

复杂结构声与振动主要能量传递路线识别

王毅刚, 杨志刚

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 从统计能量分析方法(SEA)中的功率流出发, 提出了从源子系统到目标子系统各能量传递路线上子系统间功率流的平均方法来初步识别复杂系统的主要能量传递路线, 并进一步提出将该方法和“功率流倒推法”相结合, 即功率流综合方法, 对多条主要能量传递路线进行准确的主次排序。为了说明和验证提出方法的合理性, 利用 AutoSEA 软件对一复杂结构内部声压级及子系统间功率流进行计算, 试验验证了计算结果的正确性, 同时, 按照所提出的功率流综合方法, 对该结构的主要能量传递路线进行识别, 说明了功率流综合方法是一种方便、快捷、能够准确识别复杂结构中主要能量传递路线的有效方法。

关键词: 声与振动; 统计能量方法; 功率流; 能量传递路线

中图分类号: O422

文献标识码: A

Identification of Sound and Vibration Critical Energy Paths for Complex Structure

WANG Yigang, YANG Zhigang

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: According to the power flow conception in statistical energy analysis, the method of average power flow from a source subsystem to a destination subsystem is put forward to identify preliminarily the critical energy paths for complex structure. Moreover, the method and the existing “power flow path—back tracking” method are integrated to form a power flow integration method to sort order well and truly for the critical energy paths. In order to validate the proposed method, the interior sound pressure level and power flow between subsystems are calculated by AutoSEA soft for a structure, and that the results are validated by experiments. And then the critical energy paths for the structure are ordered by the power flow integration method. It shows that the power flow integration method is a convenience, shortcut and accurate way to determine the paths.

Key words: sound and vibration; statistical energy analysis;

power flow; energy path

无论地面交通工具, 还是空中运输工具, 像汽车、飞机等其舱内乘坐的舒适性要求越来越高, 舱内噪声和振动控制也就成为提高舒适性的重要手段。然而, 对于这些复杂结构, 从声与振动激励源系统到控制的目标系统, 子结构或子系统多、声和振动特性各异, 使得能量的传递有多条路线, 每条路线在能量传递中的作用各不相同, 有主次之分。要有针对性、并有效地采取控制措施, 识别主要能量传递路线就成为其技术关键之一。统计能量分析方法^[1-2]可以对系统进行响应分析, 能提供从源子系统到目标子系统中各子系统间的功率流, 利用这些功率流的传递方式, 可以对复杂系统中不同路线的能量传递能力进行识别。但该方面的相关研究较少, 有代表性的是美国 Boeing space & Communications 公司的 Edo' Keefe 和 R. Ahuja 等提出的两类方法^[3-5]。一种是功率流倒推法(power flow path-back tracking), 它是从目标子系统开始, 比较各路线上子系统及其前一级子系统间的功率流大小, 确定这一级传递能量最大者, 直到源子系统。这一方法原理简单, 识别准确, 但从识别过程来看相当复杂, 尤其利用这种方法要识别出多个能量传递路线就更为复杂。另一种方法是利用两子系统间能量损耗最小的概念, 采用前推的方法(energy ratio path-forward tracking)。这种方法是从源子系统开始, 比较后一级子系统和源子系统的能量比, 最小者为这一级传递能量最多者, 依此类推直到目标子系统, 从而确定出主要能量传递路线。这种方法计算能量比时, 要用到子系统的内损耗因子和子系统间的耦合损耗因子, 或使用通过测量获得子系统的加速度值。同样, 这种方法较为繁琐费时。基于上述两类方法在识别主要能量传递路线上繁琐费时的问题, 本文借助于统计能量分析方法

中的功率流概念,提出了功率流综合方法来识别复杂系统中的主要能量传递路线,并通过实例进行进一步说明和验证。

1 主要能量传递路线识别的综合功率流方法

统计能量分析方法是动态系统声与振动中高频响应分析的有效工具. 这种方法从统计的意义上,通过对复杂系统进行子系统划分,再对子系统能量的耗散和传递分析来研究系统的响应特性. 在该方法分析中,需要对子系统间的功率(能量)传递大小进行计算,由此可以得到从源子系统到目标子系统多条能量传递路线上的功率流分布,对这些路线功率流传递大小的判断,可以排出传递路线的主次,为系统中声与振动的控制提供准确的控制对象。

1.1 平均功率流方法

平均功率流方法是对统计能量分析方法计算结果的深一步扩展,其原理是首先利用统计能量分析方法对结构子系统间的功率流依据公式进行计算,并划分出从源子系统到目标子系统的所有能量传递路线. 计算公式为

$$P_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i - \omega \eta_{ji} E_j \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为子系统 i 和 j 之间的功率流; ω 为频率; η_{ij} 和 η_{ji} 分别为子系统 i 到 j 和 j 到 i 的耦合损耗因子; E_i 和 E_j 分别为子系统 i 和子系统 j 的能量。

其次对每条路线上的功率流求和,并作算术平均,对其值进行比较,按从大到小的顺序进行排列,值大者表示在该条路线上平均消耗的能量少,从平均意义上说明主要能量是从这条路线传给目标子系统. 同理,值小者说明该条路线上消耗的能量多,或者有能量倒流的情况,说明它是次要的能量传递路线. 这样,从平均功率流的大小排序,可以排出能量传递路线的主次. 这一原理可用图 1 进一步说明。

源子系统 S_1 到目标子系统 S_5 可组成多条能量传递路线. 在此仅选 3 条路线予以说明,这 3 条路线为:第 1 条路线, $S_1 \rightarrow S_{21} \rightarrow S_{31} \rightarrow S_{41} \rightarrow S_5$; 第 2 条路线, $S_1 \rightarrow S_{22} \rightarrow S_{33} \rightarrow S_{42} \rightarrow S_5$; 第 3 条路线, $S_1 \rightarrow S_{23} \rightarrow S_{22} \rightarrow S_{32} \rightarrow S_{41} \rightarrow S_5$. 应用统计能量分析,按式(1)可分别计算出 $S_1 \rightarrow S_{21}$ 之间的功率流 P_{121} , $S_{21} \rightarrow S_{31}$ 之间的功率流 P_{2131} , 依此类推得: P_{3141} , P_{415} . 则第 1 条路上的平均功率为

$$P_1 = (P_{121} + P_{2131} + P_{3141} + P_{415})/4 \quad (2)$$

同理可得

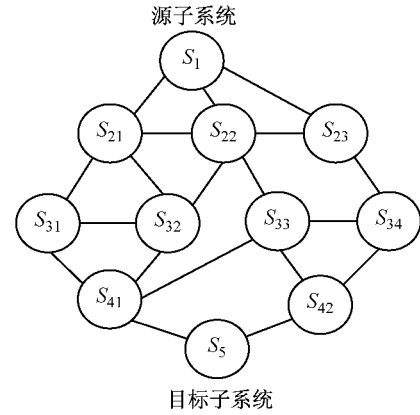


图1 子系统间的能量传递路线示意图

Fig.1 Energy paths between subsystems

$$P_2 = (P_{122} + P_{2233} + P_{3342} + P_{425})/4 \quad (3)$$

$$P_3 = (P_{123} + P_{2322} + P_{2232} + P_{3241} + P_{415})/5 \quad (4)$$

按照同样的方法可以计算出 P_4, P_5, \dots, P_n , 对它们进行比较,并按大小排序,这样排在前面的几条路线从平均意义上说明是主要的能量传递路线. 但值得注意的是,排在最前面并不一定是最主要的传递路线. 对此,用上述的第 1 条路线和第 2 条路线说明. 假设 $P_1 > P_2$, 但对目标子系统 S_5 而言,有可能在 $P_1 > P_2$ 时, $P_{415} < P_{425}$, 也就是说,最终流入目标子系统的能量第 2 条路线要大于第 1 条路线. 从对目标子系统控制的角度讲,尽管第 2 条路线的平均功率流小于第 1 条路线上的平均功率流,但它传给目标子系统的能量多,因而,相对而言,它却成为主要的能量传递路线. 所以,上述方法不是精确确定主要能量传递路线的方法,它是从功率流平均的角度初步确定多条主要能量传递路线的方法. 可以结合功率流倒推方法来精确判断主要能量传递路线. 由于,这种方法仅对每条路线上的功率流进行算术平均,然后,进行排序,简便易行,所以,是寻找多条主要能量传递路线快捷、方便的方法,尤其在噪声和振动控制初步设计时,对复杂结构需要多条途径进行综合控制时,该方法能够及时找出几条主要的能量传递路线,并根据功率流的大小,寻找在这些路线上对能量传递贡献较大的子系统,进行针对性控制,达到有效控制目标子系统的目的。

1.2 功率流综合方法

为了更精确地排出对目标子系统影响较大的子系统主要能量传递路线,可将上述提出的平均功率流方法和引言中提到的功率流倒推方法^[3]相结合,即,先用平均功率流法,按照平均功率流大小的排序,从众多的能量传递路线中,寻找出几条较主要的

向目标子系统传递能量的路线,这样会使所研究的对象范围大大缩小;然后,对这几条主要的能量传递路线,用功率流倒推的方法,排列能量传递路线的准确次序.即,对利用平均功率流方法排列出的几条主要能量传递路线,从目标子系统开始,比较各路线上子系统及其前一级子系统间的功率流大小,并进行大小排序,确定这一级传递能量较大的子系统,再对该子系统及其前一级子系统间功率流大小比较,依此类推,直到源子系统.这种综合的方法避免倒推法中对每条路线功率流进行比较的复杂性,使主要能量传递路线的识别更方便快捷.

2 功率流综合方法应用举例

2.1 统计能量分析模型的建立

为了进一步说明上述主要能量传递路线识别方法的合理性,本文利用统计能量分析方法(SEA)计算软件 AutoSEA,建立了如图 2 所示的分析模型.这一结构形式类似于飞机机身段的舱室结构,其外壳由钢板组成,形成的空腔 1 和 2 相当于客舱和货舱.其源子系统为壳 1,目标子系统为空腔 1.各子系统间的功率流传递路线如图 3 所示.

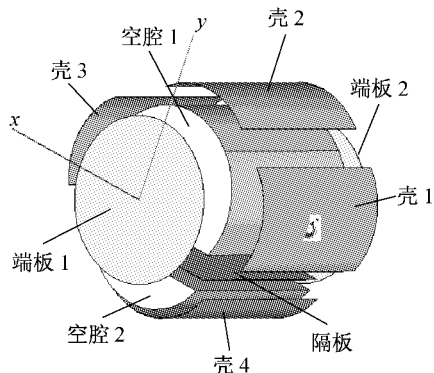


图 2 SEA 分析模型

Fig.2 SEA model

2.2 SEA 计算和试验结果比较

为了证明计算结果的可靠性,本文首先建立了图 2 的 SEA 模型,并在壳 1(源子系统)的外振动激励下(水平激励),计算了空腔 1(目标子系统)的声压级.同时,加工制作了和图 2 相同的试验件(图 4),长 1.5 m,直径 1.2 m.用激振器进行水平激励(图 4),水平激励的输入功率谱如图 5 所示.实验测量了空腔 1 内的声压级.

计算和试验结果如图 6 所示.试验结果和计算结果在中高频吻合很好,低频差的原因主要缘于 SEA 方法其低频分析能力差,结果不可靠,这是此方

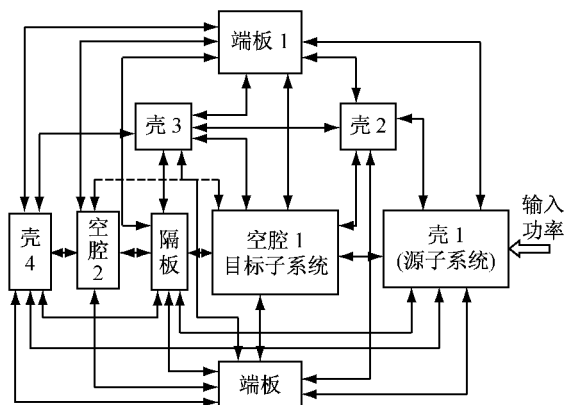


图 3 各子系统间的功率流传递路线

Fig.3 Energy paths between subsystems

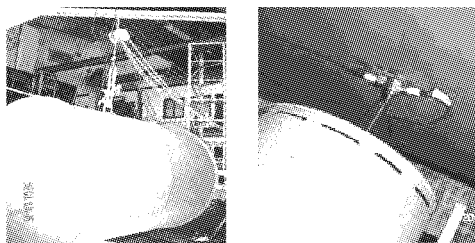


图 4 试验件及激励方式

Fig.4 Test sample (lift) and exciting mode

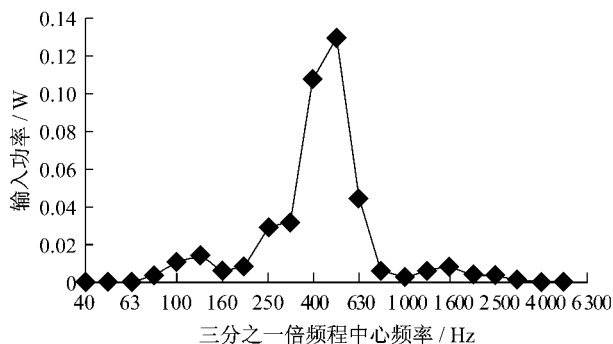


图 5 水平激励下的输入功率

Fig.5 Input power in horizontal excitation

法的特点,本文只考虑中高频结果(>400 Hz).这一结果说明本文计算结果可靠,计算过程中的数据(如功率流)可用.

2.3 主要能量传递路线识别

下述的能量传递路线分析将利用对图 2 所示结构用 SEA 分析的功率流计算结果.

如图 3 所示,从壳 1 到空腔 1 的能量传递路线很多,为了说明功率流综合方法识别主要能量传递路线的方法,本文仅选取其中 10 条主要的能量传递路线,即

- 1,壳 1 \rightarrow 空腔 1;
- 2,壳 1 \rightarrow 壳 2 \rightarrow 空腔 1;
- 3,壳 1 \rightarrow 壳 2 \rightarrow 壳 3 \rightarrow 空腔 1;

- 4,壳1→端板1→空腔1;
- 5,壳1→端板1→壳2→空腔1;
- 6,壳1→端板1→隔板→空腔1;
- 7,壳1→端板1→壳3→空腔1;
- 8,壳1→隔板→空腔1;
- 9,壳1→壳4→空腔2→隔板→空腔1;
- 10,壳1→隔板→壳3→空腔1.

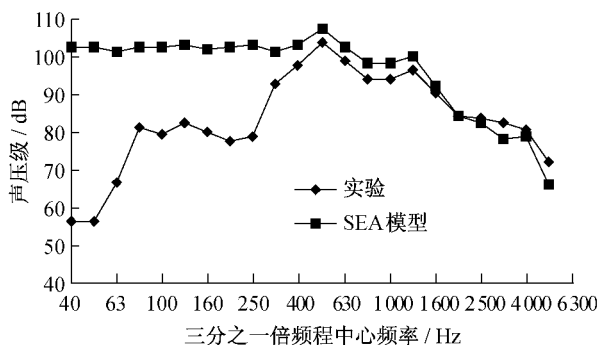


图6 空腔1内声压级实验测量
和SEA模型计算结果比较

Fig.6 Interior sound pressure level comparison
in cavity1 between test and SEA

从图4中可以看到,不同的频率对应不同空腔内的声压响应.因此,传递路线应对感兴趣的频率进行分析.在此仅对500 Hz下的SEA模型计算结果进行分析.

表1为上述10条路线上功率流、平均功率流以及平均功率流由大到小排列次序.

表1 500 Hz下各能量传递路线上的功率流
Tab.1 Power flows (dB) transmitted on different
paths in 500 Hz

序号	路径	功率流/ dB	平均功率 流/dB	排序
1	壳1→空腔1	96.36	96.360	2
2	壳1→壳2→空腔1	102.1,93.47	97.800	1
3	壳1→壳2→ 壳3→空腔1	102.1,96.36,-79.03	39.810	3
4	壳1→端板1→空腔1	84.81,-76.14	4.300	8
5	壳1→端板1→ 壳2→空腔1	84.81,-84.81,93.47	31.200	4
6	壳1→端板1→ 隔板→空腔1	84.81,87.70,-84.81	29.200	5
7	壳1→端板1→ 壳3→空腔1	84.81,79.03,-84.81	26.300	6
8	壳1→隔板→空腔1	90.59,-84.8	2.89	9
9	壳1→壳4→空腔2 →隔板→空腔1	83.47,87.7, -76.14,-84.81	5.055	7
10	壳1→隔板→ 壳3→空腔1	90.59,-87.7, -79.03	-25.400	10

从上述功率流、平均功率流和排序看,从壳1到空腔1的几条主要能量传递路线为:①壳1→壳2→空腔1;②壳1→空腔1;③壳1→壳2→壳3→空腔1.

从图2可以看出,与目标子系统直接相连的子系统分别是壳1、壳2、壳3、隔板和两端板.外激励源壳1与这几个子系统传递路径较短.所以,使得这些子系统形成的传递路线向空腔1传递较多能量成为可能.从表1可以看出,由于壳3、两端板和隔板向空腔1形成功率流倒流的情况,它们形成的传递路线平均功率流很小,只有壳1和壳2向空腔1传递的平均功率流远大于其他路线上的功率流,所以,上述第①和第②条路线才是主要的能量传递路线.

从上述分析中可看到,凡是能量传递路线上功率流为负值(能量倒流),甚至目标子系统向其他子系统传递能量的情况,都不是主要的能量传递路线.也就是说,如果子系统间出现功率流为负值的情况,这条路线就不会是从源子系统到目标子系统的主要能量传递路线.这样在划分能量传递路线时,若遇到功率流倒流的情况,即可将此路线认为不是主要能量传递路线,并舍弃,这样,可以减少很多能量传递通道,使问题进一步简化.

上述方法找出了3条主要的能量传递路线.为了进一步确定哪一条是最主要路线,哪些是次要路线,对这3条路线采用倒推法,就可排出主次顺序.即从空腔1开始,空腔1与其前一级的子系统壳1、壳2、壳3的功率流大小排序为:序号1(96.36dB)>序号2(93.47dB)>序号3(-79.03dB).说明在这一级,壳1→空腔1是最主要的能量传递路线,壳1→壳2→空腔1为第2能量传递路线,壳1→壳2→壳3→空腔1传递能量有倒流情况.按照此方法排列的主要能量传递路线次序为:①壳1→空腔1;②壳1→壳2→空腔1;③壳1→壳2→壳3→空腔1,和平均功率流法排序不全相同.显然,壳1将能量直接传递给空腔1,比经过壳2效率更高.上述排序和实际情况是相符的.由此可以看到,平均功率流法是整个路线上的功率流平均值,它不能清楚地表明每一个子系统功率流的大小,也就不能明确显示出某一个子系统在能量传递中的突出作用.只有和倒推法相结合,才能准确识别各子系统在能量传递中的作用.

3 结论

本文从SEA方法中的功率流概念出发,提出了

用平均功率流的方法来初步识别复杂系统的主要能量传递路线,在此基础上,进一步提出平均功率流法和倒推法相结合的方法,即功率综合方法,识别多条主要能量传递路线的主次.此外,建立了一种较复杂的结构模型,利用 AutoSEA 软件对其内部声压级进行计算,利用试验验证了计算结果的正确性,进一步说明和验证本文提出方法的合理性.研究表明:

(1)平均功率流方法对于复杂结构的多条能量传递路线,能够排列出其中主要的能量传递路线,这对于初步识别主要能量传递路线具有重要的意义,但不能完全确定主要传递路线的次序.

(2)功率综合方法能够识别多条主要能量传递路线的主次,并进行排序.

(3)功率流综合方法经过在复杂结构上的应用,说明了其是一种方便、快捷,而且能准确识别复杂结构中主要能量传递路线的有效方法.

参考文献:

- [1] Lyon R H. Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and applications[M]. Cambridge: MIT Press, 1975.
- [2] 姚德源,王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
YAO Deyuan, WANG Qizheng. Principle and application of statistical energy analysis[M]. Beijing: University of Beijing for Science and Technical Press, 1995.
- [3] O'keefe Ed, Berge Matt. Critical energy flow paths for SEA models[R]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [4] Berge M, Eldersveld S, Walker N. A subroutine library for network optimization [R]. Washington: The Boeing Company, 1997.
- [5] Ahuja R, Magnanti T, Orlin J. Network flows — theory, algorithms, and applications[M]. Englewood Cliff: Prentice Hall Press, 1993.

(上接第 639 页)

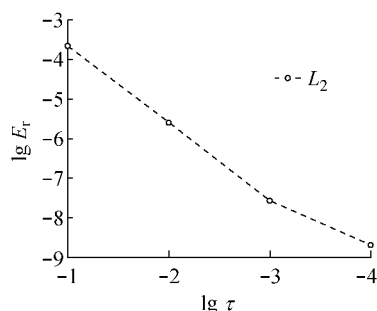


图 3 $N=126, t=1$ 时误差与 τ 的关系

Fig.3 Relationship between error and τ at $N=126, t=1$

参考文献:

- [1] Guo B Y, Xu C L. Hermite pseudospectral method for nonlinear partial differential equations [J]. Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2000, 34 (4):859.
- [2] Guo B Y. Error estimation for Hermite spectral method for nonlinear partial differential equations [J]. Mathematics of Computation, 1999, 68 (227):1067.
- [3] Xu C L, Guo B Y. Hermite spectral and pseudospectral methods for nonlinear partial equations in multiple dimensions [J]. Computational and Applied Mathematics, 2003, 22 (2):167.
- [4] Funaro D, Kavian O. Approximation of some diffusion evolution equations in unbounded by Hermite functions [J]. Mathematics of Computation, 1991, 57 (196):597.
- [5] Boyd J P. The rate of convergence of Hermite functions series [J]. Mathematics of Computation, 1980, 35(152): 1309.

- [6] Belleri V, Pata V. Attractors for semilinear strongly damped wave equations on R^3 [J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems, 2001, 7(4):719.
- [7] Carvalho A N, Cholewa J W, Dlotko T. Strongly damped wave problems: bootstrapping and regularity of solutions [J]. Journal of Differential Equations, 2008, 244(9): 2310.
- [8] Ikehata R. Decay estimates of solutions for the wave equations with strong damping terms in unbounded domains [J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2001, 24 (9):659.
- [9] Pata V. Attractors for a damped wave equation on R^3 with linear memory [J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2000, 23 (7):633.
- [10] Macías-Díaz J E, Puri A. A boundedness-preserving finite-difference scheme for a damped nonlinear wave equation [J]. Applied numerical mathematics, 2010, 60 (9): 934.
- [11] Gülle A. On the numerical solution of quasilinear wave equation with strong dissipative term [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 151 (2):581.
- [12] Guo B Y, Shen J, Xu C L. Spectral and pseudospectral approximations using Hermite functions: application to the Dirac equation [J]. Advances in Computational Mathematics, 2003, 19 (1):35.
- [13] Guo B Y. Spectral Methods and Their Applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1998.
- [14] Willett D, Wong J S W. On the discrete analogues of some generalizations of Gronwall's inequality [J]. Monatshefte für Mathematik, 1965, 69 (4):362.
- [15] Ma H P, Sun W W. Optimal error estimates of the Legendre-Petrov-Galerkin method for the Koreweg -De Vries equation [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 2001, 39 (4):1380.