文章编号:1005-0523(2012)05-0057-05

基于高精基准的面对面垂直度评定与软件开发

林 翔

(福建商业高等专科学校,福建 福州 350012)

摘要:面对面的垂直度误差评定,关键在于基准平面的拟合;国标规定了基准平面拟合应满足“最小条件”原则,基于此采用逐步缩小平面度计算值的办法,求取满足“最小条件”的基准平面,进而将垂直度问题转化为二维直线度问题,使垂直度评定结果达到高精度,经编程且以算例测试,验证其高精度性。

关键词:垂直度误差;面对面;最小条件;高精度

中图分类号:TP29;TH71　　　　**文献标志码:**A

1 垂直度评定的核心问题

按国标《GB/T 1958-2004》[1]规定,面对面垂直度误差属于位置公差中的定向误差范畴,指实际被测平面要素相对于给定基准平面在垂直方向上的变动量,此变动量要符合“最小条件”原则,即将被测平面上的测点投影于基准平面,求取这些投影点的二维直线度误差,此即为被测平面相对于给定基准平面的垂直度误差值。

如果基准平面是已知的,即其平面方程(可记为 $\pi_0{:}a_0x+b_0y+c_0z+d_0=0$ 的法矢 $\boldsymbol{T}=(a_0,b_0,c_0)$ 已给出,从文献[1]中关于被测平面对于基准平面垂直度误差的概念描述可知,只要把被测平面上各点投影到基准平面,则求垂直度误差实际上就是求全体投影点的二维直线度误差,如此则空间问题就转化为二维的问题;如果基准平面要素是通过测量获得的(设基准上测量点集为 $P=\{P_k(x_k,y_k,z_k),k=1,\cdots,n\}$),毫无疑问要以测量点为依据拟合出平面作为基准平面 π_0 ,然后进行垂直度误差评定。按照文献[1]规定,拟合平面 π_0 必须是通过平面度误差计算过程而获得的,才可以作为基准平面,进一步在π_0的基础上继续进行面对面垂直度误差计算。

显然,问题的核心是如何求得符合“最小条件”的基准平面,只有在拟合出高精度基准平面的基础上,才有可能求取高精度的面对面垂直度误差。为此,业界专家们推出了不同的平面拟合方法:文献[2-3]提出以“最小二乘平面”法求取基准平面,虽然合乎文献[1]规定但计算精度有局限;文献[4]用“直接比较法”与“坐标法”求取,对狭长平面之类的特殊情况用“光轴法”、“水平仪法”求取,方法简便易行但精度不高;文献[5]也有类似的情况。本文针对求取基准这一核心问题提出新算法,使基准平面的求取过程与垂直度误差评定过程均符合“最小条件”的原则,从而得到高精度的面对面垂直度误差值。

2 基准平面拟合

设基准平面上测量得到的点集 $P=\{p_k(x_k,y_k,z_k),k=1\sim n\}$,拟合平面 π_0 的法向量为 $\boldsymbol{T}=(a_0,b_0,c_0)$,如图1。由文献[1]规定可知,要使 π_0 符合“最小条件”成为最佳拟合基准, π_0 的平面度误差值计算过程必须要

收稿日期:2012-09-09

作者简介:林翔(1963-),男,副教授,研究方向为计算机技术在形位误差精密测量方面的研究与软件开发。

满足“最小区域”原则，即须求得一对平行的平面包容点集 P，且令两平面间距离达到最小。

求最佳拟合基准的总体思路是：首先以“最小二乘法”求取初始拟合平面，进而将拟合平面的平面度误差计算向“最小区域”靠近，令结果满足“最小条件”。记由“最小二乘法”得到的初始拟合平面方程为 π_0（求取的算法与过程在文献[2-3]中均有叙述，此不重述），初始平面度误差为 δ。经过观察分析，发现可以通过有意识地细微转动 π_0（即转动 π_0 的法方向），使 δ 值降下来。

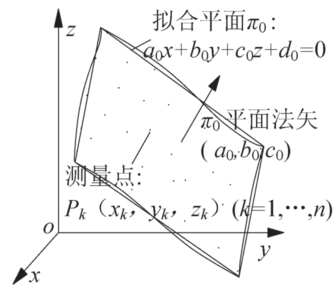

图1　基准平面拟合示意图

Fig.1　Fitting of the datum plane

设 $P_k(x_k,y_k,z_k)$ 至初始基准平面 π_0 距离为 δ_k，δ_i，δ_j 分别为 $\{\delta_k,(k=1,\cdots,n)\}$ 之最大值与最小值，相应点为 P_i，P_j，即 $\delta_i=\max(\delta_k),(k=1,\cdots,n)$；$\delta_j=\min(\delta_k)$，$(k=1,\cdots,n)$。

记初始平面度误差 $\delta=\delta_i+\delta_j=\max(\delta_k)+\min(\delta_k)(k=1,\cdots,n)$)；$A_i$，$A_j$ 为 P_i，P_j 在 π_0 的投影点，从 A_i 点沿 A_iP_i 距离ε处取 $A_i^{'}$ 点（ε是一很小的值），从 A_j 点沿 A_jP_j 距ε处取 $A_j^{'}$，$A_i^{'}A_j^{'}$ 中点记为 S，于 π_0 上取点 S'，令 $S'S\perp A_i^{'}A_j^{'}$。

以 $A_i^{'}$，$A_j^{'}$，S' 3个点作平面 $\pi_0^{'}$，π_0 与 $\pi_0^{'}$ 之间夹角甚小，可视 $\pi_0^{'}$ 为 π_0 绕 $S'S$ 做微小转动而获得；从平面方程特点视之，$\pi_0^{'}$ 是以 π_0 之法向量 $\boldsymbol{T}=(a_0,b_0,c_0)$ 作微小转动后生成的。

P_i，P_j，$A_i^{'}$，$A_j^{'}$ 四点共面，记为 π_1，π_0 经 π_1 剖切成如图2所示，易见 P_i 至 $\pi_0^{'}$ 之距 $\delta_i^{'}<\delta_i$，P_j 至 $\pi_0^{'}$ 之距为 $\delta_j^{'}<\delta_j$，即有 $\delta_i^{'}+\delta_j^{'}<\delta_i+\delta_j$，亦即当 π_0 经微小转动生成 $\pi_0^{'}$ 后有可能把 δ 值降下来，这正是拙文之总体思路所期盼的第一个结果。

究竟能否成功地将 π_0 转动生成 $\pi_0^{'}$ 而令δ降下来，还需要计算点集 P 对 $\pi_0^{'}$ 的平面度值 δ'，与原平面度值 δ 进行比较以便判断。比较的结果不外乎以下3种情况：

1）若 $\delta'<\delta$，$\pi_0^{'}$ 取代 π_0，对新 π_0 重复上述的微小扰动，重复计算、判断过程；

2）若 $\delta'\geqslant\delta$，则缩小ε并重新计算出 $\pi_0^{'}$ 及 $\delta_0^{'}$，判断是否 $\delta'<\delta$；

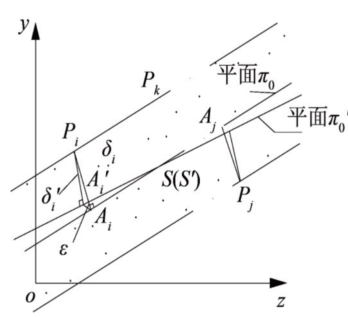

图2　点集 P 与平面 π_0，$\pi_0^{'}$ 关系图

Fig.2　Set P &plane π_0 and $\pi_0^{'}$

3）若ε经多次缩小而成为非常小的值，已达到精度要求，则计算终止，此时 δ 就是符合“最小区域”要求的平面度误差值，π_0 即所求的最佳拟合基准平面。

3　算法论证

对于上述结论的“最小条件”符合性作简要论证。如图2，A_i，$A_i^{'}$ 分别为 P_i 在 π_0，$\pi_0^{'}$ 的投影，在 $\Delta P_iA_iA_i^{'}$ 中 $\angle P_iA_i^{'}A_i$ 为钝角，因钝角之对应边必定小于任一邻边，故 $A_i^{'}P_i<A_iP_i$；同样，记 A_j，$A_j^{'}$ 为 P_j 在 π_0，$\pi_0^{'}$ 的投影，$\angle P_jA_j^{'}A_j$ 亦为钝角，亦成立 $A_j^{'}P_j<A_jP_j$。综之有 $A_i^{'}P_i+A_j^{'}P_j<A_iP_i+A_jP_j$，即$\delta'<\delta$。这表明由于 π_0 微小转动得到 $\pi_0^{'}$ 后，点集 P 对于 $\pi_0^{'}$ 的平面度误差降下来了，且是单调下降，这也说明此平面度误差的计算过程是收敛的，不断趋于“最小区域”。

本文取用了数十例平面度误差算例对上述算法进行验证，计算结果表明本文算法的精度均达到或超

过原文,进一步证明本算法的“最小条件”符合性。现摘取4例列于表1予以说明。

表1　平面拟合算例结果比较

Tab.1　Result comparisons of flat- to- flat fitting calculation

算例出处	算例概况	原文平面度误差值/μm	本文计算得出的结果	
			平面度误差值/μm	拟合平面法向量
文献[3]	被测平面上10×7=70个点	7.81	7.737 5	(0.205 0,0.488 1,1.000 0)
文献[4]	被测平面上2×2=4个点	595.71	577.4312	(1.000 0,1.000 0,1.000 0)
文献[6]	被测平面上12个测量点	2.29	2.6132	(–0.000 0,–0.000 0,1.000 0)
文献[7]	被测平面上3×3=9个点	2.00	1.719 8	(–0.000 08,1.000 0,–0.000 05)

4　垂直度评定

4.1　面对面垂直度误差算法

上述获得高精度的拟合基准平面为高精度评定面对面垂直度误差打下好的基础。对三维坐标系旋转,使 xoy 面与基准平面重合,被测平面上测量点在基准平面的投影可视为二维平面点,记为 $Q=\{Q_k(x_k,y_k),k=1\sim m\}$,解读文献[1]之规定,显然求垂直度误差就可转化成为求点集 Q 的二维直线度误差。

设 Q 的基准直线为 l_0,与之平行的两条直线为 l_1, l_2,把 Q 夹紧在其间,并使得 l_1, l_2 间距 f 达到最小,如图3所示, f 即为点集 Q 的二维直线度误差,亦即面对面垂直度误差值。

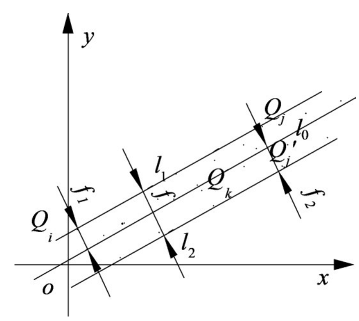

图3　投影点集 Q 与基准 l_0 示意图

Fig.3　Diagram of projection point set Q & l_0 benchmark

引用文献[7]提供的算法可以获得符合“最小区域”原则的高精度的二维直线度误差值 f,其主要思想是:

1) 通过“最小二乘法”求得基准直线 l_0(设斜率为 k_0、截距为 b_0,方程: $y=k_0x+b_0$),此时的 f 值为初始直线度误差, $f=f_1+f_2$。

2) 在此基础上细微改变 k_0 值,即对 l_0 进行细微的转动,目的是把 f 值降下来。设点集 Q 中距 l_0 的最大、最小值为 f_1, f_2,所对应的点分别为 Q_i, Q_j, Q_i, Q_j 在 l_0 的投影点为 Q_i', Q_j',在 Q_iQ_i' 方向上距 Q_i' 距离 ξ 处取 Q_i' 点(ξ 是很小值),同样在 Q_jQ_j' 方向上距 Q_j' 距离ξ处取 Q_j' 点,即 $Q_j'Q_j'=Q_i'Q_i'=\xi$。以 Q_i', Q_j' 作直线 l_0',易见 Q_i 到 l_0' 之距离小于 Q_i 到 l_0 距离, Q_j 到 l_0' 之距离也小于 Q_j 到 l_0 距离,这表明 l_0' 有可能把 f 值降下来。

到底能否把 f 降下来,该文是通过点集 Q 对于 l_0 算出新的直线度 f',与之 ′ 前的 f 比较进行判断:

1) 若 $f'<f$, l_0 取代 l_0;

2) 若 $f'\geqslant f$,则缩小 ξ,以 ξ 值重新求出直线 l_0',再计算直线度 f',观察 f 值下降与否;

3) 若ξ不断缩小已能满足精度要求,计算终止,最后得到的直线度误差 f,即为垂直度误差值。

4.2　垂直度算法流程图

按照上述的面对面垂直度误差算法过程,依软件开发要求作出算法流程图如图4所示。本算法程序用

C语言编制。(程序代码略)

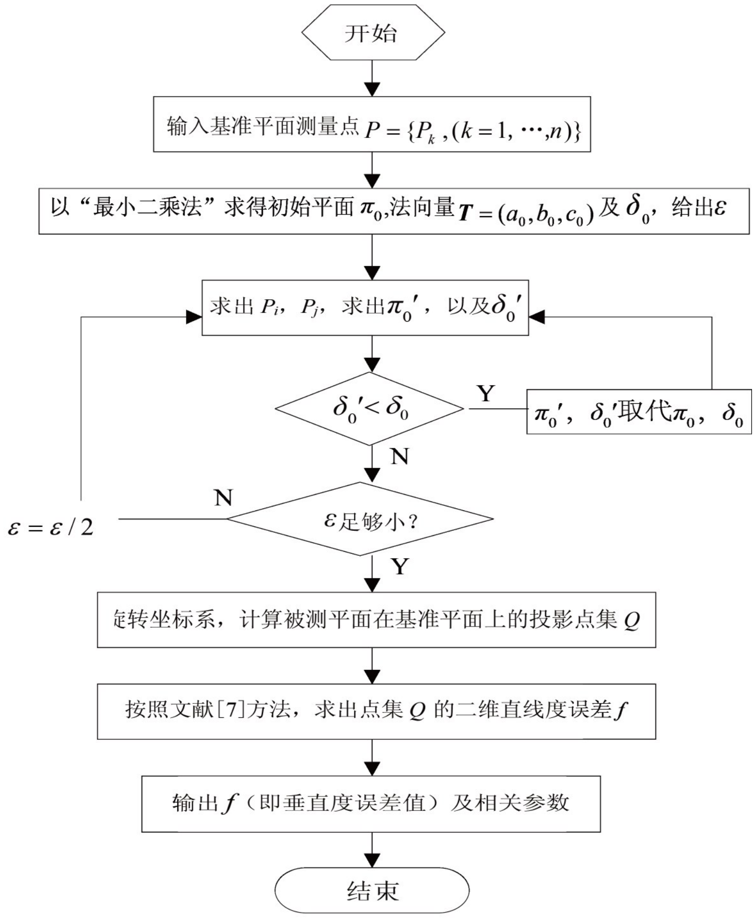

图4 垂直度算法流程图

Fig.4 Diagram of perpendicularity algorithm

4.3 算例测试

选用3个典型算例对程序加以测试,并把比较结果列于表2,对本文算法与软件的正确性可靠性略作说明。

表2 面对面垂直度误差算例计算结果比较

Tab.2 Test calculation comparisons of flat- to- flat perpendicularity error

算例出处	算例概况	原文提供结果		本文计算结果		
		垂直度误差/μm	基准平面度/μm	垂直度误差值/μm	基准平面度/μm	基准平面法向量/μm
文献[9]	基准平面20个点,被测平面20个点	6.464 2	10.769 0	8.299 7	10.400 0	$(6.667\,0\times10^{-5},-4.666\,7\times10^{-5},1.000\,0)$
文献[10]	基准平面有9个测点,被测平面有16个点	17.585 3	未给出	17.205 0	0.306 6	$(-30.000\,0,0.800\,0,-0.200\,0)$
文献[2]	基准为 *yoz* 平面,被测平面16个点	14.000 0	0.000 0	9.000 0	0.000 0	$(0.000\,0,0.000\,0,1.000\,0)$

5 结束语

面对面垂直度误差评定的关键在于基准平面的确定,核心问题是基准平面的平面度误差计算,难点在于此计算必须符合“最小条件”。本文从国标规定出发,从理论上解决了平面度误差的高精度计算问题,从而解决了拟合基准平面在“最小条件”方面的符合性;通过算例验算与结果比较,表明此理论与算法都是正确可行的。在高精度基准的基础上,引用文献[7]所提供的成熟算法,求出高精度的面对面垂直度误差,也就水到渠成了。

本文引用的算例有限,欢迎同行专家对拙作及相应软件批评指正。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 1958-2004 产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差检测规定)[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[2] 甘永立. 形状和位置误差检测[M]. 北京:国防工业出版社,1995:137.

[3] 崔长彩,车仁生,罗小川,等. 基于实数编码遗传算法的平面度评定[J]. 光学精密工程,2002,10(1):36-40.

[4] 杨伟敏. PC_DMIS软件平面度误差评定方法研究[J]. 工业计量,2012,22(3):14-15.

[5] 王少锋,许玉德,周宇,等. 基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型研究[J]. 华东交通大学学报,2011,28(5):77-82.

[6] 倪爱晶,郑联语. 基于形状误差不确定度的大尺寸测量系统优化配置方法[J]. 计量学报,2011,32(4):289-295.

[7] 王冉. 零件尺寸在线检测系统的开发及误差计算方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2000:57-58.

[8] 林翔. 直线度误差的新算法及其在微机上的实现[J]. 计量技术,2007(8):19-21.

[9] 刘平. 用计算机评定平面对平面的垂直度误差[J]. 宇航计测技术,1989(4):22-30.

[10] 杨金霞. 基于坐标测量数据的位置误差评定软件包的开发[D]. 西安:西安理工大学,2008:42-43.

The Evaluation and Software Development of High-precision Flat-to-flat Perpendicularity Error

Lin Xiang

(Fujian Commercial College, Fuzhou 350012, China)

Abstract: The evaluation on flat-to-flat perpendicularity error lies mainly in the datum plane fitting which should comply with the principle “minimum condition” in the international regulation. Therefore, the paper tries to seek the minimum condition datum plane, transferring it from perpendicularity to two-dimensional straightness in order to get high precision data. The programming and calculation test ensures the relevant data accurate.

Key words: perpendicularity error; flat to flat; the minimum condition; high-precision