

下一代互联网绿色节能解决方案

Green Energy-saving Solutions for Next Generation Internet

罗家尧,方道铿,余金波,古渊桦,黄家兆(中国联通广东分公司,广东 广州 510000)

Luo Jiayao, Fang Qiukeng, Yu Jinbo, Gu Yuanhua, Huang Jiazhao (China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou 510000, China)

摘要:

随着5G网络的迅猛发展,运营商网络能耗也随之快速增长,如何在保障网络服务质量前提下降低网络功耗和运营成本,成为运营商亟需解决的问题。分析了运营商2代网络设备的能耗和流量带宽的发展趋势,从单机节能、管理节能、网络架构节能3个维度探讨了下一代互联网降低能耗的绿色节能方案,并在运营商网络中对单机节能方案做了试点测试。

关键词:

绿色节能;单机节能;管理节能;网络架构节能

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.04.007

文章编号:1007-3043(2024)04-0039-07

中图分类号:TP393.4

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the rapid development of 5G networks, the network energy consumption of operators has also increased rapidly. How to reduce network power consumption and operating costs while ensuring network service quality has become an urgent problem that operators need to solve. This paper analyzes the development trend of the energy consumption and traffic bandwidth of the network equipment of the two generations of operators, discusses the green energy saving scheme of the next generation Internet to reduce energy consumption from the three dimensions of single machine energy saving, management energy saving, and network architecture energy saving, and conducts pilot tests on the single machine energy saving scheme in the operator network.

Keywords:

Green and energy-saving; Single machine energy saving; Management energy saving; Network architecture energy saving

引用格式:罗家尧,方道铿,余金波,等. 下一代互联网绿色节能解决方案[J]. 邮电设计技术,2024(4):39-45.

1 概述

近年来,随着5G网络的迅速发展,运营商网络的能耗也快速增长。据统计,2019年我国5G基站耗电量约占全社会用电量的0.05%,到2023年,5G基站耗电量占全社会用电量的1.3%。能耗成本也同步快速增长,目前约占运营商非业务类成本的1/3。功耗的倍增给运营商带来了新的挑战,一方面面临电源动力基础设施规模更新的投资成本(CAPEX)压力,另一方面

也面临着运营成本(OPEX)大幅提升的压力。如何在保障网络服务质量的前提下降低网络能耗,降低由此带来的投资成本和运营成本,成为运营商亟需解决的问题。

2 网络能耗分析

2.1 能耗关键指标定义

分析网络能耗,制订网络能耗的压降方案,不能仅观察设备本身能耗水平的变化,还需要考虑重新定义如下3个指标作为下一代网络能耗的关键指标。

a) 单设备每Gb带宽能耗。单设备总功耗除以业

收稿日期:2024-03-12

务板卡总带宽折合Gb数可得出每Gb带宽下设备的功耗。在同类可比的设备上,这个指标主要考察设备本身能耗效率,与设备设计能力、芯片能力、集成能力相关,与设备实际承载业务负荷无关。

b) 单设备每Gb流量能耗。设备承载了业务流量后,单设备总功耗除以实际流量流速折合Gb数可得出每Gb流量下设备的功耗。在同类可比的设备上,这个指标除了与每Gb带宽能耗相关外,还受到设备的带宽利用率、管理节能能力等因素的影响。

c) 端到端每Gb流量能耗。在同类可比的网络中,所有网络设备总功耗除以从网络入口到网络出口的总业务流量流速折合Gb数可得出端到端每Gb流量能耗。这个指标除了与单节点每Gb流量能耗相关外,还受网络架构、流量路径合理性等因素影响,与运营商网络规划能力和运营能力直接相关。

2.2 现网能耗分析

按照单设备每Gb带宽能耗指标的定义,选择IPRAN和智能城域网2代路由器设备进行能耗分析。因为汇聚设备与接入设备从设备形态、能力和应用场景上差异较大,汇聚设备一般采用框式设备,带宽大、路由能力强,接入设备一般采用盒式设备,设计比较紧凑,因此在分析中需要分别进行对比。

2.2.1 IPRAN设备能耗

统计现网2个IPRAN厂家同层级设备相同板卡配置下的功耗,结果如表1所示。

2.2.2 智能城域网设备能耗

统计现网智能城域网2个厂家同层级设备相同板卡配置下的功耗,结果如表2所示。

2.2.3 设备能耗对比分析

汇总IPRAN和智能城域网功耗2张表,并合入设备端口利用率和峰值流量速率,可计算得出IPRAN和智能城域网设备功耗对比(见表3)。

从表3可以看出,汇聚设备从IPRAN演进到智能城域网后,虽然总体功耗上升明显,但单设备每Gb带宽能耗下降也较为明显,说明设备能耗效率有一定提升。而接入设备演进后,总体功耗上升明显,但单设备每Gb带宽能耗下降并不明显,设备能耗效率提升不明显,与每代产品10倍的带宽增长,能耗翻番的愿景差距较大。考虑到接入设备部署量巨大,三大运营商在网设备数量超过百万台,后续接入设备能耗效率进一步提升的需求和空间很大,设备商应关注并完善相应解决方案。

表1 2个IPRAN厂家同板卡配置设备功耗对比

设备层级	厂家	配置		总功耗/W
		板卡类型	数量	
汇聚层	厂家A	主控板	2	1 460.00
		2路10GE光接口板+32路GE光接口板	2	
		交换板	1	
	厂家B	风扇模块	2	1 242.57
		主控板	2	
		2路10GE光接口板+20路GE光接口板	2	
接入层	厂家A	交换板	1	107.40
		风扇模块	2	
		8路GE光接口板	2	
		1路10GE光接口板	2	
	厂家B	主控板	2	123.30
		8路GE光接口板	2	
		1路10GE光接口板	2	
		风扇模块	1	

表2 智能城域网2个厂家同板卡配置设备功耗对比

设备层级	厂家	配置		总功耗/W
		板卡类型	数量	
汇聚层	厂家A	主控板	2	3 236.2
		8路50GE光接口板	2	
		40路10GE光接口板	1	
		交换板	2	
		风扇模块	3	
	厂家B	主控板	2	3 412.30
		8路50GE光接口板	2	
		40路10GE光接口板	1	
接入层	厂家A	交换板	2	311.80
		风扇模块	3	
		10路10GE光接口板	2	
		8路GE光接口板	1	
	厂家B	风扇模块	1	308.42
		主控板	2	
		10路10GE光接口板	2	
		8路GE光接口板	1	

进一步结合现网的利用率和流量情况分析单设备每Gb流量能耗,结果如表4所示。

从表4可以看出,由于智能城域网建网时间短,端口利用率和带宽利用率较低,当前折算单设备每Gb流

表3 IPRAN 和智能城域网设备功耗对比

层级	网络	厂家	总带宽/GB	总功耗/W	单设备每Gb带宽能耗/W
汇聚	IPRAN	厂家A	104	1 460.00	14.038
		厂家B	80	1 242.57	15.532
	智能城域网	厂家A	800	3 236.20	4.045
		厂家B	800	3 412.30	4.265
接入	IPRAN	厂家A	36	107.40	2.983
		厂家B	36	123.30	3.425
	智能城域网	厂家A	108	311.80	2.887
		厂家B	108	308.42	2.856

表4 结合现网利用率和流量情况分析单设备每Gb流量能耗

层级	网络	厂家	总功耗/W	峰值流量速率/(GB/s)	端口利用率/%	单设备每Gb流量能耗/W
汇聚	IPRAN	厂家A	1 460.00	97.92	22.05	14.910
		厂家B	1 242.57	92.16	32.12	13.483
	智能城域网	厂家A	3 236.20	52.17	22.91	62.034
		厂家B	3 412.30	47.11	34.22	72.433
接入	IPRAN	厂家A	107.40	10.08	50.01	10.655
		厂家B	123.30	12.52	41.33	9.848
	智能城域网	厂家A	311.80	4.03	14.28	77.370
		厂家B	308.42	5.02	18.25	61.438

量能耗远高于原有 IPRAN 设备。由于设备从投产达到利用率峰值之间有较长周期,期间设备存在一个低负荷运行的时间段,如果能够在该时间段根据设备实际负荷和利用率实施相应的管理节能手段,也能够节约大量的能耗投入。某设备商曾经提出过“Obitowatt”的口号,是对这个场景的一个较好的愿景规划。

3 网络节能方案

网络节能可以划分为3个层次,第1个层次是设备单机节能,主要通过分析设备能耗组成,通过硬件设计和软件设计实现低能耗运行,一般由设备商实现;第2个层次是设备管理节能,结合设备负荷监测进行相应节能干预,由设备商和运营商共同实现;第3个层次是网络架构节能,通过架构设计优化调整,降低端到端能耗,主要由运营商来实现。

3.1 单机节能方案

3.1.1 能耗组成

路由器设备耗能部件主要是线路板、交换网板、风扇模块、电源模块和主控板,其中占据大比例的是线路板,约占一台设备耗能部件的76%。主控板功耗

最小,设备必备基本配置,很难再进一步节能。电源模块可根据设备对动力条件的要求按需配置,功耗跟主要耗能部件强相关,可考虑进一步提升电源转换效率。风扇模块的功耗跟转速成立方的关系,且和设备所处的环境强相关。

表5所示为智能城域网一台核心设备的板卡实时功耗,可直观看出线路板在整机功耗的比重。路由器节能基本策略是以线路板和交换网板为设计重点,从单板、芯片、链路到功能模块的层层节能。

表5 智能城域网某台核心设备板卡实时功耗

时隙	PCB板卡	电压/V	电流/A	功耗/W	最大功耗/W
1	GPL4TA	53.31	17.41	928.20	1 241.00
2	GPL4TA	53.26	17.40	927.00	1 241.00
3	GPL4TA	53.42	17.77	949.30	1 241.00
4	GPL2TA	53.32	10.36	552.60	790.00
5	GPL2TA	53.31	10.98	585.40	790.00
9	GPMPUB	12.12	7.22	87.60	181.00
10	GPMPUB	12.09	7.55	91.30	181.00
SFU1	GPSFU08FB	12.10	9.30	112.60	225.00
SFU2	GPSFU08FB	12.11	9.27	112.30	225.00
SFU3	GPSFU08FB	12.10	9.50	115.00	225.00
SFU4	GPSFU08FB	12.09	9.34	113.00	225.00
SFU5	GPSFU08FB	12.09	9.28	112.30	225.00
SFU6	GPSFU08FB	12.10	9.52	115.30	225.00
SFU7	GPSFU08FB	12.08	9.27	112.00	225.00
SFU8	GPSFU08FB	12.10	9.42	114.00	225.00
FAN1	FAN	-	-	-	2 000.00
FAN2	FAN	-	-	-	2 000.00
FAN3	FAN	-	-	-	2 000.00

3.1.2 设备节能模式

设备节能是指在满足设备业务功能要求的前提下,根据不同的节能策略,使单板进入不同的节能状态,达到降低单板运行功耗。根据设备的不同运行情况,选择合适的节能模式,从而降低设备运行的功耗。设备节能模式可分为如下2种。

a) 基本节能模式。它是指设备在运行过程中动态监测各模块的使用状态,关闭默认不需要启用的模块。这些模块与业务实现无关,关闭这些模块不影响设备的正常运行。该模式是设备默认的节能模式,在网络核心或业务繁忙等场景使用。

b) 深度节能模式。在基本节能模式的基础上,对未用器件进行关断、休眠操作,这种模式下未用端口

不支持配置变更与统计状态查询。在深度节能模式的基础上,还可以配置设备温备份。

3.1.3 框式设备接口板Slice节能方案

Slice节能是在设备运行过程中动态监测各模块的使用状态,对长时间不使用的模块(包括转发模块、子卡端口及配套外围模块)进行下电、降频、休眠等节能操作,从而降低产品运行的功耗(见图1)。开启Slice节能模式后,路由器空闲端口对应的Slice进入节能模式,与满流量相比,每Slice可以节省功耗约150W(2TLPU挂载下),与空载相比,每Slice可以节省约90W(2TLPU挂载下)功耗。

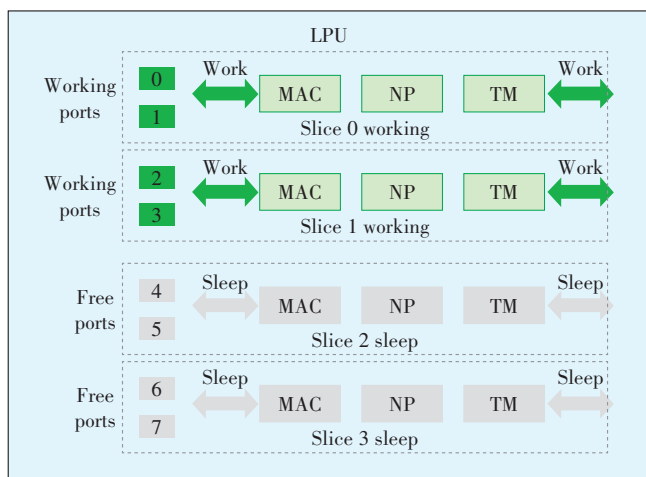


图1 框式设备接口板Slice节能示意

当某个Slice通道对应的子卡端口处于空闲状态(即端口 shutdown)或者子卡不在位,且该Slice对应的转发模块上没有业务运行时,会对这些转发模块进行节能操作。

当处于节能状态的某个Slice通道对应的子卡端口需要使用(即端口 undo shutdown)或者子卡插入时,会自动进行唤醒操作。唤醒操作需要对转发模块进行重新初始化,转发表项也需要重新下发,此时该Slice通道下的端口会有分钟级的不可用时间。

3.2 管理节能方案

3.2.1 冗余备份节能方案

由于可靠性方面的要求,设备经常会配置主备冗余板卡。以盒式设备的主控主备板卡为例,热备状态下,主用主控和备用主控处于相同工作状态,功耗保持一致。在温备状态下,备用主控处于低功耗状态,仅保持与主用主控同步路由表项、协议状态、链路状态等实时信息的能力。在主用主控故障后,备用主控

升级为主用主控并进行业务处理,实现整机业务快速恢复。

温备份功能开启后,设备会对备用主控的各组成模块进行节能操作,同时启动信息同步策略,处理完成后备用主控进入温备份工作状态。设备周期性进行备用主控的硬件可靠性检测,避免备用转发硬件失效后不能及时发现。当设备处于温备状态下,进行主备倒换时,主备倒换过程如下。

a) 对于通过网管或者命令行触发主备倒换的场景,设备首先进行备用主控温备份转热备份处理,然后完成主备倒换。

b) 对于直接拔出主用主控的场景,备用主控温备份转为热备份后直接升为主用状态。

3.2.2 按需调整方案

遵循“无业务无能耗,低业务低能耗”的原则,如路由器在一段时间内持续零流量,则进入待机状态,等待随时被唤醒;在业务量较低状态下适当休眠部分网片,以最小化能力承载业务即可。这种方案是一种理想化的节能机制,目前较难实现,对路由器的实时监测有一定要求,路由器的唤醒需要短暂的时间,这个短暂的时间内业务会临时中断。所以一般只适用于网络边缘设备,承载业务量较少,接入用户较少,用户可容忍一定程度的热启动等待时间。

某厂商提出了一种基于忙闲时段开关主控板的动态调整方案,一台业务接入设备正常情况下主备主控板都在全时段运行阶段,由于业务流量较小,可以调节的空闲芯片,到闲时阶段(凌晨00:00~06:00),主控板主备板卡只有1块板卡运行,另一块板卡冷备,此方案可节省主控板功耗约30W,预期节能10%。

如图2所示,在闲时阶段,备用板以低功耗模式运行以节约能耗,当检测到主用板有故障时,备用板全量运行,接管业务管理,保证业务无损。主用板故障恢复后,备用板卡倒换到主用板卡,恢复维持低功耗模式运行。闲时阶段结束后,设备恢复为主备双控运行。

这种方案虽然能在一定程度上做到节能,但由于受到时间段的限制只能静态设置为在某个时间段关闭板卡,白天还是默认全功率运行,实际应用中的忙闲时段受诸多因素影响变化较大(例如节假日等因素),因此无法做到根据实际的业务流量进行完全动态的调节。

3.2.3 支撑系统AI节能

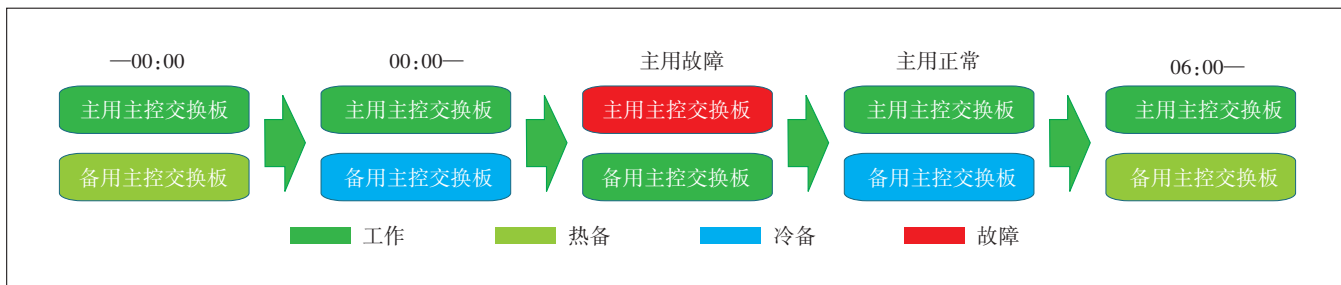


图2 基于忙闲时节能的动态调整方案

传统的路由器并没有记忆功能,无法根据以往历史流量动态调节自身功耗,支撑系统这一个决策者的引入可辅助路由器完成这部分功能。支撑系统需要实时监控路由器的流量,存取足够时间段的流量数据后利用大数据分析和机器学习算法进行建模分析,并加之以专家经验,不断优化对单点设备的节能策略。

模型训练到一定程度后可作为AI决策者,根据以往的流量主动发起对路由器部分网片、板卡和端口的关闭操作,并实时监测业务流量,业务流量升高时开启前期关闭的耗电元件,形成整个支撑系统的AI节能闭环。

3.3 网络架构节能方案

3.3.1 多网融合

如图3所示,运营商的现网建设,2B、2C和2H 3张网一直是3张独立的网络,每张网络各自使用各自的资源,网与网之间关联较少。智能城域网是一张多网融合的网络,把2B、2C和2H 3张网络融合成一张网,通过FlexE切片技术实现2C、2B、2H的隔离承载,业务互不影响。网层简化,减少设备数量,通过扁平化网

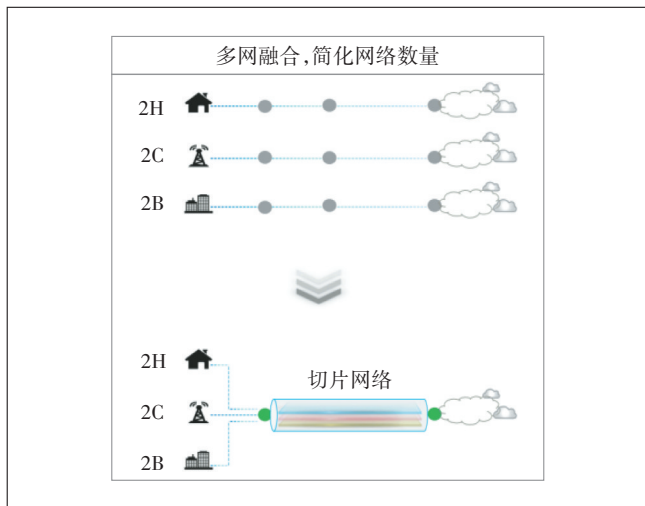


图3 2B、2C、2H 3张网融合

络,优化网络结构,减小要维护的设备数量,直接降低运营商全网设备功耗。

3.3.2 最短流量路径

设备的能耗和当前设备承载的流量呈正相关关系,端到端的流量业务路径经过的跳数越少(多条业务路径经过的节点型号和配置板卡近似一致),整张网络的总能耗也相应越小。

如图4所示,流量从节点A前往节点C存在2条路径:A-B-C和A-D-E-C,假设5台设备的型号和配置板卡一致,路径1比路径2少一跳,选择路径1作为业务流量转发路径将更有效地降低整网的功耗。在网络中,可以通过合理设置IGP的cost值、TE手工规划路径、SRv6-Policy控制器算路等多种方式规划整网流量路径,尽可能使流量的转发路径更短、更合理,从而直接降低整网的设备功耗。

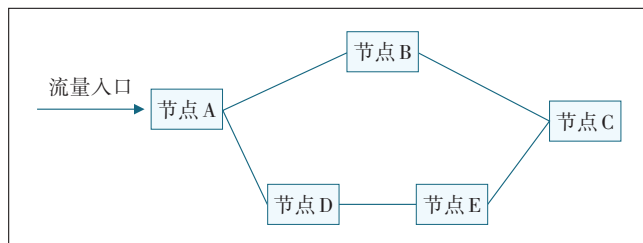


图4 业务流量多条路径示意

3.3.3 无源替代有源

网络能耗主要集中在有源设备上,如路由器、OTN设备、机房空调等,无源设备如光缆等基本不存在能耗,因此可以通过无源替代有源方式建设网络,在有限的“点”(有源设备)基础上,用更多的“线”(无源设备)连接点和点。

如图5所示,在路由器有源设备位置不变的条件下,通过增加无源光缆的方式实现各有源设备之间的全互联,把环形拓扑重构为树状拓扑,节点到节点之间的流量转发由通过环路绕行转发变为直接转发,相

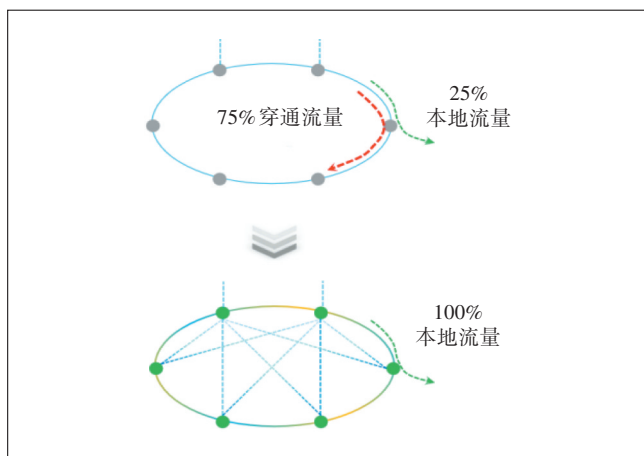


图5 无源替代有源降低穿透流量示意

邻2个节点之间转发的业务流量全部是本地流量,直接降低每跳节点的流量,从而降低每跳节点的能耗和全网能耗。

运营商网络中,建设基站锚点和无线BBU集中方式也可看作是增加无源设备来替代有源设备方式,简化网络结构,降低整网能耗,但也间接提高了对接入端光缆的要求。

4 管理节能方案测试

在当前网络架构和设备配置情况下,可以进一步探索通过管理节能手段进行能耗压降的方案,并对当前设备商提供的管理节能方案进行测试。智能城域网设备相比IPRAN设备在节能上的一个改进是汇聚和接入设备均支持深度节能,现测试智能城域网汇聚和接入设备在深度节能+温备份模式能力下的表现,主要测试节能模式开启前后的设备功耗和性能状态。

4.1 汇聚设备温备节能测试

4.1.1 测试方案

本测试选取一台智能城域网某厂家的汇聚设备,验证路由器开启深度节能+温备份模式下功耗前后的对比。使用功耗测试仪测试温备开启前后功耗的变化,其中功耗(W)=电压(V)×电流(A)。

测试步骤如下。

- 设备升级支持温备份功能。
- 功耗测试仪直接接入EUT电源接入端口。
- 在设备标准节能模式下记录半小时内的设备功耗,每隔5 min记录一次功耗测试仪电流读数,最后取平均值。
- 设备开启温备节能模式后,重新记录半小时内

的设备功耗,每隔5 min记录一次功耗测试仪电流读数,最后取平均值。

4.1.2 测试结果

开启深度节能和温备份前测试设备平均电流为38.2 A,调节节能模式后,测试设备平均电流为30.3 A,机房电压在54 V不变的条件下,节能电流约为7.9 A,单台设备节省能耗426.6 W。

4.2 接入设备温备节能测试

4.2.1 测试配置和步骤

为验证温备节能模式对接入设备性能的影响,对智能城域网某环路上一端接入设备进行版本升级以支持节能模式,测试设备温备节能模式开启前后如下5个关键指标的变化情况。

- 设备基础性能:CPU和内存使用情况。
- 控制面BFD状态:本测试使用BFD来检测MAR到MER的隧道可达性。
- nqa twamp-light:网络质量分析NQA是设备上集成网络测试功能,可以检测网络上运行的各种协议的性能,本测试通过nqa twamp-light实时采集到各种网络运行指标。
- PM统计:PM用于用户需要配置性能管理的数据统计功能。
- 功耗:使用功耗测试仪测试温备开启前后功耗的变化,其中功耗(W)=电压(V)×电流(A)。

4.2.2 设备性能状态测试结果

如表6所示,温备开启前后,设备性能状态测试结果基本符合预期,即路由器设备开启设备温备节能功能并不会影响现网业务的正常运行,具备批量敏捷部署的条件。

4.2.3 设备功耗测试结果

分别在盒式接入设备使能温备份节能和关闭温备份节能的配置下,各记录2 h的测试数据,整体测试

表6 温备开启前后测试结果

性能指标	温备开启前后测试结果
CPU和内存使用情况	①使能温备节能模式,CPU、内存使用情况几乎不变 ②去使能温备节能模式,CPU、内存使用情况几乎不变 ③温备模式下,主备倒换,CPU、内存使用情况几乎不变
控制面BFD状态	①使能温备节能模式,BFD会话不震荡,业务流量不丢包 ②去使能温备节能模式,BFD会话不震荡,业务流量不丢包 ③温备模式下,主备倒换,BFD会话不震荡,业务流量丢包在预期范围内 ④温备模式下,链路故障倒换,BFDfortunnel会话不中断,业务流量丢包在预期范围内
nqa twamp-light	①使能温备节能模式,twamp-light检测正常 ②去使能温备节能模式,twamp-light检测正常 ③温备模式下,主备倒换,twamp-light检测重新开始统计
PM统计	①使能温备节能模式,设备接口PM统计功能正常 ②去使能温备节能模式,设备接口PM统计实时监控不间断 ③温备模式下,主备倒换,接口PM统计会中断,重新统计

结果如表7所示。从表7可以看出,在机房电压为54V的情况下,使能节能模式之后,节能电流为0.05~0.10A,单台设备节省能耗3~5W。

表7 智能城域网接入设备功耗测试结果

日期	时间	功率/W	电流/A	备注
2024-03-01	09:55	314	5.62	已使能节能开关
2024-03-01	10:00	317	5.65	已使能节能开关
2024-03-01	10:05	314	5.66	已使能节能开关
2024-03-01	10:10	316	5.67	已使能节能开关
2024-03-01	10:16	312	5.62	已使能节能开关
2024-03-01	10:20	320	5.68	关闭节能开关
2024-03-01	10:25	317	5.68	关闭节能开关
2024-03-01	10:30	316	5.70	关闭节能开关
2024-03-01	10:35	317	5.72	关闭节能开关
2024-03-01	10:40	319	5.71	关闭节能开关
2024-03-01	10:45	316	5.65	已使能节能开关
2024-03-01	10:50	316	5.66	已使能节能开关
2024-03-01	10:55	316	5.65	已使能节能开关
2024-03-01	11:00	313	5.62	已使能节能开关
2024-03-01	11:05	315	5.62	已使能节能开关

4.3 节能测试总结

本测试对比了汇聚和接入设备开启温备节能模式的前后功耗,一台框式汇聚设备开启温备节能模式后可节约426.6W的功耗,约占整机功耗的20%,这也和测试的汇聚设备挂载的板卡和端口空闲率有关,说明现网汇聚设备节能还有很大的挖掘价值。一台盒式接入设备可节约3~5W的功耗,约占整机功耗的1.5%,与测试前预期值有一定差距。但由于接入设备数量庞大,全量开启节能特性后也能节约一定能耗,对于运营成本节约仍然具有一定的意义。

5 结束语

从测试结果上看,汇聚设备开启深度节能模式将有效降低设备能耗。目前智能城域网仍在持续建设阶段,部分汇聚设备上线后会有一段时间处于空载状态,此时可通过开启设备深度节能方式短期内节约能耗,甚至可通过管理节能方式把空载的业务板卡手工关停以更进一步节约能耗。但实施管理节能的同时需要权衡风险和收益,过度的节能可能会导致业务受损,绿色节能的前提必须是在保证业务稳定使用下才能进一步挖掘设备和网络的节能潜力。

目前看,管理节能的发展空间还是很大的。设备厂家管控系统在节能上也有一定的投入,主要是集中在能耗可视化和自动节能方向上,但节能落地的成效还需要实际网络去验证,并结合多种节能方案,减小网络运营的耗电量,降低运营商的CAPEX和OPEX。

参考文献:

- [1] 庄湛海,陈昊. IP路由器基于业务流量的动态节能技术与测试[J]. 移动通信,2016,40(14):19—24.
- [2] 杨海俊,张小琳,张晟,等. 核心路由器系统节能新技术研究[J]. 通信电源技术,2020,37(z1):402—406.
- [3] 吕婷,张涛,曹亘. 6G网络节能技术研究[J]. 邮电设计技术,2023(12):50—55.
- [4] 李凤花,朱洪文,马云刚. 基于AI的5G网络节能方案研究[J]. 山东通信技术,2021(12):19—23.
- [5] 周城兴. 网络节能算法研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2012.
- [6] 李晨. 面向云数据中心的节能算法研究[D]. 扬州:扬州大学,2015.
- [7] 周华林,李南珠. 浅谈互联网数据中心的节能减排技术[J]. 广西通信技术,2022(3):39—43.
- [8] 张金宏,王兴伟,黄敏,等. 绿色互联网中面向节能的分布式拓扑管理机制[J]. 计算机学报,2017,40(7):1517—1529.
- [9] 罗家尧. 互联网数据中心节能减排评估研究[J]. 低碳世界,2017(6):77—78.
- [10] 钟聪睿. 互联网数据中心(IDC)机房总体规划中的节能设计研究[J]. 信息通信,2016(8):241—242.
- [11] 商云飞,徐明伟,李丹. 互联网路由设备与协议节能研究综述[J]. 电子学报,2012,40(11):2290—2297.

作者简介:

罗家尧,毕业于暨南大学,工程师,学士,主要从事运营商IP承载网络维护工作;方道铿,毕业于中山大学,工程师,主要从事IP+光网络规划、运维、管理工作;余金波,毕业于暨南大学,工程师,硕士,主要从事运营商IP+光网络的维护、管理工作;古渊桦,毕业于中山大学,工程师,学士,主要从事运营商IP承载网络维护工作;黄家兆,毕业于华南师范大学,工程师,学士,主要从事运营商IP承载网络维护工作。