

大型飞机机身双曲度蒙皮纵向拉伸成形加载 优化设计与试验研究

文松涛¹, 曾斌¹, 汪洋华¹, 彭静文², 李卫东², 罗华²

(1. 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 针对 C919 大型客机机身双曲度蒙皮进行纵向拉形的加载轨迹优化与试验研究。**方法** 应用蒙皮拉形工艺设计制造软件, 采用优化设计的方法, 对机身典型蒙皮零件进行纵向拉形加载轨迹设计; 进行拉形过程的有限元仿真, 判断设计的加载轨迹是否满足成形要求, 将优化后的加载轨迹应用于实际零件成形; 进行实际零件拉形试验, 对毛料伸长与局部应变进行测量, 与有限元仿真进行对比, 验证有限元仿真的准确性。**结果** 实际零件的毛料伸长与轨迹设计和有限元模拟的伸长量十分接近; 将优化设计后的加载轨迹应用于实际零件的成形, 获得了满足零件交付要求的蒙皮零件。**结论** 通过加载优化设计与试验, 验证了有限元模拟有较好的精度; 通过加载轨迹优化与有限元模拟结合的拉形工艺设计方法, 可以用于零件的实际生产。

关键词: 大型飞机; 机身蒙皮; 拉伸成形; 加载轨迹

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.014

中图分类号: TG316.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)06-0088-06

Optimization Design and Experimental Study on Loading Path of Longitude Stretch Forming for Double-curved Fuselage Skin of Large Aircraft

WEN Song-tao¹, ZENG Bin¹, WANG Yang-hua¹, PENG Jing-wen², LI Wei-dong², LUO Hua²

(1. Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Objective To study the optimization design method and production experiment on the longitude stretch forming loading path for double-curved fuselage skin of large aircraft. **Methods** Applying the optimal design method, The loading path of longitude stretch forming for double-curved fuselage skin of large aircraft has been optimized with XSTR Stretch software. The stretch process is simulated with FEM to evaluate the designed loading path. The optimized loading path has applied directly for the actual part forming. The elongation and local strain of the blank is measured after the actual part stretch forming test and measurements compare with the FEM simulation to verify the accuracy of FEM. **Results** The elongation of actual forming part and FEM simulation is proximity and acceptable. The fuselage skin which meets the delivery requirement has been obtained after applying the optimized loading path. **Conclusion** The accuracy of FEM is verified by the lading path de-

收稿日期: 2014-09-23

基金项目: 洪都公司基础科研项目(司科 192-111)

作者简介: 文松涛(1983—), 男, 江西南昌人, 技术室主任, 工程师, 主要研究方向为钣金成形。

sign and actual part forming tests. The design method combined with optimized method and FEM simulation is capable for applying to actual part fabrication.

KEY WORDS: large aircraft; fuselage skin; stretch forming; loading path

蒙皮零件是构成和维持飞机气动外形的外表零件。蒙皮零件的制造水平和产品质量直接影响着飞机的气动性能和使用寿命。我国已开始自主研制大型民用客机,因此深入研究和发​​展先进蒙皮数字化制造技术对于我国航空制造业具有十分重要的意义^[1]。

大型飞机的蒙皮零件有着尺寸大、曲率小、刚性弱等特点,主要是通过纵向拉伸成形方式进行成形。纵拉一般针对双曲率或者纵向曲率大而横向曲率小的零件。纵向拉形机的钳口由一组子夹钳组成,夹钳间可以转动形成一定曲率的形状,以成形双曲度中的一个曲度,另外一个曲度在拉伸方向上形成。纵向不同于横拉,其夹钳的运动方式非常复杂,采用简单的通过模具截面线来确定加载轨迹的设计方法,通常不能得到能够良好加载的轨迹,导致了需要通过大量的尝试设计,来获得一组比较好的加载参数,进行生产试验。

近年来,为了满足大型飞机的研制,我国各大主机厂分别引进了数控纵向蒙皮拉伸机,但缺乏配套的工艺参数设计和优化比较解决方案。现有工艺人员在纵向拉形方面经验较少,靠传统的以经验分析和试验为主的飞机蒙皮成形方法,很难成形复杂蒙皮,材料和人工的浪费非常大,数控拉形设备对变形的精确控制功能未能发挥,难以满足大型飞机大尺寸蒙皮零件的生产要求,同时也严重制约了钣金厂蒙皮制造水平的提高^[2-3]。

本文针对典型的大型飞机双曲率蒙皮零件,应用蒙皮纵拉工艺设计与制造系统^[4],对夹钳的加载轨迹进行了优化设计;采用有限元模拟的方法,判断设计轨迹是否合理;根据优化后的加载轨迹,生成驱动数控纵向拉形机运动的数控代码进行零件的成形;通过对成形后的零件进行测量,获得满足零件交付要求的蒙皮零件。

1 典型蒙皮零件工艺分析模型的建立

图1为某大型飞机机身蒙皮零件数模。该零件

为双曲率零件,除了通常具有的在拉伸方向垂直方向上的较大曲率外,拉伸方向的曲率也较明显。另外,根据该零件形状设计的模具如图2所示,从中可清楚地看到该零件在右前方和左后方相比另一方有较大的倾斜度,该零件明显不对称。

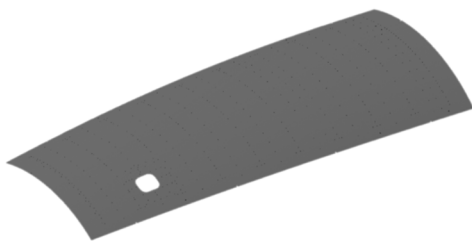


图1 双曲率蒙皮零件

Fig. 1 The double-curved skin part

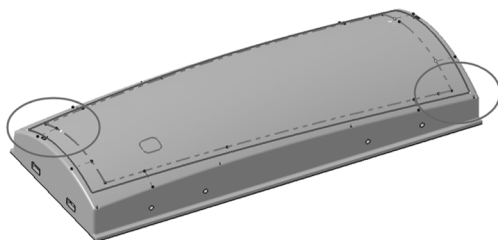


图2 双曲率零件纵拉模具

Fig. 2 The longitude stretch forming tool of double-curved skin part

零件材料为铝合金 2524-T3,厚度为 1.6 mm。分别采用单向拉伸试验和 FLD 试验获得材料性能参数和破裂准则,另外分别采用控制拉形变形量和应变速率的方法来避免滑移线和粗晶的出现。

根据零件数模信息,毛料为 1.6 mm×1845 mm×4795 mm。考虑到拉形实际过程中悬空段的长度及包覆角对成形结果的影响,适当延长拉伸方向长度,另外为使夹钳边缘子夹钳有效夹持毛料,此处设置毛料尺寸为 1.6 mm×2000 mm×6400 mm。设置辅助工作台高为 300 mm。在蒙皮纵拉工艺设计与制造系统(XSTRStretch)^[4]中建立的零件的工艺分析模型如图3所示。

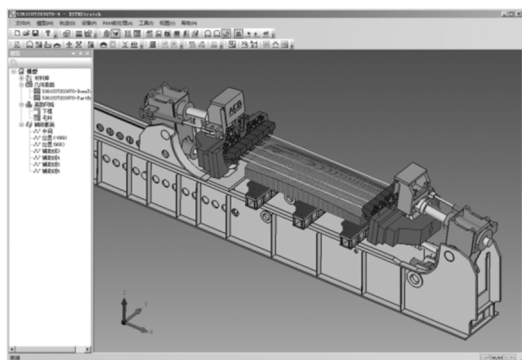


图3 蒙拉工艺分析模型

Fig. 3 Analysis model of stretch forming process

2 零件加载轨迹优化设计

根据零件的工艺分析,以及铝合金材料 2524-T3 的材料性能,首先设计蒙皮加载的延伸率为 2.0%。为了保证零件成形能够尽量包覆模具且不产生过多的局部拉伸量,按照以下原则设计夹钳的包覆角度。即成形终了位置,毛料尽量沿模具两端切线延伸,毛料刚好贴合模具且不产生过多的包覆。如图 4 所示。

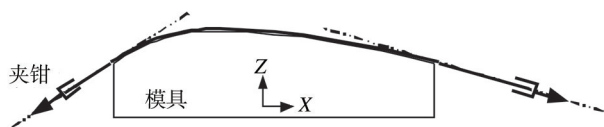


图4 毛料与夹钳的包覆

Fig. 4 Blank and wrapping of jaws

因为零件曲面较为平缓,因此其成形过程如下:初始夹持→预拉伸→曲钳口→补拉伸。按照以上的描述,设计蒙皮零件的加载轨迹参数如表 1 和表 2 所示。

表1 拉形工艺参数

Table 1 Process parameters of stretch forming

	延伸率	活动端包覆	固定端包覆
	/%	角/(°)	角/(°)
初始夹持	-0.1	1.9	1.9
预拉伸	0.5	3.5	3.2
曲钳口	0.5	3.5	3.2
补拉 1	2	3.5	3.2

表2 曲钳口角度

Table 2 Angles of curving jaws (°)

位置	A01	A02	A13	A24	A35	A46
移动端	10	15	7	9	2	4
固定端	14.5	9.7	10	11.5	8	1

将上述加载轨迹参数输入蒙皮拉形工艺设计与制造系统,输出有限元前置处理文件,导入有限元软件 Pam-Stamp 中进行模拟,模拟结果如图 5 所示。



图5 有限元模拟主应变分布

Fig. 5 Distribution of major strain

从图 5 可以看到,毛料在拉伸过程中,与模具贴合良好,毛料内部区域没有大变形的发生,因此加载工艺参数设计合理。但是在毛料与夹钳的 4 个角上,即图中椭圆位置,发生了主应变为 0.23 的变形,此变形量已经超过了 2524-T3 铝合金材料的极限拉伸量。通过调整模具的高度,增加最终拉伸时夹钳的仰角,可以减小毛料两侧边与夹钳交叉的位置的拉伸量。将辅助工作台高度设置为 500 mm,再采用上述拉形工艺参数进行有限元模拟,模拟结果如图 6 所示。

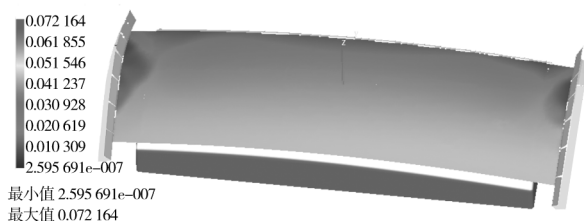


图6 修改模具高度后的拉形模拟主应变分布

Fig. 6 Distribution of major strain after increase the height of tool

从图 6 可以看到,增加模具高度后,最终毛料的最大主应变减少为 0.072,已经属于 2524-T3 材料合理的变形范围。由于模具高度与模具顶部贴模情况有一定关系,如果再增加模具高度,毛料边缘与夹

钳交叉位置应变会有减少,但会造成与模具顶部位置接触的材料发生起皱,因此 500 mm 的辅助工作台高度是最理想的高度。

3 典型零件生产性试验

按照优化的加载轨迹,在数控拉形机上进行 1 : 1 的典型零件自动拉形,验证加载轨迹设计的合理性与有限元模拟的准确性,并积累工艺经验和实验数据。

3.1 生产试验过程

在进行生产性试验之前,需要对毛料进行网格印制(如图 7 所示),用于试验完成后,测量成形后的板料内的局部变形量,与设计的延伸率和有限元模拟结果进行对比。

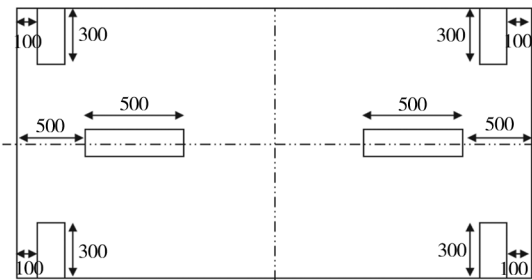
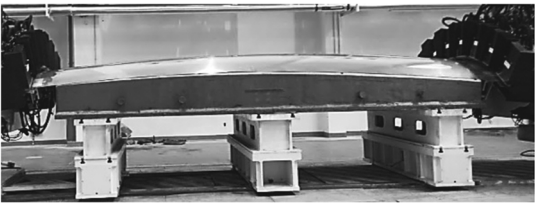
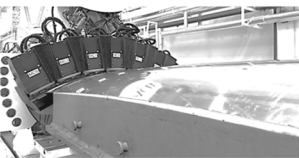


图 7 毛料印制网格区域
Fig. 7 Areas of grid in blank

根据优化后的零件加载轨迹,应用蒙皮纵拉工艺设计与制造系统生成设备的控制代码,按照数控代码自动执行拉形过程。成形过程中的零件如图 8 所示。



a 整体



b 局部位置1



c 局部位置2

图 8 试验中的零件

Fig. 8 The part in stretch forming process

由图 8 可以看出,在拉伸过程中,毛料与模具贴合情况良好。在模具两端,毛料刚好沿模具两端切线延伸,没有产生过度包覆和不贴模的情况。

3.2 试验结果测量

成形结束后,松开夹钳,将毛料卸载,通过测量零件中间和两边位置的毛料长度,可以对比优化设计的加载轨迹与实际轨迹伸长量,验证加载轨迹设计与数控代码的准确性。测量结果见表 3。

表 3 拉伸长度测量结果

Table 3 The length measurement of stretched blank

位置	拉形前	拉形后	轨迹设计	有限元
中间	6300	6410	6422.5	6422.3
两边	6300	6360	6395.5	6395.6

由拉伸长度测量情况可以看出(如图 9 所示),有限元与加载轨迹设计的长度是材料没有发生回弹前的材料长度,考虑到零件回弹,板料伸长的计算精度满足要求。

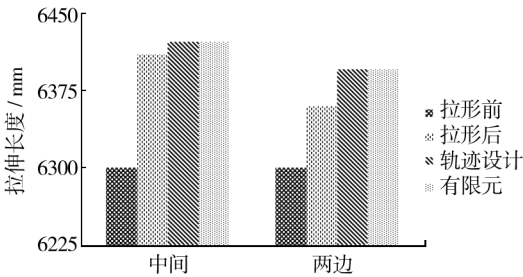


图 9 拉形板条试验结果对比

Fig. 9 The length comparison of stretched blank

在成形结束后,针对毛料上的印制的网格区域,采用网格应变测量系统 GMAS 软件测量应变^[5],测量结果如图 10 和 11 所示。

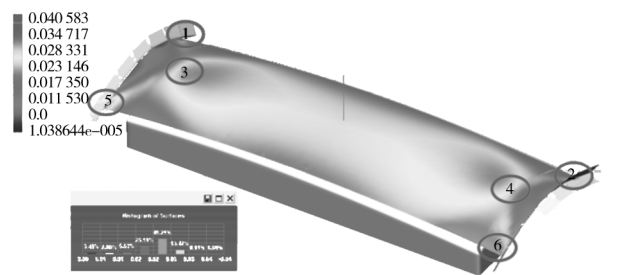


图 10 网格区域

Fig. 10 Areas of grid

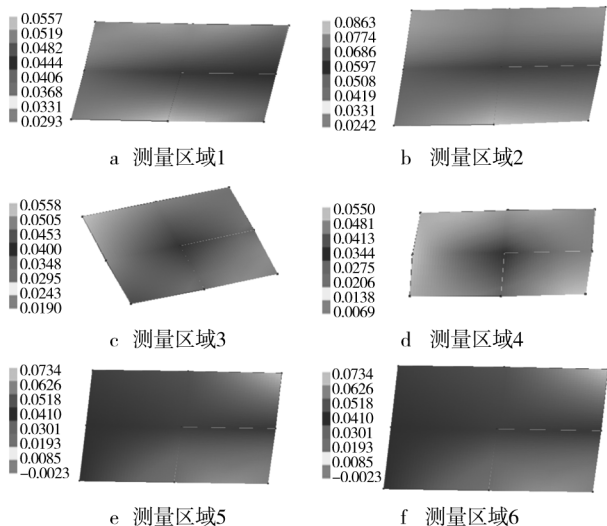


图 11 网格测量结果

Fig. 11 Strain measurement

由网格测量结果可以看出,有限元模拟的结果与实际网格应变测量结果一致,有限元的计算能够对实际生产起到指导作用。

由图 12 和图 13 可以看出,零件最终成形切边后,零件与模具的最大间隙约为 3 mm,主要发生在模具两端最高处和模具中间最低的两侧位置。零件的贴模情况理想,且与实际情况相符,满足低应力装配的要求,不需要对模具型面进行回弹修正。

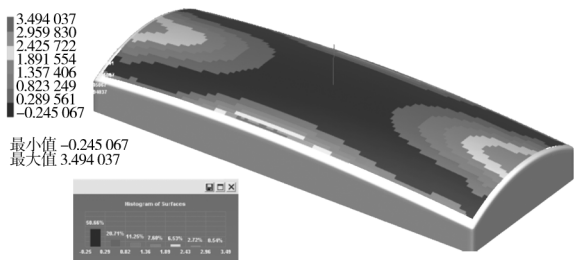


图 12 试验有限元模拟贴模情况 (mm)

Fig. 12 The fittability of FEM simulation



图 13 实际零件贴模情况

Fig. 13 The fittability of actual part

4 结论

大型飞机蒙皮零件虽然零件曲面平坦,但是有着尺寸大、曲率分布复杂等特点,在成形过程中会存在不贴模和拉伸量过大的情况。文中通过应用蒙皮拉形工艺设计与制造系统,对典型蒙皮零件的加载轨迹进行了优化设计,采用有限元仿真对优化结果进行了评估;将优化设计后的加载轨迹应用于实际零件的成形,获得了满足质量要求的零件。通过研究得到了以下结论。

1) 有限元模拟具有较好的精确度。通过正交试验方法设计有限元模拟试验,可以快速找到较好的工艺参数组合,实现工艺参数优化。

2) 对于大型飞机双曲率蒙皮零件,模具的高度位置的确定,直接影响成形结果的好坏;若模具设置太低,会使得毛料两侧拉伸量过大,直接造成毛料断裂;若模具设置太高,会导致毛料中间与两侧产生不均匀的拉伸,导致毛料中间发生起翘。

3) 一般情况下可以找到合适的拉形加载轨迹参数,使得回弹后的零件在小力作用下能够贴模,满足零件质量要求,即可不用对拉形模具进行回弹补偿,从而降低设计和制造成本。

参考文献:

- [1] 张彦敏,周贤宾. 飞机蒙皮拉伸成形工艺参数优化[J]. 航空学报,2006,27(6):1203—1208.
ZHANG Yan-min,ZHOU Xian-bin. Parameter Optimization in Aircraft Skin Stretch Forming Process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(6):1203—1208.
- [2] 韩金全,万敏,陈雪梅,等. 飞机复杂蒙皮拉形工艺参数优化设计[J]. 塑性工程学报,2009,16(6):96—101.
HAN Jin-quan,WAN Min,CHEN Xue-mei,et al. Optimization of Process Parameters in Stretch Forming of Aircraft Complex Skin[J]. Journal of Plasticity Engineering,2009,16(6):96—101.
- [3] 张晓静,周贤宾. 板料成形回弹模拟[J]. 塑性工程学报,1999,6(3):56—62.
ZHANG Xiao-jing,ZHOU Xian-bin. Simulation of Springback in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering,1999,6(3):56—62.
- [4] 李卫东. 飞机蒙皮数字化拉形技术与系统开发

- [D]. 北京:北京航空航天大学,2007.
- LI Wei-dong. Technological Research and System Development of Numerical Stretch Forming for Aircraft Skin [D]. Beijing:Beihang University,2007.
- [5] 吴向东,万敏,李盛. 便携式板料应变测量系统 GMAS [J], 锻压技术,2005(21):208—210.
- WU Xiang-dong, WAN Min, LI Sheng. Potable Sheet Metal Strain Measurement System GMAS [J]. Forging & Stamping Technology, 2005(21):208—210.
- [6] 彭静文,李卫东,万敏. 机翼前缘蒙皮拉形工艺参数优化与试验[J]. 塑性工程学报,2011,18(4):74—78.
- PENG Jing-wen, LI Wei-dong, WAN Min. Optimization and Experimental Research of Processing Parameters in Stretch Forming of Wing Leading Edge Skin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011,18(4):74—78.
- [7] 韩金全. 飞机蒙皮拉形模具型面与工艺参数优化研究 [D]. 北京:北京航空航天大学,2009.
- HAN Jing-quan. Design and Optimization of Tool Surface and Processing Parameters in Aircraft Stretching [D]. Beijing: Beihang University, 2009.
- [8] BAHLOUL R, MKADDEM A, DAL SANTO P, et al. Sheet Metal Bending Optimization Using Response Surface Method, Numerical Simulation and Design of Experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006(48):991—1003.
- [9] JANSSON T, ANDERSSON A, NILSSON L. Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part An Evaluation Using Surrogate Models and Response Surfaces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005(159):426—434.
- [10] MKADDEMA A, BAHLOUL R. Experimental and Numerical Optimization of the Sheet Products Geometry Using Response Surface Methodology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(189):441—449.
- [11] HE De-hua, LI Dong-sheng, LI Xiao-qiang. Optimization on Springback Reduction in Cold Stretch Forming of Titanium-alloy Aircraft Skin [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010(20):2350—2357.
- [12] HE De-hua, LI Xiao-qiang, LI Dong-sheng. Process Design for Multi-stage Stretch Forming of Aluminum Alloy Aircraft Skin [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010(20):1053—1058.
- [13] O'Donnell M. Finite Element Modeling of a Multi-stage Stretch-forming Operation Using Aerospace Alloys [D]. Belfast: University of Ulster, 2003.
- [14] HEUNG K, SEOK H. FEM-based Optimum Design of Multi-stage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1/3):354—362.
- [15] CAI Zhong-yi, WANG Shao-hui, XU Xu-dong. Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209):396—407.
- [16] ESMAEILIZADEH Reza, KHALILI Kourosh, MOHAMMADSADEGHI Bagher, et al. Simulated and Experimental Investigation of Stretch Sheet Forming of Commercial AA1200 Aluminum Alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2):484—490.

(上接第71页)

- [8] 吴远志,严红革,朱素琴,等. 多向锻造 ZK60 镁合金组织和性能的均匀性[J]. 中国有色金属学报,2014,24(2):310—316.
- WU Yuan-zhi, YAN Hong-ge, ZHU Su-qin, et al. Homogeneity of Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Magnesium Alloys Fabricated by High Strain Rate Triaxial-forging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2):310—316.
- [9] 夏祥生. 多向锻造 EW75 合金组织及力学性能研究 [D]. 北京:北京有色金属研究总院,2012.
- XIA Xiang-sheng. Study on the Microstructures and Mechanical Properties of EW75 Alloy During Multidirectional Forging [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.
- [10] 徐烽. 多向锻造变形对 ZK60 镁合金组织和性能影响 [D]. 南京:南京理工大学,2011.
- XU Feng. Effect of Multi-direction Forging Process on Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Magnesium Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [11] 简炜炜,康志新,李元元. 多向锻造 ME20M 镁合金的组织演化与力学性能[J]. 中国有色金属学报,2008, 18(96):1006—1011.
- JIAN Wei-wei, KANG Zhi-xin, LI Yuan-yuan. Microstructural Evolution and Mechanical Property of ME20M Magnesium Alloy Processed by Multidirectional Forging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(6):1006—1011.