

多模光纤助力数据中心的高速连接与低碳运营

康宁公司

概述

随着全球互联网用户数、设备连接数快速增长，宽带速率不断提升，同时高清视频流、元宇宙以及无处不在的社交网络共同推动了全球互联网流量的飞速增长。COVID-19 疫情期间人们在家中更多地依赖互联网与亲人交流分享，与同事进行视频电话会议，将短视频或其他内容上传到云端，这些应用加速了互联网流量增长，带动了的云和企业数据中心的需求。

在 COVID-19 疫情期间，全球互联网峰值流量增长了 47%^[1]，Facebook 的即时信息增加了 50%^[2]。从 2020 年初到现在，订阅付费流媒体服务的客户数增加了 23%，如图 1 所示。这些业务需要光纤网络将用户连接到各地的数据中心^[3]，为用户提供必要的计算、存储和内容分发等服务。数据中心已经成为现代生活的引擎，全球范围内都在大规模建设数据中心以支持各类网络应用的快速增长。



图 1. 全球互联网流量在疫情期间加速增长

在过去的 20 年中，数据中心市场已成推动技术创新最具活力、增长最快的市场之一。数据中心运营商正在努力建设网络速度更快、更密集、更易安装、更具成本效益、更节能的数据中心，实现数据中心业务的可持续性发展。

多模光纤市场展望

随着流量的持续增长，超大规模数据中心和企业数据中心通过部署更高速率的以太网光模块不断升级其基础设施。新兴的硅光技术带动了基于单模光纤连接方案的市场增长，成为市场关注的热点。而与之相对的是，基于多模光纤 (MMF) 连接方案的增长则常常被市场低估。

多模光纤的解决方案仍然是数据中心运营商的重要选择之一。业界通常通过光模块的出货量对市场发展趋势进行判断。根据 Lighcounting 的报告，多模光模块出货量在可预见的未来将持续增长^[4]，如图 2 所示：

- 多模光模块的出货量预计将占有光模块的 45% 以上，基于多模光纤的连接方案是数据中心内连接的重要方式。
- 随着数据中心向更高速率发展，未来五年中多模光模块出货量的增长将主要来自于高速多模光模块的增长。例如，100G 和 400G 多模光模块的出货量预计将在 2025 年超过 40G 及以下速率多模光模块出货量的总和。

多模光纤解决方案的强劲增长主要是受到北美企业数据中心和中国大型云数据中心的需求推动。与北美超大规模数据中心园区通常以大面积的单层建筑布局不同，中国的云数据中心通常位于占地面积相对较小的多层建筑中。因此 100 米的链路长度足以覆盖大部分交换机与交换机之间的连接。而这种链路长度，正是多模光纤连接方案的优势所在。业界普遍预计中国大型云数据中心将在未来 5 年内大量部署基于多模光纤的 200G 和 400G 方案。

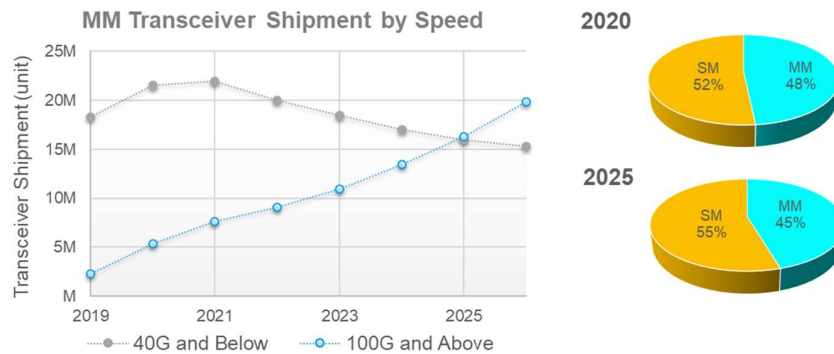


图 2. 多模光模块的出货量预测

成本优势

多模光纤结合 VCSEL 激光器的方案在数据中心系统中发挥着重要作用，因为它具有明显的成本优势，特别是在当前主流的 100G 速率系统，多模方案成本只有单模方案成本的一半。随着数据中心向更高的速率发展，行业正在准备部署下一代 400G 光模块。多模光纤解决方案是否仍能保持相对单模光纤解决方案的成本优势，是数据中心客户非常关心的一个重要问题，特别是当硅光技术已显著降低了单模光模块成本。

为此，我们建立了一个包括光模块、结构化光缆和连接器的成本模型，对基于多模光纤和单模光纤的 400G 方案的建设成本进行定量地比较。我们选择了市场上常见的 400G 光模块类型，包括 400G SR8（多模，并行）和 400G DR4（单模，并行）和 400G FR4（单模，双工）。并采用中国市场主流的光连接布线方案，分别匹配每种光模块类型。主干光缆基于 OM4 光纤，可提供 4700MHz·km 的有效模式带宽（由 IEC 60793 定义），以确保 100 米的传输距离。由于超大规模数据中心和企业数据中心在采购和运营方面的模式不同，成本模型中考虑了两种类型数据中心采购光模块时的不同价

格。如图 3 所示，通过分析我们得出以下结论：

超大规模数据中心：

- 多模 400G SR8 方案在 100 米以内短距离应用场景下是成本最优的解决方案。距离为 100 米，400G SR8 方案单模方案（FR4 和 DR4）有超过 15% 的成本优势，低于 100 米时，多模方案的成本优势更明显。
- 单模连接方案中，并行单模 400G DR4 方案比双工单模 400G FR4 方案成本更低

企业数据中心：

- 多模 400G SR8 方案相较单模方案（FR4 和 DR4）有超过 20% 的成本优势。
- 并行单模 400G DR4 方案相较双工单模 400G FR4 有成本优势。

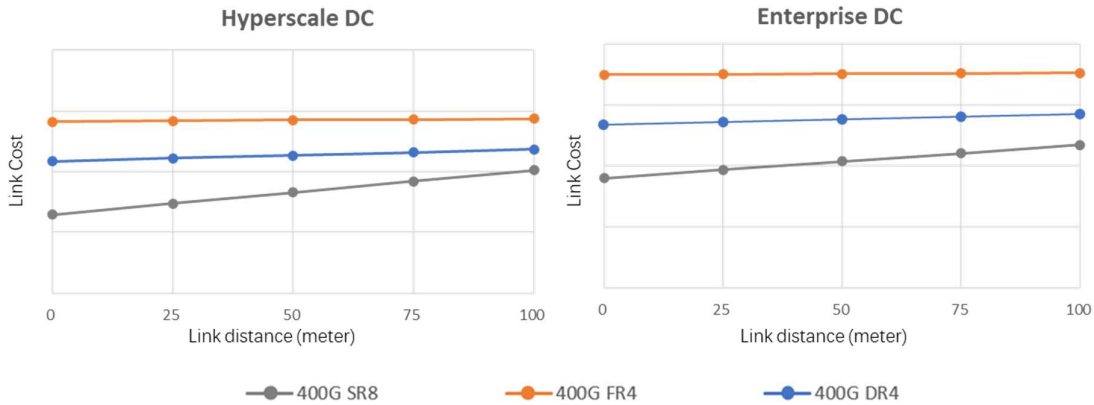


图 3.超大型数据中心和企业数据中心链路成本分析

由此看来，在 400G 时代，超大型数据中心和企业级数据中心应用场景中，多模连接解决方案仍具有成本优势。因此，我们预测作为多模光纤解决方案基础的 OM4 多模光纤市场仍会保持或增长。

低碳优势

2020 年，全球数据中心的能耗为 2000~2500 亿千瓦时，大约占到全球总耗电量的 1%^[5]。预测 2030 这一比例将增加到 8%^[6]。因此降低耗电量，减少发电带来的温室气体排放，建设高能效的绿色低碳数据中心变得至关重要。

从传输技术的角度来看，当前主流的 100G 多模方案的 VCSEL 激光器的功耗更低，比单模方案的 DFB 激光器的功耗低 40%，更有利于数据中心的运营的可持续性。更高速率的 400G 方案都采用了 DSP 技术，多模方案的功耗优势有所降低。例如多模光纤的 400G 光模块（例如 400G SR8）功耗比单模的 400GDR4 方案功耗降低了 20%左右。这两种光模块类型都需要采用 7nm 最先进的半导体工艺、功耗约为 4W 的高功耗的 DSP，功耗更低的 VCSEL SR8 光模块与 DR4 单模光模块相比，仍可降低约 2W 的功耗。正在开发中的 400G SR4 光模块方案（IEEE 802.3db 建议的下一代多模光纤 400G 方案选项），因为光学器件和跨阻放大器（TIA）的数量减少了一半，功耗优势预计会更加明显。

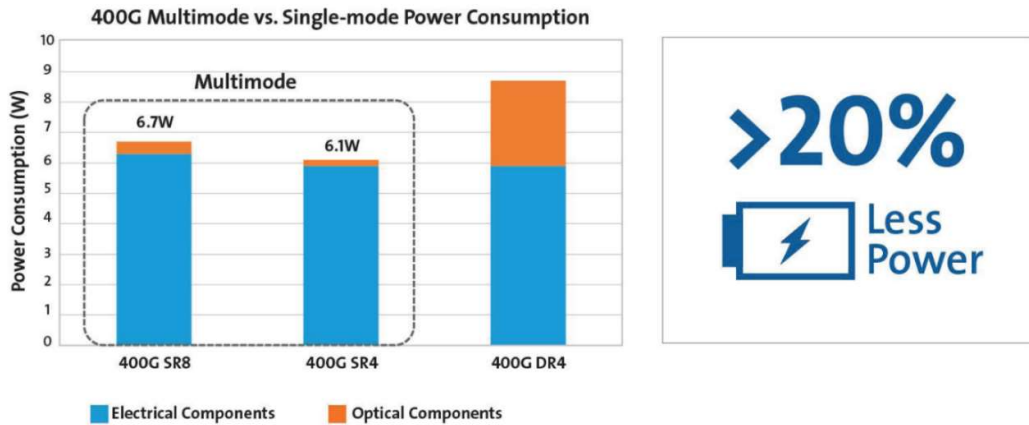


图 4. 400G 多模、单模光模块功耗对比

一个数据中心中可能会部署数以万计的光模块，选择能效更高的传输方案可以大幅度减少温室气体的排放，更加低碳环保。假设一个数据中心有 500 台交换机，如图 5 所示，部署 400G 多模光模块不仅可以节省电费开支，还能减少温室气体排放。以 10 年为周期来看，基于多模光纤的方案可节省 500 万千瓦时的电量，这意味着减少了 3543 吨的二氧化碳排放量（基于温室气体等效计算方法）。相当于 26350 亩的树林一年的二氧化碳吸收量。与单模光纤的方案相比，多模光纤的方案能帮助数据中心更显著的降低能耗。

	Electricity Reduction	Estimated Electricity Cost Savings	GHG Emissions Reduction	Carbon Sequestered by Acres of US Forests in 1 Year
1 Year	500,000 kWh	\$35,000	354 mt CO2e	434
5 Year	2,500,000 kWh	\$177,000	1,772 mt CO2e	2,171
10 Year	5,000,000 kWh	\$353,000	3,543 mt CO2e	4,341

图 5. 多模光纤方案相较单模光纤方案显著降低能耗并减少温室气体排放

康宁® ClearCurve® 多模光纤

激光优化的 50μm 芯径的多模光纤已被广泛部署，与早期的 62.5um 芯径的多模光纤相比，具有更高的模式带宽，以实现高速率的应用。

IEEE 802.3bm 工作组定义了 25Gb/s VCSEL 在多模光纤上的传输容量，25G 波特率、850nm 多模 VCSEL 在 OM4/OM5 光纤可传输 100 米链路距离。同时，IEEE 802.3db 也正在讨论 400G 以太网标准，预计采用 50G 波特率 VCSEL 激光更，结合 PAM4 调制格式，实现单通道 100G 的多模方案。为了在 100 米多模光纤上实现单通道 100G 传输，需要多模光纤具有较高的有效链路带宽 (BW_{eff})。而有效链路带宽的取决于光纤的有效模式带宽和色散带宽^[8]：

$$BW_{eff} = \frac{1}{\sqrt{EMB^{-2} + BW_{CD}^{-2}}}$$

其中 EMB 是通信工业协会（TIA）定义的最坏情况下的有效模式带宽。OM3 和 OM4 在 850nm 的 EMB 分别为 2000MHz·km 和 4700MHz·km。 BW_{CD} 是光纤的色散限制带宽，由光纤色散斜率和零色

散(λ_0)波长范围共同决定。

	ClearCurve® OM4 fiber	Standard OM4 fiber
Maximum Lambda0 (nm)	1315	1328
Maximum Zero Dispersion Slope	0.101	0.105
Maximum D at 850nm (ps/nmkm)	-101.5	-110.6
Effective Bandwidth for 100m link (BW_{eff} in GHz)	25.7	24.2
Performance Margin	7%	0%

图 6. OM4 光纤有效链路带与距离范围的比较

标准定义了 OM3 或 OM4 光纤有效模式带宽的最小数值，实际链路估算时一般采用最差值计算。光纤的有效链路带宽与光纤的色散密切相关，康宁® ClearCurve® OM4 光纤的色散相较其他同类产品更具优势。在图 6 中，我们列出了 ClearCurve® OM4 光纤与 IEC 标准 OM4 多模光纤的色散斜率和零色散波长 λ_0 范围。ClearCurve® OM4 光纤具有更窄的零色散波长 λ_0 范围和更平坦的色散斜率，因此 850nm 波长的色散绝对值更小。基于这样的色散设计，ClearCurve® OM4 光纤获得了更高的有效链路带宽，传输距离较标准产品性能提升 7%。

总结

综上所述，基于多模光纤的解决方案仍然是数据中心运营商的重要选择，北美的企业数据中心和中国的大型云数据中心预计会成为推动多模市场增长的主要动力。从成本角度来看，对于大多数应用而言，多模方案在 400G 速率应用场景下仍然具有成本优势。从功耗的角度来看，多模解决方案在节能和降低温室气体排放方面优势明显。因此，我们预计多模市场，尤其是 OM4 多模光纤，在可预见的未来会得到持续应用。通过优化色散，康宁® ClearCurve® OM4 多模光纤能提供更高的有效链路带宽，优化传输性能，相较标准产品性能提升 7%。

参考文献

- [1] Paul Brodsky, internet traffic and capacity in Covid-Adjusted terms. Telegeography
- [2] Alex Schultz et.al. <https://about.fb.com/news/2020/03/keeping-our-apps-stable-during-covid-19/>
- [3] Forbes, How the pandemic has changed video content and consumption.
- [4] LightCounting, Vendor Survey Report, September 2021

[5] IEA (2021), Data Centers and Data Transmission Networks, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

[6] Digital Realty®, <https://www.digitalrealty.com/blog/green-data-centers-are-imperative-for-enterprise-success>

[7] United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>

[8] IEEE 802.3cm AD hoc. Jonathan King, 18th June 2018