再议钢龙骨刚度对薄板间壁隔声的影响

顾檣国[1]，王季卿[2]
(1. 上海建工设计研究总院，上海 200235；2. 同济大学声学研究所，上海 200092)

摘要：轻钢龙骨在双层薄板间壁隔声中起着固体声传递作用，它较之经由空腔的空气声传递复杂得多，对间壁的中频隔声更为重要。自上世纪 80 年代该文作者提出以轻钢龙骨侧向刚度作为预计间壁隔声的参量以来，许多研究工作者在这方面积累了不少理论分析和实验资料，使得龙骨刚度对间壁隔声的影响有了更多认识。文章对此作了评述，并指出双层间壁中间联系构件(钢龙骨)的力学特性这一关键性参量该如何确定，还需作进一步探索。

关键词：房屋隔声；轻墙隔声；轻质隔断；龙骨刚度
中图分类号：TU112.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2018)-03-0261-07
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.012

Re-examination of the metal-stud stiffness on the sound insulation of gypsum-board partitions

GU Qiang-guo[1], WANG Ji-qing[2]
(1. *Shanghai Construction Design and Research Institute*, *Shanghai* 200235, *China*; 2. *Institute of Acoustics*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: For the sound insulation of a double-leaf partition, stud creates a vibration transmission path between leaves that can often be more critical and also more important in mid-frequency range than the airborne path through the cavity. As partitions with light-weight steel stud are more commonly used in the building construction, therefore studies on the sound insulation effect of such stud have been conducted. A model of considering the steel stud as an elastic spring and its lateral stiffness as a parameter in the sound insulation index prediction of such partition initialed by Gu and Wang (1983) has been widely studied during past decades. Experimental results of different stud profiles have been reported from different testing laboratories and give more information to understand the stiffness effect of the stud on the sound insulation of the partition. After a review of this subject in the paper, it has been pointed out that a critical problem on the determination of the stiffness of the connecting elements in the double panel partitions needs to be investigated further.
Key words: building acoustics; sound insulation in buildings; light-weight partition; steel stud stiffness;

0 引 言

轻钢龙骨薄板间壁是建筑中最常用的构件，其隔声性能主要由板材、龙骨和腔体三方面决定。其中以龙骨传声较为复杂，使间壁隔声效果不易准确地预计。1978 年 Sharp[1]对双层间壁龙骨传声做了开创性研究，提出了此类间壁隔声量 R(dB)的预计公式。当年他的工作是以木龙骨间壁为主。在我国和许多其他国家较多采用冷轧成型的薄钢皮(常称轻钢)龙骨，由此组成的间壁隔声性能与木龙骨间壁不同，并使同样薄板组合的间壁隔声量会有很大提高。这是因为轻钢龙骨在传声时，因龙骨变形而起到弹性声桥作用的缘故。1983 年顾檣国等[2]提出以轻钢龙骨的侧向等效刚度 K，作为表征此类间壁隔声特性的重要参量。30 多年来国外文献中常以顾王公式[3]来引述。随着各方面研究工作的深入，人们对此有了更多的认识，但还有一些尚待探索的问题。

1 简单回顾

Sharp[1]在考虑轻质双层间壁在混响声场的隔声量 R(dB)时，主要受到双层间壁的质量、空腔大小和腔内吸声处理以及龙骨声桥等几个方面的影响。龙骨与薄板之间一般按线状连接考虑，只有个别特殊情况才作为点状连接。在其预计双层间壁隔声量的精确表达式中，考虑了板材的全部阻抗。在简化式中，因虚数项的值远小于其它项而予忽略，仅保留实数项的质量阻抗，于是使得估算公式更为简明。当空腔中填充吸声材料，腔内驻波共振可认为基本消除的情况下，在大于声桥频率 f_B 时，间壁

收稿日期：2018-01-05；**修回日期**：2018-03-20
作者简介：顾檣国(1946－)，男，上海人，教授级高级工程师，研究方向为建筑声学。
通讯作者：顾檣国，E-mail: gqg124@139.com

隔声量 R 的表达式为

$$R = R_M + \Delta R_M \tag{1}$$

式中，

$$R_M = 20\lg(Mf) - 48 \tag{2}$$

ΔR_M 可用以下公式表示：

线状声桥：

$$\Delta R_M = 10\lg(bf_C) + 20\lg[m_1/(m_1+m_2)] - 18 \tag{3}$$

点状声桥：

$$\Delta R_M = 20\lg(df_C) + 20\lg[m_1/(m_1+m_2)] - 45 \tag{4}$$

其中：M 为双层间壁的面密度($\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$)，即 $M = m_1 + m_2$，m_1、m_2 分别为两侧墙板的面密度($\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$)，f_C 为临界频率(Hz)，b 为线状声桥(即各龙骨之间)间距(m)，d 为点状声桥(即钉与钉之间)间距(m)。图 1 中曲线 C 是隔声量/频率曲线中一段按 6 dB/oct 上升的斜线。式(1)适用于 $\frac{1}{2} f_C$ 以下的范围。

我们在双层间壁隔声实验研究中，把木龙骨定义为刚性声桥。将钢龙骨比喻为墙板之间的弹簧，将它定义为弹性声桥，可有效地减弱板与板之间的声传递。于是提出钢龙骨侧向等效刚度 K 这个参量来表征其性能。至于其它条件，则按 Sharp 理论分别按线状声桥和点状声桥两种情况来考虑。在大于声桥频率 f_B 和 $\frac{1}{2} f_C$ 以下，得出了钢龙骨轻质双层间壁隔声量 R 的实用简化式如下：

$$R = R_1 + R_2 + \Delta R_M \tag{5}$$

式中，

$$R_1 = 20\lg(m_1 f) - 48;\quad R_2 = 20\lg(m_2 f) - 48$$

又 ΔR_M 分别考虑如下：

线声桥时：

$$\Delta R_M = -20\lg K' - 10\lg(nl/sf) + 101 \tag{6}$$

点声桥时：

$$\Delta R_M = -20\lg K - 10\lg(n/s) + 122 \tag{7}$$

式中，K' 为龙骨侧向单位长度等效刚度($\mathrm{N\cdot m^{-1}}$，按每米计)，K 为龙骨每一声桥点的刚度($\mathrm{N\cdot m^{-1}}$)，n 为声桥数量，l 为每条线声桥长度(m)，S 为间壁面积($\mathrm{m^2}$)，这是一段按 12 dB/oct 上升的斜线，显示出轻钢龙骨比木龙骨在隔声上的优越之处，亦与我们的实验结果比较符合(见图 1 中曲线 B)。又与加拿大 NRCC 实验室[4]的间壁隔声实验数据相比较，也符合很好，如图 2 所示。至于有人认为此式在阻抗中缺少了虚数项[5-6]，其实这与 Sharp 的理论同样是一个合理的简化，较实用的预计式。其可预计的频率范围虽只限于 $\frac{1}{2} f_C$ 以下，这正是轻墙隔声中由龙骨传声所控制的主要频率范围。

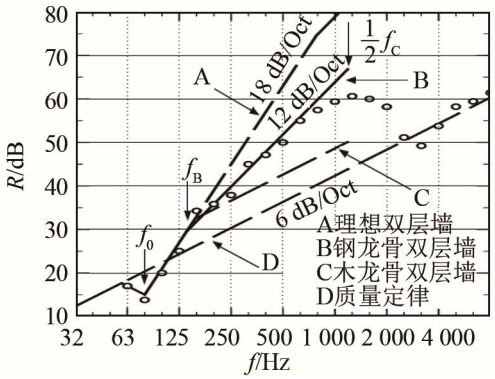


图 1 按刚性声桥(木龙骨)与弹性声桥(钢龙骨)预计的隔声量比较[2]

Fig.1 Comparison of sound reduction index R predicted by rigid (wood stud) and elastic (metal stud) acoustic bridge assumptions[2]

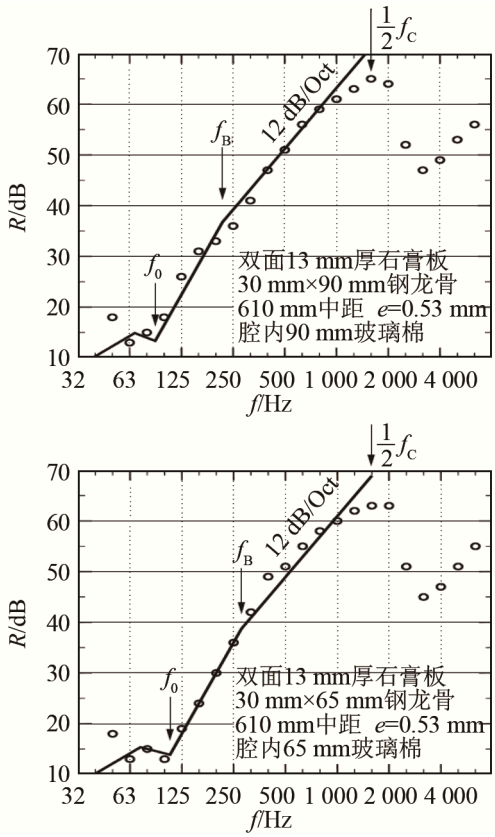


图 2 双层间壁按弹性声桥的预计隔声量曲线与实验结果(取自 NRCC)[4]相比较的两例，图中 e 为龙骨的钢板厚度

Fig.2 Comparison of sound reduction index R of double leaf walls predicted by elastic acoustic bridge assumption and two experimental results measured by NRCC[4], e is the stud thickness

2 近年进展

自 1990 年 Davy[5]注意到我们对轻钢龙骨按弹性声桥预计双层墙隔声量的工作以来，他在处理龙骨弹性参量时，选用了力顺 C_M 来表征。这与习惯上常用的等效刚度 K 是简单的倒数关系。他所提出的轻钢龙骨间壁隔声量的理论估算值，与取自 1971 年美国住宅建筑协会[7]的测试资料(13 mm 石膏板，

63 mm 钢龙骨，中距 610 mm，腔内填吸声材料)作比较，大体符合(见图 3)。Davy 由此推算出龙骨的力顺 C_M 为 1×10^{-6} m·N^{-1}(相当于等效刚度 K 为 10^6 N·m^{-1})。只是其理论估算值在中频 800～1 600 Hz 时比实测值偏高 3～6 dB。如以此频段实测值来推算龙骨的力顺，显然会更低些。于是推算出的刚度与我们当年提出的估算值相比，差值会更接近些。可见 Davy 所谓与我们的估值差 10 倍[8]之质议，并不恰切。又如按 1998 年 Guigou-Carter 等[9]的经验，龙骨刚度在 10 MPa(即 10^7 N·m^{-1})左右，与我们的结果[2]很相近。

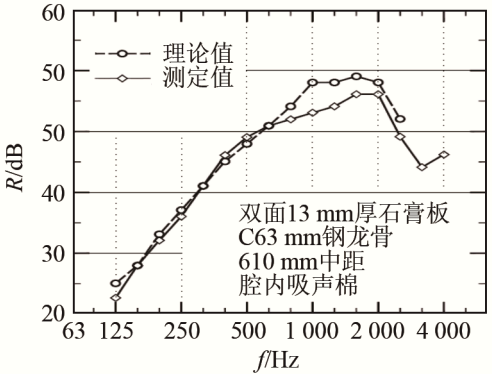


图 3　轻钢龙骨、13 mm 石膏板和腔内有吸声材料的墙体隔声量 R 实测值与 Davy 理论估算的比较[5]

Fig.3　Comparison of the measured and Davy's predicted sound reduction index R (dB) of lightweight steel stud and 13 mm gypsum board walls with cavity absorption[5]

2006 年 Hongisto[3]曾总结数十年来四类间壁(a 类：双层墙之间无龙骨也无吸声材料，b 类：双层墙之间无龙骨但有吸声材料，c 类：双层墙之间有刚性龙骨并有吸声材料，d 类：双层墙之间有弹性龙骨也有吸声材料)共 17 种双层墙隔声量的预计式。其中 d 类双层墙隔声预计式主要提到两个：顾-王公式和 Davy 的预计式。前者主要针对由龙骨刚度控制的中频范围，后者则扩展了更宽的预计频率范围。Hongisto 对这些预计式的隔声指标，按自己开发的 SRJCALC 软件(以本单位 52 组实验结果为依据，试件面积为 2.5 m^2)计算了各类间壁隔声量指标的误差值，认为目前还没有一种预计式能给出有足够精度的结果。其中弹性龙骨和腔内有吸声材料的双层墙实验共有 6 组，将结果中计权隔声量 R_w、隔声量 R 和各频率的平均隔声量三项参量作比较时，Davy 的预计结果与实验值的误差较小，而顾-王预计值与实验结果在 $\frac{1}{2}f_C$ 以下则符合得很好。至于顾-王预计值在 f_C 以上高频实验值与估算值相差较大，并非该式原定的适用频率范围。

2000 年 Craik 和 Smith[10]曾用统计能量分析法(Statistical Energy Analysis, SEA)模拟双层轻质间壁的声透射，并按若干个相互有关联的分系统来处理。根据连接板与龙骨的钉距，按一系列独立的点状连接或线状连接分别考虑。于是可对此类结构耦合的间壁隔声量作出预计，并与实验结果作比较(见图 4)。这里值得一提的是，其预计模式中对板与龙骨连接条件分别按点状(钉距 300 mm)和线状(钉距 30 mm)考虑，并与相关构件隔声实验数据相对照，说明预计结果很有效，尤其对于线状连接而言。这个结果与早年 Sharp[1]和顾檣国[2]通常按线状连接的考虑相左。查英、美建筑构造规范规定[11]：螺钉中距为 300 mm。在我国则规定[12]板边和板中的螺钉中距分别不大于 200 mm 和 300 mm，都与图 4 中按点状的实验安排更接近。唯上述实验结果是对木龙骨间壁进行的，至于轻钢龙骨的情况是否可以参照，尚待验证。

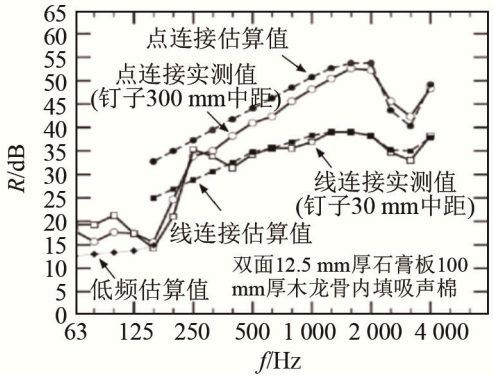


图 4　木龙骨双层墙在不同钉子间距情况下的隔声量测定值与预计值的比较[10]

Fig.4　Comparison of sound reduction index R(dB) of wood stud double walls for different nail spacing between experimental data and predicted values[10]

2009 年 Poblet-puig 等[13]对五种截面形状不同的钢龙骨的弹性进行了比较研究，他们是从间壁双侧振级差随频率的变化来观察其不同效果的。又选用了其中两种宽度相同(70 mm)、截面形状则不同的龙骨(常用的 C 型和弹性更大的∩型)，利用有限元法数字模拟和间壁构件隔声实验分析作了进一步比较。表明不同断面形状的龙骨，对振动的传递有明显差别。他们认为龙骨刚度随频率有变化，从而影响墙体隔声量的频率特性。在低频时影响小，在中高频段(400～2 500 Hz)影响则明显增加。他们又指出，由于龙骨受双侧墙板固定“夹紧”，龙骨截面上的平移(传声方向)刚度 K_t 是主要的，它的转动刚度 K_θ 可以忽略不计。图 5 所示为四种不同平移刚度 K_t 的轻钢龙骨，在不同频率下间壁隔声量估算值的变化。

2010 年 Vigran[14]利用 Poblet-Puig 的 C 型钢龙

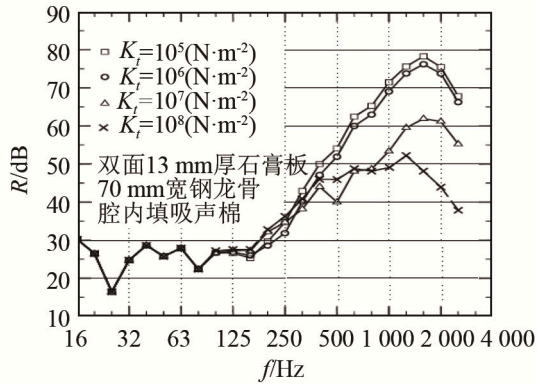


图 5 四种不同刚度 K_t 的轻钢龙骨在不同频率下对隔声量(用 SEA 算得)估值的比较[13]

Fig.5 Comparison of the predicted sound reduction index R (by SEA method) vs. frequency with four different steel stud stiffness K_t caused by their cross section shapes[13]

骨随频率而变的有效刚度值，作为修订 Sharp 刚性声桥间壁隔声量预计的参量。他据此与实验结果作比较时，采用石膏板和铝板以及腔内有和无吸声材料两种情况下，将频率扩大到临界频率以上，其预计值在临界频率以上也比较相符(见图 6)。

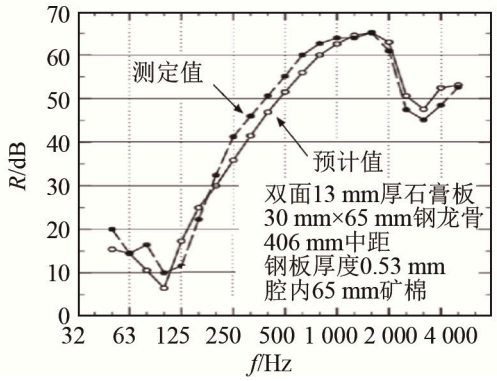


图 6 轻钢龙骨双层墙隔声量测定值与预计值比较[14]

Fig. 6 Comparison of the experimental and predicted sound reduction index R (dB) of a steel stud double leaf wall[14]

2015 年 Nguyen 等[15]对两种不同断面形状钢龙骨组成的间壁，进行隔声实验比较(见图 7)。显见龙骨 A 的刚度比龙骨 B 的小，使间壁隔声量有所提高。又与有限元法的结果作了比较，其符合情况虽不理想，但两者都表明龙骨断面形状明显影响到间壁的隔声性能。他们利用有限元法计算了 7 种不同断面形状的龙骨刚度，结果表明不同形状钢龙骨间壁隔声性能出现的差异，主要是由龙骨的刚度所决定。龙骨弹性大，刚度变小，间壁隔声性能就提高。这与一般对钢龙骨间壁隔声量的表达式所得结论是一致的。

2015 年 Hirakawa 和 Davy[6]的最近工作，主要考虑木和钢龙骨上加金属弹性垫条后的力顺 C_M (刚度 K 的倒数)问题。鉴于该文中有若干疑点，

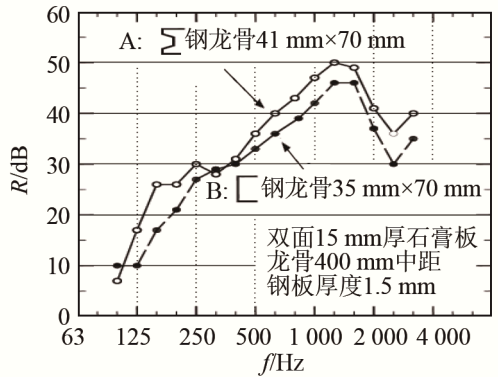


图 7 轻钢龙骨刚度因形状不同而异，对间壁隔声量影响的实验结果[15]

Fig.7 Experimental results show that the stiffness of steel stud varies with their shape and therefore affects the sound reduction index R of the wall[15]

令人感到所得结论不妥。例如，无论木龙骨或钢龙骨，在其双面或单面加了弹性垫条后，从间壁构造上讲，垫条与龙骨是成直角相交的，因此只能是点状连接。如再以线状连接来模拟，不切实际。又他们得出间壁隔声量与龙骨的连接方式(线状还是点状)几乎无关的估算结果(见图 8)。这与 Davy 过去一直认为点状与线状连接对间壁隔声效果是不同的说法，前后自相矛盾，又未作出解释。

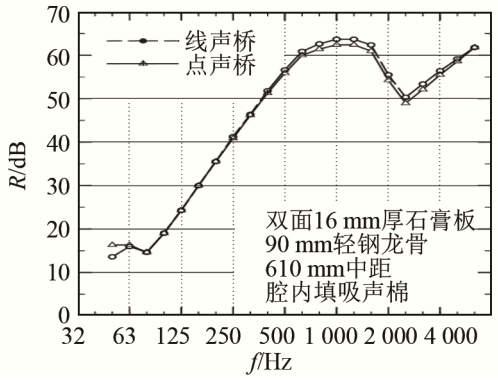


图 8 Hirakawa 等人按点声桥和线声桥分别估算出双层薄板间壁隔声量的比较[6]

Fig.8 Comparison of the sound insulation index R of a double-leaf partition predicted by point and line connection assumptions according to Hirakawa et al[6]

2010 年 Betit[16]通过实验研究表明，在相同宽度龙骨(92 mm×30 mm，中距分别为 406 mm 和 610 mm 两种)和石膏板(板厚 16 mm，分别为两层、三层和四层(即 1+1、1+2 和 2+2 三种条件)构造下，仅改变龙骨钢板的厚度使龙骨刚度有所不同，从而使间壁隔声量可有 4～5 dB 的变化。其部分结果如图 9 和表 1 所示。实验所用龙骨厚度分别为 0.53 mm、0.91 mm 和 1.52 mm 三种作比较。系统地考虑龙骨厚度对间壁隔声量影响的实验研究，还属首次。

总的来说，不同研究者得出的龙骨侧向等效刚度会有差异，甚至达到 10 倍以上。其原因是多方

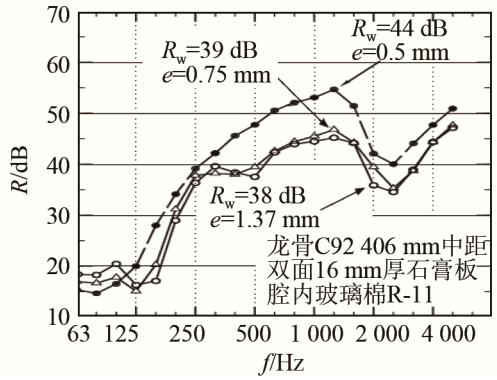


图 9 龙骨刚度因钢皮厚度 e 不同(分别为 0.5 mm, 0.75 mm 和 1.37 mm)(龙骨间距 406 mm)对 1+1 石膏板间壁隔声量的影响[16]

Fig.9 Sound reduction index R vs frequency for a 1+1 layer partition with steel studs installed at 406 O.C. for various stud gauges (25#, 20#和 16#; e= 0.5, 0.75, 1.37 mm)[16]

表 1 不同钢皮厚度下的计权隔声量*(R_w)比较[16]

Table 1 Comparison of R_w values* with different stud gauges

板材组合	龙骨钢皮厚度 e/mm	R_w/dB
四层板(2+2)	0.52	52
	0.75	48
	1.37	47
三层板(2+1)	0.52	48
	0.75	43
	1.37	43
二层板(1+1)	0.52	43
	0.75	38
	1.37	39

*原文为美制 STC 等级，与国内常用的 ISO R_W 相当

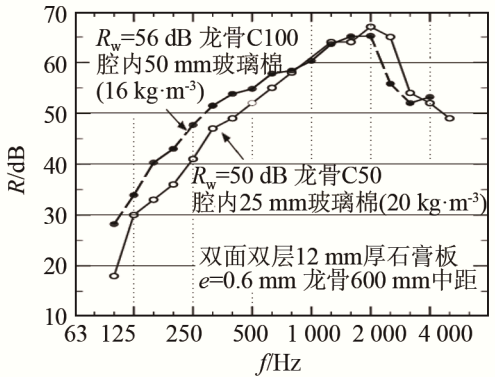
面的。除隔声测量方面引起刚度推算结果存在着不小的误差之外，不同频率段的刚度不同，是早年未曾估计到的。至于构造上的差异，如龙骨截面尺寸(龙骨宽度)和厚度不同，均会造成隔声量差别很大，如图 9 和 10 所示之数例。甚至面板与龙骨之间固定方式的不同，也对隔声有影响(见图 11)。

3 龙骨刚度的确定

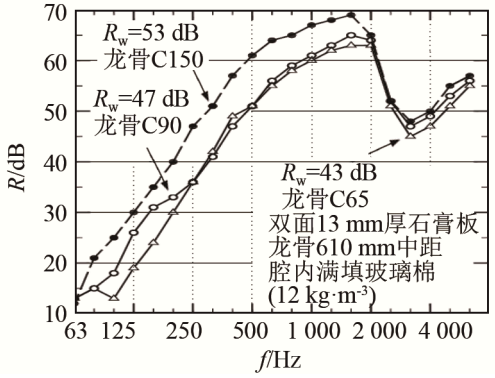
龙骨刚度对间壁隔声的重要性已如上所述，有关刚度如何确定已成为一个热点问题。长期以来，龙骨刚度是由间壁隔声量实验结果反向推算得出的。正由于推算中存在一些不确定因素，使所得刚度不够精确，甚至不能互比。于是，如何直接测定龙骨刚度成为大家关心的另一问题。

3.1 间接估算

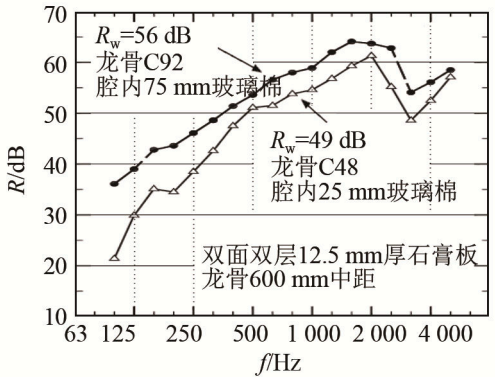
自从轻钢龙骨可按弹性元件的侧向刚度 K 来估算轻板间壁隔声量[2]以来，有了很大的发展。对此研究讨论最多的是 Davy 的工作。他在 1990 年根据其刚度理论值推算出的间壁隔声量与实测值作比



(a) 钢龙骨宽度分别为 50、100 mm 的隔声量比较(同济声学实验室测量)



(b) 钢龙骨宽度分别为 65，90 和 100 mm 的隔声量比较[4]



(c) 龙骨宽度分别为 48 和 92 mm 的隔声量比较[17]

图 10 轻钢龙骨宽度变化对间壁隔声量影响之三例

Fig.10 Three examples show the effect of stud width on the sound reduction index R of double leaf walls

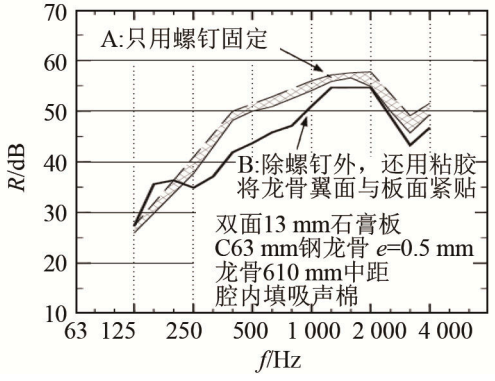


图 11 墙板与钢龙骨固定方式不同对隔声量的影响[18]

Fig.11 Effect of attaching wall board to steel stud with different methods on the sound reduction index[18]

较时，在中频(800～2 500 Hz)相差即有 3～6 dB 之多(见图 3)[5]。可见，按龙骨刚度理论值估算出的隔声量，与实际情况相差还是不小的。Davy[19]曾把加拿大 NRCC 实验室积累的大量石膏板轻钢龙骨不同组合间壁的隔声量实测资料，换算得出各种常用轻钢龙骨刚度随频率而变化的情况，如图 12 所示。可见，各种常用轻钢龙骨之刚度变化范围是很大的。

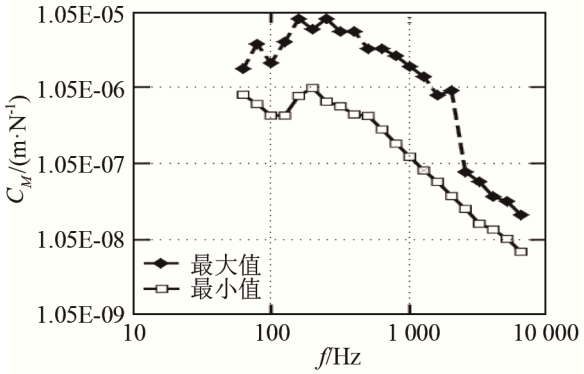


图 12 Davy 根据加拿大 NRCC 实验室大量间壁隔声量测定值估算出轻钢龙骨的力顺 C_M(即 1/K)随频率变化的极大和极小范围[19]

Fig.12 The maximum and minimum equivalent translational compliance C_M of steel studs derived from NRCC experimental data based on Davy's (2010) theory[19]

鉴于龙骨的侧向等效刚度 K 是按声学实验结果推算而得，这里就包含了构造方面的其它因素。例如：轻钢龙骨不仅因宽度不同引起刚度变化，钢皮厚度也会改变其刚度，后者对间壁隔声量的影响也不容忽略。可是在 Davy[20]的工作中从未考虑及此。再说，作为龙骨刚度 K 估值依据的间壁隔声量测量结果本身，就存在着不小的误差。这是由于不同实验室的容积、试件尺寸、洞口深度等不同，发声室和接收室的旁路传声情况，以及安装测试人员的操作方式差异等等因素引起的。即使同样构造的轻钢龙骨间壁墙，实验所得的隔声量也会有很大差别。一个突出例子如图 13 所示，同样构造间壁在北美

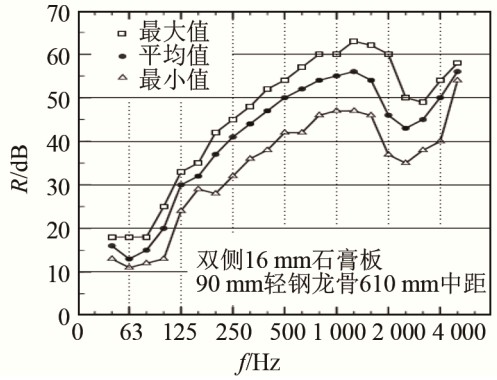


图 13 相同构造间壁在北美 13 个实验室测得的隔声量比较[7]

Fig.13 Sound insulation data of the same partition construction measured in 13 acoustic laboratory facilities in North America by the US Gypsum Board Co[7]

13 个实验室测得的隔声量，竟然出现如此之大的差异[21]，超出一般意料。如据此反算出的刚度出现成倍差异，也就不足为怪了。

按 ISO 140/2[21]附录的要求来看，同一实验室内对同一间壁构件重复装置后的隔声量重复率(见图 14)，一般可以做到。至于相同构造间壁在不同实验室之间的隔声量实验结果，其再现率即使达到 ISO 140/2 附录要求(见图 14)，在中频段也允许有 3～4 dB 之差。可见从间壁隔声量反推龙骨刚度，本身有其局限性。

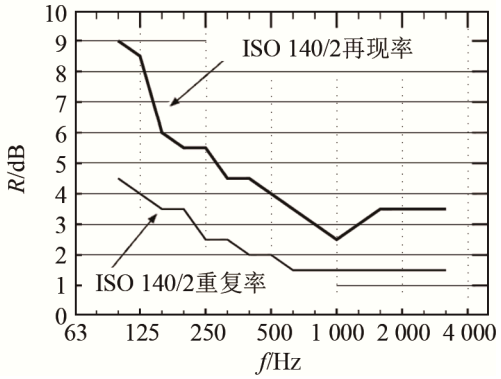


图 14 按ISO140/2 要求实验室隔声测量值的再现率和重复率要求的限值范围[21]

Fig.14 The recommend allowances of the repeatability and the reproducibility of the sound insulation measurements in laboratories, ISO 140/2[21]

3.2 直接测量

由于从实测隔声量推算龙骨刚度存在如上问题，因此人们寻求直接测量刚度的方法，既便于互比、优选和改进龙骨的设计，也可节省间壁隔声实验工作的大量费用和时间。如：2002 年 Hongisto 等[22]借用测试浮筑楼板弹性垫层方法(ISO 9052[23])，2009 年 Puig 等[13]借用测试机座隔振弹簧(ISO 10846[24])的方法来测定龙骨进行的刚度。但因使用条件和被测材料的性质不同，这些标准在此并不适用，即使作为不同龙骨进行刚度对比也不妥当。如 ISO 9052 规定被测弹性材抖是整片式的垫层，在预加静态荷载下测得其以单位面积计的动态刚度，显然不适于间壁中的龙骨。又 ISO 10846 适用于一侧为固定面的隔振特性，对于间壁隔声则考虑双侧均是处于空气声场的。因此，到目前为止尚未有确切测试龙骨刚度的力学方法可循。

2015 年 Nguyen 等[15]利用有限元方法分析双层间壁处于两混响场中的不同轻钢龙骨的声-振特性，从而对龙骨刚度作出判据。这为研究龙骨刚度另辟了蹊径。他们用二维模型进行估算，比较了七种宽度相同、断面形状不同的龙骨刚度。并选其中的两种形状的龙骨进行估算，与实际间壁构件在隔声实

验室所作的隔声量测试结果进行对比。两者隔声量-频率特性趋势基本一致，但在不少频率下，估算与实验隔声量相差达 10 dB 之多。他们认为如改用三维模型，会有所改进。而目前按二维模型的每次计算时间已达 60 h，工作量很大，这是有待改进的另外方面。

4　结 语

已知不同厚度、宽度和形状的龙骨刚度对双层薄板间壁的中频隔声量，起着很关键的作用。因此如何确定龙骨的刚度问题，引起许多研究者的关注。大量间壁隔声的实验资料积累和各种理论分析的提出均有了不小的进步。但作为该工作基本的龙骨刚度确定问题，仍有待进一步研究。

就这项研究工作而言，也有一些值得注意的问题。诚如 2006 年 Hongisto 所指出那样：一是研究者的建筑技术知识太差，考虑问题时往往会与实际间壁构造脱节；二是研究者常有一种不良倾向，当提出自己的新估算模型时，会过份强调于己有利的旁证资料，因而往往缺乏普适性意义。

参　考　文　献

[1] SHARP B H: Prediction methods for the sound transmission of building elements[J]. Noise Control Eng. J., 1978, **11**(2): 53-63.

[2] 顾檣国, 王季卿. 弹性联接对钢龙骨轻板隔墙隔声量的影响[J]. 声学学报, 1983, **8**(1): 1-12.
GU Qiangguo, WANG Jiqing. Effect of resilient connectionon on sound transmission loss of metal stud double panel par-titions[J]. Acta Acustica, 1983, **8**(1): 1-12.

[3] HONGISTO V. Sound insulation of double panels-comparison of existing prediction models[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2006, **92**: 61-78.

[4] HALLIWELL R E, NIGHTINGALE T R T. Gympsum board walls: Transmission loss data, Internal Report: IRC-IR-761[R]. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, 1998.

[5] DAVY J L. A model for predicting the sound transmission loss of walls[C]//Proc. of the Australian Vibration and Noise Conference 1990: 23-27.

[6] HIRAKAWA S，Davy J L. The equivalent translational compliance ofsteel or wood studs and resilient channel bars[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2015, **137**(4): 1647-1657.

[7] NAHB Research Foundation Inc. Acoustical manual-apartment and home construction[R]. National Association of Home Builders, Maryland, June 1971.

[8] DAVY J L. An empirical model for the equivalent translational complianceof steel studs[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, **131**(6): 4615-4624.

[9] GUIGOU-CARTE C, VILLOT M. Study of cavity ties for improving efficiency of acoustical lining[C]//EURO-noise 1998, Munich, Germany, 1-6.

[10] CRAIK R J M, SMITH R S. Sound transmission through double leaf lightweight partitions part I: airborne sound[J]. Applied Acoustics, 2000, **61**: 223-245

[11] BS5234:1991: Code of practice: internal non-load bearing partitions[S]. British Standards Institution, 1992.

[12] 中国建筑标准设计研究院 GJCT-015 轻钢龙骨石膏板隔墙、吊顶，国家建筑标准设计图集[S]. 北京：中国计划出版社, 2007: 11. 第 1.6.7 条.

[13] POBLET-PUIG J, Rodríguez-Ferran A. The role of studs in the sound transmission of double walls[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2009, **95**: 555–567.

[14] VIGRAN T. Sound insulation of double-leaf walls–Allowing for studs of finite stiffness in a transfer matrix scheme[J]. Appl. Acoust., 2010, **71**: 616-621.

[15] NGUYEN B, MORGAN T. Vibro performance of different steel studs in double-leaf walls by finite element analysis[J]. Building Acoustics, 2015, **22**(2): 65-80.

[16] BÉTIT A. Performance details of metal stud partitions[J]. Sound & Vibration, 2010, (3): 14-1.

[17] British Gypsum Co., See Table 7.1, Architectural Acoustics Handbook[M]. Ed. by Ni Xiang, Ch. 7, 2017.

[18] GREEN D W, Sherry CW. Sound transmission loss of gypsum wallboard partitions .Report #2. steel stud partitions having cavities filled with glass fiber batts[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1982, **71**(4): 902-907.

[19] DAVY J L. An empirical model for the equivalent translational compliance of steel studs[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, **131**(6): 4615-4624.

[20] DAVY J L. Predicting the sound insulation of walls[J]. Building Acoustics, 1999, **16**(1): 1-20.

[21] ISO 140/2 (1997): Determination, Verification and Application of Precission Data[S]. 国标 GB/T 19889-2005 等同采用.

[22] HONGISTO V, Lindgren M, et al. Sound insulation of double walls–An experimental parametric study[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2002, **88**(l): 904-923.

[23] ISO 9052-1 Acoustics determination of dynamic stiffness-Part 1, Material used under floating floor in dwellings[S].

[24] ISO 10846 Acoustics and vibrations – laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilent elements[S]. 国标 GB/T 22159-2016 等同采用.