

可靠性强化试验技术在某型伺服作动器 研制中的适用性探索

张钟文^{1,2}, 王学孔^{3,4}, 杜少光⁵, 林琳⁵, 钟云龙^{1,2}

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610; 2.广东省电子信息产品可靠性
技术重点实验室, 广州 510610; 3.电子信息产品可靠性分析与测试技术国家地方联合工程中心,
广州 510610; 4.广东省智能机器人可靠性工程技术研究中心, 广州 510610;
5.中国航空工业集团公司 西安飞行自动控制研究所, 西安 710000)

摘要: 目的 探索可靠性强化试验技术在典型机电液一体化产品伺服作动器研制过程中的适用性。方法 以某型伺服作动器为研究对象, 从故障激发的角度对可靠性强化试验技术的应用进行可行性分析, 在响应调查和应力分析的基础上, 结合产品的工作特点设计适用于该类伺服作动器的可靠性强化试验方案, 包含低温步进应力试验、高温步进应力试验、快速温度循环试验 10 个循环、振动步进应力试验 (包含气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动方式及电磁振动台随机振动方式) 及综合环境应力试验 5 个循环, 并依此进行试验。结果 在快速温度循环试验及综合环境应力试验过程中, 均有效地激发出了产品的漏油故障, 与相似产品外场暴露的漏油故障模式相吻合。结论 可靠性强化试验技术可有效地应用于典型机电液一体化产品伺服作动器的研制过程, 设计的可靠性强化试验方案可有效地激发外场出现频率较高的故障, 可作为该类产品研制的试验手段之一。

关键词: 伺服作动器; 强化试验; 试验评价

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.08.014

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)08-0073-05

Application of Reliability Enhancement Testing Technology in Development of Steering Gear

ZHANG Zhong-wen^{1,2}, WANG Xue-kong^{3,4}, DU Shao-guang⁵, LIN Lin⁵, ZHONG Yun-long^{1,2}

(1. China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 510610, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology, Guangzhou 510610,
China; 3. National Joint Engineering Research Center of Reliability Test and Analysis for Electronic Information Products,
Guangzhou 510610, China; 4. Guangdong Provincial Research Center of Intelligent robot reliability, Guangzhou
510610, China; 5. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710000, China)

ABSTRACT: Objective To explore applicability of reliability enhancement test technology in development of typical electro-mechanical-hydraulic integration products-steering gear. Methods With a steering gear as object of study, the feasibility of reliability enhancement test technology was analyzed from exciting failure. Based on response investigation and stress analysis, a reliability enhancement testing of RET was designed in combination with working features of the product, including low-tem-

收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-06-04

基金项目: 国家电子信息产品可靠性与环境工程技术研究中心培育 (2107B090903006); 国家科技重大专项 (2016ZX04004006)

作者简介: 张钟文 (1988—), 男, 山西河津人, 硕士研究生, 主要研究方向为可靠性与环境试验技术。

low-temperature stepping stress test, high-temperature stepping stress test, rapid temperature cycling test of 10 cycles, vibration stepping stress test (including three axis and six degree of freedom random vibration of air hammer and electromagnetic platform vibration) and comprehensive stepping stress test of 5 cycles. The experiment was carried out on this basis. Results Oil leakage failure was effectively excited in the rapid temperature cycling test and comprehensive stepping stress test. It is coincided with the failure of similar products used in the field. Conclusion The reliability enhancement test technology can be effectively used in development of electromechanical-hydraulic integration products, and can effectively activate the weakness with higher frequency in the field, and can be used as one of the methods in development of steering gear.

KEY WORDS: steering gear; reliability enhancement testing (RET); test evaluation

伺服作动器是飞机电传飞控系统的重要组成部分,其功能和性能是决定飞控系统能否正常工作的关键因素。随着新机战术技术性能的不不断提升及训练作战任务的不断变化,使用寿命不断增加,工作环境更加恶劣^[1],伺服作动器也在向长寿命、高可靠、高安全方向发展,对作动器验证技术的要求也随之不断提高。如何提升作动器的可靠性已成为与产品性能提升要求同等重要的研究目标。

传统的模拟试验是通过模拟产品真实的使用环境来检验其可靠性程度,存在周期长、效率低、耗费大的缺点。同时,由于真实环境复杂多变,产品使用时涉及到多个应力的相互耦合作用,受限于现有的试验能力水平,目前只能通过组合或几个应力综合的方式开展试验,容易导致试验结果与产品的实际使用情况不相符^[2]。

可靠性强化试验技术是把故障和失效当作主要的研究对象,通过施加逐渐增大的环境应力和工作应力来主动激发产品的设计、工艺缺陷,暴露产品的薄弱环节,从而达到快速改进产品的目的^[3-4]。由于可靠性强化试验所施加的环境应力和工作应力往往会超出产品的设计极限,基于“链条理论”及“应力-强度干涉理论”的基础,可靠性强化试验激发缺陷的效率很高,可有效缩短高质量产品的研制周期^[5-7]。

近年来,随着可靠性强化试验的理论研究基础不断加深,部分机电产品如汽车、工程车辆、轴承等陆续开展了可靠性强化试验技术应用^[8]。杭州轴承试验研究中心开展了轴承寿命及可靠性强化试验研究,并研制了轴承自主知识产权的可靠性强化试验机^[9]。重庆大学和湖北大学等研究机构对数控机床设备中的加工中心数控转台和数控系统可靠性强化试验方法开展了研究^[10]。区别于电子产品,机电产品的功能是由电控部分的运算功能或逻辑判断功能与机械构件的执行功能相结合来完成的。由于其功能多,结构复杂,失效影响因素也多,故障模式复杂,某一局部的失效就会造成整个结构的失效^[11]。

伺服作动器在飞机电传飞控系统中发挥着极为重要的作用,工作时接受飞控计算机的指令信号,向作动筒的各腔分配工作液,使作动筒输出响应位移,从而驱动飞机舵面的偏转,属于精密、复杂的机电液

一体化产品。研究可靠性强化试验技术在伺服作动器类产品上的适用性,在研制过程中将产品缺陷激发为可被检测到的故障。通过对故障模式、故障机理进行分析,对从设计上改进来控制缺陷,提高产品健壮性和可靠性,降低产品使用过程中的故障发生率,具有很好的工程应用价值。

1 可行性分析

传统电子产品的可靠性强化试验主要为环境载荷激发试验,包含环境温度载荷及振动载荷的组合及综合,一般由低温步进应力试验、高温步进应力试验、快速温度循环试验、振动步进应力试验和综合环境应力试验,如图1所示。

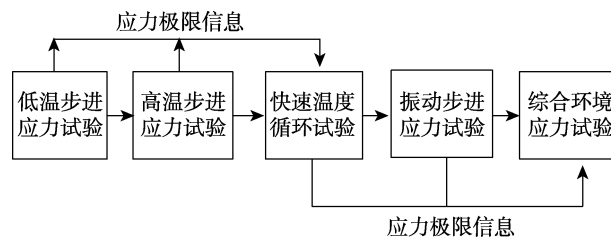


图1 可靠性强化试验流程

伺服作动器作为典型的机电液一体化产品,工作过程中除承受环境载荷(温度和振动)的影响外,工作载荷(油温、负载、运动频度等)的影响也发挥着很大的作用。伺服作动器的密封采用的是氟橡胶“O”型密封圈加保护环的形式,主要通过橡胶密封圈与作动器活塞杆的挤压实现油液的密封。

环境载荷方面,低温步进应力试验条件下,橡胶表现为低温脆性,橡胶变硬丧失弹性,并引发漏油。高温步进应力条件下,橡胶变软,随着高温保温时间的延长,橡胶容易发生老化,导致压缩永久变形增大,橡胶密封圈的预压缩量与作动器活塞杆之间接触应力下降,从而引发漏油。快速温度循环试验条件下,橡胶材料特性剧烈变化,同时不同线膨胀系数的组合件由于受温度作用的响应不同,容易造成连接松弛。振动步进应力条件下,能够激发结构部件产生疲劳,使制造或安装不当的结构部件产生松弛。综合环境条

件下,可加剧脆性绝缘材料出现裂纹及结构件的松动等。综合分析来看,传统的可靠性强化试验应力,可很好地激发伺服作动器的一系列典型故障^[12]。

工作载荷方面,伺服作动器活塞往复运动过程中,负载和运动频度的作用带来橡胶密封圈的磨损。同时磨屑带入油液后,又进一步加剧了磨损的发生,劣化了液压油的污染度,并造成污染敏感组件(如电液伺服阀等)出现故障。油温的变化带来油液黏度的变化,使得运动接触面的摩擦系数发生变化,改变了磨损的发生,工作载荷的作用对伺服作动器故障的激发同样具有很好的加速作用。

因此,为了达到快速激发伺服作动器故障的目的,在可靠性强化试验中综合考虑施加环境载荷和工作载荷,以期用最短的时间发现其薄弱环节。

2 可靠性强化试验方案制定

2.1 响应调查

为了明确伺服作动器在温度应力及振动应力下的响应情况,需开展温度响应调查及振动响应调查。其中温度响应调查包括非接触式和接触式温度响应调查,重点关注产品的温度敏感部位。如伺服作动器运动部位密封圈、保护环处的温度响应情况,确定温度稳定时间。振动响应调查需要对夹具的振动传递特性进行测定,验证夹具具有良好的振动传递特性。同时重点关注伺服作动器的共振频率及振动敏感部位的振动响应情况。

经过温度响应调查,确定产品的温度稳定时间为 60 min。根据振动响应调查结果,确定夹具的共振频率为 600~700 Hz,产品的共振频率在 330~350 Hz 之间,基本满足倍频程要求,表明该夹具具有很好的传递特性。

2.2 应力分析及确定

在制定可靠性强化试验方案前,需要对试验对象进行敏感应力的分析,找出影响产品可靠性的主要因素和对产品可靠性影响较大的敏感应力,并以此为依据制定相应的可靠性强化试验方案。根据温度响应调查结果,油温对伺服作动器整体的影响较大,产品的热点集中在油温直接作用的部位,即油直接流过的地方。对于其余零部件,环境温度的影响较大。因此需综合考虑油温和环境温度的影响。结合可行性分析结果,确定油温、振动、环境温度、负载及运动频度作为本次可靠性强化试验的敏感应力。

2.3 可靠性强化试验方案

可靠性强化试验遵循的基本前提为故障机理较常规试验应力未发生变化,但是由于伺服作动器为复杂的有机组合体,各个部分“强度”不尽相同。因此,

需要经过充分讨论,确定最终的试验应力截止条件。

2.3.1 低温步进应力试验

起始温度为常温(25℃),步进量在温度低于产品规范给定的低温工作温度时取 20℃/步,当温度高于产品规范给定的低温工作温度时取 5℃/步,温变率取 60℃/min,保温时间取 60 min。考虑到油温对伺服作动器整体的影响较大,试验中油液温度随环境温度同步变化。低温步进应力试验剖面如图 2 所示。根据油液使用说明给定的最低极限工作温度为-55℃,实际使用中往往有一定的裕度。因此,试验截止条件确定为达到产品的低温工作极限或油液无法工作,负载及运动频度在通电工作时以特定的形式进行施加。

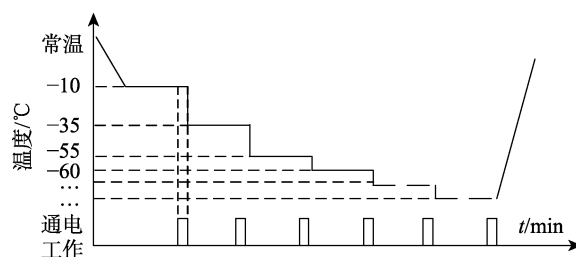


图 2 低温步进应力试验剖面

2.3.2 高温步进应力试验

起始温度为常温(25℃),步进量在温度低于产品规范给定的高温工作温度时取 15℃/步,当温度高于产品规范给定的高温工作温度时取 5℃/步,温变率取 60℃/min,保温时间取 60 min。考虑到油温对伺服作动器整体的影响较大,试验中油液温度随环境温度同步变化。高温步进应力试验剖面如图 3 所示。根据油液使用说明给定的最高极限工作温度为 140℃,实际使用中往往有一定的裕度。因此,试验截止条件确定为达到产品的高温工作极限或油液无法工作时截止,负载及运动频度在通电工作时以特定的形式进行施加。

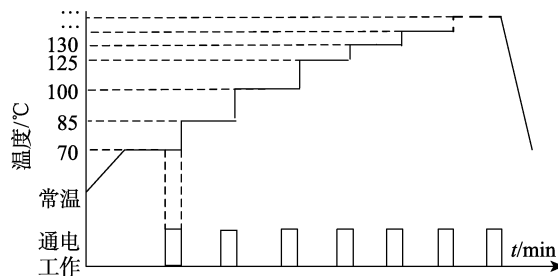


图 3 高温步进应力试验剖面

2.3.3 快速温度循环试验

温度变化范围在上述高低温试验结果得到的工作温度极限的基础上各取 5℃的余量(如温度下限为-60℃,温度上限为 130℃,则取-55~+125℃作为快速温度循环的下限和上限),温变率取 60℃/min。

考虑到伺服作动器整体受油温影响较大,其余部件受环境温度影响较大,为了使伺服作动器整体经历快速温度循环应力的考核,采用综合考虑的方式,共进行11个循环。其中前5个循环伺服作动器不工作,使伺服阀等零部件充分经历环境温度的作用,后6个循环伺服作动器加电工作,使产品整体经历环境温度及油温的作用。快速温度循环试验剖面如图4所示。

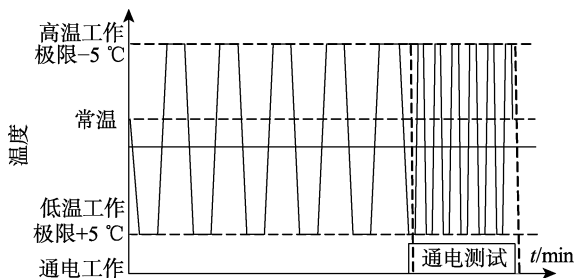


图4 快速温度循环试验剖面

2.3.4 振动步进应力试验

因伺服作动器属于典型的机电液一体化产品,其主体部分多为机械结构,固有频率一般较低,而体积小质量轻的电子控制部分固有频率较高,导致伺服作动器的设计缺陷和工艺缺陷衍生出来的固有频率有高有低。

气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动方式的优点是频率范围高达10 000 Hz,且振动方向为三轴六自由度,能比较真实地模拟被试品在外场承受的振动形式。因其激励力由气锤产生,在低频段能量较弱,不能有效激发出机械结构缺陷及薄弱环节。以Qualmark振动试验系统为例,通过测试结果可以看出,其能量多集中在1000 Hz以上,如图5所示。

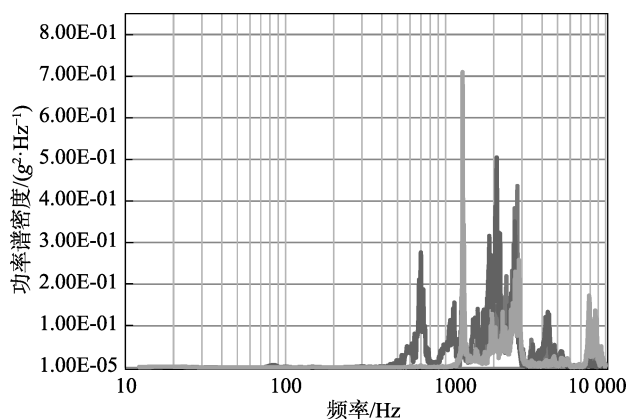


图5 Qualmark振动试验系统台面测试结果

电磁振动台随机振动方式的优点是频谱可控,即可控制低频能量,能有效激发出机械结构缺陷及薄弱环节。但每次只能在一个方向上施加振动,不能完全激发出对其他振动方向敏感的缺陷及薄弱环节。安装于某平台的伺服作动器功能振动谱如图6所示,频率范围为20~2000 Hz。

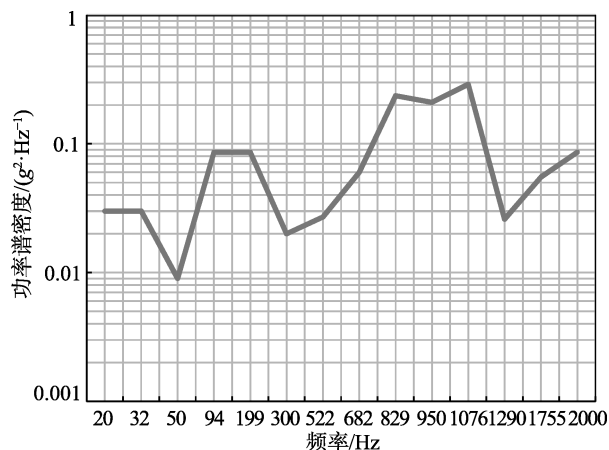


图6 功能振动谱

为了达到激发缺陷的目的,需在尽可能宽的频率范围内施加振动激励,因此振动步进应力试验采用气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动和电磁振动台随机振动相组合的试验方式。为了避免伺服作动器在1000~2000 Hz重复经历振动应力,导致故障机理发生变化,将电磁振动台随机振动频率范围设定为20~1076 Hz。

振动量级同样采用步进的方式,气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动的初始量级为5g,达到40g前每步长10g,之后每步长为5g。在40g振动结束后需返回到“微颤振动”(5g),以检测在较高振动水平时发生的可能故障,如图7所示。电磁振动台随机振动的初始量级为4g,达到14g前每步长4g,之后每步长为2g。在14g振动结束后需返回到“微颤振动”(4g),每个量级的保持时间为12 min。根据同类产品的耐久振动经验,将试验截止条件确定为达到产品的振动工作极限或60g(气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动)/20g(电磁振动台随机振动),如图8和图9所示。

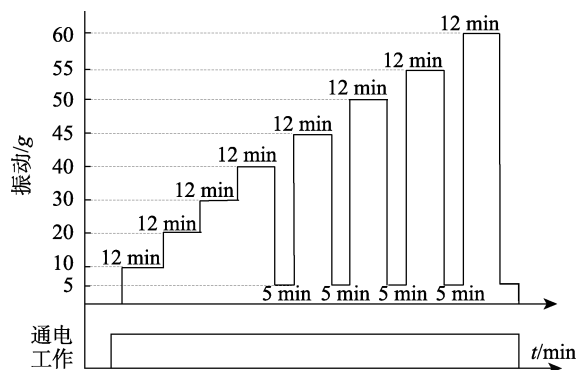


图7 气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动试验剖面

2.3.5 综合环境应力试验

综合环境应力试验一般采用温度循环试验和振动步进应力试验(气锤式三轴向六自由度超高斯随机振动)综合施加的方式。温度循环应力施加方法与快

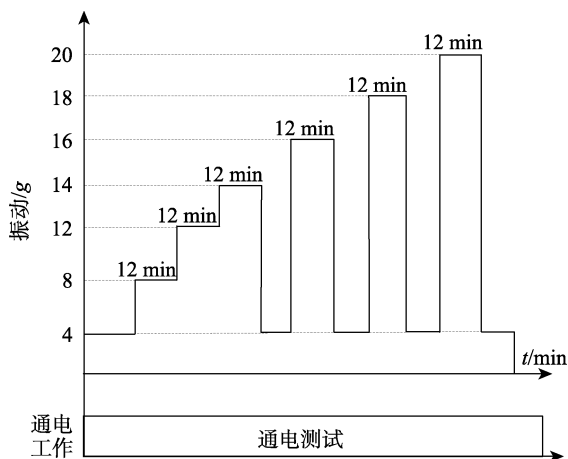


图8 电磁振动台随机振动试验剖面

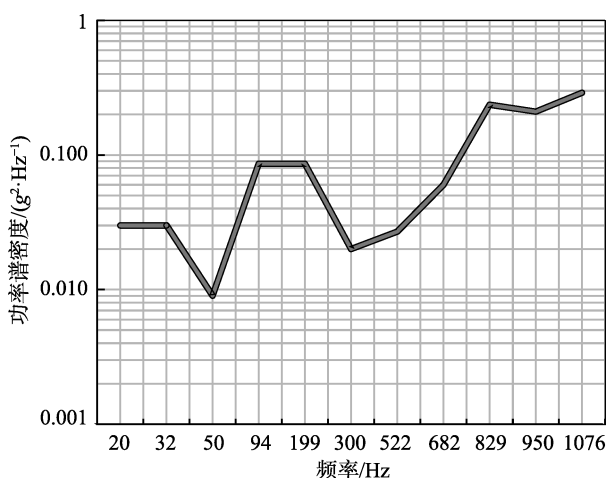


图9 电磁振动台随机振动试验剖面

速温变循环试验相同，而振动步进应力根据已完成的振动步进应力试验获得的振动应力工作极限确定步长，初始振动应力为 $1/5$ 工作极限，依次为 $2/5$ 、 $3/5$ 、 $4/5$ 工作极限，最后一个循环为工作极限减 $5g$ ，共完成 5 个循环。

3 可靠性强化试验的实施

基于既定的试验方案实施了可靠性强化试验，低温步进应力试验和高温步进应力试验阶段均未发生故障，快速温度循环试验第 7、8 循环出现漏油现象，振动步进应力试验未发生故障，综合环境应力试验第 3、4、5 循环高温段及第 4 循环的升温过程中均出现漏油故障。经分析，与相似产品外场暴露的漏油故障模式相吻合，通过更改漏油部位的结构设计，并进行了回归验证试验，未再发生故障。

4 结语

通过对可靠性强化试验应用于伺服作动器的可行性进行论证分析，表明可靠性强化试验技术理论上可应用于伺服作动器的研制过程。通过响应调查及应力分析确定，有针对性地提出了适用于伺服作动器的可靠性强化试验方案，并选取典型伺服作动器进行了试验。结果表明，提出的可靠性强化试验方案有效地激发了伺服作动器外场故障率较高的漏油故障，通过采取改进措施，避免了该故障的发生，从而提高了其固有可靠性。表明可靠性强化试验技术可有效的应用于机电液一体化结构的产品。

参考文献：

- [1] 何文波, 张涛, 郝苗苗, 等. 可靠性强化试验在高可靠性产品设计中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(s1): 29-35.
- [2] 徐凯, 李志强, 郭瑛, 等. 可靠性强化试验在失速告警振杆器上的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 21-25.
- [3] 蒋瑜, 陈循, 陶俊勇. HALT 试验高效率振动剖面的建立[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 531-535.
- [4] 李劲, 时钟. 可靠性强化试验在高可靠产品中的应用探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29(5): 10-14.
- [5] 丁晓力, 蔡小锋, 徐忠, 等. 基于可靠性强化试验的防滑刹车控制盒设计[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(6): 26-29.
- [6] 刘加凯, 齐杏林, 范志锋. 可靠性强化试验的机理探析[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 36-38.
- [7] 刘加凯, 齐杏林, 贺连梁, 等. 可靠性强化试验理论分析及其在引信中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(1): 15-19.
- [8] 蒋培, 陈循, 张春华, 等. 可靠性强化试验技术综述[J]. 强度与环境, 2003, 30(1): 58-64.
- [9] 李兴林, 张燕辽, 曹茂来, 等. 滚动轴承疲劳寿命及可靠性强化试验系统技术研究[J]. 试验技术与试验机, 2003, 43(2、3): 19-20.
- [10] 张根保, 许智, 何文辉, 等. 加工中心数控转台可靠性强化试验方法研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(8): 948-951.
- [11] 姜海勋, 叶建华, 李志强. 可靠性强化试验技术在全压智能探头研制中的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 140-144.
- [12] 张新, 王晓红, 王立志, 等. 电液舵机系统的可靠性强化试验方案设计[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 208-212.