

Research on the Influencing Factors of Dynamic Unbalance of Crankshaft Forgings

Junwen Gong

Guilin Fuda Heavy Industry Forging Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541100, China

Abstract

Starting from the principle of dynamic balance, this paper analyzes the influence of forging process on dynamic balance based on the characteristics of forging technology and the main features of the product. The main content and research results of the paper include: (1) Based on the principle of dynamic balance, the calculation method of crankshaft dynamic balance is analyzed, and how to design the distribution of balance blocks in the design process of crankshaft forgings is derived to ensure the optimization of dynamic balance of crankshaft forgings from the beginning of design. (2) By analyzing the influence of some characteristics of crankshaft forgings on dynamic balance, the forging product characteristics that affect crankshaft dynamic balance have been determined. This provides theoretical basis and work guidance for product size control in the actual production process of forging enterprises.

Keywords

forging; crankshaft forgings; forging process; dynamic balance

曲轴锻件动不平衡量影响因素研究

龚俊雯

桂林福达重工锻造有限公司, 中国·广西 桂林 541100

摘要

论文从动平衡原理入手, 根据锻造工艺的特点和产品的主要特性, 分析了模锻工艺对动平衡的影响。论文的主要研究成果有: ①根据动平衡原理, 分析了曲轴动平衡的计算方式, 从而导出了在曲轴锻件设计过程中, 应该如何对平衡块分布进行设计, 从而保证曲轴锻件从设计开始进行动平衡优化。②通过对曲轴锻件部分特性对动平衡影响的分析, 确定了影响曲轴动平衡的锻件产品特性。为锻造企业实际生产过程中的产品尺寸控制提供了理论依据和工作指导。

关键词

锻造; 曲轴锻件; 锻造工艺; 动平衡

1 概述

曲轴作为发动机的核心转子, 其复杂结构在旋转时因质量分布不均产生惯性力和力矩, 进而导致发动机振动, 且振动会随转速提升而加剧。为确保发动机稳定运行并延长寿命, 装配前需严格保证曲轴动平衡性能, 以减少振动对轴承、轴颈的磨损及潜在共振风险。与此同时, 消除锻造过程中的缺陷, 如模具磨损引起的尺寸问题, 对提升曲轴质量、降低成本及增加企业效益至关重要。

转子作为由轴承支撑进行旋转的物体, 其动力学特性和工作转速决定了其分类。通常, 我们根据这些特性将转子区分为刚性转子和柔性转子, 以便进行针对性的分析和研究。在实际情况中, 由于曲轴的工作转速通常位于其一阶临界转速以下, 其在旋转时产生的挠曲变形相当微小, 甚至可

以忽略不计。因此, 曲轴被归类为典型的刚性转子。基于这一特性, 论文的讨论将主要聚焦于刚性转子。

根据牛顿运动定律, 当转子内的各个质点进行旋转时, 它们都会产生惯性离心力。当转子内无数个质点以恒定的速度旋转时, 这些质点产生的惯性力会组合成一个整体的惯性力系。为了评估转子的平衡状态, 我们依据这个惯性力系的合成结果来进行判断^[1]。从理论力学的角度出发, 惯性力系可以被简化为一个单独的力 \vec{F}_R 和一个力偶 \vec{M}_0 。根据这种简化的不同形式, 我们可以将刚性转子分为五大类: 完全平衡、静不平衡、偶不平衡、准静不平衡和动不平衡^[2]。当 $\vec{F}_R \neq 0$, $\vec{M}_0 \neq 0$, 并且 \vec{F}_R 和 \vec{M}_0 之间呈任意角度时, 转子就处于动不平衡状态。这意味着转子同时存在静不平衡和偶不平衡, 其中心主惯性轴与轴线之间呈任意位置关系。这种不平衡状态在转子中是最为常见的。为了平衡这类转子, 我们需要在两个或更多的平面上添加或减少特定的质量。对于像曲轴这样轴向尺寸较大的刚性转子, 为了同时平衡其惯性力和惯性力矩, 我们需要在两个平面上进行操作, 这种方法被称

【作者简介】龚俊雯(1986-), 男, 中国广西桂林人, 硕士, 工程师, 从事机械工程研究。

为双面校正法。双面校正法的原理在于通过调整两个平面上的质量分布，使得转子的惯性力和惯性力矩达到平衡状态，具体如下：

为了分析一动不平衡的刚性转子在绕定轴 Z 以恒定角速度旋转时的动态特性，我们首先需要构建一个空间直角坐标系。在这个坐标系中，我们设想转子沿着其轴向被分解为若干个微小的片体。每个片体都具有一定的质量，记作 m_i ，并且其质心在坐标系中的位置由坐标 (x_i, y_i, z_i) 确定。当转子以恒定的角速度进行匀速转动时，由于转子的不平衡性，每个片体都会受到一个离心惯性力的作用，分别为 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_n$ 。把离心惯性力沿 X、Y 方向分解得到 $\vec{F}_{1x}, \vec{F}_{2x}, \vec{F}_{3x}, \dots, \vec{F}_{nx}, \dots, \vec{F}_{1y}, \vec{F}_{2y}, \vec{F}_{3y}, \dots, \vec{F}_{ny}$ ，大小为 $F_{ix} = m_i x_i \omega^2, F_{iy} = m_i y_i \omega^2$ ，如图 1 所示。

为了分析一动不平衡的刚性转子在绕定轴 Z 以恒定角速度旋转时的动态特性，首先需要构建一个空间直角坐标系。在这个坐标系中，设想转子沿着其轴向被分解为若干个微小的片体。每个片体都具有一定的质量，记作 m_i ，并且其质心在坐标系中的位置由坐标 (x_i, y_i, z_i) 确定。当转子以恒定的角速度进行匀速转动时，由于转子的不平衡性，每个片体都会受到一个离心惯性力的作用。

图 1 中，设 Z 轴坐标为 z_A, z_B 的平面 A 和平面 B 作校正平面，任意取转子的某一片体进行分析，将 X、Y 方向的惯性力分量分别分解为校正面 A、B 的平行力，如将第 i 个片体惯性力 $\vec{F}_{ix}, \vec{F}_{iy}$ 分解为 $\vec{F}_{ix}^A, \vec{F}_{ix}^B$ 和 $\vec{F}_{iy}^A, \vec{F}_{iy}^B$ 其中：

$$ix_A^{\vec{F}} = \frac{z_B - z_i}{z_B - z_A} ix^{\vec{F}}, iy_A^{\vec{F}} = \frac{z_B - z_i}{z_B - z_A} iy^{\vec{F}} \text{ 作用于平面 A 与旋转轴的交点。}$$

$$ix_B^{\vec{F}} = \frac{z_i - z_A}{z_B - z_A} ix^{\vec{F}}, iy_B^{\vec{F}} = \frac{z_i - z_A}{z_B - z_A} iy^{\vec{F}} \text{ 作用于平面 B 与旋转轴的交点。}$$

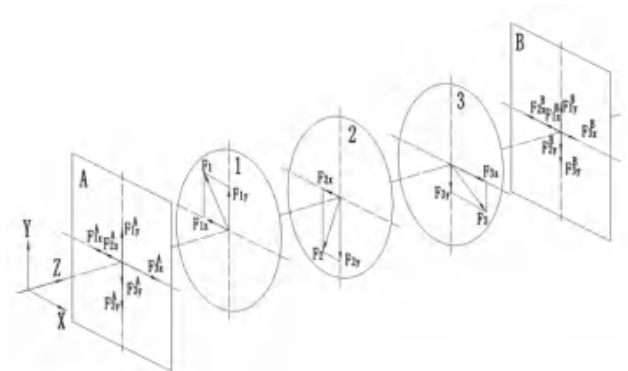


图 1 动平衡原理图

同理，把每个片体上的惯性力都向平面 A、B 上 X、Y 方向分解，可以得到：

$$\text{校正平面 A 上 X 方向汇交力系 } (\vec{F}_{1x}^A, \vec{F}_{2x}^A, \vec{F}_{3x}^A, \dots, \vec{F}_{nx}^A) ;$$

$$\text{校正平面 A 上 Y 方向汇交力系 } (\vec{F}_{1y}^A, \vec{F}_{2y}^A, \vec{F}_{3y}^A, \dots, \vec{F}_{ny}^A) ;$$

$$\text{校正平面 B 上 X 方向汇交力系 } (\vec{F}_{1x}^B, \vec{F}_{2x}^B, \vec{F}_{3x}^B, \dots, \vec{F}_{nx}^B) ;$$

$$\text{校正平面 B 上 Y 方向汇交力系 } (\vec{F}_{1y}^B, \vec{F}_{2y}^B, \vec{F}_{3y}^B, \dots, \vec{F}_{ny}^B) .$$

通过矢量加减，分别得到校正面 A、B 在 X、Y 方向的合力：

$$\sum \vec{F}_{ix}^A = \vec{F}_{1x}^A + \vec{F}_{2x}^A + \dots + \vec{F}_{ix}^A, \dots, \vec{F}_{nx}^A$$

$$\sum \vec{F}_{iy}^A = \vec{F}_{1y}^A + \vec{F}_{2y}^A + \dots + \vec{F}_{iy}^A, \dots, \vec{F}_{ny}^A$$

$$\sum \vec{F}_{ix}^B = \vec{F}_{1x}^B + \vec{F}_{2x}^B + \dots + \vec{F}_{ix}^B, \dots, \vec{F}_{nx}^B$$

$$\sum \vec{F}_{iy}^B = \vec{F}_{1y}^B + \vec{F}_{2y}^B + \dots + \vec{F}_{iy}^B, \dots, \vec{F}_{ny}^B$$

这四个力明显地与转子上所有惯性力具有等效作用。

具体来说，A、B 面不平衡量方向分别由特定矢量求和及平行四边形法则确定。通过在校正平面上同向或反向增减质量，可有效消除不平衡，实现转子平衡。基于上述原理，我们利用 C# 语言来调用 Unigraphics (UG) 软件在外部模式 (External 环境) 下提供的 UG/Open API 函数来实现相关功能 [3]。为了计算曲轴的动不平衡量，我们首先将曲轴沿其轴向分割成若干片体。接下来，利用 UG 软件的“拆分体 (Split Body)”命令来执行这一分割操作。随后，我们利用“分析 (Analysis)”菜单下的“测量体 (Measure Bodies)”命令来依次提取每个片体的质量、质心坐标等关键特性数据。这些提取的数据将作为后续计算的输入。

在数据处理和计算过程中，可能还需要用到 UG 软件的“显示信息窗口 (Show Information Window)”命令来实时查看或验证计算过程中的关键信息。通过这些步骤，我们能够准确计算出曲轴的动不平衡量，并为后续的平衡校正工作提供重要依据。

软件分析计算流程如图 2 所示。

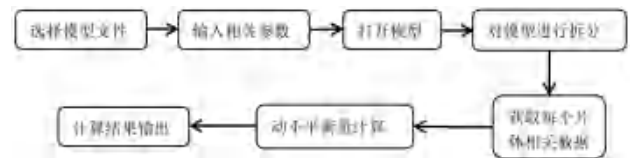


图 2 软件分析计算流程图

2 曲轴动平衡实例分析

论文动平衡影响计算采用开发的“曲轴动平衡分析软件”，分析对象为某典型六平衡块曲轴。为便于表述，坐标轴定义如图 3 所示。根据刚性转子双面校正平衡方法的原理和 B6 曲轴的结构可知，因 D、E 平面距离 A、B 平面较远，且与 C、F 平面处于对称位置，所以 A 平面位置的动不平衡量主要 C 平面位置的第一平衡块决定，B 平面位置的动不平衡量主要 F 平面位置的第十二平衡块决定。

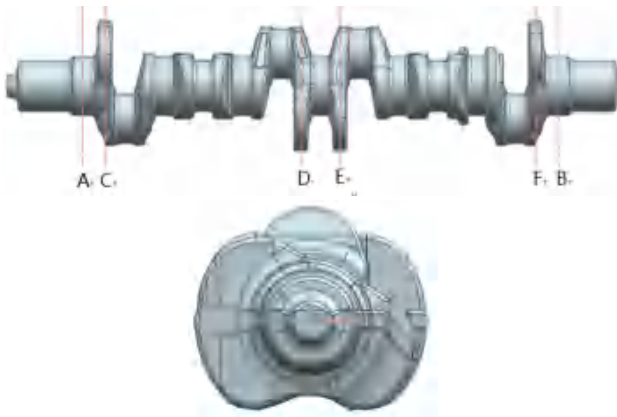


图3 曲轴动平衡校准面及坐标轴定义

根据曲轴成品设计的技术要求,该产品在机加工作动平衡工序采用钻孔去重方式进行平衡。该产品技术要求允许去重孔直径最大16mm、最深35mm,且去重孔不能相交、不能破壁。按此要求,单个平衡块最大可钻去重孔数量为5个,如图4所示。根据单个去重孔尺寸为 $\phi 16 \times 35$,可计算出单个平衡块最大去重重量为275g。质心半径按平衡块外圆尺寸10cm,单个平衡块最大可去重不平衡量为 $2750g \cdot cm$,方向与X轴共线。按该产品的成品技术要求,允许最大不平衡量为 $100g \cdot cm$,所以当该产品其他影响因素对动平衡的共同作用超过 $2750-100=2650g \cdot cm$ 时,该去重锻件在后续加工过程中将无法平衡,导致报废。

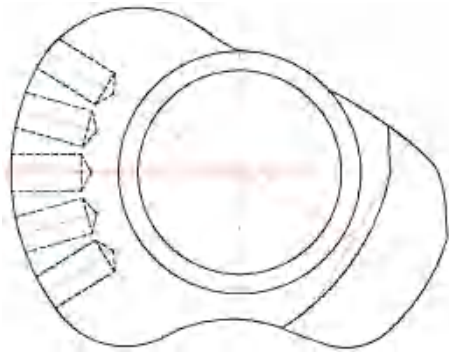


图4 单个平衡块最大去重孔数量示意图

机加工定心有几何定心和质量定心两种工艺,因质量定心时,每次机床都会对曲轴锻件进行动平衡补偿,不便于定量分析。因此,本节后续对各因素的动不平衡量影响基于几何定心,且定位基准不调整的状态下进行分析。

锻件厚度尺寸跨分模线,由模具封高决定。本文模拟锻打调分模面尺寸,分析曲轴厚度变化对动平衡的影响。如表1结果显示,厚度偏离名义尺寸均增动不平衡量。在生产过程中,应严控曲轴厚度至图纸名义尺寸。例如本文分析的六缸曲轴锻件,为满足动不平衡量可去重的要求,厚度尺寸

应该控制在 $< + 1.5mm$ 的范围内。

表1 曲轴厚度尺寸变化动平衡结果

厚度尺寸 变化量	A 平面		B 平面	
	不平衡量 /g · cm	角度 /°	不平衡量 /g.cm	角度 /°
-1	1453	233	1755	236
-0.5	998	209	1246	219
标准数模	898	167	975	185
+0.5	1248	135	1148	148
+1.0	1816	119	1636	126
+1.5	2460	111	2251	116
+2.0	3140	106	2920	109

曲轴变形存在多种情况,对动平衡性能影响程度也各不相同,在此根据锻造生产过程经验进行筛选,主要分析弯曲变形(直线度变化)对曲轴动平衡的影响。根据图纸公差范围为直线度 $\leq 1.5mm$,因此选取0、0.5、1.0、1.5四个水平进行动不平衡量计算,结果如表2所示。由表中数据可以看出,随着弯曲变形程度(直线度数值)的增加,动不平衡量的绝对值对应增加。根据计算结果可知,为减少曲轴锻件动不平衡量,生产过程中应尽量避免曲轴弯曲变形。

表2 曲轴弯曲变形动平衡结果

厚度尺寸 变化量	A 平面		B 平面	
	不平衡量 /g.cm	角度 /°	不平衡量 /g.cm	角度 /°
标准数模	898	167.5	975	185
+0.5	1079	144	1029	160
+1.0	1378	129	1242	141
+1.5	1736	120	1551	128

3 结语

从以上分析数据可以看出,曲轴锻件的厚度尺寸、直线度等产品特性变化,均会影响产品的动平衡性能。为减少曲轴锻件在机加工过程的动不平衡量,理论上最好的办法是将上述影响特性与名义值的偏差降低为0,但在实际的生产过程中无法实现。针对上述影响因素,符合实际的做法应该为根据实际的工艺条件和装备水平,在符合产品图纸公差范围的基础上,尽量压缩产品特性波动范围,提高产品的一致性,从而减少曲轴锻件的动不平衡量,减少加工过程的动平衡废品,提高企业的经济效益。

参考文献

- [1] 姜占平.动平衡校正方法的研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [2] 哈尔滨工业大学理论力学教研室.理论力学[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [3] 陈海生.基于虚拟加工的曲轴锻件迭代定心方法及优化研究[D].重庆:重庆大学,2019.