

陈爱华, 许鹤华. 马尼拉俯冲带热结构数值模拟与地震意义[J]. 华南地震, 2014, 34 (2): 34-44. [CHEN Aihua, XU Hehua. Thermal Structure Numerical Simulation and Its Earthquake Significance of Manila Subduction Zone [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(2): 34-44.]

马尼拉俯冲带热结构数值模拟与地震意义

陈爱华¹, 许鹤华²

(1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室 广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2. 中国科学院边缘海地质重点实验室 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要: 研究马尼拉俯冲带地震分布的成因机制, 根据马尼拉俯冲带最新的莫霍面深度和地壳厚度等地质与地球物理资料, 选取3条典型剖面, 模拟俯冲带热结构。结果表明: ①俯冲带热结构主要受俯冲角度、俯冲速度和俯冲板块本身地质条件等因素影响; ②BB'剖面和CC'剖面属于热俯冲; ③当洋壳俯冲至软流圈边界时, 俯冲板块温度迅速升高, 容易形成地震活动。BB'剖面的俯冲角度和俯冲速度比CC'剖面小, 使得BB'剖面发生地震的深度更浅。俯冲洋壳底部温度比顶部低, 地震活动也持续到更大的深度。

关键词: 地震; 热结构; 数值模拟; 马尼拉

中图分类号: P738.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 02-0034-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.005

Thermal Structure Numerical Simulation and Its Earthquake Significance of Manila Subduction Zone

CHEN Aihua¹, XU Hehua²

(1. Guangzhou Marine Geology Survey, Guangzhou 510760, China;

2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: In order to study the formation mechanism of the manila subduction zone earthquakes distribution, based on the latest Moho depth and crustal thickness and other geological and geophysical dates, three typical cross-sections, this paper simulated thermal structure of subduction zones. The results show that: ①thermal structure of subduction zone is mainly affected by subduction angle, velocity and geological conditions of the plate itself; ②BB' and CC' are warm subduction; ③ When the ocean crust arrive the asthenosphere boundary, the plate temperature rises rapidly, forming dense earthquakes. BB' have a shallower earthquake because of the smaller subduction angles and velocity. Subducted oceanic crust temperature at the bottom is lower than the top, earthquakes have continued to greater depth.

Keywords: Earthquake; Thermal structure; Numerical simulation; Manila

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41376061)

作者简介: 陈爱华 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事热流测量和热结构数值模拟。

E-mail: 410496183@qq.com.

0 引言

马尼拉俯冲带地震活动频繁,有着明显区别于全球大部分地区的地震分布现象,对其地震分布规律和震源机制的研究,一直是个难题,也越来越受到地质学家的关注。热结构是深部构造演化的反映,对于研究俯冲带的地震分布有重要意义^[1-2]。马尼拉海沟是南海唯一的海沟,也是恢复南海原始海盆面貌、预测南海未来构造演化趋势的关键区域。因此,开展专门针对南海东部边界—马尼拉俯冲带的热结构、形成演化的地球动力学过程及其地震成因机制的研究,对完整认识南海形成演化过程具有非常重要的意义,成为解决南海的形成、构造演化等科学问题的关键^[3-4]。

通过分析俯冲板块年龄和热流值,马尼拉俯冲带属于热俯冲^[5-11]。陈爱华等^[12]尝试利用热俯冲探讨马尼拉俯冲带的地震分布规律。但马尼拉俯冲带的俯冲速度和俯冲角度比其它热俯冲大得多,会对俯冲洋壳的热结构分布产生很大影响^[13]。马尼拉俯冲带经历了复杂的地质演化过程,俯冲板块深度较深,同时存在陆壳、洋陆过渡带和洋壳,且不同区域的地质条件相差较大^[14]。高翔等^[15]选取马尼拉俯冲带南、北两条测线,根据两处俯冲板块的角度、年龄和运动特征的差异,分析了摩擦

热和剪切热对俯冲带热结构的影响,讨论俯冲板块发生脱水和部分熔融的位置。由于研究的问题不同,建立的模型和考虑的因素也不同,必然会导致模拟结果产生差异。近年来,通过对马尼拉俯冲带以及吕宋岛弧地球物理测量,获得了马尼拉俯冲带各构造单元莫霍面的形态、走向、梯度和地壳性质,为本文研究马尼拉俯冲带的热结构提供了最新的地球物理资料^[16]。本文综合马尼拉俯冲带的地震、古地磁、地热与层析成像等多种最新地球物理资料,选取3条典型剖面(位置见图1),构建地质模型和二维数值模型,根据剖面板块俯冲角度、速度等,应用有限元方法求解非线性瞬态热方程,得到马尼拉俯冲带的热结构特征,为进一步探讨马尼拉俯冲带地震成因机制提供热力学依据。

1 区域地质背景

马尼拉俯冲带是菲律宾海板块向南海板块俯冲所形成的汇聚边界,南起民都洛岛西南陆架的海底峡谷,北部延伸至北纬 $21^{\circ}15'$,并且逐渐与台湾造山带西部的变形相连接,空间上呈南北向弧形展布,断面呈不对称的“V”形,整体表现为向西“凸”形,形态为向东倾的贝尼奥夫带(图1)^[17-18]。

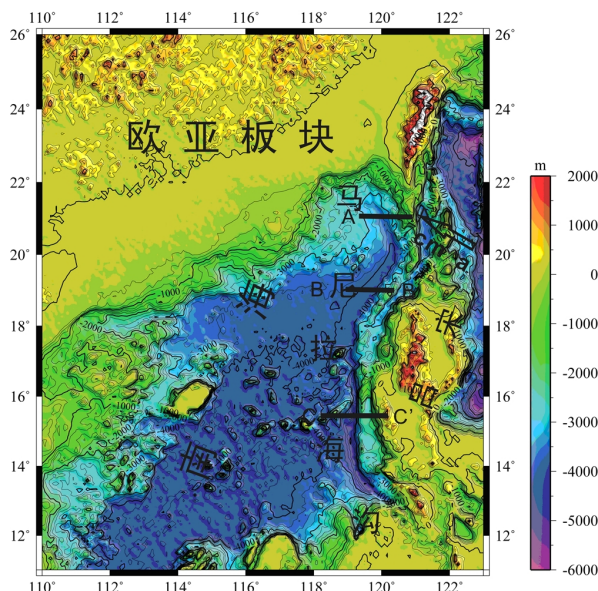


图1 马尼拉俯冲带地形图

Fig.1 Topographies maps of Manila subduction zone

马尼拉俯冲带主要受近东西向的挤压,大多数地壳内地震的主压应力轴接近E-W方向;菲律宾断层以北以NW向挤压应力为主,显示北部以

挤压逆冲为特征;菲律宾海槽及海沟地区,主压应力方向为NNW到NEE之间;南部较为复杂,存在NW、NE和近NS向挤压应力,NW向的挤压

应力主要来自菲律宾板块继续向西北的运动,以顺时针旋转为特征,且存在左旋走滑断层^[19-20]。

根据南海海底磁异常对比分析,多数学者认为,南海中央次海盆具有东西向对称分布的磁条带(11~5 d)^[6]。大陆裂谷及早期海底扩张发生于32~26 Ma,期间伸展应力场由SE向转为SSE向;24 Ma后,转为NW-SE向扩张,最后终止于15 Ma^[8,21]。在中新世,菲律宾海板块沿马尼拉海沟以7.0 cm/a的速度、NW55°方向斜向仰冲^[22]。Bautista等^[23]的研究也表明,菲律宾板块在吕宋岛北端以约7 cm/a,向南逐渐增大,在棉兰老岛的东南部最大,达到9 cm/a,欧亚板块则以1 cm/a的速度沿相近方向做同向运动,由于菲律宾板块速度比欧亚板块运动速度快,二者表现出强烈会聚。随着俯冲作用继续和菲律宾海微板块向西北方向移动,吕宋岛弧和欧亚板块发生碰撞^[22]。菲律宾海板块持续地向西北运动,碰撞作用加剧并向南扩展,马尼拉海沟的北端逐渐进入碰撞造山阶段,形成了非火山弧(增生楔)-弧前盆地(北吕宋海槽和西吕宋海槽)-火山弧(吕宋火山弧)构造组合^[24,25]。

2 计算模型

2.1 剖面特征与初始条件

马尼拉俯冲带是南海东部的俯冲边界,北部受台湾岛碰撞带的影响,南部由于巴拉望地块和菲律宾板块的作用,使得地质构造复杂。

AA'剖面位于台湾岛南部附近,沿20°N的纵波速度结构剖面显示,东沙隆起(116°~118°E)处地壳厚度约32 km,岩石圈厚度约95 km;往东至120°10'E处,地壳减薄至20 km,此段西部为陆坡区,东部南海东北部海盆是洋壳^[26]。由此可以推断,剖面AA'俯冲板块为陆壳,地壳厚度取为25 km,岩石圈厚度取95 km。

BB'剖面处于洋陆过渡带,往北逐渐为陆壳,往南则为南海中央海盆。沿18°N的P波速度结构剖面表明,海南岛之下的岩石圈厚度在80~85 km左右,从这里开始至南海中央海盆东部边缘(118°E),岩石圈厚90~95 km。在南海西北海盆至中央海盆之下(114°~119°E),地壳厚度减薄到5~6 km,莫霍面深度10 km,在马尼拉海沟(119°30'E)之下,莫霍面深度从10 km向40 km下降,但岩石圈厚度未见变化^[26]。

CC'剖面总体属于中央海盆区域,也处于古俯冲带的洋中脊附近,俯冲板块为洋壳。根据上地

幔三维S波速度结构结果:

(1) 沿北纬16°的速度剖面上,在东经114°附近,软流层顶界面深度最浅,在60 km左右,向东逐步变深,在东经120°最深,达到70 km左右,然后又变浅,达到60 km左右。

(2) 东经115°的速度剖面上,在北纬16°附近,出现一个隆起,此处软流层顶界面深度最浅,在60 km左右,北纬16°以北部分,向北逐渐变深,最深达到100 km左右,北纬16°以南部分,向南先是变深,在65 km左右,然后又逐步变浅,最浅达到60 km左右^[27]。

南海海盆的岩石圈厚度为65 km左右,最浅可达到60 km,向东到菲律宾海盆平均地壳厚度25.7 km,平均岩石圈厚度80 km^[28]。BB'和CC'两条剖面处的磁条带异常对比大概为12(约35 Ma)和6(约20 Ma),根据半空间冷却模型进行计算,两处剖面的岩石圈厚度约为77 km和58 km[7,29]。海沟两侧的台湾-吕宋岛地区的地壳厚度约为34 km,岩石圈厚度为70~80 km^[15,30]。根据层析成像结果可以推测,三条剖面处的板块俯冲深度均超过300 km^[31-32]。

根据南海及邻区莫霍面深度反演计算,南海板块在BB'剖面处地壳中的俯冲角度很平缓,大约3°,中央海盆莫霍面深度较厚,约为19~22 km,马尼拉俯冲带处地壳厚度为15~20 km;由于CC'剖面处靠近古俯冲洋中脊,中央海盆莫霍面深度减薄至10 km左右,马尼拉俯冲带地壳厚度约为10~15 km,地壳中的俯冲角度不大,约4°左右^[16]。Bautista等^[23]根据地震分布和震源机制解,推断南海俯冲板片表面形态,马尼拉俯冲带南海俯冲板片的形态复杂,底部的俯冲角度变化非常大,AA'剖面俯冲板块在浅部的俯冲角度约5°,深部约60°,至18°逐渐变缓,向南俯冲角度又逐渐变陡,至最南端的民都洛岛处,俯冲角度近乎垂直。

模型中选取的尺度较大,洋壳沉积层厚度较薄,且本文的模拟结果主要针对中深源地震,为方便建模和计算,忽略洋壳沉积层。在BB'剖面菲律宾以下的南海板块俯冲角度达到45°;CC'剖面南部剖面深部约65°,综合层析成像和地震剖面资料,本文中CC'剖面取为60°。

综合上述地质资料及分析,地质模型参数选取如表1所示。

2.2 模型参数

根据马尼拉俯冲带的地质资料,可以建立理论数值模型(图2)。为了研究俯冲板块的热结构及

表 1 地质模型参数

Table 1 Parameters of geology model

名称	地壳厚度/km	岩石圈厚度/km	浅部俯冲角度/(°)	深部俯冲角度/(°)	俯冲速度/(cm/a)
AA'	25	95	5	60	6
BB'	15	75	3	45	6
CC'	10	60	4	60	7
菲律宾板块	30	80	-	-	-

减少边界影响，本文中设定计算区域马尼拉海沟横向宽度为 1 000 km，模拟底边界深度为 600 km，板片俯冲深度为 300 km。陆壳模型的初始温度由稳态热传导方程给出，洋壳俯冲模型的初始温度根据菲律宾板块的年龄及厚度，通过半空间冷却

模型的计算方法给出。上边界温度取为 0℃，底边界处温度取为 1 600 ℃，海洋板块岩石圈边界和上覆板块岩石圈边界均采用半空间冷却模型计算出的温度分布作为边界条件，软流圈地幔左右边界均为自由边界。模型各参数如下表 2。

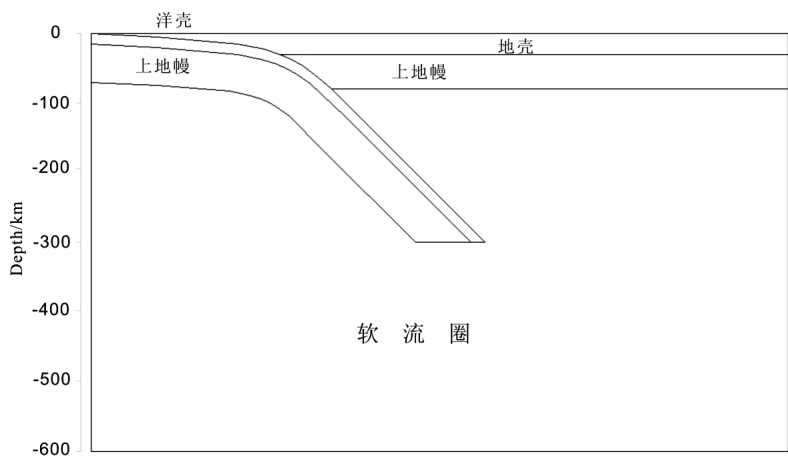


图 2 数值模型示意图

Fig.2 Schematic diagrams of numerical model

表 2 数值模型参数

Table 2 Parameters of numerical model

参数名	值
模型深度	600 km
模型宽度	1 000 km
模拟开始时间	15 Ma
模拟结束时间	0 Ma
地壳密度	2 800 kg/m ³
地壳热导率	3.0 W/(m·K)
岩石圈地幔密度	3 300 kg/m ³
岩石圈地幔热导率	3.4 W/(m·K)
软流圈密度	3 220 kg/m ³
软流圈热导率	3.8 W/(m·K)
比热容	1 200 J/(kg·K)

根据臧绍先等^[33]的研究结果，俯冲洋壳的剪切生热以及地幔中的放射性物质的产热量 A 相对其他热源项要小很多，忽略它们作为一种近似是合理的。由于 AA'剖面俯冲板块为陆壳，考虑到在同

一圈层差异很小，也为方便计算，放射性生热率取为 1*10⁻⁶W/m³。

3 模拟结果

对建立的两个数值模型赋予相同的边界条件，为验证本模拟结果，采用热流作为检验标准。AA'剖面属陆壳，地壳厚度较厚，海沟西侧热流值为 66 mW/m²，最低值约为 45 mW/m²，海沟东侧约为 72 mW/m²，陆壳本身热流值较低，加上角落流、岩浆活动和火山活动等因素的影响，上覆板块热流值会相对上升，使得海沟东侧热流值高于西侧；BB'剖面中，在俯冲较浅位置，热流值为 68 mW/m²，海沟最低处热流值为 45 mW/m²，在菲律宾板块，热流值约为 65.8 mW/m²；CC'剖面由于岩石圈厚度较薄，浅部达到 70 mW/m²，而海沟最低热流值约为 20 mW/m²，与 BB'剖面处的俯冲角度和俯冲速度有关，菲律宾板块热流值与 BB'剖面基本一

致。模型中的热流值和热流趋势与南海热流特征一致^[9, 10, 34], 因此, 此模拟结果可以较好地反应马尼拉俯冲带的热结构。

根据图 3 可知, 在俯冲的浅部, 由于俯冲角度平缓, 俯冲板块的温度主要受热传导作用控制, 基本与俯冲板块形状保持一致, 随俯冲深度加深

而增加。当深度加深, 俯冲角度逐渐增大, 纵向的分速度也逐渐增大, 较冷的俯冲板块运动至较深的深度。至软流圈边界时, 开始受软流圈对流影响, 俯冲板块温度变化明显, AA'剖面俯冲板块顶部约为 570 °C, BB'剖面洋壳顶部温度比 AA'高, 约为 680 °C, 可能是由于 BB'剖面厚度较 AA'剖面

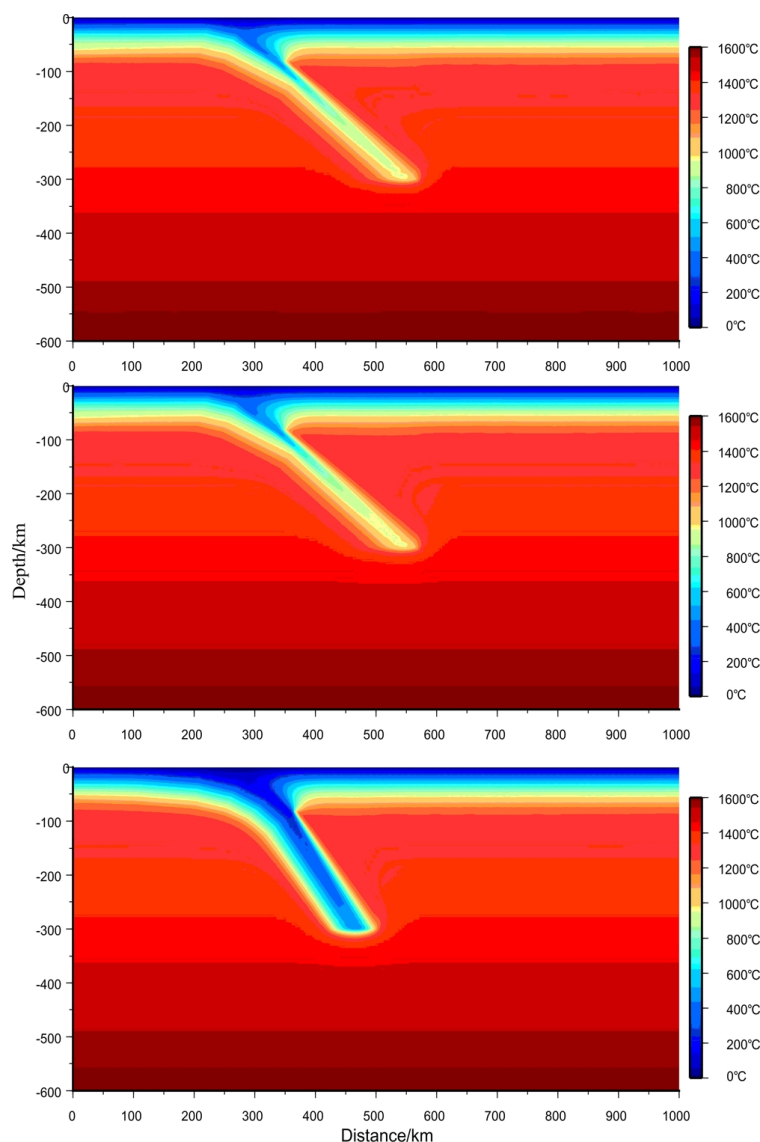


图 3 AA'、BB'和 CC'剖面计算热结构图

Fig.3 Calculated thermal structure for AA', BB' and CC' cross-section

薄, 相对更“热”。CC'剖面的俯冲角度和俯冲速度均较 BB'剖面大, 温度也较低, 洋壳顶部仅有约 450 °C。当洋壳至软流圈后, 洋壳温度快速升高, 在 90 km 处, AA'剖面板块顶部温度达到 730 °C, 底部增加较缓, 约为 650 °C; BB'剖面表面温度约为 805 °C, 底部温度约为 673 °C; CC'剖面表面温度约为 885 °C, 底部温度比 BB'剖面低的多, 约为 210 °C。由于 CC'剖面的俯冲速度和角度均比 AA'

和 BB'剖面大, 使得软流圈对洋壳内部“加热”作用比 AA'和 BB'剖面弱的多, 保持较冷的状态到更深的深度。经过软流圈的加热后, 洋壳表面和底部温度均有较大升高, 在 160 km 时, AA'剖面温度约 875 °C, 底部温度约为 671 °C; BB'剖面洋壳顶部温度升至 950 °C, 洋壳底部温度也较高, 达到 840 °C; CC'剖面洋壳顶部温度更高, 达到 1 050 °C, 洋壳底部温度也升高到 500 °C。三条剖面的热结构

对比也表明,俯冲带热结构主要受俯冲角度、俯冲速度和俯冲板块本身地质条件如软流圈深度、厚度、年龄等因素影响。

4 地震意义

Peacock 等^[35]和 Kirby 等^[36]将热流值 $>75 \text{ mW/m}^2$,且年龄 $<15\sim 25 \text{ Ma}$ 的洋壳俯冲称为热俯冲,其它热流较低、年龄较老的俯冲为冷俯冲。BB'和CC'剖面的地温梯度值比日本西南部热俯冲的地温梯度还高,因此,本模拟结果也进一步证明BB'和CC'剖面属于热俯冲^[35]。根据热俯冲的研究,地震成因机制主要有以下两种观点:

(1) 俯冲深度比较浅^[37]。

(2) 含水相脱水和榴辉岩的形成,在俯冲板块与软流圈接触之前停止^[36]。

一般认为,浅源地震是由脆性断裂导致的,大洋俯冲带深部地震基本由岩石相变引起^[38-39]。当俯冲洋壳开始俯冲时,上覆岩石压力和温度增大,大多数的孔隙被挤压消失,排出大量孔隙水。在俯冲的早期阶段,随着变质程度从沸石相的递增,相应的主要含水矿物为沸石、绿帘石等,岩石中的含水量可达到 $8\%\sim 9\%$ ^[40]。随着进一步俯冲,洋壳在约 20 km 的深度进入绿帘石蓝片岩相区域,在 50 km 的深度进入角闪石榴辉岩相^[41]。根据本文模拟结果,当俯冲至软流圈边界时,开始受软流圈的影响,俯冲板块温度迅速升高,自由水降低 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 反应温度,使俯冲洋壳大量脱水,孔隙压力继续增加,上覆岩石压力减小,岩石脱水脆化发生破裂,生成的水促进周围无水辉长岩和玄武岩相变,形成大量榴辉岩,伴随着密集的地震发生^[36,41-43]。榴辉岩的形成也使洋壳密度增大,板块应力改变,负浮力增加。由于BB'剖面的俯冲角度和俯冲速度比CC'剖面小,使得BB'剖面发生地震的深度更浅。俯冲洋壳顶部温度较高,在南海洋壳到达软流圈之前,含水相脱水和榴辉岩的形成基本停止,使软流圈之上的洋壳发生密集的地震活动。洋壳底部温度更低,需要在更深的深度才能形成榴辉岩,地震活动也持续到更大的深度,当洋壳全部进入干榴辉岩相时,地震活动也基本停止,这种推测与马尼拉俯冲带地震震源深度分布结果吻合。但进入榴辉岩相的具体深度,则需要结合实验岩石学结果,详细分析俯冲洋壳的相变。

5 结论

通过本次研究,得出以下几点认识和结论:

(1) 模拟计算结果表明,俯冲带热结构主要受俯冲角度、俯冲速度和俯冲板块本身地质条件等因素影响。

(2) 根据模拟结果的地温梯度数据,进一步证明BB'剖面和CC'剖面属于热俯冲。

(3) 当洋壳俯冲至软流圈边界时,受软流圈的影响,俯冲板块温度迅速升高,容易形成大量榴辉岩,产生地震活动。

致谢:感谢中国科学院南海海洋研究所张佳政博士给予的帮助。

参考文献:

- [1] 张健,汪集旻.南海北部大陆边缘深部地热特征[J].科学通报,2000,45(10):1095-1100.
- [2] 宋茂双,谢洪森,徐有生.俯冲带的热结构研究进展[J].地质地球化学,1996(2):18-22.
- [3] 臧绍先,宁杰远,景志成.俯冲带流变性质的研究[J].中国科学:D辑,2001,31(09):705-711.
- [4] 周蒂,王万银,庞雄,等.地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J].中国科学:D辑,2006,36(03):209-218.
- [5] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin [J]. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands, 1980, 1: 89-104.
- [6] Taylor B, Hayes D. Origin and history of the South China Sea basin [J]. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands, Part, 1983, 2: 23-56.
- [7] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98 (B4): 6299-6328.
- [8] 孙珍,孙龙涛,周蒂,等.南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟[J].地球科学(中国地质大学学报),2009(03):435-447.
- [9] He L, Wang K, Xiong L, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 126 (3-4): 211-220.
- [10] Shi X, Qiu X, Xia K, et al. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22 (3): 265-277.
- [11] 刘绍文,施小斌,王良书,等.南海成因机制及北部岩石圈热-流变结构研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2006,(04):117-124.
- [12] 陈爱华,许鹤华,马辉,等.马尼拉俯冲带缺失中深源地震成因初探[J].华南地震,2011,31(04):98-107.

- [13] Yang T F, Lee T, Chen C H, et al. A double island arc between Taiwan and Luzon: consequence of ridge subduction[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258 (1-4): 85-101.
- [14] Chemenda A, Yang R, Hsieh C, et al. Evolutionary model for the Taiwan collision based on physical modelling[J]. *Tectonophysics*, 1997, 274 (1-3): 253-274.
- [15] 高翔, 张健, 孙玉军, 等. 马尼拉海沟俯冲带热结构的模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (1): 117-125.
- [16] 秦静欣, 郝天珧, 徐亚, 等. 南海及邻区莫霍面深度分布特征及其与各构造单元的关系[J]. *地球物理学报*, 2011, 54 (12): 3171-3183.
- [17] Hsu S K, Yeh Y, Doo W B, et al. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the northernmost South China Sea and their tectonic implications[J]. *Marine Geophysical Research*, 2004, 25 (1): 29-44.
- [18] Pautot G, Rangin C. Subduction of the south China sea axial ridge below Luzon (Philippines) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92 (1): 57-69.
- [19] 臧绍先, 陈奇志, 黄金水. 台湾南部-菲律宾地区的地震分布、应力状态及板块的相互作用 [J]. *地震地质*, 1994, 16 (01): 29-37.
- [20] 朱俊江, 丘学林, 詹文欢, 等. 南海东部海沟的震源机制解及其构造意义 [J]. *地震学报*, 2005 (03): 260-268.
- [21] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据[J]. *中国科学: D 辑*, 2006 (09): 797-810.
- [22] 丁巍伟, 程晓敢, 陈汉林, 等. 台湾增生楔的构造单元划分及其变形特征[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24 (05): 53-59.
- [23] Bautista B C, Bautista M L P, Oike K, et al. A new insight on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines[J]. *Tectonophysics*, 2001, 339 (3-4): 279-310.
- [24] 陈志豪, 李家彪, 吴自银, 等. 马尼拉海沟集合形态特征的构造演化意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29 (2): 59-65.
- [25] Clift P, Vannucchi P. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42, RG2001.
- [26] 姚伯初, 万玲. 南海岩石圈厚度变化特征及其构造意义[J]. *中国地质*, 2010 (04): 888-899.
- [27] 曹小林, 朱介寿, 赵连锋, 等. 南海及邻区地壳上地幔三维 S 波速度结构的面波波形反演[J]. *地震学报*, 2001 (02): 113-124+223.
- [28] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋岩石圈三维结构及其地幔动力学[J]. *地学前缘*, 2007 (03): 21-38.
- [29] Di T, G S, Eds.. *Geodynamics*[M]. Lambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [30] 李志伟, 胥颐, 郝天珧, 等. 南海东北部及其邻近地区地壳上地幔 P 波速度结构[J]. *地学前缘*, 2009, 16 (04): 252-260.
- [31] Lallemand S, Font Y, Bijwaard H, et al. New insights on 3-D plates interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2001, 335 (3-4): 229-253.
- [32] 瞿辰, 周蕙兰, 赵大鹏. 使用纵波和横波走时层析成像研究菲律宾海板块西边缘带和南海地区的深部结构[J]. *地球物理学报*, 2007, 50 (6): 1757-1768.
- [33] 臧绍先, 宋惠珍, 宁杰远. 日本海俯冲带的热结构及热源的影响[J]. *地球物理学报*, 1993, 36 (2): 164-173.
- [34] 施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海热流特征及其构造意义[J]. *热带海洋学报*, 2003 (2): 63-73.
- [35] Peacock S M, Wang K. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan[J]. *Science*, 1999, 286 (29): 937-939.
- [36] Kirby S, Engdahl E, Denlinger R. Intermediate -depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs [J]. *Geophysical monograph*, 1996 (96): 195-214.
- [37] Sugi N, Uyeda S. Subduction of young oceanic plates without deep focus earthquakes [J]. *Bull. Soc. Geol. France*, 1984, 26: 245-254.
- [38] Liu L. Phase transformations, earthquakes and the descending lithosphere [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1983, 32 (3): 226-240.
- [39] Dobson D, Meredith P, Boon S. Simulation of subduction zone seismicity by dehydration of serpentine [J]. *Science*, 2002, 298 (5597): 1407-1410.
- [40] Peacock S M. The importance of blueschist to eclogite dehydration reactions in subducting oceanic crust [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1993, 105: 684-694.
- [41] 魏春景, 张颖慧. 俯冲大洋岩石圈的相转变与俯冲带岩浆作用[J]. *科学通报*, 2008, 53 (20): 2449-2459.
- [42] Wang K, Hyndman R D, Yamano M. Thermal regime of the Southwest Japan subduction zone: effects of age history of the subducting plate [J]. *Tectonophysics*, 1995, 248 (1-2): 53-69.
- [43] Hyndman R, Wang K. Thermal constraints on the zone of major thrust earthquake failure: The Cascadia subduction zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B2): 2039-2060.

黄敏, 杨晓源, 邵玉平. 用函数变换设计速度传感反馈地震计[J]. 华南地震, 2014, 34 (2): 41-48. [HUANG Min, YANG Xiaoyuan, SHAO Yuping. Designing Feedback Seismometer with a Velocity Transducer by a Function Transforming Method [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(2): 41-48.]

用函数变换设计速度传感反馈地震计

黄敏, 杨晓源, 邵玉平

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 短周期地震计主要用于观测地方性的微小地震, 用速度传感器设计的反馈式短周期的地震计的工作参数稳定性不好, 是国内外观测实践都证实了的问题。借鉴位移传感反馈地震计工作参数偏差较低的思路, 介绍了通过采用函数变换方法设计速度传感反馈地震计的解决方案。用函数变换方法设计的速度传感反馈地震计, 既实现了加大负反馈深度又不降低噪声指标的双重目标, 有加深负反馈和由闭环反馈生成的闭环周期位于通带外的优点。即便是机械摆受到环境变化的影响或随时间推移而出现了漂移或老化, 其对通带内的幅频特性的影响亦较小。由函数变换电路生成摆函数的工作周期及工作阻尼与机械摆的参数完全无关, 仅取决于变换电路中的两个电阻和两个电容的精度。

关键词: 函数变换; 负反馈; 工作参数

中图分类号: P315.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2014) 02-0041-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.006

Designing Feedback Seismometer with a Velocity Transducer by a Function Transforming Method

HUANG Min, YANG Xiaoyuan, SHAO Yuping

(Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: Short-period seismometer is mainly used for local microseismic monitoring. However, the operation parameter stability of feedback short-period seismometer with a velocity transducer is poor, which has been confirmed by domestic and international practical observation. Learning from feedback seismometer with a displacement transducer, the paper introduced the designing feedback seismometer with a velocity transducer by a function transforming method. By using this method, the feedback seismometer with a velocity transducer designed increases feedback depth, meanwhile, do not reduce noise index. One of the advantages of this scheme is to deepen feedback, the other is that closed-loop period is outside the pass band. Even if the mechanical pendulum is affected by environmental changes or with time there has been drift or aging, its influence on the amplitude frequency characteristics in the passband is also small. Operation period and damping of seismometer generated by function transforming method have nothing with the parameters of mechanical pendulum, only depend on the accuracy of two resistor and two capacitor in the conversion circuit.

Keywords: Function transforming; Feedback; Operation parameter

收稿日期: 2013-10-29

作者简介: 黄敏 (1960-), 女, 高级工程师, 主要从事地震观测台网设计与维护管理, 地震观测设备研制生产。

E-mail: 274790580@qq.com.

0 前言

众所周知,地震波传到观测台站,依靠各种地震仪来接收并记录,地震仪的观测频带下限主要由地震计的工作阻尼常数和周期来决定。因此应根据所需要观测的地震波的频段,适当选择地震计的工作参数(固有周期 T 和阻尼常数 D) 可以尽可能完整的反映出所需研究的地面的振动。短周期地震计主要用于观测地方性的微小地震。而用速度传感器设计的反馈式短周期的地震计的工作参数稳定性不好,是国内外观测实践都证实了的问题。德国地震学家彼得·鲍曼提出:虽然,短周期仪器参数被认为更稳定,但经验表明其特征周期与衰减(即工作周期与工作阻尼)随时间变化达几十个百分比^[1]。现有的速度传感反馈地震计产品的参数稳定性不好,尤其是经过在台站使用数年仅标定不调整的工作模式后,地震计相关参数的现场测试值与出厂标称值之间的偏差高达 10% 以上。有的产品工作参数偏差数甚至接近 30%^[2]。

速度传感反馈地震计产品的工作参数偏差较大是因为该地震计中的负反馈环是一个浅反馈环。由浅反馈环生成的工作周期和工作阻尼既与反馈电路参数有关,又与机械摆的参数相关。影响这两个工作参数的因素与部件非常多,在常温范围和长期工作的老化中极难有效控制它们带来的漂移。

1 解决思路探讨

1.1 加深反馈深度不能寄希望于改变机械摆的参数

理论与实践都已经证明,机械摆的固有频率越高,反馈式地震计的自身噪声就越大。过大的自身噪声不利观测微小地震,然而反馈式短周期地震计的主要用途就是用于观测地方性的微小地震。这也是我国流行的反馈式短周期地震计产品均采用速度传感方案的缘由,为限制自身噪声在规定的频段内低于规范值,流行产品中机械摆固有频率参数为 3 Hz。正因为如此,虽然也有机械摆固有频率为 6 Hz 的产品,因其自身噪声参数不满足规范要求故仅有较少用户选用。短周期速度反馈地震计的原理是用负反馈将机械摆的周期延长,其反馈深度取决于反馈前后的周期比,即机械摆的固有周期与闭环工作周期之比。考虑到地震计自身的噪声限制,不能采用提高机械摆的固有频率的方法来加深负反馈深度。

1.2 利用深度负反馈来实现

我国现有的反馈式短周期地震计产品,其工作周期多为 1 s 或 2 s。反馈式短周期地震计中的核心部件—机械摆,其固有频率多取 3~6 Hz,对应的固有周期为 0.33~0.167 s。反馈前后的周期比最大为 12,最小只有 3。鉴于此,常用的速度传感反馈地震计产品仅仅是一个反馈深度很浅的负反馈环。而浅负反馈环带来的不利因素在于反馈地震计的工作参数(如工作周期、工作阻尼以及灵敏度),将受到反馈环路内众多因素的影响,从而导致工作参数的稳定性欠佳。

在观测实践中我们知道,使用深反馈的位移传感反馈地震计在大于 5 Hz 的地震观测频段高端的噪声较大,而其工作参数偏差却仅有 2% 左右。这就启发我们在速度传感反馈地震计采用加大负反馈的深度,使地震计的工作周期与工作阻尼仅与少数几个电阻电容的数值相关的技术途径。本人在参与某反馈式短周期地震计产品的设计中就采用了这一技术思路,力图解决速度传感反馈地震计工作参数稳定性太差、与标称值偏差太大的问题。

2 设计方案分析

2.1 函数变换方案允许负反馈的深度

为了解决反馈式短周期地震计工作参数稳定性的问题,设计中我们有意识地加大了负反馈环的反馈深度。但在速度传感反馈地震计中有一个众所周知的规律,就是反馈深度越大,地震计闭环工作周期与机械摆的固有周期之比就越大。在机械摆的固有周期一定的前提下,较大的负反馈深度将使反馈生成的闭环周期远大于我们所需的工作周期,无法满足既定的参数指标。因此,我们采用一种新的方案——函数变换,来设计速度传感反馈式短周期地震计。该方案的要点是机械摆的固有频率仍保持为 3 Hz 不变,以确保地震计的自身噪声水平不变,通过加大反馈的深度来提高工作参数稳定性。由于加大反馈深度后生成的闭环周期和闭环阻尼不再是产品所需的最终参数,仅为中间的过渡参数。该过渡参数的闭环周期和闭环阻尼可以设计为远大于地震计最终的工作周期和工作阻尼。为了得到所需工作参数的地震计,采取了在闭环反馈环外通过双二阶函数变换电路消去该过渡的闭环周期和阻尼,并同时生成了地震计的工作周期与阻尼的方案。

2.2 反馈深度与动态范围扩展分析

在速度传感反馈地震计中,地动速度输入 $V(S)$ 与机械摆振动中心位移 $X_c(S)$ 之间满足下列关系式:

$$V(S) = \frac{(S^2 + 2D_n \omega_n S + \omega_n^2)(S + \omega_B)}{S(S + \omega_A)} X_c(S) \quad (1)$$

式(1)中, ω_n 为反馈地震计闭环角频率,单位 1/s; D_n 为反馈地震计的闭环阻尼,无量纲; ω_A 为一阶环路滤波器的极点绝对值,单位 1/s; ω_B 为反馈地震计闭环生成的一阶项角频率,单位 1/s; 当一阶环路滤波器为一阶高通电路时, ω_A 和 ω_B 与反馈地震计的开环角频率 ω_0 开环阻尼 D_1 闭环角频率 ω_n 和闭环阻尼 D_n 之间满足下列关系式:

$$\omega_A = \frac{(\omega_0^2 - \omega_n^2)}{2(D_n \frac{\omega_0}{\omega_n} - D_1)\omega_0} \quad (2)$$

$$\omega_B = \frac{\omega_0}{\omega_n} \omega_A \quad (3)$$

在计算速度传感反馈地震计动态范围上限时,认为地震计是一个机械摆振动中心位移 $X_c(S)$ 受限的系统,这一假设符合速度传感反馈式地震计正常工作时的实际状况。因为振动中位移过大,传感线圈运动将越出磁隙磁感应强度分布较均匀的区域,造成非线性失真急剧增大。在图 1 中,假设了振动中心位移在平衡位置附近的最大位移 X_{cm} 为 0.1 mm,据式 (1) 计算允许输入的最大地动位移 V_{cm} 输入曲线。计算上述曲线簇时,假设了机械

摆的固有频率为 2 Hz、开环阻尼为 1。为了与未施加反馈时的同一机械摆的动态范围上限作比较,图中还绘出了机械摆在阻尼为 0.7 的曲线。该曲线按照式(4)绘制。

$$V_0(S) = \frac{S^2 + 2D_1 \omega_0 S + \omega_0^2}{S} X_c(S) \quad (4)$$

图 1 中仅有的一条水平直线是根据反馈地震计最大单端输出峰值为 10 V 和单端灵敏度为 1 000 V_s/m 绘制的因输出电压受限的动态范围上限以资比较。

采用函数变换方案加大了反馈地震计的负反馈深度,同时也扩展了机械摆的动态范围上限。如下图所示,给出了一个固有频率 $f_0=3$ Hz 的机械摆振动中心位移受限(假设为 0.2 mm)的动态范围扩展曲线。

该机械摆是采用了一阶高通环路滤波作为闭环反馈的,绘制该曲线时假设了机械摆的振动中心允许的最大位移为 0.2 mm。图 1 中 $T_n=2$ s 曲线表示用一阶高通环将其直接反馈为 2 s 地震计的动态范围上限,不经过函数变换。 $T_n=4$ s、 $T_n=8$ s 则表示采用一阶高通环路分别将闭环周期分别延长到相应的 4 s、8 s,然后通过函数变换变至 2 s 时的机械摆动态范围上限曲线。

由图 1 可见,闭环周期与设计所需的工作周期之比越大,机械摆的动态范围上限扩展越大。图 1 中还给出了反馈地震计输出电压受限于电源电压单端最大不失真输出为 10 V 时的动态范围上限。在地震计单端电压灵敏度为 1 000 V_s/m 时,该曲线是地动速度为 0.01 m/s 的水平线。

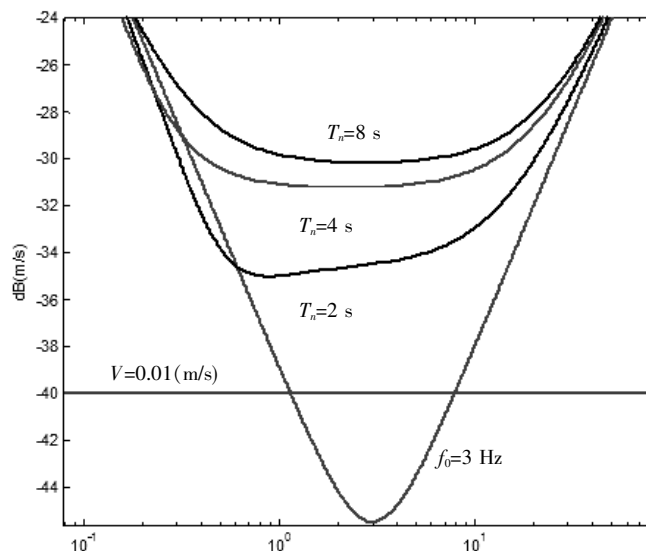


图 1 固有频率 $f_0=3$ Hz 的机械摆振动中心位移受限的动态范围扩展曲线

Fig.1 Extended dynamic range curve of mechanical vibration center displacement limited with inherent frequency f_0 of 3 Hz

2.3 闭环周期、闭环阻尼与变换周期相关性分析

在函数变换方案中,虽然工作周期和工作阻尼仅与变换电路中的两个电阻和电容有关,完全与机械摆的参数无关,但是闭环生成的中间参数仍然受到机械摆参数的影响。而机械摆的参数又是最易受环境条件影响和老化而有所变化。当机械摆参数变化闭环反馈生成的中间过渡参数必然随之变化,导致了函数变换电路中与其对消的二阶零点不能完全对准而有所残留。下面给出上述两者不能完全对准时对系统幅频特性造成影响的

理论分析结果。

闭环周期和闭环阻尼变对幅频特性的影响,可通过下面几种情况的分析得到。首先观察固定闭环阻尼 D_n 保持不变,闭环周期与变换周期之比为 4 的条件下,闭环周期 T_n 在设计值 8 s 变化 10% 时,系统的幅频特性变化情况如图 2 所示;同样地在固定闭环周期 T_n 保持不变,闭环周期与变换周期之比为 4 的条件下,闭环阻尼 D_n 在设计值 1.560 26 变化 10% 时,系统的幅频特性变化情况如图 3 所示。

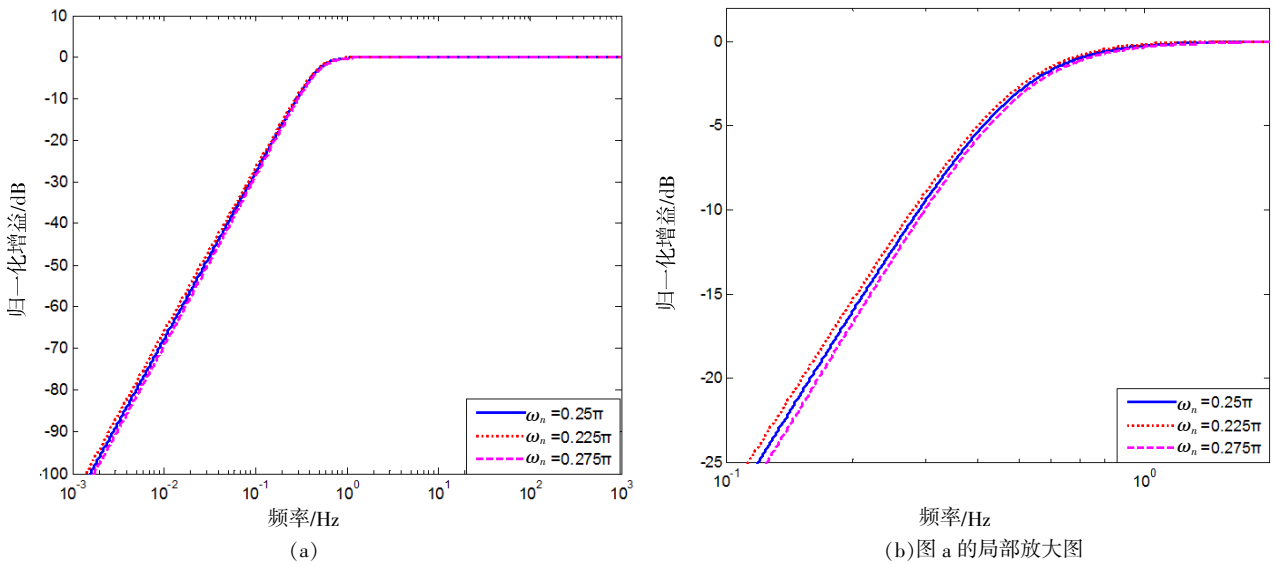


图 2 周期之比为 4, 闭环周期变化 10% 时系统的幅频特性差异图

Fig.2 Amplitude frequency characteristics difference diagram with period ratio of 4 and closed-loop period change $\pm 10\%$

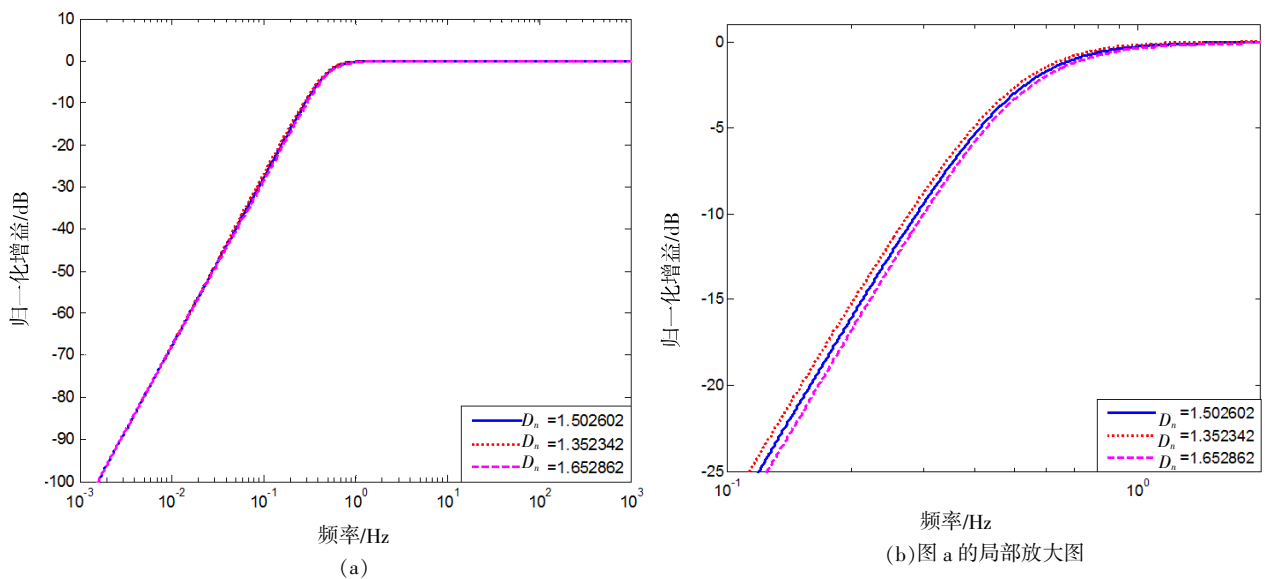


图 3 周期之比为 4 的条件下, 闭环阻尼 D_n 变化 10% 时系统的幅频特性对比图

Fig.3 Comparison diagram of amplitude frequency characteristics with period ratio of 4 and closed-loop damping D_n change $\pm 10\%$