

基于开放海缆通信系统的海缆登陆站优化研究

刘兴华¹, 周磊², 叶胤¹, 张琳雅¹

(1. 广东省电信规划设计院有限公司, 广州 510630; 2. 中国电信集团有限公司, 北京 100032)

摘要: 国际互联网带宽的快速增长推动了海底光缆及海缆登陆站的加速建设需求。分析了我国大陆海缆登陆站的当前布局及其在未来需求的不足, 并结合开放海缆通信系统的发展趋势, 研究了将海缆传输终端设备从传统的海缆登陆站转移到核心机房的技术和经济可行性。最后, 在此基础上提出了海缆登陆站优化部署的建议。

关键词: 开放海缆通信系统; 海缆登陆站; 光信噪比; 优化部署

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)03-00102-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.03.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on optimization of submarine cable landing station based on open submarine cable communication system

LIU Xinghua¹, ZHOU Lei², YE Yin¹, ZHANG Linya¹

(1. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunication Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

2. China Telecom(Group) Corporation Limited, Beijing 100032, China)

Abstract: The rapid growth of international internet bandwidth has driven the accelerated construction demand for submarine cables and cable landing stations. This article analyzes the current layout of China's mainland cable landing stations and their shortcomings in future demand, and combines the development trend of open cable communication systems to study the technical and economic feasibility of transferring submarine cable transmission terminal equipment from traditional cable landing stations to core data centers. Finally, based on this, suggestions for optimizing the deployment of submarine cable landing stations are proposed.

Key words: open submarine cable communication system, marine cable landing station, optical signal-to-noise ratio, optimal deployment

0 引言

数字经济已经成为推动全球经济复苏的重要力量。据统计, 2022 年我国数字经济规模达到了 50.2 万亿元, 同比增长 10.3%, 总量稳居世界第二^[1]。而海底通信光缆(以下简称海缆)及海缆登陆站(以下简称海缆站)是全球数字经济重要的信息基础设施, 承载了全球 90% 以上的国际通信流量^[2]。近年来, 全球国际互联网带宽持续加速增长, 这进一步推动了海缆及海缆站

的建设需求。

工业和信息化部颁发的《“十四五”信息通信行业发展规划》要求构建通达全球的信息基础设施, 加强海陆缆建设的顶层设计, 优化海缆登陆站的规划布局。本文对我国大陆当前海缆站的布局及其面对未来需求的挑战进行分析, 结合开放海缆通信系统的发展趋势, 对关于将海缆传输终端设备放置在核心机房的可行性和经济可行性进行研究, 并在此基础上提出海缆站快速优化部署的建议。

收稿日期: 2023-08-10。

作者简介: 刘兴华(1983—), 男, 硕士, 广东省电信规划设计院有限公司, 高级工程师, 长期从事光通信网络的规划和设计工作, 参与了多条国际海底光缆的规划和设计, 编写的新跨太平洋(NCP)海缆、新港美(HKA)海缆、亚太直达(ADC)海缆可行性研究报告获得多项省部级优秀工程咨询奖。



1 海缆站当前布局及面临的挑战

目前, 我国海缆站的当前布局及面临的挑战主要有以下几点:

1) 当前海缆站效能、效率低。

在“碳达峰”与“碳中和”战略倡导下, 数据中心/核

心通信机房正朝着集约化、规模化、绿色高效的方向发展。数据中心不仅致力于提升能源利用率(PUE),还积极采用可再生能源和回收利用排放热量等措施,以降低碳排放。由于海缆站设置在海边,受地理条件限制,一般难以采用各种先进手段提高能源使用效率,其 PUE 指标远差于其它大中型数据中心。因此,在“双碳”严格要求下,海缆站新建工程立项审批难度加大。

通常,海缆站按照不少于 4~5 条海缆的规模设计局站的空间、电源等设施,建筑面积一般在 2 000 m² 以上。由于国际环境存在包括但不限于地缘政治冲突、政策监管、战争、制裁等风险,以及可能会发生的海域使用冲突,导致海缆建设存在很大的不确定性,与早期的规划相比存在较大的偏差。第一条海缆建设投产多年后才会有第二、第三条海缆登陆,从而造成了海缆站大量空间、电源资源的闲置。此外,满足地质稳定、环境优良、交通便利、水电供应完善等条件的海边地块选址较困难。海缆站一般离地(市)级以上城市通信局较远,需要配置专门的技术力量进行设备管理和维护,无法做到与其它核心机房人员的复用,人力成本较高。海缆站基础设施建设投资金额大,同时需考虑运行维护的人工成本,投资决策流程冗长。

2)海缆站数量偏少,路由过于集中。

主要国家海缆站及登陆海缆数量对比情况如表 1 所示。中国大陆海岸线长约 1.8 万千米,但我国大陆国际海缆站仅 9 个,海缆站数量低于美国、日本、法国等国家,约为美国的 1/5,与我国丰富的海洋资源、庞大的经济体量相比极不相称。我国上海、汕头两地集中登陆了大部分海缆,疏导的国际出口流量超过 80%,但这两地的抗多点故障能力较弱。2020 年 4 月,曾发

生上海崇明海缆站大部分国际海缆同时中断的情况,而由于海缆过度集中登陆,使得灾备资源调配受限,进而引发国际通信出境带宽的大规模拥塞。

3)海缆登陆与近海人类活动活跃区域重合。

我国近海为宽广的大陆架,平均水深较浅,人类经济活动活跃,由此引发的海缆故障频繁发生。据统计,2015 年以来,我国海域的国际海缆故障均发生在水深 150 m 以内的区域,其中水深 90 m 以内区域的故障占到 93%^[3]。影响海缆通信安全的主要人为因素有拖锚、拖网、张网类捕捞作业等海洋活动。上海、汕头海缆登陆区域与我国主要渔场高度重合,由渔船锚泊或拖网捕捞造成的海缆中断现象特别严重。

虽然我国为提高海缆安全性迫切需要采取措施分散海缆登陆路由,但由于海缆站建设的诸多制约因素,新建海缆通常会优选在原有海缆站登陆,这进一步加剧了国际海缆路由的集中程度。

鉴于当前海缆站面临的挑战,急需寻找一种新的海缆站建设模式,以提升海缆站规划建设效率,做到优化部署,提升我国国际通信网络安全性。

2 开放海缆通信系统

2.1 开放海缆通信系统简介

近年来,开放海缆通信系统的兴起已成为行业发展的显著趋势。其核心目的在于实现传输终端设备(TTE)与水下设备的解耦,以便在新建海缆临近投产时,能够灵活地选择业界最新的 TTE。这样做不仅能够提升传输系统的性能,还能实现成本的最优化^[4]。开放海缆通信系统标准 G.977.1 在 2021 年已完成并发布^[5]。开放海缆通信系统示意图如图 1 所示。开放海缆线路包括水下部分和部分陆地部分,一般由单独供应商承包建设。G.977.1 标准将开放海缆线路系统作为一个透明的光层传输平台,通过光耦合连接设备提供开放的光接口,使得海缆业主可以自由选择 TTE 的供应商。

2.2 开放海缆通信系统陆地部分传统设计方案

放置在海缆站内的开放海缆通信系统设备包括

表 1 主要国家海缆站及登陆海缆数量对比

类别	中国大陆	美国	日本	法国	新加坡
海缆站数量	9	44	21	10	7
登陆海缆数量	13	57	24	20	35

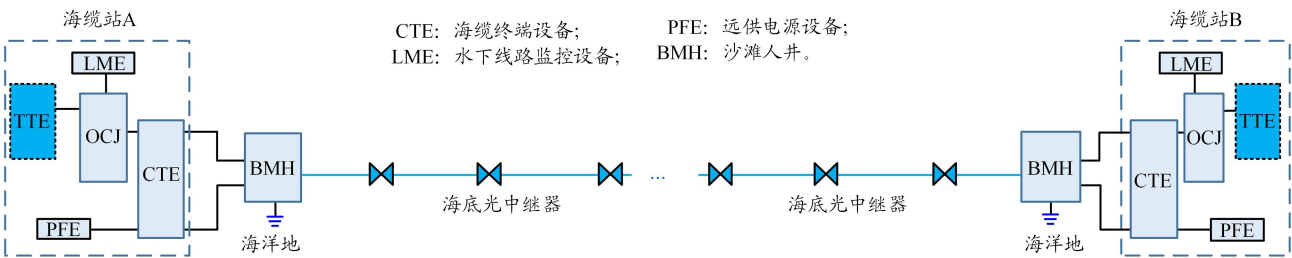


图 1 开放海缆通信系统示意图

刘兴华,周磊,叶胤,等:基于开放海缆通信系统的海缆登陆站优化研究

OCJ、LME、PFE、TTE、光配线架(ODF)等。另外,传统海缆系统的 TTE 放置在海缆站,容量通过陆缆系统延伸到核心机房交付,需要配置相应的陆地波分复用器(DWDM)。传统海缆站及陆缆延伸系统配置图如图 2 所示。海缆站建设涉及机房基础土建、机电配套、通信系统配套等多个专业,不仅需要在预估海缆通信系统的空间和电源资源后进行规划,还需要考虑其它设备(如空调、通风、电气、电梯等)的空间和电源需求,以全面综合地考虑海缆站的建设。

3 海缆站优化部署

3.1 开放海缆通信系统陆地部分优化设计方案

鉴于 G.977.1 标准允许开放海缆通信系统灵活选择 TTE 供应商,本文考虑将 TTE 放置在邻近的核心机房,而海缆站仅用于放置开放海缆线路的陆地部分,包括 PFE、OCJ、LME、CTE 等。通信业务直达核心机房,在海缆站仅作光层传通。其核心机房示意图如图 3 所示。TTE、DWDM 设备以及 ODF 在海缆站通信机房中占据了 70%以上的空间和电源资源,因此本文采用一种将 TTE 放置在核心机房的建设模式,以降低海缆站的机房空间和电源需求,并从根本上改变海缆站的建筑结构和部署策略。该优化设计方案的可行性及经济可行性分析如下。

3.1.1 技术可行性

早期的海缆系统主要通过色散管理光纤(DMF)方式,每段光缆分别由若干千米的正、负色散系数的光纤组合而成,使得色散累积接近零。相比之下,陆缆系统只采用正色散光纤,这是因为在某些方面正色散光

纤具有优势。为了补偿色散,陆缆系统通过在局站配置色散补偿光纤(DCF)模块进行补偿。相干光通信技术规模部署后,海缆系统和陆缆系统均在电域采用数字信号处理技术进行色散补偿,国际海缆也仅配置正色散光纤。由于相干技术的应用,海缆、陆缆系统的 TTE 技术实现了融合和统一。

近期建设的国际海缆主要采用低损耗、大有效面积的 G.654.D 光纤,其平均损耗系数约为 0.15 dB/km;而陆地光缆则主要采用 G.652 光纤,其平均损耗系数为 0.2 dB/km。此外,由于尺寸限制,为了便于运输和施工,陆地光缆每 2~4 km 会进行一次熔接,每次熔接会带来额外的损耗,现有标准 G.652 陆地光缆熔接的平均损耗要求不大于 0.06 dB^[6]。若采用 TTE 放置在核心机房的模式,陆地光缆的高损耗将会严重劣化端到端传输线路的光信噪比(OSNR)。为提升陆缆干线传输性能,国内开始使用性能接近的 G.654.E 光纤。这种光纤的平均损耗系数已经优化至 0.19 dB/km,同时,其熔接损耗平均值也控制在低于 0.035 dB 以下。

文献[7]以一条长度为 6 100 km 的国际海缆系统为基础,研究了将海缆系统通过若干段陆缆延伸到核心机房后再进行电终端的建设模式。考虑到陆地光缆系统的光放站设置受限,大部分陆地骨干光缆段的间距为 60~90 km。为了简化计算,通常假定所有跨段的间距为 75 km。在保持系统端到端光传输系统性能或设计容量不变的条件下,如果增加若干跨段的陆缆,海缆系统设计要进行相应调整。由于通过增加入纤功率来提高 OSNR 会导致 Q 值下降,因此改变海底中继器设计间距被认为是最可靠的方法。TTE 海陆缆

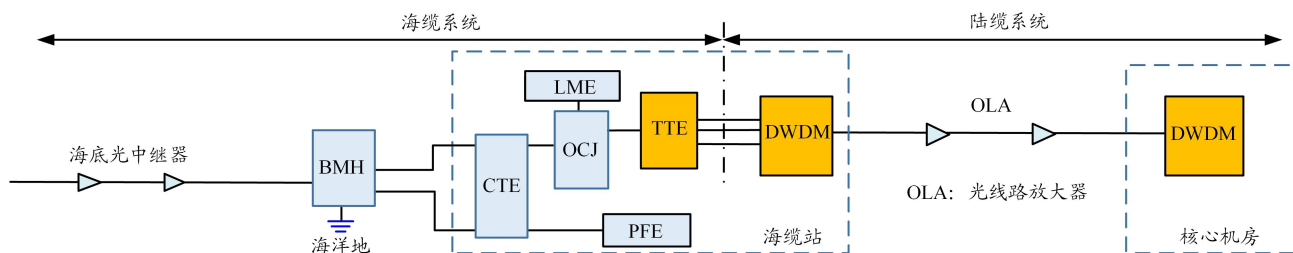


图 2 传统海缆站及陆缆延伸系统配置图

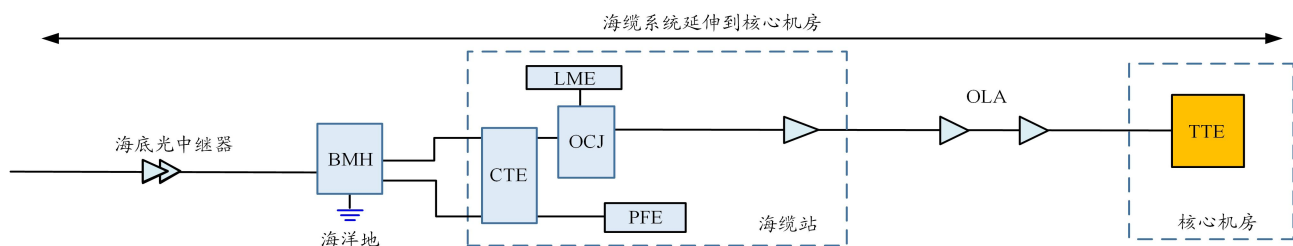


图 3 TTE 设备放置在核心机房示意图

传输系统示意图如图4所示。

在增加不同陆缆跨段数量场景下,海陆缆系统联合设计对海底中继器数量的影响分析如表2所示。可以看出,随着陆缆跨段增加,当陆缆采用 G.652.D 光纤时,海底中继器数量增加比较明显;而当采用 G.654.E 光纤时,海底中继器数量的增加幅度会得到较大程度的控制。但不管采用 G.652.D 光纤还是 G.654.E 光纤做陆地延伸,通过增加海底中继器的方式,海陆缆系统联合设计均可以实现与原先单海缆系统相同的传输性能和设计容量。

表2 不同场景下海陆缆系统联合组网的影响

陆缆类型	增加陆缆跨段数后海底中继器的数量变化/个			
	1 段陆缆 (75 km)	2 段陆缆 (150 km)	4 段陆缆 (300 km)	6 段陆缆 (450 km)
G.652.D 光纤	2	5	11	18
G.654.E 光纤	1	3	5	8

3.1.2 经济可行性

考虑到增加海底中继器的成本相对较为昂贵,如果陆缆跨段数超过1段,建议将水下一性增加的成本与陆地 DWDM 设备初期及后期扩容节省的投资进行综合经济评估。

本文以一条4纤对海缆为例进行经济评估。假设将 TTE 放置在核心机房,海缆系统需要延伸6段陆缆,分析并对比在端到端系统中,所需增加的投资与节省的投资。增加/节省的投资情况如表3所示。如果采用 G.654.E 光纤,需要增加8个海底光中继器,按280万元/个估算。G.654.E 光纤价格要高于 G.652.D 光纤,部署 G.654.E 光纤需按1万元/千米补偿差价。由于不需要陆地 DWDM 设备延伸,可以节省 DWDM 设

备的投资,并减少相应的机房空间占用和功耗。按照每纤对 16 Tb/s 的配置,DWDM 设备4纤对共640个100G。每个100G的估算成本为15万元。此外,DWDM 设备需要占用核心机房及海缆站共16个机架,每个机架的成本为15万元。考虑到 DWDM 设备满配功率的50%,本文计算了25年的功耗,并按照60万元/(10³ MW)的费用进行估算。因此,采用 TTE 放置在核心机房的建设模式可以使端到端光传输系统节省的投资要远高于增加的投资,证明了该模式在经济上的可行性。

本文分析的海缆系统距离为6100 km。对于更短的系统,例如3000 km 以内的海缆系统,其水下跨段的设计损耗会降低,更接近陆缆的跨段损耗水平。因此,采用更短路径的系统在进行海陆缆联合设计时,所需的海底光中继器数量增量相对较小,从而带来更高的经济效益。

3.2 提升海缆站效能、效率

核心机房的 PUE 指标优于海缆站,因此将 TTE 放置在核心机房,可以提升能源使用效率。同时,TTE 还可以与其它陆地通信系统共享核心机房空间,从而避免机房空间长时间使用率不高的问题。

海缆站通信机房的空间和电源需求将降低至原来的30%,因此需要对海缆站的结构进行相应调整。具体来说,通信机房、弱电间、气瓶间、变配电室、备件间、高压室、消防水泵房等功能区域的面积都将大幅缩减。随着蓄电池容量的提升,电源需求大幅降低,海缆站可考虑不配置柴油发电机,仅依靠蓄电池作为电源灾备;同时,可利用海边的风、光等为蓄电池提供绿色能源。另外,如果海缆站只需一层建筑,还可节省电梯的空间和电源。这样,海缆站的规模可以从以往的中型通信机房缩减到小型机房,本文称这种海缆站

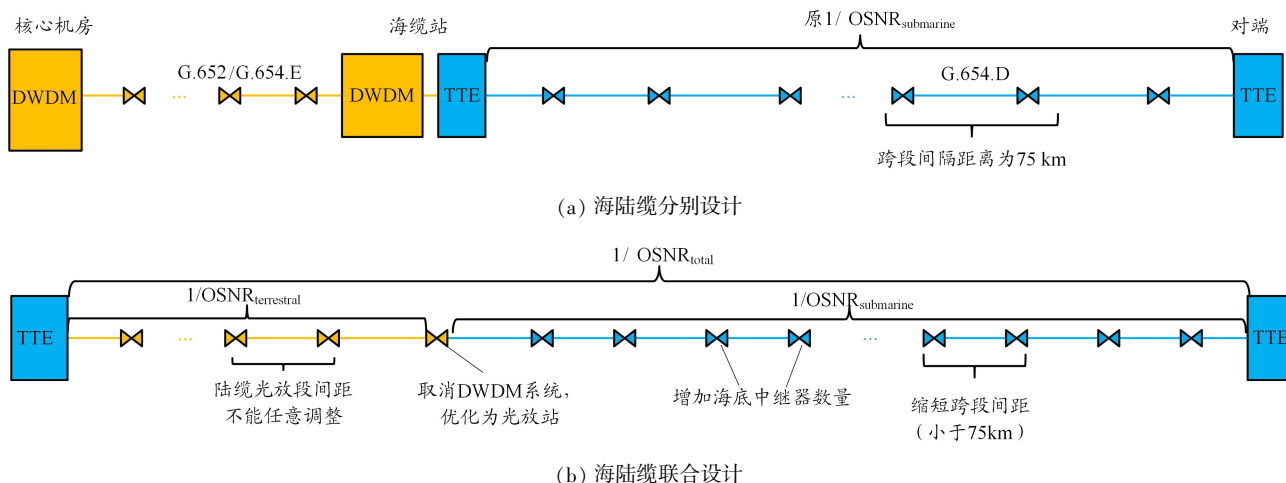


图4 TTE 海陆缆传输系统示意图

表3 增加/节省投资对比表

	类别	单位	数量	单价/万元	小计/万元	合计/万元
增加投资	海底光中继器	个	8	280	2 240	2 690
	G.654.E 光纤差价	km	450	1	450	
	DWDM 设备	100G 波道	640	15	9 600	
节省投资	DWDM 机架空间	个	16	15	240	10 788
	DWDM 功耗	10 ³ MW	15.8	60	948	

为紧凑型海缆站。

TTE 放置在核心机房,与核心机房内其它通信系统共用维护力量,人员使用效率大幅提升。随着通信机房智能化程度的不断提升、网管系统逐步云化,可考虑将紧凑型海缆站优化为无人值守机房,进一步缩减海缆站人员工作、休息的区域,同时降低海缆站对交通、生活供水等的要求。

3.3 增加海缆站数量,分散海缆路由

紧凑型海缆站专注于部署开放海缆通信系统线路,可以按照小型机房或无人值守机房的标准进行建设,这将大幅降低固定资产投资和后期的运行维护费用,同时有望简化工程立项的审批流程。由于紧凑型海缆站用地面积小,对环境的影响更小,选址限制也大幅降低,因此可以有效提升海缆站的规划建设效率,实现快速部署。

我国已建成了全球最大规模的信息通信网络,光缆覆盖到了绝大部分行政村。完善的陆地光缆系统和漫长的大陆海岸线为我国国际海缆登陆提供了有利的基础。考虑到当前海缆站的数量和分布情况,以及提高网络通信稳定性和可靠性的需求,建议在我国增加紧凑型海缆站的部署。每个海缆站一般登陆 2~3 条海缆,并且海缆站之间应隔开一定的物理距离,以便分散近海段海缆路由,减少多条海缆同时中断的风险。

3.4 海缆登陆避开人类活动活跃区域

紧凑型海缆站的选址受到陆地条件的限制,因此在选择海缆登陆地点时,需要综合考虑近海沿岸的自然条件和人类活动的影响。理想的选址应具备以下特点:近海及沿岸无岩礁、流沙,不易受到火山、地震、海啸和洪水灾害的影响;海岸浅滩较短,无突然深陷的地点;沿海全年风浪平稳,海流和潮流较弱;沿岸海洋渔业和水产养殖活动较少,海缆路由应尽量避免张网捕鱼作业区;近海和登陆滩地附近无港口、锚地、军事等大型建筑设施,同时应避免水管、油气管、海缆等海底障碍物的存在^[8]。

航运和渔业是近海海缆中断的主要因素,因此建议未来海缆站在选址时重点考虑避开拖锚、拖网、张

网类捕捞作业等人类活动频繁区域,以降低海缆中断频率、减少维护成本并提升我国国际通信网络安全。

4 结束语

本文从我国大陆当前海缆站布局及其面向未来需求的挑战出发,结合开放海缆通信系统的发展趋势,提出了一种将开放海缆通信系统线路部分单独放置在海缆站的建设模式,并深入探讨了该模式的技术可行性和经济可行性。这种建设模式对于快速优化海缆站的部署,以及响应国家海缆顶层设计具有重要的实际意义。

分散海缆近海段的路由将对现有的海缆安全管理模式构成新的挑战,这要求我们重新评估并优化海缆的安全管理策略。无人值守海缆站的安全性和运维效率问题亟待深入研究。目前,国内光缆网络主要还是以 G.652.D 光纤为主,为了提升网络性能,G.654.E 光纤的大规模应用需要进一步得到推广和应用。海缆系统和陆缆系统在设计指标和要求上存在差异,这提示我们在未来的研究中需要综合考虑两者的特点,探索统筹优化的可能性。

参考文献:

- [1] 国家互联网信息办公室. 数字中国发展报告 (2022 年)[EB/OL]. [2023-05-23]. http://www.cac.gov.cn/2023-05/22/c_1686402318492248.htm, 2023.
- [2] 刘兴华,叶胤. 海底通信光缆水下设备供电系统设计[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 77-82.
- [3] 陈晓明,高军诗,朱晓卿. 海底光缆建设维护提升研究[J]. 信息通信技术, 2021, 15(4): 79-84.
- [4] 叶胤,王超,莫仁芸. 海底光缆通信系统技术发展分析[J]. 广东通信技术, 2021(1): 19-23.
- [5] ITU-T. Transverse compatible DWDM applications for repeatered optical fibre submarine cable systems, G.977.1[S]. Geneva: ITU, 2021.
- [6] 工业和信息化部. 通信线路工程设计规范, GB 51158-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [7] 叶胤,刘杰. 海缆陆缆光传输系统联合设计的研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(12): 50-54.
- [8] 张漱纯. 海缆登陆站(点)的选择[J]. 邮电设计技术, 2003(9): 28-31.