

# 巨型液压钢模台车设计制造与运用

● 周 平 杨党荣 刘仲伟/(广汉金达隧道机械有限公司)

**【摘要】** 瀑布沟水电站两条宽 20m、高 25m 的城门洞形尾水隧洞, 采用了国内巨型液压钢模衬砌台车进行混凝土施工。该台车衬砌断面巨大, 结构受力复杂, 运输安装难度大, 为国内外第一液压钢模衬砌台车。本文主要介绍了大型液压钢模衬砌台车的技术难点、结构设计、大型门架有限元受力分析及结构安装, 对于大型断面整体衬砌施工很有参考意义。

**【关键词】** 钢模衬砌台车 模板结构 门架结构 有限元分析

## 1 序言

瀑布沟水电站位于大渡河中游、四川省汉源县及甘洛县境内。电站尾水隧洞共 2 条, 总长约 2213m, 其中 1 号尾水隧洞长 1138m, 2 号尾水隧洞长 1075m。断面型式为城门洞形, 衬砌厚度 1~2m, 衬砌后横断面为宽 20m×高 25m, 衬砌长度 12m。该台车是目前为止国内外最大的巨型台车, 它不仅要求有较强的产品结构强度、刚度, 稳定性的设计计算能力, 还要有对如此巨大台车的整体制造、安装及使用能力。它的应用成功, 不仅开创了巨型台车整体设计、制造、应用的成功先例, 而且为我国大型隧洞工程整体全断面衬砌提供了宝贵的成功施工经验和范例。

## 2 主要技术难点

台车顶部模板是半径为 12.51m 的圆弧, 加工时必须保证精度要求; 边模直墙高达 20m, 由于要考虑加工及运输的原因, 必须分段制作。因此, 制定合适的工装、合理的加工工艺甚为重要。由于该项目是国内第一台巨型台车, 必须解决大型门架结构在巨大的复杂载荷作用下的受力分析, 稳定、可靠的门架结构设计是项目成功实施的关键。台车设计需要解决的主要技术难点如下:

(1) 对大型门架结构在巨大载荷作用下的强度、刚度及稳定性进行有限元受力分析。

(2) 解决 20 多米高的直墙模板在衬砌时巨大侧向压

力作用下的直线度问题。

(3) 对顶模模板结构在衬砌 2m 厚度混凝土时的结构变形进行受力分析。

(4) 解决液压支撑系统对 200 多吨模板自重进行竖向同步就位时的可靠使用问题。

(5) 解决 20 多米高侧向模板多段脱模及就位时在竖向及纵向的直线度问题。

(6) 解决重载行走系统的慢速稳定运行问题。

(7) 提供一套稳定可行的液压控制系统, 保证数十个油缸的同步及使用问题。

(8) 提供一套成熟的电器控制方案。

(9) 解决三段边模分别脱模就位时上部模板不致错位及变形问题。

(10) 解决操作人员在上下 25m 高的台车时的方便安全问题。

## 3 台车结构组成

液压台车主要由模板总成、托架总成、平移机构、门架总成、行走机构、侧向螺旋千斤、托架螺旋千斤、门架螺旋千斤、液压系统、电气系统、上下工作梯装置等多部分组成, 整个台车总重约 380t, 液压台车衬砌断面正视图、侧视图见图 1、图 2。

### 3.1 模板总成

模板由三块顶模及两块上边模、两块中边模、两块下边模构成横断面, 顶模与顶模之间通过螺栓连成整体, 上边模与顶模、上边模与中边模、中边模与下边模之间

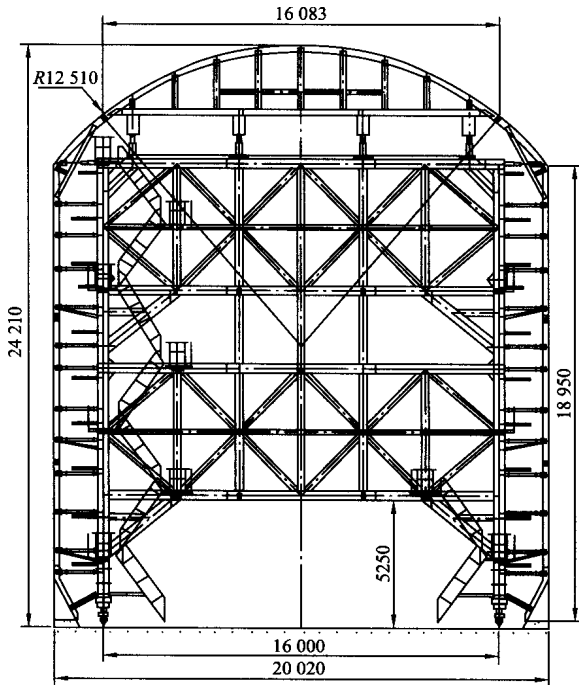


图1 液压台车正视图 (单位: mm)

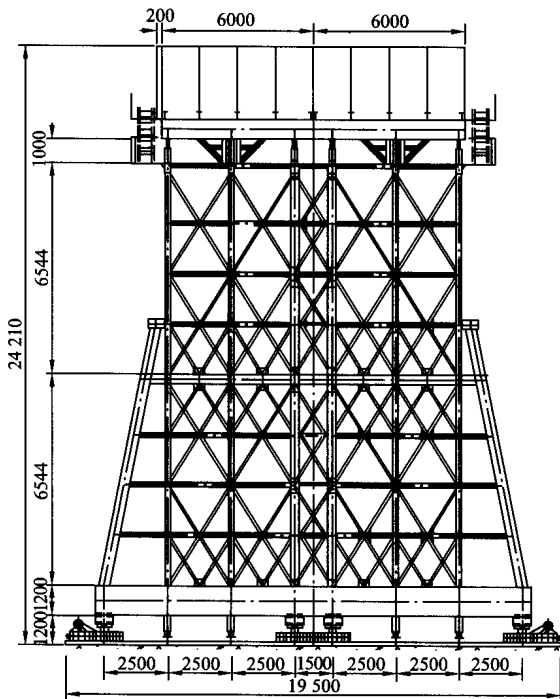


图2 液压台车侧视图 (单位: mm)

通过铰耳销轴连接。每节模板做成 1.5m 宽, 环向由 9 节组合而成, 纵向由 8 节组合成 12m 衬砌长度, 模板之间皆由螺栓连接。模板上开有呈“品”字形排列的工作窗, 顶部安装有与输送泵接口的注浆装置。

### 3.2 托架总成

托架主要承受浇注时上部混凝土及模板的自重, 它上承模板, 下部通过竖向液压油缸和支承千斤传力于门

架总成上。托架总成由 4 根纵梁、2 根边横梁、8 根中横梁及 9 排 54 根立柱组成。

### 3.3 平移机构

液压台车平移机构前后各两套, 它支承在门架边横梁上。平移小车上前后 4 支竖向液压油缸 (GE220/120-300) 与托架纵梁相连, 可承受 200t 左右的模板自重, 通过油缸的收缩来调整模板的竖向定位及脱模, 其调整行程为 200mm。水平方向上的油缸 (GE125/63-400) 用来调整模板的衬砌中心与隧道中心是否对中, 左右可调整行程为 200mm。

### 3.4 门架总成

门架是整个台车的主要承重构件, 由钢板焊接, 它由 24 根横梁、12 根立柱及 2 根纵梁通过螺栓连接而成, 各横梁及立柱间通过连接梁及斜拉杆连接。门架横梁及立柱由钢板焊接成工字形截面。纵梁采用箱形截面; 门架采用空间框架结构, 分上下两层, 每层尽量考虑制造的统一和安装的方便。由于门架高度大, 为方便人员上下安全, 门架前后左右设计有 4 套转折式工作梯装置。为保证整个门架的强度、刚度和稳定性, 必须对台车门架进行准确的载荷分析及可靠的有限元计算。

### 3.5 行走机构

台车主、从行走机构各四套, 它们铰接在门架纵梁上。主行走机构由 Y 型电动机驱动摆线针轮减速器减速后, 再通过一级链条减速, 其行走速度为 6.5m/min, 行走轮直径为 400mm。为保证台车能在弯道上运行, 将门架及行走装置设计成 6m+6m 左右对称, 既可 6m 单独衬砌, 又可组合成 12m 衬砌。为实现四套驱动装置同步, 采用四台电动机同时启动。为满足工况要求, 电动机可进行顺时、逆时针运行。

### 3.6 侧向液压油缸

侧向液压油缸主要是为模板侧向脱模, 同时起着支承模板的作用。侧向油缸 (GE100/63-400) 左右各分 3 层布置, 每层 4 根油缸, 两侧共选用 24 根油缸。

### 3.7 侧向螺旋千斤

安装在门架立柱上的螺旋千斤用来支承、调节模板位置, 承受灌注混凝土时产生的压力。侧向螺旋千斤 ( $\phi 80\text{mm}$ ) 左右各分 14 层布置, 每层 6 根, 两侧共选用 168 根千斤。

### 3.8 托架螺旋千斤

它主要为改善浇注混凝土时托架纵梁的受力条件, 保证托架总成的可靠和稳定, 将全部顶模的混凝土载荷和全部模板自重传给下部的门架。托架支承螺旋千斤 ( $\phi 100\text{mm}$ ) 布置在 4 根托架纵梁的下面, 每根纵梁下 6 根, 共选用 24 根千斤。

### 3.9 门架螺旋千斤

门架支承螺旋千斤(φ100mm)布置在2根大型门架纵梁的下面,每根纵梁下4根,共选用8根千斤。台车工作时,它顶在轨道面上,承受整个台车和混凝土的重量,以改善门架纵梁的受力条件,保证台车工作时门架的稳定。

### 3.10 液压系统

台车布置三套液压系统。每套系统采用三位四通手动换向阀进行换向,来实现油缸的伸缩,带动模板的就位。左右侧向油缸共采用6个换向阀控制两侧水平24个油缸的动作;8个竖向油缸各用一个换向阀控制其动作;4个小车平移油缸各用一个换向阀操作。为保证顶模板不致下降,利用双向液控单向阀对8个竖向油缸进行锁闭,采用高压球阀调节油缸的运动速度。

### 3.11 电气系统

电气系统主要对油泵电动机的起停及行走电动机的正反向运行进行控制。行走电动机设有正反转控制及过载保护。

## 4 门架结构有限元分析

### 4.1 顶模载荷分析

#### 4.1.1 顶模载荷计算

顶部模板受力简图如图3所示。假设混凝土厚度为最大开挖厚度2.0m,因台车设计成6m+6m,取一半衬砌长度6m。衬砌时上部整个混凝土的自重由上部圆弧模板承受,即图中的阴影部分面积,由ABCD四点构成阴影面,其面积由两部分组成,即中间扇形圆环 $S_1$ 加两边三角形ABO减去圆心角为 $9.53^\circ$ 的扇形后的 $S_2$ 组成,经计算混凝土自重为663.71t。

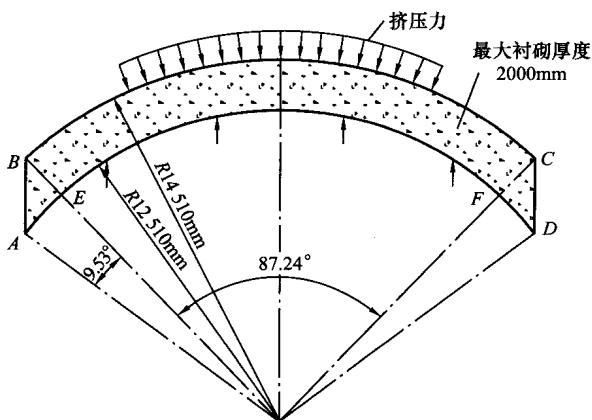


图3 顶模板结构受力示意图

#### 4.1.2 顶模板竖向载荷

一半台车全部模板及托架自重为73t,顶模板通过托架总成承受整个上部模板的载荷,而4根托架纵

梁有12个支承点承受竖向载荷并作用在门架上横梁上。

混凝土及模板自重通过四根纵梁承受,假定每根纵梁的受力相等,则单根纵梁受到的总合力为184.18t。

每根纵梁有3个支点,通过结构受力分析可知,中间的1个支承千斤承受压力较两边的油缸受力大,两边油缸承受的力只相当于一个千斤承受的力。因此,竖向千斤承受的轴向载荷为92.09t。由于顶模2m衬砌厚度是分层浇注,上部浇注时下部已初凝;同时顶模浇注时,边模已完全初凝并对顶模有支承作用,因此,门架上横梁上的4个集中载荷就只有计算的一部分。根据实践经验,取其载荷的一半能满足使用要求,则门架上横梁上的4个集中载荷为46.05t。

### 4.2 边模载荷分析

#### 4.2.1 边墙侧压力计算

台车边模板左右对称,结构及受力完全相同。边模板只考虑浇注时的侧压力对其影响。边墙的侧压力取为 $4.7t/m^2$ ,偏于安全。

根据国内行业标准有关侧压力计算公式,采用内部振捣器时,新浇混凝土对钢模板的最大侧压力 $F$ 按下式计算:

$$F = 0.22rt_0\beta_1\beta_2v^{1/2}$$

式中  $F$ ——混凝土侧压力;

$r$ ——混凝土的密度,  $2.45t/m^3$ ;

$t_0$ ——新浇混凝土的初凝时间,取5h;

$\beta_1$ ——外加剂影响系数,不加外加剂时取1.0,掺具有缓凝作用的外加剂时取1.2;

$\beta_2$ ——混凝土坍落度影响修正系数,当坍落度小于3cm时取0.85;当坍落度为5~9cm时取1.0;当坍落度为11~15cm时取1.15;

$v$ ——混凝土的浇筑速度,取1.5m/h。

将上述各值代入,  $F=4.56t/m^2$ 。

#### 4.2.2 边模板水平载荷

由于衬砌长度为12m,边模板直墙段高为19m,则边模板水平载荷合力经计算为1071.6t。假设上述侧向载荷合力由6排门架的84个支承千斤承担,而中间4排门架承受的力是两边承受的力的2倍,因此中间4排门架承受的力最大,则中间每组门架承受的力为214.32t。假设每组门架载荷各由每侧的14支千斤平均承担,则门架上每个千斤受力点的集中载荷为15.31t。

### 4.3 门架结构有限元计算

根据上述台车门架结构两种工况下的载荷分析,进行了两次计算:一是在侧向载荷作用下门架的强度和变形,门架两侧每个点受到水平千斤集中载荷15.31t作用,门架上横梁四个竖向集中载荷仅有模板自重,可不考虑;二是在竖向载荷作用下门架的强度和变形,门架上横梁受到四个竖向集中载荷46.05t作用,侧向每个千斤顶作

为约束。应用三维软件 Autodesk Inventor Professional 对门架进行实体建模,应用有限元软件 ANSYS 技术对门架进行应力分析,模拟结构在载荷条件下的表现。侧向载荷作用下门架结构受力状态见表 1 及图 4,竖向载荷作用下门架结构结果见表 2 及图 5。

表 1 侧向载荷作用下门架结构结果

名称	最小值	最大值
等效应力 (MPa)	$1.105 \times 10^{-2}$	69.4
最大主应力 (MPa)	-16.41	58.41
最小主应力 (MPa)	-73.48	9.984
变形 (mm)	0.0	1.338
安全系数	2.983	安全

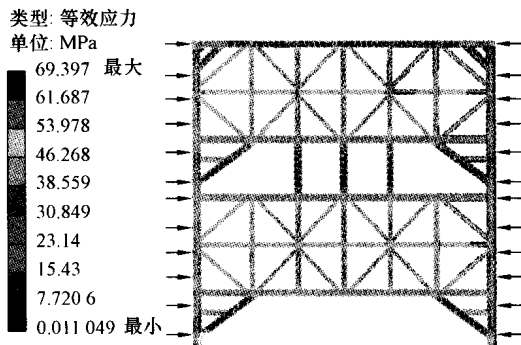


图 4 侧向载荷作用下门架等效应力图

表 2 竖向载荷作用下门架结构结果

名称	最小值	最大值
等效应力 (MPa)	$1.128 \times 10^{-3}$	93.06
最大主应力 (MPa)	-25.94	100.4
最小主应力 (MPa)	-89.94	27.83
变形 (mm)	0.0	2.555
安全系数	2.224	安全

## 5 台车安装

为保证台车的顺利运输,台车设计时将充分考虑山区公路运输条件,最大结构件长度控制在 6m 以下,模板最大结构件重量控制在 5t,长度控制在 7m 以下,让所有部件都能通过汽车运输,安全到达工地。台车部件运输到洞内安装场地,直接在隧洞衬砌的起始位置进行安装,安装前精心组织,对所有安装人员进行技术培训,特别是对 20 多米高空作业的安全需要重点强调,配齐各种安全所需的工具和设备。

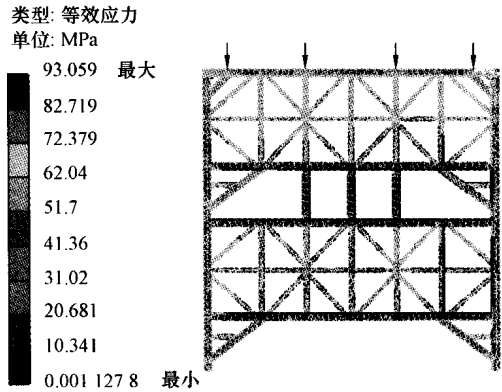


图 5 竖向载荷作用下门架等效应力图

安装前必须在洞顶超挖宽度 1.5m、比最大衬砌厚度大 1m 左右的顶部空间,布置承重锚杆,保证每个点不低于 5t 的承载拉力,锚杆连接起吊滑轮、葫芦和挂钩,在地面卷扬机的牵引下,对台车各部件进行起吊。

台车安装顺序是:平整地面、铺设轨道、安装行走装置、安装门架总成、平移机构、托架总成;再安装顶模、左右边模、各种支承千斤;布置液压管道和液压系统;最后对结构进行检测和调试,达到使用要求。一台台车安排两班共 26 人,历时 30d,顺序安装完成。

## 6 施工评价

(1) 顶模与最高点边模的连接需要改进。由于边模直墙近 21m 高,模板自重较大,边模与上部顶模的连接采用销轴铰耳。因此,顶部焊接铰耳的钢板,在巨大的重力作用下变形比较大。对于高度超过 10m 以上的电站台车,此处设计必须加强,可采用局部箱型结构等。

(2) 直墙模板的整体刚度还需提高。边墙模板分成三段,每段近 7m 高,由于台车高度大,垂直方向的垂直度很难达到铅垂。虽然每段之间采用油缸及螺旋千斤定位能满足施工质量要求,但模板的刚度特别是上部模板的整体刚度还需加强,制造精度也需要提高。

(3) 通过有限元分析计算和使用结果表明,台车整体设计合理,结构可靠,但部分门架结构偏强,结构可适当优化。

电站每条尾水隧洞投入两台台车,于 2007 年底开工建设,中途由于 2008 年 5 月的地震原因停工 4 个月,2008 年 12 月顺利衬砌完工第一条隧洞。第一条隧洞完工后,台车分别重新拆、装一次,转移到第二条隧道,于 2009 年 5 月动工衬砌,2009 年底前全部施工完毕。