

非线性系统辨识

程长明[†]

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

工程中的很多结构系统均包含非线性因素,例如直升机齿轮传动系统、高速柔性转子、柔性机器人、螺栓连接结构等,若将线性系统分析方法直接应用于结构的非线性振动分析,将很难保证结构运行的可靠性和安全性。针对非线性系统,人们开展了大量研究工作,以寻求有效的非线性系统分析方法,而对于复杂非线性系统,很难直接利用第一定理对其进行动力建模与控制,这给非线性系统的分析与控制带来了巨大的挑战。基于数据驱动的非线性系统辨识方法为非线性系统建模提供了新的解决方法,其研究进展对推动动力学领域的发展具有重要意义。

非线性系统辨识按辨识阶段可以大体上分为非线性检测、非线性定位、非线性模型辨识和非线性参数辨识四个方面。非线性检测是非线性系统辨识的第一阶段,其目标在于判定系统中非线性是否存在,它为采用非线性模型提供了必要性依据。非线性检测方法一般提取不同于线性系统特征的非线性特征,并将该特征作为系统非线性存在性的判断依据。常见的判断依据包括叠加原理不成立、互易性不成立、谐波畸变、频率响应函数畸变等。其他非线性检测方法包括基于时频分析的检测方法和基于非线性系统谱估计技术的检测方法等。

非线性定位是非线性系统辨识的第二阶段,其目标在于确定非线性结构中哪些自由度存在非线性,具体包括确定系统中非线性的个数、受非线性直接影响的自由度以及非线性在各个自由度之间的具体连接形式。虽然非线性只是直接作用于结构中的某些自由度,但系统非线性对结构中的所有自由度均有间接影响,这增加了非线性的定位难度。非线性定位方法主要有两种思路:一种是基于非线性特性的方法,依据系统不同位置处非线性所表现出的不同特性进行特征提取,进而对非线性进行定位;另一类是基于参数辨识的方法,通过假设检验的方式获取最可能的非线性位置,此类方法通常计算量较大,在系统自由度数目较大和非线性位置较多时具有一定局限性。

非线性模型辨识是非线性系统辨识的第三阶段,其目标是确定系统中各非线性的具体形式,包括非线性类型和描述形式两方面。确定非线性类型主要指定性判定非线性的性质,例如系统非线性属于刚度非线性还是阻尼非线性、硬特性还是软特性、平滑非线性还是非平滑非线性、对称非线性还是非对称非线性等。解决这类问题的方法主要包括基于畸变频率响应函数的特征提取、基于时频分析的系统瞬时特性分析、基于高阶谱的响应谱分析等。确定非线性描述形式主要指定性确定了非线性性质基础上,进一步确定非线性的具体数学形式。解决这类问题的方法可大体分为基于模型和基于数据的两类方法,其中基于模型的方法指通过理论分析和试验研究揭示各类复杂非线性的机理,进而得到精简准确的非线性描述函数;基于数据的方法指通过函数拟合等优化方法对非线性进行逼近。

非线性参数辨识根据前三个阶段得到的非线性描述模型,进一步确定其中未知待辨识系数。常见的非线性参数辨识方法主要包括恢复力曲面法、逆路径法、基于非线性反馈输出的辨识方法、非线性子空间方法等。与此同时,近些年随着机器学习和人工智能算法不断融入系统辨识领域,人们发展了非线性动力学稀疏辨识方法、基于深度神经网络的非线性系统辨识方法以及基于数据驱动和物理模型双驱动的非线

[†] 通信作者 E-mail: ccming@sjtu.edu.cn

性系统辨识方法,它们已经成为非线性系统辨识的研究前沿和研究热点。

除了辨识方法理论研究,非线性系统辨识也存在广泛的应用。例如,机械故障或结构损伤常使系统出现非线性特征,而系统非线性特征一般比线性特征对系统状态敏感,因此可以通过检测和提取系统的非线性特征对系统进行状态监测及故障诊断;辨识系统的非线性刚度和阻尼对于机械系统动力学设计具有重要意义。另外,非线性系统辨识也广泛应用于控制工程、结构工程、气象学、经济学等领域。

为进一步促进非线性系统辨识理论的发展和总结/介绍国际国内前沿成果,我们邀请了辛勤耕耘于该学科的我国部分学者撰写这一“非线性系统辨识”专刊,报道非线性系统辨识的创新性研究成果和工程应用。旨在推动不同学科/不同流派学术观点和思想的交叉融合,以进一步启发和发展出围绕非线性系统辨识的共性概念和基础性工具/方法,为青年学者提供快速进入该领域的重要文献资料。非线性系统辨识方法虽然取得了一定的研究成果,但日益增长的精度需求不可避免地使系统模型越来越复杂,规模越来越大,系统参数也越来越多。特别是对于某些非线性因素影响显著的系统,需要将其描述成为复杂高维非线性系统,会引发高维建模问题,对其进行辨识所需要的数据量呈指数速度上升,存在“维数灾难”问题,这给非线性系统辨识带来了新的挑战,因此需要发展新的复杂非线性系统辨识理论和方法,这对促进动力学的进一步发展具有重要意义。