

DAKUA DANCENG WANGQIAO GANGJIEGOU QIONGDING
SHIGONG ZONGHE JISHU



京津城际延伸线工程建设丛书

大跨单层网壳钢结构穹顶 施工综合技术

■ 张凤龙 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

京津城际延伸线工程建设丛书

大跨单层网壳钢结构穹顶 施工综合技术

张凤龙 主编

中国铁道出版社

2015年·北京

内 容 简 介

于家堡车站地面站房单层网壳结构为目前世界跨度最大的异形单层网壳结构之一。该结构是由 36 根正螺旋和 36 根反螺旋钢箱梁相互编织而成的空间结构体系,此种类型的单层网壳结构目前在国内外尚无先例,在很多方面都没有现行的技术标准可循,致使设计与施工的复杂性和难度非常大。

本书对该结构的设计计算,各个部件、杆件的加工制作,施工技术的研究与实施,施工后的卸载技术,以及该结构的长期健康监测技术等,进行了全面详尽介绍。同时,还介绍了穹顶 ETFE 膜结构技术。书中对各项技术的创新点作了重点介绍。

本书可为土木工程技术人员、高等院校师生参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

大跨单层网壳钢结构穹顶施工综合技术/张凤龙主编. —北京:
中国铁道出版社, 2015. 6
(京津城际延伸线工程建设丛书)
ISBN 978-7-113-20127-2

I. ①大… II. ①张… III. ①铁路车站一大跨度结构—网壳
结构—钢结构—屋顶(屋面)—工程施工 IV. ①U291②TU231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 061752 号

书 名: 京津城际延伸线工程建设丛书
大跨单层网壳钢结构穹顶施工综合技术
作 者: 张凤龙

策 划: 江新锡
责任编辑: 张卫晓 编辑部电话: 010-51873065 邮箱: zhuxiao23@163.com
封面设计: 王镜夷
责任校对: 胡明峰
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京铭成印刷有限公司

版 次: 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 11.75 字数: 282 千

书 号: ISBN 978-7-113-20127-2

定 价: 49.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

编 委 会

主 编：张凤龙

副 主 编：陈志华 周铁征

编 委：温双义 邱振虎 杨智艳 严 峰

刘德彬 管建国 曹景全 马 瑾

李根喜 赵中伟 潘 栋 唐国善

宋长江 高修建 邢家勇 王久军

刘金锁 严 杰 胡克明 姜海迪

何占超 朱保山 闫翔宇 徐 浩

李 博 李为阳 曾 亮

序

中国高速铁路的发展令世人瞩目,截至2014年底,已建成高速铁路1.6万公里,“四纵四横”高速铁路主骨架网基本形成,塑造了中国高速铁路“技术先进,安全可靠,性价比高”的国际品牌。在高速铁路建设和发展过程中,广大铁路建设者艰苦奋斗、集思广益、积极探索,经过了引进、消化、吸收、再创新的艰难历程,形成了自主知识产权,取得了丰硕的技术成果。京津城际及其延长线的建设和实践充分表明了这一点。

京津城际是我国第一条设计时速350 km的高速铁路,自开通运营至今,经受住了运营的考验,对京津两地经济和社会的发展起到了前所未有的支撑作用。津滨城际自天津至于家堡是京津城际高速铁路的延伸线,它的建成和开通运营对天津自贸区的发展将起到带动作用,必将进一步促进京津冀一体化的形成和发展。

京津城际延伸线虽然线路全长不足45 km,但修建难度大。线路从天津站城际场东咽喉引出,由有砟轨道、无砟轨道、25.65 km特大桥、明挖隧道横穿既有塘沽站场和城市主干道、盾构施工隧道及于家堡地下车站等单位工程组成,堪称高铁建设的博物馆,存在跨线、下穿、站场施工过渡、大直径盾构穿越繁华商业街建筑群保护、大直径盾构450 m小半径曲线施工、超大超深基坑、单层网壳穹顶钢结构、新型ETFE膜结构屋面施工、钢结构穹顶永久健康监测等许多技术难题。

特别是于家堡高铁站,是集高铁、城市轨道交通、公交、出租及社会车辆的综合地下交通枢纽,设地下两层,3台6线规模,地面层为“贝壳”形穹顶采光屋面。超大超深基坑盖挖区长为335 m,宽60 m;明挖区长529 m,宽14~86 m,深22.1 m,属首次在沿海地质复杂区进行如此规模超大超深基坑施工;穹顶钢结构是由36根正反螺旋编织而成的单层网壳钢结构,是目前世界上跨度最大的单层网壳。我曾参与设计评审及先后两次到施工现场,对工程难度深有体会。

京津城际延伸线的建设者,在工程施工过程中,树立“科学组织、精细管理、塑造精品、誓创一流”的建设理念,坚持精细化管理,加强科技攻关,克服了许多困难,解决了一个又一个难题。更为可喜的是,为总结京津城际延伸线建设实践的经验,给今后高速铁路建设提供借鉴,津滨城际铁路有限责任公司张凤龙同志担当主编,组织津滨城际铁路科研、设计、施工方面的技术人员和管理者,编写了《京津城际延伸线工程建设丛书》,将成功的经验和实践中存在的不足,呈现给了业界同行和广大的科技工作者。

该丛书分《大跨单层网壳钢结构穹顶施工综合技术》《软弱地层超大深基坑地下车站施工综合技术》《复杂条件下铁路大直径泥水盾构施工综合技术》三册,对京津城际延伸线建设过程中的技术难题及其解决的方法进行全面梳理和系统的总结思考,对今后高速铁路建设具有较强的借鉴作用和参考价值。

我将该丛书推荐给从事高速铁路设计咨询、建筑施工、科研和教学的相关专家和广大读者,并藉此向京津城际延伸线全体建设者致敬!

中国工程院院士
中国铁路总公司总工程师

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes. The signature appears to be '何平' (He Ping).

2015年4月

于家堡车站是京津城际延伸线的终点站,其站房结构为全地下形式,共分二层,主体结构采用钢筋混凝土框架结构。屋面层为“贝壳”型穹顶采光屋面。穹顶钢结构纵向跨度 143 m,横向跨度为 82 m,矢高 25 m,由 36 根正反螺旋变截面箱梁交织而成,穹顶钢结构顶板及底部环梁采用异型箱梁截面,钢结构总重达 4 000 t,展开面积为 11 000 m²,属于结构缺陷性敏感的单层网壳,结构安全等级为一级,本工程在 2011 被列为铁道部《贝壳式双向螺旋单层网壳复杂结构体系的制作安装施工技术研究》的科研课题,该结构受力形成及特点为国际首例。

于家堡车站单层网壳钢结构是一项设计难度极大,施工精度要求极高,结构施工工序复杂程度极其罕见,各种风险源控制难度极大的综合性系统工程。在实施过程中组织国内钢结构专家进行若干次论证和研讨,结合现场施工条件和整个结构特点,最后确定采用“周圈散拼,中部提升”的安装方案。经组织参建各方,以勇于探索的大无畏主人翁气概,以如履薄冰、如临深渊的谨慎意识,以精、严、细、实的精细化管理为指导思想;采取任务分解,责任到人,记名作业,旁站监控等措施;克服诸多困难,实现安全、质量、成本控制等达到预期目标。

单层网壳穹顶钢结构及膜结构安装综合技术主要包含以下几方面:

一、穹顶钢结构底环梁水平和垂直双方向支座的研制实施技术。该技术成功地解决钢结构受各种荷载的作用之后,顺利地通过底环梁和双支座传递到混凝土主体结构上;在前期组织相关院、所试验的基础上成功地得到运用。

二、成功地实施钢结构十字节点板技术。在组织院校进行钢节点比例试验和钢结构整体风洞试验的基础上,总结钢结构受力分布确定各种节点的类型,从而为工厂焊接十字节点板提供依据。

三、中部整体同步提升技术。通过计算机控制 21 台液压千斤顶成功将 961 t 钢结构整体提升到预定的空间位置。

四、小角度全熔透焊接技术。为确保杆件连接的质量,克服了施工空间狭窄,作业条件差等困难,成功进行小角度全熔透焊接技术,确保焊接质量和安装精度。

五、卸载技术。总结各种受力及监测结果,通过计算机建模和各种方案分析研究,从顶部中间向周围分区分级卸载,使钢结构从零状态到逐步受力,实现体系

的转换,在即时监测下成功地进行卸载。

六、膜结构安装技术。为减轻结果自重,本工程采用 ETFE 充气膜结构,在没有现行的标准规范的情况下,借鉴国内相关工程的实施经验,组织研究制定《于家堡穹顶膜结构屋面 ETFE 系统工程技术及施工质量验收标准》,完成目前规模最大,构造最为复杂,技术和施工难度最高的 ETFE 充气膜结构工程。

七、结构永久健康监测技术,为确保钢结构使用安全,即时掌握钢结构的受力状态,为运营维护提供精确数据,牵头组织钢结构健康监测技术的启动和方案专家论证及全过程的实施。在受力复杂的大型钢结构中率先采用从杆件的零状态开始,对钢结构的应力应变、温度应力、支座位移、焊缝应力、雪荷载、风荷载等每 5 min 进行一次数据采集。经过分析处理,提供钢结构内部受力结果,及时按照设定的受力限制提供预警,为钢结构的使用维护提供依据。

作为京津城际延伸线至于家堡工程建设的组织者,有幸参与于家堡高铁车站站房工程设计与施工的全过程,主持设计和施工过程中的技术攻关、专家论证及大量的试验研究,强化精细化的过程管理,解决一系列技术和施工难题,为实现塑造精品,誓创一流的目标奠定了基础。

本书在编写过程中,得到安鸿逵、王磊两位老专家的悉心指导,沪宁钢机股份有限公司杨文侠博士及江西飞尚科技有限公司刘文峰博士等相关同志提供了帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

本书是工程实践和理论的结合,试图为从事钢结构及膜结构安装及研究的同行提供一些有宜的素材,但由于时间仓促,编者水平有限,在内容上难免存在不足之处,敬请谅解。

C 目 录

CONTENTS

概 述	1
1 穹顶钢结构工程概况	3
1.1 建筑概况	3
1.2 结构概况	4
2 穹顶钢结构设计	5
2.1 方案设计	5
2.2 计算模型及静动力稳定性分析	10
2.3 关键构件设计	18
2.4 深化设计和构件加工制作技术	21
3 穹顶钢结构施工技术研究	37
3.1 施工方案	37
3.2 实验研究	43
4 穹顶钢结构施工技术实施	48
4.1 底环梁支座安装	48
4.2 散拼区安装	54
4.3 提升区安装	84
4.4 临时托换技术	121
4.5 高处合龙和嵌补	126
4.6 卸 载	133
5 穹顶钢结构健康监测技术	145
5.1 健康监测系統概述	145
5.2 进行健康监测的必要性	145
5.3 于家堡健康监测系統总体设计	146
5.4 于家堡站房监测内容	147
5.5 健康监测系統软件	157

5.6	健康监测系统的预警及应急预案	158
6	ETFE 膜结构技术	160
6.1	膜结构屋面概述	160
6.2	ETFE 气枕设计概况	160
6.3	ETFE 屋面遮阳系统设计	161
6.4	ETFE 气枕加工制作安装技术	165
7	结 束 语	171
	参考文献	172
	后 记	174

概 述

于家堡交通枢纽工程的总体规划主要包括 6 大功能分区,以内部相对独立的人行系统连接,各分区分别为城际铁路站房工程、公交中心工程、枢纽控制中心工程、出租车停车场工程、社会停车场工程、轨道交通地下工程。

总体规划建筑面积约为 260 000 m²,其中初步设计批复城际站房总建筑面积为 86 200 m²,地面以上主要由城际铁路地面站房、枢纽控制中心、公交中心和地面附属建筑组成;规划地面以下主要由城际铁路车站、出租车停车场、社会停车场、轨道交通地下结构(B2、Z1、Z4 三条线车站主体建筑)等工程组成。工程以城际站场为中心,由城际车站向东依次布置 Z4 线车站主体、出租车停车场工程,城际西侧主要布置轨道交通 B2、Z1 线车站主体、社会停车场、公交中心等工程。

于家堡车站地面站房单层网壳结构为目前世界跨度最大的异形单层网壳结构之一。由 36 根正螺旋和 36 根反螺旋钢箱梁交互编织而成的空间结构体系,此种类型的单层网壳结构目前在国内外没有先例,在很多方面都超过现行的技术标准,其设计与施工的复杂性和难度非常大。面对这些挑战,铁道第三勘察设计院集团有限公司作为设计总承包方,以奥雅纳(ARUP)工程咨询有限公司(上海)北京分公司作为分包方,共同完成于家堡大跨螺旋形网壳的设计工作,同时联合天津大学、西南交通大学、北京交通大学进行大量的试验研究和多项关键技术的攻关,并进行大量的科技创新,如首次提出正反螺旋形网格形式的单层网壳结构,对国内单层网壳网格形式进行了突破性的补充;创新性地提出双球铰钢支座的概念和设计,这种支座是在底环梁同一位置的底面和侧面支座分别转动形心与底环梁的形心重合的两个球形钢支座,成功解决了大跨度单层网壳的大推力问题;首次提出通过 X 形节点将空间的扭曲构件简化为空间直线构件的渐变连接,降低整个网壳的工程设计和施工的难度,也降低了造价。此外,第一次在高铁车站中综合使用健康监测技术,对网壳钢结构在运营期间进行结构安全性的诊断;在新材料、新技术方面应用镀点 ETFE 膜结构技术,既节能又环保,使于家堡地下车站成为真正的绿色建筑。

2008 年天津市面向国际公开对于家堡金融区的规划及交通枢纽的概念设计进行方案竞赛。美国 SOM 建筑设计事务所提供的以城际站房为代表性的方案胜出,此方案采用螺旋形网格,造型新颖,视觉效果震撼,网壳长 173 m,宽 96.2 m,高 28.3 m。且网壳的底部生根于地下一层的顶板上,在穹顶与地面相接处,与室外景观结合,环绕建筑轮廓设计流线形的水池。整个建筑如同倒扣在绿化广场上的贝壳,地上部分外露在海滩上,一部分埋入砂中。该方案面临众多难题,经过研究将网壳生根点放到地面层的顶板上,同时进行跨度 173 m、143 m 和 120 m 三种技术方案的比选,其中 173 m 和 143 m 为地面进站的模式,120 m 为地下进站的模式。经过综合的比选 143 m 跨度的网壳为初步设计方案,室内效果通透明亮,正反螺旋形的钢梁相互交叉编织,网格具有丰富的韵律,在视觉感官上具有很大的冲击力。

地面站主入口在穹顶的南端,入口造型与穹顶建筑的造型相协调,局部抬高,达到主入口突出,引导人流的作用。在穹顶的东南、西南部设计次要出入口。屋顶外观为顺时针的螺旋纹

建筑构件,均匀地分布在整个穹顶外表面。其设计灵感来自自然界的鹦鹉螺、葵花、松果等剖面或表面独特的螺旋形。穹顶室内表面为逆时针螺旋构件,正、反两组螺旋系统相交,在屋面上形成交织的网格,具有独特的视觉特点。

网壳外围护系统大部分面材为乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)膜材气囊。气囊系统外侧沿顺时针主体结构钢梁方向上有 500 mm 高的铝板装饰条,ETFE 气囊系统是一个外表面密封保温隔热系统,由三层 ETFE 膜组成,最终的膜层数依据建筑美观、结构计算和遮阳系数的要求确定。整个屋面 ETFE 气囊系统应能够对温度和日光提供控制,依据不同的遮阳系数分为不同的区域,通过在不同膜层上镀点、镀点的形状和大小、镀点的覆盖率等变化来达到不同的遮阳系数的要求。

1 穹顶钢结构工程概况

1.1 建筑概况

于家堡车站为地下高铁车站,车站为地下两层、地面一层。地下二层为站台层,站台规模为3座岛式站台6条到发线;地下一层为站厅层,设候车大厅、进出站厅、设备用房及办公用房;地面层为进站大厅。站房地上部分为贝壳形穹顶采光屋面,结构形式为大跨度空间网格结构。整个结构主要杆件采用钢箱梁,72根箱梁相互交叉连接,编织成一个纵向跨度约143 m,横向跨度约81 m,矢高约25 m的贝壳形穹顶网壳结构。于家堡车站效果图见图1—1和图1—2。



图 1—1 于家堡站房穹顶建筑效果图



图 1—2 于家堡站房剖视效果图

1.2 结构概况

站房屋盖为单层网壳结构,整体外形酷似贝壳形状,其南北向长 143.90 m,东西宽度 80.90 m,矢高 25.80 m。整个结构体系由 72 根箱梁相互交叉连接成单层网壳,在其顶部设置有顶环结构,在其底部设置有箱形圈梁对单层网壳顶底端起连接和约束作用,见图 1—3 和图 1—4。

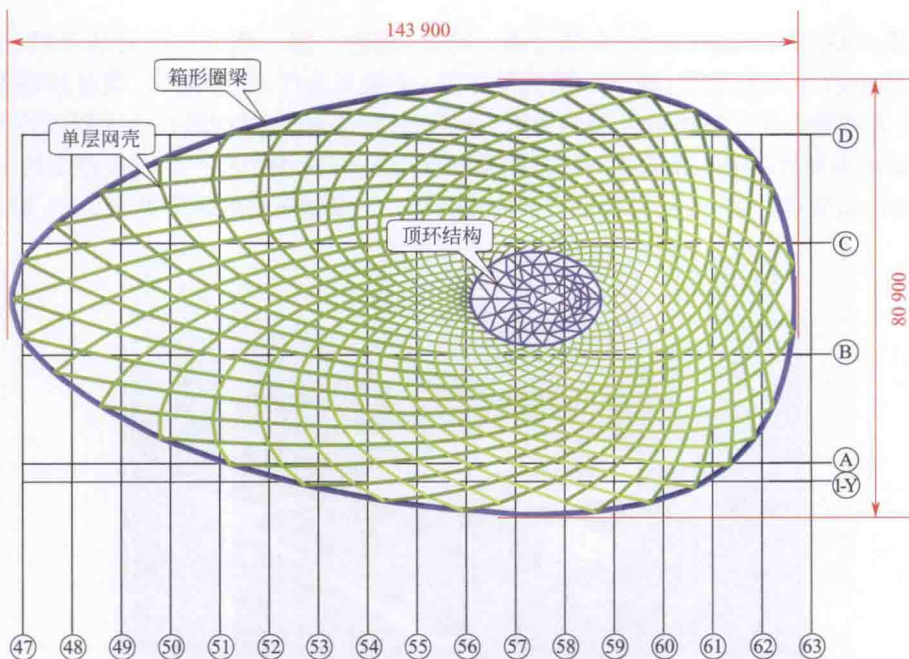


图 1—3 钢结构平面图(单位:mm)

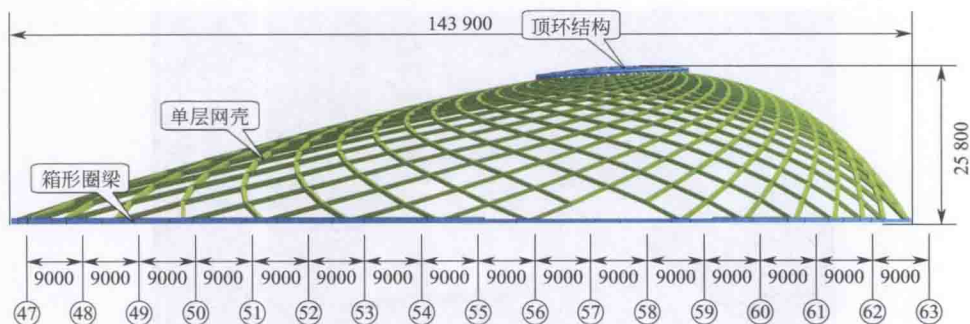


图 1—4 钢结构立面图(单位:mm)

2 穹顶钢结构设计

2.1 方案设计

于家堡站房穹顶网壳造型的设计创意以鹦鹉螺、向日葵及对数螺旋线为设计灵感(图 2—1),网壳网格由 36 根正螺旋和 36 根反螺旋变截面曲线钢箱梁相互编织而成。在顶部交织成 36 个点与顶部钢环梁连接,在底部也交织成 36 个钢节点与底部钢环梁连接,这样一个顶环梁+编织网+底环梁的单层网壳结构通过铰支座与地下结构顶板连接,在整个网壳顶部开有一个约 $19\text{ m} \times 26\text{ m}$ 椭圆形天窗,在地下结构的顶板层(网壳结构的正下方)开有长轴为 113 m ,短轴为 60 m 的椭圆形孔洞。



图 2—1 于家堡站钢结构创意设计灵感

2.1.1 网壳结构特点

于家堡地面网壳与常规网壳结构(图 2—2)比较,其结构形式有以下特点:

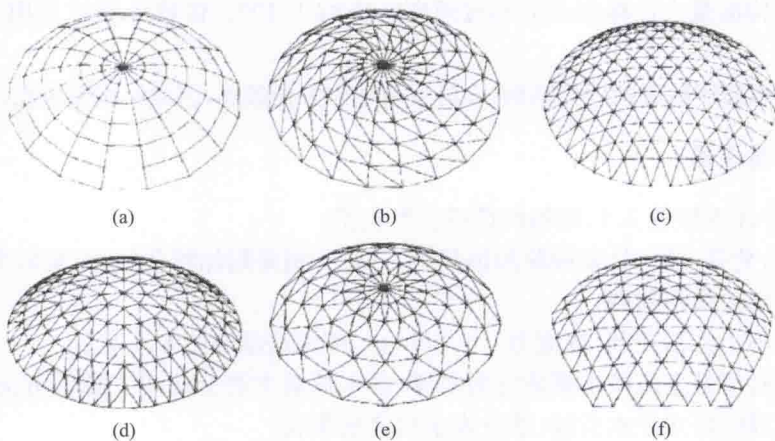


图 2—2 常见单层网壳

(1)杆件在投影面传力的途径沿螺旋线进行,而不是沿直线传力。网格的形式一般为三角形,而本网壳是不规则的四边形,且划分不均匀。

(2)跨度大,长向跨度为 143 m,短向跨度为 81 m,这种大跨度单层网壳国内罕见。

(3)网壳杆件承受压弯剪扭作用力较大,扭矩的作用明显,而常规的网壳结构以受压为主,基本上没有扭矩的作用。这就要求节点刚度必须保证杆件有效的传力。

(4)整体模型构件协同受力,空间梁单元杆件没有主次之分。

(5)节点、杆件差异性巨大,共有约 1 134 个不同节点,2 178 个不同的杆件,加工难度极大。

2.1.2 设计原则

(1)满足国家现行的相关规范和规程。

(2)采光穹顶网格结构分别按施工阶段和使用阶段进行强度、变形、稳定计算,满足耐久性的要求。结构尺寸满足建筑净空、设备安装、使用功能及施工工艺的要求。做到安全可靠、技术先进、经济合理。穹顶主体钢结构设计使用年限为 100 年。

(3)穹顶网格结构设计应保证建筑物有足够的承载力、刚度和稳定性,以确保安全。

(4)穹顶网格结构的安全等级按“一级”要求进行设计。

(5)穹顶网格结构的抗震设计按“乙类建筑”设计,按《天津市响螺湾中心商务区—于家堡金融区场地地震安全性评价报告》中的地震动参数及反应谱参数进行抗震设防。按烈度 8 度采取抗震构造措施,以提高结构的整体抗震性能。

(6)壳体和地下结构设计应保证壳体的变形协调。

2.1.3 设计标准

(1)结构设计基准期为 50 年(可靠度),结构设计使用年限为 100 年(耐久性)。

(2)结构重要性系数取为 1.1。

(3)建筑抗震设防类别为乙类重点设防建筑。地震动参数和地震反应谱参数以《天津市响螺湾中心商务区—于家堡金融区场地地震安全性评价报告》为准,网壳结构阻尼比 $\xi=0.02$ 。

(4)网壳结构地震作用计算采用振型分解反应谱法,并用时程分析法进行补充计算。提取网壳振型个数 ≥ 20 个。

(5)网壳结构的最大位移值不应超过短向跨度的 1/400。位移计算应采用与强度组合对应的标准组合。

(6)单层网壳属于缺陷敏感型结构,容易发生整体失稳破坏,因此结构整体稳定系数 $K \geq 5$ 。

2.1.4 静力计算结果

结构的重要性系数取 1.1,结构的荷载主要包括:

①屋面重力荷载:顺时针钢梁附加恒荷载、逆时针钢梁附加恒荷载、天窗恒荷载、节点恒荷载、穹顶底部玻璃天窗恒荷载;

②活荷载:不上人活荷载,取值为 0.5 kN/m^2 ,屋面清洁时施工荷载;

③雨水荷载:屋盖水沟按正螺旋方向布置,雨水荷载主要分布于正螺旋方向的杆件,主要考虑积冰荷载、瞬时降水积水荷载、部分排水沟堵塞荷载。

活荷载还包括 ETFE 充气枕拉力荷载、风荷载、温度作用等。

地震作用主要考虑表 2—1 的三水准的地震效应,水平地震影响系数曲线见图 2—3 和图 2—4。

表 2—1 三水准的地震效应

地震影响	50 年超越概率	重现周期(年)	建筑结构抗震规范		场地地震安全性评价报告		定性描述
			加速度峰值(g)	水平地震影响系数最大值 $\sigma_{\max}$	加速度峰值(g)	地震影响系数最大值 $\sigma_{\max}$	
多遇地震(小震)	63%	50	0.055	0.120	0.055	0.146	弹性
设防烈度(中震)	10%	475	0.150	0.330	0.198	0.458	弹性
罕遇地震(大震)	2%	2 475	0.310	0.720	0.310	0.893	基本弹性及不倒塌

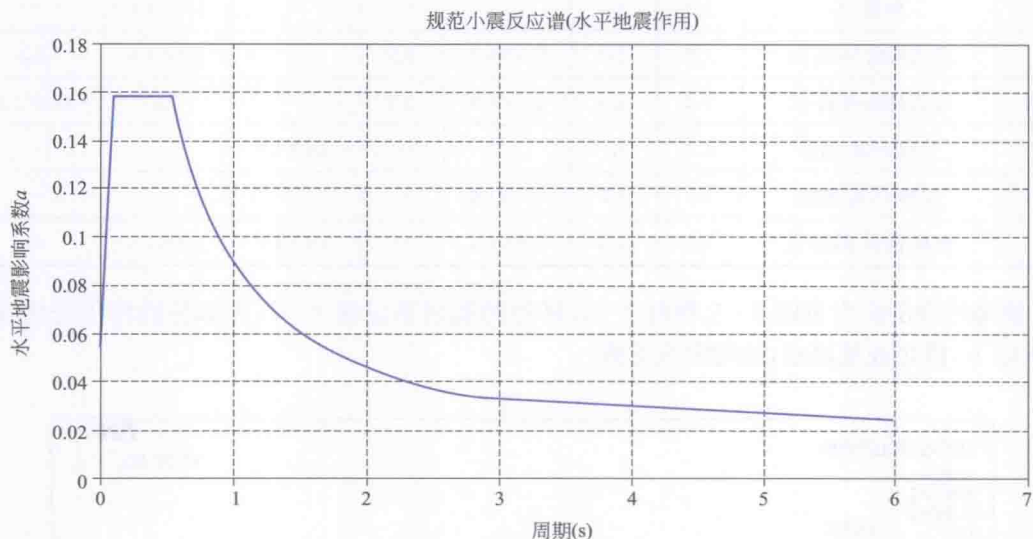


图 2—3 水平地震影响系数曲线(小震,阻尼比 0.02)

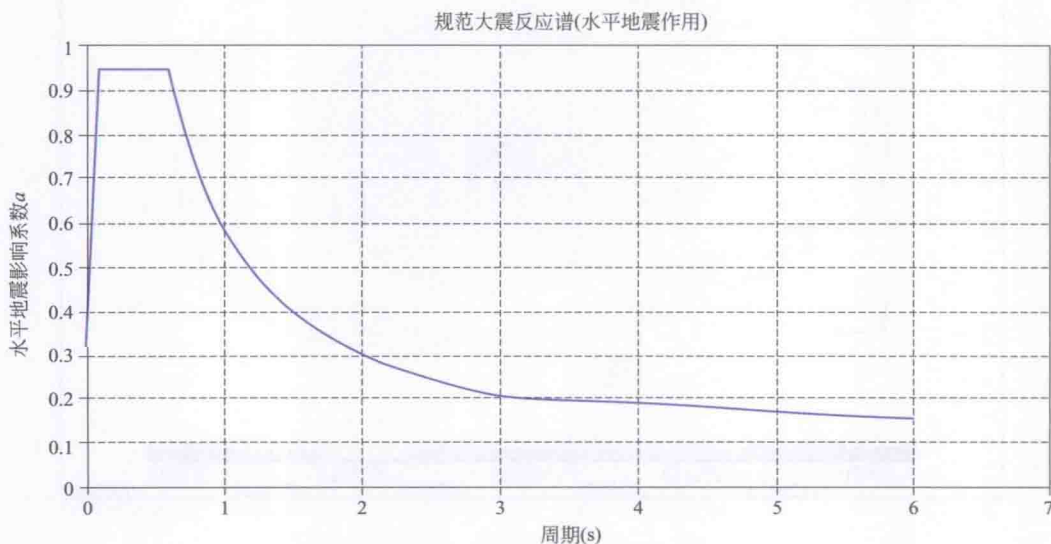


图 2—4 水平地震影响系数曲线(大震,阻尼比 0.02)