

船舶自动化电站系统仿真

施伟锋, 郑华耀

(上海海运学院交通部重点实验室航运仿真中心, 上海 200135)



摘要: 应用系统建模技术和计算机系统仿真技术, 在研究了某大型船舶电力系统的基础上, 运用 MATLAB 软件, 结合船舶柴油机发电机组和异步电动机的特性, 完成了船舶自动化电站系统的建模。实现的船舶自动化电站仿真器系统特性与实际系统特性接近。该系统对船舶轮机员技术培训和船舶电力系统的故障分析具有很高的价值。

关键词: 船舶自动化电站仿真器; 系统仿真; 建模; 故障分析

文章编号: 1004-731X (2003) 09-1249-04 **中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

Marine Automatic Electric Power Station System Simulation

SHI Wei-feng, ZHENG Hua-yao

(Shanghai Maritime University, Marine Simulation Center Major Lab. of Communication Ministry, Shanghai 200135, China)

Abstract: Applying technique of system modeling and computer system simulation, under the research of a marine power system, and combined with characteristic of marine diesel generator and asynchronous motor, a model of marine automatic electric power station system model is built by using MATLAB software. The characteristic of realized marine electric power station simulator system is close to real system. The system is very useful for marine engine technology training and marine electric power system fault analysis.

Keywords: marine electric power station simulator; system simulation; modeling; failure analysis

引言

为提高海船运输技术管理人员和维修人员的技术素质, 世界海事组织 (IMO) 和我国交通部及其国家海事局强制要求船舶轮机人员进行船舶自动化电站管理技术的仿真器培训; 又由于运用仿真器进行船舶自动化电站专业技术培训具有教学效率高和费用省的优点; 船舶自动化电站系统仿真器的研究成为一个热点。相对与火力发电系统, 船舶自动化电站系统具有以下特点: 船舶电力系统的发电机组是柴油发电机组, 船舶电力系统的容量相对来说要小得多, 船舶的用电负载的种类相对比较复杂。当船舶在装卸货物或进行移泊时期, 电气设备的起动、停止和变负荷运行工作频繁, 船舶电力系统处于动态变化的运行情况比较多, 系统的动态变化范围也比较大。

1 船舶自动化电站仿真器系统

船舶自动化电站仿真器系统是轮机模拟器的组成部分, 系统运用 Windows 操作系统组成局域网, 网络上有三种微机工作站。教学台微机是系统运行管理和教学管理工作站; 工业控制微机是通过数据采集系统控制模拟船舶主配电屏

和应急配电屏外部设备的工作站; 学生台微机是学员的离线操作或通过网络进行主配电屏在线操作的工作站。建立在工控微机 ISA/PCI 总线上的数据采集系统完成仿真软件与模拟船舶配电屏之间的人机信息交换, 数据采集控制系统的接口主要运用了数字量输入/输出和模拟量输入/输出技术。在 Visual Basic 集成开发环境中, 通过调用 Windows 操作系统的 API 函数, 进行发电机主开关动作、柴油机运转和故障报警各种声音的仿真; 通过对 DLL 动态连接库的调用实现发电机配电屏的数据采集与控制; 用 Visual Basic 控件完成软件 CRT 人机界面和网络通讯开发; 用 Visual Basic 编程完成船舶自动化电站仿真系统模型的实现。船舶自动化电站仿真器软件系统有七个组成部分: 电力系统模型, 自动化电站控制管理与报警系统模型, 软件人机界面, 硬件数据采集系统支持程序, 网络通讯程序, 自动评分程序和数据中心。系统软件中船舶电力系统模型是很重要的部分, 模型的建立是根据实际船舶电力系统而进行的。

2 船舶电力系统的结构

远洋船舶的电力系统由柴油发电机组发出功率, 在配电屏的自动控制下通过船舶电网输送电力。船舶吨位的不同或船舶主推进器功率的不同, 船舶电力系统的容量和设备的配置是不同的。例如某远洋大型集装箱船舶 (70000 载重吨位, 5250TEU) 的电力系统总体结构如图 1, 该电力系统是交流三相 AC440V、60HZ 电力系统, 有四台 2500kW、4000A 柴油发电机组, 一台 260kW、417A 应急柴油发电机组。电

收稿日期: 2002-08-18

修回日期: 2003-01-30

基金项目: 上海市高等学校科学技术发展基金项目 (02IK07); 上海市科学技术委员会科研项目 (021107013)

作者简介: 施伟锋 (1963-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 博士生, 研究方向为船舶控制工程与系统仿真技术; 郑华耀 (1946-), 男, 浙江上虞人, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动, 计算机控制技术。

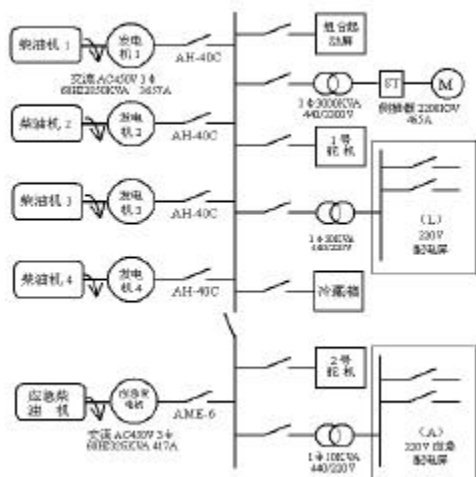


图1 船舶电力系统结构图

力负荷配置有：侧推器、锚机、起货机和制冷集装箱等甲板电气设备，空压机和滑油泵等机舱服务泵电气设备。分析船舶电力系统的组成和工作原理，可以建立船舶电力系统模型。系统的模型由柴油发电机组模型、自动化电站控制管理模型、自动化电站报警系统模型、配电屏模型、电网模型和负载模型组成，各个模型之间通过配电屏和电网相连接。系统模型完成船舶电力系统的控制管理仿真和电力系统运行的动态过程仿真。

3 船舶电力系统模型

3.1 船舶电力系统模型的建立

船舶电力系统模型是船舶自动化电站仿真器的重要组成部分，可以运用 MATLAB 软件进行系统建模、分析和仿真。根据实际船舶电力系统的组成，在 MATLAB 的

SIMULINK 交互式仿真环境下，运用 Power System Blockset 模块集和 Continuous Blockset 模块集对船舶电力系统进行了建模。其中典型的是两台发电机并网供电仿真模型（类似的有 1 台、3 台和 4 台发电机在网仿真模型）如图 2，两台 2500kW 柴油发电机组在网运行，通过主配电屏（MSB）进行供电。有一台功率为 1800kW 的电力推进设备（侧推器）通过 440V/3300V 变压器在网运行，有一台功率为 240kW/440V 的滑油泵和一些照明负载在网运行。系统测量的机械和电气参数有：每台发电机组的柴油机输出功率、转速、励磁电压与端电压；二号发电机的输出电流和主开关前后的电压；侧推器的端电压、工作电流和转速；滑油泵的工作电流和转速，各参数为标么值形式，无量纲。

3.2 柴油发电机组系统模型

柴油发电机组模型由柴油机模型、调速器模型、发电机模型和励磁调节器模型组成。发电机在柴油机的驱动下发出电功率。柴油机、调速器和励磁系统的模型框架如图 3。输入转速设定值 w_{ref} 、电压设定值 V_{tref} 和发电机综合测量信号 m ，从 m 中可提取出发电机运行的 d-q 轴电压、转速等信号。该单元输出柴油机机械功率 P_m ，励磁电压 V_f ，发电机端电压 V_t 和转速 w 。 P_m 和 V_f 输入到发电机使发电机运行（如图 2）。

3.3 柴油机与控制器模型

柴油发电机组模型方框图如图 4。模型由连续系统（Continuous Blockset）模块集进行建模。输入 $w_{ref}(pu)$ 是设定转速的标么值， $w(pu)$ 是实际转速的标么值，输出 $P_{mec}(pu)$ 是柴油机机械功率标么值。控制器是带二阶惯性的比例微分环节，通过调节柴油机油门达到转速调节作用。柴油机是一个二阶环节，输出量通过积分和延时得到转矩，转矩输出与

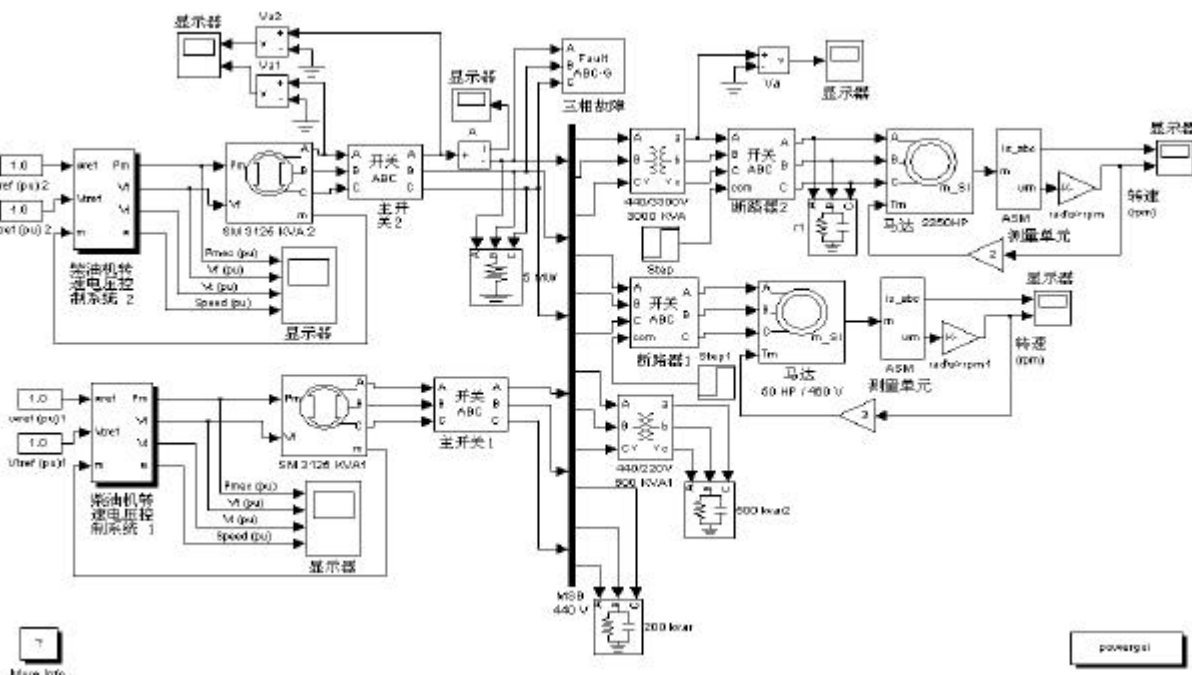


图2 船舶电力系统两台发电机并网仿真模型图

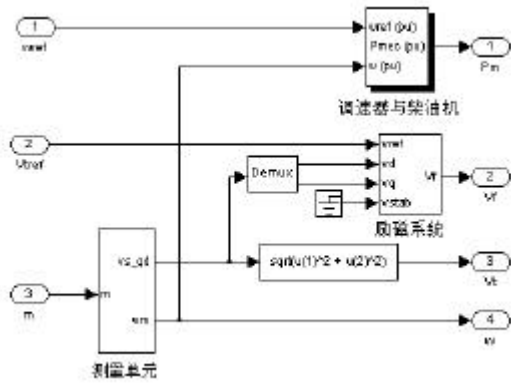


图3 柴油机与调速器和发电机励磁系统模型框架图

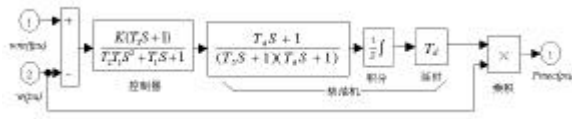


图4 柴油机及其调速器模型方框图

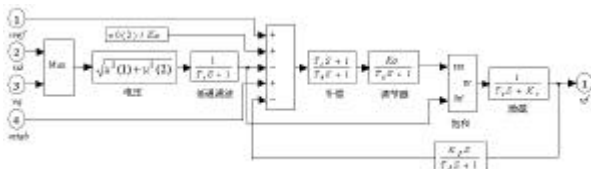


图5 发电机励磁系统模型图

转速测量值相乘得到机械功率, 最终输出给发电机, 带动发电机运转。

3.4 发电机励磁系统模型

发电机励磁系统模型方框图如图 5。模型由连续系统 (Continuous Blockset) 模块集进行建模。其中输入 v_{ref} 是电压设定参考值, v_d 是发电机 d 轴电压, v_q 是发电机 q 轴电压, v_{stab} 是接地零电压。输出 V_f 是励磁电压。d-q 轴电压运算后通过低通滤波器与设定值进行比较得到偏差值, 对偏差进行补偿和调节运算, 最后经过饱和限制以及励磁环节得到励磁电压。

3.5 同步发电机模型与异步电动机模型

船舶电力系统是由柴油发电机组进行发电的, 负载中运用比较多的是异步电动机。因此, 电力系统中同步发电机模型和异步电动机模型特别重要。在 Power System Blockset 模块集中采用了五阶的状态方程 (即不考虑零轴的派克方程, 并规定正方向的定子电流产生正向的磁链), 没有考虑 q 轴的阻尼绕组的电磁暂态过程 (T_{q0}' 和 X_q' 这两个数据为零)。同步发电机模型可以用 d-q 轴参考模型电路进行描述, 如图 6。全部的电气变量都是从定子侧看的, 上标带有一撇的是折算到定子侧的转子电量。对于同步发电机有如下的方程:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_d - \omega \mathbf{j}_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_q + \omega \mathbf{j}_d \quad (2)$$

$$V_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_{fd} \quad (3)$$

$$V_{kd} = R_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_{kd} \quad (4)$$

$$V_{kq} = R_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_{kq} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{j}_d = L_d i_d + L_{md} (i_{fd} + i_{kd})$;

$\mathbf{j}_q = L_q i_q + L_{mq} i_{kq}$; $\mathbf{j}_{fd} = L_{fd} i_{fd} + L_{md} (i_d + i_{kd})$;

$\mathbf{j}_{kd} = L_{kd} i_{kd} + L_{md} (i_d + i_{fd})$; $\mathbf{j}_{kq} = L_{kq} i_{kq} + L_{mq} i_q$

异步电动机模型也可以用 d-q 轴参考模型电路进行描述, 如图 7。对于异步电动机有如下的方程:

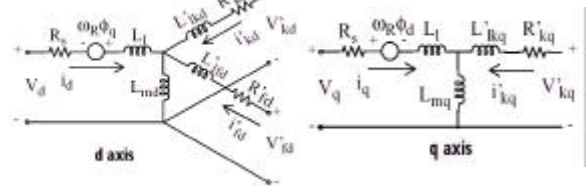


图6 同步发电机 d-q 轴模型电路图

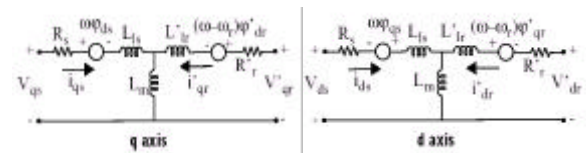


图7 异步电动机 d、q 轴模型电路图

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_{qs} + \omega \mathbf{j}_{ds} \quad (6)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}_{ds} - \omega \mathbf{j}_{qs} \quad (7)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}'_{qr} + (\omega - \omega_r) \mathbf{j}'_{dr} \quad (8)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \mathbf{j}'_{dr} - (\omega - \omega_r) \mathbf{j}'_{qr} \quad (9)$$

$$T_e = 1.5p(\mathbf{j}_{ds} i_{qs} - \mathbf{j}_{qs} i_{ds}) \quad (10)$$

其中: $\mathbf{j}_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$; $\mathbf{j}_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$;

$\mathbf{j}'_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$; $\mathbf{j}'_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$;

$L_s = L_{ls} + L_m$; $L_r = L_{lr} + L_m$;

对于机械系统 (下标 m 表示机械量) 有:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{w}_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \mathbf{w}_m - T_m) \quad (11)$$

其中: $\frac{d}{dt} \mathbf{q}_m = \mathbf{w}_m$

变量定义描述为: 下标 d 、 q 表示 d 轴、 q 轴量; 下标 s (或 s) R (或 r) 表示定子、转子量; 下标 l 、 m 表示漏感、互感量; 下标 f 、 k 表示励磁绕组、阻尼绕组量。 V_x —电压, R_x —电阻, i_x —电流, ψ_x —磁通, L_x —电感, ω —角速度, α —转角, p —极对数, T_e —电磁转矩, T_m —机械转矩, H 、 F 表示转子与负载的转动惯量、粘性摩擦系数。

4 船舶电力系统的仿真结果

在 MATLAB 的 SIMULINK 交互式仿真环境下, 对图 2 所示的两台发电机在网的船舶电力系统模型进行了仿真运行。图中“三相故障”是模拟电网发生三相接地故障的单元。发电机组主开关合闸后进入正常供电。在侧推器启动后的 0.1 秒发生了 2 号发电机输电线路短路故障, 在 0.4 秒时发

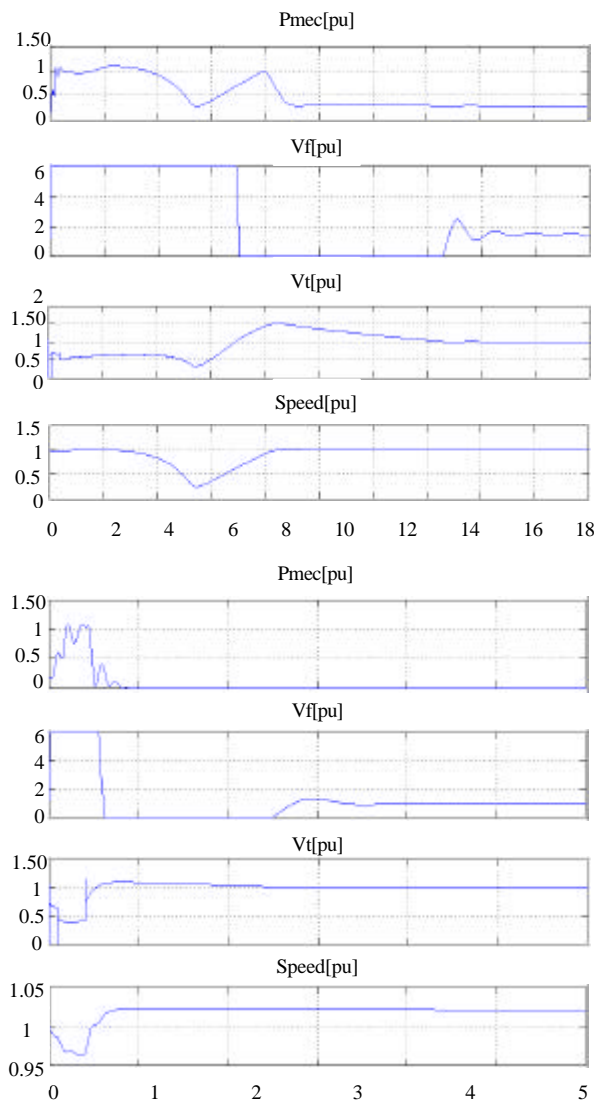


图 8 1 号和 2 号发电机组参数变化曲线图

生了 2 号发电机主开关跳闸,以后电网的全部负载由 1 号发电机供给。仿真中对发电机的电压、电流、发电机的励磁系

(上接第 1221 页)

能做了理论分析。在这些理论分析的基础上,本文对 MHSF 的另一个重要的可用性指标—信元丢失率进行了研究。

分析表明在各交换节点均匀地发送流量到其它节点条件下,MHSF 的吞吐量与 MHSF 的元数 k 、节点之间链路加速因子 s 和链路缓冲大小 m 有关(节点的内部端口数 M 通常固定),而且当 $s > M/k$ 时链路缓冲中信元排队才是稳定的,并且在可应用参数范围内,MHSF 的信元丢失率随着 s 、 m 或 k 的增加明显呈指数规律急剧下降。对于 4 元 2 立方体 MHSF,当加速因子为 2.5 时,只要链路缓冲大于 3KB,信元丢失率就能够降到 10^{-10} 以下。因此,在可应用的参数范围内,在较小参数条件下,MHSF 就具有较低的信元丢失率。论文的工作进一步论证了 MHSF 具有较好的可实现性。

统、柴油机输出功率和转速进行了检测,根据记录的数据表可以进行详细的故障分析。1 号 2 号发电机组柴油机输出机械功率标么值 $P_{mec}(pu)$ 和转速标么值 $Speed(pu)$,励磁系统反馈电压标么值 $V_f(pu)$ 和端电压标么值 $V_t(pu)$ 的变化如图 8 (图中的纵坐标为标么值,无量纲;横坐标为时间,单位为秒)。跳闸后由于切除了短路环节,系统最终进入了 1 号发电机供电的平稳状态。1 号发电机承受了外电路短路、2 号发电机跳闸以及大负荷侧推器的起动冲击。图 8 的上半部分是 1 号发电机组的参数变化情况, $P_{mec}(pu)$ 、 $V_f(pu)$ 、 $V_t(pu)$ 和 $Speed(pu)$ 波动的幅度都很大, $P_{mec}(pu)$ 的超调在 70%, $V_t(pu)$ 的超调在 70%, $Speed(pu)$ 的超调在 75%, $V_f(pu)$ 达到了饱和的上下限值,发电机受到了很大的冲击。这个参数波动值,可用于实际船舶发电机的主开关保护参数的设定,从而防止发电机组被烧坏。图 8 的下半部是 2 号发电机参数变化情况,发电机受到了很大的冲击。电网电压和电流、电机起动电流和转速都可以检测到,以分析电气设备的运行情况。

5 结论

船舶电力系统模型的研究对建立船舶自动化电站仿真系统有重要的意义。对船舶自动化电站的系统评估和故障仿真有很高的价值。应用 MATLAB 软件及其动态系统仿真工具 SIMULINK 对船舶电力系统进行建模、仿真和分析有很好的分析精度。在电力系统的故障仿真中,实际系统仿真起来有一定的困难,软件仿真是一个有价值的方法。

参考文献:

- [1] 倪以信,等. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 施亿生. 船舶电站[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [3] 陈桂明,等. 应用 MATLAB 建模与仿真[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 范影乐等编著, MATLAB 仿真应用详解 [M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
- [5] The MATH WORKS Inc. Power System Blockset for Use with Simulink 用户手册[Z]. Hydro-Quebec. TEQSIM International.2001.

参考文献:

- [1] 彭来献,李万林,田畅,等. 太比特路由器关键技术分析[J]. 电信科学,2002,19(3):11-14.
- [2] Singhal A, Jain R. Terabit Switches and Routers[EB/OL]. http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/terabit_routing/index.html, 1999.
- [3] McKeown N, Izzard M. A. Mekittikul, etc., The Tiny Tera: A Packet Switch Core [EB/OL]. <http://tiny-tera.stanford.edu/tiny-tera/>, 1996.
- [4] 李万林,齐望东,田畅,等. 太比特路由器多元超立方体交换结构时延性能分析[J]. 通信学报,2003,24(4):1-8.
- [5] Li Wanlin, Qi Wangdong, Tian Chang, et al. Stability Analysis of a New Terabit Level Switching Fabric [A]. Proceedings of ICCT2003 [C]. Beijing, China, April 2003, 536-539.
- [6] Kleinrock L. Queuing System-Volume II, Computer Applications [M]. John Wiley & Sons, 1976.
- [7] Karol M J, Hluchyj M G, Morgan S P. Input versus output queuing on a space-division packet switch[J]. IEEE Transactions on Communication, 1987, 35(12): 1347-1356.
- [8] McKeown N. Scheduling algorithms for input-queued cell switch [D]. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1995