

鼓形双曲率侧窗的优化设计方法

高大威, 张楠, 郑松林, 冯金芝, 赵礼辉

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 根据鼓形面拟合双曲率侧窗玻璃的设计原理, 提出了基于双曲率玻璃参数化模型的优化方法. 采用知识工程理论以及知识驱动的优化过程, 结合模拟退火算法优化, 得出最佳的鼓轴位置以及最优的鼓形面, 使最优鼓形面的拟合误差控制在 0.4 mm 以内, 提高了拟合精度. 应用鼓形线原理生成升降器导轨曲线, 并模拟出双曲率玻璃在升降导轨中的运动, 优化后的运动误差控制在 0.4 mm 以内, 提高了玻璃的运动质量. 优化分析结果表明, 该优化方法可满足双曲率玻璃的设计精度要求.

关键词: 鼓形双曲率玻璃; 鼓轴位置; 模拟退火算法; 导轨曲线; 优化方法

中图分类号: U 463.83⁺4 **文献标志码:** A

Optimization Method for the Design of Drum-Shaped Dual-Curvature Glass

GAO Dawei, ZHANG Nan, ZHENG Songlin, FENG Jinzhi, ZHAO Lihui

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to fit the shape of a dual-curvature glass to a drum surface, an optimization method for the dual-curvature glass parameter model was brought up. Based on the theory of knowledge engineering and the knowledge driving optimization the simulated annealing arithmetic was used to search out the best drum axis position and the optimal drum surface. The fitting precision is thus increased and the error of the optimal drum surface was below 0.4 mm. The theory of drum line was applied to produce the guide curve and the movement of the dual-curvature glass in the regulator was imitated. The error of the movement after optimization is below 0.4 mm and the quality of glass movement is improved. The analysis results show that the optimizing method can meet the needs of the design precision of dual-curvature glasses.

Keywords: drum-shaped dual-curvature glass; drum axis position; simulate annealing arithmetic; guide curve; optimization method

收稿日期: 2016-04-07
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305269, 51375313)
第一作者: 高大威(1979-), 女, 副教授. 研究方向: 车身现代化设计方法与结构强度. E-mail: gddwww1999@163.com

1 双曲率玻璃概述

在车身设计中,车门及其附件的设计是车身设计中一个非常重要的环节,其设计的好坏直接影响到汽车的进出方便性、侧面视野性及行驶安全性等.而在车门及其附件设计中,车门玻璃及其引导系统是占有空间最大的部件,也是一个最重要的子系统.长期以来,汽车造型设计与车身设计中遇到的一个难点就是车门玻璃的型面设计,现代汽车车身外型设计越来越强调流线型,为了满足不断提高的要求,越来越多的乘用车车门采用双曲率玻璃^[1].相比于传统的车门柱面玻璃,双曲率玻璃拟合的难度增大,同时玻璃引导系统的精度要求增加,现实生产的双曲率玻璃系统也会因误差过大产生一系列的问题.车身侧窗的双曲率玻璃非常复杂,本文根据车身玻璃形状分析其特点,从侧视图看,其前后导轨应是平行曲线,俯视车身轮廓,玻璃外形由最大截面向前后是缓慢往内收的.因此,玻璃半径也应从最大截面处的半径往前后逐步减小,以适应车身造型规律^[2].因此,本文采用鼓形面来拟合车门的玻璃表面.垂直于鼓轴线的各截面半径是变化的,各截面玻璃曲线是一组同心圆弧,圆弧半径由中间向两端逐渐减小,如图1所示.

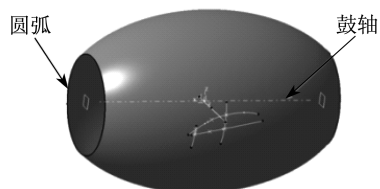


图1 双曲率玻璃的鼓形面示意图

Fig.1 Drum model of the dual-curvature glass

本文主要针对上汽某车型的前侧窗进行优化分析,基于知识工程(KBE)对整个系统进行优化^[3],其关键点在于建立基于知识的参数化模型,在车身设计阶段将双曲率玻璃的结构信息和知识信息直接存储于参数模型中,简化了车身玻璃的设计流程,并且提高了拟合精度.基于知识工程,可以将玻璃引导系统设计的专家的经验,以及设计过程有关的工程要求等知识表示在产品设计过程中,实现产品设计自动化和智能化,使工程师在设计过程中可以获得该领域专家经验知识的帮助,降低设计过程对工程师个人能力的依赖性,同时也缩短工程设计周期.国内目前关于鼓形双曲率玻璃的研究资料并不多见,大

部分研究的拟合精度不高,且没有形成一套系统的、公开的、明确的设计规范^[4-6]. Lin^[7-8]利用车门CAE(computer aided engineering)模型进行了钢丝绳式玻璃引导系统的虚拟试验设计研究,同时还研究了车门玻璃在升降运动中的鲁棒性问题. Chang等^[9]提出了一种使用计算机三维软件设计玻璃轮廓和升降导线的方法,并且研究了双曲面玻璃运动偏差问题.本文建立了基于鼓形线理论的参数化模型,并通过知识工程模块中参数的变化,优化出最佳的鼓轴位置以及最优的鼓形面,然后根据鼓形线原理拟合出导轨曲线并模拟出鼓形侧窗在升降导轨中的运动,优化后的鼓形面与车身造型面进行对比分析,结果显示,拟合误差小于0.4 mm,运动误差小于0.4 mm,满足实际的工程设计要求.

2 模拟退火算法设计

模拟退火算法(simulate snnealing arithmetic)可用来在相对宽泛的数据空间内搜索方案的最优解,它是一类通用的概率演算方法^[10-12],最早是由Vecchi等几位科学家将这一概念引入优化领域.模拟退火算法最初来源于金属退火的原理,将金属退火过程中分子的运动规律运用到数理统计中,将优化范围中的不同点类比成金属原子,每个金属原子在优化过程中都有自身的能量,优化范围内的每一个值也带有类似的能量,可以用来表示与目标值的切合度.该算法可以选择优化范围中的任意一个值为起点,随后不断寻找通向最优值的离自己最近的路径.

模拟退火法算法是一种串行结构优化算法,它可以赋予优化过程一种时变且最终趋向于零的概率突跳性,因此,可以很好地避免算法影响优化结果,陷入局部的求解极值.它来自于金属退火过程,其优化过程也与统计力学中粒子的变化规律息息相关.根据相关退火算法的资料^[12],粒子在状态为 r 、温度为 T 的情况下可满足的概率分布(波兹曼分布)为

$$P_r(E(r)) = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E(r)}{K_b T}\right) \quad (1)$$

式中: K_b 为波兹曼常数,固定值大于零; T 为绝对温度,量纲为1; $E(r)$ 为状态 r 的能量; $Z(T)$ 为粒子概率分布的标准因子.

经过大量的粒子形态的变化后,整个系统的能量逐渐降低,各个固体粒子均趋向于平衡状态,且都满足波兹曼概率分布.模拟退火算法正是采用上述

准则成为全局寻优算法,从而在理论上可以优化所建立的参数化模型.模拟退火算法流程图如图2所示.

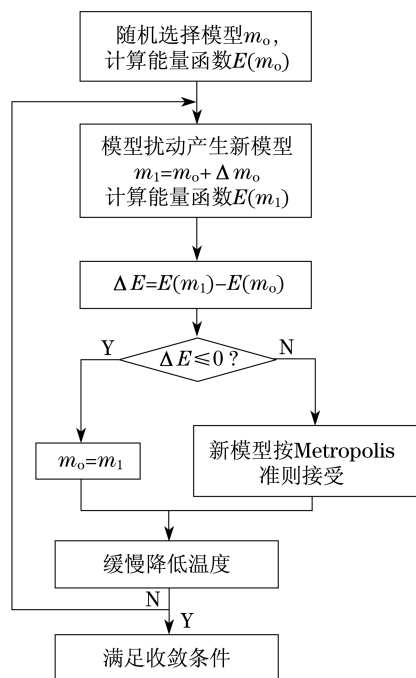


图2 模拟退火算法流程图

Fig.2 Flow diagram of the simulated annealing arithmetic

3 鼓形双曲率玻璃的拟合优化分析

3.1 基于鼓形线理论参数化模型设计

通过对双曲率玻璃升降系统的分析,根据上汽某车型前车门玻璃的造型面,确立了如图3所示的几何输入: A 点为腰线与前边界的交点, B 点为腰线后边界的交点, C,D 两点分别为前、后边界与上边界的交点, E 点在上边界的曲线上,且位于 C,D 两点竖直方向的中间位置, Q 点在腰线上,且位于 A,B 两点竖直方向的中间位置, F,G 两点分别为前、后边界的中点, S 点为玻璃的重心, R 点为 F,S 水平方向的等分点, T 点为 S,G 水平方向的等分点.

通过对模拟曲面和实体系统的参数分析,可选取 F,R,S,T,G,E 这6个点为双曲率玻璃拟合的关键点,优化结果要使得各点到造型面的距离误差最小.基于知识工程(KBE)的解决方案,建立一个完全参数化的数学模型,从而实现产品设计自动化与规范化,减少工程师个人随机性的影响,为鼓轴位置和曲面的优化提供理论模型基础,如图4所示.

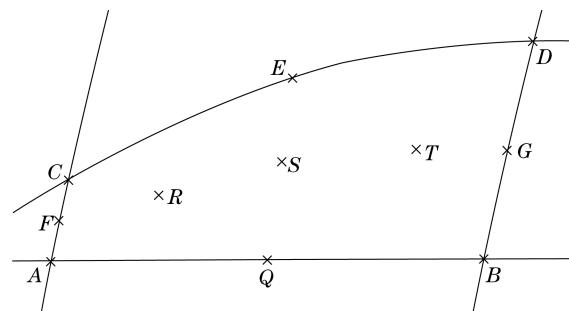


图3 输入模型

Fig.3 Input model

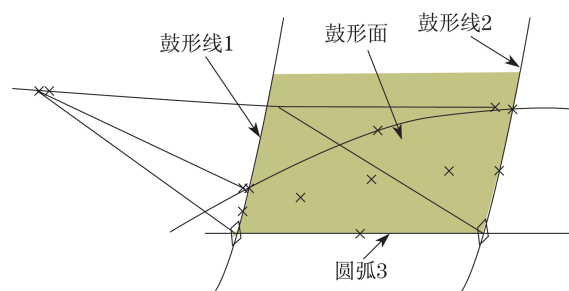


图4 鼓形面参数化模型

Fig.4 Parametric model for drum surfaces

3.2 参数模型优化过程

基于鼓形线双曲率玻璃设计流程,由参数化模型的建立过程可知,优化过程就是要找出最佳的 A_1, A_2 和 α ,使得 F, R, S, T, G, E 这6个点到车身玻璃点云模型的距离之和最小,因此,将6个点到玻璃面的距离之和设置为优化参数. A_1 为绕 y 轴旋转的角度, A_2 为绕 z 轴旋转的角度, α 为比率, A_1, A_2 和 α 为自由变量. A_1, A_2 的变化范围为 $-5^\circ \sim 5^\circ$, α 变化范围为 $0 \sim 1$,迭代的最大数值设置为200.同时将两边螺距的变化设置为约束条件,使用模拟退火算法进行优化.

3.3 优化结果

由上述过程可以得出最佳的鼓轴位置以及与车身造型面误差最小的鼓形面, $\alpha = 0.6175$, $A_1 = -0.137^\circ$, $A_2 = -0.137^\circ$ 时的鼓轴位置即为此鼓形面最佳的鼓轴位置,此参数下的鼓形面可认为是现有条件下最优的鼓形面.

采用模拟退火算法优化后的玻璃形面的关键点的误差变化对比如图5所示(见下页).

根据以上分析结果可以看出,采用模拟退火算法优化后各个关键点的误差均控制在 0.4 mm 之内,提高了拟合精度.对比结果表明,该算法完全满足鼓形双曲率玻璃升降系统的设计精度要求,对优化鼓轴位置以及设计鼓形双曲率玻璃具有指导作用.

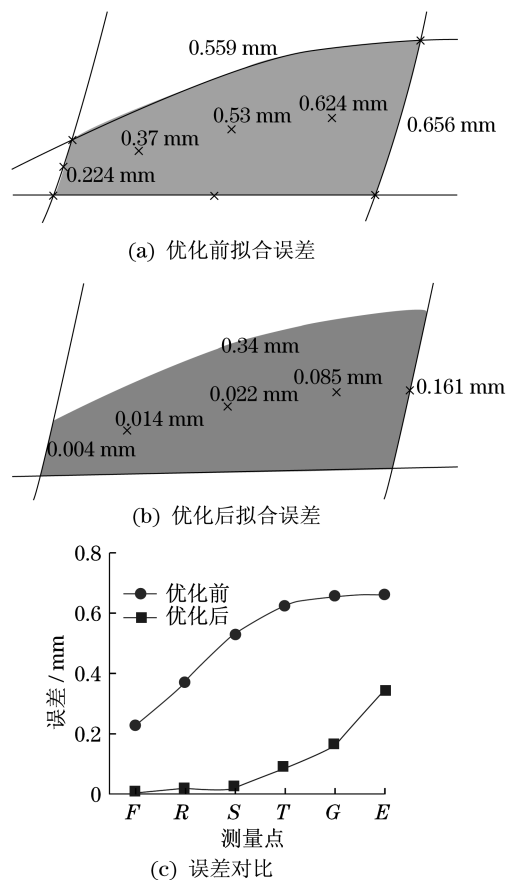


图5 优化前后玻璃形面的误差对比

Fig.5 Error comparison

4 鼓形双曲率玻璃的运动轨迹优化分析

优化出鼓形面玻璃最佳的拟合面之后,分析其运动误差的关键在于拟合出玻璃面的升降导轨曲线,而确定升降导轨曲线首先要确定玻璃升降器的类型.现代主流轿车车门大多数采用绳轮式玻璃升降器,在与双曲率玻璃配合中,这种升降器相对于叉臂式升降器具有匹配精度高、故障率小等优点,所以,本文以绳轮式玻璃升降器作为研究对象.绳轮式升降器又分为单滑道式升降器和双滑道式升降器,不同的升降方式对于玻璃两边导槽及升降器导轨的设计原理是基本相同的,只是对于导轨布置位置的选择有所区别.

4.1 导轨升降曲线的确定

选取单滑道绳轮式升降器作为研究对象,双滑道绳轮式升降器的设计原理相同.一般来说,单滑道式升降器导轨基准线布置在玻璃质心位置,在鼓形面双曲率玻璃的拟合中,升降曲线也是鼓形线.以优

化后的鼓轴位置和鼓形面为基础,过重心 S 点取垂直于鼓轴位置的一条鼓形面的轮廓线,该轮廓线即是一条标准的升降鼓形曲线.如图6所示,以该鼓形线为升降曲线,模拟侧窗玻璃在升降器中的升降运动.

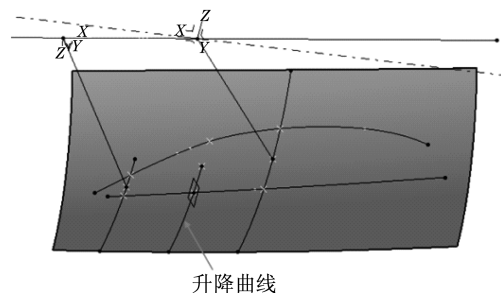


图6 拟合的导轨升降曲线

Fig.6 Lift curve of the fitted guide rail

4.2 运动误差分析

在 CATIA 软件中依次导入侧窗造型面与优化后的鼓形玻璃面,设置相应的运动副和约束条件,使鼓形玻璃面沿着上一步中生成的鼓形线运动,以此模拟双曲率玻璃在单导轨升降器中的运动.以中间的鼓形线为驱动长度,80 mm 为运动间隔,在实际的测试中,选取 F, R, S, T, G, E 这6个点为测量点,分别在玻璃运动的上止点与下止点之间的6个位置(如图7)进行距离误差干涉测量分析.各点在运动中的误差分布如表1所示, F, R, S, T, G, E 各点的误差变化柱形图如图8所示.

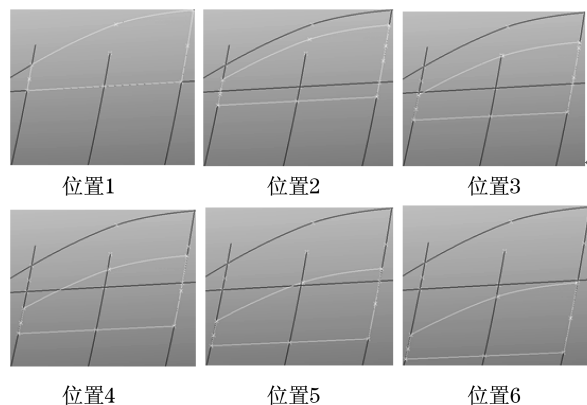


图7 运动位置分布图

Fig.7 Distribution of text positions

根据误差变化柱形图(图8)可以看出,采用模拟退火算法优化后,各个关键点的运动误差均控制在0.4 mm以内,有利于提高双曲率玻璃的运动质量,减少故障的发生,具有实际的工程价值.

表 1 各点误差分布
Tab.1 Distributions of movement errors

位置	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>G</i>	<i>E</i>
1	0.004	0.014	0.022	0.085	0.161	0.340
2	0.005	0.016	0.023	0.084	0.159	0.291
3	0.008	0.002	0.005	0.075	0.159	0.327
4	0.021	0.018	0.016	0.066	0.159	0.361
5	0.031	0.034	0.029	0.058	0.159	0.393
6	0.026	0.041	0.044	0.091	0.155	0.260

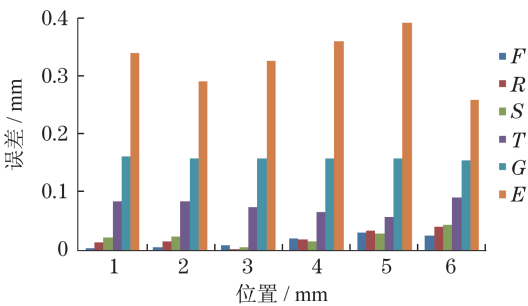


图 8 误差变化柱形图
Fig.8 Error variation column chart

5 结 论

- a. 基于鼓形面拟合双曲率玻璃的设计原理,建立了鼓形双曲率玻璃的参数化模型,选用模拟退火算法进行优化,使鼓形双曲率玻璃的拟合误差控制在0.4 mm以下,提高了拟合精度,对双曲率玻璃的设计具有指导作用.
- b. 采用鼓形线原理设计升降器导轨曲线,并模拟双曲率玻璃在导轨中的应用,优化后的运动误差控制在 0.4 mm 以下,低于文献[1]中的玻璃运动误差 0.6 mm,有利于提高双曲率玻璃的运动质量,减少故障的发生,完全满足工程设计要求.

参考文献:

- [1] 高大威,高云凯,周晓燕,等. 基于鼓形面的车门玻璃及导轨设计[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(1):92-96.
- [2] 黄金陵. 汽车车身设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 郑金桥,王义林,李志刚. 基于知识工程的大型复杂冲压件工艺方案设计[J]. 中国机械工程,2004,15(16):1422-1426.
- [4] 高云凯,赵懿,彭和东. 环面玻璃轿车车门设计方法研究[J]. 汽车工程,2005,27(4):483-485.
- [5] 孙从周,雷雨成. 基于圆环面的车门玻璃及导轨设计研究[J]. 机械设计与制造,2007(10):18-19.
- [6] 雷雨成,张平,陈寿昌,等. 双曲率车门玻璃的圆环面拟合法[J]. 汽车工程,2005,27(5):623-625.
- [7] LIN C L. Virtual experimental design optimization on cable-drive glass guidance system [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2002,9(4):317-328.
- [8] LIN C L. Robust design of glass run-channel seal. SAE Technical Paper, 2004-01-1687 [R]. Detroit: Society of Automotive Engineers, Inc. ,2004.
- [9] CHANG H Y, SONG J O. Glass drop design for automobile windows-design of glass contour, shape, drop motion, and motion guidance systems. SAE Technical Paper [R]. Detroit: Society of Automotive Engineers, Inc. , 951110,1995.
- [10] 杨玮,李程,傅卫平,等. 自动化立体仓库固定货架拣选路径问题研究[J]. 上海理工大学学报,2015,37(1):84-88.
- [11] 董德威,颜运辉,张尧,等. 矩形件优化排样的自适应遗传模拟退火算法[J]. 中国机械工程,2013,24(18):2499-2504.
- [12] 陈华根,吴建生,王家林,等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(6):802-805.

(编辑:石 瑛)