

微小卫星技术的发展与思路

Development of Smallsat Technology and Its Thinking

尤 政 龚 克 陆建华

(清华大学宇航技术研究中心 北京 100084)

随着微电子技术的发展,特别是近年来以微型机电系统(MEMS)和微型光机电系统(MOEMS)为代

表的微米纳米技术的发展,使得微型卫星、纳型卫星甚至皮型卫星的实现成为可能。

若以系统工程观点分析,小卫星要成势、形成规模、占领市场,须对运载、平台、有效载荷及地面站建设等进行全盘的筹划和考量。上海在空间技术方面有数十年发展历史,积累了一定的成功经验。它们又同属一个机构——上海航天技术研究院的领导、管辖,有利于技术资源的合理配置和共享。

3. 关于产业策略

(1) 建议由经委牵头,制定务实的小卫星产业策略。小卫星的立项,起点要高、选点要准,要充分利用上海现有的平台技术、研制基础及卫星研制中的“三总”经验(即总设计、总安装、总测试),借鉴高科技、大学等单位的资源,力争建成几种通用化、系列化和模块化的具有上海特色的平台,以适应不同种类有效载荷的配置,加快应用小卫星的发展。

(2) 就目前国外小卫星的发展水准及国内“各自为战”的状况,上海要注意扬长避短,不搞重复研制,不在“原地踏步”,要有另辟捷径的视角,主动走出去,寻找“抓总”或“配套服务”的切入点。

(3) 积极跟踪、研究国外先进的小卫星技术,全方位、多层次、多渠道地开展国际空间技术的交流与合作,或引进、或购买、或组装、或转让,多头并进,借助外力,壮大自身。这方面的运作,上海自有传统,也不乏成功先例。今天上海的造船业已颇具规模,但它早先走的就是一条从“租船”到“买船”再到“造船”的务实之路;家电行业也是如此,先组装、仿造,再推陈出新,形成自己特色,短短10年走完了国外同行数十年的历程。

四、几点启示

现代小卫星的发展给予我们下列几点启示。

1. 目前我国的小卫星研制正处于起始阶段,却已“多处开花”。航天系统、大学、中科院等部门多在行动,这是市场经济的必然,有利于科研成果的转

化,有利于优胜劣汰竞争机制的形成,也为上海积极参与小卫星的研制、建设提供了契机。

2. 作为现代高新技术结晶的小卫星事业,须有一套与之相适应的运行机制和管理模式予以支持。英国萨瑞大学小卫星中心就是集设计、制造、管理、技术转让等于一身的高效率研制机构。其成功经验和先进的管理方式值得我们借鉴。

3. 现代小卫星的研制宜实行“两条腿走路”的方针。一条腿是基于已有技术基础,充分论证、优化设计,确保高产优质,发展急需的小卫星及其星座系统;另一条腿是利用国外新技术为主,结合自主开发,深入研究、论证小卫星如何用于分布式星座系统,抢占技术制高点,为未来的天基信息系统的建设奠定基础。

4. 结合我国实际,宜以军用为契机,以军带民,共同开发,努力探索出一条技术上有继承、能发展,军民兼顾、技术共享,既经济又快速的小卫星发展之路。

5. 在我国加入WTO之际,空间项目合作与交流的机会将大大增加。小卫星由于其独特的优势,合作的成功率更高。上海可以航天技术研究院为依托,运用其成熟的技术和经验,担当起欧美与东南亚及非洲诸国之间的“中介”角色。

主要参考文献

- [1] 唐留根. 现代小卫星发展概述. 上海航天, 1999(6)
- [2] 黄志澄. 现代小卫星与卫星小型化. 科技导报, 1998(2)
- [3] 闵桂荣等. 赴英、意小卫星技术考察总结报告. 航天技术通讯, 2000(1)
- [4] 王明远. 展望小卫星的发展及其启迪. 空间电子技术, 1998(3)
- [5] 肖敏. 产学研“链接”小卫星. 科技日报, 2000-7-15
- [6] 林来兴. 当今小卫星技术水平和发展我国小卫星应用的对策. 科技导报, 1998(2)

(责任编辑 王宏章)

80年代以来,Draper 实验室(美)、JPL(美)、LIT-
TON 公司(美)、LITEF 公司(德)、SAGEM 公司(法)、
AD 公司(美)、Vector 公司(俄)等相继开展微硅陀
螺、微硅加速度计等微型惯性仪表的研究,形成产
品,进而进行微型惯性测量组合的研究。Draper 实
验室声称已做出了1立方英寸见方的微型惯性测量组
合,Draper Lab 称其微机械陀螺的性能在开环低频
带试验中,温度范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$,未补偿的偏
置稳定性为 $1^{\circ}/\text{s}$,标度因子重复性优于0.1%。NASA
正在研制新一代高密度存储,同样的存储面积存储
容量增加了近百倍。所有这些技术的发展都将使卫
星的集成度极大提高,体积大幅度减小。微型卫星、
纳型卫星甚至皮型卫星的研究已成为航天技术研
究的热点。

航天市场的需求也刺激了微小卫星技术发展,
按目前通用的现代小卫星分类方法,可以看出现代
小卫星的制造成本随制造周期的增加而增加,技术
先进性随制造周期的增加而下降。因此,具有重量
轻、性能好、研制周期快、造价低的现代小卫星,特
别是纳型卫星会给航天技术的发展带来了新的机
遇。它将改变人们对航天事业高投入、高风险的传
统观念,使更多的科技人员献身于航天事业,更多
的新技术更快地应用于航天。事实上,现代小卫星
已经在通讯、遥感、电子侦察等领域获得了广泛的
应用,受到航天、军事、工业界及普通研究机构的普
遍关注,成为当前航天技术发展的重要方向之一。
发达国家都十分重视微小型技术在航天领域的应
用并制定了相应的发展规划,如智能卵石计划、新
千载计划、铱星计划、GLOBE STAR 计划等,并显示
出良好的技术、经济和社会效益。

一、国外微小卫星的研究

1. 国外主要的微小卫星研制与发射情况

美国 1996年9月美国公布了冷战结束后的国
家航天政策文件,明确提出:通过支持一个强大、稳
定和平衡的国家航天计划,保持美国对世界航天的
领导作用;民用航天研究发展重点是空间科学、对
地观测、载人航天和航天技术开发与应用;在国家
航天安全方面,要强调加强空间监视;积极鼓励开
展商业航天活动,以增强美国经济竞争力;针对原
有空间科学和载人航天技术发展战略,采取“更小、
更快、更好、更省”的新战略。

Clementine 月球探测器是美国 Naval Research
Laboratory (NRL)研制的,1994年1月25日发射,绕月
飞行重量为233kg,直径1.14米,长1.88米,研制周期
22个月,耗资5 500万美元。其姿态确定与控制系统
满足整个飞行过程4种不同轨道(地球轨道、地一月
转移轨道、月球轨道和近地小行星轨道)、6种制导

模式和多种控制结构的要求,重量仅为13kg,功耗为
42w,控制精度可达 0.05° ,工作寿命为2年。该探测器
从元器件设计到技术管理方法都采用了先进的技术。
Clementine 月球探测器进行了23项新技术试验,
其中采用了许多当今最先进的部件,如氢镍电池、
砷化镓太阳电池、低成本轻型反作用轮及碳纤维结
构等微型、轻量化、低成本、高性能的商用元部件。
同时该探测器具有超强的软件功能,采用了专家系
统,大大提高了航天器的自主能力。在研制管理上
采用了“并行工程”管理模式。该星所采用的二级
管、晶体管和集成电路等商用器件,按军标筛选仅
淘汰了4%、3%和1%。该探测器成功地向地球发回
了380万张月球图像。

美国空军为提高军用卫星技术水平,计划进行
一系列技术试验,其中“空间试验平台”(STEP)和
“微型敏感技术集成”(MSTI)两项技术试验具有相
当高水平。STEP 系列是把多项空间小型试验以模块
方式组合起来进行空间在轨试验。该系列卫星由美
国 TRW 公司承担,该公司的产品以标准模块为基
础,根据空间试验任务的要求,可在短时间内完成
卫星的总装与测试。1990年以来已发射4颗(其中两
颗因发射故障未能按要求入轨)。STEP 卫星重
180kg $\sim$ 800kg、三轴稳定控制、指向精度为 $0.35^{\circ} \sim$
 0.5° 、低轨运行、设计寿命1 $\sim$ 3年。由于是技术试验
卫星,单独携带的有效载荷质量都较小,约占整星
重量的16% $\sim$ 34%。该系列还计划发射 STEP—4和
STEP—5两颗星,采用金牛座火箭按一箭双星方式
发射。

MSTI 系列试验卫星是为未来天基战区导弹监
测系统进行的空间飞行试验,目的是为了提
高监测系统对战区战术导弹的跟踪能力和导弹命中点的
预报精度,现已发射3颗,采用三轴稳定控制方式。
MSTI—1于1992年11月21日发射,轨道高度331/
444km,倾角 96.8° 。星上载有小型相机和遥感器,试
验目的是探测中近程导弹飞行状态,已获得10万幅
图像。MSTI—2于1994年5月9日采用侦察兵火箭发
射,轨道高度357/448km,倾角 96.9° ,重量117kg。星
上装有1台硅化铂相机和1台铟化铂相机,试验目的
是跟踪固定目标和导弹。MSTI—3卫星1996年5月16
日发射,轨道高度为325/425km、倾角 97° 、太阳同步
轨道、重183kg。该卫星控制技术是高水平的,采用90
年代先进的1750A 计算机,执行机构采用3个反作用
轮,星上装有 GPS 接收机,定轨精度100m,速度精度
0.1m/s。

SMEX 系列小型空间探测器计划是 NASA 于
1988年5月17日开始的,它为天体物理学和空间物理
学进行有针对性的空间科学考察提供了机会。NASA
戈达德空间中心负责管理和执行这项计划,UV—
SMEX 是其中的一个飞行任务。该卫星采用无陀螺

80年代以来,Draper 实验室(美)、JPL(美)、LIT-
TON 公司(美)、LITEF 公司(德)、SAGEM 公司(法)、
AD 公司(美)、Vector 公司(俄)等相继开展微硅陀
螺、微硅加速度计等微型惯性仪表的研究,形成产
品,进而进行微型惯性测量组合的研究。Draper 实
验室声称已做出了1立方英寸见方的微型惯性测量
组合,Draper Lab 称其微机械陀螺的性能在开环低频
带试验中,温度范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$,未补偿的偏
置稳定性为 $1^{\circ}/\text{s}$,标度因子重复性优于0.1%。NASA
正在研制新一代高密度存储,同样的存储面积存储
容量增加了近百倍。所有这些技术的发展都将使卫
星的集成度极大提高,体积大幅度减小。微型卫星、
纳型卫星甚至皮型卫星的研究已成为航天技术研
究的热点。

航天市场的需求也刺激了微小卫星技术发展,
按目前通用的现代小卫星分类方法,可以看出现代
小卫星的制造成本随制造周期的增加而增加,技术
先进性随制造周期的增加而下降。因此,具有重量
轻、性能好、研制周期快、造价低的现代小卫星,特
别是纳型卫星会给航天技术的发展带来了新的机
遇。它将改变人们对航天事业高投入、高风险的传
统观念,使更多的科技人员献身于航天事业,更多
的新技术更快地应用于航天。事实上,现代小卫星
已经在通讯、遥感、电子侦察等领域获得了广泛的
应用,受到航天、军事、工业界及普通研究机构的普
遍关注,成为当前航天技术发展的重要方向之一。
发达国家都十分重视微小型技术在航天领域的应
用并制定了相应的发展规划,如智能卵石计划、新
千载计划、铱星计划、GLOBE STAR 计划等,并显示
出良好的技术、经济和社会效益。

一、国外微小卫星的研究

1. 国外主要的微小卫星研制与发射情况

美国 1996年9月美国公布了冷战结束后的国
家航天政策文件,明确提出:通过支持一个强大、稳
定和平衡的国家航天计划,保持美国对世界航天的
领导作用;民用航天研究发展重点是空间科学、对
地观测、载人航天和航天技术开发与应用;在国家
航天安全方面,要强调加强空间监视;积极鼓励开
展商业航天活动,以增强美国经济竞争力;针对原
有空间科学和载人航天技术发展战略,采取“更小、
更快、更好、更省”的新战略。

Clementine 月球探测器是美国 Naval Research
Laboratory (NRL)研制的,1994年1月25日发射,绕月
飞行重量为233kg,直径1.14米,长1.88米,研制周期
22个月,耗资5 500万美元。其姿态确定与控制系统
满足整个飞行过程4种不同轨道(地球轨道、地一月
转移轨道、月球轨道和近地小行星轨道)、6种制导

模式和多种控制结构的要求,重量仅为13kg,功耗为
42w,控制精度可达 0.05° ,工作寿命为2年。该探测器
从元器件设计到技术管理方法都采用了先进的技术。
Clementine 月球探测器进行了23项新技术试验,
其中采用了许多当今最先进的部件,如氢镍电池、
砷化镓太阳能电池、低成本轻型反作用轮及碳纤维结
构等微型、轻量化、低成本、高性能的商用元部件。
同时该探测器具有超强的软件功能,采用了专家系
统,大大提高了航天器的自主能力。在研制管理上
采用了“并行工程”管理模式。该星所采用的二级
管、晶体管和集成电路等商用器件,按军标筛选仅
淘汰了4%、3%和1%。该探测器成功地向地球发回
了380万张月球图像。

美国空军为提高军用卫星技术水平,计划进行
一系列技术试验,其中“空间试验平台”(STEP)和
“微型敏感技术集成”(MSTI)两项技术试验具有相
当高水平。STEP 系列是把多项空间小型试验以模块
方式组合起来进行空间在轨试验。该系列卫星由美
国 TRW 公司承担,该公司的产品以标准模块为基
础,根据空间试验任务的要求,可在短时间内完成
卫星的总装与测试。1990年以来已发射4颗(其中两
颗因发射故障未能按要求入轨)。STEP 卫星重
180kg~800kg、三轴稳定控制、指向精度为 $0.35^{\circ} \sim$
 0.5° 、低轨运行、设计寿命1~3年。由于是技术试验
卫星,单独携带的有效载荷质量都较小,约占整星
重量的16%~34%。该系列还计划发射 STEP—4和
STEP—5两颗星,采用金牛座火箭按一箭双星方式
发射。

MSTI 系列试验卫星是为未来天基战区导弹监
测系统进行的空间飞行试验,目的是为了提高监测
系统对战区战术导弹的跟踪能力和导弹命中点的
预报精度,现已发射3颗,采用三轴稳定控制方式。
MSTI—1于1992年11月21日发射,轨道高度331/
444km,倾角 96.8° 。星上载有小型相机和遥感器,试
验目的是探测中近程导弹飞行状态,已获得10万幅
图像。MSTI—2于1994年5月9日采用侦察兵火箭发
射,轨道高度357/448km,倾角 96.9° ,重量117kg。星
上装有1台硅化铂相机和1台铽化钨相机,试验目的
是跟踪固定目标和导弹。MSTI—3卫星1996年5月16
日发射,轨道高度为325/425km、倾角 97° 、太阳同步
轨道、重183kg。该卫星控制技术是高水平的,采用90
年代先进的1750A 计算机,执行机构采用3个反作用
轮,星上装有 GPS 接收机,定轨精度100m,速度精度
 0.1m/s 。

SMEX 系列小型空间探测器计划是 NASA 于
1988年5月17日开始的,它为天体物理学和空间物理
学进行有针对性的空间科学考察提供了机会。NASA
戈达德空间中心负责管理和执行这项计划,UV—
SMEX 是其中的一个飞行任务。该卫星采用无陀螺

研究项目,有10所大学参加该项研究,其中8个是相互合作研究。

另外 NASA、JPL 还支持了 MNTD(Micro/Nanospacecraft Technology Development)计划,由加州理工大学的 JPL(Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology)负责下一代新型微小卫星与纳型卫星及其相关技术的研究。

4. 皮型卫星

2000年2月6日至10日,美国 DARPA 和 Aerosapce 公司成功地发射了世界上第一颗皮型卫星,重量仅245克。而且它是从美国 STANFORD 大学研制的23公斤的微型卫星(OPAL)上分离发射的。主要是试验 MEMS RF 技术。

二、国内微小卫星的研究

国内各研究院所与高等院校十分重视微小卫星方面的研究,虽然刚刚起步,却发展迅速。其主要工作如下。

1. 500公斤以下的小卫星的研制

航天科技集团第五研究院的“实践五号”实验卫星于1999年发射成功并进行预期的实验研究。另外 HY—1海洋小卫星、技术侦察演示验证小卫星、灾害与环境监测预报小卫星星座、雷达侦察小卫星等均在工程实验阶段。

2. 100公斤的微小卫星的研制

在“863—2”的支持下,哈尔滨工业大学与航天科技集团第五研究院合作正在加速100公斤量级的“探索一号”立体测绘微小卫星的研制,预计2001年底发射。

3. 50公斤的微型卫星的研制

清华大学、航天机电集团与英国 SURREY 大学合作,已完成一颗50公斤的三轴稳定微型卫星的研制,它具有光学遥感、信息的存储转发、软件无线电实验等功能,并于2000年6月成功发射。现运行正常,获得了大量的遥感图片。

中国科学院上海冶金所与航天科技集团第八研究院正在研制一颗50公斤量级的存储转发型通讯卫星。

4. 10公斤的纳型卫星的设计

在“863—2”的支持下,清华大学宇航中心与微米/纳米技术研究中心、中国科学院上海冶金所、电子部13所,已开展纳型卫星的设计与关键技术攻关,1999年12月清华大学的纳型卫星通过了“863—2”专家组的评审,并得到了国内外同行的关注。

另外,航天科技集团第八研究院、中国科学院空间中心、北京航空航天大学、国防科技大学、总装备部指挥学院等均开展了微小卫星关键技术研究并取得了众多科研成果。

三、国内外对比分析

现代微小卫星技术的发展主要有两个特点:一是以高新技术的发展为推动,即以提高“功能密度”为核心的系统小型化、轻量化和低功耗技术;二是采用全新的设计思想和概念,即一体化、集成化、模块化、商用器件化和功能软件化。

80年代中期以来,伴随着世界高新技术的迅速发展,微小卫星技术领域获得了雄厚的技术基础和广阔的拓展空间。进入90年代以来,对微小型卫星的研究进一步升温,各国政府、国际组织、跨国公司纷纷准备发展自己的微小型卫星系统,以图在未来的激烈竞争中领先一步。截至1995年,世界共发射小卫星约300颗,其中80%的小卫星重量在100kg以下。目前,有关微小型卫星网络系统的规划国际上有几十种,比较著名的有:Motorola 公司的 Iridium 系统;波音公司和比尔·盖茨投资的 Teledesic 系统,预计2002年投入商业运行,并在2000年向美国国会提出 SpaceNet 的庞大发展计划。此外,纳米级卫星技术得到发展,并且已经出现像 Munin、ASUSat—1、Bitsy、SNAP—1等成功的先例。

世界微小卫星技术的发展主要有两种模式。

一种是以美国为代表的模式。从早期军方的导弹预警拦截系统,到海湾战争中的 Macsat 多址通信卫星系统和近年来的新盛世深空计划(New Millennium Deep Space),再到 NASA 主持的,作为现代小卫星典型代表的 Clementine 计划,以及不断从月球传回惊人消息的 Lunar Prospector 探测器,美国始终在微小型航天器领域走在世界前列。军方与商业公司之间相互配合、彼此牵动、共同发展;强调发展具有创新技术的试验型卫星,以期跳跃式地提高微型航天器的智能化和功能密度。商业公司则瞄准星座的开发应用,以图抢占市场。在发展原则方面,NASA 提出的“faster, better, cheaper”的指导方针,基本上已得到国际同行的认可。以铱星(Iridium)系统为例,其批生产周期仅为22天。在近年的 NEAR(Near Earth Asteroid Rendezvous)计划中,为适应市场竞争,又提出了“faster, cheaper, increased risk”的商业化发展原则。

另一种是以“欧空局”、日本、英国 SSTL 等为代表的模式。主要特点是充分利用成熟的先进技术,利用自身微型系统技术方面的能力,大胆采用商品化部件,从而降低成本、缩短周期,产品以实用卫星为主。以日本为例,其电子、计算机、材料等方面的技术处于领先地位,但空间技术比较落后。1996年开始的 Hyper-Sat 计划则瞄准国际微小型卫星先进技术,将发展目标定位于高性能、高集成度、增强自控能力、设计制造自动化。这些目标的制定均以充分发挥本国自身技术优势为出发点。英国 SSTL 提出通过最大

限度地使用 OTL 技术(off-the-shelf)来达到加快研发周期、降低计划成本的目的。目前已经开发出许多商品化部件,比如用于存储转发通信、对地观测、星上数据压缩、GPS 定轨的 UoSAT 系列等。

微小卫星技术在过去、现在和可预见的未来的发展可概括地用3个技术发展阶段来表征。第一个阶段是简单的卫星小型化技术,采用了微小卫星的总体设计和与其相关的研究、管理、设计、发展体制,其典型代表为英国萨瑞大学早期的微小型卫星,但其功能还不能满足军事和商业竞争的需要。第二个阶段以高性能部件的微型化和航天器总体设计的一体化特征,其典型代表为美国 NASA 的 Clementine 小型月球探测器, Motorola 公司的 Iridium 系统和现代的萨瑞大学早微小型卫星(特别是与清华大学、航天机电集团联合研制的“航天清华一号”)。以 NASA 的“faster, better, cheaper”的指导方针为目标,微小卫星具有了日益增长的军事和商业应用竞争价值,也孕育了新一代的微米、纳米加工技术。第三个阶段以微米、纳米技术为基础,研制以微硅卫星为代表的纳型/皮型卫星,同时也将实现更高度的三维集成化和一体化;但这一发展目前尚未展示出令人信服的军事和商业应用。

(上接第 37 页)

经淋巴结)汇合点后的第一段淋巴管的中点。这段淋巴管的充、排反映了汇合的淋巴管所连系器官的工作状态。这也是针灸一个穴位往往可以收到对一个以上器官疾病的治疗效果的原因。当然并不是凡具有此种条件的位点都可以作穴位,因有的地方有骨块或有神经干、大血管妨碍,不适合作穴位。

(6) 进针深度与提插范围 由于位于穴位处的淋巴管在皮下的深度和淋巴管的粗细不同,所以在任一个特定的穴位进行针刺时,都有一个进针深度与针尖在皮下上下活动幅度的要求。这表明,达不到深度,针刺不到淋巴管;而在淋巴管的直径深度范围内,可施以提插等某些必要的行针手法操作。^[5]

(7) 针感 在进行针刺治疗的过程中,医生和患者都有一定的感觉。得气时,医生会感到针下沉紧,患者会感到酸、麻、胀、痛等。针下沉紧是由于钢针刺入淋巴管壁,使淋巴管产生应激反应,引起淋巴管壁平滑肌细胞收缩而夹紧针身所致。医生在行针时,根据患者的情况不同,往往施用提插、捻转、搓、摇、颤、捣、弹等手法,使患者产生种种不同的感觉。针刺穴位是一种外界能量的输入。它可使位于淋巴管壁上的感觉神经纤维产生一个动作电位,动作电位沿传入神经传到自主神经系统的高级中枢下丘脑,下丘脑再将感觉信息传给大脑皮质的内脏感觉区,不同的针刺手法以不同的形式向穴位输入了不同的能量,使感觉神经获得了不同的信息,这些信息传给大脑皮层内脏感觉中枢。经过分析加工,就使人产生了对针刺的各种各样的不同感觉。^[5]

微小型一体化卫星技术的发展与一个国家的基础工业水平和科技发展水平密切相关,因此,应该选择适合我国国情的具体发展道路。

进入90年代以来,有关微小卫星的研究工作逐步在我国展开,但从总体来说,我国微小卫星的基础研究相对地落后于大型卫星,至今也没有自主开发的微小卫星。在这种形势下,发展我国的微小型航天器研究有两条发展路线。一条是在我国大型卫星研究的良好基础上,在功能与结构简化的初级微小卫星技术的基础上,通过微小卫星所特有的研制周期短、升级更新快的特点,迅速升级为具有军事和商用价值的微小卫星技术;另一条是走国际合作的道路,引进国外先进技术与管理,结合国内航天技术基础,造就新一代微小型一体化航天器的基础技术,从而使我国在微小型航天器的发展上直接跃上第二个阶段。从萨瑞大学第一颗微小型卫星(由 NASA 发射)上天,到 Clementine 小型探测器的月球之旅,国外走过了15年的研究周期;而我们如果采取第二条发展路线,则有可能在5~10年中达到同样的高度,并在这一基础上,寻找迈上第三发展阶段的最佳切入点。

(责任编辑 王宏章)

通过以上几个部分的介绍、分析和讨论,可以得出一个结论:经络是由淋巴系统和自主神经系统的各一部分在结构和机能上进行有机结合而形成的一个独特系统。它在结构上,包括器官输出淋巴管到9条大淋巴干之间的器官间集合淋巴管,和结合在其上的交感神经纤维、内脏感觉神经纤维及在机能上与之相关的神经中枢。淋巴管与自主神经系统二者缺一不可,少了淋巴管,经络系统就少了感受器和效应器;少了自主神经系统,经络就少了感觉和整合中枢,人体的内环境、人和自然环境之间就不能协调一致形成一个整体。

另外,从医学的角度看,经络为我们提供了一条探索 and 干涉人体内部各个器官机能活动的途径。

主要参考文献

- [1] 王云祥编著. 实用淋巴系统解剖学. 人民卫生出版社, 1984
- [2] 李鸿勋等主编. 生理学. 河南医科大学出版社, 1997
- [3] 胡伯虎等主编. 现代针灸师手册. 北京出版社, 1990
- [4] 王立早编著. 子午流注传真. 江西科学技术出版社, 1989
- [5] 靳瑞, 黄结新. 针灸手册. 广东科学技术出版社, 1987
- [6] 楚宪襄等主编. 人体解剖学. 河南医科大学出版社, 1997
- [7] Solomon, Berg, Martin. Year 1999, 《BIOLOGY》 fifth edition, Saunders College Publishing Printed in the United States of America.

(责任编辑 蔡德诚)