

文章编号:1006-1355(2009)05-0140-06

Kirchhoff 公式在电容器装置噪声水平预估中的应用

孙新波, 吴九汇, 陈花玲

(西安交通大学 振动与噪声工程控制研究所, 西安 710049)

摘 要: 引入 Kirchhoff 公式, 对于换流站中滤波电容器装置围栏外噪声水平进行预估, 并将该方法的计算结果与单极子阵列声源计算方法的计算结果、肇庆实际测量结果进行了比较。结果表明, 实测结果与 Kirchhoff 公式计算结果具有良好的一致性, 进而验证了该方法的合理性和准确性。

关键词: 滤波电容器装置; 单极子阵列声源; Kirchhoff 公式

中图分类号: TM53 **文献标识码:** A

Application of Kirchhoff Formula in Prediction of Noise Level of Capacitor Installation

SUN Xin-bo, WU Jiu-hui, CHEN Hua-ling

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Kirchhoff formula method is employed to predict the surrounding fence noise level of the filter capacitor installation in the converter station. The computation results are compared with those by the monopole array sound source method, and by the measurement in Zaoqing. It is found that our computation results agree with the measurement data very well. Thus, this method is proved reasonable and correct.

Key words: filter capacitor installation; monopole array sound source; Kirchhoff formula

在高压直流输电系统中, 滤波电容器装置作为换流站的主要噪声源之一, 已经严重影响到周围居民及工作人员的生活。为了满足环境对滤波电容器的要求, 国电公司制定了滤波电容器在围栏外的噪声水平不应超过 60 dB 的标准, 所以, 在建造高压直流输变电站时, 有必要对设计好的滤波电容器装置的噪声水平进行预估, 在此基础上才能对其进行治理。

国外由于高压直流输变电技术发展比较早, 对滤波电容器装置噪声水平的预估研究也比较早。文献[1]在测量电容器装置噪声水平以及电容器外壳固有振动特性的基础上, 计算了在给定谐波电流时电容器表面的振动加速度信号; 文献[2]对电容器装置的噪声水平进行了实际测量; 文献[3]中给

出了换流站中电容器及电容器装置整体噪声水平的计算公式, 但没有提出该计算公式中关于电容器表面振动速度的计算方法, 因此难以直接计算电容器及电容器装置的噪声水平。

近几年, 国内对于滤波电容器装置噪声水平的预估也开始了研究, 文献[4]主要分析了电力电容器噪声产生的机理以及在谐波电流流过时电容器噪声的特性; 文献[5]从电容器噪声产生的机理入手, 研究单台电容器表面的固有振动特性、外界作用力及其在外力作用下的振动响应三者间的关系, 并通过将电容器简化为点声源的方法计算了单台和多台电容器的整体噪声水平; 文献[6]也利用单极子阵列声源的方法研究了滤波电容器装置围栏外的噪声水平。

总体来讲, 现有的滤波电容器装置噪声水平的预估方法虽然各有特点, 但预估结果与实测结果常常存在较大误差。为了提高预估精度, 本文探索了将 Kirchhoff 公式引入到滤波电容器装置的辐射声场预估的可行性。

收稿日期: 2009-02-20

作者简介: 孙新波(1984-), 男, 山西永济人, 硕士, 主要研究方向: 电力设备振动与噪声工程控制。
E-mail: kofly@stu.xjtu.edu.cn

1 电容器噪声产生机理

单台滤波电容器组成如图 1 所示,电容器的工作方式如图 2 所示,即:交流电通入电容器元件内部的小电容时会在两极板产生交变电压,进而产生交变电场力,其电场力的大小如式(1)所示

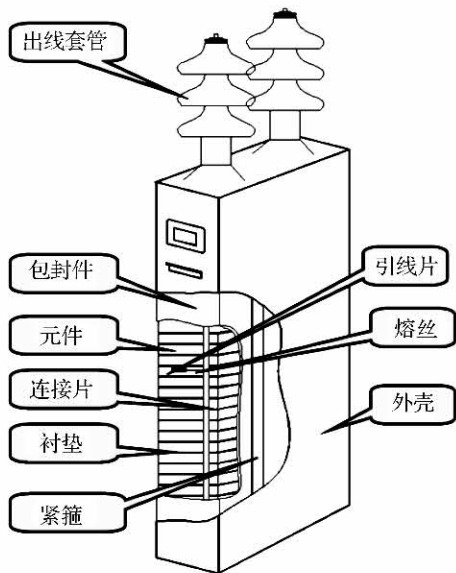


图 1 滤波电容器组成图

Figure 1: component of the high voltage filter capacitor

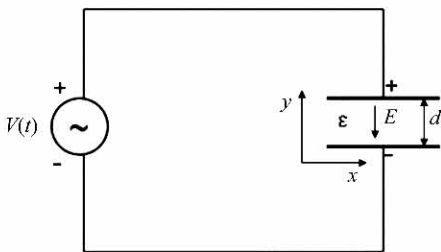


图 2 平行板电容器在交流电压 $V(t)$ 作用下的示意图

Figure 2: schematic drawing parallel-plate capacitor under the AC voltage $V(t)$

$$f(y) = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(y)}{dy} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{d^2} = -K E^2(t) \quad (1)$$

由此可见,电容器的噪声主要有两个来源:①、电容器元件两个极板在电场力作用下产生振动所辐射的噪声;②、电场力通过电容器内部元件的传递,作用到电容器的薄壁外壳上,从而造成外壳的振动而辐射的噪声。由于电容器极板产生的噪声在通过内部其他元件及电缆纸等绝缘介质时,由于他们的阻性较大,所以极板辐射的噪声衰减很快,故电容器的辐射噪声主要来源于电容器外壳的振动。

2 单极子阵列声源法在滤波电容器装置辐射声场计算过程中的应用

为了将 Kirchhoff 公式计算的可行性与精度以及与实测结果进行比较,先利用单极子阵列声源的方法对肇庆换流站中电容器装置围栏外的噪声水平进行预估。

单极子阵列声源法是将每台电容器简化为同相位的单极子声源进行处理,由平面声源声辐射(如图 3 所示)及声源群简化(如图 4 所示)方法可知,如果电容器的尺寸及测点距离电容器的距离满足一定条件,可将单台电容器简化为点声源进行处理。

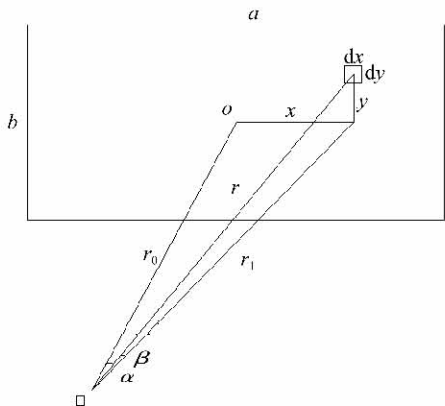


图 3 平面声源声辐射

Figure 3. sonic radiation of a plane sound source

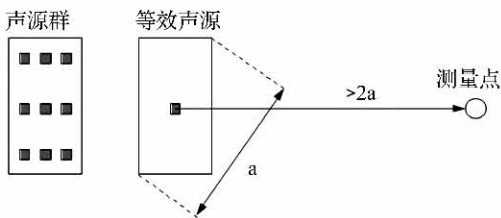


图 4 声源群简化

Figure4: simplify sound source group

根据文献[9]与文献[3]可知,平面声源声辐射简化为点声源的过度距离为 $r_0 = b/\pi$;而声源群简化为点声源的条件是测点距离要大于声源群自身的最大尺寸的 2 倍。根据肇庆换流站中围栏到各个电容器的实际可以得知,将每台电容器简化为点声源是满足要求的。

将电容器装置简化为单极子阵列声源后,如果忽略了声源之间的相互影响,则在任何一个测点的声压就等于各个声源产生的声压总和。测点测到的总声压与各点声压成比例,即

$$p \propto \sum_{i=1}^n \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \quad (2)$$

式中, r_i 为第 i 个电容器到测点的距离。根据点声源辐射声场的计算公式

$$p \approx j \frac{k \rho_0 c_0}{4 \pi r} Q_0 e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

式中, $Q_0 = Su_a$ 为声源面积和表面振动速度的乘积; ρ_0 为介质(空气)密度; c_0 为声音在空气中的传播速度; k 为波数。

此方法比较简单,但其缺点是忽略了电容器之间所造成的声的衍射现象,该方法的具体计算及计算结果在文献[6]中已经进行了详细的叙述,只是在文献[6]中未考虑地面对声反射作用,实际滤波电容器塔架由于安装在比较硬的地面上,因此,根据镜像原理应该将地面对声场的反射作用看成在地面的另一侧存在着和原来声源相同的虚声源进行处理。所以辐射声场的计算将是两者的声场叠加的结果,所以本次计算中考虑了这一点。

3 Kirchhoff 公式在滤波电容器装置辐射声场计算过程中的应用

由于电容器装置是有很多台电容器分层排列组成,所以每个电容器自身辐射的噪声在传递到测量点的过程中,还存在电容器之间的相互影响,而前面单极子阵列声源在计算过程中未考虑这点。为了准确得到测点处噪声值,预估中应该考虑该因素对声场的影响。

3.1 Kirchhoff 公式的含义及物理意义

Kirchhoff 公式是一种用于研究声与结构相互作用的声学公式(8),该公式比较适合计算结构振动引起的内外声场分布,引入该方法对滤波电容器装置的辐射声场进行了预估。Kirchhoff 公式具体如下所示

$$\phi(R) = \frac{1}{4 \pi} \iint_S \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \frac{e^{ikr}}{r} - \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) \right] dS \quad (4)$$

式中, S 为声源的表面积; r 为测点到声源表面上微元面 dS 的距离; ϕ 为速度势; $e^{ikr}/4 \pi r = G$ 为格林函数; n 为声源表面的法线方向; $\partial \phi / \partial n = v_n$ 为电容器外壳法向振动速度。

根据惠更斯原理,任何一个声场可以看作是波的迭加形式。公式(4)给出了惠更斯原理的数学形式,即以边界上 ϕ 和 $\partial \phi / \partial n$ 的函数值来确定区域内任意一点 R 的势函数的值。公式右边的两项具有明显的物理意义。第一项给出置于表面 S 上的容积声源(有时叫简单声源)的声势。在第二项中引入了导数 $\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right)$,它确定了一个产生偶极子的声源的双层声源的势函数。空间任意一点的声场是由表面上

的球面声源和偶极子声源发射出来的。由于 Kirchhoff 公式考虑了电容器自身的声辐射及电容器之间的相互影响,所以它的计算结果应该还是比较准确的。

3.2 应用 Kirchhoff 公式预估滤波电容器装置辐射声场

由速度势与声压的关系

$$P(t) = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho i \omega \phi(t) \quad (5)$$

可将式(4)变为:

$$P(R) = \frac{\rho \omega}{4 \pi} \iint_S \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \frac{e^{ikr}}{r} - \frac{P}{\rho \omega} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) \right] dS \quad (6)$$

式中, P 为电容器表面声压。要计算辐射声场中测点的声压,根据式(6)就必须知道电容器外壳的法向振动速度及靠近电容器表面的声压分布。由于在一般的测量中电容器的表面振动速度可以实际测量得到,而表面声压未知。这就需要在表面振动速度已知的条件下对表面声压进行求解。

当测点位于电容器表面上 M' 时,由公式(6)取积分主值可得

$$P(M') + \iint_S P(S) K(M', S) dS = f(M') \quad (7)$$

$$K(M', S) = \frac{1}{2 \pi} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr(M', S)}}{r(M', S)} \right) \quad (8)$$

$$f(M') = \frac{\rho \omega}{2 \pi} \iint_S \frac{\partial \phi(S)}{\partial n} \frac{e^{ikr(M', S)}}{r(M', S)} dS \quad (9)$$

式中 $r(M', S)$ 为观测点 M' 到微元面积 dS 的距离。其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr(M', S)}}{r(M', S)} \right) &= \left(\frac{ik}{r} e^{ikr(M', S)} - \frac{e^{ikr(M', S)}}{r^2} \right) \frac{\partial r}{\partial n} = \\ &= \left(\frac{ik}{r} e^{ikr(M', S)} - \frac{e^{ikr(M', S)}}{r^2} \right) \cos(\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

θ 为 r 与法线 n 的夹角,由于电容器外壳法线方向 n 与 r 垂直,所以由式(8)得出 $K(M', S)$ 为 0,所以得到

$$\begin{aligned} P(M') &= f(M') = \\ &= \frac{\rho \omega}{2 \pi} \iint_S \frac{\partial \phi(S)}{\partial n} \frac{e^{ikr(M', S)}}{r(M', S)} dS \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以计算电容器表面声压分布,进而利用 Kirchhoff 公式演变式(6)求出辐射声场的声压。

4 实测结果与两种计算方法的计算结果比较

肇庆换流站中的工作电流的具体参数见表 1 所示,肇庆换流站中滤波电容器装置的布置及测点布置如图 5 所示。

表 1 肇庆并联电容器 BAM7.896/380-1W 工作条件

Table 1 running conditions of parallel capacitor BAM7.896/380-1W in Zhaoqing

谐波次数	1	2	5	7	9	11	13	23
元件电流(A)	3.19	0.1	0.64	0.19	0.05	0.04	0.025	0.021
元件阻抗(Ω)	437.2	218.6	87.4	62.5	48.6	39.7	33.6	19.0
元件电压(V)	1394.67	21.86	55.94	11.88	2.62	1.51	0.84	0.399
元件场强(MV/m)	46.489	0.729	1.865	0.396	0.09	0.05	0.028	0.013

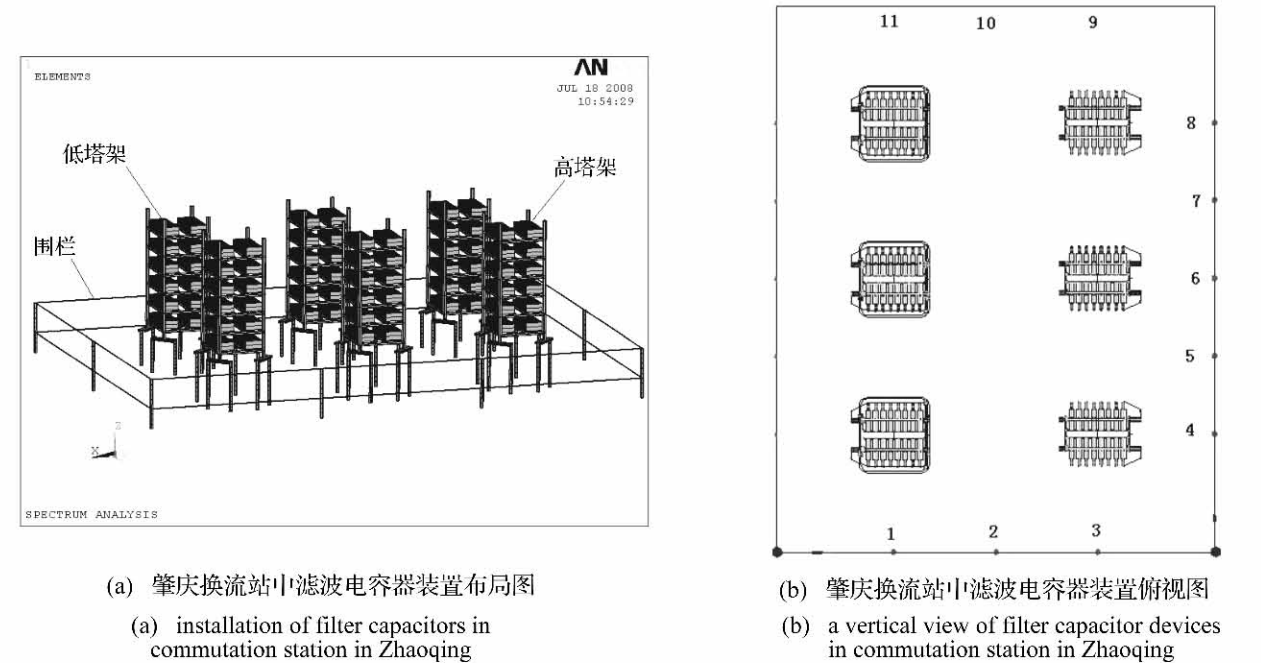


图 5 滤波电容器装置及测点布置图

Figure 5: installation of filter capacitors and layout of measurement points

利用 MATLAB 软件对上述两种计算方法进行编程,计算结果与现场实测得到的 A 计权声压级对比结果如表 2 所示。

表 2 理论计算结果与实测结果 A 计权声压级比较:声压级/dB
Table 2 comparison of theoretical calculated value and the measured results by A-weighted sound pressure level ;SPL/dB

计算方法	测点	1	2	3	4	5	6
实际测量	结果	44.0	44.5	44.0	44.0	44.5	44.0
Kirchhoff	结果	43.5	44.2	44.0	44.3	44.8	45.0
公式计算	误差	-1.1%	-0.7%	0	0.7%	0.7%	2.3%
单极子阵	结果	47.1	47.8	47.6	47.9	48.4	48.7
列计算	误差	7.0%	7.4%	8.2%	8.9%	8.8%	10.7%
计算方法	测点	7	8	9	10	11	
实际测量	结果	45.0	42.0	44.5	44.5	43.0	
Kirchhoff	结果	44.8	44.3	44.0	44.2	43.5	
公式计算	误差	-0.4%	5.5%	-1.1%	-0.7%	1.2%	
单极子阵	结果	48.5	48.1	47.6	47.8	47.1	
列计算	误差	7.8%	14.5%	7.0%	7.4%	9.5%	

从表 2 可以看出:Kirchhoff 公式计算结果中最大误差是 5.5%,而单极子阵列声源计算结果最大误差为 14.5%,最小误差为 7.0%,可见,Kirchhoff 公式预估滤波电容器装置噪声不仅可行,而且具有较高精度。当然,单极子阵列声源计算方法的计算量比较小,在一定精度下也可以对换流站滤波电容器装置噪声水平进行预估。

5 结 语

综上所述,Kirchhoff 公式计算法在考虑了电容器之间的相互影响后,其计算的结果要比单极子阵列声源计算法计算的结果更接近实际测量值。但是 Kirchhoff 公式计算法计算量比较大,而单极子阵列声源计算量比较小。所以 Kirchhoff 公式计算方法比较适合精确计算,而单极子阵列声源适合粗略估算。

(下转第 175 页)

- [7] 郑大瑞, 蔡秀兰, 等. 关于噪声评价用语的研究[J]. 声学学报, 1993, 18(6): 444-454.
- [8] 毛东兴. 车内声品质主观评价与分析方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [9] 张道永. 噪声品质主观评价中若干问题的研究及其应用[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2006.
- [10] 邵惠鑫. 城市住区的声景研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [11] 陈克安, 马苗等. 汉语语境下的车辆噪声听觉属性评价与分析[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 348-353.
- [12] G. L. Collier. A comparison of Novices and Experts in the Identification of Sonar Signals[J]. **Speech Communication**, 2004, 43: 297-310.
- [13] G. Von Bismarck. Timbre of Steady Sounds: A Factorial Investigation of its Verbal Attributes [J]. *Acustica*, 1974, 30: 146-158.
- [14] R. L. Pratt, P. E. Doak. A Subjective Rating Scale for Timbre[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1976, 45(3): 317-328.
- [15] S. Koji, K. Takaharu, S. Shigeki. The Relationship Between KANSEI and Bowing Parameters in the Scale Playing on the Violin [C]. **IEEE SMC '99 Conference Proceedings, Tokyo, Japan**, 1999, 4: 305-310.
- [16] B. Barbot, C. Lavandier, P. Chemine'e. Perceptual Representation of Aircraft Sounds [J]. **Applied Acoustics**, 2008, 69: 1003-1016.
- [17] 三民书局. 最新简明英汉词典[M]. 北京: 外语教学与研究出版社, 2005.
- [18] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

(上接第 143 页)

参考文献:

- [1] Cox M D, Guan H H. Vibration and Audible Noise of Capacitors Subjected to Non-sinusoidal Waveforms [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 856-862.
- [2] Smede J, Johansson C G, Winroth O, et al. Design of HVDC Converter Stations with Respect to Audible Noise Requirements [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1995, 10(2): 747-758.
- [3] CIGRE Technical report. HVDC Stations Audible Noise [R]. No. 202 W. G 14. 26, France, 2002.
- [4] 尹克宁. 电力电容器噪声的产生机理及其特性分析[J]. 电力电容器, 1995, 3: 10-13.
- [5] 汲胜昌, 寇小括, 李彦明. 换流站中电容器装置噪声水平计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 112-118.
- [6] 孙新波, 陈花玲, 姚成. 电容器装置噪声水平的估算方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(1): 13-16.
- [7] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 科学出版社, 2004: 89-100.
- [8] 申罗杰夫, OE. U. (苏). 水声学波动问题[M]. 何祚镛, 赵晋英译, 国防工业出版社, 1983. 12: 12-23.
- [9] 马大猷. 噪声控制学[M]. 科学出版社, 1987: 40-55.

(简讯)

2009 中国西部首届交通噪声控制技术交流会在成都市举行

由四川省环境保护局主办、四川省环保产业发展中心协办、四川正升环保科技有限公司承办的“2009 中国西部首届交通噪声控制技术交流会”于 2009 年 8 月 7 日在成都市举行。来自四川省科研、设计、大学、监测、管理、生产企业等单位的 50 余名代表出席了会议。大会邀请中科院声学所程明昆、清华大学燕翔、北京劳保所邵斌、上海中船九院吕玉恒等专家在大会上就环境噪声控制新进展、交通噪声控制设计、道路声屏障的物理学、心理学与美学观以及声屏障的结构、材料等进行了专题讲座并互动交流。四川省环保局领导与会讲了话。会议期间与会代表参观了四川正升环保科技有限公司, 该公司是中国环保产业噪声控制骨干企业之一, 主要从事环保、能源产业的设计、生产、销售业务, 是四川省高新技术企业, 已获得 20 余项专利证书, 在能源技术、噪声治理、固废处理三大领域已完成上百项大型工程的施工安装任务, 取得了满意的治理效果, 深受用户欢迎。本次交流会沟通了信息、交流了经验、增进了联系、促进了西部地区环境保护噪声治理技术的发展。