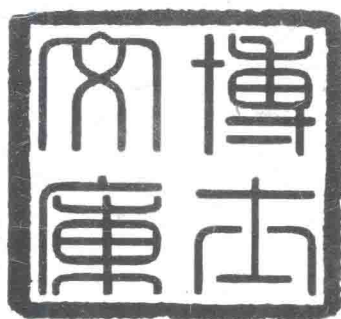


博士文库



在建地铁车站对紧邻既有结构物的 影响分析与变形控制措施探讨

武科 高明 刘金龙 著

ZAIJIAN DITIECHEZHAN DUI JINLIN JIYOU JIEGOUWU DE
YINGXIANG FENXI YU BIANXING KONGZHI CUOSHI TANTAO



海洋出版社



博士文库

在建地铁车站对紧邻 既有结构物的影响分析与 变形控制措施探讨

武科 高明 刘金龙 著

海洋出版社

2015年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

在建地铁车站对紧邻既有结构物的影响分析与变形控制措施探讨/武科, 高明, 刘金龙著. —北京: 海洋出版社, 2015. 8

(博士文库)

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9211 - 4

I. ①在… II. ①武… ②高… ③刘… III. ①地下铁道车站 - 工程施工 - 影响 - 既有铁路 - 研究 - 深圳市 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 177930 号

责任编辑: 朱瑾 任玲

责任印制: 赵麟芬

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司 新华书店发行所经销

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 9

字数: 142 千字 定价: 30.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

随着中国大型与超大型城市规模的不断扩大，城市开发强度的提高，城市人口密度的快速增长，不仅城市地面建筑密集发展，而且城市地下空间也逐步大规模得以开发利用。城市地下交通枢纽工程已成为一种重要的城市地下空间结构，为城市居民提供了便捷的交通换乘。而作为地下交通枢纽主体结构建设型式，大型深基坑工程不得不面临紧邻地面或地下既有结构的工程建设和难点。新建交通枢纽地下结构紧邻既有结构的建设过程中，除了保证深基坑的自身稳定和安全外，最主要目标在于如何控制既有结构的变形，将其限制在安全运营许可的范围内，在保证既有结构正常运转的条件下实现基坑的安全施工，这个要求可能要远远高于基坑结构安全与地层稳定对于施工的要求。因此保证既有结构的安全运转是紧邻既有结构工程的建设重点和难点，而保证基坑工程的施工安全又是保证既有结构及周边建筑物及地下管线安全的前提和基础。

本书作者依托深圳市新建地铁 11 号线车公庙交通枢纽建设中的深基坑工程，重点阐述了地铁车站侧穿既有原有地铁 1 号线车站和丰盛町地下商业街的变形规律研究方法，提出了有效的变形控制措施，以期能为地铁车站侧穿既有地下结构工程建设提供借鉴和参考。本书中有些内容也只是初步成果，目前正在进行更深入的研究工作。

由于作者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者提出宝贵的意见。

作者

2015 年 7 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 选题背景与意义	(1)
1.2 地铁车站基坑工程的研究现状	(1)
1.2.1 现场实测	(2)
1.2.2 理论分析	(3)
1.2.3 室内试验研究	(4)
1.2.4 经验类比法	(5)
1.2.5 变形控制措施	(5)
1.2.6 存在的主要研究问题	(6)
1.3 主要内容	(6)
2 工程背景及其周边环境分析	(8)
2.1 工程概况	(8)
2.2 工程地质及水文地质概况	(15)
2.2.1 地理位置及地形地貌	(15)
2.2.2 工程地质情况	(16)
2.2.3 水文地质情况	(16)
2.3 基坑岩土问题及处理措施	(18)
2.3.1 填土层上层滞水的影响及防治	(18)
2.3.2 岩土体的软化	(18)
2.3.3 基坑边坡变形	(18)
2.3.4 渗透变形	(18)
2.4 对周边环境的影响	(18)
3 基于现场实测方法的在建车站侧穿既有地下结构的变形规律研究	(20)
3.1 现场监测	(20)
3.1.1 监测目的	(20)

3.1.2	监测频率及控制标准	(21)
3.1.3	监测数据处理及反馈	(21)
3.2	基于现场实测数据分析的深基坑围护结构变形规律	(22)
3.2.1	水平位移分析	(22)
3.2.2	沉降变形分析	(24)
3.2.3	倾斜变形分析	(26)
3.2.4	紧邻既有地下结构沉降变形分析	(29)
3.3	小结	(31)
4	基于数值计算方法的在建车站侧穿既有地下结构的变形规律研究	(32)
4.1	PLAXIS 有限元分析软件	(32)
4.1.1	前处理功能	(33)
4.1.2	计算分析功能	(33)
4.1.3	后处理功能	(34)
4.1.4	土体硬化模型(HS)	(34)
4.2	数值计算模型	(35)
4.2.1	基本假定与计算范围	(35)
4.2.2	岩土体工程力学参数	(37)
4.2.3	基坑施工过程模拟	(38)
4.3	数值模拟计算结果分析	(40)
4.3.1	矢量分析	(40)
4.3.2	应变分析	(45)
4.3.3	应力分析	(54)
4.3.4	毗邻地下结构倾斜变形分析	(64)
4.4	小结	(67)
4.4.1	地下水对于深基坑建设的影响分析	(67)
4.4.2	施工工法对于深基坑建设的影响分析	(68)
4.4.3	在建地铁车站深基坑围护结构倾斜变形分析	(68)
5	基于模型试验方法的在建车站侧穿既有地下结构的变形规律研究	(70)
5.1	概述	(70)

5.2	模型试验的相似理论	(70)
5.2.1	相似判据的推导	(71)
5.2.2	模型试验相似理论	(73)
5.3	相似材料的研制及相关力学试验	(74)
5.3.1	相似材料的研制	(75)
5.3.2	相似材料的力学试验	(76)
5.4	模型试验装置	(80)
5.5	地铁车站深基坑施工过程试验研究	(82)
5.5.1	模拟范围	(82)
5.5.2	相似材料	(82)
5.5.3	试验过程	(83)
5.6	试验结果分析	(84)
5.6.1	应力分析	(85)
5.6.2	围护结构倾斜分析	(88)
5.6.3	既有地下结构失稳模式	(90)
5.7	小结	(91)
6	在建车站侧穿既有地下结构的变形控制措施研究	(93)
6.1	车公庙交通枢纽施工方案与方法	(93)
6.1.1	总体施工方案	(93)
6.1.2	车站主体围护结构施工方案	(94)
6.1.3	车站基坑降水与土石方工程施工	(96)
6.1.4	车站主体结构施工	(96)
6.2	施工方案比选	(101)
6.2.1	明挖顺筑法	(101)
6.2.2	盖挖逆筑法	(109)
6.2.3	与现场实测、模型试验结论对比	(116)
6.3	围护结构参数的影响	(117)
6.3.1	厚度分析	(117)
6.3.2	支撑轴力分析	(120)
6.4	变形控制措施	(121)
6.4.1	深基坑施工影响范围的确定	(121)

6.4.2	周围环境调查	(123)
6.4.3	车公庙地铁车站深基坑施工对紧邻既有地下结构的变形 控制措施	(124)
6.5	小结	(126)
7	结论	(127)
	参考文献	(129)

1 绪 论

1.1 选题背景与意义

随着中国大型与超大型城市规模的不断扩大,城市开发强度的提高,城市人口密度的快速增加,不仅城市地面建筑密集发展,而且城市地下空间也逐步大规模的开发利用。地下交通枢纽工程已成为一种重要的城市地下空间结构,为城市居民提供了便捷的交通换乘。而作为地下交通枢纽主体结构建设型式,大型深基坑工程不得不面临紧邻地面或地下既有结构的工程建设问题和难点^[1]。新建交通枢纽地下结构紧邻既有结构的建设过程中,除了保证深基坑的自身稳定和安全外,最主要目标在于如何控制既有结构的变形,将其限制在安全运营许可的范围内,在保证既有结构正常运转的条件下实现基坑的安全施工,这个要求可能要远远高于基坑结构安全与地层稳定对于施工的要求^[2,3]。因此保证既有结构的安全运转是紧邻既有结构工程的建设重点和难点,而保证基坑工程的施工安全又是保证既有结构及周边建筑物及地下管线安全的前提基础。

1.2 地铁车站基坑工程的研究现状

深基坑工程作为地铁车站建设的主体结构型式,不仅涉及经典土力学理论的介质强度、基坑稳定与开挖变形等问题,还涉及岩土体与支护结构相互作用、时空效应等难点^[4]。实践表明,深基坑工程这个历来被认为实践性很强的岩土工程问题,发展至今天,迫切需要理论来指导、充实和完善,同时也应针对各个工程的具体特点开展相关的理论与实践活动^[5-7]。尽管国内外对基坑开挖与支护问题进行了大量的研究,然而由于基坑工程存在大量的不确定性因素,不确定性因素的存在,导致目前基坑工程中存在理论上的一些问题,如基坑的稳定性、支护结构的内力和变形以及对周

围建（构）筑物的影响及保护的计算分析，目前尚不能准确地得出定量的结果^[8,9]。作为研究深基坑施工工艺与支护措施的研究手段，已形成了现场实测、理论分析、室内试验研究、经验类比法四种方法。

1.2.1 现场实测

深基坑工程现场实测是采用多种现场监测仪器对深基坑建设期间围护结构与周边环境开展了围护结构内力、支撑轴力、倾斜变形、地表沉降、地下水位等实时监测与分析，以此掌握围护结构与周边环境在基坑开挖过程的动态变化特征，对深基坑工程的施工给予一个综合性的安全评价^[10-14]。近年来，深基坑工程监测水平有了很大提高，监测手段不断多样化，监测项目不断多层次化以及监测仪器逐渐先进化促使监测的精度不断提高，对于监测数据的处理分析也有了不小的进展^[12-15]。

国外针对深基坑工程的现场实测最新研究如下，Lam S. Y.^[16]通过分析深基坑施工期围护桩倾斜监测数据，揭示了深基础工程施工的破坏机理。Lavrov I. V.^[17]依托墨西哥医院大楼深基础工程，通过围护结构的变形与受力监测，建立了深基础工程破坏与工程地质共同评判的准则。Capelo Antônio^[18]通过现场监测改良土 CSM 在深基坑支护体系中的效果，提出了深基坑数值模拟的计算模型。Sundaram Ramesh^[19]通过建立结构健康诊断系统，开展了深基础工程建设期间和运营期间的变形监测，评估了深基础结构的稳定性。同时，国内所开展最新的深基坑工程现场实测研究如下：刘亚龙^[20]基于 FLAC3D 有限差分法，针对深基坑工程开展了数值模拟，探讨了围护结构失稳破坏模式。李磊^[21]以南昌地铁艾溪湖东站深基坑工程为研究对象，对现场施工过程的监控量测数据进行分析，重点研究深基坑施工过程中围护结构的水平变形随基坑开挖深度和时间的变化规律。刘杰^[22]以某城市大型地铁车站基坑为研究背景，对基坑围护结构及其变形监测方案进行了设计，并对基坑围护结构变形的现场监测数据进行了分析，重点分析了基坑施工过程中围护结构的水平变形随基坑开挖深度和时间的变化规律。周克勤^[23]结合北京某地铁车站深基坑围护结构桩体变形监测工程，通过公式推导得出桩体变形机理，利用实测数据对基坑的桩体水平位移变化值进行了统计分析，得出了在不同开挖时期桩体变形规律。王伟^[24]以合肥轨道交通 1 号线试验段 I 标为研究对象，通过现场实测，分析了基坑的

水平位移、竖直位移、地下水位及支撑轴力随着时间及空间的变形规律。高立新^[25]以北京地铁奥运支线折返线车站深基坑为研究背景，依据监测资料，重点分析围护桩变形监测数据和基本规律；将钢支撑受力情况和桩体变形相结合分析，研究围护结构各部分的协同作用。

1.2.2 理论分析

深基坑开挖支护稳定性理论分析主要是通过建立理想的数学力学模型，采用解析计算方法和数值模拟分析法开展理论研究。由于岩土工程介质的复杂性和解析解数学求解的困难性，致使很多深基坑工程问题的解析解很难得到解析解^[26]。与此同时，基于高性能计算机和数学仿真方法，将岩土工程模型在计算机平台上进行研发和分析，以此寻找到工程问题的近似解答已成为岩土工程理论研究的主要技术手段^[27]。因此，目前对穿越工程的理论分析研究一般都采用数值法，即利用大型数值分析软件（例如 ANSYS、FLAC3D 等），建立数学力学模型进行计算。该方法已在国内外相关研究中得到广泛使用^[28,29]。

国外针对深基坑工程的理论分析最新研究如下：Valizadeh Kivi A^[30]基于三维有限元数值计算分析方法，采用梁单元模拟基坑支护体系，研究了地铁车站施工过程中地表变形规律和支护系统受力特点。Castaldo P^[31]采用概率分析方法，针对地铁车站修建过程中对周边建筑物产生的影响的数值计算结果，开展了损伤破坏分析。Romani E^[32]针对地铁车站施工过程开展了数值模拟与现场监测，通过对比论证两种分析方法的结果，揭示了地铁车站建设过程中地表变形规律。Yang Q. J.^[33]基于数值计算分析方法，探讨了岩土体各种力学参数对地铁车站结构设计的影响效应。Thompson Mark J.^[34]针对深基础工程，通过建立数值计算模型，研究了深基础工程施工过程中的各种损伤破坏因素。同时，国内所开展最新的深基坑工程理论分析研究如下：唐长东^[35]以某紧贴地铁车站的深基坑工程为背景，采用三维有限元法数值分析手段，动态模拟了该深基坑工程的施工全过程。张明聚^[36]通过建立数值计算模型，对多种预加轴力加载方案中桩身水平变形进行对比分析，研究了支撑刚度变化与围护结构变形的关系、围护桩刚度变化与围护结构变形的关系。李佳宇^[37]以南宁轨道交通一号线广西大学站基坑工程为背景，应用 FLAC3D 数值计算软件对基坑开挖的全过程进行模拟分

析,研究了圆砾层中地铁车站深基坑的连续墙水平变形及周围地表沉降变形特征。李培楠^[38]以上海轨道交通9号线宜山路站换乘通道下穿轻轨3号线车站的基坑工程为背景,建立三维数值分析模型,对基坑施工进行全过程动态模拟。黄佳^[39]以北京地铁7号线六标为工程背景,采用大型有限元软件 ANSYS 对洞桩法小导洞开挖和主体结构施工两个重要施工工序进行数值模拟。王海洋^[11]以地铁10号线二期公主坟站穿越1号线公主坟站工程穿越案例为依托,通过三维有限元软件 ANSYS 进行数值模拟分析,并对比现场实测数据,分析穿越地铁工程引起的地铁结构变形及轨道几何形位的变化规律。褚峰^[40]以上海地区一紧邻地铁枢纽的超深基坑工程为分析对象,考虑土体的小应力刚度特性,建立地铁区间隧道和邻近基坑的二维有限元分析模型,探讨了土体小应变条件下超深基坑的变形特征。

1.2.3 室内试验研究

深基坑室内试验通常包括普通相似模拟实验和离心相似模拟实验,基于相似理论,采用相似材料模拟真实材料,通过模型试验装置模拟深基坑施工过程,探讨深基坑开挖支护稳定性^[41,42]。对于紧邻既有地下结构的深基坑工程而言,主要采用相似模拟实验。相似模拟实验的优点是可以人为控制和改变实验条件,定性的反映出力学模型的规律,从而能明确单因素或多因素对问题的影响规律,效应直观清楚,周期短、见效快。另外室内试验可以重复且可以做破坏性实验,这是现场所不能的;缺点是相似准则不易满足,边界条件和初始条件也只能近似,在定量分析方面模型试验还存在一定的困难^[43]。

Bransby 等^[44]对砂土中的悬臂式板桩利用室内模型试验研究了板桩和土体在开挖过程受力和变形特性并研究了土与墙之间的接触面和光滑程度、土的性质对挡墙侧移和基坑周围土体沉降的影响。Bolton 和 Steedman 等^[45]用模型试验研究了基坑失稳前地下连续墙的性能,土与维护结构的相互作用以及土体位移墙体位移以及孔隙水压力的分布规律。漆泰岳^[46]针对修建大跨度地铁车站的工法优化对地表沉降的影响,首先应用数值模拟方法对5种工法进行优化比选,初步确定8步工法为最优工法,然后应用模型试验验证该工法。凌道盛^[47]为揭示地下结构地震破坏机理,采用离心机振动台试验模拟地铁车站地震破坏过程。李围^[48]采用相似模型试验,进行

了在盾构隧道基础上扩挖建成三连拱隧道地铁车站的施工方案研究。梁发云^[49,50]以上海某紧邻地铁隧道的深基坑工程为背景,采用离心模型试验,研究开挖过程中地下连续墙和隧道结构的变形特性。马险峰^[51]结合上海轨道交通某线路越江隧道修复工程,开展了超深基坑开挖的离心模型试验,得出了在使用地下连续墙围护结构条件下,在压缩性高、孔隙比大、强度低等特点的冲淤沉积地层中超深基坑开挖时围护结构的变形、周围地层的变形、支撑内力以及挡墙前后土压力等的变化规律。

1.2.4 经验类比法

深基坑经验类比法基于类似工程或专家经验,通过系统总结和概述,研究深基坑开挖支护稳定性^[52]。该类方法在实际研究工作中使用较少,另外考虑到本工程的特殊性,更需要注重施工工法与规模,与既有地下结构的位置关系,所处区域的工程水文地质情况等多因素。

1.2.5 变形控制措施

随着城市立体空间的不断开发,城市地面和地下既有结构会越来越密集,城市地铁站深基坑工程不可避免地紧邻既有结构建设,造成深基坑建设本身和紧邻的既有结构都会存在很高的安全风险^[53]。工程建设期间,不仅要保证在建工程的安全稳定,而且要保证紧邻既有结构的安全运营要求。因此,对于车站深基坑施工引起紧邻既有结构变形控制要求是非常严格的。施工过程中必须对风险因素进行分析、控制,使施工对紧邻既有地下结构的影响控制到最低水平,保证运营安全的万无一失^[54]。目前,国内外地铁类似工程主要的施工控制措施有主动控制和被动控制两种。主动控制主要是控制施工参数,包括开挖工艺、开挖面稳定控制、支护结构与安装、同步注浆等。被动控制主要有临时钢支撑、注浆加固、架设管棚等。这些风险控制措施有效控制了既有结构物的变形,在保障运营安全上发挥了巨大的作用^[55]。其中,高盟^[56]以紧贴上海某地铁站的基坑工程为背景,运用 FLAC3D 软件,建立三维数值分析模型模拟基坑开挖过程,提出在车站开挖侧设置托换桩、旋喷桩及搅拌桩加固和分块开挖的控制车站变形的有效措施。姚宣德^[57]对浅埋暗挖隧道下穿既有桥梁进行了研究,提出

了桥桩变形控制标准，重点研究了浅埋暗挖注地下工程施工引起的桩基附加荷载、沉降及变形，并根据桥桩与暗挖隧道的位置关系提出相应的风险控制措施。

1.2.6 存在的主要研究问题

地下交通枢纽工程中的主体结构大型深基坑建设对紧邻既有构筑物而言，必须明确大型深基坑建设对自身稳定性和紧邻既有地下结构变形的影响程度，建立科学的安全控制措施来保证施工过程中的环境安全。通过以上综合论述，该领域的研究主要还存在以下几个方面的问题：

(1) 紧邻既有地下结构新建地铁车站工程的实例和研究相对较少，没有系统地研究深基坑建设对紧邻既有地下结构的稳定性和破坏特征。

(2) 施工工法决定了深基坑建设的安全性和对周边环境的影响程度。开展施工工法的探讨和分析，对于该工程或类似工程都具有重要的实践意义和应用价值。

(3) 目前，在地铁车站紧邻既有地下结构施工的研究中，采用模型试验研究方法的研究成果较少，很难满足地铁工程定量化控制的需求。

(4) 在深基坑紧邻既有结构施工的环境安全控制中，多数研究是针对具体工程案例的案例分析和工程总结，未能建立指导类似工程的理论基础和安全风险管理技术体系。

1.3 主要内容

作为地下交通枢纽主体结构建设基本结构型式，大型深基坑工程紧邻地面或地下既有结构的工程成为不可避免的工程建设难点。为此，本文依托深圳市新建地铁 11 号线车公庙交通枢纽建设中的深基坑工程，重点阐述了地铁车站侧穿既有原有地铁 1 号线车站和丰盛町地下商业街的变形规律研究方法，提出了有效的变形控制措施，为类似工程提供重要的参考。主要内容如下：

(1) 通过现场车站深基坑桩基倾斜监测，分析了盖挖逆筑法施工对紧邻既有地下结构的影响，揭示紧邻既有地下结构在车站深基坑施工过程中的变形规律与支护结构失稳特点。

(2) 基于 Plaxis 有限元分析软件, 针对深基坑工程紧邻既有地下结构的施工过程, 通过有限元数值分析, 研究了明挖顺筑法和盖挖逆筑法两种深基坑施工工艺的变形规律和支护结构稳定性; 通过考虑渗流固结与开挖扰动等因素, 揭示了紧邻既有地下结构的深基坑施工期间的失稳过程, 阐述了其主要影响因素。

(3) 采用几何比为 1:50, 材料容重比为 1:1, 建立地铁车站深基坑施工过程的模型试验装置, 通过相似材料配比试验, 采用模型介质材料分别模拟地表杂填土层、粉质黏土、粉土、细砂等材料, 在模型内部适当位置布置微型多点位移计、微型土压力盒和应力传感器等监测仪器, 开展了深基坑施工对紧邻既有地下结构的变形破坏模拟试验, 通过对比分析明挖顺筑法和盖挖逆筑法两种施工工艺对既有地下结构的基坑土压力、围护结构体内力及其倾斜变形, 阐述了两种施工工法在深基坑建设期间基坑内土压力变化特征, 揭示了围护结构内力特征和倾斜变形规律及其成因, 论证了现场监测与数值模拟所得到的研究成果的正确性。

(4) 依据已有的紧邻既有结构深基坑建设期间开挖支护体系的变形及控制理论, 综合分析和对比数值计算、模型试验与现场监测的成果, 探讨了围护结构厚度、埋深及支撑轴力等因素对围护结构倾斜变形的影响, 提出了紧邻既有地下结构的新线车站深基坑围护结构的变形安全控制措施, 为类似工程的制定提供参考。

2 工程背景及其周边环境分析

2.1 工程概况

深圳市作为超大城市，人口密集，加上地质与综合环境条件复杂，轨道交通建设中碰到的重难工程尤其多，其城市轨道建设也成为各种新问题、新工艺、新措施等的试金石。该城市是以特区为中心，西、中、东三条放射发展轴为基本骨架，三级圈层梯度发展的功能性组团集合布局结构，如图 2.1 所示。其面临的主要交通问题是：① 城市交通滞后于城市发展；② 交通服务水平逐年下降，交通拥挤区域扩大；③ 道路空间资源分配不合理，道路运输能力降低；④ 常规公交运营效率及服务水平低下，缺乏竞争力；⑤ 交通枢纽作用薄弱。为此，深圳市通过建设地铁 11 号快速线，如图 2.2 所示，连接起福田区中心与沙井区，全长 51.25 km，该线不仅是缓解城市交通拥挤，提升城市区域环境品质的需要，而且是提升深圳在珠三角城市群中心地位，实现城市交通发展战略目标的需要。

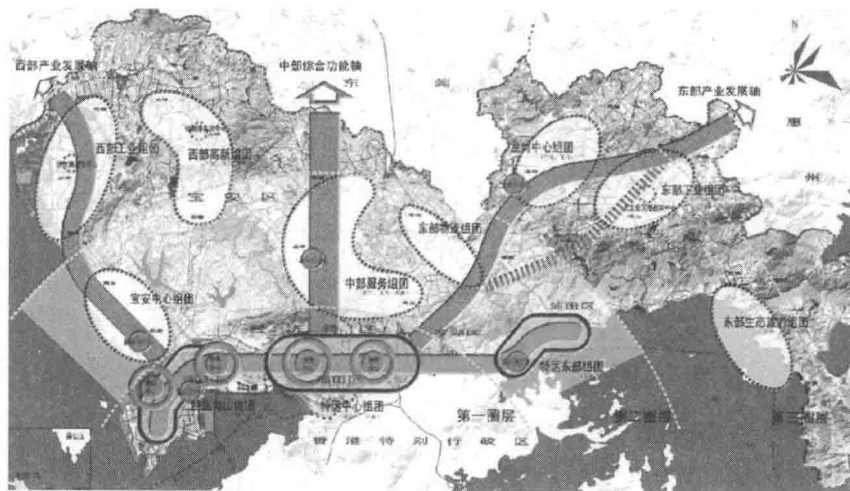


图 2.1 深圳市现状城市空间布局结构

