

文章编号:1674-2869(2015)04-0040-05

# 考虑实测轮载及各向异性的沥青路面力学响应

胡小弟,陶 雄,白 桃\*

武汉工程大学交通研究中心,湖北 武汉 430074

**摘 要:**为研究各向异性对沥青混合料轮载受力反应的影响,在实测轮载的基础上,采用有限元方法进行沥青路面结构层横观各向同性的弹性应力响应研究.以 ANSYS 有限元软件中的正交各向异性模型模拟沥青材料横观各向同性,加载实测非均布的轮胎-路面接地竖向压力及水平力,进行各向同性和横观各向同性条件下路面结构层的三向正应力以及剪应力的差异性分析.结果表明:沥青混合料各向异性特性对沥青路面结构层的竖向、横向和剪切应力基本无影响,但其对沥青结构层的行车向方向应力影响较大.目前我国采用的设计标准在弹性框架下不考虑沥青混合料各向异性特征基本适用.

**关键词:**沥青混合料;各向异性;实测轮载;力学响应

**中图分类号:**U416.21 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.04.009

## 0 引 言

目前大多数的力学试验和路面结构计算模型,将沥青混合料假定为均质各向同性材料.然而,实证研究表明,沥青混合料<sup>[1-2]</sup>、基层和底基层材料<sup>[3]</sup>这类复合材料的力学性能为各向异性的性质.各向异性是指材料在各方向的力学和物理性能呈现差异的特性.基于研究需要,一般认为沥青混合料具备横观各向同性:垂直于压实方向的水平面上两个方向的材料特性是相同的,而垂直和水平方向有显著差异.沥青混合料的各向异性主要归因于集料颗粒择优取向的随机分布、空隙的形状和集料颗粒的组成.研究表明,基于各向同性分析路面设计可能会低估与剪应力和拉应力相关的永久变形和疲劳开裂的评价.所以,沥青混合料的各向异性性质在沥青路面力学响应建模中应予以适当考虑.

目前的沥青路面力学计算大都采用圆形均布荷载,这与实际情况不符.实际的轮胎接地面不是简单的圆形,轮胎接地压力也不是均匀分布,而是典型的非均匀分布<sup>[4]</sup>.轮胎接地压力的非均匀分布与圆形均布荷载,对沥青路面力学响应的影响有较大差别,特别是轮胎-路面接触面附近的.要进一步准确计算沥青路面力学响应,有必要考虑更接近实际的车辆荷载分布特性.

笔者选取我国典型的半刚性基层沥青路面结

构,在考虑沥青混合料横观各向同性的材料参数基础上,以我国规范推荐的沥青混合料模量取值为依据,建立考虑三维实测轮载接地压力作用下的三维有限元模型,比较沥青混合料各向异性条件下对路面结构内三个方向的应力影响,并作相关分析评价.

## 1 横观各向同性弹性力学方程

横观各向同性弹性有 5 个材料常数:水平向( $E_x=E_y$ )和垂直向( $E_z$ )的弹性模量;垂直-水平向( $v_{xz}=v_{yz}$ )和水平-水平向( $v_{xy}$ )的泊松比;以及沿垂直面的剪切模量( $G_{xz}=G_{yz}$ )<sup>[5]</sup>.对于横观各向同性材料,胡克定律可表示为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{v_{xy}}{E_x} & -\frac{v_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{v_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{zx}}{E_z} & -\frac{v_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}$$

收稿日期:2015-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51278389);湖北省交通运输厅科技项目(2013-731-2-5)

作者简介:胡小弟(1971-),男,湖南常德人,教授,博士.研究方向:路面结构行为.\*通信联系人

$$\text{其中: } \frac{v_{xz}}{E_z} = \frac{v_{xz}}{E_x}, v_{yx} = v_{xy}$$

## 2 沥青路面应力计算模型

### 2.1 荷载选取

笔者所采用的是我国路面设计标准双轮组单轴载 100 kN。由于双轮组为轴对称,故模型中只考虑双轮,则一共有十条长方形轮迹。轮迹平面如图 1 所示。

研究分析过程中采用标准荷载 BZZ-100 的实测花纹轮胎竖向接地压力作为计算所施加的荷载<sup>[6]</sup>,并且施加水平力的作用。根据文献可知,水平向轮胎接地压力一般为最大竖向接地压力的 15%~50%<sup>[7]</sup>。为了比较合理的加载轮胎水平向接地压力,这里横向接地压力取竖向接地压力的 30%;纵向接地压力取最大竖向接地压力的 12%<sup>[8]</sup>。

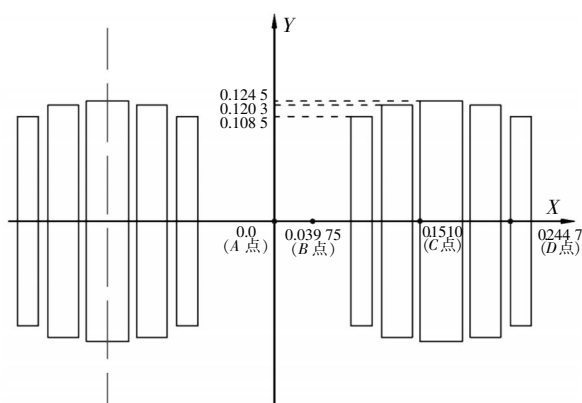


图 1 轮迹平面图

Fig.1 Layout of wheel track

### 2.2 三维有限元模型

选取典型的半刚性基层沥青路面结构(见图 2(a))进行分析。该模型大小为:长宽分别为 10 m、5 m,土基深度为 6 m。三维有限元模型的边界条件假定为:(1) 沥青路面结构各层层间完全连续;(2) X 方向两侧没有位移;(3) Y 方向两侧没有位移;(4) 底部 Z 方向没有位移。将计算所用的程序输入 ANSYS 可得到划分网格之后的模型如图 2(b)所示。

### 2.3 路面力学响应材料参数选取

为了较明显的反映面层材料参数的变化对路面应力分布的影响,将面层取为单一材料,取沥青路面面层厚度为 18 cm,面层、基层、土基模量材料弹性模量参考值按我国《公路沥青路面设计规范》<sup>[9]</sup>选取。材料参数如表 1 所示。

笔者参考 Uzan 模型<sup>[10-11]</sup>,引入沥青混合料横观各向同性系数  $\alpha$  作为参考调整标准:

$$\begin{cases} \alpha = E_z/E_x \\ G_{xz} = \frac{E_z}{2(1+\nu_{xz})} \end{cases}$$

对于沥青混合料,Wang 等人的研究表明,沥青混合料的垂直方向弹性模量能达到水平方向的 2~5 倍<sup>[12]</sup>;Ramos-Aparicio<sup>[13]</sup>和 Oh<sup>[14]</sup>等人发现弹性模量的各向异性度(垂直弹性模量与水平弹性模量比)平均为 1.26;鞠达通过室内试验,测得不同温度下 AC-20 的垂直模量可达到水平模量的 1.35 倍<sup>[15]</sup>。影响材料弹性常数的因素主要由材料的特性及所受到的应力状态来确定,上述模量比的确定要根据材料的级配、压实度、空隙率、集料的破碎程度及细料含量等因素综合确定。因此,分别设置沥青混合料弹性模量的横观各向同性系数  $\alpha$  为 1、1.5、2、2.5、3。当  $\alpha=1$  时即为沥青混合料材料各向同性。

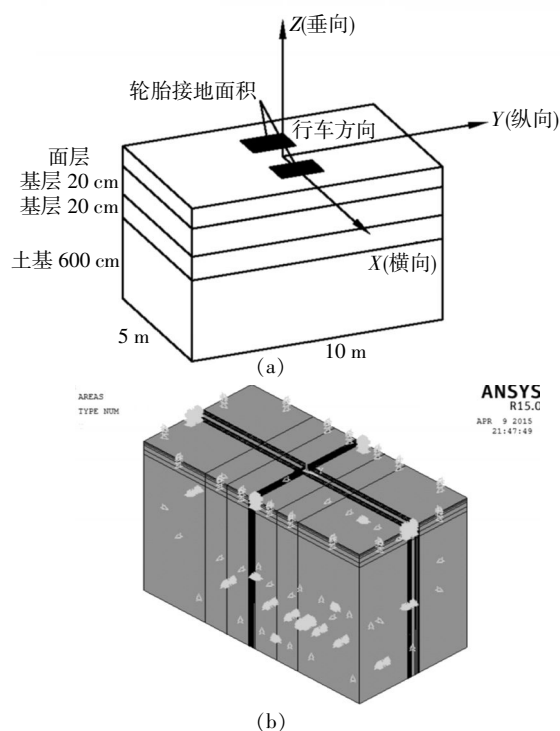


图 2 有限元计算模型

Fig.2 Finite element calculation model

综合已有的文献,取定沥青混合料横观各向同性分析弹性参数调整范围列入表 2 中。

表 1 沥青路面材料参数选取表

Tab.1 Material parameters selection of asphalt pavement

	厚度 $h/\text{cm}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
沥青面层	18	1 200	0.25
水泥稳定碎石	20	1 500	0.20
水泥石灰砂砾土	20	1 000	0.20
土基	40		0.40

表 2 沥青面层弹性参数调整范围

Tab.2 The adjustment range of asphalt layer elastic parameters

$\alpha$	厚度 $h/\text{cm}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$			泊松比 $\nu$			剪切模量 $G/\text{MPa}$		
		$E_x$	$E_y$	$E_z$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$
1.5	18	800	800	1 200	0.25	0.25	0.25	320	480	480
2.0		600	600	1 200	0.25	0.25	0.25	240	480	480
2.5		480	480	1 200	0.25	0.25	0.25	192	480	480
3.0		400	400	1 200	0.25	0.25	0.25	160	480	480

### 3 沥青路面结构模拟计算结果对比

轮迹平面如图 1 所示,选取非均布荷载轮迹代表点:A 点  $X=0\text{m}$ 、B 点  $X=0.03975\text{m}$ 、C 点  $X=0.151\text{m}$ 、D 点  $X=0.2447\text{m}$  作为代表点.分别在不同的横观各向同性系数条件下,研究点的竖向应力、纵向应力、横向应力三个方向应力响应以及最大剪应力响应.

#### 3.1 竖向应力计算结果对比

图 3(a)、图 3(b)是处于双轮间位置 A 点和 B 点的竖向应力响应图. A 点处上面层层底出现拉应力并且随着  $\alpha$  增大,拉应力逐渐增大,最大比各向同性情况大  $0.02\text{MPa}$ .其余各层的竖向应力均为负值,即为压应力;路表压应力随着  $\alpha$  增大逐渐增大;中面层层底压应力随着  $\alpha$  增大而逐渐减小,底面层层底压应力虽然随着  $\alpha$  增大而增大,但增大幅度极小,在  $3\%\sim 6\%$  之间.而 B 点处路表出现拉应力,随着  $\alpha$  增大逐渐增大;上面层、中面层层底压应力随着  $\alpha$  增大而逐渐减小;底面层层底压应力同样增幅不大,也在  $3\%\sim 6\%$  之间.由图 3(c)、图 3(d)看出,处在轮迹位置下的竖向应力均为负值,也就是均为压应力.随着  $\alpha$  增大压应力逐渐增大,对 C 点处中面层影响显著,最大达  $16\%$ ;对 D 点处路表影响显著,最大达  $12\%$ .

因此,采用各向异性特性假设对沥青路面结构的竖向应力有一定影响但不太显著.

#### 3.2 纵向应力计算结果对比

对于在不同横观各向同性系数条件下,所有代表点的纵向应力(行车方向)均为压应力.为了更好观察各向异性对路面纵向应力的影响,选取  $\alpha=1$  和  $\alpha=3$  两组数据进行对比,得出纵向应力相差最大比率,如图 4 所示.

由图 4 可以看出,所有代表点,在路表及上面层层底,随着  $\alpha$  的增大,纵向应力有明显的减小趋势,最大减小比率达  $70\%$ ,约  $0.2\text{MPa}$ .在中面层层底,A 点和 B 点两个处于轮迹中间位置的点,纵向应力有一定的减小趋势;而随着  $\alpha$  的增大,C 点

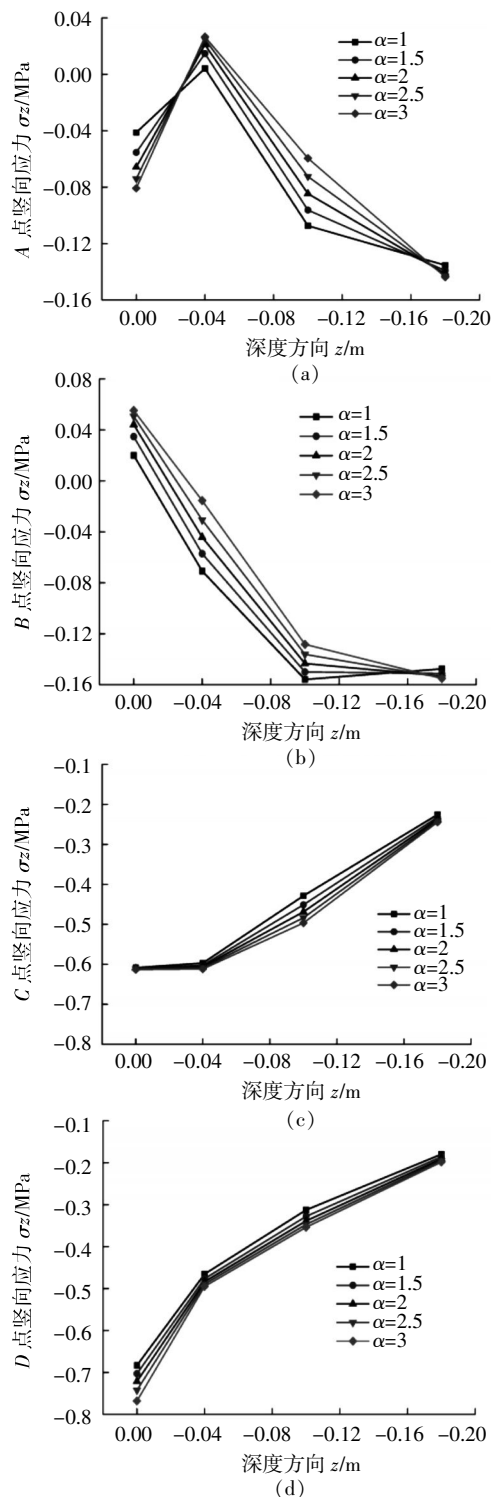


图 3 竖向应力响应

Fig.3 Vertical stress response

和D点两个处于轮迹下的点,纵向应力有一定的增大趋势.最后,在底面层层底,随着 $\alpha$ 的增大,所有代表点的纵向应力均有显著增大,达40%~70%.

因此,沥青混合料各向异性特性对行车方向纵向应力影响较大,需要适当考虑.尤其是在层间接触较差时车辆发生启制动行为,各向同性假设会明显低估行车向的应力及变形.

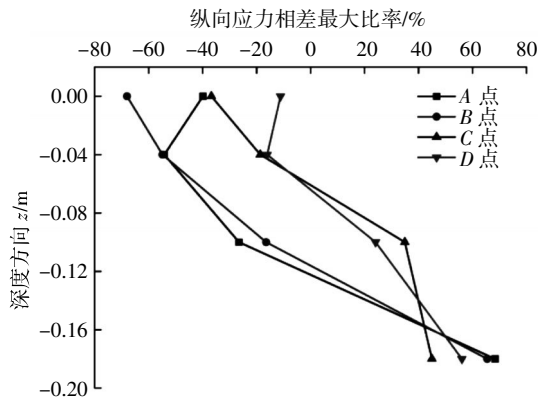


图4 纵向应力相差最大比率

Fig.4 The maximum ratio of vertical stress

### 3.3 横向应力计算结果对比

对横向应力,主要关注对沥青路面开裂产生影响的拉应力响应.根据计算结果,拉应力只出现在双轮间位置,并且均只发生在路表.如图5所示,A点处,随着横观各向同性系数 $\alpha$ 增大,拉应力显著下降,甚至在 $\alpha=3$ 时,拉应力变为了压应力;而B点处,随着横观各向同性系数 $\alpha$ 增大,拉应力随之增大,但是不明显.由此表明,我国现今采用的路面设计方法对横向应力响应而言是合适的.

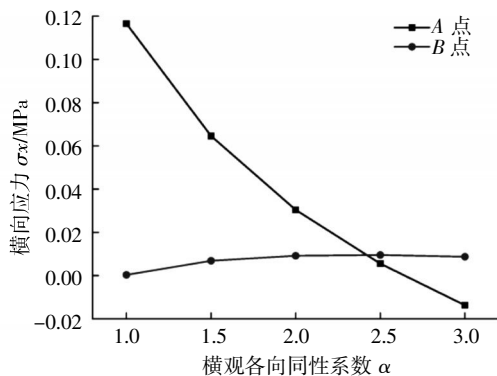


图5 路表拉应力对比

Fig.5 Comparison of tensile stress in the road surface

### 3.4 最大剪应力计算结果对比

如图5所示,标准荷载下,随着 $\alpha$ 的增大,其最大剪应力是呈非线性变化,且是逐渐增大的.由计算结果可知,所有最大剪应力出现的点均在路表下0.01 m处,并且最大差值不到0.03 MPa,对沥青路面力学响应影响有限,可以忽略.

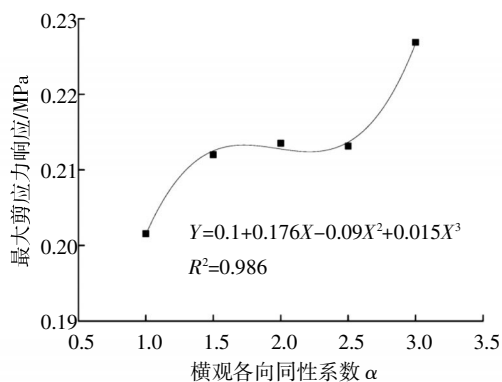


图6 横观各向同性系数对最大剪应力的影响图

Fig.6 The maximum effect of cross-anisotropic coefficient to shear stress

## 4 结语

a.横观各向同性情况下,沥青路面横、竖向应力及剪应力与各向同性情况下基本无变化.但是纵向应力区别较大,在路表及上面层层底,纵向应力最大减小比率达70%,底面层层底增大比率达40%~70%,影响明显.

b.目前我国采用的设计标准在弹性框架下不考虑沥青混合料的各向异性特征基本适用.但是在沥青结构层层间接触较差的情况下,各向同性假设会明显低估行车向的应力及变形,需适当考虑沥青混合料的各向异性特征.

## 致谢:

本研究同时得到国家自然科学基金(项目批准号:51278389)和湖北省交通运输厅科技项目(项目批准号:2013-731-2-5)的资助,在此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] MASAD Eyad, TASHMAN Laith, SOMEDAVAN Niranjan, et al. Micromechanics-based analysis of stiffness anisotropy in asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.
- [2] UNDERWOOD Shane, HEIDARI A H, Guddati Murthy, et al. Experimental investigation of anisotropy in asphalt concrete [J]. Transportation research record journal of the Transportation Research Board, 2005, 1929(1): 238-247.
- [3] SEYHAN U, TUTUMLUER Erol. Anisotropic Modular ratios as unbound aggregate performance indicators [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 409-416.
- [4] 胡小弟. 轮胎接地压力分布实测及沥青路面力学响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.  
HU Xiao-di. The tire ground pressure distribution

- measurement and the mechanical response analysis of asphalt pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in chineses)
- [5] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- SHEN Guan-lin, Hu Geng-kai. Mechanics of composites materials [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing, 2006. (in chineses)
- [6] DE Beer M, Fisher C, Jooste F J. Determination of pneumatic tyre/Pavement interface contact pressures under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements. 1997(1):179-227.
- [7] LOULIZI A, Al-Qadi I L, Lahouar S, et al. Measurement of vertical compressive stress pulse in flexible pavements; representation for dynamic loading tests[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1816(1):125-136.
- [8] Al-QADI I L, YOO P J. Effect of surface tangential contact pressure on flexible pavement response [J]. Journal of the association of asphalt paving technologists, 2007(76):663-692.
- [9] 中华人民共和国行业标准(JTG D50-2006).公路沥青路面设计规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Industry Criterion of the People's Republic of China (JTG D50-2006). Design rules of asphalt pavement for highway engineering [S]. Beijing: People Traffic Publishing, 2006. (in chineses)
- [10] UZAN J. Characterization of granular material [J]. Transportation Research Record, 1985:10-22.
- [11] UZAN J. Resilient characterization of pavement Materials [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(6): 453-459.
- [12] WANG L, HOYOS L R, WANG J, et al. Anisotropic properties of asphalt concrete: characterization and implications for pavement design and analysis [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5):535-543.
- [13] APARICIO RAMOS S I. Study of the asphalt pavement damage through nondestructive testing on overweight truck routes[D]. Texas: Master's thesis, Texas A&M University, College Station, 2003.
- [14] OH J H, LYTTON R L, FERNANDO E G. Modeling of pavement response using nonlinear cross-anisotropy approach [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(6): 458-468.
- [15] 鞠达. 沥青混凝土材料的各向异性及其对路面结构受力的影响[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- JU da. Anisotropy of asphalt concrete and the influence in pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in chineses)

## Mechanical response of asphalt pavement based on measured load and anisotropic properties

HU Xiao-di, TAO Xiong, BAI Tao

Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Hubei Province Wuhan 430074, China

**Abstract:** To investigate the influence of anisotropic characteristics of asphalt mixture on its reaction to the measured wheel load, finite element method (FEM) was adopted to calculate the pavement stress caused by the measured non-uniformly distributed tire load. The simulation was conducted in the frame of elastic theory and the asphalt mixture was reckoned to be cross-anisotropic. The orthotropic model in the commercial software ANSYS was used to simulate the characteristic of cross-anisotropic. The stresses introduced by the tire load mentioned above acting both on the vertical and horizontal directions, including three normal stress and shear stress, were compared for different material assumptions of isotropic and anisotropic. The results show that the anisotropic characteristic of asphalt mixture has a minimal effect on the vertical stress, transverse stress and the shear stress of the asphalt pavement. However, the divergence should not be ignored in the travelling direction compared to the situation that the asphalt mixture is taken to be isotropic. The specification being used now is basically appropriate in the frame of elastic theory with no anisotropic characteristic of asphalt mixture to be considered.

**Keywords:** asphalt mixture; anisotropic; measured wheel load; mechanical response

本文编辑: 陈小平