

초고속열차용 축소모델 선형동기전동기의 개념 및 기본설계 연구

A Study on a Concept and Basic Design of a Small-Scaled LSM for Ultra-High Speed Railway Transit

박찬배* 이형우** 이병송** 박현준**
Chan-Bae Park Hyung-Woo Lee Byung-Song Lee Hyun-June Park

ABSTRACT

The viscosity drive method by the wheel which is widely used in the conventional railway systems needs a large friction force between the wheel and the guide-rail, which brings on a thrust force for a quick acceleration and a high-speed travelling. In addition, the viscosity drive method needs an increase of the vehicle weight for a large friction force. However, a maglev train is possible to be driven by the electro-magnet instead of the wheel, which produces a levitation and thrust force without any contact. In general, low-speed maglev train uses a linear induction motor(LIM) for propulsion that is operated under 300[km/h] due to the power-collecting and end-effect problems of LIM. In case of high-speed maglev train, a linear synchronous motor(LSM) is more suitable than LIM because of a high-efficiency and high-output properties. LSM has a driving principle as same as a conventional rotary synchronous motor(RSM), and the torque of RSM becomes the thrust force of LSM. A conventional LSM has relatively large air-gap compared with a conventional RSM. So, it must be achieved a design that is considered normal force by finite-asymmetric structure, end-effect on the entry and exit part, and support structure of a moving part. Therefore, in this research, authors accomplish a conceptualizing and basic design of a small-scaled LSM, and characteristics analysis using FEM.

1. 서 론

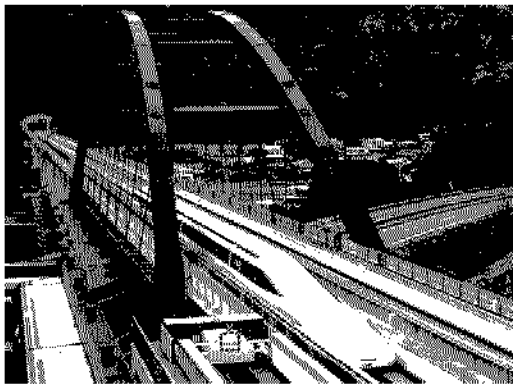
인구의 증가와 생활영역의 확대, 고유가 등에 따라 대중교통의 혁신적인 수단에 대한 요구가 증가되어 왔으며, 차세대 교통시스템은 고속, 내구성, 안전성등과 같은 여러 요구사항을 만족하여야 한다. 또한 편리하고 환경 친화적이며 유지보수가 간단하고 경량화 되어야 대량 운송수단으로서 적합하다. 자기부상열차는 이러한 요구조건을 만족하는 가장 적합한 시스템 중 하나로 부각되고 있다. 기존 철도시스템에서 널리 사용되고 있는 차륜에 의한 점착구동방식은 급가속 및 고속주행을 위한 추진력을 얻기 위해 바퀴와 선로사이의 커다란 마찰력을 필요로 하며, 마찰력의 증대를 위하여 차량의 무게를 증대시켜야 한다. 이에 반해, 자기부상철도는 전자석을 이용하여 바퀴를 대체하고 안내 선로에서 부상하여 어떠한 접촉도 없이 전자기적으로 추진력을 발생한다[4].

* 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 정희원
E-mail : cbpark@krri.re.kr
TEL : (031)460-5427 FAX : (031)460-5299

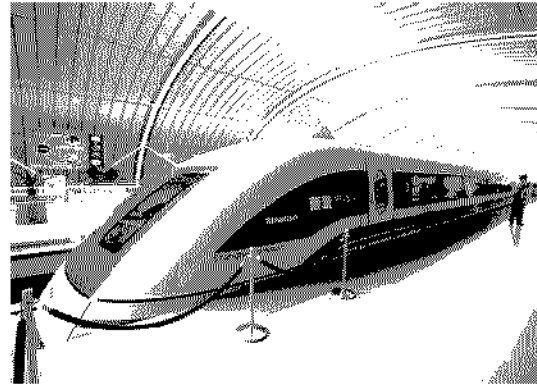
** 한국철도기술연구원, 정희원

자기부상열차는 1960년대부터 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의 시험이 이루어졌다. 독일의 Transrapid는 2003년 12월, 중국 상하이에 상용노선을 건설하여 세계 유일의 상용시스템이 되었으며, 몇몇 프로젝트들(일본, 독일, 미국 등)이 정부승인을 기다리고 있다[3]. 그림 1은 LSM 추진을 적용하여 이미 개발이 완료된 일본과 중국의 초고속 자기부상열차를 보여준다.

일반적으로 중저속 자기부상철도의 경우, 추진용으로 선형유도전동기를 사용하고 있으나, 집전장치의 어려움 및 단부효과 등으로 인하여 약 300[km/h] 이하에서 사용되고 있다. 초고속 자기부상철도의 경우, 선형유도전동기보다 고효율, 고풍력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 더 적합하다[1],[2]. 선형동기전동기는 기존의 회전형 동기전동기와 동일한 구동 원리를 가지며, 회전형 모터에서의 토크가 선형전동기에서는 추력이 된다. 선형동기전동기는 회전형 동기전동기와 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 비대칭 구조로 나타나게 된 수직력과 입구단, 출구단으로 야기되는 단부효과 및 이동자의 지지구조 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 700[km/h]급 초고속열차용 선형동기전동기 연구에 앞서서, 축소형 선형동기전동기의 개념 정립 및 수학적 방법에 의한 기본설계를 수행하였으며, 설계된 모델을 FEM 해석을 통하여 기본적인 전자기적 특성분석 연구를 수행하였다.



(a) 일본의 초전도반발식 자기부상열차



(b) 독일의 상전도흡인식 자기부상열차

그림 1. LSM 추진을 적용한 초고속 자기부상열차

2. 축소형 LSM의 수학적 기본 설계

LSM은 일반적인 회전형 동기전동기와 다르게 설계 시 (1)선형으로 변환되면서 생기게 된 비대칭으로 나타나게 된 수직력, (2)입구단과 출구단으로 야기되는 단부효과, (3)이동자의 지지구조 등을 고려해야 한다. 본 연구에서는 영구자석 및 전기자 권선 코일의 설계 등에서 그동안 행했던 연구들과 여러 설계를 통해 축적해 놓은 설계 경험들을 기반으로 하여 자기회로 설계법과 같은 근사 설계법을 이용하여 설계를 수행하였다.

일반적으로 자기부상 추진시스템용 LSM 설계 시 LSM의 기동전인력 및 그에 상응하는 용량을 산정해야 한다. 본 연구에서는 자기부상용 LSM의 기동전인력 계산 시 LSM의 Drag force에 의한 저항력을 추가로 고려하였다. 식(2)~(5)에서 보는 바와 같이 Drag force에 의한 저항력은 Aerodynamic drag force, Magnetic drag force, Linear generation drag force로 구분할 수 있다[5].

$$F_{Traction} = F_{Accel} + F_{Drag} \quad (1)$$

$$F_{Drag} = F_A + F_M + F_{LG} \quad (2)$$

$$F_A = 2.8 \times v^2 \times (0.265 \times n + 0.3) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$F_M = n \times (0.1 \times \sqrt{v} + 0.02 \times v^{0.7}) \quad (4)$$

$$F_B = 0 \quad (0 \sim 20 \text{ km/h})$$

$$= n \times 7.3 \quad (20 \sim 70 \text{ km/h})$$

$$= n \times (146/v - 0.2) \quad (70 \sim 500 \text{ km/h}) \quad (5)$$

여기서 FAccel는 기동전인력, FDrag는 Drag force에 의한 저항력, FTraction은 최종 기동전인력, FA는 Aerodynamic drag force, FM은 Magnetic drag force, FLG는 Linear generation drag force, v는 속도 [m/sec], n은 Train 당 Vehicle 수를 나타낸다. 그림 2는 축소형 LSM 시제품 개발을 위한 설계 개념도를 보여준다. 그림 2에서 보듯이, 차량에 Moving Magnet 타입의 LSM이 2대 장착된다. 그림 3은 축소형 LSM의 운행 시 속도 곡선을 보여준다. 설계된 LSM의 가속도는 1[m/s²]이며, 정격추진력은 275[N], 이에 따른 용량은 500[W]로 선정하였다. 또한 LSM 설계 시 전기장하에 대한 자기장하 비(장하비)의 적절한 선택에 따라서 기기의 특성이 결정된다. 그림 4에서 보는 바와 같이, LSM의 장하비가 커짐에 따라 Coil의 중량이 감소하는 반면 Magnet의 중량이 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 의한 LSM은 Moving Magnet 타입이므로 이동자의 중량 저감을 위해서 장하비를 50으로 선택하였다. 식 (6), (7)은 본 설계에서 사용된 장하비와 장하비에 의한 1극의 유효자속 계산식을 보여준다. 도표 1은 본 연구에 의한 축소형 LSM의 설계사양을 보여준다.

$$M = \frac{p}{2} \frac{\phi_g}{Nmi} \times 10^8 \quad (6)$$

$$\phi_g = \sqrt{\frac{4\tau \cdot M \cdot P_{rated}}{\zeta \cdot v \cdot \sqrt{2} \pi \cdot p \cdot \eta \cdot \cos\psi \times 10^8}} \text{ [Wb]} \quad (7)$$

여기서 M은 장하비, p는 극수, ϕ_g 는 1극의 유효자속, N은 상당 직렬턴수, m은 상수, i는 상전류, τ 는 극피치, ζ 는 전압비, η 는 효율을 나타낸다.

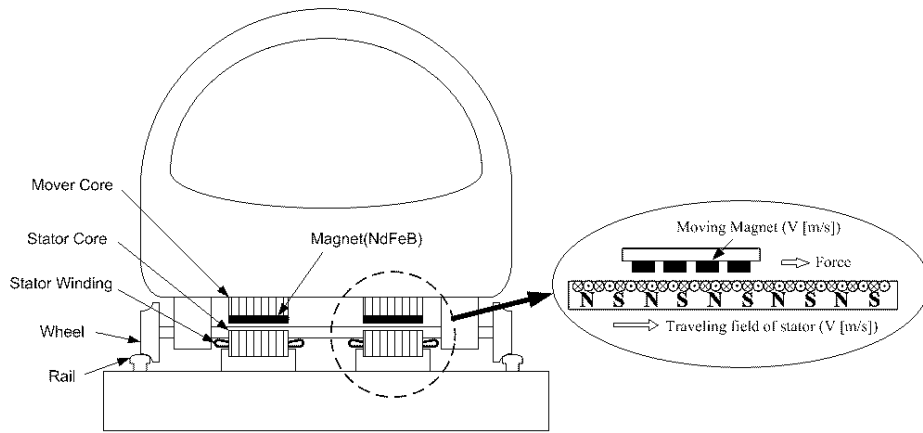


그림 2. 축소형 LSM 시제품 개발을 위한 설계 개념도

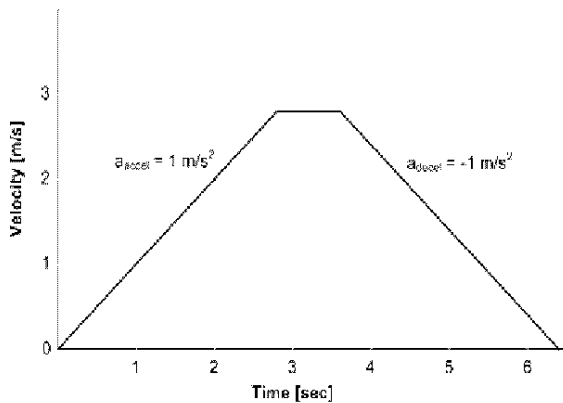


그림 3. 축소형 LSM의 속도 곡선

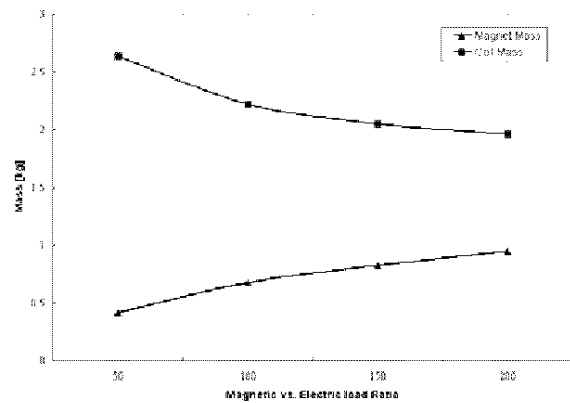


그림 4. 장하비에 따른 LSM의 Magnet, Coil

중량 변화 비교

도표 1. 축소형 LSM 설계 사양

항 목		결과값	
정격 출력 / 최대 출력		500 / 1,000 [W]	
최대 추력		275 [N]	
주파수		27.23 [Hz]	
입력 선간전압 / 입력 전류		157 [V] / 4.1 [A]	
공극		5 [mm]	
극 수 / 극 간격		4 [개] / 51 [mm]	
주행체 길이		500 [mm]	
이동자	요크	길이/폭/높이	204 x 94 x 16 [mm]
		무게	2.4 [kg]
	영구자석	크기	36(<i>l</i>)×78(<i>w</i>)×5(<i>h</i>) [mm]
		잔류자속밀도	1.23 [T]
		재질	NdFeB
		무게	0.393 [kg]
고정자	매극매상 슬롯수		1
	코일당 턴수		167 [turn]
	요크 두께 / 치 폭		16 [mm] / 8 [mm]
	슬롯 폭 / 깊이		9 [mm] / 50 [mm]

3. 축소형 LSM의 해석적 방법에 의한 특성 분석

축소형 LSM의 해석적 방법에 의한 특성 분석을 위하여 상용 전자기해석 Tool(Maxwell 2D)을 이용하였다. 그림 5는 축소형 LSM의 해석모델을 보여준다. LSM 모델의 Winding은 Full pitch, 1 Layer 이며, 매극매상슬롯수는 1이다. 해석모델의 소스는 전류원으로 수행하였으며, 최대출력 발생영역에서의 LSM의 전자기적 특성을 분석하였다. 일반적으로 회전형 SPMSM(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)의 경우 공극이 상대적으로 작기 때문에 회전자 위치 무관하게 자기저항이 일정하여 영구자석의 전기자 쇄교자속이 최대인 영구자석의 극 중심을 최대토크 발생을 위한 부하각으로 설정하나, 본 연구에서 수행중인 축소형 LSM의 경우 공극이 상대적으로 크기 때문에, 이에 따른 톨턴스 토크성분을 고려하여 부하각 80[°]지점을 최대토크 발생 지점으로 선정하였다. 그림 6은 축소형 LSM 모델의 무부하 상역기전력 특성을 보여준다. 그림 6에서 보는바와 같이 상대적으로 큰 공극에 의해 상역기전력 파형의 중심부가 함몰되는 특성을 볼 수 있으며, 무부하 상역기전력(V_{bemf})은 58.4 [V_{rms}]이다. 그림 7은 축소형 LSM에서의 자속선 분포도 및 자속밀도의 분포도를 보여준다. 그림 7 (b)에서 보는 바와 같이, 최대출력 발생영역에서의 운전 중 자속포화 현상이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그림 8은 축소형 LSM의 Tangential force 및 Normal force 특성을 보여주며, Tangential force($F_{tangen.}$)는 266 [N], Normal force($F_{norm.}$)는 1,122 [N]이다. 그림 9는 축소형 LSM의 Detent force 특성을 보여주며, Detent force(F_{detent})는 31.6 [Np.top.]이다. 본 연구의 축소형 LSM의 각 특성파라미터 해석 결과의 정량적 수치를 도표 2에 정리하였다. 해석적 방법에 의한 LSM의 특성 분석 결과 수학적 방법에 의한 설계모델의 추력값과 5 [%]이내의 오차를 보임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

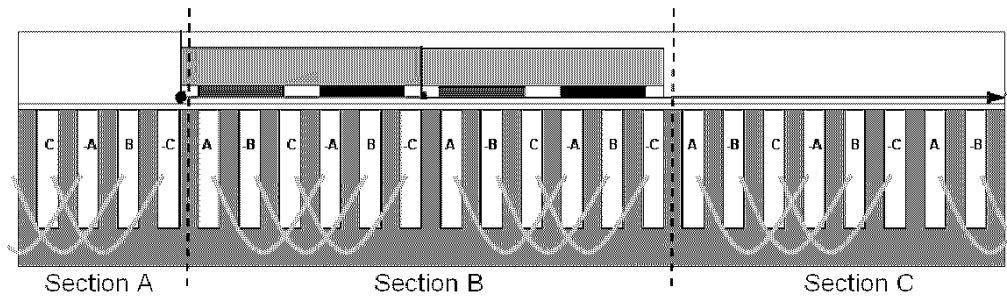


그림 5. 축소형 LSM의 해석 모델

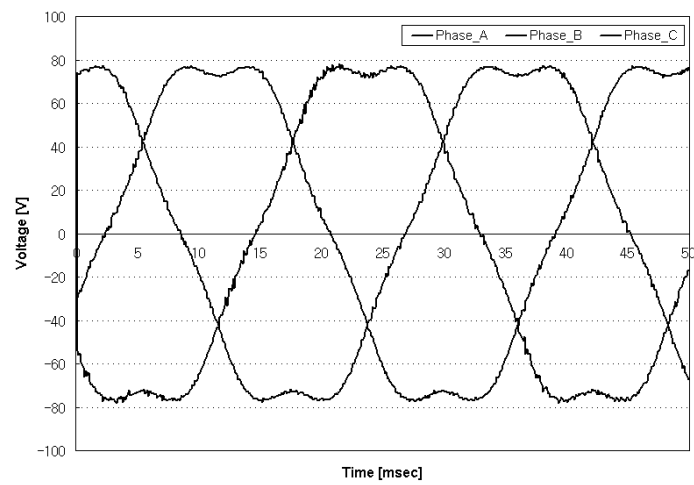
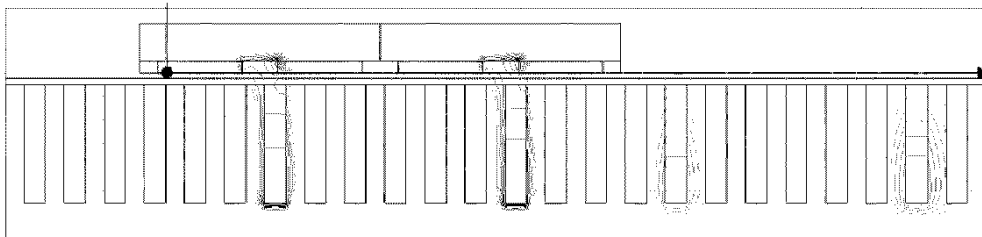
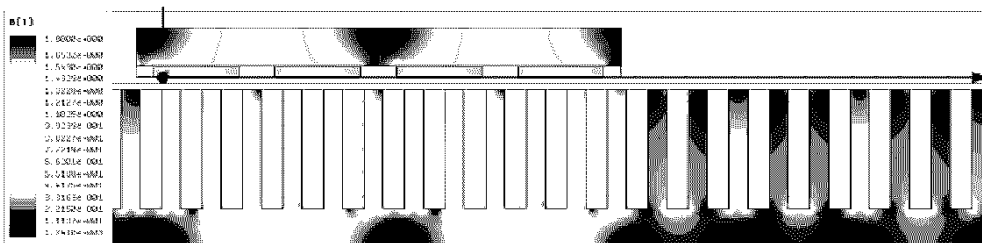


그림 6. 축소형 LSM의 무부하 상역기전력 특성



(a) 축소형 LSM의 자속선 분포도



(b) 축소형 LSM의 자속밀도 분포도

그림 7. 축소형 LSM의 코어에서의 자속선 및 자속밀도 분포도

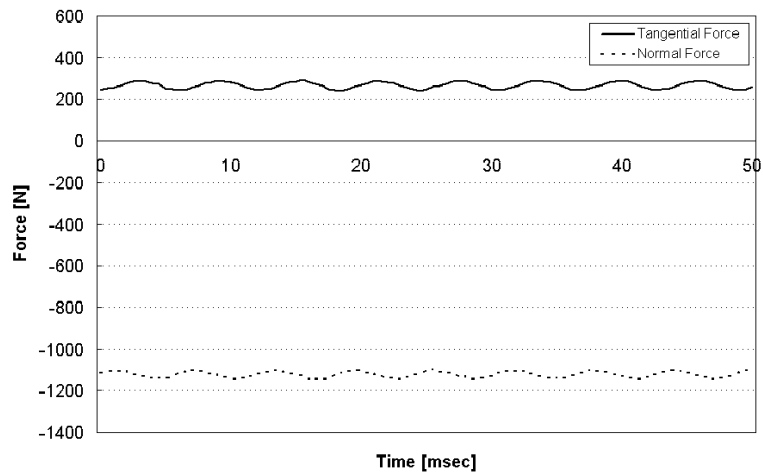


그림 8. 축소형 LSM의 Tangential force 및 Normal force 특성

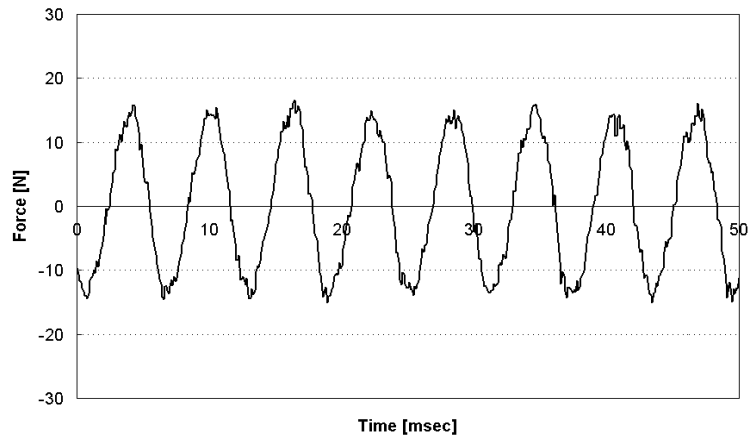


그림 9. 축소형 LSM의 Detent force 특성

도표 2. 축소형 LSM의 각 특성파라미터 해석 결과

항 목	결과값
무부하 상역기전력 (V_{bemf})	58.4 [V_{rms}]
Tangential Force ($F_{tangen.}$)	266 [N]
Detent Force (F_{detent})	31.6 [$N_{p.top.}$]
Tangential Force Ripple	11.9 [%]
Normal Force ($F_{norm.}$)	1,122 [N]

4. 결 론

일반적으로 고효율, 고출력의 특성 때문에 초고속 자기부상열차의 추진시스템으로 선형동기전동기가 적합하다. 선형동기전동기는 기존의 회전형 동기전동기와 동일한 구동 원리를 가지지만, 구조 및 특징에 있어서는 회전형 동기전동기와 구분이 된다. 선형동기전동기는 회전형 동기전동기와 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 비대칭 구조로 나타나게 된 수직력과 입구단, 출구단으로 야기되는 단부효과 및 이동자의 지지구조 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서는

700[km/h]급 초고속열차용 선형동기전동기 연구에 앞서서, 축소형 선형동기전동기의 개념 정립 및 수학적 방법에 의한 축소형 LSM의 기본설계를 수행하였으며, 설계된 모델을 FEM 해석을 통하여 기본적인 전자기적 특성분석 연구를 수행하였다. 해석적 방법에 의한 LSM의 특성 분석 결과 수학적 방법에 의한 설계모델의 추력값과 5 [%]이내의 오차를 보임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. I. Boldea and S. A. Nasar(2001), Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor & Francis, pp.103-143.
2. Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech(2000), Linear synchronous motors : transportation and automation systems, Boca Raton: CRC Press LLC, pp.85-121.
3. 이형우, 이영훈, 이창영, 권혁빈, 강부병, 한영재(2008), "초고속 자기부상철도의 추진시스템 기술", 한국철도학회지, Vol.11, No.3, pp.12-16.
4. 최성규(2008), "초고속자기부상튜브열차 개발의 필요성", 한국철도학회지, Vol.11, No.4, pp.13-18.
5. Liu Wanming, Yao, Jinbin, Zu Baofeng(2006), "Study of optimal design speed of high-speed maglev project," 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Dresden.