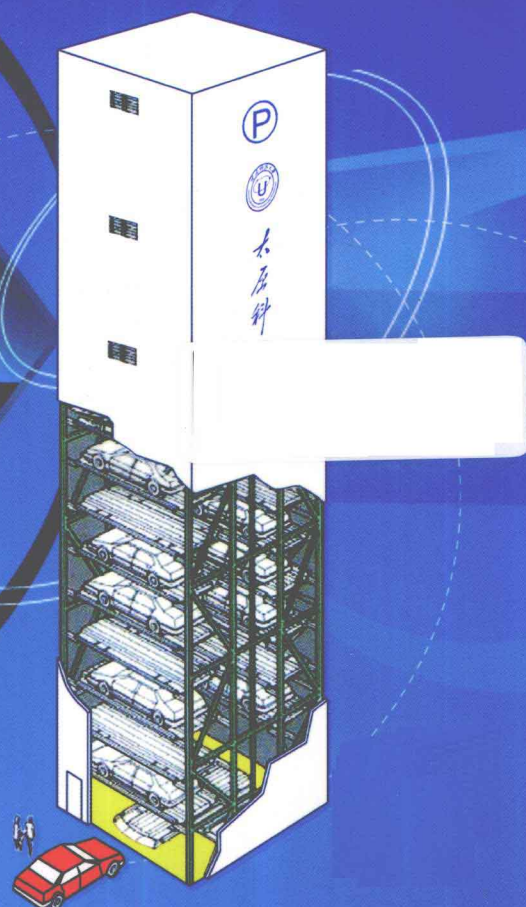


# 立体停车系统

## 机械结构调度 设计方法与实现

◎ 徐格宁 著

SPACE PARKING SYSTEM



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

本书综合反映作者在立体停车系统结构、机械、调度设计理论、方法及应用的研究成果。全书共分8章,分别阐述国内外立体停车系统发展、类型和特点,分析国内立体停车系统设计等方面存在的问题,针对性地提出了解决方案和实现路线;研究了其相关理论和方法——神经网络映射建模,组合优化设计,机械模块化设计及专家系统,机械结构参数化绘图方法,结构失效模式和结构可靠性计算。基于上述理论和方法,自主开发立体停车系统设计分析软件并应用于工程实践。为解决立体停车系统设计分析的瓶颈问题,推动本领域的技术进步提供技术支持和手段。

本书可作为相关领域工程设计参考,也可作为高等院校机械工程专业教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

立体停车系统机械结构调度设计方法与实现/徐格宁著. —北京:机械工业出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-111-39458-7

I. ①立… II. ①徐… III. ①停车设备—控制系统—机械设计—结构设计②停车设备—控制系统—调度—设计 IV. ①U491.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第192226号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:丁昕楨 责任编辑:丁昕楨 张金奎

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·321千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39458-7

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

60年前；伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。60年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业的发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工科为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012.6

# 前言

随着社会的飞速发展,城市汽车保有量剧增,导致城市静态交通问题日趋尖锐。如何解决城市停车难问题,世界各国都在寻求解决方案,从城市规划到交通管理,从汽车保有量控制到各类停车设施的建设,既有成功的经验,也有失败的教训。但采用占地面积小、停车密度高的机械式立体停车系统已成为共识。面对新型立体停车系统,国内从观念认识到性能把握,从理论研究到技术提升,均存在着认知的挑战与实践的机遇。

传统设计方法的数学建模为保证其求解简洁性,需要假定和简化处理,因而必然存在与实际的偏差。而现代设计方法的数学建模,虽精确全面但求解复杂,亦将增加设计过程的难度。立体停车系统机构多样性的需求和设计效率的困境使得产品的市场响应滞后,反映出传统设计思想的落后,而对于设计结果的采纳与否则更需要决策的科学性。工业产品设计的终端载体是工程施工图,面对复杂多变的设计参数和繁杂众多的模块化部件,图形尺寸数据的转化量大而易错。对于立体停车系统使用的公众性和宜人性需求,更要求立体停车系统的管理自动化和可视化,而存取车的离散事件模型的建立将是实现立体停车系统作业调度管理的基础。因此,如何将传统设计方法建模的片面性与现代设计方法建模的全面性完美结合,如何提高机械传动的设计效率和对所设计结果可行性评价的科学性,如何解决参数化绘图和参数化驱动以及工程图的参数化装配,如何实现多层多库的作业调度和过程仿真,如何识别立体停车系统复杂冗余结构的失效模式,确定每一失效模式的概率以及结构系统概率是本书所要解决的问题和所研究的任务。

全书共分8章,分别阐述国内外立体停车系统发展、类型、特点,分析国内立体停车系统设计等方面存在的问题,以立体停车系统结构、机械、调度设计理论和方法研究为主线,针对性地提出了解决方案和实现路线;基于作者对多学科理论研究和工程技术实践,将神经网络映射建模方法,组合优化设计方法,机械模块化设计及专家系统,机械结构参数化绘图方法,作业建模、调度管理、过程仿真方法,结构失效模式和结构可靠性计算方法集成一体,自主开发立体停车系统设计分析软件,并以此为载体应用于工程实践。为解决立体停车系统设计分析的瓶颈问题,推动本领域的技术进步提供技术支持和手段。

本书可作为相关领域工程设计参考,也可作为高等院校机械工程专业的教学参考书。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

对本书引用参考文献的作者表示感谢。对参与本书部分工作的研究生(高梅香、王建民、高有山、胡增嵘、王文红、陶书东、杨瑞刚)一并表示感谢,是他们分别对作者近10年持续研究和不懈努力的无悔伴随和辛勤付出,才使本专著得以完成,作为献给母校太原科技大学60年华诞的一份答卷和厚礼。

徐格宁  
于太原科技大学

# 目 录

总序

前言

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b>                     | 1   |
| 第一节 国内外机械式立体停车系统发展概述              | 1   |
| 第二节 机械式立体停车系统类型及特点                | 2   |
| 第三节 国内立体停车系统设计方面存在的问题             | 6   |
| 第四节 立体停车系统设计理论与分析方法概述             | 8   |
| 第五节 立体停车系统机械、结构、调度设计方法研究与实现       | 10  |
| <b>第二章 立体停车系统钢结构神经网络映射建模方法研究</b>  | 13  |
| 第一节 立体停车系统钢结构理论建模——平面“简模型”        | 13  |
| 第二节 立体停车系统钢结构系统有限元参数化建模——空间“全模型”  | 33  |
| 第三节 立体停车系统钢结构映射建模——映射模型           | 39  |
| 第四节 三种模型计算结果的比较与评价                | 45  |
| <b>第三章 立体停车系统钢结构组合优化设计方法研究</b>    | 47  |
| 第一节 约束非线性混合离散变量(MDOD)方法           | 48  |
| 第二节 正交网格法                         | 58  |
| 第三节 组合优化算法                        | 65  |
| 第四节 基于映射模型的立体停车系统钢结构优化设计          | 69  |
| <b>第四章 立体停车系统机械模块化设计及专家系统研究</b>   | 77  |
| 第一节 模块化设计的基本理论及方法                 | 77  |
| 第二节 立体停车系统机械系统的模块化设计              | 84  |
| 第三节 专家系统(Expert System)评价决策及重设计   | 100 |
| 第四节 立体停车系统机械系统模块化设计CAD软件的应用       | 105 |
| <b>第五章 立体停车系统机械结构参数化绘图方法研究</b>    | 110 |
| 第一节 模块化图形的参数化驱动                   | 110 |
| 第二节 图形的组装与装配                      | 112 |
| 第三节 基于特征的立体停车系统钢结构参数化绘图           | 113 |
| 第四节 立体停车系统机械结构参数化绘图工程实例           | 117 |
| <b>第六章 立体停车系统作业建模、调度管理、过程仿真研究</b> | 120 |
| 第一节 立体停车系统存取车过程理论建模               | 120 |
| 第二节 立体停车系统管理系统总体规划                | 127 |
| 第三节 立体停车系统管理系统设计                  | 129 |
| 第四节 立体停车系统作业过程仿真                  | 147 |
| <b>第七章 立体停车系统钢结构失效模式研究</b>        | 156 |
| 第一节 结构可靠性的基本理论                    | 156 |
| 第二节 有限元可靠性失效模式分析软件的研制             | 160 |

---

|             |                              |            |
|-------------|------------------------------|------------|
| 第三节         | 失效准则的判定 .....                | 169        |
| 第四节         | 立体停车系统钢结构系统失效模式算法研究与实现 ..... | 172        |
| <b>第八章</b>  | <b>立体停车系统钢结构可靠性研究 .....</b>  | <b>181</b> |
| 第一节         | 钢结构系统的安全余量方程及失效概率 .....      | 181        |
| 第二节         | 立体停车系统钢结构系统可靠性算法与实现 .....    | 191        |
| <b>参考文献</b> | .....                        | <b>200</b> |

# 第一章 绪 论

都市化是政治、经济、金融、教育交流的发展趋势，高楼大厦、商业中心、家居花园是人们追求的现代生活，汽车的发明又为人类提供了方便的交通工具而改变了世界的生活方式，都市化和汽车化是现代社会文明的重要标志。但它又是一把双刃剑，当人们享受现代化带来舒适的同时，也将承受由此带来的一系列负面效应：面对汽车保有量增长无限性和土地资源开发有限性的矛盾，静态交通——城市停车难已成为困扰世界各国的共同问题。

如何解决城市停车难问题，世界各国都在寻求各自的解决方案，从城市规划到交通管理，从汽车保有量控制到各类停车设施的建设。既有成功的经验，也有失败的教训。但采用占地面积小、停车密度高的机械式立体停车系统已是趋于共识的选择<sup>[1]</sup>。

## 第一节 国内外机械式立体停车系统发展概述

国外发展立体停车系统较早、较好的有日本、韩国、德国等国家。在亚洲，机械式停车设备采用较早、应用较普遍的是日本、韩国和我国台湾地区。日本从20世纪60年代初开始开发机械式停车设备。当时日本汽车保有量为500万辆，大多采用垂直循环式停车设备。20世纪80年代开始向韩国和我国台湾地区出口产品和技术。20世纪90年代初，其汽车保有量达到6200万辆，机械式停车设备得到高速发展，年递增率达到30%以上，品种也从单一垂直循环式发展为多种型式，至今已开发生产出九大类近百个品种。其管理体制、技术标准等方面日趋完善，在役的立体停车系统数量最多。日本从事机械式立体停车系统及其设备开发、制造的公司约有200余家，较著名的有“石川岛播磨”、“新明和”、“日精”、“三菱重工”、“大福”、“东急”、“村田”、“昭和起重机”等，目前每年投入运营的机械式停车设备在10万个车位以上。

韩国机械式停车设备行业是仿效日本起家的，发展历程比较平稳。20世纪70年代为起步阶段，80年代为引进阶段，90年代及以后为使用阶段。制造厂约有近百家，已进入我国的有LG公司、现代集团、德山公司（Duks An Eng & Mfg Co., Ltd）、真山公司（Jinsan Plant Co., Ltd）等。由于受到政府的高度重视，各种机械式停车设备得到了普遍应用，年递增速度达到30%；2000年为发展阶段，自动化停车设备将随供应量不断扩大而得到迅猛发展。

德国的停车场行业也很发达，生产制造机械式停车设备的厂商约有24家，其中KLAUS和OTTO WOHR两家公司的生产量约占德国总产量的80%。其他国家和地区如美国、澳大利亚、意大利以及我国台湾地区、港澳特别行政区的停车行业也较发达。

我国台湾地区在20世纪70年代初，公共和民间停车场70%是地上和地下平面停车场，机械式立体停车系统仍是鲜为人知。1980年引进日本“日精”技术，建成第一座垂直循环式立体停车系统；1982年生产出第一台双层式停车设备。1981~1991年，制造企业达到了35家。20世纪90年代初，随着汽车的大量进口，使机械式停车设备制造业得到快速发展。



1992 年企业数量增加到 65 家, 到 1996 年仅登记在案的制造企业总数猛增到 644 家, 停车设备行业进入了发展高峰阶段。但从 1997 年起, 台湾地区房地产萧条, 股市暴跌, 停车设备行业出现滑坡, 经优胜劣汰后, 行业进入稳步发展阶段。

我国在 20 世纪 90 年代初开始研制和使用机械式停车设备。20 世纪 90 年代后, 随着汽车业和建筑业的发展, 停车设备的应用逐步推广, 已经形成了新兴的停车设备行业, 步入了引进、开发、制造、使用相结合的初步发展阶段。首批获得国家颁发的立体停车设备制造资质的企业有 22 家。产品经技术引进和自主研发, 品质有了较大提高。许多设备开始采用当前机械、结构、光电、液压、计算机等领域的先进技术: 如交流变频调速系统, 使其运行高速、平稳、省电、减少振动和噪声; 控制方式为按钮式、IC 卡式、触摸屏式、密码钥匙式、遥控式等, 采用总线控制技术; 采用内藏式传动装置, 以增大停车空间并保护各传动元件不受污染和腐蚀, 提高设备的耐久性; 机械结构中采用模块化设计, 便于组合使用, 易于安装拆卸, 缩短施工周期; 采用新材料、新工艺, 如钢结构采用 H 型钢, 载车板采用整体成形镀锌板; 安全保护方面采用声光引导及定位装置、自动消防灭火系统等。目前产品国产化率已接近 60% ~ 90%。

## 第二节 机械式立体停车系统类型及特点

机械式立体停车系统 (Mechanical Space Parking System) 是在较小占地面积内高密度存储汽车的, 集机、电、光、控一体化的自动化立体停车系统。由车辆进出检测、提升、平移、旋转、承载钢结构骨架, 电力驱动, 声光报警安全装置, 微型计算机控制系统及存储管理系统组成。

### 一、机械式立体停车系统作业过程

以机械式立体停车系统为例, 其存取车辆的过程简述如下。

机械式垂直升降立体停车系统 (图 1-1) 为钢结构外敷建筑材料的主体建筑物, 中央为提升天井, 内装一台提升机, 用于提升存取汽车。天井两侧为多层停车位。每个停车位放置一个用于停放车辆的托盘。车辆存取过程由管理计算机指令 PLC 可编程序控制器自动完成。立体停车系统具备理库功能, 按优先低层存储和路线最短的原则存取车辆。

存车过程为: 车辆驶到立体停车系统入口处, 由设置在入口处的综合光电传感器自动检测车辆参数 (长、高、宽、质量, 红外检测) 是否满足存贮要求。提升机根据自动检测结果认可合格后, 取出相应车位的托盘送至立体停车系统入口处, 托盘旋转 90°。天井进口处的安全栏杆开启, 发出允许车辆驶入信号, 车辆驶入提升机的托盘上。当车辆驶到停车位置时, 前方发出车辆制动信号, 车辆制动熄火, 司机退出。待托盘上的阻车器固定车辆后, 车辆进入准备提升状态。操作人员键入存车代码及入库指令, 计算机调度管理系统在检测各种状态正常后, 提升机将带有车辆的托盘提升到存车位的相应层, 提升电动机采用变频调速电动机, 高层提升时采用起动→加速→匀速→加速→匀速→减速→匀速→减速→制动 (停止) 的提升方式, 以满足存入/取出的工作效率。届时通过安装在提升机上的传感器确认存车位的状态, 提升机微升平层, 设置在提升机轿箱上的叉式移载机使托盘与提升机轿箱脱离, 并与存车位等高, 而后叉式移载机将托盘连同车辆平移至存车位上。提升机微降, 叉式移载机的货叉回退, 复位。提升机待命, 作好再次存车准备。



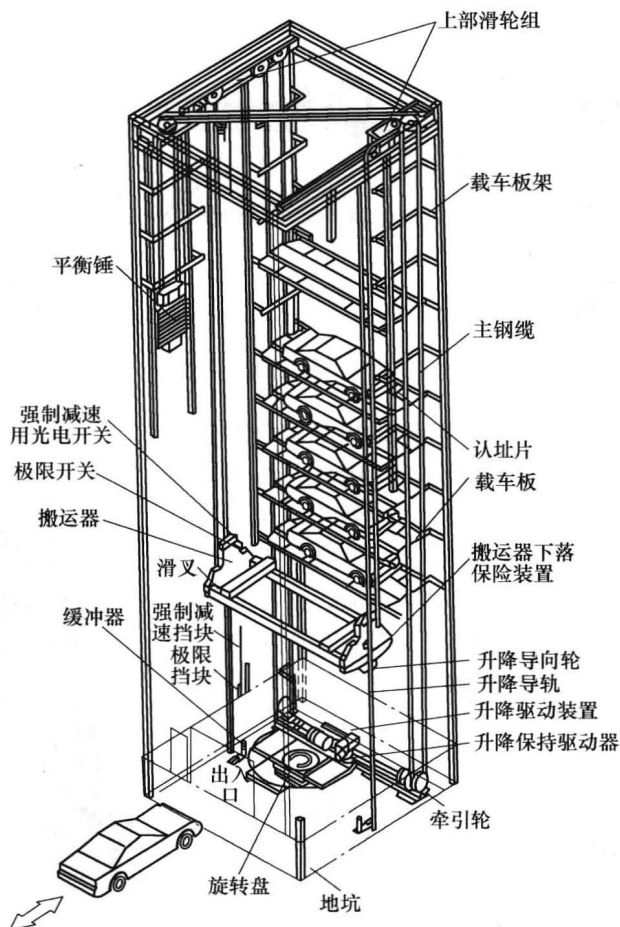


图 1-1 机械式垂直升降立体停车系统

出车过程为：键入出库命令同时键入存车代码，提升机升至相应存车层，移栽机货叉伸出到出库汽车托盘下方，提升机微升，移栽机使托盘和停车位脱离，货叉收回使汽车和托盘停留在提升机中央，提升机下降至出库层，托盘旋转 90°，车辆驶出，完成出库过程。

## 二、机械式立体停车系统的分类

### 1. 叠式机械立体停车系统

叠式停放机构是 2~3 层液压式或机械式停车架，上层车出库时，下层车必须开走，导致应用范围受到限制。为此进一步改进为双层升降式和双层升降横移式，其结构简洁，操作简单，全部车位均为有效车位，出车时间平均为 40s。但“升降式”机构由于导向长度、基坑排水等问题的限制，常见的产品多为三层（图 1-2）。

升降横移式机构除升降动作外，通过横移动作让开出车通道。由于土建工程较少，也无地下机构，是目前使用最普遍的形式。随着 PLC 控制技术的普及和机构的不断优化，该类产品已从二层扩展到五层，但其基本原理仍是地面层的“平移”，中间层“平移 + 提升”，最上层“提升”。除最上层外，各层均需留出一个空位，作为平移动作的上下通道。计算机编程已使复杂的出车程序可用单个按钮操作完成。由于设计参数较低，升降速度约为

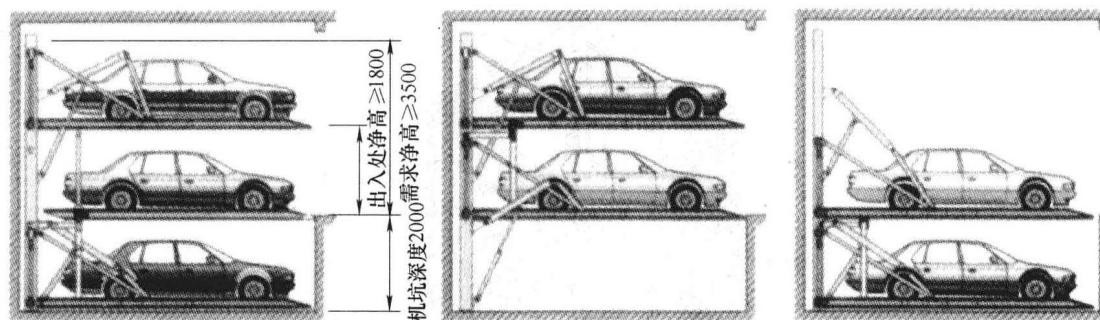


图 1-2 叠式升降立体停车系统

5m/min, 平移速度约为 10m/min, 故钢结构采用轻型刚架。单个车位(含车辆)的平均重量  $< 3000\text{kg}$ , 故可在地面安装或布置在建筑物顶部。叠式立体停车系统的建造费用约为 7500 ~ 15000 美元/车位。叠式立体停车系统在各类机械立体停车系统中土地利用率最低, 由于结构简明, 操作维修方便, 对现场适应性较强, 正面可全面出车以及造价较低的特点, 仍为国内地下立体停车系统改建工程选用较多的形式。

## 2. 垂直及水平循环式立体停车系统

垂直循环式立体停车系统也是机械立体停车系统早期发展形式之一。其结构和动作原理是由上、下驱动轮带动链轨作垂直方向的回转, 托盘挂在链轨上实现停车, 如图 1-3 所示。由于占地面积小, 约  $7\text{m} \times 7.2\text{m}$ , 每个单元的停车数在 10 ~ 56 辆, 最大高度为 53m, 曾流行于欧洲及日本, 称为“魔塔”(Magic Tower)。存车与取车可通过计算机而达到全自动化。运行速度 15m/min, 平均调车时间在 2min 左右。

近年来这一形式的立体停车系统逐步被“电梯式立体停车系统”所取代, 其原因是:

1) 每次出车或进车, 链轨均要带载回转一圈, 故能耗较高, 其使用功率为 22 ~ 55kW, 大大高于其他几种形式的立体停车系统。

2) 托盘为悬挂式, 加以间歇式的链轨和链轮运动, 使整机的冲击、振动及噪声很大, 进而限制作业速度, 影响出车速度。

由于垂直循环式立体停车系统处于竞争劣势, 国外不少公司已在产品系列中取消该品种。但国内, 在高土地利用率及低造价的前提下, 依然在采用。以建造 30 车位立体停车系统为例, 采用四层叠式立体停车系统需占地  $120\text{m}^2$ , 而叠式立体停车系统前方必须留出  $36\text{m}^2$  的出车通道, 实际需占地  $240\text{m}^2$ , 建造费用约为人民币 200 万元。如果改用垂直循环

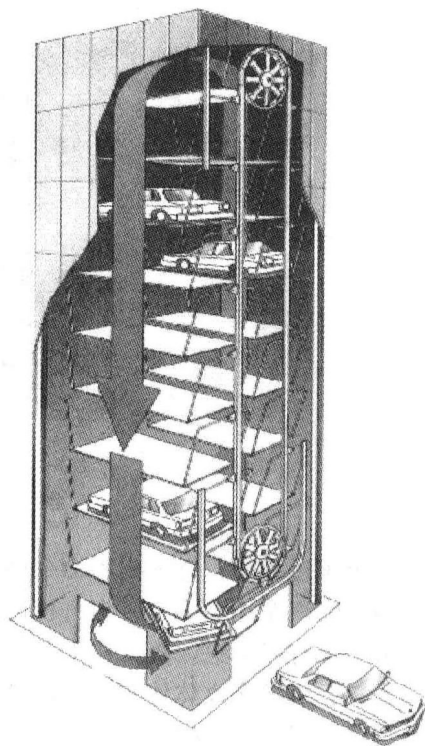


图 1-3 垂直循环式立体停车系统

式, 须用土地为  $50\text{m}^2$ , 塔高  $30\text{m}$ , 造价也是  $200$  万元。这种立体停车系统虽然能耗和噪声较大, 但采用计算机控制后, 其防盗性能优于叠式立体停车系统。

水平循环式立体停车系统的动作原理有两种类型, 一种类型同于垂直循环, 称为圆周型水平循环; 另一种是依靠左右两台升降机和上下层反向平移机构而完成循环运动, 称为直角型水平循环, 如图 1-4 所示。这类立体停车系统与垂直循环式一样, “牵一发而动全身”, 取一辆车则全部入库车辆均要运行周转, 而且只有一个出入口。水平移动能耗低于垂直方向。为提高出车速度, 其主参数选用较高, 如平移速度约为  $20\text{m}/\text{min}$ , 升降速度约为  $25\text{m}/\text{min}$ , 比叠式立体停车系统要高出数倍。特别是在直角型水平循环中, 托盘承载汽车高速从平移机构向升降机构交接, 提升机构向平移机构交接, 而形成正反方向的间歇动作, 对钢结构冲击噪

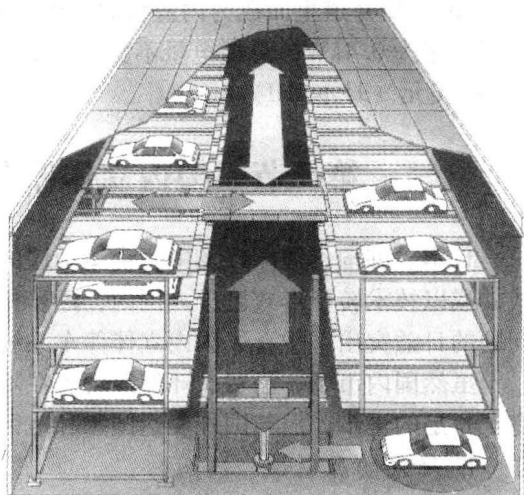


图 1-4 水平循环式立体停车系统

声较大。如支撑点布置不正确, 容易造成结构的疲劳损伤。这是水平循环式立体停车系统都要求在地下安装的主要原因。为避免循环层数太多或平面布置太长而影响出车速度, 每个单元最大容量为  $4$  层  $50$  辆, 即每个层面上横向布置  $12$  辆车, 其平均出车仍需要  $2\text{min}$ 。这种立体停车系统的最大优势是在地面上不占位置, 而且因为本身带有升降机, 故可直接从地面进车, 无需修建坡道。升降机的出入口布置灵活, 可在立体停车系统两端或中间任意位置上。但多数是在原有建筑物的地库中改建, 因其宽度尺寸要求较严, 原有建筑柱网间的净宽必须大于  $6.3\text{m}$ 。立体停车系统的层高为  $1.9\text{m}$ , 也必须和原有建筑物的层高相配合。这类立体停车系统由于尺寸要求较严, 其用途就受到限制。只能在柱网布置较宽裕的建筑物地库中及出车频率不高的地方使用。造价仍高于叠式立体停车系统, 每个车位约为  $8000 \sim 12000$  美元。

### 3. 电梯叉式立体停车系统

电梯叉式立体停车系统是自动化立体仓库的变型产品, 即将立体仓库中的自动认址巷道堆垛机改成电梯, 仍旧保留了托盘 (Pallet) 作为运载工具, 形成中央通道的储存系统。由于托盘式存储系统动作环节较多, 占用时间较长, 近年来根据梳齿原理简化为叉式交接, 垂直运动和平移运动在同一时间内进行, 故可成倍提高出入库速度。叉式交接立体停车系统的动作原理如图 1-5 所示。这种立体停车系统的电梯式升降机构采用逆变式调频调速系统控制电动机, 提升速度可达到  $90 \sim 120\text{m}/\text{min}$ , 振动和噪声很低, 平均调车速度为  $30\text{s}$ , 每个单元最高可停放  $56$  辆车, 占地  $50\text{m}^2$ , 是目前综合性能最好的停车设备。

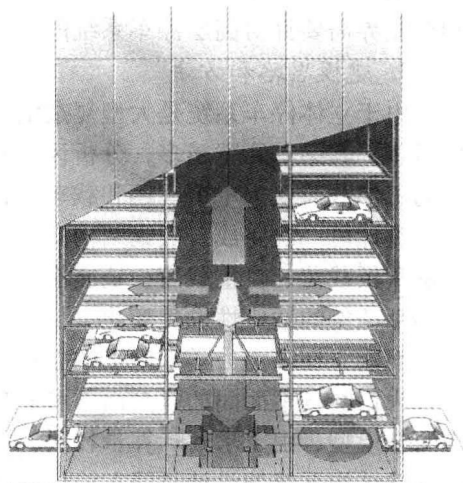


图 1-5 叉式交接立体停车系统

电梯叉式立体停车系统的外形和垂直循环式相似,但其性能已比垂直循环式立体停车系统进步一个年代。它可以由几个塔并列或纵列成为一个集合库,也可以安装在  $6.95\text{m} \times 6.8\text{m}$  的建筑井道里而成为内置型立体停车系统。其提升电动机功率为  $18.5 \sim 22\text{kW}$ , 平移电动机功率为  $0.4\text{kW}$ , 总耗电量不大于  $40\text{kW}$ 。造价约为每个车位 17500 美元 (韩国 LG) 或 25000 美元 (日本 IHI)。

### 第三节 国内立体停车系统设计方面存在的问题

日本、韩国、德国以及中国台湾地区的数十家立体停车系统制造厂商,或以合资办厂方式,或以技术转让形式已进入国内,逐步打开产品销售市场。随着汽车保有量的猛增,停车问题的日益突出,孕育了国内立体停车系统市场的广阔前景。

虽然国内市场、消费、环保等观念在不断更新,使得立体停车系统的设计、生产、应用有了长足的进步,但与国外发达国家和地区还存在很大差距。主要表现在:

#### 1. 研发的原创性

国内从 20 世纪 80 年代末期开始研制机械式高层停车系统,1996 年开始趋热。目前有 80~90 家企业在从事机械式停车设备方面的工作。虽然市场、静态交通、环保各方面的呼声很强,但由于资金、技术、认识,尤其是政策体制方面的原因,进展比较缓慢,生产能力远不能满足市场的需要。目前在用和在建的高层立体停车系统基本为国外进口,国内企业推出的停车设备大多是仿效国外技术或引进国外技术图样生产的,没有统一技术标准,缺乏安全认证,产品质量和可靠性难以保证<sup>[1]</sup>。理论研究多限于可行性论证、发展规划等层面的研究,至于涉及科学技术基础理论研究的立项更是凤毛麟角<sup>[1]</sup>。

#### 2. 设计方法和手段

由于国内企业生产规模较小,经营理念上依然是以技术合作的方式从国外引进图样,测绘转化,购置进口机电设备组装为主,设计上基本仍是采用传统的类比设计,很少采用现代设计分析方法和手段,自主开发能力薄弱,导致设计周期长,交货期拖延,质量不易控制,产品成本较高,要么浪费,要么失效,难以协调经济性和可靠性的关系。因此,国内科技界和企业界需要针对高层停车系统的现代设计方法,呼唤具有自主知识产权的现代设计软件。

#### 3. 建模思路和方法

由于立体停车系统是大型复杂钢结构系统,为高次超静定结构。而立体停车系统的停车位越多,其梁单元就越多,分析计算越复杂。由立体停车系统的工作原理可知,提升系统每次的工作载荷仅为单个车辆和载车板,当停车位增加时,提升载荷并不发生改变,因此提升系统设计可一次完成。而钢结构高度将随停车位的增减而变化,此时作用在钢结构上的车辆和载车板载荷、自重载荷、地震作用和风作用将会改变,导致钢结构的强度、刚度、稳定性与约束条件的适应性发生变化。

而建立在结构力学理论上的立体停车系统的钢结构简模型,是经过简化的平面模型,由于人为切断各平面间的联系而不可避免地会产生模型误差。对于建立在有限元方法基础上的空间全模型,由于求解计算量较大,不易于转化为优化设计模型进行计算。因此,立体停车系统钢结构系统的设计是停车泊位的动态函数,如何按停车位和车型实现参数化和映射力学建模,是立体停车系统系统设计的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。

#### 4. 设计思路和效率

按照初期选型→设计→校核→定型→制造的传统设计模式,工作量大,周期较长,投入较高。初期选型一般是依照经验或现有产品类比得出,而对于新型立体停车系统,现成的数据少,可靠性要求高,初选多是随机的、盲目的,每次选型后都要重新进行分析,导致设计的重复工作量更大,这是制约提高设计效率的关键问题。

#### 5. 参数化工程绘图

产品设计交付制造环节的最终表现形式是工程施工图。从传统的手工制图到计算机交互式绘图,均是针对某一具体结构绘出其施工图的。对于结构相似而尺寸不同的部件必须重复绘制,不能实现参数化绘图,造成人力、物力、财力上的浪费,难以提高出图效率,同时易于出错。此外,对于通常意义上的参数绘图主要是针对某种结构类型的产品,而面对模块化设计所实现的成百上千种结构形式的产品依然显得力不从心。因此需要寻求一种面向模块化设计方法的参数化绘图方法。

#### 6. 作业管理与过程仿真

国外发达国家基本采用立体存立体停车系统工业协会颁布的统一技术标准,以计算机为工具管理立体停车系统的作业全过程。目前国内企业推出的立体停车系统在管理上层次不一,自动化程度低的还停留在手动、人工管理的水平上;自动化程度高的多是参照模仿国外产品或采用国外标准开发的计算机全自动程序管理,缺乏自主定制的灵活性。

#### 7. 结构失效模式及失效概率、系统可靠性量化评价

实际复杂工程结构通常具有高冗余度,当结构系统中某元件达到临界状态时,必须考虑该元件失效后对结构系统中其余元件的影响,因此,一个失效模式所涉及的若干临界状态元件之间并不存在简单的并联关系。在每一个元件达到其极限状态后,结构系统的内力将会重新分配。结构系统的破坏是由任意失效模式引起的,形成一个失效模式需要有一系列元件达到临界状态,尽管各失效模式之间是串联的,但评价系统可靠性时,需考虑各失效模式之间的相关性,采用综合评价才是合理的。由于可靠性分析与设计充分考虑了结构系统内各元件之间以及所确定的各主要失效模式之间的相关性因素,运用可靠性设计可以对结构系统内各构件的截面尺寸进行合理匹配,从而在结构系统总质量不变的情况下,系统的可靠度达到最大,或在系统可靠度不变的情况下,结构总质量最轻。因而,把系统可靠度作为工程结构设计中所考虑的技术参数是合理的、科学的。而从经济角度来考虑,为充分利用现有服役结构,以结构可靠度为控制参数,对其进行评价,确定结构服役状态的处理方式,如是维修还是拆除。对于有些现役结构,为适应实用条件或环境等其他因素的改变而需作改造或加固,如何确定既经济又安全的改造加固方案,需对目前结构的承载性能作全面合理的评价。

立体停车系统承受载荷的复杂性和作业对象(汽车)的高价值性,使得系统的可靠性尤为重要,其机械、结构、电气控制系统必须保证车辆停泊的安全性。而立体停车系统的钢结构作为典型的大型空间结构系统,是一构成复杂的、高冗余度的刚架结构系统。从有限元角度讲,系统内各构件的相关单元非常多。在承载方面,结构系统在其使用寿命期限内承受着各种载荷,包括汽车载荷、自重载荷、起升设备载荷以及存取汽车时对结构系统产生的动载影响等。同时,当结构系统的高度超过一定范围时<sup>[2]</sup>,风载荷、地震载荷等水平载荷对系统产生的作用非常大。因此,在设计中必须考虑所有的载荷以及结构的抗风和抗振能力。以上所述特点使得系统内各构件间相互关系复杂,且各构件在系统内所起的作用和重要

性并不相同。所以,从可靠性角度讲,对各构件的可靠度要求也是不同的。因此在设计时,客观上就要求对钢结构系统的可靠性要有全面的、系统的分析和研究,以便进行最优设计,从而使结构获得更高的安全性,既具有良好的使用性能,又能节省材料,具有较高的经济性,以达到结构系统可靠性与经济性的最优匹配。

综上所述,结构系统的可靠性评定理论和方法不仅有重要的科学价值,而且具有广泛的工程应用前景和重大的社会效益和经济效益。

## 第四节 立体停车系统设计理论与分析方法概述

一个产品的设计一般要经过调查研究、方案拟定、设计计算、绘制图样及绘写技术文件等环节<sup>[4]</sup>。传统的设计方法通常是在调查分析的基础上,参照同类产品进行经验类比以确定初始设计方案,然后根据设计参数进行分析计算,检查各项性能是否满足设计指标要求,再由设计人员凭借经验或直观判断对参数进行修改。如此反复进行分析计算→性能检验→参数修改,直到性能完全满足设计要求为止。整个设计过程就是人工试凑定性分析、指标定量比较的过程,主要工作是性能的重复分析,至于每次参数的修改,仅仅凭借经验或直观判断<sup>[5]</sup>。而现代设计方法中的优化设计,则是运用近代数学的最优化方法和计算机从产品设计的众多方案中寻求一种最佳方案的技术。目前,最优化设计已成为解决复杂设计问题的一种有效工具,在各个领域获得了广泛应用。

有限元技术是复杂结构分析的有力工具,它为优化设计技术在结构设计中的应用奠定了基础。从20世纪70年代起,结构优化设计基本上是沿着数学规划法和准则法两个方向发展的<sup>[6]</sup>。数学规划法有严格的数学理论基础,能够用于不同的目标函数和设计变量的结构优化设计,但其收敛速度慢,随设计变量和约束条件的增加而导致迭代次数急剧增加,这对于基于有限元分析的结构优化设计是难以克服的沉重负担。优化准则法是根据数学规则法中的库恩-塔克条件推出的最优性准则,因而已不同于早期凭直觉想象的“满应力准则法”。这种方法收敛快,重分析的次数与设计变量的数量关系不大,所以对大型结构优化设计有重要意义。但其适应性受到限制,当结构刚度与设计变量之间关系复杂,或目标函数不限于结构的质量或体积,或结构的布局是可调时,优化准则法显得无能为力。此外,有限单元法对于设计方案的精确分析也是有力的手段,但是复杂而烦琐的建模过程,同样让人望而生畏。

因此,结构优化设计面临着计算效率和处理对象复杂性之间的矛盾:数学规则法能够处理复杂的问题但收敛太慢;优化准则法收敛快,但适应性较窄。为了提高计算效率,各种近似重分析方法和映射建模方法应运而生,用以代替完整的有限元分析。

传统的结构近似重分析技术是基于泰勒级数展开的,存在着需要求导、变化幅值不能太大等局限性。人工神经网络的出现,为结构近似重分析技术和映射建模提供了一种新途径。

人工神经网络已经渗透到多领域学科:在机床设备方面,有人工神经网络在机床运动误差补偿、热变形控制的应用<sup>[7]</sup>;在零件设计方面,有齿轮、弹簧、齿轮强度、齿轮CAD、V带设计应用等<sup>[8]</sup>;在摩擦学方面,有摩擦学设计、确定系统磨损趋势及润滑油选择等<sup>[9]</sup>;在机械结构设计方面,有复杂机械结构多目标优化设计<sup>[10,11]</sup>、机械结构系统优化问题的分解算法<sup>[12]</sup>和神经网络的结构优化策略<sup>[13]</sup>等。可以说人工神经网络在机械工程领域的应用极其广泛,但在大型复杂结构的映射建模、设计分析集成化方面的研究未见报道。

BP 神经网络最适合于处理输入输出之间的关系不明确, 无法用一个明确的函数关系表达的场合。BP 神经网络并非万能的工具, 但是其高度的非线性映射能力, 良好的容错性和鲁棒性, 依然是机械结构工程领域数学建模的一种有力工具, 有着广泛的应用前景。

结构系统失效的含义是指系统变成机构, 或超过规定的变形, 或不能进一步承受外载荷。结构系统的失效概率越小, 其可靠性越大。度量结构系统可靠性的数量指标称为结构系统可靠度。其定义为: 结构系统在规定时间内、规定条件下、完成规定功能的概率。因为在实际工程结构的设计及分析中, 载荷变量、构件几何外形尺寸及材料的力学特性等都是随机因素, 结构系统完成规定功能的能力只有采用概率度量才比较符合实际情况。

结构系统在一系列外载荷作用下, 其系统内各构件的力学指标, 如内力、强度、稳定性等并不相互独立, 其相互关系由结构系统内各元件间的布置关系、外载荷的作用形式和各构件的连接特点而决定。实际工程结构通常为复杂的高次超静定系统, 因此各构件之间的力学特性是密切相关的。对于高次超静定结构, 一般需有若干元件达到临界状态或破坏后, 才导致整个结构系统的失效, 即形成一个失效模式。对于高冗余度的大型复杂结构系统, 存在诸多失效模式, 以至在估算系统的可靠度或失效概率之前识别所有失效模式十分困难, 甚至不可能。而且从实际结构分析角度考虑, 识别所有的失效模式是没有必要的。实践和理论分析表明: 一个结构系统的可靠度主要由对结构系统可靠度有重要贡献的主要失效模式来决定。因此, 在计算结构系统的可靠度时, 一般的失效模式可以忽略不计。在确定了结构系统的主要失效模式后, 计算整个结构系统可靠度或失效概率时, 必须综合考虑各主要失效模式的关系。可将结构系统模拟为由几个主要失效模式串联而成, 任何一个失效模式的出现即会导致结构系统的破坏, 各失效模式之间存在一定的相互关系。根据相关的概率数理统计理论, 先求出各个失效模式独立的失效概率, 再考虑各失效模式间的相关性, 采取适当的计算方法, 求出结构系统的失效概率。当失效模式对应的安全余量方程为线性时, 则用分布函数的均值及标准差计算比较省时。当安全余量方程为非线性时, 工程上常采用 R-F 法、快速积分法等<sup>[14]</sup>。由于失效模式事件的相关性, 即使只考虑主要失效模式, 要精确计算结构系统的可靠度也几乎是不可能的。目前通常采用的较为实用的方法有: Ditlevsen 界限和冯元生的高精度公式等。综上所述, 结构系统可靠性理论与算法的研究主要包括以下三项内容:

- 1) 识别结构系统主要失效模式的算法研究;
- 2) 根据主要失效模式的安全余量方程 (系统功能函数) 计算模式失效概率的研究;
- 3) 由主要失效模式的模式失效概率和主要失效模式间的相关关系计算系统综合失效概率或其上下界。

面对国内立体停车系统设计分析与国外发达技术存在的较大差距, 为推动本领域的科技进步, 为行业提供先进的设计手段和设计方法, 作者在总结前人工作的基础上, 运用当前科技新理论和新技术, 在神经网络映射建模及离散优化设计方法, 参数化有限元建模与分析方法, 参数化绘图方法, 模块化设计与评价方法, 作业管理与过程仿真方法, 结构系统失效模式与系统可靠性等诸方面进行一系列有益的研究探索, 针对立体停车系统设计的瓶颈问题, 根据不同停车位库型的需求变化, 建立一套科学的、可行的、有效的、全新的设计理论与分析方法。



## 第五节 立体停车系统机械、结构、调度设计方法研究与实现

### 一、立体停车系统钢结构神经网络映射建模及优化设计方法

#### 1. 研究内容

- 1) 基于结构力学理论的立体停车系统钢结构简模型建模方法。
- 2) 复杂超静定结构力学简模型内力解析方法。
- 3) 立体停车系统钢结构全模型的有限元建模及求解方法。
- 4) 运用神经网络对以上两种模型进行力学特征映射建模的方法。
- 5) 基于映射模型的立体停车系统钢结构组合优化设计方法。

#### 2. 实现路线 (图 1-6)

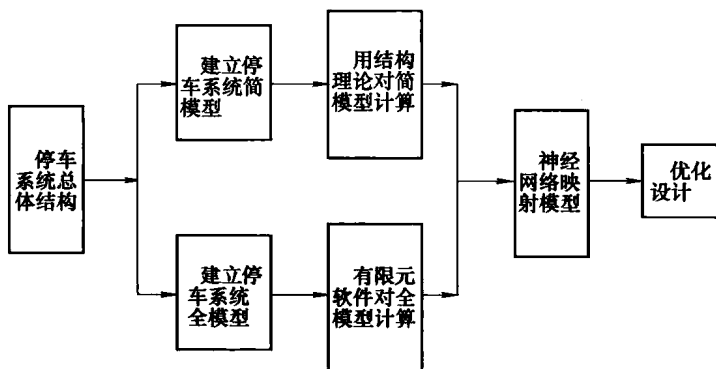


图 1-6 钢结构神经网络映射建模及优化设计方法技术路线

- 1) 对立体停车系统总体结构进行分析, 提取其结构几何特征。
- 2) 从立体停车系统钢结构的特征出发, 一方面建立科学合理的结构力学理论模型 (简模型), 另一方面建立空间有限元模型 (全模型)。
- 3) 利用神经网络强大的非线性映射能力以及信息记忆与学习处理功能, 建立多层停车系统钢结构简模型与全模型之间非线性力学本构关系的特征映射模型。
- 4) 基于映射模型对立体停车系统钢结构进行截面尺寸参数组合优化策略的离散变量优化设计, 以确定立体停车系统钢结构的最优设计方案, 为设备制造提供科学依据。

### 二、立体停车系统机械系统模块化设计及专家系统

#### 1. 研究内容

- 1) 立体停车系统机械系统进行模块划分。
- 2) 研究起升机构、平移机构、旋转机构三大模块的设计方法。
- 3) 关于三大机构模块 CAD 软件的模块化实现方法。
- 4) 基于专家系统技术对设计结果的可行性进行决策和评判。
- 5) 利用 VBA 支配 AutoCAD 进行模块参数化绘图。

#### 2. 实现路线

- 1) 在机构分析的基础上, 根据模块划分的原则对机构进行模块划分。
- 2) 在对各模块进行参数分析的基础上, 研究模块的设计计算过程。

3) 各模块之间能否相互配合组成产品主要取决于各模块的物理性能和尺寸参数,对模块的可集成性给出评判标准。

4) 对机械模块化设计 CAD 软件的模块划分原则进行研究,探索机械模块化设计 CAD 软件模块化设计方法。

5) 采用关系数据库技术和 Boolean 表格解决其数据对应关系,并在机械模块化 CAD 中集成应用。

6) CAD 软件模块化设计的实现。

7) 鉴于使用 CAD 软件用户的非专业属性,借助专家系统建立一般方法及理论,在机械模块设计 CAD 软件中融入专家系统,利用专家系统的知识表示、知识获取、知识运用三大组成部分,开发集成于立体停车系统机械系统模块化设计的专家系统,使其具有评判决策、反馈优化等功能。

### 三、立体停车系统机械结构系统参数化绘图

#### 1. 研究内容

- 1) 模块化图形的建立。
- 2) 模块化图形的参数化驱动。
- 3) 模块化图形的组装与装配。
- 4) 立体停车系统钢结构各部件的特征定义。
- 5) 立体停车系统钢结构部件的参数化绘制。
- 6) 基于装配关系的立体停车系统钢结构总图的总成。
- 7) 装配图的消隐。
- 8) 标题栏、技术条件的参数化。

钢结构总图的总成是目的,各部件的参数化绘制是核心,而钢结构各部件的特征定义是基础,只有定义了各部件的特征模型才能实现各部件的参数化绘制,进而实现立体停车系统钢结构总图的最后总成。

#### 2. 实现路线

- 1) 钢结构各零件的特征的定义。
- 2) 钢结构各部件的定义。
- 3) 钢结构各部件的参数化绘制。
- 4) 基于装配关系的钢结构总图的总成。
- 5) 运用 AutoCAD 提供的 SCR 文件结合数据库技术完成各模块图的绘制。
- 6) 利用 VBA 支配 AutoCAD 完成一些中间过程,将绘制成的模块化图形转换成 DXF 文件。
- 7) 当所有的模块图形绘制完成以后,利用 VBA 技术完成各模块 DXF 文件的组合以实现模块化的参数绘图。

### 四、立体停车系统作业建模、调度管理、过程仿真

#### 1. 研究内容

- 1) 针对立体停车系统存取作业过程,研究建立离散事件系统仿真模型。
- 2) 确定车辆的到达模式、到达间隔和时间分布。
- 3) 确定车辆等待服务的排队规则。