

异形索塔斜拉桥参数敏感性分析

刘增武, 辛景舟, 周水兴, 包发文

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

摘要:以索塔为“飞鸽”造型的异形索塔斜拉桥——贵州沿河乌江三桥为工程背景,采用Midas/Civil有限元分析软件建立空间有限元模型对相关设计参数进行敏感性分析,研究主梁自重、斜拉索刚度、施工荷载、斜拉索初张拉力、混凝土收缩徐变等参数变化对索塔应力和偏位,以及主梁线形和索力的影响规律。结果表明:主梁自重、斜拉索初张拉力、混凝土收缩徐变对成桥状态影响较大,为敏感性参数。索塔塔顶变形的敏感参数为主梁自重和收缩徐变,主梁变形和成桥索力的敏感参数为主梁自重、斜拉索初拉力和收缩徐变,参数变化对索塔截面应力影响较小。

关键词:异形索塔斜拉桥; 敏感性分析; 索力; 收缩徐变; 有限元分析

1 引言

异形索塔斜拉桥是由异形索塔、主梁以及斜拉索组成的超静定结构体系,因其造型优美而迅速流行起来。异形索塔斜拉桥在实际施工过程中受施工方案与工艺、以及自然环境等诸多因素的影响,易造成实际结构施工参数和设计值之间产生偏差,如果不能很好地识别并消除施工中各种偏差对桥梁成桥目标的影响,可能导致成桥内力状态和成桥线形与理论计算有较大偏离。因此有必要分析异形索塔斜拉桥施工参数对成桥状态的影响,通过控制施工过程中的主要敏感性参数偏差有效减小对成桥状态的不利影响。

斜拉桥施工过程的影响因素较多,许多学者、专家对影响常规斜拉桥施工过程中的设计参数进行了相关研究。王生武等分析异形独塔斜拉桥设计参数的敏感性,提出了减少异形独塔斜拉桥施工误差的建议;邬晓光等对影响双曲拱塔斜拉桥成桥内力和线形的设计参数敏感性进行了研究,为此类异形斜拉桥的施工控制和施工误差来源提供借鉴。然而未见主塔四肢偏移的异形塔斜拉桥施工参数敏感性研究的相关文献,并且同类型桥梁的施工控制资料和研究资料较少。

鉴于此类型桥梁在施工过程中受力复杂且受到的影响因素较多,为确保此类型斜拉桥施工顺利实施和成桥状态满足设计要求,该文以贵州沿河乌江三桥,一

座“飞鸽”形主塔四肢偏移的异形塔斜拉桥为工程背景,通过结合实际施工方案建立空间杆系有限元模型,分别研究主梁自重、斜拉索刚度、施工荷载、斜拉索初张拉力以及混凝土收缩徐变等参数变化对成桥时主梁线形、斜拉索索力,以及索塔应力和塔顶偏位的影响规律,并结合乌江三桥实际监控工作,对主要敏感性参数采取重点控制和修正的措施。

2 工程概况

贵州沿河乌江三桥主桥为(145+160)m的异形索塔双索面固结体系预应力混凝土斜拉桥,主桥全长305m,索塔采用“飞鸽”造型,索塔外形新颖,在中国国内尚属首座,索塔高度138.5m。该桥主梁截面采用边主梁,主桥桥面设置双向2%的横坡,主梁顶面宽为24.5m,主梁高为2.5m,主梁顶板厚为0.32m,主塔、主梁材料分别为C50和C55混凝土。全桥共有40对呈扇形布置的斜拉索,斜拉索材料为抗拉标准强度为1860MPa的钢绞线。桥型布置图见图1。

3 有限元模型

利用空间有限元软件Midas/Civil2015建立全桥空间杆系单元结构模型,全桥共划分为478个节点,离散为389个单元,其中主梁120个单元,索塔189个单

收稿日期:2020-04-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0806007);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(编号:51425801)

作者简介:刘增武,男,博士研究生,助理工程师。E-mail:175459554@qq.com

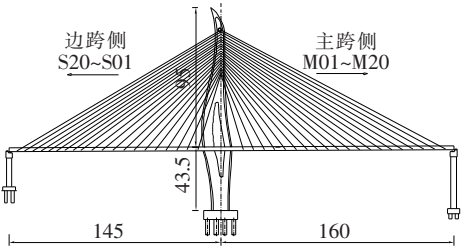


图1 贵州沿河乌江三桥桥型布置(单位:m)

元,斜拉索 80 个单元。异形索塔和预应力混凝土主梁采用梁单元模拟;斜拉索采用桁架单元模拟,斜拉索垂度效应通过 Ernst 公式进行修正;挂篮荷载和桥面铺装分别以节点荷载和均布荷载形式施加,斜拉索力采用初拉力形式施加到相应拉索中;全桥的边界条件为:①主梁 0[#] 和 1[#] 块施工支架采用仅受压节点弹性支撑,支撑刚度与实际支架等效处理;②斜拉索与索塔、主梁之间的连接采用刚臂模拟;③桥塔底部采用一般支撑固结处理,主塔、主塔横梁和主梁 0[#] 块之间的固结通过设置刚性连接处理,主梁端部支座通过一般支撑释放 D_x 约束模拟。

按照施工方案将模型划分为 205 个施工阶段,包括索塔和主梁施工,索塔横梁的分次浇筑与预应力筋张拉,施工挂篮安装与前移以及斜拉索的 3 次张拉等。

4 结构参数敏感性分析

斜拉桥在施工过程中受到结构自重、温度、混凝土收缩徐变、预应力损失、初拉索力等参数影响。结合贵州沿河乌江三桥现场实际施工和监控情况,通过单一变量原则,仅控制单一参数变化,同时其他参数保持不变,对主梁自重、斜拉索刚度、施工荷载、斜拉索初张拉力和混凝土收缩徐变 5 个参数进行分析。以成桥索塔应力和偏位,以及主梁线形和索力为控制目标,研究参数变化对桥梁内力和变形的影响,通过模拟计算确定敏感性参数和非敏感性参数。

4.1 主梁自重

贵州沿河乌江三桥的主梁为预应力混凝土主梁,主梁重度修正后取 25.79 kN/m³。主梁在浇筑过程中因立模偏差、挂篮变形以及混凝土浇筑方量偏差等都会引起主梁重量的变化。结合多座桥梁的施工经验和参考有关文献,考虑主梁自重增大 5% 对成桥状态的影响,主梁自重参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位影响如表 1 所示,主梁自重参数变化对主梁线形和索力的影响如图 2 所示。

表1 主梁自重参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响

参数变化	索塔应力/ MPa	索塔塔顶水平位移/ mm
主梁自重	0.75	-30.71
增大 5% 主梁自重	0.13	-2.82

注:表中数据为极值。下同。

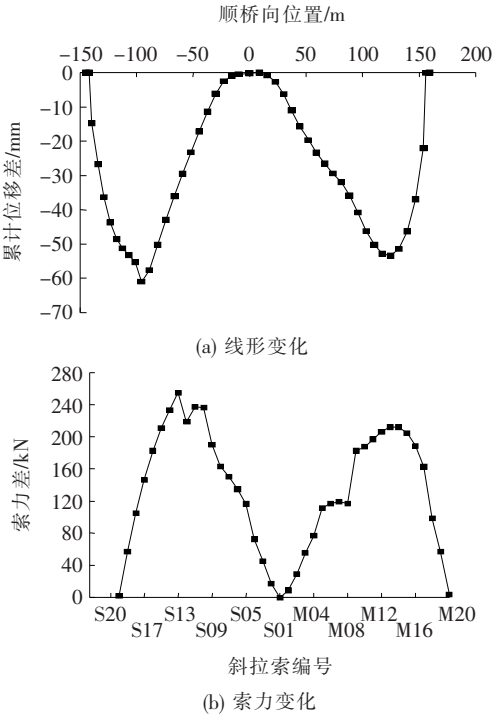


图2 主梁自重参数变化(增加 5% 主梁自重)对主梁线形和索力的影响

由表 1 和图 2 可知:主梁超重 5% 时,对主梁挠度、成桥索力、索塔应力以及索塔顶部水平偏位影响较大,边跨跨中最大下挠累积位移差为 61.06 mm,索力最大差值为 255 kN,增加 5.8%。索塔顶部水平偏位为 2.82 mm,增大 10%,索塔应力最大差值为 0.13 MPa。上述结果表明:主梁自重对成桥状态的影响较大,是主梁挠度、成桥索力、索塔内力以及索塔偏位的敏感性参数。因此主梁自重参数不能忽视,施工过程中应严格监控影响主梁自重的因素,在主梁节段施工过程中严格控制定位钢筋和模板位置,对模板固定钢筋仔细排查,确保模板精度符合规范要求,并根据实测混凝土重度及时修正有限元模型。

4.2 斜拉索刚度

贵州沿河乌江三桥斜拉索采用 PE 防护单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线,斜拉索弹性模量 $E=1.95 \times 10^8$ MPa。斜拉索垂度效应随其长度增加而变得明显,可以通过 Ernst 来修正。斜拉索的轴向刚度由弹

性模量和面积决定,由于斜拉索制造偏差小,拉索面积变化不大。通过改变斜拉索的弹性模量来模拟拉索刚度的变化,研究斜拉索弹性模量(E)减小 10%对成桥内力和变形的影响,斜拉索弹性模量参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位影响如表 2 所示,斜拉索弹性模量参数变化对主梁线形和索力的影响如图 3 所示。

表 2 拉索弹性模量参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响

参数变化	索塔应力/MPa	索塔塔顶水平位移/mm
弹性模量	0.64	-27.60
减小 10%弹性模量	0.02	0.29

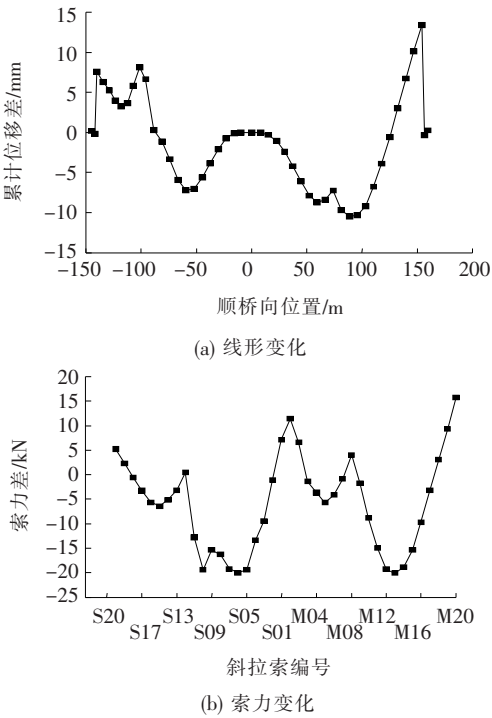


图 3 斜拉索弹性模量变化(减小 10%弹性模量)对主梁线形和索力的影响

由表 2 和图 3 可知:弹性模量减小 10%时,索塔应力最大差值为 0.02 MPa,索塔塔顶水平偏位差值为 0.29 mm,变化幅度为 1%。主梁最大下挠累计位移为 10.48 mm,最大上挠累计位移为 13.37,变化幅度为 8%,索力差值最大为 20 kN,减小 0.6%。上述结果表明:斜拉索刚度变化 10%对成桥状态影响较小,为非敏感性参数,再加上斜拉索实际加工制造偏差在 10%以内,因此采用有限元模拟计算时忽略斜拉索刚度(弹性模量)参数对成桥内力和变形的影响。

4.3 施工荷载

贵州沿河乌江三桥施工荷载包括前支点挂篮、施

工人员和机具、混凝土倾倒(振捣)荷载、以及提前堆放的施工材料和拉索等,在桥梁施工过程中施工荷载的变化可能影响桥梁成桥状态,通过对主梁挂篮重量增加 10%模拟施工荷载的变化,施工荷载参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响如表 3 所示,施工荷载参数变化对主梁线形和索力的影响如图 4 所示。

表 3 施工荷载参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响

参数变化	索塔应力/MPa	索塔塔顶水平位移/mm
施工荷载	0.63	-27.84
主梁挂篮重量增加 10%	0.01	0.05

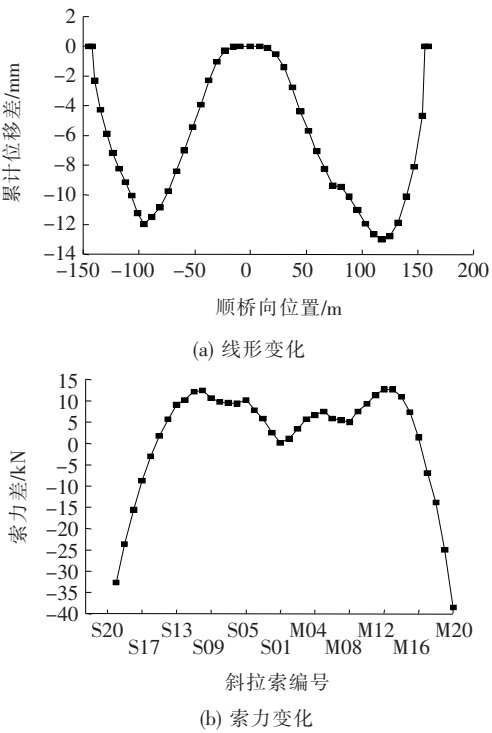


图 4 施工荷载变化(主梁挂篮重量增加 10%)对主梁线形和索力的影响

由表 3 和图 4 可知:当施工荷载增加 10%时,索塔应力差值最大为 0.01 MPa,索塔塔顶水平偏位差值为 0.05 mm,主梁累计位移差值最大为-12.78 mm,位于中跨端部悬臂施工最大悬臂端部位置,索力差值最大为-38 kN,索力增加 0.9%。以上结果表明:施工荷载对成桥索塔应力和索塔偏位以及成桥索力影响很小,这与施工荷载在桥梁建成后撤除有关。但在桥梁施工中仍要加强施工荷载的监控,使有限元模拟计算和现场实际施工荷载保持一致。

4.4 斜拉索初张拉力

贵州沿河乌江三桥采用前支点挂篮对主梁进行施

工,在主梁施工过程中斜拉索分 3 次张拉,即:安装挂篮进行第 1 次张拉,浇筑一半混凝土进行第 2 次张拉,混凝土浇筑完毕强度达 90%进行第 3 次张拉。斜拉索在实际张拉过程中由于自身应力松弛特性、施工张拉技术、环境温度以及索力测量偏差等因素的影响,造成实际拉索索力和设计索力之间产生偏差,索力偏差通常小于 5%。基于斜拉索初张拉力减小 5%对成桥内力、线形和索力的影响,确定其敏感性。初张拉力减小 5%对成桥索塔应力和偏位的影响如表 4 所示,初张拉力参数变化对主梁线形和索力的影响如图 5 所示。

表 4 初张拉力参数变化对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响

参数变化	索塔应力/MPa	索塔塔顶水平位移/mm
初张拉力	0.70	-27.37
减少 5%初张拉力	0.08	0.52

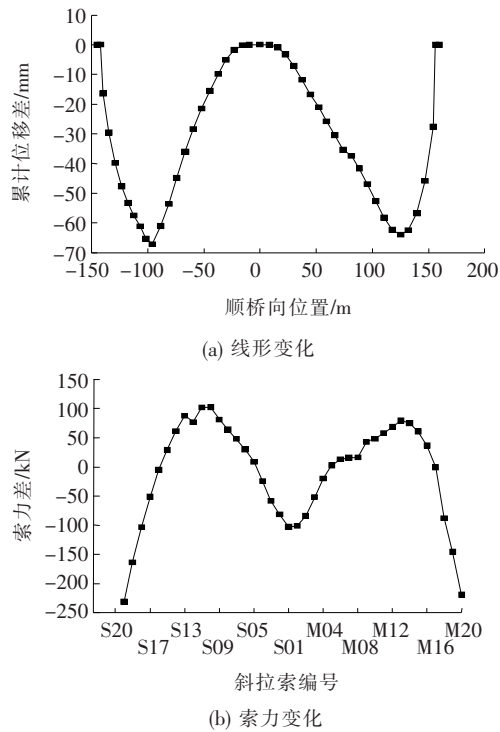


图 5 初张拉力参数变化(减小 5%初张拉力)对主梁线形和索力的影响

由表 4 和图 5 可知:斜拉索初张拉力变化对主梁的挠度和斜拉索成桥索力有很大影响。当初张拉力降低 5%时,边跨主梁下挠最大累计位移差为 67.09 mm,主跨下挠最大累计位移差为 63.90 mm。成桥索力差值最大为 232 kN,减小 5.1%,位于边跨侧端锚索(S20 处),主跨侧成桥索力最大差值为 219 kN,减小

5.6%,位于主跨侧端锚索(M20)。初拉索力降低 5%时,索塔应力差值变化较小为 0.08 MPa,索塔塔顶水平位移差值为 0.52 mm,有一定的影响。上述结果表明:斜拉索索力变化对成桥索塔应力影响较小,但对成桥索力和主梁的位移有很大的影响,对索塔的水平偏位影响也不能忽视,因此,斜拉索初张拉力为敏感性参数。斜拉索张拉时要严格分级张拉并考虑温度对索力的影响,严格控制张拉力和设计索力偏差在合理范围内,斜拉索测量时应避免风荷载、温度及施工机具振动等对索力的影响,确保成桥主梁挠度和成桥索力,以及索塔应力和塔顶偏位满足设计要求。

4.5 混凝土收缩徐变

混凝土收缩徐变影响混凝土斜拉桥的施工和成桥运营,混凝土收缩徐变特性影响因素多、离散性强。由于现在常用的混凝土收缩徐变参数是通过对大量试验数据进行拟合得到的,再加上桥梁施工时环境的差异,所以混凝土收缩徐变在有限元模拟时很难准确把握。采用 CEB—FIP(1990)建议的混凝土收缩徐变模型,通过考虑 10 年收缩徐变对成桥内力和变形的影响,分析收缩徐变的敏感性,10 年收缩徐变影响下成桥索塔应力和偏位的变化值如表 5 所示,收缩徐变对主梁线形和索力的影响如图 6 所示。

表 5 收缩徐变对成桥索塔应力和塔顶偏位的影响

参数变化	索塔应力/MPa	索塔塔顶水平位移/mm
收缩徐变	0.50	-34.21
考虑 10 年收缩徐变	-0.12	-6.32

由表 5 和图 6 可知:混凝土收缩徐变对成桥状态主梁的挠度、斜拉索成桥索力和索塔偏位影响很大,对成桥索塔应力影响不大。边跨主梁下挠最大累计位移差为 47.63 mm,主跨下挠最大累计位移差为 47.42 mm。边跨锚索(S20)成桥索力差值最大为-245 kN,减小 5.4%,主跨锚索(M20)成桥索力差值为 188 kN,减小 4.6%。索塔应力最大差值为 0.12 MPa,索塔塔顶水平位移差值为-6.32 mm。上述结果表明:混凝土收缩徐变对主梁挠度、斜拉索成桥索力和索塔偏位影响显著,属于敏感参数。为减小混凝土收缩徐变对桥梁内力和变形产生的影响,建议结合桥梁施工环境选取合理的收缩徐变计算模型,并在混凝土浇筑时添加恰当的外加剂,对已浇筑混凝土进行充分合理的养护。

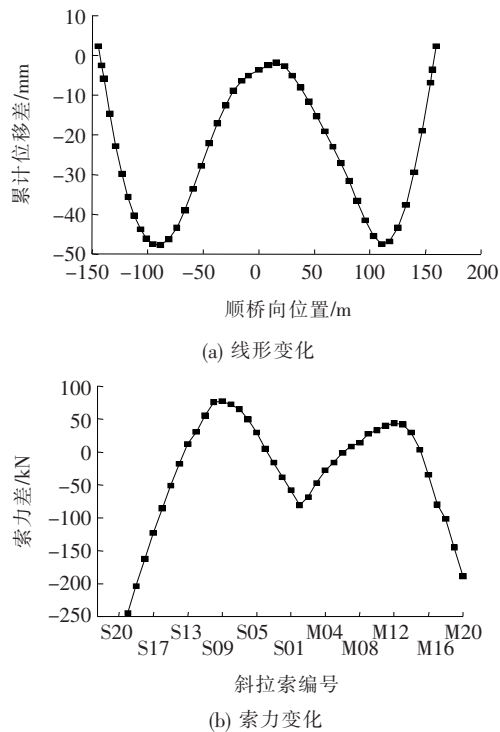


图 6 收缩徐变(10 年收缩徐变)
对主梁线形和索力的影响

将上述 5 种参数对成桥索塔应力、塔顶偏位,以及主梁线形和斜拉索力的影响进行汇总,结果见表 6。

表 6 影响参数变化引起的成桥状态下相关指标增量最大值

参数	主梁竖 向位 移/mm	索塔截 面应 力/MPa	索塔塔 顶偏 位/mm	拉索 索力/ kN
主梁自重增加 5%	61.06	0.13	2.82	255
拉索弹模减小 10%	10.48	0.02	0.29	20
施工荷载增加 10%	12.78	0.01	0.05	38
拉索初拉力减小 5%	63.90	0.08	0.52	232
考虑 10 年收缩徐变	47.63	0.12	6.32	188

注:表中数据为绝对值。

5 结 论

利用有限元软件结合实际现场施工方案对全桥进行模拟计算,分别考虑不同参数的影响,对参数变化进行全面的分析,得出以下结论:

(1) 主梁自重、斜拉索初张拉力、混凝土收缩徐变对成桥状态影响较大,为敏感性参数。斜拉索弹性模量、施工荷载对成桥状态影响很小,为非敏感性参数。

(2) 索塔应力、索塔水平偏位的敏感参数为主梁自重和收缩徐变,其中收缩徐变会减小主塔在运营期的拉应力,对主塔有利。主梁变形和成桥索力的敏感参数为主梁自重、斜拉索初张拉力和收缩徐变。当初张拉力降低 5%时,主梁下挠累计位移差为-67 mm,边跨端锚索索力差为 232 kN,对成桥状态影响很大,建议斜拉索在安装和施工张拉时要严格控制。

(3) 在实际施工过程中应严格监控对桥梁结构变形和内力产生较大影响的敏感参数,并结合现场具体施工情况及时修正混凝土重度以及斜拉索初拉力的理论参数值,确保桥梁成桥后的索塔应力、索塔变形、主梁线形以及斜拉索索力等符合设计要求。

在桥梁施工过程中,修正主要敏感参数,舍弃不敏感参数,将这种方法应用于贵州沿河乌江三桥的施工监控过程中,取得了良好的效果。

参考文献:

[1] 谢明志,卜一之,张克跃,等.特大跨度混合梁斜拉桥几何控制法参数敏感性[J].长安大学学报(自然科学版),2014(3).

[2] 王灿,刘永健,王莹,等.斜塔有背索斜拉桥结构参数敏感性分析[J].世界桥梁,2013(2).

[3] 孙全胜,宋金良.倾角对无背索斜拉桥的受力影响分析[J].公路,2014(2).

[4] 熊树章.钢混叠合梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J].中外公路,2016(1).

[5] 谢耿,蒋云锋,刚果(布)小曲线平弯斜拉桥斜拉索张拉力敏感性分析[J].中外公路,2018(2).

[6] 王生武,项纯夫,李腾腾,等.异形独塔斜拉桥参数敏感性分析[J].公路工程,2015(1).

[7] 邬晓光,杜仕朝,康春霞.双曲拱塔斜拉桥参数敏感性分析[J].公路,2016(9).

[8] 刘世明,刘永健.无背索曲塔曲梁斜拉桥参数敏感性分析[J].公路交通科技,2014(2).

[9] 马文刚,黄侨,陈晓强,等.基于两次等效索长的斜拉桥索力测量[J].公路交通科技,2011(9).

[10] 李忠三,雷俊卿,颜东煌.大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J].北京交通大学学报,2012(1).

[11] 宋亚洲,李昌辉,蔡瑞瑞.钢-混凝土混合梁斜拉桥参数敏感性分析与控制[J].施工技术,2013(23).

[12] 徐佰顺,钱永久,李豹,等.大跨径曲线矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J].世界桥梁,2016(5).

[13] 张国栋,李源,宋一凡,等.前支点挂篮斜拉桥施工过程中中间索力的确定方法[J].中外公路,2017(4).