继续深入和提高，其在汽车碰撞安全设计中的应用还有待进一步地深入发掘。

Table.1 Different type of kernel functions
表 1 不同类型的核函数

函数名称	数学表达式
线性核函数	$k(x, x') = x^T x'$
多项式核函数	$k(x, x') = (x^T x')^d$
高斯核函数	$k(x, x') = \exp(-\ x - x'\ ^2 / 2\sigma^2)$
S-核函数	$k(x, x') = \tanh(k)(x \cdot x') + \nu$
指数-RBF 核函数	$k(x, x') = \exp(-\ x - x'\ / 2\sigma^2)$

3 结论

本文介绍了近似模型方法的基本思想及其汽车碰撞安全设计中的应用。通过理论说明和具体示例阐述了不同近似模型方法的基本原理。汽车碰撞安全设计是一个复杂的系统和流程，只有综合运用近似模型方法及其他设计手段，才能加强所设计汽车产品的安全性，最大程度地保护乘员安全。

参考文献(References)

- [1] Zhong Z.H., Zhang W.G., Cao L.B., Car collision safety technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003,1-6.
钟志华, 张维刚, 曹立波. 汽车碰撞安全技术[M].北京: 机械工业出版社, 2003,1-6
- [2] Myers R H, Montgomery D C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2002
- [3] Chen M.k., Li B.G., Lin Y., Application of improved response surface method in vehicle frontal crashworthiness optimization [J]. JOURNAL OF BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2009, 29 (12): 1076-1079.
陈潇凯, 李邦国, 林逸. 改进响应面法在汽车正面抗撞性优化中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12):1076-1079.
- [4] Pan F., Zhu P., Application of Improved Response Surface Methodology for Constrained Optimization in Lightweight Design of Vehicle Body [J]. Technical Means of Mechanics, 2011, 47 (10): 82-87.
潘锋, 朱平. 面向约束优化的改进响应面法在车身轻量化设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10):82-87.
- [5] Cui J., Zhang W.G., Chang W.B., Stability optimization design for collision safety based on double response surface model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (24): 97-103.
崔杰, 张维刚, 常伟波,等. 基于双响应面模型的碰撞安全性稳健性优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24):97-103.
- [6] SimpsonTW, MaueryTM, KorteJJ, MistreeF. Kriging models for global approximation in simulation based multidisciplinary design optimization. AIAA J2001;39(12):2233-41.
- [7] Whang G. C., Cheng A. G., Hu C.H., Crashworthiness Optimization of Automobile Front Structures Based on Kriging Model [J]. 王国春, 成艾国, 胡朝辉,等. 基于 Kriging 模型的汽车前部结构的耐撞性优化[J]. 汽车工程, 2011, 33(3):208-212.
- [8] Cui J., Zhnag W.G., Xie L.J., Collision robustness analysis based on Kriging proxy model [J]. Automotive Engineering, 2013, 35 (1): 51-55.
崔杰, 张维刚, 谢伦杰,等. 基于 Kriging 代理模型的碰撞安全性稳健性分析[J]. 汽车工程, 2013, 35(1):51-55.
- [9] Gao Y.K., Sun F., Yu H.Y., Optimization Design of Crashworthiness Based on Kriging Model [J]. Automotive Engineering, 2010, 32 (1): 17-21.
高云凯, 孙芳, 余海燕. 基于 Kriging 模型的车身耐撞性优化设计[J]. 汽车工程, 2010, 32(1):17-21.
- [10] Pan F, Zhu P, Zhang Y. Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression[J]. Computers & Structures, 2010, 88(1-2):36-44.
- [11] Zhu P, Pan F, Chen W, et al. Use of support vector regression in structural optimization: Application to vehicle crashworthiness design[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2012, 86(3):21-31.
- [12] Wang H, Li E, Li G Y. Probability-based least square support vector regression metamodeling technique for crashworthiness optimization problems[J]. Computational Mechanics, 2011, 47(3):251-263.