

基于 UTC 结构的非磁性平板脉冲远场涡流 传感器参数优化的仿真分析

赵雪岩¹, 张科英¹, 杨卫国², 张超¹, 杨宾峰¹, 曹海霞¹, 张辉³

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;2.94162部队,陕西西安,710600;

3.空军工程大学科研部,陕西西安,710051)

摘要 飞机多层结构中深层缺陷的定量评估是目前航空无损检测领域面临的一个难点问题,传统无损检测方法需要对飞机结构拆卸后进行检测,这样既增加了费用又无法满足飞机外场检测的需求,远场涡流技术由于不受集肤效应的限制,其可实现原位检测的优点成为解决此难题的有效途径。在分析了非磁性平板构件脉冲远场涡流检测技术所存在问题的基础上,通过设计基于 UTC 结构的传感器使得平板构件检测中也产生了远场效应。同时,对 UTC 结构中材料属性、UTC 结构长度和厚度对检测结果的影响进行了仿真分析,得到了其优化设计的准则。

关键词 脉冲远场涡流;非磁性平板;UTC 结构

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.015

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0061-05

Simulation Optimization Design of Pulsed Remote Field Eddy Current Probe Based on UTC Structure for Nonmagnetic Material

ZHAO Xue-yan¹, ZHANG Ke-ying¹, YANG Wei-guo², ZHANG Chao¹, YANG Bin-feng¹, CAO Hai-xia¹, ZHANG Hui²

(1.Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2.Unit 94162, Xi'an 710600, China;

3.Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: On the basis of analyzing the difficulties of RFEC used in detecting non-magnetic plate, the remote field effectiveness is formed on an object of flat geometry by using a type-U component. The principles of optimization design are obtained through analysis of the influence of materials of the UTC, the length of the UTC and the thickness of the UTC. The research of this paper is of some important theoretical meaning and practical value for promoting the application of the RFEC technique and to the detection of the nonmagnetic metal plate.

Key words: pulsed remote field eddy current; nonmagnetic metal plate; UTC structure

收稿日期:2013-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377172;51107149);教育部重点实验室基金资助项目(ZD201229004)

作者简介:赵雪岩(1964-),男,河北卢龙人,副教授,主要从事计算机仿真技术研究. E-mail:ZHAOXY1964@126.com

引用格式:赵雪岩,张科英,杨卫国,等.基于 UTC 结构的非磁性平板脉冲远场涡流传感器参数优化的仿真分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):61-65. ZHAO Xueyan, ZHANG Keying, YANG Weiguo, et al. Simulation optimization design of pulsed remote field eddy current probe based on UTC structure for nonmagnetic material[J]. Journal of air force engineering university, natural science edition, 2014, 15(3):61-65.

对于航空领域而言,飞行安全的重要性不言而喻。由于飞机特殊的工作环境,极易在其结构内部出现疲劳裂纹和腐蚀缺陷,这将严重威胁着飞机的飞行安全。如何实现对在役飞机多层结构中隐含缺陷的定量检测,引起了政府部门与航空企业的广泛重视和重点关注。

然而,传统的无损检测技术难以从飞机结构外部检测到其内层的缺陷,通常采用的方法是将飞机结构进行拆卸,但是这将浪费大量的人力和财力,而且拆卸过程又有可能对飞机部件造成 2 次损伤。近年来,美国的 Y.S.Sun 等人成功将远场涡流技术的应用扩展到飞机多层结构的检测之中^[1-3]。其利用远场涡流检测不受集肤效应限制,并对内外缺陷具有相同检测灵敏度的优势,通过对传感器结构的改进设计,成功实现了对多层平板结构中深层缺陷的检测,穿透深度可达 25 mm。

美国 Innovative Materials Testing Technologies(IMMT)的 Y.S.Sun 等人研究了金属平板构件检测中的远场涡流技术,其根据此思想设计的平板远场涡流传感器已经获得了美国专利,但由于技术保密的缘故,相关文献并未给出传感器设计中磁场直接耦合分量是如何屏蔽的,聚磁技术是如何实现的,而这 2 个问题又是平板远场涡流传感器设计的关键之所在。

日本横滨国立大学 N.Kasai 等人采用远场涡流技术对石油储罐底板进行了检测^[1],但其只研究了该传感器对铁磁性平板材料的检测问题,并没有将该传感器用于对非磁性板材的检测。南京航空航天大学王新等人设计了用于平板构件检测的远场涡流传感器^[5-6],但其只能检测铁磁性材料,无法检测非磁性材料,而且该传感器只能检测厚度不大于 10mm 的板材,对于大厚度板材中出现的深层缺陷难以检测。空军工程大学崔文岩等人应用脉冲远场涡流技术对铁磁性金属平板进行了检测^[7-8]。

针对上述问题,本文设计了基于 UTC 结构的脉冲远场涡流传感器,在分析检测机理的基础上,仿真比较了 UTC 构件材料、UTC 构件长度以及 UTC 构件厚度对检测结果的影响,最终实现了对 UTC 结构的优化设计。

1 非磁性平板脉冲远场涡流检测机理

对于平板构件而言,首先要解决其远场涡流检测中磁场的 2 次穿透问题。这是因为平板与管道的远场涡流检测存在着本质的区别,管道检测中之所以会发生磁场的 2 次穿透,是因为管道的屏蔽作用

使得管内的磁场直接耦合分量以指数关系迅速衰减,而管外的磁场间接耦合分量沿管道轴向衰减较慢,从而使得在远离激励线圈的远场区,管外磁场强于管内磁场从而发生了磁场的 2 次穿透现象。

但是,当采用远场涡流检测平板构件时,由于没有管道的屏蔽作用,当传感器放置于平板构件上方时,激励线圈产生的磁场是向四周发散的,穿过板材到达平板构件下方的磁场,由于导体的衰减作用会弱于板上的磁场,且随着磁场的逐渐扩散和传播,板上磁场将始终强于板下磁场,这样就不可能发生磁场的 2 次穿透现象,也就无法实现远场涡流效应。平板构件的远场涡流检测原理见图 1。

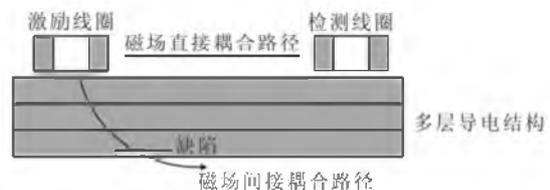


图 1 平板构件的检测示意图

Fig. 1 The schematic diagram of RFEC technique to detection of flat plate

针对平板与管道结构的不同,本文设计了一种特殊的传感器结构,将 U 字型构件(U-type Component, UTC)置于平板上,用于在平板构件上模拟管道结构,以达到对磁场直接耦合分量的衰减作用,其结构及检测原理见图 2。

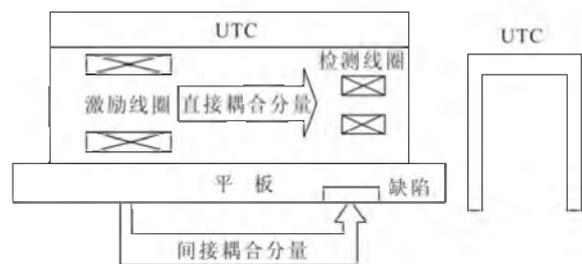


图 2 基于 UTC 结构的平板远场涡流检测示意图

Fig. 2 The schematic diagram of PRFEC probe with UTC

磁场直接耦合分量在 UTC 结构的作用下快速衰减,而间接耦合分量衰减较慢,其在远场区将会强于直接耦合分量,向上 2 次穿透平板。由于 2 次穿透平板的磁场带有缺陷信息,利用检测线圈对信号进行拾取并提取特征量,就可实现对非磁性金属平板的检测。

2 基于 UTC 结构的脉冲远场涡流传感器模型的建立

前期研究结果表明^[9-10],当采用基于 UTC 结构的脉冲远场涡流传感器时,在激励线圈缠绕在工字

型磁性上的情况下,该传感器具有较高的检测灵敏度,因此,文中设计传感器时采此结构激励线圈。

本文采用大型有限元仿真软件 ANSYS,建立了非磁性平板脉冲远场涡流的检测模型。传感器模型具体参数如下:被测平板的长度和宽宽均为 200 mm,厚度为 10 mm;矩形激励线圈由 4 块相同的矩形和 4 块 1/4 空心圆柱组成,其中矩形部分长×宽×厚均为 20 mm×20 mm×2 mm,空心圆柱内半径 3 mm,外半径 5 mm;检测线圈为空心圆柱形,长 6 mm,内半径 2 mm,外半径 4 mm,与激励线圈相距 25 mm。激励线圈聚磁板宽×高×厚为 33 mm×33 mm×5 mm;检测线圈磁路由中心磁柱与两矩形磁腿组成,其中磁柱为长 6 mm、半径 2 mm 的圆柱,两磁腿宽×高×厚为 8 mm×10 mm×3 mm;激励与检测线圈的聚磁结构与平板间距均为 0.5 mm。UTC 结构长为铝板长的 7/8(175 mm),内部宽和高均为 34 mm,厚度为 10 mm;在平板上建立上表面轴向缺陷(UTC 长度方向为轴向),位于检测线圈正下方,其长×宽×深为 20 mm×2 mm×3 mm。模型中激励与检测线圈相对磁导率均为 1,电阻率为 1.724E-8 Ω·m,其中激励线圈为 300 匝,检测线圈为 800 匝,两线圈距平板均为 2 mm;平板和 UTC 结构相对磁导率均为 1,电阻率均为 2.65E-8 Ω·m;聚磁结构的材料均为铁氧体磁芯,其结构为矩形平板,相对磁导率均为 1 000。得到的传感器模型见图 3。

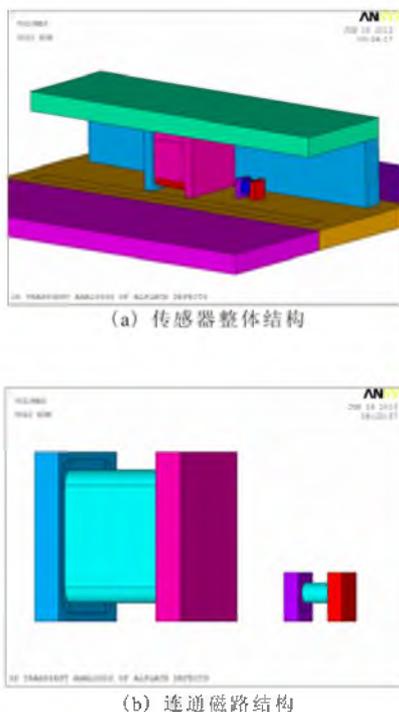


图 3 连通磁路传感器模型

Fig. 3 The probe model with connected magnetic core

3 UTC 结构参数优化的仿真分析

UTC 结构的相关参数必然会影响到感应信号和传感器的检测能力,对其参数进行优化具有重要意义。下面我们分别从 UTC 结构的材料、长度和厚度 3 个方面进行分析,研究其对检测结果的影响。

3.1 UTC 构件材料对检测结果的影响

仿真中将 UTC 结构材料分别设定为铝、铜、铁、硅钢,4 种 UTC 材料属性见表 1。

表 1 4 种 UTC 材料参数

UTC 材料	铝	铜	铁	硅钢
相对磁导率	1	1	100	4 000
电阻率/(Ω·m)	2.65E-8	0.17E-7	0.02E-5	0.10

从表 1 中可以看出,铝和铜均为低相对磁导率、低电阻率材料;铁为高相对磁导率、低电阻率材料;硅钢为高相对磁导率、高电阻率材料。这 4 种金属材料较为常见,相对磁导率和电阻率各异,且经常用于传感器设计中,选取其进行比较具有一定代表性。在这 4 种传感器模型条件下进行仿真计算,并将仿真结果进行比较,由于各检测信号幅值差距较大,将其分别绘制于两图中,结果见图 4。

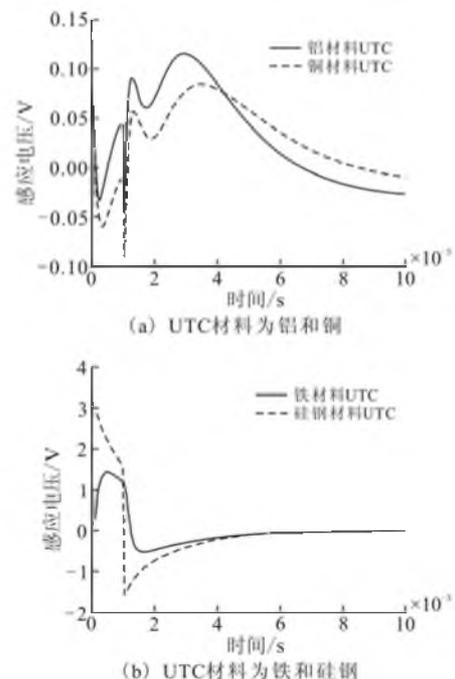


图 4 UTC 材料不同时检测信号

Fig. 4 The detecting signals with different UTC materials

从图 4(a)中可以看出,当 UTC 材料为铝和铜时,检测信号均分别包含直接和间接耦合分量部分,说明两传感器均可以在非磁性金属平板上实现远场涡流现象。但是当 UTC 材料为铝时,其感应信号幅值更大,过零时间特征量更明显,便于在实际检测中的应用。从图 4(b)中可以看出,当 UTC 材料为

铁和硅钢时,其检测信号均无间接耦合分量部分,也没有过零时间特征量,说明此时传感器无法在平板上实现远场涡流现象。

为分析其原因,取 UTC 及平板中涡流分布,见图 5。当 UTC 材料为铁时,由于其电阻率大,导电性能差,UTC 中感应涡流强度很低,大部分涡流成水平涡流分布在铝板中;当 UTC 材料为硅钢时,由于硅钢几乎不导电,感应涡流几乎只存在于铝板中。由于 UTC 中感应涡流强度极低,无法很好实现对磁场直接耦合分量的衰减作用,导致感应信号中直接耦合分量对应部分幅值很大,同时在远场区板下磁场无法向上 2 次穿透平板,因此也就无法实现远场涡流效应。此外,当 UTC 材料为硅钢时,其对磁场直接耦合分量几乎没有衰减作用,因此其检测信号直接耦合分量对应部分幅值也是最大的。

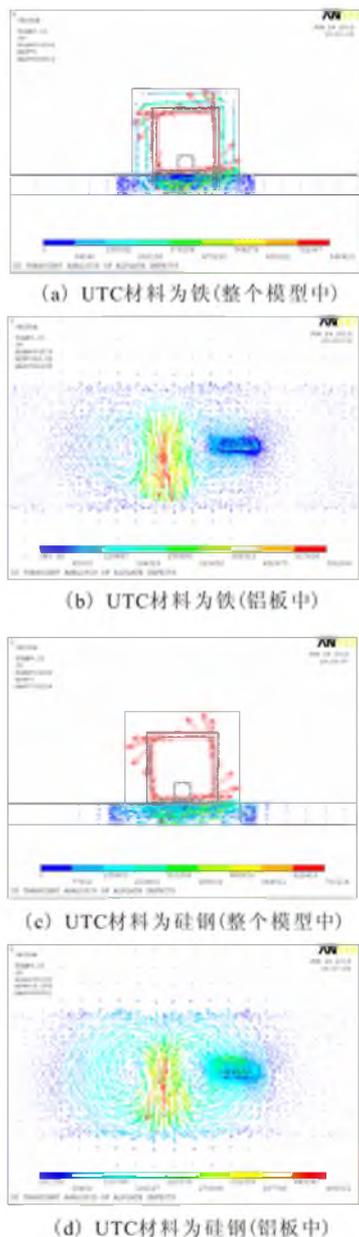


图 5 UTC 材料不同时的涡流分布
Fig. 5 The eddy current distribution with different UTC materials

综上所述,UTC 构件材料的属性直接影响到传感器能否在非磁性金属平板上形成远场效应,在选择时必须合理。为了使 UTC 结构能够更好的模拟管道,实现对磁场直接耦合分量的衰减作用,在选取其材料时应当尽量保持其与被测平板材料一致,并避免采用导电性差的材料。

3.2 UTC 构件长度对检测结果的影响

UTC 的长度会影响到传感器的长度,同时当 UTC 过短时,其中的感应涡流分布也会受到影响,从而影响检测效果。为了研究不同长度 UTC 对检测结果的影响,在实心传感器基础上,将 UTC 长度分别设置为 100 mm、125 mm、150 mm、175 mm,保持其它参数不变,仿真计算不同 UTC 长度时的检测信号,见图 6。

从图 6(a)中可以看出,当 UTC 长度为 125 mm、150 mm 和 175 mm 时,其检测信号基本没有受到影响,过零时间基本重合;当其长度缩短至 100 mm 时,由于受到“边缘效应”的影响,检测信号发生了明显的失真,负峰值特征消失(为了更明显地显示,将其单独绘制,见图 6(b))。因此,为了缩短传感器长度,UTC 长度可以适当缩短,但是应使 UTC 两端与两线圈边缘保持一定距离,从而避免受到“边缘效应”的影响。

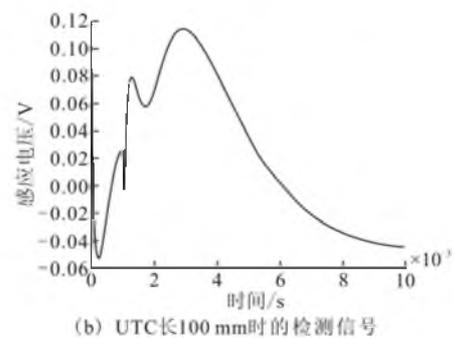
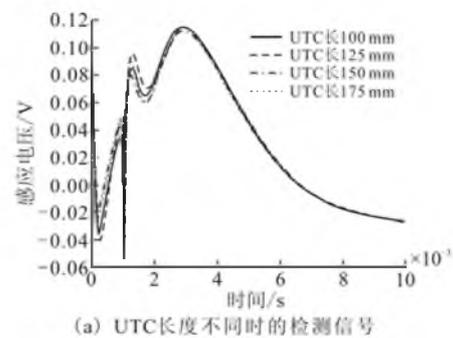


图 6 UTC 长度不同时的检测信号

Fig. 6 The detecting signals with different length of UTC

3.3 UTC 构件厚度对检测结果的影响

在传感器的设计中,便携性也是必须考虑的因素,因此传感器尺寸越小,重量越轻越好。而 UTC 的厚度不仅会影响到传感器的检测能力,也会影响

其便携性,因此本节我们将对 UTC 构件厚度对检测结果的影响进行分析。在保持实心传感器模型其它参数不变的情况下,将 UTC 厚度分别改为 5 mm、10 mm 和 15 mm,仿真计算 3 种情况下的检测信号,并进行对比,结果见图 7。

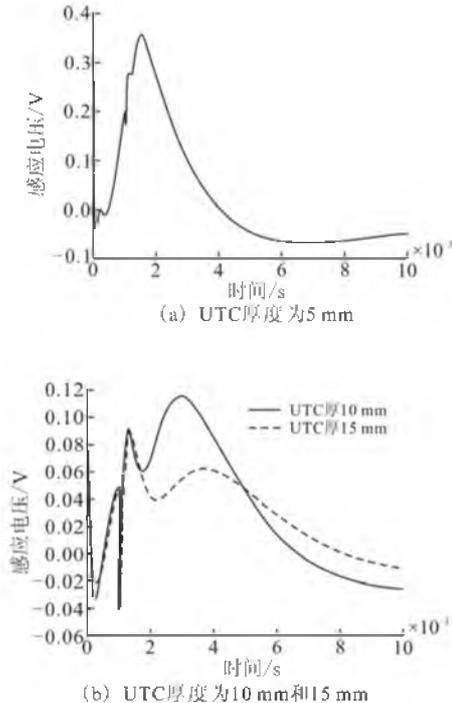


图 7 UTC 厚度不同时的检测信号

Fig. 7 The detecting signals with different thickness of UTC

从图 7(a)中可以看出,当 UTC 厚度为 5 mm 时,检测信号发生了失真;通过对比图 7(b)中两检测信号可知,当 UTC 厚度为 10 mm 和 15 mm 时传感器均可以对平板进行检测,但是当 UTC 厚度为 10 mm 时,其检测信号间接耦合分量幅值更大,过零时间特征量更为明显,同时其传感器整体尺寸更小,重量更轻。综上所述,UTC 构件的厚度过小会导致检测信号失真,过大则会导致传感器检测信号幅值减小和便携性的降低。在实际检测中,UTC 构件厚度与待测平板厚度保持一致即可。

4 结语

非磁性平板构件在航空领域具有广泛的应用,然而,传统的无损检测方法在检测非磁性平板材料时都存在一些问题,脉冲远场涡流技术具有较大的穿透深度,从而为解决这个难点问题提供了途径,本文在分析了平板脉冲远场涡流检测机理的基础上,仿真分析了 UTC 构件材料、长度和厚度不同时,传感器中涡流分布和检测结果的变化,为传感器实际应用奠定了基础。仿真结果表明,UTC 构件材料需选用导电性能好的材料,并尽量与被测平板材料保持一致;其长度需要适当,过长会导致传感器长度过

长,过短则会产生边缘效应;其厚度不能小于被测平板厚度,也不能过厚,实际应用中与被测平板厚度相同即可。

参考文献(References):

- [1] Sun Y S, Upda S, Lord W, et al. Ouyang. Application of motion induced remote field eddy current effect to online inspection and quality examination of rolling metallic strips[J]. Review of progress in QNDE, 2001, 20: 1541-1548.
- [2] Sun Y S, Ouyang T, Upda S. Remote field eddy current testing: one of the potential solution for detecting deeply embedded discontinuities in thick and multilayer metallic structures [J]. Materials evaluation, 2001, 59(5): 632-637.
- [3] Sun Y S, Ouyang T, Long J, et al. Detecting cracks under bushings with rotational remote field eddy current probes [C]//Proceedings of the 7th FAA/Dod/NASA joint conference on aging aircraft, New Orleans, LA: [s.n.], 2003.
- [4] Kasai N, Fujiwara Y, Sekine K, et al. Evaluation of back-side flaws of the bottom plates of an oil-storage tank by the RFECT[J]. NDT&E international, 2008, 41(7): 525-529.
- [5] Wang H T, Luo O F, Wang X, et al. Simulation and experimental study of remote field eddy current testing on flat conductive plate[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2010, 33: 1261-1266.
- [6] 王新. 平板导体件的远场涡流检测系统的研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
WANG Xin. Research and design on remote field eddy current technique used for plate member[D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2010. (in Chinese)
- [7] 崔文岩, 朱荣新, 杨宾峰, 等. 铁磁性平板构件远场涡流传感器设计与仿真分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(5): 71-75.
CUI Wenyan, ZHU Rongxin, YANG Bin Feng, et al. Simulation research on design of remote field eddy current sensor for ferromagnetic plate members[J]. Journal of air force engineering university: nature science edition, 2012, 13(5): 71-75. (in Chinese)
- [8] 崔文岩, 朱荣新, 杨宾峰, 等. 铁磁性平板导体件远场涡流有限元仿真与分析[J]. 计量技术, 2012(10): 3-5.
CUI Wenyan, ZHU Rongxin, YANG Bin Feng, et al. Finite element modeling and analyze of remote field eddy current in ferromagnetic conductive plate[J]. Measurement technique, 2012(10): 3-5. (in Chinese)
- [9] 张超, 王晓锋, 杨宾峰, 等. 非磁性航空金属构件检测中脉冲远场涡流传感器的仿真设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(3): 73-77.
ZHANG Chao, WANG Xiaofeng, YANG Bin Feng, et al. Simulation design of pulsed remote field eddy current probe for nonmagnetic metal aviation component[J]. Journal of air force engineering university: nature science edition, 2013, 14(3): 73-77. (in Chinese)
- [10] 张超, 王晓锋, 蒋锋聚, 等. 非磁性金属平板脉冲远场涡流传感器优化设计与缺陷定量检测[J]. 计量技术, 2013(11): 3-6.
ZHANG Chao, WANG Xiaofeng, JIANG Fengju, et al. Optimization design of pulsed remote field eddy current probe for detecting of defects in nonmagnetic metal plate[J]. Measurement technique, 2013(11): 3-6. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)