

超薄水泥混凝土路面荷载应力分析

胡长顺 马 翥

长安大学, 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064

摘要: 采用三维等参有限元法, 分析计算了层间接触状况、路面板厚度、平面尺寸、 E_c/E_s 及沥青层等因素对超薄水泥混凝土路面荷载应力的影响。分析表明, 板厚对荷载应力的影响程度与 E_c/E_s 比率、板平面尺寸相关。 E_c/E_s 越大, 板平面尺寸越大, 板厚对荷载应力的影响越明显。当板厚 $h_c=7$ cm时, 如果将板平面尺寸控制在 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 以下, 对减小荷载应力效果明显。如果保证层间完全连续接触, 则有利于减小荷载应力。路面板越薄, 沥青层厚度对荷载应力的影响越明显。保证足够厚的有效沥青下卧层对UTW路面的使用性能有十分重要的作用。

关键词: 超薄水泥混凝土路面; 荷载应力; 三维等参元; 层间接触状况; 板厚度; 沥青层

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2003)01-0107-06

Analysis of Loading Stress of UTW

HU Chang-shun MA Biao

Specific Region Highway Engineering Key Laboratory
of the Ministry of Education, Chang'an University, Xian 710064, China

Abstract: In this paper, loading stress of ultra-thin whitetopping (UTW) pavement is calculated with the finite element of three-dimensional isoparametric element. In the basis of these results, the effects of the interface conditions between whitetopping and existing AC, the thickness and the joint spacing of UTW, ratio of E_c/E_s , and the existing AC on the stress are analyzed. Results indicated that the influence of the thickness is correlated with the joint spacing and the ratio E_c/E_s . With the increasing of plane size and the ratio of E_c/E_s , the influence is more evident. Keeping the interfaces continuous touchiness is favorable to reduce the loading stress of UTW. It is very important for the performance of UTW to ensure sufficient thickness and quality of AC.

收稿日期: 2003-05-13

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2001C02)

作者简介: 胡长顺(1955-), 男, 陕西扶风人, 长安大学公路学院院长, 教授、博导、博士。

Key words :Ultra-thin whitetopping (UTW) ,loading stress ,three-dimensional isoparametric element , interface conditions , thickness of UTW, existing AC.

超薄水泥混凝土路面 (Ultra-thin whitetopping, 简称 UTW) 是指厚度为 50 ~ 100 mm、接缝间距较小 (0.6 ~ 1.8 m) 的混凝土罩面层粘结于旧沥青路面上形成的路面结构。UTW 路面的研究, 在美国进行的较多, 主要是采用铺筑试验路的方法对 UTW 路面在荷载作用下的使用状况进行评价^[1~4], 定性分析各种因素对 UTW 路面使用性能的影响, 但是, 尚未进行荷载应力计算与分析。本文根据 UTW 路面的特点, 在计算分析中将 UTW 视为面板, 板下旧沥青路面及以下结构层视作综合地基。路面结构计算模型取为弹性半空间地基上的有限尺寸四边自由弹性板。为了模拟实际的 UTW 路面板与旧沥青路面的层间接触状况, 引入正交各向异性层间接触模型以实现层间完全连续与滑动

两种极端情况; 采用三维八结点等参元法分析了板厚、板平面尺寸 (板接缝间距)、板与综合地基模量比 E_c/E_s 对荷载应力的影响。采用弹性三层体系模型, 计算分析了铣刨后沥青层厚度和弹性模量对应力的影响。

1 完全连续接触时荷载应力分析

1.1 板平面尺寸对荷载应力影响分析

计算用参数为: 板平面尺寸为 0.6 ~ 1.8 m、每 0.2 m 一级; 板厚 $h_c=5 \sim 10$ cm、每 1 cm 一级; 泊松比 $m_c=0.15$; $E_c/E_s=300$; 地基泊松比 $m_s=0.30$ 。轮载等效为 20 cm × 18 cm 矩形荷载, 轮压为 0.7 MPa; 以板纵缝边缘中部作为临界荷位, 地基地面固定, 其余四周垂直面为自由边, 计算结果如图 1。

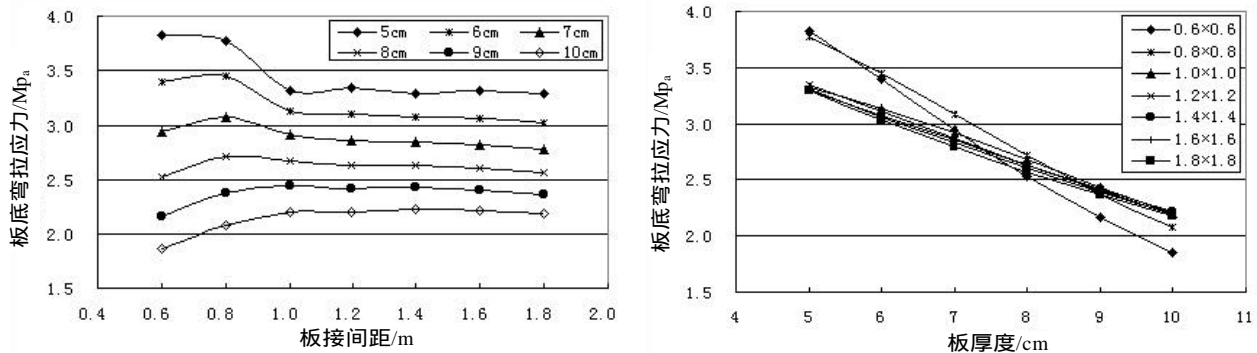


图 1 平面尺寸与荷载应力关系图

计算结果表明, 当板平面尺寸大于 1.0 m × 1.0 m 时, 对荷载应力 $S_{y \max}$ 影响很小; 当板厚为 5 cm 时, 平面尺寸在 1.0 m × 1.0 m ~ 1.8 m × 1.8 m 之间变化时引起的荷载应力值变化范围为 0.5% ~ 1.6%; 当板厚度为 8 cm 时, 应力值变化范围为 0.04% ~ 1.7%。当平面尺寸小于 1.0 m × 1.0 m 时, 荷载应力变化曲线明显存在反弯现象。利用此图可以在路面板厚度确定的情况下分析不同平面尺寸对其荷载应力的影响程度; 当平面尺寸大于 1.0 m × 1.0 m 时, 平面尺寸对荷载应力的影响可以不考虑, 当平面尺寸小于 1.0 m × 1.0 m 时, 必须对荷载应力进行适当修正。

1.2 板厚度对荷载应力影响分析

$$(E_c=28000 \sim 35000 \text{ MPa } E_s=60 \sim 4000 \text{ Mpa})$$

计算参数: 板厚 $h_c=5 \sim 10$ cm、每 1 cm 为一级; 板弹性模量 $E_c = 28000 \sim 38000$ MPa; 板平面尺寸为 1.2 m × 1.2 m; 综合地基弹性模量 $E_s = 60 \sim 400$ MPa, 其它参数同前, 计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 随板厚的增大, 荷载应力明显呈线性减小趋势; 随 E_c/E_s 的减小, $S_{y \max}$ 随 h_c 线性变化的斜率逐渐减小; 这表明, E_c/E_s 越大, 板厚对荷载应力影响越大, 增大板厚对减小荷载应力作用更明显。

1.3 E_c/E_s 对荷载应力影响分析

为了分析 E_c/E_s 对荷载应力的影响,分别用固定 E_c 变 E_s 和固定 E_s 变化 E_c 两种方式进行对比计算分

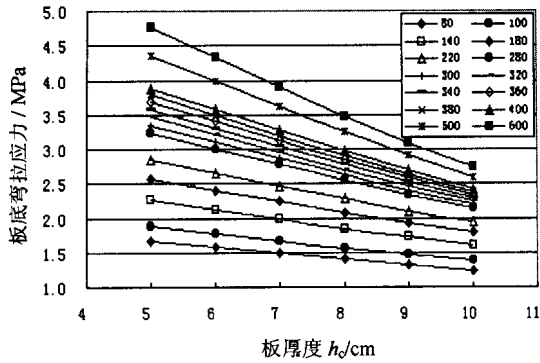


图2 板厚度与荷载应力关系图

析,计算结果如图3。

由图看出,随 E_c/E_s 的增大,荷载应力呈增长趋势,且板厚 h_c 越大,曲线越平缓。

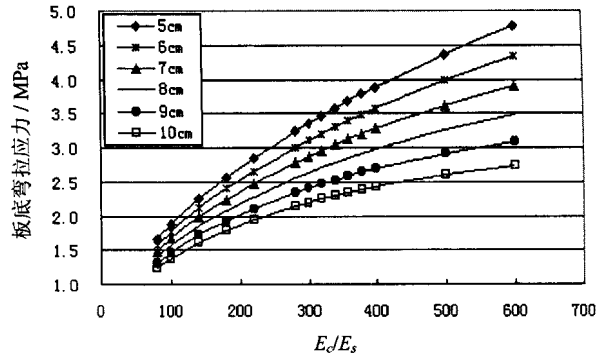


图3 E_c/E_s 与荷载应力关系图

2 滑动接触时荷载应力分析

2.1 板平面尺寸和厚度影响分析

计算参数:板平面尺寸 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \sim 1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 、每 0.2 m 为一级; $E_c/E_s=300$; $h_c=5 \sim 10\text{ cm}$,每 1 cm 为一级;其它参数同前。计算结果如图4与图5所示。

随板厚的增大,荷载应力呈减小趋势。与连续接触时不同之处在于:连续接触时基本为线性变化,而滑动接触时呈幂函数曲线变化,相关系数均在 0.9995 以上。随板厚的增大,曲线越来越平缓,即板厚对 $s_{y\max}$ 的影响逐渐减小;板平面尺寸越大,曲线越陡(即斜率越大),板厚对 $s_{y\max}$ 的影响越明显。随

平面尺寸的增大,荷载应力 $s_{y\max}$ 逐渐增大,若板厚越小,相应的 $s_{y\max}$ 越大,则其增大越明显。由图4可以看出,当板厚度 $h_c=7\text{ cm}$ 时,变化曲线较陡,即板厚对荷载应力影响明显,且平面尺寸越大时越明显;平面尺寸大于 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 后,影响曲线接近平行。同时,由图5也可以看出当板厚 $h_c=7\text{ cm}$ 时,荷载应力随平面尺寸线性变化的斜率较大,且平面尺寸越小,斜率越大。由此可知:当板厚 $h_c=7\text{ cm}$ 时,板平面尺寸宜控制在 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 以下,对减小荷载应力 $s_{y\max}$ 效果明显。这点与美国联邦公路局试验路研究结果相一致。

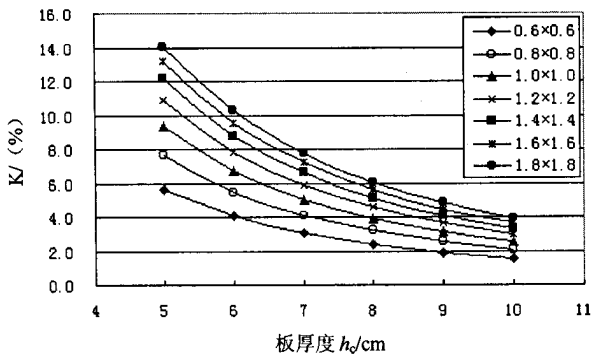


图4 层间滑动接触时板厚度与荷载应力关系图

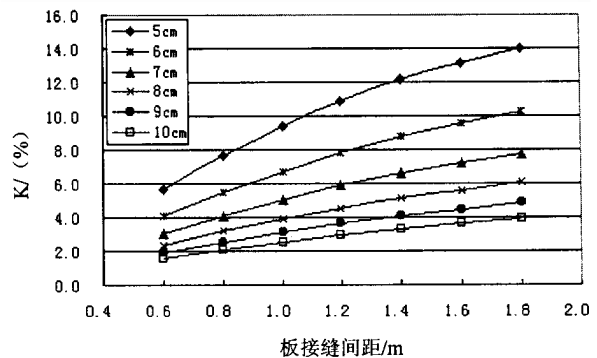


图5 层间滑动接触时板平面尺寸与荷载应力关系图

2.2 完全连续与滑动接触时，板平面尺寸和厚度对荷载应力影响对比分析

对比分析中，以层间接触状况不同引起的

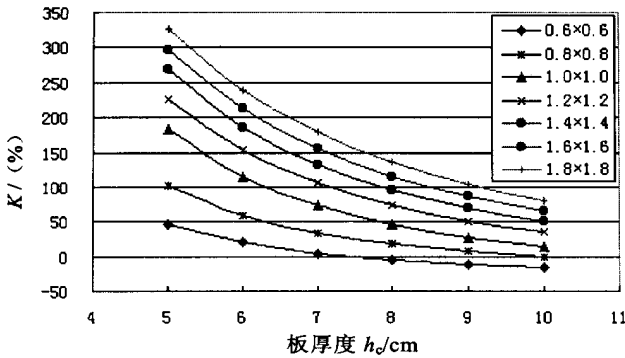


图6 板厚与K关系图

增大。从图6看出，当平面尺寸为0.6 m×0.6 m和0.8 m×0.8 m时，K随板厚变化的曲线明显缓于其他平面尺寸时的曲线，尤其是板厚越薄时这种趋势越明显。由图7同样可以得出，当板平面尺寸小于1.0 m×1.0 m后，K随平面尺寸变化的曲线斜率明显增大，且板越薄斜率增大越明显。因此，对于板厚较薄时，选用较小的平面尺寸，有利于UTW路面的使用性能。

由图7可以明显看出，当板厚度hc=8 cm时，K随平面尺寸呈线性变化；当板厚hc=7 cm时，在平

荷载应力变化率K为指标。K的定义式为：

$$K = (s_{滑} - s_{连}) / s_{滑} \times 100\%$$

计算结果示于图6与图7中。K值随板厚的增大而减小，随平面尺寸的增大而

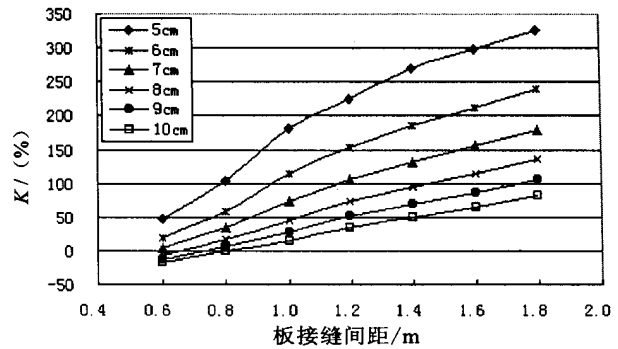


图7 板平面尺寸与K关系图

面尺寸为1.0 m×1.0 m时变化曲线明显出现拐点，这种现象在板越薄时表现得越明显。因此，当板厚hc

8 cm时对图中的曲线整体按线性模型 $K=aL+b$ (L为接缝间距,单位m)进行回归分析；当板厚hc=7 cm时以平面尺寸1.0 m×1.0 m为分界值分别对曲线进行局部线性回归分析，结果列于表1中。通过试算可知，利用以上回归公式计算得到的结果与有限元解的误差均在10%以内。

综合以上分析结果，由于超薄水泥混凝土路面在

表1 板厚度、平面尺寸与荷载应力回归分析

板厚度/cm	平面尺寸小于 1.0 m×1.0 m			平面尺寸大于 1.0 m×1.0 m		
	回归系数		相关系数 R^2	回归系数		相关系数 R^2
	a	b		a	b	
5	337.75	-159.58	0.9892	179.09	9.3099	0.9870
6	238.03	-125.97	0.9905	153.80	-34.406	0.9928
7	173.14	-101.71	0.9937	130.17	53.648	0.9952
8	$a=119.37 \quad b=-75.2$		$R^2=0.9958$			
9	$a=98.241 \quad b=-70.266$		$R^2=0.9981$			
10	$a=81.892 \quad b=-65.433$		$R^2=0.9990$			

实际使用过程中，随着行车荷载和自然因素的综合作用，路面板与综合地基之间处于连续与滑动接触之间的过渡状态，因此，在进行路面结构设计中计算荷载应力时应根据以上的分析结果，尽量控制板的平面尺寸不能过大，对不同的板厚按照以上回归公式，考虑层间接触

状况对荷载应力的影响，选取适宜的板平面尺寸。

3 沥青层对荷载应力影响分析

UTW路面试验路研究结果表明，旧沥青路面铣刨

后剩余沥青层的厚度和品质对 UTW 路面的使用性能具有明显影响。因此，本文采用弹性三层体系模型，将 UTW 路面板视作面层，沥青层视为基层，旧沥青路面基层以下部分视为综合地基。假定沥青层与综合地基之间为完全连续接触，UTW 路面板与沥青层之间分别选取完全连续和滑动接触两种极端情况进行分析。研究刨后沥青层厚度和弹性模量对 UTW 路面荷载应力的影响规律。

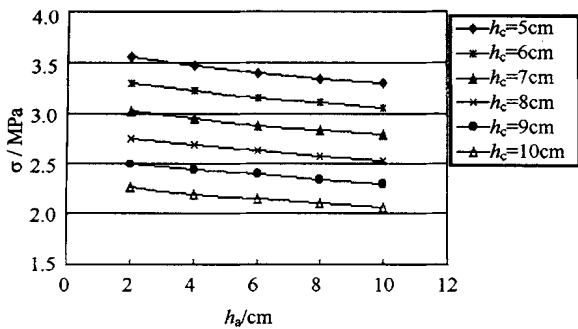


图 8 h_c 、 h_a 与应力关系图 ($E_s = 100 \text{ MPa}$)

由上图可知，路面荷载应力随沥青层厚度基本呈线性变化，且斜率与 E_s 有关。对于相同的 E_s ，随路面板厚度的增大，荷载应力随 h_a 线性变化的斜率逐渐减小。表明路面板越薄，沥青层厚度对荷载应力的影响越明显，保证足够厚的有效沥青下卧层对 UTW 路面的使用性能更加重要。

3.2 沥青层弹性模量对荷载应力影响分析

计算中取： $E_s = 57、85、121、242、425 \text{ MPa}$ ，

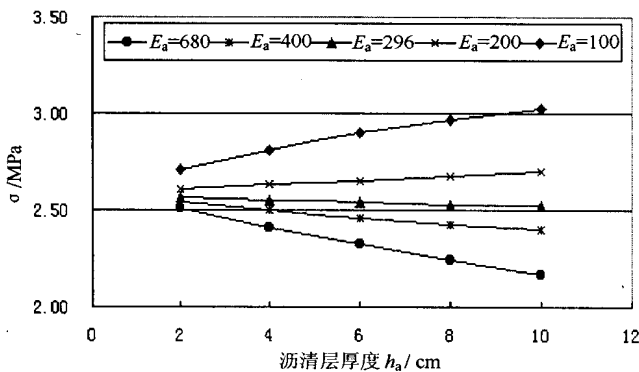


图 10 E_a 、 h_a 与应力关系图 ($E_s = 121 \text{ MPa}$)

3.1 沥青层厚度对荷载应力影响分析

计算中取： $E_c = 3.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、 $E_a = 400 \text{ MPa}$ 、 $E_s = 100、121、155、189、242 \text{ MPa}$ ， $h_c = 5 \sim 10 \text{ cm}$ ，每 1 cm 一级， $h_a = 2 \sim 10 \text{ cm}$ ，每 2 cm 一级， $m_1 = 0.15$ ， $m_2 = 0.25$ ， $m_3 = 0.30$ ，地基计算尺寸为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ，荷载作用位置为临界荷位，有限元计算结果如图 8、图 9。通过试算可知，完全连续和滑动层间接触时，沥青层对荷载应力的影响规律基本相同。

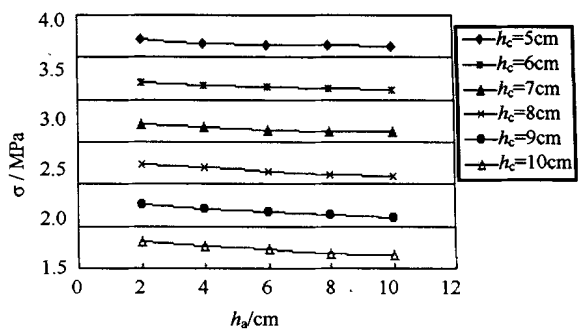


图 9 h_c 、 h_a 与应力关系图 ($E_s = 155 \text{ MPa}$)

$h_c = 8 \text{ cm}$ 其余参数同前 计算结果如图 10 与图 11 所示。

由图可知，应力随 h_a 呈线性变化，但随着 h_a 的减小，沥青层厚度对荷载应力产生负效应。即表明当沥青层品质较差时，相当于在路面板与地基之间存在一层软弱夹层，不利于 UTW 路面的使用，在修筑时应采取措施进行处治。当沥青层模量大于一定值（相对于 E_s 而言）后，可以明显减小荷载应力。

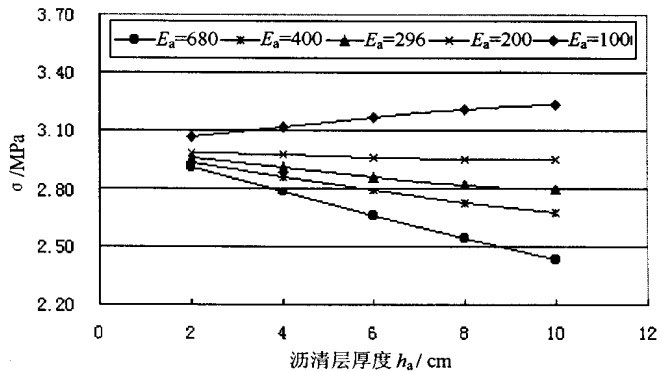


图 11 E_a 、 h_a 与应力关系图 ($E_s = 85 \text{ MPa}$)

4 结 语

(1) 在层间完全连续接触状况下, 随板厚的增大, 荷载应力呈线性减小趋势, 并且, E_c/E_s 越大, 板厚对其影响越明显。

(2) 在层间滑动接触时, 随板厚的增大, 荷载应力呈减小趋势。与连续接触时不同之处在于连续接触时基本为线性变化, 而滑动接触时呈幂函数曲线变化。随板厚的增大, 曲线越来越平缓, 即板厚对 $s_{y\max}$ 的影响逐渐减小, 而板平面尺寸越大, 曲线越陡, 这时, 板厚对 $s_{y\max}$ 的影响越明显。当板厚 $h_c = 7\text{ cm}$ 时, 若将板平面尺寸控制在 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 以下, 则对减小荷载应力 $s_{y\max}$ 效果明显。

(3) 路面板越薄, 沥青层厚度对荷载应力的影响越明显。保证足够厚的有效沥青下卧层对 UTW 路面的使用性能有更加重要的作用。当沥青层品质较差时, 相当于在路面板与地基之间存在一层软弱夹层, 不利于 UTW 路面的使用, 在修筑时应采取措施进行

处治。当沥青层模量大于一定值 (相对于 E_s 而言) 后, 可以明显减小荷载应力。

参考文献

- [1] Cole L. W. Performance of ultra-thin whitetopping roadways[J]. Proceedings of Fifth American Society of Civil Engineers Materials Engineering Congress, May 10-12, 1999, Cincinnati, Ohio.
- [2] Churilla C. J. Ultra-thin whitetopping[J]. Public Roads, 1998, 62(2).
- [3] Cole L. Ultra-thin research advances whitetopping technology[J]. Concrete Construction Magazine, 1995.
- [4] Speakman, J.N.Sott. Ultra-Thin, fiber reinforced overlays for urban intersections[J]. Transportation Research Record, TRB, National Research Council, Washington, D.C, 1996.
- [5] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [6] 马 磊. 超薄水泥混凝土路面设计理论与方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2002.

上接第 106 页

交干线都可满足国外单轨最低运量标准 (如日本的 6500 人次/日); 例如, 经营较成功的羽田机场线车辆日均走行公里为 432 km, 单车日载客数为 1237 人; 北京 2002 年全市每条公交线路平均日运输量为 16188 人次, 公交车辆日载客量为 568 人次; 广州市 1998 年全市公交线路平均日运输量为 8080 人次, 公交车辆日载客量为 666 人次 (平均运距 6.75 km)。

我国轨道交通系统的建设正处于高峰期^[2], 令人鼓舞, 但目前轨道交通系统建设费用高昂也令人咋舌。伦敦 1999 年公交运营统计表明: 巴士的每客成本 (包括资本金在内) 为 0.48 英镑, 地铁则为 0.85 英镑, 巴士与地铁的运营成本没有想象的大。因此, 探讨降低轨道交通系统建设的难度, 使单轨系统变得运营上可行, 对于发展我国城市轨道交通建设至关重要。

参考文献

- [1] 毛保华, 姜帆, 刘迁等编著. 城市轨道交通. 第一版. 北京: 科学出版社, 2001. 1-27.
- [2] 课题组. 中日合作城市轨道交通建设与规划专题研究报告. 北京: 中国国际工程咨询公司, 2003. 4-29.
- [3] Demery Leroy W. Monorail in Japan: An overview. www.publictransit.us. 2003. 10-25.
- [4] Nehashi Akira. New urban transport systems reconsidered. Japan Railway & Transport Review, 1998, (16): 13-16.
- [5] 国土交通省综合政策局. 都市交通年报. 运输政策研究所, 日本, 2001. 115-145
- [6] 国家统计局城市社会经济调查总队. 1998 中国城市统计年鉴. 中国统计出版社, 1999. 373-380.