

国家自然科学基金（编号51279126）资助

内蒙古自治区交通科技项目（编号NJ-2014-3）资助

高速公路设计与施工 关键技术后评价研究

Gaosu Gonglu Sheji yu Shigong Guanjian Jishu Houpingjia Yanjiu

张志耕 崔澍 程国义 著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金(编号 51279126)资助

内蒙古自治区交通科技项目(编号 NJ-2014-3)资助

高速公路设计与施工关键技术后评价研究

张志耕 崔 激 程国义 著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高速公路设计与施工关键技术后评价研究 / 张志耕, 崔激, 程国义著. — 天津: 天津大学出版社, 2015. 12

国家自然科学基金(编号 51279126)资助, 内蒙古自治区交通科技项目(编号 NJ-2014-3)资助

ISBN 978-7-5618-5486-0

I. ①高… II. ①张… ②崔… ③程… III. ①高速公路-设计-后评价-研究 ②高速公路-道路施工-后评价-研究 IV. ①U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 301261 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	廊坊市海涛印刷有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm × 260mm
印 张	25.75
字 数	643 千
版 次	2016 年 1 月第 1 版
印 次	2016 年 1 月第 1 次
定 价	58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

丹东至拉萨国道主干线老爷庙(蒙冀界)至集宁段高速公路(简称“老集高速公路”)是内蒙古地区第二个利用世界银行贷款建成的公路项目,是国家规划建设“五纵七横”国道主干线和内蒙古自治区规划的“三横九纵,十二出口”路网主骨架布局中的重要组成路段,也是内蒙古自治区连接我国“三北”地区的最重要的对外通道和经济干线。

老集高速公路一通车,便迅速而有效地缓解了当地公路运输的紧张状况,其快捷、舒适的运输环境,促进了西部地区的资源开发和经济发展,对接国家主干线建设,改善了沿线投资环境,带动了城乡经济的快速发展。老集高速公路自2005年建成通车至今已有10年,历经重载、大流量的交通运营状况,仍运行良好,其2015年的质量检测依然达到优良,代表了内蒙古自治区高速公路建设水平。

老集高速公路在建设过程中,解决与发展了FIDIC(Fédération Internationale Des Ingénieurs Conseils,菲迪克)合同条件下的高速公路建设管理、路基路面一体化设计、高原湿地软基处理、滑坡治理、巨粒土压实、高填方路基工后沉降控制、边坡防护、路面横向排水、路面反射裂缝防治、沥青混合料设计施工与质量控制、特大刚架拱桥桥面设计及施工质量控制等一系列设计与施工关键技术问题,形成了较为系统的西部高原地区高速公路设计与施工技术体系。对这些关键技术问题进行总结与后评价,探究其适应性,总结其优缺点,完善其技术内容,对于内蒙古地区乃至我国高原地区的高等级公路建设具有重要的参考价值 and 借鉴意义。

本书共分为12章,内容涉及老集高速公路施工管理及地基、路基、路面、桥梁等的设计与施工等诸多方面,较为系统地总结了老集高速公路建设过程中解决和发展的关键技术问题,并结合运营与维护状况对这些关键技术进行了评价和探讨。

感谢王海亮、侯芸、张宝龙、尚海龙、王瑞芳等为本书付出的辛勤劳动;感谢长安大学刘洪海教授、路域生态工程有限公司王新民总经理、武汉理工大学向木生教授、中国冶金地质总局第一地质勘查院贾开国高工、铁路科学研究院西北分院王祯教授级高工、内蒙古交通设计研究院有限责任公司王亚军教授级高工等国内同行提供的无私帮助;感谢内蒙古自治区交通运输厅科教处刘凤林处长对我们的鼓励 and 大力支持!

由于作者的学识和水平所限,难免存在疏漏、不妥之处,诚恳希望读者与专家指正。

作者
2015年8月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 老集高速公路概况	(1)
1.2 老集高速公路运营状况	(4)
1.3 老集高速公路的技术现状	(11)
1.4 技术总结	(13)
第2章 高速公路项目建设管理	(15)
2.1 概述	(15)
2.2 老集高速公路工程项目管理组织	(21)
2.3 老集高速公路工程项目管理要素	(25)
2.4 技术总结	(45)
2.5 参考文献	(46)
第3章 高速公路路基路面一体化设计方法	(48)
3.1 概述	(48)
3.2 路基路面一体化设计参数的确定	(56)
3.3 路基路面一体化设计方法	(60)
3.4 技术总结	(67)
3.5 参考文献	(68)
第4章 软基处理技术	(69)
4.1 概述	(69)
4.2 软基处理技术机理分析	(78)
4.3 软基处理技术的设计方法及施工工艺	(100)
4.4 软基处理技术的质量检测	(115)
4.5 技术总结	(135)
4.6 参考文献	(135)
第5章 巨粒土压实技术	(137)
5.1 概述	(137)
5.2 巨粒土工程特性	(139)
5.3 巨粒土压实技术	(146)
5.4 质量检测方法与评定标准	(154)
5.5 技术总结	(156)
5.6 参考文献	(157)

第6章 高填方路基工后沉降控制技术	(158)
6.1 概述	(158)
6.2 超载预压控制技术	(160)
6.3 高填方路基沉降监测技术	(169)
6.4 技术总结	(174)
6.5 参考文献	(174)
第7章 滑坡处理技术	(176)
7.1 概述	(176)
7.2 典型滑坡稳定分析及加固技术机理	(185)
7.3 古滑坡综合治理方案及设计工艺	(208)
7.4 膨胀土滑坡综合治理方案及设计工艺	(213)
7.5 技术总结	(217)
7.6 参考文献	(218)
第8章 边坡防护技术	(219)
8.1 概述	(219)
8.2 老集高速公路边坡生态恢复技术及施工工艺	(227)
8.3 老集高速公路路域生态建设质量评价体系	(242)
8.4 老集高速公路生态恢复植物适宜区划	(246)
8.5 技术总结	(254)
8.6 参考文献	(262)
第9章 路面横向排水技术	(263)
9.1 概述	(263)
9.2 沥青路面横向排水设计	(265)
9.3 无砂混凝土的配合比、强度、渗透特性研究	(269)
9.4 技术总结	(273)
9.5 参考文献	(274)
第10章 沥青路面反射裂缝控制技术	(275)
10.1 概述	(275)
10.2 大粒径沥青混合料集料级配设计及配合比设计	(278)
10.3 大粒径沥青混合料路用性能研究	(295)
10.4 大粒径沥青碎石作为下面层的路面结构设计	(304)
10.5 预锯缝联合土工布防裂技术	(319)
10.6 技术总结	(322)
10.7 参考文献	(323)
第11章 沥青混合料技术与质量控制	(325)
11.1 概述	(325)
11.2 老集高速公路 Superpave 沥青混合料设计	(326)

11.3	Superpave 混合料路面离析病害及控制	(349)
11.4	技术总结	(367)
11.5	参考文献	(368)
第 12 章	特大刚拱桥设计及施工质量监控技术	(369)
12.1	特大刚拱桥桥面系设计	(369)
12.2	特大刚拱桥施工过程控制	(374)
12.3	特大刚拱桥拱肋支架设计与预压监测	(378)
12.4	特大刚拱桥线性测量与控制	(383)
12.5	技术总结	(400)
12.6	参考文献	(401)

第 1 章 绪论

1.1 老集高速公路概况

1.1.1 老集高速公路简介

丹东至拉萨国道主干线老爷庙至集宁段高速公路(简称“老集高速公路”),是国家规划建设的“五纵七横”国道主干线和内蒙古自治区规划的“三横九纵,十二出口”路网主骨架布局中的重要组成路段,也是内蒙古自治区连接我国“三北”地区的最重要的对外通道和经济干线。它的建设对促进西部地区的资源开发和经济发展,对接国家主干线建设,改善沿线投资环境,带动城乡经济的快速发展具有十分重要的意义。

老集高速公路起点位于内蒙古乌兰察布市兴和县老爷庙乡与河北交界处,与河北宣化至老爷庙高速公路相接,途经兴和县南、甲坝子、巴音塔拉,终点为集宁南郊三号地,与集呼高速公路相接。总体路线走向为东西向,路线全长 89.338 km,起讫桩号为 K248 + 562—K337 + 904,为双向四车道、全封闭、全立交高速公路,如图 1-1 所示。

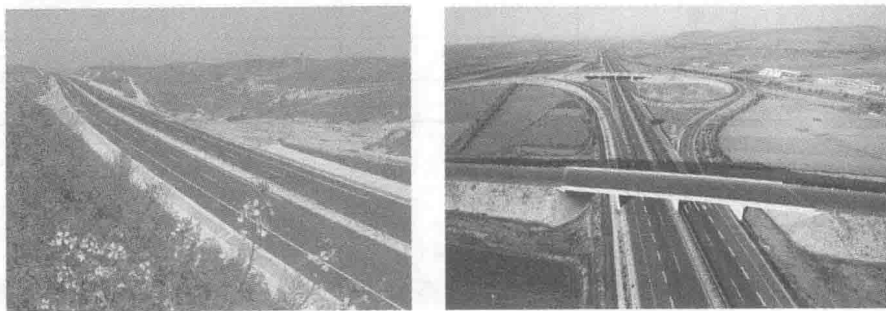


图 1-1 老集高速公路

老集高速公路建设资金由世界银行贷款、国家交通部补贴及自治区交通厅自筹等构成。项目预算总投资 18.64 亿元人民币。老集高速公路为利用世界银行贷款项目,按国际通行的 FIDIC 合同条件进行管理和实施,土建工程、机电工程和海外监理咨询采用国际竞争性招标。2003 年 1 月 10 日开工,建设工期为 3 年,于 2005 年 9 月 19 日正式建成通车。

1.1.2 主要技术指标

老集高速公路为双向四车道、全封闭式、全立交高速公路。设计行车速度 100 km/h,路基宽度为 26.0 m,行车道 $2 \times (2 \times 3.75 \text{ m})$,中央分隔带宽 2.0 m,沥青混凝土高级路面,桥

涵设计荷载为汽车—超 20 级、挂车—120 级,桥面宽为 $2 \times (\text{净 } 11.25 \text{ m} + 0.5 \text{ m 防撞墙} + 0.75 \text{ m 波形护栏})$,小桥涵与路基同宽。主要技术指标见表 1-1。

表 1-1 老集高速公路主要技术指标

项目	单位	指标
路线长度	km	89.338
公路等级	高速公路	
设计车速	km/h	100
路基宽度	m	26
行车道宽度	m/幅	$2 \times 3.75/1$
中央分隔带宽度	m	2.0
最小曲线半径	m	800
最大曲线半径	m	5 500
直线最大长度	m	3 204.068
最大纵坡	%	4
最小坡长	m	400
最小曲线半径(凸型)	m	10 000
最小曲线半径(凹型)	m	8 000
桥涵设计荷载		汽车—超 20 级、挂车—120 级
设计洪水频率		1/100
桥面净宽(新建高速公路)	m	2×11.25
桥面净宽(改建原二级公路)	m	11.00
路面类型		沥青混凝土

1.1.3 主要工程量

主要工程量:路基土石方 $1\,767.4 \text{ 万 m}^3$,大桥 $1\,770 \text{ m/座}$,互通立交桥 2 座,分离立交桥 18 处,小桥 507.9 m/座 ,防护及排水工程 56.19 万 m^3 ,沥青混凝土路面 $2\,087\,400 \text{ m}^2$ 。主线设收费站 1 处,匝道设收费站 2 处、服务区 1 处、停车区 1 处。

1.1.4 老集高速公路建设采用的新技术、新工艺、新材料

老集高速公路建设者发扬开拓进取、勇于创新的精神,在高速公路建设中不断尝试推行通过相关试验后技术上达到成熟的新技术、新工艺、新材料。其主要应用情况如下。

1.1.4.1 高速公路建设项目管理

老集高速公路是内蒙古自治区第二个利用世界银行贷款的公路项目,在项目实施过程中,依据 FIDIC 合同条件,组织编制了《老集高速公路项目管理办法》《监理实施细则》《监理管理办法》《监理程序》《监理手册》《合同管理办法》《从业人员廉政守则》以及相应的考评

标准,量化了各项管理目标、要求及指标;形成了系列管理文件,尤其是对全线的工程进行了详细的单位、分部、分项工程划分,使质量控制、资料形成、进度管理及计量支付(合同管理)、计划管理建立在一个便于统一管理的基础之上。

1.1.4.2 软基处理技术

针对高原湿地软土地基,采取了干振碎石桩处理技术。在现场长期监测的基础上,结合室内土工试验和数值模拟,深入研究了干振碎石桩联合土工格栅处理湿地软基的作用机理和变形特征,优化了其设计和施工工艺;在传统的单桩检测工艺的基础上,开发了采用瑞利面波技术进行快速质量检测的可靠技术,并进行了推广应用,通过不断实践摸索总结出一整套施工工艺和检测方法。

1.1.4.3 巨粒土压实技术

由于全线筑路材料匮乏,而大部分挖石又多废弃,为此,引进冲击式压路机用废弃石方作为路基填料。在现场压实试验的基础上,对分层厚度和压实参数进行了优化比选,建立了采用毫米级水准仪和弯沉仪联合进行路基压实度和整体强度控制的基本方法。在大量试验的基础上,建立了巨粒土路基填料的压实控制标准。这样既解决了路基填料短缺的问题,又避免了弃石占地,同时克服了下雨时无法进行路基施工的弊端,而路基质量也得到了充分保障,做到了一举多得。

1.1.4.4 高填方路基工后沉降控制技术

为了加速工后沉降的完成,保证高填方路基的质量,对全线填土高度大于6 m 和不良地质地段136处进行超载或等载预压处理,以加速工后沉降完成。同时,埋设沉降板进行连续12个月的沉降观测,根据实时监测结果及时了解施工过程中路堤的沉降及稳定情况,进一步指导施工的同时确保路堤的安全与稳定;根据观测数据预测沉降趋势,确定下道工序;通过软土地基沉降监测,确定预压卸载时间,以便在较短时间内完成路基的填筑工作,并确定路面的最佳铺筑时间及推算工后沉降量。

1.1.4.5 滑坡处理技术

老集高速公路在东部兴和附近穿越山区、半山区,而在西部则穿越以黄旗海为代表的高原湿地,沿线经过多处软弱地基,地质现象丰富,边坡病害较为常见。在工程建设过程中,老集高速公路建设单位对高原地区高速公路滑坡病害,特别是针对以古滑坡和膨胀土为主要特点的滑坡类型提出了系统的解决方案,深入研究了强夯技术、锚索抗滑桩技术和劈裂锚固注浆技术在整治滑坡工程中的设计方法与施工工艺,为今后滑坡的研究与处理提供了理论依据与借鉴。

1.1.4.6 路堑边坡防护技术

老集高速公路在实施过程中开展了《内蒙古干旱地区公路边坡生态恢复技术应用研究》。研究内容包括:内蒙古高寒干旱(半干旱)地区路域生态建设设计思路研究、内蒙古高寒干旱地区路域生态建设典型技术应用研究和内蒙古高寒干旱地区路域生态建设质量评价研究,总结适用于内蒙古(半)干旱地区高速公路边坡恢复防护的工程技术;建立了公路路域生态恢复质量评价(指标)体系;进行了内蒙古高速公路生态恢复植物适宜区划等。

1.1.4.7 路面横向排水技术

老集高速公路路基采用混凝土硬化,在实施过程中为更好地排出面层与基层之间的水,路肩板采用两层实施,其中下层采用透水(无砂)混凝土有效地解决沥青混凝土排水问题,提高沥青混凝土路面的使用寿命。

1.1.4.8 沥青路面反射裂缝控制技术

为解决下湿地半刚性基层开裂的问题,在半刚性基层上铺筑一定厚度的柔性基层,形成一种上柔下刚式的“刚柔复合基层”。这种刚柔复合基层既能充分发挥半刚性基层的高承载力的优势,又能通过柔性基层防止和减少半刚性基层反射裂缝。结合老集高速试验路的应用情况,总结刚柔复合基层的厚度设计及结构组合优化、混合料设计、施工和验收的控制等一系列相关内容,有助于减少沥青路面反射裂缝,提高路面结构承载力,改善沥青路面的服务水平,并延长沥青路面的使用寿命,节约大量的养护费用。

1.1.4.9 沥青混合料设计、施工与质量控制技术

Superpave 是基于沥青混凝土性能的规范体系,其试验和分析同路面实际使用性能直接相关。老集高速公路在实施过程中,在充分学习借鉴 Superpave 技术的基础上,结合我区的气候特点、交通状况,开展了 Superpave 混合料机械化施工过程中离析的产生机理与施工质量控制技术研究,并将研究成果应用于老集高速公路建设,达到改善高速公路沥青路面的使用性能,延长沥青路面的使用寿命的目的。

1.1.4.10 特大刚架拱桥设计及施工质量控制技术

老集高速公路工程设计研究人员以三道沟特大刚架拱桥为依托,结合内蒙古地区的气候、环境与未来荷载特点,对沥青混凝土桥面铺装、水泥混凝土桥面板、湿接缝、护栏及伸缩缝等桥面系统进行设计和关键施工技术研究,形成以该冰冻地区为代表的西部地区水泥混凝土桥梁桥面系统耐久性设计与施工技术体系。

这些新技术、新工艺、新材料的研究和应用,有力地推动了老集高速公路的建设进度和施工质量提升,保障了老集高速公路的安全持久运营,节约了维护保养成本,对这些关键技术进行后评价,对于提升内蒙古地区乃至我国高速公路建设水平,具有重要的实际意义。

1.2 老集高速公路运营状况

老集高速公路一通车,便迅速而有效地缓解了当地公路运输的紧张状况。其快捷、舒适的运输环境,促进了西部地区的资源开发和经济发展,对接国家主干线建设,改善沿线投资环境,带动了城乡经济的快速发展。老集高速公路自 2005 年建成通车至今已有 10 年,历经重载、大流量的交通运营,仍运行良好。

1.2.1 基本运营状况

依据老集高速公路入口以及出口车流量统计表,得出最近几年的年平均日交通量,见表 1-2。虽然自 2013 年开始年平均日交通量呈现下降趋势,但是运营近 10 年之久的老集高速公路仍然保持着相对较大的交通量运行状况,说明老集高速公路具有优秀的通行能力和服务水平。

表 1-2 年平均日交通量

年份/年	车道	入口日交通量/(辆/日)	出口日交通量/(辆/日)
2010	4	6 529	6 526
2011	4	8 942	8 898
2012	4	9 152	9 090
2013	4	8 462	8 390
2014	4	7 424	7 337
2015(1—5月)	4	5 050	4 983

1.2.2 基本交通量状况

表 1-3 列出了老集高速公路交通运输的车型种类,一共分为 9 类,各类车的代表车型也对应列出。货车分类依据为车辆的技术参数——轴数,轴数越大代表车载越重。

表 1-3 交通量表中的 9 类车型

车型	分类	代表车型	轴数
客车	一类客车(1~7座)	江淮 iEv	2
	二类客车(8~19座)	江淮 HK6606K	2
	三类客车(20~39座)	安凯客车 HFF6930K58C1E5	2
	四类客车(40座以上)	宇通客车 ZK6108HC	2
货车	五类车	东风 DFA5080XXY12D3AC	2
	六类车	东风 DFL1190BX5A	3
	七类车	东风 EQ5280CCQ	4
	八类车	东风天龙 EQ1311W	5
	九类车	解放 J6 半挂车	≥6

表 1-2 给出的年平均日交通量已经得出了老集高速公路大流量的运营状况,分析各车型对应的年总流量以及占总量的百分比,如图 1-2 至图 1-7 所示,2010 年至 2012 年,占总车流量百分比最大的是七类车(4 轴货车),且百分比达到 80% 以上,一类客车次之;2013 年至 2015 年,九类车(6 轴货车)车流量迅速增加,且自 2013 年开始成为主要交通量,百分比达 70% 左右,一类客车次之。根据上述统计数据可以看出,老集高速公路交通量虽然受煤炭外运影响而略有波动,但一直维持在较高水平。

图 1-8 至图 1-13 为 2010 年至 2015 年老集高速公路运营期各月份当量轴次统计图,从图中可看出,老集高速公路各月份累计当量轴次稳定增加,并在 2013 年达到峰值。图 1-14 为 2011 年至 2014 年老集高速公路年当量轴次统计图,从图中可以看出,老集高速公路的年累计当量轴次最大值出现在 2013 年,达到 2 906 258.4,体现了重载的交通运输特点。

通过综合分析可以看出,老集高速公路交通运输一直维持了大流量、重载的特点,其在

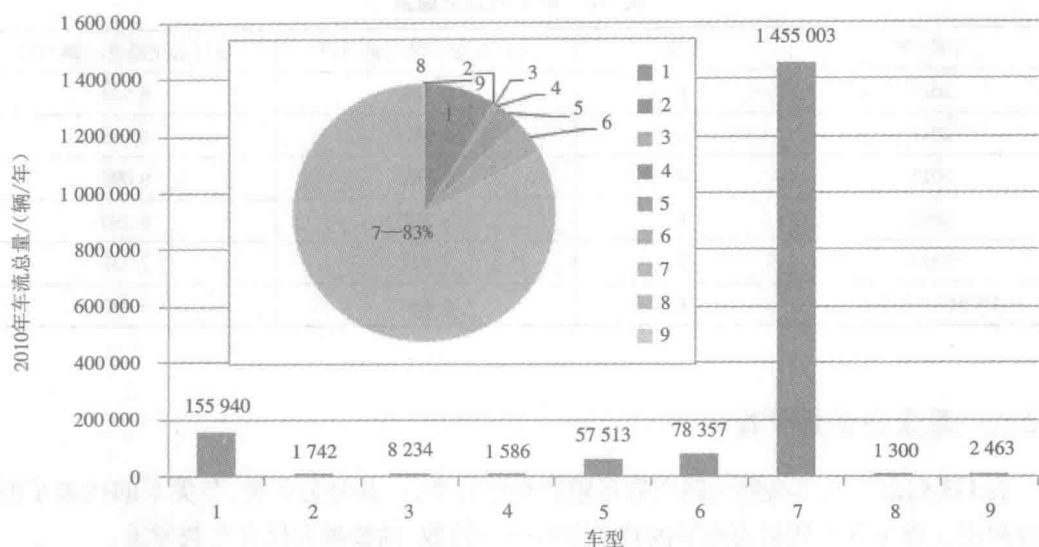


图 1-2 2010 年各车型车流总量

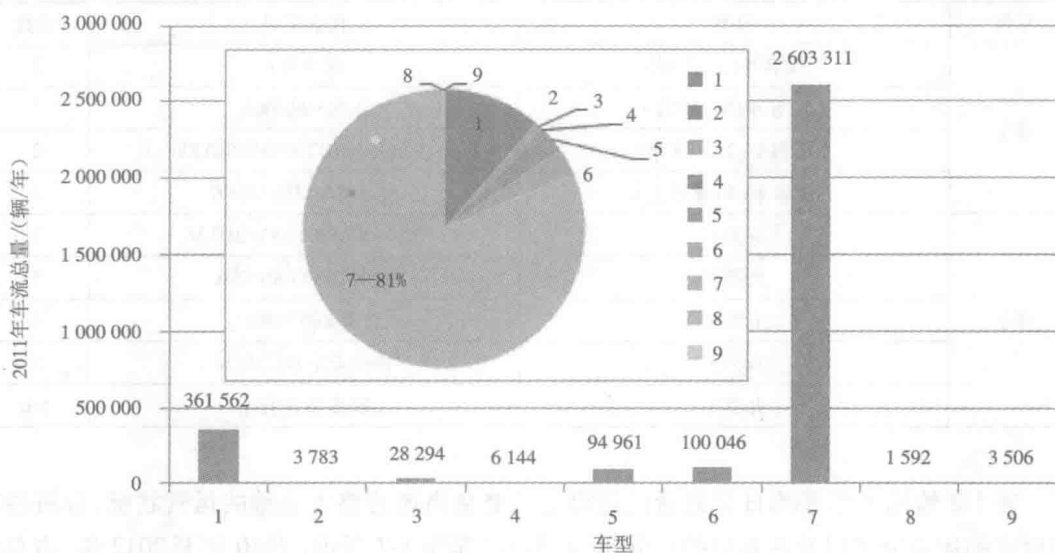
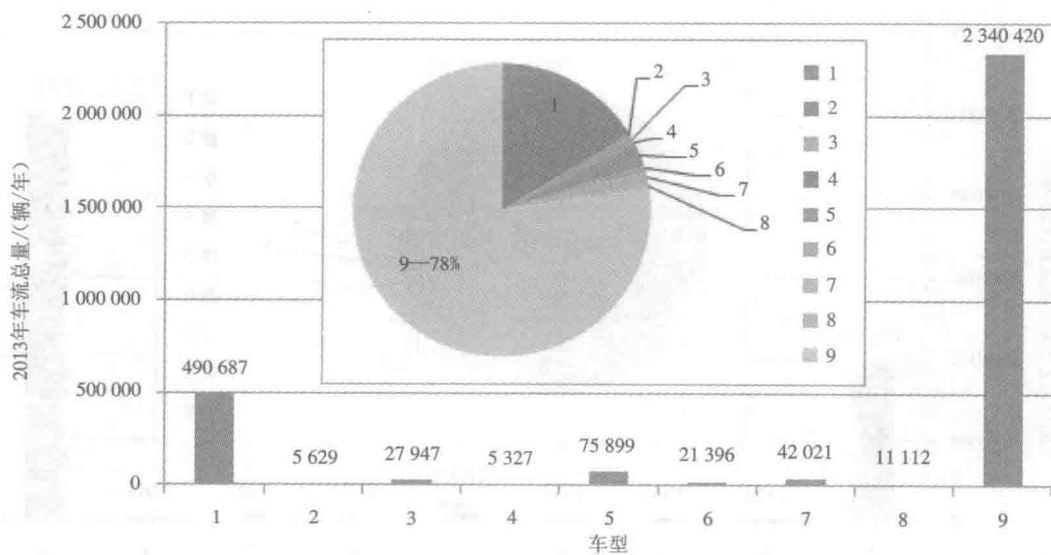
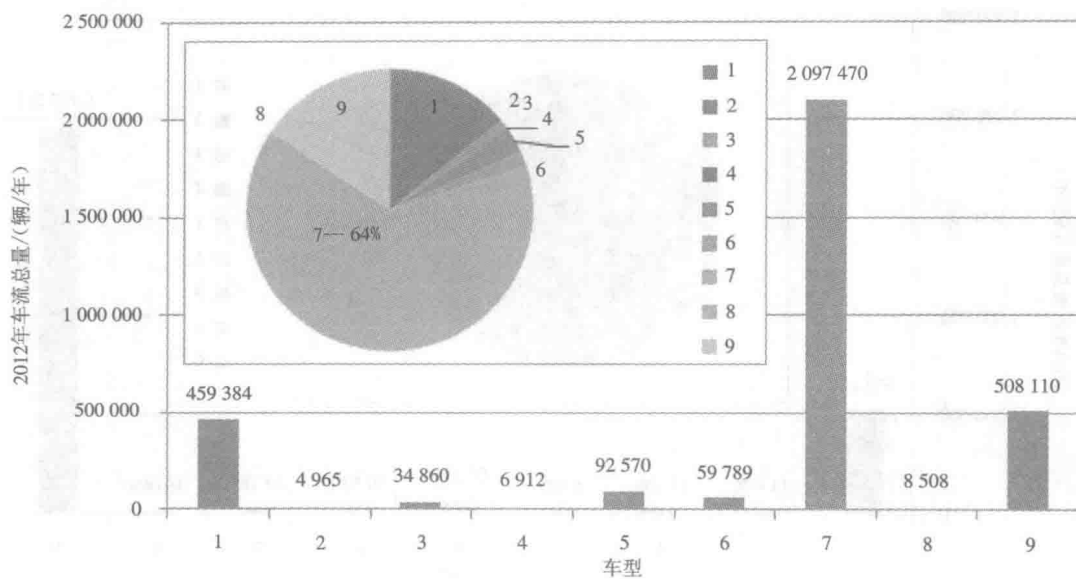


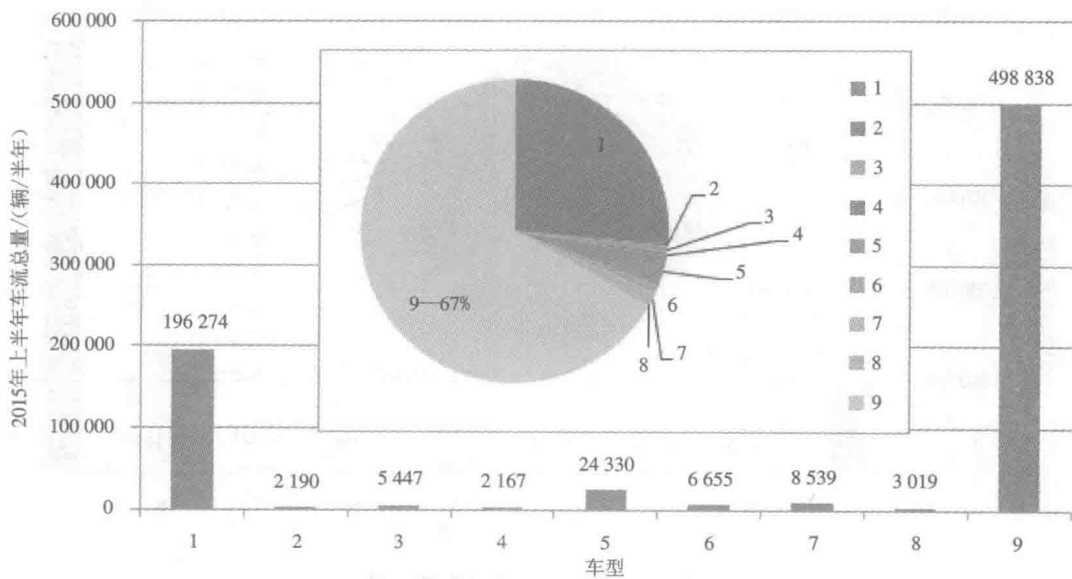
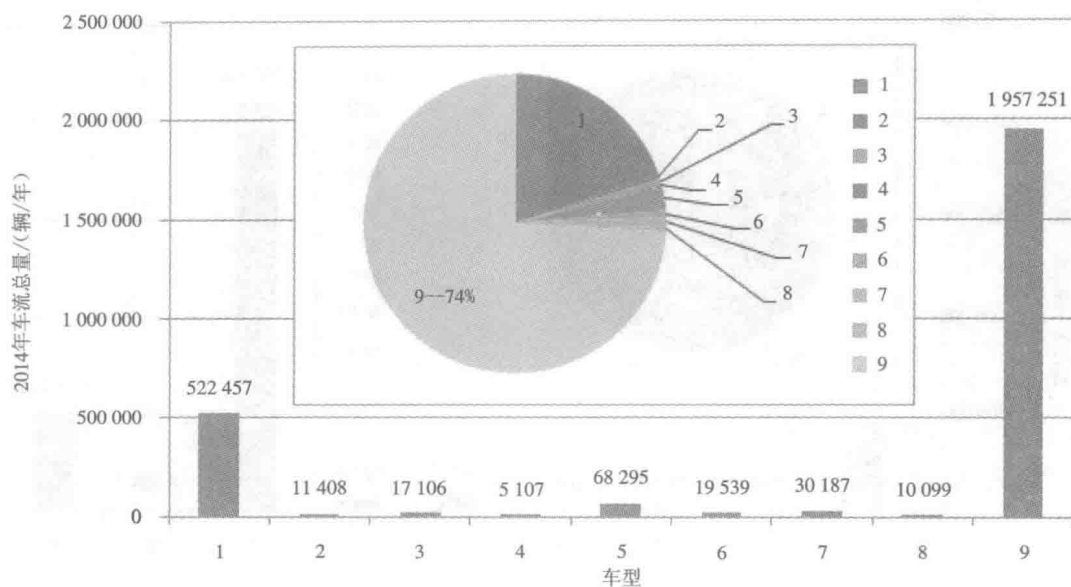
图 1-3 2011 年各车型车流总量

不利的交通运输条件下的运营质量更能突出本工程的建设质量水平。

1.2.3 经济、社会效益

老集高速公路建成通车至今,极大地改善了沿线地区的运输条件,提高了路网效用,完善了内蒙古自治区的高速公路网结构,促进了沿线地区的经济发展,改善了周边生活环境,而且老集高速公路建设过程中开发的新技术、新工艺促进了高速公路设计、施工、科研以及管理水平的提高,为西部地区高速公路建设发展做出了重要的贡献。





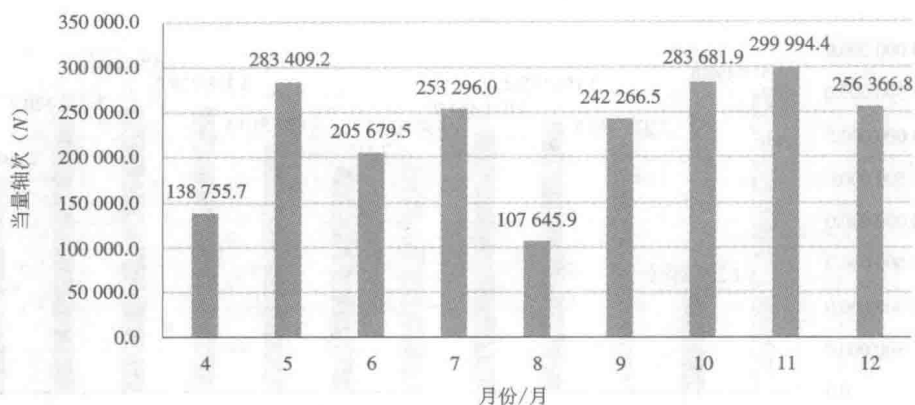


图 1-8 老集高速公路 2010 年各月份当量轴次 (N)

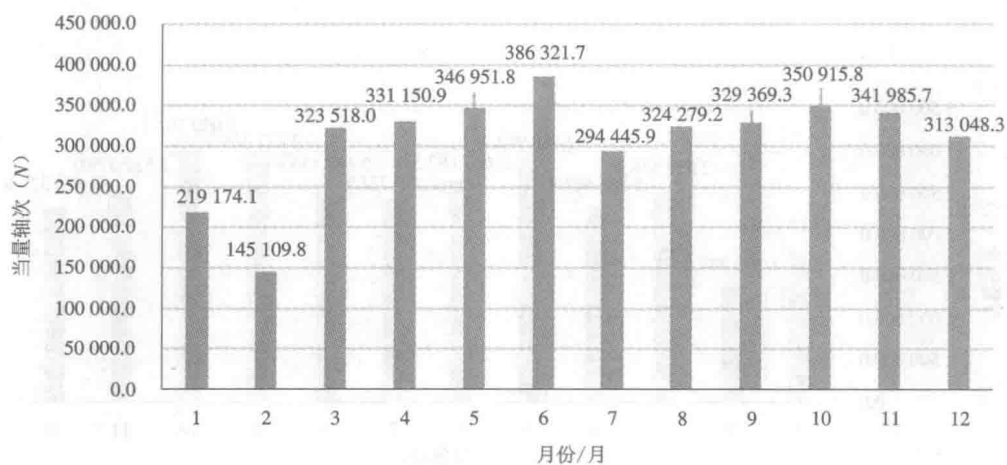


图 1-9 老集高速公路 2011 年各月份当量轴次 (N)

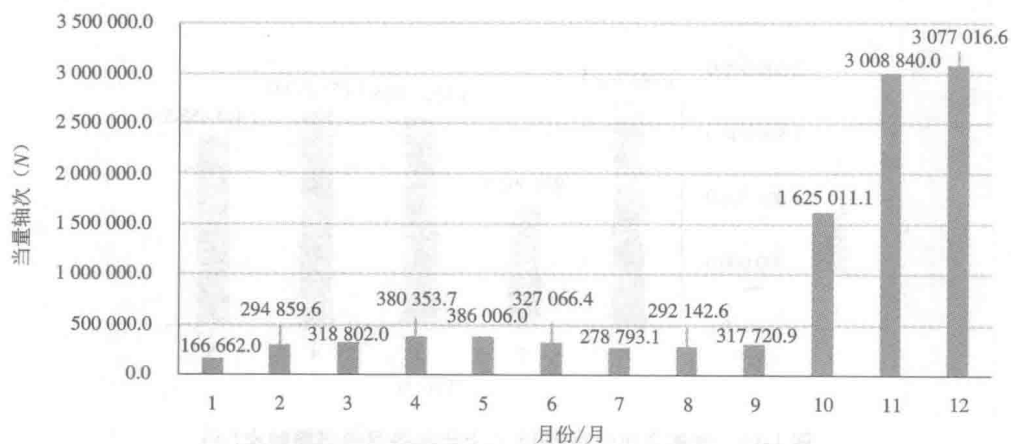


图 1-10 老集高速公路 2012 年各月份当量轴次 (N)

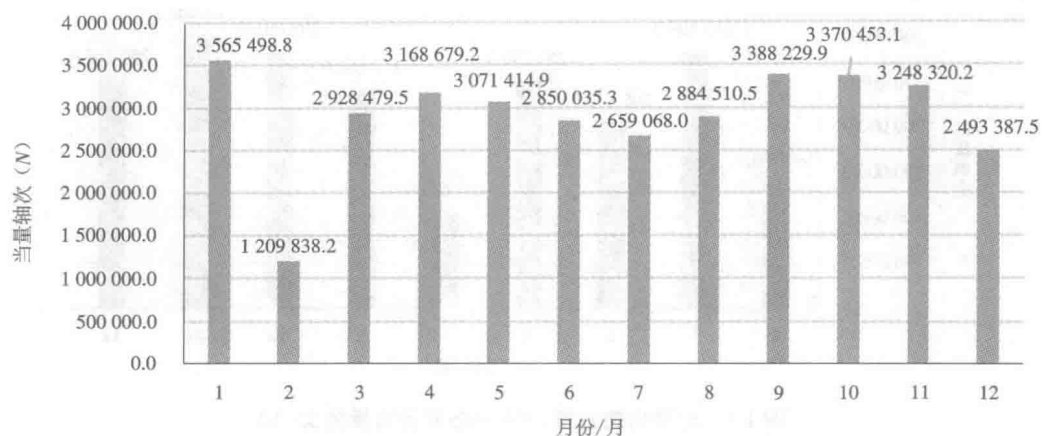


图 1-11 老集高速公路 2013 年各月份当量轴次 (N)

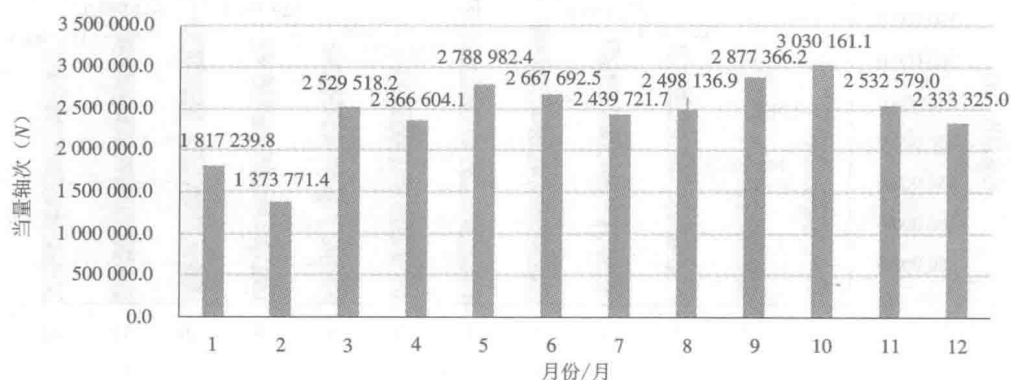


图 1-12 老集高速公路 2014 年各月份当量轴次 (N)

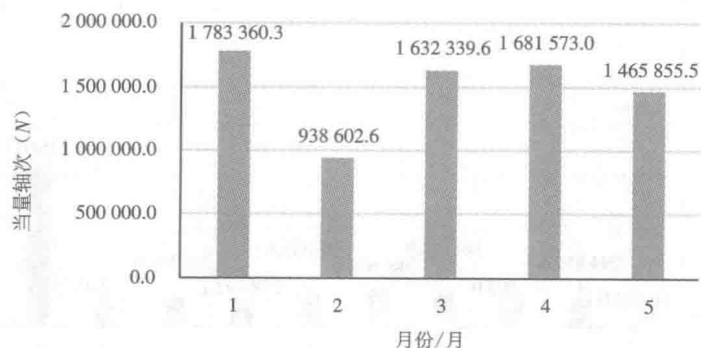


图 1-13 老集高速公路 2015 年上半年各月份当量轴次 (N)