

文章编号: 1002-0268 (2007) 04-0001-06

# 路面载重车辆的荷载特征

孟岩<sup>1</sup>, 郭林泉<sup>2</sup>, 谈至明<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 200092; 2 广东广韶高速公路有限公司, 广东 清远 513100)

**摘要:** 在收集了我国公路上行驶的单、双后轴整车型的载重车辆轴载资料的基础上, 参考国家现行轴限规定与轮胎型号等标准, 从路面结构设计的角度上对轴载、轮胎气压、接地压力、轴型参数等荷载特征参数进行了整理分析, 采用统计回归方法找到了特征参数的规律和相互关系, 进而提出了供路面结构设计的轴型参数: 双轮间距、轮距、轴距按额定轴载进行分级的建议表, 以及以后轴额定轴载和轴载实载率为自变参量的轮胎接地压力的统一回归式和回归系数, 讨论了现行沥青路面结构分析中双轮中心距取 3 倍荷载当量圆半径宜根据额定轴载和轴载实载率确定适用范围。此研究结果为提高路面结构分析精度提供了可靠的荷载特征参数依据。

**关键词:** 道路工程; 路面结构; 回归分析; 荷载特征参数; 接地压力; 轮间距

中图分类号: U416.02

文献标识码: A

## Loading Characteristics for Trucks Operating on Highway

MENG Yan<sup>1</sup>, GUO Lin-quan<sup>2</sup>, TAN Zhi-ming<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Guangshao Expressway Co. Ltd., Guangdong Qingyuan 513100, China)

**Abstract:** The authors studied the relation between loading characteristics of trucks and pavement structure design, through analyzing the collected axle load data for single and double rear axle of straight trucks on national highway, in the light of the existing standards of axle load limit and tire type etc, taking into account of loading characteristics parameters, axle load, tire pressure and axle type etc to find out their co-relations with regression analysis. Based on the study axle type parameters used for pavement design including dual wheel spacing, wheel gauge, wheelbase according to the grade of rated load are proposed in form of table, with independent variable of the rating axle load and factual load factor, regressed coefficients and formula for tire contact pressure, at the same time, according to the rated axle load and factual load factor, the applicability of equivalent load radius equals to trinal distance between dual wheel centers in present asphalt pavement structure analysis is discussed. The research results can provide reliable truck loading characteristic parameters to improve the accuracy of pavement structure analysis.

**Key words:** road engineering; pavement structure; regression analysis; loading characteristics parameters; tire contact pressure; wheel gauge

## 0 引言

对于路面结构而言, 车辆荷载的特征值有轮胎接地压力、轴载和轴型参数, 其中, 轴型参数有双轮组中心距、轮间距和轴距。这些车辆荷载特征值与车辆类型、额定载重以及超载率等有关, 但现行的路面结构设计方法没有予以充分地考虑, 例如, 在我国水泥混凝土路面设计方法中<sup>[1]</sup>, 轴型参数取单一值: 双轮

中心距 0.34 m, 轮距 1.80 m, 轴距 1.40 m; 以弹性层状体系为设计理论的沥青路面设计方法中<sup>[2]</sup>, 双轮中心距取 3 倍的轮载接地当量圆半径。这些对车辆荷载的简化处理方法会影响路面结构分析的精度, 尤其会影响当量轴载换算精度。因此, 有必要弄清我国当前公路运输中载重车辆的荷载特征参数, 为路面结构设计提供可靠的依据。

收稿日期: 2006-03-08

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200231882235)

作者简介: 孟岩 (1979-), 男, 河北正定人, 博士研究生, 从事路面工程研究. (merya3@sohu.com)

## 1 我国载重车辆的轴载状况

国家强制性标准《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB1589-2004)<sup>[3]</sup>与交通部颁布的《超限运输车辆行驶公路管理规定》<sup>[4]</sup>规定了我国道路(公路与城市道路)上行驶的各类载重车辆的轴载最大值,其中,双轮组单轴的允许最大轴重为100 kN,双轮组双联轴(以下简称双后轴)的轴载最大限值为180 kN。世界各国的公路运输车辆轴载限制标准不尽相同,约3/4国家的单轴轴载限小于等于100 kN,也有些国家的大于100 kN,如法国、比利时、西班牙和一些法语区国家的单轴轴载限为130 kN,意大利的为120 kN等;双后轴的轴载限,近87%的国家小于等于180 kN,最高限额为200 kN,如英国、比利时、美国、伊朗、新加坡等国家<sup>[5]</sup>,见图1。

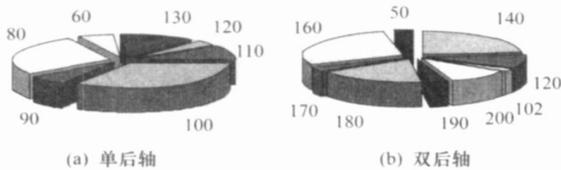


图1 世界各国车辆轴载限值分布图(单位:kN)

Fig 1 Distribution chart of axle weight limit values of trucks in the world (unit: kN)

尽管我国对载重车辆的轴载有明确规定,但监管不力,在搜集到的目前我国公路上行驶较为常见的,单后轴轴载>60 kN、双后轴轴载>120 kN的载重车辆中,有相当数量的进口车辆和引进国外生产线的国产车辆不满足我国现行的轴限标准要求,其中,26种单后轴整车型中有27%车型的单后轴超过100 kN轴限,最高为130 kN;35种双后轴整车型中有60%车型的双后轴超过180 kN轴限,额定双轴超过200 kN的车辆有10种车型,应属厂矿专用车辆,疑因监管不力而进入公路运输市场,见表1。

表1 超限车辆统计表

Tab 1 Statistics of overload trucks

车型	轴载 /kN	比例 /%	超限车型
单后轴	> 10	27	黄河 JN150、解放 CA155、红岩 CQ1191、日产 CKB450、依维柯 MP190、斯太尔 K38、斯达-斯太尔 I291
双后轴	(180, 200]	31	长征 CZ1260、长征 CZ361、日野 ZM440、日产 CWB520、拉巴 L26、大通 SH1261、北方-奔驰 ND2629、红岩 CQ1260、红岩 CQ3260、奔驰 NR2629K、重远 NY3260
	> 200	29	交通 SH361、黄河 JN360、红岩 CQ1300、红岩 CQ302、斯太尔 P43、斯达-斯太尔 I491、北方-奔驰 ND3228、北方-奔驰 ND2635、TATRA T815、TATRA T815S3

另外,公路运输车辆的超载超限现象十分普遍和严重,据广东、山西、湖南、广西等11个省市在1996~2001年间的公路运输车辆超载超限的调查<sup>[6]</sup>,额定载重大于2.5 t单后轴货车的单轴超限(10 t)最少有1/4左右,双后轴超限(18 t)的比例大于1/3,超载超限的幅度惊人,单轴最大值为17~31 t,双后轴最大值达29~51 t,实载率(实际载重/额定载重)最大值为280%~400%。2004年5月起开展的全国性的车辆超限超载治理,有效遏制我国的车辆超限超载现象上升的势头,但从根本上解决公路运输车辆的超限超载现象尚需时日。

## 2 轴型参数

### 2.1 双轮中心距

双轮中心距是指双轮组轮胎中心之间的距离。图2给出了载重车辆的额定后轴轴载与双轮间距的关系图,其中的“◇”点为额定轴载超过200 kN的双后轴车辆。从图2中可以看到,双轮中心距与额定轴载二者之间具有很好的相关性,其回归式为

$$d_s = 0.98P_s + 274, \quad (1)$$

$$d_d = 0.50P_d + 284, \quad (2)$$

式中, $d_s$ 、 $d_d$ 分别为单、双后轴双轮中心距,mm; $P_s$ 、 $P_d$ 分别为单、双后轴的额定轴载,kN。

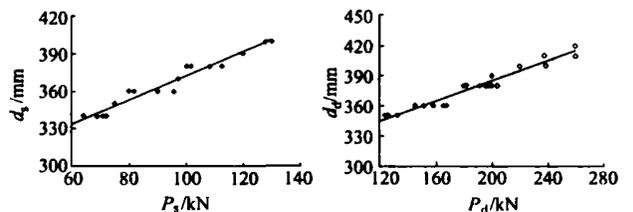


图2 双轮间距与额定轴载关系图

Fig 2 Correlation between rated axle load and dual wheel spacing

### 2.2 轮间距

轮间距是指后轴两侧轮中心之间的距离。国家和行业标准对轮间距无强制规定,不同汽车制造厂的车辆轮间距不尽相同。收集的各种载重车辆的轮间距与额定轴载之间关系见图3。从图3中可以看到,轮间距与额定轴载相关性不大,单后轴轮间距主要集中在1740、1800 mm线上,其中,集中在1740 mm的共有14种车型,占53.8%;集中在1800 mm的有8种车型,占30.8%;轮间距大于1800 mm的4个点为额定轴载超标车型,分别为红岩CQ1191(1810 mm)、依维柯MP190(1823 mm)、日产CKB450(1860 mm)、斯太尔K38(1820 mm)。双后轴的轮间距主要集中在1760、1800、1860 mm线附近,1760 mm的有

8 种车型, 占 22.9%; 1 800 mm 有 17 种车型, 占 48.6%; 1 860 mm 附近有 9 种车型, 占 25.7%; 高于 1 860 mm 的为老车型交通 SH361 (1 902 mm) 车型, 现在公路上已不多见。

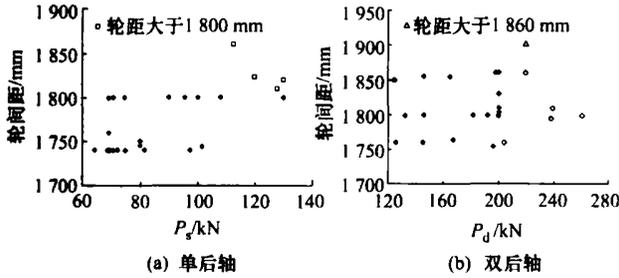


图 3 轮间距与额定轴载关系图

Fig 3 Correlation between rated axle load and wheel spacing

### 2.3 轴距

#### 2.3.1 前后轴距

前后轴距指整车型车辆的前轴到第一根后轴的距离。单后轴整车的前后轴距随着后轴额定轴载的增大而增长, 它们之间有很好的相关性, 其回归关系式见式 (3); 双后轴整车的前后轴距与额定轴载之间相关性较差, 其原因为双后轴整车中的一大部分是前后轴距较小的自卸车辆, 见图 4。

$$l_s = 26.79P_s + 2\ 079, \quad (3)$$

式中,  $l_s$  为单后轴的前后轴距, mm。

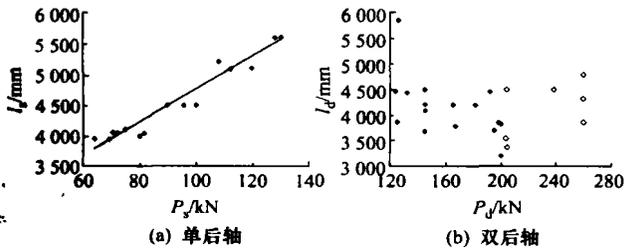


图 4 前后轴距与后轴额定轴载关系图

Fig 4 Correlation between axle rated axle load and axle spacing

#### 2.3.2 双后轴轴距

双后轴的轴距基本上在 1 270、1 320 mm 上, 轴距为 1 270 mm 的有 8 种车型, 占 22.9%; 轴距为 1 320 mm 的有 15 种车型, 占 42.9%; 轴距高于 1 320 mm 的有 12 种车型, 均为额定轴载超限的车型, 有日产 CWB520、斯太尔 P43、斯达-斯太尔 1491 等进口车型和红岩及北方-奔驰系列等国产车型, 见图 5。

综上所述, 在不考虑已属淘汰车型和超出国际上单、双后轴载最高限额标准的车型前提下, 注意到载重车辆的双轮中心距、轮间距和轴距越小则对路面结构越不利的路面结构特点。因此, 在路面结构分析

时, 载重车辆的轴型参数 (双轮中心距、轮间距、轴距) 值建议按其额定轴载确定, 如表 2 所示。

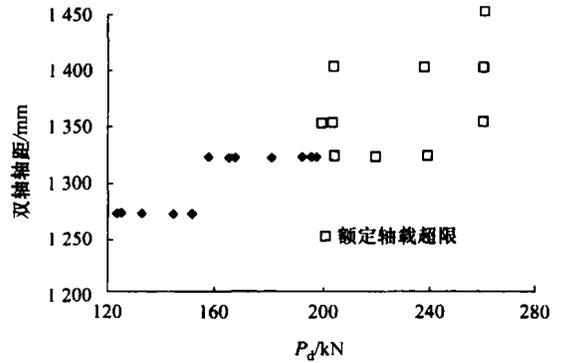


图 5 双后轴轴距与额定轴载关系图

Fig 5 Correlation between rated axle load and double rear axle spacing

表 2 载重车辆的轴型参数建议值

Tab. 2 Proposed values corresponding to axle type parameters of trucks

轴型	额定轴载 /kN	双轮中心距 /mm	轮间距 /mm	轴距 /mm
单后轴	[ 60, 80]	340	1 740	-
	( 80, 100]	360		
	(100, 120]	380		
	(120, 130]	400		
双后轴	[ 120, 140]	350	1 760	1 270
	(140, 160]	360		
	(160, 180]	380	1 320	
	(180, 200]			

### 3 接地压力

#### 3.1 轮胎类型和内压

轮胎的技术参数有名义断面宽度、轮辋名义直径、类型和层级 4 项, 其中, 名义断面宽度和轮辋名义直径采用 in 表示, 轮胎类型一般有子午线轮胎 (用 R 表示) 与斜交轮胎 (用 “-” 表示), 而层级是表示轮胎能承受负荷的特定强度标志, 用数字和 PR 表示<sup>[7,8]</sup>。例如, 9.00R20 10PR 是指名义断面宽度为 9.00 in、轮辋名义直径为 20 in、层级为 10PR 的子午线轮胎。

载重车辆的轮胎名义断面宽度随着额定轴载的增加而增大, 所有调查车辆的额定轴载与轮胎名义断面宽度的关系见图 6。由图 6 结果可推得如表 3 所示的不同额定载重的单、双后轴整车的轮胎名义断面宽度的代表值。

不同规格双轮并装轮胎的设计最大气压与相应单轮负荷见表 4<sup>[9,10]</sup>。从表 4 中可以看出, 相同型号的

表3 不同额定载重的轮胎名义断面宽度代表值

Tab 3 Nominal widths of tires corresponding to rated load ranges

轮胎名义断面宽度 /[mm(in)]	229(9.0)	254(10.0)	279(11.0)	305(12.0)
轴载/kN				
单后轴	[60, 80]	(80, 100]	(100, 120]	(120, 130]
双后轴	[120, 140]	(140, 160]	(160, 200]	-

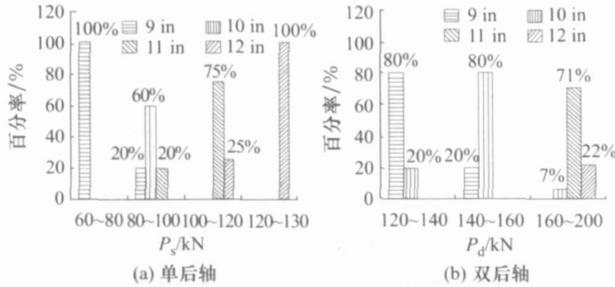


图6 不同额定轴载的轮胎名义断面宽度比例图

Fig 6 Proportional diagram of nominal widths of tires related to rated load ranges

表4 并装双轮轮胎的设计最大气压与相应单轮负荷表

Tab 4 Allowable internal air pressure of dual paralleled tires and corresponding load of a tire

轮胎层级 PR	10		12		14		16		18	
轮胎设计最大气压 $p_i$ /MPa	$P_i$	$P$								
与相应轮胎负荷 $P/t$										
9.00-20	0.49	1.84	0.60	2.05	0.70	2.26	0.81	2.50		
10.00-20			0.53	2.16	0.63	2.41	0.74	2.63	0.84	2.90
11.00-20			0.53	2.36	0.63	2.63	0.74	2.87	0.84	3.15
12.00-20					0.56	2.79	0.67	3.08	0.74	3.27
轮胎规格										
9.00R20	0.53	1.84	0.63	2.05	0.74	2.26	0.90	2.65		
10.00R20			0.56	2.16	0.67	2.41	0.77	2.63	0.93	3.00
11.00R20			0.56	2.36	0.67	2.63	0.77	2.87	0.93	3.25
12.00R20					0.60	2.79	0.70	3.08	0.77	3.27

注: 斜体为增强型轮胎的数据。

2004年孟书涛等人对轴载、轮胎内压与接地压力、接地面积三者关系进行了试验研究<sup>[13]</sup>, 试验用轮胎型号为12R22.5, 采用单轴双轮组, 测定轴载分6级加载, 轮胎内压为0.7、0.9、1.1 MPa, 实测轮胎接地面积  $A$  为轮胎接地的轮廓阴影面积减去轮胎花纹脱空的空白面积, 然后求得实测接地压力  $p$ 。将其试验数据代入式(5)、式(6), 可得到如图7所示的结果。

从图7中可以看到, 实测接地压力与Ikeda公式的计算值相差不大, 偏差在0.04 MPa以内; Verstbaeten公式给出接地压力上下限范围过大, 其下限与轮胎内压为0.8 MPa的实测接地压力  $p$  相当, 故实用意义不大。因此, 在已知轮胎内压的情况下, 接地压力  $p$  宜采用Ikeda公式估计。

### 3.3 额定轴载的基准接地压力

根据轮胎宽度与额定轴载的关系(表3), 轮胎

子午线轮胎与斜交轮胎在额定负荷相等的情况下, 子午线轮胎的胎压要高出斜交轮胎气压0.03~0.04 MPa, 对表4中的数据统计分析发现, 轮胎设计最大气压  $p_i$  与相应轮胎负荷  $P$  之间有如下关系:

$$P \propto p_i^{0.62} \quad (4)$$

### 3.2 接地压力、轴载、轮胎内压的关系

轮胎接地压力或接地面积与轴载的关系, 较常用的有日本Ikeda.T提出的轮胎接地压力与轴载和气压的经验关系式(5)<sup>[11]</sup>和比利时J.Verstbaeten提出的接地面积与轴载经验关系式(6)<sup>[12]</sup>。

$$p = 0.002 1P_s + 0.29p_i + 0.145, \quad (5)$$

$$A = 200P_s + 15200 \pm 7000, \quad (6)$$

式中,  $p$  为轮胎接地压力, MPa;  $p_i$  为轮胎气压, MPa;  $P_s$  为单轴轴载, kN;  $A$  为接地面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\pm 7000$  为保证率达到95%的离差范围。

的设计最大气压与相应单轮负荷关系(表4), 以及具有较好精度的轮胎接地压力与轮胎内压、轴载关系式(式(5)), 可以推出如表5所示的不同载重车辆以额定轴载  $P$  为最大负荷时的轮胎标准内压  $\hat{p}_i$ , 以及车辆满载(轴载为额定轴载)时的基准接地压力  $\hat{p}$ 。

表5 载重车辆额定轴载的轮胎接地压力(子午)

Tab 5 Tire contact pressure with rated axle load (meridian tire)

轴型	额定轴载 $P$ /kN	轮胎断面宽度 /[mm(in)]	轮胎标准内压 $\hat{p}_i$ /MPa	基准接地压力 $\hat{p}$ /MPa
单后轴	[60, 80]	229(9.0)	0.38~0.61	0.38~0.49
	(80, 100]	254(10.0)	0.50~0.71	0.46~0.56
	(100, 120]	279(11.0)	0.62~0.82	0.53~0.63
	(120, 130]	305(12.0)	0.67~0.76	0.59~0.64
双后轴	[120, 140]	229(9.0)	0.38~0.49	0.38~0.43
	(140, 160]	254(10.0)	0.40~0.50	0.41~0.46
	(160, 180]	279(11.0)	0.43~0.52	0.44~0.48
	(180, 200]	279(11.0)	0.52~0.62	0.48~0.53

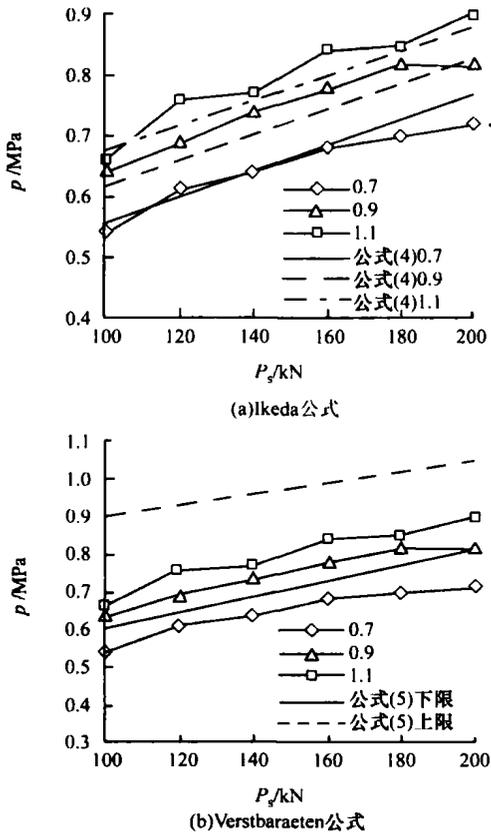


图 7 接地压力实测值与经验公式值比较

Fig 7 Comparison between measured and empirical formula's tire contact pressures

3.4 实际车辆的接地压力

我国当前车辆超载现象相当普遍和严重。为了提高轮胎的负荷能力, 车主擅自采用高层级压轮胎且盲目加大轮胎内压。假定超载车辆的轮胎负荷与轮胎气压满足关系式 (4), 则超载车辆的轮胎内压  $p_i$ 、轴载  $P$  与轮胎标准内压  $\hat{p}_i$  和额定轴载  $P$  关系可表示为

$$p_i = \left( \frac{P}{P} \right)^{0.62} \hat{p}_i, \quad (7)$$

式中,  $P/P$  可称之为轴载实载率, 记作  $\lambda$ 。若知道车辆的额定轴载和实际轴载的情况, 就可超利用式 (7) 和式 (5), 求出超载车辆的接地压力  $p$ 。

当车辆不满载 ( $\lambda < 1$ ) 时, 轮胎内压  $p_i$  可记为其轮胎标准内压  $\hat{p}_i$ , 则其接地压力  $p$  可直接应用式 (5) 求出。

综上所述, 无论载重车辆超载与否, 其轮胎接地压力  $p$  均可表示为其额定轴载  $P$  和轴载实载率  $\lambda$  的函数, 它们之间的关系可统一表示为

$$p = \lambda^b P, \quad (8)$$

式中,  $b$  为回归系数, 见表 6。

图 4 所示了单后轴整车的后轴额定轴载与前后轴

表 6 接地压力统一式的回归系数  $b$

Tab 6 Regressed coefficient $b$ in formula of tire contact pressure					
轴载 /kN	单后轴	[ 60, 80]	( 80, 100]	( 100, 120]	( 120, 130]
	双后轴	[ 120, 140]	( 140, 160]	( 160, 200]	-
$b$	$\lambda > 1$	0.56~0.61	0.61~0.64	0.65~0.67	0.67~0.68
	$\lambda \leq 1$	0.46~0.52	0.52~0.56	0.56~0.59	0.59~0.60

距之间有良好的相关关系, 因此, 可利用由静、动态的车辆称重仪测得的前后轴距判断其额定轴载, 进而求得其轴载实载率  $\lambda$ ; 双后轴整车等其他车型的额定轴载需采用其他方法加以识别。

4 荷载图式

水泥混凝土路面结构分析主要应用有限元等数值分析, 因此, 车辆轮胎接地面通常处理为矩形。轴载一侧双轮组荷载的图式如图 8 (a) 所示, 接地面宽度  $b$  可取轮胎断面宽度, 长度  $l$  则根据其负荷和接地压力求出。

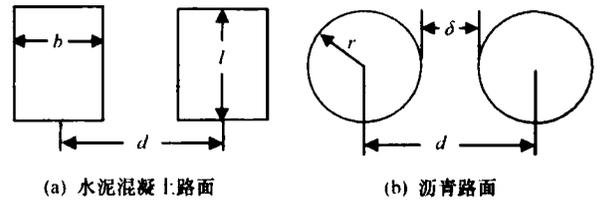


图 8 双轮组荷载图式

Fig 8 Schematic presentation of dual wheels load

以弹性层状体系为设计理论的国内外沥青路面设计方法中, 车辆荷载只考虑轴载一侧的轮载, 轮载的接地面视为圆形。对于双轮组荷载, 双轮中心距  $d$  取 3 倍的轮载当量圆半径  $r$ , 即 2 个当量圆之间间隙  $\delta$  恰好等于当量圆半径  $r$ , 见图 8(b)。这种处理方法对于车辆不超载 ( $\lambda \leq 1$ ) 时是恰当和稍偏保守的, 但是, 对于超载车辆来说, 这种处理方式转变为偏危险和不安全; 当轴载实载率  $\lambda$  较大时, 当量圆之间间隙  $\delta$  明显小于荷载圆半径  $r$ , 见表 7。因此, 对严重超载车辆不宜将轮间隙  $\delta$  视为与荷载当量圆半径  $r$  相同, 否则将使路面结构的应力和变形的计算值偏小。

5 结语

现行的路面结构设计方法, 对车辆荷载处理较简略, 没能很好地表征实际载重车辆的荷载特征, 尤其是超载车辆的情况。为此, 对目前我国公路上行驶的单、双后轮整车型载重车辆的荷载特征参数进行广泛收集和整理分析, 得到以下结果:

(1) 我国对载重车辆的轴限标准执行不力, 目前

表 7 不同轴载超载率条件下的轮间隙  
与当量圆半径之比- $\xi r$

Tab 7 Ratio  $\xi r$ -wheel spacing against equivalent circle  
radius under different overload level

轴型	额定轴 载/kN	双轮中 心距/mm	轴载实载率 $\lambda$							
			0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
单 后 轴	80	340	1.19	1.07	0.99	0.96	0.93	0.91	0.89	0.87
	100	360	1.20	1.08	1.01	0.97	0.95	0.92	0.91	0.89
	120	380	1.22	1.11	1.03	0.98	0.94	0.91	0.88	0.86
	130	400	1.23	1.12	1.05	1.01	0.99	0.97	0.95	0.94
	140	350	1.24	1.11	1.03	0.97	0.93	0.89	0.87	0.84
双 后 轴	160	360	1.21	1.10	1.02	0.96	0.92	0.89	0.86	0.84
	180	360	1.17	1.06	0.99	0.94	0.90	0.87	0.84	0.82
	200	380	1.23	1.11	1.04	0.98	0.94	0.91	0.89	0.87

公路上行驶较为常见的单、双后轴整车（单轴 > 60 kN、双后轴 > 120 kN）的车型中，分别约有 1/4、3/5 车型的额定轴载超出国家标准的轴限规定。

(2) 单、双后轴整车后轴的轴型参数：双轮中心距、轮距、轴距与后轴额定轴载具有较好的相关关系，通过分析归纳，提出了按额定轴载分级的双轮中心距、轮距、轴距建议值。

(3) 总结了轮胎的接地压力与轮胎规格（型号）、轮胎气压、额定轴载和实载率之间的相关关系，给出了以后轴额定轴载和轴载实载率为自变参量的轮胎接地压力统一回归式和回归系数。

(4) 在车辆不超载时，双轮中心距取 3 倍的轮载

当量圆半径是恰当和稍偏保守，但当车辆严重超载时，这种处理方式是偏危险和不安全。因此，双轮中心距宜根据其额定轴载和轴载实载率确定。

#### 参考文献:

- [1] JTJ D40-2002, 水泥混凝土路面设计规范 [S].
- [2] JTJ 014-97, 公路沥青路面设计规范 [S].
- [3] GB1589-2004, 道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值 [S].
- [4] 中华人民共和国交通部. 超限运输车辆行驶公路管理规定 [Z]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2000.
- [5] 孟书涛. 超载与我国现有公路工程技术水平的适应性分析 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (3): 138-139.
- [6] 交通部西部交通建设科技项目. 水泥混凝土路面断板分析及防治技术研究总报告 [R]. 上海: 同济大学, 2005.
- [7] 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册·设计篇 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [8] 庄继德. 汽车轮胎学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [9] GB9744-97, 载重汽车轮胎 [S].
- [10] GB/T19040-2003, 增强型载重汽车轮胎 [S].
- [11] HIMENO K, KAMIJIMA T, *et al.* Distribution of tire contact pressure of vehicles and its influence on pavement distress. Proceedings [C] // HICKSR G. 8<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavement. Seattle: International Society for asphalt Pavement, 1996: 128-140.
- [12] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [13] 孟书涛, 等. 轴载、轮胎内压与轴载换算的研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (6): 4-6.