

# 基于 RBF 的电火花多电源同步均衡控制算法

焦银亮,罗福源,杨杰

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对“一电四线”式混合进电电火花超细密线网切割方法存在不同组间电极丝切割速率不一致、硅片切缝不均匀、切片厚度一致性差等问题,设计了一种基于 RBF 的电火花多电源同步均衡控制算法。在加工过程中实时调整数据模型,并结合动量增量法和梯度下降法,根据 Jacobian 信息和不同组间电流的差值来调整电源脉冲宽度,建立了 simulink 仿真模型和多电源并行放电切割试验系统。仿真和实验结果表明,该算法收敛快,实时性强,切割质量高。

**关键词:**半导体材料;电火花切割;混合进电;RBF 神经网络;均衡放电控制

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0170-05

## Multi-Power WEDM Synchronous Equalization Discharge Control Algorithm Based on RBF

JIAO Yinliang, LUO Fuyuan, YANG Jie

(College of Mechanic and Electric Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The inconsistency of the speed rate of slicing silicon material with hybrid power supply and the poor uniform silicon wafer and slicing thickness exist in the “one-power four-wire” super dense wire network EDM method. This paper proposes a multi-power synchronous equalization control algorithm based on RBF neural network. The Jacobian information and the difference between the currents of different groups are used to adjust the power pulse width and establish a Simulink simulation model and a multi-power parallel discharge cutting test system. The simulation and experimental results show that the algorithm above is of fast convergence, strong real-time performance, and high slicing quality.

**Keywords:** semiconductor material; EDM; hybrid power supply; RBF neural network; discharge equalization control

## 0 引言

电火花线切割已被证实为一种环保、有效、精密的半导体材料切片加工方法。但目前研究学者一般是采用单电源、“一电一线”的进电方式,这种方式存在电源利用率低、切割速度低等问题<sup>[1]</sup>。在这种情况下,采用多个独立电源并行放电,并且每个电源给一根经过多圈缠绕的电极丝供电的混合进电方式成为较为可行的解决方案。基于上述思想,本文采用3个电源构建了3×4根切割电极丝构成的超细密网,进行硅材料的电火花线切割。这种切割方式1次能够切割出12片完整硅片,极大地提高了电火花切割半导体材料的速度,同时能够突破单电源功率较小的限制,发挥串行供电方式电源利用率高的优点<sup>[2]</sup>。但是混合进电方式存在不同组间的电极丝切割速率不一致、半导体切缝不均匀、硅片厚度一致性差等问题。为此,本文提出了基于RBF的电火花多电源同步均衡放电控制算法。为了增强控制算法的准确性和实时性,对RBF神经网络作了如下改进:

1) 在加工过程中实时调整数据模型,保证数据模型的准确性。在加工过程中,不断采集加工数据,实时调整数据模型,使得建立的数据模型更符合当前时刻的加工

状态。

2) 将上一次数据模型的权值作为当前时刻神经网络权值调整的初始值,利用动量增量法,进一步加快算法的收敛速度,提高控制系统的实时性。

3) 利用梯度下降法,根据系统的 Jacobian 信息和不同组间电流的差值来共同调整电源脉冲宽度,从而快速减小各组电极丝切割速率的差异性。

## 1 多电源同步均衡放电控制原理

如图1所示,假设在1个放电周期后,A组间隙<B组间隙<C组间隙。间隙越小,单位时间内被击穿的放电点数量越多,相应的放电通道中加工电流越大。若仍以相同的放电参数进行放电切割,则A组电极丝一直在加工间隙较小的状态下进行放电切割,B组电极丝放电状态良好,C组电极丝由于间隙较大,其放电数量较少,因此加工速率较慢。若脉冲电源一直提供较大的放电能量,则会对已经加工好的平面造成损伤,从而导致C组电极丝加工表面质量较差。

针对上述不同组间电极丝放电切割速率不一致的问题,本文提出了基于RBF神经网络的电火花多电源同步均衡放电控制算法,其原理如下:

**基金项目:**江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20160084);中央高校基本科研业务费项目(NS2016056)

**第一作者简介:**焦银亮(1993—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为电火花加工。

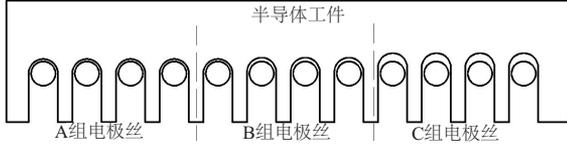


图1 不同组间电极丝切割间隙示意图

$$\begin{cases} q = KW_M f \phi_i \\ W_M = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $q$  为单位时间内电火花放电能量;  $K$  为放电系数;  $W_M$  为单个脉冲电火花能量;  $f$  为电火花放电频率;  $\phi_i$  为电火花放电脉冲宽度。

放电电源参数主要包括放电电压  $U$ 、放电电流  $I$ 、脉冲宽度  $t$  和脉冲周期  $T$ 。放电电压  $U$  越大, 脉冲宽度  $t$  越大, 单个放电脉冲能量越大, 从而蚀除材料的体积越大<sup>[3]</sup>。放电切割过程中, 电压  $U$  基本保持不变, 电流  $I$  无法直接控制调整, 脉冲周期  $T$  在确定最佳值之后基本不作变更。因此, 通过脉冲宽度  $t$  来调整单个脉冲放电能量是最切实可行的方式。

## 2 同步均衡放电控制算法原理

如图2所示, RBF神经网络是一种3层前向的局部逼近网络, 由于输入到输出的映射是非线性的, 而隐含层空间到输出空间的映射是线性的, 因此能够加快学习速度并避免局部极小问题<sup>[4-5]</sup>。将RBF神经网络引入控制系统是利用神经网络的非线性映射能力<sup>[6]</sup>, 在线辨识被控对象的数学模型, 为控制器提供系统 Jacobian 信息  $\partial y / \partial \Delta$  (灵敏度信息), 以便于通过整定算法实时调节加工参数, 这样就构成了具有自适应能力的控制算法<sup>[7-8]</sup>。

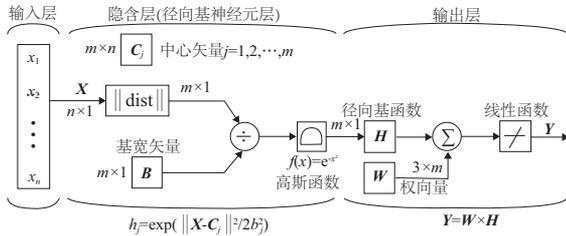


图2 RBF神经网络结构图

RBF神经网络中, 隐含层的输出结果:

$$h_j = e^{-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中:  $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  为神经网络的输入向量;  $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}, \dots, c_{jn}]$  为隐藏层第  $j$  个神经元的中心向量;  $b_j$  为第  $j$  个神经元的基宽参数。网络输出权值:

$$W = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_m] \quad (3)$$

神经网络的输出:

$$Y = W \times h \quad (4)$$

第  $l$  个输出结果与目标值之间的误差:

$$e_l = Y_l^d - Y_l \quad (5)$$

误差指标为:

$$E(t) = \frac{1}{2} e_l^2 \quad (6)$$

利用梯度下降法, 进行权值调整和参数调整:

$$\Delta w_j(t) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial w_j(t)} = \eta e_l h_j \quad (7)$$

$$\Delta b_j(t) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial b_j(t)} = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial h_j(t)} \cdot \frac{\partial h_j(t)}{\partial b_j(t)} =$$

$$\eta \sum_{i=1}^N e_i w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (8)$$

$$\Delta c_{ji}(t) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial c_{ji}(t)} = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial h_j(t)} \cdot \frac{\partial h_j(t)}{\partial c_{ji}(t)} =$$

$$\eta \sum_{i=1}^N e_i w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (9)$$

为了避免权值的调整过程中产生震荡、收敛速度慢的问题, 考虑上次的权值变化对于本次权值调整的影响, 引入动量因子  $\alpha$ , 其值在 0~1 之间<sup>[9]</sup>。

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta \Delta w_j(t) + \alpha (w_j(t) - w_j(t-1)) \quad (10)$$

$$b_j(t+1) = b_j(t) + \eta \Delta b_j(t) + \alpha (b_j(t) - b_j(t-1)) \quad (11)$$

$$c_{ji}(t+1) = c_{ji}(t) + \eta \Delta c_{ji}(t) + \alpha (c_{ji}(t) - c_{ji}(t-1)) \quad (12)$$

Jacobian 阵(即被控对象的输出对控制输入的灵敏度信息)算法为:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial y}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial y}{\partial h_j} \cdot \frac{\partial h_j}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (13)$$

RBF网络隐含层神经元个数取9, 网络结构为5-9-3,  $i = 1, 2, 3, 4, 5, j = 1, 2, 3, \dots, 9$ 。

输入向量  $X = [H, V, t_1, t_2, t_3]$ ; 输出向量  $Y = [y_1, y_2, y_3]$ ; 调整指标  $I = [i_1, i_2, i_3]$ ;  $H$  为当前加工厚度;  $V$  为当前进给速度;  $t_i$  为第  $i$  组电脉冲宽度,  $i = 1, 2, 3$ ;  $i_i$  为第  $i$  组平均电流,  $i = 1, 2, 3$ 。

当前  $k$  时刻, 3组电流的中间值为  $i_{mid}(k)$ , 若3组电流值中存在2组或3组电流值相等, 取相等的电流值为  $i_{mid}(k)$ 。各组电流与中间值的微小偏差量如下:

$$\Delta i_j(k) = i_{mid}(k) - i_j(k) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (14)$$

利用数据模型的灵敏度信息调整脉冲宽度:

$$\Delta t_j(k) = \lambda \cdot \left| \frac{\partial y_{out}}{\partial t_j} \cdot \Delta i_j(k) \right| \quad (j = 1, 2, 3) \quad (15)$$

脉宽调整采用如下策略:

1) 若  $\Delta i_j(k) \leq 0$ , 则:

$$t_j(k+1) = t_j(k) + \Delta t_j(k) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (16)$$

2) 若  $\Delta i_j(k) > 0$ , 则:

$$t_j(k+1) = t_j(k) - \Delta t_j(k) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (17)$$

式中:  $\partial y_j / \partial t_j$  为RBF神经网络辨识所得系统 Jacobian 信息;  $\lambda$  为量化因子;  $\Delta t_j$  为根据电流差值计算出的脉宽调整量。基于RBF的多电源同步均衡控制算法流程如图3所示。

## 3 MATLAB 仿真与分析

根据上述算法流程图, 利用MATLAB建立了如图4所示的Simulink系统仿真模型, 包括仿真数据输入模块与同步均衡控制模块。通过仿真数据输入模块, 将数据输入到仿真系统中, 并建立仿真时间与输入数据之间的关系。同步均衡控制模块根据输入的仿真数据校正RBF数据模

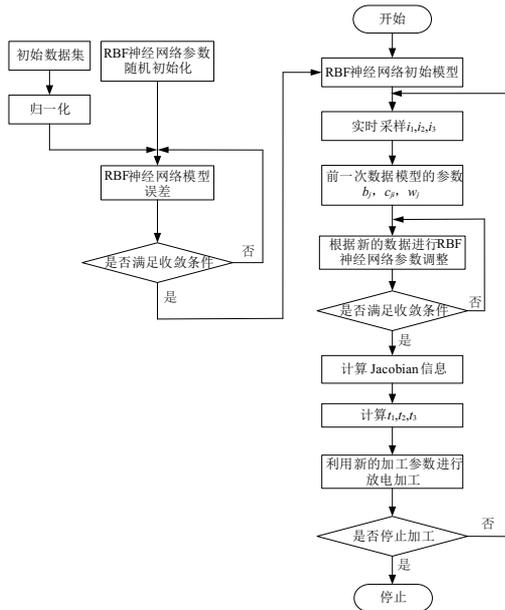


图3 多电源同步均衡放电控制算法流程图

型,并根据3组电流的差值计算新的脉冲宽度。

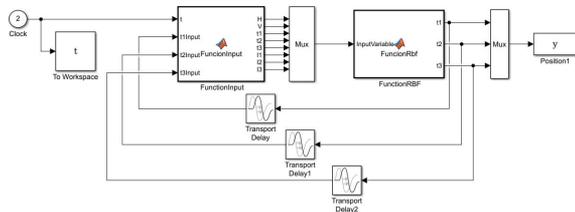


图4 Simulink 仿真系统框图

图5是利用随机值作为参数初始值,根据更新的数据调整神经网络模型的收敛图。图6是将上一次数据模型的权值作为当前时刻神经网络权值调整的初始值并引入动量因子 $\alpha$ 的改进RBF神经网络收敛图。

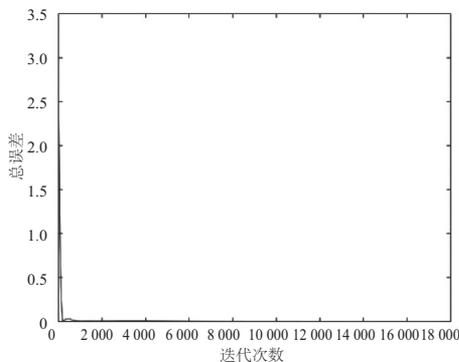


图5 参数随机初始值条件下RBF神经网络收敛图

对比图5与图6可以看出,改进后的RBF神经网络收敛速度大大提高。用随机值作为RBF神经网络参数的初始值,其达到收敛条件的迭代次数接近18000次。而改进的RBF神经网络达到收敛条件的迭代次数接近6100次,远远小于常规RBF神经网络的迭代次数,大大提高了算法

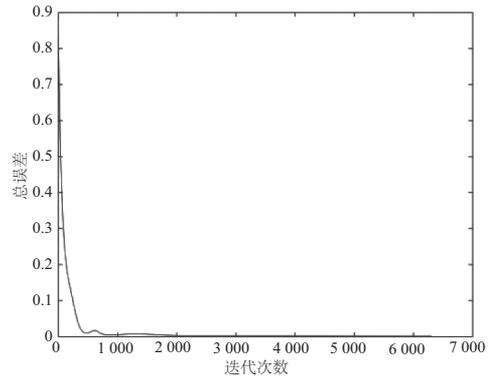


图6 改进的RBF神经网络收敛图

的收敛速度,从而保证控制系统的实时性要求。

如图7、图8所示,在仿真起始阶段,第1路电流值 $i_1$ 最小,第3路电流值 $i_3$ 最大,且3组电流的差值较大,此时对应输出的脉冲宽度 $t_1$ 迅速降低,从而减小脉冲电源的能量,减小材料的蚀除体积,减小第1组电极丝与工件之间的间隙。脉冲宽度 $t_3$ 迅速增加,增大第3组电极丝与工件之间的间隙。仿真时间在1s~1.8s范围内,3组电流差值较小,第1组电流 $i_1$ 最大,此时脉冲宽度 $t_1$ 缓慢增加。第3组电流 $i_3$ 较小,此时脉冲宽度 $t_3$ 缓慢减小。而第2组电流 $i_2$ 比较平稳,因此脉冲宽度 $t_2$ 调整较小。仿真时间在1.8s~2s范围内,3组电流大小基本一致,此时脉冲宽度基本不变。从上述分析中可以看出,同步均衡放电控制算法能够实时动态调整脉冲宽度,使3组电极丝的加工状态保持一致。

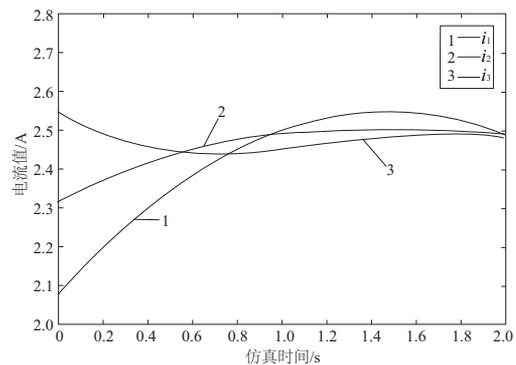


图7 仿真系统电流输入图

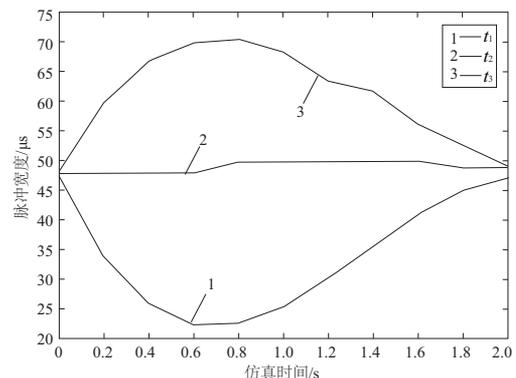


图8 脉冲宽度输出图

## 4 实验与分析

### 4.1 试验样机的搭建

图9是国内首创的混合进电硅材料电火花超细密线网机床样机,图10是3×4根切割电极丝构成的超细密线网空间排布图。如图10所示,在空间中错位排布多线集聚切割导轮组,电极丝反复缠绕在多槽导轮的导线槽中,在垂直进给方向上构成间距仅为0.6mm的12根电极丝切割线网。



图9 混合进电电火花多线切割机床实物图



图10 细密线网空间排布图

### 4.2 切缝宽度分析

图11(a)是多电源同步均衡控制算法条件下切割出的半导体硅材料的切缝形貌图,图11(b)是利用定脉宽条件下切割出的切缝形貌图,由于显微镜视野大小的限制,只能观测到4条切缝的情况。

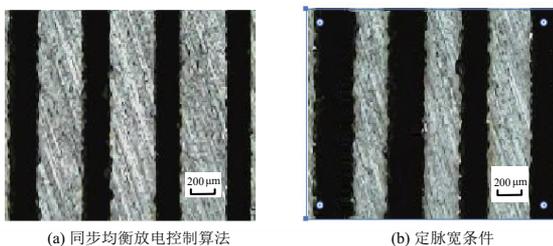


图11 不同条件下得到的切缝形貌图

如图11(a)所示,利用同步均衡放电控制算法得到的

切缝宽度较小,且边沿较为平整,同时各组之间切缝基本相同。根据表1中数据得知,各组之间的切缝宽度差异 $<10\ \mu\text{m}$ ,切缝平均值为 $198\ \mu\text{m}$ 。从图11(b)中可以看出,在定脉宽条件下进行放电切割半导体硅材料,切割出的切缝宽度较大,边沿毛刺较为严重,同时组与组之间切缝宽度差距较大,最大切缝差值 $>20\ \mu\text{m}$ ,切缝的平均值为 $231\ \mu\text{m}$ (表2)。上述实验结果表明,利用多电源同步均衡放电控制算法得到的硅片切缝宽度远远小于定脉宽条件下切割出的硅片切缝宽度,同时保证不同组间的电极丝切缝较为均匀,硅片厚度一致性较好。

表1 同步均衡放电控制算法条件

下得到的切缝宽度表		单位: $\mu\text{m}$			
分组名称	切缝1	切缝2	切缝3	切缝4	
组1	194	198	196	198	
组2	196	197	198	202	
组3	198	203	202	202	

表2 定脉宽条件下得到的切缝宽度表 单位: $\mu\text{m}$

分组名称	切缝1	切缝2	切缝3	切缝4
组1	236	234	242	236
组2	224	218	228	224
组3	238	231	234	234

### 4.3 表面粗糙度分析

不同条件下,3组电极丝切割的硅片表面粗糙度数值如表3~表4所示。

表3 同步均衡放电控制算法下

切片表面粗糙度数值表		单位: $\mu\text{m}$			
分组名称	$Ra1$	$Ra2$	$Ra3$	$Ra4$	
组1	2.84	2.91	2.95	2.89	
组2	2.77	2.81	2.74	2.85	
组3	3.02	2.94	2.97	2.92	

表4 定脉宽条件下切片

表面粗糙度数值表		单位: $\mu\text{m}$			
分组名称	$Ra1$	$Ra2$	$Ra3$	$Ra4$	
组1	3.78	3.85	3.91	3.88	
组2	3.42	3.51	3.49	3.53	
组3	3.95	3.87	3.93	3.88	

根据表3和表4中数据对比分析可以得知,利用多电源同步均衡放电控制算法,消除了各组之间电极丝切割速率的差异性,因而保证切割出的硅片表面质量基本相同。利用多电源同步均衡放电控制算法切割出的半导体硅片的表面粗糙度平均值为 $2.84\ \mu\text{m}$ ,而定脉宽条件下切割出的硅片表面粗糙度平均值为 $3.75\ \mu\text{m}$ 。可见,本文提出的控制算法能够解决多电源混合进电方式中存在的电极丝

切割速率不一致的问题,从而得到较好的工件表面质量。

### 5 结语

针对混合进电硅材料电火花超细密线网切割方法中存在的不同组间电极丝切割速率不一致的问题,提出了基于 RBF 的多电源同步均衡控制算法,在加工过程中根据更新的数据不断调整神经网络模型,并将上一次数据模型的权值作为当前时刻神经网络权值调整的初始值,提高了所建立模型的准确性。通过引入动量增量法与梯度下降法,进一步加快了算法的收敛速度,提高了伺服控制系统的实时性。Simulink 仿真与硅片切割试验结果表明所提出的算法切实有效。

#### 参考文献:

[1] 史勇. 太阳能硅片电火花双线运丝结构设计及切割工艺研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

[2] 吴法彦. 多线电火花线切割加工装置设计及实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[3] CHEN H R, LIU Z D, HUANG S J, et al. Study of the mechanism of multi-channel discharge in semiconductor processing by WEDM [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 32:125-130.

[4] LIU K, WU Y, ZHU T, et al. Improved RBF network torque control in flexible manipulator actuated by PMAs[J]. Robotica, 2018,37(2):1-17.

[5] ZHANG S P, DING Y C, WANG J, et al. Application of RBF Neural Network in WEDM [J]. Advanced Materials Research, 2012, 468/469/470/471:607-612.

[6] 乔俊飞,韩红桂. RBF 神经网络的结构动态优化设计[J]. 自动化学报,2010,36(6):865-872.

[7] 陈益飞. RBF 神经网络的 PID 控制研究与仿真[J]. 计算机仿真,2011,28(4):212-215

[8] 张静,裴雪红. 基于 RBF 在线辨识的 PID 整定[J]. 电机与控制学报,2009,13(a01):157-160.

[9] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2016.

收稿日期:2019-02-09

(上接第 129 页)

由图 6 和图 7 可知,该副车架在完成全套耐久测试后,其最大损伤值为 1.43;超过了临界值 1;最大损伤位置位于转向机安装支架根部。

### 3.3 计算对比分析

对比两种分析方法的损伤云图可以看出,采用模态应力法的损伤值和损伤面积要明显大于采用准静态方法的结果,对副车架的关键点损伤结果进行数据对比,见表 2。

表 2 副车架关键点的损伤值对比

位置	模态应力结果	准静态结果
转向机支架根部	1.429	0.049
车身连接支架上部	0.451	0.023
稳定杆安装支架根部	0.105	0.006
车身连接支架下部	0.015	0.001
前车身安装点	0.173	0.005

从结果对比可以看出:

1) 采用准静态方法分析的结果全部满足使用寿命要求,其最大值为 0.05。采用模态应力法的分析结果在局部出现了损伤大于 1 的情况,说明其寿命不足。

2) 从整体结果来看,采用模态应力法计算结构损伤要远大于准静态的分析结果,但结果对比并不会呈现出线性关系。这是因为在结构局部刚度不同,导致对激励的响应并不会出现按比例放大的特性。

3) 在实际路试中,由于路况比较严苛,一般副车架都会出现轻微的损伤开裂情况,这说明,准静态方法在处理

疲劳损伤的过程中,其分析结果偏保守,不能充分避免设计的缺陷。

### 4 结语

在工程中,大多数工况都是动态的,在某些特定条件下(如加载时间很长,质量极小等),结构的响应可以采用准静态的方法进行近似,这对于简化分析流程和减小数据输入都很有帮助。但对于频率较高的激励(>20 Hz),会带来较大的误差。采用模态应力法既能考虑动态响应的影响,也能排除高频激励(>200 Hz)的影响,同时并不会增加计算成本,对提高计算精度,协助车身结构设计都有很好的帮助。

#### 参考文献:

[1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[2] 林家浩,张亚辉. 结构动力学基础[M]. 大连:大连理工大学出版社,1998.

[3] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.

[4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[5] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[6] 蒋荣超,王登峰,秦民,等. 基于疲劳寿命的轿车后悬架扭转变形轻量化设计[J]. 吉林大学学报(工学版),2016,46(1):35-42.

[7] 周伟,周宁,王东栋,等. 基于 HyperWorks 的车身结构刚度与模态分析[J]. 机械制造与自动化,2015,44(2):139-142,163.

[8] 欧阳黎健. 车体疲劳强度设计及疲劳寿命预测方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2019(3):42-45.

收稿日期:2020-01-14