

青岛北站 结构设计

张相勇 等 著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

青岛北站结构设计

张相勇 等 著

中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 提 要

《青岛北站结构设计》详细阐述了青岛北站结构设计的全过程,以及施工的关键技术,内容丰富、系统完整。全书共分3篇,第1篇主要介绍青岛北站工程的基本情况;第2篇系统介绍青岛北站地下结构、主站房(屋盖、高架候车层、东西广厅与观景平台、幕墙钢结构)和两侧对称的站台无柱雨棚等各部位的结构计算分析与设计;第3篇详细介绍青岛北站结构设计研究中的关键技术,包括:大型基坑设计与施工、大跨钢结构风荷载效应、大跨钢结构抗火性能化设计、预应力钢结构、钢结构异形截面承载力验算、消能减振设计、大型拱脚节点设计、结构试验研究(整体模型、异形截面、复杂节点及拉索抗火等)、含预应力张拉与卸载的施工仿真分析、大跨钢结构施工监测与健康监测等。

本书可供建筑结构设计人员、建筑科研院所研究人员及高等院校土木工程专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

青岛北站结构设计/张相勇等著. —北京:中国铁道出版社,2016.7

ISBN 978-7-113-21970-3

I. ①青… II. ①张… III. ①火车站—结构设计—青岛市 IV. ①TU248.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140939 号

书 名:青岛北站结构设计

作 者:张相勇 等

策 划:陈小刚

责任编辑:张 瑜

编辑部电话:010-51873193

封面设计:崔丽芳

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁 高春晓

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:2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:26.5 字数:649 千

书 号:ISBN 978-7-113-21970-3

定 价:75.00 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

《青岛北站结构设计》

编委会

主 编:张相勇

副主编:杨惠东 甘 明 牟在根 赵鹏飞

编 委:张相勇 杨惠东 甘 明 牟在根 赵鹏飞

薛慧立 韩志伟 张克意 李文峰 Emmanuel Livadiotti

李黎明 王宏伟 吕黄兵 徐瑞龙 焦峰华

刘 娟 毛绍米 张志强 王德连

序

进入二十一世纪以来,我国高铁站房建设步入了蓬勃发展的时期,青岛北站是国内近年来新建的高铁站房中设计难度非常大的工程项目之一。“海鸥”方案造型优美,展翅欲飞的动感给人以无限的遐想。建筑师奇特的想象与结构工程师严谨务实的追求共同创造了一项经典的预应力钢结构建筑,该建筑已成为青岛市新的城市景观及城市名片。

中铁二院、北京市建筑设计研究院有限公司及法国 AREP 公司三家单位组成的设计联合体,面对新颖奇特而异常复杂的建筑方案,开展了卓有成效的结构设计工作。在结构设计过程中不断创新、反复研究,最终形成了受力合理且施工方便的结构设计方案,尤其是主站房创新性地采用了预应力立体拱架结构,丰富了预应力钢结构体系的内容,实现了建筑艺术的美感,是结构美与建筑美深度融合的典范之作。

青岛北站结构体系异常复杂,是多种结构体系组合而成的混合体,含预应力立体拱架结构、拉索结构和钢桁架结构及部分混凝土结构,而且主构件截面多为异形截面,增加了设计难度。为了解决设计难题,应用了多项创新技术。青岛北站的 struct 设计与建设过程,是产学研深度合作的过程,取得了丰硕的成果。设计联合体与西南交通大学、同济大学、北京科技大学、东南大学、建研科技股份有限公司、北京市建筑工程研究院等组成的设计研究团队,解决了设计过程中的诸多难题,通过理论研究、试验验证及设计方法研究,形成了结构设计中的关键技术,这些创新成果为青岛北站的 struct 设计提供了理论与技术支撑,从而确保了项目的顺利进行。

设计研究团队对青岛北站的 struct 设计与研究成果进行了全面总结,再次彰显了该团队的创新意识、责任感和使命感。本书是我国高铁站房领域的钢结构及空间结构科技著作,内容丰富、可读性强,它的出版可以增加广大读者对钢结构及大跨空间结构在铁路领域乃至土木工程其他领域应用的了解,也有利于促进我国钢结构的进一步发展。

中国工程院院士
清华大学教授
聂建国

前 言

青岛北站是集高(普)速铁路、城际铁路、轨道交通、公交、长途客运、出租车和社会车辆等多种交通方式为一体的综合性大型交通枢纽,为山东省目前最大的铁路客运枢纽站。站场规模按8台18线布置,整个火车站由售票厅、广厅、高架候车厅、地下出站厅、无站台柱雨棚等客运部分,以及车站办公服务用房与设备用房组成。

青岛北站整体造型富有动感又伸展飘逸,挺拔而富有张力,似一只海鸥振翅高飞,预示着青岛市经济文化的蓬勃发展;建筑优美曲线的灵感来自于展翅飞翔的海鸥,给人以无限的遐想;同时采用预应力立体拱架结构体系直接外露,是建筑美与结构美的完美演绎,形成了一种城市门户的形象,象征着青岛以博大的胸怀迎接来自五湖四海的宾客。

青岛北站的“海鸥”方案造型奇特,注定了结构设计的极大挑战性,设计难度与复杂程度在国内近年建造的火车站房中比较少见。中铁二院、北京市建筑设计研究院有限公司及法国 AREP 公司三家单位组成的设计联合体为此付出了艰苦卓绝的努力。从2007年青岛北站方案投标开始,设计工作先后经历了结构方案深化设计、初步设计、修改初步设计、施工图设计、施工配合、车站运营配合设计等多个阶段,联合体内部经历了无数的不眠之夜,车站各结构单体也都进行了充分的讨论和多轮的修改,共历时6年多的时间。青岛北站于2013年12月正式通车,工程圆满竣工,为业主、为青岛市民提供了一项精品工程,构成了青岛市新的城市名片与新城市景观。

青岛北站在结构设计过程中,设计联合体曾协同西南交通大学、同济大学、北京科技大学、东南大学、建研科技股份有限公司、北京市建筑工程研究院等设计研究团队,对结构设计进行系统的理论研究、试验验证及设计方法研究,成功突破了结构设计中的关键技术,解决了项目设计过程中的诸多难题,为项目的顺利进行奠定了良好的基础。

青岛北站属于多种结构体系巧妙组合而成的混合体,含预应力立体拱架结构、拉索结构和钢桁架结构及部分混凝土结构,而且主构件截面多为异形截面,加之单体长度与跨度超限,结构设计难点颇多。通过预应力立体拱架的应用,紧密结合建筑造型,在满足建筑外观要求的基础上,良好地达到了屋盖结构的安全可靠使用要求,实现了独特建筑造型与新颖结构体系的统一;大量运用复杂节点和异形截面构

件,通过大尺度缩尺模型试验及节点与异形截面试验的验证,同时进行相应的电算模拟,圆满完成了对其工作性能的验证,同时为其他相似工程问题提供了经验;通过耐火试验,验证高砒索在初始预应力作用下,喷涂防火涂料后,拉伸变形 0.3%,在 500℃ 高温下达到 1.5 h 的耐火极限,结果表明拉索受力性能满足要求,此类拉索耐火试验在国内尚属首次;运用 TMD 阻尼器,有效避免了高架候车层与观景平台大跨度楼面与人群行走频率的共振,同时显著减小了楼面加速度,保证了良好的舒适度要求;防屈曲支撑在西广厅的应用,在不增大原有框架柱截面的基础上,控制住了结构在地震作用下的层间位移角与振动响应,从而有效地保护结构在强震下的安全,而且安装方便,施工快捷;预应力幕墙钢结构在满足建筑外观和结构安全可靠的基础上,良好地实现了其功能作用,与主体结构的灵巧通透形成了呼应。

自 2013 年 12 月车站正式通车后迄今为止,青岛北站结构设计关键技术等各项科研课题均通过了相关部门验收,达到国际先进水平,部分成果达到国际领先水平,共完成关键技术研究报告 11 项,发表论文 20 余篇,相关成果共获得省部级奖励 5 项。

青岛北站结构设计过程中,中国铁路总公司(原铁道部)、青岛市政府给予了大力支持,曾得到柯长华、汪大绥、刘树屯、陈富生、王亚勇、傅学怡、齐五辉、薛慧立、苗启松、陈彬磊、盛平、覃阳、朱兴刚、肖从真、钱基宏、于海平、周学军、夏世群、蒋世林等国内专家的指导和帮助;另外,设计联合体内各单位的领导和许多专家同行亦给予了热情关心、指导与帮助,在此表示最诚挚的感谢。

工程建设过程中,在青岛北站建设指挥部强有力的领导下,总包单位中铁二局、中建股份等单位,以及中建钢构有限公司、中建安装有限公司等钢结构施工单位密切配合,通力合作,最终高质量的完成了本工程。

本书编写自火车站通车后正式筹备,全书由张相勇组织并定稿,各章节编写人员如下:第 1 章:张相勇;第 2 章:张相勇,张克意;第 3 章:张相勇,赵鹏飞;第 8、9 章:张克意,张相勇;第 13 章:李黎明,张相勇;第 14 章:张相勇,张志强;第 16 章:牟在根,张相勇;其他章节均由张相勇编写。参与过本项目的罗斌、谈政、孟祥冲、魏建友、王莹、阳升、方云飞、韩龙勇、陈晗、陈新礼、司波、尧金金、冉鹏飞、张爵扬、汤理达等提供了工程建设过程中相关的资料与素材。参加本书编写的还有李静姝、葛鹏等。部分摄影图片由王顺成提供。

薛慧立、杨惠东、牟在根、赵鹏飞、李文峰、吕黄兵、徐瑞龙等专家校审了书稿。

中铁二院的业务建设课题为本书的顺利出版提供了极大的帮助。

在此一并致谢!

目 录

第 1 篇 工程基本情况

第 1 章 工 程 概 况	3
1.1 工程概况	3
1.2 设计概况	4
1.3 工程大事记	21
1.4 主要科技成果	29
第 2 章 结构方案设计	31
2.1 “海鸥”形屋盖钢结构	31
2.2 高架候车层钢结构	33
2.3 东西广厅与观景平台结构	34
2.4 站台无柱雨棚	35
2.5 地下结构与地基基础	36

第 2 篇 结构设计分析

第 3 章 “海鸥”形屋盖钢结构	47
3.1 结构体系与成形	47
3.2 结构计算分析	49
3.3 屋盖钢结构设计	139
第 4 章 高架候车层结构	152
4.1 结构体系	152
4.2 技术条件	153
4.3 验算控制标准	159
4.4 9.000 m 标高候车层整体计算	159
4.5 计算结果检验	166
4.6 其他计算	173
4.7 高架候车层部分施工图	187
第 5 章 东西广厅与观景平台	190
5.1 工程概况	190

5.2	观景平台结构舒适性分析	191
5.3	消能减振分析设计	191
5.4	节点设计	197
第 6 章	幕墙钢结构	199
6.1	结构体系说明	199
6.2	幕墙钢结构设计依据及引用技术文件	200
6.3	基本参数	201
6.4	南(北)区幕墙钢结构	201
6.5	幕墙钢结构部分施工图	210
第 7 章	站台无柱雨棚	213
7.1	结构形式及特点	213
7.2	结构计算分析	214
7.3	结构分析情况	221
7.4	构件截面验算	225
7.5	钢柱落地斜拉索设计	228
7.6	关键节点计算	229
7.7	雨棚部分施工图	233
第 8 章	地下结构	238
8.1	“桥建合一”地下结构	238
8.2	东西广厅地下结构	247
8.3	基础设计	248

第 3 篇 关键技术

第 9 章	大型基坑设计与施工	261
9.1	前期设计	261
9.2	基坑工程设计	266
9.3	基坑工程的重点设计	268
9.4	本章小结	272
第 10 章	大跨钢结构风荷载效应	274
10.1	数值风洞研究	274
10.2	风洞试验研究	281
10.3	本章小结	284
第 11 章	大跨钢结构抗火性能化设计	286
11.1	主站房 FDS 火灾模拟	286

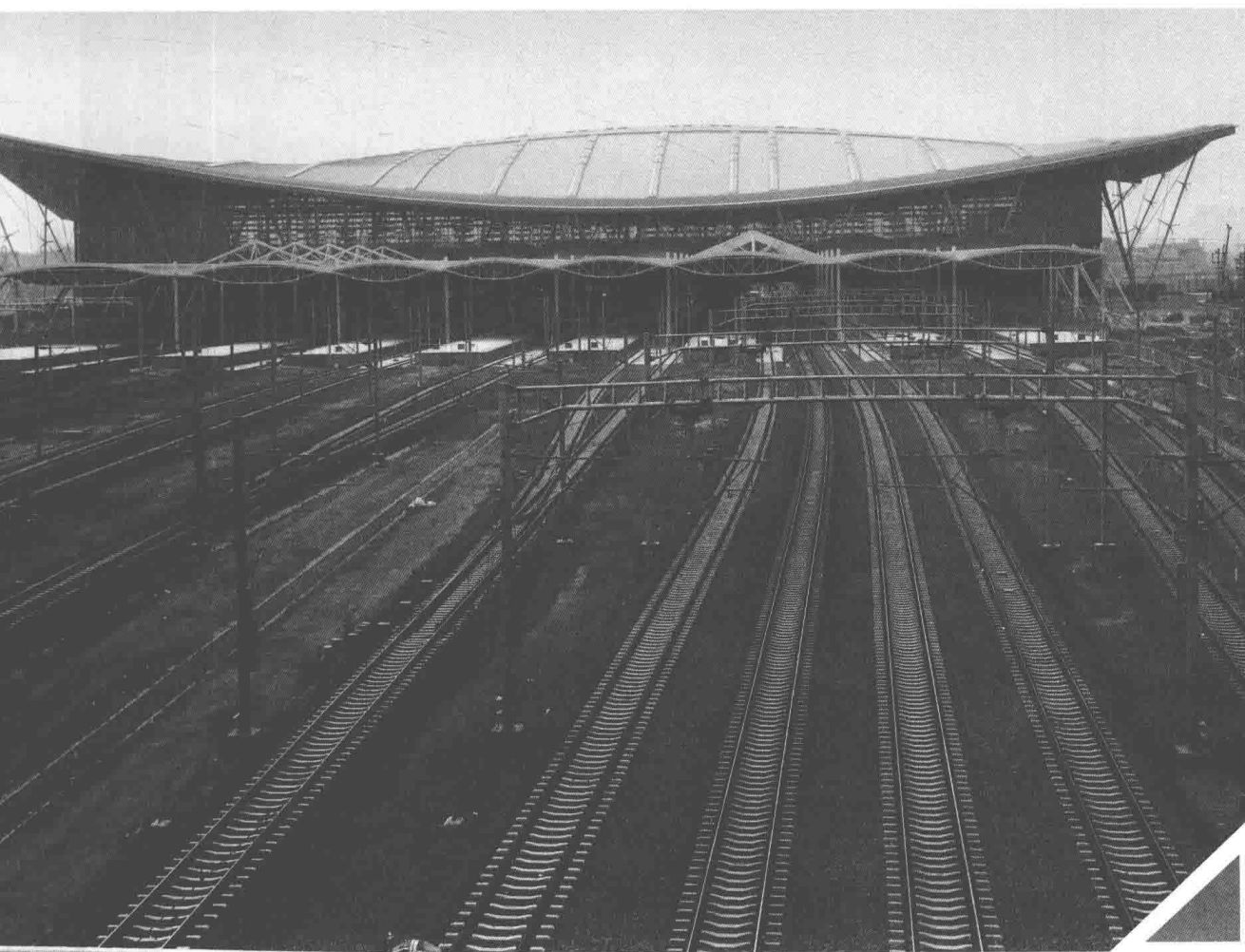
11.2	主站房屋盖结构抗火承载力验算	294
11.3	本章小结	301
第 12 章	预应力钢结构	302
12.1	预应力立体拱架	302
12.2	无柱雨棚预应力钢结构	310
12.3	本章小结	315
第 13 章	钢结构异形截面承载力验算	316
13.1	异形截面验算思路	316
13.2	截面验算程序 EASY MIDAS	317
13.3	截面验算结果	320
13.4	本章小结	322
第 14 章	消能减振设计	323
14.1	有限元分析模型及动力特性分析	323
14.2	人群荷载模拟与分析工况定义	324
14.3	TMD 减振方案及效果分析	325
14.4	屈曲约束支撑消能原理	327
14.5	消能减振设计方案	328
14.6	多遇地震下弹性时程分析	330
14.7	罕遇地震下弹塑性时程分析	331
14.8	本章小结	333
第 15 章	大型拱脚节点设计	334
15.1	有限元分析讨论	335
15.2	边界条件和荷载取值	336
15.3	计算结果的分析与讨论	337
15.4	本章小结	339
第 16 章	结构试验研究	341
16.1	立体拱架缩尺模型试验	341
16.2	异形截面试验	356
16.3	复杂节点试验	360
16.4	本章小结	368
第 17 章	含预应力张拉与卸载的施工仿真分析	369
17.1	拼装过程	369
17.2	卸载方式	374

17.3	施工仿真	374
17.4	结果分析	375
17.5	拉索抗火试验	377
17.6	本章小结	380
第 18 章	大跨钢结构施工监测与健康监测	381
18.1	监测的必要性	381
18.2	监测的内容	382
18.3	监测的结果	386
18.4	本章小结	407
参考文献		408

第 1 篇

工程基本情况

GONGCHENG JIBEN QINGKUANG



第1章 工程概况

1.1 工程概况

1.1.1 场 地

青岛北站设在青岛市李沧区,基地西侧为胶州湾及胶州湾高速公路,西南约 1 km 为跨海大桥——青岛海湾大桥的起点,北距青岛流亭国际机场约 13 km。青岛北站建设用地范围地形平坦,地势开阔,无特殊地形地貌。车站总平面图如图 1-1 所示。

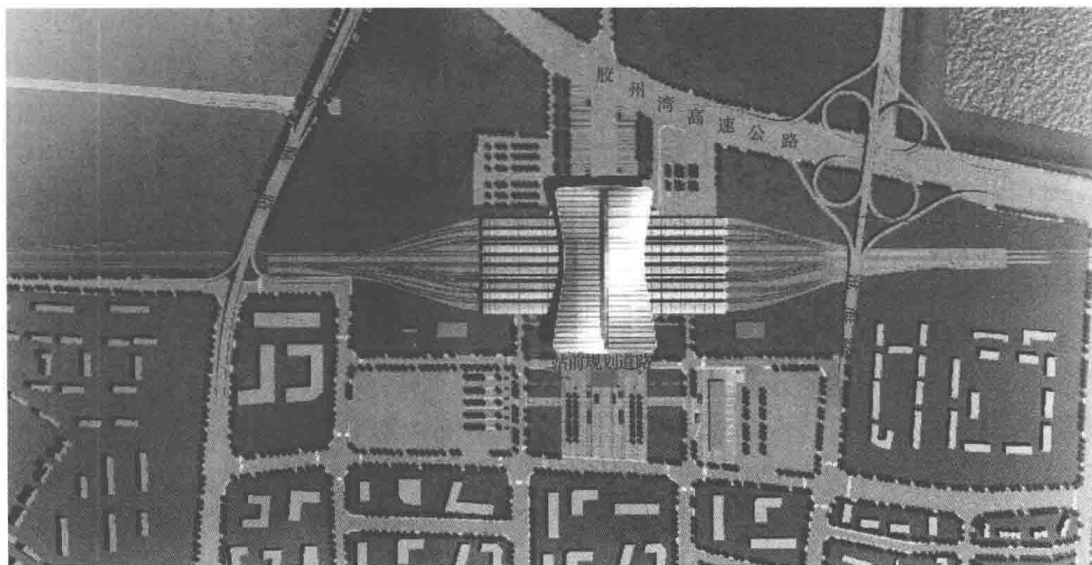


图 1-1 车站总平面图

1.1.2 功 能

青岛北站是我国“四纵四横”快速铁路网的重要节点,是连接山东半岛、长江三角洲、珠江三角洲沿海快速铁路通道的起点,衔接胶济客专及青荣城际铁路、青连铁路、胶济铁路高速线,是山东省最大的国铁、地铁、公交立体交叉的综合性交通枢纽。青岛北站采用双向广场设计,两侧均设售票厅、进站广厅和地下出站厅,站房总建筑面积 68 898 m²,包括地上两层、地下三层共五层布局。地面层为站台层,建筑面积 12 077 m²,设有 8 个站台 18 条线路;地上二层为高架候车层,建筑面积 31 447 m²,可同时容纳 1 万人候车;地下一层为出站和综合换乘通道,地下二层为地铁 3 号、8 号线,地下三层为地铁 1 号线。

青岛北站集城际铁路、普速铁路、高速铁路、轨道交通、公交、长途客运、出租车和社会车辆等多种交通方式为一体,系统集成实现了旅客多种交通方式的“零换乘”。主站房是整个交通枢纽中最重要的旅客集疏区域,客流集中,功能和流线复杂。

1.1.3 设计要求

- (1)符合国家基本建设政策、法令和有关规定,充分体现“以人为本”的设计指导思想。
- (2)符合铁路站房建设“功能性、先进性、系统性、文化性和经济性”的建设理念,做到技术先进、功能合理、结构安全,并满足建筑节能和环境要求。
- (3)与外部交通环境条件紧密结合,创造以人为本、高效、便捷的交通枢纽。
- (4)充分考虑远期发展和火车站的城市窗口形象,合理确定建设标准,注重长远经济效益和社会环境效益。
- (5)强调建筑个性与环境的统一,通过一体化、完整而独特的建筑造型体现现代交通建筑的内涵,体现地域文化特点,满足城市规划和城市交通需要。
- (6)重视环境和室内空间建设,为旅客创造更为生动、舒适的站内环境。
- (7)积极采用新技术、新材料、新设备,提高科技含量,强调消防安全。

1.2 设计概况

1.2.1 方案设计

1. 背景

青岛北站由中铁二院工程集团有限责任公司(以下简称铁二院)、北京市建筑设计研究院有限公司(以下简称BIAD)和法国铁路集团AREP建筑设计公司(以下简称AREP)三家组成的设计联合体共同设计。其中,方案设计由联合体共同完成,AREP主要负责地上主体建筑与结构的初步设计,BIAD负责主体建筑与结构的施工图设计,铁二院负责地下部分的整体设计及地上机电各专业相关设计。

2. 设计理念

(1)以人为本,贯彻铁路站房建设“功能性、先进性、系统性、文化性和经济性”的建设理念。

(2)针对不同客流需求建立以快速通过为主的旅客交通模式。青岛北站流线设计在满足普通候车式旅客活动模式的基础上,着重加强了客流的快速通过能力。针对不同的旅客需求建立“上进下出、下进下出”的立体站内交通流线,为旅客提供方便快捷的路线。

(3)公共空间的兼容可变性和应急能力。设计中将空间最大限度地留给公共空间面积,采用完整的大空间布局,为未来铁路的发展变化预留下良好的条件。车站具有足够的室内外空间以应对在春运、暑运和节假日等特殊时段客流高峰聚集的情况,提高车站应急能力。

(4)引入站房功能的多元化和城市化。主站房主要空间引入城市化、社会化功能,为旅客提供商业、休闲、休息等多种设施和服务。站房本身已不仅仅局限于交通功能,更成为城市生活的一部分。

(5)展翅腾飞是青岛北站设计的立意基础。青岛北站造型立意海鸥在海滨展翅飞翔,寓示青岛博大的胸怀和广阔的发展前景,突出了“海边的站房”这一得天独厚的环境条件,使交通建筑的空间塑造与自然环境浑然一体,完美地体现了人与自然和谐相处的城市特点,又以独特的

建筑造型构成了青岛市的新地标,一座极具地域特征和视觉冲击力的交通建筑将为胶州湾海域增添活力。

3. 规划设计

将青岛北站站房置于城市站前大道尽端上,紧邻大海。轴线上的城市广场、站前广场、站房、站房后的广场延续空间,构成完整的景观序列,青岛北站成为城市轴线的对景,它对称的体形也强化了这一城市空间关系。

针对地形特点,形成对称的站场交通、景观形态。站前广场结合城市交通分东、西两个广场,主广场设在站房东侧,解决城市方向来的旅客进出站;西广场设在胶州湾高速公路与车站之间,解决胶州湾高速公路方向来的旅客进出站,形成完善的进出站交通空间。

整个站区环境开阔,空间丰富且具有层次,为进站人群提供了舒适的集散休闲场所。站前广场及城市广场以自然生态为主题,对应远处的碧海蓝天形成绿色生态的站区环境。具有强烈引导性和流动性的广场景观绿化,融入站房空间,再渗透出来汇入大海,整个站房犹如展翅欲飞的海鸥,给人无限的遐想和视觉映像。

4. 功能设计

青岛北站流线设计在满足传统候车式车站旅客活动模式的基础上,结合空间和平面布局,着重加强了客流的快速通过能力,充分考虑旅客的需求,进行功能流线的优化设计,创造舒适、优美、人性化的空间,为旅客提供细致入微的关爱,使车站成为功能完善、技术先进、经济合理、适应铁路发展和旅客需要的现代化交通建筑精品。

青岛北站为跨线式车站,全站设到发线 18 条(含正线 2 条、货线 2 条),有效长度按 650 m 设计。车站两边最外侧各设一个基本站台,分别采用 $500\text{ m}\times 15\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ 、 $450\text{ m}\times 12\text{ m}\times 1.25\text{ m}$,第二站台采用 $500\text{ m}\times 12\text{ m}\times 1.25\text{ m}$,其余 5 个中间站台采用 $450\text{ m}\times 12\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ 。

主站房主要空间设计考虑了足够的场所来处理进、出站层的多种功能,并将城市化、社会化的概念引入站房功能。在进站广厅、候车区等公共空间中为旅客提供商业、餐饮、休息等多种设施和服务,满足不同层次旅客的不同需要。结合候车室布置室内绿化有效地改善了候车环境。站房本身已不仅仅局限于交通功能,更成为城市生活的一部分。

青岛北站建筑平面采取高架候车的形式,采用“上进下出”的旅客流线,将车站功能空间划分为地下出站层、地面站台层、高架候车层三个层面。

地下出站层主要由出站厅及出站通道组成,旅客由站台经自动扶梯下至地下出站厅,检票后进入出站通道。出站旅客可在出站通道选择直接上至东西站前广场、东站房广厅及站前平台、地铁站厅及各地面停车场,实现各种功能的综合连接。

地面站台层东西两端均设置有进站广厅、售票等客运用房。其中东端客运用房中部为进站广厅,广厅右侧设售票用房,左侧设商业用房,使广厅成为综合利用空间,旅客由广厅经自动扶梯可直接到达高架候车层。贵宾候车室设于广厅左侧,具有独立的出入口,并可通过专用垂直电梯上至高架候车层,经进站走廊跨线到达站台。

高架候车层中部为高架候车区,东端设置有少量客运管理及设备用房,并设置有餐厅;西端设置有面海观景区。候车区内采用玻璃隔断划分出普通候车区、母子候车区和软席候车区等,适当引入室内绿化及楼板局部开孔,形成丰富、舒适的候车空间。

餐厅、观景休闲区等配套商业服务设施的设置,在大大提升青岛北站候车空间品质的同

时,也将海景车站的独特优势发挥到极致。

5. 建筑方案设计

(1) 地下一层

该层(相对标高为 -10.500 m)主要功能为铁路旅客到达的出站厅、综合换乘的大厅、地铁站厅、地下停车场,其平面图如图 1-2 所示。

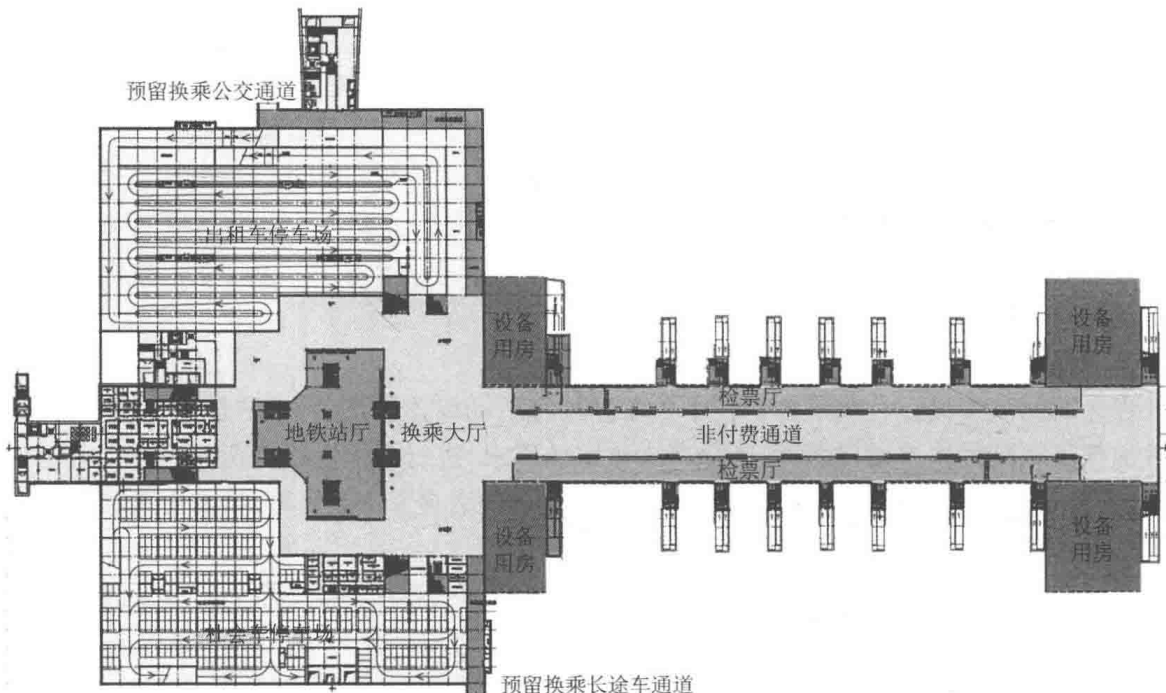


图 1-2 地下一层平面图(1:700)

出站厅为双柱三跨,中跨为城市通道,可连通站房东西广场及地下空间;两侧边跨为出站检票厅,铁路旅客从站台通过楼扶梯到达检票厅,检票后进入城市通道离站。

铁路设备管理用房设置于东西站房下方。

出站厅东侧为换乘大厅。换乘大厅东侧为地铁站厅,南侧为出租车停车场及公交换乘通道,北侧为社会车停车场及长途车换乘通道。铁路旅客出站后可通过换乘大厅选择地铁、出租车、社会车、长途车、公交车等多种交通方式进行换乘。

(2) 站台层

站台层(相对标高为 $\pm 0.000\text{ m}$)共 8 个站台,所有站台上均不设柱,所有雨棚及站房的结构柱均设于两条轨道的中央。每个站台均设两处进站楼扶梯,两处地下出站通道,以及两部连接高架候车层与站台层、站台层与出站大厅层的无障碍电梯。站台层平面图如图 1-3 所示。

西侧基本站台以外设置西站房,西站房中部为进站广厅和基本站台候车区,广厅内设置通向高架层的楼扶梯。西站房本层南侧为售票、工作人员办公区、卫生间,南侧夹层设置设备用房及信号专业用房;北侧为贵宾室、工作人员办公区、设备用房、卫生间,北侧夹层设置设备用房及信号专业用房。

东侧基本站台以外设置东站房,东站房中部为进站广厅和基本站台候车区,广厅内设置通