

# 不同等级公路对公路货运发展的影响

王 芳,吴群琪,唐俊忠

(长安大学 经济与管理学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为衡量不同等级公路对公路货运发展的影响程度,基于公路网的网络结构特征,应用比较优势理论,采用通径分析方法,构建出衡量不同等级公路对公路货运发展的贡献度计量模型。研究结果表明:高等级公路是影响公路货运发展的主导因素,较低等级公路对公路货运发展的贡献主要通过高等级公路来实现;较低等级公路的集散功能与高等级公路的通过功能是相互制约的关系;要促进公路货运发展,不仅需要继续保持对高等级公路的建设投资,还要推进各等级公路的协调发展,进一步完善各等级公路的合理布局。

**关键词:**交通规划;公路货运;比较优势;贡献度;计量

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

## Influence on road freight transportation of different grades highway

WANG Fang, WU Qun-qi, TANG Jun-zhong

(School of Economy and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to measure the influence level of different grades highway on the development of freight transportation, based on the structure characteristics of highway network, the comparative advantage theory and path analysis methods were used to build an algorithm model to get the contribution degree of different grades highway to the development of freight transportation. The results show that the freeway is the domain factor which impact the development of freight transportation, the low grade highway contribution is realized through freeway. There is mutual constraint relation between the pass-through function of high-grade highway and the distribution function of low-grade highway. The result indicates that the investment of high-grade highway should be maintained, at the same time, the rational distribution of highway network should be improved. 3 tabs, 1 fig, 17 refs.

**Key words:** traffic planning; highway freight transportation; comparative advantage; contribution degree; algorithm model

## 0 引 言

公路运输业是维持现代经济增长与社会运转的基本条件之一,其不仅担负着国民经济发展的运输任务,还要适应国民经济发展的运输需要,这种适应

不但表现在规模、结构和速度方面,还体现在空间地域分布和技术等级配置方面。公路货运作为公路运输业的典型代表,其发展与公路基础设施的发展相辅相成、息息相关<sup>[1]</sup>。近 10 年来,中国公路货运与公路基础设施均取得较大发展,据统计,截止 2011

年底,中国公路的通车总里程已达  $410.64 \times 10^4$  km, 等级公路里程达到  $345.36 \times 10^4$  km(按新统计), 二级及二级以上的高等级公路里程  $47.35 \times 10^4$  km, 占等级公路总里程的 13.72%。公路运输基础设施发展的同时,也带动公路货运迅速发展,近5年来,中国公路货运量和公路货运周转量每年都以超过10%和13%的速度递增,到2011年底,分别达到  $282.01 \times 10^8$  t 和  $51\,374.74 \times 10^8$  t·km,在综合运输中占据主导地位。

在公路货运与公路基础设施迅速发展的同时,专家学者对公路基础设施和公路货运发展的关系进行了研究。20世纪90年代中期,虽然公路里程与技术等级水平均偏低,但长期受到抑制的运输需求得以释放,促进公路货运业快速发展,使其完成的货运量和周转量占各种运输方式完成的比例不断提升,这说明较低等级公路在公路货运中起到了重要作用<sup>[2]</sup>。但这种发展具有阶段性,其与中国当时粗放型经济发展特点有关,公路货运主要实现低品质运输需求;随着产业结构优化升级,对公路基础设施要求日益提高,较低等级公路的优势逐渐消失<sup>[3-5]</sup>。由于公路基础设施具有网络经济特性,各等级公路相互关联,形成运输网络,才能促进公路货运发展,网络中各等级公路的作用应均等。目前,中国经济发展水平主要以低附加值、低风险运输需求为主,其对运输成本具有高度弹性,承担能力差,对导致高成本的高等级公路依赖度较低;但随着产业结构提升,高附加值货运需求增加,大型运输企业成长环境改善,抗风险能力提高,公路货运发展将主要依赖高等级公路<sup>[6]</sup>。计重收费在全国范围的推广,促使货车向多轴重载方向发展,大大降低公路货运的成本,使高等级公路在公路货运发展中的作用进一步提高<sup>[7-10]</sup>。上述研究主要定性描述何种等级公路基础设施能促进公路货运发展,但没有系统定量研究不同等级公路对公路货运发展的贡献程度。为此,本文根据不同等级公路具有的比较优势,分析其在公路货运发展中所起的作用,并构建相应的理论和数学模型,对各等级公路的贡献度进行定量分析,进而衡量公路基础设施发展的合理性。公路货运的发展取决于多方面因素,如经济的持续高速发展、公路基础设施规模及技术等级的不断提升、运输设备技术水平的提高、公路货运行业管理水平以及组织化程度的提高等。本文重点探讨公路基础设施规模和技术等级的提升给公路货运发展带来的影响。

## 1 不同等级公路发展与公路货运发展的关系

公路基础设施是公路货运生产所依托的主要物质载体,其空间分布、通过能力和技术装备水平体现公路货运系统的发展水平,是影响公路货运发展的基础因素与主导因素。由于不同等级公路基础设施有其特有的技术经济特性,决定其比较优势不同,以及对公路货运发展影响不同,而公路货运的发展主要依赖于不同等级公路组成的运输基础设施网络<sup>[11]</sup>。根据运输网络具有的网络经济特征,各等级线路之间是互补而非替代的作用关系,是一种“你中有我,我中有你”的制约关系。组成运输网络的各等级公路间相互作用促进公路货运发展,由于不同等级公路在公路网中的动能定位不同,决定其对公路货运发展的贡献程度也不同。

公路在路网中主要发挥“通过”和“送达”两种功能,“通过”功能是指在干线上快速高效地完成大批量的运输,表现为通道功能;“送达”功能是指通过性运输承担集散客货任务的运输,又称为集散功能。根据公路基础设施具有的功能分析其比较优势,能更好的突出公路设施与公路货运之间的作用关系。根据研究的需要,本文对依据使用任务、功能以及适应交通量水平不同而确定的公路技术等级进行重新划分,其中高速公路、一级公路和部分二级汽车专用路划归高等级公路范畴,其具有较高容量、通达性和运行效率,是公路网的主骨架,主要发挥区域间、主要经济点间和城市间运输通道作用;大部分二级公路、全部三级和四级公路划归较低等级公路范畴,其容量较低、通过性较差,是公路网的支线和连接线,主要发挥集散作用。通过对不同等级公路的技术经济特性分析,得出较高等级公路在公路网中发挥“通过”功能,较低等级公路在路网中发挥“送达”功能,对公路货运发展的贡献分别可通过其在路网中的功能分工进行分析。

根据不同等级公路的技术经济特性,构建不同等级公路间作用关系的理论模型,如下页图1所示。高等级公路在货运中主要起“通过”功能,而较低等级公路主要起“送达”功能,部分起连接线功能<sup>[12-14]</sup>。高等级公路与较低等级公路间是相互依存、相互依赖的作用关系,如果仅有高等级公路,其主要发挥“通过”功能,虽有一定程度的“送达”功能,但因其分布的广度和深度的制约,不能高效地将复杂且分散在经济实体中的运输需求转化成运输量,因为缺乏具备较强集散功能的支线和连接线;如果

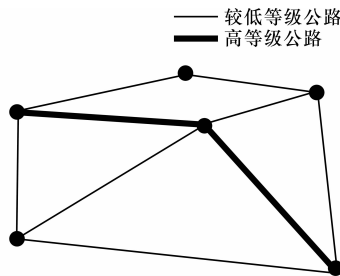


图1 不同等级公路间关系的理论模型  
Fig.1 Theoretical relationship model of different grades highway

仅有较低等级的公路,其技术经济特性决定其主要发挥短距离范围内的“送达”功能,而无法克服低效率“通过”功能的局限,不利于公路货运发展和升级。虽然通过公铁或公水联运可实现运输需求,但随着产业结构的不断升级,高附加值的货运需求比例的提高,对运输的时间效益和空间效益要求更高,并且有很多货物不适宜中间转运<sup>[15]</sup>。这就进一步验证,各等级公路协调发展更有利于公路货运发展,这种协调性的度量是以较高与较低等级公路在路网中所占比例进行说明。

高等级公路和较低等级公路相互作用,促进了公路货运发展,促进过程体现为高等级公路为集中的货物提供高效的通过保障,使其获得较高的时间和空间效益;较低等级公路为分布在经济体中的运输需求转化成运输量提供条件,同时激发潜在运输需求。但公路基础设施具有网络经济特性,这种特性决定各层级公路网之间必须相互协调,才能更好的促进公路货运发展。而现实条件下,各地区的公路网结构不同,不能明确分析出哪种等级的公路更能促进公路货运发展。结合中国经济水平和产业结构变迁的实情,高附加值产品在公路货运中占据的比例将会进一步提高,这种产品的属性决定其需要更高品质的运输服务,而高品质货运服务对高等级公路具有较强的依赖性。所以,高等级公路在公路货运发展中的作用将会与日俱增,但仅有高等级公路也不能很好的促进公路货运展,因为缺少具有集疏散功能的支线。

在上述分析的基础上,提出以下几种假设。

- (1)高等级公路在公路货运发展中的作用将会随着经济的发展更加重要。
- (2)较低等级公路对公路货运发展的贡献主要通过高等级公路来实现。
- (3)高等级公路对公路货运发展的促进作用的发挥依赖于较低等级公路。

2 计量模型

本文的研究目的是衡量不同等级公路对公路网货运发展的贡献程度,这种贡献不仅体现在不同等级公路的直接贡献,还体现在不同等级公路之间相互作用而产生的间接贡献。基于对各等级公路基础设施与公路货运发展的关系,以及各等级公路之间相互作用关系的分析,构建计量模型对直接贡献和间接贡献进行定量分析。在计量模型中,以 GDP 作为控制变量,公路货运量和周转量作为因变量,各等级公路规模作为自变量,计算直接贡献系数、间接贡献系数和剩余系数,分别衡量各等级公路对公路货运发展的直接贡献和间接贡献,以及其他的剩余贡献。这种计量模型的构建与各等级公路之间的关系及其对公路货运发展贡献相适应,具有一定的合理性。在此基础上,构建不同等级公路对公路货运发展的贡献度计量模型。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k \tag{1}$$

$$\bar{Y} = \beta_0 + \beta_1 \bar{X}_1 + \beta_2 \bar{X}_2 + \cdots + \beta_k \bar{X}_k \tag{2}$$

式中: $X_1, X_2, \cdots, X_k$  与  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \cdots, \bar{X}_k$  分别为高速、一、二、三、四级公路里程与对应的均值; $Y, \bar{Y}$  分别为公路货运量或货运周转量与对应的均值; $\beta$  为律定系数。

由式(1)、式(2) 可得

$$Y - \bar{Y} = \beta_1 (X_1 - \bar{X}_1) + \cdots + \beta_k (X_k - \bar{X}_k) \tag{3}$$

对式(3) 两边同时除以被解释变量  $Y$  的标准差  $\sigma_y$ , 可得

$$\begin{aligned} (Y - \bar{Y}) / \sigma_y &= \beta_1 (X_1 - \bar{X}_1) / \sigma_y + \cdots + \beta_k (X_k - \bar{X}_k) / \sigma_y \\ \text{即} \\ (Y - \bar{Y}) / \sigma_y &= \beta_1 \frac{\sigma_{x_1}}{\sigma_y} \frac{(X_1 - \bar{X}_1)}{\sigma_{x_1}} + \cdots + \beta_k \frac{\sigma_{x_k}}{\sigma_y} \frac{(X_k - \bar{X}_k)}{\sigma_{x_k}} \end{aligned} \tag{4}$$

在此基础上进行数量变换,得出系数的分解方程为

$$\left. \begin{aligned} P_{1Y} + r_{12} P_{2Y} + r_{13} P_{3Y} + \cdots + r_{1k} P_{kY} &= r_{1Y} \\ r_{21} P_{1Y} + P_{2Y} + r_{23} P_{3Y} + \cdots + r_{2k} P_{kY} &= r_{2Y} \\ \cdots &\cdots \\ r_{k1} P_{1Y} + r_{k2} P_{2Y} + r_{k3} P_{3Y} + \cdots + P_{kY} &= r_{kY} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: $r_{ij}$  为  $X_i$  与  $Y_i$  的相关系数; $r_{iY}$  为  $X_i$  与  $Y$  的相关系数; $P_{iY}$  为直接贡献系数,表示  $X_i$  对  $Y$  的直接贡献; $P_{jY}$  为间接贡献系数,表示  $X_i$  通过  $X_j$  对因变量

Y 的间接贡献。

式(5) 是构建的一般计量模型。

该计量模型用于衡量各等级公路对货运发展的直接贡献,以及各等级公路相互作用条件下对货运发展的间接贡献。由于公路货运发展与各等级公路发展间作用关系的复杂性,以及人们认识能力的局限性,在设定模型时不可能把影响因变量的所有因素都考虑进来,所以,应该计算遗漏变量和误差项对因变量 Y 的影响系数  $P_{nY}$ ,即剩余效应,计算公式见式(6)<sup>[16]</sup>。

表 1 2001 ~ 2011 年中国公路货运发展情况

Tab. 1 Status of highway freight transportation in China from 2001 to 2011

年份	指标						
	货运量 $Y_1$ / 10 <sup>8</sup> t	周转量 $Y_2$ / 10 <sup>8</sup> t · km	高速公路里程 $X_1$ /10 <sup>4</sup> km	一级公路里程 $X_2$ /10 <sup>4</sup> km	二级公路里程 $X_3$ /10 <sup>4</sup> km	三级公路里程 $X_4$ /10 <sup>4</sup> km	四级公路里程 $X_5$ /10 <sup>4</sup> km
2001	105.60	6 330.40	1.94	2.52	18.21	30.86	80.07
2002	111.60	6 782.50	2.51	2.75	19.71	31.51	81.80
2003	116.00	7 099.50	2.97	2.99	21.19	32.48	84.24
2004	124.50	7 840.90	3.43	3.35	23.17	33.53	88.10
2005	134.18	8 693.19	4.10	3.84	24.64	34.47	92.13
2006	146.63	9 754.25	4.53	4.53	26.27	35.47	95.70 *
2007	163.94	11 354.69	5.39	5.01	27.64	36.39	99.27 *
2008	191.68	32 868.19	6.03	5.42	28.52	37.42	121.35 *
2009	212.78	37 188.82	6.51	5.95	30.07	37.90	165.76 *
2010	244.81	43 389.67	7.41	6.44	30.87	38.80	198.21 *
2011	282.01	51 374.74	8.49	6.81	32.05	39.36	230.67 *

注:为保持数据的可比性,对 2006 ~ 2011 年的四级公路里程数据按统一口径进行了修正,并用\* 标注。数据来源:2001 ~ 2011 年公路水路交通运输行业发展统计公报。

将表 1 数据代入贡献度计量模型,在 SPSS 软件中编程求解,得出的直接贡献系数和间接贡献系数,剩余系数见表 2 和表 3(这些系数均已通过检验)

表 2 各等级公路对货运量发展的贡献度系数

Tab. 2 Contribution coefficient to cargo  
from different grades highway

作用因子	直接作用	通过 $X_1$	通过 $X_2$	通过 $X_3$	通过 $X_4$	通过 $X_5$
$X_1$	1.363 5		-1.078 3	0.949 2	-0.772 2	0.488 1
$X_2$	-1.084 8	1.355 3		0.941 5	-0.761 1	0.507 8
$X_3$	0.967 9	1.337 2	-1.055 2		-0.811 5	0.451 7
$X_4$	-0.823 9	1.277 9	-1.002 2	0.953 3		0.405 9
$X_5$	0.563 4	1.181 3	-0.977 8	0.775 9	-0.593 5	
剩余系数	0.126 79					

由表 2 可知, $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_5$  的直接贡献系数分别为 1.363 5、0.967 9 和 0.563 4,说明它们是影响公路货运发展的主要因素; $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  通过  $X_1$  对  $Y_1$  的间接贡献系数均大于 1.15,说明其他等级公路对公路货运发展的贡献主要通过高速公路获得实现; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  通过  $X_3$  对  $Y_1$  的间接贡献系数均大于 0.77 外剩下的均大于 0.94,说明其他等级公路

$$P_{nY} = \sqrt{1 - (P_{1Y}r_{1Y} + P_{2Y}r_{2Y} + \cdots + P_{kY}r_{kY})}$$
 (6)

若剩余效应很小,说明该计量模型已把握主要变量,否则,说明在分析中遗漏了某些主要因素。

3 实证分析

为验证各等级公路发展与公路货运发展关系理论的正确性,以及衡量各等级公路对公路货运发展贡献度计量模型的合理性,选取 2001 ~ 2011 年公路货运发展情况以及各等级公路发展情况数据(表 1),对上述理论和计量模型进行验证。

对货运发展的贡献对二级公路的依赖性较大,这主要与二级公路在公路网中发挥连接线功能有关;剩余系数为 0.126 79,说明导致  $Y_1$  变化的 12.68% 的原因该模型无法解释,也就是说有 87.32% 的原因该模型可以解释;这也进一步验证了假设(1) 和假设(2) 的正确性。

表 3 各等级公路对货运周转量发展的贡献度系数

Tab. 3 Contribution coefficient to freight turnover  
from different grades highway

作用因子	直接作用	通过 $X_1$	通过 $X_2$	通过 $X_3$	通过 $X_4$	通过 $X_5$
$X_1$	1.184 0		0.310 9	-0.898 1	0.255 4	0.124 4
$X_2$	0.315 3	1.167 3		-0.880 2	0.249 2	0.132 8
$X_3$	-0.918 0	1.158 4	0.302 4		0.263 5	0.118 1
$X_4$	0.268 8	1.124 9	0.292 3	-0.899 7		0.108 8
$X_5$	0.145 1	1.014 9	0.288 6	-0.746 8	0.201 5	
剩余系数	0.099 526					

由表 3 可知,高速公路直接贡献系数为 1.184 0,一级、三级、四级公路分别为 0.315 3、0.268 8、0.145 1,说明在促进公路货运周转量发展的影响因素中,高速公路里程仍然占据主导地位,其次是处于

较高等级的一级公路,这与高等级公路在路网中的主干通道功能相符合;第四、六、七列中的数值均大于 0,第三列数值均大于 1,说明其他等级公路主要通过高速公路对公路货运发展产生影响,公路货运周转量的增加主要是高速公路发展推动的结果,这也进一步验证了假设(2)和假设(3)的正确性;剩余系数为 0.099 526,说明模型所选择的自变量解释了导致因变量发展变化的主要原因。

同时也有统计数据可以说明高速公路在公路货运发展中的主导作用,2006 年到 2009 年,高速公路完成的货运周转量的年均增长率为 22.22%,而同一时期所有等级公路的货运周转量的年均增长率为 14.78%(2008 年公路货运周转量统计方法调整)。在 2008 年高速公路完成的周转量中,其中煤炭、冶炼物质、粮食、石油、化肥农药等 5 类物质占到 34.8%,机电设备、农林牧渔、轻工医药、化工、矿物性建材分别占 10%、12%、8%、5%、8%,这也进一步验证了假设(1)的正确性<sup>[17]</sup>。

## 4 结 语

(1)由不同等级公路相互联接组成的公路网具有网络结构特征,在考虑不同等级公路对公路货运发展的影响时,需要考虑不同等级公路间,及其与公路货运发展之间的内在经济联系,在此基础上才能构建出衡量不同等级公路对公路货运发展的贡献度量模型,从满足运输需求角度考虑,为公路基础设施建设提供依据。

(2)基于比较优势理论与通径分析方法构建公路货运影响因素的贡献度模型,并应用其测算出不同等级公路对公路货运发展的贡献度,得出高速公路是影响公路货运发展的主导因素;较低等级公路对公路货运发展贡献主要通过高等级公路来实现;高等级与较低等级公路相互依赖,相互制约,共同促进公路货运的发展;各等级公路在促进货运发展中充分发挥自身的技术经济优势。

(3)要促进公路货运的快速发展,需要继续保持对高速公路的投资,同时加强不同等级公路之间的协调发展,只有实现高等级公路“通过”功能与较低等级公路“可达”功能之间相互配合,才能实现公路网整体贡献程度的最大化。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张国伍. 交通运输系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,1991.  
ZHANG Guo-wu. Transportation system analysis

- [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1991. (in Chinese)
- [2] 许庆斌,荣朝和,马 运,等. 运输经济学导论[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.  
XU Qing-bin, RONG Chao-he, MA Yun, et al. An introduction to transportation economics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [3] 徐亚华. 完善道路货运市场管理有关政策问题的思考[J]. 公路交通科技, 2011, 28(2): 154-158.  
XU YA-hua. Consideration of policy for perfecting road freight transport market management [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(2): 154-158. (in Chinese)
- [4] Thomas F G, Amelia C R. Impacts of highway congestion on freight operations: perceptions of trucking industry managers [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(7): 577-599.
- [5] 陈荫三, 李 彬. 2010 年中国高速公路网运输状态[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 68-73.  
CHEN YIN-san, LI BIN. Transportation status of Chinese expressway network in 2010 [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 68-73. (in Chinese)
- [6] YIN Y F, Miler M A, Shladover S E, et al. Assessment of the applicability of cooperative vehicle-highway automation systems to freight movement in Chicago [R]. Washington DC Transportation Research Board, 2004.
- [7] Paul M. Estimation and accuracy of origin-destination highway freight weight and value flows [J]. Journal of Transportation and Statistics, 2003, 6(2/3): 67-80.
- [8] ICF. Economic effects of transportation: the freight story [R]. Fairfax: ICF Consulting & HLB Decision-Economics, 2002.
- [9] 王健伟. 东北亚国际运输通道[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(2): 77-82.  
WANG Jian-wei. Construction of international transportation corridor in northeast Asia [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 77-82. (in Chinese)
- [10] 王玉辉. 道路货运市场网络化发展模式[J]. 综合运输, 2007(5): 63-66.  
WANG Yu-hui. Road freight market network development model [J]. Comprehensive Transportation, 2007(5): 63-66. (in Chinese)
- [11] 吴群琪. 交通运输系统价值分析理论研究[D]. 西安: 长安大学, 2000.  
WU Qun-qi. Traffic transportation system value analysis research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2000. (in Chinese)
- [12] 陈荫三. 公路通行费改革及其对货车发展的影响[J].

- 交通运输工程学报,2006,6(2):99-106.
- CHEN Yin-san. Highway tolling reform and its influence on truck development[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 99-106. (in Chinese)
- [13] 林毅夫. 自生能力、经济发展与转型理论与实证[M]. 北京:北京大学出版社,2004.
- LIN Yi-fu. Theory and demonstration of self-dependence, economic development and transformation[M]. Beijing: Beijing University Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 沈志云,邓学钧. 交通运输工程学[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2006.
- SHEN Zhi-yun, DENG Xue-jun. Transportation engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 李丽,吴群琪. 基于各方主体经济利益实现的长效治理超限超载对策研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3):153-158.
- LI Li, WU Qun-Qi. Research on countermeasures of long-term oversize and overload controlling base on relational interest factors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3):153-158. (in Chinese)
- [16] 敬艳辉,邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育, 2006(2):24-26.
- JING Yan-hui, XING Liu-wei. Size analysis and its application[J]. Statistical Education, 2006(2): 24-26. (in Chinese)
- [17] 交通运输部. 2009年中国高速公路运输量调查分析报告[R]. 北京:人民交通出版社,2010.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Analysis report of China highway transportation volume survey 2009[R]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)
- .....
- (上接第60页)
- [8] 李围,叶裕明,刘青山,等. ANSYS土木工程应用实例[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- LI Wei, YE Yu-ming, LIU Qing-shan, et al. ANSYS civil engineering application examples[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 王景鹏. 高层框架剪力墙结构动力特性研究及地震作用时程反应分析[D]. 西安:长安大学,2009.
- WANG Jing-peng. Study of dynamic characteristics and analysis of seismic responses of frame-shear wall structures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [10] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- WANG Xu-cheng, SHAO Min. Basic principles of finite element method and numerical method[M]. Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [11] 李悦,周孝军,李清海,等. 轻钢结构住宅模型动力特性测试与分析[J]. 建筑技术, 2009, 40(4):324-326.
- LI Yue, ZHOU Xiao-jun, LI Qing-hai, et al. Dynamic characteristic test and analysis of light steel structure residential modal[J]. Architecture Technology, 2009, 40(4):324-326. (in Chinese)
- [12] 贾连光,许峰,张绍武,等. 轻型钢框架结构的抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(10):64-68.
- JIA Lian-guang, XU Feng, ZHANG Shao-wu, et al. Experimental study on aseismatic property of light-weight steel frame[J]. Industrial Construction, 2005, 35(10):64-68. (in Chinese)
- [13] 宋锋,王元清,石永久. 钢结构跃层加层的地震反应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(1):55-61
- SONG Feng, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Seismic response analysis of adding extra-floors spanning existing building with steel structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(1):55-61. (in Chinese)
- [14] 杨维国,陈丹,潘多俊. 不同结构体系对钢结构框架侧向刚度的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2):102-105.
- YANG Wei-guo, CHEN Dan, PAN Duo-jun. Effects of different structural systems on lateral rigidity of steel structural frames[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2):102-105. (in Chinese)