



结构智能优化 方法及应用

李彦苍 刘战伟 著
周书敬 赵磊



科学出版社

河北省高校“百名优秀创新人才支持”计划资助(BR2-206)

河北省自然科学基金资助项目(E2012402030)

结构智能优化方法及应用

李彦苍 刘战伟 著
周书敬 赵 磊

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合具体工程实例深入浅出地介绍了几种智能优化方法及其在结构优化中的应用,在内容设置和安排上突出实用、创新的特色。全书分两篇,共5章。第一篇为基础篇,主要介绍各类结构的功能特点以及各类智能算法的一些基础知识;第二篇为应用篇,主要介绍鱼群算法、微粒群-蚁群混合算法、遗传算法在各类结构优化中的应用。

本书可作为高等院校土木工程、水利工程等专业的本科生和研究生教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 CIP 数据

结构智能优化方法及应用/李彦苍等著. —北京:科学出版社,2014
ISBN 978-7-03-041863-0

I. ①结… II. ①李… III. ①智能化建筑-建筑设计 IV. ①TU243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 209600 号

责任编辑:王 钰 纪 兴 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年11月第一次印刷 印张:10

字数:192 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

结构优化设计是一种新兴的、科学的设计方法。通过优化可以使结构布置更加合理,与建筑功能更加协调,从而达到用最低的成本实现结构预期功能的目的。随着结构形式的不断发展,传统的结构优化方法在模型的描述和求解精度上存在不足。在国内外学者的努力下,结构优化设计相关研究有了长足的发展。本书探索将智能优化方法应用于结构优化之中,为结构优化提供了一种新的思路和方法。著者结合多年研究成果和所带研究生的研究成果完成了本书,以期为在校学生及相关从业人员提供帮助。

全书分两篇,共5章。第一篇为基础篇,主要介绍结构优化和智能优化方法的基础知识;第二篇为应用篇,主要介绍鱼群算法、微粒群-蚁群混合算法、遗传算法在结构优化中的应用。

在本书的写作过程中,参考和引用了有关专家、学者的论著,在此谨向他们表示衷心的感谢和深深的敬意。

真诚希望本书能够对高等院校土木工程等相关专业教学及从事相关专业的人员有所裨益。

由于结构优化设计和智能算法相关研究的发展日新月异,本书难以全面概括,更由于理论水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2014年2月

目 录

前言

第一篇 基 础 篇

第 1 章 结构优化设计	3
1.1 结构优化设计概述	3
1.1.1 结构优化设计	3
1.1.2 传统的结构优化设计方法	5
1.1.3 现代智能结构优化方法	7
1.2 桁架结构优化设计	8
1.2.1 桁架结构的特点及应用	8
1.2.2 桁架结构的优化简介	13
1.2.3 桁架结构优化程序的实现	14
1.3 钢管混凝土结构优化设计	18
1.3.1 钢管混凝土结构的特点及应用	19
1.3.2 钢管混凝土结构的优化	25
1.4 轻钢框架结构优化	26
1.4.1 轻钢结构住宅的特点	26
1.4.2 我国轻钢结构住宅的发展	27
1.4.3 轻钢结构设计概述	28
1.4.4 轻钢框架结构设计计算	29
第 2 章 智能优化算法	37
2.1 人工鱼群算法	37
2.1.1 基本人工鱼群算法	37
2.1.2 改进人工鱼群算法	40
2.2 微粒群-蚁群混合算法	49
2.2.1 微粒群算法	49
2.2.2 蚁群算法	52
2.2.3 混合算法	59
2.3 遗传算法	62
2.3.1 基本遗传算法	62

2.3.2 改进遗传算法	70
--------------------	----

第二篇 应用篇

第3章 改进人工鱼群算法在桁架结构优化中的应用	79
3.1 改进鱼群算法在桁架结构连续型随机变量优化中的应用	79
3.1.1 桁架结构截面优化的数学模型	79
3.1.2 目标函数和约束条件的处理	80
3.1.3 改进人工鱼群算法的应用	82
3.1.4 实例分析	83
3.2 改进鱼群算法在桁架结构离散型随机变量优化中的应用	90
3.2.1 离散变量优化问题的特点	90
3.2.2 离散变量的优化方法	91
3.2.3 桁架结构离散变量优化模型	91
3.2.4 改进鱼群算法在桁架离散变量优化中的实现	92
3.2.5 优化实例	94
第4章 微粒群-蚁群混合算法在结构优化中的应用	98
4.1 微粒群-蚁群混合算法在桁架截面尺寸优化设计中的应用	98
4.1.1 桁架结构截面优化的数学模型	98
4.1.2 平面和空间桁架的结构分析程序	99
4.1.3 优化实例	101
4.2 微粒群-蚁群混合算法在桁架结构形状优化设计中的应用	106
4.2.1 桁架结构形状优化的数学模型	107
4.2.2 考虑局部稳定性约束的桁架结构形状优化设计	108
4.2.3 优化实例	109
4.3 微粒群-蚁群混合算法在钢管混凝土框架优化设计中的应用	119
4.3.1 优化模型的建立	119
4.3.2 适应度函数的建立	121
4.3.3 蚁群算法设计和参数设置	123
4.3.4 钢管混凝土框架优化	123
4.3.5 结果分析	126
4.4 微粒群-蚁群混合算法在多层轻钢框架结构优化中的应用	127
4.4.1 多层轻钢框架结构整体优化	127
4.4.2 多层轻钢框架结构构件截面优化	129
4.4.3 优化实例	133
第5章 遗传算法在钢筋混凝土框架结构优化中的应用	140
5.1 钢筋混凝土框架结构优化模型	140
5.1.1 框架梁的优化模型	140

5.1.2 框架柱的优化模型	141
5.2 钢筋混凝土框架结构优化实例	142
5.2.1 算例描述	142
5.2.2 构件编码	142
5.2.3 遗传算子及控制参数确定	145
5.2.4 确定解码方法	145
5.2.5 算法性能分析	146
主要参考文献	151

第一篇 基础篇

第 1 章 结构优化设计

1.1 结构优化设计概述

结构优化设计(structural optimum design, SOD)最早起源于 1869 年的 Maxwell 理论和 1905 年的 Michell 桁架,它属于一门交叉学科。目前,其已在交通、机械、建筑、电子等多领域广泛应用。

结构优化设计是设计者根据设计要求和预定目标,求出在满足约束条件下工程结构最优方案的设计方法。作为一种新兴的、科学的设计方法,该方法将传统的结构设计过程,由“假设-分析-校核-重新设计”转化为“假定-分析-搜索-最优设计”,其中的搜索过程是修改并优化的过程。它首先判断设计方案是否达到最优(包括满足各种给定的条件),若不是,则按某种规则进行修改,以求逐步达到预定的最优指标。优化设计所得结果,不仅仅是“可行的”,而且是“最优的”。这里所说的“最优”是相对设计者预定要求而言的。随着科学技术的发展及设计条件的变动,最优的标准也将发生变化。

结构优化的目的是得到既满足使用要求又保证安全的最为经济的结构,它将数学的最优化理论结合计算机技术应用于结构设计。这种新型设计方法理论综合性很强,其发展是计算力学、数学规划、计算机科学以及工程学科交叉、渗透的结果,它使得结构设计由被动分析、校核上升为主动设计、优化。

1.1.1 结构优化设计

1. 结构优化的概念

结构优化设计涉及以下概念:

(1) 设计变量。优化设计中待确定的描述结构特性的某些参数,称为设计变量。一个结构的设计方案是由若干个变量来描述的,这些变量可以是构件的截面尺寸,如面积、惯性矩等几何参数,也可以是结构的形状布置几何参数,如高度、跨度等,还可以是结构材料的力学或物理特性参数。这些参数中的一部分是按照某些具体要求事先给定的,它们在最优化设计过程中始终保持不变,称为预定参数;另一部分参数在最优化设计过程中是可以变化的量,即为设计变量。设计变量是最优化设计数学模型的基本成分,是最优化设计最终所需确定的参数。

(2) 目标函数。优化设计时判别设计方案优劣标准的数学表达式称为目标函数。它是设计变量的函数,它代表所设计结构的某个最重要的特征或指标。优化设计就是从许多的可行设计中,以目标函数为标准,找出这个函数的极值(极小或极大),从而选出最优设计方案。结构的体积、刚度、承载力、造价、自振特性等都可以根据需要作为优化设计中的目标函数。

(3) 约束条件。优化设计寻求目标函数极值时的某些限制条件,称为约束条件。它反映有关设计规范、计算规程、运输、安装、施工、构造等各方面的要求,有的约束条件还反映优化设计者的设计意图。大体上说,约束可以分为两大类,即几何约束和性态约束。几何约束是在几何尺寸方面对设计变量加以限制,如构件截面尺寸约束、预应力混凝土的裂缝约束等。性态约束是对结构的工作性态所施加的一些限制,如强度约束、刚度约束、稳定性约束、频率约束等。

2. 结构优化设计的主要特点

区别于一般的优化问题,结构优化设计具有如下特点:

(1) 结构优化受多方面制约(环境、荷载、几何特性、材料、施工、费用等)往往十分复杂。必须抓住问题的主要方面和主要矛盾,删繁就简,进行抽象,形成数学模型,才能实施优化。因此,优化设计的价值与有效性取决于所用的数学模型与相应的寻优算法,特别与所选用的设计变量、所考虑的约束条件和规定的目标或评价函数有密切关系。优化提供的最优解或最优设计只是一个相对的最优结构,它仅仅是在所选用的约束与评价函数下才是最优的。

(2) 结构优化设计多属于离散变量优化问题但又存在一些连续变量,这给优化设计带来很大的困难。离散变量优化问题的基本特点是变量取值的离散性,可行解集在设计空间中呈散点状分布,即可行域为可行离散解集。数学模型中的目标函数和约束函数不再具有连续性和可微性,原有连续变量优化中的许多有效的解析算法如各种梯度型算法就无法应用。另外,离散变量优化的数学模型必然属于非凸规划,使各种对偶算法在很大程度上失去有效性,解析数学不易求解离散变量优化问题,需要采用组合数学的方法,而这些方法大多属非多项式算法,即出现所谓 NP 困难问题。

(3) 结构优化设计的数学模型一般为约束优化问题,且约束条件常为隐式约束,求解时需要做大量的结构重分析工作,计算量很大。

(4) 就优化的对象而言,结构优化设计大致可分为三个层次,即结构的材料优选和结构类型的选择、结构布局优化(包括结构的拓扑优化和结构形状优化等)、结构的截面尺寸优化等。就结构优化的内容而论,可分为结构的静力优化与结构的动力优化、单一目标的优化与多目标的优化等。目前一般优化设计都是针对特定

结构的特定优化水平进行的,由于优化问题本身的复杂性、优化设计水平的局限性以及计算能力的不足,针对结构全过程的优化很难实现。

(5) 结构优化的思想始终贯穿结构设计的整个过程。

3. 结构优化设计的数学模型

结构优化设计的数学模型所用的参数为设计变量、目标函数、约束条件。对于结构优化设计问题,数学模型直接关系到优化的效果。所以,结构优化设计的一项重要内容是建立正确的结构优化设计数学模型。

结构优化设计的数学模型如下:

求设计变量

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T \quad (1-1-1)$$

满足约束条件

$$\begin{cases} g_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (1-1-2)$$

使目标函数

$$F(x) \rightarrow \min(\text{最小}) \quad (1-1-3)$$

式(1-1-2)中由 p 个不等式约束和 q 个等式约束规定了问题的可行域。

用最优化方法求得的一组设计变量 $\mathbf{x}^* = [x_1^* \quad x_2^* \quad \cdots \quad x_n^*]^T$ 代表了一个最优设计方案,称为最优设计点,对应一个最优目标函数值

$$F^* = F(x_p^*) = F(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \quad (1-1-4)$$

最优点和最优目标函数值构成一个优化问题的最优解。若目标函数 $F(x)$ 和约束表达式 $g_i(x) \leq 0, h_j(x) = 0$ 都是设计变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的线性函数,那么这样的优化问题称为线性规划问题,否则称为非线性规划问题。

结构优化设计参量部分以变量出现,在满足规范的前提下,形成全部可能的结构设计方案域。结构优化设计要求利用数学手段,按设计者预定的要求,从域中选出一个不但可行且最好的设计方案。优化设计需根据既定的结构类型及形式、工况、材料和规范所规定的各种约束条件,建立优化的数学模型。

为了将结构优化技术付诸实用,除了建立可靠的优化模型外,还需要采用适当的优化算法求解数学模型,从而实现结构优化的目的,使设计既满足安全性、适用性和耐久性的要求,又具有经济性。

1.1.2 传统的结构优化设计方法

1. 传统优化方法

实际工程结构优化问题中,约束条件和目标函数多为非线性隐式函数,优化方

法的选用至关重要。传统的结构优化设计方法主要有准则法和数学规划法。

准则法是最先发展起来的一种结构优化设计方法,从 20 世纪 50 年代末开始用于工程结构设计,60 年代得到发展,至今仍然是实际工程中常用的一种结构优化方法。该方法从工程观点出发,首先提出结构达到优化设计时应满足的某些准则,如满应力准则、强度准则、刚度准则和能量准则等,然后采用迭代方法求出满足这些准则的解。最优准则法也可以处理位移、自振频率、弹性稳定等方面的约束条件,通常是从 Kuhn-Tucker 条件出发建立准则方程。该方法主要特点是收敛速度快,重分析次数与设计变量数目无直接关系,计算量不大,但其理论上尚有欠缺,适应范围也有局限性,主要适用于结构布局及几何形状已定的情况。

数学规划法是从结构力学的基本原理出发,运用数学规划和优选法等方法寻找最优解。该方法是 20 世纪 40 年代后期发展起来的。1960 年, Schmit 提出将结构分析的有限元法与结构优化设计的数学规划法结合,从而把数学规划引进结构设计领域以处理含不等式约束条件的结构优化问题,首次构造了多工况作用下弹性结构优化设计的数学模型并提出可应用数学规划求解的方法。结构优化设计很快发展为一门独立的学科。数学规划法主要有线性规划、非线性规划、动态规划、几何规划。线性规划、非线性规划是研究设计变量在约束条件限制下,求目标函数极值的方法;动态规划是把所研究的问题分成各个阶段,利用递推关系依次作出最优决策的方法;几何规划是在目标函数的各个部分中寻求分配总目标函数值的最优方案的方法。传统的数学规划理论,对凸问题很有优势,但对凹问题则有很大的局限性,而实际中很多问题是非线性的凹问题。

2. 传统方法的不足

工程优化本质上是一门交叉的学科,传统的优化设计方法越来越难以适应,其局限性主要体现在以下五个方面。

(1) 对目标函数和约束条件的要求限制了算法的应用范围。传统的优化方法通常要求目标函数和约束函数式为连续可微的解析函数,有的甚至要求这些函数是高阶可微的,如牛顿法。优化设计实践中,这样的条件往往很难满足。

(2) 局部最优问题。传统优化方法多根据目标函数的局部展开性来确定下一步搜索的方向,这与搜索全局最优解的目标在一定程度上是抵触的。

(3) 在算法实现之前,需进行大量的准备工作,如求函数的一阶和二阶导数、某些矩阵的逆等。在目标函数较为复杂时,这些工作是很难实现的。

(4) 优化结果一般与初始值的选取有很大的关系。初始值的选取在很大程度上都依赖于优化者对问题背景的认识及所掌握的知识和经验。

(5) 方法缺乏通用性。针对一个问题,需要有相当的知识去判定哪种优化方

法较为适用。

传统结构优化方法在模型描述和求解上存在缺陷,导致以下亟待解决的难题:

(1) 重分析次数多。模型维数高,计算量大,易出现“组合爆炸”和“维数灾难”,造成求解困难。

(2) 易陷入局部最优解。因可行集非凸,利用启发式算法求出的解往往是局部最优解。全局最优解的寻求,一直是困扰人们的一大难题。

(3) 易忽略结构设计中存在的大量的不确定性因素的影响。

(4) 隐性约束处理困难。传统算法对处理隐性约束显得无能为力。

进一步分析后可知,造成结构优化设计的实际应用远远落后于理论研究这种现象还有一个很重要的原因,那就是现有的优化方法都是以传统的数学模型作为优化模型。例如,准则法(包括力学准则和理性准则法)、数学规划法(如线性规划、非线性规划)以及两者的结合等静态优化方法都是基于代数方程模型的。最优控制理论中的庞特里亚金极大值原理、动态规划等动态优化方法是基于微分方程或差分方程模型的。由于这些传统数学模型的描述能力和求解方法有相当的局限性,使现有的最优化理论和方法在实际应用中受到了很大的限制,存在许多亟待解决的难题。

随着科技的发展,在工程实践中遇到的问题越来越复杂。传统的优化方法因存在计算复杂、耗时长、精度低等缺陷而越来越不适应于复杂结构优化问题的求解。因此,自20世纪70年代起,具有启发式特征的计算智能方法以其独特的优势而逐渐受到广大学者的青睐。

1.1.3 现代智能结构优化方法

随着计算机技术、仿生学、数学、人工智能等学科的飞速发展,一些借鉴和利用自然界中自然现象或生物体机理的优化算法被相继提出,它们克服了传统优化方法在结构优化设计中的一些局限性,取得了良好的效果。这类算法多具有自适应环境的能力,因此又被称为智能算法。

智能算法借助现代计算机作为工具,对复杂的组合最优化问题的求解具有普适性,自20世纪80年代以来得到了快速发展和广泛应用。1975年,Holland提出遗传算法。这种优化方法模仿生物种群中优胜劣汰的选择机制,通过种群中优势个体的繁衍进化来实现优化的功能。1977年,Glover提出禁忌搜索算法。这种方法将记忆功能引入最优解的搜索过程中,通过设置禁忌区阻止搜索过程中的重复,从而大大提高了寻优过程的搜索效率。1983年,Kirkpatrick提出模拟退火算法。这种算法模拟热力学中退火过程能使金属原子达到能量最低状态的机制,通过模拟的降温过程按玻尔兹曼(Boltzmann)方程计算状态间的转移概率来引导搜索,

从而使算法具有很好的全局搜索能力。20 世纪 90 年代初, Dorigo 等提出蚁群优化算法。这种算法借鉴蚂蚁群体利用信息素相互传递信息来实现路径优化的机理, 通过记忆路径信息素的变化来解决组合优化问题。1995 年, Kennedy 和 Eberhart 提出粒子群优化算法。这种算法模仿鸟类和鱼类群体觅食迁徙中, 个体与群体协调一致的机理, 通过群体最优方向、个体最优方向和惯性方向的协调来求解优化问题。上述智能算法均具有很强的学习能力和环境自适应能力, 实际应用效果良好。利用其进行结构优化设计可以有效弥补传统优化方法的不足。

在智能优化算法的研究方面, 主要包括以下三个方面:

- (1) 改进经典的智能算法。
- (2) 研究开发新型现代智能算法。
- (3) 通过建立混合智能算法, 将经典智能算法和新型智能算法相结合。

1.2 桁架结构优化设计

1.2.1 桁架结构的特点及应用

在古代, 建筑结构是人们根据粗略的估计和以往的经验建造的, 在某种程度上可以说是一种艺术。随着时代的发展, 对结构的要求越来越高, 大跨度、高耸结构日益增多, 网架、桁架等新型的结构形式应运而生。

桁架(truss)是主要承受轴向力的直杆在相应的节点上连接成几何不变的格构式承重结构。可分为平面桁架和空间桁架。桁架结构中各杆件之间互相支撑, 刚度大、整体性好、抗震能力强, 可以承受来自多个方向的荷载。桁架还具有结构简单、拆装方便、运输便利等优点。因此被广泛应用于较大跨度的承重结构和高耸结构中, 如大跨度的厂房、展览馆、收费站、体育馆和桥梁等公共建筑和吊车架、起重机架、水工闸门、钻井井架、海洋平台及电视发射塔等结构中。

以下为一些典型的工程实例:

(1) 体育馆建筑。澳门体育馆所采用的是双曲形的空间管桁架结构, 主桁架跨度达 360m, 拱顶与地面最低点的距离为 54m, 是由 8 根 $\phi 508\text{mm} \times 36\text{mm}$ 的主弦杆、2260 根腹杆、130 个焊接球组成的, 桁架截面面积为 $12.5\text{m} \times 4.5\text{m}$, 两榀桁架总重达 2180t。建成后的澳门体育馆如图 1-2-1 所示。

(2) 酒店建筑。河北沧州盛泰名人酒店位于黄骅市, 结构采用空间管桁架体系, 屋面、墙面采用隐框玻璃幕墙, 如图 1-2-2 所示。结构形状为大半个椭球体, 跨度 $98.50\text{m} \times 53.50\text{m}$ 、高度 21.75m; 所有弦杆均为椭圆线。每一榀管桁架钢架的尺寸均不同, 以两端中心点逐步放射。



图 1-2-1 澳门体育馆

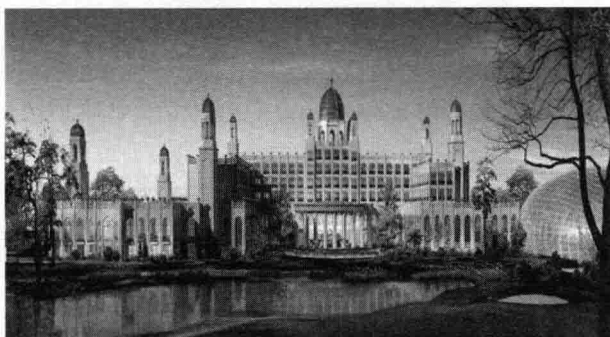


图 1-2-2 位于河北沧州的盛泰名人酒店

(3) 高速路收费站。济青高速公路收费站管桁架长 41.5m, 宽 21.6m, 采用正放四角锥管桁架, 形状为 S 形, 如图 1-2-3 所示。其由四根 $\phi 180 \times 8$ 的钢柱加工制作成管桁架作为整个管桁架的支撑, 钢柱最高处标高高达 13.2m, 钢柱与管桁架间设 16 道 $\phi 75$ 的拉杆, 管桁架杆件数量为 1184 根, 均采用材质为 Q235 的高频焊管。



图 1-2-3 济青高速公路收费站

(4) 单体公共建筑。长沙黄花国际机场新航站楼建筑面积为 21 万 m^2 , 由前

端主楼、中间连廊、空侧三个“半岛”式候机厅等部分组成,是湖南省迄今为止最大的钢构桁架结构单体公共建筑,如图 1-2-4 所示。



图 1-2-4 长沙黄花国际机场新航站楼

(5) 展览馆建筑。青岛岭海国际博览中心由世界著名规划设计公司美国 NB-BJ 担纲设计,总建筑面积约为 $200\,000\text{m}^2$,有东、西、北三面共 10 个展馆、2 个登陆大厅、1 个多功能馆、1 个室外展览广场,标准展位达 6000 多个,是目前中国北方最大的国际博览中心。其结构形式以管桁架为主,另有 V 形柱、BOX 结构以及 H 型钢相结合,如图 1-2-5 和图 1-2-6 所示。



图 1-2-5 青岛岭海国际博览中心效果图

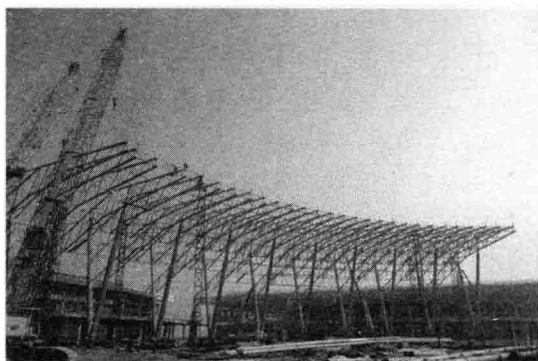


图 1-2-6 青岛岭海国际博览中心吊装现场