

文章编号:1006-1355(2018)05-0057-05

变步长CFxLMS算法及其在电梯噪声主动控制中的仿真

马英博, 吴亚锋, 杨鑫博

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘要:提出一种改进的CFxLMS(Correlation FxLMS)算法,该算法使用滤波参考信号与误差信号的相关函数控制步长更新。即随着相关函数的减小,步长也逐渐减小,从而提高了算法的实时性,较好地解决了传统FxLMS算法因步长固定带来的稳态误差大和实时跟踪能力弱的问题。为进一步验证改进算法的性能,将CFxLMS算法应用于高速电梯的轿厢内噪声主动降噪仿真中,并与FxLMS算法的结果进行对比。

关键词:声学;主动噪声控制;变步长;Correlation FxLMS(CFxLMS)算法;电梯噪声;仿真计算

中图分类号:TB535

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.05.010

CFxLMS Algorithm with Variable Step Size and its Application to Simulation of Elevator Cabin Noise Active Control

MA Yingbo, WU Yafeng, YANG Xinbo

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: A modified CFxLMS(Correlation FxLMS) algorithm is proposed. In this algorithm, the correlation function of the filtered reference-error signal is used to control the step size updating. The step size decreases with the decrease of the correlation function, thereby the real-time capability of the algorithm is improved, and the inherent contradiction of the FxLMS algorithm between convergence speed and stable error is overcome. For further verification, the CFxLMS algorithm is applied to active noise control of high speed elevator cabins. Simulation results are compared with the results of the FxLMS algorithm.

Keywords: acoustics; active noise control; variable step size; correlation FxLMS(CFxLMS) algorithm; elevator noise; simulation computation

主动噪声控制(Active Noise Control)是一种噪声控制的新技术^[1]。它根据源噪声的特性,通过自适应控制系统(adaptive control system)人为地产生一同频、反相、等幅的抵消声场,从而达到降低源噪声的目的。

在主动噪声控制系统^[1]中,自适应滤波器(Adaptive Filter)是其核心技术。其中最常用的滤波算法是滤波-x最小均方(Filter-x LMS)算法,该算法具有计算量小,易于实现,稳定性好等特点。在FxLMS算法中,步长是决定算法收敛速度和稳态误

差的关键因素,增大步长可加快算法的收敛速度,但同时会增大稳态误差,甚至导致算法发散。为此,人们提出了变步长的改进思路^[2-3],即:在算法收敛初期步长较大,以便有较快的收敛速度和对时变系统的跟踪速度;随着算法收敛的进行,步长逐渐减小;在算法收敛末期步长很小,以便有较小的稳态误差。

基于这一想法,本文在传统FxLMS算法的理论基础上,根据参考-误差信号互相关函数,提出了一种变步长CFxLMS(Correlation FxLMS)算法。分别对FxLMS算法和本文提出的CFxLMS算法的收敛性能进行了仿真分析,并将其应用于电梯运行时轿厢内部实测数据的仿真降噪中。

1 CFxLMS算法

1.1 传统FxLMS算法

传统FxLMS算法框图如图1所示。

收稿日期:2017-07-13

作者简介:马英博(1995-),男,陕西省咸阳市人,硕士研究生。主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: adam9501@mail.nwpu.edu.cn

通信作者:吴亚锋(1961-),男,西安市人,博士生导师。

E-mail: yfwu@nwpu.edu.cn

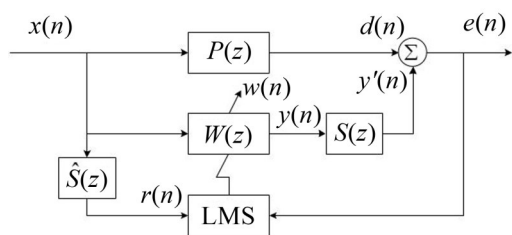


图1 传统FxLMS算法框图

图中： $W(z)$ 是自适应滤波器； $P(z)$ 是噪声源到误差传感器之间声音传播路径的传递函数，称为初级通道传递函数； $S(z)$ 是次级通道传递函数， $\hat{S}(z)$ 是次级通道传递函数的估计。 $x(n)$ 是噪声源信号， $e(n)$ 是误差传感器测量信号。 $x(n)$ 经 $\hat{S}(z)$ 得到滤波参考信号 $r(n)$ ， $r(n)$ 和 $e(n)$ 作为控制器的输入信号，经处理后得到次级控制信号 $y(n)$ 。 $y(n)$ 经次级通道传递函数，在误差传感器处得到一个和原噪声 $d(n)$ 幅值相等、相位相反的抵消噪声 $y'(n)$ ，从而达到降噪的目的。

传统FxLMS算法具体如下^[4-5]

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (1)$$

$$y'(n) = s(n) * y(n) \quad (2)$$

$$r(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (3)$$

$$e(n) = d(n) - y'(n) \quad (4)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu r(n) e(n) \quad (5)$$

式(5)中：步长 μ 是一个固定的常量，取值需满足^[6]

$$0 < \mu < 2/LP_x \quad (6)$$

式(6)中： L 是自适应滤波器 $W(z)$ 的阶数， P_x 是滤波参考信号 $r(n)$ 的功率。FxLMS算法的固有矛盾在于 μ 取值较小能获得较小的稳态误差，但算法收敛速度慢； μ 取值增大，算法的收敛速度得以提高，但以较大的稳态误差为代价。

1.2 CFxLMS算法

式(5)中，步长 μ 是决定传统FxLMS算法收敛速度和稳态误差的关键因素，固定步长 μ 使得算法无法兼顾收敛速度和稳态误差，需在这两个性能间取折中。一种解决方法^[7]是用步长 μ 除以误差信号 $e(n)$ 的欧氏平方范数，即

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\beta + \|e(n)\|^2} \quad (7)$$

式(7)中：固定收敛因子 α 需精心选择，以便在收敛速度和稳态误差之间达到平衡。 $\|e(n)\|^2 = \sum_{i=1}^n |e(i)|^2$

是从算法迭代开始到 n 时刻迭代的过程中所有误差量的平方值之和。随着迭代次数的增加， $\|e(n)\|^2$ 不断增大，步长 $\mu(n)$ 是一个平滑下降的函数，从而保证在算法收敛末期步长较小，有效地减小了算法的稳态误差；但这一特点使该算法对于非平稳随机过程，

系统跟踪能力较弱。因此，有必要对这一算法加以改进，以提高算法的实时性。

分析传统FxLMS算法框图可知，在算法收敛初期，自适应滤波器权值 $\mathbf{w}(n)$ 远离最优权值 $\mathbf{w}^o(n)$ ， $r(n)$ 和 $e(n)$ 相关度高，此时步长 μ 应较大以保证算法有较快的收敛速度；在算法收敛末期，自适应滤波器权值 $\mathbf{w}(n)$ 接近最优权值 $\mathbf{w}^o(n)$ ， $r(n)$ 和 $e(n)$ 相关度低，此时步长 μ 应很小以保证算法有较小的稳态误差。由此可知， $r(n)$ 和 $e(n)$ 的相关函数和步长的取值成正相关，故可在算法的迭代过程中使用 $r(n)$ 和 $e(n)$ 的相关函数来调整步长的取值。

CFxLMS算法将固定步长 μ 改为可变步长函数 $\mu(n)$ ，并取滤波参考信号 $r(n)$ 和误差信号 $e(n)$ 的相关函数 $C(n)$ 来调整步长函数 $\mu(n)$ ，即

$$\mu(n) \propto C(n) \quad (8)$$

式(8)中： n 时刻 $C(n)$ 为

$$C(n) = E[r(n)e(n)] = \frac{\sum_{i=1}^n r(i)e(i)}{n} \quad (9)$$

$n-1$ 时刻 $C(n-1)$ 为

$$C(n-1) = E[r(n-1)e(n-1)] = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} r(i)e(i)}{n-1} \quad (10)$$

式(9)、式(10)相减，得

$$C(n) = \frac{n-1}{n} C(n-1) + \frac{1}{n} r(n)e(n) \quad (11)$$

令 $\gamma = \frac{n-1}{n}$ ，得

$$C(n) = \gamma C(n-1) + (1-\gamma) r(n)e(n) \quad (12)$$

CFxLMS算法将 $C(n)$ 引入式(7)中，在保证步长函数 $\mu(n)$ 平滑下降的基础上，提高了算法的实时性。综上所述，CFxLMS算法具体如下

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (13)$$

$$y'(n) = s(n) * y(n) \quad (14)$$

$$r(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (15)$$

$$\mu(n) = \frac{\alpha C(n)}{\beta + \|e(n)\|^2} \quad (16)$$

$$C(n) = \gamma C(n-1) + (1-\gamma) r(n)e(n) \quad (17)$$

$$e(n) = d(n) - y'(n) \quad (18)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu(n) r(n) e(n) \quad (19)$$

CFxLMS算法框图如图2所示。

由图2可知，在算法收敛初期，由于 $r(n)$ 和 $e(n)$ 相关度高， $C(n)$ 的值较大，因此步长函数 $\mu(n)$ 也较大，算法有较快的收敛速度；在算法接近收敛时， $r(n)$ 和 $e(n)$ 相关度降低， $C(n) \rightarrow 0$ ，因此步长函数 $\mu(n)$ 很小，算法有较小的稳态误差；此时若输入信号 $x(n)$ 发生突变， $r(n)$ 和 $e(n)$ 的相关度迅速增加， $C(n)$ 由小变大，步

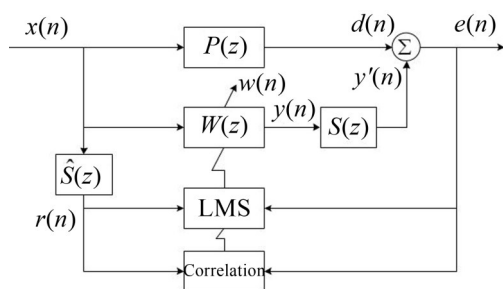


图2 CFxLMS算法框图

长函数 $\mu(n)$ 也随即由小变大,算法收敛速度变快。

CFxLMS算法有3个参数 α 、 β 和 γ 。 α 控制步长取值范围; β 是一个取值较小的正常量; γ 控制滤波参考信号 $r(n)$ 和误差信号 $e(n)$ 的相关函数 $C(n)$ 在步长迭代中所占的权重比,取值 $0 < \gamma < 1$,系统对实时性要求越高, γ 取值应越小。

2 算法性能分析

本节通过仿真对比在不同信噪比条件下,传统FxLMS算法和CFxLMS算法的收敛性能。具体做法是给定一输入混合噪声信号 $x(n)=s(n)+r(n)$;其中 $s(n)=\sin(2\pi \cdot 60 \cdot (n/fs)) + 0.4 \cdot \sin(2\pi \cdot 120 \cdot (n/fs)) + 0.1 \cdot \sin(2\pi \cdot 180 \cdot (n/fs))$ 为正弦输入噪声,采样频率 $fs=1\ 000\text{ Hz}$, $n=0,1,2,\dots,10\ 000$; $r(n)$ 为在已知 $s(n)$ 和预期SNR条件下,推算出的背景白噪声;自适应滤波器阶数为32;传统FxLMS算法初始参数设置为 $\mu=0.01$;CFxLMS算法初始参数设置为 $\alpha=25$, $\beta=0.01$, $\gamma=0.7$ 。

仿真结果如图3—图5所示。

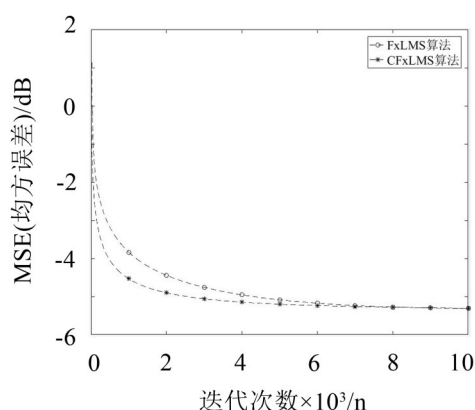


图3 SNR=30 dB时各算法收敛曲线

图3—图5分别是不同信噪比下,传统FxLMS算法和CFxLMS算法的收敛曲线图。图3中SNR=30 dB,传统FxLMS算法的收敛速度稍慢于CFxLMS算法的收敛速度,两种算法的稳态误差均较小。图4中,增加白噪声的方差,此时传统FxLMS算法的稳态误差变大;CFxLMS算法仍可保持和此前SNR=30 dB条件下接近的稳态误差。图5中,继

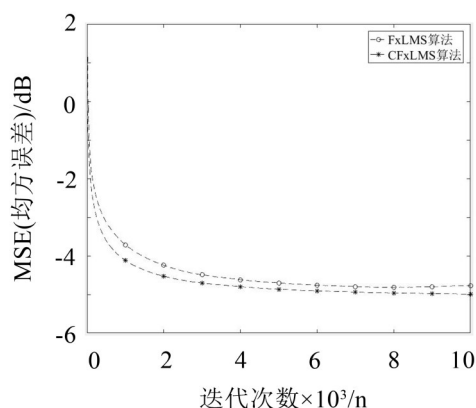


图4 SNR=10 dB时各算法收敛曲线

续增加白噪声的方差,传统FxLMS算法的收敛速度明显变慢,稳态误差明显增大;CFxLMS算法的收敛速度稍有变慢,稳态误差稍有变大。

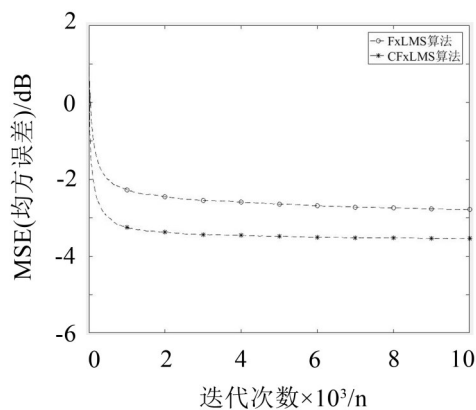
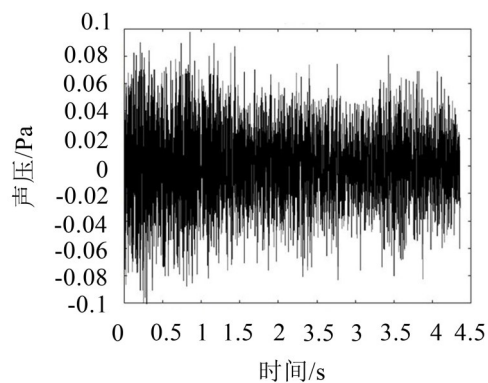


图5 SNR=0 dB时各算法收敛曲线

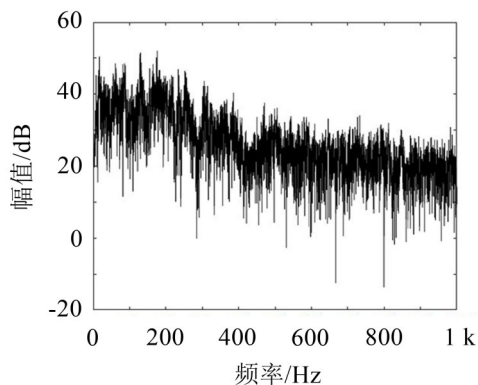
由图3—图5的对比可以看出,当信噪比较高时,传统FxLMS算法和CFxLMS算法均有较好的收敛性能和稳态性能。当信噪比较低时,传统FxLMS算法收敛速度慢,稳态误差大;而CFxLMS算法仍保持较快的收敛速度,且稳态误差较小,因此传统FxLMS算法对噪声更敏感,相比之下CFxLMS算法抗噪性能更好。

3 高速电梯轿厢噪声主动控制仿真

在高速电梯(额定速度大于500 m/min^[8])加、减速运行阶段,电梯速度急剧变化,导轮与导轨之间的摩擦、旋转部件与曳引绳之间的摩擦等会在电梯轿厢内部产生严重的低频(400 Hz以下)、非平稳振动噪声^[9]。本节通过计算机仿真对比传统FxLMS算法和本文提出的CFxLMS算法对某型高速电梯实际减速运行时轿厢内部所录制的实测噪声ANC效果。实测噪声如图6所示,仿真结果见图6—图8。图6(a)为高速电梯轿厢内高度1.7 m中心位置处测得的噪声时域图,图6(b)为其频谱分布图(部分)。



(a) 时域图



(b) 频域图(部分)

图6 实测噪声时域图与频域图

由图可知,电梯轿厢内的噪声能量主要集中在0~300 Hz的频段。

图7是传统FxLMS算法和CFxLMS算法对该噪声进行主动控制的算法收敛曲线对比图。

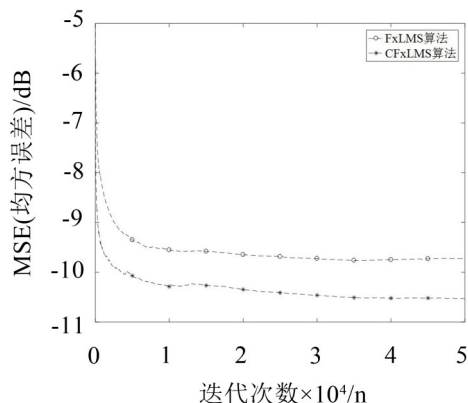


图7 算法收敛曲线对比图

由图7的曲线看到,传统FxLMS算法收敛性能差,稳态误差大,而本文提出的CFxLMS算法收敛速度更快,稳态误差更小。

图8绘出了对电梯轿厢噪声进行ANC后的噪声变化情况。

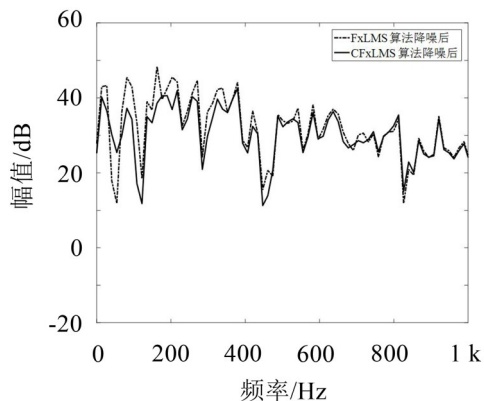


图8 频域降噪效果对比图

结果显示,传统FxLMS算法和CFxLMS算法对于实测数据均有降噪效果,相比之下CFxLMS算法

对电梯减速运行噪声ANC处理结果较传统FxLMS算法平均可再降4 dB~5 dB,最高频率点可再降9.4 dB。

表1是使用传统FxLMS算法和CFxLMS算法分别对电梯加速、匀速、减速运行的3个阶段轿厢内部实测噪声数据20次主动仿真降噪的平均降噪量。

表1 高速电梯加速、匀速、减速运行时算法平均降噪量/dB

	加速		
	降噪前	降噪后	降噪量
FxLMS	75.6	72.8	2.8
CFxLMS	75.6	66.5	9.1
降噪差		6.3	
	匀速		
	降噪前	降噪后	降噪量
FxLMS	78.6	75.0	3.6
CFxLMS	78.6	70.3	8.3
降噪差		4.7	
	减速		
	降噪前	降噪后	降噪量
FxLMS	74.2	72.5	1.7
CFxLMS	74.2	66.4	7.8
降噪差		6.1	

由表1可以看出,CFxLMS算法在电梯运行的3个阶段与FxLMS算法相比的降噪量变化依次为6.3 dB、4.7 dB、6.1 dB,说明CFxLMS算法实时性好,系统跟踪能力强。

4 结 语

传统FxLMS算法由于其固定的步长无法兼顾收敛速度和稳态误差。本文在传统FxLMS算法和变步长理论上提出了一种新的变步长FxLMS算法,新算法将步长函数与滤波参考信号与误差信号的相关函数相关联。在算法收敛初期步长取较大值,使其有较快的收敛速度,在算法收敛末期步长取

较小值,使其有较小的稳态误差,从而较好地解决了传统FxLMS算法的固有矛盾。仿真结果表明,新算法与传统FxLMS算法相比可以更好地兼顾收敛速度和稳态误差,且有更好的抗噪性能。为进一步验证改进算法的性能,将其应用于高速电梯噪声ANC仿真处理,取得了满意的效果。

参考文献:

- [1] 王春云,吴亚锋,杨浩,等.多通道自适应主动噪声控制系统设计及实验[J].**测控技术**,2011,30(8):57-59.
- [2] 张红梅,韩万刚.一种新的变步长LMS自适应滤波算法研究及其应用[J].**仪器仪表学报**,2015,36(8):1822-1830.
- [3] LI M, LI L, TAI H M. Variable Step Size LMS Algorithm Based on Function Control[J]. **Circuits Systems & Signal Processing**, 2013, 32(6): 3121-3130.
- [4] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control: a tutorial review[J]. **Proceedings of the IEEE**, 1999, 87(6): 943-973.

- [5] ARDEKANI I T, ABDULLA W H. FxLMS-based active noise control: A quick review[C]. Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual (APSIPA) Summit and Conference, Xi'an, China. 2011.
- [6] HAE-JIN LEE, GYEONG-TAE LEE, JAE-EUNG OH. Active control of automotive intake noise under rapid acceleration using the Co-FXLMS algorithm[J]. **Journal of System Design and Dynamics**, 2010, 4(3): 429-439.
- [7] 孙娟,王俊,刘斌.基于相对误差互相关函数的变步长LMS算法[J].**系统工程与电子技术**,2008,30(12):2316-2320.
- [8] YANG I, JEONG J, JEONG U, et al. Improvement of noise reduction performance for a high-speed elevator using modified active noise control[J]. **Applied Acoustics**, 2014: 58-68.
- [9] 王晓伟,于艳杰,张瑞军,等.高速曳引电梯噪声研究综述[J].**噪声与振动控制**,2014,34(3): 1-5.

(上接第56页)

表3 备选设计点

序号	P1/mm	P2/mm	P3/mm	P4/kg	P5/Hz	P6/Hz	P7/Hz
1	4.46	50.74	227.71	47.10	165.68	172.62	197.19
2	4.32	51.86	245.29	47.41	167.07	173.88	197.14
3	4.48	53.74	266.38	47.99	170.01	179.54	202.29

5 结 语

本文利用数值仿真与试验验证相结合的方法对9R-40饲草揉碎机转子进行模态分析及结构优化,得出如下结论:

(1) 试验各阶频率与数值计算各阶频率基本相同,与自由模态频率最大相对误差为2.7%,可见所建立理论模型及数值计算结果是可信的;预应力模态与自由模态比较表明,预应力使转子结构固有频率有所提高,第1、2、3阶频率提高幅度较大,分别提高了14.01%、12.01%、10.54%。

(2) 转子预应力模态第1阶频率为147.43 Hz与激振频率基频140 Hz较为接近,避开率为5.03%,极易发生共振,故需进行优化。

(3) 采用响应面法优化后转子预应力模态第1阶频率与基频激振频率避开率由5.03%提高到15.49%,转子预应力模态第2阶频率与2倍频激振频率避开率为62.21%,转子预应力模态第3阶频率与3倍频激振频率避开率为112.30%,总质量减小了1.06%,节约了材料,提升了转子动态特性。且优化后的转子强度和刚度满足使用要求。

参考文献:

- [1] 刘刚,赵满全,康卫东.9R-40型秸秆揉碎机喂入装置设计与研究[J].**农机化研究**,2009,48(1):94-96.
- [2] 王娟.9R-40型揉碎机噪声分析研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [3] 麻乾,刘飞,赵满全.基于滑移网格技术的揉碎机内流场研究[J].**农机化研究**,201612:14-18.
- [4] 赵艳琼.基于流固耦合的秸秆抛送叶轮有限元分析及动态特性优化[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2016.
- [5] 熊永华,杜发荣,高峰.轻型载货汽车车架动态特性分析与研究[J].**机械设计**,2007,24(4):60-62.
- [6] 李旺益.纯模态激光测试法的研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [7] 王钰栋,金磊,洪清泉,等. Hypermesh & HyperView 应用技巧与高级实例[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [8] 卢喜凤.实验模态分析与激光测振技术研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [9] 张俊龙,张劲夫.非惯性系下旋转叶片的动力学分析[J].**机械科学与技术**,2010,29(5): 570-573.
- [10] 王建礼,赵晓璐,廖猜猜,等.风力机叶片固有频率优化设计研究[J].**工程热物理学报**,2010,31(11):1843-1846.