

이송 물체의 질량 측정 속도 향상

이 우 갑, 정 진 완, 김 광 표
한국표준과학연구원

ABSTRACT

This study presents an algorithm and related techniques which could satisfy the important properties of check weighers and conveyor scales. The algorithm of Recursive Least Squares Regression is applied for the weighing system simulated as a dynamic model of the second order. Using the model and the algorithm, model parameters and then the mass being weighed can be determined from the step input.

The performance of the algorithm was tested on a check weigher. Discussions were extended to the development of noise reduction techniques and to the lagged introduction of objects on the moving plate. It turns out that the algorithm shows several desirable features suitable for microcomputer assisted real-time signal processing, which are high precision and stability in noisy environment.

1. 서론

이송 물체의 질량 측정 기술을 응용하는 분야는 질량 선별기(check weigher), belt scale, can-fill weigher, hopper scale 등이 있다.[1] 이 가운데 신속한 시간과 정밀도를 최고로 요구하는 것은 질량 선별기이다. 질량 선별기는 선진국에서 1960년대 중반에 상용화되었다. 그 당시에 차동변환기(differential transformer)가 사용되어 선정된 기준값(set point)으로부터 차이를 측정하는데 이용되었다. 1980년대 초반에 로드셀이 사용되어 이송물체의 질량 측정 정확도를 높여 이송되었다. 1990년대 초반부터 이송 물체의 고정밀 측정 수요에 맞추어 전자력 저울이 소개되었다. 이 측정기들은 측정기에 가해지는 질량, 스프링 혹은 로드셀로 만들어진 감지부로부터 이루어지며 이차 동적 시스템으로 묘사될 수 있다.[2]

T. Onof[3]는 측정계의 하중에 의한 중력 방향의 변위, 속도, 가속도의 측정 값들의 조합 즉 ADV (acceleration displacement velocity), DV, V 방법을 제안하였다. 이 방법들은 측정계를 묘사하는 이차 미분 방정식의 적분해를 기초로 하여 질량을 결정한다.

재귀형 최소 자승법(Recursive Least Squares Regression Method)[4,5]은 공정 제어의 변수 결정 및 예측(system identification)에 사용되고 있다. 재귀형 최소 자승법을 이용하여 공정제어와 같은 방법으로 동적 상태의 이송 물체의 질량을 측정하고자 한다. 스프링과 댐퍼로 구성되는 질량 측정계를 모델로 하고 그의 미지수 가운데 하나는 초기에 질량을 아는 샘플로부터 교정 혹은 결정 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이송 물체 질량 측정에 응용이 되지 않았던 재귀형 최소 자승법과 지수가중함수(Exponential Weighting Function)를 활용하여 수렴이 빠르도록하고 노이즈에 안정성이 있고 이송 물체가 측정 팬 위에 소개(introduction) 지연 효과를 고려하는 측정계를 개발하고자 하였다.

2. 재귀형 최소 자승법의 이용

2.1 측정계 모델링

스프링과 댐퍼로 구성된 이차 미분식으로 표현되는 질량 측정계를 고려한다. 이 계의 동적 특성은 스프링 상수 C_0 , 댐핑 계수 C_1 , 측정계에 가해지는 동적 질량 M , 그리고 질량 M 이 놓여지기 이전에 하중 센서가 감지하는 반침대의 본래 질량 m 에 의하여 결정된다.

초기의 변위를 0으로 하고 초기에 하중 반침대의 속도가 0이라 하면 이 계를 나타내는 미분방정식은 아래와 같다.

$$Y=0 \quad \text{at } t=0$$

$$dY/dt=0 \quad \text{at } t=0$$

$$(m+M) \frac{d^2Y}{dt^2} + C_1 \frac{dY}{dt} + C_0 Y = Mg \quad (1)$$

여기서 Y 는 로드셀의 스트레인 게이지에 의해 측정 될 수 있는 변위, mm,이고 t 는 시간, s,이고 g 는 중력가속도이다.

디지털 데이터 처리를 위하여 샘플링 주기를 T 로 하는 차분식으로 나타내면 식 (1)은,

$$Y(nT) = -a_1 Y(nT-T) - a_2 Y(nT-2T) + a_3 \quad (2)$$

여기서, $a_1 = -2 \exp(-aT) \cos(bT)$, $a_2 = \exp(-2aT)$,

$$a = \frac{C_1}{2(M+m)}, \quad b^2 = \frac{C_0}{M+m} - a^2$$

T = 샘플링 주기.

$$a_3 = \frac{Mg}{C_0} (a_1 + a_2 + 1),$$

Y(nT)는 시간 nT에서의 변위,

따라서, 일련의 차분식 데이터로부터 관계계수 a_1, a_2, a_3 가 정해지면 질량 M이 결정된다.

$$M = \frac{C_0}{g} \frac{a_3}{(a_1 + a_2 + 1)} \quad (3)$$

여기서, C_0/g 는 C_0 의 장의로 부터 혹은 최종값 정리로부터 얻어질 수 있다. 즉 질량을 아는 시편을 이용하여 교정하므로써 결정될 수 있다.

매트릭스 벡터의 성질을 이용하여 정리하면 a_1, a_2, a_3 의 λ_k 에 대한 제구형 해가 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} - K_k [X_k^T \lambda_{k-1} - Y_k] \quad (4)$$

$$K_k = P_{k-1} X_k [1 + X_k^T P_{k-1} X_k]^{-1} \quad (5)$$

$$P_k = P_{k-1} - K_k X_k^T P_{k-1} \quad (6)$$

벡터 λ 와 매트릭스 P의 초기 값 λ_0, P_0 이 주어지야 한다. k가 증가함에 따라 매트릭스 P의 요소들이 지수적으로 작아지므로 106 정도의 큰 값을 갖는 요소들로 이루어진 P와 임의의 유한한 λ_0 는 수렴을 하게된다.

그리고 $[1 + X_k^T P_{k-1} X_k]$ 항이 스칼라 항으로 전환된 것으로 matrix inversion이 필요없게 되어 계산 시간을 상당히 단축시키게 된다. 이는 이송 물체의 질량 측정에 매우 적합한 결과이다.

3. 질량 선별기에의 응용

3-1. noise 제거

사용된 디지털 필터는 Butterorth 필터로 차수 N을 3으로 시도하였다.[6,7] Butterworth 필터의 전달함수 H(f)는 절단 주파수 W_c 를 포함하는 다음식으로 정리될 수있다.

$$H(f) = \frac{(1+z)^2 W_c^2}{z^2(1+W_c^2+W_c)z+(W_c^2-1)+(1+W_c^2-W_c)} \frac{(1+z) W_c}{W_c-1+z(1+W_c)} \quad (7)$$

여기서, 전달함수는 z에 대한 2차항의 전달함수와 1차항의 전달함수의 곱으로 표현되었다. 따라서 이 두 필터는 cascade 필터 즉 세리즈로 연결시키 첫번째 필터의 출력이 둘째 필터의 입력이 되게 연결시키 사용할 수 있다.

Fig. 3-1은 noise 크기 수준 0.05 즉 입력 신호의 절대값에 상대적으로 크기가 0.05되는 백색 noise가 첨가되었을 때의 필터 입력과 출력을 나타낸 것이다. 여기서 입력 신호는 모사 실험에서 사용되는 로드셀을 모형으로 한것으로 $C_0=1000$ N/mm, $C_1=30$ N/(mm/s), $M=1$ kg, $m=2$ kg을 모형으로 하여 발생된 신호이다.

필터링에 의한 시간 지연은 사용되는 W_c 에 따라 다르며 필터 효과가 좋고 지연 시간이 짧은 W_c 를 선택하는 것이 문제로 남는다. 다음의 표 3-1과 Fig. 3-2

Table 3-1. Delay effect dut to filtering

W_c	지연시간, s	$\log(W_c)$	$\log(\text{지연시간})$
0.05	0.55	-1.3	-0.26
0.10	0.23	-1.0	-0.64
0.20	0.10	-0.7	-1.00
0.40	0.06	-0.4	-1.22
0.80	0.025	-0.1	-1.60

에는 W_c 에 따른 지연 영향을 보여준다. 지연 시간은 신호가 처음으로 1.0에 이르기 까지 걸리는 시간의 입력과 출력 차이이며 시간의 단위는 Fig. 3-1의 시간값 100이 1초에 해당한다.

알고리즘의 노이즈에 대한 안정성을 시험하기 위하여 노이즈의 크기를 변화시키 보았다. 알고리즘으로 부터 얻어지는 이송 물체의 추정 질량값의 5개의 연속적인 평균 즉 5개의 이동 평균과 최신 추정값과의 차이가 0.5 %보다 작을 때 추정이 완료 되었다고 가정하여 소요되는 시간을 계산하였다.

표 3-2에는 이 소요되는 시간을 상대적 노이즈 크기 0.01, 0.05, 0.10에 대하여 그리고 절단 주파수의 변화에대한 영향을 보여준다. 표 3-2에 보인 바와 같이 노이즈 크기가 10 배로 커지는 것에 대하여 w_c 가 작은 경우는 그영향이 미소하고 w_c 가 증가함에 따라 그영향이 나타난다. 즉 노이즈 크기가 증가하면 수렴 소요 시간이 더 길어진다.

W_c 가 0.5 rad/s보다 크면 이동 평균값이 빨리 수렴하지만 수렴한 값은 최종값에서 벗어난 값을 보여주는 불안정성을 내포하고있다. W_c 가 0.2에서 0.5 rad/s일 때 3개의 노이즈 크기에 대하여 모두 안정적이고 빠른 수렴을 보여주었다.

3-2. 질량 선별기 및 A/D 변환기의 특성

본 실험에서는 질량 선별기의 하중 감지 부분인 로드셀, 물체를 이동시키는 벨트만을 이용하여 본 알고리즘을 응용하였다. 벨트는 로드셀 상단부 플레이트에 부착되어있는 벨트와 플레이트 램웨어 물체가 같은 수평 이동 속도로 진입하고 나가도록 앞 뒤의 벨트가 구동한다.

Table 3-2. Effects of noise

noise W_c	0.01	0.05	0.10
0.1	63	62	63
0.2	34	38	42
0.3	33	44	40
0.4	34	48	50
0.5	41	38	40
0.6	36	45	57
0.7	36	43	38

A/D 변환기는 12 비트, 91 k samples/sec 측정 속도를 갖는다. 벨트 이동시키는 인속 이동 장치는 Orient사 제작의 US315-402 모델 모타를 장착시키서 이송 물체 질량의 최대 용량 1.2 kg, 벨트의 질량 300 kg, 기어 드림의 질량 700이 허용되어 속도 조정이 가능하도록 하였다. 플레이트의 길이는 40 cm이며 실험은 플레이트 이동속도 48 cm/s에서 수행되었다.

장착된 로드셀은 영국 Huntleigh Technology사 제작의 용량 5 kg 모델 1011 이다.

로드셀 신호 안정화 시간은 로드셀마다 다양하다. 예로 Huntleigh Tech.사의 model 1010은 안정화 시간이 4.5 초이고 model 1011은 1 초이다.

A/D 변환기로부터 신호를 받아 이 신호를 필터 처리하고 본 연구를 통하여 개발된 Recursive Least Squares Regression 알고리즘을 구동시키기 위하여 PC가 사용되었다. 사용된 PC는 Intel 486 sx 33 MHz의 CPU를 내장한 것이다.

Fig. 3-3에는 본 실험에 사용된 장치들을 보여주는 사진이다. PC 뒤편에 A/D 변환기가 보여지고 그 인 쪽에 질량 선별기가 보여진다. 벨트 플레이트 위에 이송 물체 시료로 사용된 내부에 금속이 들어있는 종이 박스가 보인다. 선별기의 뒤편에 보이는 것은 물체의 투입으로 인한 플레이트의 변위의 변화를 측정하는데 사용되는 로드셀의 스트레인 게이지의 출력의 직선성 점검 및 더욱 정확하고 빠른 변위 데이터를 제공하는 레이저 변위 측정기가 보여진다.

3-3. 실험 결과

물체 특성을 측정하기 이전에 정지 상태의 일반적인 지울 특성이 시험되었다. 이들은 내귀 오차, 직선성, 정밀도, 감지도의 시험이다. 로드셀 출력 및 A/D 변환기의 변환 상한값인 8.75 Volts를 고려하여 최대 질량 875 g을 시편 질량으로 사용하였다. 플레이트 위에 시편을 올려 놓지 아니하였을 때 지시값이 6.972656이었으며 시편을 올려 놓았을 때 지시값이 8.745117로 변화하였으며 이를 10회 반복하였을 때 똑 같은 값을 지시하였다. 지시값이 변하는 최소 질량 즉 감지도는 (1.8 g) / (4.9 x 10⁻³ 지시값 volts) 이다.

내귀 오차 시험을 하기 위하여 시편을 네 귀퉁이에 놓았을 때 지시값의 변화를 검사하였다. 이들의 위치는 중앙, 앞 오른쪽(전우), 앞 왼쪽(전좌), 뒤 오른쪽(후우), 뒤 왼쪽(후좌)이다. 이 위치에서의 측정 지시값은 다음의 표에 보여진대로 한 눈금 값안에 들었다.

Table 3-3. Test of 4 corner error

중앙	전우	전좌	후우	후좌
8.745117	8.75	8.75	8.745117	8.745117
8.75	8.745117	8.745117	8.75	8.75
8.745117	8.745117	8.745117	8.745117	8.75
8.745117	8.745117	8.745117	8.75	8.745117

직선성을 시험하기 위하여 플레이트 중앙에 분동을 0 g, 200 g, 400 g, 600 g, 800 g 씩 올려 놓으면서 이들의 지시값이 직선적으로 증가하는지 보았다. 즉 질량 증가에 대한 지시값의 증가, dV/dm,의 변화가 있는지 검사되었다. dV/dm은 상대 오차로 매우 작은 1/10,000 수준이다. 분동은 증가시키면서 올려진 것이며 역으로 감소시키면서 관찰할 때 히스테리시스는 나타나지 않았다.

개발된 알고리즘[8]의 응용을 위하여 사용된 시편은 금속을 천으로 감고 작은 종이 박스에 넣고 빈 공간을 종이와 스티로폼으로 채웠다. 외형은 직육면체로 치수는 8.5 x 8.5 x 10.0 cm³이다. 플레이트와 접촉은 8.5 x 8.5 평면이며 플레이트의 이동 방향과 항상 같은 방향으로 진행하도록 하였다. 즉 플레이트와 시편이 되도록이면 같은 조건에서 충돌하도록 하였다.

정지 상태에서의 반복도가 시험되었고 이어서 동적인 상태에서 반복도가 시험되었다. 우선 플레이트가 움직이지 않는 상태에서 시편을 약 1 cm 높이에서 손으로 잡고 있던 시편을 놓아 자유낙하시키기 이의 신호를 관찰하였다. 이 때 로드셀의 출력 신호와 이를 처리한 알고리즘의 출력이 Fig. 3-4에 3번의 측정에 대하여 보여진다. 로드셀 출력신호는 거의 한선에 초가질 수 있도록 거의 동일함을 보여준다. 그리고 알고리즘의 초기 출력은 즉 시간 100 이전에는 판이하게 틀린 값을 나타내다가 시간 150을 넘으면서 수렴함을 보여준다.

펜 펠트를 구동시키면서 알고리즘을 이용하여 측정하였다. 4 회 측정된 데이터가 Fig. 3-5에 그려져있다. 알고리즘은 만족스러운 출력을 제공하였다. 앞 그림 즉 플레이트를 고정시켰을 때에 비하여 수렴 시간이 결코 더 길리지 아니하였다. 이는 손으로 자유 낙하시키는 것보다 안내 플레이트(guideline plate)에서 동속도 운동을 하다가 투입되는 것이 더 일관성이 있고 안정적인 것으로 간주된다.

플레이트 가동 조건에서 수렴시간을 측정하였다. 기준은 9 개의 날개 측정값의 연속적인 평균 즉 9 개의 이동평균 값의 상대 차이가 0.0001 보다 작으면 수렴한 것으로 가정하여 측정하였다. 결과는 Fig. 3-6에 보여진다. 5 회의 측정이 이루어졌다. Fig. 3-6에 수렴 시간이 data no. 단위로 표시되어있다. 수렴기준을 더욱 정밀하게 함으로써 최종 수렴값에 가깝게 할 수 있음은 물론이다.

같은 수렴 수준에서 이동평균값의 차이는 측정되는 시편과 플레이트와의 충돌시 역학 특성의 차이에 기인하는 것으로 믿어진다. 본 알고리즘에서 로드셀만 스프링과 댐퍼로 구성되어 있고 시편 물체는 단단한 물체로 가정하였다. 시편은 금속을 천으로 싸고 종이로 싸운 직육면체 모형으로 스프링과 댐퍼의

요소를 갖고 있으며 만나다 또는 한 민의 위치에 따라 그 차이가 있다. 이러한 샘플을 측정하는 것을 더욱 연구하여 수렴 값을 더욱 일찌기 추정하는 방법을 찾을 수 있을 것이다.

4. Lagged Introduction 응용

4-1. 수학적 모델링

Input이 수학적으로 표현이 제일 쉬운 step input 보다 실제적으로 현실에 가깝고 더우기 충전기 등과 같은 경우에는 이 표현이 적합한 경우를 수학적으로 묘사하고자한다. 이로 부터 가속 추산 알고리즘을 개발한다. 질량 M에 의한 중력 힘이 지연 소개될 때, 시간에 대한 소개되는 input 힘 F(t)의 변화를 ramp function과 step function과의 결합으로 Fig. 4-1에서와 같이 표시할 수있다.

(가 3T 이상일 때

$$X(nT) = -(a_1 - 1)X(nT - T) - (a_2 - a_1)X(nT - 2T) + a_2X(nT - 3T) + Mg/(C_0g_0) (A_1 + A_2 + A_3) \quad (8)$$

여기서 Recursive Least Squares Regression[9]으로부터 변수 값 4개가 결정되면 Mg/(C₀g₀)가 정해진다. C₀가 고정으로 부터 알 수 있으므로 Mg/g₀를 결정 할 수있다.

X(t)의 해는 다음과 같다.

$$X(t) = Mg/(C_0g_0) [-2aB + t + 2aB \exp(-at) \cos(bt) + (2a^2B - D) \exp(-at) \sin(bt)/b] \quad (9)$$

4-2. 실험적 결과

로드셀에서 감지하는 질량이 순간적이지 못하고 지연되는 경우 즉 수학적으로 ramp function 일 때를 고려하기 위하여 물체의 형상이 직육면체인 물체를 측정에 활용하였다. 물체의 치수는 16 x 8 x 5 입방 cm이고 내부는 금속 조각, 종이, 스티로폼로 외부는 두꺼운 종이 박스로 쌓여졌다. 물체의 질량은 870 g 이다.

ramp function input을 모사하기 위하여 16 x 8의 면을 질량 선별기의 이동 방향에 대하여 긴 쪽으로 명명하게 투입시켰으며, 결과를 비교하기 위하여 16 x 8의 면을 앞시의 것에 대하여 수직적인 방향으로 투입시키 step function을 모사하도록 하였다. 선별기 플레이트의 진행방향 길이는 39 cm 이고 사용 한 이동 속도는 45 cm/s 이다.

Fig. 4-3에 step input을 모사한 결과가 보여진다. 이 경우에 투입시 지연되는 길이가 16 x 8 민의 8 cm 로 회전 플레이트의 길이 39 cm의 약 20 %로 그림에서 횡축 시간 단위 100에서 계산이 수렴 값으로 진입함을 보여준다. 사용된 알고리즘은 step input 용의 것을 적용시켜 보았다.

Fig. 4-4에 보여진 것은 ramp function을 모사하는 것으로 투입 길이가 16 x 8 민의 16 cm로 앞의 경우에 비하여 두 배로 길어진다. 투입 시간의 대부분에 있어서 응용 알고리즘이 ramp function을 기초로 한 것이 아니기 때문에 근사치도 제공하지 못한다.

두 그림 모두 시간단위 450 이상에서는 물체가 플레이트를 이탈하기 때문에 질량이 감소함을 보여준다

5. 결론

1. 이송물체의 질량이 재귀형 최소승법(recursive least squares regression method)을 일차년도에 개발하였고 이차년도에 데이터 로깅 장치, 민위 측정 장치 (laser displacement measurer), 질량 선별기와 연결되어 삼차년도에 노이즈제거 기술, 펠트 처리 기술, 투입 지연 효과 고려 기술과 결합하여 실험적으로 종래의 측정기보다 3배이상의 속도를 제

공함을 보였다.

2. 재귀형 최소자승법의 신속한 수렴에 exponential weighting function이 적합하게 활용됨이 입증되었다.

3. Butterworth 필터가 사용되어 백색 노이즈의 상대 최대 진폭이 신호의 0.05 보다 작은 경우에 빠르고 안정적인 노이즈 감쇄 효과를 보여주었다.

4. 투입 지연 효과가 큰 증진기동에 사용될 수 있는 기술이 연구되어 추후 관련 연구를 수행할 기초 자료를 제공하였다.

참고문헌

- [1] Intralox,; Conveyor Belt Engineering Manual, Intralox Inc., 201 Lairam Lane, Harahan, LA 70123.
- [2] Masao, Osawa, New Technology in Weight Control with Checkweighers and Automatic Combination Weighers, 91' Advanced Techniques in Automization, (Korean), Seoul,1991.
- [3] Colett, C.V., Hope, A.D.; Engineering Measurements, 2nd. ed.; Pitman Publishing Inc., Massachusetts, 1983.
- [4] Ono,T, "Dynamic Weighing of Mass", Instrumentation and Automation, vol. 12, no. 2, 235(1984).
- [5] Franklin, G.F, Powell, J.David; Digital Control of Dynamic Systems; Addison-Wesley Pub. Co., London, 1980, pp207.
- [6] Hamming, R.W.; Digital Filters, 3rd. ed., Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- [7] Parks,T.W., Burrus,C.S.; Digital Filter Design, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [8] Lee, W.G. et al., Dynamic Weighing Using Recursive Least Squares Regression Algorithm, Patent Submt. No. 102738/1992, Japan.
- [9] Yong, P., Recursive Estimation and Time Series Analysis, Spring-Verlag, Tokyo, 1984.

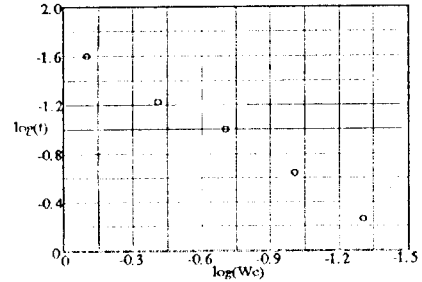


Fig. 3.2 Effects of W on lag time t



Fig. 3.3 Photograph of the experimental apparatus

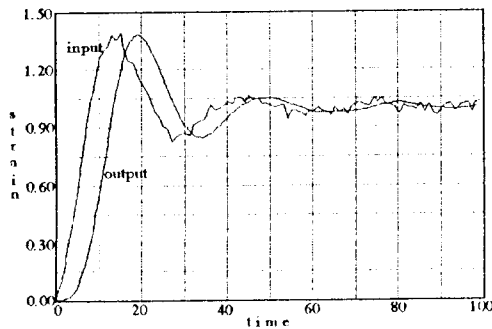


Fig. 3.4 Input and output of employed filter

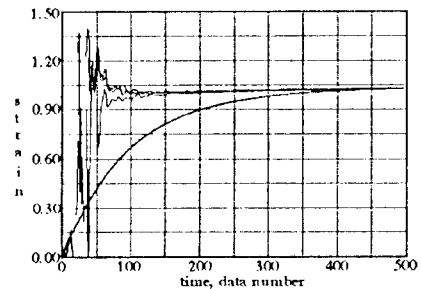


Fig. 3.4 Precision test of measurement with stationary belt plate

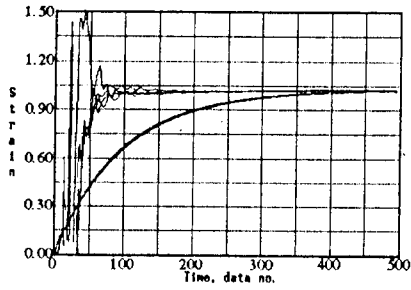


Fig. 3-5 Precision test of measurement with moving belt plate

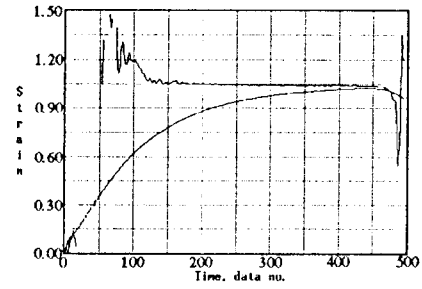


Fig. 4-3 Results of 'near step input'

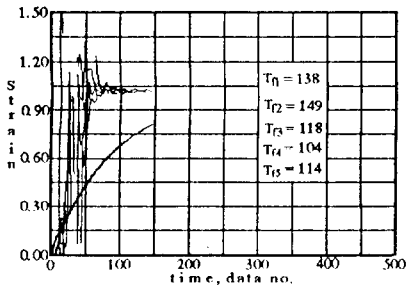


Fig. 3-6 Repeatability of convergence time

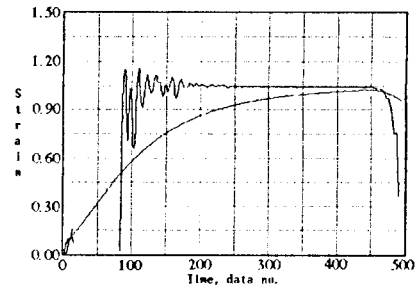


Fig. 4-4 Results of 'ramp input'

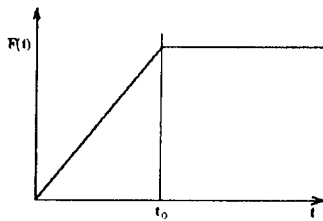


Fig. 4-1 Modelling with a ramp function