

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.11.022

# 基于粒子群算法的直升机扭振系统传递函数辨识

刘立坤\*, 霍幸莉, 王东森, 周友明

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:** 为识别扭振系统传递函数, 完成结构动力学建模, 以某型直升机为例, 利用试验扫频数据将扭振系统激励响应数  
据计算所得的频响函数与理论模型频响函数的差值作为粒子群算法优化目标, 通过拟合扭振系统的伯德图 (Bode Diagram)  
完成系统参数辨识。结果表明, 粒子群算法能够有效辨识扭振系统传递函数, 为结构动力学建模提供依据。

**关键词:** 扭振系统; 参数辨识; 粒子群算法; 伯德图拟合; 传递函数

中图分类号: V217 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 11-0022-05

直升机扭振系统的参数辨识可为建立其结构动力学模型提供可靠依据, 常见的辨识方法主要有频域法和时域法两类。频域法利用输入输出所得频响函数识别系统参数; 时域法利用系统响应的时间历程曲线识别系统参数。目前常见的小波分析法、希尔伯特-黄转换 (Hilbert-Huang Transform) 等则是时域与频域结合的时频域分析方法。

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO), 也称为鸟群觅食算法, 由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出<sup>[1]</sup>。因其容易实现、精度高、收敛速度快等特点, 广泛应用于自动控制系统、滤波器设计、通信网络、金融预测等方面<sup>[2-4]</sup>。但粒子群优化算法在直升机扭振系统参数辨识中的应用较少。本文利用某型直升机试验扫频数据, 通过将系统参数辨识问题转化为优化问题, 结合粒子群优化算法进行扭振系统传递函数辨识。

## 1 粒子群算法

粒子群算法源于复杂适应系统, 具有进化及群体智能的特点<sup>[5]</sup>。通过模拟鸟群觅食的过程, 达到群体智能的目的。粒子群算法首先在搜索空间中随机初始化一群粒子, 每

个粒子代表该空间内的一个可行解, 对应于目标函数它就有了相应的适应度值, 寻优的过程中粒子追随当前的最优粒子在解空间内搜索最优值。假定搜索空间的位数为  $d$ , 粒子种群的规模为  $S$ , 第  $i$  个粒子的位置和速度分别为:

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T, i = 1, 2, \dots, S \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})^T, i = 1, 2, \dots, S \quad (2)$$

用  $P_i$  和  $P_g$  分别表示到目前为止第  $i$  个粒子的最优位置和整个粒子群的最优位置, 则种群的演化规则如下:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(P_{id} - x_{id}) + c_2r_2(P_{gd} - x_{id}) \quad (3)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (4)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为认知学习因子和社会学习因子, 分别表示粒子自身的经验和种群的经验对该粒子位置移动作用的大小;  $P_{id}$  为粒子本身的历史最优值,  $P_{gd}$  表示第  $d$  维整个粒子群全局最优值;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数;  $w$  为影响算法收敛速度的权值, 其上下边界值分别为  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$ 。在每次的粒子群迭代更新过程中, 通过比较每次迭代的适应度函数值  $J$  来更新  $P_{id}$  和  $P_{gd}$ 。

粒子群算法过程如下:

(1) 利用扫频激励或随机激励, 由线性系统产生  $T$  个离

收稿日期: 2017-08-06; 退修日期: 2017-08-17; 录用日期: 2017-10-17

\* 通信作者. Tel.: 029-86838039 E-mail: 18591937802@163.com

引用格式: LIU Likun, HUO Xingli, WANG Dongsan, et al. Identification of transfer function of helicopter torsional vibration system based on particle swarm optimization algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (11): 22-26. 刘立坤, 霍幸莉, 王东森, 等. 基于粒子群算法的直升机扭振系统传递函数辨识 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (11): 22-26.

散时间输入、输出数据  $\{u(t), y(t)\}$ , 其中  $t$  为 1 至  $T$  的一系列离散时间点。

(2) 确定粒子种群规模  $S$ 、维数大小  $d$ 、粒子的位置向量和对应的速度矢量, 确定粒子运动位置和速度范围以及最大进化次数。

(3) 初始化最优个体  $P_{gd}$  和粒子本身历史最优值  $P_{id}$ , 计算各个粒子的适应度值  $J$ , 检查是否达到代数要求。若不满足要求, 则更新粒子位置和速度产生新种群, 重新调用适应度子函数, 计算个体适应度值; 若满足代数要求, 则输出优化结果。

## 2 粒子群算法识别系统模态参数

多自由度黏性阻尼线性系统传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1 s + \dots + a_{2N} s^{2N}}{b_0 + b_1 s + \dots + b_{2N} s^{2N}} \quad (5)$$

式中:  $N$  为系统模态阶数;  $a_k, b_k (k=0, 1, \dots, 2N)$  为待定系数, 均为有理数。

令  $s=j\omega$ , 得到频响函数为:

$$H(j\omega) = \frac{a_0 + a_1(j\omega) + \dots + a_{2N}(j\omega)^{2N}}{b_0 + b_1(j\omega) + \dots + b_{2N}(j\omega)^{2N}} \quad (6)$$

对一系列频率点  $\omega = \omega_i (i=0, 1, \dots, 2L)$ , 实测频响函数  $\tilde{H}_i$  与理论频响函数  $\tilde{H}(j\omega_i)$  幅值与相位的差值分别为:

$$\tilde{e}_{Ai} = A_i - A(j\omega_i) \quad (7)$$

$$\tilde{e}_{\Phi i} = \Phi_i - \Phi(j\omega_i) \quad (8)$$

用和方差  $e_i$  作为伯德图拟合误差指标,  $w_i$  为权重系数, 则有:

$$e_i = \sum_{j=1}^n w_{i1}(e_{Ai}) + \sum_{j=1}^n w_{i2}(e_{\Phi i}) \quad (9)$$

定义误差目标函数为:

$$\{e\} = \{e\}^H \{e\} \quad (10)$$

最终的优化目标函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{E(\theta)\} \\ \theta = (a_0, a_1, \dots, a_{2N}, b_0, b_1, \dots, b_{2N}) \end{array} \right\} \quad (11)$$

将目标函数带入粒子群算法, 即可辨识出包含系统模态参数的待定系数  $a_k, b_k (k=0, 1, \dots, 2N)$ 。

## 3 扭振系统传递函数参数辨识

在初步建立的仿真模型基础上, 通过仿真试验对该方法进行了验证, 并对比了仿真系统和所辨识系统的频响特性。之后利用某型直升机扭振系统试验扫频数据, 采用粒

子群优化算法, 对该型直升机扭振系统的传递函数进行了辨识。

### 3.1 仿真辨识

图 1 为某型直升机扭振系统与发动机系统耦合所构成系统的方框图<sup>[6]</sup>, 即为一个单输入单输出系统, 输入量为动力涡轮参考转速  $R_{np}$ , 输出量为动力涡轮测量转速  $\Delta N_{pt}$ 。其中,  $G_1(s)$  为包含结构模态信息的负载模型,  $G_2(s)$  为燃气发生器模型,  $G_3(s)$  为自由涡轮模型,  $G_4(s)$  为发动机燃油调节控制机构模型,  $G_5(s)$  为外环转速控制器模型。

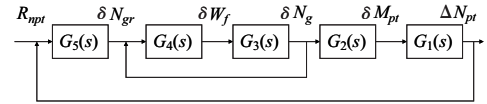


图 1 某型直升机扭振系统与发动机系统耦合系统方框图

Fig.1 Block diagram of the coupled system consist of a helicopter's engine control system and torsional vibration system

将反馈信号(动力涡轮转速信号测量值)从输入端断开, 得到开环系统。根据上述系统各个子模型的输入输出序列估计未知参数。设置输入为扫频激励信号, 考虑到耦合系统固有频率为 3Hz 左右, 实际选取扫频范围为 0.5~4Hz。综合考虑计算精度和计算时间, 确定粒子群迭代次数  $k=2000$  次, 粒子种群个数 100, 初始化影响算法收敛速度的权值  $w_{\max}=0.9$  和  $w_{\min}=0.4$ , 初始化认知学习因子  $c_1=1.3$  和社会学习因子  $c_2=1.7$ , 确定粒子运动位置范围为  $[0, 2]$ , 粒子运动速度范围为  $[-1, 1]$ , 粒子最大速度为速度变化范围的 10%~20%。

根据系统的激励响应数据, 确定估计参数对应的适应度函数为系统频响函数幅值和相位的和方差。

$$J_i^k = \sum_{j=1}^T \{(y_i - y(j\omega_i))^2\} \quad (12)$$

式中:  $T$  为激励时间;  $y$  为系统频响函数的幅值和相位序列,  $k$  为迭代次数。

图 2 为粒子群算法经过迭代后拟合的伯德图, 图 3 为仿真输出与辨识输出曲线。其中,  $N_p$  为相对动力涡轮转速。从辨识输出结果可知, 粒子群算法能够有效辨识扭振系统的传递函数。

### 3.2 试验数据辨识

利用某型直升机扭振系统地面激励试验所得数据进行模型修正。实际的直升机扭振系统模型如图 4 所示, 其中控制回路为  $G_3, G_4, G_5$  组成的控制环节<sup>[6]</sup>。

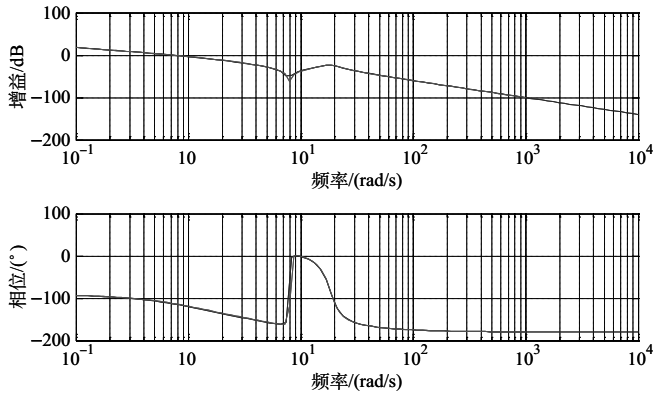


图2 仿真系统伯德图拟合结果图

Fig.2 Simulation system's Bode diagram fitting result

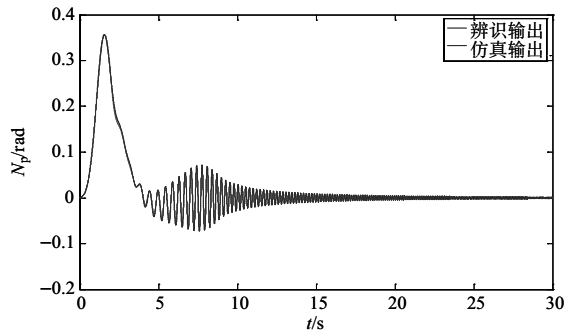


图3 仿真输出与辨识系统输出对比图

Fig.3 Comparison of simulation output and identification output

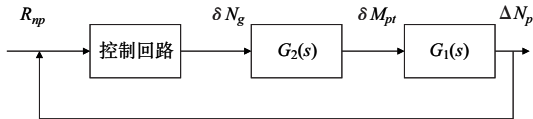


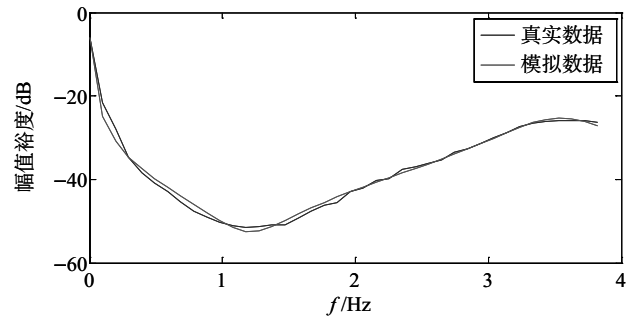
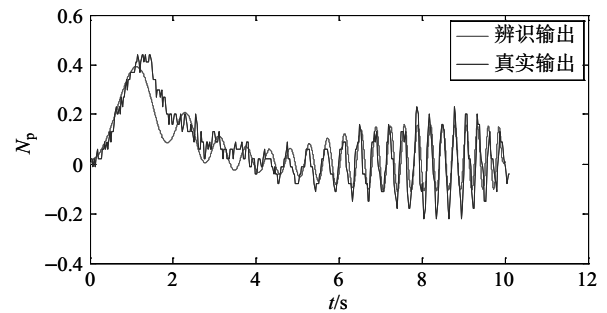
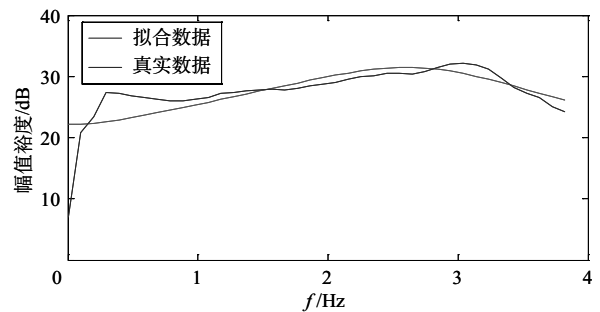
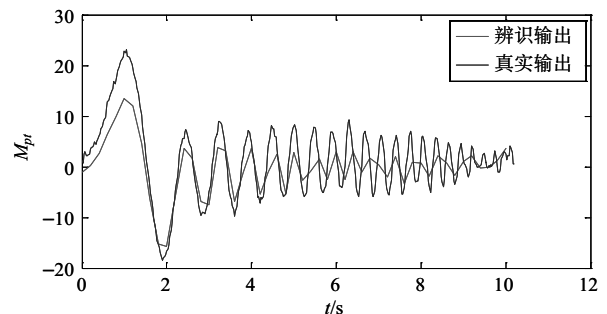
图4 直升机扭振系统模型图

Fig.4 Helicopter torsional vibration system model

试验在 100% 发动机动力涡轮转速条件下进行,选取扫频激励信号频率范围为 0.5~4Hz,激励时间为 10s,分别测量并记录发动机动力涡轮转速信号  $N_p$ 、燃气涡轮转速信号  $N_g$ 、发动机供油量信号  $W_f$ 、发动机输出扭矩  $M_{pt}$ 、扫频激励信号  $R_{np}$  等。

将输入输出数据代入粒子群算法程序中,辨识结果如图 5~ 图 10 所示。其中,图 6 中  $N_p$  为相对发动机动力涡轮转速图 8 中  $M_{pt}$  为相对发动机输出扭矩,图 10 中  $N_g$  为相对燃气涡轮转速。

将各子系统串联组成扭振系统,并将辨识所得系数和某型直升机扭振系统试验数据代入 Simulink 仿真模型中,在相同扫频激励条件下辨识所得系统响应信号与实际响应信号如图 11 所示。

图5 传递函数  $G_1$  伯德图拟合曲线图Fig.5 Transfer function  $G_1$ 's Bode diagram fitting curve图6 传递函数  $G_1$  真实输出与辨识输出曲线Fig.6 Transfer function  $G_1$ 's real output and identification output图7 传递函数  $G_2$  伯德图拟合曲线Fig.7 Transfer function  $G_2$ 's Bode diagram fitting curve图8 传递函数  $G_2$  真实输出与辨识输出曲线Fig.8 Transfer function  $G_2$ 's real output and identification output curve

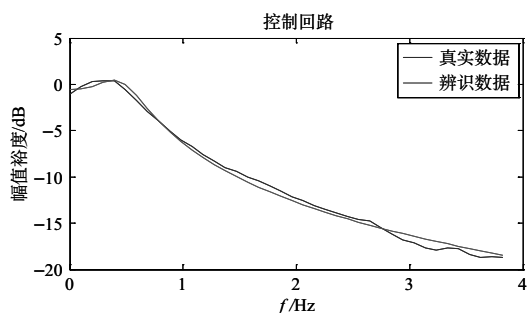


图9 控制回路伯德图拟合曲线

Fig.9 Control loop's Bode diagram fitting curve

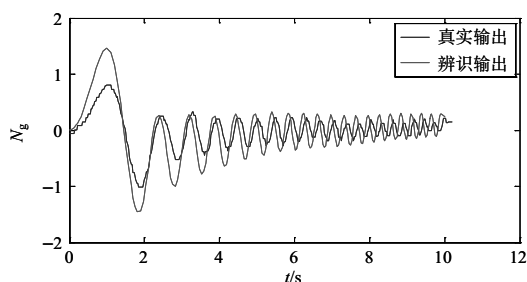


图10 控制回路真实输出与辨识输出曲线

Fig.10 Control loop's real output and identification output curve

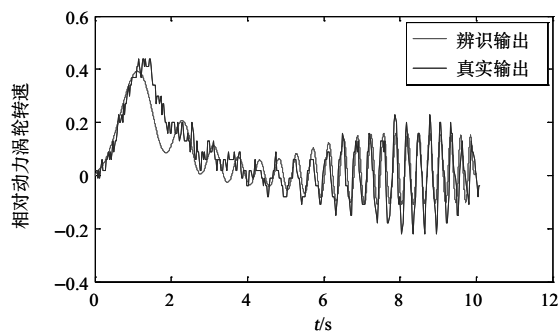


图11 某型直升机扭振系统辨识输出与真实输出对比图

Fig.11 A helicopter torsional vibration system's real output and identification output

## 4 结论

以扭振系统输入输出所得实测频响函数与理论频响函数的差值为优化目标,扭振系统传递函数参数为优化对象,运用粒子群算法对传递函数参数搜索取值使差值最小化,从而达到扭振系统传递函数参数辨识的目的。结合某型直升机扭振系统试验数据,对该型直升机扭振系统传递函数参数进行了辨识,所得辨识结果基本满足要求,为直升机扭振系统动力学建模提供了参考。

AST

## 参考文献

[1] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability,

and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6 (1): 58-73.

[2] Van B F, Engelbrecht A P. A new locally convergent particle swarm optimizer[C]//International Conference on IEEE, 2002.

[3] 常军,刘大山.基于量子粒子群算法的结构模态参数识别[J].振动与冲击,2014,33(14):72-76.

CHANG Jun, LIU Dashan. Structural modal parameter identification based on quantum-behaved particle swarm optimization[J]. Journal of Vibration and shock, 2014, 33 (14): 72-76. (in Chinese)

[4] 孙俊.量子行为粒子群优化:原理及其应用[M].北京:清华大学出版社,2011.

SUN Jun. Quantum behaved particle swarm optimization: theory and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)

[5] 王辉,陈华,刘志文.直升机发动机控制系统与旋翼/动力传动扭振系统耦合稳定性分析[J].直升机技术,2002(04):19-23.

WANG Hui, CHENG Hua, LIU Zhiwen. The stability analysis of the coupled system consists of helicopter engine control system, rotor and drive train[J]. Helicopter Technique, 2002 (04): 19-23. (in Chinese)

[6] 朱林.直升机传动与发动机控制系统耦合动稳定性研究[D].武汉:华中科技大学,2005.

ZHU Lin. Research on the stability of the coupled system consists of helicopter drive system and engine control system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)

(责任编辑 樊丹丹)

## 作者简介

刘立坤(1991-)男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行颤振及振动试飞。

Tel: 029-86838039

E-mail: 18591937802@163.com

王东森(1972-)男,研究员,硕士。主要研究方向:飞行颤振及振动试飞。

霍幸莉(1973-)女,研究员,硕士。主要研究方向:飞行颤振及振动试飞。

周友明(1977-)男,研究员,硕士。主要研究方向:颤振飞行试验。

## Identification of Transfer Function of Helicopter Torsional Vibration System Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Likun\*, HUO Xingli, WANG Dongsan, ZHOU Youming

*Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*

**Abstract:** In order to identify the transfer function of the torsional vibration system and establish structural dynamics model, the paper took a helicopter as an example. Accomplished the system parameters identification by fitting the bode diagram with the test sweep frequency data. In the process of the identification, the Particle Swarm Optimization Algorithm was used. The difference between theoretical and test results of frequency response function was taken as the optimization objective. The calculation results show that the method can effectively identify the transfer function parameters.

**Key Words:** torsional vibration system; parameter identification; particle swarm optimization; bode diagram fitting; transfer function

---

**Received:** 2017-08-06;      **Revised:** 2017-08-17;      **Accepted:** 2017-10-17

**\*Corresponding author. Tel. :** 029-86838039      **E-mail:** 18591937802@163.com