

เอกสารอ้างอิง

1. R.P.Paul , ROBOT MANIPULATORS : MATHEMATICS ,PROGRAMMING AND CONTROL , THE COMPUTER CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS, (MIT Press 1981)
2. Andrew P. Sage , Chelsea C. White,3, OPTIMAL SYSTEM CONTROL , 2nd edition . (Prentice - Hall Inc; 1977)
3. Richard C. Dorf , MODERN CONTROL SYSTEM , 2nd edition , (Addison Wesley Publishing Company Inc; 1980)
4. Roger S. Babcock , W.L. Elliott , John R. Kelly , GAS CUTTING : ASM METAL HANDBOOK , ASM Committee on Gas and Arc Cutting, 8th edition vol.5
5. Yoram Koren , ROBOTICS FOR ENGINEERS , (Mc Graw Hill , Inc ; 1985)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

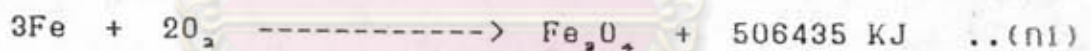


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีการตัดเหล็กด้วยเปลวไฟ (4 : 278)

ในการตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟนั้น เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยใช้ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น โพรเพน อะซิทีลีน และก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการสันดาปให้พลังงานความร้อน ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงเหล่านี้จะให้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น ก๊าซโพรเพนเมื่อเผาไหม้จะให้อุณหภูมิประมาณ 4800° F และก๊าซธรรมชาติประมาณ 5000° F แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปก็คือ ก๊าซอะซิทีลีน ทั้งนี้ก็เพราะว่า ก๊าซอะซิทีลีนให้พลังงานความร้อนสูง คือประมาณ 5600° F สามารถนำมาตัดโลหะที่มีความหนาระหว่าง 0.5 - 2000 มิลลิเมตร ซึ่งงานตัดโลหะด้วยเปลวไฟนั้น เป็นการตัดโลหะให้ขาดจากกัน โดยใช้เปลวไฟให้ความร้อนแก่ชิ้นงานบริเวณที่ต้องการตัดจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดสันดาป แล้วจึงเปิดวาล์วปล่อยก๊าซออกซิเจนที่มีความดันสูงออกมาจากปลายหัวตัด ให้ปะทะชิ้นงานที่ถูกให้ความร้อนไว้ก่อนแล้ว (preheat) ก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเหล็กที่ร้อนแดงแปรสภาพเป็นออกไซด์ในทันที ดังสมการที่ (ก1)



เหล็ก + ออกซิเจน -----> เหล็กออกไซด์ + พลังงานความร้อน

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Oxidation) จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้น ซึ่งพลังงานความร้อนจำนวนนี้จะทำให้ในบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะ และแรงดันของก๊าซออกซิเจนที่พุ่งตัดจะเป่าชิ้นงานให้ขาดออกจากกันเกิดเป็นร่องตัด (Kerf) ขึ้นต่อเนื่องไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวตัด

ข้อจำกัดประการหนึ่งของงานตัดโลหะด้วยวิธีนี้ ก็คือ สามารถตัดได้ผลดีเฉพาะเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำเท่านั้น คือ ประเภทเหล็กเหนียว แต่ เหล็กหล่อ สเตนเลส หรือโลหะที่ไม่ใช่เหล็กก็สามารถทำการตัดได้เช่นกัน แต่จะต้องใช้เทคนิคในการตัดที่แตกต่างไปจากงานตัดเหล็กเหนียว และไม่สามารถตัดได้ดี ทั้งนี้ก็เพราะว่าโลหะดังกล่าวมักจะมีจุดหลอมเหลวของออกไซด์สูงกว่าจุดหลอมเหลวของเนื้อโลหะนั้น แต่ถ้าใช้อุปกรณ์บางอย่างมาประกอบด้วยจึงจะสามารถตัดได้ โดย

อาจใช้ Chemical flux หรือ ผงโลหะ (Iron powder) ใส่เข้าไปผสม
กับหัวฉีดก๊าซออกซิเจนที่ใช้ตัด หรืออาจจะใช้วิธีการตัดแบบอื่น เช่น Plasma หรือ
Laser ก็ได้

การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ในการทำงานจะแสดงไว้ในตารางดังต่อไปนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 1 Typical Data for Manual Oxyacetylene Cutting of Low-Carbon Steel Plate

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Oxygen pressure, psi	Cutting speed, ipm (a)	Gas consumption, cu ft (b)(c)			
				Per hr		Per linear ft	
				Oxygen	Acetylene	Oxygen	Acetylene
1/8	0.0380-0.0400	15-23	20-30	45-55	7-9	0.37-0.45	0.06-0.07
1/4	0.0380-0.0595	11-20	16-26	50-93	9-11	0.63-0.72	0.08-0.11
3/8	0.0380-0.0595	17-25	15-24	60-115	10-12	0.80-0.96	0.10-0.13
1/2	0.0465-0.0595	20-30	12-22	66-125	10-13	1.10-1.14	0.12-0.17
3/4	0.0465-0.0595	24-35	12-20	117-143	12-15	1.43-1.95	0.15-0.20
1	0.0465-0.0595	28-40	9-18	130-160	13-16	1.78-2.89	0.18-0.29
1 1/2	0.0595-0.0810	35-48	6-14	143-178	15-18	1.96-3.18	0.21-0.33
2	0.0670-0.0810	22-50	6-13	185-231	16-20	3.55-6.16	0.31-0.53
3	0.0670-0.0810	33-55	4-10	240-290	19-23	5.80-12.00	0.46-0.95
4	0.0810-0.0860	42-60	4-8	293-388	21-26	9.70-14.64	0.65-1.05
5	0.0810-0.0860	53-70	3.5-6.4	347-437	24-29	13.66-19.83	0.91-1.37
6	0.0980-0.0995	45-80	3.0-5.4	400-567	27-32	21.00-26.70	1.19-1.80
8	0.0995	60-77	2.6-4.2	505-615	31.5-38.5	29.30-38.84	1.83-2.42
10	0.0995	75-96	1.9-3.2	610-750	36.9-45.1	46.90-64.20	2.57-3.84
12 (c)	0.1200	69-86	1.4-2.6	720-880	42.3-51.7	67.70-103.00	3.98-6.05

(a) Lowest speeds and highest gas consumptions are for inexperienced operators, short cuts, dirty or poor material. Highest speeds and lowest gas consumptions are for experienced operators, long cuts, and clean and good material.
 (b) Because the pressure of acetylene for the preheating flames is more a function of torch design than of the thickness of the part being cut, pressure data have been omitted from

this table. For acetylene pressure data, see charts of manufacturers of apparatus.
 (c) Beyond 12-in. thickness, the critical data of manual cutting practices are greatly affected by the condition of the metal and the skill of the operator, resulting in wide ranges of data. In view of this, the table has been terminated at the 12-in. thickness. In Table 3, on machine cutting, thickness range is extended to 36 in.

Table 2 Typical Data for Machine Oxyacetylene Cutting of Low-Carbon Steel Plate (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Oxygen pressure, psi	Cutting speed, ipm (b)	Gas consumption, cu ft (b)(c)			
				Per hr		Per linear ft	
				Oxygen	Acetylene	Oxygen	Acetylene
1/8	0.0250-0.0400	15-23	22-32	40-55	7-9	0.34-0.36	0.05-0.06
1/4	0.0310-0.0595	11-35	20-28	45-93	8-11	0.34-0.66	0.07-0.08
3/8	0.0310-0.0595	17-40	19-26	82-115	9-12	0.86-0.89	0.08-0.09
1/2	0.0310-0.0595	20-55	17-24	105-125	10-13	1.04-1.24	0.11-0.12
3/4	0.0380-0.0595	24-50	15-22	117-159	12-15	1.45-1.56	0.14-0.16
1	0.0465-0.0595	28-55	14-19	130-174	13-16	1.83-1.86	0.17-0.19
1 1/2	0.0670-0.0810	25-55	12-15	185-240	14-18	3.20	0.23-0.24
2	0.0670-0.0810	22-60	10-14	185-260	16-20	3.70-3.72	0.29-0.32
3	0.0810-0.0860	33-50	8-11	240-332	18-23	6.00-6.04	0.42-0.45
4	0.0810-0.0860	42-60	6.5-9	293-384	21-26	8.53-9.02	0.58-0.65
5	0.0810-0.0860	53-65	5.5-7.5	347-411	23-29	10.97-12.62	0.77-0.84
6	0.0980-0.0995	45-65	4.5-6.5	400-490	26-32	15.10-17.78	0.98-1.16
8	0.0980-0.0995	60-90	3.7-4.9	505-625	31-39	25.52-27.30	1.59-1.68
10	0.0995-0.1100	75-90	2.9-4.0	610-750	37-45	37.50-42.10	2.25-2.55
12	0.1100-0.1200	69-105	2.4-3.5	720-880	42-52	49.70-60.00	2.97-3.50
12	0.1935	30	(e)	1274	85	(d)	(d)
14	0.221	25	(e)	1458	98	(d)	(d)
16	0.221	30	(e)	1683	98	(d)	(d)
18	0.250	25	(e)	1838	134	(d)	(d)
20	0.250	30	(e)	2098	134	(d)	(d)
22	0.250	35	(e)	2358	134	(d)	(d)
24	0.290	25	(e)	2467	174	(d)	(d)
26	0.290	30	(e)	2772	174	(d)	(d)
28	0.290	35	(e)	3077	174	(d)	(d)
30	0.332	25	(e)	3125	204	(d)	(d)
32	0.332	30	(e)	3425	204	(d)	(d)
34	0.332	35	(e)	3775	204	(d)	(d)
36	0.332	40	(e)	4125	204	(d)	(d)

Cutting With One-Piece Divergent Nozzles (High-Speed Tips)(f)

1/4	120	26	70	14	0.54	0.109
1/2	100	22	100	18	0.91	0.163
3/4	100	20	120	18	1.00	0.18
1	110	18	130	18	1.44	0.20
1 1/2	100	16	170	25	2.11	0.31
2	100	13	230	25	3.52	0.39
3	85	10	270	32	5.4	0.64
4	85	9	230	35	7.3	0.78
5	110	8	395	35	9.7	0.87
6	125	7	435	35	12.4	1.00
7	80	6	495	36	16.5	1.20
8	100	5 1/2	580	36	21.2	1.32

(a) Column values do not necessarily vary in exact proportion to plate thickness, because straight-line relations do not exist among pressure, speed, and orifice sizes.
 (b) Lowest speeds and highest gas consumptions are for inexperienced operators, short cuts, dirty or poor material. Highest speeds and lowest gas consumptions are for experienced operators, long cuts, clean and good material.
 (c) Because the pressure of acetylene for the preheating flames is more a function of torch design than of the thickness of the part being cut, pressure data have been omitted from this table. For acetylene pressure data, see charts of manufacturers of apparatus.

(d) The data for 12 to 36 in. are for torches with large tips, using large volumes of oxygen at low pressures. Because the speed depends on the condition of the material being cut and the skill of the operator, no figures are given for gas consumption per linear foot.
 (e) Cutting speeds vary from 4 ipm for light sections to 2 ipm for heavy sections.
 (f) These data are for divergent orifices that have controlled expansion tips, permitting the use of relatively high oxygen pressures so as to expand the cutting oxygen through the orifices. Thus the gas stream has high velocity and is relatively narrow. Higher speeds and lower specific consumption of oxygen result.

Table 3(f) Typical Data for Manual Oxy-Natural Gas Straight-Line Cutting of Low-Carbon Steel Plate (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Oxygen pressure, psi	Minimum natural gas pressure, oz per sq in.	Cutting speed, ipm(b)	Approximate gas consumption, cu ft per hr	
					Oxygen	Natural gas
1/8	0.046	15	3	20 to 28	25	8
1/4	0.046	18	3	18 to 28	35	10
3/8	0.046	20	3	16 to 20	45	14
1/2	0.059	30	3	13 to 17	50	18
5/8	0.059	35	3	10 to 15	75	20
1	0.059	40	3	9 to 13	100	24
1 1/4	0.067	40	3	7 to 12	145	26
2	0.067	45	3	6 to 10	190	28
2 1/2	0.067	50	3	6 to 9	245	30
3	0.093	50	3	5 to 8	270	32
4	0.093	55	3	5 to 7	320	36
5	0.093	60	3	4 to 6	400	40
6	0.110	60	3	4 to 6	470	48
7	0.110	70	3	3 to 5	520	52
8	0.110	80	3	3 to 4	580	56
10	0.110	90	3	3 to 4	850	60
12	0.110	100	3	2 to 3	1000	64

(a) Using injector-type torch and two-piece tips. (b) Variations in cutting speeds may be caused by mill scale on plate, variation in oxygen purity, flame adjustment, condition of equipment, impurities in steel, and variation in heat content of natural gas.

Table 4(f) Typical Data for Machine Oxy-Natural Gas Shape Cutting of Low-Carbon Steel Plate 1/4 to 8 In. Thick (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	High preheat		Low preheat		Cutting oxygen, psi	Cutting speed, ipm(b)	Width of kerf, in. (approx)
		Oxygen, psi	Natural gas, psi	Oxygen, psi	Natural gas, oz per sq in.			
1/4	0.036	28	3	7 to 12	1	70 to 75	18 to 28	0.08
3/8	0.037	28	3	7 to 12	1	70 to 80	18 to 26	0.08
1/2	0.039	34	3	7 to 12	1	75 to 80	16 to 24	0.09
5/8	0.039	34	3	7 to 12	1	75 to 80	16 to 23	0.09
3/4	0.046	46	3	8 to 12	1	80 to 85	16 to 22	0.10
1	0.046	48	3	8 to 12	1	80 to 85	14 to 20	0.10
1 1/4	0.054	44	3	8 to 12	1	80 to 85	14 to 18	0.12
1 1/2	0.054	44	3	8 to 12	1	90 to 95	13 to 18	0.12
1 3/4	0.054	45	3	8 to 12	1	90 to 95	12 to 17	0.12
2	0.054	45	3	8 to 12	1	100	10 to 15	0.12
2 1/4	0.055	46	3	8 to 12	1	100	9 to 15	0.13
2 1/2	0.055	46	3	8 to 12	1	100	8 to 14	0.13
2 3/4	0.067	46	3	8 to 12	1	100	8 to 13	0.14
3	0.067	46	3	8 to 12	1	100	7 to 13	0.14
3 1/4	0.073	50	3	10 to 14	1	105	6 to 12	0.15
4	0.073	50	3	10 to 14	1	110	6 to 11	0.15
4 1/2	0.082	50	3	10 to 14	1	110	5 to 10	0.17
5	0.082	50	3	10 to 14	1	115	5 to 10	0.17
5 1/4	0.096	50	3	10 to 14	1	115	5 to 9	0.18
6	0.096	50	3	10 to 14	1	120	5 to 9	0.18
6 1/2	0.096	50	3	10 to 14	1	120	4 to 8	0.18
7 1/4	0.096	50	3	10 to 14	1	120	4 to 8	0.18
8	0.096	50	3	10 to 14	1	120	3 to 7	0.18

(a) Two-piece tips for high-speed machine cutting. (b) Variations in cutting speeds may be caused by mill scale on plate, variation in oxygen purity, flame adjustment, condition of equipment, impurities in steel, and variation in heat content of natural gas.

Table 5f) Typical Data for Machine Oxy-Natural Gas Drop Cutting of Shapes From Low-Carbon Steel Plate 10 to 2 1/4 In. Thick (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Preheat		Cutting oxygen, psib)	Cutting speed, ipm	Cutting oxygen, cfh
		Oxygen, psi	Natural gas, psi			
10	0.250	35 to 45	5	27	3.25	1400
12 1/4	0.281	35 to 45	5	28	3.25	1750
15 1/4	0.281	35 to 45	5	30	3.0	1900
18	0.312	35 to 45	5	28	4.25	2245
21	0.312	35 to 45	5	28	3.0	2245
21 1/4	0.312	35 to 45	5	30	3.75	2365

(a) Two-piece recessed tips with milled preheat flutes (heavy preheat) and straight-bore cutting-oxygen orifices. (b) Pressure measured at torch inlet.

Table 6f) Typical Data for Machine Oxy-Propane Straight-Line Cutting of Low-Carbon Steel Plate 8 to 44 In. Thick (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Operating pressure, psi			Cutting speed, ipm	Gas consumption, cfh		
		Cutting oxygen	Preheat oxygen	Propane		Cutting oxygen	Preheat oxygen	Propane
8 to 12	0.1562	40 to 65	20 to 40	10 to 15	3 to 6	715 to 1210	200 to 375	55 to 105
10 to 16	0.1875	30 to 60	20 to 40	10 to 15	3 to 5	840 to 1500	200 to 375	55 to 105
15 to 25	0.250	30 to 60	20 to 40	10 to 15	2 to 3 1/2	1500 to 2510	200 to 375	55 to 105
20 to 32	0.2812	30 to 60	20 to 60	10 to 20	2 to 3	1900 to 3150	220 to 425	60 to 115
24 to 36	0.3125	25 to 55	20 to 65	10 to 25	1 1/2 to 2 1/2	2080 to 3650	250 to 450	60 to 125
28 to 44	0.3437	25 to 55	20 to 65	10 to 25	1 1/2 to 2 1/2	2570 to 4400	250 to 450	60 to 125

(a) Two-piece recessed tips with milled preheat flutes (heavy preheat) and straight-bore cutting-oxygen orifices.

Table 7f) Typical Data for Oxy-Mapp Gas Cutting of Low-Carbon Steel Plate, Using Standard-Pressure Cutting Tips or High-Speed Cutting Tips (a)

Plate thickness, in.	Cutting tip No. (b)	Cutting speed, ipm	Oxygen			Methylacetylene-propadiene			
			Cutting pressure, psia(c)	Cutting rate of flow, cfh	Preheat pressure, psi	Preheat rate of flow, cfh	Cutting pressure, psi	Cutting rate of flow, cfh	Kerf width, in.
Cutting With Standard-Pressure Tips									
1/4	75	30 to 36	40 to 50	12 to 15	5 to 10	7 to 25	2 to 10	2 to 10	0.025
3/8	72	26 to 32	40 to 50	20 to 30	5 to 10	7 to 25	2 to 10	2 to 10	0.03
1/2	68	24 to 30	40 to 50	30 to 40	5 to 10	7 to 25	2 to 10	2 to 10	0.04
5/8	61	22 to 28	40 to 50	55 to 65	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.05
3/4	58	18 to 22	40 to 50	60 to 75	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.06
1	56	14 to 20	40 to 50	60 to 75	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.06
1 1/4	54	13 to 17	50 to 60	105 to 120	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.08
1 1/2	54	12 to 16	50 to 60	105 to 120	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.08
2	52	10 to 14	50 to 60	145 to 190	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.09
2 1/2	48	9 to 13	50 to 60	210 to 265	10 to 30	20 to 50	6 to 10	8 to 20	0.10
3	48	8 to 13	50 to 60	210 to 265	10 to 30	20 to 50	6 to 10	8 to 20	0.10
4	46	7 to 12	60 to 70	290 to 336	10 to 30	25 to 50	6 to 10	10 to 20	0.15
5	46	6 to 10	70 to 80	330 to 405	10 to 30	25 to 50	6 to 10	10 to 20	0.15
6	42	5 to 8	80 to 70	375 to 470	10 to 30	25 to 50	6 to 10	10 to 20	0.16
8	35	4 to 7	80 to 70	485 to 590	30 to 50	40 to 100	10 to 15	20 to 45	0.19
10	30	3 to 6	40 to 70	508 to 625	30 to 50	40 to 100	10 to 15	20 to 45	0.20
12	30	3 to 5	50 to 85	645 to 865	30 to 50	60 to 150	10 to 15	30 to 60	0.21
Cutting With High-Speed Tips									
1/4	75	32 to 38	60 to 70	20 to 25	5 to 10	7 to 25	2 to 10	3 to 10	0.025
3/8	72	28 to 32	70 to 80	30 to 40	5 to 10	7 to 25	2 to 10	3 to 10	0.03
1/2	68	26 to 32	70 to 80	55 to 65	5 to 10	7 to 25	2 to 10	3 to 10	0.05
5/8	61	24 to 30	80 to 90	75 to 95	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.06
3/4	56	20 to 26	80 to 90	115 to 130	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.07
1	56	18 to 24	80 to 90	115 to 130	5 to 10	12 to 25	2 to 10	5 to 10	0.07
1 1/4	54	16 to 20	70 to 80	155 to 170	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.08
1 1/2	54	15 to 19	80 to 90	170 to 180	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.08
2	52	14 to 18	80 to 90	215 to 255	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.09
2 1/2	52	12 to 17	80 to 90	215 to 255	10 to 20	20 to 35	2 to 10	8 to 15	0.09
3	48	10 to 15	80 to 90	335 to 400	10 to 20	20 to 35	6 to 10	10 to 15	0.10
4	46	9 to 14	80 to 90	375 to 425	10 to 20	20 to 35	6 to 10	10 to 15	0.12

(a) All recommendations are for straight-line cutting with a three-bore torch perpendicular to work. (b) All tips are of design recommended by the supplier. (c) Pressure of cutting oxygen measured at the torch.

Table 8f Operating Conditions and Comparative Costs for Straight-Line Gas Cutting of Low-Carbon Steel Plate With Four Fuel Gases (Example 347) (a)

Item	Acetylene	Mapp(b)	Propane	Natural gas
Cutting 1/2-In.-Thick Plate				
Type of cutting tip	45(c)	68(d)	361(c)	361(c)
Cutting-oxygen orifice:				
Tip No.	1		1	1
Drill-size No.	68	68	68	68
Diameter, in.	0.031	0.031	0.031	0.031
Optimum cutting speed, ipm(e)	35	35	32	31
Fuel-gas pressure, psi	5	10	9	4.5
Fuel-gas flow, cfh	23	13	27	45
Preheat oxygen(f):				
Pressure, psi	8	30	20	30
Flow, cfh	28	39	110	75
Ratio of oxygen to fuel gas	1.2 to 1	3 to 1	4 to 1	1.7 to 1
Cutting oxygen(f):				
Pressure, psi	100	110	100	100
Flow, cfh	75	85	75	75
Time per 100 ft cut, hr	0.571	0.571	0.625	0.645
Fuel cost per 100 ft cut	\$0.33	\$0.15	\$0.04	\$0.02
Cost of preheat and cutting oxygen per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$0.11	\$0.13	\$0.21	\$0.17
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$0.29	\$0.36	\$0.58	\$0.48
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$0.59	\$0.71	\$1.16	\$0.97
Direct labor cost per 100 ft cut(g)	\$2.85	\$2.85	\$3.12	\$3.22
Total cost of gas and direct labor per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$3.29	\$3.13	\$3.37	\$3.41
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$3.47	\$3.36	\$3.74	\$3.72
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$3.77	\$3.71	\$4.32	\$4.21
Cutting 1-In.-Thick Plate				
Type of cutting tip	45(e)	61(d)	361(c)	361(c)
Cutting-oxygen orifice:				
Tip No.	2		3	3
Drill-size No.	62	61	57	57
Diameter, in.	0.038	0.039	0.043	0.043
Optimum cutting speed, ipm(e)	24	24	21	21
Fuel-gas pressure, psi	8	10	7	4.5
Fuel-gas flow, cfh	30	16	25	45
Preheat oxygen(f):				
Pressure, psi	16	30	20	25
Flow, cfh	32	50	100	80
Ratio of oxygen to fuel gas	1.1 to 1	3.1 to 1	4 to 1	1.8 to 1
Cutting oxygen(f):				
Pressure, psi	115	100	95	95
Flow, cfh	120	130	140	140
Time per 100 ft cut, hr	0.833	0.833	0.952	0.952
Fuel cost per 100 ft cut	\$0.83	\$0.27	\$0.06	\$0.03
Cost of preheat and cutting oxygen per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$0.23	\$0.27	\$0.41	\$0.38
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$0.63	\$0.75	\$1.14	\$1.05
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$1.27	\$1.50	\$2.28	\$2.09
Direct labor cost per 100 ft cut(g)	\$4.16	\$4.16	\$4.76	\$4.76
Total cost of gas and direct labor per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$5.02	\$4.70	\$5.23	\$5.17
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$5.42	\$5.18	\$5.96	\$5.84
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$6.06	\$5.93	\$7.10	\$6.88
Cutting 2-In.-Thick Plate				
Type of cutting tip	45(c)	54(d)	361(c)	361(c)
Cutting-oxygen orifice:				
Tip No.	4		4	4
Drill-size No.	55	54	55	55
Diameter, in.	0.052	0.055	0.052	0.052
Optimum cutting speed, ipm(e)	18	18	16.5	16.5
Fuel-gas pressure, psi	5	10	8	4.5
Fuel-gas flow, cfh	28	15	31	45
Preheat oxygen(f):				
Pressure, psi	16	30	20	25
Flow, cfh	33	46	125	80
Ratio of oxygen to fuel gas	1.2 to 1	3 to 1	4 to 1	1.8 to 1
Cutting oxygen(f):				
Pressure, psi	100	95	105	105
Flow, cfh	220	260	245	245
Time per 100 ft cut, hr	1.11	1.11	1.21	1.21
Fuel cost per 100 ft cut	\$0.78	\$0.34	\$0.09	\$0.04
Cost of preheat and cutting oxygen per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$0.51	\$0.61	\$0.81	\$0.71
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$1.40	\$1.70	\$2.24	\$1.97
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$2.81	\$3.40	\$4.48	\$3.93
Direct labor cost per 100 ft cut(g)	\$5.55	\$5.55	\$6.05	\$6.05
Total cost of gas and direct labor per 100 ft cut:				
Oxygen at \$0.18 per 100 cu ft	\$6.84	\$6.50	\$6.95	\$6.80
Oxygen at \$0.50 per 100 cu ft	\$7.73	\$7.59	\$8.38	\$8.06
Oxygen at \$1.00 per 100 cu ft	\$9.14	\$9.29	\$10.62	\$10.02

(a) Costs per 100 cu ft of bulk fuel gases were: acetylene, \$2.50 (estimated; in-plant generated); Mapp gas, \$2.03; propane, \$0.25; natural gas, \$0.07. (b) Stabilized methylacetylene-propadiene. (c) Two-piece, high-speed cutting tip. (d) Two-piece, high-speed cutting tip different in design

from tip used with the other fuel gases. (e) Optimum cutting speed was fastest speed consistent with maintaining acceptable quality without loss of cut. (f) Total oxygen required for cutting includes both preheat oxygen and cutting oxygen. (g) At \$5/hr.

Table 9(f) Dimensional Tolerances Normally Obtainable in Production Gas Cutting of Plate

Plate thickness, in.	Tolerance, in.
Up to 1/2 inclusive	± 1/16
Over 1/2 to 1 1/4	± 3/32
Over 1 1/4 to 3	± 1/8
Over 3 to 5	± 5/32
Over 5 to 6	± 3/16
Over 6 to 8	± 3/32
Over 8 to 10 inclusive	± 1/4

For machine cutting with equipment in good working condition, and with adequate control for minimizing distortion in cutting shapes and long, narrow pieces.

Table 10(f) Approximate Relations Among Metal Thickness and Cutting-Oxygen Flow Rates, Operating Pressures and Oxygen-Orifice Diameters for Cutting Heavy Steel Plate(a)

Work-metal thickness, in. for thickness range basis(b) of	80f	100f	120f	Flow rate, cfh	Cutting oxygen—Operating pressure, psi, at torch entry, for orifice diameter, in., of										
					0.147	0.1895	0.1935	0.231	0.250	0.290	0.332	0.375	0.422	0.468	
12	10	8	.....	1000	56	39	28	..	..	..	..	..	..	..	..
14 1/2	12	9 1/2	.....	1200	..	49	35	26	..	..	..	..	..	..	..
17	14	11	.....	1400	..	59	42	31	..	..	..	..	..	..	..
19	16	13	.....	1600	..	..	49	36	27	..	..	..	..	..	..
21 1/2	18	14 1/2	.....	1800	..	..	57	42	31	..	..	..	..	..	..
24	20	16	.....	2000	..	..	..	48	35	26	..	..	..	..	..
27	22	17 1/2	.....	2200	..	..	..	53	39	28	..	..	..	..	..
29	24	19	.....	2400	..	..	..	..	44	31	..	..	..	..	..
31 1/2	26	21	.....	2600	..	..	..	..	49	34	24	..	..	..	..
33 1/2	28	22 1/2	.....	2800	..	..	..	..	54	37	26	..	..	..	..
36	30	24	.....	3000	..	..	..	..	..	40	29	..	..	..	..
38 1/2	32	25 1/2	.....	3200	..	..	..	..	..	43	31	..	..	..	..
41	34	27	.....	3400	..	..	..	..	..	47	33	25	..	..	..
43	36	29	.....	3600	..	..	..	..	..	50	36	27	..	..	..
45 1/2	38	30 1/2	.....	3800	..	..	..	..	..	54	38	29	..	..	..
48	40	32	.....	4000	..	..	..	..	..	..	40	30	..	..	..
..	42	33 1/2	.....	4200	..	..	..	..	..	..	43	32	24	..	..
..	44	35	.....	4400	..	..	..	..	..	..	45	34	25	..	..
..	46	37	.....	4600	..	..	..	..	..	..	48	36	27	..	..
..	48	38 1/2	.....	4800	..	..	..	..	..	..	50	38	28	..	..
..	..	40	.....	5000	..	..	..	..	..	..	53	40	30	..	..
..	..	41 1/2	.....	5200	..	..	..	..	..	..	..	42	31	24	..
..	..	43	.....	5400	..	..	..	..	..	..	..	44	32	25	..
..	..	45	.....	5600	..	..	..	..	..	..	..	46	34	26	..
..	..	46 1/2	.....	5800	..	..	..	..	..	..	..	48	35	27	..
..	..	48	.....	6000	..	..	..	..	..	..	..	50	37	28	..

(a) Data are based on gas cutting of plate 8 to 48 in. thick at speeds of 2 to 6 in. per minute, using a straight-drilled torch tip of the type and with the dimensional relationships illustrated at right.

(b) Based on the approximate formula that oxygen flow in cubic feet per hour will range from 80 times metal thickness (80f) to 120 times metal thickness (120f) in heavy cutting. Cutting-oxygen consumption for shape cutting is generally near, or slightly above, 120f; straight-line cutting will use 80f to 100f.

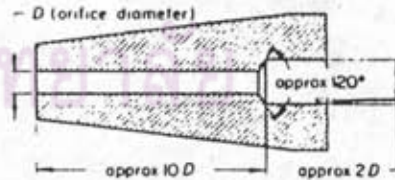
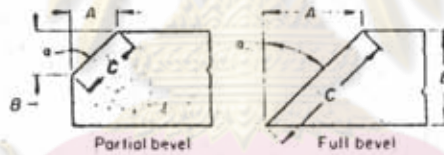


Table 11(f) Torch Settings for Various Bevels, Using Extra Preheat Tip (Bevel Adapter) in Oxy-Natural Gas Cutting (a)

Bevel dimensions, in.			Cutting oxygen orifice diam. in (b)	Pressure, psi.		Speed ipm	
A	B	C		Oxy.	Natu. gas		
Bevel Angle (α) of 45°							
1/4	1/4	3/8	.....	0.037	45	10	13
3/8	3/8	1/2	.....	0.037	45	10	13
1/2	1/2	13/16	.....	0.054	60	10	12 1/2
3/4	3/4	1 1/16	.....	0.054	60	10	11
1	1	1 1/8	.....	0.054	60	10	11
1 1/4	1 1/4	1 3/4	.....	0.055	60	10	11
1 1/2	1 1/2	2 1/8	.....	0.055	65	10	10
2	2	2 1/2	.....	0.073	70	10	9
2 1/2	2 1/2	3 1/2	.....	0.073	70	10	6 1/2
3	3	4 1/4	.....	0.073	80	10	6
Bevel Angle (α) of 30°							
5/32	1/4	5/16	.....	0.054	60	10	15
7/32	3/8	1/2	.....	0.054	60	10	14
1/4	1/2	3/4	.....	0.054	60	10	14
5/16	3/4	1 1/8	.....	0.054	60	10	14
3/8	1 1/8	1 1/4	.....	0.054	60	10	14
1/2	1 3/8	1 3/4	.....	0.054	60	10	14
5/8	1 7/8	2 1/8	.....	0.054	60	10	13
3/4	2 1/8	2 3/4	.....	0.054	60	10	13
7/8	2 3/8	3 1/4	.....	0.054	60	10	12
1	2 7/8	3 3/4	.....	0.054	80	10	11
1 1/8	3 1/8	4 1/4	.....	0.054	60	10	10 1/2
1 1/4	3 3/8	4 3/4	.....	0.055	65	10	10
1 1/2	3 7/8	5 1/4	.....	0.055	65	10	9
1 3/4	4 1/8	5 3/4	.....	0.055	70	10	9
1 7/8	4 3/8	6 1/4	.....	0.055	70	10	7
2	4 7/8	6 3/4	.....	0.073	75	10	7
2 1/4	5 1/8	7 1/4	.....	0.073	75	10	6 1/2



(a) Extra preheat tip to be set 1/4 to 3/8 in. above plate surface. For proper torch setting, adjust preheat for slight whistle, then reduce oxygen slightly. (b) Two-piece tips for high-speed machine cutting. Corresponding tip sizes of different manufacturers vary in performance because of differences in construction of torches and mixers.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การหาค่า Optimal gain

พิจารณาจาก Cost function

$$\begin{aligned}
 J = & 0.5 \langle [Z(t_f) - Y(t_f)], F_w [Z(t_f) - Y(t_f)] \rangle \\
 & + 0.5 \int_0^{t_f} \{ \langle [Z(t) - Y(t)], Q(t) [Z(t) - Y(t)] \rangle \\
 & + \langle U(t), R_w(t) U(t) \rangle \} dt \dots\dots\dots (ข1)
 \end{aligned}$$

โดยที่

- $Z(t)$ = สัญญาณเฝ้าที่พื้ที่ต้องการ
- $F_w, Q(t), R_w(t)$ = weighting factor
- $Z(t) - Y(t) = e(t)$ = ค่าความผิดพลาด

กำหนดให้

$$Z(t) = 0 \text{ และ } Y(t) = X(t) = -X''(t) = -e(t)$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J = & 0.5 \langle X(t_f), F_w X(t_f) \rangle \\
 & + 0.5 \int_0^{t_f} [\langle X(t), Q(t) X(t) \rangle + \langle U(t), R_w(t) U(t) \rangle] dt \\
 & \dots\dots\dots (ข2)
 \end{aligned}$$

จาก Hamiltonian , H จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 H = & 0.5 \langle X(t), Q(t) X(t) \rangle + 0.5 \langle U(t), R_w(t) U(t) \rangle \\
 & + \langle A(t) X(t), P(t) \rangle + \langle B(t) U(t), P(t) \rangle \dots\dots\dots (ข3)
 \end{aligned}$$

จากเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการควบคุมแบบออปติมัล

$$\frac{\partial H}{\partial U} = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial X} = \dot{P}(t) \quad \dots\dots\dots (15)$$

จะได้ว่า

$$\dot{P}(t) = -Q(t)X(t) - A^T(t)P(t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

จากสมการ (14) จะได้ว่า

$$0 = R_w(t)U(t) + B^T(t)P(t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

จากสมการ (17) จะได้ว่า

$$U(t) = -R_w^{-1}(t)B^T(t)P(t) \quad \dots\dots\dots (18)$$

จากสมการสแตท

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

แทนค่าสมการ (18) ลงในสมการ (19) จะได้

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) - B(t)R_w^{-1}(t)B^T(t)P(t) \quad \dots\dots\dots (110)$$

สมมติให้

$$P(t) = -K(t)X(t) \quad \dots\dots\dots (111)$$

$$\dot{P}(t) = -\dot{K}(t)X(t) - \dot{X}(t)K(t) \dots\dots\dots(ข12)$$

หรือจาก

$$\dot{P}(t) = -Q(t)X(t) - A^T(t)P(t) \dots\dots\dots(ข13)$$

จากสมการ (ข10)

$$\dot{X}(t) = [A(t) - D(t)K(t)]X(t) \dots\dots\dots(ข14)$$

โดยที่

$$D(t) = B(t)R_w^{-1}(t)B^T(t) \dots\dots\dots(ข15)$$

แทนค่าสมการ (ข14) ลงในสมการ (ข12) จะได้

$$\dot{P}(t) = -[\dot{K}(t) + K(t)A(t) + K(t)D(t)K(t)]X(t) \dots\dots(ข16)$$

แทนค่าสมการ (ข16) ลงในสมการ (ข6) แล้วจัดรูปใหม่ จะได้

$$\dot{K}(t) + K(t)A(t) + A^T(t)K(t) + K(t)D(t)K(t) - Q(t) = 0$$

$$\dots\dots\dots(ข17)$$

ซึ่งสมการ (ข17) นี้เรียกว่า สมการ Riccati

แต่เนื่องจากระบบนี้เป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time invariant) ดังนั้น

$$\dot{K}(t) = 0$$

จะได้ว่า

$$K(t)A(t) + A^T(t)K(t) + K(t)D(t)K(t) - Q(t) = 0 \dots\dots\dots(ข18)$$



และจาก $U(t) = K_u(t)X''(t) = -K_u(t)X(t)$

$$K_u = R_w^{-1}(t)B^T(t)K(t) \dots\dots\dots(๒19)$$

แทนค่าเมตริกในสมการ (๒18) จะได้

$$0 = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-B_v}{J_1+r_p^2M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & \frac{-B_v}{J_1+r_p^2M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{J_1+r_p^2M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{J_1+r_p^2M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(๒20)$$

เพื่อให้สะดวกในการคำนวณจะให้ $a_2 = a_3 = 0$

$$0 = \begin{bmatrix} 0 & k_1 - \frac{B_v k_2}{J_1+r_p^2M} \\ 0 & k_3 - \frac{B_v k_4}{J_1+r_p^2M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_1 - B_v k_3 & k_2 - B_v k_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{k_2}{R_w(J_1+r_p^2M)} \\ \frac{k_4}{R_w(J_1+r_p^2M)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{J_1+r_p^2M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$0 = \begin{bmatrix} -\alpha_1 + \frac{k_2 k_3}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \\ \\ k_1 - \frac{B_v k_3}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_3 k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \\ \\ k_1 - \frac{B_v k_2}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_2 k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \\ \\ k_3 - \frac{B_v k_4}{J_1 + r_p^2 M} + k_2 - \frac{B_v k_4}{J_1 + r_p^2 M} - \alpha_4 + \frac{k_4^2}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \\ \dots\dots\dots \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (ข21)$$

จากสมการที่ (ข21) เทียบสัมประสิทธิ์ จะได้

$$\frac{k_2 k_3}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} - \alpha_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (ข22)$$

$$k_1 - \frac{B_v k_2}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_2 k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (ข23)$$

$$k_1 - \frac{B_v k_3}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_3 k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (ข24)$$

$$k_3 - \frac{B_v k_4}{J_1 + r_p^2 M} + k_2 - \frac{B_v k_4}{J_1 + r_p^2 M} - \alpha_4 + \frac{k_4^2}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (ข25)$$

จากสมการที่ (ข22) ถึง สมการที่ (ข25) เมื่อแก้สมการจะได้ว่า

$$k_2 = k_3 = \sqrt{a_1 R_w} (J_1 + r_p^2 M) \dots\dots\dots (126)$$

$$k_4 = B_v R_w (J_1 + r_p^2 M) \pm (J_1 + r_p^2 M) \sqrt{(B_v R_w)^2 - R_w [2k_2 - a_4]} \dots\dots\dots (127)$$

$$k_1 = B_v \sqrt{a_1 R_w} - \frac{k_4 \sqrt{a_1 R_w}}{R_w (J_1 + r_p^2 M)} \dots\dots\dots (128)$$

จากสมการที่ (126) ถึง สมการที่ (128) จะหาค่า K_u ได้จากสมการที่ (119)

$$\begin{aligned} K_u &= R_w^{-1}(t) B^T(t) K(t) \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ J_1 + r_p^2 M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ R_w (J_1 + r_p^2 M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$K_u = \begin{bmatrix} k_3 & k_4 \\ R_w (J_1 + r_p^2 M) & R_w (J_1 + r_p^2 M) \end{bmatrix} \dots\dots (129)$$

การหาค่าเสถียรของระบบ

หาค่า characteristics equation ได้จาก สมการที่ (19) และ สมการที่ (119) ซึ่งจะได้

$$\dot{X}(t) = A X(t) - B K_u X(t) \dots\dots (130)$$

จากสมการที่ (130) take Laplace transform จะได้

$$sX(s) = (A - BK_e) X(s) \dots\dots(131)$$

$$[sI - (A - BK_e)]X(s) = 0 \dots\dots(132)$$

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า characteristics equation เป็น

$$\det [sI - (A - BK_e)] = 0 \dots\dots(133)$$

แทนค่าสมการที่ (4.15) และ สมการที่ (129) ลงในสมการที่ (133) ได้

$$s^2 + \left(\frac{B_v}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \right) s + \frac{k_3}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} = 0 \dots\dots(134)$$

ในการหาค่า poles ของระบบจะหาได้จากการหารากของ s ในสมการที่ (134) จาก

$$a s^2 + b s + c = 0 \dots\dots(135)$$

จะได้ค่า poles ของระบบเป็นดังนี้

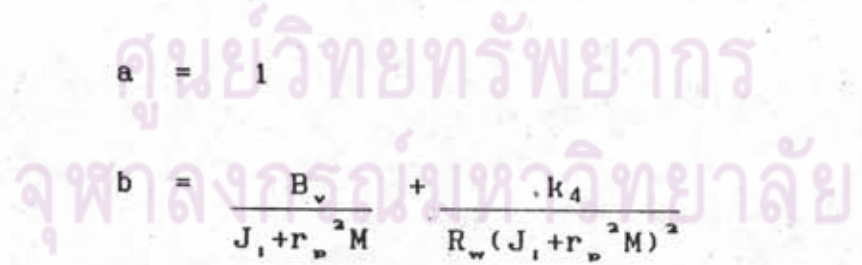
$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \dots\dots(136)$$

ซึ่ง

$$a = 1$$

$$b = \frac{B_v}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_4}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2}$$

$$c = \frac{k_3}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2}$$



การหาค่าพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง

จากสมการของระบบ 2nd order (3 : 33)

$$s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (ข37)$$

เทียบสัมประสิทธิ์จะได้ว่า

ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency : ω_n) คือ

$$\omega_n^2 = \frac{k_s}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2} \quad \dots\dots\dots (ข38)$$

ค่าอัตราหน่วงการสั่น (damping ratio , ζ) คือ

$$\zeta = \frac{\frac{B_v}{J_1 + r_p^2 M} + \frac{k_d}{R_w (J_1 + r_p^2 M)^2}}{2\omega_n} \quad \dots\dots\dots (ข39)$$

ค่าเวลาคงที่ (time constant (3 : 33) , τ) คือ

$$\tau = \frac{1}{\zeta \omega_n} \quad \dots\dots\dots (ข40)$$

ศูนย์วิทยุโทรศัทพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การจำลองแบบ

ในการศึกษาออกแบบระบบควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น จำเป็นที่จะต้องมีการจำลองแบบให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ก็เพราะว่า ในการจำลองแบบนี้ เราสามารถที่จะรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าของระบบได้ทั้งทางสถิตยศาสตร์ และทางพลศาสตร์ อีกทั้งยังรู้ถึงความเป็นไปได้ในการสร้างอุปกรณ์เหล่านั้น จึงทำให้ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายต่างๆ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model)

จากสมการทางพลศาสตร์ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ ดังสมการที่ (4.12)

$$(J_1 + r_p^2 M) \ddot{\theta} + B_v \dot{\theta} = T - \mu r_p Mg$$

เราสามารถที่จะหาค่าของ ตำแหน่ง และ ความเร็วที่เกิดขึ้นจริงได้จากสมการทางพลศาสตร์ของระบบได้ กำหนดให้

$$c_1 = J_1 + r_p^2 M \quad \dots \dots \dots (ค1)$$

$$c_2 = B_v \quad \dots \dots \dots (ค2)$$

$$c_3 = T - \mu r_p Mg \quad \dots \dots \dots (ค3)$$

จากสมการที่ (4.12) จะได้ว่า

$$c_1 \ddot{\theta} + c_2 \dot{\theta} = c_3 \quad \dots \dots \dots (ค4)$$

จากสภาวะแรกเริ่ม (Initial condition) ที่เวลา $t = 0$ จะได้ว่า

$$\theta(0) = \theta_0 \quad , \quad \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0$$

$$\int c_1 \ddot{\theta} dt + \int c_2 \dot{\theta} dt = c_3 dt$$

$$\dot{c}_1 \theta + c_2 \theta = c_3 t + c_4 \quad \dots\dots\dots (ค5)$$

จากสภาวะเริ่มแรก (Initial condition) เดิมจะได้ว่า

$$c_4 = c_1 \dot{\theta}_0 + c_2 \theta_0$$

แทนค่าในสมการ ค5 จะได้

$$c_1 \dot{\theta} + c_2 \theta = c_3 t + c_1 \dot{\theta}_0 + c_2 \theta_0 \quad \dots\dots\dots (ค6)$$

หรือ

$$c_1 \dot{\theta} + c_2 \theta - c_3 t - c_1 \dot{\theta}_0 - c_2 \theta_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (ค7)$$

ให้

$$u = c_2 \theta - c_3 t \quad \dots\dots\dots (ค8)$$

$$\frac{du}{dt} = c_2 \dot{\theta} - c_3 \quad \dots\dots\dots (ค9)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{u} + c_3}{c_2} \quad \dots\dots\dots (ค10)$$

แทนค่า $\dot{\theta}$ ลงในสมการที่ (ค7) จะได้

$$\frac{c_1}{c_2} (\dot{u} + c_3) + u - c_1 \dot{\theta}_0 - c_2 \theta_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (ค11)$$

$$c_1 \dot{u} + c_1 c_3 + c_2 u - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (ค12)$$

$$c_1 \dot{u} + c_2 u + c_3' = 0 \quad \dots\dots\dots (ค13)$$

ที่ซึ่ง

$$c_3' = c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 \quad \dots\dots\dots (ค14)$$

$$c_1 \frac{du}{dt} = -c_2 u - c_3 \quad \dots\dots\dots (ค15)$$

$$-\int \frac{c_1 du}{c_2 u + c_3} = \int dt \quad \dots\dots\dots (ค16)$$

$$\frac{c_1}{c_2} \ln |c_3 + c_2 u| = -t + c_4 \quad \dots\dots\dots (ค17)$$

แทนค่าสมการที่ (ค8) และ สมการที่ (ค14) ลงในสมการที่ (ค17)

$$\frac{c_1}{c_2} \ln |c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 + c_2^2 \theta - c_2 c_3 t| = -t + c_4 \quad \dots\dots\dots (ค18)$$

แทนค่าจากสภาวะเริ่มแรก ที่เวลา $t = 0$ ได้ว่า $\theta(0) = \theta_0$ ลงในสมการที่ (ค18)

$$\frac{c_1}{c_2} \ln |c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 + c_2^2 \theta| = c_4 \quad \dots (ค19)$$

แทนค่าสมการที่ (ค19) ลงในสมการที่ (ค18) จะได้

$$\text{ที่ซึ่ง} \quad c_{11} = c_{22} \quad \dots\dots\dots (ค20)$$

$$c_{11} = \frac{c_1}{c_2} \ln |c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 + c_2^2 \theta - c_2 c_3 t|$$

$$c_{22} = \frac{c_1}{c_2} \ln |c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 + c_2^2 \theta - t|$$

$$\ln \left| \frac{c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0 - c_2^2 \theta_0 + c_2^2 \theta - c_2 c_3 t}{c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0} \right| = -\frac{t c_2}{c_1} \quad \dots\dots\dots (ค20)$$

$$\frac{c_6 + c_2^2 \theta - c_2 c_3 t}{c_6 + c_2^2 \theta_0} = e^{-tc_2/c_1} \dots\dots\dots (ค21)$$

$$\theta = \frac{(c_6 + c_2^2 \theta_0) e^{-tc_2/c_1} + c_2 c_3 t - c_6}{c_2^2} \dots\dots\dots (ค22)$$

แทนค่าสมการที่ (ค14) ลงในสมการที่ (ค22)

$$\theta = \frac{(c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0) e^{-tc_2/c_1} + c_2 c_3 t - c_1 c_3 + c_1 c_2 \dot{\theta}_0 + c_2^2 \theta_0}{c_2^2} \dots\dots\dots (ค23)$$

จาก $x = \theta r_p$ และ $\dot{x} = \dot{\theta} r_p$

$$x = \frac{r_p}{c_2^2} [(c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{x}_0) e^{-tc_2/c_1} + c_2 c_3 t - c_1 c_3 + c_1 c_2 \dot{x}_0 + c_2^2 x_0] \dots\dots\dots (ค24)$$

จากสมการที่ (ค6) จะได้ว่า

$$\dot{\theta} = \frac{c_3 t + (c_1 \dot{\theta}_0 + c_2 \theta_0) - c_2 \theta}{c_1} \dots\dots\dots (ค25)$$

$$c_1 \dot{\theta} = \frac{c_3 t + c_1 \dot{\theta}_0 + c_2 \theta_0 - [(c_6 + c_2^2 \theta_0) e^{-tc_2/c_1} + c_2 c_3 t - c_6]}{c_2} \dots\dots\dots (ค26)$$

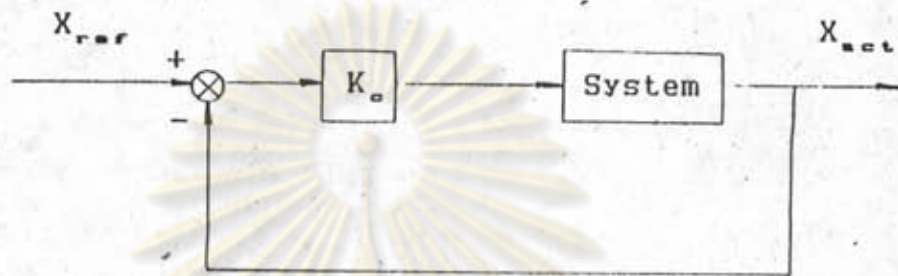
$$c_1 \dot{\theta} = c_1 \dot{\theta}_0 + c_2 \theta_0 - \frac{(c_6 + c_2^2 \theta_0) e^{-tc_2/c_1} + c_6}{c_2}$$

$$c_1 c_2 \dot{\theta} = c_1 c_2 \dot{\theta}_0 + c_2^2 \theta_0 - (c_6 + c_2^2 \theta_0) e^{-tc_2/c_1} + c_6 \dots\dots\dots (ค27)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 + \frac{(c_1 c_3 - c_1 c_2 \dot{\theta}_0)(1 - e^{-tc_2/c_1})}{c_1 c_2} \dots\dots\dots (ค28)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_o + \frac{r_p}{c_1 c_2} [(c_1 c_2 - c_1 c_2 \dot{x}_o)(1 - e^{-t c_2 / c_1})] \dots\dots (ค29)$$

เมื่อสามารถหาค่า ตำแหน่งและความเร็วที่เกิดขึ้นจริงตามสมการทางพลศาสตร์ของระบบแล้วก็จะนำค่ามาทำการจำลองแบบดังรูปที่ ค1



รูปที่ ค1 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบจากการจำลองแบบ

โดยที่สเตตเวคเตอร์ X_{ref} นี้สามารถหาได้จากเทคนิคต่างๆ เช่น การเดินเป็นเส้นตรง การเดินเป็นเส้นโค้ง เป็นต้น จากรูปที่ ค1 ถ้าเราแทนค่า x , \dot{x} ลงในสมการที่ (ค24) และ สมการที่ (ค29) แล้วนำค่าที่ได้ไปหักลบกับค่า x_{ref} , \dot{x}_{ref} แล้วป้อนกลับไปด้วยค่า K_o ก็จะได้ค่า อินพุต ตัวใหม่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งสามารถนำขั้นตอนดังกล่าวมาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ณ เวลาต่างๆกัน มาเขียนเส้นกราฟ เพื่อดูผลตอบสนองที่เกิดขึ้นว่ามีความผิดพลาดไปจาก จุดอ้างอิงต่างๆอย่างไร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ส่วนประกอบของระบบควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง

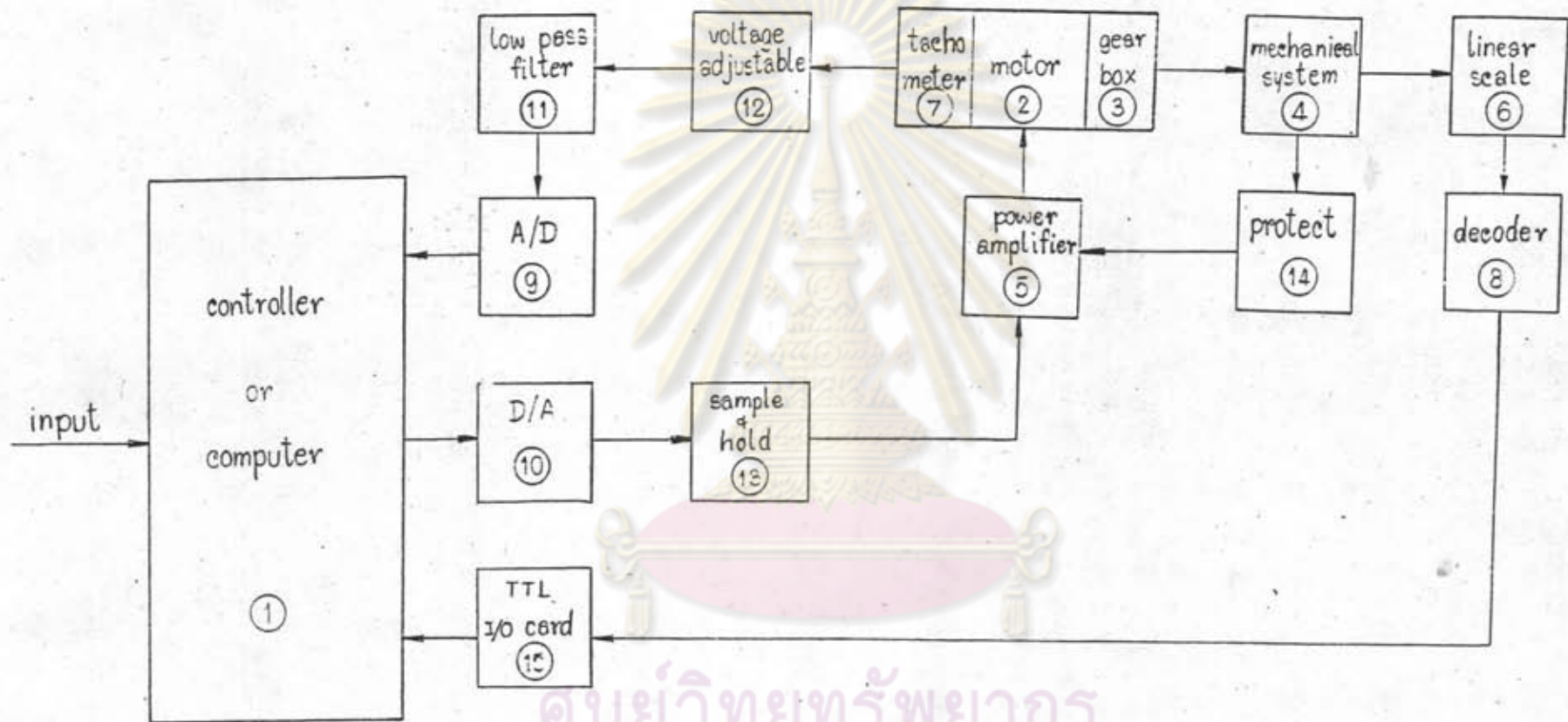
ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแสดงในรูปที่ ง1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ

- ตัวควบคุม
- วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง
- ตัวทรานซิวเซอร์
- มอเตอร์กระแสตรง และ ภาระ

พิจารณาส่วนสำคัญในระบบควบคุมทั้ง 4 และ รูปที่ ง1 จะเห็นได้ว่าในแต่ละส่วนทั้ง 4 นี้จะประกอบไปด้วยส่วนย่อยๆ อีก ดังนั้นเราจะพิจารณาชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ตามหมายเลขในรูปที่ ง1



รูปที่ ง2 แสดงชุดตัวควบคุม (controller)



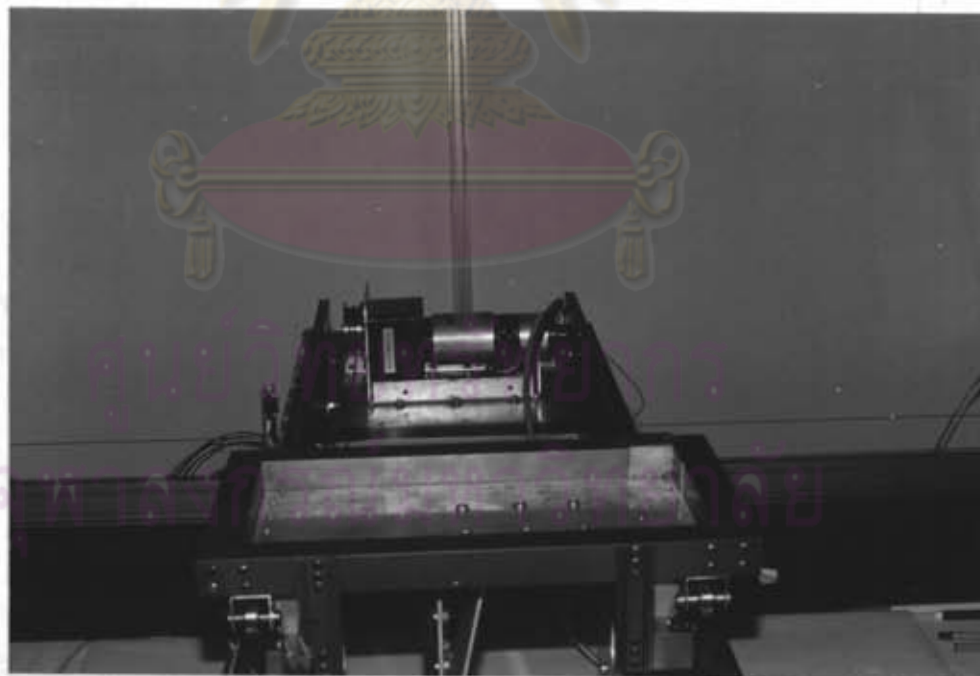
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ ง1 แสดงชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน

1. ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุมเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณควบคุม ไปบังคับมอเตอร์ และภาระ ตัวควบคุมที่ทำให้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณแอนาลอก ซึ่งส่วนนี้ในโครงการวิจัยนี้เราจะใช้คอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต มีหน่วยความจำ 640 กิโลไบต์ และมี Coprocessor (8087 ซึ่งเป็นตัวช่วยในการคำนวณ) เป็นตัวควบคุม จะใช้ซอฟต์แวร์ชุดหนึ่งเป็นตัวสั่งให้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณ และ ส่งสัญญาณออกไปควบคุมมอเตอร์โดยผ่านตัว D/A Converter และรับสัญญาณบ็อนกลับจากเอนโคดเดอร์ (Encoder) เข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง วงจรอ่านโค้ด (Decoder) และทาง I/O Card ของไมโครคอมพิวเตอร์ หรือรับสัญญาณจากทาคอไมเตอร์ เข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง A/D Converter ดังรูปที่ ๓2

2. มอเตอร์กระแสตรง (DC motor)

มอเตอร์กระแสตรงนี้เป็นส่วนต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนระบบทางกล ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงนี้จะใช้มอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Electrocraft รุ่น E586-MGHP



รูปที่ ๓๓ แสดงมอเตอร์กระแสตรง ชุดเฟืองทด ทาคอไมเตอร์

จะเป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีค่าความเหนียวนำของตัว

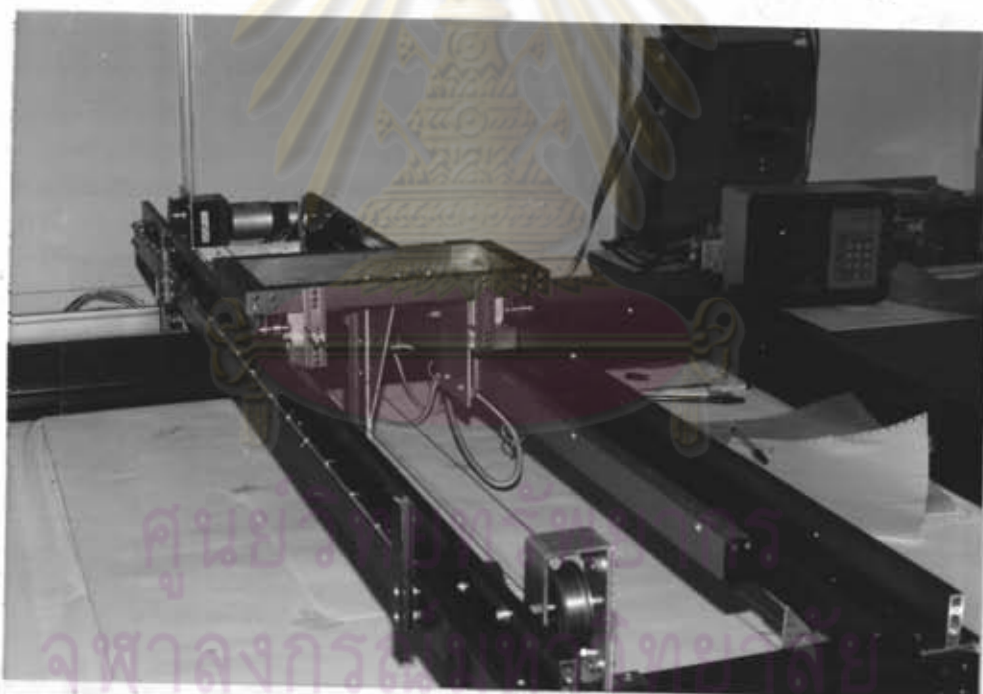
อาร์เมเจอร์และแรงเฉื่อยของตัวโรเตอร์ต่ำ และจะใช้มอเตอร์นี้ร่วมกับชุดวางจรรยา (Power Amplifier) ดังรูปที่ ง3

3. ชุดเฟืองทด (Gear Box)

เนื่องจากมอเตอร์มีความเร็วรอบในการทำงานสูง แต่ความเร็วเชิงเส้นของระบบที่ใช้ตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟนั้นมีความเร็วสูงสุด 12.5 mm/sec จึงจำเป็นต้องใช้ชุดเฟืองทอนี้มาทดรอบ เพื่อให้ได้ความเร็วอยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังรูปที่ ง3

4. ระบบงานกล (Mechanical System)

ส่วนนี้เป็นส่วนที่เคลื่อนที่พาหัวตัดก๊าซไปในระนาบเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามต้องการ ซึ่งจะมีส่วนที่เคลื่อนที่ดังกล่าวกัน 2 แนวแกน ดังรูปที่ ง4



รูปที่ ง4 แสดงระบบงานกล ชุดแอนติคัตเตอร์

5. วางจรรยาขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งต่อไปยังมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนระบบทางกล ดังรูปที่ ง5

6. เอนโค้ดเดอร์ (Encoder)

ในระบบการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ต้องใช้ เอนโค้ดเดอร์สำหรับรักษาตำแหน่ง และสร้างสัญญาณป้อนกลับโดยที่ตัวมันเองจะสร้างสัญญาณเป็นพัลส์ออกมา ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของระบบ สามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของเพลามอเตอร์ในรูปของจำนวนพัลส์ต่อเวลา ซึ่งเอนโค้ดเดอร์จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญคือ ตัวกำเนิดแสง แฉบช่อง และตัวรับรู้สัญญาณ (Sensor) ซึ่งแฉบช่องจะมีช่องเป็น 2 แนวและในแนวทั้งสองนี้จะประกอบไปด้วยช่องเล็กจำนวนมาก และเหลื่อมกันอยู่ 90 องศา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเข้ากับวงจรนับ และวงจรอ่านโค้ดเพื่อส่งต่อเข้าคอมพิวเตอร์ได้ ดังรูปที่ ๖4



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๖5 แสดงชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

7. ทาโคมิเตอร์ (Tachometer)

เป็นตัวรับรู้สัญญาณ (Transducer) ที่สามารถแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่ เป็นสัดส่วนกับขนาดของความเร็วเชิงมุม ในระบบการควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไปจะใช้ทาโคมิเตอร์เป็นตัวแสดงความเร็วเพื่ออ่านค่าความเร็วของเพลามอเตอร์ หรือเพื่อป้อนความเร็วกลับสำหรับ

การควบคุมความเร็ว หรือเพื่อให้ความเสถียรภาพของระบบดีขึ้น ดังรูปที่ ง3

8. วงจรอ่านโค้ด (Decoder)

ชุดวงจรอ่านโค้ดนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับที่ได้มาจากตัวอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ แล้วแปรความหมายออกมาเป็นระยะทาง หรือ ความเร็ว จึงส่งค่าไปประมวลผลในไมโครคอมพิวเตอร์ แล้วส่งสัญญาณควบคุมออกไป ดังรูปที่ ง6

9. A/D Converter

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้อ่านค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก (tachometer) แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ ง7



รูปที่ ง6 แสดงชุดวงจรอ่านโค้ด วงจรหน่วงสัญญาณ

10. D/A Converter

เป็นอุปกรณ์ที่จะส่งสัญญาณควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์ไปควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อน (มอเตอร์กระแสตรงและชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง) ให้เคลื่อนไปตามที่ต้องการ ดังรูปที่ ง7

11. ชุดกรองความถี่สูง (Low pass filter)

ชุดกรองความถี่สูงนี้เป็นส่วนซึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณก่อนที่จะส่งเข้าสู่ A/D ทั้งนี้เพราะค่าที่อ่านได้นั้นมีการเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน จึงจำเป็นต้องใช้วงจรนี้เพื่อช่วยลดปัญหาของสัญญาณรบกวนดังกล่าว ดังรูปที่ ง8

12. ชุดวางจลลดแรงดันไฟฟ้า (Decrease voltage)

ในการอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากทาคอไมเตอร์ซึ่งผ่านมาจากตัว A/D นั้น ๓. ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ ทาคอไมเตอร์จะสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาถึง 88.4 volts แต่เนื่องจาก A/D นี้่านค่าได้แค่ช่วง 0 - 9 volts เท่านั้น จึงต้องใช้ชุดวงจรนี้มาลดแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้สามารถส่งผ่านสัญญาณเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ได้. ดังรูปที่ ง8



รูปที่ ง7 แสดง ADDA card

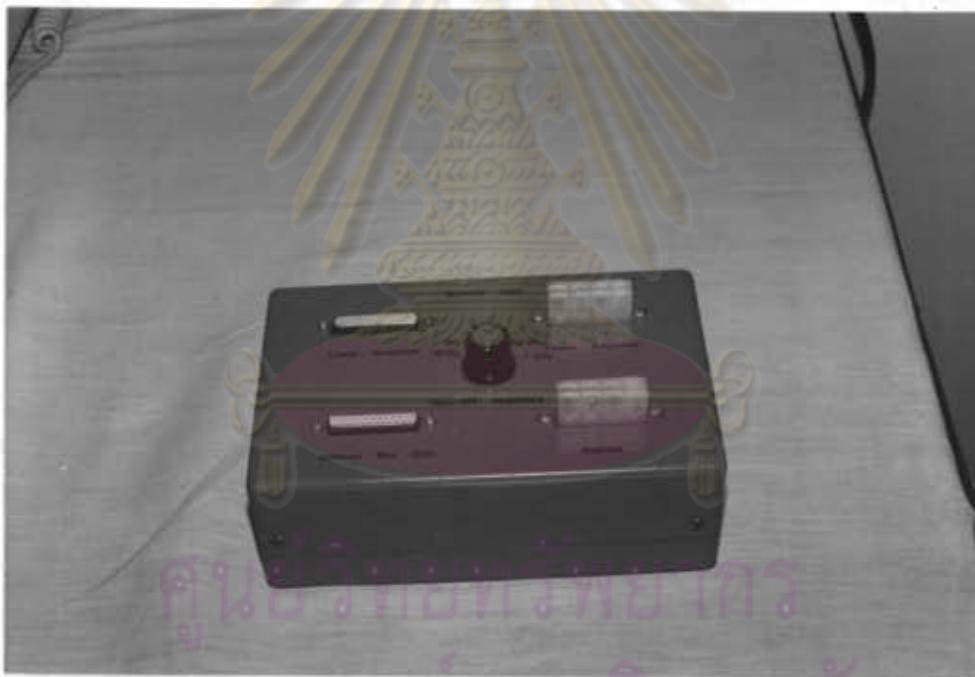
13. วงจรหน่วงสัญญาณ (Sample & hold)

เนื่องจากในระบบงานกลนี้เป็นการเคลื่อนที่ใน 2 แนวแกนตั้งฉากกัน จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (D/A) ควบคุมไปควบคุมการเคลื่อนที่ 2 ชุดด้วยกัน แต่ที่เราใช้นั้นเป็น ADDA Card ที่มี D/A เพียงชุดเดียวเท่านั้น เพื่อเป็น

การประหยัด จึงจำเป็นที่จะต้องใช้วงจรนี้โดยการให้ไมโครคอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณไปควบคุมทีละแกนแล้วนำวงสัญญาณไว้และส่งสัญญาณควบคุมไปควบคุมอีกแนวแกนหนึ่ง แล้วก็นำวงสัญญาณไว้อีก ทำสลับกันไปเช่นนี้ก็สามารถที่จะใช้ D/A เพียงชุดเดียวไปควบคุมการเคลื่อนที่ 2 แนวแกนได้ ดังรูปที่ ๖6

14. อุปกรณ์ป้องกัน (Protection)

เป็นอุปกรณ์ป้องกันการเสียหายของระบบงานกลอันเนื่องมาจากความไม่เสถียรของระบบควบคุมที่ส่งผลให้การเคลื่อนที่เกินขอบเขตของการใช้งาน โดยชุดอุปกรณ์นี้จะตัดการทำงาน (ที่ Power amplifier) ของระบบ ถ้ามีการเคลื่อนที่เกินขอบเขตที่กำหนด หรือขอบเขตการทำงานดังรูปที่ ๖9

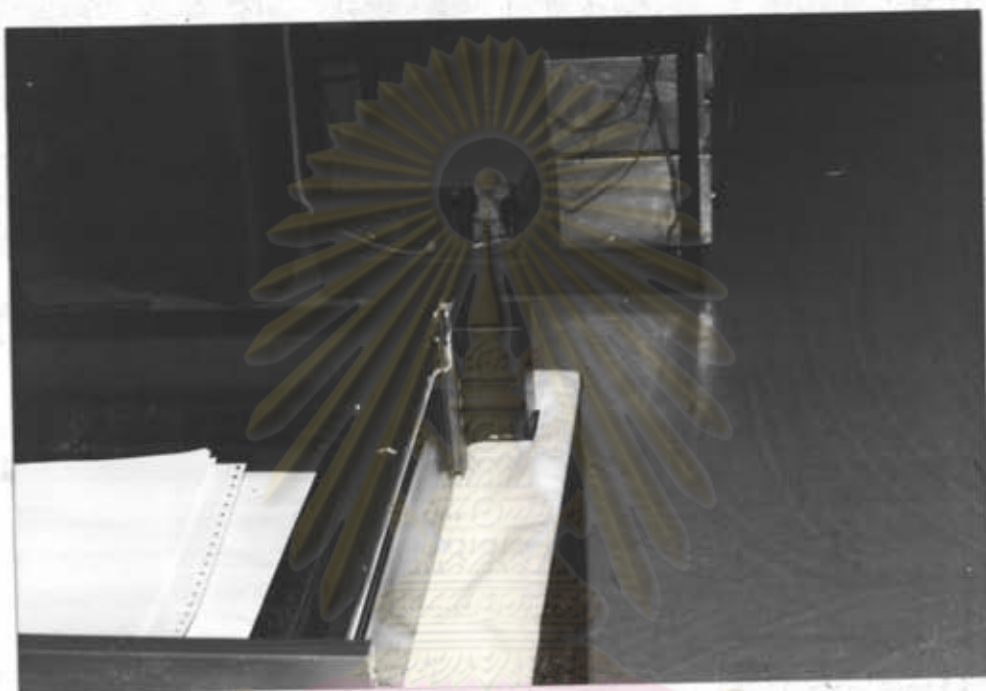


รูปที่ ๖8 แสดงชุดวงจรรองความถี่ วงจรลดแรงดัน

15. TTL I/O card

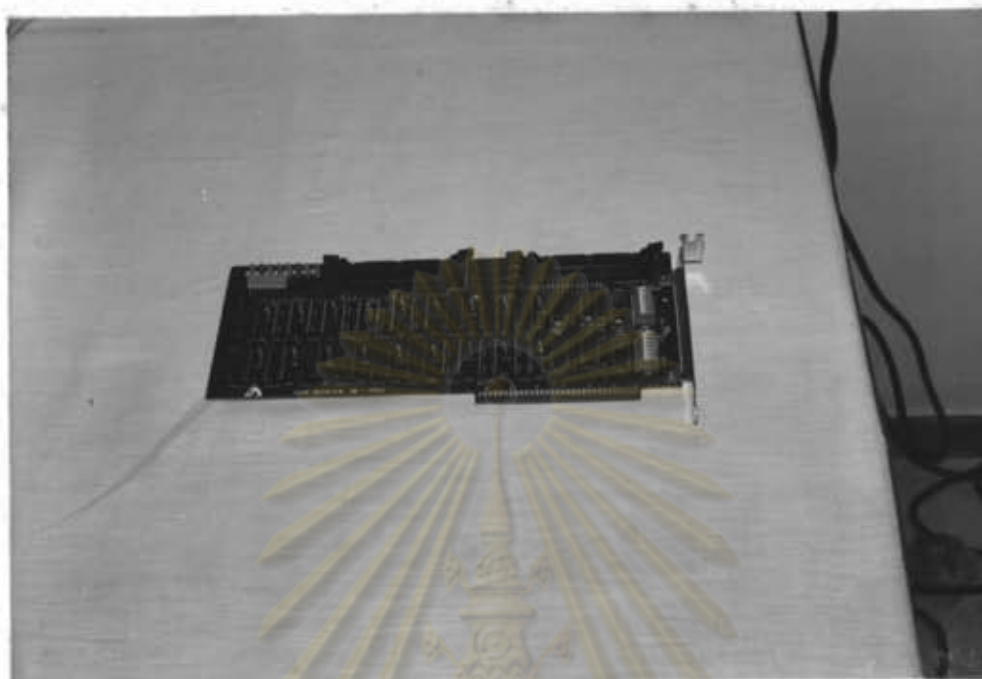
เป็นอุปกรณ์อ่านและส่งสัญญาณของไมโครคอมพิวเตอร์ แต่เนื่องจาก card นี้การอ่านและส่งสัญญาณจะใช้ address ร่วมกัน จึงทำให้การสลับอ่านเข้าและส่งออกมีแรงดันสวนทางกัน ทำให้เกิดการหักล้างกันและชิ้นส่วนอุปกรณ์ใน card จะ

เกิดความร้อนสูง เป็นเหตุให้การอ่านค่าเข้าและส่งออกไม่ถูกต้องนัก จึงจำเป็นจะต้องใช้งานในการอ่านหรือส่งสัญญาณออกเพียงอย่างเดียว ซึ่งเราจะใช้ card นี้เพื่ออ่านเข้าเท่านั้น โดยใช้อ่านตำแหน่งการเคลื่อนที่จากชุดอ่านโค๊ดอีกทีหนึ่ง ดังรูปที่ ง10



รูปที่ ง9 แสดงชุดป้องกันการเสียหาย (protection)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง10 แสดงชุด TTL I/O card

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

ข้าพเจ้านาย ทาวร วิทย์ดาวรวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน 2505 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2527 และปัจจุบันทำงานอยู่ในตำแหน่ง วิศวกร ที่บริษัท ซาดากะ (ประเทศไทย) จำกัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย