

文章编号: 2095-2163(2020)08-0186-06

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

两相位信号交叉口反馈控制方法研究

焦振坤, 严 凌, 于本琪, 王嘉文, 徐明杰

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 交叉口交通流运行状况很大程度上决定城市道路网是否顺畅。为解决交叉口的拥堵问题, 本文以两相位信号控制交叉口为研究对象, 建立了不同状态下的车辆排队长度模型, 并根据排队长度实测值与期望值之间的偏差, 制定了相对应的反馈控制规则。利用 Matlab 接入 Vissim-COM 接口来动态访问和操控 Vissim 对象。通过调节信号周期时长来改变交叉口单位时间吞吐量及排队长度。进行了不同流量状态下的仿真模拟, 分析优化前后交叉口的通行性能和运行状态。实验证明, 所建立的信号反馈控制模型可较好地适应交通流的动态变化, 提高交叉口的运行效率。

关键词: 两相位交叉口; 信号控制; 反馈控制; 排队长度

Research on signal feedback control method for two-phase intersection

JIAO Zhenshen, YAN Ling, YU Benqi, WANG Jiawen, XU Mingjie

(Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] The operation status of the intersection's traffic flow largely determines whether the urban road network works well. To solve the problem of congestion at the intersection, the two-phase signal control intersection is used as the research object, and the vehicle queuing length model in different states is established. The deviation between the measured value of the length and the expected value establishes the corresponding feedback control rule. We use Matlab to access the Vissim-COM interface to dynamically access and manipulate Vissim objects, change the unit time throughput and queue length of the intersection by adjusting the signal cycle duration, and then perform simulations under different traffic conditions to analyze and optimize the traffic of the intersection before and after performance and operating status. Experiments show that the established signal feedback control model can better adapt to the dynamic changes of traffic flow and improve the operation efficiency of intersections.

[Key words] two-phase intersection; signal control; feedback control; length of queue

0 引言

城市信号交叉口的有效信号控制策略, 能够显著预防队列溢出、提高流动性并缓解拥堵问题。对交叉路口交通信号的优化一直是交通研究的热点问题。在过去的几十年中, 已经有大量针对信号优化的研究。由于控制系统中的反馈控制是利用误差原理, 通过观测输出来获得有关过程状态的信息, 产生一个新的控制输入, 使得系统性能按期望值变化。它具有更强的鲁棒性, 对动态系统的变化不太敏感, 其扰动及其响应更快、更准确。因此, 许多学者将反馈控制应用于交叉口信号控制, 以期更好地保证道路流程运行。

Joseph A. Ball 等人^[1]对单交叉口及由两个交叉口组成的简单路网, 提出了信号反馈控制方法的优化设计, 实现了使排队长度或等待时间最小的目标。Woelki Marko^[2]针对单车道交通流的瓶颈状况, 提出了密度反馈控制模型。其工作原理是当瓶颈区域的实际密度大于所设定的最佳阈值时, 就将车辆的

储存密度降低到一个不同的常数值, 从而最大化可通行的交通流量。

由于目前研究的几种在线反馈控制方法, 大部分的控制目标是防止队列溢出, 不能使车辆延迟时间最小化, 在理论上也没有评估它们的优化程度。故 Weili Sun 等人^[3]针对过饱和交叉口系统, 提出了一种准最优分散排队反馈控制策略。基于实时测量当前队列的大小逐周期应用并不断优化, 使队列长度能够近似离线研究所得出的最优队列; 李瑞敏^[4]构建了一种实时反馈动态交通信号控制系统。通过在相邻的两个交叉口设置摄像机组获取车辆输入信息。通过摄像机组—工控机—光端机—控制服务器的控制系统, 实现了对从第一个交叉口进入第二个交叉口的车辆预测, 从而生成和优化第二个路口的信号配时方案, 提高了控制系统的实时性; 冉学均^[5]提出了一种多模式互反馈信号控制优化方法, 以各类检测器实时获取的各种交通数据作为信号反馈控制的输入, 综合分析各类数据的影响, 评价控制

作者简介: 焦振坤(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能交通、交通规划与管理; 严 凌(1963-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 交通规划、交通经济、系统工程。

收稿日期: 2020-05-30

策略的适用性,来实现对信号控制方案的实时调整;王秀蒙^[6]针对过饱和状态下的单交叉路口,引入正定切换系统模型。基于正定切换系统的耗散性能分析,设计状态反馈控制器,来确定各相位有效绿灯时间,实现了排队长度最小的控制目标;Li^[7]考虑到交通需求的不确定性,协调进口延误和非协调进口延误两类延误公式,提出了一种自适应调整信号偏移量的方法,并验证了其在最小化平均总延迟方面的有效性;R.X.Zhong^[8]针对一类日常(DTD)非平衡过程,进行了动态反馈控制设计及稳态分析,提出了一种互联动态系统框架,证明在动态反馈控制下,路网流量状态比无控制时更快地收敛到期望的均衡状态;向伟铭^[9]将过饱和交叉路口的排队车辆消散问题,抽象为离散时间切换系统的指数稳定性问题,建立了信号交叉路口的离散时间切换系统模型,同时设计了状态反馈设置绿灯时长,保证排队车辆按照指数规律迅速递减,并尽量降低排队车辆数;张卫华^[10]基于路网宏观基本图实施城市区域交通控制时,为了防止边界交叉口受阻方向的车辆排队长度过长,同时提高路网内车辆完成率,提出了考虑受控区域边界交叉口交通拥堵状况的交通流反馈阀门控制方法;Mehdi Keyvan-Ekbatani 等^[11]在简单反馈控制结构的基础上,利用城市网络基本图的概念,通过应用阀门措施来改善饱和和交通条件下的移动性。微观模拟的结果表明,该路网的总时延明显减小,平均车速相应提高。

综上所述,相对于传统定时信号控制的离线操作,通过实时检测的交叉口信号控制更加精准高效。本文在以往研究的基础上,针对常见的两相位信号控制交叉口、基于反馈控制的理论思想,深入研究基于进口道排队长度的信号反馈控制策略。利用交叉路口的排队长度与期望值之间的偏差,控制调节信号周期时长,使车辆排队长度趋于稳定、降低交叉路口的延误、提高交叉路口的通行效率。

1 系统描述

1.1 交叉路口的几何结构

在中小型城市的道路网络中,两相位信号控制交叉口是比较常见的一种交叉口类型。两相位信号控制交叉路口的模型如图1所示,该模型每一相位的两个方向上的交通流都具有相同的运动特性。

在第一相位,东西方向为绿灯,车辆通行,南北方向为红灯,车辆停车等待;

在第二相位,南北方向为绿灯、车辆通行;东西方向为红灯、车辆停车等待。

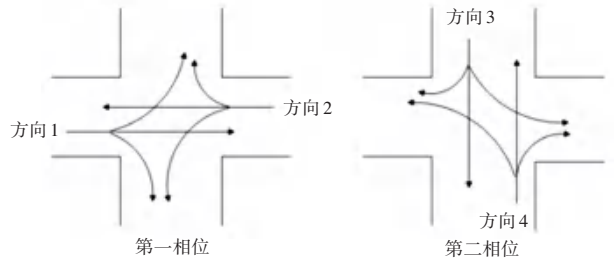


图1 两相位交通流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-phase traffic flow

1.2 交通状态界定

根据交叉路口的实际交通需求与交叉口通行能力之间的关系,可将交叉路口的交通状态划分为:非饱和状态、饱和状态及过饱和状态三种。

当信号控制交叉路口的实际交通需求小于其通行能力时,车辆到达率较低,交叉口处于非饱和状态,此时 $\mu < 1$;当实际交通需求与其通行能力几乎相等时,交叉口处于饱和状态,此时 $\mu = 1$;而当实际交通需求大于通行能力时,车辆到达率过大,交叉口处于过饱和状态,此时 $\mu > 1$ 。

$$\mu = \frac{D}{Q} \quad (1)$$

其中, μ 为信号控制交叉路口的饱和度; D 为实际交通需求; Q 为通行能力。

2 信号反馈控制模型

2.1 模型相关参数标定

本研究中信号综合控制模型的符号解释,见表1。

表1 模型符号解释

Tab. 1 Model symbol explanation

符号	含义
g_p	$P \in F \in (1,2)$, 信号绿灯时长(s)
r_p	$p \in F \in (1,2)$, 信号红灯时长(s)
C	周期时长(s)
q_i	$i \in F \in (1,2,3,4)$, 平均到达率(pcu/s)
s_i	$i \in F \in (1,2,3,4)$, 饱和流率
x_i	$i \in F \in (1,2,3,4)$, 各进口路段排队等待的车辆数(pcu/s)
x_0	进口道初始排队车辆总数(pcu)
x_k	红灯时间到达的车辆总数(pcu)
l	当车辆排队时,平均每辆车所占据的道路长度(m)
L_i	车辆实际占用道路长度,用车辆数表示(pcu)
L	排队长度期望值,用车辆数表示(pcu)

2.2 车辆排队长度建模

在一个周期内,一个相位的绿灯时间开始时,进

口道的车辆排队长度为:

$$x_i = x_0 + x_k. \quad (2)$$

(1) 非饱和状态。在交叉口非饱和状态下,车辆到达率较低,红灯期间进口道形成的排队车辆可以在绿灯时段全部放行。所以在本周期的红灯初期进口道没有排队车辆,即:

初始排队长度为:

$$x_0 = 0. \quad (3)$$

红灯时期到达的车辆数为:

$$x_k = \begin{cases} q_i r_p, & q_i < s_i; \\ s_i r_p, & q_i \geq s_i. \end{cases} \quad (4)$$

此时最大排队长度与红灯时间到达的车辆数一致,即:

$$x_i = \begin{cases} q_i r_p, & q_i < s_i; \\ s_i r_p, & q_i \geq s_i. \end{cases} \quad (5)$$

(2) 饱和或过饱和状态。在交叉口饱和及过饱和状态下,红灯期间进口道形成的排队车辆在绿灯期间不能全部通过交叉口,所以在本周期的红灯初期,进口道有车辆排队,队列长度的初始值非负,即:

$$x_0 = n, \quad \forall n \in N. \quad (6)$$

红灯时期到达的车辆数:

$$x_k = \begin{cases} q_i r_p, & q_i < s_i; \\ s_i r_p, & q_i \geq s_i. \end{cases} \quad (7)$$

此时最大排队长度为:

$$x_i = \begin{cases} q_i r_p + n, & q_i < s_i; \\ s_i r_p + n, & q_i \geq s_i. \end{cases} \quad (8)$$

3 信号反馈控制策略

本文旨在建立基于排队长度趋于稳定的信号反馈控制模型。通过调节信号灯的周期时长,实现对交叉口信号控制方案的实时优化调整。继而提高路口单位时间内车辆的通行能力,使路口车辆的排队长度趋于预先设定值。

实际检测到车辆占用道路的长度为:

$$L_i = x_i l. \quad (9)$$

设定反馈控制中第一种信号控制方案的周期时长为 C_1 、第二种信号控制方案的周期时长为 C_2 , 则信号反馈的控制规律为:

$$C = \begin{cases} C_1, & m < 0; \\ C_2, & m \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$m = \frac{L_i}{l} - L. \quad (11)$$

当实测排队长度小于预先设定值时,按照第一种信号控制方案放行车辆,交叉口的通行能力可以

满足当前交通流的使用需求,信号控制方案无需调整,信号灯的周期时长为 C_1 。

当实测排队长度大于预先设定值时,若按照第一种信号控制方案放行车辆,已无法满足当前交叉口车流量的使用需求,进口道已发生排队溢出现象。为避免造成交通瓶颈和进口路段愈加拥堵,需要延长信号灯的周期时长,将交叉口的信号控制方案改为第二种,即应用周期时长为 C_2 的信号控制方案。反馈控制系统,如图2所示。

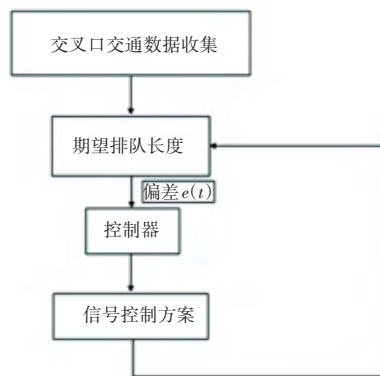


图2 信号反馈控制系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of signal feedback control system

4 仿真建模分析

4.1 基本假设

为保证实验的可靠性,给定如下假设:

- (1) 实验中交叉口的相位相序固定,按照交叉口现有的相位相序情况进行优化;
- (2) 不考虑绿灯启亮时的损失时间,绿灯启亮后,车辆均以饱和流率释放;
- (3) 黄灯时间为3 s,且黄灯期间车辆不得通过交叉口;
- (4) 当同一相位两个方向上的交通流在行驶过程中造成冲突时,直行车辆优先通行,左转车辆让行;
- (5) 暂不考虑行人、非机动车等因素对交通流的影响。

4.2 交叉口现状分析

(1) 交叉口概况。如图3所示:敦化路北进口、南进口及延吉东路西进口三个方向均有两条机动车道(1条进口道,1条出口道),延吉东路东进口有三条机动车道(1条左转专用车道,1条直行右转共用车道和1条出口道)。

将交叉口的四个进口路段分别标记为路段1、路段2、路段3、路段4,路段长度为 $w_j, j \in F \in (1, 2, 3, 4)$, 4个进口道的方向分别标记为方向1、方向

2、方向 3、方向 4,表示为 $i, j \in F \in (1, 2, 3, 4)$ 。

通过事前交通调查获取交叉口车辆构成情况,见表 2。

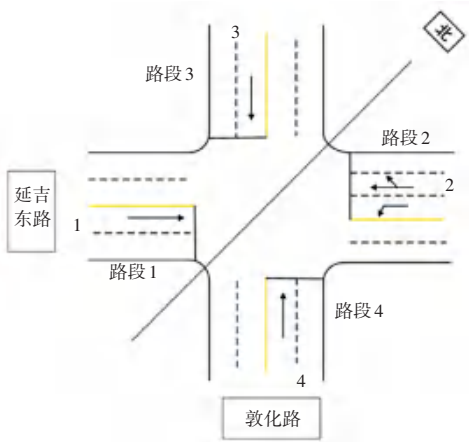


图 3 交叉口现行渠化情况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the current channelization of the intersection

表 2 交叉口车辆构成情况

Tab. 2 Vehicle composition at intersections

	小汽车	大型客车	货车
延吉东路	0.77	0.2	0.03
敦化路	0.83	0.4	0.03

(2) 交叉口现行配时情况分析

延吉东路与敦化路交叉口采用两相位信号控制方案,且其信号控制策略不随时段而改变,信号周期时长为 156 s,交叉口的相位相序及现有配时方案,见表 3。

表 3 交叉口现有配时情况

Tab. 3 Current timing situation of intersection s

	绿灯时间	红灯时间	黄灯时间
东西方向	66	89	3
南北方向	84	69	3

4.3 仿真环境

Vissim 仿真软件内部由交通仿真器和信号状态产生器两部分构成,它们之间通过接口交换检测器数据和信号状态信息。作为有效的交通情况分析工具,Vissim 既可以建立交通模型,在线生成可视化的交通运行状况,还可以对模拟交通情况进行设置:如交叉口信号控制、道路上的交通组成、驾驶员的行为以及道路类型等。并能对交通系统中的路网进行数据分析、参数评价以及路网的优化。因此,本文将使用 Vissim 仿真软件建立路网仿真模型。

虽然 Vissim 可以通过检测器、配置评价参数来获取路网的交通流检测数据(例如排队长度、行程

时间、延误等),但并不能实时获得车辆状态并进行动态调节。用户需要等待仿真结束后,通过生成的“.txt”文件查看检测数据。因此,为解决交叉口动态控制存在的不足,本文利用 Matlab 软件,通过 Vissim-com 接口对 Vissim 进行二次开发,更改特定设置对所建模型进行仿真模拟。

4.4 数值分析

针对交叉口实例,在信号反馈控制调节过程中,所设定的两种信号控制方案周期时长及具体配时如下:

第一种,5 信号配时方案周期时长 C_1 为 90 s,配时情况见表 4。

表 4 反馈控制中第一种信号控制方案配时情况

Tab. 4 The timing situation of the first signal control scheme in feedback control t/s

	绿灯时间	红灯时间	黄灯时间
第一相位	37	50	3
第二相位	47	40	3

第二种,信号配时方案周期时长 C_2 为 120 s,配时情况,见表 5。

表 5 反馈控制中第二种信号控制方案配时情况

Tab.5 The timing situation of the second signal control scheme in feedback control t/s

	绿灯时间	红灯时间	黄灯时间
第一相位	52	65	3
第二相位	62	55	3

4.4.1 平峰时段

交叉口平峰时段各个方向到达的车流量及分流情况,见表 6。

表 6 平峰时段交叉口各方向车流量

Tab. 6 Traffic flow in all directions at intersections during peak hours pcu/h

进口道方向	左转	直行	右转	合计
1	32	136	68	236
2	148	132	37	317
3	19	240	25	284
4	74	244	46	364

根据 3 个方案的仿真评价数据,可以得到不同信号控制方案的交叉口车辆数、平均延误、平均排队长度和停车时间,见表 7。

由上述数据可以得知,在统计时间段内,交叉口处于非饱和状态。此时车辆到达率较小,未发生交通拥堵现象。由图 4 可见,3 种信号控制方案通过交叉口的车辆数相差不大。与交叉口原有信号方案

相比,信号反馈控制和定时信号控制都能使交叉路口的车辆排队长度减少、车辆的通行效率提高。

表7 平峰时段评价指标输出结果

Tab. 7 Output result of evaluation index during peak period

	现行配时方案	定时控制方案	反馈控制方案
车辆数/pcu	185	185	189
平均排队长度/m	12.6	8.8	6.8
平均延误/s	25.5	19.0	16.4
停车时间/s	19.9	13.3	10.3

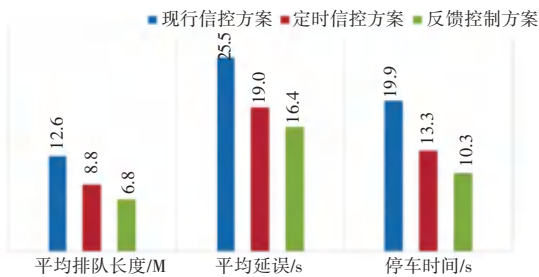


图4 平峰时段三种信号控制方案评价指标对比

Fig. 4 Comparison of evaluation indexes of three signal control schemes in flat peak period

在平均排队长度上,反馈控制方法较现行信号配时方案降低了46.03%,较定时信号控制方法降低了22.73%;在平均延误上,反馈控制方法较现行信号配时方案减小了35.68%,较定时信号控制方法减小了13.68%;在停车时间上,反馈控制方法较现行信号配时方案减小了48.24%,较定时信号控制方法减小了22.56%。

针对各个方案,虽然不同进口道统计时段的排队长度或延误时间优越性不同,但本文所提出的信号反馈控制方法始终优于其他两种方法。

4.4.2 高峰时段

交叉口高峰时段各个方向到达的车流量及分流情况,见表8。

表8 高峰时段交叉口各方向车流量

Tab. 8 Traffic flow in all directions at intersections during peak hours

进口道方向	左转	直行	右转	合计
1	32	281	122	435
2	106	313	5	424
3	42	436	41	519
4	77	546	100	723

根据上述3个方案的仿真评价数据,可以得到不同信号控制方案的车辆数、平均延误、平均排队长度和停车时间,见表9。

表9 高峰时段评价指标输出结果

Tab. 9 Output results of evaluation indicators during peak hours

	现行配时方案	定时控制方案	反馈控制方案
车辆数/pcu	299	286	302
平均排队长度/m	25.5	26.0	21.3
平均延误/s	28.7	29.9	24.7
停车时间/s	22.0	23.2	17.8

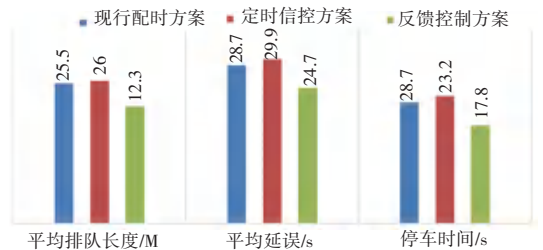


图5 高峰时段3种方案评价指标对比

Fig. 5 Comparison of evaluation indexes of three schemes during peak hours

由上述数据可知,在统计时间段内,交叉口处于饱和或过饱和状态时,信号控制方案下的排队长度过长,优化方案对交叉口的拥堵情况几乎没有缓解。本文提出的信号反馈控制方法与现行信号控制方案相比,在平均延误指标上减小了13.93%,在停车时间指标上减小了19.09%,这说明本文所提出的信号反馈控制模型可以适应交通流的随机变化,并根据车辆排队长度与期望值的偏差有效控制信号周期时长,在交叉口饱和及过饱和状态下,提高了交通流的运行效率,对交叉口拥堵情况有所改善。

5 结束语

综上所述,对于两相位信号控制交叉口,定时控制只适用于交叉口非饱和的情况,对于饱和或过饱和状态时的交叉口几乎没有效用。当交叉口处于非饱和状态时,本文所提出的信号反馈控制方法与定时控制方案及交叉口现有配时方案相比,都能使排队长度趋于稳定、降低延误,使车辆的通行更加顺畅。但在通过交叉口的车辆数几乎相同时,本文方法模拟仿真得到的车辆的排队长度比定时信号控制更短,所造成的延误更小,优化效果更为显著。当交叉口处于饱和及过饱和状态时,本文的方法与现有控制方案相比,有明显优化效果,减小了延误且使车辆排队长度更加稳定,对交叉口的现状有所改善,一定程度上缓解了交通拥堵。

本文研究有待进一步完善之处,如:所建立的两相位信号控制交叉口反馈控制模型,是在某些限制条件下施行的,存在一定的误差;未考虑行人、非机动车等对交通流的影响;车流转向时,交叉口进口道

的渠化问题对排队长度的影响;在交叉口饱和以及过饱和情况下,所建立的排队长度模型并未进行严谨的理论推导和仿真验证等。故可以在本文研究的基础上,由点到面,延伸到区域控制及城市路网,在网联交通环境下继续进一步的研究。

参考文献

- [1] BALL J A, DAY M V, KACHROO P, et al. Robust control for signalized intersections [C]//Intelligent Transportation Systems. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3207: 164-171.
- [2] Woelki Marko. Density-feedback control in traffic and transport far from equilibrium. [J]. Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2013, 87(6).
- [3] SUN Weili, WANG Yunpeng, YUGuizhen, et al. Quasi-optimal feedback control for a system of oversaturated intersections [J]. Transportation Research Part C, 2015, 57.
- [4] 清华大学,北京建筑大学. 实时反馈动态交通信号控制系统: CN201410831938.8[P]. 2015-04-22

- [5] 冉学均. 多模式互反馈交通信号控制系统 [C]//中国智能交通协会. 第十一届中国智能交通年会大会论文集. 中国智能交通协会: 中国智能交通协会, 2016: 399-409.
- [6] 王秀蒙. 城市过饱和路网中的信号灯动态实时反馈控制 [D]. 大连海事大学, 2018.
- [7] LI Lubing, HUANG Wei, LO Hong K. Adaptive coordinated traffic control for stochastic demand [J]. Transportation Research Part C, 2018, 88.
- [8] ZHONG R X, CAN H X, XU DB, et al. Dynamic feedback control of day - to - day traffic disequilibrium process [J]. Transportation Research Part C, 2020, 114.
- [9] 向伟铭,肖建,蒋阳升. Hybrid Control for Over - saturated Signalized Intersection Based on Switched System [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 57-61.
- [10] 张卫华,陈森,丁恒. 考虑边界交叉口交通拥堵的反馈阀门控制 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 241-248.
- [11] Mehdi Keyvan-Ekbatani, Anastasios Kouvelas, Ioannis Papamichail, et al. Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating [J]. Elsevier Ltd, 2012, 46(10).

(上接第 185 页)

上下文之间的关联性、表述者的意图与情感都是需要考虑的因素。人工智能算法更像是穷举法,利用海量数据训练自身,然后为所有决策的可能性提供判断依据和填补空白,这种方式很难模拟人类的情感。如果在新型的图书馆服务体系中引入 NLP,比如对话管理系统,可能会出现不可思议的结果。

4 结束语

大数据为图书馆赋予了更加多元化的内涵,未来甚至不用担心找不到提升自我的方向,也不用担心你所在的地区没有数字资源。互联、互溶、互通图书馆服务体系正在形成,完备知识生态链系统正在萌芽。从硬件基础到数字资源库,再到应用层,它可以满足读者和图书馆人员的各种需求。语音识别和图像处理技术的广泛应用让图书馆全天开放成为可能。当读者走进图书馆的同时,摄像头会识别你的个人身份,并依据你的借阅历史和网络行为数据分析最适合你的知识图谱,为你定制学习计划。依据个性化定制内容,为你推荐合适的参考文献及课程。大数据对馆藏资源的合理优化布局则更为显而易见,利用读者的行为数据,可以对藏书位置布局进行优化。例如,热点图书资料更加便于获取,图书采购的优化则更为显著。不仅仅可以满足当下,还可以预测未来的采购需求。这可以在数据冗余率尽可能低的前提下最大限度的满足所有人的借阅需要,对人力、物力、财力都是一种合理的调配,未来访问图书馆资源实体也许很难出现馆藏图书为零而无法借阅的现象。针对于古籍、

孤本等资源,可以通过浏览数字资源或体验 VR/AR 的方式进行。值得深思的是,图书馆虽在资源上有得天独厚的优势,但在技术方面相对滞后,且不同地域不同图书馆之间的馆藏资源和年度经费预算差别巨大。如何将这些馆藏资源进行有效整合,降低数据的冗余是一项巨大挑战。相信未来的图书馆服务体系,会更好的利用大数据与人工智能技术去打造交互式体验、自主智能化、个性精准推荐的阅览体验。

参考文献

- [1] 洪亮,周莉娜,陈珑琦. 大数据驱动的图书馆智慧信息服务体系构建研究 [J]. 图书与情报, 2018(2): 8-38.
- [2] 刘桂锋,卢章平,化慧. 图书馆大数据知识服务生态体系及其动力机制研究 [J]. 国家图书馆学刊, 2016, 25(3): 52-60.
- [3] 马晓亭. 基于大数据决策分析需求的图书馆大数据清洗系统设计 [J]. 现代情报, 2016, 36(9): 107-111.
- [4] 孟小峰,慈祥. 大数据管理:概念、技术与挑战 [J]. 计算机研究与发展, 2013, (1).
- [5] 夏立新,白阳,张心怡. 融合与重构:智慧图书馆发展新形态 [J]. 中国图书馆学报, 2018, (1).
- [6] 覃雄派,王会举,杜小勇,等. 大数据分析——RDBMS 与 MapReduce 的竞争与共生 [J]. 软件学报, 2012, 23(1): 32-45.
- [7] 徐聪,李擎,张德政,等. 文本生成领域的深度强化学习研究进展 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(4): 399-411.
- [8] 李舟军,范宇,吴贤杰. 面向自然语言处理的预训练技术研究综述 [J]. 计算机科学, 2020, 47(3): 162-173.
- [9] 孟小峰,慈祥. 大数据管理:概念、技术与挑战 [J]. 计算机研究发展, 2013, 50(1): 146-169.
- [10] 冯登国,张敏,李昊. 大数据安全与隐私保护 [J]. 计算机学报, 2014, 37(1): 246-258.
- [11] 申德荣,于戈,王习特,等. 支持大数据管理的 NoSQL 系统研究综述 [J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1786-1803.