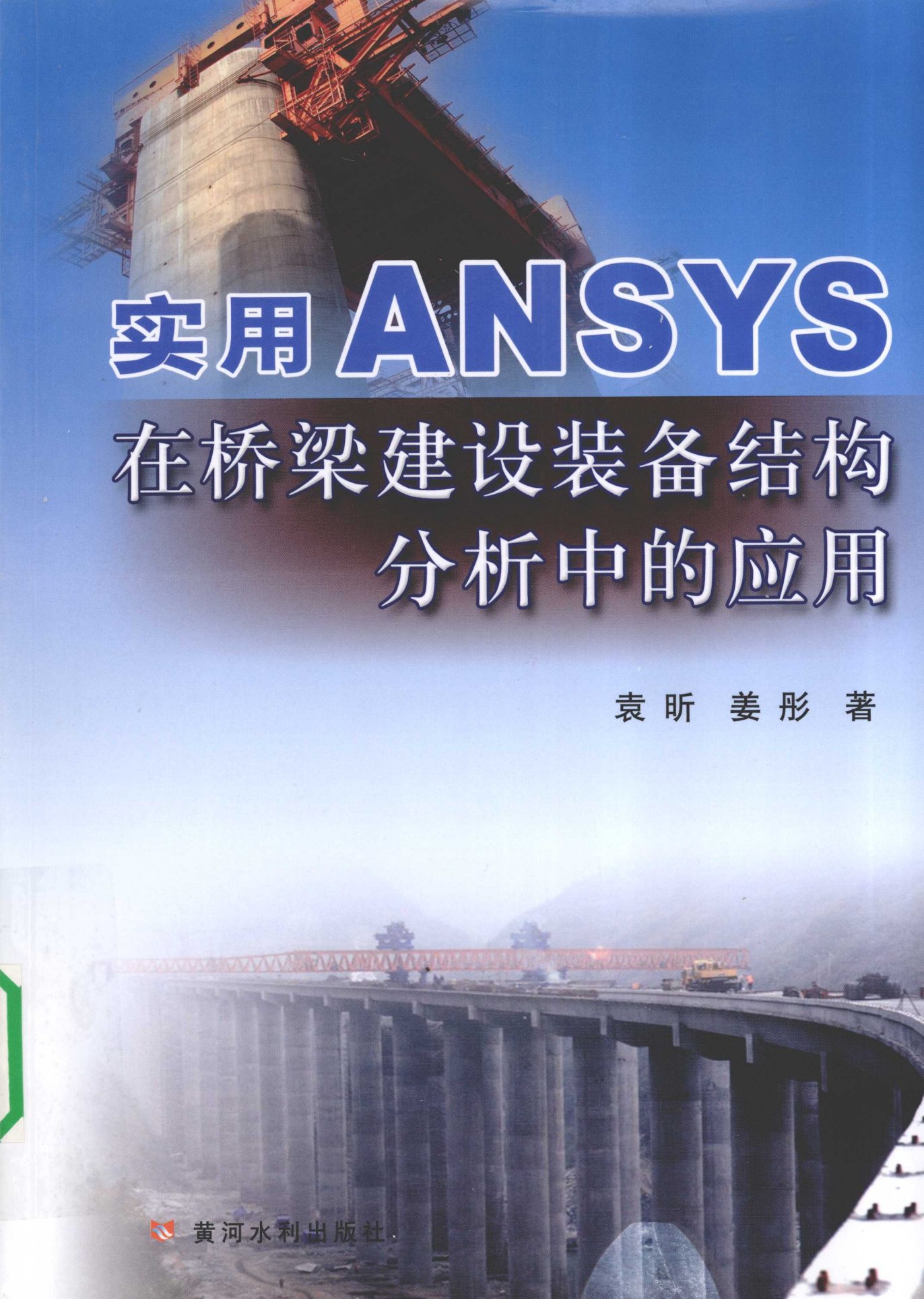




实用 ANSYS

在桥梁建设装备结构 分析中的应用

袁昕 姜彤 著

实用 ANSYS 在桥梁建设装备 结构分析中的应用

袁昕 姜彤 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以目前典型的大型桥梁架设装备—造桥机(移动模架)关键结构支撑托架为研究主线,在 ANSYS 平台上,全部采用参数化语言 APDL 技术,进行支撑托架的多工况静力学计算分析、动力学计算研究、优化设计(拓扑优化、构件截面尺寸优化)、基于有限元的概率设计计算等。并以此为基础,从实用的角度,翔实地说明和论述了大型复杂钢结构的有限元设计、计算、分析、优化等环节的解决方案、技术关键以及 ANSYS 参数化操作、实用的 APDL 命令及其使用方法。

本书可作为水利电力、桥梁、铁道、能源等科研院所的相关设计、研发部门技术人员以及城市轨道交通、铁路客运专线、供水输水等相关领域生产施工单位的工程技术部门人员的培训参考;同时也特别适用于作为高校土木工程、道桥、建筑、结构、工程机械等专业高年级学生的教材和教师的学习资料;对于具有初步 ANSYS 的使用基础,且希望能提高使用水平,特别是对于从事大型、较为复杂钢结构的分析计算人员也十分有益。

图书在版编目(CIP)数据

实用 ANSYS 在桥梁建设装备结构分析中的应用/袁昕,
姜彤著. —郑州:黄河水利出版社,2009.9
ISBN 978-7-80734-721-7

I. 实… II. ①袁… ②姜… III. 架桥机—有限元
分析—应用程序, ANSYS IV. U445.36-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 168599 号

策划组稿:马广州 电话:13849108008 E-mail: magz@yahoo. cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126. com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17

字数:392 千字

印数:1—1 500

版次:2009 年 9 月第 1 版

印次:2009 年 9 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前 言

大型桥梁建设装备广泛应用于铁路、高速公路、城市轨道交通、水利工程、国防及军事工程等领域。

铁路运输在我国国民经济中处于重要地位,但目前的铁路客运和货运均处于严重供不应求的状态。据统计,目前我国铁路网大约仅能满足国内需求的 40%。为解决铁路运输目前供不应求的现状,国家规划到 2020 年,铁路营业里程达到 10 万 km,主要繁忙干线实现客货分线。“十一五”规划中交通部对全国交通运输基础设施的投资预算约为 3.8 万亿元,铁道部对全国铁路基础设施投资预算约为 1.25 万亿元,同比增长分别为 73% 和 250%。新一轮铁路大规模建设的序幕已经拉开,续建和新建项目达 200 多个,快速客运网总规模将提高至 2 万 km 以上,客运专线项目 28 个、运营里程近 1 万 km。

交通部《公路、水路交通“十一五”规划》将 2010 年前的高速公路建设目标提高至 6.5 万 km,建设速度明显加快,国家对公路(含高速公路)建设的投资预计达 2.1 万亿元。预计 2010 年前,年均投资规模约 1 400 亿元,2010~2020 年年均投资约 1 000 亿元。

在交通基础设施建设中,桥梁建设的比重很大。如高速铁路客运专线中,桥梁所占比例约为 36%,因此大型桥梁建设装备将发挥至关重要的作用。这类施工装备除桩基、铺轨、运梁等设备外,主要是架桥机、移动模架造桥机及提梁机等大型专业设备。作为桥梁架设大型工程机械,其结构设计特点是跨度及载重量大,作业工况多,同时受移动荷载作用,受力复杂,属多个构件组成的大型复杂结构。

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。作为 CAE 技术的主要计算方法之一,有限元法(FEM 技术)已广泛应用于结构力学、结构动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等。基于有限元法的 ANSYS 多用途计算机设计计算平台在诸多工业领域,如桥梁、建筑、重型机械、航空航天、汽车工业、电子产品等,已得到全球工业界的认可,强大的建模和处理功能使其已成为有限元计算分析领域主流和权威的平台之一。

本书主要特点有:

(1)以造桥机(移动模架)的关键结构——支撑托架钢结构为主要对象,贯穿全书。在 ANSYS 的全方位使用基础上对支撑托架的结构进行较为深入和全面的分析示范,对于在先进有限元分析平台上对大型复杂钢结构完整的建模、计算、分析、改进、优化等应用方面,既有针对性又有通用性。

(2)本书以工程实例为背景,突出 ANSYS 的实用性。以实际工程结构为对象,从有限元建模、计算和分析方案的制定到实施建模计算的整个过程,从 ANSYS 参数化语言 APDL 的运用到实用命令的使用,直至计算结果分析和研究的展开,全书重点突出,一气呵成。

(3) 本书虽着眼于大型桥梁架设机械钢结构的有限元计算、分析和研究,但更兼顾读者 ANSYS 使用水平的真正提高和深度使用。书中包含诸多分门别类的归纳和总结,同时辅以针对性强的例子,以点带面,利于读者 ANSYS 使用的融会贯通。

本书得到郑州大方桥梁机械有限公司的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。全书由袁昕统稿,由于作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2009 年 4 月

目 录

前 言

第一章 移动模架造桥机简介	(1)
第一节 移动模架造桥机结构组成和工作原理	(1)
第二节 移动模架造桥机标准作业流程	(2)
第三节 移动模架造桥机主要技术特点	(5)
第二章 造桥机支撑托架有限元建模	(6)
第一节 造桥机支撑托架的工作原理	(6)
第二节 造桥机支撑托架有限元建模方案	(7)
第三节 建模过程中几个需要注意的问题	(9)
第四节 造桥机支撑托架的有限元建模过程	(15)
第五节 注释与说明	(89)
第三章 支撑托架静力学求解计算	(93)
第一节 支撑托架静力学求解方案	(93)
第二节 支撑托架静力学求解过程和分析	(95)
第三节 支撑托架静力学分析和改进	(120)
第四节 注释与说明	(129)
第四章 造桥机支撑托架的优化	(143)
第一节 支撑托架的拓扑优化方案和步骤	(143)
第二节 支撑托架拓扑优化过程	(145)
第三节 优化设计概述及支撑托架的截面尺寸优化方案	(158)
第四节 支撑托架的截面尺寸优化过程	(168)
第五节 注释与说明	(184)
第五章 支撑托架的动力学分析	(191)
第一节 支撑托架的模态分析	(191)
第二节 支撑托架的谐响应分析	(199)
第三节 支撑托架的瞬态动力学分析	(207)
第六章 支撑托架基于有限元的概率设计计算	(213)
第一节 基于有限元的概率设计基本过程	(213)
第二节 随机输入输出参数	(214)
第三节 概率设计方法	(216)
第四节 支撑托架的概率设计分析过程	(220)
第七章 移动模架造桥机整体结构建模和计算分析	(239)
第一节 造桥机整体结构建模过程	(239)

第二节	造桥机整体结构的计算分析	(246)
第三节	移动模架横向倾覆稳定性分析	(249)
第八章	架桥机主梁钢结构的优化研究	(252)
第一节	架桥机结构组成和工作原理	(252)
第二节	架桥机主梁优化策略和方法	(255)
第三节	架桥机主梁优化过程	(255)
参考文献		(264)

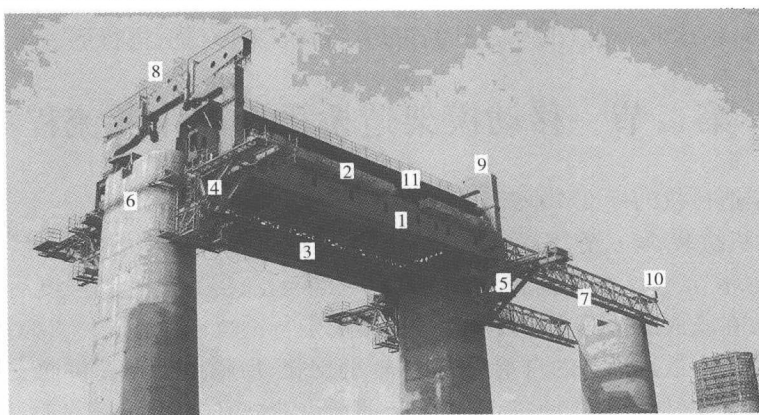
第一章 移动模架造桥机简介

移动模架造桥机广泛应用于水利电力、城市轨道交通、铁路客运专线、供水输水等大型工程中桥梁、渡槽等的架设施工作业。移动模架造桥机集制梁和架梁于一体,不需要占用大量场地预制混凝土梁,可节省建场费用,无需大吨位的运梁设备和起吊设备。同时,由于其采用先进的液压技术和自动控制技术,工作效率高。实际上,移动模架造桥机可以说是一种自动化程度较高的可自行移位的混凝土制品工厂和桥梁制造平台。

本书涉及的是针对铁路客运专线双线整孔桥梁施工而设计的 DXZ32/900 下行式移动模架造桥机,采用逐跨整孔原位现浇的施工方法,适用最大桥跨 32.7 m,现浇单跨梁的最大重量为 900 t。

第一节 移动模架造桥机结构组成和工作原理

移动模架造桥机主要由主框架、底模横梁、模板系统、支撑托架、前辅助支腿、中辅助支腿、后辅助支腿、电气液压系统及辅助设施等部分组成。造桥机支撑于两组支撑托架上。主框架由并列的两组纵梁组成,主要承托底模横梁、模板系统等设备重量及钢筋、混凝土等结构材料重量。每组纵梁由三节承重钢箱主梁加三节导梁组成。钢箱梁接头采用螺栓节点板连接,导梁为桁架式结构。造桥机整体结构如图 1-1 所示。



1—承重钢箱主梁;2—配重;3—底模横梁;4—后支撑托架;5—前支撑托架;6—精轧螺纹钢;
7—导梁;8—后辅助支腿;9—中辅助支腿;10—前辅助支腿;11—外模及模架

图 1-1 造桥机整体结构

移动模架造桥机利用墩身安装支撑托架,支撑托架支撑主框架,外模及模架安装在主框架上,形成一个可以纵向移动的制造平台。同时,移动模架可以横向分离和横向合拢,

横向分离使其能够通过桥墩并纵向前移过孔到达下一施工位,横向合拢使其再次形成施工平台,完成下一孔施工。

底模横梁共八组,每组由两根焊接工字钢组成,每根工字钢可从中部剖分,工字钢的每侧均与主梁相连。底模横梁主要将模板系统等设备重量及钢筋、混凝土等结构材料重量传递到钢箱主梁上。

支撑托架是造桥机的支撑基础,共设两套,每套支撑托架由相同的左右两部分组成,为三角形框架结构。在墩身指定位置开洞,支撑托架的上部樁头插入洞内并支承在洞底,以传递垂向力;支撑托架的下部水平弧形板支承在桥墩侧面,以传递水平力。支撑托架上的移位台车可在支撑托架横梁上横向移动,以使主框架横向开启。移位台车设置吊挂和纵移机构,实现支撑托架的提升和自行过孔。

前辅助支腿设置在导梁上并可从中间剖分,可作为支撑托架吊挂过孔时的临时支撑并适应移动模架横向开启过孔作业的需要。前辅助支腿在导梁上有三个安装位置,以适应不同跨度的需要。

中辅助支腿由两组曲臂组成,可从中部剖分。合拢状态时,在曲臂横梁和梁顶之间设置油缸,可以临时支撑主框架,作为支撑托架吊挂过孔时的临时支撑。

后辅助支腿由 L 形支腿、滑动式横梁、横移油缸等部分组成。后辅助支腿不仅可以吊挂主框架,实现后支撑托架的自行过孔和主框架的横向开启,而且能够吊挂主框架后端在既成桥面上行走,实现移动模架的过孔作业。

移动模架造桥机整个作业过程可分为制梁和过孔两大阶段。制梁阶段即移动模架拼装就位后,进行绑扎钢筋、立内模、浇筑混凝土等标准跨混凝土梁的施工。过孔阶段即造桥机在后辅助支腿、支撑托架的横移油缸等部件作用下横向开启,并使其能够通过桥墩,然后纵向前移,到达下一施工位。过孔结束后造桥机横向合拢,进行下一孔的施工。

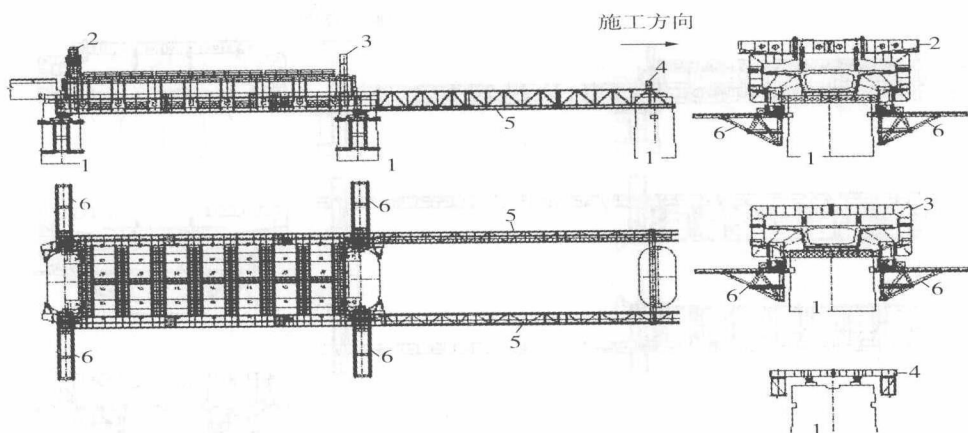
第二节 移动模架造桥机标准作业流程

移动模架造桥机的标准作业流程包括以下五个步骤:

(1) 造桥机拼装就位,施工标准跨混凝土梁。此时架桥机支承在前、后支撑托架上,完成基本作业环节,包括绑扎钢筋、立内模、浇筑混凝土;混凝土达到强度后,解除内模撑杆,张拉完毕;在既成的桥面上铺设后辅助支腿的走行钢轨;点动前、后支撑托架的承重油缸,使其少量回收,依靠设备的自重脱模;中辅助支腿、后辅助支腿在桥面支撑,前辅助支腿在桥墩顶部支撑,然后操作前、后支撑托架的承重油缸完全回收;解除前、后支撑托架的对拉高强精轧螺纹钢筋,如图 1-2 所示。

(2) 利用纵移油缸顶推前、后支撑托架前进至下一桥墩就位;张拉前、后支撑托架的对拉高强精轧螺纹钢筋;后支撑托架上的承重油缸与架桥机的主梁顶紧;解除中辅助支腿、前辅助支腿支撑;操作使架桥机主梁底部的轨道落放在支撑滑道上,如图 1-3 所示。

(3) 解除底模横梁、底模、前辅助支腿中部的连接螺栓;后辅助支腿、后支撑托架、前支撑托架的横移油缸循环伸缩,使两侧移动模架向外横移开启让过墩宽,如图 1-4 所示。



1—桥墩;2—后辅助支腿;3—中辅助支腿;4—前辅助支腿;5—导梁;6—支撑托架

图 1-2 标准作业流程中造桥机状态示意图(步骤 1)

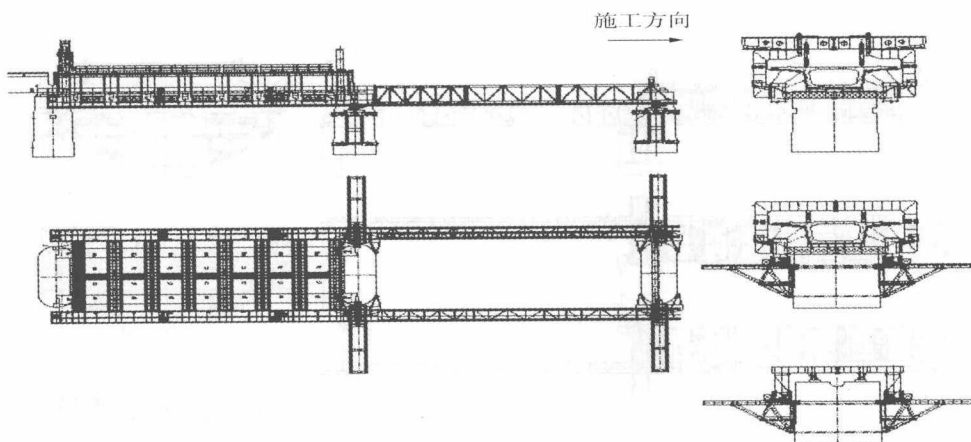
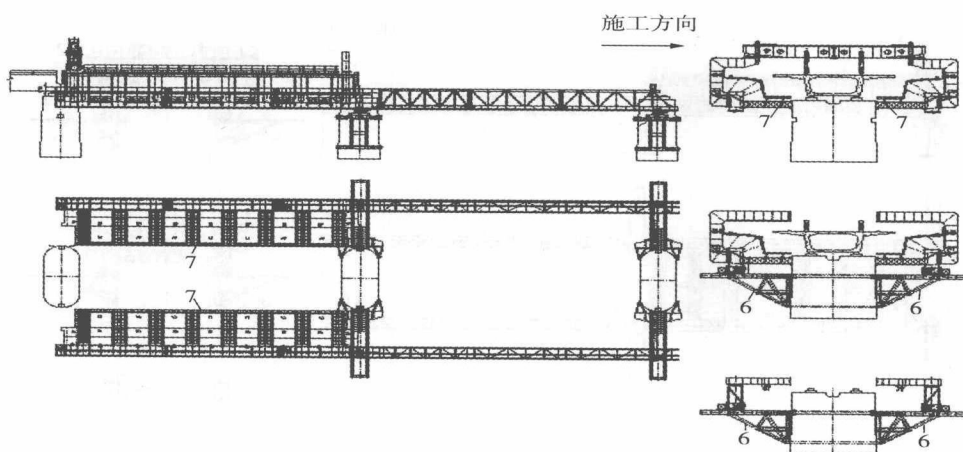


图 1-3 标准作业流程中造桥机状态示意图(步骤 2)

(4)同时启动后支撑托架上的纵移油缸,循环伸缩使模架前移一跨,如图 1-5 所示。

(5)模架横移合拢就位,连接底模横梁、底模、前辅助支腿中部的连接螺栓;支撑托架承重油缸顶升就位并机械锁定;模板调整;绑扎底腹板钢筋,内模就位,进行混凝土浇筑,如图 1-6 所示。



7—底模横梁

图 1-4 标准作业流程中造桥机状态示意图(步骤 3)

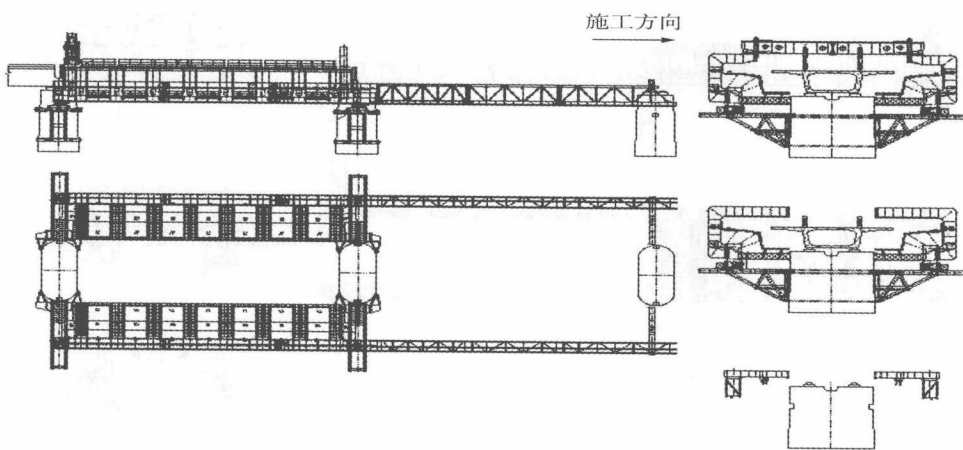


图 1-5 标准作业流程中造桥机状态示意图(步骤 4)

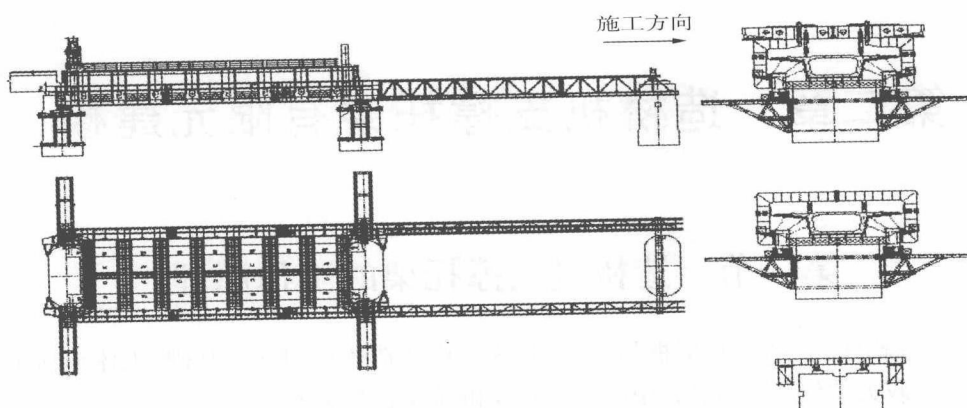


图 1-6 标准作业流程中造桥机状态示意图(步骤 5)

第三节 移动模架造桥机主要技术特点

该移动模架造桥机具有以下主要技术特点和优势:

- (1) 采用下行式结构,利用桥墩安装支撑托架,具有良好的稳定性。
- (2) 支撑托架受力体系明确,采用精轧高强螺纹钢筋对拉连接,便于安装施工。
- (3) 造桥机升降、横向的开合、纵移过孔等均采用了液压控制。造桥机共配 6 套液压系统,支撑托架上的液压系统由液压泵站、垂直支承油缸、纵移水平油缸、横移水平油缸、支腿提升缸、控制元件及管路组成;后辅助支腿的液压系统由液压泵站、垂直支承油缸、横移水平油缸及管路组成。液压系统配合电气控制系统进行作业,动作平稳、安全可靠,极大地降低了劳动强度,提高了施工效率。
- (4) 支撑托架能够自行过孔就位安装,不仅方便了高桥高墩的施工,也极大地降低了施工成本。
- (5) 支撑托架上设置横向移位油缸,便于调整主框架位置,也便于曲线过孔作业。

第二章 造桥机支撑托架有限元建模

第一节 造桥机支撑托架的工作原理

支撑托架的立面为三角形框架结构,是移动模架造桥机的支撑基础,主体钢材采用 Q235,应力较大的位置如前、后、中间横向立板和端板采用 Q345。

移位台车承载模架并在支撑托架上移位,进行由制梁位置到过孔位置(或由过孔位置到制梁位置)的移动动作。支撑托架共设 2 套,每个桥墩上附设 1 套。每套由相同的左右两部分组成。支撑托架有两个支座,一个是上支座(樁头),一个是下弧形支座(弧形板)。桥墩墩身侧面开洞,支撑托架的樁头插入洞中以传递垂直力,下张拉梁及弧形支座水平支承在桥墩侧面,以传递水平力。支撑托架中上张拉梁和下张拉梁的左右两端利用高强精轧螺纹钢对拉与桥墩固结成一个整体。上张拉梁每端 8 根,单根张拉力 20 t;下张拉梁每端 2 根,单根张拉力 10 t,采用两台千斤顶在桥墩前后两侧同步进行张拉预紧。图 2-1 为造桥机安装施工现场照片。

移动模架造桥机的设计施工周期为 12 天/跨。制梁和过孔两大阶段中,制梁阶段为 11 天/跨左右。制梁位置垂直计算荷载 377 t,过孔位置(制梁位置外伸 4 800 mm)垂直计算荷载 160 t。移位台车在横移油缸的推拉作用下在支撑托架的横梁上横向移动,完成模架的开启与合拢,如图 2-2 所示。

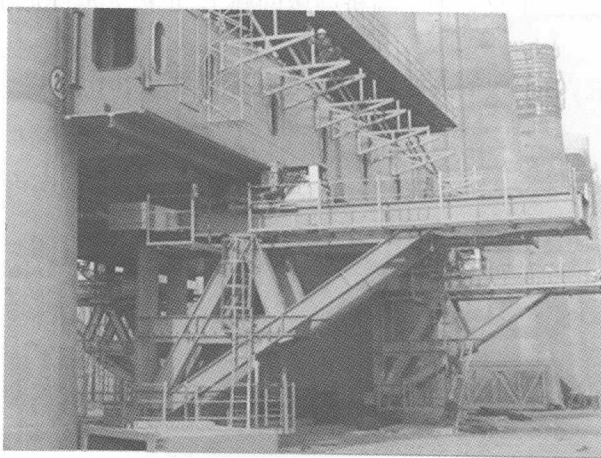


图 2-1 造桥机安装施工现场

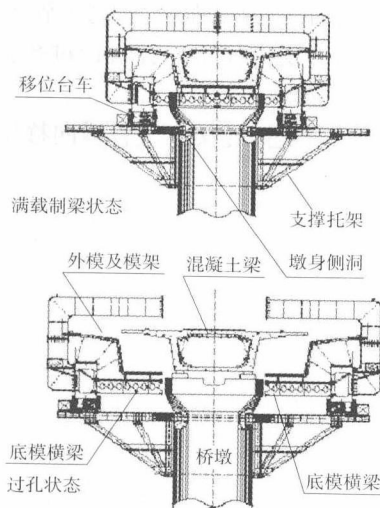


图 2-2 满载制梁与过孔状态对比

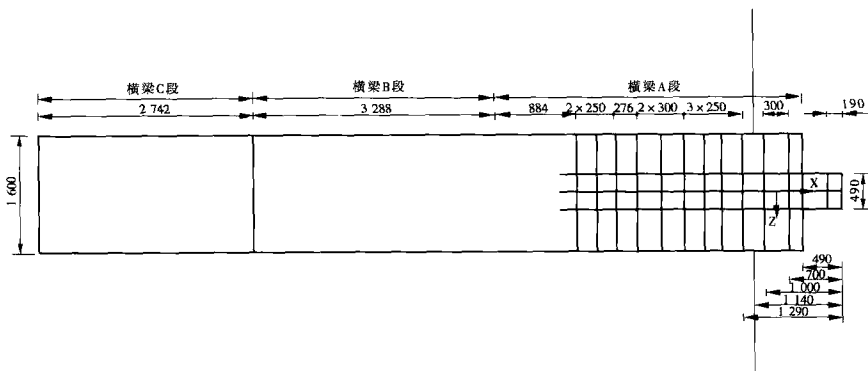


图 2-5 支撑托架俯视图

(3) 按结构组成, 依次连接这些关键点生成构件的轴线。

(三) 对称复制其后部构件的轴线(包括线上的关键点), 生成支撑托架的前部

为便于后续连线和建模时对应关系, 复制时关键点编号相应增加 100。连接对应的关键点, 生成中间横梁连接梁、外端横梁连接梁、内纵撑、中间纵撑、外纵撑的轴线。

(四) 划分已建各构件的单元网格

(1) 定义各构件的截面类型和几何尺寸, 列出各构件的截面编号, 如图 2-6 所示。横梁、斜撑、立撑、中间横梁连接梁、外端横梁连接梁以及内纵撑、中间纵撑、外纵撑、横撑均为钢板焊接工字形截面, 可在 ANSYS 梁截面库中直接定义。

(2) 选择单元类型, 定义弹性模量、泊松比、材料密度等物理参数。主体结构构件包括横梁、下张拉梁、内斜撑、外斜撑、立撑、横撑等, 均为钢板焊接成工字形截面, 因此采用支持截面形状显示, 考虑剪切变形和翘曲的 BEAM188 梁单元模拟。

(3) 依次划分各构件的单元网格。注意: 在划分 BEAM188 单元时, 需要预先定义方向关键点。

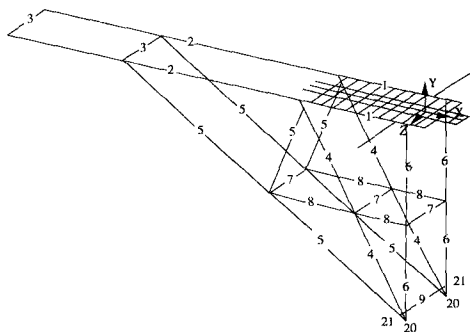


图 2-6 支撑托架主体构件截面编号示意图

(五) 建立网格平台模型

(1) 以横梁上相应的关键点为基础, 生成第 2 ~ 11 列纵向隔板轴线分别与后横向立板、中间横向立板、前横向立板轴线交汇处的关键点。连接这些关键点及前后横梁上相应的关键点, 依次生成第 2 ~ 11 列纵向隔板的轴线和后横向立板、中间横向立板、前横向立

板的轴线,如图 2-4 所示。

(2) 定义纵向隔板、横向立板截面并划分单元。第 2~11 列纵向隔板及横向立板均为钢板,可在 ANSYS 梁截面库中按矩形直接定义。

(3) 沿 X 轴方向生成横梁、后横向立板、中间横向立板、前横向立板 Z 轴轴线以内部分的轴线和第 1 列纵向隔板及端板的轴线,并划分单元。

(六) 建立上部樁头部分模型

分别延长后横向立板、中间横向立板、前横向立板的轴线等,并划分单元。

(七) 建立下张拉梁模型

下张拉梁由 A、B 两段等截面箱形梁组成,如图 2-7 所示。建立下张拉梁各段轴线。ANSYS 梁截面库中没有箱形截面,因此需预先自定义 A、B 两段的箱形截面。

(八) 建立上张拉梁模型

上张拉梁是截面为箱形的部分变截面梁,因此需要将上张拉梁分为 A、B、C、D、E 共 5 段来建模,并预先定义好突变处的箱形截面,如图 2-8 所示。建模时首先定义 A 段的起始截面、终止截面和 D 段的起始截面、终止截面,A 段利用已定义的起始截面、终止截面进行变截面建模,B 段按 A 段的终止截面进行等截面建模,C 段按 D 段的起始截面进行等截面建模,D 段利用已定义的起始截面、终止截面进行变截面建模,最后 E 段按 D 段的终止截面进行等截面建模。

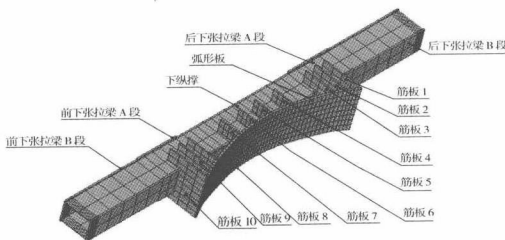


图 2-7 下张拉梁及弧形支座

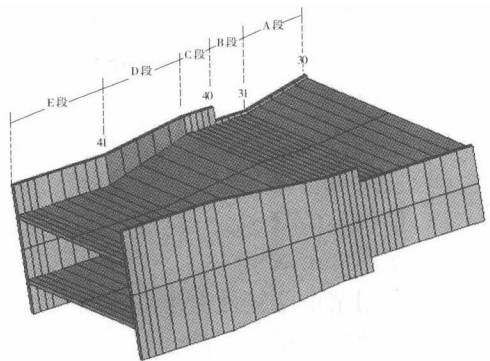


图 2-8 上张拉梁变截面箱形梁建模示意图

(九) 建立弧形支座模型

如图 2-7 所示,下端弧形板及筋板等用 SHELL63 壳单元模拟。定义实常数(弧形板、筋板厚度);建立相应关键点,建立筋板 1~10 的面,并划分筋板 1~10 的单元;通过各筋板对应点生成水平样条曲线;由线生成弧形板中的面,并划分弧形板单元。

第三节 建模过程中几个需要注意的问题

一、APDL 参数化设计语言与参数化建模

ANSYS 提供了两种工作模式,即人机交互模式(GUI)和 APDL 命令流输入模式。

GUI 模式对于习惯 Windows 操作界面的初学者来说比较直观,易于接受,但由于 APDL 命令流模式相对 GUI 模式具有显著的甚至不可替代的优势,如不受操作系统的限制、基本不受 ANSYS 版本的限制,可进行 GUI 无法实现的优化及可靠性等分析、简便高效的网格重划分及重分析、便于建立参数化零件库和制作宏等操作,因此对于大型、比较复杂的模型,或者当需要对模型做修改进行重分析以及结构优化等高级分析时,就需要使用 APDL 命令流模式。

APDL(ANSYS Parametric Design Language),即 ANSYS 参数化设计语言,类似于 FORTRAN 的解释性语言,提供了一般程序语言的功能,如参数、宏、分支、循环、重复、访问 ANSYS 有限元数据库以及标量、向量及矩阵运算等。

利用 APDL 的程序语言与宏技术组织管理 ANSYS 的有限元分析命令,可以实现参数化建模、施加参数化荷载与求解,以及参数化后处理结果的显示,从而实现参数化有限元分析的全过程,也是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数,如梁截面几何尺寸等,以达到反复分析各种尺寸、不同荷载大小的多种设计方案或者序列性产品,极大地提高分析效率,减少分析成本。同时,APDL 也是 ANSYS 设计优化、可靠性及灵敏度研究等高级数据分析处理的基础,只有创建了参数化的分析流程,才能对其中的设计参数执行优化改进,达到最优化设计目标。另外,APDL 可以建立标准化零件库、序列化分析、开发专用有限元分析程序,或者编写经常重复使用的功能程序,如特殊荷载施加宏、按规范进行强度或刚度校核宏等。

参数是 APDL 的变量,在 ANSYS 运行中可随时定义参数。参数的定义、赋值或取值可采取以下 6 种方法:

- (1)使用 ***SET** 命令。
- (2)使用赋值号“=”。
- (3)使用 ***GET** 命令。
- (4)使用 ***ASK** 命令。
- (5)利用菜单路径或命令输入窗口。
- (6)启动时利用驱动命令。

使用 ***STATUS** 命令可以列表显示所定义的参数。

在本计算中,支撑托架建模采用了部分参数化的建模方案,即对于横梁(工字形截面)的几何尺寸、内外斜撑的截面尺寸及立撑的截面尺寸,均采用参数化定义,以便进行后续的截面尺寸优化和灵敏度分析等。同时,对于截面优化和灵敏度分析中不涉及的尺寸,如支撑托架的外形尺寸、构件的定位尺寸等,没有采用参数化定义,这样既能减少建模的工作量,又降低了建模的难度。

分支、循环、重复操作往往称为 APDL 的流程控制,主要包括 ***GO** 无条件分支、***IF** - ***IFELSE** - ***ELSE** - ***ENDIF** 条件分支、***DO** - ***ENDDO** 循环、***DOWHILE** 循环、***REPEAT** 重复等五种。在支撑托架建模中多次使用 ***DO** - ***ENDDO** 循环,提高了建模速度和效率。

宏是具有某种功能的命令组合,也可以说是参数化的用户程序。在 ANSYS 中创建宏的方法主要有四种: