# 基于 UG 的双横臂独立悬架运动学分析系统\*

侯永涛1 陆建辉2 周孔亢2 汪若尘2

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 提出了一种基于 UG 构建双横臂独立悬架运动学分析系统的方法,并应用该方法开发出了相应的原型系统,给出了系统的框架结构。系统的快速参数化设计模块可方便、快捷地对双横臂悬架运动仿真模型的结构参数、几何参数和定位参数进行修改;系统的运动学仿真分析模块通过调用 UG/Motion 集成的 MSC ADAMS 或 Function Bay RecurDyn 解算器来获取仿真分析结果,通过集成 Matlab 的绘图功能对分析结果进行输出查看;以前轮 定位参数的变化量最小、车轮侧向滑移量最小为优化目标,采用遗传算法构建了系统的悬架机构结构参数优化设 计模块。通过一个设计实例验证了系统的正确性及基于遗传算法的结构参数优化设计模块的有效性。系统的框架结构具有良好的可扩展性,已在麦弗逊悬架的优化设计过程中得到应用。

关键词:汽车 双横臂独立悬架 运动学分析 遗传算法 中图分类号:U463.33 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)12-0025-07

# Kinematics Analysis System of Double-wishbone Independent Suspension Based on UG Software

Hou Yongtao<sup>1</sup> Lu Jianhui<sup>2</sup> Zhou Kongkang<sup>2</sup> Wang Ruochen<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

#### Abstract

A construction method for kinematics analysis system of the double-wishbone independent suspension based on UG software was proposed. The corresponding software prototype system using this method was developed and the frame structure of the system had been given account. Using the fast parameterized design function module of the system, the structure and geometric parameters of the double-wishbone suspension mechanism's simulation models could be rapid and convenient edited. By calling the MSC ADAMS or RecurDyn solver, which is integrated in UG/Motion, the kinematics simulation and analysis function module of the system could get the simulation results. The simulation results could be inspected using the drawing function of Matlab, which is integrated in this function module. Taking the minimum variation of the front wheel alignment parameters, minimum lateral displacement of the tires as the optimal object, the optimization design function module of suspension's the structural parameters was constructed based on genetic algorithm. The correctness and the validity of the system and its function modules were verified by a design example. The frame structure of the system had good scalability and had been used in the optimum design of McPherson suspension.

Key words Automobile, Double-wishbone suspension, Kinematics analysis, Genetic algorithm

引言

悬架是现代汽车重要的总成之一,其特性直接

影响到汽车的舒适性、操纵性和行驶安全性。双横 臂机构是目前独立悬架中应用非常广泛的导向机构 之一,特别是在大型载客汽车中具有广泛的应用。

收稿日期:2010-12-20 修回日期:2011-01-05

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50905078)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802991016)和江苏大学高级专业人才科研 启动基金资助项目(10JDG064)

作者简介: 侯永涛,副教授,主要从事车辆动态特性仿真及 CIMS 研究, E-mail: hytao@ ujs. edu. cn

关于悬架系统运动学特性的分析和优化,国外学者 做了大量研究工作<sup>[1~3]</sup>,国内学者也开展了相应的 研究工作[4~8]。从方法上讲这些研究大致可分为两 类:一类是基于空间机构运动学和数值计算方法,运 用坐标变换原理及瞬心法等,建立悬架系统的空间 几何与运动学特性关系。该方法的缺点在于系统构 建繁琐,在运动学分析过程中需要求解一元非线性 方程<sup>[4~5]</sup>。从应用角度讲,这种方法也不够直观。 第二类是应用多体动力学仿真软件 ADAMS 建立悬 架系统仿真模型,对其进行运动学分析和优化。如 文献[6~8]都提出基于遗传算法运用 ADAMS 对悬 架系统进行优化设计的方法,但文献[6]并未给出 从 ADAMS 获取仿真结果的方法;文献[7]提出了通 过建立 C 语言和 ADAMS 软件的接口,在 ADAMS 中 建立动态链接库的方法来实现数据传输,但并未具 体说明传递哪些数据及如何实现仿真模型的更新; 文献[8]提出了应用 ADAMS 和 iSightFD 联合仿真 进行悬架系统优化的方法,但从其给出的联合仿真 优化流程图中可以看出, ADAMS 计算的结果需要导 入到 EXCEL 中,再进行综合目标函数的计算。实际 上,在采用遗传算法运用 ADAMS 对悬架系统进行 优化设计的过程中,不仅需要从 ADAMS 中获取仿 真结果来计算适应度函数,而且需要将遗传算法中 产生的各代种群中每个个体的设计变量应用到 ADAMS 仿真模型中,进行模型更新,即需要实现遗 传优化程序与 ADAMS 之间双向传递数据。但由于 ADAMS 开发工具的限制,实现起来相当困难。

本文提出一种基于 UG 系统构建双横臂独立悬 架机构运动学分析系统的方法,并应用该方法开发 出相应的原型系统,以实现双横臂机构的快速参数 化设计、运动学仿真分析以及基于遗传算法的结构 参数优化。

# 1 系统的框架结构







从图 1 可以看出,系统以 UG 软件为基础,主要应用 UG 的 UG/Motion 模块,以 UG/Open API 为开 发工具来实现。UG/Motion 模块集成了 MSC ADAMS 和 Function Bay RecurDyn 两种解算器,实验证明,对大多数机构来说,用这两种解算器求解出的结果基本相同;UG/Open API 提供了一系列函数用于实现仿真模型的更改、仿真运行及仿真结果的获取;系统通过 SQL Server2000 数据库来保存设计结果及仿真分析结果;鉴于 Matlab 已成为业界进行数据可视化的标准,因此系统集成了 Matlab 的部分绘图函数功能,用于仿真结果的输出。

#### 2 快速参数化设计模块

图 2 所示为双横臂独立悬架结构简图。图中, A、B为上、下摆臂摆动中心点;U、K为上、下摆臂主 销球铰点;L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>为上、下摆臂的摆动轴线;C为主销 与转向节轴线交点;D为车轮中心点;E为车轮接地 点;P为转向节臂球销中心;S为转向梯形断开点。 坐标系 x 轴指向车尾,z 轴垂直车架表面向上,y 轴 由右手定则确定。



在 UG 系统中,使用 UG/Motion 模块构建的双 横臂独立悬架运动仿真模型如图 3 所示。

快速参数化设计模块的操作界面如图 4 所示。 A、B 和 S 点在悬架运动过程中保持不变,其坐标值 可由设计图纸确定<sup>[4]</sup>, P 点的初始位置也可由设计 图纸给定。对于 K、U 和 D 点,系统提供了"参数" 和"坐标"两种方式来确定其初始位置。设下摆臂 长度为 L<sub>BK</sub>,下摆臂在 yz 横向平面内的倾角(投影 角)为 α,在 xy 水平面内的斜置角(投影角)为β,则 K 点与 B 点的坐标差为

$$\begin{cases} \Delta y = -L_{BK} / \sqrt{1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta} \\ \Delta z = \Delta y \tan \alpha \\ \Delta x = \Delta y \tan \beta \end{cases}$$
(1)



图 3 UG 系统中双横臂独立悬架运动仿真模型 Fig. 3 Motion simulation model of double-wishbone

suspension in UG system

参数及使	点确定			^
坐标:	x	Y	Z	
B点:	-86.82000	485.65000	81.270000	应用
A点:	44. 90000	(399.5100C	(391.21000C	应用
P点:	-170.7100	-26.95000	(100.00000C)	应用
S点:	-252.500(	439.55000	[181.19000C]	应用
确定方	<del>بر</del>			
参数	坐标			
参数:	下摆臂长度	橫平面倾角	水平斜置角	
<u>қ</u> д:	500.00000	9.50000	-10.135700	应用
参数:	主销长度	主销内倾角	主销后倾角	
V点:	330.00000	10.00000	2.53770C	应用
C点:	67.00000	%(以)水为基	准所占比例)	应用
参数:	CD间距离	车轮外倾角	前束角	
0点:	146. 48100	0.97790	0.200500	应用
轮胎参数				^
滚动直径	: (750.00000	断面宽。	夏: 215.0000()	应用
医臂轴线	参数			~
上摆臂XY	平面投影角:	-4. 91000		
下摆臂XX	平面投影角:	10.1357(		应用
设计重置	及保存			^
Sanchasanch		重置所有参	数	
新设计名	称 设计1		保存设计参数到	数据库

图 4 快速参数化设计模块操作界面 Fig. 4 Rapid parameterized design module operating interface

因取左悬架四分之一模型,式(1)中 $\Delta y$ 取负 值;为使程序通用,对于 $\alpha$ 和 $\beta$ 的符号,规定由B点 到K点所确定的向量,分别与z轴及x轴正向的夹 角为钝角时取正号,锐角时取负号。当已知B点坐 标时,即可由式(1)通过参数计算得出K点的坐标。

同理,在计算得出 K 点的坐标后, U 点与 K 点 的坐标差为

$$\begin{cases} \Delta z = L_{KU} / \sqrt{1 + \tan^2 \sigma + \tan^2 \tau} \\ \Delta y = \Delta z \tan \sigma \\ \Delta x = \Delta z \tan \tau \end{cases}$$
式中  $L_{KU}$ — 主销长度  $\sigma$ —— 主销内倾角

τ---主销后倾角

*C*点在建模时,可采用 UG 的"两点之间"方式 创建,这样只需一个表达式即可确定 *C*点位置。其 在 *K*点和 *U*点间的比例可由设计图纸查知。在 *C* 点位置确定后,*D*点和 *C*点的坐标差为

$$\begin{cases} \Delta y = -L_{cD} / \sqrt{1 + \tan^2 \gamma + \tan^2 \delta} \\ \Delta z = \Delta y \tan \gamma \\ \Delta x = \Delta y \tan \delta \end{cases}$$
(3)

式中 L<sub>cp</sub>——C和D两点间距离

E 点为车轮接地点,当已知轮胎直径和轮胎宽 度后,其位置可由悬架模型的几何尺寸确定。

设摆臂在 xy 平面内的投影角为 $\theta$ ,在 xz 平面内的投影角为 $\varphi$ ,则摆臂摆动轴线的方向余弦<sup>[4-5]</sup>为

$$\boldsymbol{U} = \left[ U_x, U_y, U_z \right] =$$

 $\left[1/\sqrt{1+\tan^2\theta+\tan^2\varphi}, U_x \tan\theta, -U_x \tan\varphi\right] \quad (4)$ 

该方向与上或下摆臂垂直,以上摆臂为例,当已 知 U点和A点坐标后,可计算得出这两点所确定矢 量方向  $V = [V_x, V_y, V_z]$ ,该方向与U方向垂直,即两 矢量的点积为零,则可求得

$$\tan\varphi = (V_x + V_y \tan\theta) / V_z \tag{5}$$

当已知摆臂在 xy 平面内的投影角  $\theta$  后,则可根据式(5)和式(4)计算得出摆臂摆动轴线的方向余弦,调用函数 UF\_SO\_set\_direction\_of\_dirr()即可设置修改仿真模型中摆臂摆动轴线的方向。

"快速参数化设计"操作界面允许用户一次生 成多个设计实例,各设计实例的结构参数、几何参数 及定位参数可保存在 SQL Server 2000 的"设计参 数"数据库中。该数据库对应有"悬架系列编号 + 设计名称 + 部件实例名 + 参数名 + 参数值"5 个字 段,其中"悬架系列编号"用于未来系统的扩展,具 体实现方法可参考文献[9]。

# 3 运动学仿真与分析模块

当模型的快速参数化设计完成后,即可进行运 动学仿真,查看仿真结果。系统"仿真分析及遗传 优化"对话框的"仿真分析"选项卡如图 5 所示。使 用该选项卡,从"设计结果"下拉列表中选择相应设 计名称,即可从数据库中检索出该设计名称所对应 所有设计参数,用以更新模型。

仿真模型的运动驱动可使用 UG/Motion 模块添加及修改。函数 UF\_MOTION\_solve\_model()用于执行模型以时间为基础的仿真分析,该函数要求用户输入仿真时间和仿真步数。当模型具有一个及以上自由度时,函数执行动力学仿真;当模型自由度为

15	<b>真分</b>	折及	;遺(	专优	ĸ						
仿真约	分析	遗传	€忧≁	Ł							
设计	更新										•
设计	结果	设i	+1		5	]		更新	所模	型	
仿真	参数										
仿真 仿真	时间 步数		. 000	)0() )0		C		运行	ī仿	ļ.	
Tâb	22222222	ananan a	10111111			666666666				in the second	and a second
主主前回车车	的 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何 何	角角角点骨	移量								
主 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 非 和 工 和	的后所 有 方 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所 所	角角角点量	移量	E							
主主前前五年第 本第 本第 本第 本第 本第 本第 一 二 二 二 二 二 二 二 前 前 二 二 二 前 前 二 二 前 前 二 二 二 前 二 二 二 前 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二	的后外角接跳动 车轮跟	角角角点量	移量	C R	打间						
主主前前五年年 新 新 新 新 新 新 新 新 新 新 新 新 新	的后外角接跳 车轮跟 存	角角角点量 跳 真	移量		dit la constante de la constan		直	[]]]	图形		

Fig. 5 Tab of simulation analysis

零时,执行运动学仿真。仿真分析的结果被保存在 UG内部的数据库中,直到模型被更改或另一个仿 真分析被运行。

与 ADAMS 系统相似,为获取双横臂悬架系统 的运动仿真结果,即车轮定位参数、车轮接地点滑移 量及车轮跳动量的变化,需要使用 UG/Motion 模块 在模型中 U、K、D、C 和 E 点处,相应"连杆"上添加 相应的 Marker 点。这样在执行仿真分析后,调用 UF\_MOTION\_ask\_trans\_displacement\_results()函数 即可从 UG 的内部数据库中获取各 Marker 点在每 一步仿真中相应坐标的位置,由此可计算得出双横 臂独立悬架各车轮定位参数、车轮接地点滑移量和 车轮跳动量。以上参数计算表达式可参考文献[7] 和文献[10]。

应用 Matlab 的 M 语言编写相应的绘图函数,使 用 mcc 编译器将 M 文件编译成可脱离 Matlab 环境 独立运行,供 Visual C + +调用的动态链接库。将 用户对 x、y 轴的选择以及仿真分析结果(即主销内 倾角、主销后倾角、前轮外倾角、前束角、车轮接地点 滑移量、车轮跳动量及时间共 7 列数据)以二维数 组形式传递到该动态链接库,即可调用 Matlab 的绘 图函数,输出图形对仿真结果进行查看。

上述 7 列数据可保存在 SQL Server 2000 的"仿 真分析结果"数据库中,用于后续对不同设计之间 仿真分析结果的比较查看。该数据库除包含以上 7 列数据的定义字段外还包含"悬架系列编号"和 "设计名称"2 个字段,共9 个字段。

# 4 基于遗传算法的结构参数优化设计模块

传统常规的机械设计优化方法,大多是从设计

空间的单个点出发,根据相应规则进行点到点的顺 序搜索,很难处理经常遇到的非凸、高度非线性等参 数优化问题,且对于多峰值问题的求解很容易收敛 于局部最优解。遗传算法则是从一个初始种群开 始,不断产生和测试新一代的种群,这种方法从一开 始便扩大了搜索范围,可较快地获得问题的全局最 优解。因此,系统采用遗传算法来实现双横臂悬架 机构的结构参数优化设计。

### 4.1 设计变量

根据双横臂悬架车轮定位参数的计算公式及悬架导向机构的空间情况,确定设计变量为:下摆臂长度  $L_{BK}$ 、下摆臂横向平面的倾角  $\alpha_L$ 、水平斜置角  $\beta_L$ ; 上、下摆臂的长度比值  $\lambda_L$ 、上摆臂横向平面的倾角  $\alpha_v$ 、水平斜置角  $\beta_v$ ;主销长度  $L_{KV}$ 、主销内倾角  $\sigma$ 、主销后倾角  $\tau$ ;控制 C 点位置的比值  $\lambda_c$ ;车轮外倾角  $\gamma$ 、前束角  $\delta$ 。由设计变量组成的优化向量为  $X = (L_{BK}, \alpha_L, \beta_L, \lambda_L, \alpha_v, \beta_V, L_{KV}, \sigma, \tau, \lambda_c, \gamma, \delta)。$ 

#### 4.2 目标函数

(1)根据独立悬架导向机构的设计要求,确定 前轮定位参数的特性,当车轮上下跳动时,前轮定位 参数变化量平方的加权和的算术平方根为最小,即

$$f_{1} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (\rho_{1}(\sigma_{i} - \sigma_{0})^{2} + \rho_{2}(\tau_{i} - \tau_{0})^{2} + \rho_{3}(\gamma_{i} - \gamma_{0})^{2} + \rho_{4}(\delta_{i} - \delta_{0})^{2})}$$
(6)

式中 n——悬架全行程运动过程中所需计算位置 的总个数,由仿真分析所输入的仿真步 数确定

- $\sigma_i$ 、 $\tau_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\delta_i$ ——悬架在第i位置时的主销内 倾角、主销后倾角、前轮外倾 角和前束角

 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 、 $\rho_4$ ——对应优化目标的加权因子

式(6)中,加权因子的选择对优化结果的可靠 性有很大的影响,考虑到系统优化时计算的方便,采 用直接加权法来建立 *f*<sub>1</sub>的目标函数,具体选取方法 和取值可参考文献[11]。

(2)车轮上下跳动时,前轮接地点滑移量相对 平衡位置变化量平方的加权和的算术平方根为最 小,即

$$f_{2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{i} (y_{i} - y_{0})^{2}}$$
(7)

式中 y<sub>i</sub>、y<sub>0</sub> —— 悬架系统在第 *i* 位置和平衡位置时 车轮接地点 y 方向的坐标值 将以上两个目标函数采用线性组合法,统一为 综合目标函数

$$\min f(x) = \frac{\omega_1 f_1}{t_1} + \frac{\omega_2 f_2}{t_2}$$
(8)

式中 ω1、ω2---加权因子,由用户指定

*t*<sub>1</sub>、*t*<sub>2</sub>——比例因子

 $t_1 \ t_2$  用于消除  $f_1 \ \pi f_2 \ \pm$ 纲与数量级不同的影响,  $t_1 \ t_2$ 取值由系统通过比较计算结果确定,以使  $f_1 / t_1$ 和  $f_2 / t_2$ 具有相同的数量级。

4.3 约束条件

适当选取上、下摆臂的长度比例有助于减小车 轮相对车身跳动时外倾角的变化,美国克莱斯勒和 通用公司分别认为,上、下摆臂的长度比例取 0.7 和 0.66 为最佳<sup>[12]</sup>。因此,系统中设计变量  $\lambda_L$ 的取值 范围定为[0.6,0.8];用于控制 C 点位置的设计变 量  $\lambda_c$  的取值范围为[0.4,0.8];其余设计变量的取 值范围由用户指定。系统"仿真分析及遗传优化" 对话框的"遗传优化"选项卡如图 6 所示。

化变量			
变量初值		最小值	最大值
下摆臂长度	500.00000	480.00000	520,00000
<b></b>	9. 50000	5.00000	12.00000
水平斜置角	-10.00000	-12.00000	-8.00000
上摆臂参数			
橫平面倾角	11.00000	9.0000	14.00000
水平斜置角	5.00000	0.0000(	10.00000
主销长度	330.00000	300.00000	(350.00000
主销内倾角	10.00000	5.00000	15.00000
主销后倾角	2.50000	0.00000	5.00000
前轮外倾角	0.9779(	0.0000	1.00000
前束角	0.2000	0.0000	0.50000
又重系数			
主:W1对应四	个车轮定位	角度,\2对	应车轮滑移:
1 0.	50 🗢 🕅	É∶W2=1-W1	
	开始	忧化	*******
化设计名称	优化设计1	(保存	设计参数

图 6 "遗传优化"选项卡界面 Fig. 6 Tab of genetic optimization

系统中,优化设计变量采用浮点向量表示,初始 种群的个体数为20,由原设计方案及随机产生的设 计方案构成。交叉概率取0.75,变异概率取0.15, 在复制和交叉过程中,采用单点交叉、均匀变异和转 轮盘的复制方法。以K点为基点,应用式(1)~(5) 计算相应各点坐标及摆臂摆动轴线的方向余弦。在 D点坐标的计算过程中,L<sub>co</sub>由初始方案给定,整个 优化过程保持不变。 自动更新模型、运行仿真程序、获取仿真分析结 果,系统即可按式(6)~(8)计算出每个个体的综合 目标函数。遗传优化算法的适应度函数取综合目标 函数的倒数,即 e<sub>val</sub> = 1/f(x)。如果连续5代适应度 函数值无变化,则以10%的速度加大变异概率,如 果加大变异概率后连续3代适应度函数值无变化, 则认为收敛,终止遗传算法。系统的"运动仿真结 果比较"对话框如图7所示。

、 运动仿真结界	果比较		
确认比较			^
设计名称1		设计1	-
设计名称2		优化设计1	
T轴			~
主销内倾角 主销后倾角 前较外倾角 前束角 车轮接地点滑移 车轮跳动量	量		
X轴			~
④车轮跳动量	〇时间		
[	比较查看		
		美麗	8)

图 7 "运动仿真结果比较"对话框界面

Fig. 7 Dialog of result comparison of kinematics simulation

## 4.4 优化设计实例

为验证所提方法及相应原型系统的正确性,以 一个设计实例对其进行检验,设计实例的初始设计 参数可参考文献[10]。仿真模型的运动激励方程 为 z = 50sin(2πt)。在 ADAMS 中对该实例进行仿 真,其结果如图 8 所示。图 8 中仅给出主销内倾角、 前轮外倾角及车轮接地点滑移量随车轮跳动量的变 化曲线,其他参数的变化曲线可参考文献[10]。

应用系统的"快速参数化设计"模块、"运动学 仿真与分析"模块以及"基于遗传算法的结构参数 优化设计"模块,最终的优化向量结果为

 $X = (499.72, 7.093^{\circ}, -9.036^{\circ}, 0.663, 8, 9.91^{\circ}, 6.58^{\circ}, 0.663, 8, 9.91^{\circ}, 9.91^{\circ}, 6.58^{\circ}, 0.663, 8, 9.91^{\circ}, 9.91^{\circ}$ 

326. 80,10. 51°,0. 995°,0. 799 7,0. 48°,0. 227 5°)

初始设计和优化设计对应的仿真结果如图9所示。对比图8和图9可以看出,系统的仿真结果与 ADAMS的仿真结果相一致。从图9优化前后的对 比可以看出,优化前、后主销后倾角在整个车轮跳动 过程中变化不大;优化后的主销内倾角与前轮外倾 角的变化量比优化前有所增大,但前轮外倾角的变 化量基本在±1°以内;前束角是为了克服外倾带来 的不利影响而与外倾角合理匹配的设计参数,用以 保证车轮前轮纯滚动和正直行驶。从图9可以看 出,优化后前束角的变化量不大,且其与外倾角的变



Fig. 9 Kinematic responses of design example before and after optimization using prototype system
 (a) 车轮跳动量-主销后倾角曲线
 (b) 车轮跳动量-主销内倾角曲线
 (c) 车轮跳动量-前轮外倾角曲线
 (d) 车轮跳动量-前束角曲线
 (e) 车轮跳动量-车轮接地点滑移量曲线

化相匹配,避免了前轮的较快磨损和摆振现象;优化 后,车轮接地点滑移量比优化前有很大改善,其变化 范围在0~2 mm之间,减少了轮胎的磨损。

系统的框架结构具有良好的可扩展性,且已应 用于某款微型车麦弗逊悬架系统的局部结构参数优 化过程中。图 10 所示为麦弗逊悬架系统的运动仿 真模型,图 11 所示为系统对其优化后的仿真结果, 图 11 中仅给出主销内倾角、前轮外倾角随车轮跳动 量的变化曲线。图 12 为应用 ADAMS 对系统仿真 结果的验证。对比图 11 和图 12 可以看出,两者仿 真结果相当吻合,进一步检验了所提出的优化设计 准则的准确性。

# 5 结论

(1)充分利用 UG 系统的开放结构,提出了一种构建双横臂独立悬架机构运动学分析系统的方法,基于该方法开发了原型软件系统,可快速实现悬架机构的参数化设计、运动仿真与分析,使悬架的设





计更为简单、准确,为复杂机构及悬架系统的运动学 分析与研究拓展了思路。

(2)系统将遗传优化算法与多体动力学分析相









结合,实现了双横臂独立悬架机构的结构参数优化 设计,通过设计实例将仿真结果与 ADAMS 仿真结 果进行对比,验证了系统的正确性。

(3) 系统的构建方法具有可扩展性,并已在麦

弗逊悬架的优化设计过程中得到应用,对系统进行 扩展可建立包含多种悬架的虚拟样机库,为汽车悬 架乃至汽车底盘的综合化、集成化、并行化设计打下 基础。

参考文献

- 1 Bae Sangwoo. Axiomatic approach to the kinematic design of an automotive suspension system with the McPherson strut type [J]. International Journal of Vehicle Design, 2003, 31(1):58 ~ 71.
- 2 Nikravesh P E. Computer-aided analysis of mechanical systems [M]. Englewood Cliffs: Printice-Hall, 1998: 10 ~ 200.
- 3 Park J, Guenther D, Heydinger G. Kinematic suspension model applicable to dynamic full vehicle simulation [C]. SAE Paper 2003 01 0859,2003.
- 4 初亮,彭彦宏,鲁和安,等. 双横臂独立悬架转向梯形断开点位置的优化及分析[J]. 汽车工程, 1998, 20(3):176~182.
   Chu Liang, Peng Yanhong, Lu Hean, et al. Optimization and analysis of splitting point of ackerman steering linkage of double-wishbone suspension[J]. Automotive Engineering, 1998, 20(3):176~182. (in Chinese)
- 5 王其东,赵韩,李岩,等.汽车双横臂式独立悬架机构运动特性分析[J].合肥工业大学学报,2001,24(6):1066~1071.

Wang Qidong, Zhao Han, Li Yan, et al. Kinematic analysis of automobile wishbone independent suspension [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2001, 24(6):1066~1071. (in Chinese)

6 李坤,钟崴,童水光,等.基于遗传算法的客车前独立悬架及转向系统的运动学优化设计[J].机械设计,2010, 27(6):78~82.

Li Kun, Zhong Wei, Tong Shuiguang, et al. Kinematics optical design of front independent suspension and steering system in bus based on genetic algorithm [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(6): 78 ~ 82. (in Chinese)

7 陈黎卿,陈无畏,何钦章.双横臂扭杆独立悬架多目标遗传优化设计[J].中国机械工程,2007,18(17):2122~2125.

Chen Liqing, Chen Wuwei, He Qinzhang. Multi-objective heredity optimization design of torsion-bar wishbone suspension [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2122 ~ 2125. (in Chinese)