

## 巴哈赛车转向梯形联合优化设计\*

李永佳, 崔康东, 田顺, 杨炜

(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为保证赛车具有良好的操纵稳定性与过弯能力, 赛车的转向系统应满足合理的 Ackermann 转向关系。文中提出一种断开式转向梯形的联合优化设计方案, 并对关键参数进行优化以满足 Ackermann 转向关系。首先从转向梯形几何学的角度建立巴哈赛车转向梯形实际转角与理论转角的函数关系, 根据转向梯形模型确定目标函数与约束函数, 利用 MATLAB 遗传算法优化转向梯形的参数进行实际与理论的拟合, 并使用 ADAMS 虚拟样机模拟赛车前悬架跳动优化前轮束角的变化范围。结果表明, 转向梯形联合优化设计改善了赛车的操纵稳定性。

**关键词:** 汽车; 巴哈赛车; 转向梯形; 优化设计

**中图分类号:** U463.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)01-0001-05

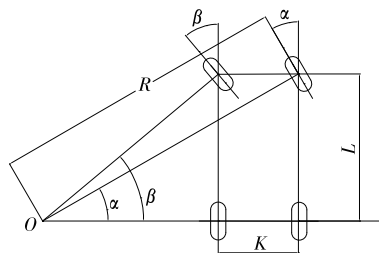
巴哈赛车比赛赛道的路况十分复杂且恶劣, 要求赛车的转向系统在满足规则与 Ackermann 转向关系的前提下能保证良好的操纵稳定性与较强的过弯能力, 这就需要巴哈赛车的转向梯形在必要的约束条件下尽可能满足理论 Ackermann 转向梯形。大部分转向梯形优化设计中为方便计算将转向梯形假设为平面梯形, 但由于汽车主销有内倾角与后倾角, 实际的转向梯形是一个空间梯形。该文结合长安大学巴哈猎辰车队 2021 赛季猎辰 V 号赛车转向系统转向梯形设计, 根据实际巴哈赛车的主销特性建立数学几何模型, 利用 MATLAB 编写遗传算法优化转向梯形参数来与理论 Ackermann 转向关系进行拟合, 再运用 ADAMS 虚拟样机进行前悬架模拟跳动优化转向梯形的实际点坐标, 保证前悬架跳动过程中轮胎定位参数处于合理变化范围, 从而实现转向梯形的联合优化。

## 1 转向梯形模型建立

### 1.1 理想 Ackermann 转向原理

在汽车转向行驶过程中, 为避免产生路面对汽车行驶的附加阻力并减小轮胎的过度磨损, 要求转向系统能保证汽车所有车轮作纯滚动。要满足该条件, 所有车轮的轴线都需相交于一点, 转向中心  $O$  位于后轴延长线上(见图 1)。由几何关系可得出转向轮角度的理想关系式:

$$\cot\alpha - \cot\beta = \frac{K}{L} \quad (1)$$



$\alpha$  为理论外轮转角;  $\beta$  为理论内轮转角;  $K$  为两侧主销轴线与地面相交点的距离;  $L$  为轴距

图 1 汽车理想 Ackermann 转向关系示意图

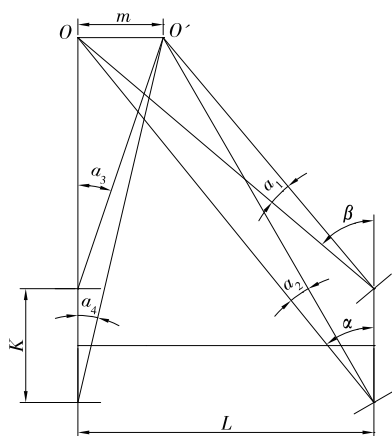
### 1.2 实际转向转角关系

理想的 Ackermann 转向关系实现的前提是把轮胎简化为刚体, 而现实中轮胎并非刚体, 且有着不可忽略的弹性形变。在行驶过程中, 汽车受到路面的侧向倾斜、侧向风或曲线行驶时的离心力等侧向力的作用, 因为轮胎的弹性形变, 地面对车轮产生侧偏力, 使轮胎产生侧偏现象。由于轮胎侧偏, 汽车在转向行驶时转向中心  $O$  点从后轴延长线上移动至  $O'$  点(见图 2)。

### 1.3 优化目标转向关系

对于低速转弯行驶的车辆, 采用理想 Ackermann 转角关系也就是 100% Ackermann 系数是合理的。但对于巴哈赛车, 为保证赛车在行驶时具有高速过弯能力, 通常转弯半径较小, 需修正实际的内

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52072047); 长安大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(300102220106); 陕西省大学生创新创业训练计划项目(202010710323)



$m$  为理论与实际转向中心的距离; $\alpha_1$  为前内轮侧偏角; $\alpha_2$  为前外轮侧偏角; $\alpha_3$  为后内轮侧偏角; $\alpha_4$  为后外轮侧偏角

图2 汽车实际转向几何关系示意图

外轮转角,进而确定转向梯形的Ackermann系数

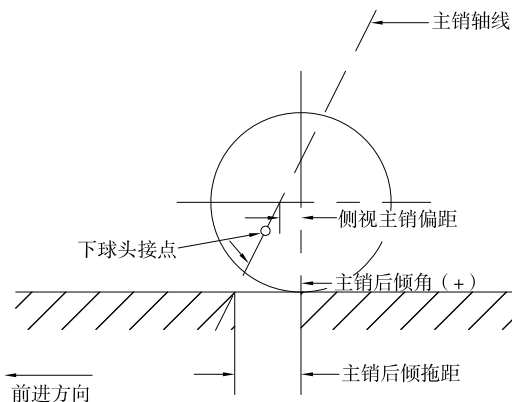


图3 主销示意图

式中: $f_{gg}$  为前轮距; $p_{inoff}$  为主销偏置距。

实际轴距  $L$  可表示为:

$$L = w_b - p_{inbdrag} \quad (4)$$

式中: $w_b$  为轴距; $p_{inbdrag}$  为主销后倾拖距。

两侧主销轴线与地面相交点的距离即转向梯形底边长度  $K$  为:

$$K = r_{fgg} - 2h \tan p_{inins} \quad (5)$$

式中: $h$  为转向节臂与主销连接点的高度; $p_{inins}$  为主销内倾角。

由转向几何关系可推出最大外轮转角  $O$ :

$$O = \arcsin\left(\frac{L}{R - p_{inoff}}\right) \quad (6)$$

式中: $R$  为转弯半径。

由 Ackermann 转向原理,最大内轮转角  $i$  为:

$$i = k \operatorname{arccot}\left[\cot O - \frac{K}{L}\right] + (1-k)O \quad (7)$$

平均最大转角  $a_{ve}$  为:

$k$ 。公式如下:

$$k = \frac{\beta_0 - \alpha_0}{\beta - \alpha} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\beta_0$  为转向过程中实际内轮转角; $\alpha_0$  为实际外轮转角。

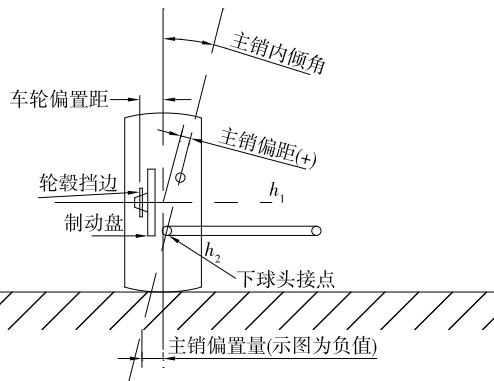
采用较低的 Ackermann 系数可减小转弯半径但会产生较大侧偏角,从而对轮胎产生更大的磨损。基于对巴哈比赛赛道路面、巴哈赛车所用轮胎、巴哈赛车实际行驶工况等因素的综合考虑,选用 35% 的 Ackermann 系数。

#### 1.4 基本参数的确定

基于赛车的总布置参数及图 3 所示赛车主销参数进行转向梯形优化的基本参数设置。

实际前轮距  $r_{fgg}$  可用下式表示:

$$r_{fgg} = f_{gg} - 2p_{inoff} \quad (3)$$



$$a_{ve} = \frac{i + O}{2} \quad (8)$$

#### 1.5 转向梯形布置参数的确定

根据车架离地间隙、车架管径和转向机半径等可得出转向机轴线预设高度。为防止转向系统与车架和车身发生干涉,齿条断开点长度应略大于车身宽度。

## 2 转向梯形拟合优化

### 2.1 遗传算法

遗传算法是模仿自然界的生物遗传进化机制和自然选择而发展起来的随机全局搜索和优化方法,它模拟的是自然界中生物通过进化与遗传不断朝着适应大自然生存环境方向的进化过程。如图 4 所示,该算法通过编码将要求解的问题转换为遗传空间的染色体或个体,产生初始种群后,利用适应度函数对种群的适应度进行评估,通过剔除适应度较差

的种群,经过交叉、变异运算获得新的种群,找到相似度最高的种群,确定最优解。

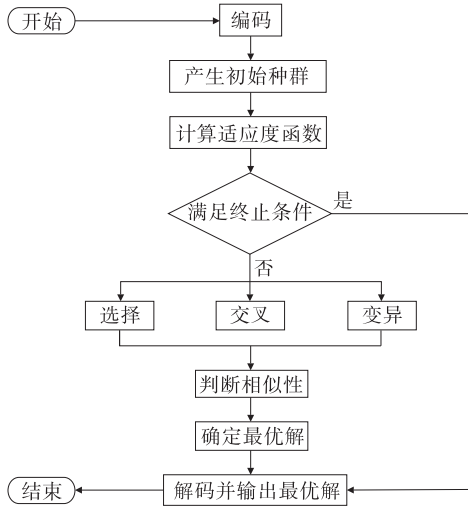


图4 遗传算法流程

## 2.2 转向梯形遗传算法优化流程设计

利用遗传算法进行转向梯形优化的流程(见图5)如下:

- (1) 通过对转向梯形的建模与计算确定转向梯形的优化目标与优化对象。
- (2) 结合赛车赛道行驶状况确定目标函数。
- (3) 分析实际转向几何在整车上的布置情况与梯形几何的传动关系确定约束条件。
- (4) 根据转向梯形几何学关系与经验公式确定优化对象的参数取值范围。
- (5) 使用遗传算法进行优化设计,找到拟合度最高的最优解。

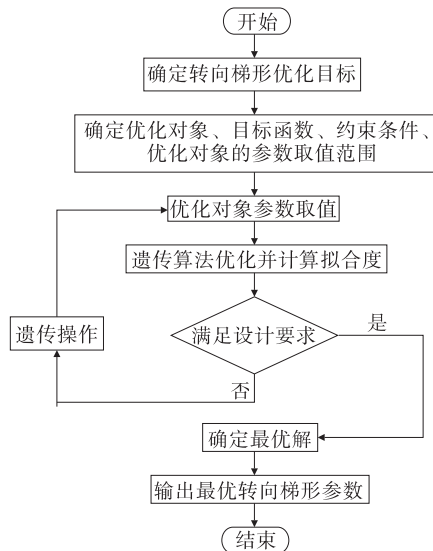


图5 转向梯形遗传算法优化流程

## 2.3 确定优化对象

图6为前置断开式转向梯形。根据已有分析,转向梯形参数中需优化的对象有转向节臂长度 $l_1$ 、梯形底角 $\phi$ 、梯形高度 $H$ 。

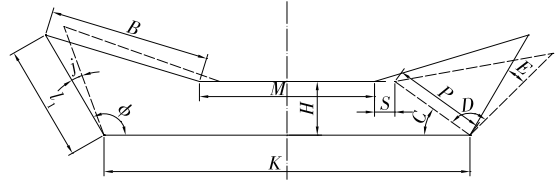


图6 前置断开式转向梯形

设 $F$ 为理论内轮转角。因为巴哈赛车采用35% Ackermann系数,为使巴哈赛车的实际转向转角关系与采用35% Ackermann系数时的理论Ackermann转向转角关系高度拟合,即尽可能使 $E$ 与 $F$ 接近,建立转向梯形优化目标函数,在外轮转角 $j$ 从 $0^\circ$ ~最大转角 $O$ 范围内进行转向过程分析。35% Ackermann系数时的理论内轮转角 $F$ 为:

$$F = 0.35 \arccot(\cot j - \frac{K}{L}) + 0.65j \quad (9)$$

由图6所示几何关系可得:

$$B =$$

$$\sqrt{\left(\frac{K-M}{2} - l_1 \cos \phi\right)^2 + [H - l_1 \sin \phi]^2} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{B^2 - [H - l_1 \sin(\phi - j)]^2} + l_1 \cos(\phi - j) - \frac{K-M}{2} \quad (11)$$

$$C = \arctan \frac{H}{(K-M)/2 - S} \quad (12)$$

$$D =$$

$$\arccos \left[ l_1^2 + H^2 + \frac{[(K-M)/2 - S]^2 - B^2}{2 \times l_1 \times \sqrt{H^2 + [(K-M)/2 - S]^2}} \right] \quad (13)$$

$$E = C + D - \phi \quad (14)$$

## 2.4 确定目标函数

考虑到巴哈赛车在赛道行驶时多数工况下外轮转角 $j$ 小于 $20^\circ$ ,且 $10^\circ$ 以内的小转角使用更频繁, $j$ 大于 $20^\circ$ 的情况很少,引入式(15)所示加权因子 $W(j)$ ,使目标优化值最小,从而确定目标函数 $\min f$ 。

$$W(j) = \begin{cases} 1.5, 0^\circ \leq j \leq 10^\circ \\ 1, 10^\circ < j \leq 20^\circ \\ 0.5, 20^\circ < j \leq j_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

$$f = \sum_{j=1}^{j_{\max}} W(j) \times \left| \frac{E}{F} - 1 \right| \quad (16)$$

式中:  $j_{\max}$  为外轮最大转角。

## 2.5 建立约束条件

根据图 6 所示转向梯形几何传动关系, 为保证连杆传动良好, 应满足横拉杆与节臂传动角  $\delta \geq 30^\circ$ , 横拉杆与齿条间夹角  $\xi \leq 10^\circ$ 。由图 6 可知:

$$P = \left( \frac{K-M}{2} - S \right)^2 + H^2 \quad (17)$$

同时有:

$$\cos \delta = \frac{l_1^2 + B^2 - P^2}{2l_1 B} \leq \cos 30^\circ \quad (18)$$

$$\sin \xi = \frac{|l_1 \sin(\phi + E) - H|}{B} \leq \sin 10^\circ \quad (19)$$

$$\sin \xi = \frac{|l_1 \sin(\phi - j) - H|}{B} \leq \sin 10^\circ \quad (20)$$

## 2.6 取值范围的确定

根据半经验公式得转向梯形理想底角为:

$$\phi_0 = 180^\circ - \arctan\left(\frac{4}{3} \times \frac{L}{K}\right) \quad (21)$$

对于断开式后置转向机构, 合适的梯形底角  $\phi$  应在  $\phi_0$  附近, 将其范围扩大  $30^\circ$ , 则  $\phi$  取值范围为  $[\phi_0 - 30^\circ, \phi_0]$ 。

为防止球铰与摩擦盘发生干涉, 取二者间距为  $B_{oy}$ , 需满足:

$$l_1 \times |\cos \phi(\min)| < B_{oy} \quad (22)$$

为防止转向过于沉重, 转向节臂长度不能过短, 一般令  $l_1 > 40 \text{ mm}$ 。

梯形高度  $H$  对传动角的影响较大, 同时影响转向系的性能。由图 6 可得:

$$H = l_1 \sin \phi_0 \pm \left( \frac{K-M}{2} \pm l_1 \cos \phi_0 \right) \tan \xi \quad (23)$$

带入数值计算取整, 可得到  $H$  的最大值与最小值, 从而确定  $H$  的取值范围。

## 3 优化结果分析

取优化对象的初值为:

$$x_0 = [l'_1, \phi', H'] \quad (24)$$

式中:  $l'_1$ 、 $\phi'$ 、 $H'$  分别为转向节臂长度、转向梯形底角和转向梯形高度取值范围的中间值。

以前文计算的转向梯形基本参数、目标函数、约

束条件函数及转向梯形优化初值为基础, 利用 MATLAB 遗传算法对巴哈赛车实际转向关系与理论 Ackermann 转向关系进行拟合优化, 优化结果见表 1。

表 1 MATLAB GA 遗传算法优化结果

参数名称	数值
转向节臂长度 $l_1/\text{mm}$	74
梯形底角 $\phi/^\circ$	114
梯形高度 $H/\text{mm}$	105
目标函数 $\min f$	0.27

图 7 为带入整车数据所得巴哈赛车转向梯形理论值及优化前后 Ackermann 转角关系对比。由图 7 可知: 优化后转角关系曲线与 35% 理论 Ackermann 转角关系曲线的拟合度在外轮转角为  $0^\circ \sim 10^\circ$  时最佳, 在  $10^\circ \sim 20^\circ$  时次之, 在  $20^\circ \sim j_{\max}$  时有微弱偏差 (1.2% 以内)。各段偏差情况与所取加权因子  $W(j)$  对应。根据表 1, 优化后目标函数  $\min f$  值为 0.27, 总体上优化后曲线与理论曲线偏差很小, 达到了预期优化目标。

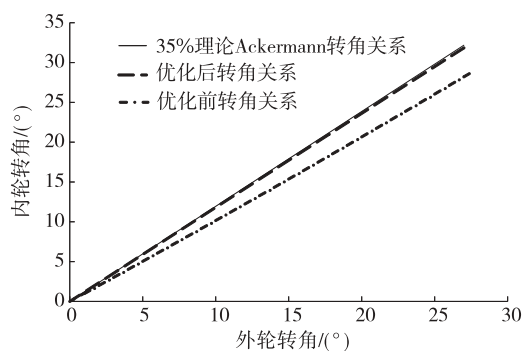


图 7 转向梯形 Ackermann 转角关系对比

巴哈赛车的理论内轮转角与实际内轮转角的差值随外轮转角的变化见图 8。由图 8 可知: 外轮转角为  $0^\circ \sim j_{\max}$  时, 理论内轮转角与实际内轮转角的最大差值仅为  $0.35^\circ$ , 精度较高。

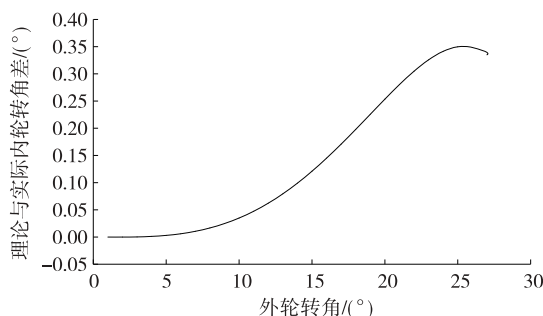


图 8 理论与实际内轮转角差

## 4 ADAMS 虚拟样机优化

### 4.1 建立前悬架与转向的 ADAMS 模型

为进一步优化转向梯形结构,对转向轮定位参数影响最大的转向梯形点坐标进行优化。利用表 1 中数据,结合转向梯形几何关系推导转向梯形各点坐标,与前悬架硬点坐标结合,即可在 ADAMS 中建立前悬架与转向系统模型。

由 ADAMS insight 模块分析可知转向梯形的转向横拉杆外点  $z$  坐标(tierod\_outer,  $z$ )对前悬架上下跳动时前轮束角变化的影响最大,为保证车辆在前悬架跳动时束角变化在合理范围内,建立包含前悬架与转向系统的 ADAMS/Car 模型(见图 9)。

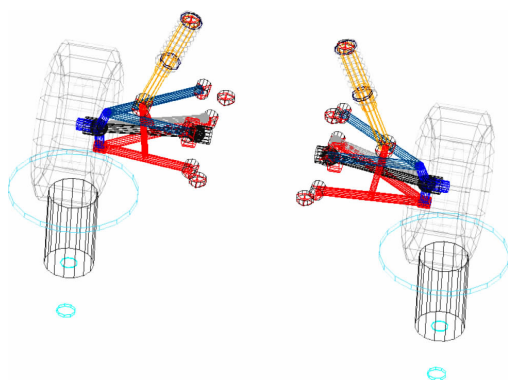


图 9 前悬架与转向系统的 ADAMS 模型

### 4.2 ADAMS 优化结果分析

将整车参数、轮胎参数、减振器参数等 ADAMS 分析所需参数数据(见表 2)导入 ADAMS/Car 模型中。设置转向横拉杆外点  $z$  坐标为设计变量,根据表 2 中数据进行前悬架平行轮跳分析,利用 ADAMS 优化转向横拉杆外点  $z$  坐标数值使前轮束角在悬架跳动过程中的变化范围最小。

表 2 ADAMS 分析主要设置参数

参数名称	参数值
轴距/mm	1 400
质心高度/mm	543
轮胎滚动半径/mm	279
轮胎刚度/(N·mm)	50
簧上质量/N	1 450
簧下质量/N	550
前轴传动分配比/%	50
前轴制动分配比/%	65
前悬架上跳行程/mm	100
前悬架下跳行程/mm	80
静态前轮束角/(°)	-1

ADAMS/Car 优化结果见表 3。由表 3 可知:优化前悬架下跳最大时前束角为  $-8.8^\circ$ ,上跳最大时前束角为  $+6.4^\circ$ ,前轮束角变化范围为  $15.2^\circ$ ,变化范围过大,会使转向操纵不稳,对赛车操纵稳定性的影响很大;优化转向横拉杆外点  $z$  坐标后,前悬架下跳最大时前束角为  $-0.7^\circ$ ,上跳最大时前束角为  $-1.6^\circ$ ,前轮束角变化范围为  $0.9^\circ$ ,相较于优化前大大减小,处于合理范围。前束角的变化见图 10。

表 3 ADAMS/Car 优化结果

参数名称	优化前数值	优化后数值
转向横拉杆外点 $z$ 坐标/mm	279.7	238.6
悬架下跳最大时前轮束角/(°)	-8.8	-0.7
悬架上跳最大时前轮束角/(°)	+6.4	-1.6
悬架跳动前轮束角变化范围/(°)	15.2	0.9

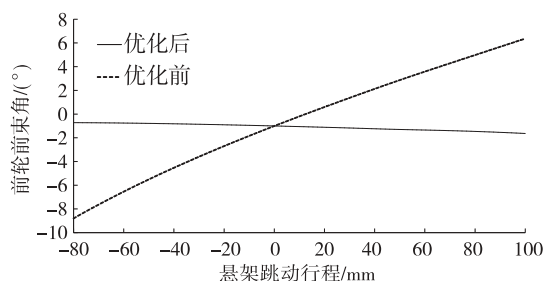


图 10 优化前后前轮前束角变化范围对比

与 MATLAB 优化后转向梯形各点坐标相结合,完成了转向梯形的联合优化设计,优化确定的转向横拉杆外点  $z$  坐标为 238.6。

## 5 结语

该文提出一种巴哈赛车断开式转向梯形联合优化设计方案,通过分析实际巴哈赛车的主销参数与转向几何关系建立转向梯形几何模型,并确立目标函数与约束函数。按照理论 Ackermann 转向转角关系,使用 MATLAB 遗传算法对转向梯形参数进行优化,使实际转向梯形的转角关系与理论 Ackermann 转角关系相拟合。使用 ADAMS 虚拟样机仿真模拟前悬架跳动来优化转向梯形坐标,验证前轮前束角变化范围处于合理范围,转向梯形的优化设计合理。

### 参考文献:

- [1] 陈刚,郭荣辉.巴哈越野赛车车架设计与结构优化[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2018,30(1):81-86.
- [2] 姚汉波,唐应时,王焕美,等.FSAE方程式赛车转向系

(下转第 16 页)

制冷。

(2) 故障诊断。调节冷暖调节作动器至温度最低,观察是否能出冷风。若不能出冷风,先检查蒸发器温度传感器是否正常;若蒸发器温度传感器正常,则检查低压保险盒内制冷管继电器 ER17 是否有故障;若 ER17 正常,则检查制冷剂电磁阀是否有故障;若制冷剂电磁阀正常,则检查压缩机控制器 EP07 的 7 号针脚是否有 12 V 电压、8 号针脚搭铁是否正常。

### 3.4 空调无法制热

(1) 故障现象。打开空调,能正常出风,但不能制热。

(2) 故障诊断。调节冷暖调节作动器至温度最高,观察是否能出热风。若不能出热风,先检查加热芯体温度传感器是否正常;若加热芯体温度传感器正常,则检查低压保险盒内热交换器继电器 ER16 是否有故障;若 ER16 正常,则检查热交换器是否有故障;若热交换器正常,则检查 PTC 控制器 CA48 的 1 号针脚是否有 12 V 电压、7 号针脚是否与 VCU 通信正常,检查加热泵 CA62 的 2 号针脚是否有 12 V 电压、3 号针脚是否有搭铁信号。

## 4 结语

以吉利帝豪新能源汽车为例,分析自动空调鼓

风机、压缩机和 PTC 加热器的低压控制电路和自动空调的工作条件,通过对其电路的分析,总结容易出现的电路故障点。以空调常见故障为例,对低压控制系统可能出现的故障逐一进行检查,确定故障部件,为新能源汽车维修提供参考。

### 参考文献:

- [1] 于兰.整车控制器硬件在环仿真系统设计[J].汽车工程师,2018(6):48-49+58.
- [2] 凌学锋.空调系统自动模式下内循环控制分析[J].汽车电器,2011(5):3-5.
- [3] 汪琳琳.新能源电动汽车低温热泵型空调系统研究[J].汽车工程,2020,42(12):1744-1750+1757.
- [4] 郭冲.电动汽车热泵空调模糊控制的模拟研究[J].汽车技术,2016(10):57-62.
- [5] 徐继勇.新能源汽车空调检测与维修[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2020.
- [6] 陈林.新能源汽车空调系统工作原理及检修项目研究[J].内燃机与配件,2020(6):168-169.
- [7] 刘明瑞.新能源汽车空调系统工作原理与检修注意事项[J].汽车电器,2019(3):17-18.
- [8] 方波,周欢,景志敏.新能源汽车空调原理及常见故障分析[J].内燃机与配件,2020(3):155-156.

收稿日期:2021-04-02

\*\*\*\*\*

(上接第 5 页)

- 统的仿真与优化[J].计算机仿真,2011,28(4):349-352.
- [3] 余志生.汽车理论[M].6版.北京:机械工业出版社,2018:157-208.
  - [4] 李玉民,过学迅,王文家,等.整体式转向梯形的运动分析及优化设计[J].拖拉机与农用运输车,2001(2):18-22.
  - [5] 郭鹏彦,石博强,肖成勇,等.多轴线液压板挂车转向机构优化设计[J].工程机械,2008,39(1):32-37.
  - [6] 巢香云,黄蕾澎,代成浩,等.方程式赛车转向梯形优化设计及仿真[J].农业装备与车辆工程,2019,57(6):39-41.
  - [7] 宋学前,丁华锋,景文倩,等.FSAE 赛车转向系统优化设计[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2019,33(2):38-44.
  - [8] 李辰,付有兵,张军伟,等.考虑侧偏特性时的修正阿克曼原理转角研究[J].导弹与航天运载技术,2018(6):96-99.
  - [9] MILLIKEN W F, MILLIKEN D L. Race car vehicle dynamics[M]. SAE International, 1995:710-713.

- [10] 李君,邓正俊,郑维伟,等.FSAE 方程式赛车转向梯形优化[J].农业装备与车辆工程,2014,52(12):10-13.
- [11] 姜明国,陆波.阿克曼原理与矩形化转向梯形设计[J].汽车技术,1994(5):16-19.
- [12] 刘曙光,费佩燕,侯志敏.生物进化论与人工智能中的遗传算法[J].自然辩证法研究,1999(12):20-24.
- [13] 王永鼎,李宁业.采用遗传算法的海流能发电机叶片优化与研究[J].机械强度,2021,43(2):327-332.
- [14] 陈盼,张凯.FASE 方程式赛车转向梯形的联合优化设计[J].汽车实用技术,2015(4):72-74.
- [15] 王晓军,裴锦华,李明.某车型转向梯形和驱动机构优化设计[J].客车技术与研究,2011(3):19-22.
- [16] 程静.电动客车高压应急转向系统方案设计[J].客车技术与研究,2018(5):19-20.
- [17] 赵德玉,王振军.基于 ADAMS 的悬架仿真及优化[J].农业装备与车辆工程,2020,58(3):122-125.
- [18] 马涛锋,薛念文,李仲兴,等.对汽车操纵稳定性的影响因素分析及对操稳性的研究评价[J].机械设计与制造,2005(4):122-123.

收稿日期:2021-05-25