关联度分析在东方音乐厅音质评价中的应用

宋拥民，章奎生
(上海现代建筑设计(集团)有限公司章奎生声学设计研究所，上海 200041)

摘要： 用东方音乐厅客观音质参数的测试结果和访谈得到的主观评价结果对东方音乐厅与世界上 14 个大型音乐厅的音质效果进行了分析，虽然东方音乐厅的音质效果令人满意，但其音质究竟能够达到怎样的满意度却缺乏可参照的目标。按照音质相近等级相同的原则可以判定东方音乐厅的音质效果与柏林交响乐厅最为接近，文章应用灰色系统关联度分析方法推断东方音乐厅的音质效果达到了优异级。

关键词： 灰色关联度分析；音质参量；主观评价；音乐厅
中图法分类号： **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-3630(2008)-02-0247-04

Application of gray relation analysis to acoustics evaluation of the oriental philharmonic hall

SONG Yong-min, ZHANG Kui-sheng
(Zhang kuisheng Acoustic Design and Research Studio, Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Objective measurements and subjective evaluation results of Oriental Philharmonic Hall and 14 large world-famous Concert Halls are compared. Though the acoustic quality of Oriental Philharmonic Hall is satisfied, there is no clear conclusion about the acoustic satisfaction level for the Hall. In accordance with the principle that the Hall with similar acoustic qualities should have the same rank, it can be determined that the acoustic quality of Oriental Philharmonic Hall is most similar to that of Berlin Symphony Hall. Therefore, with gray system relation analysis method it can be concluded that the acoustic quality of Oriental Philharmonic Hall is outstanding.

Key words: gray relation analysis; acoustical parameters; subjective evaluation; concert hall

1 引 言

东方音乐厅是上海东方艺术中心建筑群里容座最大的一座演艺建筑，也是目前国内已建成使用的最大型的交响音乐厅。其室内音质的客观测试结果及主观评价[1]都表明东方音乐厅的音质效果是令人满意的。

Beranek 博士曾历时数年收集了世界上一些有代表性的音乐厅的音质参数[2]，并对其中一些音乐厅通过访谈或问卷调查的方式进行了主观音质评价，按照室内音质效果的差别对音乐厅进行了分级，将其音质分为 A+、A、B+、B、C+和 C 六个等级，分别代表室内音质达到 “顶级”、“优异”、“良好到优异”、“良好”、“一般到良好”和 “一般”。获得众多好评的东方音乐厅其音质效果究竟可以与 Beranek 博士所划分的哪一等级的音乐厅相媲美？考虑到采用 Beranek 博士的研究方法对东方音乐厅进行音质主观评价难度较大，因此本文选取文献 2 中数据比较详尽的 14 个音乐厅与东方音乐厅进行音质客观参量间的数据对比分析，通过关联度分析结果来确定东方音乐厅音质效果的等级。

2 关联度分析方法简介

关联度分析方法[3]是灰色系统理论常用的分析方法。它通过对灰色系统内有限数据序列的分析，

收稿日期：2007-05-31；修回日期：2007-09-04
作者简介：宋拥民(1976-)，男，湖北人，博士，主要从事厅堂音质与噪声控制工程设计及研究工作。
通讯作者：宋拥民，E-mail:asong1102@163.com

寻求系统内部诸因素间的关系，找出影响目标值的主要因素，进而分析各因素间的关联程度。它通过确定参考数列和若干比较数列几何形状的相似程度，判断灰色过程发展态势的关联程度。如果参考数列和比较数列在系统发展过程中相对变化基本一致，则认为两者关联度大；反之，两者关联度就小。对参考数列和比较数列进行相似程度的比较是关联度分析最基本的功能。

设有 m+1 个指标组成的序列 $\{X_0^{(0)}(k)\}\{X_1^{(0)}(k)\}\{X_2^{(0)}(k)\}\cdots\{X_m^{(0)}(k)\}$，$(k=1,2,\cdots,n)$，n 为各序列的长度（即数据个数），数据上标“(0)”表示数据未经处理即为原始数据。如果数据经过“直接累加”、“移动平均”、“加权累加”或“遗忘因子累加”等方式的数据生成，则处理的次数需要标记“(n)”，n 为处理的次数。

设 $\{X_0^{(0)}(k)\}(k=1,2,\cdots,n)$ 为此指标序列的母序列，而其它 m 个指标序列为子序列。关联度分析就是要找出母系列和子系列之间的关联性。在本文的研究中，要考察的是东方音乐厅的音质与世界上 14 个大型音乐厅音质的相似程度，将东方音乐厅音质参量作为唯一的母序列，其他 14 个音乐厅音质指标作为子序列，因此只需要排定各音乐厅与东方音乐厅音质的关联序，就可以确定东方音乐厅的音质与所比较音乐厅音质的相似程度。

关联度分析一般包括原始数据变换、关联系数计算、关联度计算、关联序排序这几个步骤。变换原始数据主要是为了消除不同参数之间量纲和数量级的差异，以方便进行数据间的比较。主要的变换方式有均值化、初值化和标准化。一般情况下，对原始数列只作数值间的关联比较，常用均值化变换。

关联系数是表征两个被比较序列在某一数据点的紧密程度。设经数据变换的母序列记为 $\{X_0(t)\}$，子数列记为 $\{X_i(t)\}$，则在第 k 个数据处母序列 $\{X_0(k)\}$ 与子序列 $\{X_i(k)\}$ 的关联系数 $L_{0i}(k)$ 可由下式计算：

$$L_{0i}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta_{\max}} \tag{1}$$

式中 $\Delta_{0i}(k)$ 表示 k 点两个比较序列的绝对差：

$\Delta_{\max}$ 和 $\Delta_{\min}$ 分别表示所有比较序列各个数据点处绝对差中的最大值与最小值；

ρ 为分辨系数，其意义是削弱最大绝对差数值太大引起的失真，提高关联系数之间的差异显著性，$\rho\in(0,1)$，一般情况下可取 0.1~0.5。

两个序列的关联度是指两个被比较序列在各个数据观测点的关联系数的平均值，即：

$$r_{0i}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}L_{0i}(k) \tag{2}$$

式中 r_{0i} 为子序列 i 与母序列 0 的关联度，N 为比较序列的长度（即数据个数）。

将 m 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来，便组成关联序。它直接反映各个子序列与母序列的相关程度。

3 东方音乐厅音质参量的测试结果

容座 1980 人的东方音乐厅其建筑平面呈椭圆形。厅内最大长度达 52m，最大宽度达 42m，全厅平均吊顶高度为 11m。建筑墙体由八个呈鱼形状的钢筋混凝土筒体围合而成，整个天花呈前高后低的斜形平面状。全厅观众席离指挥台平均距离为 17m，最远座离指挥台 31 米，侧墙和吊顶的扩散程度较高。

2004 年 12 月中法双方合作对东方音乐厅做了空满场音质测量，通过脉冲响应法测量各个主要音质参量，包括混响时间、早期衰减时间、音乐明晰度、侧向反射声系数、声场力度、声场不均匀度等，并按照低音比的定义[4]计算了东方音乐厅室内音质的低音比 BR。测试和计算结果如表 1 所示。

表 1 东方音乐厅室内音质参量的测试和计算结果

Table 1 Measurements of acoustical parameters in oriental philharmonic hall

音质参量	倍频带中心频率 f/Hz					
	125	250	500	1k	2k	4k
RT(U)	2.10	2.00	2.00	1.90	1.80	1.50
RT(O)	1.90	1.90	1.70	1.80	1.80	1.50
EDT(U)	2.10	1.90	1.90	1.80	1.80	1.40
EDT(O)	1.70	1.70	1.60	1.60	1.60	1.40
C80(U)	-3.0	-1.1	1.1	1.4	0.9	1.9
C80(O)	-3.2	0.00	1.6	2.0	2.0	2.4
LF(U)	0.25	0.24	0.26	0.38	0.35	0.39
ΔL_P(U)	±3.8	±2.6	±2.0	±2.3	±2.5	±3.2
BR	1.09					

注：“U”和“O”分别代表空场和满场，RT(U) 代表空场混响时间，RT(O) 代表满场混响时间，其他类似。

4 关联度分析结果

对东方音乐厅及 14 个大型音乐厅的音质参量进行灰色系统关联度分析，东方音乐厅的音质参量作为母序列，被比较的 14 个大型音乐厅的音质参量作为子序列，通过分析各子序列对母序列的关联序，

可以确定东方音乐厅音质效果与被比较的各音乐厅音质的相似程度。组成灰色系统的 15 个音乐厅的建筑体形参数如表 2 所示。

考虑到本文旨在比较东方音乐厅和 14 个大型音乐厅音质效果的相似程度，并不是比较东方音乐厅的建筑体形规模与 14 个音乐厅的相似程度，因此在应用灰色系统关联度分析时仅将这 15 个音乐厅的音质参数作为指标序列的原始数据，其结果如表 3 所示。依据 Ando 的研究结果[5]，在音乐厅内 EDT 比 RT 更能反映主观评价，因此表 3 中仅以 EDT 作为时间参量的代表，同时在列出的 5 个参量中，除 BR 为满场值外，其余 4 个参量均为空场测试值。

对表 3 所示的由 15 个音乐厅音质参数组成的灰色系统，采用均值化进行数据变换，并按照式(1)和式(2)进行关联系数及关联序的计算，其结果如表 4 所示。

由表 4 的分析结果可知，东方音乐厅的音质与柏林交响乐厅的音质关联度最高，而与维也纳音乐协会大音乐厅及苏黎士大音乐厅的音质关联度均较低。依据 Beranek 博士的研究结果，柏林交响乐厅的音质达到优异级，按照音质相似音效同级的原则，可以推断东方音乐厅的音质效果也达到优异级。

表 2　参与比较的 15 个大型音乐厅的建筑体形参数

Table 2　Architectural characteristics of 15 large-scale concert halls

名　称	体积 /m^3	座位数 N /座	单座容积 (m^3/人)	高度 /m	宽度 /m	长度 /m	舞台至最远观众席距离/m
东方艺术中心音乐厅	24 000	1 980	12.12	11.0	42.0	52.0	31.0
阿姆斯特丹 交响乐大厅	18 780	2 037	9.22	17.1	27.7	26.2	25.6
波士顿 交响乐厅	18 750	2 625	7.14	18.6	22.9	39.0	40.5
维也纳 音乐协会大音乐厅	15 000	1 680	8.93	17.4	19.8	35.7	40.2
巴塞尔 都市俱乐部音乐厅	10 500	1 448	7.25	15.2	21.0	23.5	24.4
柏林交响乐厅	21 000	2 335	8.99	12.8	42.7	29.0	30.0
卡迪夫圣大卫音乐厅	22 000	1 952	11.27	18.0	27.4	27.4	33.5
克利夫兰塞费伦斯音乐厅	16 290	2 101	7.75	16.8	27.4	32.9	41.2
东京 TOC 音乐厅	15 300	1 636	9.35	21.5	20.0	33.8	34.6
苏黎士大音乐厅	11 400	1 546	7.37	14.0	19.5	29.6	29.9
蒙特利尔 威-佩大厅	26 500	2 982	8.89	23.5	32.9	37.5	41.2
特拉维 夫曼氏大厅	21 240	2 715	7.82	12.2	40.2	30.5	38.7
布法罗 小汉斯音乐厅	18 240	2 839	6.42	13.4	39.3	37.5	43.9
伦敦巴比肯音乐厅	17 750	2 026	8.76	14.3	39.3	27.4	35.1
伦敦皇家艾伯塔音乐厅	86 650	5 080	17.06	36.0	47.0	44.5	42.7

表 3　组成灰色系统的原始数据

Table 3　Basic data in the gray system

名　称	EDT	BR	SDI	C_{80}	LF
东方艺术中心音乐厅	1.85	1.09	0.9	1.2	0.32
阿姆斯特丹 交响乐大厅	2.60	1.08	1.0	- 3.6	0.18
波士顿 交响乐厅	2.35	1.07	1.0	- 2.6	0.24
维也纳 音乐协会大音乐厅	3.00	1.11	1.0	- 4.3	0.18
巴塞尔 都市俱乐部音乐厅	2.20	1.24	0.8	- 2.6	0.16
柏林交响乐厅	2.10	1.01	0.8	0.1	0.16
卡迪夫圣大卫音乐厅	2.10	0.98	0.6	- 0.8	0.18
克利夫兰塞费伦斯音乐厅	2.00	1.19	0.8	0.0	0.14
东京 TOC 音乐厅	2.70	1.05	0.9	- 2.8	0.16
苏黎士大音乐厅	3.00	1.22	0.9	- 4.0	0.16
蒙特利尔 威- 佩大厅	2.00	1.22	0.6	- 0.3	0.14
特拉维夫 曼氏大厅	1.70	0.98	0.5	- 0.9	0.14
布法罗 小汉斯音乐厅	1.65	1.26	0.3	2.2	0.15
伦敦巴比肯音乐厅	1.90	1.10	0.3	- 1.2	0.15
伦敦皇家艾伯塔音乐厅	2.65	1.13	0.5	0.5	0.14

注：除东方音乐厅外，表中所示数据均引自参考文献[2]

表 4 ρ=0.2 下的关联系数及关联序

Table 4 Relational coefficient and order under ρ=0.2

名 称	EDT	BR	SDI	C_{80}	LF	关联序	等级
阿姆斯特丹 交响乐大厅	0.72	0.99	0.81	0.19	0.52	12	A+
波士顿 交响乐厅	0.79	0.98	0.81	0.22	0.65	3	A+
维也纳 音乐协会大音乐厅	0.63	0.98	0.81	0.17	0.52	13	A+
巴塞尔 都市俱乐部音乐厅	0.85	0.86	0.93	0.23	0.48	7	A
柏林交响乐厅	0.89	0.92	0.93	0.50	0.48	1	A
卡迪夫圣大卫音乐厅	0.89	0.90	0.71	0.36	0.52	5	A
克利夫兰塞费伦斯音乐厅	0.93	0.91	0.93	0.47	0.45	2	A
东京 TOC 音乐厅	0.70	0.96	0.93	0.22	0.48	9	A
苏黎士大音乐厅	0.63	0.88	0.93	0.18	0.48	14	A
蒙特利尔 威-佩大厅	0.93	0.88	0.71	0.42	0.45	4	B
特拉维夫 曼氏大厅	0.93	0.90	0.64	0.35	0.45	11	B
布法罗 小汉斯音乐厅	0.91	0.85	0.53	0.54	0.47	8	C+
伦敦巴比肯音乐厅	0.97	0.99	0.53	0.31	0.47	10	C+
伦敦皇家艾伯塔音乐厅	0.71	0.96	0.64	0.61	0.45	6	C

5 结 语

从东方音乐厅客观音质参数的测试结果和访谈得到的主观评价结果可以知晓东方音乐厅的音质是令人满意的。但其音质究竟能够达到怎样的满意度却缺乏可参照的目标。本文应用灰色系统关联度分析方法,对东方音乐厅与 14 个大型音乐厅音质参量之间的关联度进行对比分析,从而得出东方音乐厅的音质效果与柏林交响乐厅的音质效果最相近,并可以推断东方音乐厅的音质效果也达到优异级。

参 考 文 献

[1] 章奎生, 王静波, 杨志刚. 上海东方艺术中心的建声设计与主客观音质评价[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 352-357.
ZHANG Kuisheng, WANG Jingbo, YANG Zhigang. Architectural acoustic design and subjective and objective acoustics evaluation of the oriental art centre[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4): 352-357.

[2] 白瑞纳克著, 王季卿译. 音乐厅与歌剧院[M]. 上海, 同济大学出版社, 2002.
Beranek L L. Translated by WANG Jiqing. Concert halls and opera houses[M]. Shanghai, Tongji University Press, 2002.

[3] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国著. 灰色系统理论及其应用[M]. 科学出版社, 1999.
LIU Sifeng, GUO Tianbang, DANG Yaoguo. Theory and application of gray system[M]. Science Press, 1999.

[4] Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameter. ISO 3382-1997(E) [S].

[5] Ando Y. 著, 戴根华译. 音乐厅声学[M]. 北京, 科学出版社, 1989.
Ando Y. Translated by DAI Genhua. Concert hall acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1989.