

文章编号 1004-924X(2011)12-2963-07

双球渐开线样板的理论分析和应用

石照耀, 张 健*, 陈洪芳

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 为确保齿轮测量仪器的高精度校准, 国际标准 ISO/TR 10064-5:2005 推荐了新型的双球渐开线样板。该样板采用高精度球体的部分圆弧代替渐开线, 通过误差补偿, 获得高精度渐开线以实现渐开线溯源。研究了该样板相关的理论问题, 为双球样板设计与应用提供了理论基础。针对数控齿轮测量仪器常采用的电子展成法, 分析并给出了理想安装条件下和存在安装误差时双球渐开线样板的原理误差及其计算公式; 根据最优圆弧思想, 使用最小二乘法推导出双球中心距的优化公式; 最后给出了原理误差的补偿方法。基于上述基本理论, 开发了双球样板设计软件并研制了一块模数为 2.268 1 mm、齿数为 40、压力角为 20° 的双球渐开线样板。

关键词: 齿轮; 齿轮仪器; 齿轮测量; 齿轮样板; 双球渐开线样板

中图分类号: TH132.41; TP274 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2963

Theoretical analysis of double-ball artifact and its applications

SHI Zhao-yao, ZHANG Jian*, CHEN Hong-fang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: jk0618@126.com

Abstract: To ensure high-precision calibration of gear measuring instruments, the international standard ISO / TR 10064-5:2005 recommends a Double-Ball Artifact (DBA) as calibration reference. The DBA employs a high-precision sphere to replace the involute and uses an error compensation technique to obtain a high-precision involute to realize the involute traceability. The theoretical issues relating to the DBA are discussed to provide a theoretical basis for the design and application of the DBA. The error of measurement principle of DBA and its calculation function are given under the conditions of ideal installation and with installed errors for the electronic generative metrology. According to the optimized arc thoughts, the formula of the optimized center distance between the two balls is derived by the least square method. Finally, the error compensation method is described. The DBA software is designed based on the above theory and a DBA is developed with a parameter of module in 2.268 1 mm, number of teeth in 40, and a pressure angle in 20°.

Key words: gear; gear instrument; gear measurement; gear artifact; Double-ball Artifact(DBA)

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50805003)

1 引言

齿轮样板是保证齿轮量值传递和统一的基础^[1]。齿轮样板包括渐开线样板、螺旋线样板和齿距样板。这些样板形状复杂、加工困难,目前世界上最精确的渐开线样板仍有 $0.3 \mu\text{m}$ 的加工误差;特别是渐开线基准样板还需要专门的超精密仪器进行测量^[2-3]。许多年来,人们一直在探索用简单形体(如球、圆柱、平面等)的组合去代替齿轮样板的可能性。20 世纪中期,就有人提出了一些设想,但都没有成为现实,这主要受限于当时机械式齿轮量仪的制造水平。最近 20 多年,齿轮量仪的数控化为这种探索成为现实提供了技术基础^[4]。

简单形体及其组合,测量方便,且能实现高精度测量。结合数控化仪器的软件修正技术,就能实现复杂形体的量值传递。在渐开线样板方面,国外研究了平面样板、圆柱样板、双球样板等非渐开线样板,其中平面和圆柱样板存在测量结果易超出仪器量程和安装精度难以保证等缺点而被淘汰;而双球样板具有结构简单、成本低、精度高、可溯源等优点,非常符合对数控齿轮测量中心进行高精度校准的要求^[5-9],因而为国际标准 ISO/TR 10064-5:2005 所采纳。该标准给出了双球渐开线样板的原理误差及其补偿方法、双球中心距的优化方法等计算公式。本文推导了该标准的公式,特别是弄清了双球中心距的优化方法,为设计双球渐开线样板提供了理论基础。本文依据此理论基础设计并制造了一块双球渐开线样板。

2 样板结构与工作原理

双球样板的结构如图 1 所示,包括定心球、检测球和基座,两个球置于同一个基座上。定心球和检测球的中心距可以溯源到长度的国际标准。检测球的横截面的一部分弧线接近渐开线,渐开线和圆弧之间的偏差称之为样板原理误差,原理误差可以通过计算得到,计算原理误差所用的参数都可以溯源。通过补偿原理误差,圆弧可以作为虚拟的渐开线使用。调整定心球与检测球之间的距离以及检测球半径的大小,双球样板可以校准各种模数齿轮的渐开线齿廓^[10]。

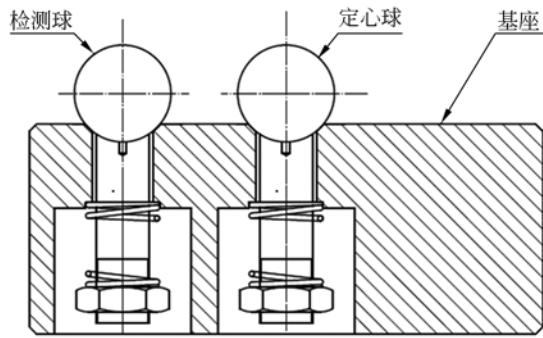


图 1 双球样板的结构

Fig. 1 Structure of DBA

3 样板原理误差分析

3.1 理想情况下的原理误差

理想情况下双球样板的原理误差如图 2 所示, O_1 表示齿轮测量中心的测头与检测球接触时的球心, O_2 表示测头与理想渐开线接触时的球心, O 为定心球球心,也是基圆中心, M 为检测球的中心, r_c 为检测球的半径, C 表示检测球球心与定心球球心之间的距离, r_b 为基圆半径, A 表示基圆与检测球之间的交点, r_p 为测头半径, l 表示渐开线, X 轴为齿轮测量中心的轴, T 表示测头球心与 X 轴之间的距离, ε 为旋转角。根据齿轮测量中心的电子展成原理,在整个齿形测量过程中测头获取的误差值都是在渐开线的法线方向上获取的,因此在双球样板中用 O_1 与 O_2 在渐开线法线方向上的距离 δ_p 表示样板的原理误差^[11]。

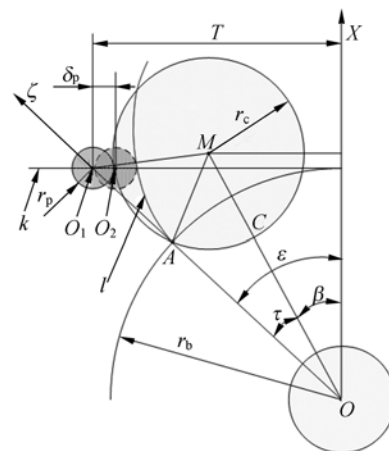


图 2 理想双球样板的原理误差

Fig. 2 Principle error of ideal DBA

从图中可以看出, 在 $\triangle MAO$ 中

$$\tau = \angle AOM = \arccos \frac{r_b^2 + C^2 - r_c^2}{2r_b C}, \quad (1)$$

显然有 $\beta = \epsilon - \tau$,

$$T = \sqrt{(r_c + r_p)^2 - (C \cos \beta - r_b)^2} + C \sin \beta, \quad (2)$$

由此, 可以计算得到双球样板的原理误差为,

$$\delta_p = T - r_p - r_b \epsilon. \quad (3)$$

3.2 存在安装误差时的原理误差

样板安装在齿轮测量中心上时可能存在安装误差, 因此双球样板存在安装误差时的原理误差如图 3 所示, 双球样板定心球球心与齿轮测量中心的旋转中心之间的位置偏差和角度偏差分别用 e_c, α_c 表示; 测头在双球样板检测球上实际测量时的位置与测头在理论渐开线上测量时的偏差用 δ_p 表示。 O' 为齿轮测量中心的旋转中心, k_1 表示渐开线发生线, k_2 为平行 k_1 过测头球心的直线, k_1 与渐开线相交于 B 点, 过 M 做 k_1, k_2 的垂线与其分别相交于 N 点和 H 点, r 为渐开线的矢向半径, r_0 为齿轮测量中心的中心到检测球中心的距离^[11]。

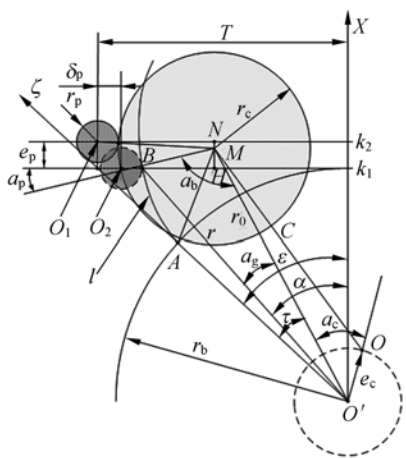


图 3 存在安装误差时的样板原理误差

Fig. 3 Principle error of DBA with systematic error

根据渐开线的性质有,

$$r = BO' = \frac{r_b}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

在 $\triangle MOO'$ 中有,

$$r_0 = MO' = e_c \cos \alpha_c + \sqrt{C^2 - (e_c \sin \alpha_c)^2}, \quad (5)$$

在 $\triangle AMO'$ 中有,

$$\tau = \arccos \frac{r_b^2 + r_0^2 - r_c^2}{2r_b r_0}, \quad (6)$$

因 $a_g = \alpha + \tau - \epsilon$, 在 $\triangle BMO'$ 中有,

$$BM = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos a_g}, \quad (7)$$

$$a_b = \arccos \frac{BM^2 + r_0^2 - r^2}{2BM \cdot r_0}, \quad (8)$$

$$a_p = \frac{\pi}{2} - \tau + \epsilon - a_b. \quad (9)$$

在 $\triangle NMO_1$ 中有,

$$NM = e_p - BM \cdot \sin a_p, \quad (10)$$

$$NO_1 = \sqrt{(r_p + r_c)^2 - NM^2}, \quad (11)$$

存在安装误差时双球样板的原理误差为,

$$\delta_p = NO_1 - BH - r_p. \quad (12)$$

4 双球中心距的优化

在双球样板中若要使用圆弧代替渐开线, 需要找到最接近渐开线的圆弧, 称这样的圆弧为渐开线拟合的最优圆弧。可以通过最优圆弧反推出样板中两球之间的最优中心距, 最优圆弧有如下两个性质^[12]。

性质 1 最优圆弧的圆心在基圆以外, 并且圆弧与渐开线有 3 个交点, 如图 4 所示。

在图 4 中 M 为圆弧的圆心, O 为基圆圆心, 虚线代表圆弧, 与渐开线有 3 个交点 P_1, P_2, P_3 。渐开线的起点设为 P_0 , 终点设为 P_4 。 ρ_c 与 ψ_c 分别是 M 的向径与幅角, N 为 OM 与基圆的交点, NP_2 是渐开线的发生线与基圆相切。过 M 存在基圆的两条切线, 与基圆有两个切点 J 和 K , 且 $\angle MOJ = \angle MOK = \xi$, MJ 和 MK 的延长线与渐开线分别相交于 S, T 。

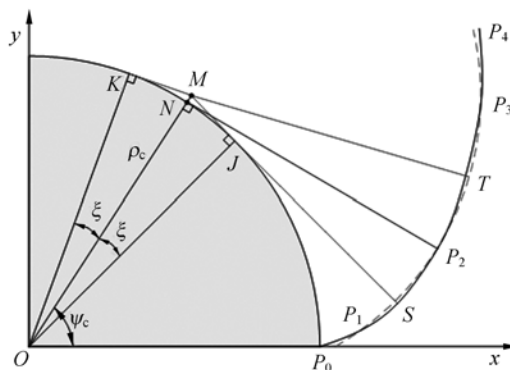


图 4 最优圆弧与渐开线的交点

Fig. 4 Intersection between optimal arc and involute

性质 2 最优圆弧与渐开线之间的偏差曲线形状为驼峰形状, 如图 5 所示。 Φ 为渐开线发生线的展开角; e_0, e_1, e_2, e_3 分别是 $P_0 P_1, P_1 P_2,$

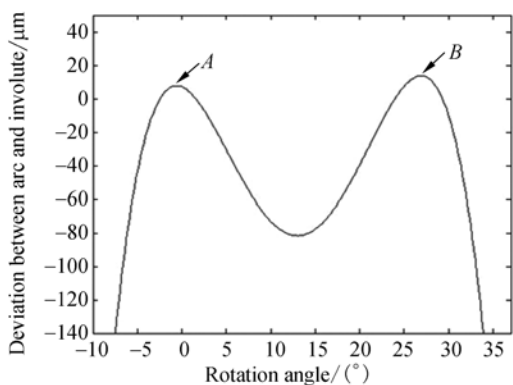


图 7 理论曲线

Fig. 7 Theoretical curve

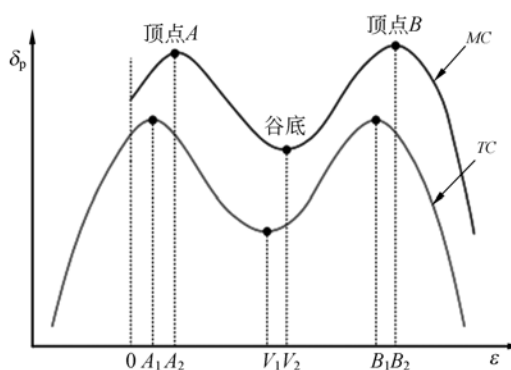


图 9 测量曲线的移动

Fig. 9 Movement of measurement curve

横坐标 ϵ 代表样板的旋转角度, 纵坐标 δ_p 代表样板的原理误差值, 测量曲线 (Measured curve, MC) 代表测量值, 评定仪器的偏差曲线 (Deviation Curve for Evaluation, DEC) 代表仪器的误差, 下面的误差补偿公式描述了它们之间的关系^[13]:

$$DEC = MC - TC. \quad (19)$$

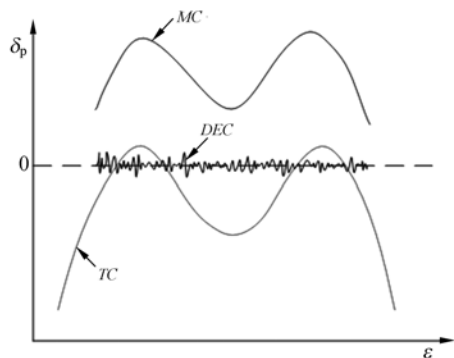


图 8 原理误差的补偿

Fig. 8 Compensation of principle error

为完成原理误差补偿需要将 MC 与 TC 放在同一坐标系下进行比较, 如图 9 所示。

为了使 MC 与 TC 在 ϵ 坐标下重合, 可以采用如下简单的方法, 首先通过计算得到 MC 与 TC 的顶点 A, 谷底, 和顶点 B 在 ϵ 轴上的坐标 $A_1, V_1, B_1, A_2, V_2, B_2$, 使用下面的公式计算出 MC 的移动量 Δ 。

$$\begin{cases} sum_{TC} = A_1 + V_1 + B_1 \\ sum_{MC} = A_2 + V_2 + B_2 \\ \Delta = \frac{sum_{MC} - sum_{TC}}{3} \end{cases} \quad (20)$$

6 应用

基于上述基本理论, 开发了双球渐开线样板的设计分析软件 (见图 10), 并研制了一块模数为 2.268 1 mm、齿数为 40、压力角为 20° 的双球渐开线样板 (如图 11)。

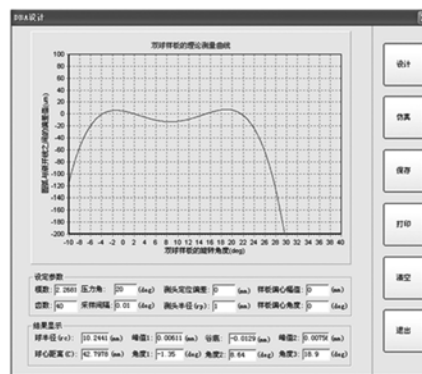


图 10 双球样板的设计分析软件界面

Fig. 10 Interface of DBA design

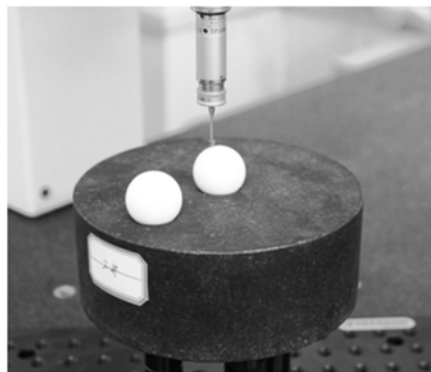


图 11 双球渐开线样板实物

Fig. 11 Picture of DBA

7 结 论

为解决数控齿轮测量仪器高精度校准和渐开线溯源问题,本文针对 ISO/TR10064-5 中推荐的双球渐开线样板,论述了该样板的结构和原理,给

出其原理误差计算公式及补偿方法,并对两球中心距进行了优化,得到的双球中心距优化公式与 ISO/TR10064-5 中给出的公式相吻合。基于上述理论,本文提出了双球样板设计软件,并研制出了双球渐开线样板。

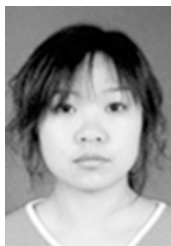
参考文献:

- [1] 石照耀. 国外齿轮精度标准及其保证体系[J]. 机械传动, 2008, 32(2): 5-7.
SHI Z Y. Gear accuracy standards and traceability systems [J]. *Mechanical Drive*, 2008, 32(2): 5-7. (in Chinese)
- [2] RUDOLF O. History of gear measuring machines and traceability 1900-2006[J]. *Gear Product News*, 2006, 41(10): 20-25.
- [3] 王立鼎, 凌四营, 马勇, 等. 精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 322-325.
WANG L D, LING S Y, MA Y, *et al.*. Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 322-325. (in Chinese)
- [4] 石照耀. 齿轮量仪. 2010 中国齿轮工业年鉴[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
SHI Z Y. *Gear Checker*. 2010 *China Gear Industrial Yearbook*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [5] KONDO K, MIZUTANI H. Measurement uncertainty of tooth profile by master balls[J]. *VDI-Berichte*, 2002, 165(2): 797-810.
- [6] KUBO. Traceable artifacts for involute checker calibration[C]. *Braunschweig, Germany, Proc. 202nd PTB-Seminar Accurate Gear Metrology*, 2004: 950-956.
- [7] KNODO K, SASAJIMA K, NOGUCHI S, *et al.*. Tooth form evaluation using ball artifact development of a measuring instrument of a ball center distance traceable to national standard of length[C]. *Sendai, Japan, ISMTII 2007*, 2007: 1211-1215.
- [8] KOMORI M, TAKEOKA F, KONDO K, *et al.*. Design method of double ball artifact for use in evaluating the accuracy of a gear-measuring instrument[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(7): 1-10.
- [9] OSAWA S, SATO O, KONDO Y, *et al.*. A novel artifact for evaluating accuracies of gear profile and pitch measurements of gear measuring instruments [C]. *Lisbon, Portugal, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009: 1877-1881.
- [10] KUBO A, KONDO K, TAKATSUJI T. Calibration system of involute tooth form checker using ball artifact [J]. *VDI-Berichte*, 2005, 190(2): 505-521.
- [11] ISO/TR 10064-5 Cylindrical gears-Code of inspection practice- Part 5[R]. *Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments, Annex C*.
- [12] 钱文瀚. 渐开线齿廓的圆弧拟合[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1984.
QIAN W H. *Arc Fitting Involute Tooth Profile* [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1984. (in Chinese)
- [13] TAKATSUJI T, KONDO K, KUBO A. Performance assessment of involute gear measurement by CMM using a double-ball artifact [C]. *Bellingham, WA, SPIE*, 2005: 587-595.

作者简介:



石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,工学博士,教授,博士生导师,1984 于合肥工业大学获得学士学位,1988 年于陕西机械学院获得硕士学位,2001 年于合肥工业大学获得博士学位,研究方向为齿轮工程和精密工程。E-mail: shizhaoyao@126.com



陈洪芳(1980—),女,黑龙江安达人,工学博士,讲师,硕士生导师,2004 年、2007 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电检测及信号处理、精密测试等方面的研究。E-mail: hfchen@bjut.edu.cn



张健(1982—),男,黑龙江北安人,硕士研究生,2006 年于西安理工大学获得学士学位,主要从事齿轮测量方面的研究。E-mail: jk0618@126.com

(本栏目编辑:曹金)

● 下期预告

高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽特性

刘小涵^{1,2},冯晓国¹,赵晶丽¹,高劲松¹,张红胜¹,申振峰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

在确保制作感性网栅膜后光学窗红外透射率下降小于 5% 的前提下,研究了影响感性网栅膜电磁屏蔽特性的主要因素。首先,归纳了感性网栅膜红外透射率公式;接着,运用含阻抗边界条件的谱域 Galerkin 法,推导了周期结构金属网栅的电磁场积分方程,用周期矩量法算出网栅的反射系数及透射系数,进而求出其电磁屏蔽效能,计算并分析了不同线宽、周期、衬底材料、衬底厚度时透明导电光窗(制备了金属网栅膜)的电磁屏蔽效能。最后,采用激光直写、真空镀膜等工艺在 ZnS 基底上制作了周期 $360\ \mu\text{m} \times 360\ \mu\text{m}$ 、线宽 $12\ \mu\text{m}$ 、方块电阻分别为 $13\ \Omega$ 、 $25\ \Omega$ 的样片,采用自由空间法测试了 $2\sim 18\ \text{GHz}$ 频段的电磁屏蔽效能。测试与分析结果表明:当在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段感性网栅膜引起的平均透射率下降小于 2% 的情况下,电磁屏蔽效能平均达到了 20 dB 以上。由于网栅的光电特性是矛盾的,解决途径主要考虑线宽与周期越小越好,同时尽量降低网栅的表面电阻。