公路纵坡与汽车运行速度油耗之间的关系

周荣贵*(研究实习员)　邢惠臣（研究员）

（交通部公路科学研究所 北京 100088）

提要 本文介绍了中型载重汽车在纵坡上以各种方式运行时，纵坡坡度与车辆运行速度，油耗之间的相互关系，并以此确定汽车在各种坡度纵坡上以极限状态（最大油门开度）冲坡行驶时的稳定车速和稳定油耗，并与相同坡度下正常行驶时的速度、油耗作对比分析，得出了若干结论，可供制定标准、可行性分析及经济效益分析时参考.

关键词 纵坡坡度　稳定速度　稳定油耗　极限坡长

On The Relation Between Vehicle Speed Fuel Consumption and Longitudinal Gradient

Zhou Ronggui(Research Practicer)　Xing Huichen(Research Fellow)

(Research Institute of Highway, the Ministry of Communications, Beijing, 100088)

Abstract In the paper, the relations between longitudinal gradient and vehicle speed, longitudinal gradient and fuel consumption of a medium-duty truck driving on a slope under different operation states are investigated. from which the steady speed and steady fuel consumption of a truck dashing with limit state on different slopes are determined accordingly, based on field experiments and mathematieal statistic method, a few conclusions are drawn finally by comparing with the vehicle driving under normal road conditions in order to help formulate the feasibilty study and economic benefit analysis of a highway construction as well as to offer suggestions for specification revision.

Key words Longitudinal gradient　Steady speed　Steady fuel consumption　Grade line limit

*参加本课题研究的还有张祖荫、何耀福等同志。

1 前言

公路纵坡设计是公路几何设计中的重要内容之一。在一定的地形条件下，纵坡选用得是否合理，不仅直接影响工程造价，而且还直接关系到车辆的运行速度和油耗。如何合理的选用纵坡坡度、极限坡长，以使公路使用质量、运输效益及工程造价之间总体效果最优，一直是公路工程和运输部门所关注的。本文针对我国目前和今后一段时期内使用较多的车型，研究其在各种纵坡条件下的速度、油耗等变化规律，并以此为依据来研究分析《公路工程技术标准》中对纵坡的有关规定，从而为今后进一步开展路线质量评价模式和管理系统的研究开发打下一定的基础。

2 研究方法

根据汽车动力学理论，每一种车辆的运行特征都可以通过计算得到。但是在实际使用过程中，由于司机操作水平的不同、地形气候条件的差别、道路与交通条件的变化以及车辆本身使用寿命的长短，往往导致理论计算与实际运行情况不相符，因此，为了得到可供实际使用的纵坡与车辆运行速度、油耗之间的关系，本研究从实际出发，采用我国目前及今后一段时间内主要使用的中型载重汽车东风EQ140和解放CA141，车辆性能均满足国标《车辆特性试验和要求》规定，在排除其它影响因素（道路，气候条件等）的情况下进行实际运行试验和相关分析，研究车辆在坡道上行驶时，纵坡与车辆运行速度、油耗之间的关系。为了保证油耗试验的准确性，我们遵循以下几条原则选择试验路段:

① 选择近年翻修的公路，且路面状况良好的路段。

② 试验路段坡度保持一致．以保证纵坡值正确。

③ 试验坡段越长越好，以求一次能达到稳定车速。

④ 试验段内的平曲线半径至少满足60 km/h运行速度的要求，以排除平曲线半径对运行速度和油耗的影响。

⑤ 在试验时暂时中断交通，以排除其它车辆对试验车运行速度和油耗的影响。

另外，为了反映我国不同地区海拔高度对车辆上坡的影响，分别在北京、山西和云南地区进行20个坡段的试验，内容为:

① 在试验段前10 m用一档起步，以司机认为可取的最大油门开度进行加速上坡试验。

② 在试验段外将试验车加速至能够达到的最大速度，在试验坡段进行上坡减速冲坡试验。

③ 在北京地区选择三个路段进行了正常行驶的油耗试验，并用道路几何数据采集车测量纵坡等参数，以求得正常行驶状态下纵坡与油耗的关系。

3 纵坡坡度与汽车运行速度的关系

3.1 车辆在纵坡上行驶时，行车速度随纵坡坡长的变化

对于一定性能的车辆，当它在一定长度的纵坡上行驶时，基本上呈加速或减速状态行驶。通过对两地区试验路段上加速上坡，减速冲坡试验的数据分析和曲线拟和，发现如下规律:

① 在第一种方式下（即加速上坡试验），车速随坡长按对数曲线形式递增，方程为 $V=a+b\ln x$。而且当坡长增大到一定值后，速度呈稳定状态，见图 3－1。

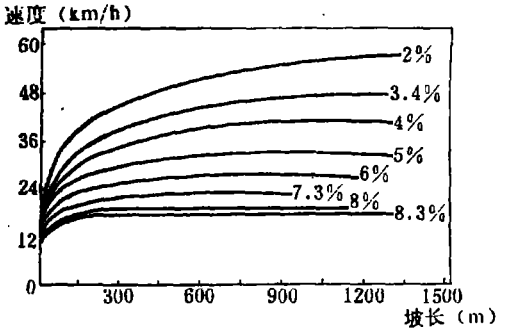

图 3－1(a) 北京、山西地区速度与坡长关系图
（初速度为零）

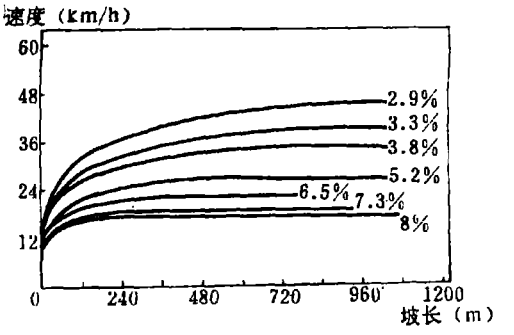

图 3－1(b) 云南地区速度与坡长关系图
（初速度为零）

从图 3－1 看出，每一个纵坡都有相应的稳定速度和达到稳定速度的坡长。纵坡坡度越陡，稳定速度越小，达到稳定速度的坡长也越短。

在第二种方式（即减速冲坡试验）下，由于车辆以一定的初速度进入试验段的，当车辆进入纵坡坡段后，为克服上坡阻力，必须逐渐减速，在前 250m 左右行车速度一般随坡长呈指数形式递减，函数形式为 $V=ae^{bx}$，而后逐渐过渡到对数形式，$V=a-b\ln x$ 行驶到一定距离后，速度递减至稳定速度，即速度达到最小值。见图 3－2。

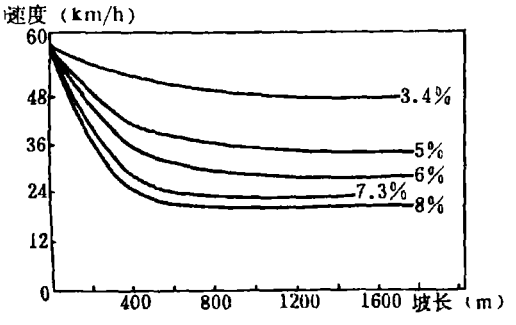

图 3－2 (a) 北京、山西地区速度与坡长关系图
（以一定的初速度上坡）

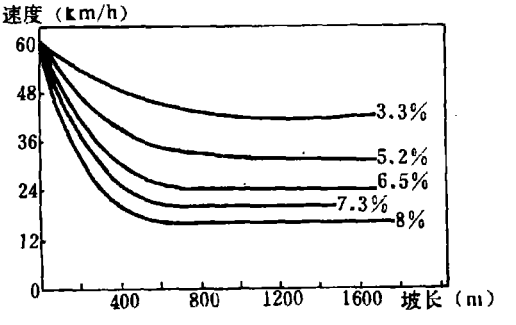

图 3－2 (b) 云南地区速度与坡长关系图
（以一定初速度上坡）

从图 3－2 可看出，坡度越陡，速度递减越快，稳定速度越小，反之亦然。此外从初速度递减至稳定速度所需的坡长与纵坡坡度有关，纵坡坡度越陡，所需坡长越短；初速度越大，减至稳定速度的坡长越长。

② 试验结果发现：北京和山西两地区由于海拔高度相差不多，在同一纵坡下数据十分接近，图 3－1 中 2%,5%,7.3%,8% 的曲线为两地区数据合在一起的回归分析结果，相关关系很好。由此可见，这一试验结果对海拔高度在 1000m 以下的地区是有代表性的。另外对比云

南、北京和山西两组曲线图和各个纵坡的稳定速度后发现，云南地区（海拔高度1500m左右）达到与北京地区相同稳定速度的纵坡坡度大约要小0.5%，这一结果对高原纵坡折减提供了一定的参考依据。

③ 从试验时的档位记录看，三个地区达到稳定速度的档位基本相同，见表3－1。

各种纵坡达到稳定速度时所处的档位表 3－1

坡　度（%）	档 位（档）
2	5
3～ 4	4
5～ 6	3
6 ～ 7	2 ～ 3
7 ～ 8	2
8 ～ 9	2

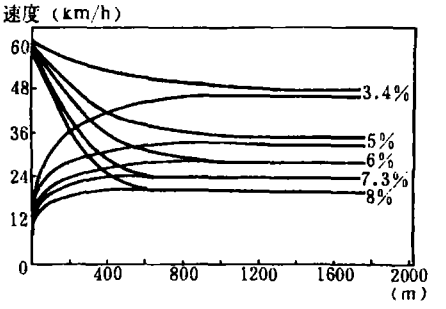

图3－3 各种坡度下加、减速行驶速度与坡长关系图

可以看出，无论是在北京、山西、还是在云南的试验都表明（图3－3），当纵坡由4%增加到5%时，速度随坡长变化的两条曲线间的间隔突然增大，稳定速度下降约10km/h，出现明显速度台阶．可见从这两种车的特性看，当纵坡增大至5%时，为了克服爬坡阻力，无法再从3档升至4档，否则就要减速，这一结果对我们确定高等级公路的纵坡是十分有意义的。

④ 同样坡度的加速上坡与减速冲坡相比较（图3－3），对于坡度小于6%的纵坡，加速上坡运行达到的稳定速度略比减速冲坡的稳定速度小，这一结果与美国的试验结果稍有区别。

3.2 纵坡坡度与车辆运行速度的关系

3.2 1 在加速上坡和减速冲坡运行时，纵坡坡度与稳定速度之间的关系

加速上坡和减速冲坡试验得到的各种纵坡坡度所对应的稳定速度及达到稳定速度所需的坡长列于表3－2和表3－3。

北京、山西地区纵坡坡度稳定坡长、稳定速度一览表　表3－2

坡度（%）	初速度为0的冲坡试验		初速度为60km/h冲坡试验	
	稳定坡长（m）	稳定速度（km/h）	稳定坡长（m）	稳定速度（km/h）
2	1200	58		
3. 4	900	47	1450	49
4	800	43. 5		
5	600	32	1200	34
6	450	27	1000	27
7. 3	300	22. 5	750	23
8	250	19	550	18. 5
8. 3	200	18		

云南地区纵坡坡度、稳定速度稳定坡长一览表　表3－3

坡度（%）	初速度为0的冲坡试验		初速度为60km/h冲坡试验	
	稳定坡长（m）	稳定速度（km/h）	稳定坡长（m）	稳定速度（km/h）
2.9	900	46		
3.3	800	41	1300	43
3.7	700	38		
5.2	500	27	1100	28.5
7.3	250	19	700	20
8	200	17.5	500	17.6

对表中所列各纵坡坡度与相应的稳定速度和稳定坡长进行回归分析后发现，随着坡度的

增大，稳定速度呈指数形式递减，具体回归曲线和方程见图 3－4、图 3－5、图 3－6 和图 3－7。

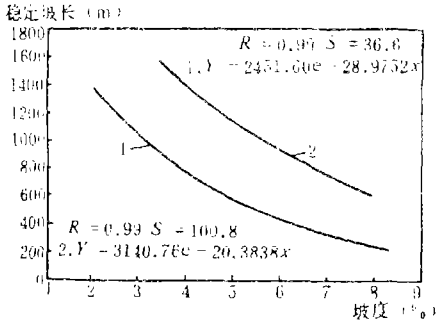

图 3－4 北京、山西地区加、减速上坡稳定坡长与坡度关系图

1. 加速上坡； 2. 减速上坡。

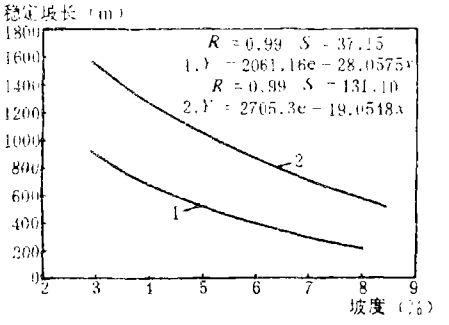

图 3－5 云南地区加、减速上坡稳定坡长与坡度关系图

1. 加速上坡； 2. 减速上坡。

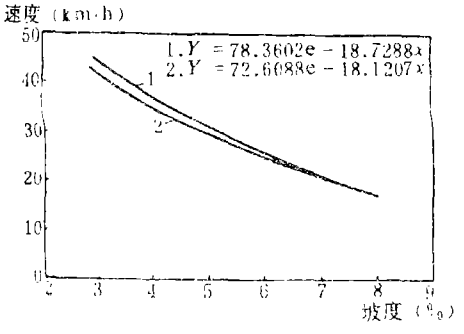

图 3－6 云南地区加、减速上坡稳定速度与坡度关系图

1. 减速上坡，2. 加速上坡。

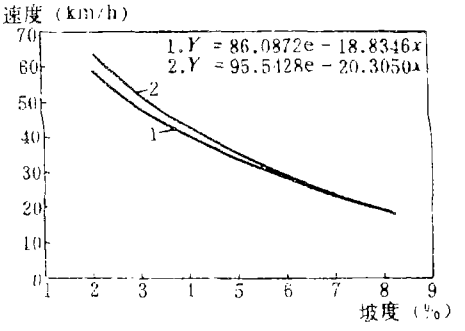

图 3－7 北京地区加、减速上坡稳定速度与坡度关系图

1. 加速上坡； 2. 减速上坡。

3.2.2 正常运行状态下纵坡坡度与行车速度的关系

在正常行驶时，司机往往采用较小的油门开度，但爬坡的加速度是变化的。为此选择了路面良好，线型满足二级路要求的 110 国道和怀丰线，用同样试验车进行正常运行的油耗和速度变化的测试，并用道路几何数据采集车测定沿线的纵坡。对相应纵坡所对应的运行速度进行分析后发现，在正常运行状态下两条路的纵坡坡度与运行速度间的关系呈图 3－8 所示的指数函数形式。而且两条路的回归曲线非常接近，可以归并成相关关系很好的一条曲线。

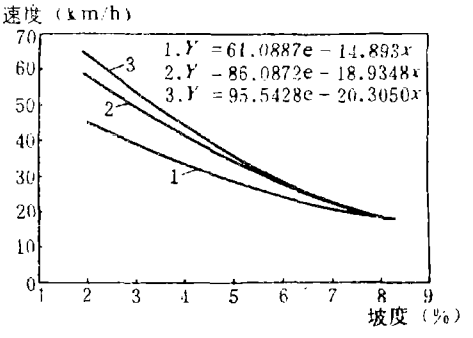

图 3－8 加，减速上坡和正常行驶速度与坡度关系图

1. 正常行驶；2. 加速上坡；3. 减速上坡。

由图 3－8 可以看出，在正常行驶状态下，司机并不是以最大速度冲坡的，因此各纵坡正常行驶速度与稳定速度间有一个差值，见表 3－4。

各纵坡坡度所对应的稳定速度与正常行驶速度差值表　　表 3－4

纵　　坡（%）	2	3	4	5	6	7	8
稳定速度与正常行驶速度差（km/h）	13.60	9.72	6.70	4.40	2.65	1.34	0.37

由表 3－4 可知，纵坡越缓，两者的差值越大，如 2% 纵坡所对应的行驶速度只有稳定速度的 75% 左右。可见，在纵坡坡度较缓的路上司机行驶的随意性较大．随着纵坡坡度的增大，为了克服坡度阻力不得不减速，所以速度差也越来越小，如 8% 所对应的正常行驶速度已达到稳定速度的 98% 以上，实际上，坡度越陡时，稳定速度与正常行驶速度已基本趋于一致。

4　纵坡坡度与汽车油耗之间的关系

4.1　汽车油耗随纵坡坡长的变化规律

由于北京和山西海拔高度相近，其回归曲线可以一并考虑。根据试验结果的整理分析，得出如下结论。

① 在一定纵坡上进行加、减速冲坡时，油耗随坡长按幂函数形式 $Y=ax^{\pm b}$ 变化。当车辆在坡道上作加速上坡运行时，油耗随坡长递减直至坡长增大到一定值后，油耗也趋于稳定．见图 4－1，图 4－2 。坡度越陡，稳定油耗越大，达到稳定油耗所需坡长越短，而且达到稳定油耗的坡长与达到稳定速度的坡长是相同的。

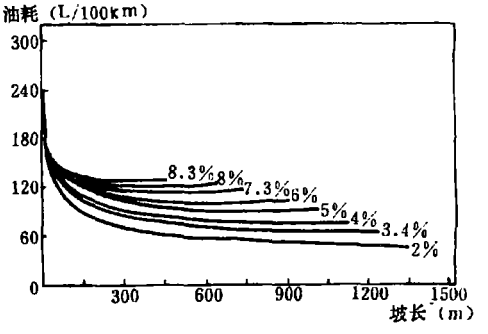

图 4－1　北京、山西地区油耗与坡长关系图
（初速度为 0）

而当车辆以一定的初速度作减速冲坡时，其油耗随坡长的变化与加速上坡相反，按幂函数式形式递增，直至坡长达到稳定坡长后，油耗不再增加，见图 4－3和图 4－4。

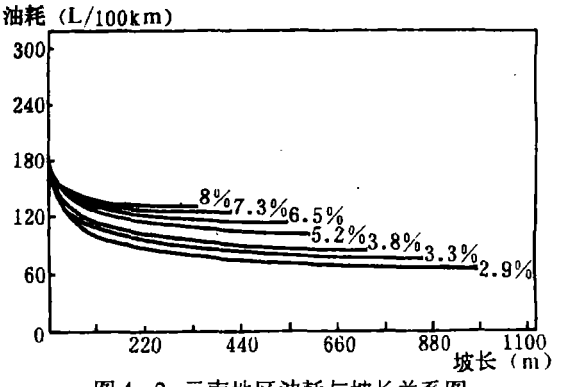

图 4－2　云南地区油耗与坡长关系图
（初速度为 0）

② 当坡度由 4% 升至 5% 时，因车速达到稳定车速的档位由 4 档变至 3 档，油耗也出现一个阶梯形变化，油耗的差值达 15L/100km。因此，从节约能源和提高运输经济效益的角度看，坡度小于 4% 是十分有意义的。另外，试验结果还表明；纵坡坡度小于 6％时，由于以一定初速度减速冲坡的稳定速度大于初

速度为零时的加速上坡的稳定速度，故减速冲坡所达到的稳定油耗略低于同坡度加速上坡的稳定油耗；当纵坡坡度大于 6% 时，两种方式冲坡的稳定油耗基本趋于一致。

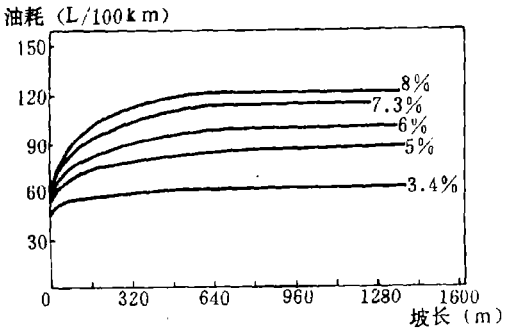

图 4－3　北京、山西地区油耗与坡长关系图
(以一定的初速度上坡)

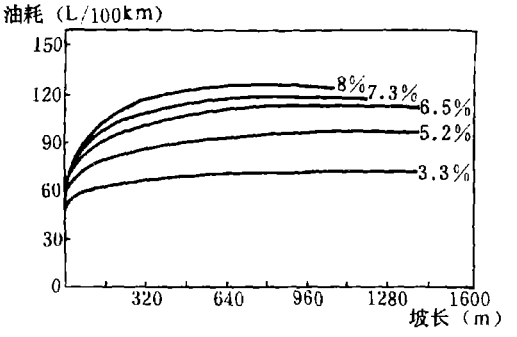

图 4－4　云南地区油耗与坡长关系图
(以一定的初速度上坡)

4.2 纵坡坡度与油耗之间的关系

根据以上分析，分别对两种试验方式下各种纵坡坡度与所对应的稳定油耗进行回归分析，结果发现，二者呈直线相关关系

另外，考虑到司机正常驾驶时，油门开度要比试验时小，而且公路纵坡的坡长绝大多数没有试验段那样长，爬坡时的初速度也不完全一致．单位油耗也不可能与冲坡时一样，因此，我们在北京地区的公路上按正常驾驶方式进行了以下运行试验；① 在两条平曲线指标满足二级公路要求且平整度较好的路段上，用东风 EQ140 货车进行了满载 (5t) 和空载行驶；② 在线型很差，最大纵坡坡度超过 9% 以上，路面十分不平整的砂右路面上进行了载重 (5t)行驶，并测定坡度等几何数据。通过对这些路上的纵坡坡度与相对应油耗之间的相关分析后发现，纵坡坡度与油耗也成直线关系，见图 4－5。

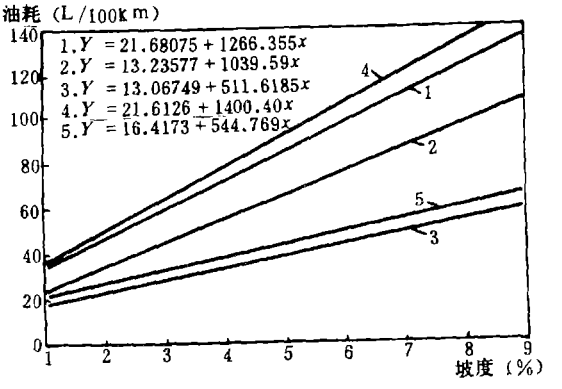

图 4－5　各种道路、运行方式的油耗与坡度关系图
1.加速上坡；2.正常行驶 (满载)；3.空载正常行驶(110线)
4.西峰山砂石路；5.空载正常行驶 (西峰山砂石路)。

由图 4－5 可以看出 。

① 由于司机在实际驾驶中并不是以最大油门开度进行操作，所以实际运行中各纵坡坡度所对应的油耗要比冲坡行驶时达到稳定速度所需的油耗少。纵坡坡度与相应的油耗差值可用下式表示：$Y_{差} = 8.445 + 226.761i$

式中；$Y_{差}$ 为冲坡时同一纵坡下稳定油耗与正常行驶油耗的差值；i 为纵坡坡度。相应纵坡下两者的差值如表 4－1 所示。

一定纵坡坡度下稳定油耗与实际运行油耗的差值表　　表 4－1

纵坡坡度 (%)	2	3	4	5	6	7	8
$Y'_{差}$ (L/100km)	12.98	15.25	17.52	19.78	22.05	24.32	26.58

根据速度差值表和油耗差值表，同一纵坡下的油耗差值除以速度差值就可以得出每一纵坡坡度下在稳定速度内车速每提高 1km 所增加的油耗，见表 4－2。

一定纵坡坡度下车速每提高 1km 需要增加的油耗值　　表 4－2

纵坡坡度 (%)	2	3	4	5	6	7	8
速度提高 1km 所需油耗 (L/100km)	0.95	1.56	2.61	4.50	8.32	18.15	71.84

从表 4－2 可看出，随着纵坡坡度的增大，在相应纵坡上提高行车速度所需要的油耗增加得非常快，8% 纵坡大约为 2% 纵坡的 87 倍，可见，在纵坡陡的纵坡上要提高速度是很不经济的，因此，在进行公路可行性分析及纵坡设计时，不能只注意节省工程投资，而忽略运输经济效益，两者之间必须统一，否则就会造成极大的浪费。

5　加、减速冲坡时各种纵坡坡度所对应的稳定速度和油耗之间的关系

根据前面的分析，现将北京，山西和云南地区各种坡度下相应的稳定速度和稳定油耗列于表 5－1，表 5－2 。

北京，山西地区冲坡、稳定速度、油耗　　表 5－1

坡度 (%)	初速度为 0 冲坡		初速度为 60km/h 冲坡	
	稳定速度 (km/h)	稳定油耗 (L/km)	稳定速度 (km/h)	稳定油耗 (L/100km)
2	58	45		
3.4	47	63	49	62
4.0	41	72		
5.0	32	90	34	87.5
6.0	27	100	27	100
7.3	22.5	115	23	115
8.0	19	121	18.5	120
8.3	17.6	125.6		

云南地区冲坡、稳定速度、油耗　　表 5－2

坡度 (%)	初速度为 0 上坡		初速度为 60km/h 上坡	
	稳定速度 (km/h)	稳定油耗 (L/km)	稳定速度 (km/h)	稳定油耗 (L/100km)
2.9	46.5	63.4		
3.3	39.5	74.0	43.0	72.0
3.7	35.0	82.0		
5.2	27.0	100.7	28.5	98.6
6.5	23.0	115.5	23.5	115.0
7.3	19.0	120.9	20.0	120.7
8.0	17.5	125.0	17.6	125.0

对于上述二表中相应的稳定速度和稳定油耗进行回归分析发现；它们成如图 5－1 所示的关系，同时，将正常行驶时路面平整，线形较好的 110 线和怀丰线各纵坡下相应的行车速度和油耗曲线也绘于图 5－1 中。

将同一纵坡下一般行驶速度和油耗值以及北京地区加速上坡时的速度和油耗值列于表5-3。

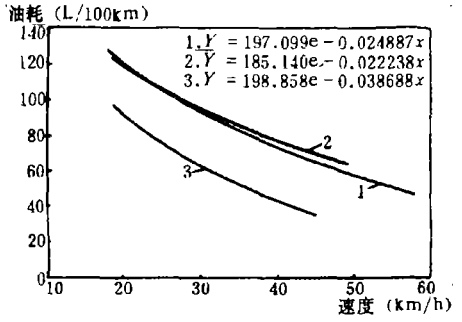

图5-1 速度与油耗关系图

1. 加速上坡；2. 减速上坡；3. 正常行驶 。

由表5-3可以看出，无论何种行驶方式都是纵坡缓时速度高，油耗低；纵坡陡时速度低，油耗高。见图5-2。

一定纵坡坡度下稳定速度、稳定油耗和一般速度、油耗　　表5-3

纵坡 (%)	稳定速度 (km/h)	一般速度 (km/h)	稳定油耗 (L/100km)	一般油耗 (L/100km)
2	52.52	45. 34	44. 5	34
3	49.91	39. 07	65	44
4	40.05	33. 66	72	54. 8
5	33.6	29. 01	90	65. 19
6	27.77	24. 99	100. 5	75. 6
7	22.95	21. 54	115	85. 97
8	18.97	18. 56	120	96. 94

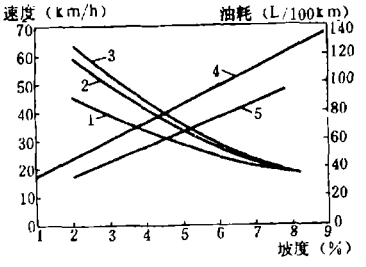

图5-2 各种行驶方式纵坡、速度与油耗关系图

1. 正常行驶；2. 加速上坡；3. 减速上坡；4. 加速上坡稳定油耗；5. 正常行驶油耗。

6 对现行标准和路线设计规范的几点建议

通过分析车辆在纵坡上行驶规律，并结合国内外有关研究，提出以下建议：

① 最大纵坡

通过车辆在纵坡上冲坡试验和一般公路上的正常运行试验，结合标准中设计速度的有关规定，当汽车交通量较大时各级公路的极限纵坡应慎用，尽量采用较小的纵坡。

② 纵坡坡长

我们认为对于纵坡坡长的确定，除其它因素外，车辆在纵坡上运行时所应保持的最低车速也是必须考虑的重要因素，同时还应兼顾我国目前车辆的现状和今后汽车工业的发展，根据对现有各级公路的调查，现将在交通量较少的各级公路上，卡车85%位车速及我国目前山岭重丘区公路的设计速度和15%位车速列于表5-4。

速度调查表　　表5-4

公路等级	85% 位车速	15% 位车速计	山岭重丘区算行车速度
一级公路	75	50	60
二级公路	65	40	40
三级公路	55	30	30
四级公路	45	25	20

以表列85%位车速作为纵坡开始的速度，15%位车速作为纵坡末端的速度，根据这些车速的要求，并结合一定初速度在纵坡上减速上坡时的坡长与车辆运行速度变化的关系和实际运行过程中各纵坡上车辆实际行驶的速度要比稳定车速略低的特点，可以得出表5-5所列的坡长值。

论沥青路面集料标准筛的修订 *

沈金安（研究员） 李福普（助理研究员）

（交通部公路科学研究所 北京 100088）

提要 本文论述了国外沥青路面集料标准筛的现状，论证了将其修改为方孔筛的理由，提出了方孔筛系列的各筛孔尺寸，以及在近期同时使用两种筛孔时的对应关系及过渡方法，为修订我国沥青路面施工技术规范提供了依据。

关键词 沥青路面 集料 矿料级配 标准筛

A modification of the Standard Sieve Size for Asphalt Pavement Aggregates

Shen Jinan (research fellow) Li Fupu(Assistant research fellow)

(Research Institute of Highway, the Ministry of Communications,beijing,100088)

Abstract The situation of standard sieve for asphalt pavement aggregate abroad and the reason of replacing the round opening sieve with square opening sieve are discussed in this paper. A series of square mesh size is proposed and the correlation between square mesh size and round mesh size when they are being used simultaneously in the near future time are formulated to facilitate the future modification of the technical specification asphalt pavement.

Key Words Asphalt pavement Aggregate Mineral grading Standard sieve

各级公路坡长 (m) 参考值 表 5-5

坡度 (%)	一级路		二级路		三级路		四级路	
	坡长	坡顶车速要求	坡长	坡顶车速要求	坡长	坡顶车速要求	坡长	坡顶车速要求
3	800	50						
4	600	50	800	40				
5	400	50	600	40	800	30	800	30
6	200	50	400	40	600	30	600	30
7			200	40	400	30	400	25
8					200	30	200	25
9							200	20