

# 广义螺旋曲面工件轮廓度统一测量方法

翁 迅 程国全 翁海珊

**【摘要】** 对国标规定的标准螺旋曲面的测量方法进行分析,得出普通螺纹和丝杠形位误差测量方法中的共性问题。利用微分几何的曲面包络理论,结合坐标投影变换法和相对运动法对工件的曲面方程进行研究,得到了在母线曲面已知的情况下广义螺旋曲面的统一方程。通过广义螺旋曲面测量要素分析,得出异型螺旋面的测量方法。结合曲面统一方程,提出了广义螺旋面的统一测量方法。实例表明,该方法能够快速、准确地测量出对应工件的型面尺寸,避免了测量的复杂性和低效性。

**关键词:** 广义螺旋 工件 轮廓度 测量方法

**中图分类号:** TG801 **文献标识码:** A

## Unified Theory of Measurement Method for Surface Profile Error of Workpiece Generalized Helix Surface

Weng Xun<sup>1</sup> Cheng Guoquan<sup>2</sup> Weng Haishan<sup>2</sup>

(1. *Beijing University of Posts and Telecommunications*

2. *University of Science & Technology Beijing*)

### Abstract

The measurement method of standard helix surface in the national standard was summarized and the common properties and methods of common screw and screw bar in geometric error measurement were gained. Based on the envelope principle of complex surface in differential geometry theory, the surface equation of a workpiece was studied with the method of coordinate transformation and relative motion. The general formulas were presented for the generalized helix surfaces in the condition which the curve equations of generatrixs have been obtained. Through the analysis of measurement factors in generalized helix surface, the measurement method for the abnormality helix surface has been got. Combined with the general formulas, a unified theory of measurement method for generalized helix surface was presented. This theory will provide the theoretical base of the online measurement of generalized helix surface.

**Key words** Generalized helix, Workpiece, Surface profile, Measurement method

### 引言

广义螺旋运动就是一个点在任意回转面上的运动,该运动可以分解为沿回转面母线的移动和绕回转面回转轴的转动,而沿回转面母线的移动又可分解为轴向运动和径向运动。作广义螺旋运动的点的运动轨迹称为广义螺旋线<sup>[1~2]</sup>。

随着工业加工制造水平的发展,有关机械设备

在生产中由于应用了广义螺旋曲面的工件后,能显著提高其整体工作性能或发挥出优异的加工效率(例如加工球磨钢球的斜轧辊、各种大型挤压设备中的变导程螺杆;铣削加工中的等螺旋角锥形铣刀等等),故此类工件在生产中起到至关重要的作用,因此异型螺旋成形质量问题日益受到相关企业的重视<sup>[3~4]</sup>。但受到目前测量手段的限制,现有的轮廓度测量方法中没有特别适合大轴类广义螺旋曲面工件

收稿日期:2006-07-13

翁 迅 北京邮电大学自动化学院 讲师,100876 北京市

程国全 北京科技大学机械工程学院 副教授,100083 北京市

翁海珊 北京科技大学机械工程学院 教授 博士生导师

的<sup>[5]</sup>。针对这些问题先研究了标准螺旋曲面的测量方法,并推导出广义螺旋曲面数学表示式,结合分析出的各个测量要素,提出广义螺旋面统一测量方法。

## 1 广义螺旋曲面测量要素分析

### 1.1 标准螺纹检验

标准螺纹的基本几何要素有大径、小径、中径、螺距和牙型半角。从互换性的角度看,主要影响因素是螺距误差、牙型半角误差和中径误差。对于普通螺纹,国家标准并没有单独规定螺距及牙型半角的公差,而是通过规定一个中径的公差来保证。利用中径公差同时来限制中径、螺距以及牙型半角 3 个要素的误差。在螺纹测量中,判断中径的合格性必须遵循泰勒原则。在检测过程中,对于普通螺纹,特别是精密螺纹,实际检验时常用三针量法、内螺纹双球法或者利用万工显来测量计算,得到最终的螺纹中径值。这些方法虽然精度可保证,但效率偏低,仅适合单件检验或抽检。

### 1.2 丝杠检验

根据 JB/T2886—92 规定,丝杠公差的特点是对精度的指标要求高,特别是对丝杠的螺旋线规定有较严格的公差。大体上看,主要有螺旋线公差、螺距公差、牙型半角的极限偏差、全长上中径尺寸变动量公差、丝杠中径跳动公差和大径、中径、小径公差。

根据国家标准规定,螺距公差可用来代替丝杠螺旋线公差。由于螺距误差用静态量法测量的结果不如用动态量法测量螺旋线误差反映得全面,虽然国家标准中规定螺距公差可以代替螺旋线公差,对于中径和牙型半角的误差,考虑到丝杠本身在工作时,为了方便旋转需要间隙来存放润滑油,所以国家标准给了较大的公差带。由于中径的尺寸变化会直接影响到丝杠与螺母配合间隙的均匀性和丝杠两螺旋面的一致性,所以需要特别考虑其公差值,国家标准规定中径尺寸变动量必须在同一轴向截面内测量。

从以上的分析可以看出,对于丝杠而言,最主要的测量指标就是螺旋线误差和中径尺寸变动量。在实际测量中,对于螺旋线误差,常用的方法是将被测丝杠与标准丝杠相比较来获得,也有部分采用较先进的双频激光干涉仪来测量螺旋线误差。这些方法精度较高,但对于测量设备和环境要求较高,不适合企业大批量生产的在线检验。对于丝杠中径的测量,到目前也没有特别合适的方法,通常还是借鉴螺纹测量中径的三针法或者万工显的方法来实现。

### 1.3 广义螺旋面测量方法对比

将广义螺旋面涉及的几个典型工件的曲面测量

方法对比如表 1 所示。从表中可以看到,最难处理的是中径的测量。由于中径并没有一个准确的实体位置,所以在测量时只有通过其他相关参数计算获得或者多次测量后取平均值。对于异型螺旋曲面的测量,国家没有一个统一标准,样板靠模法精度偏低,无法满足现代制造的要求。由此,本课题考虑建立广义螺旋面统一参数化模型,将总结出的标准螺旋面的测量要素推广到广义螺旋面中。

表 1 广义螺旋曲面测量方法对比

Tab. 1 Comparison of measurement method of generalized helix surface

工件名称	测试项目	采用方法
标准螺纹	螺距误差	万工显两次测量取平均值
	牙型半角误差	三针量法或双球法
	中径误差	万工显两次读数消差法
丝杠	螺旋线误差	标准丝杠对比法或双频激光干涉仪
	中径尺寸变动量	同轴截面测量法
斜轧辊	螺旋线误差,大径尺寸变动量	样板靠模法
变螺距螺杆	螺旋线误差,大、小径尺寸变动量	样板靠模法

## 2 广义螺旋曲面数学模型

从加工和测量的角度看,按相对运动方式,取工件为参照系,假设工件不动,整个广义螺旋面工件的加工过程认为是加工刀具母线的轮廓绕自身轴线旋转并前进,同时还绕工件母体公转。按此思路,广义螺旋曲面就可以抽象成刀具母线轮廓曲面族和工件母体间的包络面问题。对于加工刀具曲面,考虑到加工刀具坐标系始终在运动中,不易获得其在工件坐标系下的参数化方程,利用坐标矩阵变换的方式,将其变换到工件坐标系中。这样,整个广义螺旋曲面实际可以认为是刀具轮廓曲面族形成的包络曲面。利用微分几何的相关理论,即可导出广义螺旋面工件的曲面方程。

加工刀具表面  $M$  的空间曲面方程为

$$\begin{cases} x_0 = x_0(\varphi, \beta) \\ y_0 = y_0(\varphi, \beta) \\ z_0 = z_0(\varphi, \beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\varphi$ ——刀具曲面点极坐标与  $OX$  轴夹角

$\beta$ ——刀具曲面点极坐标与  $OZ$  轴夹角

$M$  的曲面方程表示的是刀具坐标系下的方程,通过坐标变换变化到工件坐标系后得到  $(x, y, z)$  应该满足

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\cos\alpha_0 & \sin\theta\sin\alpha_0 & T^* \sin\theta\sin\alpha_0 + A_0\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\alpha_0 & -\cos\theta\sin\alpha_0 & -T^* \cos\theta\sin\alpha_0 + A_0\cos\theta \\ 0 & \sin\alpha_0 & \cos\alpha_0 & A_0\theta\cos\alpha_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $T^* = \int_0^\alpha \frac{T(\alpha)}{2\pi} d\alpha$

式中  $A_0$ ——刀具坐标系相对工件轴线偏移距离

$T^*$ ——累积导程

$\alpha_0$ ——在刀具做螺旋运动时,刀具轴线与工件的  $Z$  轴线保持的空间夹角

$\theta$ ——刀具轴线的法平面相对工件轴线的法平面旋转的一个角度

当刀具表面  $M$  沿空间螺旋线运动时,即得到其空间曲面族  $\{S_\alpha\}$  方程为

$$\begin{cases} x = x_0(\varphi, \beta)\cos\alpha - y_0(\varphi, \beta)\sin\alpha \\ y = x_0(\varphi, \beta)\sin\alpha + y_0(\varphi, \beta)\cos\alpha \\ z = z_0(\varphi, \beta) + \int_0^\alpha \frac{T(\alpha)}{2\pi} d\alpha \end{cases} \quad (3)$$

按微分几何中的包络原理,将式(2)变化后的刀具坐标代入曲面族方程  $\{S_\alpha\}$ ,得到广义螺旋曲面的包络方程,即为广义螺旋曲面统一表示式

$$\sum \begin{cases} x = f(\beta)\cos\varphi\cos2\theta - f(\beta)\sin\varphi\sin2\theta\cos\alpha_0 + \\ \quad g(\beta)\sin2\theta\sin\alpha_0 + T^* \sin2\theta\sin\alpha_0 + A_0\cos2\theta \\ y = f(\beta)\cos\varphi\sin2\theta + f(\beta)\sin\varphi\cos\alpha_0\cos2\theta - \\ \quad g(\beta)\sin\alpha_0\cos2\theta - T^* \sin\alpha_0\cos2\theta + A_0\sin2\theta \\ z = f(\beta)\sin\varphi\sin\alpha_0 + g(\beta)\cos\alpha_0 + T^* \cos\alpha_0 + T^* \\ \quad f(\beta)f'(\beta)\cos\varphi\sin\alpha_0 - f'(\beta)\frac{T^*}{2\pi} + \\ \quad f'(\beta)A_0\sin\alpha_0 + g'(\beta)A_0\sin\varphi\cos\alpha_0 + g(\beta)g'(\beta) \cdot \\ \quad \cos\varphi\sin\alpha_0 + g'(\beta)\cos\varphi\sin\alpha_0 T^* = 0 \end{cases} \quad (4)$$

### 3 广义螺旋面测量统一测量方法

根据国标对标准螺旋面测量的要求可看出,螺旋距误差、牙型误差和中径误差是螺旋面共同需要测

量的问题,而且也是决定螺旋面最关键的要素。将需要测量的要素和式(4)推出的广义螺旋曲面统一参数化方程比较后可看到,牙型实际上就是母线截面轮廓,而螺旋距误差即累积导程  $T^*$ 。从上述公式可知,在获得母线截面轮廓后,中径坐标值在取适当的参数值后,可通过母线截面轮廓和累积导程表示。

由此可知,对于具有广义螺旋面特点的工件,在测量时实际仅需要检测母线截面轮廓和累积导程即可,而不必像国标规定的测量中径等方法。

### 4 实例

以加工球磨钢球用的斜轧辊为例,型面结构如图1所示。其型面属于典型的变螺距、变棱高和变棱宽的异型螺旋面。从斜轧辊的实际应用中可知,中径并不是设计者和使用者所关心的,设计者更关心的是棱高和棱宽的精度。在式(4)曲线表达式中,任意点的棱高实际等

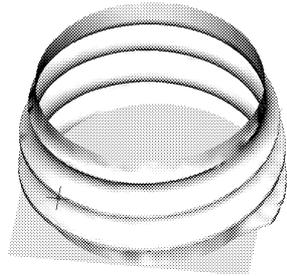


图1 斜轧辊型面模型图  
Fig.1 Surface model of skew roller

于  $\sqrt{x^2 + y^2} - R$  ( $R$  为基圆半径),任意点的棱宽就等于对应的  $(\theta, \beta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ)$  和  $(\theta + 360^\circ, \beta = 270^\circ, \varphi = 0^\circ)$  所决定的  $Z_\theta$  和  $Z_{\theta+360^\circ}$  的差。测量累积导程和截面母线特性参数后,将测量值代入公式,可以得到斜轧辊曲面上对应点的  $(x, y, z)$  坐标值,通过计算可以得到检验所需参数。

### 5 结束语

利用推导出的广义螺旋面统一曲面参数化模型的显式表达式方程。结合普通螺旋面的测量方法,提出的统一测量方法可以满足实际测量需要。利用本文提出的统一测量方法能够快速准确地测量出对应工件的型面尺寸,改变了以往各种测量方法的复杂性和低效性。

### 参考文献

- 1 龚智辉,宾鸿赞. 螺旋角的广义定义及其应用[J]. 中国机械工程,1994,5(1):14~15.
- 2 何耀雄,周云飞,周济. 广义螺旋运动与复杂回转刀具几何建模[J]. 航空学报,2002,23(2):135~139.
- 3 易先中,华北庄,乐兑谦. 螺杆转子的旋风式法曲率包络铣削技术[J]. 中国机械工程,2000,11(9):1052~1055.
- 4 蔡忆昔,蔡继业. 基于 Fluent 软件的直喷柴油机螺旋进气道设计[J]. 农业机械学报,2006,37(6):1~4.
- 5 Qiu Hua, Hironobu Nisitani, Akio Kubo, et al. Autonomous form measurement on machining centers for free-form surfaces[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004,44(9):961~969.