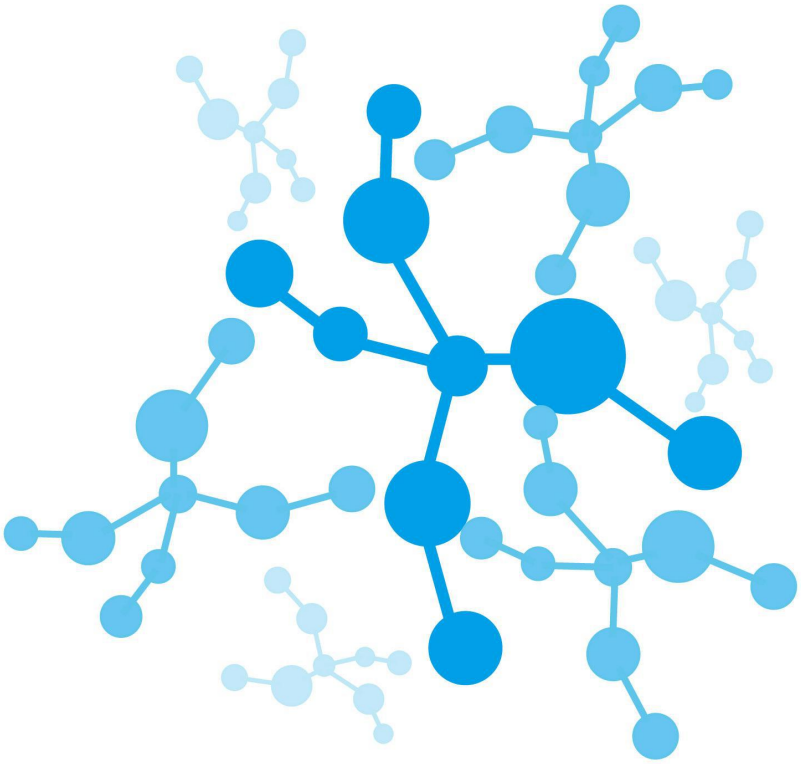
未来网络发展大会
FUTURE NETWORK
DEVELOPMENT CONFERENCE
NANJING · CHINA / 中国 · 南京

未来网络白皮书

——数据中心自动驾驶网络技术白皮书
(2021版)



第五届未来网络发展大会组委会
2021年6月

版权声明

本白皮书版权属于网络通信与安全紫金山实验室、华为技术有限公司和北京邮电大学所有并受法律保护，任何个人或是组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明来源。否则将违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此网络通信与安全紫金山实验室、华为技术有限公司和北京邮电大学有权追究侵权者的相关法律责任。

编写说明

编写单位：（排序不分先后）

网络通信与安全紫金山实验室、华为技术有限公司、北京邮电大学

主要编写人员：（排序不分先后）

王蕾、韩涛、邓小军、李宝焜、李洪迪、黄韬、汪硕、沈洋、朱华兴

前　言

云计算技术兴起将企业数据中心推向又一个高速发展阶段。云化数据中心为企业提供按需自助、泛在接入、资源池化、快速弹性以及可度量的标准服务能力。数据中心不再只是一种资源支撑系统，而成为一种新的生产力，改变企业研发、生产和运营模式，并驱动企业业务模式创新，带动产业转型。随着软件定义网络（Software-defined Networking，SDN）技术兴起，企业数据中心云化改造快速落地，数据中心网络满足了计算、存储动态发放、弹性扩缩诉求。

然而，在企业信息化进程快速推进的同时，企业数据中心 OPEX 随着网络规模扩大而逐年增加，网络运营在规划、建设、维护和优化各阶段仍严重依赖于人员经验和技能，结构化矛盾日益凸显。而想要消除数据中心网络全生命周期运维的人工断裂点，原有网络技术已经无能为力。

数据中心自动驾驶网络这一新系统体系旨在通过自动化与智能化手段逐步减少和消除人工操作，逐步向自服务、自维护、自优化的无人值守数据中心网络演进。

本白皮书介绍数据中心自动驾驶网络的内涵、分级标准、网络架构、尤其是关键技术，包括数字孪生网络、网络引入的 AI 技术、网络仿真与推演、意图管理和回滚、智能搜索技术，并通过测试用例介绍数据中心自动驾驶网络的关键能力。

本白皮书旨在吸引更多研究、工程和产业人员参与自动驾驶网络的理论研究、技术攻关和应用落地；通过自动驾驶网络架构实现未来网络变革，推动各行业朝着信息化、数字化、网络化和智能化的方向

第五届未来网络发展大会白皮书

升级，深化加速企业数字化转型。

第五届未来网络发展大会白皮书

目　　录

前　　言 I
一、数据中心网络发展与挑战 5
1.1 数据中心网络发展面临新挑战 5
1.2 技术创新驱动结构性问题解决 8
二、数据中心自动驾驶网络介绍 14
2.1 数据中心自动驾驶网络愿景 14
2.2 数据中心自动驾驶网络分级 15
2.3 数据中心自动驾驶网络架构 17
三、数据中心自动驾驶网络关键技术剖析 24
3.1 数字孪生网络技术 24
3.2 AI 推荐技术 30
3.3 仿真平台技术 32
3.4 网络变更推演技术 34
3.5 意图管理和回滚技术 36
3.6 智能搜索技术 37
四、数据中心自动驾驶网络优秀实践 41
4.1 测试拓扑 41
4.2 测试物料 41
4.3 测试结论 43
4.4 测试用例列表 44
附录 A：术语与缩略语 47
参考文献 48

第五届未来网络发展大会白皮书

第五届未来网络发展大会白皮书

一、数据中心网络发展与挑战

1.1 数据中心网络发展面临新挑战

自上世纪 90 年代至今，企业数据中心无论是在技术上还是部署规模上都极速发展，并先后历经数据大集中及资源池化、云计算两个跨越式发展阶段。特别是云计算技术兴起将企业数据中心推向第二个高速发展阶段。云化数据中心为企业提供按需自助、泛在接入、资源池化、快速弹性以及可度量的标准服务能力。数据中心不再只是企业内的一种资源支撑系统，而是成为一种新的生产力，开始改变企业研发、生产和运营模式，并驱动企业业务模式创新，带动产业转型。此时，随着软件定义网络（Software-defined Networking，SDN）技术兴起，企业数据中心云化改造快速落地，数据中心网络满足了计算、存储动态发放、弹性扩缩诉求。截至 2018 年底，大部分企业数据中心已完成虚拟化向云化改造，进入云数据中心时代。

然而，在企业信息化进程快速推进的同时，一方面，企业数据中心随着网络规模扩大而逐年增加，网络运营在规划、建设、维护和优化各阶段仍严重依赖于人员经验和技能，结构化矛盾日益凸显。通过与 TOP 30 金融客户的深入探讨，我们发现数据中心平均每千台设备的运营维护需要约 30 名工程师。另一方面，数据中心网络也存在业务体验难以管理的巨大挑战，网络部门收到的用户投诉一半以上与业务体验问题有关。

第五届未来网络发展大会白皮书

我们与企业客户在数据中心网络领域深入合作，对数据中心网络全生命周期进行研究和分析，识别出如下重大问题：

- **规划阶段：**企业数据中心在未来 3 年仍处于高速建设期，服务器规模将翻倍增加。网络设计人员需要完成业务需求转化为网络设计、评估应用安全要求、规划网络资源使用等繁琐工作，这消耗了企业中约一半的网络人力，急需通过系统化、自动化手段改变疲于奔命的状态。
- **建设阶段：**随着云化业务量大幅上升，一方面，业务上线周期由原来的周级降至天级，压力日趋增大。另一方面，企业关键核心业务对可靠性要求极高。据 Gartner 统计，近 40%网络事故由人为失误导致，如何保障配置发放的正确性至关重要。以某银行网络为例，2019 年累计变更 14500 余次，而变更工作量巨大，已超出人工处理极限，应接不暇的变更评审使变更成功率不断下降，造成 5 起网络中断事故。同时网络对于客户的实际业务感官较少，仍然停留在网络的具体某些 IP、配置的策略、路由协议上，业务出现问题后，再经过人工转换为具体的网络元素，故障解决处理周期无形中拉长，甚至由于转换信息不明确，导致故障未定位，给客户造成更大影响。
- **维护阶段：**当前企业数据中心大多采用 4 个 9（99.99%）高可用标准，即数据中心全年中断时间应小于 26 分钟；部分核心业务应达到 5 个 9（99.999%）标准，即全年中断时间应小于 5

第五届未来网络发展大会白皮书

分钟。为此，金融行业、运营商及一些大企业均提出 5 分钟故障快速修复的目标。然而，当前企业网络维护智能化改造进程明显慢于业务自动化进程。云化业务弹性发放及 VM 迁移带来网络访问与流量的动态变化，给网络运维增大了难度。传统网络运维依靠告警、事件和日志等信息，无论是状态信息丰富度，还是监测周期（10min）都无法满足云化数据中心的运维要求。网络故障在被动应对、依赖人工排查，定位时间不可控。

- **优化阶段：**云化数据中心业务变化加快，网络、安全资源使用易存在局部热点，如不及时调度将可能导致业务上线失败问题。另一方面，AI 训练、大数据、HPC 和分布式存储等新兴业务规模上线，应用之间点到多点分发式通信模式增多，导致网络微突发情况加剧和亚健康状态频发，严重影响业务运行效率。当前网络状态评估、业务预测、补丁升级等工作仍严重依赖人工经验，存在滞后性，潜在风险无法及时排除，造成业务体验差。

综上所述，数据中心网络全生命周期运营维护存在四大人工断裂点，一旦消除这些人工断裂点，数据中心网络将实现全生命周期高度自治。

表 1-1 人工断裂点与高度自动化对比

As-Is：人工断裂点	To-Be：高度自动化
以网络语言作为主要编排方式	以业务意图驱动，网络智能推荐
业务正确性人工校验，层层评审	智能仿真校验，网络多级回滚保障，

第五届未来网络发展大会白皮书

As-Is：人工断裂点	To-Be：高度自动化
	业务秒级就绪
故障被动响应，多工具辅助，人工恢复时间长	故障主动发现，智能定位，自动闭环
人工经验巡检，网络优化滞后	基于业务体验，AI 持续预测健康度体系，持续优化

1.2 技术创新驱动结构性问题解决

事实上，想要消除数据中心网络全生命周期运维的人工断裂点，原有网络技术已经无能为力，而随着意图抽象、数字孪生、人工智能等重大创新技术的迅猛发展，数据中心网络高度自治才成为可能。

意图网络、数字孪生等技术与 AI 结合，可逐步消除数据中心网络运维的人工断裂点，不仅可以代替人工处理大量重复性、复杂性的操作，还可基于海量数据提升网络预测和预防能力，通过数据更懂客户，基于数据驱动差异化的产品服务，使能高度自动化和智能化的数据中心网络运维。

（1）意图网络

业务对网络的意图（简称意图）指以应用为中心，用业务语言描述对特定网络服务及操作的期望。它是意图网络最重要的外部输入。意图网络是 ADN 自动驾驶的抽象层面的直观体现，将过去客户繁琐的网络语言抽象为便于客户直观理解，可度量的业务应用语言，作为输入，由系统去达成客户意愿。

第五届未来网络发展大会白皮书

意图网络需将业务意图转换为网络可理解、可配置、可度量、可优化的对象及属性。通过对现有网络资源规格、网络 SLA 及安全能力等方面的综合评估，实现可靠性最优、资源最优、安全最优的网络设计方案推荐，并提供持续业务网络保障优化能力。

例如：某账单查询系统需要上线。它包含 3 个微服务，业务对网络的意图描述如下：

表 1-2 某账单查询系统上线对网络诉求

微服务名称	服务类型	实例数	网段	安全分区	互联	出口
账单查询服务	Web 服务	20	20.20.1.0/24	WEB 区	数据库	出口
支付服务	应用服务	20	20.10.1.0/24	APP 区	数据库	/
数据库服务	关系数据库	2	10.10.1.0/24	DB 区	支付/账单查询	/

该意图语言描述了客户的一个诉求：客户需要上线账单查询系统，包含 3 个微服务，一个存储，一个用于支付，一个用户查询，对应客户的规划网段对三个服务都有明确要求。基于安全级别需要规划三个安全分区去部署这三个服务，并要求了可靠性，同时定义了三个服务之间的互联通信关系。从而可以描述出客户的业务意图：{Name:“账单查询系统”｜SecurityArea:“web”,“APP”,“DB”｜Service:“账单查询服务”/“Web 区”/20/“20.20.1.0/24”,“支付服务”/“APP”/20/“20.10.1.0/24”,“数据库服务”/“DB”/2 /“10.10.1.0/24”｜Communication:“账单查询->数据库”,“支付->数据库”,“数据库->支付，账单查询”｜externalDomain:“web”/“账单查询服务”}。客户描述好意图语言后，系统需要的做的事就

第五届未来网络发展大会白皮书

是将业务对网络的意图转换为网络语言：

业务需要部署三个服务，分别位于不同的安全分区。系统推荐资源消耗最低，保持业务安全隔离性的组网方案，因此推荐每个安全分区一个 LogicRouter 部署一个服务，需要部署三个 LogicRouter，名称为 “账单查询服务”、“支付服务”、“数据库服务”。

分别为三个 LogicRouter 分配一个 24 位网段子网，需要 LogicSwitch 模型接入。

账单查询系统总体有一个外部出口，位置在 web 区，由账单查询服务接入，因此需要为账单查询查询的 logicRouter 绑定一个 web 区的外部网关。

三个服务有访问诉求，转换为对应三层互访网络诉求，配置互通，系统根据网络情况及安全要求决定互访控制点，如防火墙还是转发设备，是否过多次墙等推荐。

根据网络资源与计算业务分布，推荐实例上线位置。

网络诉求完成后，系统基于专家样本库推荐最合适的网络方案推荐给客户，客户部署后可设置业务重点保障监控。

依托意图网络可实现网络设计简化，降低管理复杂度；屏蔽异构网络设备及多云业务差异。使得管理员无需在网络技术细节上耗费时间，大大缩短业务上线周期。

（2）数字孪生

Gartner 将数字孪生(Digital Twin)定义为物理对象的数字化表

第五届未来网络发展大会白皮书

示，包括：

- 物理对象的模型
- 来自物理对象或与其相关的数据
- 与物理对象唯一的一对一对应模型实体
- 监视物理对象的能力[1]

网络数字孪生是对网络的数字化实时表示，包括状态信息(故障，事件，异常，业务状态，协议状态等)，静态信息（设备类型、容量、拓扑、配置等)、动态信息（流量、表项、性能）、关联关系（对象模型、属性关联等）等。它为网络实现设计推荐、故障处理、资源性能优化等智能决策环节提供了一张高精地图。

数字孪生的目的是构建一张与实际现网网络一比一的数字化网络，能直接通过用户的眼睛反应到客户脑海中。客户可以通过对该数字化网络的认知，直接反应到实际网络的认知，比如网络故障(故障点，故障级别，故障原因)都将在数字化网络中直观呈现，客户可以感知到具体的故障位置，比如什么地方，哪个机房，哪个设备，哪个端口；可感知到故障的具体原因，比如端口光模块接收异常。客户可以感知实际业务的具体情况，比如能通过数字化网络查看到某条业务流的具体路径，包含设备路径，可以叠加查看流量的丢包统计，SLA健康状态等信息。总之，数字化网络使客户利用直接的双眼能直观感知到实际物理设备的运行状态，运行轨迹，之前摸不着的网络能直观呈现出来反应到客户大脑中，这个就是数字孪生技术的基本应用。

第五届未来网络发展大会白皮书

同时，数字孪生提供的其他丰富功能，孪生实例，数据治理，timeline 历史切片等都帮助了客户更好开展自己的业务和基于数字化网络上做运营。

（3）人工智能

意图网络完成外部对网络的诉求输入，网络数字孪生完成对网络可视化直观感知，而人工智能（Artificial Intelligence，AI）技术的引入，进一步实现人工断点的消除。目前，广泛使用的人工智能算法有如下几类：

● 强化学习

强化学习（Reinforcement Learning，RL）是不断地重复、不断强化认知的学习过程。

在数据中心，大量业务上线和变更导致网络频繁变更。如果通过人工方式变更网络，很难以最优方案部署或得到最佳体验。而通过引入强化学习，根据不同组网方式、不同业务场景和流量大小等多种因素，对变更的参数进行动态选择，则可以实现网络的最佳部署。

● 形式化验证

形式化验证（Formal verification）最早应用于软件验证领域，通过穷举程序的所有输入和所有执行路径来诊断代码的质量和功能。

将形式化方法引入到网络配置中，可构建事前仿真、事后验证的能力。在网络变更前，进行配置面验证，保证变更 100%无错误。在配置下发后，定时采集设备的表项进行数据面验证，对网络运行状态

第五届未来网络发展大会白皮书

提供持续性可靠保障。

● 知识图谱

知识图谱（Knowledge Graph）技术主要包括知识表示与建模、知识获取、知识融合与知识应用四部分。它以结构化形式描述数据实体及其之间的关系，并提供了一种更好地组织、管理和理解海量信息的能力。将网络配置、状态、关键 KPI 等信息通过知识图谱方式进行自动化建模，并通过故障与网络事件自动注入持续训练实体间因果关系，可实现故障场景下多 KPI 指标异常传播关系的模糊推理，快速识别故障类型与根因。

第五届未来网络发展大会白皮书

二、数据中心自动驾驶网络介绍

2.1 数据中心自动驾驶网络愿景

凭借多年来在 ICT 领域不断深耕的一线经验，结合众多领域，贯穿融合多方技术，我们总结而成**自动驾驶网络（Autonomous Driving Network, ADN）体系**，希望帮助和指导客户的网络团队，建设其自身的数字化网络，为组织持续输出“血液”。该体系涵盖一系列方法论、工具和最佳实践，旨在通过自动化与智能化手段逐步减少和消除人工操作，逐步向自服务、自维护、自优化的无人值守数据中心网络演进，从而帮助企业用户打造一条切实可落地的网络数字化转型路线[2]。

- 自服务

系统自动抽取业务对网络可靠性、资源、SLA（Service Level Agreement，服务水平协议）等需求；结合资源预测、安全策略推荐、网络模型推荐等关键算法实现网络方案的自动化设计，提供免规划、免设计的自服务网络体验。

- 自维护

系统通过网络数字孪生、知识图谱等技术实现对网络状态、变化的实时感知；通过持续的网络行为学习与训练，主动识别网络风险与异常；通过根因溯源、模糊推理等技术实现故障根因智能分析；结合故障发生位置、时间、业务影响等因素给出异常修复建议；最终实现

第五届未来网络发展大会白皮书

风险主动规避、故障自动闭环的自维护系统以提升业务连续性与体验。

● 自优化

系统通过智能监控、健康度分析预测、仿真验证，业务意图比对等手段，实现网络参数的持续优化。最大限度提升业务运行效率，提升算力，并优化网络资源开销。

数据中心网络作为自动驾驶网络的积极践行者，相比园区、城域等网络领域具有架构单一，网络边界清晰，模型抽象完备，自动化、智能化程度高等优势。只要聚焦关键业务场景人工断裂点，充分运用大数据与 AI 技术进行持续联合创新，数据中心网络有望率先实现限定条件下的网络自治，并向高度、完全自动驾驶网络演进。

2.2 数据中心自动驾驶网络分级

要实现网络完全的自动驾驶，必然是一个长期的过程，不可能一蹴而就。参考汽车自动驾驶五级标准，我们提出自动驾驶网络的标准，从人工和系统的协作关系，将自动驾驶网络定义为五个等级[3]：

L0 手工操作：所有操作全部通过人工执行，包括配置下发，状态查询均通过命令行完成，这是网络的最初始阶段。

L1 工具辅助：针对已知重复性任务，通过工具或脚本批量操作（如批处理工具），辅助用户提高效率，通常是针对一个或多个网元进行。

第五届未来网络发展大会白皮书

L2 部分自治网络：核心理念是从网元视角转变为网络视角，例如业界的 Fabric、VPC 等概念。用户从整个网络考虑问题，摆脱对单网元命令行的依赖。大部分用户和厂商都处于这个阶段。

L3 限定条件自治网络：核心理念是从网络视角转变为业务视角，通过业务意图驱动整个网络的运行。此时，系统从被动执行转变为智能决策，比如推荐网络的最佳方案、提供事前评估、事后自动验收、发现问题后自动定位等。系统具备智能化能力，用户授权后，可实现部分场景的闭环管理。

L4 高度自治网络：相比 L3 阶段，网络智能化程度更高。系统可以提前预测和分析潜在风险，并主动进行优化调整，保证网络持续满足业务要求。针对突发问题，系统有主动纠偏的能力，作为后续能力。

L5 全自治网络：这是数据中心网络发展的终极目标，系统具备在任意场景中跨业务、跨领域的全生命周期的闭环自愈能力，真正实现无人驾驶网络，作为后续能力。

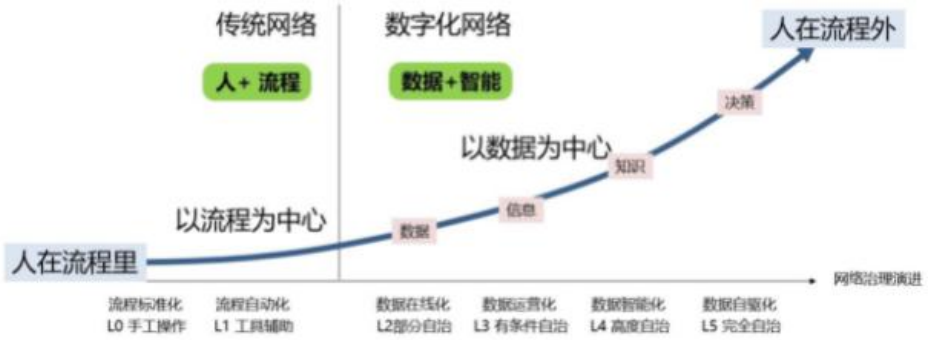


图 2-1 从传统网络到自动驾驶网络的跃迁

第六届未来网络发展大会白皮书

2.3 数据中心自动驾驶网络架构

数据中心自动驾驶网络方案架构主要分为网络基础设施、管控系统、云端训练系统三层[3]。

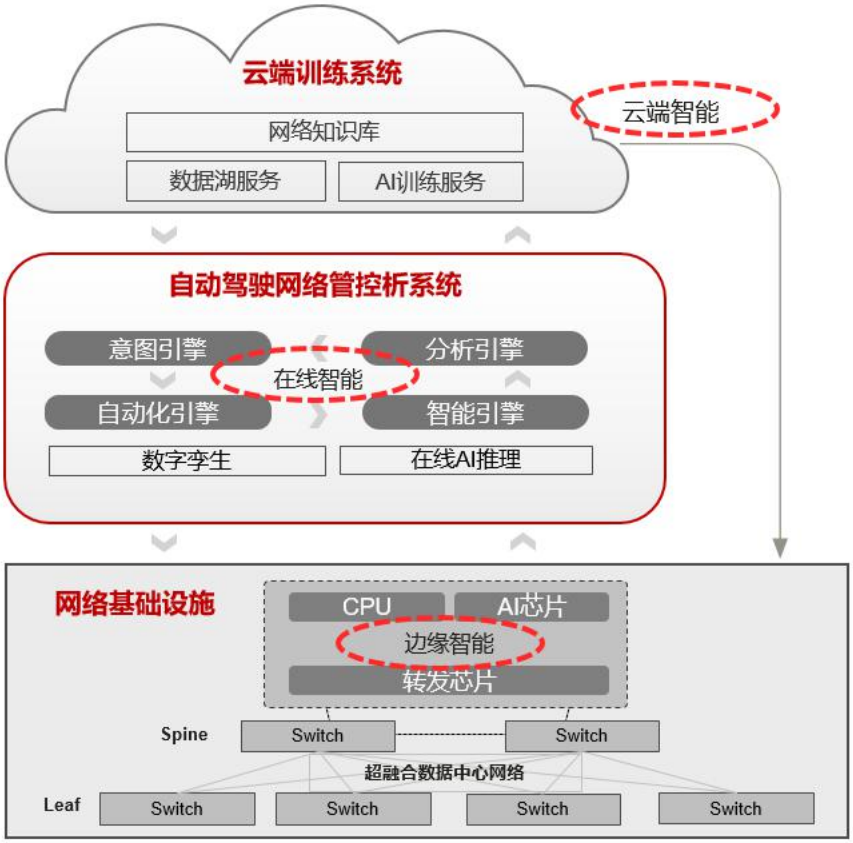


图 2-2 数据中心自动驾驶网络方案架构

- 网络基础设施：依托数据中心交换机实现数据中心物理网络采集与配置系统重构，支持 Telemetry 主动上报，Netconf Yang 高速配置能力。同时网络设备内嵌 AI 芯片，具备智能边缘推理能力，可实现网络 KPI 及流量异常行为分析、网络 KPI 自优化能力。
- 管控系统：依托自动驾驶网络管控析系统，以意图引擎、自动

化引擎、分析引擎、智能引擎及网络数字孪生底座为核心，面向数据中心网络“规-建-维-优”全生命周期的自动化管理以及智能运维业务全场景，提供意图管理、仿真校验、业务发放、健康度评估等独立、微服务化组件。

- 云端训练系统：集成海量 AI 算法库，支持高性能 AI 训练能力。基于云端 AI 模型训练引擎、管控系统智能训练&推理引擎、设备智能边缘推理引擎，可实现三层智能引擎间的模型与推理参数主动优化，持续向高级网络自动驾驶能力演进。

其中，数据中心自动驾驶网络管理控制析系统，是集管理、控制和分析一体化的自动化与智能化平台，是数据中心自动驾驶网络的大脑，意图引擎、自动化引擎、分析引擎、智能引擎及数字智能平台实现数据中心网络全生命周期高度自动化和智能运维。

网络发展白皮书

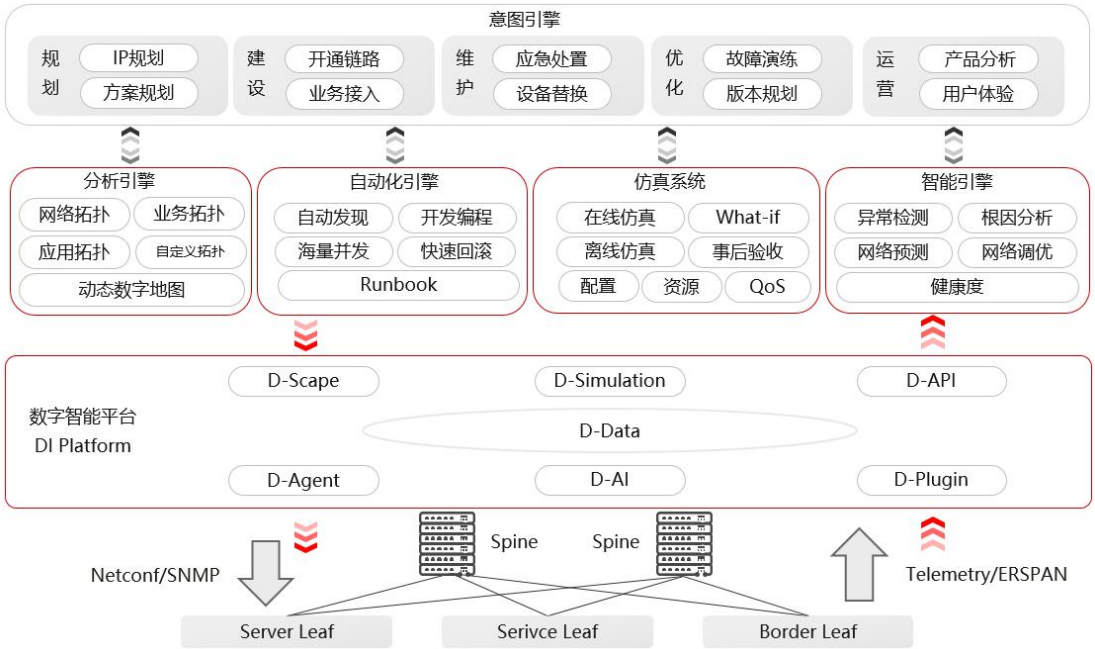


图 2-3 数据中心自动驾驶网络管控系统架构

（1）意图引擎：

意图引擎是自动驾驶网络的中枢，是从 L2 自动化走向 L3 意图驱动的核心标志。基于业务意图，通过网络推荐算法，将业务意图自动转换为网络设计。提供 IP 地址推荐、网络资源位置推荐、安全方案推荐等智能推荐能力，实现一键式业务网络规划，并将业务意图转化为网络监控指标，持续保障网络连接或功能的 SLA。

意图引擎由意图管理、意图决策以及工作流三部分组成。

- 意图管理：以业务意图为核心，实现意图的全生命周期自动闭环管理。
- 意图决策：将不同业务场景对网络的诉求进行抽象，结合网络最佳路径、安全最优原则，通过智能推荐算法，实现最优网络设计推荐，并根据业务特点，为业务网络自动创建差异化、针对性的网络保障服务。
- 工作流：基于业务设计器，根据业务需求，实现业务工作流的灵活定义，快速实现网络与企业用户的业务系统对接集成。

（2）自动化引擎：

自动化引擎负责整体数据中心网络的发放，由网络规划、业务发放和仿真校验三部分组成。

- 网络规划：通过编排网络模型构建业务逻辑网络，通过自动化编排消除手动配置，降低网络复杂性并提高自动化水平。
- 业务发放：基于网络模型，完成业务逻辑网络向网络配置的转

第五届未来网络发展大会白皮书

换，实现网络业务统一发放。支持业务高效调度和高并发，满足数据中心业务极速发放的要求。同时，还提供业务、租户和全网的多级回滚及对账能力。

- 仿真验证：仿真系统，包括在线配置仿真验证、离线配置仿真验证和事后验收。以现网配置、拓扑和资源信息作为输入，通过网络建模和形式化验证算法，基于现网仿真剩余网络资源是否足够、呈现详细的连通性互访关系、数字化模拟用户重大意图的执行、验证意图的预期效果、分析和评估变更对原有业务影响，并持续验证原始业务意图是否已经被满足，进而保障客户网络可靠性。

（3）分析引擎：

分析引擎建立了一整套故障发现、故障根因与影响智能推理、故障处理维护的统一框架，是数据中心网络运维监控的入口。通过大数据技术构建海量设备数据的采集与分析能力，实时感知设备 KPI、状态以及表项变化，并支持全流采集分析。

分析引擎由健康度评估、异常检测和根因分析三部分组成。

- 健康度评估：将网络 KPI、流量及状态等指标进行抽象建模，建立面向设备、网络、协议及业务的网络健康度评估体系，并根据性能、容量、状态、安全攻击及连通性等多个维度，综合、实时评估网络健康状态。
- 异常检测：基于网络健康评估，实现未发生故障主动预测，快

第五届未来网络发展大会白皮书

速感知已发生网络异常和故障。

- 根因分析：基于知识图谱进行深度特征挖掘和学习，辅以故障排查和配置表项比对等手段，实现网络故障根因快速定位。根因定位后，分析故障影响并推荐优选故障处理方案。同时，可以根据网络流量等数据，提前识别和分析出故障风险，进行主动优化，排除网络隐患。

（4）智能引擎：

智能引擎是整体方案架构中的 AI 平台化组件，提供应用识别、质差分析等多个 AI 通用算法学件能力。基于联邦学习技术，智能引擎可实现与其他端 AI 平台联动，持续优化算法库。同时，智能引擎与设备 EAI（Embedded Artificial Intelligence，嵌入式 AI）组件协同，将训练后的算法推送给设备 EAI 组件，从而实现设备本地推理和业务体验优化。

（5）数字智能平台：

一个平台，七种关键能力内置其中。

- D-Agent：持续、自动的发现全网运行蓝图，包括私有云、公有云、混合云以及容器和云原生环境，满足高度动态的环境中的可扩展性和覆盖面，无需手动配置。
- D-Scape：自动、实时的发现全栈拓扑，捕获并统一所有可视化数据之间的依赖关系，以便智能地组合度量、日志、跟踪和配置数据。此实时拓扑图是智能可视化的基础，包括网络、

第五届未来网络发展大会白皮书

应用、业务以及交易。

- D-AI：自我学习、自我修复、智能决策、意图推荐，提供全方位的智能网络运维，包括智能基线自动学习“网络正常”状态，并随着环境的变化动态调整，针对业务故障提供更精准的智能根因分析。
- D-Simulation：还原生成网络，建设 1：1 的仿真环境，提供多维度的仿真验证能力。
- D-API：多种数据及功能对外服务出口，包括 openAPI、消息、CDC 订阅等，并且支持 OpenTracing、OpenTelemetry 等协议。
- D-Plugin：支持插件化的三方对接，完成数据及功能协同，包括 ITSM（IT Service Management，IT 系统管理）、CMDB（Configuration Management Database，配置管理数据库）、监控告警等。
- D-Data：大数据平台，统一集中存储网络全栈数据，包括关系型数据、图数据、列式数据等。

一体化，不再需要大量孤立的工具、不再浪费宝贵的时间、网络自动架构平台可以搞定一切，网络运维的 Everything 尽在其中。不仅具备包括指标、日志、跟踪信息、配置等在内的可观测能力，还能针对常用的技术提供自动化支持，并通过全栈式技术模型、仿真能力和无与伦比的人工智能引擎实现自动化、智能化的运维和运营、加强跨团队协作，通过提供同一个真实可信的数据来源，让网络与系统、

第五届未来网络发展大会白皮书

安全、开发、业务运营团队之间更好的协同，促进企业的数字化转型。为所有的用户历程提供出色的用户体验，最大限度的提升关键性能指标，持续的获取新用户，增加收入。

第五届未来网络发展大会白皮书

三、数据中心自动驾驶网络关键技术剖析

数据中心自动驾驶网络引入多种创新技术，来解决数据中心网络现网全运维流程的种种难题，使能网络逐步实现人在流程外，网络闭环自治。

3.1 数字孪生网络技术

3.1.1 概述

数字孪生常用于工业 4.0，通过将物理对象数字化呈现，实现对客户世界物理实体的设计、构建和故障诊断等能力，极大提升工业生产效率。

传统网络的一些问题：

- 网络中，传统网络通过网管工具可采集部分数据，硬性统计并呈现一些物理网络信息，内容离散，页面分散，每页呈现信息有限，不全面，需要多个界面综合查看。
- 传统网络也可通过一定的抓包工具等获取到部分流信息，用于分析和诊断，但却缺乏一种对网络级业务、流的直观呈现，依赖用户经验处理问题。
- 网络的任何变更都靠人设计，靠人评审，没有方便的环境可以提供给客户保证变更的正确性，影响性。

网络数字孪生的意义在于通过对网络建模，数字化的呈现网络的

第五届未来网络发展大会白皮书

真实情况，多级呈现，比如物理信息，协议信息，业务网络，流量信息，表项信息等直观叠加展示，将网络的实际状态通过一副或者多维度的形式直观展示给客户，让客户通过这些图能直观了解到网络的现状，比如健康度，故障情况，业务部署情况及业务流量情况等。同时，孪生系统可以衍生多实例，将网络数字化的网络模型及数据多实例处理，提供多用户的不同处理需要，相互不影响，更不会影响实际的网络业务数据。基于多实例技术，客户可以完成规划，设计，验证能力，提高网络业务开通效率。此外，数字孪生与数据建模系统提供了丰富灵活的数据开放能力，可快速支撑上层客户使用。

3.1.2 关键能力

数字孪生网络作为数据中心的数据底座技术，主要提供三个关键能力：

- 基于模型的数据存储、管理和开放：基于网络数据模型构建网络数据，提供多产品模型统一，数据存储能力，包括对数据的治理，对外提供数据开放性。
- 网络数字化的构筑能力：基于数字孪生模型底座的多图层叠加显示，方便用户在一张图上查看所需要的信息，动态叠加信息，形成客户脑海中的网络画像图样。客户看图样即为看网络。
- 多实例机制：提供多实例机制，实例间设计互相不影响，独立运作。同时基于生产网络到其他实例间配置冲突检查，当生产网络实例发生变更时，可同步处理到其他实例，保证其他

第五届未来网络发展大会白皮书

实例的数据最新，减少用户在其他实例上设计到具体自动化下发由于生产变更导致的错误发生。

数字孪生网络交互能力如下图所示。数据孪生作为数据底座组件，接收数据采集模块和上层各引擎及 APP 的数据注入。采集完成网络生产数据物理层面的数据注入，当前主要包括物理网络信息，比如网元，链路，网元配置等信息；上层引擎和业务数据注入主要注入网络业务侧数据，全部汇入数字孪生数据底座。数字孪生对内提供几个功能模块，模型管理，数据存储，多实例机制，数据治理，图层机制，整体对外实现了存储和开放，丰富的可视化展示，基于模型的多实例机制能力。

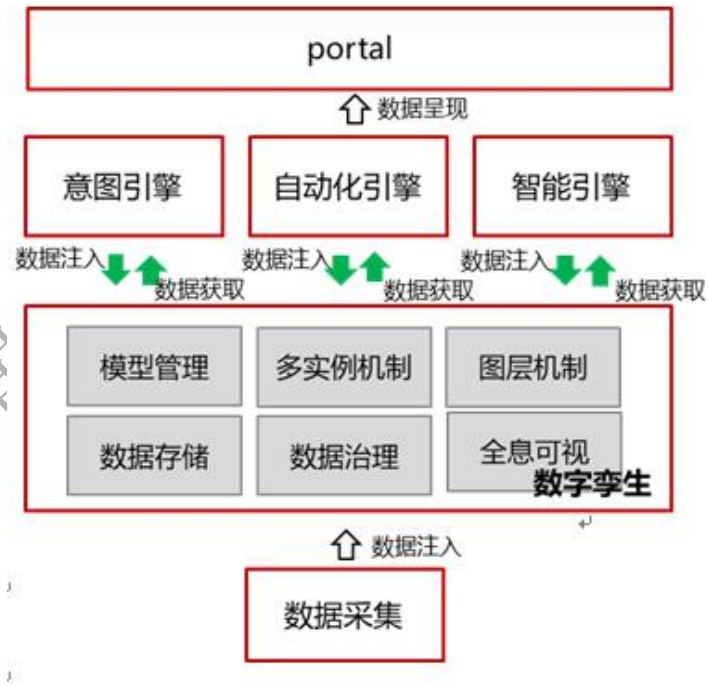


图 3-1 数字孪生网络交互能力

（1）多实例下及数据存储关键技术：

数字孪生多实例技术在数字孪生中起着比较重要的作用，数字孪

生可产生多实例数据环境，同时基于沙盒的实现机制，能快速构建和销毁，不同用户在某个实例数据上的操作都是一样的体验，所做的操作不会影响其他实例的数据。性能上通过沙盒和存储机制提升性能，提升客户操作体验。如下图所示。

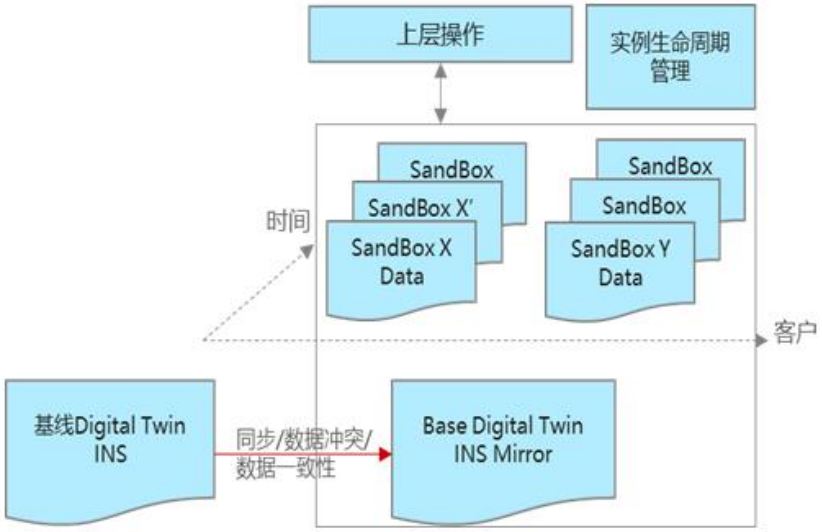


图 3-2 数字孪生多实例

关键的两个技术点：

- 多实例机制：构建生产和镜像实例，数字孪生负责这两个实例之间的数据同步，冲突处理和一致性处理，保证两个实例之间数据一致，提供数据冲突的解决机制。
- 虚实地址的存储方式最小化资源和提升性能：基于数据真实实际物理地址存储和虚拟地址存储的方式，实现多实例的数据的最小开销存储，互不干扰。每个沙箱内生产的数据基于实际地址保存；非沙箱产生的数据采用虚拟地址保存，其实际数据地址在镜像实例。基于该实现机制，能提高沙箱的资源

第五届未来网络

消耗，同时提供较高的性能体验。

（2）前台技术体系

网络数字化依赖前后台技术的搭配，前台带给客户的是数字化的直观体验。前台采用多个技术，使用到了 lightTopo2D，lightTopo3D 组件，整体打造 2D/3D 的网络数字化能力。前台整体架构如下：

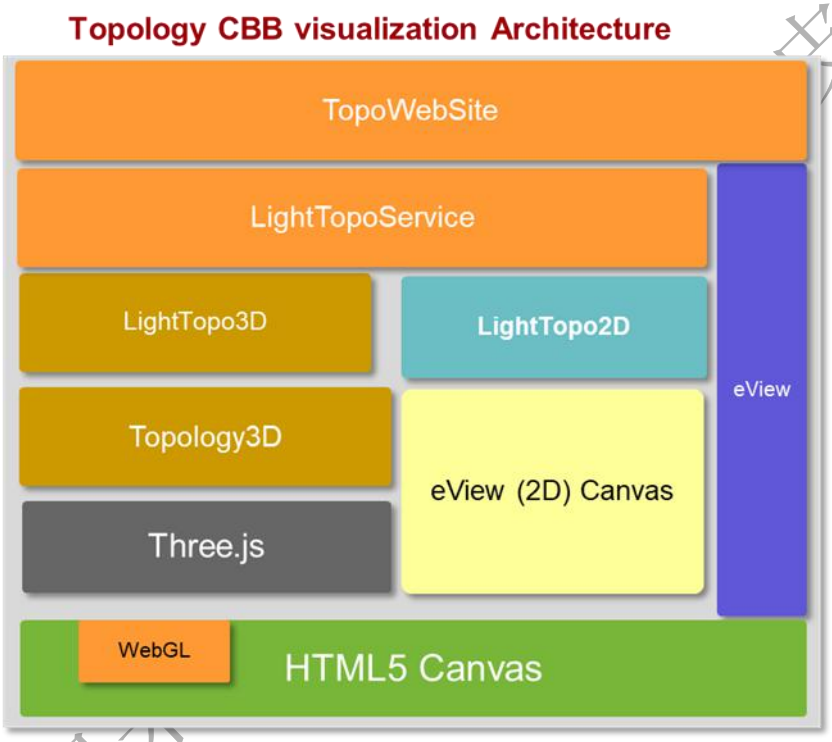


图 3-3 数字孪生网络前台整体架构

LightTopo3D 关键能力如下：

- 标准支持 多端兼容：基于标准 Web 技术，无需插件，通过浏览器即可在 PC 和手机等多端浏览，协助用户更好地洞悉网络数据，未来支持混合虚拟现实 AR+VR 技术为用户提供沉浸体验。

第五届大学生创新大赛 参赛文书

- 性能优异 效果绚丽：基于 Three 自主研发 3D 引擎，高效轻量，深度优化，可承载超大数据量、超大场景展示，支持各种贴图纹理、灯光效果，动画场景特效，带来革命性的视觉体验。
- 动态交互 实时响应：3D 场景 360 度全方位展示，支持室内运维场景，丰富的动效和交互操作能力。支持动态、实时的数据刷新和动态呈现，避免用户淹没在海量信息之中。
- 渲染器：多路动画、流光特效等。通过抽象镜头追踪算法，构建物体的虚焦和实焦能力、阴影分辨率、透明高光等效果。

通过前台构建的网络数字化世界可以给客户呈现最直观的体验。

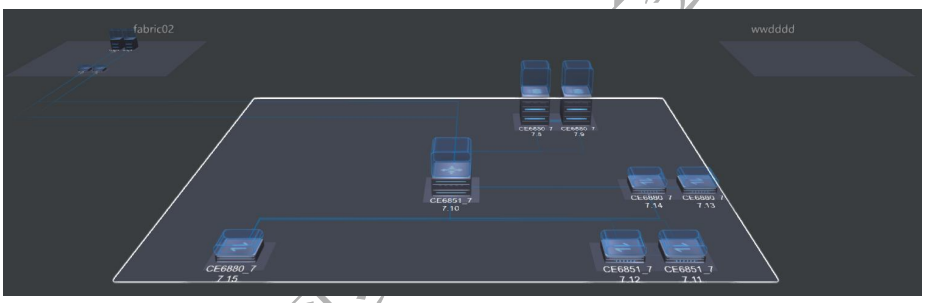


图 3-4 物理网络数字化视图示意图

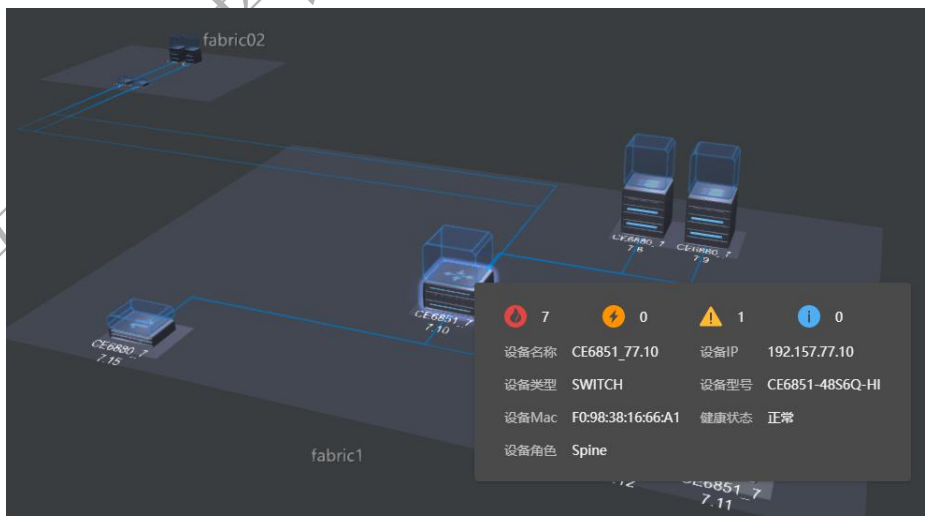


图 3-5 物理网络数字化信息示意图

3.2 AI 推荐技术

3.2.1 概述

人工智能应用在当今世界各个领域，特别图像识别、机器人等领域得到了很好的广泛应用。在网络中的 AI 应用相对较少，一方面是网络组网复杂，故障复杂，每个客户的网络都不一样，基本都靠客户自己设计和维护；一方面对于网络的模型建模，实体间关系等建模研究时间不长，网络的专业人员对于模型这块不擅长，熟悉 AI 的专业人员对网络又不擅长，是一个逐步发展的过程。但随着对网络的理解输入和知识图谱等技术的应用，网络的 AI 会很快发展起来，系统可自己找到网络中的故障或者推荐符合客户网络业务发展要求的业务规划和部署，系统也可以通过自学习的方式逐步学习训练新的网络和故障，最终逐步达到整体网络的自治，自愈，释放大量人力。当前网络自动驾驶人工智能的两个重要场景如下：

- 网络专家推荐：通过机器学习大量的标准网络或者客户网络，系统训练并推荐出适合客户业务诉求的业务网络部署。
- 网络故障自诊断：通过知识图谱构建网络的故障模型，通过 AI 算法，系统自发现故障问题，匹配最合适的故障解决方案。

3.2.2 关键能力

数据中心自动驾驶网络管控析系统采用机器学习专家模式，通过几个步骤完成网络的智能化。

学习当前数据中心成千上万张网络，抽取网络特征，如层次架构，

第五届未来网络发展大会白皮书

设备角色，冗余特征，端口特征，流量特征，业务特征等。

基于每一张网络，通过抽取的特征构建生成知识图谱，阐明实体及实体的表示关系。

客户输入业务诉求，系统转换为实际的网络诉求，知识图谱聚类匹配发现与网络诉求相似度最高的网络方案和次高的方案，分别作为最优方案，次优方案推荐给客户。

AI 推荐的方案，系统提供了修改的能力，即客户可以基于推荐的方案做一些细微的修改，修改后的网络会基于特征、客户习惯重新生成网络知识图谱，参与到下次的网络推荐中。

网络推荐的原理图如下，系统意图管理组件负责意图的输入，理解及翻译转换成实际的网络特征诉求，进而进入样本和算法组件进行匹配推荐，推荐输出的网络进入网络设计用户可修改，也可直接使用。

第五届未来网络发展大会白皮书

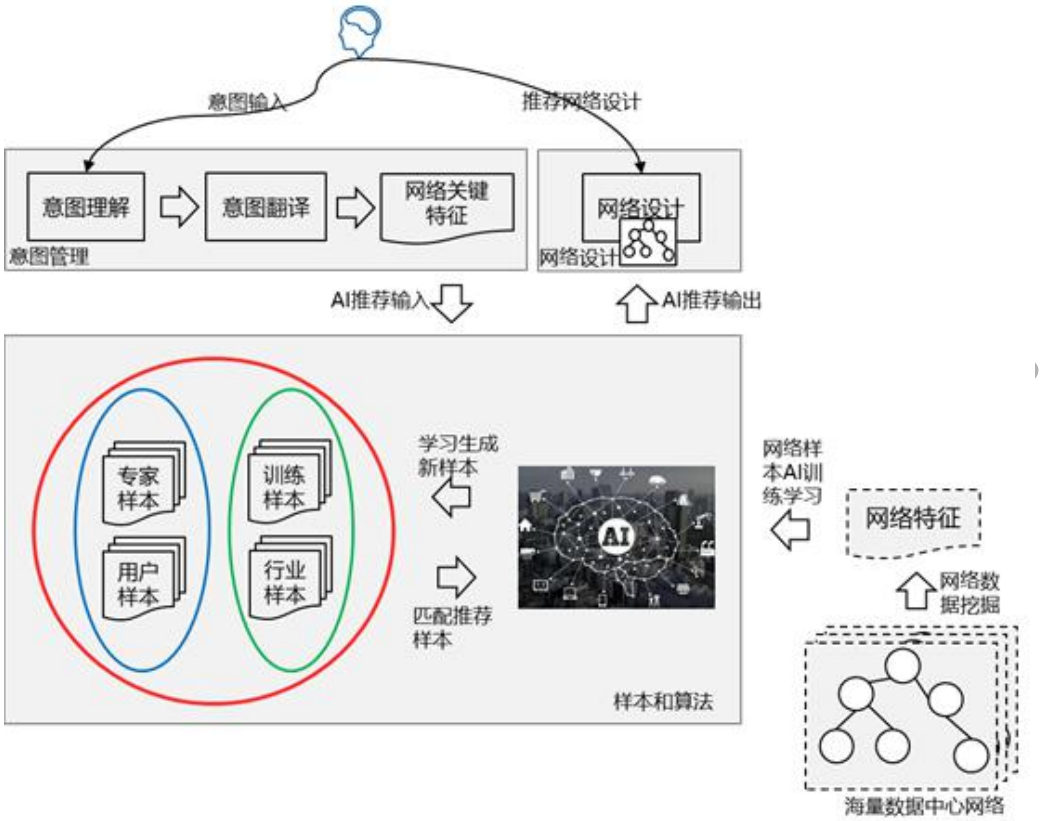


图 3-6 网络推荐原理图

3.3 仿真平台技术

3.3.1 概述

仿真能力在自动驾驶网络系统中的位置很关键。系统自治的关键点是系统的决策，比如方案推荐，系统的决策离不开验证可行性的支撑，推荐方案经过验证系统验证是否能满足基本的客户诉求，不能只推荐而不验证，否则无法保证推荐的网络是符合要求且正确可行的。同时，针对客户日常运维频繁的网络变更在变更期发生错误而导致事故时有发生的问题，仿真也能避免该问题的发生：针对任何变更，客户可以先利用仿真平台能力进行仿真验证，提前发现此次变更对现网

第五届未来网络

的业务影响，包含数据中心现有 Underlay&Overlay 业务影响分析。

3.3.2 关键能力

仿真的平台化能力支撑上层各业务的仿真验证诉求，屏蔽底层仿真算法组件的差异，从而提供给用户完善的仿真验证能力。验证子系统提供平台化的仿真能力，包含仿真验证管理适配组件和算法组件，采集数据的接收层。整体对外提供平台化的仿真能力，将仿真能力按原子粒度接口对外提供，比如验证<源 IP，目的 IP，源端口，目的端口>的连通性，验证路由域范围内的路由黑洞，给定 IP 地址与路由域是否存在地址冲突等原子接口能力，上层应用通过控制流信息调用原子接口组装，得到上层应用的仿真验证结果。控制器提供了增强展示能力，基于仿真的结果信息，可以通过控制器的数字孪生技术叠加图形展示。

仿真子系统架构如下图所示。

第五届未来网络发展大会白皮书

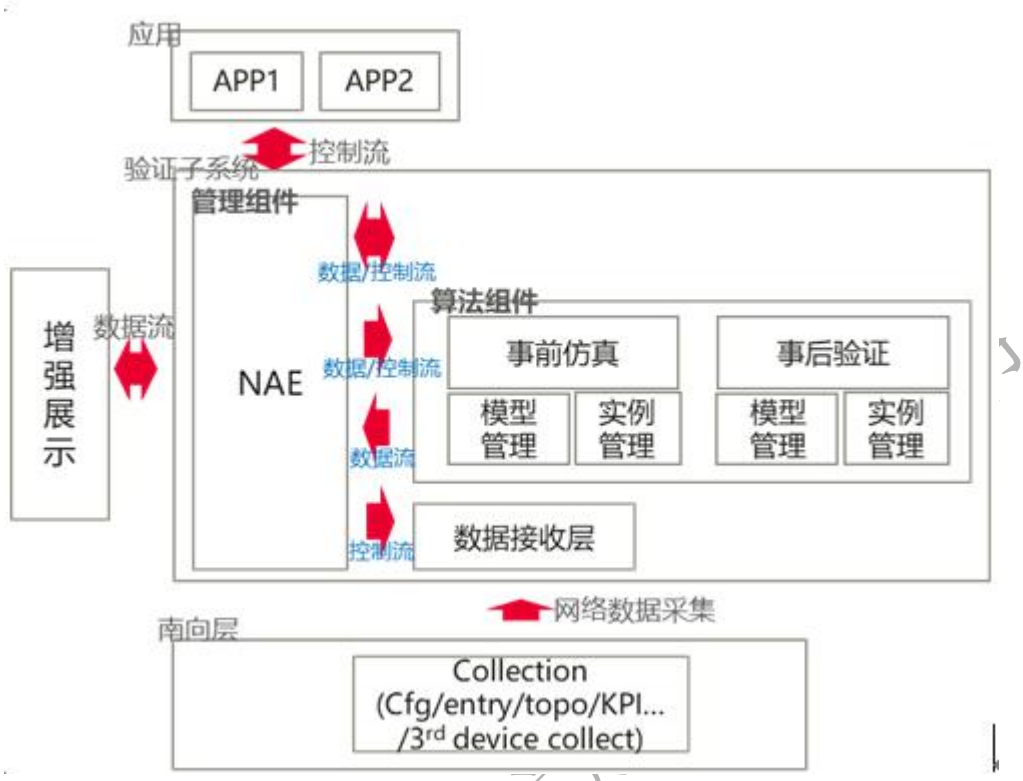


图 3-7 仿真子系统架构

架构上，管理适配组件完成仿真系统的控制流和数据流的外部交互，对内完成与算法组件的交互，包括建模及控制流驱动。算法组件为可替换的架构，跟随业界最先进的算法演进。数据接收层接收采集层上送的采集数据，作为仿真基线的数据建模的数据来源，根据网络变更持续刷新数据。仿真数据结果可以注入增强展示，在网络数字化中呈现，直观可视。

3.4 网络变更推演技术

3.4.1 概述

网络变更推演的核心是“what-If”思想。其基于一定的假设来

第五届未来网络发

考虑如果发生了会产生什么情况。网络中，在日常的变更，业务发放中可以复用这个想法去执行预判断，预先判断业务如果下发了，变更如果执行了会有什么结果，对网络的影响如何。因为这是一个模拟发生的事，而非真实发生，所有操作不会影响实际现网的业务数据，从安全面上来说是安全可靠的。

3.4.2 关键能力

网络变更推演，针对物理网络的变更进行推演，预先返回变更的影响性分析，给客户真实实施前的指导建议。网络变更推演使用数字孪生，仿真平台技术实现，架构实现如下图所示。

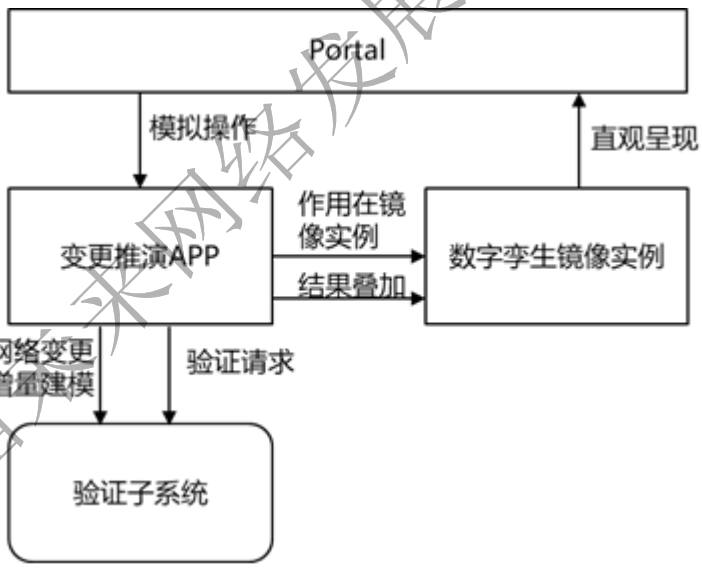


图 3-8 网络变更推演实现架构

逻辑处理流程如下：

- 变更推演接收网络变更的逻辑操作处理，同步会通知数字孪生创建一个镜像实例，并根据变更改变镜像实例中的网络，客户直观呈现感知那些变更。

第五届未来网络发展大会白皮书

- 变更推演通知验证子系统增量建立新网络模型，便于应对后续的验证请求；验证子系统增量对网络建模。
- 变更推演基于变更，按客户的主要验证诉求调用验证子系统的平台化接口去执行仿真验证，并接收验证结果。
- 变更推演接收结果后将结果叠加到数字孪生镜像实例中，直观呈现，客户直接感知变更分析影响报告

3.5 意图管理和回滚技术

3.5.1 概述

客户的抽象网络意图输入，对于系统的一个必然要求就是能基于输入意图的管理和追溯。管理是为了直观呈现对应的意图操作的状态和数据，比如部署情况，具体的业务详细信息等，方便客户运维；同时，提供追溯能力，客户所有的网络意图业务操作都需要记录操作员，操作时间，操作结果和具体操作内容，操作报告等信息，方便客户事后追溯历史记录。

回滚的技术是一种高级能力，即针对客户部署的单次意图，一键回滚，在业务不需要执行或者业务下发有问题时能快速回退，做到快速回收业务或者尽快恢复业务的目的。

管理和回滚两者的结合从体验上能更好的支撑客户操作系统，基于管理的数据呈现历史追溯，并可基于操作记录一键回滚，同时也能查看每次操作的具体业务数据，提供更方便的用户管理体验。

第五届未来网络发展大会白皮书

3.5.2 关键能力

意图管理和回滚在体验上融合，系统实现上也采用了两个关键技术来支撑管理和回滚框架能力实现：业务的注册机制和数据/操作的存储管理，如下图所示。

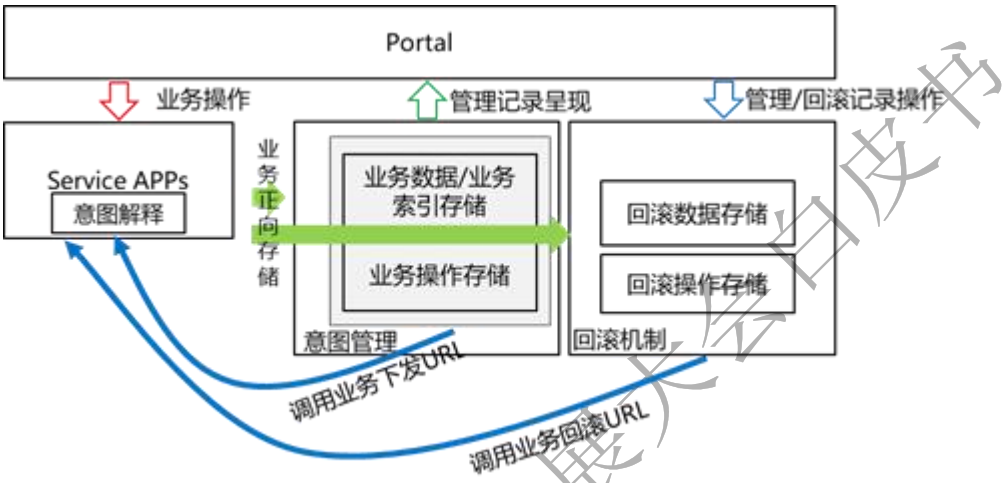


图 3-9 业务的注册机制和数据/操作的存储管理示意图

框架支持所有业务的处理一致性，且框架不知道业务的具体数据信息，因此提供注册能力，业务 APP 将业务数据、执行 URL 等对应注册到意图管理和回滚机制中。界面融合意图管理和回滚机制的能力，当界面触发记录查询或者回滚时，调用框架 URL 接口处理，框架调用对应业务操作的对应执行 URL，把数据同步传递给各业务执行。业务负责具体 URL 的执行处理，整体完成融合体验能力。

3.6 智能搜索技术

3.6.1 概述

搜索的目的在于快速查询符合客户预期搜索对象的结果，控制器

第五届未来网络发展大会白皮书

以往的搜索能力针对不同的业务提供搜索，相对固化，存在如下缺点：

- 控制菜单多，层次深，查找部署业务繁琐。
- 资源种类多，数据量大，入口也众多，查找业务资源需要到不同的入口去查找，往往一个问题需要跳转 3、4 个界面入口查询数据帮助。
- 业务信息需要逐层下钻查看，关键信息无法一眼纵览。
- 搜索仍然是传统的搜索能力，需要基于搜索的数据的类型选择区分才能进行。
- 业务资源众多，各自独立需求开发，没有统一的搜索快速开发方式支撑业务的快速搜索能力开发。

基于上诉的痛点，控制器引入了搜索框架，提供类 Google 搜索体验，统一搜索入口，带来了如下好处：

- 统一搜索入口，客户一个入口查询信息，多维度展示，系统支持搜索结果推荐适配。
- 统一的搜索开发框架，各资源聚合，业务不需要关心搜索实现细节，不需要代码处理这方面能力。
- 精细和模糊搜索统一体验，业务不关心实现细节，有搜索框架支持。
- 后续可支持业务全景 360 可视，一次搜索业务全景结果可见。

数据中心自动驾驶网络系统智能搜索提供如下能力：

- 统一搜索入口
- 搜索联想

第五届未来网络发展大会白皮书

- 搜索历史记录提示，智能匹配
- 搜索结果实时显示，关键词高亮
- 搜索分类展示
- 搜索结果收藏
- 链接和资源表项搜索支持
- 搜索结果智能推荐
- 搜索结果预览
- 快速搜索开发框架

3.6.2 关键技术

搜索引擎使用业界通用的 ElasticSearch，集成到控制器中，作为中间模块，负责呈上启下，整体架构如下图所示。

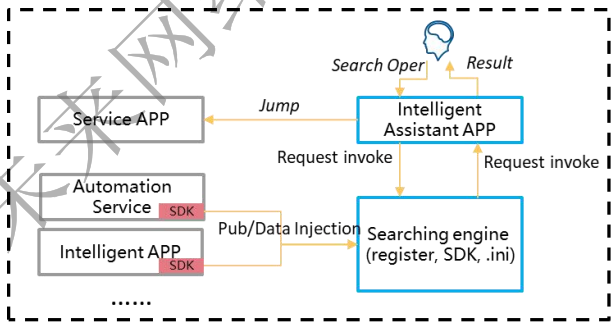


图 3-10 搜索引擎架构

数据中心自动驾驶网络系统对外部的交互体验集中在智能助手小机器人，完成与客户的交互，搜索的整体入口被放置在这里，输入得到客户的请求后，会通过内部接口调用搜索引擎，基于搜索引擎的数据返回。

搜索引擎提供 SDK（Software Development Kit，软件开发工具

第五届未来网络发展大会白皮书

包）和注册，配置机制，对于其他服务业务通过 SDK，注册等机制将业务数据发布到搜索引擎，通过 ini 配置文件的简单设置，能快速完成搜索键值及其他信息设置，非编码方式完成搜索匹配。

第五届未来网络发展大会白皮书

四、数据中心自动驾驶网络优秀实践

我们从数据中心网络 Day 0 ~Day N 全生命周期各个阶段展开，对华为数据中心自动驾驶网络解决方案进行了全面测试。下面附上本次测试的相关信息，以供评估数据中心自动驾驶网络能力参考。

4.1 测试拓扑

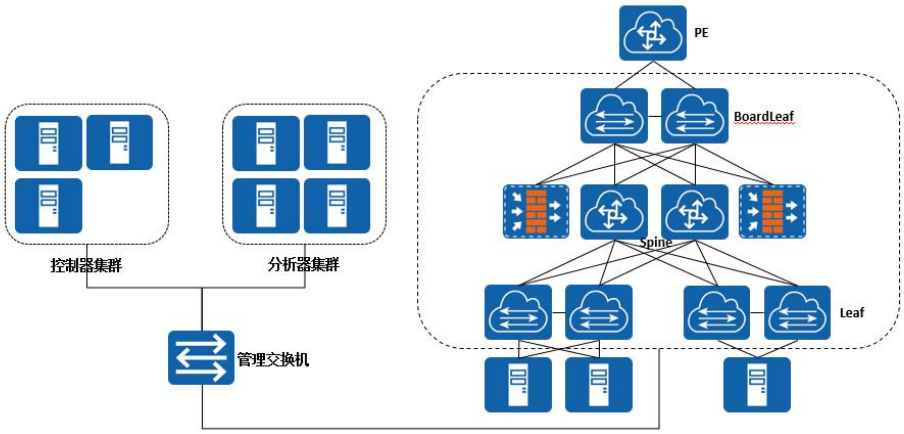


图 4-1 华为数据中心自动驾驶网络测试拓扑

4.2 测试物料

表 4-1 测试物料列表

设备角色	设备型号	规格	数量
Spine&BorderLeaf	CE8861-4C-EI	CE8861-4C-EI 主机(4 子卡槽位,2*交流电源,端口侧进风),CE8860:8 端口 100GE QSFP28 接口卡*1,	2

白皮书 第五届本

设备角色	设备型号	规格	数量
ServerLeaf-1	CE8861-4C-EI	CE8861-4C-EI 主机(4 子卡槽位,2*交流电源,端口侧进风),CE8860:8 端口 100GE QSFP28 接口卡*2,CE8860:24 端口 25GE SFP28,2 端口 100GE QSFP28 接口卡*1	2
ServerLeaf-2	CE8861-4C-EI	CE8861-4C-EI 主机(4 子卡槽位,2*交流电源,端口侧进风),CE8860:8 端口 100GE QSFP28 接口卡*1,CE8860:24 端口 25GE SFP28,2 端口 100GE QSFP28 接口卡*1	2
FW	USG6655E	USG6655E 交流主机(16*GE RJ45 + 12*10GE SFP+ + 2*40GE QSFP+,32G 内存,2 交流电源,含 SSL VPN 100 用户), 固态硬盘-240GB-SATA 6Gb/s-读取密集型-2.5 英寸	1
管理交换机	S5731	S5731-H48T4XC(48 个 10/100/1000BASE-T 以太网端口,4 个万兆 SFP+,单子卡槽位,不含电源)	1
控制器集群	iMaster NCE-Fabric 部署在 2288X V5 服务器上	2288X V5 128G 配置(2*Xeon Gold 5218-16Core/2.3GHz CPU,4*32G 内存,4*1200GB SAS HDD,9460-8i(2G	3

第五届未来网络发展大会白皮书

设备角色	设备型号	规格	数量
		cache)Raid 卡+超级电容,2*4GE+2*2 10GE 光口,2*900W AC)	
分析器集群	iMaster NCE-FabricInsight 部署在 2288X V5 服务器上	2*16Core/2.3GHz CPU,8*32G 内存,8*1200GB SAS HDD,9460-8i(2G cache)Raid 卡+超级电容,2*4*GE+3*2*10GE,2*900W AC	3
	iMaster NCE-FabricInsight 采集器部署 2288X V5 服务器上	2*16Core/2.3GHz CPU,8*32G 内存,8*1200GB SAS HDD,9460-8i(2G cache)Raid 卡+超级电容,2*4*GE+3*2*10GE,2*900W AC	1

第五届未来网络发展大会白皮书

4.3 测试结论

我们对华为数据中心自动驾驶网络解决方案从 Day 0~ Day N 全生命周期四个维度进行了测试：

- DAY0 规划建设：规划建设环节，包括基于业务意图系统自动理解，并转化为网络需求，生成方案，同时完成部署验证等物理网络就绪的能力。
- DAY1 业务部署：业务部署环节，包括意图理解，事前仿真，配置自动化，事后检验等业务部署时网络配置效率及准确性能力。

- DAY2 运维监控：运维监控环节，包括意图监控，问题定界定位、方案生成、评估决策、方案实施、业务验证等智能运维能力。
- DAYN 变更优化：变更优化环节，对网络变更或优化的意图进行方案设计、评估决策，方案实施和验证等，以提高网络运行效率的能力。

结论：从数据中心生命周期 Day0、Day1、Day2、DayN 四个阶段，规划设计、部署开通、业务部署、监控排障、网络变更、优化调参六个大类、通过 70 个测试用例，华为数据中心自动驾驶网络解决方案部署效率和准确性、易用性、可维性、可靠性、网络性能优化等指标达到 L3 级自动驾驶网络标准。

4.4 测试用例列表

表 4-2 测试用例列表

阶段	测试用例	测试结果
Day 0	数据中心网络一体化设计	通过
	组网架构：Border Leaf 与 Spine 合一组网	通过
	组网架构：Border Leaf、Spine、Server Leaf、Service Leaf、DCI Gateway 五合一组网	通过
	组网架构：多组 Border Leaf 组网	通过
	组网架构：Multi-PoD 之间 Spine 背靠背连接组网	通过
Day 1	物理网络带外组网 ZTP	通过
	物理网络开局自动化校验	通过
	应用上线意图翻译，网络自动化开通	通过
	IPv4/IPv6 网络变更仿真	通过
	与 OpenStack 对接	通过

第五届未来网络发展大会白皮书

阶段	测试用例	测试结果
	与 Kubernetes 对接	通过
	创建租户及其 VPC 网络	通过
	配置主机接入 SDN 网络（M-LAG 方式）	通过
	创建逻辑防火墙	通过
	同 Leaf 同网段主机 L2 互通测试	通过
	不同 Leaf 同网段主机 L2 互通测试	通过
	同 Leaf 跨网段的主机之间 L3 互通测试	通过
	不同 Leaf 跨网段的主机之间 L3 互通测试	通过
	VPC 隔离&跨 VPC 互通	通过
	批量业务部署	通过
	业务链	通过
	微分段测试	通过
Day 2	交换机扩容意图翻译和自动化执行	通过
	服务器扩容意图翻译和自动化执行	通过
	全网回滚	通过
	租户回滚	通过
	业务回滚	通过
	交换机资源统计	通过
	物理设备信息	通过
	网元配置	通过
	Underlay 网络检测	通过
	应用拓扑展示	通过
	逻辑拓扑展示	通过
	物理拓扑展示	通过
	设备替换业务影响分析	通过
	设备查找	通过
	告警管理	通过
	多路径检测	通过
	多端口环路检测	通过
	单端口环路检测	通过

第五届未来网络发展大会白皮书

阶段	测试用例	测试结果
	流量统计	通过
	配置审计与数据一致性	通过
	设备 CLI 锁定功能	通过
	单端口故障替换	通过
	日志管理	通过
	控制器节点监控	通过
	设备 CPU/内存指标与异常检测	通过
	单板 CPU/内存/资源表项指标与异常检测	通过
	芯片 TCAM 使用率与异常检测	通过
	接口 KPI 指标与异常检测	通过
	基于队列的微突发检测与拥塞可视	通过
	光链路 KPI 指标	通过
	设备异常日志查看	通过
	网络变更可视	通过
	查看健康度评估并生成报告	通过
	交换机整机故障主动识别和闭环	通过
	疑似二层环路问题主动识别和闭环	通过
	交换机 FIB 表项超阈值问题主动识别	通过
	光链路异常问题主动识别和闭环	通过
	协议维度的问题主动识别	通过
	M-LAG 成双主状态问题主动识别	通过
	Overlay 维度的问题主动识别	通过
	VXLAN 隧道中断问题主动识别	通过
	网络接入侧 IP 地址冲突问题主动识别	通过
Day N	网络可靠性仿真推演	通过
	基于流口流量预测扩容链路	通过
	RoCE 参数调优	通过

第五届未来网络发展大会白皮书

附录 A：术语与缩略语

中文名称	英文缩写	英文全拼
软件定义网络	SDN	Software-defined Networking
数字孪生	DT	Digital Twin
人工智能	AI	Artificial Intelligence
强化学习	RL	Reinforcement Learning
形式化验证	FV	Formal Verification
知识图谱	KG	Knowledge Graph
自动驾驶网络	ADN	Autonomous Driving Network
服务水平协议	SLA	Service Level Agreement
嵌入式 AI	EAI	Embedded Artificial Intelligence
IT 服务管理	ITSM	IT Service Management
配置管理数据库	CMDB	Configuration Management Database

第五届未来网络发展大会白皮书

参考文献

[1] Definition of Digital Twin – Gartner. https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin.

[2] Autonomous Networks: Empowering digital transformation for smart societies and industries, TMF, Release 2, October 2020.

[3] 华为技术有限公司. 华为自动驾驶网络白皮书[R]. 2020.

第五届未来网络发展大会白皮书