

南平市闽江大桥牵索挂篮的总体设计

程依祖¹ 唐明翰² 顾海欢² 李世群³

(1 上海外经集团有限公司 上海 200032 2 上海基础工程有限公司 上海 200002

3 上海市工程建设咨询监理有限公司 上海 200433)

摘要:牵索挂篮是大跨度P.C斜拉桥最理想的施工设备。本文着重介绍这种挂篮的优缺点与原理,以及南平桥牵索挂篮的设计思路。

关键词: P.C斜拉桥 传统挂篮 牵索挂篮 承载平台

1 工程概况

1.1 总体布置

南平市闽江大桥主桥为一座双塔双索面半漂浮斜拉桥与连续梁协作体系的组合式“P·C”桥梁,由南向北跨径布置为45+160+272+130m,全长607m。主桥南端引桥为单箱五室现浇箱梁,北端引桥为38m跨径的8片“V”型预制小箱梁。桥面由北向南为1.15%单向纵坡。

航道位于“160m”跨内。通航净宽为90m。

1.2 索塔

索塔由上、中、下(塔墩)三段和上、下两道横梁构成。承台以上塔高:南塔为123.7m,北塔为126.7m。塔墩为变截面直立式单箱双室结构,下设承台,台下有22 ϕ 2.0m钻孔嵌岩桩,中、上塔呈折线“H”型为350 \times 650cm等截面单箱单室结构。塔墩垂直高度为33.5m,中塔柱以1:13.4277内倾,垂高为42.7m,直立式上塔柱高度为52.2m,壁中设有“井”字形 ϕ 32j粗钢筋预应力束。

索塔采用爬模施工。

1.3 主梁

斜拉桥部分的主梁断面除南端为单箱四室箱梁,北端为单箱三室箱梁,其余均由双边箱梁和箱间的横梁和桥面板构成。梁面设2%双向横坡,顶宽24.2m,另加设0.2m的风嘴。断面中心高2.8m,边高2.574m,横梁间距6m,顶板厚26cm,底板厚25cm,腹板中心距11m,厚30cm。标准段长6m,每段2/3处设有一道由两段箱内和一段箱间、实为三段连续的整体横梁,两外端为拉索下锚点。

全桥有3 \times 20+16=76个标准节段,采用牵索

挂篮悬浇,最大浇筑段混凝土方量为140m³。设计要求挂篮(含模板)重在140吨内。

主塔处“0”号段长27m,采用支架现浇。

协作部分为变截面单箱四室结构,外形与斜拉部分一致,均用支架施工。

全桥合龙段三个,南北边跨合龙段长2m。

中孔合龙段长度原为5m,为利于合龙,某单位建议改为3m,将不足的2 \times 1m分散在2 \times 20个标准段中,即标准段长为6.05m。笔者认为对原设计图的变更量太大,最后按笔者建议,决定仅将这2 \times 1m放在最后一段即21号节段一次浇筑,则该段浇筑长为7m。合龙段两边孔先合龙,中孔后合龙,均用吊架施工。

1.4 斜拉索

21对拉索呈扇形布置,为平面索。索面相距22.64m,梁上索距6m,拉索下端锚于横梁两端底部的锚块上,塔内张拉锚于塔柱内壁齿块上。

拉索为热挤“PE”半平行钢丝绳,从PES(C)7~109~187共6种规格,其垂直夹角为13.11°~57.65°,相应的成桥索力2332kN~4069kN。监控单位计算的施工阶段的调索索力为1607.79kN~3627.16kN。斜拉索布置见图1。

2 国内传统挂篮综述

国内大跨径P·C“T”型刚构、连续刚构和连续梁三类桥梁,大都是用挂篮逐段悬臂浇筑而成。为使施工阶段梁的内力与日后运营时相近或超过不是很多,设计时常从桥墩到跨中设计成若干不同长度的节段,宽桥则设计成双幅。其中有些桥梁分别施工后,通过现浇带将桥面连成一体。前者如即将开工的伊朗BR—06L/R特大桥,

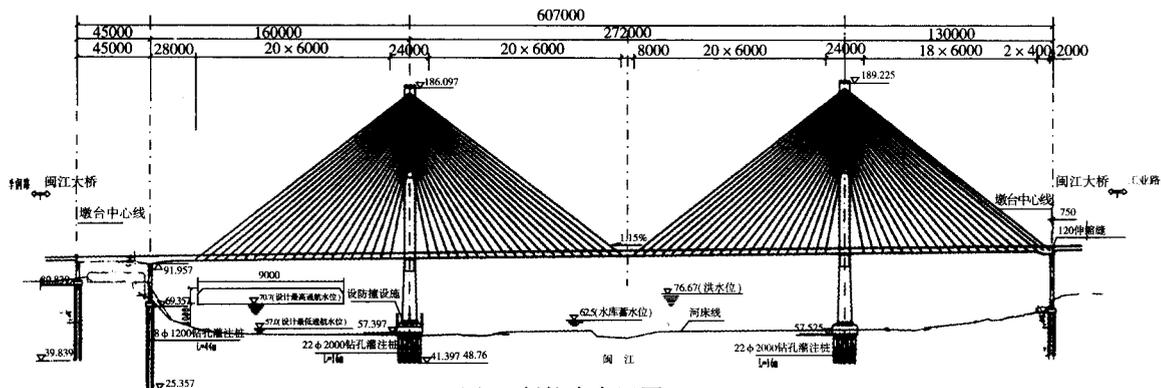


图1 斜拉索布置图

单幅单箱顶宽13.1m，双幅间距为2m；后者如▲柳州大桥，单箱双室，施工时箱顶宽9.6m，后浇带宽为0.8m。

我国广泛应用的传统挂篮，它由悬臂式钢架、吊杆、平台、平衡系统、行走系统和模板组成。钢架后部支承在已成梁段顶面，前部悬臂长度大于一个节段长，臂端有前吊杆吊住下方的平台前端，平台后端用后吊杆向上吊在已成梁段上。施工时平台上的混凝土、模板、平台以及其他施工荷载之和的一半由后吊杆直接传到已成梁段上，而另一半则经由前吊杆、悬臂钢架再传到已成梁段上。

上世纪六十年代建成的我国首座大跨径P·C桥柳州大桥（现称柳江一桥），其主桥由三个“T”构成，两个中孔为124+120m。笔者施工时曾用了六只以万能杆件作桁架、型钢作平台，铁轨作压重的悬臂式挂篮，完成了十条悬臂梁的浇筑（近岸边的两条则由支架施工）。后期的施工速度为五天一段，此后我国多座桥梁都采用这种挂篮进行施工。

历经40余年的发展，这种悬臂式传统挂篮出现了多种多样。

①按造型分：有桁架式、斜拉式、菱形和三角形。

②按材料分：有万能杆件、贝雷架、六四军用梁和钢箱梁。

③按平衡方式分：

A. 全压重（按梁段最大重量时的平衡配置）

B. 半压重半锚固式（压重按挂篮行走时配置，施工时不足部分以锚固补充）

C. 全锚固式（施工和行走时都由锚固来平衡）

在m值（挂篮用钢量与节段混凝土之比）方面由桁架式挂篮的1.0左右（柳州大桥为0.97，常德沅水桥为1.23）已降到三角形挂篮0.4左右。

2009年合龙的柬埔寨湄公河桥，主桥为95+3×170+95m连续梁-刚构组合桥。它的单臂是由6×3+9×3.5+7×4m构成，单箱单室，顶宽13.5m。节段最大混凝土重212吨，挂篮为无压重全锚式三角形，含模板在内的挂篮全重仅75吨。

3 牵索挂篮的优点与原理

我国大跨径P·C斜拉桥多由悬浇而成，桥宽也多在20米到40米之间，节段长一般在6~8米范围内。无论在宽度上、节段长度上以及节段混凝土重方面都远远超过了传统挂篮所能适应的能力，而牵索挂篮除具有①特有的适应性，尚具有②不再有传力钢架，桥面简洁，方便于施工；③仍可做到m值在0.4以下；④挂篮在满负荷工况下，仅一半载荷传到已成梁体上，大大减少了施工阶段中梁的内力。

牵索挂篮与传统挂篮的承载平台从侧面上都为一个简支结构，其后支点都是锚在已成梁段上。不同的是牵索挂篮平台的前支点为永久斜拉索，当节段混凝土养生到强度后，启动前支点下的千斤顶对斜拉索进行张拉。到达吨位后，旋紧斜拉索下锚具外的螺母，使其与锚垫板密贴，千斤顶开始回油，回油后拉索索力则转移到梁体上了。同时拉索与挂篮自动分离，完成了转换工作。

4 南平市闽江大桥牵索挂篮设计

4.1 总体考虑

①斜拉桥中各标准梁段均用牵索挂篮施工，其中近协作部分的4个渐变梁段中的底板过后用

吊模方法补上。

② 承载平台顶面与砼梁底相距250mm，平台与底模分离，以便于立模标高的调整。

③ 挂钩可降落高度为200mm。

④ 为便于施工单位日后承接更宽、节段更长的桥梁时的改制和增加整体刚度，挂篮采用箱型结构，构件间均为栓接。

⑤ 为减轻重量，钢材材质为Q345。

4.2 构造设计

本桥前支点挂篮拟由：1、承载平台；2、牵索机构；3、悬吊系统；4、行走系统；5、导向、纠偏与定位系统；6、止推机构；7、模板系统七部分构成（见图2~5）。

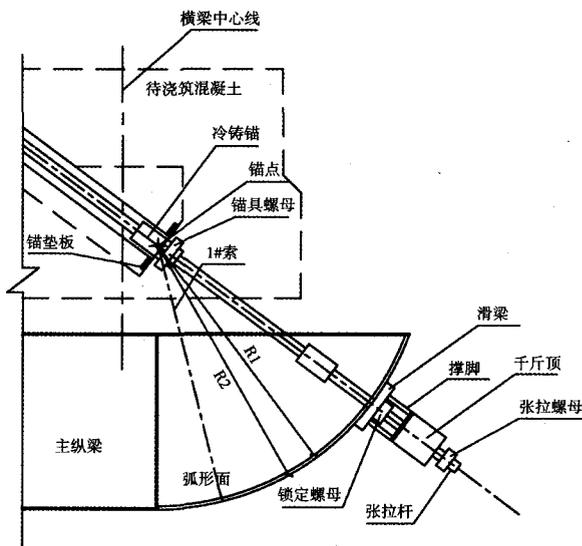


图5 牵索机构

牵索挂篮平台有长短两种。其共同点是在已成梁段的前方的平台长度都需大于一个节段长，供梁段施工之用。不同之处是短平台后部仅需约半个节段长，供设置平台后吊杆、行走挂钩和止推装置之用。此外在已成梁段桥面仍需设三角形桁架与挂钩组成挂篮行走时的前后吊点。而长平台后部则需要一个节段长，供设置行走挂钩、后吊杆、止推装置和反走轮之用。由于增加的部份仅为两条主纵梁。显而易见，长平台方案用钢少，且桥面简洁，故本桥采用长平台方案。

① 承载平台

由于本桥主梁为边双箱梁，混凝土大部分重量集中在两侧、故承载平台除必须设置的两条主纵梁外，又设置了两条辅助性次纵梁。为了能适应以后8m长节段的施工，此次让平台的后支点处于受力更好的已成梁段（N-1段）的砼横梁处，将平台前后支点间距定为8.5m，经综合考虑后，平台的钢箱梁排由4纵4横构成，均为箱形结构，前三根横梁为主要受力构件，主纵梁纵轴线与斜拉索同在一个竖直平面内。

第二道横梁受力最大且净跨达21m，为增加刚度确保砼浇注时的变形值小于允许值，拟有三种措施：方案一。如图所示，将其做成组合式桁架，即上弦为箱形，下弦及立杆为钢管。方案二。对横梁施加预应力，梁底下不再有桁架。方案三。方案一中的下弦为柔性索，竖腹杆不与横梁连接，而是两者间置有千斤顶，在砼浇注过程

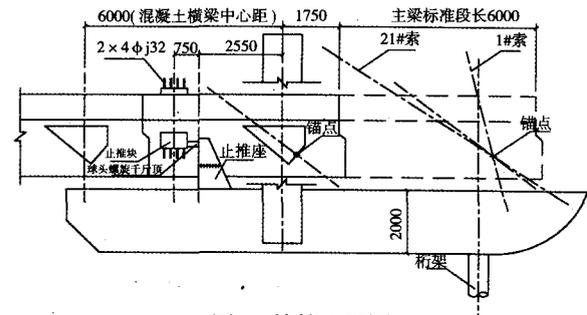


图2 挂篮立面图

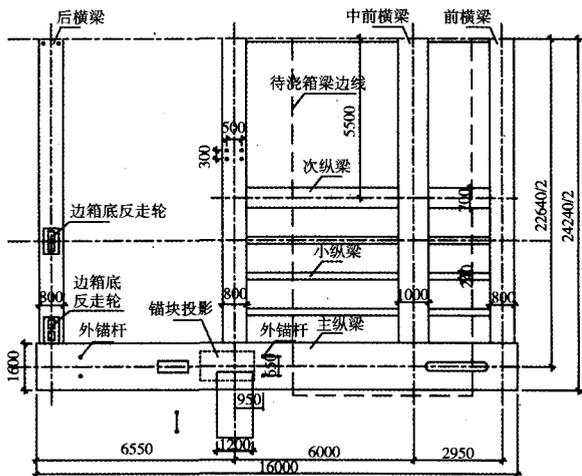


图3 挂篮平面图

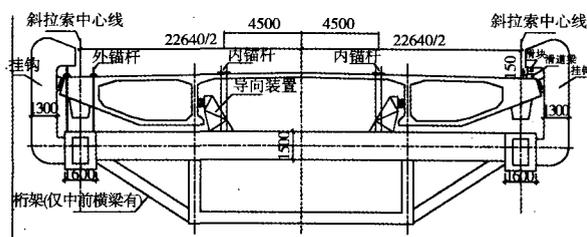


图4 挂篮断面图

中,对横梁施加反顶力。为操作简便起见,最终采用方案一。

根据需要本桥的挂篮平台平面拟定为(顺横桥向)16×24.24m前三横梁间若增设若干道宽20cm,高50~60cm的焊接“T”字钢作为小纵梁,则更利于底模的搭设和受力。

各梁梁顶齐平与混凝土梁底保留25□间隙,底模安装后的多余部分作立模标高调整之用

② 牵索机构

其功能是将斜拉索与挂篮连接起来作为挂篮的前支点,该系统由:弧形首、滑梁、锁定螺母和千斤顶组件构成。

弧形首是以混凝土梁拉索锚点为圆心以某一尺寸为半径一定宽度的钢板和加劲肋焊在主纵梁腹板内侧而形成,以附着千斤顶,千斤顶组件由撑脚、千斤顶、张拉杆、张拉螺母,接长杆和联结器构成。锁定螺母先将滑梁紧固在弧梁的某一位置。

如图所示,平台上施工时,只有锁定螺母和接长杆在工作,转换时启动千斤顶对斜拉索进行张拉,到吨位后,旋紧锚具螺母,千斤顶回油后,索力瞬即转移到混凝土梁体上,同时拉索与挂篮进行分离。

随着砼梁的延伸,斜拉索的水平夹角逐渐减小,附有千斤顶的滑梁也逐渐上移至新的位置,每次到位后除有螺母锁定外,尚有防止滑梁上下滑移的装置。

目前国内斜拉桥拉索有两种:一种厂制平行钢丝索(如本桥),两端LZM锚具为笔者与上海市政设计院1978年发明;另一种为平行钢绞线索,锚具为群锚。对于后者,牵索机构中尚需增设一个高约80余厘米由4根拉杆和端连接板组成的传力架,其一端与千斤顶张拉杆相连,另一端则旋在拉索下锚具的锚板外螺纹上,传力架的中空部份则作单根绞线安装和张拉的操作空间。

③ 悬吊系统

悬吊系统是挂篮的后支点,如前所述,它是通过若干锚杆组将节段(n)的砼重,模板重,挂篮重及施工荷载四者之和的一半传到已成梁段(n-1)段的梁体上。

本桥悬吊系统由设在后中横梁的2~4φ32精轧螺纹钢(内锚杆)和该横梁两端主纵梁顶面

的2-2φ70mm40cr两种锚杆(外锚杆)共同组成。设在主纵梁后端的2-2φ70mmcr锚杆仅作定位之用。

④ 行走系统

其功能是实现挂篮的空载移动,由“C”形挂钩,滑道,牵引千斤顶和反滚轮构成。

“C”形挂钩为直立式箱形结构,下端用螺栓与主纵梁外腹板连接,滑道由型钢与钢板焊成,平铺在拉索预埋管外侧的桥面上,顶面铺有F4板,牵引千斤顶为连续张拉千斤顶,其后座设在滑道两端,φ32j钢筋穿过挂钩并用螺母与其相连,两端分别穿入千斤顶内,以便可进可退。

挂篮行走时,由于前重后轻,故在挂篮尾端设置了反滚轮以平衡前倾力矩,可沿箱梁底滚得,初步计算反力为80吨。

⑤ 导向,纠偏与定位系统

“中后”横梁上的导向滚轮和挂钩内侧的限位滚轮都为防止挂篮行走时左右摆动而设置的,一旦发生偏向可通过单只启动牵引千斤顶以及启动设在后横梁的千斤顶反推砼箱梁腹板,以达挂篮中心线与桥梁中心线一致。

⑥ 止推结构

平台定位后,随着施工荷载的不断增加,拉索索力及其水平分力也相应不断增加。本桥单根索的最大的水平分力有近300t之多,上述锚杆组与梁体间的摩阻力尚不足以平衡,为防止定位后的挂篮向塔柱移动。故设置了止推机构,它由止推座,止推块,预埋件和螺杆四部分组成。

止推座设于挂钩后面的主纵梁顶面,在高度上分上下两段,下段与主纵梁相焊,上下间栓接,行走时拆去上段。止推块为底平顶斜并焊有圆钢柱的焊接钢块,每侧用2×4φj32与风咀锚固在一起,埋件由φ245×30短钢管,斜钢板、锚筋、剪力板焊成一体后埋在砼中。斜钢板上设有φj32钢筋孔。螺旋千斤顶为专门设计的由螺杆和套筒构成,螺杆端部设有球座,并固定于止推座上,挂篮定位后,调节螺杆使其端部紧贴止推块。

为使钢柱基本处于纯剪状态,柱高约为200mm,与其匹配的钢管内径差为5mm。在确定柱径及钢管直径与壁厚时需确保管外的砼应力在允许范围内。

拉索的水平分力主要是通过抗剪柱传到砼梁上, 虽然对埋件与止推块的两个接触面都加工成一定的精度, 但我们仅作增加安全度之用。

起初曾考虑采用“反拉杆”来平衡, 后因本桥砼梁削弱太多而放弃。

⑦ 模板系统

A. 边箱外侧模

采用大块定型钢模, 预留可包络全部斜拉索锚块的大孔, 届时施工现场按锚块的尺寸参数用胶合板制作模壳补上。

B. 边箱内模

边箱内内横梁前后区均用碗扣式 $\phi 48 \times 3.5\text{mm}$ 钢管作支架, 配胶合模板。钢管立于底板钢筋网格中底模顶面的混凝土预制块上。浇筑顶板时每隔6m设有预留孔, 内膜拆除后补上。

C. 边箱底模

拟用定型钢模, 通过调整标高的垫块支承于平台顶面。

D. 中横梁前区

采用固定钢支架, 配定型钢模。

E. 中横梁后区

采用可升降的整体钢支架, 以便于挂篮下降后空载前移, 配定型钢模。整体钢支架有“拱式”和“桁架式”两者。前者重量轻, 但构造相对复杂, 本桥采用后者。

上述钢模模板均为6mm钢板作面板, 8#槽钢作肋, 材质为Q235。

4.3 计算

4.3.1 荷载

① 标准节段长6m, 合龙段前一节段长7m, 最大砼重340t, 荷载冲击系数取1.2。

② 牵索拉力最大为407t, 实际上一期垣载施工时小于此值。拉索水平夹角 33.33° 。

③ 挂篮自重108t。

④ 止推机构反力对主纵梁产生的最大弯矩M为812t·m

⑤ 模块重40t。

⑥ 施工荷载 2.5kN/m^2 。

⑦ 当地风速为20m/s, 风压 $w=1/1600y^2=0.25\text{kN/s}$ 。

4.3.2 计算

工矿1: 满负荷施工, 即节段砼刚浇注完毕。

工矿2: 挂篮带有模板前移。

按上述二工况计算相应的构件, 结果表明: 相关构件的应力和变形均满足规范要求。

5 挂篮静载试验

在挂篮安装就位后使用前必须对其进行荷载试验。旨在①检验设计与加工质量; ②消除挂篮非弹性变形; ③掌握日后施工过程中的弹性变形。

加载材料宜为袋装砂、石材料或钢筋, 加载时需按模板和砼在平台上的位置和重量分布情况进行堆放。

至少分三级加载, 即50%、100%、110%, 逐级稳定后逐级测试各主要构件的应力和变形。其结果与计算值相比, 无异常情况时方可继续加载。

6 挂篮一个节段的施工步序及工作内容

A. 挂篮前移至n段。

B. 安装n段拉索, 并第一次张拉实现索力与立模标高双控。

C. 绑扎n段钢筋, 安装预应力管道和模板。

D. 浇筑n段砼至1/2时, 拉索进行第二次张拉。

E. 继续浇注混凝土至完毕。

F. 混凝土养生。

G. n段拉索进行第三次张拉, 完成体系转换工作。

上述各步序中工作内容:

A. 挂篮移至n段后

① 安装前外锚杆, 并张拉使滑靴底上升离滑道梁顶195mm。

② 启动后横梁处的反顶千斤顶, 拆除反走装置。

③ 前外锚杆第二次张拉使边箱底模与砼梁底相贴。

④ 安装止推装置, 并使螺杆顶紧。

B.

① 预埋管就位后, 安装n段斜拉索。

② 通过斜拉索的张拉和平台后端的反顶千斤顶使索力与标高达到双控标准。

③ 前外锚杆第三次张拉至每根800kN。

④ 内锚杆每根 $\phi j32$ 张拉至350kN。

(下转第40页)

都调低至设计拉力之下,使锚索在安全应力下有较大的变形空间。但是,锚索自由段的长度是恒定的,锚索的安装应力与最大允许应力之间的应力差决定了锚索的最大允许伸长量,该伸长量必须与由于开挖核心岩体引起的洞室收敛量相匹配,否则,不是浪费了锚索材料(前者大于后者),就是对锚索的工作状态构成威胁(前者小于后者)。

对那些需要调整锚索预应力的工程,如果选用屈服锚索,既可始终保持锚索的设计支护力,又允许围岩变形,省去调整锚索拉力的工序。

6 结束语

到现在为止对屈服锚索的认识仍处于初级阶段,它的抗震和抗爆作用仅仅是有限的实验和几个工程的实际应用结果;文中提到的在其他领域

的应用,仅限于作用机理的分析,并无应用实例证实。要完全弄清爆炸的当量和地震的级别与屈服锚索的设计参数(屈服力和屈服量)的确切关系,要证实屈服锚索在其他领域的应用效果,仍需锚索工作者作长期而艰苦的努力。然而,理论总是落后于实践,毕竟已有工程实验和工程实践证明屈服锚索有显著的抗动载作用。我们相信,不久的将来,屈服锚索必将在抗爆、抗震等工程中发挥巨大的作用。

参考文献

- [1] 孙国庆等. 千米埋深小煤柱顺槽让压锚杆支护技术研究[J]. 岩土锚固工程, 2007.3
- [2] 高建科等. 采场巷道综合控制技术及其在二矿区的应用[M]. 锚固技术在岩土工程中的应用. 人民交通出版社版发行, 2006.11
- [3] 刘玉堂等. 屈服锚索在国防工程中的应用研究. 总参工程兵科研三所. 2007.07.20

(上接第33页)

⑤ 安装后外锚杆每根拉至750kN。

F. 砼养生到强度后

① 拆模。

② 张拉预应力束。

③ 拆除止推系统。

G. 体系转换

① n段拉索进行第三次张拉后,将索力转移到砼梁上。

② 拆除后外锚杆。

③ 滑道前移一个节段,标高及平整度调整后固定。

④ 拆除前内锚杆。

⑤ 放松前外锚杆使滑靴落在滑道梁顶面。

⑥ 利用反顶千斤顶安装反走轮。

⑦ 拆除前外锚杆。

挂篮准备前移至n+1段

7 尾语

(1) 双索面P·C斜拉桥主梁截面常有A. 由两边箱组成的开口箱梁, B. 两边实心梁组成的肋板结构。B种又有外侧带悬挑板和不带的两种。

(2) 关于长平台牵索挂篮行走时平衡装置的设计

对于A种截面可设置于边箱边腹板与底板交界处的正下方。或中腹板的正下方(如本桥),对于B种截面可设于边实心梁下方。平衡装置当采用反走轮时,需根据该处的反力值和砣不会压碎、不会碾碎,来确定轮子的大小和数量,轮子本身也应有足够的强度。

平衡装置也可采用反滑移方案,即在平台尾端设置滑靴托住梁底,为减少摩阻力,可在梁底预埋一条宽24cm、厚12mm的钢板。

(3) 关于长平台牵索挂篮止推装置

对于A种截面和不带悬挑板的B种截面的梁目前尚无比“抗剪柱”更好的方案。对于外带悬挑板的B种截面的梁宜优先选用“反拉杆”法。由于挂篮主纵梁位于边实心砣下方,因此可在挂篮主纵梁两侧设置销座。拉杆下端通过销轴与主纵梁相连,上端穿过砣梁顶板上的临时性砣锚块,用螺母锚固。顶板上的预留孔很小,削弱甚微,临时性锚块用后凿除,然后将该孔补上。临时性锚垫板无需配置很多,可重复使用。各梁段拉杆角度可采用单一角度,即各拉索的平均角度,也可与每段斜拉索相同。

(4) 南平桥牵索挂篮施工时最快达到了六天一段。