

# 刚性系杆拱桥吊杆张拉索力施工控制研究

郭鑫, 颜东煌, 袁晟, 袁明

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**系杆、拱肋是系杆拱桥的主要承重构件,而吊杆索力的大小直接影响全桥的内力分布及工作状态,吊杆张拉次序及张拉力的控制是系杆拱桥施工过程监控的重要内容之一。该文结合理论分析及桥梁的实际情况,确定合理的吊杆张拉顺序,并在确定施工顺序后,对可能影响吊杆成桥索力的拱肋抗弯惯性矩、系杆抗弯惯性矩等设计参数及桥上施工荷载情况和吊杆张拉端锁紧螺母和油泵回油时拉力损失的影响进行敏感性分析;基于此,进一步提出刚性系杆拱桥吊杆张拉施工控制的流程,并完成对某刚性系杆钢拱桥进行吊杆张拉过程的施工控制。结果表明:从两端拱脚往拱顶依次对称张拉吊杆比从拱顶往拱脚张拉的施工方案更为合理,临时施工荷载及张拉过程中锚下拉力损失对成桥吊杆索力影响较大,进行吊杆张拉理论分析时必须对结构计算参数进行修正,并对临时施工荷载进行调查。施工过程中基于千斤顶法对频率法中吊杆的有效计算长度进行修正,并联合频率法与千斤顶法对吊杆张拉过程进行严格控制,可以有效解决千斤顶回油后不能明确定量锚下拉力损失问题。基于该文提出的刚性系杆拱桥吊杆张拉索力控制方法,成桥索力与目标索力最大偏差在3%以内,满足规范及设计要求,可有效减少吊杆索力调整次数,加快施工进度。

**关键词:**桥梁工程;系杆拱桥;吊杆张拉;索力控制;影响矩阵法;有效计算长度

## 1 引言

系杆拱桥由于其结构轻盈、线形美观、建筑高度小、跨越能力大,在中国东部公路桥梁建设中得到了越来越广泛的应用。系杆、拱肋是主要承重构件,而吊杆索力的大小直接影响全桥的内力分布及工作状态;刚性系杆拱桥施工中,吊杆力的调整非常重要,张拉过程中每根杆件的张拉都会伴随着拱肋及系杆的变形及其内力重分布,而后期吊杆的张拉力又会对先期施工的吊杆力产生影响,使得拱桥在吊杆张拉完毕后达不到预期的理想状态,因此吊杆张拉次序及张拉力的控制是系杆拱桥施工过程监控的重要内容之一。

目前系杆拱桥吊杆索力问题采用与斜拉桥索力问题相似的计算方法,如差值迭代法、正装迭代法等,只要迭代次数够多,采用何种方法均能取得较好的结果。祁强等通过对系杆拱桥吊杆张拉过程进行模拟试验研究,并建立有限元仿真计算,发现有限元模型能够比较

合理地模拟系杆拱桥的施工过程。尽管如此,实际工程中,成桥索力与目标索力相比仍存在较大偏差的情况,究其原因,主要是理论模型与实际结构存在差异,同时吊杆张拉时施工精度难以控制。王弘等指出:在对系杆拱桥吊杆进行千斤顶张拉时,必须辅以频率法对吊杆索力进行监测,而频率法测吊杆索力的精度受边界条件及计算长度等的影响,因此准确计算施工过程中吊杆的有效计算长度对吊杆张拉索力控制具有积极意义。

该文结合理论分析及桥梁的实际情况,以确定合理的吊杆张拉顺序,并在确定的施工顺序后,对可能影响吊杆成桥索力的拱肋抗弯惯性矩、系杆抗弯惯性矩、材料重度、弹性模量等设计参数及桥上施工荷载情况和张拉端锁紧螺母和油泵回油时拉力损失的影响进行敏感性分析;基于此,进一步提出刚性系杆拱桥吊杆张拉施工控制的流程,并完成对某刚性系杆钢拱桥进行吊杆张拉过程的施工控制,以使成桥吊杆索力与目标索力偏差较小,满足规范及设计要求。

收稿日期:2020-09-16(修改稿)

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2015CB057706);国家自然科学基金资助项目(编号:51108046, 51678068);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2017JJ5029)

作者简介:郭鑫,男,博士研究生. E-mail:530220383@qq.com

2 工程概况

某刚性系杆拱桥计算跨径为 75 m,吊杆为常用的兰格尔体系,采用先梁后拱,支架上焊接拼装施工方案。钢主梁截面采用双主梁断面,单幅主梁为扁平钢箱梁结构,纵向设 3 道腹板和 1 道外封板。系梁设置在桥面中央且为镂空结构,张拉系杆平衡拱脚推力。钢主梁顶宽 31.4 m,底宽 19.9 m,截面中心高度 2 m。主拱计算跨径 75 m,主拱垂直,立面矢高 18.5 m,主拱矢跨比  $f/L=1/4.054$ ,拱轴线为二次抛物线。吊杆顺桥向间距 3.0 m,每个吊点横桥向为双吊杆,全桥共 42 根吊杆。每根吊杆由 55 $\phi$ 7 mm 高强度低松弛镀锌钢丝组成,标准抗拉强度为 1 770 MPa。吊杆索拱端锚头为冷铸锚,梁端连接穿销式铰板,拱端为张拉端,采用球铰以适应吊杆微小转动。主要结构参数及立面、断面布置图如表 1 及图 1~3 所示。

表 1 主要结构参数

构件	弹性模量/ MPa	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	抗弯惯性 矩/m <sup>4</sup>	强度/ MPa
拱肋	$2.06\times10^5$	77.0	0.144	345
系杆	$2.06\times10^5$	77.0	1.002	345
吊杆	$1.95\times10^5$	77.0	$3.565\times10^{-7}$	1 770

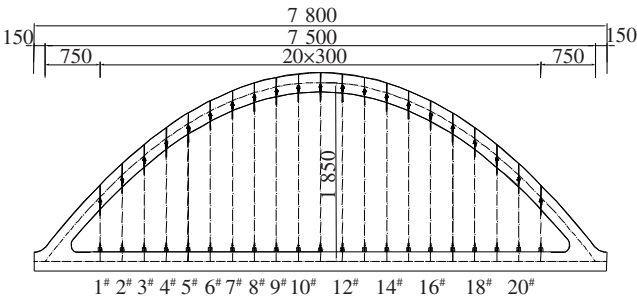


图 1 系杆拱桥立面布置图(单位:cm)

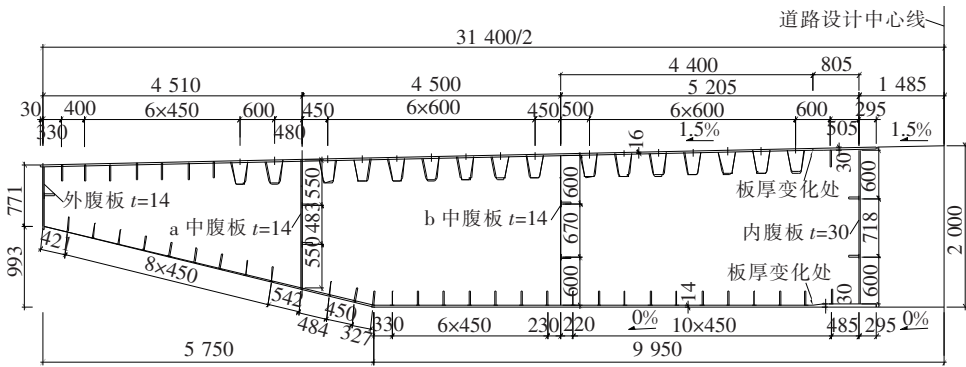


图 2 系梁标准断面布置图(单位:mm)

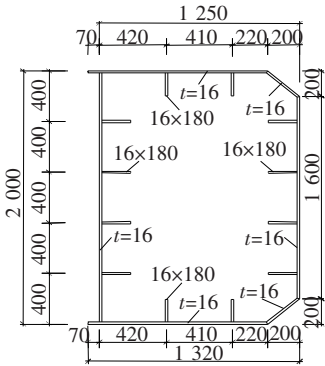


图 3 拱肋标准断面布置图(单位:mm)

3 张拉顺序的选择

合理的施工顺序能有效地保证吊杆张拉过程的安

全,减少调索次数,加快施工进度,节约施工成本。理论上无论采用何种张拉顺序,均能使成桥索力与目标索力一致,但该桥吊杆张拉在钢箱拱内,张拉设备笨重,工人带着在钢箱拱里面行动非常困难,同时,由于吊杆安装及张拉施工单位仅能提供 4 台千斤顶同时张拉,不能一步张拉到位,因此,需要采用合理的吊杆张拉顺序,减少千斤顶的挪动次数及吊杆索力的调整次数,由于该桥为钢箱拱桥,安全储备较大,故仅对以下两种方案进行讨论,方案 1:两端拱脚向拱顶对称张拉;方案 2:拱顶向两端拱脚对称张拉。该文采用影响矩阵法分别对两种张拉方案进行正装迭代计算,两种方案下的施工索力及张拉过程中拱肋的应力变化分别如表 2 及图 4、5 所示。

由表 2 可知:在达到同样的目标索力下,方案 1 的

表2 设计初张索力与施工索力

吊杆编号	设计初张索力/kN	拱脚至拱顶 施工索力/kN	拱顶至拱脚 施工索力/kN
1 <sup>#</sup> (21 <sup>#</sup> )	300	457.4	302.1
2 <sup>#</sup> (20 <sup>#</sup> )	300	464.5	341.0
3 <sup>#</sup> (19 <sup>#</sup> )	320	507.3	412.3
4 <sup>#</sup> (18 <sup>#</sup> )	320	566.2	476.0
5 <sup>#</sup> (17 <sup>#</sup> )	320	654.4	542.5
6 <sup>#</sup> (16 <sup>#</sup> )	320	749.2	606.5
7 <sup>#</sup> (15 <sup>#</sup> )	320	804.3	661.4
8 <sup>#</sup> (14 <sup>#</sup> )	320	700.6	620.6
9 <sup>#</sup> (13 <sup>#</sup> )	320	523.1	596.0
10 <sup>#</sup> (12 <sup>#</sup> )	320	378.9	667.0
11 <sup>#</sup>	320	322.1	936.8

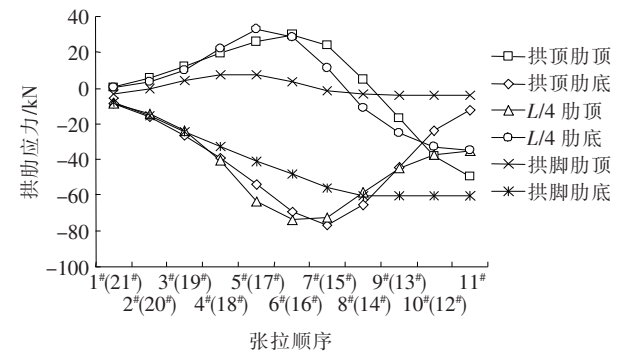


图4 方案1拱肋应力变化值

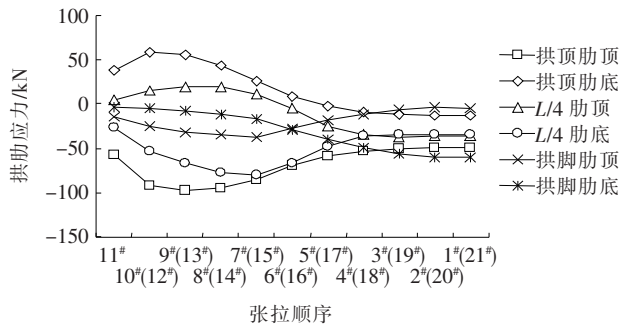


图5 方案2拱肋应力变化值

最大施工索力较小,且相对更为均匀,对千斤顶的  
要求较低,能有效降低千斤顶重量,减小工人的施工  
难度。由图4、5可知:方案1施工过程中拱肋的应力  
变化更为合理,且出现的最大应力小于方案2,能有  
效提高施工过程中拱肋的强度及稳定性,确保施工  
过程的安全。基于此,该桥采用从两端拱脚至跨中  
对称张拉的施工方案。

4 成桥索力参数敏感性分析

对于系杆拱桥而言,当理论计算模型各参数确定  
后,采用差值迭代法或正装迭代法等方法进行理论分  
析后,均能得到合理的吊杆张拉顺序及与之相应的吊  
杆施工索力,吊杆张拉施工过程中,工人将严格按照  
设计或其他技术人员提供的施工索力进行施工,当实  
际结构各设计参数存在偏差时,势必导致全部吊杆张  
拉完成后,成桥索力与目标索力有所出入,同时吊杆  
张拉施工过程中,由于工人的操作不当,或由于张拉  
端锁紧螺母和油泵回油时拉力损失的影响,也会导  
致索力有所差异,这都是现场施工人员无法确定的,  
因此在技术人员给出吊杆张拉顺序及吊杆施工索力  
时,必须对各设计参数进行校核,并对施工过程进行  
严格监测控制。基于此,为进一步研究在特定施工顺  
序下,吊杆成桥索力与目标索力的偏差受哪些因素  
的影响,采用单一参数法,分别对拱肋抗弯惯性矩、  
系杆抗弯惯性矩等设计参数及桥上施工荷载情况和  
张拉端锁紧螺母和油泵回油时拉力损失的影响进行  
敏感性分析。

该文分别将拱肋抗弯惯性矩、系杆抗弯惯性矩分  
别增加或减小10%,而其余参数不变,再根据未改  
变参数前的计算模型分析得到的吊杆张拉施工索力  
进行正装分析。对于施工荷载的影响,为赶进度,桥  
面上可能同时有两台吊车同时作业(吊装饰板),登  
高车(拱肋涂装)等大型施工机械,另有施工人员、  
钢材、气焊机、氧气罐等若干临时荷载,考虑总施  
工临时荷载为75 t,为计算方便,取10 kN/m的均布  
荷载分布于整个计算跨径内进行计算分析。油泵回  
油时的拉力损失是一个无法估计的未知量,该值受  
张拉吊杆的长短、张拉设备、施工人员的操作等因  
素的影响,可能每根吊杆均会有偏差,统计指出,该  
值可能达到100 kN;该文为得到吊杆锚下拉力损失  
对成桥索力的影响,每根吊杆在施工索力下仅考虑  
30 kN的损失,进行正装分析;基于以上分析及有限  
元分析模型,得到各参数改变后成桥索力与目标索  
力的偏差结果如表3所示。

由表3可知:临时施工荷载及张拉过程中锚下  
拉力损失对成桥吊杆索力影响较大,在等效的10  
kN/m的临时施工荷载作用下,成桥吊杆索力最大偏  
差为11%,如果吊杆初张拉或二次调索时,施工进  
度超前或滞后,还存在其他桥面堆积荷载,将对成  
桥吊杆索力产生更大的影响。系梁抗弯惯性矩影响  
较小,在其变化10%的状况下,影响百分比小于1%,  
这主要是因为系

表 3 各参数变化对成桥索力影响的计算结果

吊杆编号	对成桥索力的影响/%				施工荷载	锚下拉 力损失
	拱肋抗弯惯 性矩增大	拱肋抗弯 惯性矩减小	系杆抗弯惯 性矩增大	系杆抗弯惯 性矩减小		
1 <sup>#</sup> (21 <sup>#</sup> )	-0.28	0.20	0.11	-0.05	2.19	-4.41
2 <sup>#</sup> (20 <sup>#</sup> )	-1.62	1.71	0.18	-0.17	3.03	-4.05
3 <sup>#</sup> (19 <sup>#</sup> )	-2.32	2.55	0.32	-0.32	3.98	-2.85
4 <sup>#</sup> (18 <sup>#</sup> )	-2.30	2.61	0.44	-0.45	5.44	-0.93
5 <sup>#</sup> (17 <sup>#</sup> )	-1.47	1.76	0.54	-0.57	7.32	2.10
6 <sup>#</sup> (16 <sup>#</sup> )	0.20	-0.04	0.52	-0.50	9.30	5.73
7 <sup>#</sup> (15 <sup>#</sup> )	1.95	-2.06	0.10	0.01	11.09	9.12
8 <sup>#</sup> (14 <sup>#</sup> )	2.13	-2.43	0.68	-0.75	-0.02	-1.41
9 <sup>#</sup> (13 <sup>#</sup> )	1.34	-1.51	0.32	-0.34	0.00	-4.17
10 <sup>#</sup> (12 <sup>#</sup> )	0.41	-0.45	0.08	-0.08	0.00	-7.71
11 <sup>#</sup>	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-9.39

梁的抗弯惯性矩远大于拱肋(约 7 倍),在改变系梁抗弯惯性矩时对整个桥梁结构刚度影响较小;拱肋抗弯惯性矩对成桥吊杆索力的影响最大约为 3%,改变拱肋抗弯惯性矩,成桥吊杆索力偏差大于 1%的吊杆数量为 14 根,而对拱脚、四分点及跨中处吊杆影响较小。

5 频率法计算长度的确定

目前,柔性吊杆索力测试的方法主要有油压千斤顶法、压力传感器法、振动频率法及磁通量法,振动频率法不需要预埋传感器,它利用环境随机振动或人工激振作为结构物激振,在吊杆上附着高灵敏度的传感器,拾取吊杆在环境激励下的振动信号,经过滤波、放大、谱分析,测定结构的振动特性,然后根据吊杆索力与其振动频率之间的关系求出吊杆的索力,因此,采用振动频率法测吊杆索力是最为经济快速的方法。

目前频率法测索力的理论模型主要有张紧弦模型、两端铰支的受拉水平直梁模型、两端固支的受拉水平直梁模型及柔性拉索模型。研究表明:只有两端固支受拉水平直梁模型能应用于短索,其具体计算公式为:

$$T=4\pi^2ml^2\frac{f_n^2}{y_n^2}-\frac{EI}{l^2}y_n^2$$
 (1)

$$y_n=n\pi+A\phi_n$$
 (2)

$$\phi_n=\sqrt{\frac{EI}{m\omega_n^2l^4}}$$
 (3)

$$A=-1.33+12.83n+17.3n^2$$
 (4)

式中: $m$  为吊杆线密度; $l$  为计算索长; $f_n$  为  $n$  阶频率; $E$  为弹性模量; $I$  为抗弯惯性矩, $\omega_n=2\pi f_n^2$ 。

文献[16]研究表明:吊杆两端刚度很大的连接部分对索力测试精度有着不容忽视的影响,将吊杆两锚固点间长度减去两端连接部分长度的一半来取值计算,能得到合理且精确的结果,而文献[17]的研究表明,计算长度取两端锚垫板之间的距离扣除刚性锚头长度和减振器长度影响能得到较为精确的结果,误差不超过 3%,各研究成果存在出入,因此,为明确该桥吊杆的有效计算长度,该文采用两端固支受拉水平直梁模型计算公式,并基于 Matlab 编制程序计算出每根吊杆的有效计算长度(1<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>吊杆由于太短无法准确测出其频率,未列出),求取平均值并计算出每根吊杆的有效计算长度作为后续索力测试的依据,结果如表 4 所示。

6 吊杆张拉施工控制流程及成果

基于以上分析,如不能将全桥吊杆同步张拉到位,为尽量减小吊杆初张拉或二次调索后的索力与目标索力的偏差,提出了以下关于刚性系杆拱桥吊杆张拉施工控制的流程:① 收集有关设计图纸等资料;② 确定各结构设计参数建立有限元分析模型,并根据实际材料试验对模型进行修正;③ 进行临时施工荷载调查,将桥面上的重型施工机械及其他临时荷载清理出桥面,如不能进行清理,需将桥面荷载调查清楚,并添加在分析模型相应位置上;④ 进行结构计算,确定吊杆



表4 各吊杆有效计算长度修正结果

吊杆 编号	索长 $L/\text{m}$	线密度 $m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	吊杆 直径 $D/\text{m}$	抗弯刚 度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	实测 频率 $f/\text{Hz}$	对应 $\phi_n/(\times 10^{-4})$	对应 $y_n$	控制 索力 $T/\text{kN}$	索长修 正值 $\Delta L/dL$	平均索 长修正 值/ $\text{m}$	有效 索长 $L_0/\text{m}$
2 <sup>#</sup>	6.599	18.435	0.052	69.522	13.107	8.999	3.168	300	1.479		5.149
3 <sup>#</sup>	8.630	18.435	0.052	69.522	9.454	6.377	3.160	320	1.474		7.180
4 <sup>#</sup>	10.424	18.435	0.052	69.522	7.486	5.138	3.156	320	1.464		8.974
5 <sup>#</sup>	11.981	18.435	0.052	69.522	6.320	4.376	3.154	320	1.415		10.531
6 <sup>#</sup>	13.301	18.435	0.052	69.522	5.591	3.896	3.153	320	1.387		11.851
7 <sup>#</sup>	14.385	18.435	0.052	69.522	5.172	3.611	3.152	320	1.522		12.935
8 <sup>#</sup>	15.232	18.435	0.052	69.522	4.869	3.406	3.151	320	1.582		13.782
9 <sup>#</sup>	15.842	18.435	0.052	69.522	4.648	3.260	3.151	320	1.553		14.392
10 <sup>#</sup>	16.215	18.435	0.052	69.522	4.461	3.131	3.151	320	1.334		14.765
11 <sup>#</sup>	16.351	18.435	0.052	69.522	4.444	3.132	3.151	320	1.413	1.450	14.901
12 <sup>#</sup>	16.251	18.435	0.052	69.522	4.456	3.128	3.151	320	1.354		14.801
13 <sup>#</sup>	15.914	18.435	0.052	69.522	4.546	3.188	3.151	320	1.308		14.464
14 <sup>#</sup>	15.340	18.435	0.052	69.522	4.818	3.368	3.151	320	1.547		13.890
15 <sup>#</sup>	14.529	18.435	0.052	69.522	5.127	3.584	3.152	320	1.556		13.079
16 <sup>#</sup>	13.481	18.435	0.052	69.522	5.487	3.828	3.153	320	1.346		12.031
17 <sup>#</sup>	12.197	18.435	0.052	69.522	6.192	4.298	3.154	320	1.418		10.747
18 <sup>#</sup>	10.676	18.435	0.052	69.522	7.317	5.039	3.156	320	1.516		9.226
19 <sup>#</sup>	8.918	18.435	0.052	69.522	9.009	6.102	3.159	320	1.424		7.468
20 <sup>#</sup>	6.923	18.435	0.052	69.522	12.202	8.456	3.166	300	1.454		5.473

张拉方案,得到吊杆张拉的合理施工状态;⑤ 吊杆张拉施工过程中,需同步采用频率法对吊杆张拉力进行监测;通过千斤顶法对频率法参数进行修正,频率法测索力建议采用两端固支受拉水平直梁模型,千斤顶回油后,采用修正后的计算公式计算出理论目标频率并对频率进行测量,如有偏差,调整锁紧螺母进行调整;⑥ 全桥吊杆张拉完成后,对所有吊杆进行测量,与目标索力偏差在合理范围内即施工完成,若有较大偏差需寻找原因,重新进行参数修正并对过程进行监测。吊杆张拉施工监控流程如图6所示。

基于该文方法对某刚性系杆拱桥吊杆张拉施工过程进行监控,成果索力如表5所示(1<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>吊杆频率无法准确测量,未列出),与成桥目标索力相比,最大偏差仅3.0%,满足规范及设计要求,可为同类型桥梁吊杆张拉索力控制提供参考。

7 结论

(1) 对于刚性系杆钢箱拱桥而言,在张拉设备较少时,从两端拱脚往拱顶依次对称张拉吊杆方案优于从拱顶往两端拱脚张拉,且张拉过程中结构受力更为

合理。

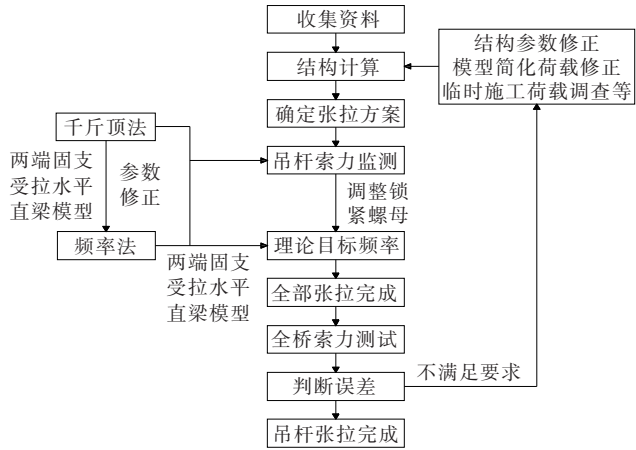


图6 吊杆张拉施工控制流程

(2) 临时施工荷载及张拉过程中锚下拉力损失对成桥吊杆索力影响较大,拱肋抗弯惯性矩对成桥索力影响较系梁抗弯惯性矩影响大,吊杆张拉理论分析之前必须对结构设计参数进行修正,并对临时施工荷载进行调查。

(3) 千斤顶张拉吊杆过程中必须辅以频率法进行监测,同时采用千斤顶法对频率法计算模型参数进行

表 5 吊杆成桥索力

吊杆 编号	目标索 力/kN	上游侧吊杆			下游侧吊杆		
		实测基 频/Hz	换算索 力/Hz	偏差百 分比/%	实测基 频/Hz	换算索 力/Hz	偏差百 分比/%
2 <sup>#</sup>	550	17.124	540	−1.8	17.173	543	−1.2
3 <sup>#</sup>	550	12.340	560	1.9	12.311	558	1.4
4 <sup>#</sup>	550	9.750	552	0.3	9.721	549	−0.3
5 <sup>#</sup>	550	8.158	535	−2.8	8.191	539	−2.0
6 <sup>#</sup>	550	7.440	565	2.8	7.357	553	0.5
7 <sup>#</sup>	550	6.792	562	2.2	6.780	560	1.9
8 <sup>#</sup>	550	6.271	545	−1.0	6.241	539	−1.9
9 <sup>#</sup>	550	6.047	553	0.5	5.993	543	−1.3
10 <sup>#</sup>	550	5.887	552	0.3	5.847	544	−1.1
11 <sup>#</sup>	650	6.355	655	0.8	6.300	644	−0.9
12 <sup>#</sup>	550	5.912	559	1.6	5.828	543	−1.3
13 <sup>#</sup>	550	6.008	551	0.2	5.971	544	−1.0
14 <sup>#</sup>	550	6.311	560	1.9	6.240	548	−0.4
15 <sup>#</sup>	550	6.684	557	1.2	6.675	555	0.9
16 <sup>#</sup>	550	7.261	555	0.9	7.214	548	−0.4
17 <sup>#</sup>	550	8.186	561	2.1	8.166	559	1.6
18 <sup>#</sup>	550	9.480	552	0.4	9.501	555	0.8
19 <sup>#</sup>	550	11.871	562	2.2	11.914	566	3.0
20 <sup>#</sup>	550	16.153	546	−0.6	16.252	553	0.6

修正,两端固支受拉水平直梁模型更适用于系杆拱桥吊杆索力测试。

(4) 基于该文提出的吊杆张拉索力控制流程对某刚性系杆拱桥吊杆张拉索力进行施工控制,成桥索力与目标索力偏差不超过 3%,具有较高精度,满足规范和设计要求,可为同类型桥梁吊杆张拉索力控制提供参考。

参考文献:

[1] 邢云,赵荣欣,李博.系杆拱桥典型架设方法的施工控制研究[J].桥梁建设,2012(1).

[2] 韩保勤.钢管混凝土拱桥吊杆张拉方案比选[J].桥梁建设,2015(1).

[3] 蔡军田.先梁后拱式系杆拱桥吊杆张拉及索力控制研究[J].铁道建筑,2013(8).

[4] 许汉铮,蔡昌伟,李浩师.系杆拱桥吊杆索力计算方法对比分析研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019(4).

[5] 杨焯,周水兴.斜拉桥施工阶段初张索力计算方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008(1).

[6] 颜东煌,刘光栋.确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J].中国公路学报,1999(2).

[7] 祁强,张戎令,胡锐鹏,等.系杆拱桥施工过程索力变化规律试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017(9).

[8] 王弘,郭良友,王朝华.钢管混凝土拱桥吊杆索力的误差状况分析[J].世界桥梁,2004(3).

[9] 吴文清,王成树,刘国昌,等.大跨度系杆拱桥柔性吊杆张力监测和参数识别研究[J].公路交通科技,2007(1).

[10] 陈彦江,程建旗,闫维明,等.基于参数灵敏度分析的吊杆索力识别[J].振动与冲击,2011(7).

[11] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].同济大学学报(自然科学版),1998(3).

[12] 王学伟,卜一之,祝兵,等.六塔斜拉桥主梁制造阶段参数敏感性研究[J].公路交通科技,2015(1).

[13] 刘旭政,黄平明,许汉铮.独塔斜拉桥参数敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2007(6).

[14] 魏建东.索力测定常用公式精度分析[J].公路交通科技,2004(2).

[15] 方志,汪建群,颜江平.基于频率法的拉索及吊杆张力测试[J].振动与冲击,2007(9).

[16] 毛亚娜,刘世忠,叶丹.基于频率法对系杆拱桥吊杆索力测试的分析[J].兰州交通大学学报,2010(1).

[17] 冯东明,李爱群,李枝军,等.基于频率法的自锚式悬索桥吊索力测试与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2009(S2).