

文章编号: 1000-4750(2014)09-0198-05

考虑特征紊流影响的大跨桥梁静风稳定分析方法

张文明¹, 葛耀君²

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏, 南京 210096; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了研究特征紊流抖振力对大跨度桥梁静风稳定性的影响, 提出了特征紊流气动力模型, 建立了考虑特征紊流影响的大跨度桥梁静风稳定分析方法。通过采用风洞实测气动力系数谱模拟特征紊流气动力系数时程, 利用动力有限元算法计算了西堍门大桥的位移响应, 分析了特征紊流对其静风稳定的影响。结果表明: 结构仅仅是在平衡位置附近作微幅振动, 特征紊流对西堍门大桥静风稳定临界风速和失稳形态没有明显影响。主要是因为特征紊流是窄带的随机过程, 其能量主要集中在某一个频率附近, 对西堍门大桥而言, 该频率远高于结构的基频, 所以特征紊流气动力未能激起较大的位移响应。

关键词: 特征紊流; 静风稳定; 大跨度桥梁; 气动力模型; 抖振

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0423

AN APPROACH FOR ANALYZING THE EFFECT OF SIGNATURE TURBULENCE ON THE AEROSTATIC STABILITY OF LONG-SPAN BRIDGES

ZHANG Wen-ming¹, GE Yao-jun²

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the effect of signature turbulence on the aerostatic stability of long-span bridges, a model for signature turbulence aerodynamic-force was proposed. An approach for analyzing the effect of signature turbulence on the aerostatic stability was also put forward. The time-histories of aerodynamic force coefficients were simulated based on the spectra gained in wind tunnel tests of a sectional model. The displacement responses of Xihoumen Bridge were then calculated using the dynamic FEM method. The results show that the bridge deck vibrates with a small amplitude in the vicinity of an aerostatic equilibrium configuration, which means the effect of signature turbulence on aerostatic stability is unremarkable. Signature turbulence is a narrow-band random process. The energy mainly concentrates near a certain frequency which is much higher than the fundamental frequency of Xihoumen Bridge. As a result, signature turbulence cannot induce a vibration with a large amplitude.

Key words: signature turbulence; aerostatic stability; long-span bridge; model of aerodynamic force; buffeting

大跨度缆索承重桥梁的静风失稳, 通常为加劲梁在静力风荷载作用下发生的弯扭耦合发散现象, 具有突发性特点。Simiu和Scanlan^[1]提出了扭转发散临界风速简单计算公式, 该方法基于小变形线性理

论, 忽略了气动力矩随结构变形而变化 and 扭转角沿桥轴线不均匀分布的影响, 同时也不考虑结构抗力的非线性因素以及初始攻角的影响。为了全面考虑结构的几何与气动力非线性的影响, Boonyapinyo

收稿日期: 2013-05-11; 修改日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208104); 江苏省自然科学基金项目(BK2012344); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金课题项目(20120092120018); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

通讯作者: 张文明(1983—), 男, 河南人, 讲师, 博士, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: wenmingzhang@hotmail.com).

作者简介: 葛耀君(1958—), 男, 上海人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: yaojunge@tongji.edu.cn).

等^[2]在1994年采用了静力有限位移方法对大跨度斜拉桥风致侧向弯扭屈曲问题做了空间非线性有限元分析。此后,程进等^[3]对大跨度桥梁的静风稳定性做了进一步的研究,提出了内外增量双重迭代方法,考虑了结构的几何与材料非线性、以及沿桥轴线风攻角不一致分布影响。在结构所处流场为均匀流场的前提下,内外增量双重迭代方法已经能够足够精确地确定结构的静力扭转发散临界风速。

然而实际结构所处的流场常常为紊流风场,除了由平均风作用引起结构静位移之外,在脉动风作用下结构还将产生抖振位移。显然,采用静力有限元迭代计算的方法无法考虑抖振对静风稳定性的影响。张志田和葛耀君等^[4-7]提出了大跨度桥梁静风稳定求解的动力有限元方法,基于准定常气动力模型研究了桥梁结构脉动风抖振响应对静风稳定的影响,结果表明来流紊流对大跨度悬索桥的静风稳定临界风速和失稳形态有显著影响。

一般而言,结构物自身尾流或邻近结构物尾流中的紊流成分带有结构的特征,称为特征紊流。特征紊流同样会产生抖振力,其对静风稳定是否有影响?这个问题鲜有文献涉及。

1 问题提出

西堍门大桥是一座主跨 1650m 的钢箱梁悬索桥,加劲梁为流线型分离双箱断面。该桥的全桥气弹模型风洞试验中出现了静风失稳现象。采用内外增量双重迭代方法计算的静风失稳临界风速略大于风洞试验结果,如表 1 所示。

表 1 西堍门大桥静风失稳临界风速 (m/s)
Table 1 Critical wind speed of aerostatic stability for the Xihoumen Bridge

初始攻角	-3°	0°	+3°
数值计算 ^[8]	134.3	126.9	115.2
风洞试验 ^[9]	115.0	105.0	95.0

上述计算是在均匀流场中只考虑来流的静力作用完成的。而在西堍门大桥的全桥气弹模型风洞试验中,虽然来流是均匀的,但是经过断面将产生流动分离和漩涡脱落,从而形成特征紊流。特征紊流有别于来流紊流,但是它产生的抖振力可能是造成表 1 中差别的原因。为了验证这一设想,本文尝试研究特征紊流对静风稳定性的影响,建立了考虑特征紊流影响的静风稳定分析方法。

2 气动力表达

实际桥梁结构往往位于开阔地带,一般不会受到邻近结构物尾流的影响,因此桥梁结构的特征紊流主要是指自身尾流中的紊流成分。特征紊流具有周期性或有明显的卓越周期。本文的研究仅限于均匀风场的特征紊流,主要是因为紊流风场中,来流紊流对特征紊流有“削峰”作用^[10],相对于来流紊流引起的抖振力,特征紊流引起的抖振力非常的小。

采用以下气动力模型计入均匀流场中特征紊流引起的抖振力:

$$D(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 [C_D(\alpha_0 + \theta) + C_{Ds}(t)] \cdot B \quad (1a)$$

$$L(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 [C_L(\alpha_0 + \theta) + C_{Ls}(t)] \cdot B \quad (1b)$$

$$M(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 [C_M(\alpha_0 + \theta) + C_{Ms}(t)] \cdot B^2 \quad (1c)$$

式中: ρ 为空气密度; U 为平均风速; C_D 、 C_L 和 C_M 分别表示加劲梁阻力、升力和升力矩系数; α_0 为初始风攻角; θ 为结构响应扭转载移; $C_{Ds}(t)$ 、 $C_{Ls}(t)$ 和 $C_{Ms}(t)$ 分别表示特征紊流阻力、升力和升力矩系数,它们是零均值的平稳随机过程,可利用风洞试验测得的特征紊流气动力系数谱^[10]进行模拟获得; B 为加劲梁宽度。

文献[11]对抖振力的展向相关性进行了风洞试验测试,结果表明,由于特征紊流的存在,相关函数中的实测数据点在某一折算频率值附近有数据点突起,甚至接近1。特征紊流的频率比较集中,并且其沿桥跨方向同步性较好,相关性较高,因此在特征紊流的卓越频率区域的形成了相干函数的突起。因此本文可以假定:均匀流场中特征紊流引起的抖振力沿展向是全相关的。

3 特征紊流气动力系数识别

本节拟以西堍门大桥为工程背景,如前文所述,该桥加劲梁为流线型分离双箱断面。文献[11]利用节段模型测试了该类断面的特征紊流气动力系数谱,并拟合成公式如下:

$$S_{C_s}(K) = \sum_{i=1}^m \left(b_{0i} + \frac{b_{1i}}{(K - b_{2i})^2 + b_{3i}} \right) \quad (2)$$

式中: $S_{C_s}(K)$, ($I=D, L, M$) 分别为特征紊流阻力、升力和升力矩系数谱; $K = \omega B / U$ 为折算频率; m 为

脉动力系数谱中由于特征紊流引起的波峰个数;
 b_{0i} 、 b_{1i} 、 b_{2i} 、 b_{3i} 为第 i 个波峰的拟合参数且都大于
 0, 由 b_{2i} 可以直接得到第 i 个波峰峰值所对应的频
 率位置, 由 b_{1i}/b_{3i} 可比较峰值的大小。西堍门大桥
 0° 攻角时各参数的取值可以参考表 2。

根据 $S(K)dK=S(n)dn$ 可将 $S(K)$ 转换成用频率 n
 表示的 $S(n)$:

$$S_{C_s}(n) = \frac{2\pi B}{U} \sum_{i=1}^m \left(b_{0i} + \frac{b_{1i}}{\left(\frac{2\pi B}{U} n - b_{2i} \right)^2 + b_{3i}} \right) \quad (3)$$

表 1 西堍门大桥特征紊流气动力系数谱参数^[8]
 Table 2 Parameters of signature turbulence aerodynamic
 coefficient spectrum for the Xihoumen Bridge^[8]

脉动气动力	i	b_0	b_1	b_2	b_3
C_{Ds}	1	1.3×10^{-23}	3.35×10^{-8}	3.72	0.1740
	2	1.4×10^{-16}	6.16×10^{-7}	6.39	0.0184
	3	2.8×10^{-17}	4.38×10^{-6}	7.20	2.73×10^{-4}
C_{Ls}	1	1.1×10^{-25}	2.13×10^{-6}	6.37	0.0055
	2	4×10^{-15}	7.92×10^{-5}	7.20	1.45×10^{-4}
C_{Ms}	1	4.3×10^{-22}	1.15×10^{-7}	6.39	0.00893
	2	5.6×10^{-17}	3.67×10^{-6}	7.20	2.76×10^{-4}

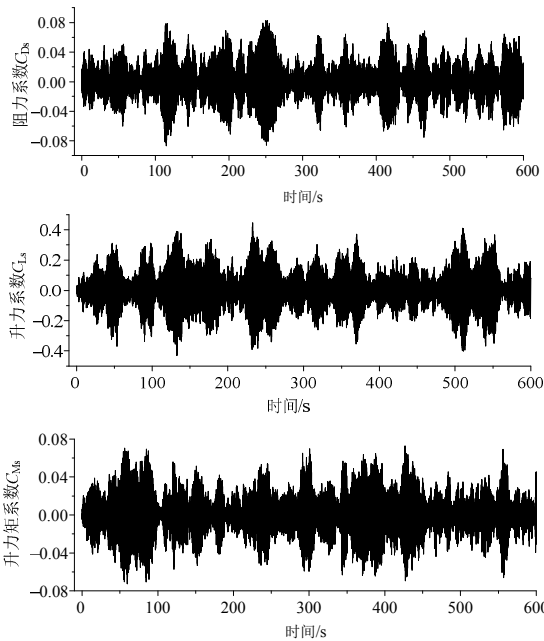


图 1 特征紊流气动力系数模拟时程

Fig.1 Simulated time-histories of signature turbulence aerodynamic coefficients

本文采用线性回归滤波器法的自回归(AR)模
 型^[12]模拟特征紊流脉动气动力系数时程。线性滤波
 法即白噪声滤波法(White Noise Filtration Method,
 WNFM)是基于线性滤波技术, 将人工生成的均值为

零、具有白色谱的一系列随机数通过设计好的滤波
 器, 使其输出为具有给定谱的随机过程。近年来,
 WNFM 中的自回归模型(Auto-Regressive, AR)因其
 计算量小和速度快, 在脉动风速时程的数值模拟中
 得到了广泛的应用。

采用 5 阶 AR 模型, 时间步长取为 0.1s, 共取
 6000 步, 600s, 利用线性滤波器法模拟各平均风速
 下的特征紊流气动力系数时程。由于假定特征紊流
 气动力沿展向全相关, 所以模拟单点随机过程即
 可。作为示例, 图 1 为 $U=110\text{m/s}$ 时的气动力系数
 时程, 图 2 为模拟功率谱与目标谱的比较, 两者吻
 合较好。

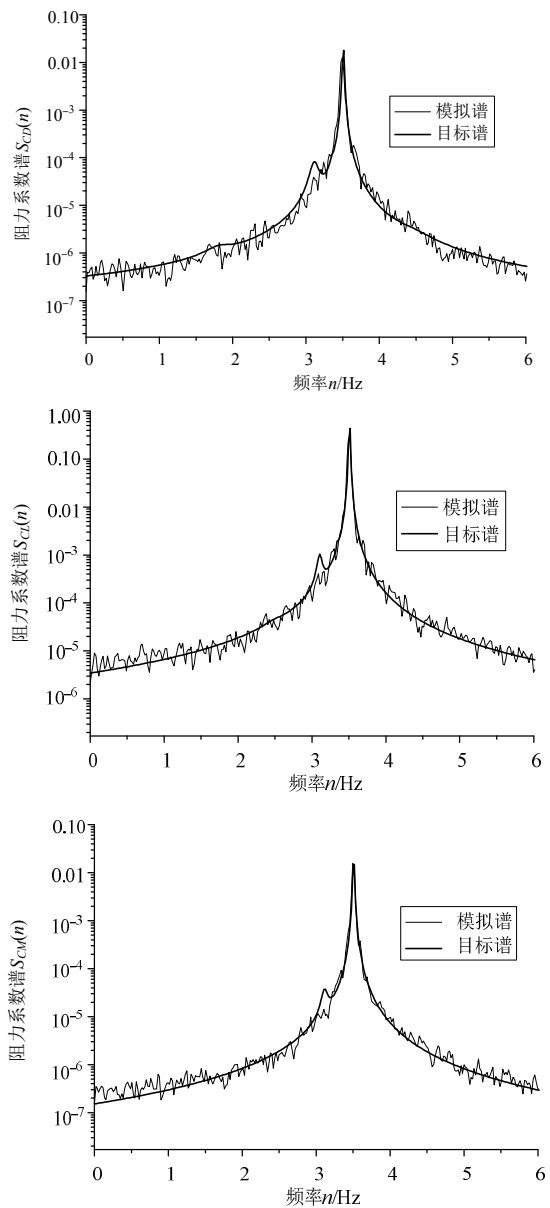
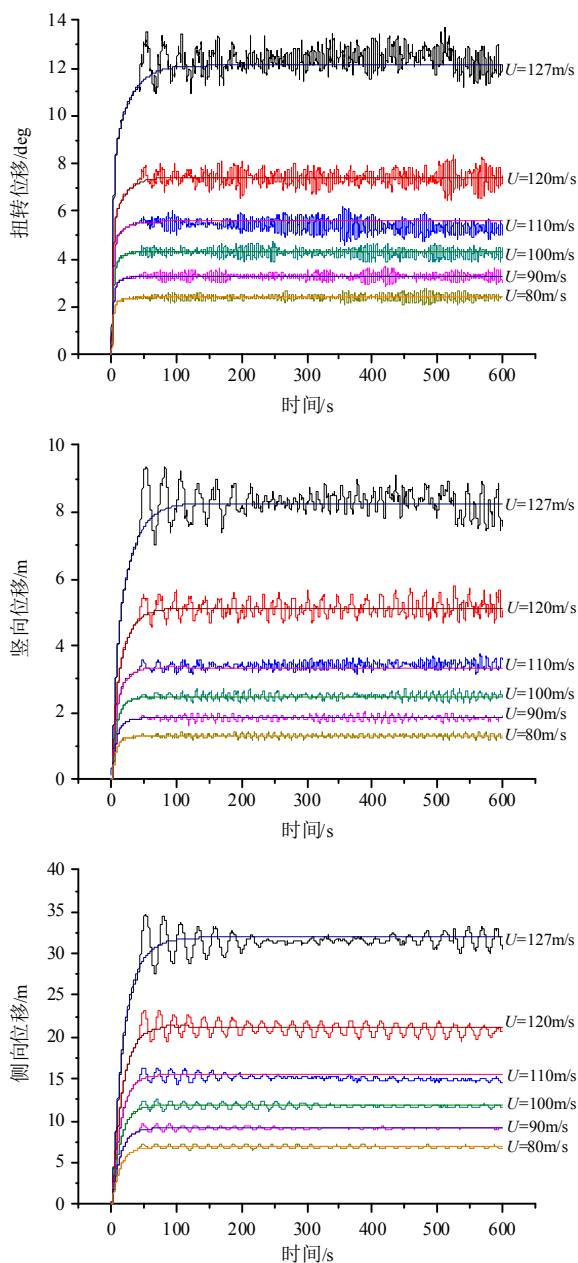


图 2 特征紊流气动力系数模拟谱与目标谱的比较

Fig.2 Simulated spectrum and target spectrum of signature turbulence aerodynamic coefficient

4 计算结果及讨论

采用本文提出的特征紊流气动力模型, 利用动力有限元算法计算了西堍门大桥 0° 攻角下的结构位移响应。为了避免突加荷载引起的激荡效应^[5], 在前 40s 采用高阻尼比, 之后调整为正常阻尼比。



注: 脉动线表示计入特征紊流的结果; 直线表示不计入特征紊流的结果

图3 西堍门大桥跨中位移响应历程

Fig.3 Time-histories of displacement responses at midpoint of main span for Xihoumen Bridge

图3对比示出了计入与不计入特征紊流时的跨中位移响应历程。从图3可以看出特征紊流没有改变各风速下的位移响应均值, 结构仅仅是在平衡位置附近作微幅振动, 因此可以认为特征紊流对西堍

门大桥静风稳定性没有影响。

本文在特征紊流气动力作用下的结构响应没有出现类似于文献[5]中在来流紊流作用下的大峰值响应, 主要是因为: 来流紊流的能量主要集中在低频部分, 而西堍门大桥的结构基频很小, 竖弯基频 0.09995Hz , 扭转基频 0.2323Hz ^[9], 因此来流紊流能激起结构很大的位移响应; 特征紊流是窄带的随机过程, 其能量主要集中在某一个频率附近, 对西堍门大桥而言, 这个频率远高于结构的基频, 所以特征紊流气动力不能激起结构很大的位移响应。

5 结论

本文提出了特征紊流气动力模型, 建立了考虑特征紊流影响的大跨度桥梁静风稳定分析方法。通过采用风洞实测气动力系数谱模拟特征紊流气动力系数时程, 利用动力有限元算法计算了西堍门大桥的位移响应, 分析了特征紊流对其静风稳定的影响。结果表明, 结构仅仅是在平衡位置附近作微幅振动, 特征紊流对西堍门大桥静风稳定临界风速和失稳形态没有明显影响。主要是因为特征紊流是窄带的随机过程, 其能量主要集中在某一个频率附近, 对西堍门大桥而言, 该频率远高于结构的基频, 所以特征紊流气动力未能激起较大的位移响应。至于表1中的临界风速试验值与计算值的差别可能是其他因素造成的, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Simiu E, Scanlan R H. Wind Effects on Structures [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996: 451—454.
- [2] Boonyapinyo V, Yamada H, Miyata T. Wind-induced nonlinear lateral-torsional buckling of cable-stayed bridges [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(2): 486—506.
- [3] 程进, 肖汝诚, 项海帆. 大跨径斜拉桥非线性静风稳定性全过程分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 25—28. Cheng Jin, Xiao Rucheng, Xiang Haifan. Full range nonlinear aerostatics analysis for long-span cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 25—28. (in Chinese)
- [4] 张志田. 大跨度桥梁非线性抖振及其对抗风稳定性影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. Zhang Zhitian. Nonlinear buffeting vibration and its effect on aerostatic and aerodynamic stability of long-span bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [5] 张志田, 陈政清, 葛耀君, 等. 紊流中大跨桥梁的扭转

- 发散特性[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 108—116.
- Zhang Zhitian, Chen Zhengqing, Ge Yaojun, et al. Torsional divergence characteristics of long span bridge in turbulence [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 108—116. (in Chinese)
- [6] 张志田, 葛耀君. 考虑抖振影响的大跨度桥梁静风稳定性分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 96—101.
- Zhang Zhitian, Ge Yaojun. Aerostatic instability analysis of long span bridges including buffeting effect [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 96—101. (in Chinese)
- [7] Zhang Z T, Chen Z Q, Hua X G, Li C G, Ge Y J. Investigation of turbulence effects on torsional divergence of long-span bridges by using dynamic finite-element method [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2010, 15(6): 639—652.
- [8] 张文明. 多主跨悬索桥抗风性能及风致灾变全过程研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- Zhang Wenming. Study on Wind-Resistance property of multi-main-span suspension bridges and full process of wind induced hazard evolution [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [9] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 西堍门大桥悬索桥抗风性能及风振控制研究施工图设计阶段研究报告[R]. 2003.
- State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University. Research report on wind-resistance properties and wind induced vibration control at detailed design phase of Xihoumen suspension bridge [R]. 2003. (in Chinese)
- [10] 文水兵. 特征紊流效应对典型桥梁断面脉动气动力谱和气动导纳的影响 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- Wen Shuibing. Effect of signature turbulence on fluctuating aerodynamic force spectra and aerodynamic admittance of typical bridge decks [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [11] 朱乐东, 赵传亮, 丁泉顺. 扁平箱主梁断面抖振力频谱特性以及桥跨方向相关性研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 96—101.
- Zhu Ledong, Zhao Chuanliang, Ding Quanshun. Spectral characteristics and spanwise coherence of buffeting forces on a flat box girder bridge deck [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 96—101. (in Chinese)
- [12] 张文明. 大跨连续刚构桥最大悬臂施工阶段风致响应分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- Zhang Wenming. Wind response analysis of a continuous long-span rigid frame bridge at the longest cantilever stage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)

(上接第 189 页)

- [16] 岳茂光, 王东升, 孙治国, 苏志彬. 汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 250—256.
- Yue Maoguang, Wang Dongsheng, Sun Zhiguo, Su Zhibin. Analysis on collapse resistant capability of reinforced concrete frame structure under Wenchuan earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 250—256. (in Chinese)
- [17] 陆新征, 李易, 叶列平, 等. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 2): 150—157.
- Lu Xinzheng, Li Yi, Ye Lieping, et al. Study on design method to resist progressive collapse for reinforced concrete [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl 2): 150—157. (in Chinese)
- [18] 黄思凝, 郭迅, 张敏政, 等. 钢筋混凝土结构小比例尺模型设计方法及相似性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 31—38.
- Huang Sining, Guo Xun, Zhang Minzheng, et al. Study of design method and similitude for small-scale reinforced concrete structural models [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 31—38. (in Chinese)