



东方所先进技术说明书

# 桥梁模态自动化监测技术

文件编号 CT6001.1  
V1.0 2014-9-5

保密级别：无

北京东方振动和噪声技术研究所

东方所技术说明书

文件编号：CT6001.1

保密级别：无

#### 修订记录

版本	修订日期	修订内容	制作	校核	批准
1.0	2014-09-05	初始完成	刘进明,沈松	刘进明	应明

# COINV 桥梁模态自动化监测技术

北京东方振动和噪声技术研究所(COINV)

主要内容:

- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| 1 简介                  | 4 核心技术 3 — 自动化分析技术 |
| 2 核心技术 1 — 多 OMA 拟合算法 | 5 东方所国内外发表的相关论文    |
| 3 核心技术 2 — 统一优化算法     | 6 案例分析             |

本技术适合各类桥梁的自动化模态在线监测。

## 一 简介

桥梁运行过程中，其动态特性参数的变化是反映桥梁健康状态的重要手段之一。其中模态参数是最全面最专业的动态参数，非常适合深入研究桥梁长期运行过程中的内在特性变化。

但是模态试验和分析过程则是非常复杂和专业的，因此模态的在线监测则是长期的难题。

COINV 桥梁模态自动化监测技术，基于东方所的专业 OMA 模态分析技术基础上，提出了多方法统一的优化算法，实现了模态参数的自动化分析，形成了国际领先水平的商用化桥梁模态监测技术。

本技术主要分两步实现：

第一步是桥梁监测实施初期的人工 OMA 模态分析，并作为未来长期监测的参考初始值，其精确程度是日后监测的数据基础。

第二步是在桥梁的长期监测过程中，定时（如每小时）自动完成 OMA 模态分析，实现真正的模态自动化监测。

实现上述模态自动化监测的关键在于：

1 先进准确的 OMA 模态拟合算法。东方所提供 PolyIIR、PolyLSCF、SSI、ERA、EFDD 等多种当前国际上先进的 OMA 算法。

2 多种 OMA 算法的优化统一。不同方法具有不同特点，其计算结果各异，东方所提出的优化算法可将各种算法的结果进行统一，以得到最优的模态分析结果

3 桥梁模态自动化分析。在长期监测中，系统自动完成振动信号采集、处理分析、OMA 分析、虚假模态甄别、优化计算等过程，每小时输出一次模态分析结果。

东方所多年来在自动化模态技术方面进行了深入的研究，提出了多种先进思想，在国内外发表大量论文，并在多个桥梁以及其他一些工程结构上实施了模态自动化监测技术。

## 二 核心技术 1 – 多 OMA 拟合算法

东方所提供目前国际上较为先进的多种 OMA 模态拟合方法，包括 PolyLSCF(PolyMAX)、SSI、EFDD 和 PPM 等，并独创提出了高精度的 PolyIIR 算法。

### 1 SSI(随机子空间法)

为时域算法，使用半谱对应的互相关系数。通过稳定图选择模态频率和阻尼，当前最通用的 OMA 算法<sup>[1][8]</sup>

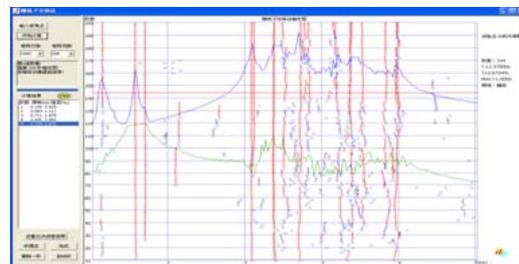


图 1 SSI 方法

### 2 PolyIIR(多参考点无限长脉冲响应滤波模型算法)<sup>[2]</sup>

东方所首次发表于 14 届亚太振动会议，2011.12，香港，为时域算法，适用于 MIMO，相当于时域的 PolyMAX。稳定图比 PolyMAX 更为清晰。这是因为和 PolyIIR 和 PolyMAX 具备完全相同的频率特征方程，A unified matrix polynomial approach (UMPA)。但 PolyIIR 的 Hankel 矩阵的所有系数是直接得到，PolyMAX 方法 Hankel 矩阵的系数需要经过复数运算，FFT 运算以及逆矩阵运算，维数太大的逆矩阵运算会导致病态方程，损坏稳定图的清晰度。

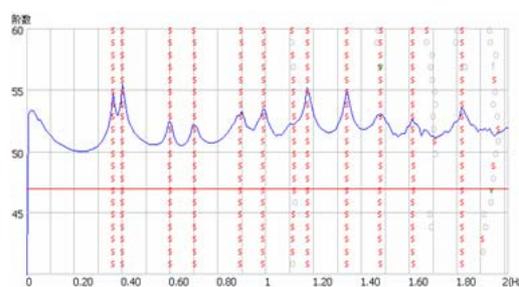


图 2 PolyIIR 方法

### 3 PolyMAX(多参考点频域最小二乘复频域法)

学术名 PolyLSCF: 多参考点的最小二乘复频域法，Least-Squares Complex Frequency-Domain method，国外称 PolyMAX，频域算法中最佳模态分析方法之一。采用离散时间频域模型，属于总体拟合法，具有快速递推的运算技巧，分析频带可选。

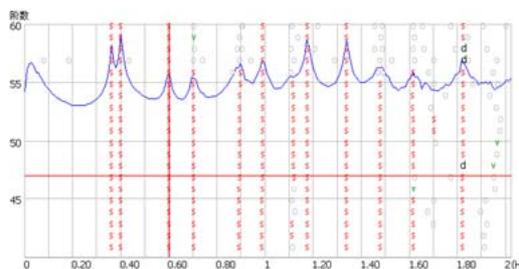


图 3 PolyMAX 方法

### 4 EFDD(增强型频域分阶的方法)

增强型频域分解的方法，属于频域方法，同峰值拾取法(PPT)一样简单，通过奇异值分解，直接得到振型。DASP 模态分析软件中 EFDD 方法利用 INV 频率计得到更为精确的频率和阻尼比。

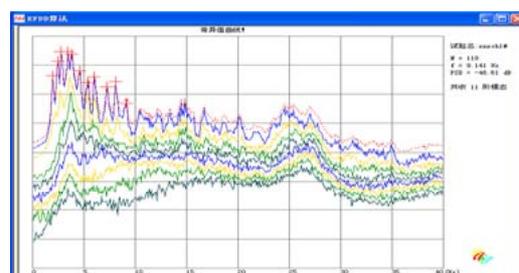


图 4 EFDD 方法

### 5 PPM(多项式功率谱方法)<sup>[6]</sup>

多项式功率谱方法，东方所独创，首次发表于 IMAC-XXIV,2006。精度优于 EFDD，可识别密集模态参数。仅用自功率谱，可进行模态频率阻尼分析，可以分频段进行拟合分析。



图 5 PPM 方法

### 三 核心技术 2 – 统一优化算法

上述多种 OMA 算法各自具有不同特点，不同操作人员使用不同方法得到的结果各异，甚至甚至同一分析人员用同一方法在不同时刻进行分析，得到的模态参数也会有所差别。

东方所提出了一种模态的优化方法，使得各方法在经过优化计算后得到基本一致的结果。基于该优化方法，设置一定的优化标准后，即可通过计算机自动进行优化计算得到与实测结果最吻合的结果，以实现没有人工参与的模态自动化分析。

东方所提出了一个理论上合理且数学上可行的优化目标，即通过模态参数综合得到的频响函数或半谱（对应运行状态模态分析）和实测的结果最为吻合。根据此目标，又给出了模态参数的优化算法，通过优化，不论初解由何种算法得到，最终都可得到理论曲线和实测曲线最为吻合的最优的统一结果。

对 SIMO(单输入多输出)及 MISO(多输入单输出)优化过程为，固定模态振型，优化频率和阻尼，得到新的频率阻尼后，提取模态振型，再进行下一步的优化。

对 MIMO 优化过程为，固定模态参与因子和模态振型，优化频率阻尼，得到新的频率和阻尼后，根据模态频率和阻尼，求模态参与因子，求出参与因子后，提取模态振型，再进行下一步的优化

优化算法实例：卢浦大桥五种分析方法模态结果和优化后结果的比较

阶数	模态频率 $f(\text{Hz})$ 和 阻尼比( $\%$ )					优化结果	
	SSI	PolyMAX	EFDD	PZM	PPM		
1	$f$	0.362	0.362	0.362	0.362	0.361	0.362
	$\xi$	0.264	0.171	0.364	0.153	0.220	0.131
2	$f$	0.401	0.401	0.402	0.402	0.402	0.401
	$\xi$	0.497	0.288	0.360	0.347	0.309	0.206
3	$f$	0.600	0.600	0.591	0.598	0.599	0.600
	$\xi$	0.639	0.489	1.906	0.579	0.831	0.543
4	$f$	0.704	0.700	0.698	0.699	0.699	0.701
	$\xi$	1.183	1.330	0.585	0.550	0.565	1.300
5	$f$	0.894	0.892	0.892	0.892	0.895	0.893
	$\xi$	1.530	1.310	1.749	0.990	1.349	1.617
6	$f$	0.989	0.991	0.990	0.992	0.990	0.989
	$\xi$	0.848	0.850	0.857	0.800	1.037	0.883
7	$f$	1.111	1.114	1.118	1.108	1.117	1.126
	$\xi$	1.415	1.307	2.168	1.767	2.559	2.644
8	$f$	1.174	1.173	1.175	1.174	1.175	1.175
	$\xi$	0.422	0.214	0.649	0.237	0.227	0.165

9	$f$	1.339	1.336	1.338	1.337	1.338	1.338
	$\xi$	0.323	0.253	0.316	0.294	0.317	0.239
10	$f$	1.483	1.477	1.467	1.479	1.481	1.474
	$\xi$	1.041	1.051	1.466	1.488	1.356	1.393
11	$f$	1.616	1.627	1.625	1.617	1.622	1.616
	$\xi$	1.317	0.853	0.973	0.786	1.211	1.791
12	$f$	1.815	1.819	1.812	1.822	1.812	1.819
	$\xi$	0.673	0.176	0.353	0.391	0.594	0.880
Fit( $f$ )		21.11%	22.25%	24.99%	22.10%	20.71%	16.90%
Fit( $t$ )		68.49%	71.59%	69.43%	70.92%	67.31%	65.70%

#### 四 核心技术 3 – 自动化分析技术

实现完全的自动化分析，除了上述优化计算统一结果外，还需要能够自动识别和剔除虚假模态。

东方所创新提出的智能模态分析技术(一键求模态)(发表于 IMAC-XXIX,2011), Blind Analysis<sup>[4][9]</sup>。即使开始得到的模态结果有虚假模态，在优化过程中可将其删除。优化机理如下：

虚假模态即数学极点在优化过程中是不稳定的，其走势有三种可能性，通过分析其走势，可将其和物理极点区分出来，并消除掉。第 1 向最接近的物理极点靠近，导致一个真正模态对应了两个极点，两者振型也趋于一致。第 2 为阻尼越来越大，大于设定值，可将其删除。第三为极点对应的模态振型所占能量越来越小<sup>[5]</sup>，小于特定的值可将其删除。

东方所实现自动化模态的过程如下：

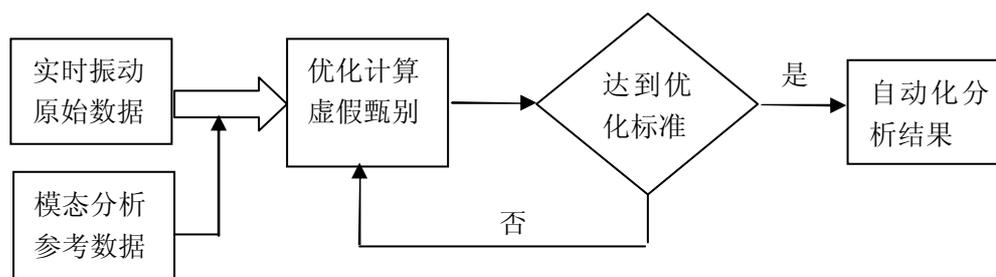


图 6 优化计算和自动化模态分析过程

此外，使用预试验模态结果作为自动化模态分析的一个参考，可以有效提高自动化模态分析的准确性和计算速度，避免传感器信号异常等情况导致自动化模态分析结果的不确定性。

#### 五 东方所发表于国内外的相关论文

- [1] 刘进明 应怀樵等，时域模态分析方法的研究及软件研发，振动与冲击 2004 年 第 23 卷 第 4 期 pp123-126

- [2] J. M. Liu, S. W. Dong, M. Ying, S. Shen. Dynamic Parameters Identification Technology in Bridge Health Monitoring, Proceeding of the 14th ASIA PACIFIC VIBRATION CONFERENCE, 2011, Dec. HongKong
- [3] 章关永, 刘进明, 上海卢浦大桥主桥动力特性测试研究, 振动与冲击, 2008 年第 27 卷 第 9 期 Pg.167-170
- [4] J. M. Liu, S. Shen, M. Ying and S. W. Dong, The Optimization and Autonomous Identification of Modal Parameters, Modal Analysis Topics, Volume 3, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2011, Volume 6, 203-214, DOI: 10.1007/978-1-4419-9299-4\_17
- [5] J.M.Liu H.Q.Ying etc. The Function of Modal Important Index in Autonomous Modal Analysis IMAC XXV, Conference Proceedings, 2007.
- [6] J.M.Liu H.Q.Ying etc. A Fast Frequency Domain Global Parameter Identification Algorithm. IMAC XXIV, Conference Proceedings, 2006 St.Louis, Missouri, USA
- [7] H.Q.Ying, J.M.Liu etc. Precise output-only modal parameters identification from power spectrum. IMAC XXIV, Conference Proceedings, 2006 St.Louis, Missouri, USA
- [8] J.M.Liu, W.D.Zhu, M.Ying, etc, Precise Frequency Domain Algorithm of Half Spectrum and FRF, 32<sup>nd</sup> IMAC, 2014
- [9] 刘进明, 应怀樵, 章关永, OMA 模态参数的优化及盲分析技术探讨, 振动、测试与诊断, 2012, 第 32 卷第 6 期, PP1016-1020

## 六 案例分析

东方所的 DASP 系统完成了国内上百座大桥的模态分析, 如火箭激励钱塘江大桥模态试验, 锤击法变时基分析乌海黄河大桥模态试验, 环境激励上海卢浦大桥、扬浦大桥、分布式 GPS 同步测试杭州湾跨海大桥模态试验等等。

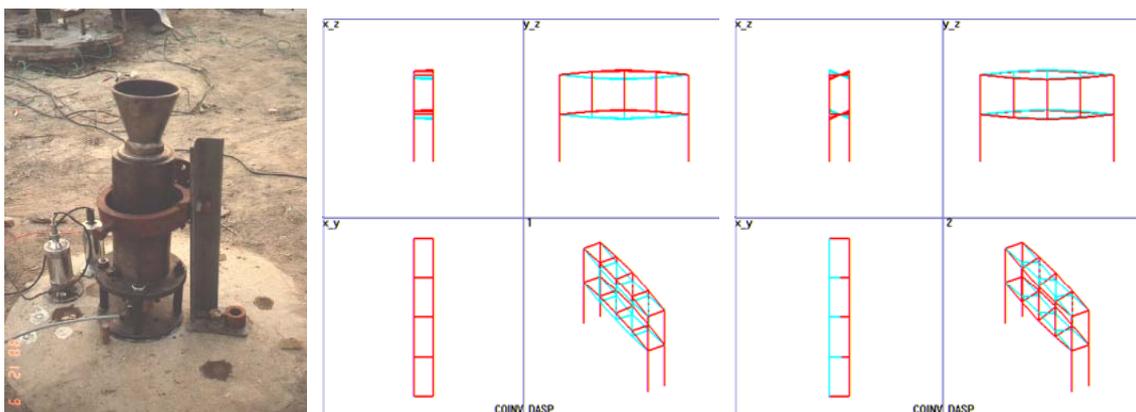


图 7 火箭激励, 钱塘江大桥模态试验, 1988 年

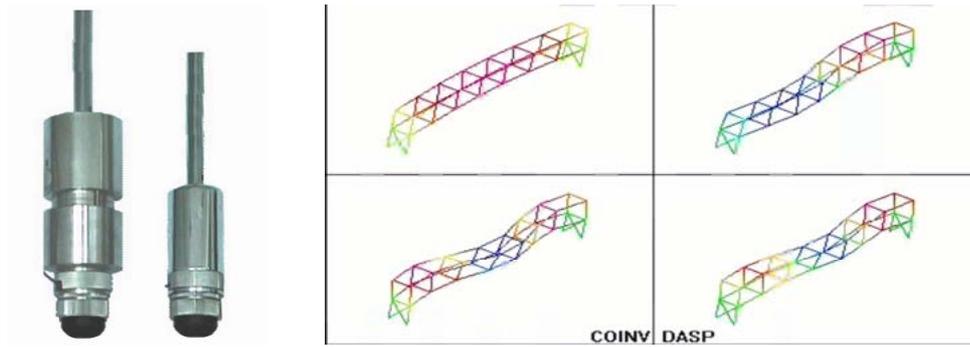


图 8 锤击激励，变时基方法，乌海黄河铁路桥模态试验，1996 年

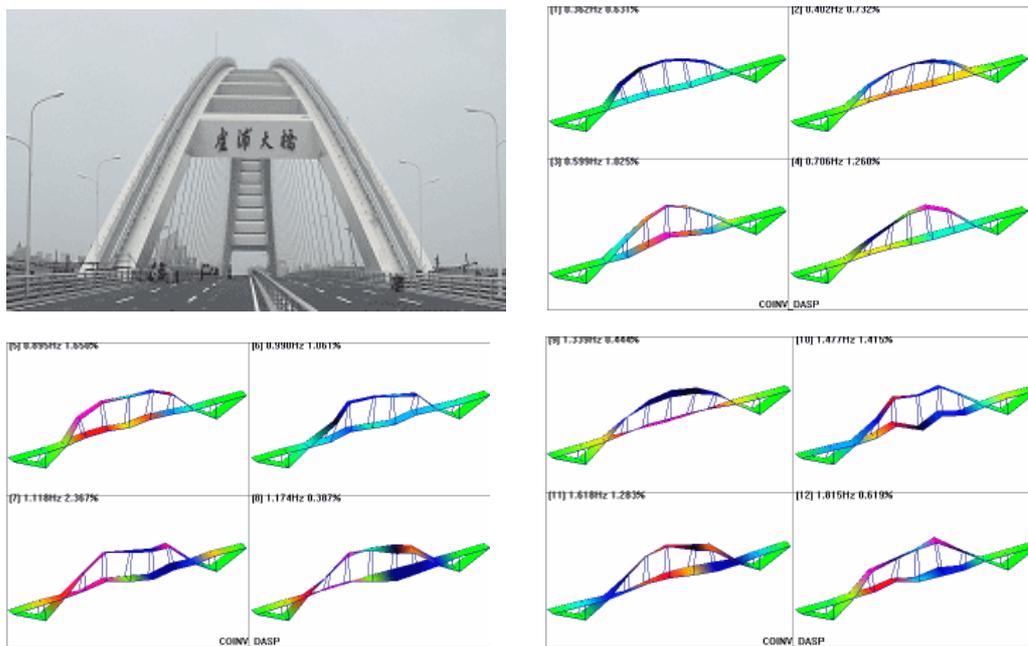


图 9 环境激励，OMA，上海卢浦大桥模态试验，2003 年

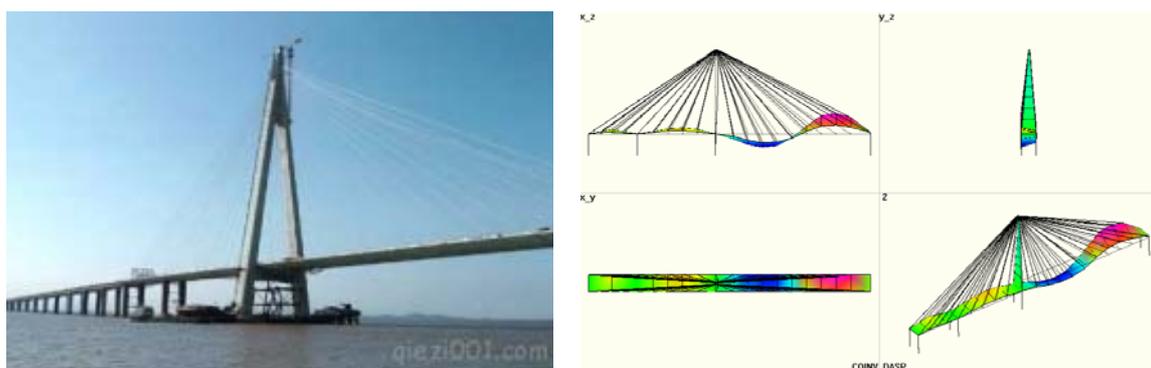


图 10 分布式 GPS 同步测量，OMA，杭州湾跨海大桥模态试验，2012 年

[END]