



# 第 1 章

## 城市轨道交通信号系统概述

### 教学提示

城市轨道交通系统是指主要服务于城市客运系统,通常以电力或机械力为动力,以轮轨运行方式为特征的车辆与轨道(导轨)等各种相关设施的总和。相比其他城市公共交通系统,它具有运能大、速度快、安全准时、节约能源,以及能缓解地面交通拥挤和有利于环境保护等优点。而城市轨道交通系统的安全运行需要信号系统来保障,通过城市轨道交通信号系统,可以实现行车指挥和列车运行现代化,提高城市轨道交通的运输效率。

### 学习目标

- 了解城市轨道交通概况;
- 掌握城市轨道交通信号系统的组成及发展;
- 理解城市轨道交通信号系统与铁路信号系统的异同;
- 了解城市轨道交通信号系统。

### 知识结构

本章知识结构如图 1.1 所示。

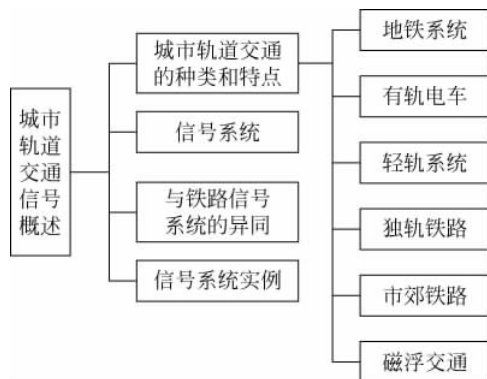


图 1.1 本章知识结构图

## 1.1 城市轨道交通概述

### 1.1.1 城市轨道交通的种类

随着经济社会的不断发展,城市轨道交通成为现代化都市所必需的交通工具,我国各大城市迎来了轨道交通的高速发展时期。城市轨道交通的定义是以电能为动力,采取轮轨运输方式的快速大运量公共交通的总称,它具有特殊的技术优势和经济特点,能迅速、安全地在城市范围内运送乘客,最大限度地满足市民出行的需要,满足多层次、多方面的客运需求。

现阶段我国城市轨道交通处于建设高潮,发展前景十分广阔。相关数据表明,截至2016年底,我国北京、上海、深圳、南京、武汉、重庆、天津等30个城市已开通运营城市轨道交通,共计133条线路,运营线路总长度达4152.8 km。2017年中国城市轨道交通市场仍将处于建设高峰时期,城市轨道交通建设正在向二三线城市延展。预计到2020年,中国城市轨道交通运营里程将达到6000 km。

城市轨道交通种类繁多,按照用途可分为地下铁道、有轨电车、轻轨交通、独轨交通、市郊铁路、磁浮交通等。下面分别介绍这几种交通形式。

#### 1. 地下铁道

地下铁道简称地铁,它的线路通常修建在地下隧道内,也有的建在地面或高架桥上。图1.2所示为上海地铁。地铁的单向小时最大运输能力为3万~6万人次,具有容量大、速度快、安全、准时、舒适、运输成本低、不占城市用地的特点,但建设成本高,适于出行距离较长、客运量需求大的城市中心区域。

#### 2. 有轨电车

有轨电车是采用电气牵引在轨道上行驶的轻型轨道交通车辆,它是一种单车或两辆编组运行在城市路面线路上的低运量城市轨道交通系统。它的运行速度较低,行车安全和准时性较差,运量小,单向运量在1万人次左右。图1.3所示为沈阳有轨电车。



图 1.2 上海地铁



图 1.3 沈阳有轨电车

#### 3. 轻轨交通

轻轨交通是在有轨电车的基础上发展起来的电气牵引、轮轨导向、车辆编组运行在专用行车道上的中运量城市轨道交通系统,一般采用钢轮钢轨,主要在城市地面或高架桥上运

行,线路采用地面专用轨道或高架轨道,遇繁华街区,也可进入地下或与地铁衔接。轻轨的输送能力为每小时1万~3万人次。图1.4所示为苏州轻轨。



图 1.4 苏州轻轨

#### 【知识窗：地铁与轻轨的区别】

按照国际标准,城市轨道交通列车可分为A、B、C三种型号,分别对应3 m、2.8 m、2.6 m的列车宽度。凡是选用A型或B型列车的轨道交通线路称为地铁,采用5~8节编组列车;选用C型列车的轨道交通线路称为轻轨,采用2~4节编组列车。对于两者的区别,有人认为城市轨道交通中,在地面以下行驶的叫地铁,在地面或高架上行驶的就是轻轨;还有人认为轻轨的钢轨重量比地铁轻。这两种认识都是错误的。城市轨道交通分为地铁和轻轨两种制式,地铁和轻轨都可以建在地下、地面或高架上。

#### 4. 独轨交通

独轨交通是使车辆在一根导轨上行驶的交通工具,具有中等运量,分为跨座式和悬挂式两大类。跨座式是指车辆跨在一根走行轨道上行走,其重心位于走行轨道上方,我国重庆市轨道交通采用的就是这种制式,如图1.5所示。悬挂式的车辆悬挂在轨道梁走行装置的下面,其重心处于轨道梁的下方。图1.6所示为德国运营的世界第一条悬挂式独轨。



图 1.5 重庆跨座式独轨



图 1.6 德国悬挂式独轨

## 5. 市郊铁路

市郊铁路是由电气或内燃机牵引,采用轮轨导向,车辆编组运行在城市中心与市郊、市郊与市郊、市郊与新建城镇间,以地面专用线路为主的大运量快速城市轨道交通系统。市郊铁路的输送能力在每小时 6 万~8 万人。如图 1.7 所示为北京市郊铁路。

## 6. 磁浮交通

磁浮交通是一种运用“同性相斥、异性相吸”的电磁原理,依靠电磁力使车厢悬浮并行走的轨道运输方式。磁浮交通有常导和超导两种类型。常导式磁浮线路能使车辆浮起 10~15 mm 的高度,运行速度较低,用感应线性电机来驱动。超导式磁浮线路能使车辆浮起 100 mm 以上,速度较高,用同步线性电机来驱动,技术难度较大。中国的上海浦东机场线路磁浮交通如图 1.8 所示,其最高时速可达 430 km/h。



图 1.7 北京市郊铁路



图 1.8 上海磁浮交通

### 1.1.2 城市轨道交通的特点

随着城市化进程的深入,城市轨道交通越来越成为城市公共交通的骨干,因此明确城市轨道交通的特点对于城市轨道交通的建设和发展有着重要的指导意义。下面从三个方面介绍城市轨道交通的特点。

#### 1. 城市轨道交通自身的特点

城市轨道交通属于绿色环保交通体系,符合可持续发展的原则,特别适应于大中型城市。其自身具有以下优点。

##### (1) 运营速度快,节省出行时间

城市轨道交通具有列车运行系统技术水平比较高,能够实现高密度运转的优点,列车的行车间隔比较短,而且城市轨道交通有自己的专用线路,不受其他交通工具的干扰和影响,不会出现交通阻塞而延误运行时间。因此,城市轨道交通的运营速度通常是常规道路交通工具的 1~2 倍,能够节省乘客大量的出行时间,保证乘客准时、迅速地到达目的地。

##### (2) 运输能力大

城市轨道交通与常规道路交通不同的是其运输工具可以编组运行,因此,城市轨道交通的运输能力比较大。地下铁道单向每小时运送能力为 3 万~7 万人次,轻轨交通在 1 万~3 万人次之间,而公共汽车或电车为 8000 人次,在客流密集的城市建设城市轨道交通可疏散公交客流,满足城市的发展需求。

### (3) 运营费用低,经济效益高

城市轨道交通与常规道路交通相比,能节省运营所需的人工费用,并且城市轨道交通的车辆使用年限比常规公交车辆长,其维修费、折旧费较低。而且,城市轨道交通的发展能够促进沿线城市 and 地区的发展,因此可以提高整个地区的综合经济效益。

### (4) 安全,舒适性高

城市轨道交通在线路、轨道及车辆等方面采用减少冲击、降低振动等技术,使得其运行平稳,乘车环境舒适。城市轨道交通与其他交通工具无相互干扰,可以减少交通事故次数和伤亡人数,在没有意外和自然灾害的情况下,运行安全有充分的保障。

### (5) 利于环境保护

城市轨道交通采用电力牵引,噪声小,污染轻,对城市环境不造成破坏。同时城市轨道交通分担了城市很大一部分载客量,可以减少汽车的交通量,使城市中汽车排放的废气和噪声降低,有利于改善环境。

### (6) 节省土地资源

城市轨道交通多建于地下或高架桥上,占用地面面积有限,充分利用了城市空间,节省了日益宝贵的土地资源。

但是,城市轨道交通也存在以下局限性。

(1) 建设投资巨大。城市轨道交通的建设要求高,施工难度大,设备技术标准高。因此,建设投资巨大,1 km 的轨道建设大概要 4 亿~5 亿的投入。

(2) 建成以后线路走向及线网结构不易调整。轨道交通线路是永久性结构,一旦建成,几乎再无调整可能性。

(3) 运营成本高。城市轨道交通系统能源消耗绝对量相当大,因此运营成本较高。

(4) 经济效益有限。城市轨道交通带有公益性,因此无法按运营成本核收票价。

(5) 发生重大事故时,不易疏散。城市轨道交通系统是一个大容量系统,而该系统与乘客直接接触的车站空间与外界交流的出入口的数量有限,所以一旦有重大事故发生,乘客疏散比较困难。

## 2. 城市轨道交通有别于铁路的特点

城市轨道交通虽然和铁路同为轨道交通,但是和铁路有很多不同之处。

### 1) 运营范围

城市轨道交通在城市市区及郊区运行,运营范围往往只有几十千米,不像铁路那样四通八达纵横数千千米,而且连接城乡。

### 2) 运行速度

城市轨道交通因站间距离短,且站站停车,列车运行速度一般不超过 80 km/h。而铁路的运行速度比较高,许多铁路线路速度超过 120 km/h,而高速铁路速度可以达到 300 km/h 以上。

### 3) 服务对象

城市轨道交通的服务对象单一,只针对市区内的客运服务,而铁路则包括客运和货运等。

### 4) 线路与轨道

城市轨道交通大部分线路在地下或高架通行,均为双线,各线路之间一般不跨线运营。

而常规铁路则全路成网,必须跨线运行。城市轨道交通正线一般采用 9 号道岔,车辆段采用 7 号道岔,而铁路的道岔控制比较复杂。另外,城市轨道交通还有铁路没有的跨座式和悬挂式。

### 【知识窗: 正线】

正线,是连接车站并贯穿或直股伸入车站的线路。主要指供载客列车运行的线路。

#### 5) 车站

城市轨道交通的车站一般多为正线,多数车站也不设道岔,换乘站多为立体方式;与之不同,铁路车站会设置数量不等的道岔及股道,有较复杂的咽喉区,换乘站多为平面方式。

#### 6) 车辆段

城市轨道交通的车辆段具有车辆检修、停放以及大量的列车编解、接发车和调车作业等功能,而铁路的车辆段只有车辆检修的功能。

#### 7) 车辆

城市轨道交通的车辆采用电动车组,而铁路的车辆称为机车车辆,包含了有动力和无动力两种,分为铁路机车、铁路车辆、客车等众多类型。

#### 8) 供电

城市轨道交通的供电系统包括牵引供电和动力照明供电,牵引供电采用直流电力牵引,而铁路的供电包括电气化铁路和非电气化铁路两种方式,我国的电气化铁路采用单相工频交流制供电。

#### 9) 信号

城市轨道交通是以车载信号为主、地面信号为辅的方式,而铁路以地面信号机的色灯“信号显示”为主体信号,车上的“机车信号”为辅助信号。

## 1.2 城市轨道交通信号系统

在城市轨道交通系统中,信号系统是保障列车运行安全与提高城市轨道交通的速度、输送能力和效率的重要设备。随着信息技术的高速发展,城市轨道交通往往采用高速度、高密度方式运营,因此,列车对信号系统的要求越来越高,选择合适的信号系统也成为城市轨道交通的关键所在。

### 1.2.1 城市轨道交通信号系统的作用

针对城市轨道交通自身的特点及需求,其信号系统起到的作用有以下两个方面。

#### (1) 确保列车运行安全

城市轨道交通信号系统是指挥列车安全运行的关键设备,信号系统需要满足一些条件,如列车马上驶入的轨道区段没有被列车占用、道岔位置正确并锁闭、敌对信号未开启等,才允许给列车发出允许前行的信号。有了信号系统的保障,可以减少城市轨道交通的运行事故,确保行车安全。

## (2) 提高城市轨道交通运行效率

在城市轨道交通信号系统中采用了列车运行自动控制技术,可以在保证列车运行安全的前提下,使列车以最高允许速度运行,大大缩短了行车间隔,增大了行车密度,列车的停站时间也随之缩短,从而提高了城市轨道交通的运行效率。

### 1.2.2 城市轨道交通信号系统的组成

城市轨道交通信号系统通常由信号基础设备、联锁设备、闭塞设备,以及列车自动控制系统组成,其结构如图 1.9 所示。

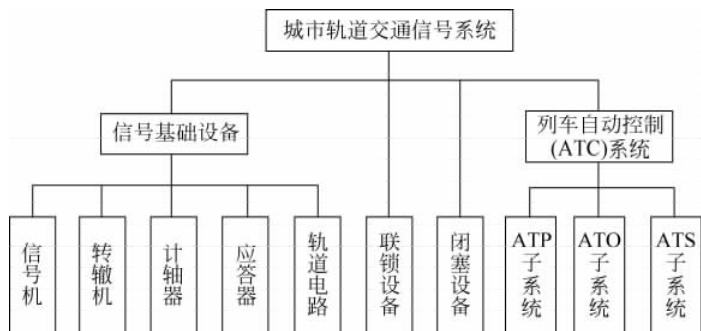


图 1.9 城市轨道交通信号系统结构图

#### 1. 信号基础设备

信号基础设备主要包括信号机、转辙机、计轴器、应答器、轨道电路等,它们是城市轨道交通信号系统的重要基础设备,能够可靠运用信号基础设备,是信号系统正常运行和充分发挥效能的保证。城市轨道交通信号基础设备沿袭了铁路信号的信号基础设备,但有的基础设备又与铁路不同,如信号机的设置和显示、轨道电路的制式等。

#### 2. 联锁设备

联锁设备是为了保证行车安全,通过技术方法实现联锁关系的设备,联锁关系即使进路、道岔、信号机之间按一定程序、一定条件建立起相互联系、相互制约的关系。联锁设备可以分散控制,也可以集中控制。目前使用的联锁设备有继电联锁和计算机联锁两大类,城市轨道交通中多用计算机联锁来实现联锁关系。

#### 3. 闭塞设备

闭塞就是用信号或者凭证,保证列车按照前行列车和追踪列车之间必须保持一定距离运行的技术方法,也就是保证区间或闭塞分区在同一时间内只能运行一个列车。闭塞设备即保证一个区间或闭塞分区在同一时间内只能运行一个列车的设备。城市轨道交通采用的闭塞设备主要是自动闭塞,一般包括固定闭塞、准移动闭塞和移动闭塞三种。

#### 4. 列车自动控制系统

列车自动控制系统包括列车自动防护(automatic train protection, ATP)、列车自动运行(automatic train operation, ATO)及列车自动监控(automatic train supervision, ATS)三个子系统,简称“3A”。

ATP 子系统的主要功能是监督及控制列车在安全状态下运行,应满足故障-安全原则。为了确保城市轨道交通线路列车的安全、高速、高效运行,必须装备 ATP 子系统。

ATO 子系统是自动控制列车运行的设备。ATO 子系统能够在 ATP 子系统的保护下,根据 ATS 子系统的指令实现列车的自动驾驶,自动地完成对列车的启动、牵引、巡航、惰行和制动的控制,确保达到设计的列车运行间隔和运行速度。

ATS 子系统是监控列车运行的设备。ATS 子系统在 ATP 子系统的支持下完成对全线列车运行的自动管理和监控。

### 1.2.3 城市轨道交通信号系统的发展

城市轨道交通信号系统是保障行车安全、提高运输能力的关键技术设备,它随着微电子技术、计算机技术、通信技术的发展而不断发展。

#### 1. 城市轨道交通信号系统技术的发展趋势

城市轨道交通信号系统中,地面与车载设备的安全信息传输方式,大致经历了模拟轨道电路、数字轨道电路和无线通信三个阶段。

##### 1) 基于模拟轨道电路的 ATC 系统

轨道电路是将区间线路划分为若干固定的区段,进行列车占用检查和向车载 ATC 设备传送信息的载体。列车定位是以固定的轨道电路区段为单位,采用模拟轨道电路方式由地面向车载设备传送 10~20 种信息,列车采用阶梯式速度控制,称之为固定闭塞。

#### 【知识窗：区间】

两个车站之间的线路叫区间。习惯将车站管辖范围以外的线路称作区间。

模拟轨道电路在我国应用的代表作品有：从英国西屋引进的 FS22500 无绝缘轨道电路（北京地铁 1 号线、13 号线）；从美国 GRS 公司引进的无绝缘数字调幅轨道电路（上海地铁 1 号线）。

从系统整体角度来看,基于模拟轨道电路的 ATC 系统中各子系统处于分立状态,技术水平明显落后,维修工作量大,制约了列车运行速度和密度的进一步提高,将逐步退出历史舞台。

##### 2) 基于数字轨道电路的 ATC 系统

数字轨道电路采用数字编码方式,地面向车载设备传送数十位数字编码信息,列车可实现一次模拟曲线式安全防护,缩短了列车运行间隔,提高了乘客的舒适度。采用数字轨道电路的 ATC 系统,列车可实现一次模式曲线式安全防护,因此称之为准移动闭塞。

数字轨道电路在我国应用的代表作品有：美国 USSI 公司的 AF2904 无绝缘数字轨道电路（上海地铁 2 号线）；德国西门子公司的 FTGS 无绝缘数字轨道电路（广州地铁 1、2 号线,南京地铁 1 号线等）。

数字轨道电路的 ATC 系统采用微电子技术、计算机技术和数字通信技术,延续了轨道电路故障-安全的特点,目前在我国和世界范围内开通运用较多,系统的可靠性和稳定性得到了充分的验证。

但是,数字轨道电路存在以下缺点。

(1) 必须具备很强的抗干扰能力。轨道电路中 ATC 信息电流一般在几十毫安至几百毫安,而列车牵引回流最大可达 4000 A。

(2) 受轨道电路特性限制,只能实现地面向列车的单向信息传输,信息量也只能到数十

比特,限制了 ATC 系统的性能。

### 3) 基于通信的列车控制系统

基于通信的列车控制(communication-based train control,CBTC)系统的特点是前、后列车都采用移动定位方式,通过安全数据传输,将前行列车的位置信息安全地传递给后续列车,可实现一次模式曲线安全防护,并且其防护点能够随前车的移动而实时更新,有利于进一步缩小行车间隔,提高运输效率,称之为移动闭塞。

我国已经开通使用的广州地铁 3 号线采用加拿大阿尔卡特公司的 Sel Trac MB 系统,用感应环线实现车地信息双向传输;北京地铁 10 号线、广州地铁 4 号线采用德国西门子公司的 Trainguard MT,用点式(access point,AP)实现无线信息传输,北京地铁 2 号线改造、机场线采用法国阿尔斯通公司的 Urbalis TM,用波导管和 AP 实现无线信息传输。

近几年建设的项目,如广州地铁 5 号线、广佛线,上海地铁 6、7、8、9 号线,北京地铁 4 号线,沈阳地铁 1、2 号线,成都地铁 1 号线等,都选择了基于 AP 无线通信的 CBTC 系统,它已经成为我国城市轨道交通信号系统选型的主流制式。

CBTC 系统采用当前先进的计算机技术和信息传输技术,不占用牵引供电电流的轨道通路,有利于牵引供电专业合理布置设备;不需要在轨道上安装设备,易形成疏散通道。采用 CBTC 技术,具有多方面优势(提高效率、易于延伸线建设和改造升级),可以充分利用国内现有的信号产品和资源,易于实现国产化。其中具有完全自主知识产权的计算机联锁设备和 ATS 子系统已经成功在现场开通使用,但目前 CBTC 系统的应用在国际上还处于初期阶段,国外厂商都在结合工程实践对其进行不断完善。

## 2. 国产化城市轨道交通信号系统进展

国内开发的城市轨道交通系统三种制式都有,基本上都采用基于无线通信的列车控制系统。主要开发进展情况如下。

(1) 中国铁道科学研究院充分利用专业齐全的优势,通过多年的研发,完成了 CBTC 系统所有子系统(ATS、联锁、ATP、ATO、DCS、应答器等)的研制工作,并进行了室内系统调试、现场试验和调试。铁科院的 ATS 子系统、计算机联锁子系统是国内成熟的系统,具有城市轨道交通业绩,已经具备工程实施的条件。铁科院的 CBTC 系统对无线故障情况下的后备转换进行了深入的研究,能够在保证行车安全的情况下,尽量减少对正常运营的干扰,这种技术达到了先进的水平。在安全性方面,与研发同步进行第三方安全认证工作,已签署安全认证合同并开展安全认证工作。

(2) 2004 年,北京交通大学、北京地铁运营公司、北京和利时公司申请北京市科委“基于通信的城轨 CBTC 系统研究”科研项目,在北京地铁试车线进行了 ATP、ATO 试验,并在大连设立了 10 km 试验段,包括地面线路和地下线路,进行了两列列车的追踪试验。2010 年 12 月 28 日,北京轨道交通亦庄线正式开通试运营。国产信号系统历经 10 年研制及成功应用,使中国一举成为继德国、法国、加拿大之后,第 4 个成功掌握轨道交通 CBTC 核心技术并顺利应用于实际工程的国家。亦庄线开通以来,信号系统运行安全、稳定、可靠,系统稳定性、故障率等各项指标优于其他线路,实现了“自动驾驶”“无人折返”“安全运营”三项目标。

2015 年 4 月,在中国(天津)区域轨道交通发展及装备关键技术论坛暨第 24 届地铁学术交流会上,北京地铁亦庄线工程被评为“城市轨道交通创新技术推广项目”,并在全国轨道

交通建设中推广应用。

(3) 北京全路通信信号研究设计院也正在进行城市轨道交通 CBTC 的研发,它们利用自身研发的通过 SIL4 级的安全控制平台,进行室内点式 ATP 的研发。

### 1.3 城市轨道交通信号系统与铁路信号系统

城市轨道交通和铁路交通同属于轨道交通的范畴,两者在运营形式、设备应用和控制方式等方面有一定的联系,但是也不尽相同。以下对城市轨道交通信号系统和铁路交通信号系统的异同进行论述。

#### 1.3.1 城市轨道交通信号系统与铁路信号系统的相同点

##### 1. 信号基础设备

城市轨道交通沿用了铁路交通的信号基础设备,与铁路交通有基本相同的信号设备,比如信号机、轨道电路、转辙机、计轴器、应答器等,但布局方式及应用形式方面会有一些不同。

##### 2. 停车点保护

安全停车点是基于危险点定义的,危险点是列车超越后可能发生危险的点。停车点有时即是危险点,通常在停车点前方设置一段防护段,ATP 子系统设计出的紧急制动曲线即以该防护段为基础,以保证列车不超过防护段。有时也可以在防护段设置一列车滑行速度值,如 5 km/h。列车根据需要在此基础上加速,或者停在危险点前方。

##### 3. 联锁的含义

城市轨道交通沿用了铁路基本的联锁的含义,其含义依然是信号设备之间相互制约的关系,在铁路上联锁往往局限在车站内部,城市轨道交通联锁一般包括正线和车辆段。

##### 4. 速度监督与超速保护

城市轨道交通和铁路交通都重视速度监督与超速保护,列车自动防护(ATP)子系统的速度限制分为两种:一种是固定速度限制,如区间最大允许速度(取决于线路参数),列车最大允许速度;另一种是临时性的速度限制,例如线路维修、施工时临时设置的速度限制。ATP 子系统始终严密监视这类速度限制不被超越,一旦错过,先进行告警,后启动紧急制动,并作记录。

##### 5. 测速与测距

目前城市轨道交通和高速铁路都有列车速度自动控制系统,它的一个重要的功能就是测速与测距。ATP 子系统利用装在轮轴上的测速传感器测量列车的即时速度,并在驾驶室通过计算生成速度曲线。ATP 子系统的列车定位是以轨道电路为基础的,而对轨道电路内的运行距离的测量,则可依赖于所记录的车轮转数及预知的车轮直径进行转换。

#### 1.3.2 城市轨道交通信号系统与铁路信号系统的区别

城市轨道交通信号系统和铁路信号系统在基本控制原理、信息传输方式等方面都有相同或相似的地方,但两者还是存在很大差异的:城市轨道交通更注重行车密度,把握列车的追踪间隔是控制的核心,而铁路信号系统不仅要缩短列车追踪间隔,更关键的是要提高运行速度,增大运营能力。所以两种信号系统的区别远远多于共同点。