

基于特征提取的KNN路由优化算法

赵莉, 石昕宇, 孙宗伟

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要:为提高大规模Benes光网络的路由效率与通信性能,提出一种基于特征提取的K近邻(KNN)路由优化算法。通过提取波导交叉位置及数量等关键特征构建特征路由表,对传统KNN路由优化算法进行预处理优化,并基于四电平脉冲幅度调制(PAM4)系统搭建光网络仿真平台,对不同路由路径的消光比、带宽及误符号率进行测试分析。实验结果表明:所提方法将路由筛选准确率从34.48%提升至71.85%;在30 Gb/s传输速率下,改进的KNN路由优化算法使优势路径的最小接收功率要求比劣势路径低0.8 dBm。

关键词: Benes光网络; K近邻算法; 消光比; 带宽; 误符号率

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)05-0089-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.016

KNN routing optimization algorithm based on feature extraction

ZHAO Li, SHI Xinyu, SUN Zongwei

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To improve the routing efficiency and communication performance of large-scale Benes optical network, a K-nearest neighbor (KNN) routing optimization algorithm is proposed based on feature extraction. Features such as the waveguide crossing position and number are extracted to construct a routing table. In doing so, the traditional KNN algorithm is preprocessed and optimized. An optical network simulation platform is built based on the four-level pulse amplitude modulation (PAM4) modulation system to test and analyze the extinction ratio, bandwidth, and symbol error rate of different routing paths. Experimental results show that the proposed method improves the routing screening accuracy from 34.48% to 71.85%. At a transmission rate of 30 Gbit/s, the superior path selected by the improved KNN routing algorithm requires 0.8 dBm less minimum received power than the inferior path.

Key words: Benes optical network, K-nearest neighbor algorithm, extinction ratio, bandwidth, symbol error rate

0 引言

随着人工智能、物联网与虚拟通信等技术的迅猛发展,信息通信系统对高速、大容量数据传输的需求日益增长,光子芯片作为光通信与光计算的核心载体,其性能优化面临重大挑战^[1-2]。尤其在多端口光交换架构^[3-6]中,路由路径的智能控制成为影响系统吞吐

量、能耗与响应速度的关键因素。Benes光网络凭借其无阻塞、可重构及结构紧凑等优势,成为大规模光子集成中的主流拓扑之一,其路由策略的高效性与可靠性对整体性能具有决定性作用。

传统路由算法,如穷举搜索法和固定规则策略,在处理不断增长的端口规模时逐渐显现出局限性。这类方法往往计算复杂度高、实时性差,且难以适应动态变化的通信需求,导致网络调度效率低下和资源利用率不足^[7-8]。尽管已有研究在光交换芯片结构设计方面取得显著进展,如日本先进工业科技研究所和中科院半导体研究所分别实现了低串扰的32×32光交换芯片^[9-11];浙江大学团队也研制出高消光比的Benes结构电光开关^[12]。然而,这些工作多集中于器件设计与工艺优化,在路由控制方面仍以传统方法为主,缺

收稿日期:2025-05-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62201338)资助。

作者简介: 赵莉(1984—),女,上海人,博士,副教授。主要研究方向是信息技术与数据网络、AI光通信、人工智能等,已主持完成和正在承担的国家级、省部级项目共3项。



赵莉,石昕宇,孙宗伟: 基于特征提取的KNN路由优化算法

乏对智能算法与特征驱动优化的系统性探索。

目前,基于微环谐振器的 Benes 光网络路由研究存在三大难点:1)随着端口数增加,传统穷举法的时间成本呈指数增长,无法满足多项式时间内求解的需求^[13];2)固定路由策略缺乏对路径特征的提取与泛化能力,难以推广至更大规模网络^[14];3)诸如最小均方误差(MMSE)的数值方法因涉及矩阵求逆复杂运算,实际部署中面临硬件资源消耗高、响应延迟大的问题^[15]。这些因素共同制约了光网络在消光比、带宽利用率与动态重构能力等方面的性能提升。针对上述问题,本文提出一种基于特征提取的K近邻(KNN)路由优化算法,以提升 Benes 光网络的路由效率和性能表现。

1 基于特征提取的KNN路由优化算法

1.1 传统KNN算法与路由表数据

在机器学习领域,KNN算法因其原理简单、易于实现而被广泛应用。该算法通过计算待预测样本与训练集中所有样本的距离,选取距离最近的 K 个邻居,根据这些邻居的标签(分类任务)或数值(回归任务)进行预测。然而,将路由表数据直接用于传统的KNN算法,其性能通常不理想。这主要是因为路由表数据具有以下特点:高维性,是指路由表由大量的“0”或“1”信号组成,每个路由表都可以看作一个高维向量;低相关性,是指这些“0”和“1”信号之间的关联性很弱。

传统的降维方法,如主成分分析法,虽然可以有效处理连续数据,但对于这种由离散的“0”或“1”构成的、相关性低的路由表数据,其降维效果并不理想。因此,直接使用传统的KNN算法难以准确捕捉路由表数据的内在特征,从而影响了其在路由效率、通信质量等任务中的性能。

1.2 KNN路由优化算法的路由优化策略

为克服上述限制,本文在KNN算法中引入特征提取方法,将原始路由表数据转化为KNN算法可高效处理的关键特征,从而实现算法优化。该优化策略的核心包括2个方面:一是增加预处理模块,提取关键特征以显著降低数据维度;二是引入特征平均模块,以满足KNN算法对数据相关性和均衡性的要求。

本文深入分析了 Benes 路由表的结构,成功提取出3个与路由性能密切相关的关键特征,构建了一个更紧凑且更具代表性的特征路由表。这3个特征分别为:波导交叉的首次出现位置(包括行和列)、波导交叉的总次数。

前2个特征直接反映了光信号在路由过程中首次

发生串扰的位置。串扰是影响光路径性能(尤其是消光比)的关键因素之一。最后一个特征从数值上表示了光信号在传输路径中经历的光开关次数,与路由功耗直接相关。

在KNN路由优化算法中,光开关的交叉位置和交叉次数直接影响光网络的性能。若首次引入串扰的位置越早,后续消光比的恶化程度通常越严重。处于“开状态”的开关数量越多,表明信号经过的滤波次数越多,导致带宽变窄。而滤波次数的增加通常也会带来更高的功耗。为平衡数据规模并增强模型的泛化能力,本文对总交叉次数取平均值,以更准确地反映光开关的功耗特性,同时满足KNN路由优化算法对数据相关性和均衡性的要求。

通过采用特征提取方法,以平均交叉次数为依据,结合消光比标签将路由情况划分为“Good”和“Bad”2个等级,作为分类标准;将高维路由表数据有效降维,构建出更具代表性的低维数据集,显著提高了算法在路由筛选中的准确率与效率。

2 仿真与分析

2.1 仿真实验平台搭建

2.1.1 实验平台配置

本文构建了一个 Benes 光网络交换芯片仿真实验平台,用于评估基于机器学习路径选择算法的物理性能。实验平台运行于高性能服务器,具体软硬件配置如表1所示。

表1 软硬件环境配置

电脑环境参数	版本
CPU	2.2 GHz Intel Core i9-13900HX
RAM	32GB
仿真软件	Lumerical INTERCONNECT 2020R2
Python	3.11
Matlab	R2022a

2.1.2 Benes网络结构与光开关特性

Benes网络采用 2×2 基本光开关单元构建,其独特之处在于每个光开关仅具有2种工作状态,即

开状态(Bar):输入二进制信号为“0”时激活;

关状态(Cross):输入二进制信号为“1”时激活。

光开关的状态转换通过调节有效折射率和波导损耗实现,从而动态调谐环形谐振波长。关键性能参数如表2所示^[24-25],非关键参数采用INTERCONNECT系统默认值。

表2 光开关参数指标

参数	数值	
	Bar	Cross
波导损耗/(dB/m)	300	0
波导有效折射率	2.27	2.29
波导群折射率	4.26	4.26
波导长度/ μm	10.242 3	10.242 3
波导频率/GHz	1.55	1.55

2.1.3 四电平脉冲幅度调制(PAM4)系统设计

本文采用PAM4实现高速信号传输,其系统结构框图如图1所示。系统构建按以下顺序进行:

1)信号生成:配置2个7位伪随机二进制序列(PRBS)发生器,产生可重复的随机二进制序列;使用2个非归零(NRZ)脉冲发生器将PRBS信号转换为脉冲序列。

2)信号分配与处理:采用2个 $1\times N$ 分路器(FORK)实现信号分路与合并,端口分路系数设置为2;使用连续波激光器提供1 550 nm稳定光源,输出功率设置为0.01 W。

3)信号调制与控制:通过光波导耦合器和光学相

移器(OPS,角度设定为 $\pi/4$)实现光信号相位精确控制;添加4个光学调制器(Measured型号)和另一个波导耦合器,生成30 Gb/s PAM4信号。由于Benes光开关是轴对称结构,可以使PAM信号从右侧输入左侧输出。Benes开关按照路由表设置,路径消光比按照端口逐一扫描,然后进入信号检测与分析阶段。

4)信号检测与分析:连接2个电气信号注入器、 1×2 FORK分路器;使用2个PIN光电探测器(PD)进行光信号检测;采用低通贝塞尔滤波器(LPF)进行信号滤波;通过矢量分析仪(VSA)实时显示TE-mode信号特性。

2.2 KNN路由优化算法模型训练与参数优化

为评估KNN路由优化算法在路由性能预测中的有效性,本文首先进行模型训练与关键参数优化。具体步骤如下:

1)数据集构建与预处理:从原始路由表中选取多样本构成训练集,并按10%~30%的比例划分测试集;对训练集路由数据进行预处理,提取3个关键特征值(波导交叉行、列位置与数量)。

2)K值优化:通过系统实验评估不同K值对预测准确性的影响。实验表明,当 $K=5$ 时预测准确性达到最优,此时既能避免过拟合(K 过大导致),又能防止欠

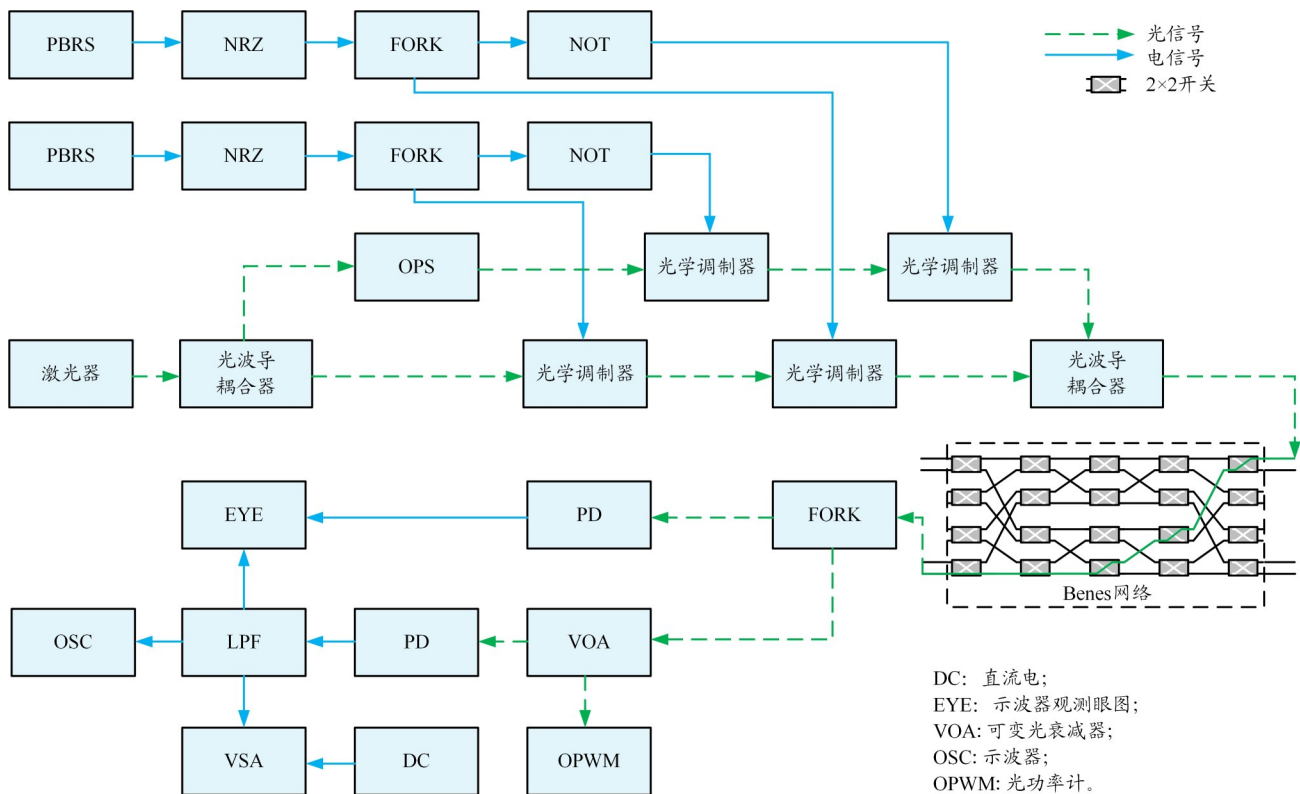


图1 PAM4系统结构框图

赵莉,石昕宇,孙宗伟: 基于特征提取的KNN路由优化算法

拟合(K 过小导致)。

2.3 实验设计与分组

本文采用3组对比实验验证所提算法的性能。

1)初始组(A组)构建:采用轮询法^[26]选取8种路由情况,保持输入端口为 $[1, \dots, N]$,输出端口依次循环移位 $([1, \dots, N], [2, \dots, N, 1], \dots, [N, 1, \dots, N-1])$,确保样本集的多样性与代表性

2)劣化组(B组)生成:对A组路由进行KNN预测($K=5$),将预测为“优”的路径通过随机更换方式劣化,直至所有路径预测结果为“劣”。

3)优化组(C组)生成:对A组进行第二轮KNN预测,保留预测为“优”的路径,对预测为“劣”的路径进行随机更换探索。

2.4 性能测试与结果分析

将A、B、C组路由置入光学仿真环境,测试消光比、带宽和误符号率(SER)等关键指标,结果分别如图2、图3、图4所示。

从图2(a)可以看出,A组数据的消光比分布范围较宽,而B、C组经KNN路由优化算法处理后分布趋于集中。C组的消光比分布表明其路由性能较优。

从图2(b)可以看出,C组的累积分布函数(CDF)曲线较为陡峭,在低消光比区域变化平缓,而在高消光比区域明显上升,说明C组中包含较多高性能路由。A组与B组的CDF曲线相对平缓,尤其B组CDF在高消光比区域趋于平稳,表明其数据点多集中于低消光比水平,进一步验证B组性能次于C组。

综合图2可知,KNN路由优化算法能够有效区分性能优良的C组与性能较差的B组。这种区分既体现于消光比数值,也清晰呈现于CDF图的分布差异,证明了KNN路由优化算法在此类路由数据分析中具有良好的准确性与有效性。

从图3可以看出,C组的带宽最宽,且其CDF曲线在大部分带宽区间均高于A组和B组,表明C组整体性能最优。尤其在低带宽区域,C组的CDF曲线上升更为平缓,说明该组路由的带宽主要集中于高带宽区域。

综合图2与图3可知,C组网络性能显著优于A组,而A组性能又优于B组。这一性能区分不仅体现在单一指标上,在不同路由配置与带宽条件下亦呈现一致趋势。因

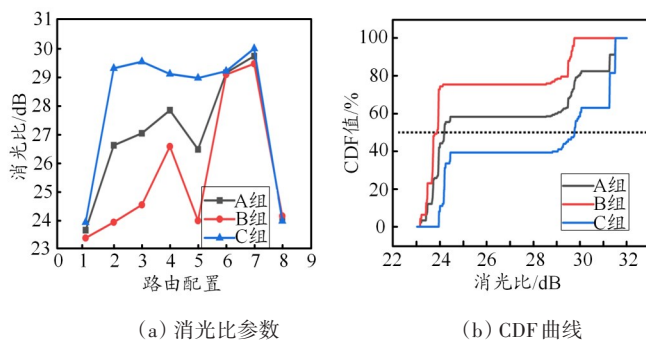


图2 3组路由的消光比性能

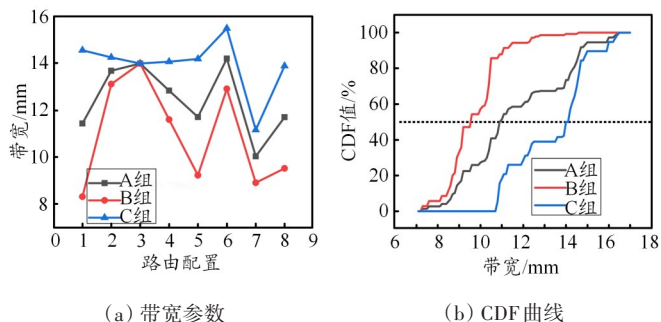


图3 3组路由的带宽性能

此,C组可视为3种配置中最优选择,在网络性能提升方面具有明显优势。

当传输速率为30 Gb/s时,接收功率与SER在不同路径条件下的关系如图4所示。图中右侧分别为接收功率 -9.026 、 -10.775 dBm时的眼图。可以看出,在KNN路由优化算法作用下,优势路径较劣势路径获得了清晰而张开的眼图;优势路径性能接近理想状态背靠背路径,在相同SER情况下,两者满足系统通信要求的最小接收功率(横坐标与趋势线交点)分别约为 -7.6 、 -8.5 dBm;劣势路径因增加了系统SER,其最小接收功率为 -6.8 dBm。这一结果表明,经KNN路由优

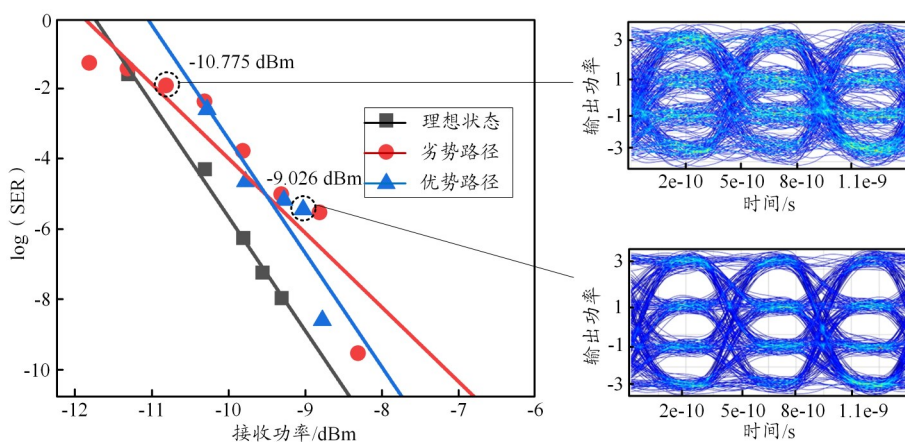


图4 当传输速率为30 Gb/s时,接收功率与SER在不同路径条件下的关系

化算法路由优化后,系统在低功耗条件下仍可保持较高信号质量,验证了KNN路由优化算法在路由性能预测与优化方面的有效性。

除此之外,本文通过实验对比了以下4种算法的性能:本文提出的KNN路由优化算法、基于二分图的Benes固定路由算法、基于穷举搜索的Benes光路由算法,以及传统KNN算法。实验结果表明:

1) Benes光路由算法的计算耗时随网络规模增大而急剧上升,无法在多项式时间内生成有效的路由表;

2) Benes固定路由算法的路径筛选效果较差,难以满足高数据相关性与负载均衡的要求;

3) 传统KNN算法由于缺乏有效的特征预处理,准确率仅为34.48%;

4) 本文提出的改进型KNN路由优化算法将准确率显著提升至71.85%。该结果已超过70%的经验性阈值。据文献[27]所述,当人工智能系统的判断准确率超过70%时,可认为其表现优于人类平均水平。因此,本文所提算法在性能上达到了这一参考标准。结合光网络的实际应用场景,71.85%的准确率已能够满足实际部署需求。

3 结束语

本文提出了一种基于特征提取的KNN路由优化算法,以解决传统方法在高速光芯片路由优化中准确率不高的问题。通过构建反映串扰与能耗特征的路由表,该算法显著提升了分类性能,其路由判断准确率达到71.85%,超过了70%的人类判断阈值。该成果验证了机器学习在光路由优化中的有效性,表明其能同时满足高速光通信对高准确率和低功耗的严格要求。在优势路径下,优化后的系统实现了-7.6 dBm的最低接收功耗,且信号SER保持较低水平,展现出在低功耗、高性能光互连系统中的良好应用前景。未来研究将探索该算法在更大规模Benes网络中的鲁棒性,并结合更多物理参数进行优化,以进一步提升其实用性与综合性能。

参考文献:

- [1] 史上清,刘鹏程,恽斌峰. 硅基光开关切换延时芯片延时测量稳定性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 2013001-1-2013001-6.
- [2] MOREIRA R L, GARCIA J, LI W, et al. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(12): 1165-1168.
- [3] LIN M, MCKEOWN N. The throughput of a buffered crossbar switch[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(5): 465-467.

- [4] KONOIKE R, SUZUKI K, IKEDA K. Path-independent insertion loss 8×8 silicon photonics switch with nanosecond-order switching time[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(3): 865-870.
- [5] CHEN X, LIN J, WANG K. A review of silicon-based integrated optical switches[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(4): 2200571-1-2200571-21.
- [6] GUO X, DU Q, LI Y, et al. Cascading failure and recovery of metro-bus double-layer network considering recovery propagation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 122: 103861-1-103961-16.
- [7] 张金花,武保剑,邱昆. 扩张型Benes光交换集成芯片路由算法[J]. 光通信技术, 2019, 43(2): 1-8.
- [8] 管爱红,孙军强,等. 用于WDM光网络的一种低串扰无损耗光开关矩阵[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 99-103.
- [9] TANIZAWA K, SUZUKI K, TOYAMA M, et al. Ultra-compact 32×32 strictly-non-blocking si-wire optical switch with fan-out LGA interposer[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17599-17606.
- [10] TANIZAWA K, SUZUKI K, SUDA S, et al. Silicon photonic 32×32 strictly-non-blocking blade switch and its full path characterization[C]//IEEE. Proceedings of 2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) Held Jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS). Niigata: IEEE, 2016: 1-3.
- [11] QIAO L, TANG W, CHU T. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 42306-42313.
- [12] QIAO L, TANG W, CHU T. Ultra-large-scale silicon optical switches[C]//IEEE. Proceedings of 2016 IEEE 13th International Conference on Group IV Photonics (GFP). Shanghai: IEEE, 2016: 1-2.
- [13] BAHADORI M, RUMLEY S, POLSTER R, et al. Loss and crosstalk of scalable MZI-based switch topologies in silicon photonic platform[C]//IEEE. Proceedings of 2016 IEEE Photonics Conference (IPC). Waikoloa: IEEE, 2016: 615-616.
- [14] CHENG Q, BAHADORI M, HUANG Y, et al. Smart routing tables for integrated photonic switch fabrics[C]//IEEE. Proceedings of 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg: IEEE, 2017: 1-3.
- [15] HUSSEIN Y S, ALIAS M Y, ABDULKAFI A A. On performance analysis of LS and MMSE for channel estimation in VLC systems[C]//IEEE. Proceedings of 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA). Melaka: IEEE, 2016: 204-209.
- [23] UKEY N, YANG Z, LI B, et al. Survey on exact KNN queries over high-dimensional data space[J]. Sensors, 2023, 23(2): 629-673.
- [24] ZHAO L, SHI P, ZHANG H. Bi-directional Benes with large port-counts and low waveguide crossings for optical network-on-chip[J]. IEEE Access, 2021, 9: 115788-115800.
- [25] KIM H K, JI Y, KIM K, et al. A controller for Si MZI-based spanke-Benes optical switch fabric with automatic calibration capability[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(3): 1-6.
- [26] SAOMOTO H, KIKKAWA N, MORIGUCHI S, et al. Round robin test on angle of repose: DEM simulation results collected from 16 groups around the world[J]. Soils and Foundations, 2023, 63(1): 101272-101287.
- [27] TURING A M. Computing machinery and intelligence[J]. Mind, 1950, 59(236): 433-460.