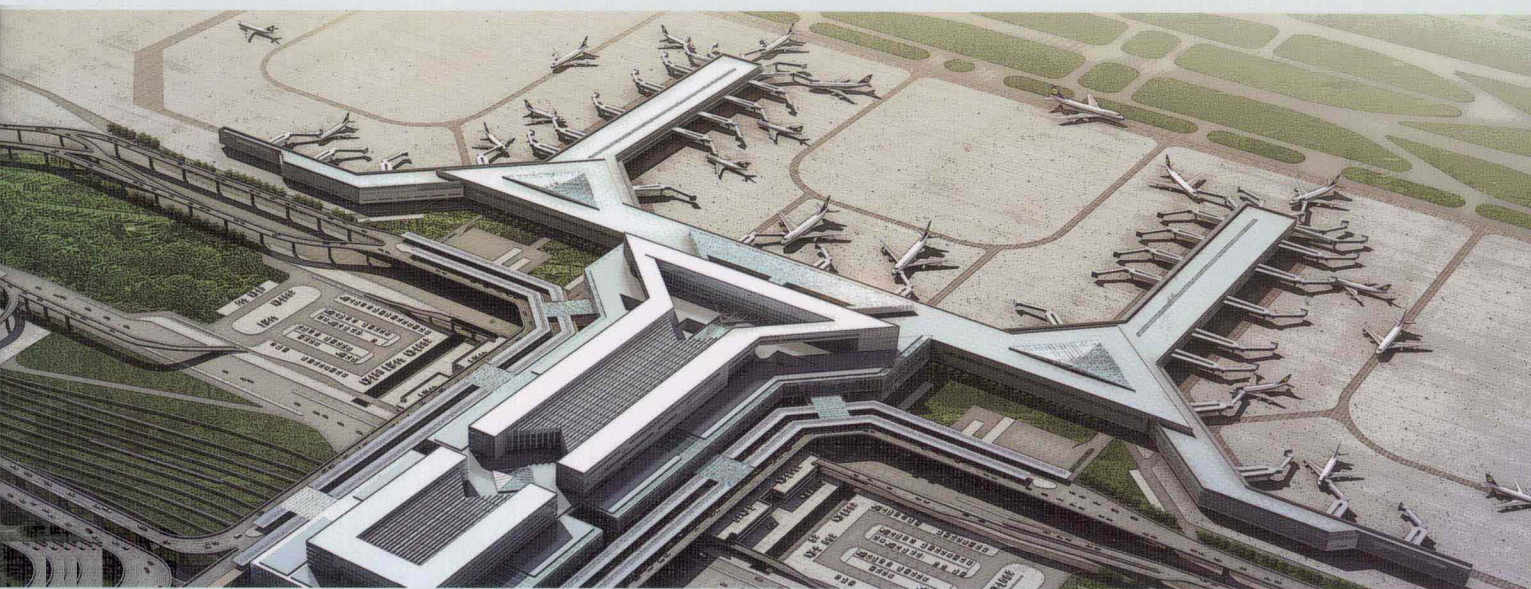


# 上海空港

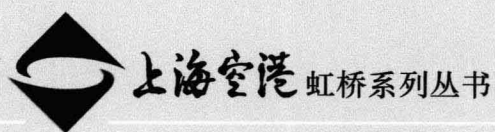
虹桥系列丛书

HONGQIAO  
ZONGHE JIAOTONG SHUNIU  
DIXIA GONGCHENG JISHU



## 虹桥综合交通枢纽 地下工程技术

主编 吴念祖  
出版 上海科学技术出版社



HONGQIAO  
ZONGHE JIAOTONG SHUNIU  
DIXIA GONGCHENG JISHU

# 虹桥综合交通枢纽地下工程技术

主编 吴念祖



上海科学技术出版社

上海空港虹桥系列丛书

虹桥综合交通枢纽地下工程技术

#### 图书在版编目(CIP)数据

虹桥综合交通枢纽地下工程技术/吴念祖主编. —上海:  
上海科学技术出版社, 2010. 2

(上海空港虹桥系列丛书)

ISBN 978-7-5478-0157-4

I. 虹... II. 吴... III. 交通运输中心—地下工程—  
工程技术—上海市 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 015273 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

苏州望电印刷有限公司印刷 新华书店上海发行所经销

开本 889×1194 1/16 印张 10.75 字数 222 千字 插页 2

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-0157-4/TU·23

印数:1—1 500

定价:98.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向承印厂联系调换

## 内容提要

本书以虹桥综合交通枢纽工程为背景,汇集了虹桥综合交通枢纽地下工程设计、施工、科研等主要研究成果,着重就三维地质信息系统、桩端后注浆钻孔灌注桩(抗压)技术及承载机理、扩底及桩侧后注浆钻孔灌注桩(抗拔)技术及承载机理、桩基工程施工控制、超大面积基坑工程的优化设计、超大基坑工程施工技术、地下结构设计与施工以及光传感技术等内容作了详细的论述,包括问题的产生、解决方案及最后的结论。

本书为编者结合上海岩土工程勘察设计院有限公司(简称上海岩土院)、华东建筑设计研究院(简称华东院)、上海建工集团总公司(简称上海建工)及铁道第三勘察设计院集团有限公司(简称铁三院)等的科研总结报告提炼而成,对虹桥交通枢纽地下工程遇到的难点及关键技术问题进行了系统的阐述,所述内容均为最新的地下工程技术,极具针对性,既有一定的广度,又有一定的深度,可供建筑、市政等领域从事地下工程科研、勘察、设计、施工、检测、监测、监理等工作的科技人员,以及高等学校的教师和学生参考应用。

上海空港虹桥系列丛书  
虹桥综合交通枢纽地下工程技术

## 编委会

### 封面题字

杨国庆

### 主编

吴念祖

### 副主编

李德润 刘武君

### 顾问编委

杨国庆 寿子琪 张光辉 刁永海 肖立元 钮晓鸣 何卫国 朱宁一  
俞吾炎 陈 龙 汪光弟 应根宝 曹文建 蔡 军 徐玉龙 景逸鸣  
王其龙 朱传松 胡建明 贾锐军 孙 立 张永东 姚亚波 沈 迪  
许首珽 秦 云 徐 征 李永盛 王中东 蒋作舟 刘观昌 夏丽卿  
叶可明 刘炳权 汪天翔 姚祖康 管式勤 Jeffrey Thomas(美)  
Ben Hasselman(荷) 是枝孝(日) Tony Mills(英)

### 编委

(以姓氏笔画为序)

马兴发 王 杰 王 斌 王坤之 王晓鸿 冉祥来 付如刚 西绍波  
华志坚 刘宝树 孙金科 李金良 吴庭毅 邱威尔 张志良 张海英  
张敏珠 陈宏凯 范庆国 林 晨 林建海 金德雄 周水森 郑悦峰  
赵 华 赵 青 姚 倩 贺胜中 秦灿灿 顾吉祥 柴震林 徐 晓  
徐建初 郭 强 郭建祥 唐洁耀 康 建 章亚军 寇怡军 董红江

### 本书编著

王其龙 唐洁耀 李金良 王晓鸿 陈丽蓉 王卫东 徐向辉  
高振锋 石 展 董政明 曹 锴 陈 晖 吴 超 田 宇  
米思兴 凌昌荣 陶 金 王伟良 吴江斌 孙俊岭

虹桥综合交通枢纽是包括航空、城际铁路、高速铁路、轨道交通、长途客运、市内公交等多种换乘方式于一体的综合枢纽,由东至西分布为二号航站楼、东交通广场(含南北车库)、磁浮、高铁、地铁西站、西交通广场(南北车库)、西延伸、西西延伸等单体,地铁2号、10号、20号以及5号、17号线分别从地下二层、地下三层贯通整个枢纽。各单体施工在平面、时间和空间上相互重叠、纵横交错,基坑开挖总面积高达52万 $\text{m}^2$ ,基坑东西长2000m,南北最宽600m,开挖深度7.8~29m,施工难度大,地下工程量巨大,施工周期长,基坑暴露时间长。

鉴于本工程地下工程的复杂性,上海机场建设指挥部得到了上海市科委的重点支持(合同编号:07DZ12006),联合上海岩土工程勘察设计院有限公司(简称上海岩土院)、华东建筑设计研究院有限公司(简称华东院)、上海建工建团总公司(简称上海建工)、铁道第三勘察设计院集团有限公司(简称铁三院)分别进行了地下工程设计、施工、监测以及半开敞空间环境下动载作用结构层关键技术研究、地下工程与结构一体化设计关键技术研究等。

本书以虹桥综合交通枢纽工程为背景,汇集了虹桥综合交通枢纽地下工程设计、施工、科研等主要研究成果,主要就以下问题作了详细介绍:

- (1) 绪论,简要介绍虹桥综合交通枢纽整个工程概况及各个单体建筑物的性质及规模,并就地下工程特点作了几点阐述;
- (2) 工程地质及水文地质条件,介绍整个场地的地形、地貌及土层分布特征,并重点介绍面向应用的真三维空间数据管理平台——三维地质信息系统;
- (3) 桩基工程优化设计,首先根据建筑物的荷载特点及工程地质特征,初步确定桩基方案,然后利用原位静载荷试验和数值模拟,对新型抗压和抗拔桩进行了分析,并以此为依据确定了最终的桩基设计方案;
- (4) 桩基工程施工,结合桩基工程的特点,详细介绍施工过程中所采取的关键控制措施,同时

对各类常见桩基工程质量问题提出处理及预防措施；

(5) 基坑工程优化设计,根据基坑特点及周边环境条件等因素,进行围护方案的初步选型,并利用通用软件建立有限元模型对该方案进行了计算分析,从而确定了最终的基坑设计方案,最后将监测结果与计算得到的结果进行对比分析；

(6) 超大基坑工程施工技术,从基坑工程的特点出发,详细介绍基坑施工的关键技术路线,重点阐述特殊施工技术措施；

(7) 地下结构设计与施工,介绍虹桥枢纽工程应用的基坑、基础与结构一体化设计理念；及地下结构施工中的关键施工技术；

(8) 光传感检测技术,这是上海乃至国内首次将该技术应用于国家重大工程桩基检测中,本书对其原理、埋设及检测结果等作了较为详细的介绍。

在本书脱稿付梓之际,我们要感谢所有支持和鼓励本书出版的人。

在本书撰写过程中,上海机场建设指挥部刘武君总工程师给予了极大的关心和指导,每当书稿编制遇到资料不全、进展困难,或对某个章节内容产生疑惑时,刘总总是第一时间组织会议,共同研讨关键问题,提出解决问题的思路与方法,并尽力协助搜集各种宝贵资料和文献,使得本书的编制能顺利进行下去,并最终完成本书的文稿。

感谢上海岩土院陈丽蓉、许丽萍、陈晖、丁元陶、崔永高、唐坚、褚伟洪、徐枫、魏建华、吴超对本书出版的无私奉献,他们在整本书的构思、编排、校核等方面都给予了极大的帮助,在上海岩土院领导的重视下,他们专门成立了编写小组,全身心地投入到本书的编写工作当中。本书的第2、3、5和8章的大部分内容都摘自上海岩土院的课题报告。上海岩土院对本书倾注了大量的心血,对整本书的出版具有至关重要的作用。

感谢华东院王卫东、吴江斌、翁其平、宋青君、徐中华、李进军对本书出版的热情支持,本书的

第 3、5 章的部分内容摘自华东院的课题报告,在本书定稿之前,华东院对本书内容提了许多宝贵建议。

感谢上海建工高振锋、徐敏、王伟良、杨志强、陶金、梁其家、朱旭东、华士辉、张学进、赵大鹏、黄新、邹腾辉对本书出版的大力支持,本书的第 4、6 和 7 章的大部分内容均由上海建工提供,他们的总结精彩至极,字字精炼,提高了本书内容的丰富性和可读性。

感谢铁三院索晓明、徐向辉、孙俊岭、张建新、薛清鹏、张晓磊、张万忠、唐虎对本书出版的全力帮助,本书第 5、7 章部分内容 by 铁三院提供。

我们想还能列出长长的感谢名单,即使再列出更多,依然可能疏忽许多需要感谢的人。在这里我们借用一句话:与其感谢您们当中的一些人,还不如让我们默默地给您们每个人送去谢意。

如果说 19 世纪是大量铁路兴建的世纪,20 世纪是一座座桥梁架立的世纪,那么 21 世纪就是大规模地下空间开发的世纪,地下工程在整个土木工程领域占据的位置越来越重要,地下工程也是以后重点研究和发展的领域,希望本书能对我国的地下工程事业作一份贡献,对相关技术人员有一定的指导和借鉴意义。

编 者

2009 年 12 月



## 第1章 概 述

1

## 第2章 工程地质及水文地质条件

7

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 2.1   | 地形、地貌          | 8  |
| 2.2   | 工程地质特征         | 8  |
| 2.2.1 | 土层构成与特征        | 8  |
| 2.2.2 | 工程地质结构分区       | 9  |
| 2.3   | 水文地质特征         | 13 |
| 2.3.1 | 水文地质参数         | 13 |
| 2.3.2 | 地下水、土对建筑材料的腐蚀性 | 15 |
| 2.4   | 三维地质信息系统       | 15 |
| 2.4.1 | 系统建设           | 15 |
| 2.4.2 | 系统特点           | 16 |
| 2.4.3 | 主要功能           | 17 |

## 第3章

### 桩基工程优化设计

23

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 3.1   | 桩基工程概念设计           | 24 |
| 3.1.1 | 桩型的选择              | 24 |
| 3.1.2 | 桩基持力层的选择           | 26 |
| 3.2   | 抗压桩优化设计            | 29 |
| 3.2.1 | 桩端后注浆钻孔灌注桩技术       | 29 |
| 3.2.2 | 桩端后注浆静载荷试验         | 30 |
| 3.2.3 | 桩端后注浆承载特性的数值模拟     | 35 |
| 3.2.4 | 桩端后注浆抗压桩小结         | 38 |
| 3.3   | 抗拔桩优化设计            | 38 |
| 3.3.1 | 新型抗拔桩技术            | 38 |
| 3.3.2 | 扩底与桩侧后注浆静载荷试验      | 40 |
| 3.3.3 | 扩底桩与桩侧后注浆承载特性的数值模拟 | 46 |
| 3.3.4 | 扩底与桩侧后注浆抗拔桩小结      | 49 |
| 3.4   | 桩基设计方案             | 49 |

## 第4章

### 桩基工程施工

53

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 4.1   | 工程要点及工程桩的施工控制      | 54 |
| 4.1.1 | 工程要点               | 54 |
| 4.1.2 | 大规模工程桩的施工控制        | 56 |
| 4.2   | 技术创新及关键技术          | 60 |
| 4.2.1 | PHC 预制管桩大深度送桩      | 60 |
| 4.2.2 | 超长落低钻孔桩的成孔和混凝土浇筑控制 | 60 |
| 4.2.3 | 后注浆钻孔桩的施工全过程控制     | 62 |
| 4.2.4 | 扩底钻孔桩扩底钻头的应用和控制    | 64 |
| 4.2.5 | 大落深工具式格构柱的应用       | 67 |
| 4.3   | 质量问题处置及应急预防措施      | 69 |
| 4.4   | 施工质量检测             | 72 |

## 第5章

### 基坑工程优化设计

73

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 5.1   | 基坑工程概况         | 74 |
| 5.2   | 基坑总体方案概念设计     | 78 |
| 5.3   | 基坑工程数值模拟计算分析   | 82 |
| 5.3.1 | 基坑开挖的土体本构模型选取  | 82 |
| 5.3.2 | 基坑围护体系数值模拟研究   | 87 |
| 5.3.3 | 大面积多梯次围护体系设计方法 | 96 |
| 5.4   | 基坑围护设计方案       | 97 |
| 5.5   | 计算结果与监测数据对比分析  | 99 |

## 第6章

### 超大基坑工程施工技术

105

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 6.1   | 施工特点与难点                 | 106 |
| 6.2   | 技术路线                    | 107 |
| 6.2.1 | 测量网布置                   | 107 |
| 6.2.2 | 支撑施工工艺的确定               | 109 |
| 6.2.3 | 基坑围护施工操作面确定             | 109 |
| 6.2.4 | 重力坝及加固的施工工艺             | 111 |
| 6.2.5 | 钻孔桩、重力坝及加固、地墙、降水交叉施工的安排 | 111 |
| 6.2.6 | 土方开挖流程                  | 112 |
| 6.3   | 施工技术措施                  | 116 |
| 6.3.1 | 降水试验及施工                 | 116 |
| 6.3.2 | 信息化施工                   | 121 |
| 6.3.3 | 磁浮交界面六级放坡处理             | 124 |
| 6.4   | 工程总体评价                  | 127 |

## 第7章

### 地下结构与施工

129

|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 7.1   | 基坑、基础与结构一体化设计 | 130 |
| 7.1.1 | 一体化概念的提出      | 130 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.1.2 | 一体化设计概况 .....              | 130 |
| 7.1.3 | 支护结构与主体结构相结合的设计分析与研究 ..... | 132 |
| 7.2   | 关键施工技术 .....               | 137 |
| 7.2.1 | 超长耐久性外墙、内衬墙结构抗裂控制 .....    | 137 |
| 7.2.2 | 动荷载大截面劲性梁、柱施工技术 .....      | 140 |
| 7.2.3 | 巨型钢管柱混凝土灌芯施工技术 .....       | 143 |

## 第 8 章

### 光传感检测技术

---

|     |                 |     |
|-----|-----------------|-----|
| 8.1 | 光传感技术测试原理 ..... | 148 |
| 8.2 | 光传感器的埋设 .....   | 152 |
| 8.3 | 测试结果 .....      | 152 |

## 结 语

---

157

# 第 1 章

## 概 述

虹桥综合交通枢纽涵盖航空港、高速铁路与城际铁路、磁浮、城市轨道交通、长途客运中心和出租车等多种交通方式,是轨、路、空三位一体的日旅客吞吐量 110 万人次的超大型世界级交通枢纽。其特性体现在 6 种交通方式之间存在 56 种换乘模式,将“零换乘”的便捷带给每一位旅客。

虹桥综合交通枢纽的重要性不仅在于其换乘功能,更在于它的建成将形成一个全新的现代化服务业集聚区。该区域建成新的商务中心后,将有助于缓解中心城区压力,疏散城区人口,改善城市建设和居住条件,降低商务成本,使其成为面向江浙两省的总部经济聚集地、新的城市商务活动聚集地以及未来上海城市发展的亮点。虹桥综合交通枢纽全景效果如图 1-1 所示。

核心区内各主要功能主体的平面布局由东向西依次为:二号航站楼、东交通广场、磁浮车站、高铁车站、西交通广场,如图 1-2 所示。轨道交通进入枢纽的线路为 2 号线、10 号线、17 号线、5 号线、青浦线。其中 2 号线与 10 号线为由东向西由地下二层穿越枢纽核心区,分别在东、西两个交



图 1-1 虹桥综合交通枢纽全景效果图

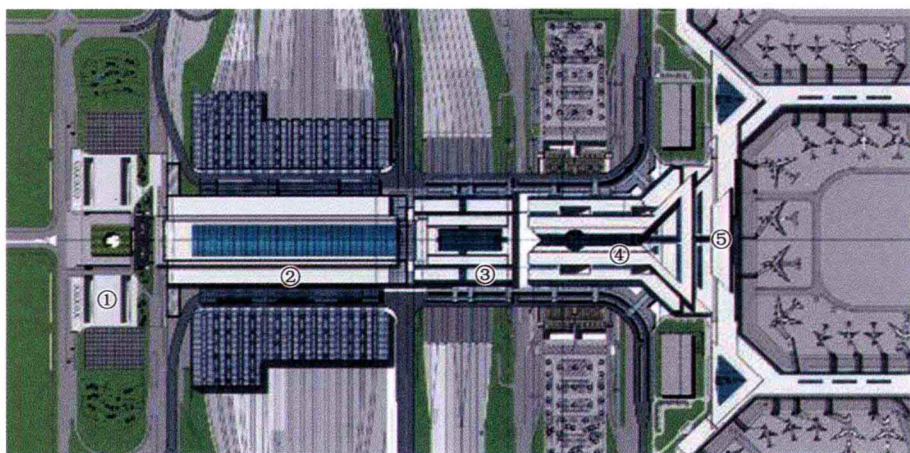


图 1-2 核心区主要功能主体平面布局

①—西交通广场;②—高速火车;③—磁浮虹桥站;④—东交通广场;⑤—二号航站楼

通广场位置设站;17号线与5号线南北向由地下交于高铁西侧,并与2号线及10号线形成换乘站。青浦线由西向东从轴线大道地下层进入枢纽西侧,与其余轨道线换乘。

虹桥综合交通枢纽总规划面积约 26.26 km<sup>2</sup>,包括 5 个单项工程,每个单项工程的层数、建筑面积和高度见表 1-1。在标高+0.000 m 和+12.150 m 层,分别有道路和高架桥把整个交通枢纽和车辆交通联系在一起。

表 1-1 各建筑单体规模一览表

| 单 项 工 程 名 称 | 层 数 | 建 筑 面 积 (万 m <sup>2</sup> ) | 高 度 (m) |
|-------------|-----|-----------------------------|---------|
| 二号航站楼       | 9   | 34.8                        | 42.85   |
| 东交通广场       | 11  | 31                          | 42.85   |
| 磁浮虹桥站       | 11  | 17                          | 42.85   |
| 高铁车站        | 5   | 28.9                        | 40      |
| 西交通广场       | 3   | 17.4                        | 地下      |

### 1. 枢纽核心区平面布局

虹桥综合交通枢纽各场、站的合理布局和各种交通方式的融入使之成为一个高效、有机、和谐的综合交通系统,东起虹桥国际机场二号航站楼,向西依次平行排列社会停车库/公交巴士东站、磁浮车站、高速铁路车站、城际铁路车站、地下社会停车库/公交巴士西站等各类交通设施,这样的布置充分体现了城市公共交通体系的共享原则。在该枢纽中,铁路、机场负责城市的对外交通,与负责市内客流集散的地铁、公交、机场快线等城市公共交通体系有机衔接。磁浮车站的站厅层与铁路、机场同层面对接,保证与对外交通的方便换乘。机动车量根据旅客流向分别设置在东西交通广场和高架车道边(交通中心),两者紧密联系,充分发挥各交通方式的优势,实现综合交通枢纽的系统功能。

### 2. 枢纽核心区竖向布局

虹桥综合交通枢纽核心区交通建筑共分为 4 个主要层面,如图 1-3,图 1-4 所示。

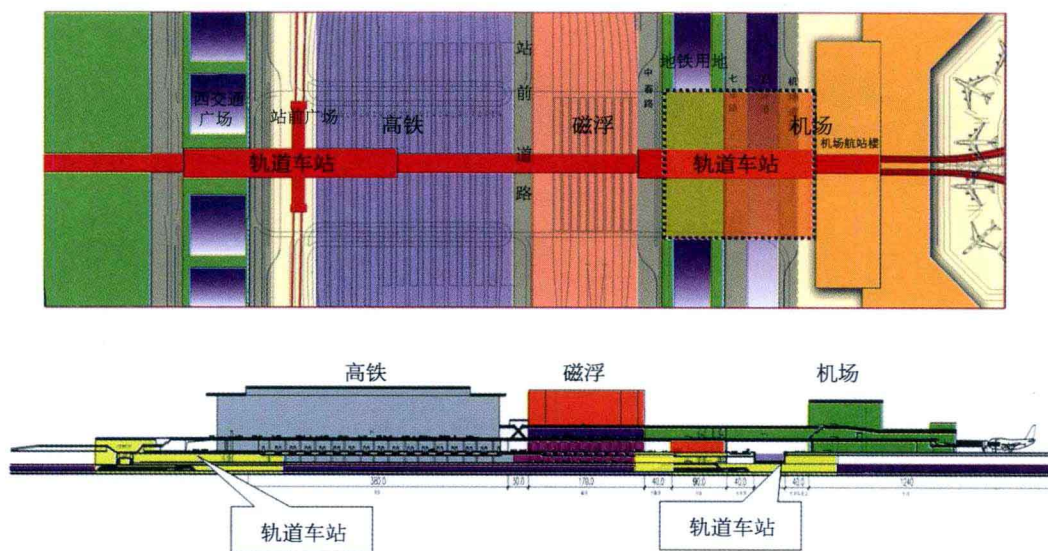


图 1-3 枢纽建筑体竖向层面布置图

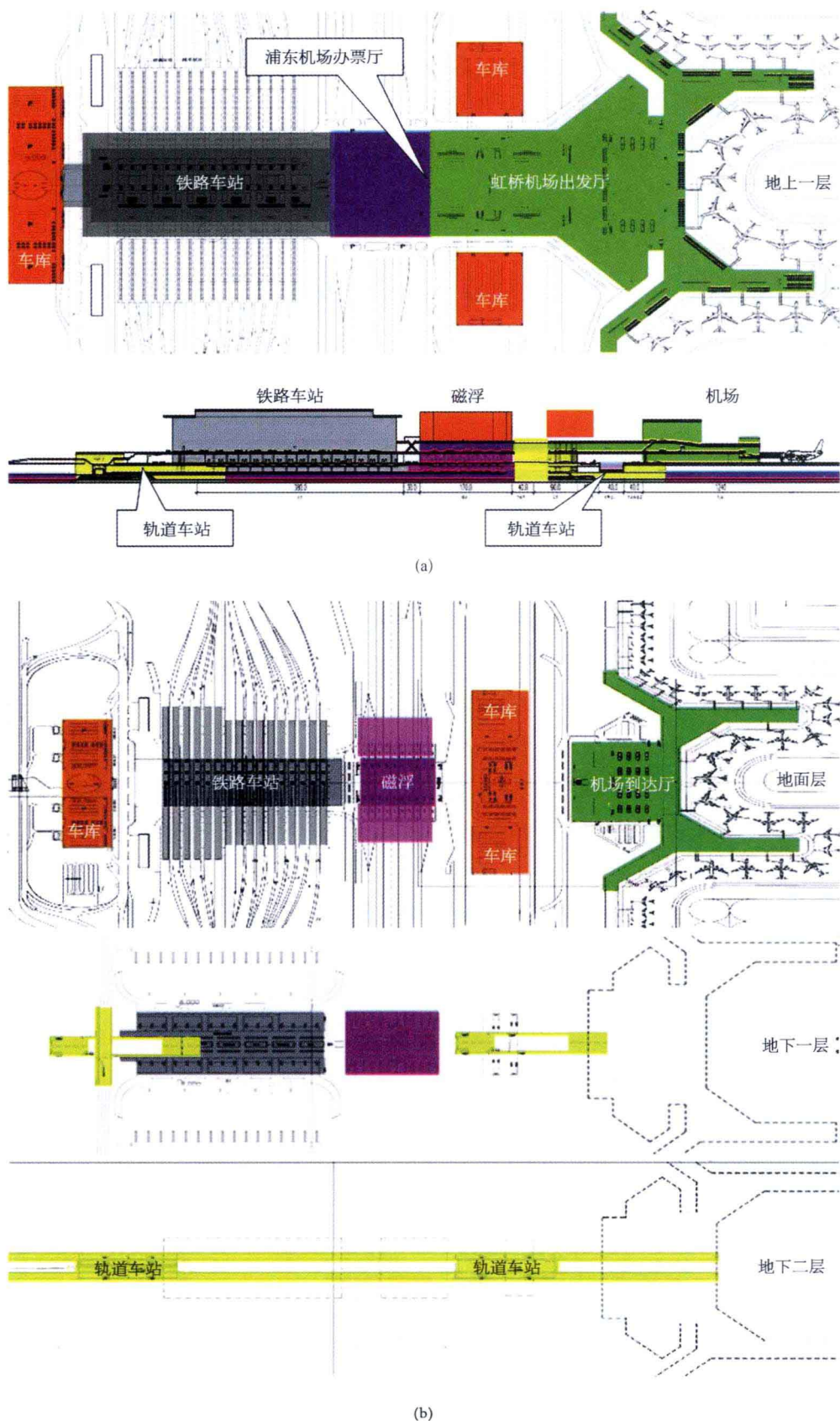


图 1-4 枢纽核心区不同层面的布局