

# 基于本征模函数的轨道质量评价方法

李再伟<sup>1,2</sup>, 练松良<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 为了更合理有效地评价轨道质量, 将轨道不平顺波长因素纳入轨道质量评价中, 提出基于本征模函数(intrinsic mode function, IMF)的轨道质量评价方法——轨道质量能量指标(track quality energy index, TQEI)。通过对轨道不平顺数据进行经验模态分解得到对应波长频段的轨道不平顺 IMF, 利用频谱分析的方法求得各个 IMF 的能量; 将各个 IMF 的能量与总能量的比值作为特征向量, 并进行量纲一化处理, 从而得到轨道不平顺 IMF 的能量系数; 利用能量系数求得 TQEI。通过理论推导证明了轨道质量数(track quality index, TQI)是在不考虑波长因素作用下轨道质量能量指标的特殊形式。最后, 以京广提速干线轨道不平顺数据为例, 对比分析了实际检测数据 TQEI 与 TQI 的关系。结果表明: 轨道质量能量指标是对 TQI 的细化和延续, 其既起到了 TQI 的幅值管理作用, 又可以弥补 TQI 在波长及幅值管理方面的缺陷, 可以准确有效地对轨道质量进行评价。

**关键词:** 轨道不平顺; 本征模函数; 经验模态分解; 能量系数; 波长; 评价方法

**中图分类号:** U 216.3

**文献标志码:** A

## Track Quality Assessment Method Based on Intrinsic Mode Function

LI Zaiwei<sup>1,2</sup>, LIAN Songliang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to more effectively assess track quality, a new assessment method of track quality energy index (TQEI) is presented, which is based on the intrinsic mode function (IMF) and includes the factor of track irregularity wavelength. The data of track irregularity is decomposed into finite IMFs by empirical mode decomposition (EMD). The frequency spectrum and the power of each IMF are calculated by using FFT. The energy coefficient of track irregularity

IMF is chosen as the ratio of IMF signal energy to the original signal energy, and then track quality energy index is obtained with the corresponding calculation. Track quality index (TQI) is proved to be a special form of TQEI on certain basis. Finally, the track irregularity signal is studied by the new index, which is collected by track recording vehicles from Beijing-Guangzhou Railway. The statistic and analysis results indicate that track quality energy index is the development of the track quality index, which helps to assess the track quality accurately and effectively.

**Key words:** track irregularity; intrinsic mode function; empirical mode decomposition; energy coefficient; wavelength; assessment method

随着我国既有线铁路提速的完成和高速铁路的陆续开通运营, 列车运行的舒适性和安全性问题引起了人们越来越多的关注。轨道结构作为列车行车的基础, 对轨道几何形位的要求是在任何条件下, 都能保证各种类型的列车以规定速度安全平稳运行。因此, 深入研究轨道结构的质量评价方法对保障列车行车的安全性和舒适性有着重要的意义。国内外对轨道质量管理都侧重于通过轨道不平顺的幅值对轨道状态进行评价, 如我国的局部超限评分法和 TQI(track quality index, 轨道质量数)、荷兰的 Q 指数、日本的 P 指数、美国的 TQI 等<sup>[1]</sup>; 并探索了轨道不平顺谱的评价方法<sup>[2-3]</sup>。由于轨道不平顺的幅值和波长对车辆-轨道系统的响应都有着重要的影响, 特别是列车在高速行驶的情况下, 轨道不平顺波长的作用逐渐显现出来, 因此有必要将轨道不平顺波长的因素纳入到轨道质量评价体系中。目前, 国内外学者在此方面研究较少, 且多是从车辆-轨道传递函数等角度作了部分探索性研究, 取得了一定的研究成果<sup>[4-9]</sup>。

收稿日期: 2012-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(50878158)

第一作者: 李再伟(1983—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构振动。E-mail: lzw\_5220964@163.com

通讯作者: 练松良(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为轨道结构振动。E-mail: liansl6634@126.com

本文在综合现有研究成果的基础上,将轨道不平顺波长因素纳入轨道质量评价中,利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)得到轨道不平顺在各个波段的本征模函数(intrinsic mode function, IMF),提出基于本征模函数的轨道质量评价方法——轨道质量能量评价指标(track quality energy index, TQEI);通过理论与实测讨论了轨道质量能量评价指标与 TQI 的内在联系,并验证了新方法在轨道质量管理方面的实用性和有效性。

## 1 轨道不平顺本征模函数

本征模函数(IMF)是对信号进行 EMD 分解的结果,该方法由美国科学家 Norden E. Huang 于 1998 年提出,是一种自适应性的信号处理方法。每个 IMF 都是单分量的幅值或频率调制信号且需要满足如下两个条件:① 极值点的数量和过零点的数量相等或者最多相差一个;② 在任一时间点上,信号的局部极大值与局部极小值定义的包络的均值必须是零。EMD 方法的本质是通过特征时间尺度获得信号的 IMF,然后利用 IMF 不断地筛选信号。

EMD 分解信号  $x(t)$  的一般步骤<sup>[6]</sup>如下:

(1) 找出待分析信号  $x(t)$  的全部极大值和极小值,利用三次样条函数分别把它们拟合为该信号的上、下包络线,计算出包络线的均值  $b_1$ ,进而求出待分析信号和  $b_1$  的差值  $h_1$ ,即

$$h_1 = x(t) - b_1 \quad (1)$$

一般地,  $h_1$  不一定满足 IMF 的要求,需对它重复上述过程。即将  $h_1$  视为新的信号,求均值  $b_{11}$ ,进而求出待分析信号和  $b_{11}$  的差值  $h_{11}$ ,即

$$h_{11} = h_1 - b_{11} \quad (2)$$

一直进行该过程,直至满足 IMF 的条件,得到第一个 IMF 分量  $c_1$ ,并求出原信号与该 IMF 的差值  $r_1$ ,即

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (3)$$

(2) 将  $r_1$  作为待分解信号,重复以上过程,  $r_2 = r_1 - c_2, \dots, r_p = r_{p-1} - c_p$ ,直至所剩下的  $r_p$  不可分解或其研究意义已经不大为止。

经过经验模态分解后,信号变为各 IMF 和一个趋势项之和

$$x(t) = \sum_{k=1}^p c_k + r_p \quad (4)$$

在上述的分解过程中,需要特别注意的是边界效应问题<sup>[10]</sup>。在本文中采用灰色神经网络闭合镜像

法<sup>[11]</sup>进行端点延拓,从而保证本征模函数信号的准确性。

通过对轨道不平顺信号进行 EMD 分解,轨道不平顺 IMF 按照波长由短到长的顺序自适应性地分解出来,每个 IMF 表征着轨道不平顺相应频段的波长和幅值。因此,通过本征模函数可以准确获取区段轨道不平顺波长及幅值的分布,从而有效识别提取不利于行车的波长,有利于现场维修。

从能量角度可知,轨道不平顺可以认为是车辆-轨道系统的能量输入,轨道不平顺幅值越大,引起的系统响应也越大;而车辆-轨道耦合动力学理论与仿真计算的结果表明<sup>[12-13]</sup>:轨道不平顺 IMF 与车辆振动响应 IMF 之间存在一定的对应关系,即输入的本征模函数分量越大,引起的系统振动响应越大。因此,在一定程度上可以确定轨道不平顺 IMF 是影响车辆-轨道系统响应的决定性因素。基于此,本文提出了基于轨道不平顺本征模函数的 TQEI。

## 2 轨道质量能量指标原理与算法

设里程  $x$  为横坐标的某区段轨道不平顺样本  $\eta(x)$ ,单元区段长度为 200 m,则轨道质量能量指标(TQEI)的表达式为

$$Q_{TQEI} = \sum_{i=1}^7 G_i \quad (5)$$

$$G_i = \sqrt{n \sum_{j=1}^n \lambda_i(f_j) E_i(\eta_j)} \quad (6)$$

式中:  $Q_{TQEI}$  为轨道质量能量指标值;  $G_i$  为各单项不平顺的能量指标,  $i=1, 2, \dots, 7$  分别为左右高低、左右轨向、轨距、水平和三角坑等 7 项几何参数;  $j=1, 2, \dots, n$  分别为 EMD 分解后得到各个本征模函数的个数,  $n$  为本征模函数总数;  $\lambda_i(f_j)$  为第  $i$  项不平顺对应的第  $j$  项本征模函数的能量系数;  $E_i(\eta_j)$  为第  $i$  项不平顺对应的第  $j$  项本征模函数的能量。

能量系数  $\lambda(f_j)$  需满足如下量纲一化条件:

$$\sum_{j=1}^n \lambda(f_j) = 1 \quad (7)$$

不同的本征模函数有着不同的能量系数,能量系数越大表示与之对应的波长的轨道不平顺 IMF 对轨道质量影响越大;能量系数的计算方法有多种,本文采用的是特征能量法。首先利用频谱分析方法,计算功率谱密度面积从而得到各个波段下的 IMF 能量与轨道不平顺信号总能量值;其次将各 IMF 能量  $E_j$  与总能量  $E$  的比值作为特征向量,即

$$\lambda(f_j) = E_j / E \quad (8)$$

由于计算的能量比不包含残余项,所以各 IMF 的能量之和  $\sum_{j=1}^n E_j$  小于原信号能量  $E$ ,因此需要将求得的特征向量进行量纲一化处理,从而满足能量系数的要求。

轨道质量能量指标计算过程如下:① 对轨道不平顺样本进行分段,区段长为 200 m,对信号进行预处理,去除异常值和趋势项;② 对样本进行 EMD 分解,获得各个单项轨道不平顺的本征模函数分量;③ 计算各个本征模函数在各自频带内的能量值,并对能量值进行量纲一化处理,得到能量系数;④ 利用式(5)和式(6)得到轨道质量能量指标。

### 3 指标效果验证

#### 3.1 TQEI 与 TQI 关系

由 TQI 的定义<sup>[1]</sup>有

$$Q_{TQI} = \sum_{i=1}^7 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{u=1}^m (\eta_u^2 - \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u)} \quad (9)$$

式中: $Q_{TQI}$ 为轨道质量指数值; $m$ 为采样点的个数。通过对轨道不平顺信号进行去除趋势项和异常值的预处理<sup>[14]</sup>,轨道不平顺数据的均值可以认为近似为零,即

$$\frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u = 0 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)有

$$Q_{TQI} = \sum_{i=1}^7 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u^2} \quad (11)$$

对轨道不平顺本征模函数而言,若其波长在波段内均匀分布,则本征模函数在各频段内能量相等,即能量系数相等,有

$$\lambda_i(f_1) = \lambda_i(f_2) = \dots = \lambda_i(f_n) = \frac{1}{n} \quad (12)$$

将式(12)代入式(6)有

$$G_i = \sqrt{n \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_i(\eta_j)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_i(\eta_j)} \quad (13)$$

由 EMD 基本理论可知,EMD 分解具有足够的完备性<sup>[10]</sup>,所以本征模函数的能量和与原始信号能量近似相等,有

$$\sum_{j=1}^n E_i(\eta_j) = E_i \quad (14)$$

对原始信号能量  $E_i$  而言,其值可用下式来表示:

$$E_i = \int_0^x G_i(f) dx = \phi_i^2 \quad (15)$$

式中: $G_i$ 为轨道功率谱密度函数; $f$ 为频率; $\phi_i^2$ 为均

方值。

而均方值  $\phi_i^2$  计算式为

$$\phi_i^2 = \frac{1}{x} \int_0^x \eta_i^2(x) dx \approx \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u^2 \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)和式(14)有

$$\sum_{j=1}^n E_i(\eta_j) = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u^2 \quad (17)$$

将式(17)代入式(13)与式(5)有

$$Q_{TQEI} = \sum_{i=1}^7 G_i = \sum_{i=1}^7 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \eta_u^2} = Q_{TQI} \quad (18)$$

所以,当轨道不平顺波长在整个波段内均匀分布时,TQEI 与 TQI 相等。因此,可以说 TQI 是在不考虑波长因素作用下轨道质量能量指标的特殊形式。

#### 3.2 实例验证

利用本文所给出的轨道质量能量指标计算过程,对样本的 TQEI 进行计算并与相对应的 TQI 比较,轨道不平顺数据样本选取京广提速干线上行 K1065—K1075 区段 2009 年 1 月 7 日 GJ 型轨道检查车检测数据,检测速度区间为 120~160 km · h<sup>-1</sup>。计算结果幅值变化情况如图 1 所示。

从图 1 可知,轨道质量单项和整体能量指标与 TQI 单项和整体指标的变化趋势基本相同,但 TQEI 幅值较 TQI 幅值有一定程度的增大。由式(18)可知,若不平顺波长在整个区段均匀分布,TQEI 与 TQI 相等,这说明各个区段的不平顺波长分布差异性较大,导致能量系数的不均匀分布,从而使 TQEI 幅值与 TQI 幅值产生一定的差距;此外,比较两者的波形可知,TQEI 各单项指标的波形变化较 TQI 各单项指标的波形变化剧烈,这说明在轨道几何形位幅值相同的情况下,不平顺波长同样对轨道质量有着很大的影响,而这些含有较大能量的波长往往可以引起较大的车辆振动,从而影响车辆运行的平稳性和安全性。因此,采用轨道质量能量指标可以有效地对区段不平顺波长进行评价,从而解决幅值指标不超限而车辆振动指标超限的问题。

由表 1 可知,两者的波形除水平不平顺指标外,其余指标值相关系数均大于 0.7,特别是总体指标大于 0.9,说明利用 TQEI 总体指标与 TQI 总体指标波形变化基本相同;对比两者极大值和平均值的变化趋势,可知两者在两种工况下变化基本相同,且 TQEI 幅值统计值大于 TQI 幅值统计值。综合图 1 和表 1 可见,轨道质量能量指标可以有效地对轨道质量进行评价,是对现行 TQI 评价指标的有益改

进;由于纳入了波长的影响因素,因此可以更为有效和准确地评价轨道质量。

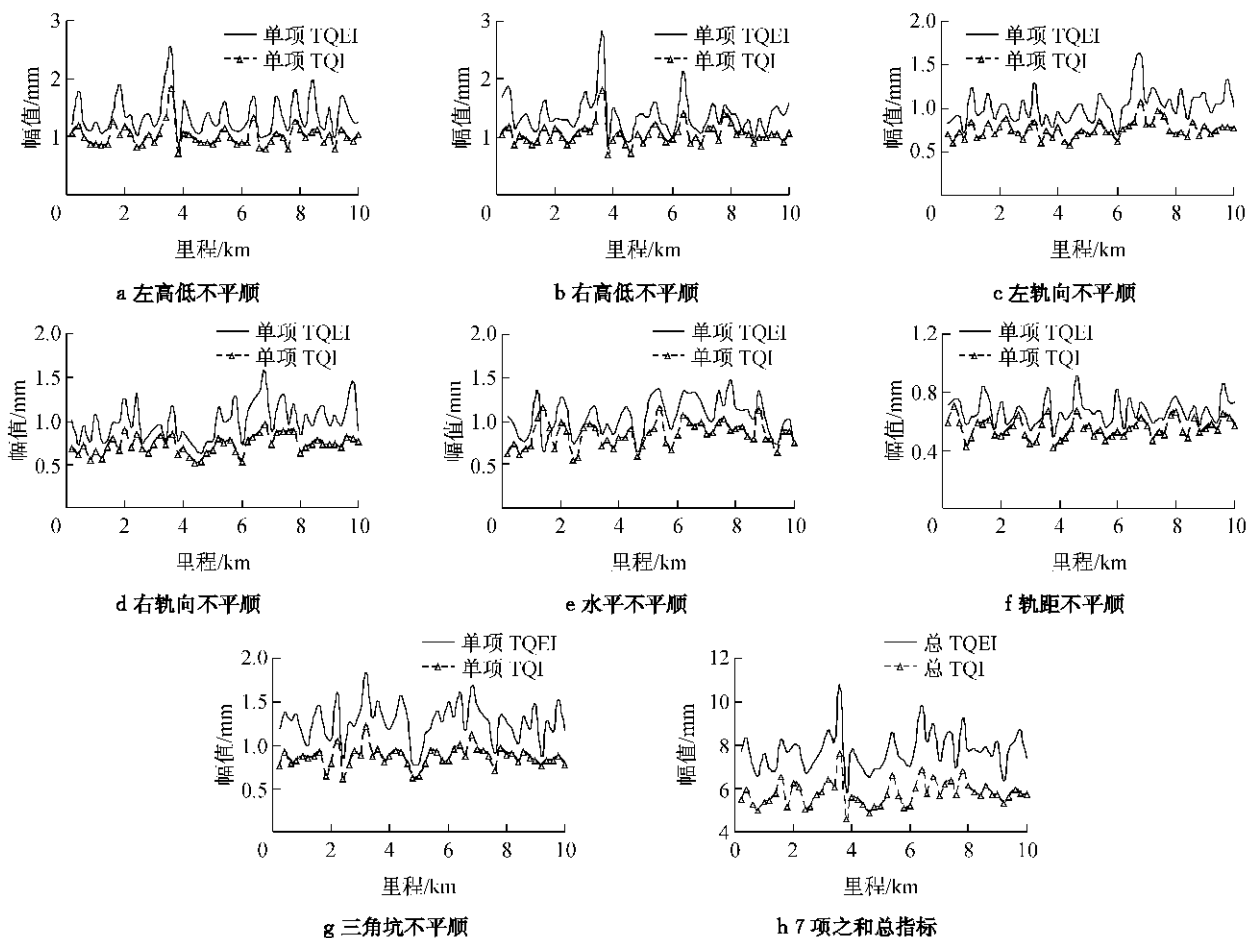


图1 TQEI与TQI幅值比较

Fig.1 Amplitude comparison of TQEI and TQI

表1 TQEI和TQI统计参数比较

Tab.1 Statistical parameters comparison of TQEI and TQI

项目名称	左高低	右高低	左轨向	右轨向	水平	轨距	三角坑	7项之和
两指标相关系数	0.856	0.855	0.731	0.787	0.663	0.740	0.813	0.912
TQEI最大值	2.509	2.827	1.615	1.577	1.480	0.915	1.832	10.749
TQI最大值	1.823	1.813	1.064	0.966	1.155	0.697	1.216	7.611
TQEI平均值	1.356	1.371	1.020	0.993	1.048	0.672	1.272	7.731
TQI平均值	1.001	1.037	0.745	0.722	0.838	0.550	0.859	5.752

## 4 结论

本文利用 EMD 分解得到的本征模函数,将轨道不平顺波长因素纳入到轨道质量评价中,提出了基于本征模函数的轨道质量能量指标(TQEI),并讨论了其与 TQI 的关系,可以得到如下结论:

(1) 给出 TQEI 的原理和计算方法,通过分析其与 TQI 的关系,证明 TQI 是在不考虑波长因素作用下轨道质量能量指标的特殊形式。

(2) 利用实测轨道不平顺数据对 TQEI 值进行

了计算,验证了 TQEI 在轨道质量管理方面的作用。

(3) 基于本征模函数的 TQEI 是对现行 TQI 的细化和延续,其既可以起到 TQI 的均值管理作用,又弥补 TQI 在波长及幅值管理方面的缺陷,是对目前轨道质量管理方法的有益改进和补充。

## 参考文献:

[1] 许玉德,李海峰,戴月辉. 轨道交通工务管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.

XU Yude, LI Haifeng, DAI Yuehui. Track maintenance & management for urban mass transit [M]. Shanghai: Tongji

- University Press, 2007.
- [2] 练松良, 刘 扬, 杨文忠. 沪宁线轨道不平顺谱的分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(10):1342.  
LIAN Songliang, LIU Yang, YANG Wenzhong. Analysis of track irregularity spectrum of Shanghai-Nanjing Railway[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(10): 1342.
- [3] 罗林, 张格明, 吴旺青, 等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 158-172.  
LUO Lin, ZHANG Geming, WU Wangqing, et al. The control of the state of track regularity in wheel-rail system [M]. Beijing: China Railway Press, 2006.
- [4] Luber B. Railway track quality assessment method based on vehicle system identification [J]. Elektrotechnik and Informationstechnik, 2009, 126(5): 180.
- [5] Sadeghi J, Fathali M, Boloukian N. Development of a new track geometry assessment technique incorporating rail cant factor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(F3): 255.
- [6] Liu Y, Magel E. Performance-based track geometry and the track geometry interaction map [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(F2): 111.
- [7] 王卫东, 刘金朝, 梁志明. 综合评价车辆/轨道系统动态特性的广义能量法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 22.  
WANG Weidong, LIU Jinzhao, LIANG Zhiming. Generalized energy index for comprehensively evaluating the dynamic characteristics of vehicle/track system [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 22.
- [8] 梁志明, 王卫东. 基于功能转化原理的车辆-轨道系统脱轨安全性的研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 14.  
LIANG Zhiming, WANG Weidong. Research on the derailment security of vehicle-track system based on functional transformation theory [J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 14.
- [9] 李海锋, 许玉德, 王建西. 轨道几何状态均匀性指数及其应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(4):495.  
LI Haifeng, XU Yude, WANG Jianxi. Track geometry equality index and its application [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(4):495.
- [10] Norden E, Huang Z S, Steven R Long, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C] //Proceedings of Royal Society, London:[s. n.]. 1998: 903-962.
- [11] 李再伟, 练松良, 周俊磊. 基于改进 EMD 方法的轨道不平顺时频分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(5): 702.  
LI Zaiwei, LIAN Songliang, ZHOU Junlei. Time-frequency analysis of track irregularity based on improved EMD method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 40(5): 702.
- [12] 李海涛, 王成国, 许跃生, 等. 基于 EEMD 的轨道-车辆系统垂向动力学的时频分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 24.  
LI Haitao, WANG Chengguo, XU Yuesheng, et al. Time-frequency response analysis of the vertical dynamics of track-vehicle systems based on EEMD [J]. China Railway Science, 2007, 28(5): 24.
- [13] 陈双喜, 林建辉, 陈建政. 基于改进的 EMD 方法提取车辆-轨道垂向耦合系统动态特性[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 212.  
CHEN Shuangxi, LIN Jianhui, CHEN Jianzheng. Dynamic characteristics extraction of vehicle-track vertically coupling system based on improved EMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 212.
- [14] 刘秀波. 铁路干线轨道不平顺谱研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑学院, 2006.  
LIU Xiubo. Study on power spectral density of track irregularities on railway main lines [D]. Beijing: School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, 2006.