DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.008

基于刚柔耦合动力学的玻璃升降器多目标优化研究*

罗 坤[1,2],陈梓铭[1,2],吴云龙[1,2],曾 刚[3],李落星[1,2]
(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410000;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410000;3. 长安汽车 欧尚研究院,重庆 400023)

摘要:针对某 SUV 车型的前车窗玻璃在运动过程中发生卡滞的问题,建立了绳轮式玻璃升降器的刚柔耦合多体动力学模型,对玻璃偏转位移、钢丝绳拉力等性能指标进行了研究。通过升降器试验台架对模型精度进行了验证,然后对导轨位置、尼槽阻力和水切条阻力等影响因素进行了参数化建模;结合 Isight 中的拉丁超立方设计方法进行了试验设计,并建立了各指标的二阶响应面近似模型;基于该响应面模型,采用第二代非支配遗传算法对玻璃升降器的性能指标进行了优化。优化结果表明:玻璃卡滞现象消失,玻璃上测点偏转位移、下测点偏转位移、钢丝绳拉力分别降低了 47.6%、33.3%、9.6%;在满足玻璃上升时间的条件下,该优化显著提升了玻璃升降器的运动性能。

关键词:玻璃升降器;刚柔耦合;多体动力学模型;多目标优化;试验设计;遗传算法
中图分类号:TH122;U463.85 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-4551(2019)08-0814-05

Multi-objective optimization of glass lifter based on rigid-flexible coupled dynamic simulation

LUO Kun[1,2], CHEN Zi-ming[1,2], WU Yun-long[1,2], ZENG Gang[3], LI Luo-xing[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410000, China; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China; 3. Changan Automobile Auchan Research Institute, Chongqing 400023, China)

Abstract: Aiming at the problem of stuck in the front window glass of a SUV , the rigid-flexible coupled multi-body dynamics model of the sheave type glass lifter was established, the performance indexes such as glass deflection displacement and wire rope tension were researched. Model accuracy was verified through the lift test bench, the parameters such as rail position, guide seal friction force and slot seal friction force were parameterized, combined with the Latin hypercube design method of Isight for experimental design, a second-order response surface approximation model for each index was established. Based on the response surface model, the second generation non-dominated genetic algorithm was used to optimize the performance of the glass lifter. The optimization results indicate that the glass stuck phenomenon disappears, the deflection displacement of the measuring point on the glass, the deflection displacement of the lower measuring point, and the pulling force of the steel wire rope are reduced by 47.6%, 33.3%, 9.6%, under the condition of satisfying the glass rise time, the glass lifting performance is significantly improved.

Key words: glass lifter; rigid-flexible coupled; multi-body dynamics model; multi-object optimization; design of experiment (DOE); genetic algorithms (GA)

收稿日期:2019-02-13
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0101700);国家自然科学基金资助项目(U1664252)
作者简介:罗坤(1994-),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事车门闭合件密封系统方面的研究。E-mail:luokun_hnu@163.com
通信联系人:李落星,男,教授,博士生导师。E-mail:llxly2000@163.com

0　引　言

玻璃升降器作为汽车车门的关键附件之一,因此,对玻璃升降器系统的动力学特性进行分析及优化设计非常有必要。

近年来,绳轮式玻璃升降器以其结构紧凑、操控方便、噪音小的优势占据重要市场。国内外学者对玻璃升降器系统开展了大量的研究工作。梅行益等[1]分析了不同工况下系统载荷的理论计算方法;朱文峰等[2]建立了基于非线性刚度拟合的车窗系统模型;李成东等[3]对叉臂式玻璃升降器模型的主动臂参数进行了多目标优化设计;NAM Y[4]通过优化玻璃尼槽、水切条的结构达到了降低玻璃振动噪声的目的;高云凯等[5]结合鼓形线原理与比例函数,得到了玻璃导轨设计曲线;刘小锐等[6]通过建立玻璃升降器的力学模型,得到了车门、导槽等部件对玻璃升降平顺性的影响情况。

上述研究方法主要针对玻璃升降器的理论模型与刚体模型,并未考虑玻璃运动过程中各部件的耦合作用和多因素的综合影响,因此,不能在前期设计阶段精准地评估玻璃偏转卡滞的问题。

针对上述问题,本文将提出基于动力学仿真的玻璃升降器多目标优化方法。

1　玻璃升降器动力学模型建立

1.1　玻璃升降器系统

目前常见的玻璃升降器主要有叉臂式与绳轮式玻璃升降器。

本文所研究的绳轮式玻璃升降器系统主要由电机、钢丝绳、导轨、玻璃等组成,如图 1 所示。

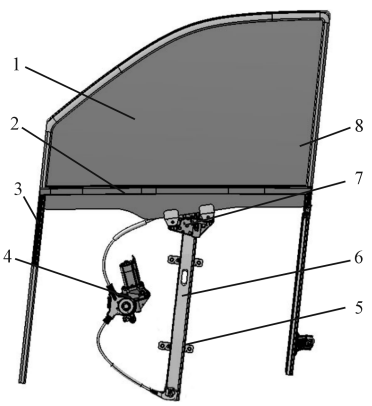


图 1　玻璃升降器系统

1—玻璃;2—水切条;3—前尼槽;4—驱动机构;5—安装支架;6—导轨;7—托架;8—后尼槽

1.2　导轨-托架刚柔耦合建模

基于某 SUV 车型左前门单导轨绳轮式玻璃升降器,本文建立了玻璃升降器多体动力学模型。其中,升降器的钢丝绳与托架固连,使其沿着导轨上升下降,并拖动玻璃完成升降动作。由于托架是塑性材料,与导轨过盈配合,其微小的变形可能会引起玻璃偏转量的增大,从而导致玻璃的运动卡滞等问题,建模中对托架变形情况的处理至关重要。

本文将玻璃托架作柔体处理,即在 Hypermesh 中对托架划分网格并建模,利用 Optistruct 模块计算生成模态中性文件,然后导入 ADAMS 中作为托架柔体[7-8]。由于导轨与托架之间直接接触,但托架为柔体而导轨是刚体,二者之间直接建立接触会导致计算结果不准确,需在两者间增加辅助刚体,以模拟托架的实际受力和变形情况,这样生成的刚柔耦合动力学模型保证了仿真分析的精度。

1.3　驱动机构建模

玻璃升降器的驱动部件由电机、蜗轮蜗杆及钢丝绳机构组成。本文所建立的仿真模型中,利用 ADAMS 软件的 Motor 模块建立电机模型,然后利用 Gear 模块建立蜗轮蜗杆系统。

电机、蜗轮蜗杆各参数值如表 1 所示。

表 1　电机、蜗轮蜗杆各参数值

类型	参数	数值
电机额定电压	E_s/V	12
电枢绕组线圈匝数	Z	19
磁极对数	P	4
单位磁极磁通量	Φ/Wb	2.8×10^{-2}
电枢电阻	R/Ω	0.46
蜗杆头数	Z_1	1
蜗杆直径系数	q	9.56
蜗轮齿数	Z_2	65
模数	m	0.8

针对 ADAMS 中钢丝绳的建模,传统的处理方式是将钢丝绳离散成若干小圆柱体,然后用轴套力连接,并与滑轮之间建立接触,这种建模方式过程复杂而且模型精度低[9]。

采用 ADAMS/Cable 模块提供的 Simplified 方法建立的钢丝绳模型,不仅可以精确获取钢丝绳拉力,而且能够提高仿真效率[10]。因此,本研究根据某 SUV 车型玻璃升降器系统的 CAD 数据,利用 Cable 模块建立包含卷丝筒、钢丝绳、滑轮的传动系统模型。

1.4　玻璃密封系统建模

车窗升降过程中,玻璃对尼槽内外唇边的压缩负荷均随运动情况而发生变化。笔者基于密封条的压缩负荷试验[11],获得其内外唇边的压缩载荷偏差(compression load deflection,CLD)试验曲线,通过换算得到

等价的内外唇边压缩负荷特性,然后在玻璃前后边沿取一系列等分点,在该等分点上沿垂直玻璃面方向对玻璃分别施加正压力,同时沿玻璃运动反方向对玻璃施加摩擦力。

由于玻璃前后边缘长度差距较大,导致在玻璃上升过程中,水切条对玻璃的作用力不断变化。本文结合水切条的 CLD 曲线,利用 ADAMS 中的样条曲线(Spline)函数与插值(Akispl)函数拟合得到水切条对玻璃的作用力,来对其进行建模。

最终建立的玻璃升降器刚柔耦合多体动力学模型如图 2 所示。

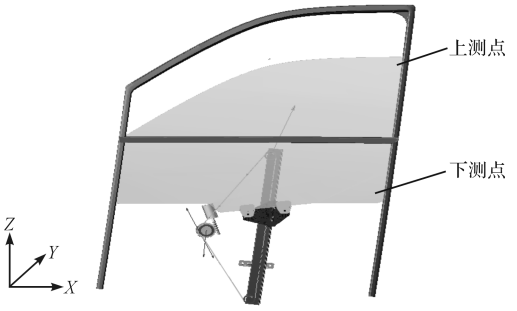


图 3　玻璃升降器刚柔耦合多体动力学模型

X—车长方向;*Y*—车宽方向;*Z*—垂直地面方向

2　玻璃升降器动力学特性分析及验证

2.1　玻璃升降器评价指标及动力学分析

在玻璃上升过程中,玻璃沿 *X* 负向偏转,其前边缘与前尼槽底部接触,导致玻璃上升缓慢或卡滞。本文选择玻璃上/下测点偏转位移及钢丝绳拉力作为动力学特性评价指标。其中,玻璃偏转位移反映了玻璃 *X* 负向偏转量的大小,影响玻璃的运动平顺性;钢丝绳拉力反映了玻璃上升时的总阻力,影响电机选型及钢丝绳的寿命。

基于已建立的玻璃升降器动力学模型,本文进行了玻璃上升过程仿真。

玻璃测点沿 *X* 向偏转位移的仿真分析曲线如图 3 所示。

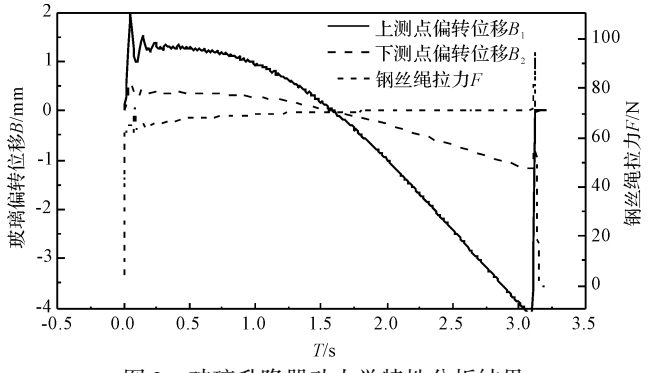


图 3　玻璃升降器动力学特性分析结果

图 3 中,在上升过程中,玻璃沿 *X* 负向偏转,其偏转位移最大值出现在玻璃即将停止运动时,上测点偏转位移 B_{1max} 为 4.2 mm,下测点偏转位移 B_{2max} 为 1.2 mm。

在玻璃上升过程中,钢丝绳拉力平均值为 69.2 N。

2.2　玻璃升降器动力学特性试验验证

为验证玻璃升降器动力学仿真模型的可靠性,本文将玻璃升降器系统固定在试验台架上,对相关平顺性指标进行试验。本文涉及的平顺性指标有:

玻璃偏转位移(车长方向,即 *X* 方向)、钢丝绳拉力、玻璃上升速度、电机工作电流。

具体试验方案如下:

(1)由于玻璃偏转量会随玻璃上升而增大,所以在玻璃上进行划线,当玻璃上升 3 s(即将停止运动)时,用刻度尺测量并记录相对应的玻璃偏转位移;

(2)利用台架内部力学传感器输出钢丝绳拉力;

(3)利用台架外部速度传感器输出玻璃上升速度。

玻璃测点偏转位移的测量结果如表 2 所示。

表 2　玻璃测点偏转位移仿真-试验结果

类型	仿真值	试验值
玻璃上测点沿 *X* 负向偏转位移 B_1/mm	4.2	4.4
玻璃下测点沿 *X* 负向偏转位移 B_2/mm	1.2	1.3

玻璃升降器仿真-试验对标结果如图 4 所示。

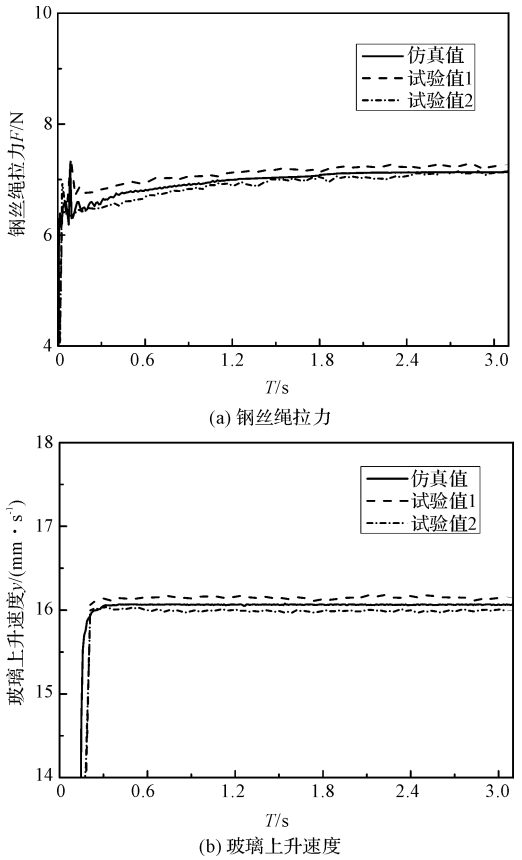


图 4　玻璃升降器仿真-试验对标结果

图 4 中:

偏转位移试验与仿真的差值在 0.2 mm 以内,试验平均值为 69.6 N,仿真平均值为 69.2 N,方差为 1.3 N^2;玻璃上升平均速度的试验结果为162 mm/s。

本文将仿真结果取平均值后,再进行对比,结果发现误差低于 5%。根据以上对标情况可知,玻璃升降器仿真分析结果精度较高,可用于指导后续性能优化工作。

3　玻璃升降器多目标优化设计

3.1　DOE 试验设计

笔者将 ADAMS-View 模块与多学科交叉优化软件 Isight 集成,基于玻璃升降器运动学仿真模型进行 DOE 试验设计。常用的试验设计方法包括:全因子设计、部分因子设计、正交数组设计、中心组合设计和拉丁超立方设计[12]。

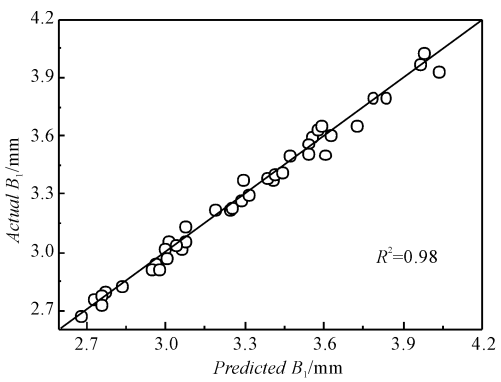
其中,最优拉丁超立方设计用同样的点数可以研究更多的组合,使所有的试验点尽量均匀分布在设计空间,具有良好的空间填充性和均衡性,且每个试验变量的水平只出现一次。

本文选择玻璃升降器结构参数—导轨沿 X 方向位置 D_1、导轨沿 Y 方向位置 D_2、导轨-托架 X 方向间隙 C_1,以及弹性元件性能参数—前尼槽摩擦力 F_1、后尼槽摩擦力 F_2、水切条摩擦力 F_3、导轨-托架摩擦力 F_4 作为设计变量,采用最优拉丁超立方设计方法对这 7 个设计变量进行试验设计,样本数为 400 个。

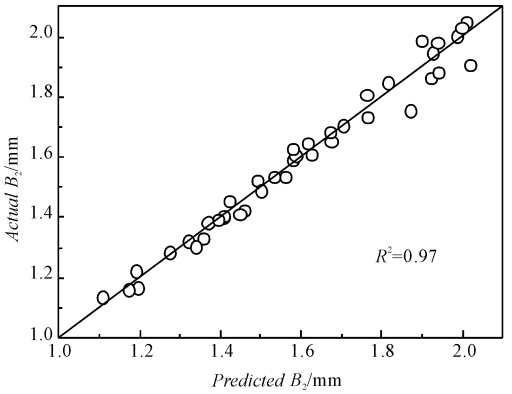
3.2　二阶响应面近似模型

由于响应面拟合算法可以拟合复杂的响应关系,并具有良好的鲁棒性,本文采用二阶响应面方法对玻璃上/下测点偏转位移及钢丝绳拉力进行拟合。

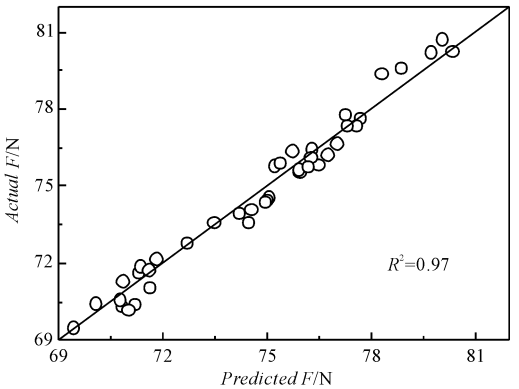
本文随机选取 40 个新样本点,运用 R^2 误差分析方法对拟合模型的精度进行分析,近似模型误差分析结果如图 5 所示。



(a) 玻璃上测点沿X向偏转位移



(b) 玻璃下测点沿X向偏转位移



(c) 钢丝绳拉力

图 5　近似模型误差分析

图 5 中:玻璃上测点偏转位移、玻璃下测点偏转位移、钢丝绳拉力的决定系数 R^2 分别为 0.98、0.97、0.97。

上述数据说明该响应面拟合模型的精度满足要求,可代替玻璃升降器系统的动力学模型,从而完成优化工作。

3.3　基于遗传算法的玻璃升降器多目标优化

以玻璃升降器系统的 7 个参数作为设计变量,以玻璃上/下测点偏转位移,及钢丝绳拉力的最小值作为优化目标,以玻璃上升时间 T 作为约束条件,本文建立的多目标优化数学模型的定义如下:

$$\text{Variable}:\ F_i, D_j, C$$

$$\text{Objective}:\ \min\ B_1, B_2,\ F$$

$$\text{s.t}:\ 0 \leqslant T \leqslant 3.2\ \text{s}$$

$$0 \leqslant B_j \leqslant 2.5\ \text{mm}$$

$$0 \leqslant F \leqslant 65\ \text{N}$$

$$i = 1,2,3,4 \quad j = 1,2$$

第二代非支配遗传算法(NSGA-II)的稳定性好,且能保证非劣最优解的均匀分布,因此本研究选择该算法对数学模型进行迭代寻优求解。其中,群体规模为 10,最大遗传代数为 20,而交叉率设置为 1。对基于响应面模型优化方法所得到的玻璃升降器系统设计

变量进行规整化处理,并代入玻璃升降器系统动力学分析模型中计算。

玻璃升降器各设计变量及响应的优化结果如表 3 所示。

表 3 设计变量及响应的优化结果

设计变量及响应	初始值	下限	上限	优化值
前尼槽摩擦力 F_1/N	11.2	6.0	10.0	6.5
后尼槽摩擦力 F_2/N	14.3	8.0	15.0	12.4
水切条摩擦力 F_3/N	9.2	8.0	12.0	9.3
导轨-托架摩擦力 F_4/N	5.7	3.0	7.0	5.5
导轨沿 X 方向位置 D_1/mm	0	-20	20	-5
导轨沿 Y 方向位置 D_2/mm	0	-1.0	1.0	0
导轨-托架 X 方向间隙 C_1/mm	0.1	0	1	0.1
玻璃上测点偏转位移 B_1/mm	4.2	1.0	2.5	2.2
玻璃下测点偏转位移 B_2/mm	1.2	0	2.5	0.8
钢丝绳拉力 F/N	69.2	60	70	62.5
玻璃上升速度 V/(mm · s^{-1})	161	155	165	162

表 3 的优化结果显示:

(1)玻璃上测点偏转位移由4.2 mm降为2.2 mm,下测点偏转位移由 1.2 mm 降为 0.8 mm,玻璃卡滞情况得到了明显改善;

(2)钢丝绳拉力由原来的 69.2 N 减小至 62.5 N,降低了电机的工作负荷。

由此可见,在满足车窗玻璃关闭时间技术标准的前提下,优化结果显著提升了玻璃升降器系统的运动性能。

4 结束语

(1)基于 ADAMS/View 软件,本文建立了玻璃升降器的刚柔耦合仿真模型,开展了玻璃升降器相关试验,并以玻璃偏转位移、钢丝绳拉力等作为评价指标,验证了玻璃升降器仿真模型的可靠性;

(2)结合响应面近似模型与遗传算法,本文对玻璃升降器的动力学特性进行多目标优化,优化后:玻璃上测点偏转位移降低 47.6%,下测点偏转位移降低 33.3%,钢丝绳拉力降低 9.6%,玻璃卡滞现象消失,提升了玻璃升降器运动学品质;

(3)本文在对玻璃升降器系统进行优化时,未考虑安装支架与车门内板的干涉情况,且优化方案缺乏试验验证,后续需在这两个方向开展深入研究工作。

参考文献(References):

[1] 梅行益,贺占魁,李 涛. 玻璃升降系统的载荷计算与效率优化[J]. 汽车工程师,2013(6):52-54.

[2] 朱文峰,林佩剑,周 辉,等. 基于非线性刚度拟合的车窗系统约束分析与建模[J]. 机械工程学报,2015,51(20):171-176

[3] 李成冬,孟春毅. 基于多目标遗传算法的汽车玻璃升降器结构优化设计[J]. 机械设计与制造,2016(3):253-256.

[4] NAM Y, YOON G. Minimizing the rattling of door glass [M]. Warrendale:SAE Technical Paper, 2017.

[5] GAO Y, QIU N, FANG J. A test method and simulation study of pmma glazing on motion deviation[M]. Warrendale: SAE Technical Paper, 2014.

[6] 刘小锐,吴文昌,黄启涌,等. 单导轨玻璃升降系统品质控制研究[J]. 汽车实用技术,2017(14):3-7.

[7] 徐华俊,汤 萍,黄 鹤. 汽车车门玻璃升降系统性能耐久试验机构设计[J]. 机械,2018,45(8):40-44.

[8] 高云凯,马干干,杜倩倩. 滑移门系统刚柔耦合多体动力学特性研究[J]. 汽车技术,2016(9):1-3,8.

[9] ANDREW S E . Efficient modeling of extensible cables and pulley systems in ADAMS[C]. The 1st MSC. ADAMS User Conference, London:ADAMS,2002.

[10] 朱文峰,黎 鹏,周 辉,等. 基于非线性约束的电动车窗动力学建模[J]. 制造业自动化,2016,38(1):71-74.

[11] 黄燕敏. 轿车玻璃导槽密封条结构改进方法[J]. 汽车技术,2013(6):39-42.

[12] 赖宇阳,姜 欣,方立桥,等. Isight 参数优化理论与实例讲解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

罗 坤,陈梓铭,吴云龙,等. 基于刚柔耦合动力学的玻璃升降器多目标优化研究[J]. 机电工程,2019,36(8):814 - 818.

LUO Kun, CHEN Zi-ming, WU Yun-long, et al. Multi-objective optimization of glass lifter based on rigid-flexible coupled dynamic simulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):814 - 818.