

骨声振动分析中软组织加速度计的影响分析

彭健新 马玉英 张若昕 陈启敏

(陕西师范大学应用声学研究所 西安·710062)

在骨声振动分析中皮肤、肌肉等软组织、加速度计对结果有一定的影响。本文分析在体胫骨测试的情况,用力电类比的方法分析这些因素对骨声振动的影响。结果表明,加速度计的质量大小、及加速度计与骨之间的软组织硬度对结果影响较大。测试时频率分析范围必须远小于加速度计在软组织上的共振频率而远大于软组织的自振频率。

关键词 骨声振动分析 共振频率 骨 软组织 加速度计

Influence of accelerometer and soft tissue on sound vibration analysis of bone

PENG Jianxin MA Yuying ZHANG Ruoxin CHEN Qimin

(Applied Acoustic Institute, Shanxi Teachers University Xian 710062)

Accelerometer and soft tissue such as skin and muscle have an influence on the result of sound vibration analysis of bone. Measurement of the tibia and the influence of soft tissue and accelerometer on the bone sound vibration has been investigated by force-voltage analogue circuit in this paper. The result shows that the mass of accelerometer and stiffness of soft tissue between accelerometer and bone have a significant influence. It is suggested that frequency to be analyzed must be less than the resonant frequency of the accelerometer on the soft tissue and much greater than the resonant frequency of the soft tissue.

Key words: sound vibration analysis, resonant frequency, bone, soft tissue, accelerometer

1 引言

骨声振动分析已广泛应用于骨病诊断、关节病诊断、骨折愈合程度估计^[1],它是一种无损检测方法,在应用中结合信号处理技术对骨的性能进行分析,找出骨振动的共振频率与骨的物理参数之间的关系。但是,测试时皮肤、肌肉等软组织和加速度计对骨声振动分析的结果有一定的影响,人们为了消除这些因素的影响做了不少的工作。Nokes 在测试时施加适当的预应力,其结果与实际情况比较接近^[2];Collier 建立一套机械阻抗测量装置测量其输入输出阻抗,并分析它们之间

的关系来消除软组织、加速度计质量的影响^[3];Corenlissen 从实验上分析这些因素对结果的影响^[4];Ziegert 采用不同质量的加速度计拾振,发现加速度计的质量越小,其测试结果越与直接从骨上测得的结果相接近^[5];Kim 把加速度计及加速度计与骨之间的软组织作为一个质量-弹簧-阻尼的系统对测试结果进行修正^[6]。本文从振动模型分析入手,借助力电类比方法,分析了皮肤、肌肉等软组织加速度计对骨声振动分析结果的影响。

2 方法与振动模型分析

• 收稿日期:95-6-22;修回日期:95-9-23

骨声振动分析中,加速度计通过皮肤肌肉耦合接收骨振动信号。在体测试胫骨时,将腿置于一水平面上,用一弹性带将加速度计系于胫骨一端的皮肤上,在胫骨另一端激振,如图 1 所示,图 2 为采用不同质量的加速度计在同一位置接收到的骨振动时域信号(虚线为 YD-1 型, $M=22g$; 实线为 YD-8 型, $M=2g$)。

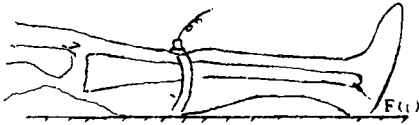


图 1 在体测试示意图

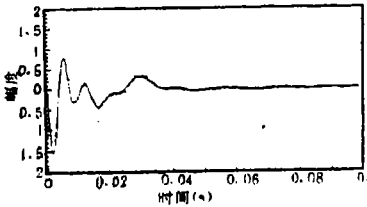


图 2 骨振动时域信号

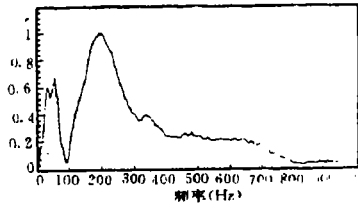


图 3 骨振动频谱图

图 3 为其对应的频谱图,从图中可以看出加速度计的质量不同,所得到的相应骨振动频谱主峰值不同,加速度计的质量越大,而频谱主峰值越小。

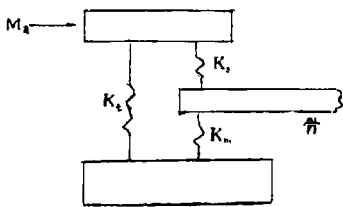


图 4 简化的振动模型

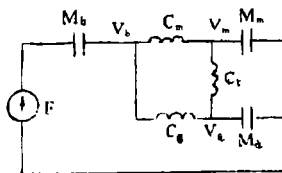


图 5 等效电路图

为了进一步分析各因素对骨声振动的影响,图 1 所示装置用一个简化的振动模型来描述,如图 4 所示。其中, M_a 、 M_m 分别表示加速度计、肌肉质量, K_m 、 K_t 、 K_s 分别表示肌肉、弹性带、加速度计与骨之间的硬度。用力电类比方法得到其等效电路图见图 5,其中: $C_m=1/K_m$, $C_t=1/K_t$, $C_s=1/K_s$ (1) 根据克希霍夫定律得:

$$\frac{V_b - V_m}{j\omega C_m} = j\omega V_m M_m + \frac{V_m - V_a}{j\omega C_t} \quad (2)$$

$$\frac{V_b - V_a}{j\omega C_s} + \frac{V_m - V_a}{j\omega C_t} = j\omega V_a M_a \quad (3)$$

其中 V_a 、 V_b 、 V_m 分别表示加速度计、骨、肌肉的振动速度,由式(1)、(2)、(3)得:

$$V_a = \frac{C - \omega^2 M_m K_s}{M_a M_m \omega^4 - B \omega^2 + C} V_b \quad (4)$$

其中 $B = M_a(K_t + K_m) + M_m(K_t + K_s)$ (5)

$$C = K_s K_t + K_t K_m + K_m K_s$$

由(4)式得到频率方程为:

$$M_m M_a \omega^4 - B \omega^2 + C = 0 \quad (6)$$

$$\text{即: } \omega^2 = [B \pm (B^2 - 4M_m M_a C)^{1/2}] / (2M_m M_a)$$

(7)

在(7)式中, ω_1 对应于加速度计静止,肌肉振动的频率; ω_2 对应于肌肉静止,加速度计振动的频率;将 Ziegert 测试的结果 ($K_s = 4.8 \times 10^5 \text{ N/m}$, $K_t = 1.8 \times 10^3 \text{ N/m}$, $K_m = 1.2 \times 10^5 \text{ N/m}$, $M_m = 2.8 \text{ kg}$, $M_a = 2.2 \times 10^{-3} \text{ kg}$) 代入(7)式中得到频率值为: $f_1 = 33.2 \text{ Hz}$, $f_2 = 2355.3 \text{ Hz}$ 。由此可知,在骨声振动分析中的频率分析范围应远小于 f_2 而远大于 f_1 。

3 讨论

对(7)式作进一步分析得到 M_a 、 M_m 、 K_s 、 K_t 、 K_m (各参量变化两个数量级)与频率 f 的关系见图 6。从图 6。(a)、(b)中可以看出频

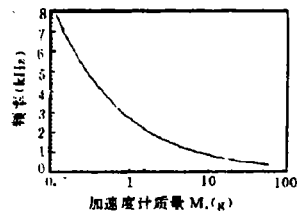
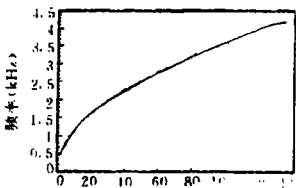
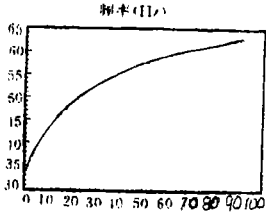


图 6 (a)



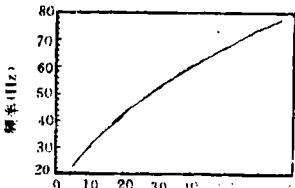
加速度计与骨间硬度 $K_s (\times 10000 \text{ N})$

(b)



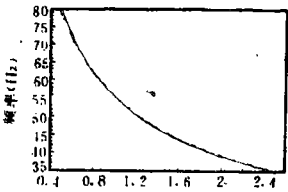
带硬度 $K_s (\times 10000 \text{ N})$

(c)



肌肉硬度 $K_m (\times 10000 \text{ N})$

(d)



肌肉质量 $M_m (\text{kg})$

(e)

图6 M_s, M_m, K_s, K_t, K_m 与频率 f 的关系

率随加速度计的质量大小及加速度计与骨之间的软组织硬度变化较大,加速度计的质量越大,加速度计与骨之间的软组织硬度越小,对应的频率值就越小,可测试的频率范围愈窄。图6.(c)、6.(d)、6.(e)表明频率随肌肉和弹性带的硬度、肌肉质量变化较小,其变化范围小于100Hz。由以上分析可知:加速度计的质量大小及加速度计与骨之间的软组织硬度对结果影响较大,而肌肉和弹性带的硬度、肌肉质量对结果影响较小。因此等效网络图(3)可进一步简化为图(7),图中考虑了加速

度计与骨之间的软组织的阻尼效应, R_s 为阻尼系数。根据图(7)可得:

$$\frac{V_b - V_a}{j\omega C_s} + (V_b - V_a)R_s = j\omega V_a M_a \quad (8)$$

由式(8)、(1)得振动方程为:

$$M_a X'' - R_s (X' - Z') + K_s (X - Z) = 0 \quad (9)$$

式中 X, Z 分别表示加速度计、骨的位移。对式(9)作傅里叶变换得加速度传输函数为:

$$H(\omega)_{a-a} = \frac{1 + jZ\xi\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2 + (jZ\xi\omega/\omega_n)} \quad (10)$$

$$\text{式中, } \omega_n = (K_s/M_a)^{1/2} \quad \xi = R_s/(2M_a\omega_n) \quad (11)$$

式(10)可简化为:

$$H(\omega)_{a-a} = |H(\omega)| e^{-j\varphi(\omega)} \quad (12)$$

$|H(\omega)|_{a-a}$ 为增益因子, 大小为:

$$|H(\omega)|_{a-a} = \left(\frac{1 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (Z\xi\omega/\omega_n)^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$\varphi(\omega)$ 为相位因子, 其大小为:

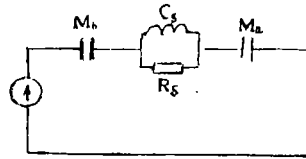


图7 简化的等效网络

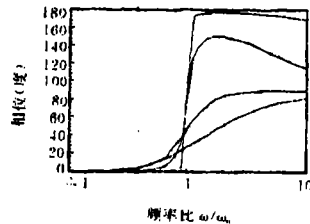
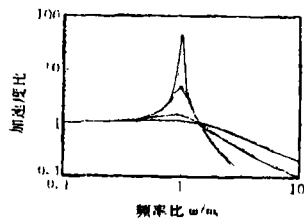


图8

$$\phi(\omega)_{-s} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2\zeta(\omega/\omega_n)^3}{1 - (\omega/\omega_n)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2} \right) \quad (14)$$

的图形见图 8, 图 8 说明了加速度计接收到的加速度大小与骨振动的加速度大小的比值和阻尼比 ζ , 频率比 ω/ω_n 有关。实际上软组织呈较低的阻尼, 为了准确地反映骨的物理特性, 当阻尼比 $\zeta=0.1$ 时, 测试的最大频率必须低于加速计在软组织上的共振频率的 1/3, 这个结果与 Ziegert 分析的结果相符。

4 结 论

由以上分析可知: 加速度计的质量大小、及加速度计与骨之间的软组织硬度对结果影响较大, 在骨声振动分析中, 为了准确的反映骨的物理特性, 应采用质量较小的加速度计拾振, 同时, 测试时频率分析范围必须远小于加速计在软组织上的共振频率而远大于软组织的自振频率。

参 考 文 献

1 Nokes D. M. et al, A literature review of vi-

brational analysis of human limbs. IEEE Trans. BME. 1984; 31(2); 187~193.

2 Nokes L. et al, Vibration analysis of human tibial; The effect of soft tissue on the output from skin-mounted accelerometers, J. Biomed. Eng. 1984; 6(7); 223~226.

3 Collier R. J. et al, Non-invasive method of measuring resonant frequency of human tibia, J. Biomed. Eng. 1987; 9(10); 321~331.

4 Corenlissen P. et al. Assessment of tibia stiffness by vibration testing in stiu - I, Influence of soft tissues joint and fibule, J. Biomech. 1986; 19(7); 551~561.

5 Ziegert J. C. et al, The effect of soft tissue on measurements of vibrational bone motion by skin-mounted accelerometer, ASME. J. Biomech. Eng 1979; 101(8). 218~220.

6 Kim W. et al, Measurement of the impulsive bone motion by skin-mounted accelerometers, J. Biomech. Eng. 1993; 115(1); 47~52.

7 杜功焕. 声学基础, 上海科技出版社, 1981.

会议报道

上海市声学学会第四届年会暨学术交流会简报

上海市声学学会第四届年会暨学术交流会于 1996 年 4 月 16 日在上海市科学会堂举行。来自科研、高校、医疗、设计、生产各单位会员 110 名, 会议共收到论文 64 篇。论文摘要刊载于《声学技术》杂志 1996 年第 1 期上。

在大会上宣读的报告有两篇: (1) 章奎生高级工程师, “上海大剧院观众厅音质设计与研究”, (2) 徐智章教授, “医学超声的新进展”。其余报告按不同内容分为 6 类, 分别在 3 个会场宣读。它们是 (1) 水声与超声, (2) 建筑声学及噪声控制, (3) 生物医学超声与生理声学。

大会由冯绍松理事长主持, 赵松龄副理事长代表第四届理事会作学会工作总结, 并宣布理事会的决定; 授予周永昌主任医师和魏墨盍教授“上海声学学会荣誉理事”的称号并颁发了荣誉证书, 以表彰他们多年来对上海市声学学会作出的卓越贡献。在会上由全体出席会议选举上海市声学学会第五届理事会理事。

新成立的上海市声学学会第五届理事会召开了第一次会议, 选出向大威研究员为理事长, 陈思忠高级工程师、徐智章教授、钱梦骥教授为副理事长, 阎玉舜副教授为秘书长。

蒋济良