文章编号：1002-0268（2000）01-0005-05

沥青路面超重车轴载换算初步研究

黄文元
（交通部公路科学研究所，北京 100088）

摘要：通过轴重调查，获得重载车对路面的荷载状况。针对一般和两种特殊状况，通过理论计算获得重载车弯沉与轴重关系，由此推得超重轴载下的沥青路面理论轴载换算公式，再综合天津市实测弯沉分析结果，得最后推荐公式。
关键词：沥青路面；超重车；轴载换算
中图分类号：U411 文献标识码：A

The Primary Research of Equivalent Factor of Overloaded Axle on Asphalt Pavement

HUANG Wen-yuan
（Research Institute of Highway，Beijing 100088，China）

Abstract: Based on the result of axle load survey，the loading condition of overloaded pavement is discussed. Then the theoretic relationship between axle load and deflection is calculated respectively to three different conditions（one ordinary，two special）. At last the axle conversion equation of overloaded axle on asphalt pavement，which is validated to some extent by the result of Tianjin deflection survey，is recommended.
Key words: Asphalt pavement；Overloaded vehicle；Axle load conversion

由于经济持续高速增长，新旧经济体制过渡期市场行为一定程度的无序性，运输者片面追求利益最大化，公路运输缺乏有效的执法等原因，我国公路普遍存在超限超载现象。在国道主干线和主要承担大宗货物（如建材、矿质原料、集装箱等）运输的道路上，实际行驶着大量轴重超过 13t 的车辆，这些车辆对路面的破坏影响是主导性的，但由于超出了现行《沥青路面设计规范》（JTJ014-97，以下简称“规范”）的适用范围，目前尚缺乏有依据地定量评估这一影响的手段，本文的目的是就此做一些探索。

1 重载交通的定义和界定

近年来，国际道路界有一个备受关注的名词——重任务（Heavy Duty）交通，它是指道路通车后交通量/累计当量标准轴次（*ESALs*）大大超过一般水平，路面性能衰减超常规发展的现象。在我国，这类情况习惯称之为重载交通。在发达国家，因为有比较健全的轴载管理机制，重载交通主要体现为货运向集装箱、大型化、多轴化方向发展，累计当量标准轴次基本能反映交通特性，所以一般以某个临界 *ESALs* 值来界定。以我国为代表的发展中国家，重载交通通常以车辆的大面积超限超载为特点，而且车型和超载程度随地域变化差别很大，*ESALs* 与实际通行的交通流量没有很好的关系，笔者认为宜以＞100kN 的轴次占总轴次的比重或绝对数来界定，具体标准有待进一步研究确定。

2 重载交通的现状

主要承担重载交通道路上的实际调查发现：标准载重约 5t 的中型货车（如解放、东风）实际载货量经常超过 10t；大型货车单后轴轴重达 16t 以上的现象并非鲜见，某些晋煤外运重型车改装后后轴重甚至高达 20～30t。笔者 1999 年 7～8 月对某国道南段进行了轴载调查，图 1 和图 2 为其典型断面的调查结果。该路为我国南北货运主干线，承担的车流以货运为主（货车占交通量 60％以上），货车主导车型是以

收稿日期：1999-09-20
作者简介：黄文元（1975—），男，江西吉安人，硕士研究生.

5t 额载为特征的中型汽车。从车型手册查得，这类车满载的后轴重在 7t 左右，而图中实测轴重以 12～15t 为多，反映了超载超限的严重程度，图 2 为根据车型参数和轴重调查结果得到的超载比（（实际载货-额载）/额载）分布图。

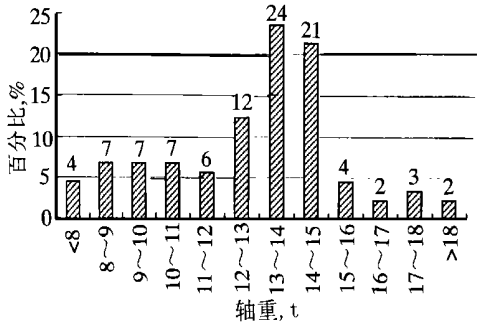

图 **1**　货车后轴轴载谱

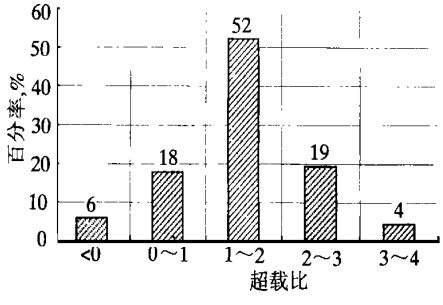

图 **2**　货车超载比分布图

3　重载车辆与路面作用的特点

受荷状态下汽车轮胎宽度方向的轮廓更接近直线而不是弧形，而且直线长度是一定的，所以绝大多数情况下轮胎与地面的接触面更象一个短轴固定的椭圆。只有在以额定轴载为中心的较小范围荷载下，接触面才看起来象个圆（图 3 为某国道轴载调查获得的单轴双轮典型轮迹，轴重＝16t，接地压力＝0.85MPa）。汽车一经安装成型，动力系统的最大功率就固定了，改造难度和费用均较大，超载汽车为了提高效益（集中体现为速度和油耗），多从减少行车阻力下手，大量采用高强轮胎，并加厚钢簧，使得货车轮胎压力普遍超过 0.7MPa（图 4 为某国道轴载调查轮压分布图）。另外还有一个事实不能忽视——轮胎间距（荷载圆中心距离）是不可能随超载程度的变化而改变的。

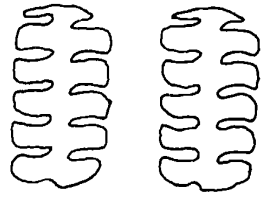

图 **3**　典型重载车轮迹

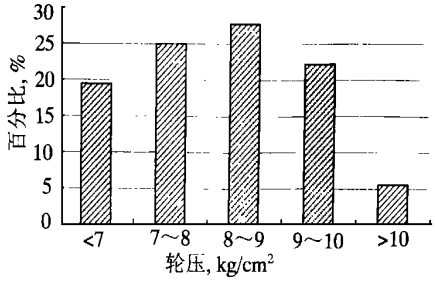

图 **4**　货车轮压分布图

双轮双圆，圆中心距等于 3 倍接地半径，接地压力 0.7MPa 的标准荷载图式不可以代表超载车对路面作用。如图 5 采用的各图式中，I、L、M 不同程度反映了超载时的路面受力状况。其中，图式 I 最接近于重载车辆行驶时路面受力的实际情况；图式 L 和 M 则反映了两种极端情况——气压与轴重等比例增加以维持接地面积不变，接地压力不变轮胎随轴重增加而塌落；图式 I、L、M 的结果能够涵盖重载车的使用范围；K 图式实际上是不存在的，但分析时能起到对照和验证作用。限于非中心对称荷载力学计算的复杂性，布载仍采用了当量圆方法。以下为 4 种图式及其说明。

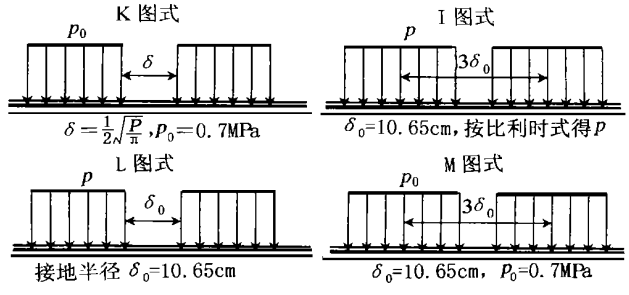

图 **5**　计算加荷图式

①K 图式：双轮双圆，圆中心距等于 3 倍接地半径，接地压力 0.7MPa（标准图式）。

②I 图式：轮压和接地面积均随轴载的增加而增加，圆心距保持 31.95cm 不变，这种图式最符合实际，因为承担越重货物运输的车，统计上越有采用高强高压轮胎的趋势。但由于国内尚缺乏这方面的调查资料，只能借用比利时接地面积与轴重经验关系式（$A=0.008P+152\pm70$。其中，A 为接地面积，cm^2；P 为轮胎荷载，N；±70 为保证率达到 90％的离差范围）。

③L 图式：接地半径与圆心距保持 10.65cm 和

31.95cm，轮压随轴重等比例增减。

④M 图式：轮压与圆心距保持 0.7MPa 和 31.95cm，接地半径随轴重增加而增加。

4 基本轴载换算公式

由参考文献〔2〕的分析，对单轴双轮主要车型弯沉值比 l_1/l_2 的简化公式为

$$\frac{l_1}{l_2}=\frac{p_1 d_1}{p_2 d_2}\cdot\frac{\omega_1}{\omega_2}\approx\frac{p_1}{p_2}\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{a} \tag{1}$$

或

$$\frac{l_1}{l_2}\approx\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{b} \tag{2}$$

其中，p 为接地压力，d 为接地圆直径，P 为轴重，a、b 为待定指数。

与设计弯沉值 $l_r=AN^{-c}$（N 为计算车道累计当量轴次，A、c 为回归系数）相联系，得不同轴载的设计弯沉比为

$$\frac{l_{r1}}{l_{r2}}=\frac{AN_1^{-c}}{AN_2^{-c}}=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{-c} \tag{3}$$

以（3）式代入（1）和（2）式，得弯沉等效轴载换算基本公式

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{p_2}{p_1}\cdot\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{a}\right)^{1/c} \tag{4}$$

和

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{b/c} \tag{5}$$

如上公式所示，轴载换算指数，除受弯沉比值关系式影响外，还取决于容许弯沉值公式指数（即交通量-容许弯沉值对数坐标图的斜率）。不同的数据不同方法汇总得到的容许弯沉公式，指数 c 有相当的变化：规范取 0.2，采用 1984 年北京市政设计院的数据回归得到的公式 $c=0.22$，TRRL 及哈尔滨、武汉两市半刚性容许弯沉公式 c 都约为 0.26。取上述 3 值的 $1/c$ 分别为 5、4.55、3.85。由于 $1/c$ 居于指数的地位，c 值的细小变化会引起实际换算当量的巨大变化。

在材料设计参数相同的情况下，路面厚度将主要取决于设计弯沉值 l_d，$l_d=A\cdot\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{b}{c}}\right]^{-c}$。由公式可见，由于 c 的变化对 l_d 的影响存在一个内在制约关系，而远没有对换算当量值大，实际算例的试算结果是 b 从 0.87 变为 1.00 以后，l_d 增至 1.45 倍，c 从 0.2 变为 0.26 时 l_d 增至 1.37 倍。

5 计算对象和思路

国家科技攻关项目“高等级公路半刚性路面基层沥青路面典型结构的研究”的主要成果之一是提出了东北、华北、黄土高原、西北、华东、中南和西南 7 个片区的半刚性路面典型结构。该成果是 6 个科研院所、16 个交通厅局历时 4 年，对 18 个省（市）现有高等级半刚性基层沥青路面结构及其使用性能广泛调查（66 条路的 243 个路段）研究的结果，基本代表了半刚性基层沥青路面的现状和现有设计方法下结构和厚度的常见组合。又鉴于半刚性基层沥青路面在高等级道路路面的统治地位，选用这些典型结构作为计算对象具有明显的现实意义。

每一片区先选取有特点的典型结构组，将其中最厚路面结构（交通量最大，土基最弱，选取 12 个）及同一行（土基等级不同，24 个结构）和同一列（交通量等级变化，36 个结构）的结构加上最薄路面结构(土基最强，交通量最小，12 个结构)用于计算，以寻求现有半刚性基层沥青路面重轴换算关系。

除此以外，选用了千万数量级直至 1 亿累计当量轴次交通量下设计的全厚式无机结合集料基层沥青路面结构（6 个），以推求未来可能采用的重载路面结构的重轴换算关系；考虑到判断重轴换算公式对较低等级沥青路面的适用性，还选取了几个非高等级沥青路面结构（二级 5 个三级 2 个）。

计算对象及荷载图式（详见前文 3）确定后，将每一个荷载图式施加到各个路面结构上进行弹性层状体系理论力学计算（每一结构和荷载图式计算 10～18t 9 个轴重），算得的所有 10t 以上轴重弯沉值与 10t 弯沉值及各自的轴荷参数共同代入式（1）和式（2），计算 a、b 理论值。

比如对 11cm 沥青混凝土（$E_3=1\ 200$MPa）＋30cm 水泥碎石（$E_2=1\ 500$MPa）＋35cm 水泥土（$E_1=550$MPa）及 $E_0=40$MPa 的路面结构施加轴重为 13.02t 和 10.01t 的 I 荷载图式，理论计算得 $l_{13}=5.24$、$l_{10}=4.02$（单位 0.01cm），则 $b=\ln(5.24/4.02)/\ln(13.02/10.01)=1.008\ 1$。

6 计算结果分析

表 1 为各个片区在不同交通量下推荐的典型结构计算结果统计值，从中可见均值之间的差距则多在 0.02 左右，分级统计的变异系数多在 1%以下，最大仅有 1.9%。显示 a、b 受路面结构组成和厚度的影响很小，也即是对厚度与荷载圆半径比、各层模量比不敏感。

表 1 反映的另一个重要信息是荷载图式对各系数值的明显影响。针对图式 K 的计算说明如果保持标

准图式加荷，单纯增加荷载对换算因次影响不大，从另一个角度证明了各系数受层厚与荷载圆半径的比值影响很小。而作为对比的另一方，3 个重载图式推得的系数计算结果都明显且一致比图式 K 要大，而且与K 图式一样，每一图式的计算结果都能保持小的离散性，I、L、M 三图式获得的 a、b 均值相差很小(均值最大差距分别只有 0. 023 和 0. 028)，完全可以统一推荐一组值。

进一步分析还可以发现与常规认识似乎抵触的地方。日常经验表明：轮胎压力大对路面破坏大，所以换算结果应该大。但本次计算结果显示：在同是超重图式的情况下，计算弯沉及最后得到的弯沉等效换算系数，其由大到小排序都是图式 M、I、L，而轮胎压力次序则恰好相反。合理的解释是：轮胎压力大使路面破坏更集中于路面表层，弯沉等效原则下的轴载换算公式主要保障路面结构承载力，与路面面层的耐久性并无直接关系。由此可见，有必要进一步建立车辙等效原则下的轴载换算公式，或者开发能模拟重载条件的混合料设计和检测方法，以分别从重载道路的两大通害(疲劳和车辙)的角度，充分考虑行车对路面的影响。

厚度及图式影响汇总表　　表 **1**

交通等级	分析项目	图式 I		图式 L		图式 K		图式 M	
		a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
T4	均值	2. 035	1. 012	—	1. 000	1. 792	0. 898	2. 042	1. 023
	标准差	0. 017	0. 055	—	0. 004	0. 020	0. 010	0. 012	0. 005
	Cv	0. 009	0. 005	—	0. 004	0. 011	0. 011	0. 006	0. 005
T3	均值	2. 037	1. 013	—	1. 001	1. 799	0. 901	2. 044	1. 024
	标准差	0. 020	0. 006	—	0. 004	0. 021	0. 011	0. 013	0. 007
	Cv	0. 010	0. 006	—	0. 004	0. 012	0. 012	0. 007	0. 007
T2	均值	2. 035	1. 012	—	1. 002	1. 808	0. 906	2. 039	1. 021
	标准差	0. 014	0. 004	—	0. 004	0. 016	0. 008	0. 011	0. 005
	Cv	0. 007	0. 004	—	0. 004	0. 009	0. 009	0. 005	0. 005
T1	均值	2. 028	1. 010	—	1. 000	1. 805	0. 904	2. 034	1. 019
	标准差	0. 013	0. 004	—	0. 003	0. 019	0. 009	0. 014	0. 006
	Cv	0. 007	0. 004	—	0. 003	0. 011	0. 010	0. 007	0. 006
CZ	均值	2. 049	1. 016	—	1. 002	1. 791	0. 897	2. 051	1. 028
	标准差	0. 022	0. 006	—	0. 006	0. 012	0. 006	0. 019	0. 009
	Cv	0. 011	0. 006	—	0. 006	0. 007	0. 006	0. 009	0. 008
小结	均值	2. 035	1. 012	—	1. 001	1. 800	0. 902	2. 041	1. 022
	标准差	0. 018	0. 005	—	0. 004	0. 019	0. 010	0. 014	0. 007
	Cv	0. 009	0. 005	—	0. 004	0. 011	0. 011	0. 007	0. 007

说明：*ESALs* 值为 $T_1 \leqslant 5\times 10^6$，$5\times 10^6 \leqslant T_2 \leqslant 8\times 10^6$，$8\times 10^6 \leqslant T_3 \leqslant 12\times 10^6$，$12\times 10^6 \leqslant T_4 \leqslant 18\times 10^6$，$2\times 10^7 \leqslant CZ \leqslant 10\times 10^7$

土基模量是影响结构承载力的重要因子，因此有必要单独研究它对轴载换算因次的影响，计算结果和表 2 证明了这一影响的可忽略性，3 个土基模量计算的 a、b 均值，相差在 0. 013 以下，所有 a、b 的极端差距分别仅有 0. 183、0. 052。

土基模量影响汇总　　表 **2**

计算项目	荷载图式 S_3		荷载图式 S_2		荷载图式 S_1	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
均值	2. 044	1. 015	2. 047	1. 016	2. 035	1. 012
标准差	0. 019	0. 006	0. 021	0. 006	0. 017	0. 005
Cv	0. 009	0. 005	0. 010	0. 006	0. 009	0. 005

说明：表中 E_0（MPa）值 $30 \leqslant S_1 \leqslant 45$，$45 \leqslant S_2 \leqslant 65$，$65 \leqslant S_1$

汇总总表　　表 **3**

计算项目	图式 I		图式 L		图式 K		图式 M	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
均值	2. 038	1. 013	—	1. 001	1. 781	0. 892	2. 039	1. 022
标准差	0. 019	0. 006	—	0. 005	0. 034	0. 017	0. 014	0. 006
Cv	0. 009	0. 006	—	0. 005	0. 019	0. 019	0. 007	0. 006

表 3 是计算结果的汇总总表，从总体上再次证明了各系数的稳定性，由表最后推荐适于重载交通的理论系数值：$a=2$，$b=1$，由此得到的适应重载交通弯沉等效轴载换算公式为

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{p_2}{p_1}\cdot\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right)^{1/c} \quad 和 \quad \frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/c}$$

重载交通造成的路面过早破坏，已引起有关部门的重视，某些地区已针对性地开展了一些研究工作，积累了一定数量的数据。天津市有关方面更遵照专家建议，在主要承受重载的津围公路与京津塘高速公路的双向车道上进行了重载车型（单后轴 18t）与标准车型（单后轴 10t）弯沉的对比试验，积累了宝贵的实测资料，图 6 为在津围 k13＋500～k108＋000 段双向 20m 一测点，1km 计算一代表值数据的基础上汇总的弯沉比值分布图。

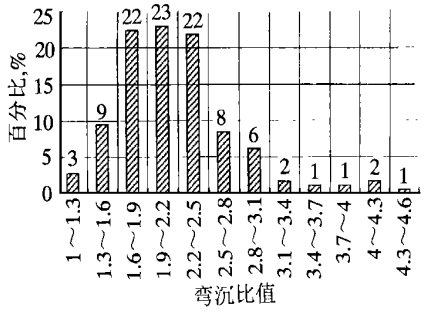

图 **6**　18t，10t 弯沉比值分布图

表 4 为对该分布的正态分布拟合优度检验的计算表，其中，筛除了 2 倍标准差以外的数值（即大于 3. 1 的值）。　　表 **4**

j	D_j	n_j	$\hat{p_j}$	$n\hat{p_j}$	$\frac{(n_j-n\hat{p_j})}{n\hat{p_j}}$
1	＜1. 3	5	0. 0401	6. 8571	0. 503
2	1. 3～1. 6	17	0. 0978	16. 7238	0. 005
3	1. 6～1. 9	40	0. 1957	33. 4647	1. 276
4	1. 9～2. 2	41	0. 2535	43. 3485	0. 127
5	2. 2～2. 5	39	0. 2235	38. 2185	0. 016
6	2. 5～2. 8	15	0. 1276	21. 8196	2. 131
7	＞2. 8	14	0. 0618	10. 5678	1. 115
和		171			5. 173

由表 4 知 $\chi^2=5.173<\chi^2_{0.9}(4)=7.779$，故可以认为 $l_{18}/l_{10}\sim N$（2. 098，0. 456）。由数理统计理论知，正态分布期望值的矩估计、极大似然估计、无偏估计均为其平均值，故可由实测结果取 $l_{18}/l_{10}=2.098$，将此值代入式（2）计算，得 $b=1.26$。

理论值和实测值出现一定程度的偏差是源于路面材料实际存在的弹性非线性性质。材料应力级位的增加，变形以超过荷载增加速度的比例增长，导致弯沉增速加剧。考虑到实际行驶车辆对材料作用效果较之静态弯沉测量时更接近于线弹性，最后 a 的推荐值采用实测和理论结果的平均值，即 $b=(1.26+1.00)/2=1.13$。若采用规范的容许弯沉公式，$c=0.2$，则轴载换算因次为 5. 65；若取参考文献 [3] 推荐的容许弯沉公式，$c=0.26$，则轴载换算因次为 4. 35。

取I 图式时 18t 向 10t（4）换算，联立（4）、（5）式，算得 $a=2.267$。

7　结语

（1）调查表明，我国公路存在较严重的超限超载现象（重载交通），重载车对路面的施力图式与标准图式有较大的不同。这一差异使得重载车对路面的结构性破坏增加。

（2）大量理论计算和天津津围公路弯沉实测结果均表明，超重图式下的弯沉值较之标准图式有较大的增加，重载车的轴载换算因次应较现沥青路面设计规范有所提高，理论计算的推荐值为 $a=2$，$b=1$，实测估计值 b 取 1. 26。考虑到实际路上情况介于二者之间，最后推荐值取 $b=1.13$，$a=2.26$。

（3）接地压力的增大使荷载对路面上部结构的压应力增大，但弯沉值却无此趋势，重载交通对路面更高的结构承载力和面层稳定性要求要分别考量。

参考文献：

[1]　沙庆林．高等级公路半刚性基层沥青路面．人民交通出版社，1998.

[2]　林绣贤．柔性路面结构设计方法．人民交通出版社，1988.

[3]　交通部公路科学研究所等．“高等级公路半刚性基层沥青路面典型结构的研究”总报告，各分报告．1995.

[4]　林绣贤．沥青路面设计中轴载换算方法的研究．1996 年道路工程“高等级公路与科技进步”学术会议论文集.