

# 飞机钣金零件展开计算方法的研究和应用现状

## Research and Application Status of Aircraft Sheet Metal Parts Development Algorithms

西北工业大学机电学院 卢元杰 刘 闯 王俊彪

**[摘要]** 分析了飞机钣金零件展开的复杂性,按照飞机钣金零件的结构和成形分类,对钣金零件展开计算方法进行了综述和归类,在此基础上提出了典型飞机钣金零件数字化展开计算方法的解决思路。

**关键词:** 数字化制造 展开方法 飞机钣金零件

**[ABSTRACT]** According to the structure and forming classification, the complexity of aircraft sheet metal parts development is analyzed, and the algorithms of sheet metal parts development are summarized and classified. Base on this, the solution for development algorithms of typical aircraft sheet metal parts digitalization is put forward.

**Keywords:** Digital manufacturing Development Algorithms Aircraft sheet metal parts

钣金零件作为飞机结构组成的重要部分,直接影响着飞机的外形准确度和结构承载能力,其制造工艺已成为影响飞机整体性能的重要环节。钣金零件展开是将钣金零件复杂的三维几何外形展开成平板毛料的过程,是钣金零件制造中的关键问题。试验证明,合理的毛料外形不仅可以减少成形后的修边工作量,还可改善成形过程中材料的应变分布,提高零件的成形质量。

然而,由于飞机钣金零件种类多样,其变形量及结构各不相同,难以用一种通用的方法来解决,需要针对不同类型的钣金零件研究与开发相应的算法和系统。随着零件复杂程度的增加及数字化制造技术的应用,基于经验法、试错法的传统展开技术已难以适应现代飞机研制的要求。本文综述了目前国内外学者在该领域的研究成果,并加以分类;通过对飞机钣金零件展开特点和难点的分析,探讨了解决问题的方向。

### 1 飞机钣金零件展开特点

零件展开问题的实质是零件三维形状向二维平面映射。展开是成形的逆过程,展开过程受到诸多因素影响:

(1)零件结构。飞机钣金零件结构复杂,很多零件表面既有曲面又有平面,有的零件本身就可以看作带厚度的曲面。零件曲面又可分为可展曲面和不可展曲面2类。

(2)材料性能。材料性能不同,塑性变形的特性也有差别。

(3)成形工艺方法。不同的成形工艺,因其成形机理不同,材料的流动方式也不同。

飞机钣金零件类型多,所用材料种类多,工装品种多,成形方法多,影响成形的因素多。典型飞机钣金零件的结构特点和成形方法如表1所示,飞机钣金零件按功能分类有框肋、蒙皮、壁板、长桁、加强支柱等,不同类型的零件又有不同的结构;常用的铝合金材料牌号有LY12、LF21、LC4等,每个牌号又有不同的材料状态;常用的成形方法有橡皮囊液压成形、蒙皮拉形、喷丸成形、拉弯成形、落压成形、滚压成形、轧压成形、冲压成形、手工成形等十几种;每一类零件可用的成形方法都会有好几种。由于钣金零件结构多样和成形工艺复杂等特点,导致了钣金零件的展开成为一个十分复杂的问题,主要表现为:

(1)为满足飞机气动外形要求,钣金零件多具有

表1 典型飞机钣金零件结构特点和成形方法

钣金零件	结构特点	成形方法
蒙皮	构成飞机气动外形的薄板件,结构尺寸大,相对厚度小,刚性差,外形多为复杂曲面	蒙皮拉形,轧压,滚弯
整体壁板	飞机整体结构承力件,外侧是曲面,内侧带有加强筋、长桁等结构要素,构成飞机的气动外形	喷丸成形,应力松弛
框肋	翼肋、机身隔框或其他骨架零件,腹板是平的或略带弧度,周围有浅的弯边;腹板上一般分布有减轻孔、定位孔和加强埂;腹板或弯边上有时有下陷	橡皮囊液压,冲压,拉弯

双曲率等复杂曲面外形,其曲面多为不可展曲面。

(2)部分钣金零件展开计算内容既包括外形面的展开,又包括内部结构特征的展开。如整体壁板外形是复杂曲面,内形面带有筋条和长桁等结构。

(3)钣金零件的结构一般有装配公差要求,如孔、下陷、长桁缺口等。这就要求毛料的展开具有较高的准确度。

(4)钣金零件所用材料种类多样,不同材料、不同牌号、甚至同种牌号的不同批次,其材料状态、成形性能都有所不同,一个成熟的展开方法必须考虑材料特性。

(5)成形工艺包括工艺方法选择、工艺参数设计和成形道次选择,这3方面对零件的展开影响显著。如框肋零件分别在用手工成形或橡皮囊液压成形后成形质量和毛坯形状存在差异;拉深成形中的压边力和压延筋位置对零件毛坯设计具有影响;如采用蒙皮多次拉形、整体壁板多次喷丸以及多道次拉深等工艺,毛坯的设计与采用单次成形不一样。

金属板料的塑性成形本身是一个连续的非线性不可逆过程,板料变形与路径有关,因而无法建立这个过程的逆解数学模型。对于形状稍有差别的金属平板,如果采用适当的成形工艺,也可以成形出形状相同的零件。因此,零件展开结果自然不会唯一,理论上也不存在直接从钣金零件几何外形逆推出精确并唯一的毛料外形的可能性。

## 2 飞机钣金零件展开算法分析

人们对零件展开计算问题的关注由来已久,许多研究者面向不同应用领域进行研究,提出了多种展开计算方法。不同的展开计算方法适应不同形状零件、不同成形工艺的需要。目前应用于实践或见诸报道的方法主要有经验公式法、滑移线法、势场模拟法、几何映射法、解析法和反向模拟法。不同的展开算法有其特定的适用对象,如表2所示。

表2 各种展开算法的适用范围

展开算法	适用范围
经验公式法	拉深件,蒙皮,框肋零件
滑移线法	拉深件
势场模拟法	拉深件
几何映射法	拉深件,蒙皮,整体壁板
解析法	框肋零件
反向模拟法	冲压件,框肋零件

### 2.1 经验公式法

传统的钣金零件毛坯计算方法的要点是:在试验和等面积、等长度理论的基础上,建立展开经验公式,通过查表及查图法确定公式中的系数,从而计算出毛坯的形状和尺寸。不同种类零件的经验公式各不相同,现仅以框肋零件直弯边展开为例介绍目前企业采用的方法。图1为框肋零件直弯边展开图。

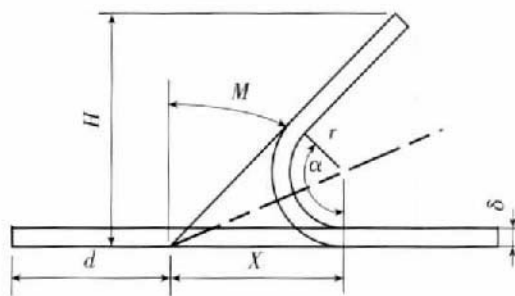


图1 框肋零件直弯边展开图  
Fig.1 Development of the bent edge on frame and rib parts

如图1所示, $H$ 为弯边高度, $M$ 为弯边斜角值, $\alpha$ 为中心角, $r$ 为弯曲内半径, $\delta$ 为零件材料厚度, $X$ 为弯曲起始线到弯边交线的距离,为弯边展开值。由此可知,

$$X = (r + \delta) \tan \frac{\alpha}{2} = (r + \delta) \tan \frac{(90^\circ \pm M)}{2}。$$

根据经验公式

$$d = \frac{H}{\cos M} - m$$

可得到展开值 $d$ ,从而得到总的展开长度。其中修正值 $m$ 可按下式计算:

$$m = m_1 + m_2,$$

$$m_1 = \left[ 2 \tan \frac{90^\circ - M}{2} - 0.01745(90^\circ - M) \right] R,$$

$$m_2 = \left[ 2 \tan \frac{90^\circ - M}{2} - 0.01745k(90^\circ - M) \right] \delta,$$

式中, $k$ 为弯曲中性层位置系数,与 $R/\delta$ 有关,其来源为工厂的经验数据。

通过以上经验公式可以确定弯边某点处的展开值,然后查图确定不同形状弯边的结构模线画法。对于曲率较大的曲线弯边和双曲率等复杂弯边则由车间反复试错制造展开样板。目前国内的飞机制造厂中,用经验法展开弯边仍占较大比重。

## 2.2 滑移线法

滑移线场理论是:针对具体的塑性加工过程,建立滑移线场,然后利用滑移线的某些特性来进行求解。20世纪50年代苏联的楚达列夫首次将滑移线场理论用于钣金拉深件毛料展开计算,随后各国学者也在此方面做了大量研究。1979年,V.Hasek和K.Lange利用滑移线法求算不规则直壁拉深件的展开问题。随后K.Lange等人进一步将滑移线法与计算机技术结合,实现了建立滑移线场、求算毛料及分析变形等过程的自动化。然而,滑移线法在实际应用中对拉深件的形状有一定限制,难以用于形状复杂零件的展开。

## 2.3 势场模拟法

势场模拟法是20世纪80年代出现的一种求算毛料的方法,比较有代表性的方法是电模拟法、流体模拟法和热传导模拟法。这种方法在一定的假设条件下,根据许多物理问题数学描述的相似性,通过相似理论,采用其他物理介质构成的模型来模拟板料凸缘的金属流动。梁炳文等人提出了一种应用于不规则拉延件毛料展开的势流模拟法。吴建军、马泽恩在1997年将势场模拟法与边界元素法相结合,提出势流边界元法用于设计复杂形状拉深件的毛料展开。吴建军和李顺平将上述展开计算方法应用在“一步法”分析中。

势场模拟法虽然适合于任何边界形状的钣金零件毛坯展开问题,但是得出的结果是在一系列假设条件下确定的,过于理想化。比如,热传导理论所做的物理假设为:板料在变形中厚度不变,材料各向同性,不考虑摩擦影响,材料为理想刚塑性等。实际上,飞机钣金成形所使用的板料多为弹塑性材料,且存在加工硬化,而且实际成形过程中摩擦因素的影响较大,金属流动情况复杂,因此会造成一定误差。

## 2.4 几何映射法

几何映射法又称为几何模拟法,20世纪80年代首次由加拿大McMaste大学学者R.Sowerby等人提出。它是针对钣金零件的成形过程进行近似预测分析的一种方法。该方法不考虑边界条件、金属塑性流动以及应力-应变关系。首先在所给的曲面模型上画出网格,然后将模型表面上的网格单元通过纯几何方式转换到平面上,从而得到毛坯外形。Blount G N和Stevens P R利用几何映射法获得较复杂零件的毛料形状。J.C.Gerdeen和P.Chen考虑了成形后零件的厚度分布。席平等提出了一种直纹面三角剖分展开方法。该方法将复杂曲面划分为若干条状区域,每一条状区域可近似认为是直纹面,按照映射规则,将各三

角片依次绕前一个三角片旋转,使所有三角片都落在同一平面上,最后用样条曲线逼近由三角平面所确定的平面形状的外围轮廓点,即可得到直纹面的最终展开形状。1998年,康小明等提出了不可展曲面近似展开的四边形等面积法,并将该算法用于壁板零件的毛坯计算当中。他们认为零件由平板状态成形为要求外形时发生的面内变形不大,并且不至于引起显著的厚度变化,由此零件成形前后的质量不变可以归结为面积不变。其展开过程分为4个步骤:曲面离散与网格化,展开中心的确定,网格的展开,零件结构信息的展开。2004年,孙申新在康小明等人的工作基础上做出了进一步研究,针对不规则边界曲面和局部大曲率复杂曲面在网格划分时出现三角形网格和四边形网格混合的情况,提出了混合四边形-三角形网格等面积展开算法。同年,西北工业大学的张贤杰提出了基于单元等变形的复杂曲面优化展开算法。该算法用三角形网格离散曲面,使相邻两个三角形构成一个虚单元,虚单元内变形程度一致。该方法对飞机整体壁板零件展开效果良好,但对表面曲率变化较大的零件效果不好。

几何映射法有一个突出的优点,即计算时间较短,能够快速计算出毛料外形,但是由于没有考虑力学和边界条件等因素,无法反映成形过程,展开精度只能依靠正确的假设条件,算法不具有通用性。

## 2.5 解析法

解析法的思路是根据零件成形过程的变形规律,得到零件成形过程的初始应变分布,结合材料性能参数、本构关系、屈服准则,计算零件应力分布,再根据计算得到的应力分布修正应变分布。由得到的变形过程应力应变分布关系反算,可由零件形状获得展开料尺寸。Wang C.T.基于全量理论和膜应变假设,通过解析方法,推导出了凹曲线弯边和凸曲线弯边的成形变形计算模型,为展开算法建立了基础。胡平等提出了针对翻边结构的解析数学模型,该模型基于全量塑性理论及膜应变假设,并忽略了弹性变形。解析法要求得到零件成形过程的初始应变分布,它对变形规律已知的简单解析形状适用,但在处理零件外形复杂、变形规律未知的情况时误差较大。因此,其应用范围有限。

## 2.6 反向模拟法

反向模拟法又称有限元逆算法,是一种采用数值模拟方法求解毛坯外形的方法。随着计算机性能的不提高和有限元理论的日趋成熟,有限元方法在钣金

