

# 基于逆装法的拱桥吊索初拉力优化

张雨果 郝天琪 廖茹伊  
西藏大学 西藏拉萨 850000

**摘要:** 以于都县起元大桥为依托,采用与正装计算时吊索张拉顺序相反的顺序进行吊索初拉力优化,同时结合通用有限元软件进行成桥吊索力计算,结果表明,按照该方法可以大大节省对吊索初拉力进行优化所需要的时间,优化后有限元软件计算结果与设计成桥吊索力一致。

**关键词:** 拱桥;逆装法;吊索初拉力;有限元

## 引言

对于由吊索(杆)、拱肋和桥面系统等组成<sup>[1]</sup>的拱桥,其在设计中与斜拉桥等有相似之处,比如确定一个合理的成桥状态是首要的<sup>[2]</sup>,其中最关键的部分就是使吊索实际成桥索力与设计值一致,这也是最重要的目标之一。

随着施工全过程的进行,结构的内力以及线形都在不断变化<sup>[3]</sup>,因此为了达到吊索实际成桥索力与设计值一致的目标,必须通过优化吊索初拉力来实现,目前用于优化吊索初拉力的方法包括刚性支撑连续梁法<sup>[4]</sup>、影响矩阵法<sup>[5,6]</sup>、能量法<sup>[7,8]</sup>以及结构变刚度有限元法<sup>[9]</sup>等。

以上方法在一定程度上比较复杂,比如刚性支撑连续梁法的一些传统算法应用于拱桥时还需要对部分公式进行修正后才能使用<sup>[4]</sup>;影响矩阵法在导出索力影响矩阵时计算量较大<sup>[10]</sup>等,因此为了方便应用,新提出一种概念清晰、操作简便的吊索初拉力的确定方法——逆装法。

## 一、基于逆装法的吊索初拉力优化方法

### (一) 吊索的优化顺序

假设吊索一共分为N组进行张拉,采用正装计算时吊索张拉顺序为1~N,则对应吊索优化顺序为N~1,这是考虑到在进行正装计算时,后张拉的吊索对先张拉的

吊索内力影响较大,不利于吊索初拉力的优化,因此采用了相对于正装计算时吊索张拉顺序相反的顺序作为吊索的优化顺序。

### (二) 吊索初拉力的确定

先假定张拉吊索的初拉力(可自行选取),进行初次正装计算,得到实际的吊索成桥索力,按照1.1所述优化顺序,以初次正装计算后第N组和第(N-1)组吊索为例(此处仅说明如何确定吊索初拉力,其余流程参照第3.2节):优化第N组吊索时,将第N组吊索进行初次正装计算时的初拉力减去其初次正装计算后的吊索成桥索力差值作为第二次计算的初拉力,进行第二次正装计算(仅修改第N组吊索初拉力);继续优化第(N-1)组吊索时,将第(N-1)组吊索进行第二次正装计算时的初拉力减去其第二次正装计算后的吊索成桥索力差值作为第三次计算的初拉力,进行第三次正装计算(仅修改第(N-1)组吊索初拉力),以此类推,优化完一轮后得到新一轮的吊索初拉力,循环往复,直至实际成桥索力与设计值一致。

该方法仍采取正装计算的方式,但是吊索的优化顺序是对应正装计算时吊索张拉的逆顺序,因此称为逆装法。

## 二、工程简介

### (一) 工程概况

起元大桥为单跨拱桥,大桥总长515.9m。其中主桥长(40+40+168+40+40)m,主桥布置如图2.1.1所示。

主桥采用Y型连续刚构—拱组合体系桥,整幅布置箱梁,其中边跨采用预应力混凝土结构,通航孔跨采用钢箱梁,桥梁标准段梁宽40m。

全桥共有21对吊索,8对背索,将背索以及吊索按照图2.1.1所示从左至右依次命名为BS01~04、DS01~11、

## 作者简介:

- 1.张雨果(2000-),男,汉族,河南洛阳人,研究生在读,单位:西藏大学,研究方向:结构工程。
- 2.郝天琪(1999-),男,满族,辽宁阜新人,研究生在读,单位:西藏大学,研究方向:桥梁与隧道工程。
- 3.廖茹伊(1998-),女,汉族,四川南充人,研究生在读,单位:西藏大学,研究方向:结构工程。

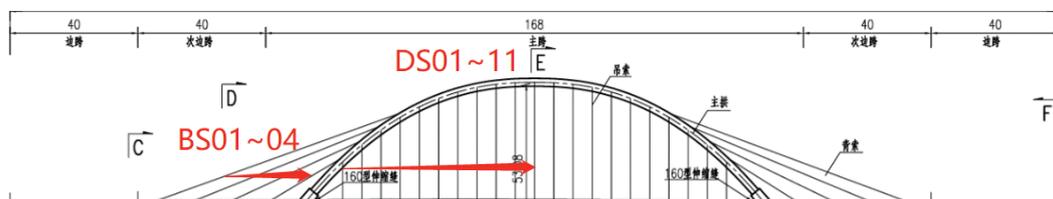


图 2.1.1 起元大桥主桥布置

DS10' ~01'、BS04' ~01' (其中DS11为中跨跨中吊索, 其余吊索与背索均基于中跨跨中对称布置, 故图中仅标出一侧吊索)。

### (二) 起元大桥主要施工步骤为

- ①桩基、桥墩施工, 边跨混凝土梁浇筑、主跨钢箱梁顶推到位;
- ②搭设拱支架、按照由下至上的顺序依次安装钢拱箱, 第一次对称张拉背索, 背索张拉顺序为BS04~01;
- ③钢拱箱安装完毕第一次张拉底部系杆;
- ④张拉中跨跨中吊索DS11, 再按照从跨中至两端的顺序(DS10~01)对称张拉其余中跨吊索;
- ⑤第二次张拉底部系杆、第二次对称张拉背索(第二次张拉顺序与第一次张拉顺序一致)。

### 三、计算与分析

#### (一) 有限元模型建立

采用桥梁有限元软件Midas/civil建立全桥模型如图3.1.1所示, 全桥包含2792个节点, 2533个单元, 其中梁单元2467个, 只受拉单元66个, 只受拉单元包括21对吊索, 8对背索, 4对桥梁下部系杆。

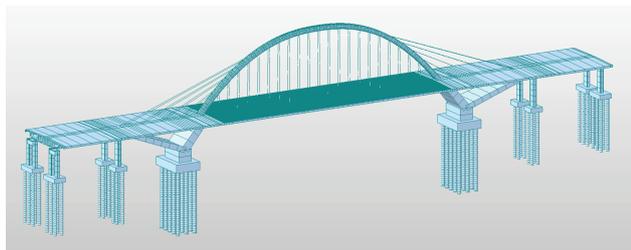


图 3.1.1 起元大桥有限元模型

#### (二) 逆袭法操作流程

利用桥梁通用有限元软件实现逆袭法的操作步骤为:

- ①输入一组初始假定初拉力进行施工全过程正装计算;
- ②分析计算得到的吊索索力与设计成桥索力的误差百分比;
- ③按照与正装计算相反的吊索张拉顺序进行初拉力的优化;
- ④再进行正装计算;
- ⑤重复步骤②~④直至最终计算成桥索力与设计成桥索力误差百分比在误差限值以内。

为方便说明, 假设正装计算时吊索的张拉顺序为1~N, 则基于逆袭法的吊索初拉力优化流程如图3.2.1

所示:

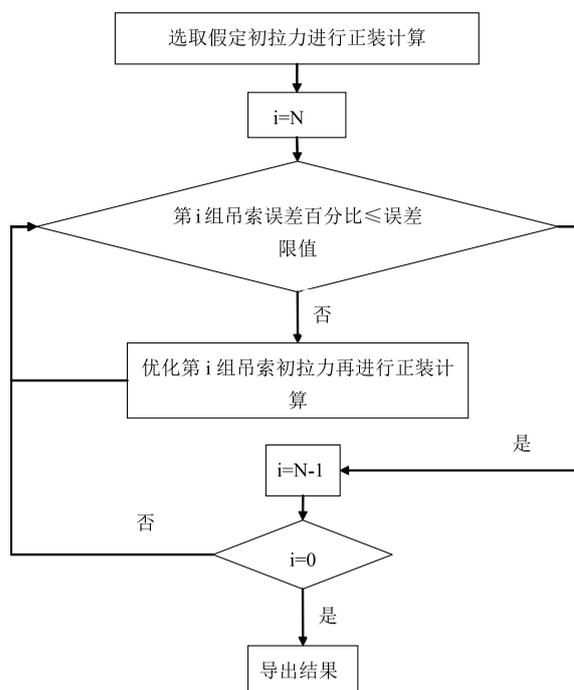


图 3.2.1 逆袭法流程图

#### (三) 逆袭法计算结果

以起元大桥吊索的优化为例说明, 在进行正装计算时中跨吊索张拉顺序为DS11~DS01(该顺序对应流程中的1~N, 由于是对称张拉, 为方便说明只写出一侧吊索编号), 则吊索优化顺序为DS01~DS11(该顺序对应流程中的N~1), 该工程中对应N为11, 误差限值为5%。

利用Midas/civil有限元软件将设计成桥索力作为吊索假定初拉力进行成桥索力计算并按照逆袭法的吊索初拉力优化流程图对吊索初拉力进行优化, 将结果列于表3.3.1中。

结果表明, 初次计算中最大误差百分比为79.39%, 出现在吊索DS11处。在经过一轮的优化后虽然有个别吊索不满足要求, 但是这些吊索索力的误差百分比都非常接近误差限值, 且大部分吊索均已处于误差限值内, 证明了逆袭法在实际应用时是可行的。

按照流程图对第一轮的计算结果进行第二轮优化, 结果如表3.3.2所示:

**表 3.3.1 初次计算结果以及第一轮优化后计算结果对比**

吊索编号	吊索索力 (kN)			一轮计算误差百分比 (%)	初始误差百分比 (%)
	设计成桥索力	初始计算成桥索力	一轮计算成桥索力		
DS01	1455.00	2120.62	1456.96	0.13	45.75
DS02	1504.00	1874.36	1503.51	-0.03	24.63
DS03	1473.00	1519.38	1476.13	0.21	3.15
DS04	1446.00	1212.94	1434.23	-0.81	-16.12
DS05	1400.00	1032.96	1327.08	-5.21	-26.22
DS06	1371.00	1131.90	1256.64	-8.34	-17.44
DS07	1112.00	1075.02	1054.16	-5.20	-3.33
DS08	1069.00	1236.62	1013.17	-5.22	15.68
DS09	1024.00	1247.26	972.30	-5.05	21.80
DS10	983.00	978.74	973.37	-0.98	-0.43
DS11	955.00	196.86	939.51	-1.62	-79.39
DS10'	983.00	978.10	974.23	-0.89	-0.50
DS09'	1024.00	1245.25	969.10	-5.36	21.61
DS08'	1069.00	1233.84	1015.28	-5.03	15.42
DS07'	1113.00	1074.88	1056.56	-5.07	3.43
DS06'	1371.00	1133.72	1209.25	-11.80	-17.31
DS05'	1399.00	1038.69	1331.57	-4.82	-25.76
DS04'	1445.00	1214.66	1411.02	-2.35	-15.94
DS03'	1472.00	1521.29	1545.32	4.98	3.35
DS02'	1502.00	1871.54	1497.38	-0.31	24.60
DS01'	1448.00	2097.59	1450.82	0.19	44.86

**表 3.3.2 第二轮优化后计算结果对比**

吊索编号	吊索索力 (kN)			百分比 (%)	初始误差百分比 (%)
	设计成桥索力	计算成桥索力	差值		
DS01	1455.00	1417.06	-37.94	-2.61	45.75
DS02	1504.00	1512.11	8.11	0.54	24.63
DS03	1473.00	1470.84	-2.16	-0.15	3.15
DS04	1446.00	1434.71	-11.29	-0.78	-16.12
DS05	1400.00	1385.09	-14.91	-1.06	-26.22
DS06	1371.00	1303.11	-67.89	-4.95	-17.44
DS07	1112.00	1060.32	-51.68	-4.65	-3.33
DS08	1069.00	1019.50	-49.50	-4.63	15.68
DS09	1024.00	974.66	-49.34	-4.82	21.80
DS10	983.00	938.86	-44.14	-4.49	-0.43
DS11	955.00	910.30	-44.70	-4.68	-79.39
DS10'	983.00	935.12	-47.88	-4.87	-0.50
DS09'	1024.00	975.40	-48.60	-4.75	21.61
DS08'	1069.00	1017.26	-51.74	-4.84	15.42
DS07'	1113.00	1059.87	-53.13	-4.77	3.43
DS06'	1371.00	1308.16	-62.84	-4.58	-17.31
DS05'	1399.00	1386.51	-12.49	-0.89	-25.76
DS04'	1445.00	1436.17	-8.83	-0.61	-15.94
DS03'	1472.00	1471.13	-0.87	-0.06	3.35
DS02'	1502.00	1507.90	5.90	0.39	24.60
DS01'	1448.00	1400.92	-47.08	-3.25	44.86

结果显示所有吊索的成桥索力误差百分比均在误差限值范围内，满足要求。

综上，吊索初拉力在第一轮优化后，大部分吊索已满足误差限值的要求，在经过第二轮的优化后，所有吊索的成桥索力误差百分比均控制在误差限值以内。

### 结论

采用逆装法优化吊索初拉力得到以下结论：

1. 以实际成桥索力与设计成桥索力误差百分比不在

误差限值内的吊索为优化目标，根据正装计算时的吊索张拉顺序（1~N）的逆顺序（N~1）进行吊索初拉力调整，优化目标明确，整体思路清晰；

2. 根据流程图在经过一次优化后大部分吊索的成桥索力误差百分比已满足误差限值的要求，在执行三次流程后所有吊索均满足要求，证明了采用逆装法优化吊索初拉力的快速简便；

3. 在操作上结合通用有限元软件进行成桥索力的计算，大大缩短了吊索初拉力的优化周期，可以应用于工

程实际。

### 参考文献

[1] 李耀华. 基于影响矩阵法的无应力状态法调索实践[J]. 工程与建设, 2021, 35(01): 125-127.

[2] 李洪波, 马玉全, 于天龙. 基于影响矩阵的系杆拱桥合理成桥吊杆索力确定[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(10): 2817-2819.

[3] 孔繁龙. 影响矩阵法在施桥大桥吊索二次调索中的应用[J]. 交通科技, 2012, (02): 7-9.

[4] 盛兴旺, 李松报. 确定系杆拱桥吊杆力的刚性连续梁法算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(03): 42-46.

[5] 高婧, 陈龙云, 王俊文. 基于影响矩阵法的多跨系杆拱桥吊杆张拉力计算与优化[J]. 公路, 2022, 67(09):

165-170.

[6] 陈代海, 李银鑫, 周帅等. 基于影响矩阵法的斜拉桥斜拉索合理初始张拉力分析[J]. 世界桥梁, 2021, 49(02): 78-83.

[7] 刘钊. 基于能量法的系杆拱桥最优吊杆内力的确定[J]. 工程力学, 2009, 26(08): 168-173.

[8] 田志昌, 孙超, 韩永华等. 拱桥成桥状态下吊杆索力优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(02): 296-302.

[9] 彭宣茂. 系杆拱桥吊杆初始张拉力的计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2000(06): 32-33.

[10] 冯仲仁, 苗永慧, 王雄江. 确定斜拉桥施工索力的影响矩阵法[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(02): 85-90.