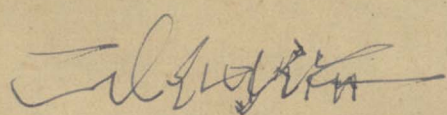


机械阻抗与系统识别

译文集



1982.12.24

第一机械工业部 郑州机械研究所

强度室 振动组 编

一九七九年九月

目 录

- (一) 用于机器分析的阻抗方法
- (二) 结构动力学的组合块法
- (三) 用阻抗方法的结构动力试验研究(Ⅱ)
——用单点激振的结构系统识别
- (四) 用阻抗方法的结构动力试验研究(Ⅲ)
——自由体响应
- (五) 用阻抗方法的结构动力试验研究(Ⅳ)
——子系统
- (六) 车辆系统动力分析用NASTRAN程序
- (七) 在冲击和振动中系统识别的方法和应用
- (八) 冲击和振动力的识别
- (九) 轴颈轴承特性的识别

用於機器分析的阻抗方法

[加舒大] M. Massoud and
H. Pastorel

摘 要

本文论述了现在流行的阻抗分析技术及其在机口的设计和
分析中的应用。说明了基本概况和基础定义之后,叙述了现代
的阻抗测量和实验技术。简单地回顾了传统的应用。近代的应用
包括预防维修、失败价值、声发射和环境等。引证了有关的
刊物。

阻抗是系统的可观察得到的一个参数。从另一方面来说,
象质量和刚度一样,它也被称为直观的和实在的参数[9]。虽然,
后者在分析无源结构时是有用的,但在分析复杂的动力机械
系统时,阻抗却变得越来越有用了。阻抗法的特点是:用被
称为机械阻抗或导纳的传递函数形式表示系统的可测得的位移
表达式。这样,系统的模态可由实测阻抗值综合而得。

阻抗分析的历史可回溯至十九世纪三十年代,早先的发展

— 1.2 —

包括在电网络分析原理中[19]。控制系统的分析在阻抗分析进展方面起了重要作用。早期应用包括：飞机螺旋桨和发动机之间、机头和船身之间通过底座扭转相互作用的振动传递等。

ASME 在1958年主办了阻抗分析讨论会[87]。随着计算机的出现和测量技术的进步，在六十年代初期就有可能直接处理从机头的有效点之间测得的大量数据[5、11、61、62]。

Endevco 有限公司[32]报导了直到六十年代中期为止已发表的有关机械阻抗方面的文章。

数学公式和基本定义

阻抗法对分析能用常系数线性系统为模型的机械元件特别有用。实质上，阻抗就是传递函数，其定义是在元件上某一点输入力的拉氏变换，与同一点或某些其它点的输出振动的拉氏变换之比。因而，注意力直接集中到元件的一些有效的点上。

当元件受一正弦力激励时，拉氏变换就变成了频率响应，从而，阻抗就被表示为两个复数的频率响应之比 [38, 40, 41, 53]。所有的有效点之间的阻抗函数可组成阻抗矩阵形式 [33, 80]。迭加技术（也叫组合块法和模态综合）用来描述复杂机件的综合性能。 [34, 63, 64]

阻抗这一术语，可以采取表 1 所示的任何一个定义 [19, 61, 64]。受正弦力激励的线性元件，可用经典的二阶系统来模拟：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\}e^{i\omega t}$$

其中， $[M]$ 和 $[K]$ 是质量矩阵和刚度矩阵， $\{x\}$ 是响应。当阻尼矩阵 $[C]$ 可假定为所谓的 Rayleigh 型，即 $\alpha[M] + \beta[K]$ 时，则响应是：

$$\{x\} = [Z]^{-1}\{f\}$$

$$\text{其中, } [Z] = [\alpha + i\omega][M] + [\beta + \frac{1}{i\omega}][K]$$

= 阻抗矩阵

该矩阵的对角元素和非对角元素分别称为点阻抗和传递阻抗。这些元素可由实验测出，将试验结果与数学表示式对比，可识

别出下件的重要参数和模态形状 [9.86]。

表1 阻抗的定义

阻抗术语	定 义
机械阻抗 = 力 / 响应	力 / 位移 = 位移阻抗, 表观刚度 力 / 速度 = 速度阻抗 力 / 加速度 = 加速度阻抗、动质量、 表观质量
导纳 (Mobility) = 响应 / 力	位移 / 力 = 位移导纳、敏态系数、柔度 速度 / 力 = 速度导纳 加速度 / 力 = 加速度导纳、惯性率

测量仪器和试验方法

试验方法根据分析的目标而异。试验技术并不新颖, 无论如何也没有充分发展, 而且测试设备正在不断改进。Remmers [92] 评价了在不同位置上进行的阻抗试验结果的可靠性和重复性特性, 并指出了在设备和试验方法中所固有的误差。

若干方法中的任何一个, 都能用来测量阻抗矩阵 (表2)。最直接的方法, 是用稳态的正弦力激励系统, 并测量正弦响应。为了得到完全的阻抗矩阵, 这一方法在一个频段范围内重复进

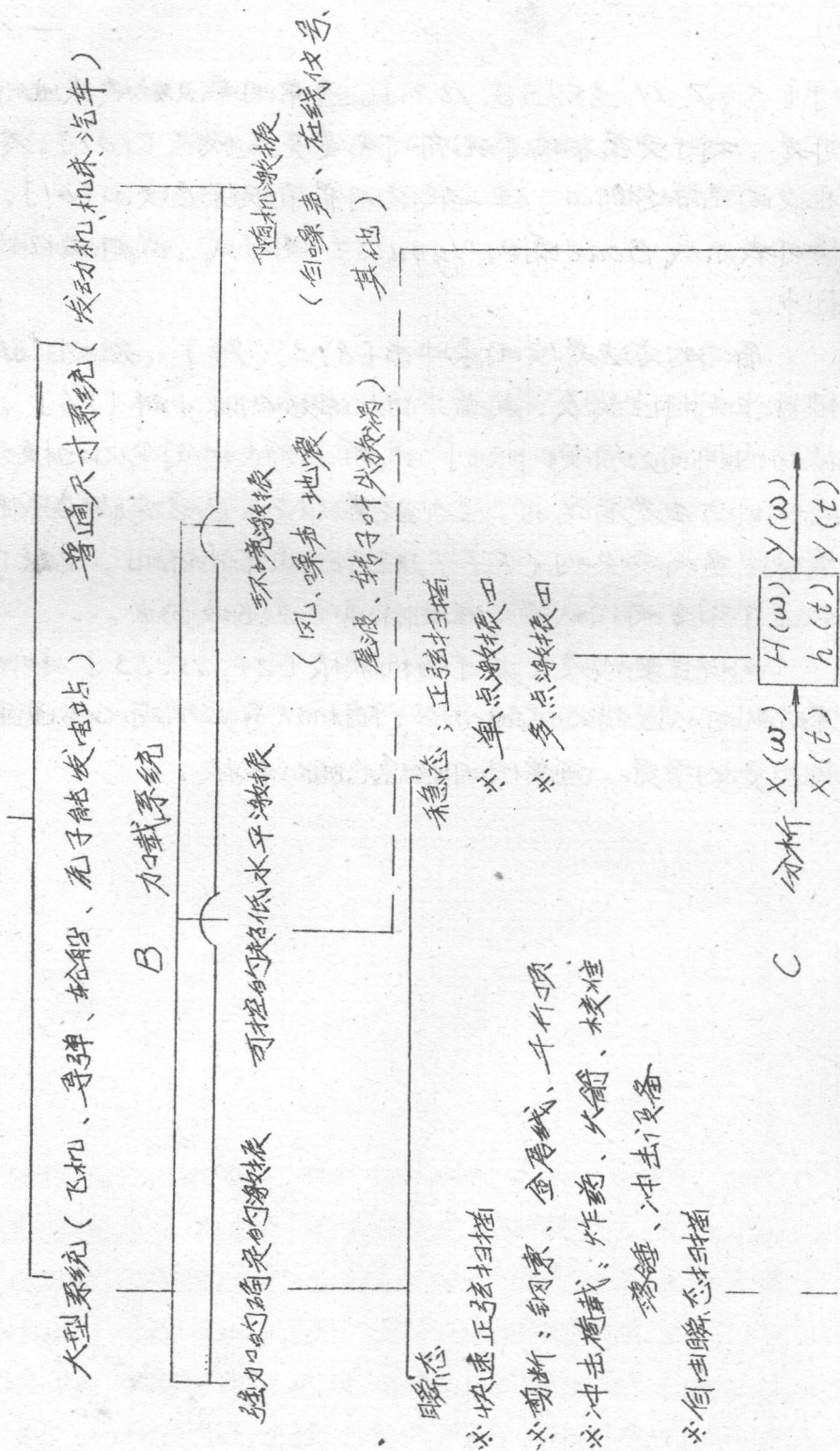
行[5, 7, 11, 35, 36, 102]。通常用单点激振来进行试验。可是, 对于更复杂的系统有时需要多点激振[101]。尽管偶尔也使用宽带均衡器, 但一般使用窄带跟踪滤波器[61]。阻抗数据可表示成 Bode 图或 Nyquist 图形式, 或存储在数字计算机中。

备用的方法是使用象冲击[8, 37, 74]、短的正弦瞬态激振等非周期性激振, 或者是随机激振的脉冲群[26]。当试验振动的期间必须受到限制, 或者含有随时间变化的模态特性时, 备用的方法是有用的。这个装置的核心是含有数据采集系统和有快速富氏变换的 (FFT) 程序的数字计算机。文献[74]中叙述了带专用的数据处理脉冲传递函数方法。

同样重要的是, 基于随机激振[24, 25, 83]和不同分离系统就可以进行的试验方法。随机信号必须有比传递函数大得相当多的带宽。通常使用准稳态随机激振。

表2 试验方法

A 实际系统



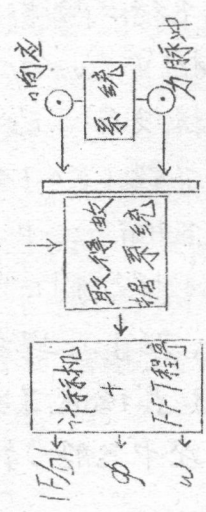
时间域(对瞬态扫描)
对连续时间信号的卷积
 $y(t) = \int_{-\infty}^t x(\lambda)h(t-\lambda)d\lambda$
对离散时间信号的传递矩阵
 $\bar{H} = \begin{bmatrix} h_1(0) & 0 \\ h_1(n) & h_1(n-1) \end{bmatrix}$
对集总系统的卷积累加
 $\bar{Y} = \bar{H} \bar{X}$

频率域
连续时间信号
离散时间信号
频率响应分析
 $H(w) = \frac{Y(w)}{X(w)}$
Z变换或
复频率域

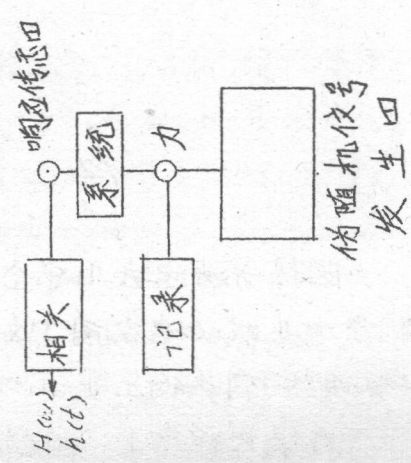
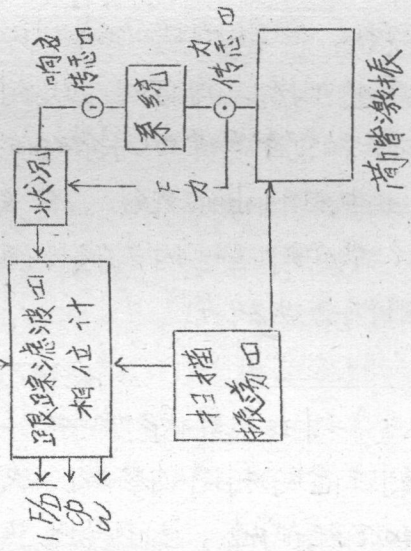
时间域
 $r_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda) dx(t-\lambda) d\lambda$
 r_{xy} = 互相关
 r_x = 自相关

频率域
 $W_y(w) = |H(w)|^2 \cdot W_x(w)$
 $\frac{W_{xy}(w)}{W_x(w)} = H(w)$
 W_y = 输出功率谱密度
 W_x = 输入功率谱密度
 W_{xy} = 互功率谱密度
n.b 相关函数和功率谱密度
是傅氏变换对。

D. 设备



调幅



伪随机信号
发生器

谐波激励

应 用

阻抗方法过去几乎全用于振动分析。六十年代中期之后,航空工业成功地应用了这一方法,该技术也传播到与运输、机械和船舶有关的工业部门。

在很大程度上,阻抗测量已用于动力设计、共振试验、系统模拟、试验规范的编制和材料参数的识别。可用比较使用期前后的阻抗值的方法,识别机件的力学弱点和潜在的损坏。现在流行的强调噪声污染的问题已受到促进,用阻抗测量去研究由机件中发射出的声能。有关生物工程学的议题,如人机相互作用、乘坐舒适性和失败价值 (crashworthiness) 等现在都用阻抗方法研究。

航空工业 Flannelly 和 Berman 在文献 [86] 中,评述了到七十年代所取得的航空结构的系统识别技术发展水平,特别注意可测得的参数。改进了的技术被发展来指导飞行中地面和飞行试验,已用传递函数测量决定最佳频率摆动控制 [75]。Burton 讨论了飞行试验方法 [17]。在文献 [24, 25] 中叙述了欧洲空间机构 (European Space Agency) 用来分析飞机结构的阻抗设备。已经推导并试验过对直升飞机叶片响应 [57], 和转子毂 [56] 的广义传递函数。在文献 [81, 95] 中讨论了直升飞机设计中减振装置的有效性问题。直升飞机参数已能由试验数据识别,飞行中的振动荷载已能用阻抗测量来确定 [38, 42, 76]。宇宙飞船也能用阻抗方法分析。文献 [6, 50, 51, 58] 论述了空中飞船的子结构的发射和脱离问题。Viking (空中飞船) 轨道试验与分析模态有关 [65]。

109]。Maloney [72] 从试验资料确定了导轨的接头柔度。

运输工业 美国汽车工程学会发表了最合适的应用成果。已经做了用来确定其动力特性的汽车框架试验 [39.48.99]。Sakata [94] 分析了发动机振动到框架的传达。Yoshida [113] 报导了车辆的声学特性。

文献 [16.111] 讨论了用区域柔度概念进行车辆试验。[78] 按滚动导轨的概念分析了轮胎。在火车头设计中，轨道和机车的相互作用已引起人们注意。Harz [45] 和 Vigil [108] 发表了火车的动力响应和评价分析模型需要的阻抗试验。在 [91] 中，Remington 研究了相互作用的某些方面，并报导了车轮和铁轨的噪音。

造船工业 自从三十年代初期，对由船体发射的能旁就已有兴趣，而且从那时起已开始用阻抗试验测量这一能旁。文献 [18.44] 已报导了船体振动方面的近代研究。船体和各种设备（发动机、螺旋桨、货物）的相互作用，也已用阻抗方法进行了研究 [3.14]。Douglas 讨论了用阻抗技术设计小艇 [27]。

机床工业 阻抗测量已广泛应用于机床工业。用随机的和确定性的激励对机床工件进行试验，以改善在工作情况下的刚度 [66.83.104]。在切削、冲压和其他操作时的加工精度也已用评价动柔度的方法进行了研究 [107.110]。可控机械阻抗法已用来减少机床振动 [21] 和抑制颤振 [20]。

机械零件 阻抗方法已用于带叶片的轮盘装置、鼓风机和推进器的设计 [4.22.88]。工件振动对管道系统 [52.98] 和空穴诱导 [13] 的影响也已用阻抗方法进行了研究。阻抗方法已用于隔板、吸振器和在冲击环境中抗振装置的设计 [59]。

用于冲击环境中的材料阻尼特性，也已用导纳测量研究过 [31. 33. 43. 106]。一个有关的领域是基础隔振 [1. 10. 23. 69. 71. 93]。导纳法也已用于轴承设计，文献 [79. 105] 讨论了轴颈轴承和油膜的性能。Bradley 在 [12] 中叙述了用机械阻抗测量对齿轮装置中的噪声流进行校正。Lemen [68] 讨论了这种测量对机械工程问题的应用。锅炉的传递函数已经发表 [77]，把它看作蛇形弹簧 [55]。螺栓结构中的应力松弛，利用组合的柔度测量 [73]。

预防维修 阻抗测量有助于工程师预测和防止事故 [60]。提倡三个措施：对振动信号的频率分量进行识别的窄带频谱分析，识别共振的传递函数分析和模型观察。

环境 人和机器的相互影响已引起注意。重点在于衰减冲击和对在运载工具中人体舒适的估价。乘客的传递函数测量已经发表 [2. 15. 29. 30. 85]。噪声污染问题也刺激了同测量声导纳的方法去研究声发射的兴趣。[49. 96. 103]

参考文献

1. Abell, A and Steer, A.G., "Dynamic Response of Large Turbo-Alternator Steel Foundations," Symp., Interpretation of Complex Signals from Mechanical Systems, London, Inst. Mech. Engrs. (Feb. 24, 1976)
2. Adams, J.J. and Goode, M.W., "Application of Human Transfer Functions to System Analysis," NASA, Langley Res. Ctr. Rept No, NASA-TN-D-5478.
3. Aguilina, R. and Caudriot, L., "Application of Mechanical Impedance Concepts to the Coupling Problem of Structures in Shock Environment," Shock Vib. Bull., U.S. Naval Res. Lab., Proc., No. 44, Pt. 4 (Aug. 1974)
4. Baade, P.K. and Morris, R.D., "Use of Impedance Data for Avoiding Propeller Fan Resonance," ASME Paper No. 75-DET-54.
5. Bannister, R.L. and Thoman, R.J., "An

Experimental Mechanical Impedance Technique",
SN, Sound Vib., 2(3), pp10-16 (1968)

6. Bamford, R. and Trubert, M., "A Shock Spectra and Impedance Method to Determine a Bound of Spacecraft Structural Loads", AIAA Paper No. 75-811 (1975).
7. Barden, M., "The Development of a Digitally Controlled Mechanical Transfer Function System," Proc. Inst. Environ. Sci., Vol. 11 21st Ann. Tech. Mtg., Anaheim, CA (Apr. 1975).
8. Bathelt, H. and Bosenberg, D., "New Experimental Methods in Body Acoustics Measurements of Transfer Functions by Means of the Impulse Technique," Automobiltech. Z., 78(5) (May 1976) (In German)
9. Berman, A., "Determining Structural Parameters from Dynamic Testing," Shock Vib. Dig., 7(1) (Jan 1975).
10. Berthier, P., Lalanne, M., and Martinat, J., "Dynamic Behavior of a Damped Frame Modal of Machinery-Seating," ASME Paper No. 73-DET-74.

11. Bouche, R.P., "Instruments and Methods for Measuring Mechanical Impedance," 30th Shock Vib. Symp., Detroit, MI (Oct 1961).
12. Bradley, W.A., "Sound Gear Quality," Mech. Engrg., 94 (10) (Oct 1972).
13. Brermen C. and Acosta, A.J., "The Dynamic Transfer Function for a Cavitating Inducer," J. Fluids Engrg., Trans. ASME, 98 (2) (June 1976).
14. Breslin, J.P., "Exciting-Force Operators for ship Propellers," J. Hydronautics, 5 (3) (July 1971).
15. Broderson, A. B. and Von Gierke, H.E., "Mechanical Impedance and Its Variation in the Restrained Primate during Prolonged Vibration," ASME Paper 71-WA/BHF-8 (1971).
16. Bunforf, R.T. and Leffer, R.L., "The Cornering Compliance Concept for Description of Vehicle Directional Control Properties." SAE Paper No. 760713.
17. Burton, R.A., Bischo, F.F., and David, E., "More Effective Aircraft Stability and

Control Flight Testing through Use of System Identification Technology." Naval Air Test ctr., Patuxent River, MD. Rept. No. NATCTM-76-2-SA (Nov. 1976).

18. Catley, D and Norris, C., "Theoretical Prediction of the Vertical Dynamic Response of ship Structures Using Finite Elements and Correlation with Ship Mobility Measurements," Proc. 11th Symp., Naval Hydrodyn., Dept. Mech. Engrg., Univ. College, London (Mar. 1976).
19. Church, A. H., "Mechanical Mobility," Mach Des. (Dec 10, 1959, Dec 24, 1959; Feb 18, 1960).
20. Comstock, T. R., Tse, F. S., and Lemon, J. R., "Chatter Suppression by Controlled Mechanical Impedance," ASTM E Natl. Engrg. Conf., Philadelphia, PA (Apr 1968).
21. Comstock, T. R., Tse, F. S., and Lemon, J. R., "Application of Controlled Mechanical Impedance for Reducing Machine Tool Vibration," ASME Paper No. 69-VIBR-28.
22. Cottney, D. J. and Ewins, D. J., "Towards the Efficient Vibration Analysis of

Shrouded Bladed Disk Assemblies," ASME Paper No. 73-DET-144.

23. Darby, R. A., "Mechanical Impedance Measurements in Foundation Studies," Shock Vib. Bull., U.S., Naval Res. Lab.; Proc. No. 33, Pt. 4 (Mar 1964).
24. Dat, R., "Determination of Natural Modes of Structure from a Vibration Test with Arbitrary Excitation," La Recherche Aerospatiale, France, 2 (1973).
25. Dat, R., "Structural Vibration Test Methods Used by Onera," Rept. No. ESA-TT-221, ONERA-P-1975.1 (Dec 1975).
26. Domeck, D. and Kashmar, G., "Transfer Function. Using Random Bursts," Proc. Inst. Environ. Sci., Vol. 11, 21st Ann. Tech. Mtg., Anaheim, CA (Apr 1975).
27. Douglas, B. E. and Kenchington, H. S., "Mechanical Impedance Technique in Small Boat Design," Shock Vib. Bull., U.S. Naval Res. Lab., Proc., No. 46. Pt. 5 (1976).