

否正确,因此测量策略的验证只需关注测量策略本身是否可以正确实现即可。

- 测量意图的下发与实时反馈:测量策略实时下发到数据平面,收集数据平面的信息进而计算得到网络测量的结果.由于无法验证测量结果的正确性,系统需要自动进行多次测量,自动过滤错误的测量结果,最后将测量的结果反馈给用户。

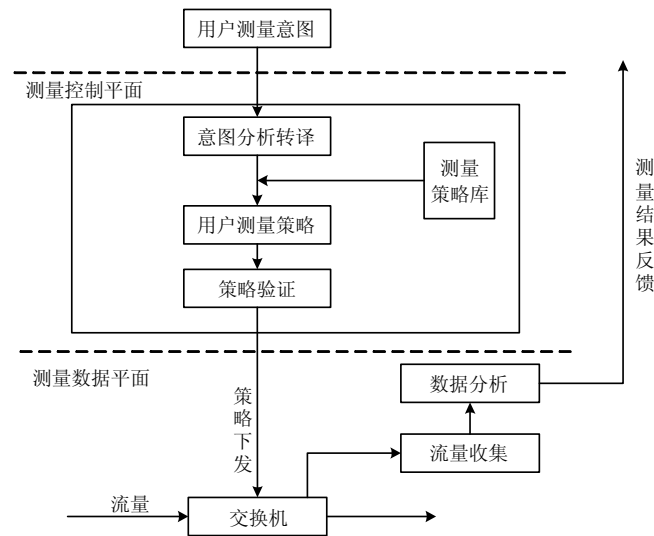


Fig.5 Implementation process of intent driven network measurement

图 5 意图驱动网络测量实现流程

意图驱动网络测量可以应用到诸多方面,例如网络运维:当网络出现故障的时候,需要对网络性能进行测量从而找到故障发生的位置,然而手工部署这些测量任务需要考虑很多因素,耗时较大;而意图驱动网络测量只需要用户输入测量意图,便可综合多方面因素得到最优的网络测量策略,得到网络性能指标,方便用户找到网络故障的发生位置。

3.2 基于IBN的网络业务编排

在运营商网络架构中,网络主要由骨干网、城域网以及数据中心组成,其中,骨干网实现多种网络的互联,同时与国际互联网对接,实现国内国际流量互通.骨干网为多种功能需求进行业务编排,例如为某些企业实现不同区域之间通信的服务保障等.然而,目前大多数的网络业务编排都需要进行人工部署,并且由于骨干网的服务范围大、覆盖范围广、网络拓扑复杂,所以人工部署需要考虑多种问题并且可能需要在多地同时部署,因此运营商级别的网络业务编排通常需要很长的时间.通过将 IBN 中意图的思想引入到运营商网络中,可有效降低业务编排所需的时间.IBN 系统可感知网络的拓扑以及状态信息,因此在进行业务编排时,可以最大程度减少人工的介入,从而提升业务编排的效率.网络管理员进行业务编排时,只需要将用户的需求输入到系统中,系统便可自动将用户需求转译为相关网络配置以及具体的网络性能指标,从而可实现在多地同时部署业务。

以企业 VPN 业务为例,如图 6 所示,基于意图的业务编排的执行过程如下。

- 业务编排意图的获取:当企业用户向运营商提出 VPN 业务开通申请后,运营商需要了解用户的相关需求,例如开通的地点、开通时间的限制以及相关服务质量的要求;之后,运营商即可把这些需求抽象为业务编排意图输入到系统中。
- 业务编排意图的转译:业务编排意图将用户的需求转译为相关的网络配置策略,并将各种服务质量需求转译为具体的网络性能指标,例如带宽、时延、抖动等;之后分析采用的 VPN 接入方式,如 MPLS 或 SD-WAN 等;最后形成一条完备的 VPN 部署策略。
- 业务编排策略的验证:业务编排策略的验证是基于意图的业务编排中最重要的一步,它可以事先验证

业务是否符合用户预期,如果验证出现错误可能会带来巨大的损失.可以采用形式化的验证方法来验证策略是否可以正确实现,除此以外,还需要考虑资源可用性问题.

- 业务编排意图的下发与实时反馈:由于 VPN 业务的编排涉及多地同时进行,因此在进行相关网络配置、资源分配时还要实时监测网络的状态,确保业务的编排满足用户的意图需求;并且实时向上反馈运行情况,当出现与意图不一致的情况,需要及时对业务编排策略进行调整,保证意图实现的一致性.

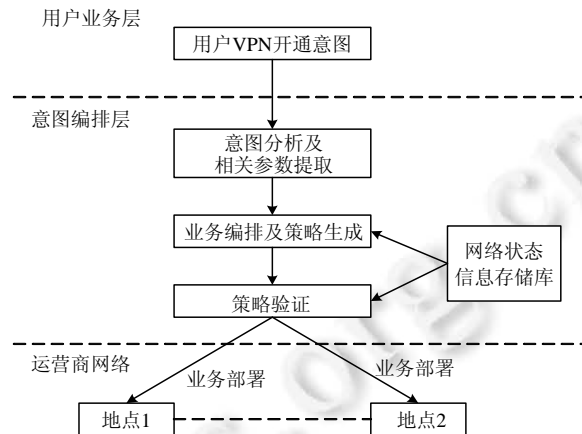


Fig.6 Implementation process of intent driven VPN deployment

图 6 意图驱动 VPN 部署实现流程

在运营商网络环境下进行基于意图的业务编排,可极大地提升工作效率、减少业务开通的时间.但在运营商层次实现 IBN 的落地还需要大量深入的研究,才能确保运营商免受相关风险的影响.

IBN 将不断为未来网络的发展助力:IBN 可在工业互联网领域大有作为;IBN 可以实现工厂的智能组网,极大地减少人工操作可能带来的风险;另外,IBN 可以实时监测工厂网络状态,当网络出现异常时,可以迅速做出响应,减少工业生产损失. IBN 也可应用于数据中心网络,数据中心网络链路数量多、网络拓扑复杂,IBN 可实现数据中心网络的智能管理和监测.当数据中心网络出现故障时,IBN 可以迅速定位网络故障,降低网络维护成本. IBN 凭借其灵活、智能、自动化的特点,在 5G、车联网、卫星网络等多个领域都将发挥重要作用.

4 研究展望

IBN 是一种新的理念,并不是一种新的技术,IBN 的实现综合了多种现有的技术,并基于 IBN 的性质开发了许多新技术.目前,IBN 已经得到了广泛的关注,学术界和产业界都已经开始对 IBN 进行深入研究与应用探索.然而,IBN 在迅速发展的同时也面临着一些挑战.

(1) 意图转译问题的研究

IBN 能实现网络任务自动化部署的一个关键步骤就是从意图到网络策略的转译工作,用户意图显示地或者隐式地表明了用户的需求,因此意图的转译工作是确保 IBN 正确实现的关键一步.然而,目前意图的转译工作还没有统一的实现方法,且现有方法大多停留在实验阶段.如第 2.2 节所述,对于意图的转译工作,不同的方法有各自的优缺点,缺少一个较为完善的解决方案.此外,对于用户意图的分析也是一个亟待解决的问题,目前的研究往往局限于一些简单的、特定环境下的意图描述或者策略描述,这使得一些研究工作往往忽略了意图的分析工作.意图的分析工作主要使用自然语言处理的方法,但是目前自然语言处理方法对于语义挖掘等任务的处理能力有限,因此要想完美实现意图的转译工作,对于意图的语义挖掘等问题还需要进一步的研究与探索.

(2) 策略验证问题的研究

IBN 实现网络任务自动化部署的另一个关键步骤就是策略的验证问题,策略的验证关系到网络的正常运行.在 IBN 的整个运行闭环中,如果一条策略出现错误,可能会导致一连串其他错误的出现,甚至导致网络停止运

行.策略的验证工作是 IBN 实现不可缺少的一步,对于策略的验证的内容要有一个全面的考虑,除了上面提到过的资源的可用性验证、策略的冲突验证以及策略的正确性验证外,还要考虑其他需要验证的方面,例如对于网络策略与用户意图一致性的验证等,这是今后需要认真探究的内容.此外,策略的验证方法也是另一个需要继续深入研究的内容,例如上面提到过的形式化验证的方法,虽然它可以很好地对策略的正确性进行验证,但是它存在着状态空间爆炸这一严重的问题,这会导致系统无法正确求解或者无法求解.此外,其他的验证方法也有各自的局限性,因此需要继续对验证方法进行研究.并且还要考虑验证的效率问题,策略的验证工作一定要高效并且全面,需要把所有的验证方法集成到一个模块之中.因此,验证方法的集成也是一个亟待解决的问题.

(3) IBN 部署问题的研究

虽然目前大多数对于 IBN 的研究都处于理论与实验阶段,但是鉴于 IBN 能够极大地提高网络管理与维护的效率,IBN 的大规模部署或许会逐步开展.不过,IBN 的部署会引起它与传统网络的并存问题.因为 IBN 中存在与传统网络不兼容的协议和网络设备,会带来一些性能问题,例如网络的可靠性、路由问题等.文献[9]借鉴 SDN 中采用增量部署的方式,可采用增量部署或者部分部署的方式来逐渐部署 IBN.此外,还要考虑 IBN 的可拓展性,因为在 IBN 的逐步部署过程中,IBN 本身也会不断地调整,从而更好地实现用户的意图.因此,IBN 的可拓展性也需要进一步的研究.

(4) IBN 跨域通信问题的研究

目前,大多数对于 IBN 的研究局限于在一个单独的网络域内,但是却很少有人考虑跨域通信的问题^[64].IBN 的实现很大程度上依赖于对于全局网络信息的感知,意图转译工作需要参考全局网络信息,策略的验证工作更是基于全局的网络信息进行的.然而在实际中,不同网络域的域内信息由于利益关系、隐私保护等因素无法对外公布,因此在一个域内可能无法获取另一个域内的网络信息,这会导致意图的转译工作和策略的验证工作无法正常运行.因此,IBN 中跨域通信、多域通信的问题是 IBN 落地无法避免的,这需要今后进一步的研究.

(5) IBN 全局优化问题的研究

IBN 的实现是一个完全自动化的过程,因此在整个系统的运行期间需要考虑优化问题,从而提高系统的运行效率.目前,虽然 IBN 实现过程中的各个步骤都有一定的方法,但是还没有工作给出一个统一的实现架构,今后的工作需要对协调各个模块的接口,协调优化每一个实现模块.此外,系统的实时性以及及时反馈也是系统优化的一个部分,为使 IBN 灵活运转,那么就on需要不断实时地收集网络状态信息,并及时验证网络策略,并及时给出反馈.因此,IBN 的全局优化工作是一个值得讨论的问题.

(6) IBN 安全问题的研究

网络安全问题随着网络的发展一直存在,因此 IBN 中的安全问题也是一个值得思考的内容. IBN 有别于传统的网络,它可以根据用户的意图自动化地部署网络策略,然而这种自动化的部署带来了新的安全问题:首先,用户与网络之间的信任关系是一个值得研究的问题,用户是否可以完全信任网络不会受到恶意应用的干扰从而实现自己的意图;其次,隐私问题也值得注意,IBN 的自动化意味着需要向外界公布一些自己的内部信息,因此隐私保护问题值得研究;最后,IBN 虽然为网络的管理带来了自动化,但是这同样也带来了网络的脆弱性,恶意应用可以攻击 IBN 的转译模块,使得 IBN 无法正常运转.因此,对于 IBN 的安全的研究,将确保 IBN 可以平稳安全的发展.

5 总 结

IBN 是当前网络领域热门技术之一,之所以得到广泛的关注,在于它可以根据用户意图自动实现网络业务编排,这是其他类型网络无法比拟的.首先,网络业务自动化部署将网络管理员从繁重的网络管理工作中解放出来,加速业务和应用的部署和更新;其次,网络策略的自动化验证确保网络转发行为与用户需求一致,无须用户多次参与业务部署;最后,IBN 根据当前网络情况自动优化网络配置,提升网络性能.鉴于 IBN 的发展潜力,学术界和产业界已经深入研究其关键技术,并将 IBN 应用到网络测量、网络业务编排等领域.然而,IBN 要想真正地落地还需要克服意图语义挖掘、策略验证和跨域通信等挑战.因此,要发挥 IBN 的优势,不仅要不断改进现有技

术,还要开发新技术,完善 IBN 的优化闭环.只有这样,IBN 才会更好地服务网络智能管理,最终实现网络自治.

References:

- [1] Li Y, Yin X, Wang Z, *et al.* A survey on network verification and testing with formal methods: approaches and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018,21(1):940–969.
- [2] Veriflow. Network complexity, change, and human factors are failing the business. 2019. <https://www.veriflow.net/survey/>
- [3] Muuss M. The story of the ping program. 1983. http://mirrors.pdp-11.ru/_vax/www.bandwidthco.com/whitepapers/netforensics/icmp/The%20Story%20of%20the%20PING%20Program.pdf
- [4] Traceroute. 2019. <ftp://ftp.ee.lbl.gov/traceroute.tar.gz>
- [5] McKeown N. Software-defined networking. In: Proc. of the INFOCOM Key Note. 2009. <http://infocom2009.ieee-infocom.org/technicalProgram.htm>
- [6] Feamster N, Rexford J, Zegura E. The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014,44(2):87–98.
- [7] Han Y, Li J, Hoang D, *et al.* An intent-based network virtualization platform for SDN. In: Proc. of the Int'l Conf. on Network & Service Management. IEEE, 2017.
- [8] Janz C. Intent NBI-definition and principles. Open Networking Foundation, 2015. https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/TR-523_Intent_Definition_Principles.pdf
- [9] Elkhatib Y, Coulson G, Tyson G. Charting an intent driven network. In: Proc. of the 2017 13th Int'l Conf. on Network and Service Management (CNSM). IEEE Computer Society, 2017.
- [10] Zhang H, Wang Y, Qi X, *et al.* Demo abstract: An intent solver for enabling intent-based SDN. In: Proc. of the 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2017. 968–969.
- [11] Kiran M, Pouyoul E, Mercian A, *et al.* Enabling intent to configure scientific networks for high performance demands. *Future Generation Computer Systems*, 2018,79:205–214.
- [12] Cohen R, Barabash K, Rochwerger B, *et al.* An intent-based approach for network virtualization. In: Proc. of the 2013 IFIP/IEEE Int'l Symp. on Integrated Network Management (IM 2013). IEEE, 2013.
- [13] Intent: Don't tell me what to do (tell me what you want)! 2015. <https://www.sdxcentral.com/articles/contributed/networkintent-summitperspectivedavidlenrow/2015/02/>
- [14] Laliberte B. Towards the Intent Based Network. 2018 (in Chinese with English abstract). https://www.cisco.com/c/m/zh_cn/express/case_center/en/anren008369.html
- [15] Comer D, Rastegarnia A. OSDF: An intent-based software defined network programming framework. In: Proc. of the 2018 IEEE 43rd Conf. on Local Computer Networks (LCN). IEEE, 2018. 527–535.
- [16] Lui W. RFC 8338 Policy-based Management Framework for the Simplified Use of Policy Abstractions (SUPA). feb-2018, 2018.
- [17] Behringer M, Pritikin M, Bjarnason S, *et al.* Autonomic Networking: Definitions and Design Goals. RFC7575, 2015.
- [18] Jiang S, Carpenter B, Behringer M. General Gap Analysis for Autonomic Networking. RFC 7576, 2015.
- [19] Clemm A, Nobre J, Granville L, *et al.* Autonomic Networking Use Case for Distributed Detection of Service Level Agreement (SLA) Violations. RFC 7576, 2015.
- [20] Sourì A, Norouzi M. A state-of-the-art survey on formal verification of the Internet of things applications. *Journal of Service Science Research*, 2019,11(1):47–67.
- [21] McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, Parulkar G, Peterson L, Rexford J, Shenker S, Turner J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008,38(2):69–74. [doi: 10.1145/1355734.1355746]
- [22] Bosshart P, Daly D, Gibb G, *et al.* P4: Programming protocol-independent packet processors. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014,44(3):87–95.
- [23] Opendaylight SDN controller. 2019. <https://www.opendaylight.org/>
- [24] NEMO. Network model. 2019. <http://www.nemo-project.net/>
- [25] Van Deursen A, Klint P. Domain-specific language design requires feature descriptions. *Journal of Computing and Information Technology*, 2002,10(1):1–17.
- [26] 2019. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/dna-center/index.html>

- [27] Pham M, Hoang DB. SDN applications-the intent-based northbound interface realisation for extended applications. In: Proc. of the 2016 IEEE NetSoft Conf. and Workshops (NetSoft). IEEE, 2016. 372–377.
- [28] Koshibe A. Onos intent framework. 2016. <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/Intent+Framework/>
- [29] Sanvito D, Moro D, Gulli M, *et al.* ONOS intent monitor and reroute service: Enabling plug&play routing logic. In: Proc. of the 2018 4th IEEE Conf. on Network Softwarization and Workshops (NetSoft). IEEE, 2018. 272–276.
- [30] Foster N, Harrison R, Freedman MJ, *et al.* Frenetic: A network programming language. ACM Sigplan Notices, 2011,46(9): 279–291.
- [31] Anderson CJ, Foster N, Guha A, *et al.* NetKAT: Semantic foundations for networks. ACM Sigplan Notices, 2014,49(1):113–126.
- [32] Yu Y, Wang ZL, Bi J, Shi XG, Yin, X. Survey on the languages in the northbound interface of software defined networking. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(4):993–1008 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5028.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005028]
- [33] Tian B, Zhang X, Zhai E, *et al.* Safely and automatically updating in-network ACL configurations with intent language. In: Proc. of the ACM Special Interest Group on Data Communication. ACM, 2019. 214–226.
- [34] Prakash C, Lee J, Turner Y, *et al.* PGA: Using graphs to express and automatically reconcile network policies. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015,45(4):29–42.
- [35] Gruber TR. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993,5(2):199–220.
- [36] Liao B, Gao J. An automatic policy refinement mechanism for policy-driven grid service systems. In: Proc. of the Int'l Conf. on Grid and Cooperative Computing. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 166–171.
- [37] Riftadi M, Kuipers F. P4/O: Intent-based networking with P4. In: Proc. of the 2019 IEEE Conf. on Network Softwarization (NetSoft). IEEE, 2019. 438–443.
- [38] Beigi MS, Calo S, Verma D. Policy transformation techniques in policy-based systems management. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY 2004). IEEE, 2004. 13–22.
- [39] Wang P, Huang L, Xu H, *et al.* Rule anomalies detecting and resolving for software defined networks. In: Proc. of the IEEE Global Communications Conf. IEEE, 2016. 1–6.
- [40] Al-Shaer E, Al-Haj S. FlowChecker: Configuration analysis and verification of federated openflow infrastructures. In: Proc. of the ACM Workshop on Assurable and Usable Security Configuration. ACM, 2010. 37–44.
- [41] Khurshid A, Zou X, Zhou W, *et al.* Veriflow: Verifying network-wide invariants in real time. In: Proc. of the 10th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2013). 2013. 15–27.
- [42] Gleirscher M, Marmsoler D. Formal methods: Oversold? Underused? A survey. arXiv preprint arXiv:1812.08815, 2018.
- [43] Legay A, Delahaye B, Bensalem S. Statistical model checking: An overview. In: Proc. of the Int'l Conf. on Runtime Verification. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 122–135.
- [44] Kovács L, Voronkov A. First-Order theorem proving and Vampire. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer Aided Verification. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 1–35.
- [45] Cadar C, Sen K. Symbolic execution for software testing: Three decades later. Communications of the ACM, 2013,56(2):82–90.
- [46] Armand M, Faure G, Grégoire B, *et al.* A modular integration of SAT/SMT solvers to Coq through proof witnesses. In: Proc. of the Int'l Conf. on Certified Programs and Proofs. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 135–150.
- [47] Huang SS, Green TJ, Loo BT. Datalog and emerging applications: An interactive tutorial. In: Proc. of the ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data (SIGMOD 2011). Athens, 2011. 1213–1216.
- [48] Jackson D. Software Abstractions—Logic, Language, and Analysis. MIT Press, 2006.
- [49] Son S, Shin S, Yegneswaran V, *et al.* Model checking invariant security properties in OpenFlow. In: Proc. of the 2013 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). IEEE, 2013. 1974–1979.
- [50] Lewis B, Fawcett L, Broadbent M, *et al.* Using P4 to enable scalable intents in software defined networks. In: Proc. of the 2018 IEEE 26th Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2018. 442–443.
- [51] Gupta A, Harrison R, Canini M, *et al.* Sonata: Query-driven streaming network telemetry. In: Proc. of the 2018 Conf. of the ACM Special Interest Group on Data Communication. ACM, 2018. 357–371.
- [52] Laffranchini P, Rodrigues L, Canini M, *et al.* Measurements as first-class artifacts. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019—IEEE Conf. on Computer Communications. IEEE, 2019
- [53] Beckett R, Mahajan R, Milstein TD, Padhye J, Walker D. Don't mind the gap: Bridging network-wide objectives and device-level configurations. In: Proc. of the ACM SIGCOMM (SIGCOMM). 2016.

- [54] Beckett R, Mahajan R, Milstein TD, Padhye J, Walker D. Network configuration synthesis with abstract topologies. In: Proc. of the 38th ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation (PLDI). 2017.
- [55] El-Hassany A, Tsankov P, Vanbever L, Vechev MT. Network-wide configuration synthesis. In: Proc. of the 29th Int'l Conf. on Computer Aided Verification (CAV). 2017.
- [56] El-Hassany A, Tsankov P, Vanbever L, Vechev MT. NetComplete: Practical network-wide configuration synthesis with autocompletion. In: Proc. of the 15th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI). 2018.
- [57] Estan C, Keys K, Moore D, *et al.* Building a better NetFlow. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004,34(4): 245–256.
- [58] Phaal P, Panchen S, McKee N. InMon corporation's sFlow: A method for monitoring traffic in switched and routed networks. 2001. <https://www.hjp.at/doc/rfc/rfc3176.html>
- [59] Pan T, Song E, Bian Z, *et al.* INT-path: Towards optimal path planning for in-band network-wide telemetry. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019—IEEE Conf. on Computer Communications. IEEE, 2019. 487–495.
- [60] Zhang P, Zhang C, Hu C. Fast data plane testing for software-defined networks with RuleChecker. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2018,27(1):173–186.
- [61] Stoescu R, Popovici M, Negreanu L, Raiciu C. Symnet: Scalable symbolic execution for modern networks. In: Proc. of the ACM SIGCOMM (SIGCOMM). 2016.
- [62] Beckett R, Gupta A, Mahajan R, Walker D. A general approach to network configuration verification. In: Proc. of the ACM SIGCOMM (SIGCOMM). 2017.
- [63] Hu ZG, Tian CQ, Du L, Guan XQ, Cao F. Current research and future perspective on IP network performance measurement. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017,28(1):105–134 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5127.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005127]
- [64] Arezoumand S, Dzevaroska K, Bannazadeh H, *et al.* MD-IDN: Multi-domain intent-driven networking in software-defined infrastructures. In: Proc. of the 2017 13th Int'l Conf. on Network and Service Management (CNSM). IEEE, 2017. 1–7.

附中文参考文献:

- [14] Laliberte B. 向基于意图的网络迈进. 2018. https://www.cisco.com/c/m/zh_cn/express/case_center/en/anren008369.html
- [32] 于洋,王之梁,毕军,施新刚,尹霞. 软件定义网络中北向接口语言综述. 软件学报, 2016,27(4):993–1008. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5028.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005028]
- [63] 胡治国,田春岐,杜亮,关晓蕾,曹峰. IP 网络性能测量研究现状和进展. 软件学报, 2017,28(1):105–134. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5127.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005127]



李福亮(1986—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为网络智能运维,下一代互联网.



刘树成(1983—),男,博士,高级工程师,主要研究领域为网络架构,IPv6,SDN,意图网络,网络智能化,物联网.



范广宇(1995—),男,硕士生,主要研究领域为意图网络,网络测量.



谢坤(1984—),男,博士,讲师,主要研究领域为下一代互联网,网络资源智能规划,数据中心网络.



王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为互联网,云计算,网络空间安全.



孙琼(1982—),女,博士,高工,主要研究领域为下一代互联网,SDN 网络.