

## 清華學校大禮堂之聽音困難及其改正

葉 企 孫

### 第一節 緒論

趙忠堯君及作者關於此問題之初次報告載於民國十五年十月十九日之清華校刊。茲節錄該文中數段，作為緒論，以便未看該文者。作者只以此文為一種專門報告，無暇作通俗的詳細說明，祈讀者原諒。

吾人對於建築的音學，原來至近世方知端倪。系統的研究自哈佛大學教授 Wallace Clement Sabine 始。研究工作始於 1895，其結果散見各雜誌。Sabine 歿後，哈佛大學集之成書，出版於 1922 (Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press)。又有 F. R. Watson 者，Illinois 大學物理教授也。因該校大禮堂發生餘音及回音困難，自 1918 起亦研究建築的音學。六年後方將該校大禮堂改善，同時增加吾人對於此問題之智識。1923 年 Watson 著 Acoustics of Buildings (John Wiley)。

凡發一音，自原音方絕至餘音方絕之時間，名曰餘音之時間。Sabine 曾以實驗證明下式：—

$$\text{餘音時間} = \frac{0.164 \times \text{室之體積}}{\text{室內所有之吸收聲音總能力}}$$

時間的單位是秒，體積的單位是立方公尺，吸收聲音能力的單位是開的窗一平方公尺。最後一句話要些說明。Sabine 因開的窗的吸收聲音能力（就是減少餘音能力）當然最大，且與面積成正比例，所以他就拿開的窗一平方公尺，為單位。

凡可以面積算的東西，其吸收聲音係數照下式算：—

一、此文之結論為最後的，有幾處與初次報告不盡同。

某物之吸收聲音係數 =  $\frac{\text{該物一平方公尺之吸收聲音能力}}{\text{開的窗一平方公尺之吸收聲音能力}}$

例如單層玻璃的吸收聲音係數 = 0.027。面積單位變時此種係數不變。不能以面積算的,只能整個的說,例如每單個美國男子其吸收聲音能力 = 0.48平方公尺開的窗。面積單位變時,此種常數亦變。吸收聲音之係數及常數見 Watson 的書第 25 頁。

關於實驗用的儀器及其他專門討論,請參考趙忠堯君之“著中國衣服者之吸音能力。”

第二節 清華學校大禮堂之形狀,材料,容積,及總面積  
清華大禮堂之南北剖面圖見第一圖。最可注意者為巨大高深之圓頂 (bome)。建築材料大部份為石灰磚 (lime brick)。聽音困難,一部份因吸收聲音之材料太少,以致餘音時間太長。一部份因形狀關係而發生回音。故改良方法,統歸於增加相宜之吸音材料於相宜地位。換言之,問題有三:(1)用何物? (2)用多少? (3)置何處?

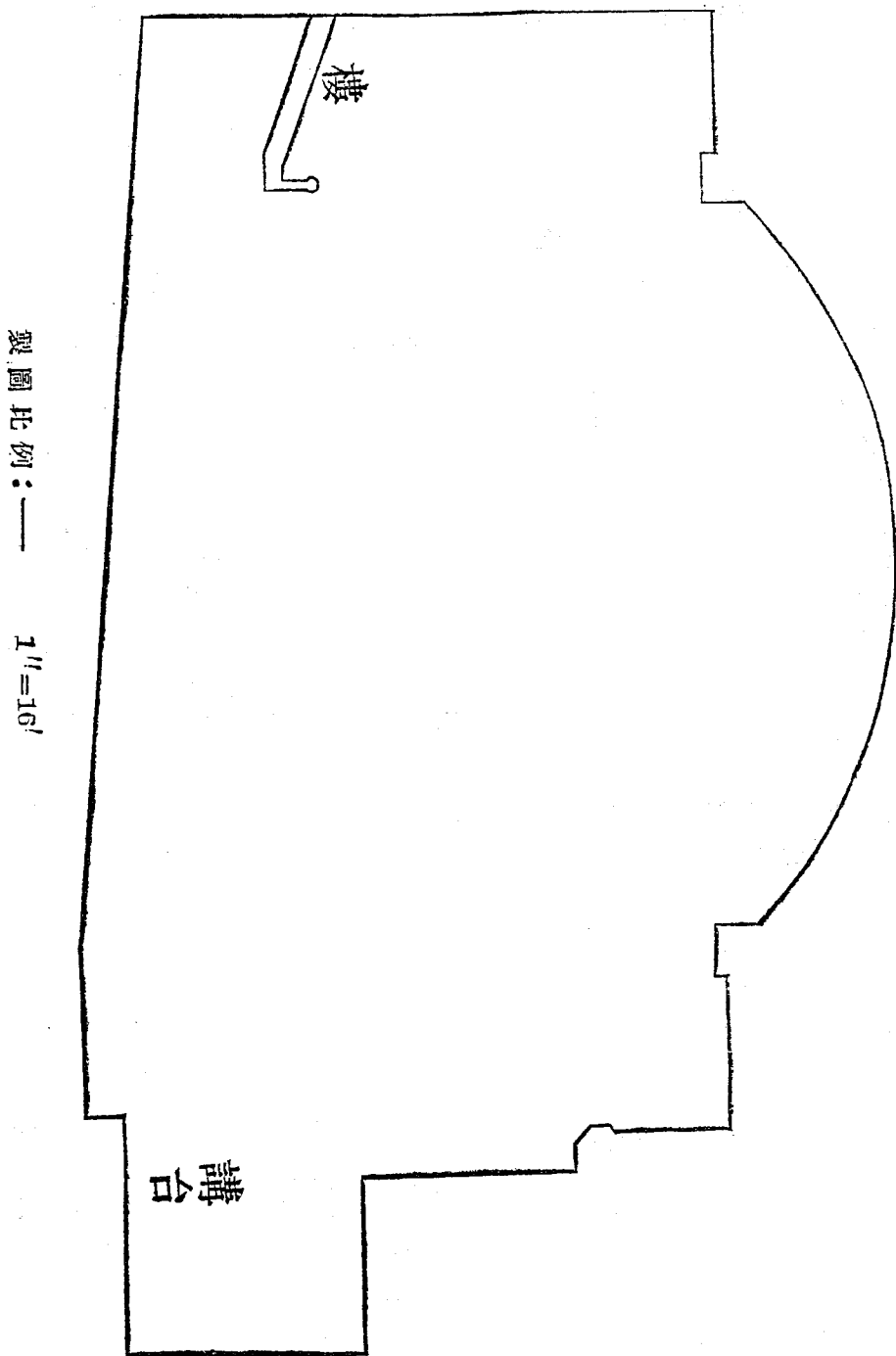
大禮堂之體積為 436,200 立方英尺,即 12,350 立方公尺。禮堂內各部之面積如下:—

第一表 大禮堂各部份之面積

地 板	760	$\overline{\text{m}}^2$
圓 頂	460	$\overline{\text{m}}^2$
四 弧 面	810	$\overline{\text{m}}^2$
四 牆	1000	$\overline{\text{m}}^2$
走樓底面	600	$\overline{\text{m}}^2$

二, 轉載該文者止於此。

三, 民國十六年中國科學社年會論文集。



製圖比例：——

1"=16'

第一圖 大禮堂之幾何形狀

### 第三節 清華學校大禮堂內已有之總吸音能力

禮堂內已有之總吸音能力(聽衆不在內),可應用各種材料之已知吸音係數而估計之。結果得2,940平方英尺開窗,即270平方公尺開窗。詳表如下:—

第二表 大禮堂各部份吸音能力之估計

品 類	材 料	總面積或總個數	吸音係數	總吸音能力
地板	軟木	8200平方英尺	.16	1310平方英尺開窗
牆,頂面等	洋灰,磚,塗粉	87200 ”	.025	980
皮門	皮	710 ”	.35	250
布幕,國旗等	布	1780 ”	.10	170
地毯	毛織物	182 ”	.29	40
木地板,木門 木牆,木舞台	木	1920 ”	.047	90
木椅	木	1400 只	.10	140
皮椅	皮	7 只	2.00	10
				共 2940

此估計所得數,是否可靠,可實驗餘音時間而確定之。實驗結果如下:—

情形甲 堂中有原有陳設,實驗者三人,及實驗儀器,窗盡閉。  $t=5.12$ 秒

情形乙 同上,但可開的窗盡開。  $t'=4.30$ 秒

在情形乙下,堂中之溫度降低,故  $t'$  之實驗數值上須加一因溫度不同而必須加的改正,如是得  $t'=4.22$ 秒。開的窗有總面積66平方公尺,但窗面只能開到與垂面成七十度角的地位,所以有效面積為  $66 \times \frac{7}{9}$ ,即51.4平方公尺。

欲求堂內已有之總吸音能力,所需要之算式如下:—

$$At = A't' + \log_e \frac{a'}{a} \dots\dots\dots (1)$$

四、關於此節內算式之說明,請參考民國十六年中國科學社年會論文集,趙忠堯之“著中國衣服者之吸音能力”。本篇之算式(1)即該篇之算式(11)。

$$A = \frac{13.8a}{K_0 V}, \quad A' = \frac{13.8a'}{K_0 V}; \quad \text{因 } K_0 = 0.164, V = 12350;$$

$$\text{故 } A = 0.0068a, \quad A' = 0.0068a'$$

$$\text{代入 (1), 得 } at - a't' + 338 \log_{10} \frac{a'}{a}$$

上式之最右項爲改正項,且只含  $\frac{a'}{a}$  之對數,故該項之  $\frac{a'}{a}$  可以

其相近數值  $\frac{270+51.4}{270}$  代入。如是得下式:—

$$A \times 5.12 = (a + 51.4) \times 4.22 + 338 \log_{10} \frac{270+51.4}{270}$$

解之仍得  $a = 270$ 。此實驗所得數內尙包括實驗者三人及實驗儀器之吸音能力。估計以上兩項,約得 3 平方公尺開窗。減去後餘 267。此數與用估計法所得數 270 相差甚少。

#### 第四節 著中國衣服者之吸音能力

此問題已經趙忠堯君實驗決定。論文載民國十六年中國科學社年會論文集。結果如下:—

第三表 棉衣

	散 離 者	聽 衆
立	.81—	
坐	(.66)	(.58)

第四表 夾衣

	散 離 者	聽 衆
立	.59—	
坐	.48	(.42)

不加括弧之結果爲直接測定者。

加括弧之結果爲推算得者。

#### 第五節 俄國及美國方面對於建築音學的幾種新研究

關於大講堂(大音樂堂,或大戲院亦包括在內)的最相宜的除音

時間,有以下數種新研究:<sup>五</sup>——

1. P. E. Sabine (Riverbank 建築音·學實驗室主任)

“The American Architect” pp. 579-86, June, 1924.

作者得以下結論:任何大講堂,聽者滿座時最相宜的餘音時間在一秒及二秒之間。爲講演及細音樂(light music)用,則應在此範圍之下半,爲大音樂(如銅樂等)用,則應較近上限。

2. F.R. Watson, 在“Journal of Franklin Institute” pp. 78-83, July, 1924.

作者得以下計算式(從經驗得來):

$$t = 0.75 + 0.375 \sqrt[3]{V} \text{ 秒}$$

$t$  = 空堂時最相宜之餘音時間;  $V$  = 堂之容積,以立方英尺算。

3. Samuel Lifshitz (在莫斯科國立音樂研究所)

Physical Review pp. 391-4 March, 1925

作者斷定,爲講演用,或爲音樂用,最相宜之餘音時間相差不能過 0.05 秒(此結論與前人所得者不同)。容積大的室,最相宜之餘音時間(此指聽時最相宜之餘音時間)照下式算:——

$$(10.23 - \log_{10} V) T + 0.97 (0.4 - \log_{10} V) \sqrt{T} = 6$$

第六節 清華學校大禮堂內應增加之吸音材料

照 Lifshitz 公式計算,則清華大禮堂內聽音時最適宜之餘音時間應爲 1.75 秒,故總吸音能力(包括聽者之吸音能力)應爲 1.160 平方公尺開窗。

大禮堂內座位約共 1,400。根據冬服半座計算,則堂內已

---

五, 關於新研究方面,作者得益於蔡方蔭君之介紹甚多,附誌謝。

有之總吸音能力爲  $270 + 700 \times .6$ , 即 690 平方公尺開窗。故尙缺少 470 平方公尺開窗 (470 平方公尺 = 5,060 平方英尺)。何以根據冬服計算? 則因夏服之吸音能力雖較小, 但夏時可開窗以補足之。何以根據半座計算? 則一因滿座之機會甚少; 二因即使滿座, 吸音材料尙不嫌太多。(以上係根據 Lifshitz 公式計算; 倘照 P. E. Sabine 之說, 則聽音時最適宜之餘音時間原可較短, 即添加之吸音材料, 原可更多。添加 470 平方公尺開窗後, 滿座時之餘音時間爲 1.285 秒, 仍在 P. E. Sabine 之限內, 故吸音材料尙不嫌太多。)

### 第七節 通俗之誤解

從前人有一種誤解, 至今尙有信之者, 以爲室內張金屬線可以消除聽音困難。其實此層已經各專家證明爲絕對無稽。茲彙錄各專家之結論于後, 以見此點之毫無問題。——

1 “As examples of remedies, may be cited…… the stretching of wires, even now a frequent though useless device” (W.C. Sabine, Collected Papers on Acoustics, p.4)

2. “Experiments and observations show that wires are of practically no benefit. ……” (Watson: Acoustics of Buildings, p. 19)

3. “At last, however, through the results of scientific investigation, the useless stringing of wires is being discontinued.” (O.M. Swan, “Architectural Acoustics,” p. 5, John-Mansville 公司出版)

4. “The stringing of wires has been demonstrated to be entirely useless.” (Akoustolith as related to Architectural Acoustics, Guastavino) 公司出版)

### 第八節 美國各公司之估價

美國方面,製造吸音材料之公司,其著名者有三。作者曾託清華學校庶務處向諸公司詢問,所得結果,列表于下:—

第五表 各種材料之常數

材 料 名 稱	製 造 該 項 材 料 之 公 司	吸 音 係 數	價 格	
			該 項 材 料 一 平 方 英 尺 之 國 幣 價	用 該 項 材 料, 得 到 一 平 方 英 尺 開 窗 的 國 幣 價
Celotex B	Celotex	0.55	1.00	1.80
Asbestos acoustical felt	Mansville	約0.45	0.52	1.15
Akoustolith Tile	Guastavino	0.33	1.60	4.40
Akoustolith plaster	''	約0.18	0.44	2.40

第六表 各公司之估價

公 司	該 公 司 所 估 計, 應 添 加 之 吸 音 材 料, 單 位 = 1 平 方 英 尺 開 窗	某 項 材 料 所 需 要 之 總 面 積	該 項 材 料 之 總 價 (以 國 幣 為 單 位)
Celotex	4,000	7,800平方英尺 Celotex B	7,800
Mansville	''	9,000 '' Asbestos Acoustical felt	4,680
Guastavino	5,400	15,000 '' Akoustolith tile	24,000
''	''	30,000 '' '' Plaster	13,200

第九節 各種材料之說明

Celotex B 是用甘蔗的纖維做成,外觀似粗澀的紙板。製造此物之公司,曾用特別手續,使其吸音係數增高至 0.55。鑽筒是重要手續之一,蓋吸音面積能因此增加一倍半。Celotex 的特別好處在乎各種顏色都能有,且其面上能加各種美術的圖案。Celotex 亦為一種熱的不良導體。其熱傳導係數為每點鐘每平方英尺華氏每度每英寸厚 0.33 英國熱單位。以之建屋,則冬暖夏涼,且節省燃料。Celotex B 是  $\frac{77}{8}$  英寸厚,每平方英尺鑽筒四百;每筒之直徑  $\frac{1}{4}$  英寸,深  $\frac{3}{4}$  英



寸。

Asbestos acoustical felt 是一種軟氈。其主要成份爲長牛毛,中更雜以 Asbestos 碎末。織氈時更以麻繩爲經緯,以增固之。紐約 John-Mansville 公司自 1911 年起設法製造此氈。其製造手續昔年由 Sabine 指導,現由曾協助 Sabine 研究建築音學者 C. M. Swan 指導。Watson 改善 Illinois 大學大禮堂所用之氈,即係此種。此氈不易燃燒,且甚經久。裝置之法,釘木條於牆上,張氈於木條之間,外更蓋以張緊之稀布,使布與氈間留空地。此氈厚  $\frac{3}{4}$  英寸,每平方英尺重約  $\frac{3}{4}$  磅。

Akustolith Tile 是一種特別多細孔的磚。幾乎各種顏色都可以有。此磚之製成,多得力于 Guastavino 同 Sabine 的研究。磚厚  $\frac{7}{8}$  英寸,每平方英尺重約五磅。

Akoustolith Plaster 是一種塗牆的材料,用粒狀之渣製成(煉鋼爐內所出之渣即可用),再用一種以養化鎂與綠化鎂製成之膠固質 (bonding material),使渣粒結合。關於此種材料之揀選,製造與混合,均須用特別方法。該公司試驗三年方得最後結果。每噸乾料,價美金二百元,和水後可塗牆面一百平方碼。

以上四種材料之樣子,清華學校物理系均有。欲來考察者,無任歡迎。

#### 第十節 討論

上述四種材料中, Akoustolith Plaster 不合于用,蓋倘用此料,須塗三萬平方英尺方得效果;但可塗之面積總計不過 1,970 平方公尺,(即第一表中圓頂,四弧面,四牆三項。走樓底面,因地位關

係,雖塗亦不生效力)。即 21,000 平方英尺,與所需之面積相差甚遠。

Akoustolith Tile 亦不合於用,蓋無論用何種材料,圓頂為必須蓋掩之區域:(因禮堂之幾何形式,倘但蓋掩他處,置圓頂於不顧,則雖減除一部份餘音困難,而清晰的回音現象反將較往日易辨,聽音困難仍未除去。)鋪磚於圓頂不出二法:一則拆去一層舊磚而以 Akoustolith Tile 代之;二則舊磚不動,只加一層 Akoustolith Tile。前法工程浩大甚且動搖牆壁,當然無庸置議。用後法則圓頂下每平方英尺將增加八磅或九磅之重量(磚每平方英尺重約五磅,磚後及磚間塗泥每平方英尺重約三磅至四磅)。圓頂是否能受此增重,為一問題。即使能受,工程亦頗不易。倘工程師,監工者,包工者,做工者,買料者,或付款者有一失察或有一溺職,以致工程不著實,不久或數年後而加上之磚倒下,甚至損傷人命。雖設計者實不能受其咎,而不識者仍將譏設計者為不智。故在中國現在情形下,作者決不願採用再加一層磚之方法。

Akoustolith Plaster 同 Akoustolith Tile 之不相宜,已如上述;且二者價值之昂貴,遠過于 Celotex 與 Asbestos acoustical felt。故其不能採用,無復可疑。

Celotex 與 Asbestos acoustical felt 二者中從美觀及易於裝置著想,均能滿意。但氈之價較廉,且其抵抗火及經久之性質亦勝於 Celotex。

故倘欲採用美國貨以改良清華大禮堂之聽音困難,則以 John-Mansville 公司所製造之 Asbestos acoustical felt 為最相宜。

## 第十一節 今後之工作

作者開始研究此問題時，即存材料須在國內製造之心。

以上四種材料中，以氈爲最易仿造（次則 Celotex）。且北京爲織氈名城，獸毛及 Asbestos 亦爲華北產物。現在市上之氈，雖皆不合用；然欲製造合乎吸音用之氈，即非甚易，想亦非太難。作者從本年十月以來，與北京仁立地毯公司之凌其峻君，在製造吸音氈方面著手設法；現正在進行中，報告俟諸將來。

自此問題開始以來，已將兩年。美國方面調查需時，材料到後，又每無暇整理，以致擱置多時。實驗則須在熄燈後做，每星期平常至多做一次，大多在星期六夜半，以便次晨可晏起；然逢有風聲時，又不能做；蓋此問題之本性，實需要長久時間也。今幸困難之分析及其消除，大體已具；以後問題，純在製造吸音氈與實施工程。

作者對於物理系同人趙忠堯施汝爲鄭涵清閔裕昌諸君，庶務處及技術部之協助，無任感謝。

# 第一期商學彙報出版了！

## 要目：

中國絲業之蠶測.....	胡敬修
天津主要出口貨物中之棉花羊毛及地毯.....	吳知霖
買辦制度.....	陳啟霖
天津銀號之研究.....	劉學熙
銀兩匯兌之比較.....	玄堪
物價指數論.....	吳家瑞

定價：每冊大洋五角

發行：天津南開大學商學會庶務股

外埠函購先將報價并郵費五分寄下當即寄奉不誤郵票代洋十足通用

注意：凡本校師長購者按八折計算大洋四角

## 樸社出版經理部出版書目

生命之節律(秋士譯)	實價三角五分	諸子辨 再版訂正(宋濂著)	實價二角五分
原子新論(何道生譯)	實價四角五分	燈花仙子(孟堯松著)	實價三角
古史辨第一冊(顧頡剛著)	四版甲種實價二元四角	歐洲哲學史(徐旭生譯)	實價一元
	乙種實價一元八角	歧路燈(馮友蘭標點)	實價八角
	丙種實價一元二角	社會學上之文化論(孫本文著)	實價六角
四行日記(陳萬里著)	實價八角	玉君(現代叢書之一, 楊振聲著)	實價五角
憶(小詩集, 俞平伯著)	實價一元	三訂國學用書撰要(李笠著)	實價五角
溫德米爾夫人的扇子(潘家洵譯)	甲種實價五角	達爾文以後生物學上諸大問題(周太玄譯)	實價五角
	乙種實價三角五分	陶庵夢憶(明張岱著, 俞平伯標點)	實價五角
中國文學概論(陳彬龢譯)	實價三角五分	怎樣認識西方文學及其他(采真譯)	實價五角
人間詞話 再版(王國維著)	實價二角	粵風(孫季調元編)	實價一角五分
戴氏三種(戴震著)	定價八角	哲學評論(尙志學會編) 金年六冊 預定一元五角	
浮生六記 五版(沈復著)	實價二角五分		每冊另售 實價大洋三角
初日樓少作(嚴既澄著)	定價三角	國學月報(述學社編) 全年十二冊 預定一元	
髭須(李青崖譯)	定價四角		每冊另售 實價大洋一角
劍鞘(葉紹均俞平伯著)	定價一元		

社設北京景山東街十七號