

中国公路论坛

CHINA HIGHWAY FORUM

主 编：王元庆

第3卷 2005年

西安地图出版社

中国公路论坛

CHINA HIGHWAY FORUM

主 编：王元庆

西安地图出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国公路论坛/王元庆主编. —西安:西安地图出版社,
2005.7

ISBN 7-80670-832-4

I. 中... II. 王... III. 道路工程—施工技术—文
集 IV. U415.6-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 091422 号

中国公路论坛

王元庆 主编

西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路 334 号 邮政编码:710054)

新华书店经销 长安大学雁塔印刷厂印刷

880×1230 毫米·1/16 开本 8 印张 250 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—10000 册

ISBN 7-80670-832-4/G·179

定价:58.00 元

《中国公路论坛》征稿简则

《中国公路论坛》是集学术期刊、技术期刊及会议论文集三者优点于一身的连续出版物。《中国公路论坛》组委会依托清华大学、同济大学、东南大学、长安大学、北京交通大学、上海交通大学、西南交通大学、吉林大学等中国交通领域著名高校的专家、教授,倾力打造中国公路交通领域权威、开放、专业的言论平台。《中国公路论坛》宗旨是:讨论中国公路交通前沿新科技,展示中国公路交通建设新成果,展望中国公路交通发展新前景。

《中国公路论坛》论文征集范围及内容:

道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济、公路绿化养护、交通信息化、交通材料、综合等。

《中国公路论坛》主要栏目:

(1)权威观点

作者群体:中国科学院院士、中国工程院院士、知名教授、博导、有突出贡献的专家等。

(2)学术前沿

作者群体:海外华人、海外留学人员、访问学者、中青年专家、博士、硕士等。

(3)实用技术

作者群体:中国公路交通领域规划、设计、施工等生产一线的专业人士。

《中国公路论坛》论文汇编及出版:

由《中国公路论坛》论文集组委会负责组稿和编辑,面向美国、加拿大、澳大利亚、欧洲、日本及中国等全球交通行业全面发行。每年一卷,第四卷拟于2006年8月底正式出版发行,国家正规出版社出版。规格:国际标准16K,印刷:高级铜版纸(封页及彩色广告页)和高级双胶纸(内文)。

《中国公路论坛》论文格式要求:

(1)每篇论文字数限为4000字以内,重大课题可放宽至6000字以内,用Word格式排版。

(2)论文书写顺序为:标题、作者、单位、所在城市、邮编、摘要、关键词、正文、参考文献。

(3)论文中照片或图表清晰明了,电子文件形式*.jpg、*.gif。

《中国公路论坛》其他事项:

(1)送报材料均以电子邮件方式发往《中国公路论坛》组委会:times@timehighway.com.cn,并写清联系方式。

(2)论文无论是否选用,均不退稿,请自留底稿。

(3)论坛发布彩色及黑白广告。

《中国公路论坛》组委会秘书处联系电话:029-85257020

支持媒体:时代公路网

www.timehighway.com.cn

时 代 公 路 网

<http://www.timehighway.com.cn>

时代公路网初建于1998年,是目前国内交通行业最大的网站。时代公路网专注于中国公路的建设、管理、规划等方面的信息交流与服务,为国内外公路专业相关的广大用户提供多层次、专业化的信息处理与整合,使用户能够迅速掌握行业动态,洞悉前沿技术,了解最新的项目信息,在信息化的时代中始终领先一步。

时代公路网与国内大多数相关的企事业单位保持着良好的合作关系,这都使时代公路网在公路交通行业的信息发布和交流上形成了得天独厚的优势。时代公路网在行业动态、供求信息、科研院所及知名企业资料查询等方面为用户提供系统、及时、个性化的多项信息服务,构建一个公路企业与企业之间、企业与用户之间的信息平台。

凭借良好的信息服务,时代公路网已经成为全国各地公路相关单位的决策者、管理人员、工程技术人员快速了解业内动态首选的网络媒体之一,影响日渐扩大,网站用户和日访问量稳步攀升,并在国内同类网站中居领先地位。时代公路网在行业中的独特地位为企业进行形象宣传和产品广告提供了广阔的空间舞台,时代公路网竭诚欢迎广大公路行业的企事业单位加盟。

时代公路网永远以满足用户的要求为自己的最大目标。在广泛听取广大用户的意见和建议的基础上,时代公路网将不断为网站增加新的功能模块,使网站更加贴近用户的实际需求。时代公路网致力于公路行业信息的整合与交流,借助于广泛的信息资源和专业的采编制作,时代公路网力图在业内提供全面、及时、系统、准确、专业及个性化的信息服务和资料检索。

时代公路网聘请业内专家和专业人士对行业大事、传媒热点进行深入研究和探讨,尽力使用户对国家最新政策、行业发展方向有一个完整的把握,专业化的信息服务和市场分析会把领先一步的信息迅速转化为财富。

时代公路网配备了资深的专业编辑,每日对收到的各种信息进行审核与编辑,去伪存真,评判轻重,并将相关信息关联起来,将信息纳入统一的信息资料库中,使时代公路网的信息形成一套完整系统的网状数据库结构,从而保证了信息的系统和准确。

主要栏目有:人物聚焦、西部项目、企业观察、国家高速、行业分析、行业动态、国际会议、国内会展、公路科研、招投标信息、供求信息、公路软件、政策法规、在建项目、筹建项目、高等院校、科研院所、知名企业、筑路机械、路用材料、公路期刊、业内名录、企业建站、公路论坛、行业咨询、信息邮件、求职招聘、广告发布、公路书城等三十多个精彩纷呈的栏目。

目 次

·权威观点·

钢管拱吊装阶段中温度的影响分析·····	郑皆连(1)
基于同伦方法的路面模量反算研究·····	王秉纲,查旭东(6)
中国城市发展的优先计划——可持续交通·····	黄 卫(12)
用全新的理念打造宁杭高速公路·····	钱国超,明图章,胡安兵,周兴顺(15)
公路网规划后评价的理论与方法·····	周 伟,向前忠(20)

·学术前沿·

美国物流交通中的城市卡车模拟·····	陈雪明(26)
公路沥青路面的早期破坏问题及对策研究·····	李 伟,杨桂霞(33)
公路路基施工质量控制研究·····	倪万兴(38)
影响路基压实度的因素分析与研究·····	赵世博,刘 东(42)
公路测设中三维可视化设计的应用研究·····	李修奎(44)
公路主枢纽信息系统功能研究·····	靳引利,王 晨(47)
勉宁高速公路高性能沥青路面抗滑表层设计及施工·····	侯全岐,杨世民,呼永兴(53)

·实用技术·

试验工作在公路工程建设中的重要性·····	张 云(59)
自动收发卡机应用下的 IC 卡管理·····	张喜玲(62)
二灰稳定碎石抗裂配合比设计·····	赵世博(66)
重力式挡土墙设计及稳定性分析·····	李培林(72)
延塞高速公路沥青混凝土中、下面层结构材料组成设计·····	张 云,闫周卫(77)
用能量法分析变截面梁的稳定极限承载力·····	王 勃(82)
弯沉测试方法的应用比较·····	曹建平(87)
盖梁无支架施工的设计与试验分析·····	丁小峰,刘高印(91)
公路边坡稳定分析方法及防护与治理·····	唐 意(98)
玻纤格栅在新建沥青路面施工中的应用·····	苏网才,唐万银(106)
中国半刚性基层沥青路面设计研究·····	韩国良,俞贤畅(109)
中国立交匝道设计指标分析·····	江红远,张宏开(112)
探地雷达在公路工程检测中的应用·····	周 晖,张宏开(115)
防治桥头跳车研究·····	唐万银,苏网才(118)
高速公路监视与控制系统研究·····	马党利(121)

CHINA HIGHWAY FORUM

Vol.3

Aug. 2005

CONTENTS

Temperature influence during erection accuracy of steel tube	ZHENG Jie-lian(1)
Backcalculation of modulus for pavements based on homotopy method	WANG Bing-gang , ZHA Xu-dong (6)
Priority planning city development in China:sustainable transportation	HUANG Wei(12)
Building Ning-hang expressway with a whole new idea	QIAN Guo-chao,MING Tu-zhang , HU An-bing, ZHOU Xing-shun(15)
Theory and method for post-evaluation of highway network planning	ZHOU Wei,XIANG Qian-zhong(20)
City truck simulation in freight flow traffic of America	CHEN Xue-ming(26)
The Study and countermeasures on expressway bituminous pavement initial damage	LI Wei,YANG Gui-xia (33)
Research on construction quality control of highway subgrade	NI Wan-xing(38)
Analysis and research of affecting subgrade compaction degree	ZHAO Shi-bo, LIU Dong(42)
Application and research of DTM in highway inspection	LI Xiu-kui(44)
Research on information system function of important hinge in road	JIN Yin-li,WANG Chen(47)
Design and construction of high performance asphalt pavement antislipping for Mian-ning highway	HOU Quan-qi, YANG Shi-min,HU Yong-xing(53)
The importance of test in highway construction	ZHANG Yun(59)
IC card management in the autotransceiver-card machine application	ZHANG Xi-ling(62)
Anti-cracking ratio design of lime-flyash stabilized macadam	ZHAO Shi-bo(66)
Design and stability analysis of gravity retaining wall	LI Pei-lin(72)
Material composition design of asphalt concrete middle or base course structure in Yan-sai highway	ZHANG Yun,YAN Zhou-wei(77)
Analysis for ultimate load-carrying capacity of section beam with law of energy	WANG Bo(82)
Comparing with application of deflection test methods	CAO Jian-ping(87)
Designation and experimental analysis of the unshored bent cap construction	DING Xiao-feng,LIU Gao-yin(91)
Analysis method and proction of highway slope stability	TANG Yi(98)
Applycation of Glassgrid in the asphalt pavement construction	SU Wang-cai,TANG Wan-yin(106)
Designation and research of semi-rigid base and asphalt pavement in China	HAN Guo-liang,YU Xian-chang(109)
Designation index analyse of grade seperation ramp in China	JIANG Hong-yuan,ZHANG Hong-kai(112)
The applications of ground penetrating radar in highway detection	ZHOU Hui,ZHANG Hong-kai(115)
Study of preventing Vehicle Bump at Bridge Head	TANG Wan-yin,SU Wang-cai(118)
Research on the supervision and control system of highway	MA Dang-li(121)

钢管拱吊装阶段中温度的影响分析

郑皆连

(广西壮族自治区交通厅,广西南宁 530011)

摘要:就缆索吊装钢管拱的施工方法,以工程实例讨论钢管拱在吊装阶段中温度对安装精度和应力测试结果的影响。

关键词:钢管拱;缆索吊装法;温度;安装精度;应力测试

中图分类号:U448.275

文献标识码:A

0 引言

近年来钢管混凝土拱桥在中国发展很快,钢管混凝土拱桥施工采用自架设方法,先合拢空钢管,再浇筑管内混凝土。对于大跨径钢管混凝土拱桥,形成空钢管拱的方式主要有缆索吊装法和转体施工法。用缆索吊装法施工合拢的钢管混凝土拱桥跨径最大的是重庆巫山长江大桥,达460m,用转体法施工合拢的钢管混凝土拱桥跨径最大的是广州丫髻沙大桥,为360m。

钢管混凝土拱桥的骨架一经合拢,此后的施工过程中就无法再进行大的调整,因此在空钢管拱架设阶段对轴线和标高的控制显得尤为重要。对结构截面进行应力监测是施工过程的安全预警系统,随着施工的推进,其值是不断变化的。在某一时刻的应力值是否与预测值一致,是否处于安全范围是施工控制所关心的问题。一旦监测发现异常,应立即停止施工,查找原因并及时进行处理。

温度是施工控制中最常见的参数,也是最复杂的参数之一,在连续刚构桥和斜拉桥中普遍采用回避的方法来识别和修正,而在钢管混凝土拱桥的施工中则无法回避。用缆索吊装法进行钢管拱架设采用的是分段在空中悬拼,温度对拱轴线型的影响较大,且跨径越大,扣索越长,影响越大。温度同样对应力监测结果有影响,有时影响也较大。

本文以桂林石家渡漓江大桥为工程背景,试图讨论温度变化对缆索吊装钢管拱精度以及应力监测结果的影响,以供参考。

1 工程简介

石家渡漓江大桥是桂林市区至磨盘山码头公路上跨越漓江的一座大桥,主桥为净跨径170m钢管混凝土中承式桁架拱桥,净矢跨比为1/4.5,主拱轴线为悬链线,拱轴系数 $m=1.543$,拱肋为等截面钢管混凝土桁架结构,截面高为3.5m,宽为1.75m,如图1所示。拱肋上下弦杆各为两根 $\phi 711\text{mm} \times 13\text{mm}$ 的Q345C钢管,上下弦杆2根并列钢管用厚度 $\delta=10\text{mm}$ 的Q345C钢板连接,腹杆采用 $\phi 325\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的Q345C空钢管。上下弦杆钢管及钢管缀板内为50号混凝土。该桥设计荷载为汽车—超20级,挂车—120,设计车速为100km/h。

石家渡漓江大桥钢管拱肋的吊装方法采用千斤顶钢绞线斜拉扣挂缆索吊装法,每条拱肋分7段预制吊装。石家渡漓江大桥钢管拱肋缆索吊装系统立面布置如图2所示。

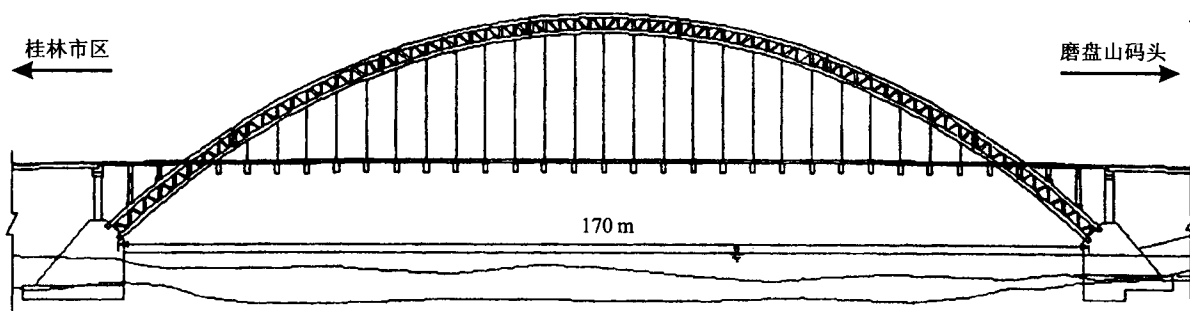


图1 石家渡漓江大桥立面

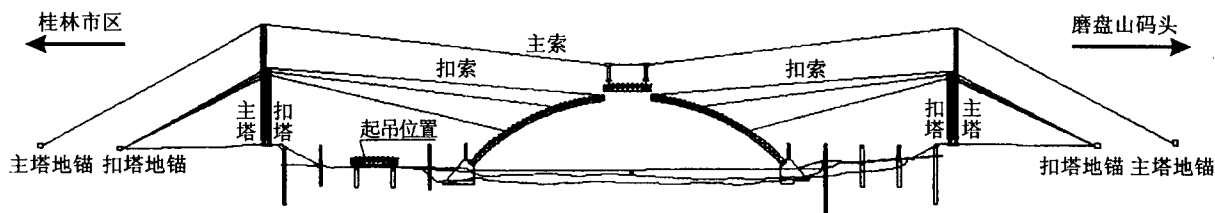


图2 石家渡漓江大桥钢管拱肋缆索吊装系统立面布置

按照《公路工程质量检验评定标准》(JTJ071-98),对钢管拱肋制作与安装的要求是:拱圈标高符合设计要求,在浇注混凝土后拱圈标高偏差不得超过 $L/3000$ 。石家渡漓江大桥的跨径为 170m,标高偏差应小于 0.057m。

施工时先安装上游幅拱肋,再安装下游幅拱肋。吊装拱肋的施工顺序为:安装第 1 段拱肋→安装第 1 段单片横联→安装第 2 段拱肋→安装第 2 段单片横联→安装上游侧(或下游侧)第 3 段拱肋→单侧合拢→安装下游侧(或上游侧)第 3 段拱肋→双侧合拢。

2 监控测点布置

2.1 钢管应力测点布置

根据监控任务,首先进行了钢管拱肋吊装过程的仿真计算分析(略),确定了吊装过程中拱肋的最不利截面位置,并以此为依据,来布置拱肋的应力监测点。

最不利截面位置在拱顶、拱脚及扣点截面(弦杆与腹杆相交截面),基本对应于 0 、 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $L/2$ 等截面。但由于在拱脚和扣点截面处是主要的施工作业面,从过去的监控经验看,测点布置于此很容易受到破坏,因此除拱顶截面外,其余测点位置略移半个节间,即布置在 2 个节点间。其中拱脚处截面测点向跨中方向移半个节间,以避开封拱脚时的影响;而扣点处截面测点则向拱脚方向移半个节间,以避开安装作业的影响。计算表明,测点位置的应力虽略小于最不利截面位置的应力,但相差不大,可忽略不计。

根据以上分析,每条拱肋各布置 9 个应力测试断面,如图 3 所示,图中数字为测试断面号;每个断面分别在其上弦的顶面及下弦的底面布置应力传感器,每个截面布置 4 个应力传感器,如图 4 所示,图中数字为测点号。每条拱肋共布置 36 个测点,两幅桥 4 条拱肋总共 144 个测点。

2.2 标高监控点布置

为了控制主拱结构在架设和施工过程中水平、竖向变形和位移,在靠近每个主拱分段接头和拱顶设置位移观测点,每条拱肋设置 7 个观测点。标高测点纵向布置如图 5 所示。图中测点标高值为按施工图提供的放样拱轴线的标高值。

2.3 应力测试点编号

第一个字母用 A 表示上游幅桥上游拱肋,用 B 表示上游幅桥下游拱肋,C 表示下游幅桥上游拱肋,D 表示下游幅桥下游拱肋。字母后数字表示断面位置(图 3);“-”后的数字表示测点在拱肋测试断面的位置,如图 6 所示。如:D 表示下游幅桥的下游拱肋; $Dx-1$ 表示下游幅桥下游拱肋的上游上弦管; $D3-1$ 表示下游

幅桥下游拱肋的上游上弦管第3个截面上的测点。

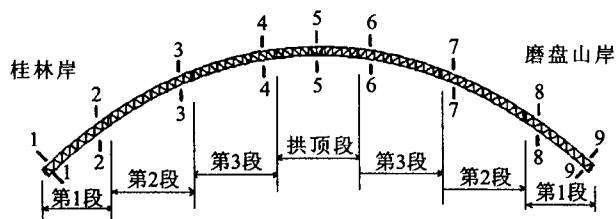


图3 应力测点纵向布置

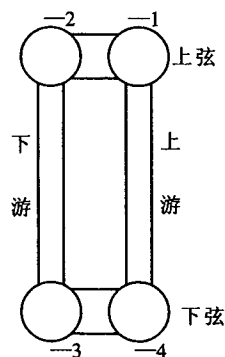


图4 应力测点横向布置

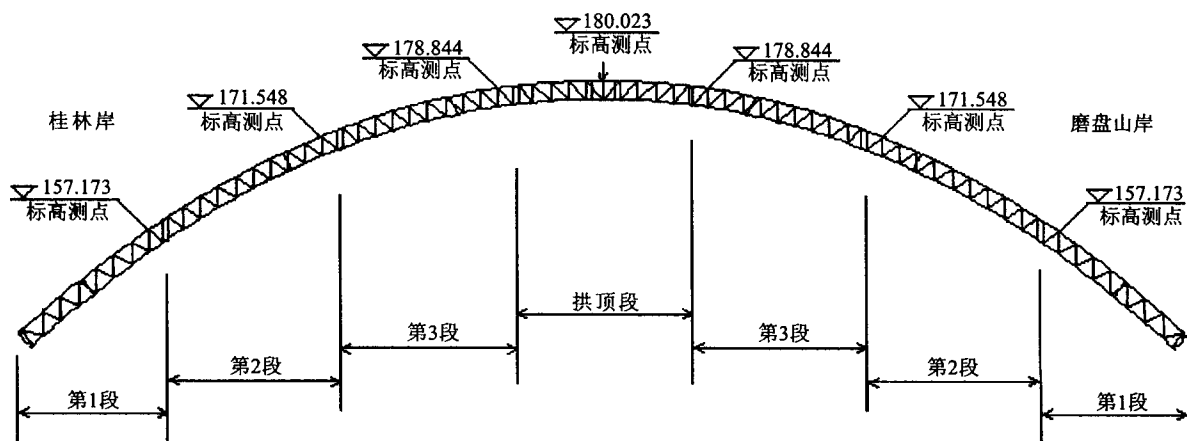


图5 标高测点纵向布置

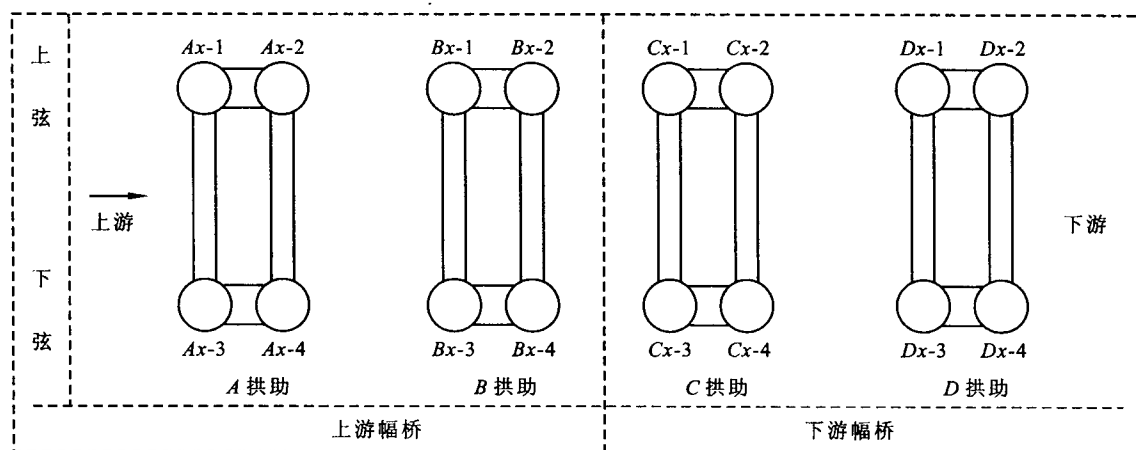


图6 拱肋、弦管及测点编号

3 钢管拱合拢温度问题

由于现场日温差对测点标高的影响较大,因此应确定一个基准温度作为参考标准,才能确定如何对标高进行控制,该基准温度也应是合拢的控制温度。石家渡漓江大桥的设计文件要求:拱肋合拢温度应在 19°C ~ 20°C 之间,尽可能取较低温度合拢,同时要避开日照影响,选取清晨或阴天进行合拢。根据这一要求,可以取 19°C ~ 20°C 为基准温度。但考虑到下游幅的吊装时间是5月底~6月中旬,早晨6:00~7:00的气温通常是在 21°C ~ 23°C ,甚至可能更高,再将 19°C ~ 20°C 作为基准温度也许是不现实的。从施工情况看,吊装完一

个节段后,松吊点的时刻有时是在傍晚,有时是在早晨,因此在监控过程中提出注意观测和记录松吊点时的标高和气温;如果是在傍晚松吊点,除了要记录当时的标高和气温外,还应注意记录第二天早上在未作任何调整之前(主要指扣索张拉)的标高和气温,并注意其中的变化值,并将这些变化作为下一个相似节段吊装时参考。

4 温度对标高的影响

4.1 温度对标高影响计算值

经计算分析可知,未合拢前,温升使标高降低,温降使标高抬高;合拢后,温升使标高抬高,温降使标高降低。标高随温度的变化量基本呈线性关系,表 1 列出了温度每降低 10℃ 的标高变化量,正值为标高抬高,负值为标高降低;当温度升高 10℃ 时,标高的变化量与表中数值符号相反。可根据当时的气温变化,通过内插来估计标高的变化。

表 1 温度每降低 10℃ 对标高变化的影响

安装阶段	桂林岸			拱顶段	农场岸		
	第 1 段	第 2 段	第 3 段		第 3 段	第 2 段	第 1 段
安装第 1 段	2.3						2.2
安装第 1 段单片横联	2.3						2.2
安装第 2 段	1.1	2.8				2.7	1.1
安装第 2 段单片横联	1.1	2.8				2.7	1.1
安装上(下)游第 3 段	1.0	2.6	4.1		4.0	2.4	1.0
单边合拢	-0.6	-1.6	-2.4	-2.5	-2.4	-1.6	-0.6
安装下(上)游第 3 段	0.7	1.7	3.0		2.9	1.7	0.6
双边合拢	-0.7	-1.6	-2.3	-2.4	-2.3	-1.6	-0.7

另外分析表明,温度变化虽然会引起标高有较大的变化,但对扣索力的变化影响较小。

4.2 吊装过程中部分标高实测值分析

如吊装下游幅桥桂林岸上游侧第 1 段,松吊点时标高抬高量为 4.0cm,气温为 28℃,在吊装桂林岸第 1 段单片横联前复测的标高抬高量为 3.3cm,气温为 33℃,与松吊点时相比气温升高了 5℃,标高变化值为 -0.7cm。说明计算与实际情况基本相符,但也说明了其中索鞍存在较大的摩擦力。

又如安装下游幅桥磨盘山岸上游侧第 2 段时,刚松吊点时标高抬高量为 3.9cm,气温为 22℃;两日后复测标高抬高量为 1.7cm,气温 31℃;接着第二天在吊装第 2 段单片横联之前再次复测标高抬高量又变为 2.2cm,气温 25℃。第一次复测时气温升高了 9℃,标高变化计算为 -2.4cm,实际变化值为 -2.2cm;第二次复测时气温比第一次复测的气温降低了 6℃,标高变化计算值应为 1.6cm,实际变化值为 0.5cm。同样可以说明计算与实际变化趋势基本相符,同时也说明了其中索鞍存在较大的摩擦力。

当下游幅桥下游侧单边合拢时,拱顶标高抬高量为 7.3cm,气温为 25℃,两天后复测标高抬高量为 7.8cm,气温为 27℃。气温升高 2℃,标高变化量为 0.5cm,与计算值所得的变化量相符。

上游幅桥吊装合拢时,上游侧拱肋拱顶处标高抬高量达 8.4cm,该值是在温度为 33℃ 时测量所得的结果,此后该点标高在温度为 27℃ 时复测值为 7.0cm,也与计算相符。

5 温度对应力的影响

实测数据表明温度变化对应力的影响很大,实测应力与计算数据之间的误差,在很大程度上就是由温度影响引起的。

5.1 有限元分析

取一段拱肋(如拱顶段)进行有限元分析。将拱顶段按实体建模,用 8 节点壳单元划分。由于太阳幅射

和大气温度变化可使钢桥温度发生较大变化,影响较为复杂,对钢管拱肋也同样如此。为取得一些概念上的认识,此处仅对拱肋上弦的上半表面做局部温升的分析,近似模拟垂直日照辐射使拱肋局部升温的情况。

分析表明,当拱肋温度发生均匀变化时(如升温 10°C),拱肋内部除了腹杆与弦杆连接部位局部存在少量的应力集中(约 0.16MPa)外,其余部分的应力几乎没有变化。可以说明清晨日出前,拱肋温度与气温相同,虽然气温有所变化,但拱肋上测点读数仍然比较稳定。

而当拱肋发生局部温度变化时,如拱肋上弦的上半表面温度升高 1°C ,其余部分温度不变,则上弦上表面测点的压应力变化幅度为 $-1.22 \sim -1.53\text{MPa}$,当拱肋上弦的上半表面温度较气温升高 10°C 时,则上弦上表面测点的压应力变化为 $-12.2 \sim -15.3\text{MPa}$;拱肋下弦下表面测点的应力则变化很小。

5.2 部分应力实测值分析

下游幅桥桂林岸第2段拱肋 D3 截面测点,起吊前进行初读数测试,2003年6月1日早上6:31(气温 21°C 、钢温 21°C)与下午13:56(气温 32°C 、钢温 47°C ,温差 15°C)分别进行测试。上弦测点 D3-1 下午读数与上午读数相差 -25.38MPa ;上弦测点 D3-2 下午读数与上午读数相差 21MPa ;下弦2个测点 D3-3 和 D3-4 的读数则相差不大。

再以下游幅桥农场岸上游侧拱肋为例。表2为2003年6月4日~6月6日为农场岸上游侧第1段和第2段拱段应力监测点的应力测值比较差,由于6月5日~6月6日进行的是其他拱段吊装,因此表2中6月6日测值为农场岸上游侧第1段和第2段的复测值。

表2 下游幅上游侧拱肋农场岸部分应力实测数据 (MPa)

工 况		吊装第2段拱肋	吊装2号单片横联	复 测
测试日期及天气		6月4日,6:08,晴	6月4日,12:38,晴	6月6日,8:11,阴
上 弦 测 点	C7-1	-10.18	-28.83	-12.85
	C7-2	-10.34	-26.48	-10.66
	C8-1	-10.18	-26.48	-15.51
	C8-2	-11.75	-31.34	-11.91
	C9-1	-4.86	-18.02	-6.74
	C9-2	-7.83	-23.97	-8.46
下 弦 测 点	C7-3	-6.89	-5.17	-7.68
	C7-4	-10.03	-6.42	-6.27
	C8-3	-17.55	-15.51	-18.33
	C8-4	-16.77	-12.38	-13.32
	C9-3	-21.47	-20.53	-20.53
	C9-4	-8.62	-4.70	-7.68
气 温		25°C	30°C	24°C
上弦钢温		25°C	40°C	24°C

由表2可以看出,6月4日中午上弦钢温和气温相差较大,达 10°C ,上弦测点的压应力明显大于清晨的测值,变化幅度在 $-13 \sim -19.6\text{MPa}$ 之间,其中主要是由于局部温差引起的应力变化;到了6月6日早上,所测读数已明显下降,与6月4日清晨测值相比,主要是结构变化引起的应力变化。相对而言,下弦测点的这三次应力测值则明显变化幅度较小,其变化值主要是由于结构变化及其他因素引起的。

(下转第14页)

基于同伦方法的路面模量反算研究

王秉纲¹, 查旭东²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要:根据最优化问题的极值条件, 将模量反算转化为非线性映射求零点的问题, 结合数值微分计算弯沉对模量的一阶和二阶偏导数, 建立了基于同伦方法反算路面模量的数学模型; 并采用LI-YORKE算法求解微分方程初值问题跟踪同伦曲线, 获得模量的反算结果, 在此基础上编制了相应的模量反算程序。通过对3种路面结构的落锤式弯沉仪(FWD)的实测弯沉盆进行模量反算, 并与国内外其他反算程序比较, 验证了同伦方法反算结果的精度和可靠性。同时, 通过选取不同初始值进行反算比较, 验证了同伦方法的大范围收敛性和反算结果的精度和稳定性。结果表明, 采用同伦方法进行路面模量反算有效地解决了常规最优化算法的初始值和局部收敛的问题, 是一种精度好、速度快、效率高、结果稳定且大范围收敛的模量反算方法。

关键词:道路工程; 路面模量反算; 同伦方法; 弯沉; 落锤式弯沉仪

中图分类号:U416.2

文献标识码:A

0 引言

随着20世纪70年代落锤式弯沉仪(FWD)引入路面评价以来, FWD作为无损检测设备得到越来越广泛的应用, 而根据FWD实测弯沉盆反算路面结构层的模量也就成为路面结构强度和刚度评价的重要手段之一。实际上, 路面模量反算是一个非常复杂的非线性最优化问题, 目前国内外主要有数学规划法、数据库搜索法、模式识别法、神经网络法和遗传算法等。其中, 前三种方法是基于启发式搜索规则的最优化方法, 速度较快但存在着初始值和局部收敛的问题; 神经网络法能进行实时处理, 但精度和适用范围受网络的影响较大; 遗传算法是一种模拟自然选择法则的最优化算法, 具有良好的全局收敛性, 但存在计算速度慢的缺点。为此, 笔者引入大范围收敛的同伦方法, 以有效地解决现有反算方法存在的局限性。

1 模量反算的数学模型

根据FWD实测弯沉盆反算路面模量一般可简化为非线性最优化问题

$$\min Y = \sum_{i=1}^m q_i \left(\frac{W_i - L_i}{L_i} \right)^2 \quad (1)$$

式中: W_i 通常采用弹性层状体系理论计算, 即

$$W_i = W(h_j, E_j, \mu_j, r_i, p, a) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: Y 为实测弯沉与理论弯沉之间的相对平方误差; W_i 、 L_i 、 q_i 、 r_i 分别为各测点的理论弯沉(0.01mm)、实测弯沉(0.01mm)和加权系数及各测点至荷载中心的距离(cm); h_j 、 E_j 、 μ_j 分别为路面各结构层厚度(cm)、回弹模量(MPa)和泊松系数; p 、 a 分别为荷载集度(MPa)和作用半径(cm); i 、 m 分别为测点序号和个数; j 、 n 分别为结构层序号和层数。

实际反算时, E_j 为变量, 其他参数为定值。为了提高反算效率, 大部分反算方法通常增加一个模量上下限的约束条件, 其值根据结构层材料的不同按经验选取。根据最优化问题的极值条件, 式(1)的最优解必须满足

$$f(E_j) = \frac{\partial Y}{\partial E_j} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

由此, 式(1)可转化为求解非线性方程组式(3)的零点问题。如果采用通常梯度意义下的算法计算式(3)的零点, 仍然无法克服初始值和局部收敛问题。为此, 引入大范围收敛的同伦方法进行求解。

2 基于同伦方法的模量反算

同伦方法的数学基础是逆象定理和 Sard 定理(为叙述方便且不致混淆, 以下将不从字母字体上区分向量和标量)。

逆象定理 设 X 是 k 维带边光滑流形, Y 是 l 维带边光滑流形, $k > l$, $f: X \rightarrow Y$ 是光滑映射, 如果 $y \in Y$ 同时是映射 $f: X \rightarrow Y$ 和其边界 $\partial f: \partial X \rightarrow Y$ 的正则值, 则其逆象 $f^{-1}(y)$ 或者是空集, 或者是空集, 或者是 $k - l$ 维带边流形。

Sard 定理 设 X 是带边光滑流形, Y 是光滑流形, $f: X \rightarrow Y$ 是光滑映射, 则 f 的临界值集和 ∂f 的临界值集在 Y 中的测度均为零。

同伦方法的基本思想就是, 通过构造一个新映射, 使新映射的定义域的维数与原映射定义域的维数相同, 而值域的维数降低一维。再利用 Sard 定理和正则值逆象定理, 得到若干互不相交的光滑曲线, 这些曲线的某些端点是映射的零点或不动点。从这些曲线上的点出发, 通过解微分方程初值问题, 跟踪曲线直至原映射的零点或不动点。因此, 同伦方法对初始值没有严格的要求, 是一种大范围收敛的算法。

设 X 和 Y 是 R^n 的非空子集, $f, g: X \rightarrow Y$ 是光滑映射, 如果对任意 $(t, x) \in [0, 1] \times X \rightarrow Y$ 成立

$$H(t, x) = tg(x) + (1 - t)f(x) \in Y \quad (4)$$

则称光滑映射 $H: [0, 1] \times X \rightarrow Y$ 是 f 和 g 之间的一个线性同伦, 称 $t \in [0, 1]$ 为同伦参数。

取光滑辅助映射 $g: R^n \rightarrow R^n$, 使得映射 g 的零点明显, 如取

$$g(x) = x - a \quad (5)$$

式中: a 为 R^n 中的常向量, 则 g 有唯一零点 $x = a$, 并称 g 为平凡映射。希望从平凡映射 $g(x) = 0$ 开始, 逐渐过渡到目标问题 $f(x) = 0$, 即从平凡映射 g 逐渐过渡到目标映射 f , 从而从平凡映射 g 的零点出发, 求得目标映射 f 的零点。而由式(4)有

$$H(0, x) = f(x), H(1, x) = g(x) \quad (6)$$

即同伦映射 H 在 $t = 0$ 处的零点与映射 f 的零点相同; 而在 $t = 1$ 处的零点则与映射 g 的零点相同, 从而说明式(4)给出的映射可以实现同伦的基本思想。

由此, 同伦 H 的零点集 $H^{-1}(0)$ 为光滑的简单曲线, 从 $(1, a)$ 出发跟踪 $H^{-1}(0)$ 中的曲线即可以从平凡映射 g 的零点求得目标映射 f 的零点。引入弧长参数 s , 并记跟踪的曲线 $\lambda(s)$ 为

$$\left. \begin{aligned} \lambda(s) &= [t(s), x(s)], 0 \leq s \leq s_0 \\ \lambda(0) &= [t(0), x(0)] = (1, a) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因为 $\lambda(s)$ 是 $H^{-1}(0)$ 中的曲线, 所以满足方程

$$H[\lambda(s)] = H[t(s), x(s)] = 0 \quad (8)$$

两边对 s 求导数, 从而曲线 $\lambda(s)$ 满足初值问题

$$\left\{ \begin{aligned} -f[x(s)] + x(s) - a : t(s)I + [1 - t(s)] \frac{\partial f}{\partial x}[x(s)] \left[\begin{array}{c} \dot{t}(s) \\ \dot{x}(s) \end{array} \right] &= 0 \\ [t(0), x(0)] &= (1, a) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $\dot{x}(s)$ 为 $x(s)$ 对 s 的导数; $\dot{t}(s)$ 为 $t(s)$ 对 s 的导数。

因为 0 是同伦 H 在 $[0, 1] \times R^n$ 上的正则值, 式(9)中的矩阵满秩, 所以, 初值问题式(9)在 $[0, 1] \times R^n$ 内具有唯一的解。因此, 采用微分方程初值法求解式(9), 从而求得映射 f 的一个零点, 即可以实现同伦方法。具

体的算法可参考文献[6]中的 LI - YORKE 算法。对于模量反算问题式(3),引入同伦参数 t 和平凡映射

$$g(E) = E - E^0 \quad (10)$$

构造线性同伦映射

$$H(t, E) = (1 - t)f(E) + t(E - E^0) \quad (11)$$

根据微分方程初值问题,采用 LI - YORKE 算法,从 $(1, E^0)$ 出发跟踪曲线 $H^{-1}(0)$ 走到 $t = 0$,即可得到式(3)的零点,相应的 E^* 即为模量反算结果。

为了实施同伦方法,必须计算相对平方误差 Y 对 E 的一、二阶偏导数,由式(1)可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial E_j} &= \sum_{i=1}^m \frac{q_i}{L_i} \left(\frac{W_i}{L_i} - 1 \right) \frac{\partial W_i}{\partial E_j} \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial E_j \partial E_{j'}} &= \sum_{i=1}^m \frac{q_i}{L_i} \left[\frac{1}{L_i} \frac{\partial W_i}{\partial E_j} \frac{\partial W_i}{\partial E_{j'}} \left(\frac{W_i}{L_i} - 1 \right) \frac{\partial^2 W_i}{\partial E_j \partial E_{j'}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由于弹性层状体系的理论弯沉 W 含有大量的特殊函数和无穷积分, W 对 E 的一阶和二阶偏导数难以采用理论推导计算。为此,为了解决偏导数的计算,采用数值微分方法。根据导数的定义,给定步长 h_j ,采用中差公式,有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_i}{\partial E_j} &\approx \frac{W_i(E_j + h_j) - W_i(E_j - h_j)}{2h_j} \\ \frac{\partial^2 W_i}{\partial E_j \partial E_{j'}} &\approx \frac{W_i(E_j + h_j, E_{j'} + h_{j'}) - W_i(E_j + h_j, E_{j'} - h_{j'}) - W_i(E_j - h_j, E_{j'} + h_{j'})}{4h_j h_{j'}} \\ &\quad + W_i(E_j - h_j, E_{j'} - h_{j'}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当 $j = j'$ 时,有

$$\frac{\partial^2 W_i}{\partial E_j^2} \approx \frac{W_i(E_j + h_j) - 2W_i(E_j) + W_i(E_j - h_j)}{h_j^2} \quad (14)$$

根据数值试验表明,步长 h_j 取 $0.1 \sim 0.001E_j$ 可获得满意精度的偏导数结果。同时,为了减小初值问题的计算量,可以采用 EULER 法进行预估。至此,可以根据同伦方法实现路面模量的反算,从而根据 LI - YORKE 算法,采用 Visual FORTRAN5.0 编制了相应的反算程序 HMDEF。

在跟踪曲线的过程中,由于 $\frac{\partial Y}{\partial E}$ 的值一般要比 g 的值小,为了使二者相差不大,可取适当的平凡映射 g 对同伦方法进行改进。由于模量值的非负要求,所以, g 可取对数函数形式

$$g(E) = \ln E - \ln E^0 \quad (15)$$

实际计算表明,式(15)的平凡映射不仅有效地提高曲线的跟踪能力,且降低数值微分的精度影响。

3 算例比较

为了测试同伦方法的模量反算能力,必须选取 FWD 的实测弯沉盆进行反算,所以选取双层体系、三层体系和四层体系的 3 种路面结构的 3 个实测弯沉盆数据进行分析,见表 1。表 1 中的弯沉盆数据摘自美国航道试验站开发的 LEEPWIN 软件中的示例数据库,每个弯沉盆数据含有 7 个弯沉,距荷载中心的距离依次为 0cm、30.48cm、60.96cm、91.44cm、121.92cm、152.40cm 和 182.88cm,反算时各测点的加权系数 q_i 均取 1。荷载作用半径为 15cm。

为了进行对比分析,选取了几个国外著名的模量反算程序,包括美国华盛顿州交通厅的 EVERCALC、美国航道试验站的 WESDEF 和美国德克萨斯州交通厅的 MODULUS,以及自行开发的改进遗传算法反算程序 GADEF。除 HMDEF 和 GADEF 采用自行开发的弹性层状体系计算程序外,其他反算程序均采用 WESLEA。由于国外反算程序大多考虑了刚性下卧层,反算时,刚性下卧层假设为刚度很大的弹性半空间地基,距离表深度取 731.52cm(24ft.),模量取 6894.76MPa(1000ksi),泊松系数取 0.50。由于 EVERCALC、WESDEF 和 MODULUS 都采用了迭代搜索规则,其结果的收敛性取决于初始值的好坏,因此,选取各自误差最小的反算模量作为最终结果,见表 2。

表1 FWD 实测弯沉盆数据

序号	结构类型	厚度 h_j/cm	泊松系数 μ_j	荷载 P/kN	弯沉盆数据 $L_i/0.01\text{mm}$						
					L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
1	沥青混凝土面层 土基	7.62 601.98	0.35 0.40	74.33	97.79	66.60	27.94	15.24	10.16	7.62	5.08
2	沥青混凝土面层 基层 土基	13.34 35.56 560.71	0.35 0.25 0.40	176.99	100.58	65.28	43.94	31.24	23.11	17.53	13.72
3	水泥混凝土面层 基层 底基层 土基	13.97 22.86 25.40 547.37	0.15 0.35 0.35 0.40	262.11	25.65	23.37	21.08	19.05	16.76	14.73	12.95

表2 同伦方法与其他反算程序的比较

序号	反算结果	HMDEF	GADEF	EVERCALC	WESDEF	MODULUS
1	E_j/MPa	8506.27	8503.37	8549.64	9427.81	9534.72
		112.25	112.32	111.97	108.34	107.71
	$\delta/\%$	4.0	4.0	4.0	5.3	4.3
2	E_j/MPa	3173.93	3171.73	3229.50	3241.43	3221.96
		701.68	701.13	700.23	676.86	661.58
		130.17	130.31	129.41	130.51	133.19
	$\delta/\%$	1.7	1.7	1.8	1.7	0.9
2	E_j/MPa	107193.61	106687.68	102325.98	96741.40	105577.35
		20242.39	20350.43	22880.53	23545.82	28218.03
		4293.37	4282.20	3790.74	3640.14	2182.05
		167.40	167.54	170.92	171.45	175.47
	$\delta/\%$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

表2中的平均误差 δ 按下式计算

$$\delta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{W_i}{L_i} - 1 \right| \times 100\% \quad (16)$$

式中:各字母含义同式(1)。

从表2的反算结果来看,各程序反算的土基模量的结果相差不大,这也说明了土基模量的反算结果具有很好的稳定性,相比之下,路面结构层的模量结果稳定性稍差。通过比较可以看出,同伦方法反算的结果与遗传算法的结果保持了很好的一致性,说明同伦方法的结果精度高。同时,与 EVERCALC、WESDEF 和 MODULUS 相比,虽然弹性层状体系计算程序不同,但结果仍然保持了良好的一致性。这表明同伦方法反算的模量结果可靠,并且弹性层状体系的计算误差对反算结果影响不大。

对于相同的弯沉盆,采用 Pentium III /800CPU 的计算机进行反算,一个双层体系,同伦方法大约需 3~5s 的时间,而三层和四层体系通常在 20s 以内完成。通过合适的精度控制,同伦方法的计算速度还可以加快,其速度完全满足大量反算的要求。同伦方法的速度比遗传算法至少快 2 个数量级,而与常规优化算法相比,其计算速度要慢。虽然这样,同伦方法在 20s 内就可以获稳定可靠的模量结果,而常规优化算法需要在给定

的模量取值范围内不断调整初始值,才能获得稳定的结果,实际上,从结果可靠性来说,同伦方法的效率要明显高于常规优化算法。因此,基于同伦方法的模量反算是一种稳定可靠的方法,其速度也完全满足工程需要。

4 收敛性比较

为了验证同伦方法进行模量反算时的大范围收敛性,选取表 1 中第 2 个弯沉盆进行反算比较。由表 2 的反算结果已知模量 E 约为 3447.38/689.48/137.90MPa(500/100/20ksi),随机在 $0.001 \sim 1000E$ 范围内产生 2 个模量组合,并与 E 一起作为初始值 E^0 进行反算比较,其比较结果见表 3。由于遗传算法与初始值的选取无关,所以表 3 中未列出 GADEF 的结果。采用 MODULUS 反算时,土基模量初始值的范围约在 6.89~689.48MPa(1~100ksi)之间,超出该范围无法计算。初始值 1、2 的同伦方法跟踪曲线见图 1、图 2,图中短虚线、实线和长虚线分别为 E_1 、 E_2 、 E_0 随同伦参数 t 变化跟踪的曲线。

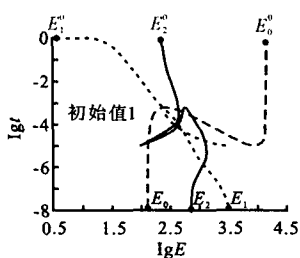


图 1 $\lg E \sim \lg t$ 跟踪曲线

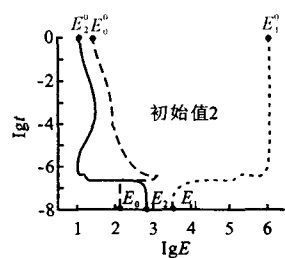


图 2 $\lg E \sim \lg t$ 跟踪曲线

从表 3 可以看出,EVERCALC 受初始值的影响很大,这主要是由于该程序采用了修正的 GAUSS-NEWTON 算法的缘故,其算法只有初始值为好点时,才能获得可靠的结果。WESDEF 程序的收敛性较好,但其结果的稳定性较差,并且对于第 2 个初始值,不能进行反算。相比而言,MODULUS 的收敛性较好,这主要归功于该程序规定了较严格的模量取值范围和数据库搜索方法,这种作法实际上降低了该程序的反算能力和计算范围。而对于同伦方法的反算结果,结合图 1、2 可以看出,同伦方法在 $0.001 \sim 1000$ 倍目标模量范围内取不同初始值的情况下,均能收敛,并且反算结果完全一致,表明其具有很好的稳定性和收敛性。因此,同伦方法的大范围收敛与反算结果的稳定可靠有效地解决了常规优化算法的初始值以及需给定各结构层模量范围的问题。实际反算时,同伦方法完全可以不需要人为给定初始值,而由计算机随机选取,这样可以大大提高模量反算的效率。

表 3 不同初始值的反算比较

序号	初始值 /MPa	HMDEF		EVERCALC		WESDEF		MODULUS	
		E_j /MPa	δ /%	E_j /MPa	δ /%	E_j /MPa	δ /%	E_j /MPa	δ /%
1	3.41	3173.93	1.7	38.27	154.5	3227.09	1.7	无法计算	
	224.09	701.68		2225.63		677.62			
	14732.03	130.17		916.45		130.59			
2	1075168.87	3173.93	1.7	26264.35	14.6	计算失败		3220.61	0.9
	11.34	701.68		885.98				661.76	
	26.09	130.17		135.14				133.14	
3	3447.38	3173.93	1.7	3222.27	1.8	3247.02	1.7	3220.61	0.9
	689.48	701.68		700.92		678.31		661.76	
	137.90	130.17		129.42		130.45		133.14	