

# 那只揣着怀表的古怪白兔 又出现了,还搞了件大事

小溪

看过《爱丽丝梦游仙境》(Alice's Adventures in Wonderland)么?那是英国作家路易斯·卡罗尔(Lewis Carroll)1865年出版的一部著名的儿童文学作品。书中讲述的是英国小女孩爱丽丝(Alice)在睡梦中见到一只揣着怀表的古怪白兔边跑边说“要迟到了!要迟到了!”。爱丽丝好奇地追逐着白兔,一不小心掉入了兔子洞,她由此进入了位于另一时空的神奇国度,经历了一段奇幻的冒险之旅。

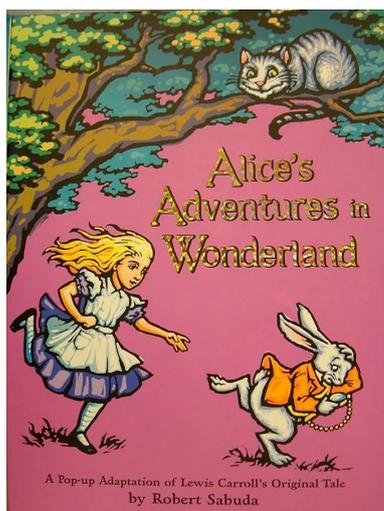


图1 《爱丽丝梦游仙境》(图片来自网络)

一个半世纪之后,没想到那只古怪的“白兔”竟然又出来搞事情了。2009年,欧洲核子研究中心(CERN)为满足科学研究高速精确计时的需要,启动了一个命名为“白兔(White Rabbit, WR)”的网络高精度时间控制研究项目,项目的logo就是《爱丽丝梦游仙境》中那只揣着怀表的白兔。最终,这个极有意义的前沿技术研究获得成功,还由此设定了一个新的网络系统高精度时间控制国际标准。

## 1.“白兔”出来搞什么

“白兔”出来搞的是什么事?那时,理论物理学家们在“标准模型”中所预言存在的62种基本粒子中已有61种得到实验物理的证实(物理学家们为此花了约50年)。作为世界最大的科学研究中心之一,CERN为寻找这个唯一未被实验所证实的希格斯粒子,建造了一个可达到产生希格斯粒子所需的极高能量的大型强子对撞机(LHC)。

2008年9月开始运行的LHC是由多级不同类型的粒子加速器串接组成的一个庞大的加速器链(其最大的环形地下隧道周长达27千米),通过这个加速器链将质子在顺时针和逆时针方向分别加速到接近光速,然后由建在各对撞点上的多个大型粒子探测器测量及记录质子束对撞后产生的各种次级粒子的信息,再经复杂的数据分析从海量的数据中寻找希格斯粒子的踪迹。

可以想象,运行如此规模、如此复杂的加速器链系统,对每个节点都需进行极高精度的时间控

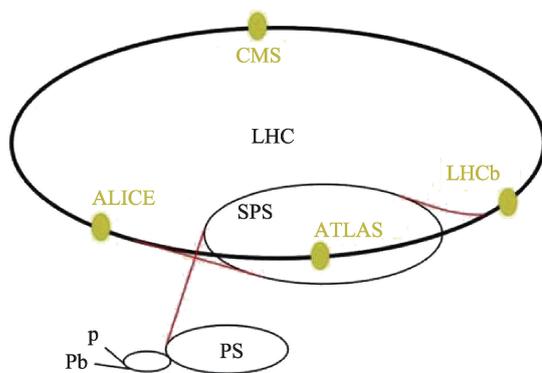


图2 LHC加速器链示意图(图片来自网络)

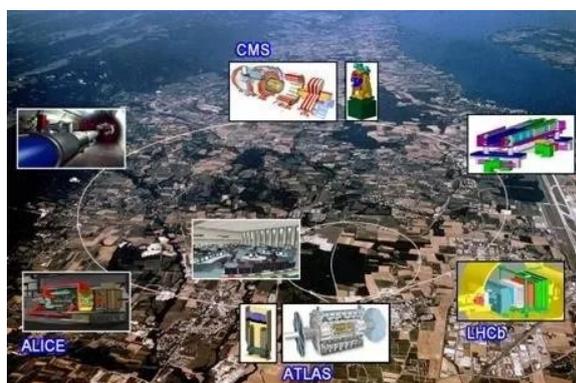


图3 LHC探测器布局示意图(图片来自网络)

制,其中最核心的部分就是主计时系统。LHC开始运行之后,为进一步提高实验精度,CERN决定将整个加速器链系统中所有通用设备计时系统的时间同步性能提高至亚纳秒(1纳秒=10亿分之一秒)及皮秒(1皮秒=10000亿分之一秒),特开启一个“网络高精度时间控制技术”研究项目,以《爱丽丝梦游仙境》中那只总揣着怀表掐时间的“白兔”作为项目名称还是挺有寓意的。



图4 CERN“白兔”项目的logo(图片来自网络)

## 2. 网络系统及标准

要理解“白兔”项目需了解一点网络系统的基本知识:在较小范围内(几百米至十几千米)将各种计算机及通信设备互连构成的通信网络称为局域网(LAN)。范围大一些的局域网也称为城域网(MAN),如范围达到几十至几千千米可称为广域网(WAN)。根据国际通用定义,按共同协议标准组成的公共型广域网称为互联网(internet,首字母i小写),而能够连接世界上各类网络(无论其规模及所处地理位置)并将网络上的信息资源组合起来的网

络体系则称为因特网(Internet,首字母I大写)。

有三项关键技术决定了局域网的基本特性(包括网络传输数据的类型,网络的响应时间、吞吐率、利用率以及网络的应用范围等):

(1) 传输介质——指传输数据的物理通路。若按传输介质分类,局域网可分为有线网(通过双绞线、同轴电缆、光纤或电话线传输数据)和无线网(通过无线电波、红外线或通过卫星进行数据通信)。

(2) 网络拓扑结构——指用抽象的点与线来表达网络中各种设备及传输介质相连接的结构方式。若按网络拓扑结构分类,局域网可分为总线型、星型、环型、树型、分布型、网状、混合型等。

(3) 传输介质访问控制方法——指为网络数据交换制定的规则、约定及标准,也称为网络通信协议。若按传输介质所使用的访问控制方法分类,局域网可分为以太网(EtherNet)、令牌环网(Token-ring network)、光纤分布式数据接口(FDDI)、异步传输模式(ATM)、无线局域网(WLAN)等。其中,以太网技术的应用最广(包括符合IEEE 802.3系列标准规范的标准以太网(10 Mbps)、快速以太网(100 Mbps)、千兆以太网(1000 Mbps)、10 G以太网等)。

为保证网络体系的正常运行需要制定网络通信标准,国际上制定网络通信技术标准的权威机构有电气和电子工程师学会(IEEE)、国际标准化组织(ISO)、美国国防部高级研究计划局(ARPA)等。

IEEE在150多个国家中拥有300多个地方分会,在计算机、电信、生物医学、电力等多个领域都是主要权威。IEEE拥有几十个专业学会,其中IEEE 802委员会负责起草与局域网相关标准,规范定义局域网中的网络接口卡(网卡)如何访问传输介质、如何在传输介质上传输数据、如何建立网络设备之间的连接、如何维护连接及如何去除连接等。IEEE 1588委员会负责起草与网络精密时钟同步相关的标准,规范网络各设备之间的时间或频率差保持在合理的误差水平内等。

ISO由来自世界上100多个国家的国家标准化团体组成,技术领域涉及信息技术、交通运输、农

业、保健、环境等。IEEE 标准经 ISO 认定后成为 ISO 标准。

ARPA 开发的网络控制协议(TCP/IP)于 20 世纪 80 年代成为因特网不同计算机之间互连和不同网络互连的行业标准(TCP 是传输控制协议,IP 是网际协议)。现在的 TCP/IP 已是基于 TCP 和 IP 这两个最初协议之上的多个不同功能通信协议的集合群了。

### 3. “白兔”的意义

“白兔”项目是多个实验室、多个公司的跨国合作。“白兔”研究团队向 LHC 以及其他多个重大国际合作的基础研究项目(如:欧洲基础物理学领域最大的科研装备项目之一的反质子和离子研究设施(FAIR)、世界规模最大、影响最深远的国际科研项目之一的国际热核聚变实验反应堆(ITER),及由超过 100 台契伦柯夫天文望远镜组成的阵列(CTA)、多国合作的平方公里阵列射电望远镜(SKA)、建在地中海海底的立方千米中微子望远镜阵列(KM3NeT)等同样需要超高精度时间与频率分配的大型天文分布式设施)征集了对网络超高精度时间传输及无损数据传输的需求。基于征集得到的数据,研究团队分析了这些设施需求的共同点以及潜在的与现有技术标准的不兼容性,为最终确定“白兔”项目的技术路线打下了基础。

考虑到未来电信及信息科学技术的强劲发展必然会推动工业领域的时间传输精度要求越来越

接近科学研究的要求水准,研究团队最终将“白兔”项目的研究思路确定为:基于占主导地位的以太网标准 IEEE-802.3 并兼容与其他时间同步机制相比更有优势的精确时间协议 IEEE-1588 v2 (PTP v2) (PTP 的相位同步和时钟同步精度为亚微秒级,建设与维护成本比全球定位系统(GPS)低),以完全开放的设计将数据传输和定时领域的最新技术汇集在一起。“白兔”技术不仅要满足 CERN 及上述一些重大项目的需求,还要能在更多的大型科研项目及更广范围内得到应用。

“白兔”网络基于已有的 IEEE 标准机制,如需满足 CERN 的要求,则以向后兼容的方式对这些标准进行扩展和外延。技术上,“白兔”是个虚拟局域网(VLAN)(IEEE 802.1Q),将网络中的设备和用户(这些设备和用户并不受其所在物理位置的限制)按一定的原则(例如不同功能、部门及应用等)从逻辑上划分成多个小的逻辑网络(小的逻辑网络形成各自的虚拟局域网),使用以太网技术(IEEE 802.3)进行网络中交换机(Switch)和节点(Node)的互连,并用精确时间协议(PTP v2)来实现同步,如图 5 所示。

在庞大、复杂的网络系统中实现超高精度时间传输及无损数据传输绝非易事,相关的硬件、固件(内部保存的设备驱动程序)及软件需要突破的众多技术难点都极具挑战性。经数年努力,“白兔”研究团队终于实现了预定研究目标,并通过了 125 千米及 1000 千米远距离链路的严格测试。团队开发获

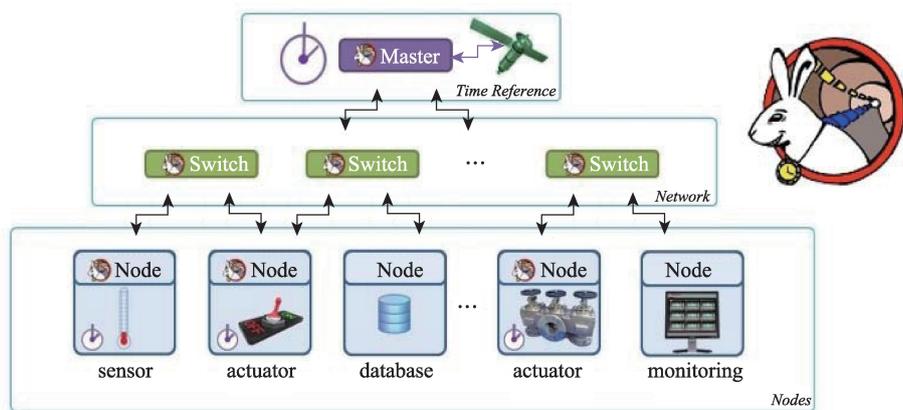


图5 “白兔”技术布局示意图(图片来自网络)

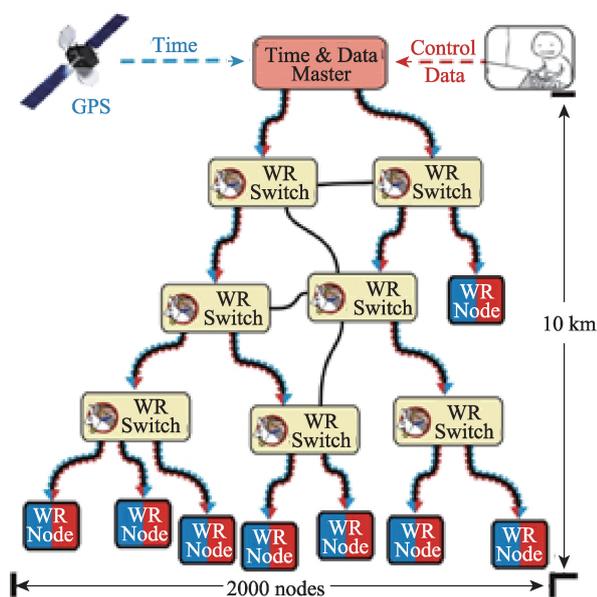


图6 “白兔”研究实现了预定研究目标(图片来自网络)

得的基于以太网的网络高精度时间控制技术可在10千米光纤长度上以亚纳秒精度的同步连接数千个节点,数据传输速率达千兆比特率,为大型粒子加速器链及大型设施上分布式仪器的无损数据传输实现亚纳秒精度及几皮秒的同步精度提供了保证。

2020年6月16日,网络系统高精度时间控制的新版精确时间协议IEEE-1588-2019 v2.1 (PTP v2.1)正式颁布(该协议草案于2019年11月19日获IEEE审查委员会投票批准),这意味着使PTP的时间同步性能从亚微秒提高到亚纳秒的“白兔”技术完成了纳入IEEE-1588标准化的工作,“白兔”技术已被公认为世界范围内新的行业标准。由于增添了多项新的功能和特性,PTP v2.1文件已扩展到500页(PTP v2文件为250页)。

#### 4. 应用与展望

“白兔”技术于2011~2012年开始应用于CERN、德国重离子研究中心(GSI)等大型粒子加速器链以及研究高能伽马射线和超高能宇宙射线的探测器阵列(TAIGA-HISCORE)等有精确时序与频率转移需求的大型设施上分布式仪器类项目上。

“白兔”技术的所有硬件、固件及软件完全对外

开放,不仅保证了该项技术可来自多个供应商的商业可用性,且允许使用者有修改和进一步发展的权利,鼓励不同的企业及研究机构基于“白兔”技术进行新的开发。不少使用者为“白兔”技术的改进提升做出了新贡献,同时,CERN也从这些技术的新发展中得到了益处。

“白兔”的相关技术突破催生了新的网络系统高精度时间控制标准(IEEE-1588-2019 v2.1)颁布,而这更加有利于“白兔”技术的扩展与传播。目前,“白兔”技术已应用于美国费米国家实验室(Fermilab)、国际聚变材料放射测试设施(IFMIF)、欧洲大功率激光光源(ELI-ALPS、ELI-BEAMS、EISCAT)、立方千米中微子望远镜阵列(KM3Net)、契伦柯夫天文望远镜阵列(CTA)、平方公里射电望远镜阵列(SKA)、德国电子同步加速器实验室(DESY)、欧洲散裂中子源(ESS)、搜寻外星智能生命信号的纳秒天文望远镜(PANOSSETI)、美国加利福尼亚大学伯克利分校(Berkeley)、原始深地下中微子实验平台(ProtoDUNE)、欧洲航天局(ESA)、德国宇航中心(DLR)、欧洲同步辐射光源(ESRF)、中国高海拔宇宙线观测站“拉索”(LHAASO)等多个研究机构(或项目)的科学研究基础设施上。此外,世界上大多数国家计量机构的计时单位采用了这项技术,且100 G以太网、5 G移动通信、智能电网、金融技术、地理定位、工业控制等领域的多个机构已成为“白兔”技术的用户。

诞生于CERN的“白兔”技术成果是粒子物理



图7 世界各地“白兔”技术用户分布图(图片来自网络)

研究对世界科技进步的又一项重要贡献。展望未来,因“白兔”技术拥有的巨大影响潜力,更多具有挑战性的应用太值得期待了!

(本文采自高能所微信公众号,略有修改)

### 参考文献

① White Rabbit, a CERN-born technology, sets a new global standard  
<https://home.cern/news/news/knowledge-sharing/white-rabbit-cern-born-technology-sets-new-global-standard>.

② White Rabbit Official  
<https://white-rabbit.web.cern.ch/>.

③ The White Rabbit Project  
[https://www.researchgate.net/publication/44191118\\_The\\_White\\_Rabbit\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/44191118_The_White_Rabbit_Project).

④ IEEE 1588-2019 Version 2.1 officially published  
<https://www.oreganosystems.at/about-us/news/ieee-1588-2019-version-21-officially-published>.

⑤ «The White Rabbit Project» Seven Solutions  
<https://sevensols.com/white-rabbit-technology/>.



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;  
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

### 欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 [mp@mail.ihep.ac.cn](mailto:mp@mail.ihep.ac.cn),并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2022年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款。

2020~2021年单行本每期10元;2010~2019年合订本每本60元。

### 订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识\*\*年\*\*期”)

名称:中国科学院高能物理研究所  
开户行:工商银行北京永定路支行  
账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;  
淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>  
或扫描下方二维码:



淘网购刊



微信购刊