Journal of Da-Yeh University, Vol. 10, No. 1, pp. 21-27 (2001)

壓電式噴墨列印頭之振動板的設計

鄭江河

大葉大學機械工程學系

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

摘　要

壓電式噴墨列印頭之一噴孔噴墨機構，其主要係利用積層式壓電陶瓷材料作爲致動器，推動振動板上的島板，該島板係由彈性膜片材料支撐其邊緣，島板受壓電致動器之推動，可改變壓力艙內之體積容量，而使墨水之流速及壓力升高，進而推擠墨水從噴嘴孔噴出。本文以有限元素方法及田口氏最佳設計方法得到振動板的最佳尺寸，並且依照此最佳尺寸實作一噴墨頭。
關鍵詞：壓電，列印頭，壓力艙，噴嘴

Vibration Plate Design of A Piezoelectric Ink-Jet Print Head

CHIANG-HO CHENG

Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University

112, Shan-Jeau Rd., Da-Tsuen, Chang-Hwa, Taiwan

ABSTRACT

The one nozzle of a piezoelectric ink-jet print head sprays the ink-jet mechanism by making use of multilayered piezoelectric ceramic materials used primarily for an actuator which pushes an island plate, an elastic membrane which props up its edge. When the island plate is subjected to the push of the piezoelectric actuator, the volume capacity of the pressure chamber can be changed and the velocity and pressure of the ink made to increase, thereby squeezing ink from the nozzle injection to the paper.

In this article, the design was accomplished by analysis with finite element modeling and the Taguchi optimization technique, after which the optimization dimension of the vibration plate was obstained. Furthermore, according to such an optimization dimension, an ink-jet head was made.
Key Words : piezoelectric, ink jet head, pressure chamber, nozzle

一、前言

印表機是現今生活中不可或缺的設備，依不同的原理可衍生出不同的列印方式，其中主流產品分爲撞擊式及非撞擊式兩種，撞擊式印表機算是較早期的產品，但因其列印時噪音過大，列印速度慢，品質又差，所以其市場漸漸被噴墨印表機和雷射印表機佔據，而雷射印表機因爲售價過高，所以目前市場上的主流爲低售價、低耗材成本的噴墨式印表機。噴墨印表機的關鍵技術在於噴墨列印頭，列印頭其噴墨品質之優劣，關係列印成品品質好壞而噴墨速度也關係到印表機的列印速度，噴墨列印頭除了可用於黑色彩色印表機外尚可應用於傳真機以及繪圖機方面。目前適用電腦週邊設備的噴墨列印頭，主要分爲熱汽泡式噴墨列印頭(thermal bubble ink jet print head)和壓電式噴墨列印頭(piezoelectric ink jet print head)，熱泡式乃利用加熱器將墨水瞬間氣化，產生高壓氣泡推動墨水由噴嘴射出 [2, 4]，而壓電式工作原理爲利用壓電陶瓷因施加電壓產生形變，擠壓液體產生高壓將液體噴出 [7]，根據不同壓電產生變形之機制，各種壓電式噴墨列印頭可分爲彎曲型（bend mode ）、推擠型（push mode）、剪力型（shear mode）、收縮管型（squeeze tube mode）[1]。

積層式壓電噴墨列印頭，係由一積層壓電陶瓷片、振動板、壓力艙、入口管道及噴嘴片所組成，如圖 1 所示，爲其橫截面示意圖。壓電式噴墨列印頭是一精密設計與製作的關鍵性零組件，其工作原理是當電源供應器給予積層式壓電陶瓷微致動器一足夠脈衝電壓而產生一微小變形（大約 0.8 μm），使微致動器快速伸縮推動振動膜壓縮墨水艙之墨水，在噴嘴處之液體因承受內外壓力差而加速運動，形成速度漸增的突出液面。其後雖然作用於壓電陶瓷片之電壓於適當時間釋放，液體壓力下降，噴嘴處液滴仍因慣性緣故，克服表面力之牽絆而脫離而將墨水（直徑大約 40 μm）噴出於紙面上。壓電微致動器便經由連續的脈衝電壓，使噴嘴不斷的噴出墨滴串而列印。

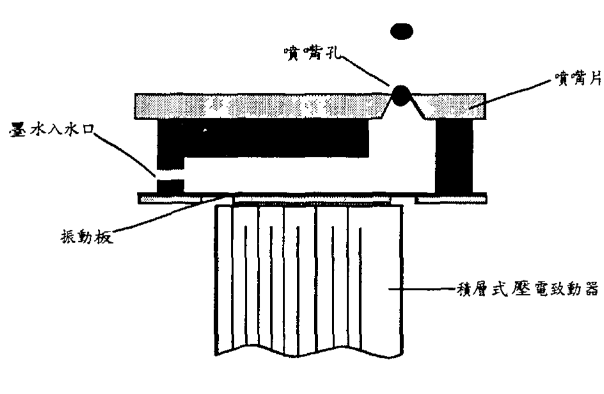


圖 1. 積層式壓電噴墨頭示意圖

二、田口氏參數設計過程

1. 問題的定義：假如問題能清楚的陳述出來，則可以依需要而建立實驗（數值分析）來解決問題。
2. 決定目標：確定輸出特徵（反應）以便能夠分析最適化。
3. 建立直交表：這是在數值分析建立之前最重要的階段，決定控制變數（control factor）及雜亂變數（noise factor），並且確定數值分析之範圍和合適的變數階段。
4. 數值分析的設計：選取適合的數值分析設計，並構築控制變數矩陣（CFA）或稱內部矩陣及雜亂變數矩陣（NFA）或稱外部矩陣。指定可控制變數和它們之間的交互作用項到 CFA 的行數，並指定雜亂變數到 NFA 的行數。
5. 數值分析的實施：完成每一項數值分析的結果並收集資料。
6. 分析資料：評估目標性能量測（TPM）和雜亂性能量測（NPM）這兩項特性量測，並以偏差的分析（ANOVA）技巧製作 TMP 和 NPM 的 ANOVA 表格，以便得到最佳的設計參數。
7. 解釋結果：確定目標控制變數（TCF）和偏差控制變數（VCF）並選取它們的最佳階段，從最大的 NPM（最小的偏差）可得到最佳階段的 VCF，最靠近目標值的平均輸出可得到最佳階段的 TCF。
8. 驗證數值分析：將所得到的最佳參數帶回，而再重做一次數值分析，以驗證輸出結果是否如預期。如不是，則需要重新考慮數值分析的設計。

三、有限元素分析模型

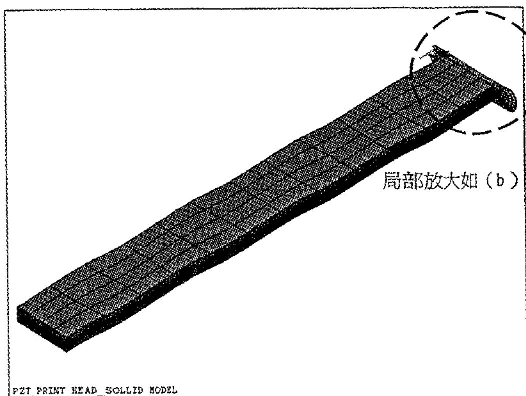
本文以有限元素分析軟體 ANSYS [3] 建立之壓電噴墨印表頭之 3-D 分析模型，模型組成包含壓電材料及鎳兩種不同的材料，壓電材料之密度爲 7900，其它性質如表 1 所示，鎳之材料性質如表 2，其中壓電材料部分選用 Solid 5 元素，材料鎳的選用 Solid 45 元素，經網格化後之有限元素分析模型如圖 2 所示。

表 **1.** 壓電材料之材料性質

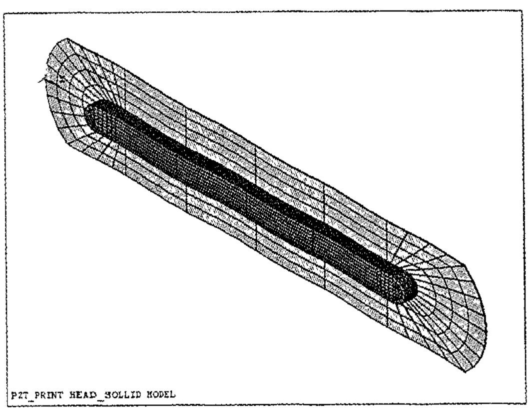
	剛性係數 C x 10^{10} N/m^2						壓電係數 e C/m^2			介電常數 ε x 10^9 F/m	
材料	C_{11}	C_{12}	C_{22}	C_{23}	C_{44}	C_{55}	e_{11}	e_{12}	e_{26}	ε_{11}	ε_{22}
PZT	7.37	3.95	8.98	4.18	2.44	2.60	17.90	-11.84	13.38	26.55	21.24

表 **2.** 鎳之材料性質

材料	楊氏係數（E） MPa	浦松比（ν）	密度（ρ） kg/m^3
鎳	196000	0.3	8600



（a）整體模型圖



（b）局部放大圖

圖 2. 有限元素分析模型圖（**a**）整體模型圖、（**b**）局部放大圖

四、振動板的幾何參數最佳設計

在整個積層式壓電噴墨列印頭的設計中，噴墨驅動波形；積層式壓電陶瓷材料、振動板、壓力艙及噴嘴孔尺寸；振動板的靜態、模態及暫態分析、壓力艙內部之墨水流速和壓力分析；噴嘴孔液滴的形成過程分析等都是很重要的研究課題。而其中振動板的尺寸對於墨水是不是能夠噴出及噴出品質有很大的影響，因爲振動板的體積變位及推擠速度，對墨水噴出的粒徑大小及速度有直接的關係，因此需要得到最佳的振動板尺寸設計，使振動板的位移量能夠最大，除此之外，在振動板的薄層部分其等效應力應該愈低愈好。振動板可分爲兩部分，與積層式壓電致動器接著的部分稱爲島板，而在島板的周圍部分稱爲振動膜片，如圖 3 所示。振動板的幾何參數計有壓力艙寬度（1）、島板厚度（2）、島板寬度（3）、膜片厚度（4）、振動板寬度（5）、島板長度（6）、右邊膜片長度（7）及左邊膜片長度（8）等八項，因此這八項也就是控制變數，由這些變數可構築 CFA。由於製作及組裝的誤差，實際上這些控制變數之值可能會變動，因此可將此變動視爲公差，此變動的公差也就是雜亂變數，由這些變數可構築 NFA。而振動板的最大位移量及最大等效應力可當爲此設計的輸出。當控制變數、雜亂變數及輸出項目決定之後，可由田口氏參數設計 [6] 的過程中得到最佳的振動板幾何參數。其數值分析方法是採用有限元素，所使用的軟體爲 ANSYS。其設計步驟可分爲

1. 決定目標：以振動板的最大位移量越大越好，而其最大等效應力要越小越好。
2. 控制變因及水準的訂定：本文的設計參數共有 8 個，選用之直交表爲 L_{18} 如表 3 所示，其提供的第一個設計參數爲 2 個水準，而其他 7 個設計參數爲 3 個水準。所選定的 8 個設計參數爲壓力艙寬度（1）、島板厚度（2）、島

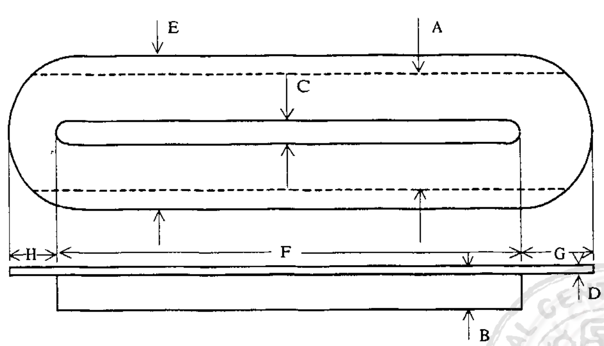


圖 3. 振動版之幾何尺寸

表 3. L_{18} 標準直交表

NO. ＼ 變數	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

板寬度（3）、膜片厚度（4）、振動板寬度（5）、島板長度（6）、右邊膜片長度（7）及左邊膜片長度（8）。訂定各設計參數的各個水準時，應考慮製造或配合的極限來適當地訂定，所使用的單位皆爲 μm。各設計參數及其水準如表 4 所示。

表 4. 各變數水準表

變因 ＼ 水準	1	2	3
A　壓力艙寬度	190	210	NA
B　島板厚度	20	25	30
C　島板寬度	40	50	70
D　膜片厚度	2	4	6
E　振動板寬度	240	250	260
F　島板長度	650	700	800
G　右邊膜片長度	140	160	180
H　左邊膜片長度	100	120	140

3. 直交表的選擇：8 個參數的直交表，要進行的數值分析次數爲 18 次，每次數值分析中，各參數所應選用的水準可由表 5 得出。
4. 數值分析的配置及輸出數據：分析結果如表 5，其中位移的單位爲 μm，壓力的單位爲 MPa。
5. 數據的解析和最適條件的決定：

（1）位移部份

a. 各變數水準對位移的影響效果如圖 4。

b. ANOVA 表格的建立，如表 6。

從各變數水準的圖表，可以得到每個變數的最佳水準。

表 5. 分析結果表

No. ＼ 變數	A	B	C	D	E	F	G	H	輸出結果	
									位移	壓力
1	190	20	40	2	240	650	140	100	0.8513	186
2	190	20	50	4	250	700	160	120	0.8154	247
3	190	20	70	6	260	800	180	140	0.6940	403
4	190	25	40	2	250	700	180	140	0.8518	159
5	190	25	50	4	260	800	140	100	0.8144	246
6	190	25	70	6	240	650	160	120	0.6977	401
7	190	30	40	4	240	800	160	140	0.8211	224
8	190	30	50	6	250	650	180	100	0.7429	319
9	190	30	70	2	260	700	140	120	0.8475	185
10	210	20	40	6	260	700	160	100	0.7858	255
11	210	20	50	2	240	800	180	120	0.8519	135
12	210	20	70	4	250	650	140	140	0.8164	248
13	210	25	40	4	260	650	180	120	0.8326	186
14	210	25	50	6	240	700	140	140	0.7737	264
15	210	25	70	2	250	800	160	100	0.8507	145
16	210	30	40	6	250	800	140	120	0.7803	251
17	210	30	50	2	260	650	160	140	0.8533	169
18	210	30	70	4	240	700	180	100	0.8154	246

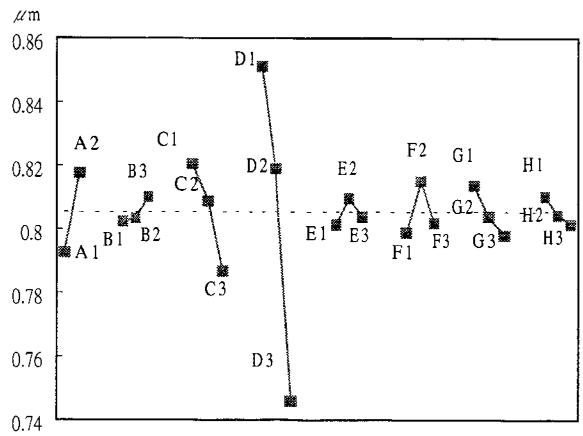


圖 **4.** 各變數水準對位移的影響效果圖

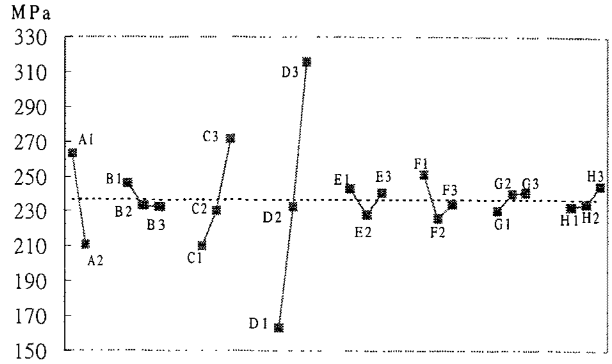


圖 **5.** 各變數水準對等效壓力的影響效果

表 **6.** 位移影響之 **ANOVA** 表

Source	df	S	MS	F-ratio	$\bar{S}$	P(%)
A	1	0.002853	0.002853	23.57851	0.002732	6.247427
B	2	0.000232	0.000116			
C	2	0.003545	0.001773	14.64876	0.003303	7.553167
D	2	0.034710	0.017355	143.4298	0.034468	78.82003
E	2	0.000207	0.000104			
F	2	0.000838	0.000419	3.46281	0.000596	1.362909
G	2	0.000813	0.000407	3.359504	0.000571	1.30574
H	2	0.000214	0.000107			
e	2	0.000313	0.000157			
Total	17	0.043730			0.043730	100
e pooled	8	0.000966	0.000121		0.00206	4.710725

表 **7.** 等效壓力影響之 **ANOVA** 表

Source	df	S	MS	F-ratio	$\bar{S}$	P(%)
A	1	12853.4	12853.4	23.27931	12301.26	11.99
B	2	495.444	247.722			
C	2	11840.8	5920.4	10.72268	10736.52	10.46486
D	2	71276.4	35638.2	64.54578	70172.12	68.39655
E	2	642.111	321.0555			
F	2	2115.44	1057.72			
G	2	394.111	197.0555			
H	2	560.444	280.222			
e	2	2418.11	1209.055			
Total	17	102596			102596	100
e pooled	12	6625.66	552.1383		9386.092	9.148594

在位移部份，其輸出結果要越大越好，所以可得到 A2、B3、C1、D1、E2、F2、G1 及 H1 等各變數的水準爲最佳。從各圖表之曲線的傾斜度可以看出那個變數對輸出結果的影響度比較大，在此例中可以得到膜片厚度對最大位移的影響度最大。而各變數對位移量的貢獻比率，需要從 ANOVA 表格得到。從表格中可以看出膜片厚度對位移量的貢獻比率達到 78.82%，厚板寬度對位移量的貢獻比率達到 7.553%，壓力艙寬度對位量的貢獻比率達到 6.247%，而其它的變數對位移量的貢獻比率都很小。

（2）等效壓力部份

a. 各變數水準對等效壓力的影響效果如圖 5。

b. ANOVA 表格的建立，如表 7。

從各變數水準的圖表，可以得到每個變數的最佳水準。在等效壓力部份，其輸出結果要越小越好，所以可得到 A2、B3、C1、D1、E2、F2、G1 及 H1 等各變數的水準爲最佳。從各圖表之曲線的傾斜度可以看出那個變數對輸出結果的影響度比較大，在此中可以得到膜片厚度對最小等效壓力的影響度最大，而各變數對位移量的貢獻比率，需要從 ANOVA 表格得到。從表格中可以看膜片厚度對等效壓力值的貢獻比率達到 68.40%，厚板寬度對等效壓力值的貢獻比率達到 10.46%，壓力艙寬度對等效壓力值的貢獻比率達到 11.99%，而其它的變數對等效壓力值的貢獻比率都很小。

振動板的最佳尺寸設計，需要其振動板的位移量最大，而等效應力最小。從以上分析可知壓力艙寬度爲 210 μm、厚板厚度爲 30 μm、膜片厚度爲 2 μm、振動板寬度爲 250 μm、厚板長度爲 700 μm、厚板寬度爲 40 μm、左邊膜片長度爲 100 μm、右邊膜片長度爲 140 μm 時可得到振動板的位移量最大，而等效應力最小。

6. 確認實驗

從以上所得的數據，再確認其實驗的輸出結果是否正確，從表 8 中可知道在最佳振動板尺寸下，其振動板的位移量最大，而等效應力最小，如數值分析實驗 1 的輸出結果。從以上分析，知道膜片厚度對振動板的位移量及等效應力影響最大，而其它的變數影響較小。因此膜片厚度越小時，其振動板的位移量越大，而等效應力越小。但是為了要振動板與墨水的自然頻率比 PZT 的自然頻率大，其膜片厚度有其最小的限度，一般來說 PZT 的自然頻率大約在 200 KHz 以下，所以振動板與墨水的自然頻率最好要比 200KHz 大，從圖 6 可看出其膜片厚度最好要大於 3.5 um，所以可以讓膜片厚度為 4.0 um，而其輸出結果如數值分析 2 所示。

五、墨滴飛行狀態之實驗量測

利用有限元素及田口氏參數設計所得到的最佳尺寸後，使用微製程的方法，製造壓電式噴墨列印頭各零組件，並以精密定位機構將各零組件做精密組裝而成一完整壓電式噴墨列印頭。液滴觀系統如圖 7 所示，噴墨列印頭以一精密三軸平台固定，由墨滴驅動系統給予一連續脈衝電壓，其波形如圖 8 所示 [3]。T1 為壓電致動器往後拉使壓力艙的體積變大，使得墨水儲存之墨水經由流道流入墨水艙內以補充墨水所需的時間，大約為 100 μs；T2 為壓電致器往前回復到原先位置以推動墨水艙內之墨水往外噴出的時間，大約為 6.6 μs；T3 為三角脈衝之間的間隔時間，大約為 60 μs，上述三個時段之和的倒數乃是噴墨頭的噴墨頻率，一般為 5 KHz 以上，而驅動電壓一般為 23 V 左右。由於噴墨頻率一般為 5 KHz 以上，直接觀測十分困難，因此使發光二極體的閃爍頻率和電壓脈衝的頻率相同，便可凍結畫面，此畫面是由每秒可截取 30 個畫面的電荷耦合攝影機所捕捉，此畫面再藉由影像處理系統儲存於電腦內。此外，再藉著可微調 1 μs 的時間延遲裝置，用以調整發光二極體和電壓脈衝兩者之間的時間延遲，如此逐漸增加延遲時間，便拍攝出墨滴串噴出的整個過程。液滴飛行狀態，如圖 9 所示，延遲時間是從 T2 以後開始，也就是壓電致動器往前推墨水時。其噴墨頻率為 6 KHz，因此每秒鐘有 6000 顆墨滴噴出，所以攝影機每拍攝一畫面的液滴狀態，實際上已經重覆累積 200 顆墨滴，從圖上可看出液滴的形狀非常清楚，此乃表面每顆液滴的飛行速度都一樣的。如果液滴的速度不是等速，則液滴形狀會模糊不清，嚴重一點的話根本看不到。此外，利用影像處理系統可量測液滴的直徑及飛行速度，如圖 10 所示為各噴墨頻率之液滴直徑及飛行速度的變化狀態。從圖中可看出其變化不大，其液滴飛行速度約為 8 m/s，而液滴粒徑約為

表 8. 確認實驗數據表

變數 / No.	A	B	C	D	E	F	G	H	輸出結果 位移	輸出結果 壓力
1	210	30	40	2	250	700	140	100	0.8541	130
2	210	30	40	4	250	700	140	100	0.8327	185

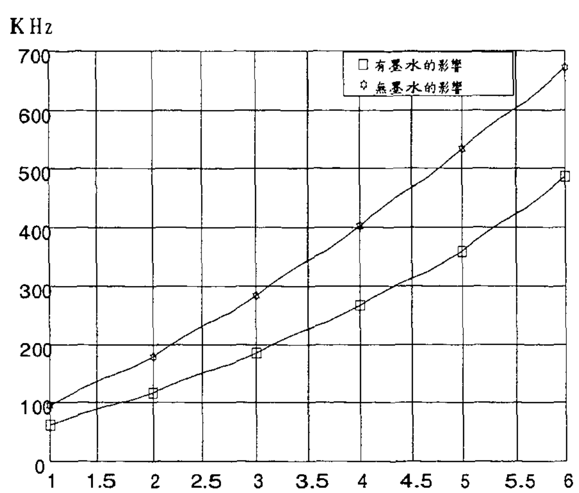


圖 6. 振動板薄板之厚度對振動板自然模態的變化

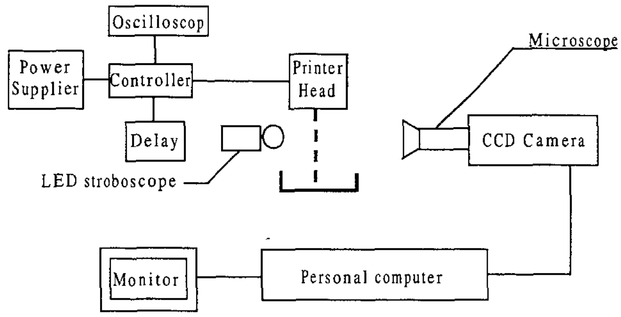


圖 7. 液滴觀測系統

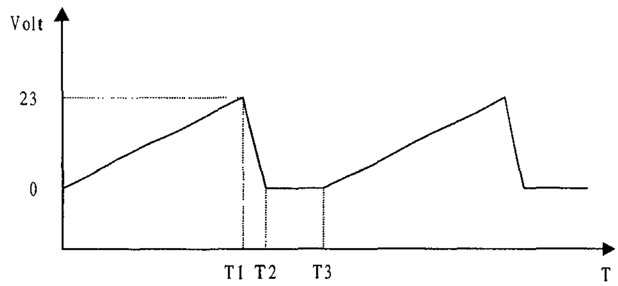


圖 8. 電壓脈衝形狀之示意圖

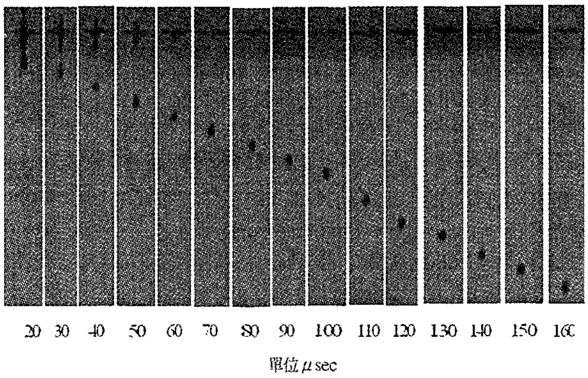


圖 9. 液滴觀測微墨滴飛行狀態

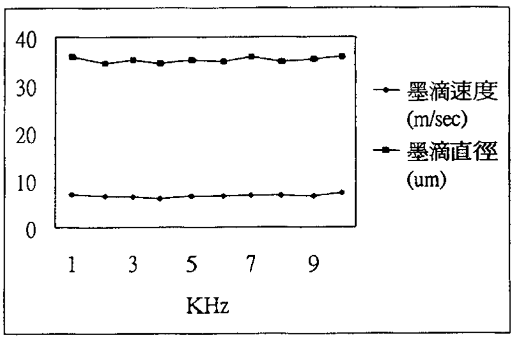


圖 10. 噴墨頻率與墨滴速度及直徑之關係圖

36 μm。

在壽命測試方面，其驅動波形如圖 8 所示，連續驅動噴墨列印頭做噴墨測試，且藉由液滴觀測系統觀測其噴墨狀態，液滴觀測系統如圖 7 所示，另外在控制面板上有計數器，可計量噴墨次數，經過多次的測試，其噴墨頭的壽命可達 10^9 次以上。

六、結論

本文利用有限元素分析及田口氏參數設計方法，可決定壓電式噴墨列印頭之振動板的最佳化尺寸，其尺寸亦須考慮製造或配合的極限來適當地訂定。藉由液滴觀測系統，能夠觀測液滴的飛行狀況及其飛行速度與粒徑，在各種噴墨頻率下，其飛行速度大約為 8 m/s，而液滴粒徑約為 36 μm。由液滴觀測系統得知噴墨頭之噴墨壽命可達 10^9 次以上。

參考文獻

1. 葉吉田（民國 87），壓電式應需求型液滴微泵浦運作原理簡介，工業材料 5(137)，頁 109-113。
2. Allen, R. R., J. D. Meyer and W. R. Knight (1985) Thermodynamics and hydrodynamics of thermal ink jets, *Hewlett-Packard Journal*, 36, 21-27.
3. Ansys Menu (1996) *Structural Analysis User's Guide*, Release 5.3.
4. Chen, P. H., W. C. Chan and S. H. Chang (1997) Bubble growth and ink ejection process of a thermal bubble ink jet print head. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39, 683-695.
5. Hosono, S., T. Abe, S. Yonekubo, M. Usui and M. Yoshida (1992) *Ink Jet Type Recording Head Driving Circuit*, U. S. Patent No. 5426465.
6. Madhav, S. P. (1989) *Quality Engineering Using Robust Design*, P T R Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Sakai, S., A. Kobayashi, T. Naka, S. Yonekubo, T. Mitsuzawa and S. Shinada (1993) *Piezoelectric Ink Jet Print Head*, European Patent No. 0573055A2.

收件：**89.06.26** 修正：**90.05.04** 接受：**90.05.15**