

文章编号: 1001-0920(2006)05-0492-05

## 基于极点配置的网络流量控制研究

井元伟<sup>1</sup>, 曾晖<sup>1</sup>, 潘伟<sup>1,2</sup>

(1 东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2 沈阳炮兵学院 电子侦察系, 沈阳 110162)

**摘要:** 应用极点配置方法, 讨论了根据网络的现实状态将极点配置在不同区域, 使链路具有较高的利用率且解决网络 congestion 的问题。由于利用前面时刻的信息, 提前通知源端网络的使用情况, 从而避免了时延对其性能的破坏性影响。此算法不仅保证了网络缓冲器的不溢出及带宽的公平分配和充分利用, 而且使信源速率能快速、动态地响应网络状态的变化。仿真结果验证了极点配置算法能使网络具有良好的动态性能。

**关键词:** ATM 网络; congestion 控制; 流量控制; 极点配置

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A

## Pole Assignment Algorithm in Networks Traffic Control

JING Yuanwei<sup>1</sup>, ZENG Hui<sup>1</sup>, PAN Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Process Industry Automation of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Department of Electric Detection, Shenyang College of Artillery, Shenyang 110162, China. Correspondent: ZENG Hui, Email: zh6135@163.com)

**Abstract:** Pole assignment algorithm is adopted to discuss that the higher utilization and congestion avoidance of network can be get if poles are assigned in different area according to network state. The use of foregoing information makes network state is achieved by source ahead of time, so devastating influence of time delay to network performance is avoided. The algorithm not only guarantees no buffer overflow and fair and sufficient utilization of bandwidth, but also makes source rate responding to the change of network state rapidly and dynamically. Simulation results approve that pole assignment achieves better dynamic performance of network.

**Key words:** ATM network; Congestion control; Traffic control; Pole assignment

### 1 引言

ATM 网络能够传递数据信息、声音信息和图像信息, 适应当今多媒体业务发展的需要。在 ATM 提供的 4 类服务中 (CBR, VBR, ABR 和 UBR), 后两种属于尽力而为的服务, 即建立 ABR 连接时, 它的带宽不被预留, 只是利用未被 CBR 和 VBR 使用的带宽。所以, ABR 是所有服务中最适合进行流量控制的。

流量控制可以根据网络负载动态调整输入业务量, 并根据每个连接的需要有效地分配带宽。于是, 不仅避免了网络 congestion, 而且可提高网络资源的使用

率<sup>[1,2]</sup>。流量控制分为两类: 基于速率的流量控制和基于信用的流量控制<sup>[3,4]</sup>。

ATM 论坛流量管理规范 4.0<sup>[5]</sup> 定义了一套端到端的、基于速率的 congestion 控制框架。即分组沿着预先建立的通路由源端经中间交换节点不断地存储转发直至目的端。同时, 信源定期向网络中发出资源管理 (RM) 信元, 途经的交换机根据本身的 congestion 状态填写该信元中的相应域, 信元到达信宿后经反向连接回到信源。于是, 信源可根据 RM 信元提供的网络 congestion 信息来调整自己的发送速率。然而, 时延的存在使得源端不能及时获得网络的状态信息, 从而导致网

收稿日期: 2005-06-22; 修回日期: 2005-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60274099); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20020145007)。

作者简介: 井元伟 (1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、远程通讯网络控制等研究; 曾晖 (1978—), 女, 长春人, 博士生, 从事通信网络中的控制问题研究。

络拥塞甚至崩溃 因此, 时延不利影响是必须加以控制的

文献[6]针对具有一个瓶颈和多用户的高速通信网络系统, 提出一种时延相关控制方法 此方法能降低数据丢失率, 提高网络利用率, 但控制器的设计需要知道时延上界, 因此影响了控制器的设计和时延补偿的有效性 文献[7]从理论上证明Kahn 算法能够确保缓冲器的不溢出及带宽的公平分配, 但没有考虑ABR 业务带宽或缓存发生改变的情况 当ABR 业务的带宽或缓存被重新分配时, 需要改变ABR 源的发送速率, 以避免拥塞的产生和确保带宽的充分利用 因而, 如何同时保证缓存以及带宽的利用率成了流量控制的关键问题

本文采用极点配置算法<sup>[8]</sup>, 根据网络的实际情况将极点配置在不同位置, 动态跟踪网络带宽的变化, 调整缓冲器队列长度 当实际网络带宽的分配率跟踪上预定值, 并且实际队列长度跟踪上给定的参考值时, 网络的数据丢失率就会很低, 这时网络具有较高的利用率, 信源由此调整其发送速率以达到满意的效果 但由于时延的存在, 使得理论分析的结果难以达到 本文以 $\Delta u$ 为控制律, 即 $\Delta u = u(t - dT) - u(t - (d + 1)T)$ , 其中 $d$ 为延迟拍数 由前面相邻两个时刻(与 $d$ 有关)的信息便可决定当前应采取的动作 此算法不仅解决了延时问题, 而且利用前面时刻的信息提前动作, 具有预估器的作用, 且算法简单

## 2 网络模型

在ATM 网络的ABR 通信中, 基于速率反馈的流量控制是进行拥塞控制的主要手段之一, 它是通过控制缓冲器队列长度 $y(t)$  来实施流量控制 为充分利用分配的带宽, 又不使缓冲器溢出, 将当时输出链路缓冲器的队列长度控制在大于零的一定范围之内, 采用交换机排队缓存中的队长变化来反映拥塞情况

一个具有简单拓扑结构的面向连接的分组交换网络可由图 1 来表示 图中S, D 和SN 分别表示源端、目的端和交换节点, VC<sub>i</sub> 代表虚电路, L<sub>j</sub> 代表链路

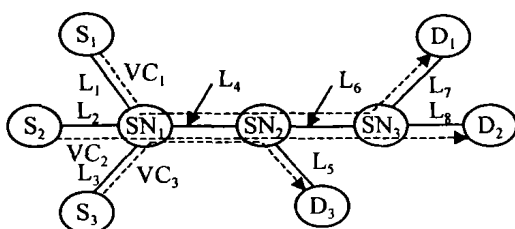


图 1 面向连接的分组交换网络

网络流量模型可由下列微分方程<sup>[7]</sup> 所确定:

$$\frac{dy_j(t)}{dt} = u_{ij}(t - \tau_{ij}) - f_j(t), \quad (1)$$

其中:  $y_j$  为链路 $L_j$  缓冲器的队列长度;  $u_{ij}$  为流经链路 $L_j$  缓冲器的第 $i$ 条VC 的信源速率;  $\tau_{ij}$  为信元从第 $i$ 条VC 的源端到链路 $L_j$  缓冲器的时延;  $f_j$  为第 $i$ 条VC 传输带宽: 当 $y_j(t) > 0$  时,  $f_j(t) = bw_j(t)$ , ( $bw_j(t)$  为链路的传输带宽); 当 $y_j(t) = 0$  时,  $f_j(t) = \min[u_{ij}(t - \tau_{ij}), bw_j(t)]$

## 3 系统设计

在ATM 网络中, ABR 通信的流量控制可看作以信源速率 $u(t)$  为控制变量, 交换节点输出链路的缓冲器队列长度 $y(t)$  为被控变量, 包含纯滞后环节且链路的服务速率 $f(t)$  为扰动的线性控制系统, 如图 2 所示 其中:  $RTT_s$  为往返时间,  $e^{-RTT_s}$  为控制滞后环节,  $1/s$  为积分器的传递函数,  $T_s$  为采样周期 在ATM 网络中, 链路带宽先分配给CBR 和VBR, 然后再将剩余的带宽分给ABR 和UBR. 所以, 用于ABR 的带宽是时刻发生变化的, 故将其作为不可测量的扰动来处理

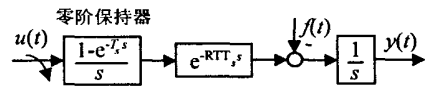


图 2 ABR 流量控制系统示意

根据网络模型, 系统传递函数为

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{e^{-RTT_s s} (1 - e^{-T_s s})}{s^2}, \quad (2)$$

可得

$$y^{(2)}(s) = u(s)e^{-RTT_s s} - u(s)e^{-(RT+1)T_s s}, \quad (3)$$

设 $RTT_s = dT_s$ , 其中 $d$ 为正整数 根据拉氏变换定义,

$$y^{(2)}(s) = u(s)e^{-RTT_s s} - u(s)e^{-(RT+1)T_s s} = [u(t - dT_s) - u(t - (d + 1)T_s)]e^{-st} = \Delta u e^{-st} = \frac{1}{s} \Delta u(s), \quad (4)$$

于是有

$$\ddot{y}(s) = \Delta u(s). \quad (5)$$

因为ATM 网络中面向ABR 的服务是基于速率流量控制的机制, 即每隔固定数目的数据信元, 源端周期性地发送一个RM 信元进入网络 RM 又可描述为FRM 和BRM. FRM 将从源端到目的端途经交换机的信息填入其相应域, 主要有当前信元速率(CCR)域, 拥塞标识(CI)域和显式速率(ER)域 目的端收到FRM 信元后, 将它随同最新的网络信息

反馈给源端,此时该 FRM 就成为 BRM<sup>[9]</sup>。所以,源端可以确定所需的发送速率,网络的状态是可观测的

将  $\Delta u$  看成被控变量,则状态方程的可观测标准形可描述为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u, \\ y &= [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

但由于网络时延的存在,使得信源不能及时获得有关网络状态的信息,因此,不能快速地响应网络状态的变化,不能有效地控制网络流量以及防止网络拥塞的发生

为解决网络中的时延问题,通过算法将信源所需的信息提前于该时刻通知源端,而不需要经过 RM 信元的往返传输。即采用状态反馈配置闭环极点,使源端快速响应网络状态的变化,从而解决网络中的时延问题,避免网络拥塞的产生

**引理 1** 用状态反馈任意配置闭环极点的充要条件是:受控系统可控

由系统的可观测标准形,可求得

$$\begin{aligned} \text{rank} [B \quad AB \quad A^2B] &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &= 3, \end{aligned} \quad (7)$$

即此受控系统是可控的。又由引理 1 可知,网络系统可用状态反馈任意配置闭环极点

应用极点配置方法,控制系统的方框图如图 3 所示

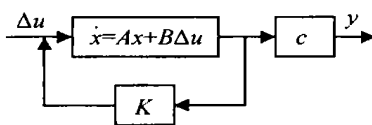


图 3 极点配置框图

其中,控制律

$$\Delta u = Kx, K = [K_1 \ K_2 \ K_3], \quad (8)$$

所以

$$\begin{aligned} |\lambda I - (A + BK)| &= \\ \lambda^3 - K_1\lambda^2 - K_2\lambda - K_3 & \end{aligned} \quad (9)$$

为保证系统稳定,将极点配置在左半平面,即  $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0$  于是有

$$\begin{aligned} \lambda^3 - K_1\lambda^2 - K_2\lambda - K_3 &= \\ (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3) & \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} K_1 &= (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), \\ K_2 &= -(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2), \\ K_3 &= \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \end{aligned}$$

由可观测标准形,有  $\dot{x}_1 = \Delta u, \dot{x}_2 = x_1, \dot{x}_3 = x_2, y = x_3$ , 那么,经过配置后的传函为

$$\begin{aligned} \frac{y(s)}{\Delta u(s)} &= x_3 / [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)x_1 - \\ & (\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)x_2 + \\ & \lambda_1\lambda_2\lambda_3x_3] = \\ & x_3 / [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)x_3s^2 - \\ & (\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)x_3s + \\ & \lambda_1\lambda_2\lambda_3x_3] = \\ & 1 / [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)s^2 - \\ & (\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)s + \\ & \lambda_1\lambda_2\lambda_3] \end{aligned} \quad (10)$$

于是,以  $\Delta u$  为变量,补偿时延引发的问题,可使缓冲器队列长度  $y$  随  $\Delta u$  的改变而改变,动态跟踪网络状态的变化,不仅防止了拥塞,而且保证链路带宽得到充分利用。本文运用的极点配置算法,根据网络的现实状态将极点配置在不同区域,动态地跟踪网络带宽的变化。当网络的状态突然改变,即有发生拥塞的可能时,也可通过极点配置算法调整各个极点的位置,从而减少网络的占用率

## 4 性能分析

### 1) 收敛速度快,振荡小

前面已证明该网络系统是可控的,因此可采用极点配置算法进行控制,以保证网络系统的稳定性。此算法应用于网络系统,能使缓冲器队列长度  $y$  根据网络状态动态地改变其应用状况,且  $\Delta u$  信息能先于某时刻前到达源端,保证了系统的快速响应,以及尽量小的振荡

### 2) 具有较高的带宽利用率和较低的信元丢失率

当缓冲器队列长度值较小时,通过提高源端发送速率来增加缓冲器的利用率,从而提高了网络的带宽利用率;当缓冲器队列长度值较大时,或有发生拥塞的可能时,可通过减少源端发送速率降低缓冲器的使用状况,从而确保较低的信元丢失率。这些均可通过配置极点来实现。因此,极点配置算法应用于此系统既能保证较高的带宽利用率,又能保证较低的信元丢失率

### 3) 所有活动 VC 之间链路带宽的公平分配<sup>[7]</sup>

由网络的流量模型

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = u_{ij}(t - \tau_{ij}) - f_j(t) \quad (11)$$

有(假设有  $m$  条 VC)

$$\frac{y_j((k+1)T_s) - y_j(kT_s)}{T_s} = \sum_{i=1}^{m_j} u_{ij}(kT_s - dT_s) - f_j(kT_s), \quad (12)$$

当系统稳定时

$$\sum_{i=1}^{m_j} u_{ij}(kT_s - dT_s) - f_j(kT_s) = 0$$

根据设计的控制系统, 可得  $u_{1j}(kT_s) = u_{2j}(kT_s) = \dots = u_{m_j}(kT_s) = u_j(kT_s)$ ,  $k = 0, 1, \dots$ , 于是可得  $u_{1j}(kT_s) = u_{2j}(kT_s) = \dots = u_{m_j}(kT_s) = f_j(kT_s)/m_j$ . 所以, 当系统稳定时, 所有活动的 VC 可以公平地分配链路带宽

4) 控制机制简单

由  $y$  和  $\Delta u$  之间简单的函数关系, 可以看出此控制机制的简单性和有效性

由以上分析可以看出, 所采用的极点配置算法能使系统具有较好的性能, 满足了自动控制中对控制系统的稳定性、效率性(有效性)、简单性和公平性的要求

5 仿真结果

设图 1 中各链路的带宽均为 100M bit/s 对链路缓冲器的队列水平进行控制, 以确保该瓶颈链路不发生拥塞, 且带宽得到充分利用和公平分配 仿真中考虑最坏情况的 ABR 带宽变化——阶跃变化, 即  $f(t) = 10I(t) + 100I(t-3) - 100I(t-5) + 100I(t-7) - 105I(t-10)$  cell/ms 假定用于链路  $L_4$  的缓冲器队列长度的设定值  $r_0 = 55$  cell, 其上的实际 ABR 通信带宽如图 4 所示

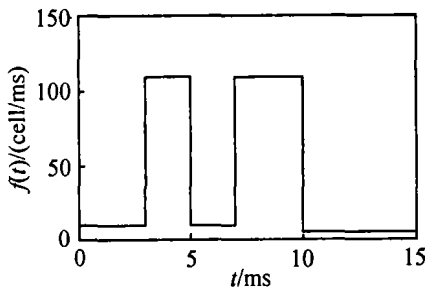


图 4 阶跃变化的 ABR 通信带宽

图 5 中链路  $L_4$  的缓冲器队列长度被控制在大于零且小于其设定值的一定范围之内 因此, 既保证了无信元丢失, 又能使链路带宽得到充分利用 图 5 中的速率差为  $\Delta u = 45$  cell, 此时, 极点被配置在  $\lambda_1 = \lambda_2 = -0.5$ ,  $\lambda_3 = -0.125$  图 6 为当 ABR 带宽突然改变时, 通过设置极点在  $\lambda_1 = -0.5$ ,  $\lambda_2 = -2$ ,  $\lambda_3 = -3$  来保证 ATM 网络的性能, 此时的速率差为

230 cell(配置不唯一). 如果缓冲器队列长度超过给定值, 网络会变得不稳定, 采用极点配置算法则可减少队列长度, 从而避免拥塞 此算法不管链路使用情况如何, 都可以动态地跟踪网络状态

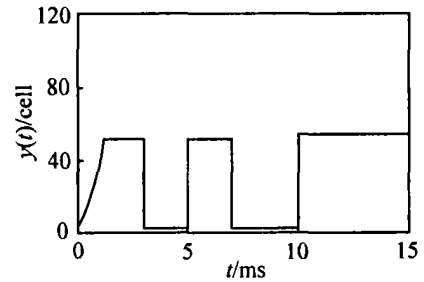


图 5 缓冲器队列长度( $\Delta u = 45$  cell)

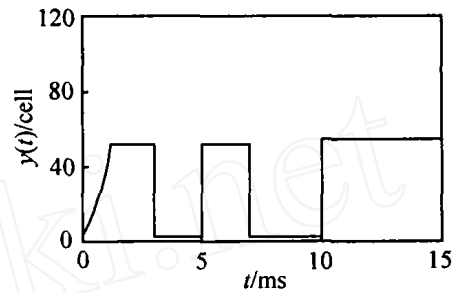


图 6 缓冲器队列长度( $\Delta u = 230$  cell)

目前, 应用控制理论方法对网络进行控制的例子有很多, 如 Kalman 算法, PID 控制等 从仿真图形(见图 7)可以看出, 本文的极点配置算法不仅具有较高的缓冲器利用率, 而且能快速响应网络状态的变化 文献[7]的 Kalman 算法虽然性能明显优于 PID 控制, 但其缓冲器利用情况不如本文好, 而 PID 控制则有相当严重的超调现象

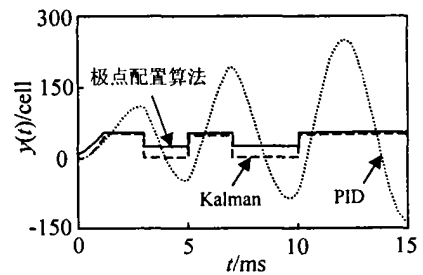


图 7 不同控制方法下的缓冲器队列水平

6 结 论

本文采用的极点配置算法不仅克服了时延对于 ATM 网络的不利影响, 而且适应 ATM 网络的复杂性和多变性的特点 信源不仅能快速响应网络状态的变化, 而且能使缓冲器容量得到有效的利用 在 ATM 的 ABR 通信中, ABR 能动态有效地改善整个链路的利用情况, 但当许多应用同时竞争网络资源时, 它可能产生潜在的网络拥塞 数据应用的突发性使 ABR 拥塞控制更加富有挑战性和复杂性

## 参考文献(References)

- [1] Jain R. Congestion Control and Traffic Management in ATM Networks: Recent Advances and a Survey [J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1996, 28(13): 1723-1738
- [2] 张孝林, 吴介一, 何小燕, 等. 基于速率的流量控制机制的研究[J]. *通信学报*, 2001, 22(5): 57-62  
(Zhang X L, Wu J Y, He X Y, et al. Study of Rate Based Flow Control Mechanisms [J]. *J of China Institute of Communications*, 2001, 22(5): 57-62)
- [3] Kamolphiwong S, Karbowiak A E, Mehrpour H. Flow Control in ATM Networks: A Survey [J]. *Computer Communication*, 1998, 21(11): 951-968
- [4] Liping An, Nirwan Ansari, Ambalavanar Arulamalam. TCP/IP Traffic over ATM Networks with FMMRA ABR Flow and Congestion Control [J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1998, 29(3): 2091-2102
- [5] ATM Forum. Traffic Management Specification Version 4.0 [S]. 1996
- [6] 姜培刚, 李春文, 吕景飞, 等. 时延高速通信网络的指数稳定跟踪控制[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(3): 546-550  
(Jiang P G, Li C W, Lv J F, et al. Robust Tracking Stabilization for the Communication Networks with Multiple Time-delays [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(3): 546-550)
- [7] 沈伟, 胡立生, 邵惠鹤. 网络流量控制系统的设计——Kalman 算法[J]. *通信学报*, 2003, 4(24): 49-57.  
(Shen W, Hu L S, Shao H H. The Design of Traffic Control System in Networks — Kalman Control Algorithm [J]. *J of China Institute of Communications*, 2003, 4(24): 49-57.)
- [8] 胡寿松. *自动控制原理* [M]. 第3版. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
(Hu S S. *Modern Control Theory* [M]. 3rd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.)
- [9] 张孝林, 吴介一, 朱正强, 等. ATM 网络中面向 ABR 服务的一种流量控制机制[J]. *电子学报*, 2002, 30(4): 503-507.  
(Zhang X L, Wu J Y, Zhu Z Q, et al. A Flow Control Mechanism for ABR Service in ATM Networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(4): 503-507.)

(上接第 491 页)

## 参考文献(References)

- [1] Iri M, Aoki K, Oshima E, et al. An Algorithm for Diagnosis of System Failures in the Chemical Process [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1979, 3(1-4): 489-493
- [2] Chang C C, Yu C C. On-line Fault Diagnosis Using the Signed Directed Graph [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1990, 29(7): 1290-1299
- [3] Venkatasubramanian V, Zhao J, Viswanathan S. Intelligent System for HAZOP Analysis of Complex Process Plants [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(9/10): 2291-2302
- [4] Cowell R G, Dawid A P, Lauritzen S L, et al. *Probabilistic Networks and Expert Systems* [M]. New York: Springer-Verlag, 1999
- [5] Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference* [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1988
- [6] Jensen F V. *Bayesian Networks and Decision Graphs* [M]. New York: Springer, 2001
- [7] Cooper G F. The Computational Complexity of Probabilistic Inference Using Bayesian Belief Networks [J]. *Artificial Intelligence*, 1990, 42(2-3): 393-405
- [8] 吴重光. 用于操作分析的 65t/h 环保锅炉仿真建模[J]. *锅炉技术*, 2002, 33(9): 1-6  
(Wu C G. Modeling and Simulation of 65t/h Steam Boiler for Operation Analysis [J]. *Boiler Technology*, 2002, 33(9): 1-6)
- [9] 张贝克. SDG(符号有向图)实时推理机制图形化软件平台及安全工程应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2003  
(Zhang B K. *Study with SDG(Signed Directed Graph) on Its Real-time Deduction Mechanism, Graphic Software Platform and Application in Safety Engineering* [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2003)