

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.010

## 基于动态优先级调度机制的多级通信网络负载均衡

钱小燕<sup>1</sup>, 徐睿<sup>1</sup>, 韩磊<sup>2</sup>, 顾妍<sup>1</sup>, 刘青松<sup>1</sup>, 郑兆或<sup>3</sup>

(1.南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2.南京邮电大学计算机学院, 南京 210023;  
3.南京交通职业技术学院, 南京 211188)

**摘要:** 现代机场通信网络在智慧机场建设背景下,面临着保障航空管制等安全关键业务确定性低时延与满足视频监控、数据中心存储业务等高吞吐量传输的双重挑战。现有优先级调度与负载均衡算法存在固有局限性,仅能单一地满足低时延或高吞吐量需求。针对这一问题,本文提出基于时间敏感网络的多级负载均衡算法。首先,建立动态优先级调度机制,构建符合机场业务等级的优先级映射关系并支持临时优先级调整,以保障关键业务低时延传输;其次,设计基于排队时延的单级负载均衡机制,精确量化链路传输能力,实现业务流的最优出口决策;最后,通过多优先级队列状态管理机制,将动态优先级调度与单级负载均衡有机融合,实现多优先级的出口链路决策,从而最大化带宽资源利用率,显著提升网络吞吐量。实验结果表明,相较于等价多路径(Equal-cost multi-path, ECMP)路由算法、基于时延的负载均衡(Delay-based load balance, DLB)算法、先验信息未知流调度(Practical information-agnostic flow scheduling, PIAS)算法和时间敏感网络(Time-sensitive networking, TSN)优先级调度算法等基准方案,本文算法将机场关键业务流时延降低63%且整体业务流吞吐量最大提升40%,有效缓解了机场通信网络中“低时延-高吞吐量”的复合需求矛盾。

**关键词:** 智慧机场; 通信网络; 流量控制工程; 优先级调度; 负载均衡

中图分类号: TP393; TN913.21 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2025)06-1135-11

## Load Balance in Hierarchical Communication Networks Based on Dynamic Priority Scheduling

QIAN Xiaoyan<sup>1</sup>, XU Rui<sup>1</sup>, HAN Lei<sup>2</sup>, GU Yan<sup>1</sup>, LIU Qingsong<sup>1</sup>, ZHENG Zhaoyu<sup>3</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;  
3. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China)

**Abstract:** Targeting smart airports, modern airport communication networks must simultaneously support deterministic low-latency transmission for safety-critical services and high-throughput data delivery. Existing scheduling and load balancing methods struggle to balance both requirements. To address this challenge, this paper proposes a framework of multi-level load balance algorithm based on time-sensitive networking. First, dynamic priority scheduling establishes hierarchical service-tier mappings with temporary escalation support for critical operations. Second, queueing delay-aware load balancing quantifies link capacity via real-time metrics to enable optimal egress selection. Finally, multi-priority queue coordination unifies these mechanisms through stateful management, enabling holistic multi-priority egress decisions that maximize

**基金项目:** 国家自然科学基金(U2033207); 国家重点研发项目(2024YFB2906704); 江苏省自然科学基金重点项目(24KJA520006)。

**收稿日期:** 2025-09-30; **修订日期:** 2025-11-11

**通信作者:** 钱小燕, 女, 副教授, E-mail: qianxiaoyan@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 钱小燕, 徐睿, 韩磊, 等. 基于动态优先级调度机制的多级通信网络负载均衡[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1135-1145. QIAN Xiaoyan, XU Rui, HAN Lei, et al. Load balance in hierarchical communication networks based on dynamic priority scheduling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1135-1145.

bandwidth utilization and boost throughput. Experiments show the proposed framework reduces latency for critical services by 63% and increases overall throughput by 40% compared to benchmarks like equal-cost multi-path (ECMP) routing, delay-based load balance (DLB), practical information-agnostic flow scheduling, namely PIAS, time-sensitive networking (TSN). It effectively mitigates the low-latency versus high-throughput conflict.

**Key words:** smart airport; communication network; flow control engineering; priority schedule; load balance

随着中国民航现代化进程加速,智慧机场<sup>[1-2]</sup>建设成为数字化转型的核心任务。习近平总书记提出建设“平安、绿色、智慧、人文”4型机场<sup>[3-4]</sup>战略目标,而智慧机场通信网络需实现“机场一张网”全域互联<sup>[5]</sup>。然而,中国民航业中传统以太网难以满足 Airport4.0<sup>[6]</sup>时代全域协同需求,且航空器运行控制等关键业务对网络的低时延和高可靠性具有严格要求,而视频监控、数据中心存储等业务则对网络的高吞吐量传输能力有着迫切需求。如何应对这种“低时延-高吞吐量”的复合需求是现有机场通信网络流量控制的关键挑战。

现有机场通信网络流量控制算法<sup>[7]</sup>包括优先级调度和负载均衡。优先级调度方案通过流分类和优先级标记,优化关键业务的传输时延,却以低优先级业务的吞吐量损失为代价。负载均衡方案通过动态监测链路时延信息智能选择最优出口链路,显著提升网络整体吞吐量的同时却难以保障航空管制等安全关键业务所需的确定性低时延传输要求。时间敏感网络(Time-sensitive networking, TSN)通过 802.1Qbv 等协议严格划分业务优先级,确保航空管制等关键业务获得确定性低时延传输<sup>[8]</sup>。然而,其静态优先级分配机制导致低优先级业务的吞吐量显著下降,在机场高并发场景下可能引发非关键业务拥塞。先验信息未知流调度(Practical information-agnostic flow scheduling, PIAS),根据数据流大小动态分配优先级,长流自动降级以避免网络过载<sup>[9]</sup>。该方案虽能保证短流低时延和长流高吞吐量,但由于缺乏对业务关键性的显式区分,无法保障空管指令等小粒度高实时性业务的传输需求。等价多路径(Equal-cost multi-path, ECMP)通过哈希算法将流量均匀分散到多条等价链路,最大化利用网络带宽资源<sup>[10]</sup>。然而,其完全忽略业务优先级差异,使得高优先级业务可能被分配到高时延路径。基于时延的负载均衡(Delay-based load balance, DLB)实时监测链路排队时延并动态选择最优路径,有效降低网络平均传输时延。但该算法仅关注时延指标,未考虑业务关键性,低优先级业务抢占高优先级业务的链路资源,导致关键业务高传输延迟<sup>[11]</sup>。

针对当前机场网络流量控制方法无法满足低时延和高吞吐量的复合需求,本文提出基于时间敏感网络的多级负载均衡算法,将业务优先级调度与网络负载均衡策略有机融合,确保航空管制等关键业务的低时延通信,同时满足大数据业务的高吞吐量传输。本文主要贡献如下:(1)设计动态优先级调度机制,构建业务等级与传输优先级的映射关系,保障航空管制等关键业务确定性低时延;(2)设计基于排队时延的单级别负载均衡机制,通过链路状态表实时监测各链路队列状态,并结合历史最优路径信息,实现最优端口选择决策,有效保障网络流量均衡;(3)设计基于 TSN 的多级负载均衡机制,通过多优先级队列状态管理确保关键业务流避开高时延链路,解决链路级与队列级最优决策的冲突问题。

## 1 相关工作

机场运营环境对网络性能提出了双重严格要求,一方面,航空管制等安全关键业务(如地面运行控制、塔台管制)需要低时延的可靠通信;另一方面,视频监控和数据中心存储等业务则要求维持高吞吐量以支持海量数据传输。当前机场通信网络中的流量控制算法主要采用优先级调度和负载均衡策略,二者各具优势。

优先级流调度<sup>[12]</sup>概念指的是一种用于管控网络中不同数据流传输优先级的网络调度策略,从而确保关键数据在网络中得到及时传输和处理,提高网络性能和服务质量。优先级流调度分为最短工作优先算法(Short job first, SJF)和最早截止时间优先算法(Earliest deadline first, EDF)两类。EDF 类算法的核心是优先处理截止时间最短的流。截止时间驱动(Deadline-driven delivery, D3)算法通过已知截止时间分配发送速率,但存在资源竞争和硬件兼容性问题。后续改进包括:截止时间感知数据中心(Deadline-aware data-center, D<sup>2</sup>)传输控制协议(Transmission control protocol, TCP)算法结合拥塞控制实现兼容性优化<sup>[13]</sup>;最小延迟控制协议算法(Minimal-delay control protocol, MCP)利用显示拥塞通知(Explicit congestion notification,

ECN)动态调整速率<sup>[14]</sup>;截止时间感知(Time deadline aware, TDA)-pFabric算法直接优先调度最短截止时间流<sup>[15]</sup>。这些算法仍面临两大局限:(1)依赖截止时间先验知识;(2)过度优化会损害其他流性能。SJF类算法优先传输短流以降低延迟。抢占式分布式快速(Preemptive distributed quick, PDQ)算法和pFabric创新性地应用该思想,这些方法受限于需要预知流长度<sup>[16-17]</sup>。为解决流长度未知的问题,Bai等<sup>[9]</sup>提出PIAS算法,通过已发送字节数动态调整流优先级,模拟SJF效果。

负载均衡概念最早由John A. MacGregor提出,当时仅仅讨论了电话交换机中的话路分配问题。随着高速以太网和数据中心技术的发展,胖树拓扑构型在计算机网络中逐渐占据主流,应用于数据中心网络的负载均衡技术转而关注如何解决ECMP的负载不均衡问题,以保证整个网络的传输资源得到充分的利用。负载均衡机制的核心在于通过智能化的路由选择策略,将网络流量(包括流级flow、流片段flowlet及分组级packet)动态分配到多条可用链路上。负载均衡分为使用随机算法的被动负载均衡和依赖网络状态的主动负载均衡。

当前数据中心广泛采用RFC2992标准定义的ECMP被动负载均衡算法<sup>[10]</sup>。该标准通过五元组(源/目的IP地址、源/目的端口号、协议类型)的哈希取模计算将同流数据映射至固定转发端口实现流级别的被动负载均衡,已成为现代数据中心网络架构的基础性技术方案。Zhou等<sup>[18]</sup>提出的WCMP(Weighted cost multipath)路由是一种主动式负载均衡方案,它在传统ECMP静态哈希分发机制基础上,创新性地引入了动态权重调整策略。该方案通过集中式控制器,如软件定义网络(Software-defined networking, SDN)控制器,实时感知全网状态(包括链路带宽利用率、队列深度、传输时延等关键指标),并通过周期性优化算法动态计算各端口的转发权重,从而有效缓解了ECMP因哈希碰撞和路径不对称导致的流量分配偏斜问题。相较于被动式的ECMP,WCMP通过主动调控机制显著提升了网络资源利用率,尤其适用于现代数据中心非对称链路环境下的高精度流调度需求。

由于机场通信网络对安全性要求极高,现有数据中心网络中的流调度与负载均衡技术难以直接应用。Tao等<sup>[19]</sup>提出关键流优先调度(Key flow first prioritized flow scheduling, KFF)算法,在多租户数据中心中将流分类为延迟敏感型与吞吐需求

型,并进一步按长短流划分,通过多优先级队列实现差异化调度。本文受KFF启发,结合机场通信网络特性,构建了适用于机场数据流的优先级映射机制。Wang等<sup>[20]</sup>提出数据中心网络异构流量负载均衡(Load balancing for heterogeneous traffic, LBHT),通过动态调整流量交换粒度提升链路利用率,在数据中心网络中有效平衡了长短流负载。然而,在机场通信网络中,即使小于100 KB的短流也需重新划分优先级,LBHT的粒度调控机制无法直接适用。本文在此基础上,针对机场场景的高安全与实时性需求,重新设计了流分类与调度策略。

## 2 算法设计

本文提出一种基于TSN的多级负载均衡算法。如图1所示,首先,终端主机通过自适应优先级调度模块对网络流量进行处理,依次完成流分类、优先级标记和优先级调整3个关键步骤,为不同类型的数据流打上差异化的服务等级标签。接着,数据包进入交换机,基于延迟的负载均衡模块会实时监测链路状态,构建最优端口候选集,并做出单级路由决策,确保数据沿着时延最低的路径传输。最后,交换机的多级负载均衡模块通过精细管理各优先级队列状态,综合考虑业务等级和网络负载情况,做出最优的多级路由决策,最终实现关键业务低时延和整体网络高吞吐量的平衡。

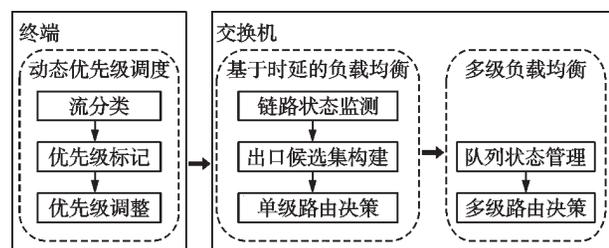


图1 本文算法架构

Fig.1 Architecture of the proposed algorithm

### 2.1 动态优先级调度机制

机场运行控制作为航空安全的核心保障环节,其业务流的优先级划分直接影响整体运行效能。机场运行控制作为航空安全的核心保障环节,其业务流的优先级划分直接影响整体运行效能。通过对机场业务特性和运行控制关键属性的深入分析,本研究主要将机场业务流细分为6个类别,如表1中优先级Q6至Q1的映射关系。而优先级Q7通常用于TCP的ACK消息传输,任何面向连接的网络都必须保证ACK消息为最高优先级;最低优先级Q0传输的尽力而为(Best effort, BE)流,在网络中通常是对数据传输没有严格时延要求的流量,在

表 1 流优先级映射

Table 1 Flow priority mapping

流类型	涉及业务	优先级
ACK 流	TCP 连接建立与中止	Q7
运行控制流	机场运行中心(Airport operations center, AOC)地面运行控制、塔台管制	Q6
营运服务流	旅客离港、办公、综合、广播等	Q5
关键视频流	异常行为视频监控	Q4
数据中心 Web 流	Web 业务	Q3
数据中心存储流	存储业务	Q2
存储视频流	存储视频监控	Q1
BE 流	除以上的其他流	Q0

机场通信网络仿真环境中作为背景噪声流量。

(1)流分类和优先级标记:在初始阶段,系统执行流分类和优先级标记。深度包检测引擎分析数据包的协议特征和应用场景,将其映射到预定义的业务类别。每条流根据其关键性被赋予相应的优先级标签,形成从 Q7(最高优先级)到 Q0(最低优先级)的层次化服务体系。这一分类过程严格遵循机场业务需求,确保空管控制等关键业务获得最高服务等级。

由于机场通信网络处于相对集中的一片区域,通信过程中的发送时延、传播时延、处理时延相对稳定,因此排队时延是影响机场通信可靠性和低时延的重要因素。在网络服务中,流到达往往服从泊松分布,因此本文采用排队论体系中经典队列模型 M/M/1 队列计算严格优先级传输的 TSN 队列中的理论排队时延<sup>[9]</sup>。802.1Q 协议的 TSN 优先级中优先级的 8 队列数是固定的,因此在期望时延计算时将各优先级队列的负载和速率确定为固定的相应数字下标(7 为最高等级优先级,0 为最低等级优先级)。最高优先级队列(第 7 优先级)数据处理速率为该物理链路的传输速率

$$r_7 = R \quad (1)$$

式中: $r_7$ 为最高优先级队列数据处理速率; $R$ 为物理链路传输速率,单位为 Gbit/s。

$$t_7 = \frac{L_7}{R} \quad (2)$$

式中 $L_7$ 为最高优先级队列的负载量,单位为 Gbit/s,与上游交换机出口链路速率相关。式(2)表明第 7 优先级队列独占全部链路带宽资源,其期望时延与负载量成正比,与链路速率成反比。

次高优先级队列(第 6 优先级)的数据处理速率定义为物理链路传输速度与最高队列的负载量之差

$$r_6 = R - L_7 \quad (3)$$

次高优先级队列的带宽可用性与最高优先级队列负载的制约关系为

$$t_6 = t_7 + \frac{L_6}{R - L_7} \quad (4)$$

式中 $t_6$ 表示队列 6 的时延期望,为 $t_7$ 等待高优先级队列与 $\frac{L_6}{R - L_7}$ 本队列的时延期望之和。

通用优先级队列(第  $i$  优先级)的剩余带宽模型为

$$r_i = R - \sum_{k=i+1}^7 L_k \quad (5)$$

完整的优先级队列时延期望为

$$t_i = \sum_{k=i+1}^7 t_k + \frac{L_i}{R - \sum_{k=i+1}^7 L_k} \quad (6)$$

这组递推公式构建了完整的优先级队列时延期望计算模型,通过累加所有更高优先级队列的时延期望,精确量化了各优先级业务流在竞争环境中的传输性能。

(2)优先级调整:由于不同业务流在时延敏感度与业务重要性方面存在显著差异,其优先级必须进行强制隔离。运行控制流直接关系到民航运行安全,必须与营运服务流及其他低优先级业务流在队列调度上实现严格隔离,以确保其传输的绝对优先性与确定性。同时,营运服务流、关键视频流及数据中心 Web 流作为典型时延敏感型业务,亦需与数据中心存储流等低优先级长流进行有效隔离,以避免高时延对服务质量造成影响。

在优先级分配机制中,最高优先级队列 Q7 通常用于传输 TCP 可靠性控制报文(如 ACK/NACK 等连接管理信息),但亦支持在特定场景下进行动态优先级调整。例如,当发生场面突发事件时,系统可将原处于 Q6 队列的运行控制流临时提升至 Q7,以确保关键控制指令获得极致的低时延传输保障;同时,关键视频流与 Web 流亦可相应提升至 Q5 优先级在保障常规通信需求的基础上,可通过主机端人工临时调整业务的优先级,赋予网络在应急场景下的灵活响应能力,从而全面提升系统运行的可靠性与安全性。

## 2.2 基于排队时延的单级负载均衡

在多级负载均衡机制的最底层,单级路由机制负责在每个交换节点上为到来的数据包做出即时的转发决策。其核心目标是在本地信息受限(通常无法感知整个网络的全局状态)的情况下,最小化数据包在本地交换机出口的排队延迟,从而缓解局

部拥塞并加速数据包转发,其运作机制可分解为以下核心步骤。

(1)链路状态监测:在决策时刻  $t$ ,交换机监测其  $N$  个出口端口对应队列的瞬时长度。记第  $i$  条出口链路在  $t$  时刻的瞬时队列长度为  $L_i(t)$ ,表征该端口的即时拥塞状态,其数学表示为

$$L_i(t) \in N_0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中  $N_0$  表示非负整数集,对应实际队列中等待转发的数据包数量,此步骤建立当前网络局部状态的实时快照。

由于链路传输速率在真实环境中并非固定值,需将队列长度量化为排队时延,其数学表示为

$$D_i(t) = \frac{L_i(t)}{\mu_i(t)} \quad (8)$$

式中  $D_i(t)$  为第  $i$  条链路排队时延;  $\mu_i(t)$  为第  $i$  条链路传输速率。同时,排队时延须由交换机的链路状态表维护,形成链路编号和对应链路状态的映射关系。如表2所示,每条链路分别对应其实时链路时延  $D_n(t)$ ,其中  $n$  为链路编号。

表2 链路状态表  
Table 2 Link state table

链路编号	链路时延
LINK0	$D_0(t)$
LINK1	$D_1(t)$
⋮	⋮
LINK $n$	$D_n(t)$

(2)出口候选集构建:首先,生成初始化候选集。当某数据流第1个数据包到达交换机时,转发引擎会从所有可用的  $N$  个输出端口中随机均匀采样  $d$  个候选端口,这一过程可以形式化为

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{\text{base}}(t) &= \{i_1, i_2, \dots, i_d\} \subseteq \{1, 2, \dots, N\} \\ i &\sim \text{Uniform}(1, N) \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\mathcal{C}_{\text{base}}(t)$  为  $t$  时刻的出口候选集;  $i$  为候选端口编号。这种设计相比全局监控显著降低了计算开销,从  $O(N)$  降为  $O(d)$ ,同时通过概率方法保证了在足够多包的情况下能覆盖所有端口。

为克服瞬时选择的短视性,引入历史记忆来生成历史候选集。每个交换机维护一个历史最优出口索引  $h(t)$  记录上一时刻选定的最优端口,其数学形式为

$$h(t) = \arg \min_{i \in \mathcal{C}_{\text{prev}}} D_i(t-1) \quad (10)$$

该记忆机制将前一时刻的优化结果传递到当前决策,保留历史上表现良好的路径信息。最后,通过合并基集与历史最优项构建增强候选集

$$\mathcal{C}_{\text{enh}}(t) = \mathcal{C}_{\text{base}}(t) \cup \{h(t-1)\} \quad (11)$$

对应的索引集表示为

$$\mathcal{I}_{\text{enh}} = \{i_1, i_2, \dots, i_d\} \cup \{h(t-1)\} \quad (12)$$

该机制通过随机采样发现新的可能优化路径,同时保留历史验证的有效路径。

(3)路由决策:基于增强候选集  $\mathcal{C}_{\text{enh}}(t)$  的路由决策机制采用时延敏感的动态选择策略,其核心在于实时选取瞬时排队时延最小的可用端口作为数据转发出出口。该策略可形式化为

$$\text{Selecte\_Index}(t) = \arg \min_{i \in \mathcal{I}_{\text{enh}}} D_i(t) \quad (13)$$

式中  $D_i(t)$  表示端口  $i$  在时隙  $t$  的排队时延计算值。通过持续跟踪各端口的队列状态信息,该机制能够自适应地将流量导向当前网络中最畅通的传输路径,从而有效降低端到端传输时延。

### 2.3 基于排队时延的多级负载均衡

多级负载均衡机制需要突破传统动态优先级调度与单级负载均衡的简单叠加,通过设计高细粒度的队列状态管理机制,实现多优先级流量的精细化均衡。该机制采用分层处理方式,先对数据流进行优先级分类与标记,再实时监测各链路上不同优先级队列的排队时延,最终通过全局状态实现多端口协同的分级负载均衡调度。

#### (1)队列状态管理

针对多级路由机制带来的系统复杂度提升问题,传统路由表在高细粒度网络状态管理方面存在明显不足。为此,本研究提出队列状态表这一数据结构,该结构通过多维状态表征各端口各优先级的传输时延,为动态路由选择提供准确状态依据。如表3所示,不同链路不同优先级队列分别维护对应实时链路时延  $D_i^p(t)$ ,其中  $p$  为队列优先等级,  $p \in \{Q0, Q1, \dots, Q7\}$ ,  $i$  为链路编号。

表3 队列状态表  
Table 3 Queue state table

链路编号	队列等级	链路时延
LINK0	Q7	$D_0^{Q7}(t)$
LINK0	Q6	$D_0^{Q6}(t)$
⋮	⋮	⋮
LINK0	Q $n$	$D_0^{Qn}(t)$
LINK1	Q7	$D_1^{Q7}(t)$
⋮	⋮	⋮
LINK $n$	Q $n$	$D_n^{Qn}(t)$

队列状态表作为多级路由系统的核心数据结构,通过双通道三维张量结构  $R(t) \in \mathbf{R}^{W \times M \times Q \times 2}$  实现对网络队列状态的精确建模,  $W$  为采样窗口(默认为10次时间采样),  $M$  为端口数量,  $Q$  为队列数

量。该表以端口号、优先级等级和时间构建索引,第 1 个通道的元素  $r_{i,p,0}(t)$  记录特定时刻  $t$  下端口  $i$  优先级  $p$  队列的队列长度;第 2 个通道的元素  $r_{i,p,1}(t)$  记录特定时刻下端口  $i$  优先级  $p$  队列的瞬排队时延。第 1 元素即队列长度  $L_{i,p}(t)$ ;第 2 元素参数通过队列长度  $L_{i,p}(t)$  和实测链路速率  $\mu_i(t)$  计算获得

$$r_{i,p,0}(t) = L_{i,p}(t) \quad (14)$$

$$r_{i,p,1}(t) = \frac{L_{i,p}(t)}{\mu_i(t)} \quad (15)$$

这一计算模型反映网络转发平面的瞬时状态特征。然而,单纯依赖瞬时测量值存在两个固有缺陷:首先,瞬时采样机制对网络微突发流具有高度敏感性,易因短期流量波动导致队列状态估计偏差,进而引发调度决策失准与系统吞吐量下降;其次,在遵循严格优先级 (Strict priority queuing, SPQ) 的流级调度策略条件下,瞬时时延仅反映特定采样时刻数据包的局部排队时延,且未能有效建模不同优先级队列间的动态耦合效应(如高优先级流量对低优先级队列的抢占式影响),从而削弱了状态评估的准确性。为此,本研究通过动态融合瞬时时延与时延期望,构建更稳健的网络状态表征体系。

系统初始化阶段采用瞬时时延模式,直接基于实时测量值进行状态评估。同时,在多级队列系统中,采用层级累加方式计算总时延(例如 Q6 的总时延=Q7 时延+Q6 时延),则系统初始化阶段的瞬时时延评估公式可修正为

$$D_{i,p}^{\text{init}}(t) = \sum_{k=p}^P r_{i,k,1}(t) \quad (16)$$

式中: $P$  表示最高优先级(如 Q7); $p$  表示当前优先级(如 Q6); $r_{i,k,1}(t)$  为端口  $i$  在优先级  $k$  的瞬时排队时延。该公式计算从当前优先级  $k$  到最高优先级  $P$  的所有层级时延之和。这种累加方式能够反映高优先级队列对低优先级队列的时延影响。

当系统运行稳定且积累足够采样数据后,自动切换至时延期望评估模式

$$E[D_{i,p}(t)] = \frac{\sum_{k=p+1}^P E[r_{i,k,1}(t)] + E[r_{i,p,0}(t)]}{\mu_i - \sum_{k=p+1}^P E[\lambda_{i,k,0}(t)]} \quad (17)$$

式中:第 1 项表示所有更高优先级队列的历史时延期望之和,体现了严格优先级调度中高优先级流量对低优先级流量的时延累积;第 2 项分子为当前优

优先级队列的历史队列长度期望,分母则为链路总带宽与所有高优先级队列的平均传输速率之差,反映了当前队列可用的实际带宽资源。

对于历史时延期望计算,本研究采用事件触发式滑动采样窗口机制。具体而言,窗口机制采用固定容量设计,设定窗口大小  $W=10$  个采样点。采样触发条件与数据流到达事件严格绑定,即每个到达交换节点的新数据流将触发一次状态采样操作。这种事件驱动的采样策略保证了时间序列的连续性,使每个滑动窗口始终包含最新的 10 个连续采样样本。

在时间维度上,窗口的时间跨度  $T$  为动态变量,其值由窗口内第 1 次和最后 1 次采样的时间戳差值确定

$$T = t_{\text{last}} - t_{\text{first}} \quad (18)$$

式中  $t_{\text{last}}$  和  $t_{\text{first}}$  分别表示窗口内第 1 个和最后 1 个采样点的时间戳。这种动态时间窗口设计能够自适应网络流量的速率变化。

通过该滑动窗口,历史时延期望可表示为

$$E[r_{i,k,1}(t)] = \frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T+1}^t r_{i,k,1}(\tau) \quad (19)$$

式(17)中高优先级队列的传输速率期望则由队列长度期望与时间窗口的比值确定

$$E[\lambda_{i,k,0}(t)] = \frac{E[r_{i,k,0}(t)]}{T} \quad (20)$$

式(20)通过融合历史统计量和实时带宽信息,有效克服了瞬时测量对微突发流量的敏感性,同时通过显式建模优先级间的带宽竞争关系,解决了传统方法无法反映队列间动态耦合的问题,为多级路由系统提供了更稳健的状态评估基础。

## (2) 多级路由决策

多级负载均衡决策机制通过分层状态评估和动态路径选择实现业务流的差异化调度。该机制通过 SPQ 的层次化服务模型,将网络流量按照业务关键性划分为  $P$  个优先级等级,形成从 Q7(最高优先级)到 Q0(最低优先级)的层次化服务体系。每个数据包通过深度包检测 (Deep packet inspection, DPI) 技术被赋予特定的优先级标记  $p \in \{Q0, Q1, \dots, Q7\}$ , 确定其所属的负载均衡层级。图 2 展示了多级优先级队列调度与负载均衡机制。终端根据业务流的优先级将其分类映射到不同队列,交换机根据排队时延动态分配至多条物理链路进行传输,从而实现高优先级业务的低时延保障。同时,通过多级负载均衡机制,避免单条链路的拥塞。

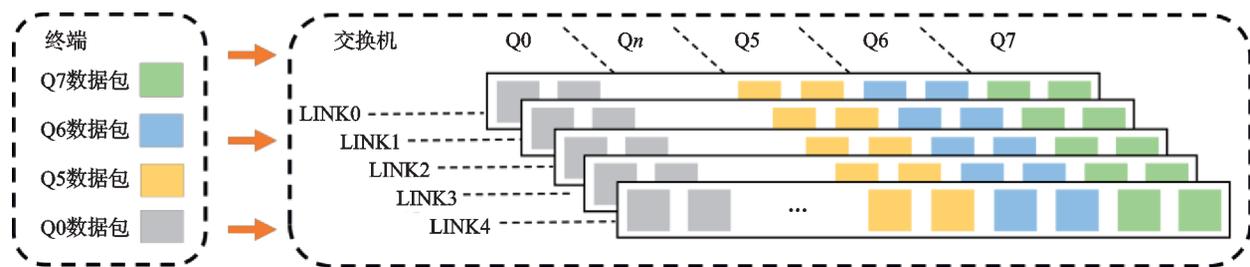


图2 多级负载均衡队列管理

Fig.2 Queue management of multi-level load balance

在路由决策过程中,系统首先通过查询路由表获取目标IP地址的可达端口集合

$$\mathcal{P}_{\text{candidate}} = \{i \in 1, 2, \dots, N \mid \text{RouteTable}(i, \text{dstIP})\} \quad (21)$$

式中  $N$  为交换机端口总数。

从可达端口中随机选取  $d=2$  个候选端口形成初始候选集

$$\mathcal{C}_{\text{random}}(t) = \text{RandomSample}(\mathcal{P}_{\text{candidate}}, 2) \quad (22)$$

系统为每个优先级层级  $p \in \{0, 1, \dots, 7\}$  维护独立的历史最优端口记忆单元  $h_p(t)$ , 其更新策略为

$$h_p(t-1) = \arg \min_{i \in \mathcal{C}_{\text{prev}}} \sum_{k=p}^7 r_{i,k,1}(t-1) \quad (23)$$

式中  $r_{i,k,1}(t-1)$  表示端口  $i$  在优先级  $k$  排队时延。 $\mathcal{C}_{\text{prev}}$  历史最优端口的引入有效保留了长期验证的高效路径信息。

最终决策候选集为两者的并集

$$\mathcal{C}_{\text{candidate}}(t) = \mathcal{C}_{\text{random}}(t) \cup \{h_p(t-1)\} \quad (24)$$

最终路由决策采用最小化时延策略,从候选集中选择当前时  $t$  下优先级  $p$  的最小累积排队时延端口

$$i_{\text{selected}} = \arg \min_{i \in \mathcal{C}_{\text{candidate}}} D_i^p(t) \quad (25)$$

式中  $D_i^p(t)$  为端口  $i$  在优先级  $p$  的总排队时延,包含高优先级队列的抢占时延与当前队列的传输时延,

$$\text{即 } D_i^p(t) = \sum_{k=p}^7 r_{i,k,1}(t)。$$

## 2.4 算法部署

在工程部署方面需系统性地解决硬件支持、计算开销和实时性保障等核心挑战。首要前提是部署支持关键 TSN 标准(如 IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1AS)的专用交换设备和终端网卡,确保底层硬件具备时间感知整形和高精度时钟同步能力。为应对算法的高计算复杂度,需在核心节点采用现场可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)或专用集成电路(Application-specific integrated circuit, ASIC)对队列状态管理、时延期望计

算等关键任务进行硬件加速,避免软件处理成为性能瓶颈,从而满足空管指令等业务对微秒级时延的苛刻要求。

在系统架构设计上,需采用“集中式管控+分布式执行”的混合模型以平衡全局优化与本地实时性。中央控制器基于 SDN 理念实现全局流量预测、优先级规则下发等宏观管理,而各 TSN 交换机本地代理则负责实时测量排队时延、维护候选端口集并执行快速路由决策。这种架构既通过集中式控制保障策略一致性,又通过分布式数据面确保单点故障下网络的自主运行能力,提升系统可靠性。

最终落地需遵循分阶段部署策略:先在非关键区域试点验证,再逐步扩展至飞行区、安防网等关键域,最终通过中央控制器实现全域集成。同时必须设计快速重路由(Fast reroute, FRR)机制实现链路故障下的亚秒级切换,并为最高优先级业务预留带宽资源。通过完善的监控系统持续追踪时延、抖动等指标,形成“部署-验证-优化”的闭环,最终推动本文算法从仿真环境走向真实机场网络的高可靠应用。

## 3 性能评估

### 3.1 实验设置

本文使用 ns-3 仿真平台评估本文算法在机场运行场景下的传输性能,并与无优先级的负载均衡算法 ECMP、基于时延的单级负载均衡算法 DLB、基于流大小的优先级调度算法 PIAS 以及基于机场关键业务流的优先级调度算法 TSN 比较。

网络拓扑:本实验构建一个包含 216 个路由器/交换机、1 731 个终端主机的机场通信网络,组成了骨干网、数据中心网和各区域业务网,各主机链路带宽均不低于千兆以太网标准,单链路带宽不低于 400 Gbit/s。图 3 是典型的两种机场网络拓扑,图 3(a)为数据中心网络拓扑,采用三级 Spine-Leaf 架构,实现高带宽、低延迟的数据交换,适用于云计算、大数据处理等密集计算场景;图 3(b)为机场骨干网拓扑,通过多组骨干节点互联航

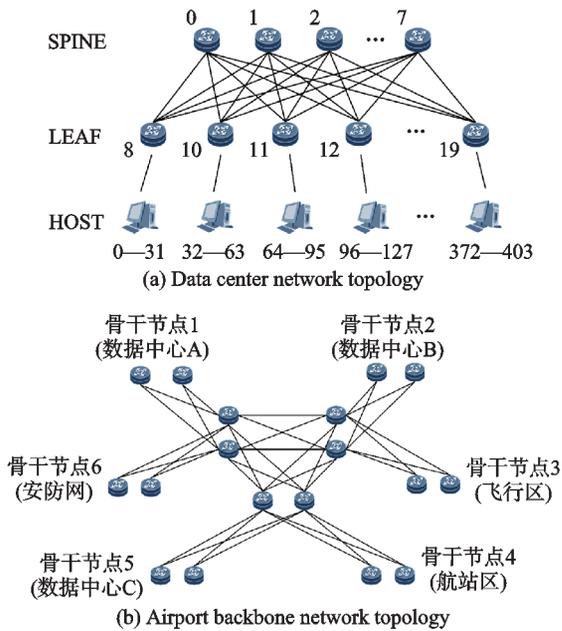


图3 机场骨干网和数据中心网拓扑结构

Fig.3 Airport backbone network and data center network topology

站区、飞行区、安防网及分布式数据中心,形成高可靠、冗余的骨干链路,确保航班调度、安防监控等关键业务的实时性与高可用性。

**流量负载:**负载总流数目为 1 731 个,均在  $t=0$  时刻同时由各区域主机产生,同时不定期生成 BE 流作为背景流,以模拟机场的全负载场景。各服务对之间采用完全随机的方式进行匹配,各业务类型流均满足如下流量模型<sup>[21]</sup>要求。(1) Web 请求业务: Web 请求业务指的是用户对网站页面的请求,并得到服务器数据的过程。它大致的流程是,用户向页面提交 1 次请求;页面处理请求后生成 1~10 个 HTTP 请求;服务器收到 HTTP 请求后处理数据并将其反馈给用户。一般而言,1 次 HTTP 请求产生 1~10 KB 吞吐。假设 Web 业务型主机每秒发送一次业务请求,那么单主机吞吐量可估计为

$$1 \times X \times Y = Z$$

式中:  $X$  为整数,  $X \in [1, 10]$ ;  $Y$  为整数,  $Y \in [1, 10]$ ;  $Z \in [1, 100]$ , 单位为 KB。

(2) 存储流: 存储流与 Web 业务不同,往往存在大体积的流带来一段持续的数据传输时间。因此极端情况下将存储业务流的吞吐上限视为接入链路的速率。

(3) 视频流: 根据机场视频监控要求,摄像头画质应满足 1080P、25 frame/s 及以上标准,1080P 分辨率的图片大小 49 766 400 bit, H264 编码传输协议的压缩比为 1/300,因此单个摄像头的发送带宽在 H264 编码传输协议下应满足

$$R_c \geq 49\,766\,400 \times 25 \div 300 = 3.96 \text{ Mbit/s}$$

(4) 特殊控制流: 仅考虑 LES2000 空管自动化控制系统传输行为。由于其内部通信协议具有不可知性,因此将其单主机流量估计为 Web 流与视频流之间

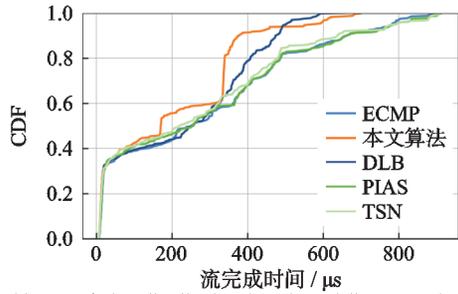
$$1 \text{ KB/s} \leq R_{LES} \leq 3.96 \text{ Mbit/s}$$

**评估指标:** 采用流完成时间 (Flow completion time, FCT)、FCT slow down 和累积分布函数 (Cumulative distribution function, CDF) 作为本次实验的评估参数。FCT 直接反映了数据流的端到端传输时延,是评估算法性能的基础指标。由于实验中各数据流的字节大小统一,不同算法的整体吞吐量比值可通过总传输时延的倒数计算得出。FCT slow down 定义为传输单位长度数据所耗费的时间,以纳秒每比特为单位,用于消除流大小差异对时延评估的影响,便于在不同规模的流之间进行公平比较。累积分布函数 CDF 则用于统计在不同流大小区间内完成的流数量分布,直观展示算法对不同长度流的完成情况统计特征。

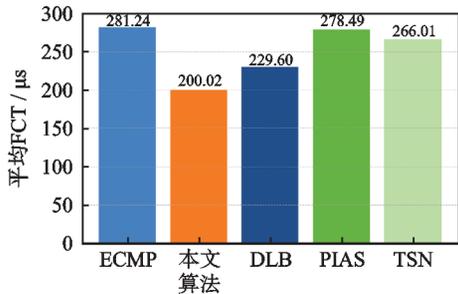
### 3.2 与现有方法的比较

多级负载均衡算法本质上是优先级调度策略与负载均衡策略的协同优化机制。在航空运输系统运行环境中,确保航空器运行安全的绝对可靠性和旅客服务质量的稳定性构成机场运营的核心需求。因此,本研究提出机场通信网络的优化目标函数应同时满足两个关键约束条件:通过严格的优先级调度机制保障关键业务流的确定性低时延传输,并通过主动负载均衡算法优化吞吐量敏感型业务流的传输效率。本文对 ECMP、DLB、PIAS、TSN 和本文算法这 5 种流量控制算法进行总体性能评估。同时,针对 6 个差异化服务等级分别进行量化性能评估。

图 4 给出了 5 种流量控制算法在 FCT 分布上的性能差异。总体而言,本文算法相比 ECMP、DLB、PIAS、TSN 分别缩短 29%、13%、28%、25% 的时延,提高 40%、14%、39%、33% 的吞吐量。CDF 曲线表明,传统负载均衡算法 ECMP 和 PIAS 在机场特殊业务场景下表现欠佳,二者 FCT 分布几乎完全重合,平均时延差异不足 1%,这验证了通用以太网流量控算法在特定场景下的局限性。相比之下,TSN 算法通过引入业务流优先级调度机制,其 CDF 曲线明显向左偏移,实现了约 5% 的性能提升,证实了优先级调度在机场业务环境中的有效性。DLB 算法通过整合排队时延先验信息,相比传统算法获得 20% 的时延性能优势,凸显了网络状态信息对流量调度的重要性。本文算法创新性地融合了业务优先级调度和时延感知负载均衡机制,在 CDF 分布和平均 FCT 指标上均展现出



(a) Cumulative distribution function of flow completion time for ECMP, DLB, PIAS, TSN, and the proposed algorithm



(b) Average flow completion time of ECMP, DLB, PIAS, TSN, and the proposed algorithm

图 4 ECMP、DLB、PIAS、TSN 和本文算法性能比较

Fig.4 Performance comparison between ECMP, DLB, PIAS, TSN, and the proposed algorithm

显著优势,平均时延最大降低 29%,整体吞吐量最大提升 40%。这一结果表明综合考虑业务等级和网络状态是实现高性能流量调度的关键。表 4 分别给出了本文算法和 ECMP、本文算法和 DLB、本文算法和 PIAS、本文算法和 TSN 的时延比值(表 4 中正值表示本文算法某项性能比基准算法好,负值表示本文算法某项性能比基准算法差),具体计算公式为

$$\text{时延比值} = \frac{\text{FCT}(\text{基准算法}) - \text{FCT}(\text{本文算法})}{\text{FCT}(\text{基准算法})} \quad (26)$$

式(26)表示具体时延比值为基准算法和本文算法的 FCT 差与基准算法 FCT 之比。

表 4 和图 5(a)给出了 5 种算法在运行控制流

中的性能比较。实验数据表明,TSN 算法平均 FCT 指标较传统 ECMP 算法显著降低 63%,验证了时间敏感网络技术的安全关键场景中的技术优势。本文算法 FCT 指标近似于 TSN(几乎不存在差距),融合负载均衡使业务性能曲线呈现高度平滑特性,特别是在  $10^5 \sim 10^6$  比特的中等业务规模区间,能够将 FCT slow down 稳定控制在 0.15~0.05 ns/bit 范围内,波动幅度严格限制在  $\pm 5\%$  以内。这种确定性时延特性对于航空控制指令传输等对时序有严格要求的应用场景尤其重要。

营运服务流作为机场核心业务数据流(优先级 Q5),承载着旅客服务系统、货运管理平台等关键业务系统的数据传输需求。表 4 和图 5(b)给出了各类算法对该类业务流的性能比较。可以看出,本文算法展现出显著的综合性能优势,其混合调度机制实现了 5%~19% 的平均时延优化。值得注意的是,当业务流规模超过 100 KB 数据包时,网络拥塞导致的排队效应使得各算法均出现不同程度的时延抖动现象。在此条件下,本文算法的最大时延指标虽比 TSN 高 15%,但仍比 ECMP 和 PIAS 低 1%~15%。

表 4 和图 5(c)给出了关键视频流业务的性能比较。实验结果表明,本文算法在处理 48 路并发视频流时展现出卓越的性能稳定性,其 FCT slow down 指标稳定维持在 0.005 ns/bit,验证了该算法在应对突发视频数据传输方面的优势。同时,较其他算法,本文算法实现了 44% 的平均时延降低和 27% 的时延抖动优化,验证了本文算法的有效性。

表 4 和图 5(d)为各典型算法在数据中心 Web 流中的表现。实验表明,本文算法相比传统 ECMP 算法实现 13% 的平均时延优化,较先进 TSN 算法也有 4% 的性能提升。虽然在时延抖动指标上较 TSN 存在 7% 的劣化,但其动态调度机制仍能保持抖动控制在  $\pm 5\%$  的稳定范围内。此外在基

表 4 本文算法分别与 ECMP、DLB、PIAS 和 TSN 在不同业务流中的时延比值

Table 4 Latency performance comparison between the proposed algorithm and ECMP/DLB/PIAS/TSN across different traffic flows %

流类型	ECMP			DLB			PIAS			TSN		
	平均时延	最大时延	时延抖动									
运行控制流	63	66	67	59	56	58	53	57	59	0	0	0
营运服务流	19	15	15	13	-8	-8	5	1	1	13	-15	-16
关键视频流	56	50	60	48	30	27	57	50	60	44	36	45
数据中心 Web	13	19	20	15	6	6	6	-5	-5	4	-6	-7
数据中心存储流	22	28	28	-9	0	0	0	22	22	20	28	28
视频存储流	13	12	37	4	-35	-57	14	23	49	16	21	49

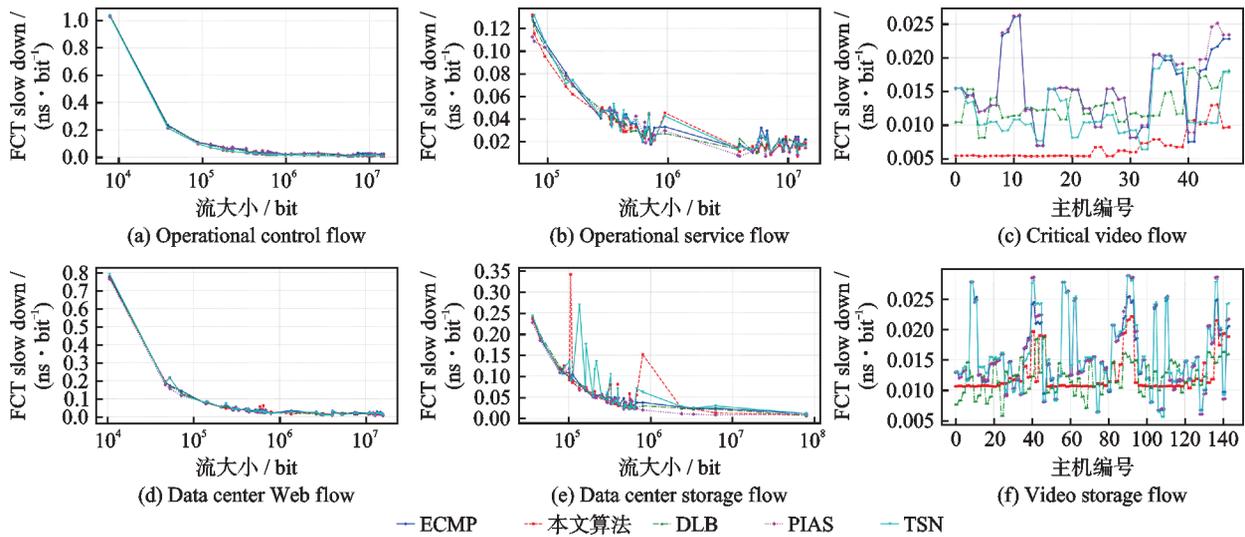


图5 ECMP、DLB、PIAS、TSN和本文算法对不同业务流FCT slow down的性能表现

Fig.5 FCT slow down performance comparison between ECMP, DLB, PIAS, TSN, and the proposed algorithm

于优先级的流调度机制中,高优先级业务流对优质带宽资源的抢占效应,必然导致低优先级业务流面临时延性能的显著劣化。这一现象揭示了优先级调度系统固有的资源分配特性:为确保关键业务的服务质量,系统必须承受非关键业务在时延指标上的妥协。

表4和图5(e)为各算法在数据中心存储流中的性能比较。在相同测试条件下,本文算法仅有12%的数据流的时延抖动超过 $\pm 5\%$ 阈值,而TSN算法这一比例达到23%。这一差异表明,时延先验信息是保障低优先级业务稳定性的关键因素;同时,混合调度策略在处理对吞吐量敏感的低优先级业务时展现出独特优势。

表4和图5(f)所示为各算法在存储视频流中的表现。该类视频流存在于安防网内,用于视频监控的回放,在网络中具有次低的传输优先级(仅高于BE流)。实验数据表明,在该类低优先级业务场景中实现4%~16%的平均时延优化,这一结果有力验证了本文算法设计的先进性:动态优先级调度机制有效保障关键业务的稳定运行;多级负载均衡机制即使在低优先级业务资源受限的情况下,仍能提升该业务的平均吞吐量。这种性能特征在安防监控系统的实际运维中具有重要价值,特别是在多路视频并发回放等高负载场景下,能够在不影响高优先级业务的前提下,为存储视频流提供高吞吐量的数据运输保障。

## 4 结 论

本研究提出了一种面向智慧机场通信网络的多级负载均衡算法,通过三级协同机制有效解决了“低时延-高吞吐量”的复合需求挑战。首先,构建

动态优先级调度机制,建立符合机场业务特性的6级优先级映射体系,采用M/M/1排队模型实现关键业务的不确定性时延保障;其次,设计基于排队时延的单级负载均衡机制,通过增强候选集算法精确评估链路状态,为流量调度提供最优出口决策;最后,开发多优先级队列状态管理机制,将上述两种策略深度融合,在消除策略冲突的同时显著提升带宽利用率。实验结果表明,该方案使运行控制流完成时间减少63%,网络整体吞吐量提升40%,可为机场通信网络的智能化升级提供参考。

## 参考文献:

- [1] 朱俊洪. 智慧机场视角下航空物流平台规划研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.  
ZHU Junhong. Research on the planning of aviation logistics platform from the perspective of smart airport [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [2] 中国民用航空局. 中国民用航空局关于印发智慧民航建设路线图的通知[EB/OL]. (2022-01-16). <https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/5669771/files/f7402a57bcf349b0ae8d1224a0f35737.pdf>.
- [3] 中国民用航空局. 四型机场建设导则[EB/OL]. (2020-10-13). <https://www.gov.cn/xinwen/202011/04/5557258/files/9af3ba5d2eb84025a50820cb06ffa09a.pdf>.
- [4] 中国民用航空局. 2023年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-05-31). <http://www.caacnews.com.cn/1/1/202405/t20240531>.
- [5] 高利佳, 熊英, 刘钰. “互联网+”时代的智慧机场规划设计研究[J]. 综合运输, 2015, 37(11): 5-11, 134.  
GAO Lijia, XIONG Ying, LIU Yu. Research on the planning of building a smart airport in “Internet plus”

- era[J]. *China Transportation Review*, 2015, 37(11): 5-11, 134.
- [6] 韦群. 民航机场信息系统及其发展[J]. *指挥技术学院学报*, 2001, 12(4): 27-30.
- WEI Qun. Information system and the development in the airport of civil aviation[J]. *Journal of Institute of Command and Technology*, 2001, 12(4): 27-30.
- [7] NOORMOHAMMADPOUR M, RAGHAVENDRA C S. Datacenter traffic control: Understanding techniques and tradeoffs[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1492-1525.
- [8] FARKAS J, BELLO L L, GUNTHER C. Time-sensitive networking standards[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 20-21.
- [9] BAI W, CHEN L, CHEN K, et al. PIAS: Practical information-agnostic flow scheduling for commodity data centers[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(4): 1954-1967.
- [10] HOPPS C. Analysis of an equal-cost multi-path algorithm[EB/OL]. (2000-11-01). <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2992.html>.
- [11] GHORBANI S, GODFREY B, GANJALI Y, et al. Micro load balancing in data centers with DRILL[C]//*Proceedings of the 14th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. Philadelphia, USA: ACM, 2015: 1-7.
- [12] 陈珂, 刘亚志, 王思晗. 基于流量特征的流调度策略研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(10): 2889-2894.
- CHEN Ke, LIU Yazhi, WANG Sihan. Survey of research on flow scheduling strategies based on traffic characteristics[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(10): 2889-2894.
- [13] VAMANAN B, HASAN J, VIJAYKUMAR T N. Deadline-aware datacenter TCP (D2TCP)[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(4): 115-126.
- [14] CHEN L, HU S H, CHEN K, et al. Towards minimal-delay deadline-driven data center TCP[C]//*Proceedings of the 12th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. College Park, USA: ACM, 2013: 1-7.
- [15] KHABBAZ M, SHABAN K, ASSI C, et al. Prioritizing deadline-constrained data flows in cloud datacenter networks[C]//*Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on Applied Computing*. Pisa, Italy: ACM, 2016: 636-643.
- [16] HONG C Y, CAESAR M, GODFREY P B. Finishing flows quickly with preemptive scheduling[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(4): 127-138.
- [17] ALIZADEH M, YANG S, SHARIF M, et al. pFabric: Minimal near-optimal datacenter transport[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 435-446.
- [18] ZHOU J L, TEWARI M, ZHU M, et al. WCMP: Weighted cost multipathing for improved fairness in data centers[C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Computer Systems*. Amsterdam, Netherlands: ACM, 2014: 1-14.
- [19] TAO X D, QIAN X Y, HAN L, et al. Key flow first prioritized flow scheduling strategy in multi-tenant data centers[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2024, 21(3): 3264-3277.
- [20] WANG J, RAO S Y, LIU Y, et al. Load balancing for heterogeneous traffic in datacenter networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2023, 217: 103692.
- [21] HU J B, HUANG J W, LI Z Y, et al. RPO: Receiver-driven transport protocol using opportunistic transmission in data center[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP)*. Dallas, USA: IEEE, 2021: 1-11.

(编辑:张蓓)