

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.008

# 滚珠丝杠的发尘特性研究\*

梁 汉, 杨家军\*, 高 扬, 张传祥, 施建华, 赵美玲  
(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对如何高效维持无尘室洁净度等级方面的问题,对设备中滚珠丝杠副的发尘规律和无尘室中润滑脂的使用寿命进行了研究。提出了一种发尘量理论来预测设备在工作中的发尘规律,为了验证该理论规律,利用发尘量检测综合实验台对滚珠丝杠副的发尘量特性进行了检测,有效地检测出了滚珠丝杠副在工作中发尘量的多组数据。通过 Matlab 将测量的多组实验数据进行了拟合,得到了发尘量与发尘源距离之间的分段指数函数,验证了发尘量的扩散特性规律和运动特性对发尘量的影响。实验结果表明,发尘量理论规律有一定的客观依据与实用性,利用这种特性可对其采取相应的除尘手段,在发尘源处减少其发尘量,有效地保证整体环境的洁净度等级。

**关键词:**发尘量;扩散性;数据拟合;除尘;洁净度

**中图分类号:**TH188

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)06-0684-05

## Particle generation characteristics of ballscrew

LIANG Han, YANG Jia-jun, GAO Yang, ZHANG Chuan-xiang,  
SHI Jian-hua, ZHAO Mei-ling

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and  
Technology, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of maintaining the clean room environment level, the particle generation of ballscrew and the service life of the grease was researched, and the theoretical research was presented to find the regular in particle generation. In order to prove this theory, the particle generation comprehensive experimental platform was designed, and the characteristics of ballscrew data was tested out. From this data, the new formula was fit in Matlab, the exponential function about relation between the particle generation and the distance was built. The results indicate this theory has certain objective basis and practicality, the formula could be used to analyze the particles and take some methods to reduce it. There is a way to reduce the particle generation from its source, and ensure overall environment cleanliness level effectively.

**Key words:** particle generation; diffusivity; data fitting; dust extraction; cleanliness level

## 0 引 言

目前,生产行业中设备都要满足高速高精的要求,设备在工作中产生的一些颗粒物对设备稳定运行具有一定的影响,在一些精度要求高的设备上(例如高精

度直线导轨以及高精度的滚珠丝杠),发尘量的控制变得尤为重要。精度加工要求高的设备和食品医疗器械的工作环境中允许存在的颗粒数是有严格要求的,这些加工的工序也大多是靠机床来完成,进给运动和传动主要是靠滚珠丝杠副,所以滚珠丝杠在运动过程

收稿日期:2015-12-23

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2013ZX04008-031)

作者简介:梁汉(1992-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事机械设计与结构设计方面研究。E-mail:296281773@qq.com

通信联系人:杨家军,男,教授,博士生导师。E-mail:yjlar@163.com

中的发尘特性研究具有重要的研究价值。

目前,在日本的 KOYO 公司对各类轴承与固体润滑剂在不同环境下运行时的发尘量已有相关的研究<sup>[1-2]</sup>,以及轴承在不同环境中的发尘与轴承润滑的疲劳寿命之间的联系等问题<sup>[3]</sup>。华中科技大学的施建华<sup>[4]</sup>研究的《行星滚珠丝杠副的热特性与发尘特性研究》中检测各类润滑脂在行星滚珠丝杠运动过程中的发尘特性研究,与发尘量紧密相关的是存在润滑脂润滑的情况下,润滑与摩擦磨损和失效的关系的研究目前也比较透彻<sup>[5]</sup>,对发尘特性中不同润滑脂对工作中产生发尘量的关系,以及载荷大小对发尘量的影响等做了充分研究,在摩擦与润滑的部分也有了一定的研究基础,但是对发尘量的扩散性以及滚珠丝杠副存在加速度与匀速运动时的发尘量研究还有所欠缺。

本研究通过研究滚珠丝杠副在工作中的发尘量扩散性规律等问题,为滚珠丝杠副其他的发尘特性以及改善工作空间洁净度提供一定的理论参考。

## 1 发尘量检测实验台

目前测试发尘量的方法通常分为两种:一种是出口式的发尘量检测方式,在一个洁净工作室中通风,出口处放置粒子计数器来计算工作的发尘量;另外一种深入式的发尘量检测方式,在洁净工作室的发尘原旁边放置粒子计数器收集管,更近地检测发尘原旁边的粒子数量。本研究以深入式的发尘量检测方式为基础完成实验研究。

实验台主体由洁净工作室和粒子计数器组成,洁净工作室持续通风的状态下能使内部的空气达到 IOS class 4 等级<sup>[6]</sup>,最小的  $0.3\ \mu\text{m}$  的颗粒小于  $1020\ \text{颗}/\text{m}^3$ 。因为在实验过程中滚珠丝杠润滑脂的一个发尘量远大于这个洁净工作室中的颗粒个数,无尘工作室能满足其要求。

发尘量的检测实验台如图 1 所示。



图 1 发尘量检测实验台

图 1 中,左侧为粒子计数器,中间为洁净工作室,

洁净工作室中的通风量可调,且大于  $28.3\ \text{L}/\text{min}$ ,粒子计数器的流量为  $28.3\ \text{L}$ ,其余空气从左侧的排风口排出,排出的速度可由左侧 5 个阀门调节。

### 1.1 发尘量的参考作用

发尘量对于产品性能来说还是一个新词汇,且控制发尘量的研究在国内也是比较空缺,存在相对运动以及传动部分的设备上的发尘量尤为明显,这些发尘量产生的尘粒分为摩擦损失的金属颗粒和润滑脂产生的油脂颗粒,其中最主要的就是油脂颗粒。

发尘量的特性可以简单地分为最初加入润滑脂的一个磨合阶段,在此之后形成稳定发尘阶段,达到润滑脂使用寿命的时候,会出现严重发尘阶段,研究人员可以利用这样的一种现象来间接地对设备的润滑脂的使用寿命进行推测。例如当发尘量比原工作发尘量提高了 10 倍以上时,可表示设备运转已经达到润滑脂的使用寿命,需要更换。这样通过间接的方法更容易知道设备的工作状况,不用去拆开设备再去检测,极大提高了工作效率。

### 1.2 发尘量与润滑摩擦磨损

润滑脂的颗粒占发尘量的主要成分,润滑脂的各个性能指标中的蒸发损失和机械安定性是主要决定润滑脂发尘量的因素<sup>[7]</sup>,润滑脂失效的判定上有物理因素引起的失效和化学因素引起的失效,但是在无尘室等环境中使用的润滑脂应该有一个新的定义:发尘量失效。在正常运作过程中对于有润滑的磨损关系,磨损量与发尘量也存在一定的正比关系,研究人员也能凭借这个指标来参考与判断机械传动运行的平顺性。在发尘量的检测中,以磨合阶段后的正常工作阶段的发尘量为标准,把发尘量超过一个数量级也就是十倍关系的时候判定润滑脂发尘量失效,需要进行更换或维护。

润滑脂的组成中,基础油、稠化剂、添加剂 3 部分成分不同,会明显地影响润滑脂在使用中的发尘量。

试验中,本研究利用 HNK 公司的 AFF 低发尘润滑脂作为标准(设其值为 1)来测定相同运动状态下不同润滑脂和润滑油的发尘量关系,比例数据如表 1 所示。

表 1 润滑产品发尘比例系数

润滑脂 型号	THK AFF	THK AFB	长城通用 润滑脂	美孚 Vectra2
系数值	1	1.13	2.54	14.67

表 1 中数据表明,发尘量的大小对于不同成分构成的润滑脂影响明显,环境有洁净度要求的情况下使用润滑脂时尽量使用低发尘的润滑脂来最大限度地减少对环境尘量的改变。

## 2 发尘量扩散性的研究

很多工厂有空气洁净度的要求时通常要达到万级或 10 万级空气洁净度,这一洁净度是在整个环境中的平均值。但是在测试滚珠丝杠的发尘量时,发尘源附近的发尘量相比环境中的平均发尘量要大的多,所以设备仪器发尘量扩散性的研究对洁净度有要求的工厂来说是很重要的。通过寻找发尘量扩散性的规律而得出的扩散性规律在优化工厂的设备布置、空气过滤,以及设备除尘改进等一些方面具有实际的参考价值。

### 2.1 实验数据采集

本研究对运动中的滚珠丝杠副的发尘量进行数据采集,在行程为 300 mm 的滚珠丝杠的中点位置与端点位置的各个间距取测量点。

测量点分布示意图如图 2 所示。

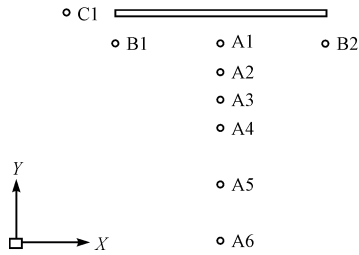


图 2 测量点分布示意图

图 2 中,A1 到 A6 分别距离丝杠行程中点 Y 轴方向 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、30 cm、40 cm,B1 与 B2 相距端点 Y 轴方向 5 cm,C1 到 C3 分别距离丝杠行程左端端点 5 cm 处。测量点如图 2 所示。

实验时滚珠丝杠滑块的速度为 25 m/min,本研究在滑块上增加了一个重量为 4 N 的配重块,使之进行往复运动,滚珠丝杠示意图如图 3 所示。

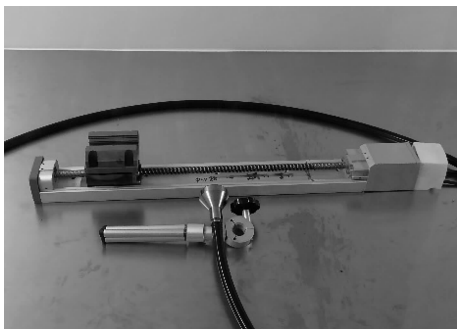


图 3 滚珠丝杠示意图

测量时本研究使粒子计数器调整到通风量为 28.3 L/min 的最大值后,相同的测量的位置点中每 15 min 测量一次记录,在保持相对稳定的时候记录 10 组数据。

因为实验所用的 METNOE 粒子计数器在 0.3 μm

的计算精度为 50% ~ 70% 左右,本研究在数值的选取上用所有的粒子数之和来减小部分的误差将测量的结果以折线图的形式来表达<sup>[8]</sup>,粒子数折线图如图 4 所示。

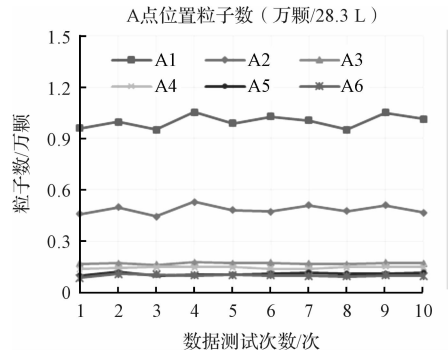


图 4 粒子数折线图

由图 4 可知,测量 10 次的结果表明,在固定位置的发尘量的大小几乎没有太大变化,只会在一小幅度下波动:

$$\bar{N} = aN \tag{1}$$

$$\alpha_{\max} = \frac{N_{\max}}{N} \quad \alpha_{\min} = \frac{N_{\min}}{N} \tag{2}$$

式中: $a$ —波动系数,取值为定点总粒子数的平均值与测量结果中最大和最小粒子数的一个比值; $N$ —粒子数的一个算数平均值; $\bar{N}$ —用波动系数处理后平均值。

把 A 点位置上的各个数据点处理好之后,各点处对应  $N$ 、 $a$  值如表 2 所示。

表 2 各点处对应  $N$ 、 $a$  值数据

点	距离 $d$ /CM	$N$ /颗(28.3 L)	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
A1	5	9 998	0.95	1.05
A2	10	4 855	0.92	1.10
A3	15	1 721	0.95	1.03
A4	20	1 471	0.95	1.05
A5	30	1 109	0.91	1.09
A6	40	1 008	0.88	1.09
C1	5	13 689	0.92	1.08
B1	5	14 967	0.90	1.07
B2	5	14 573	0.94	1.09
出口处	/	926	0.97	1.02

由表 2 可以看出,粒子的个数  $N$  与相距发尘源的距离  $d$  是有一定的关系,从波动系数  $a$  值的选取可以看出  $\alpha_{\min}$  的值保守估计取值为 0.90, $\alpha_{\max}$  的取值为 1.10,所以在公式中波动系数  $a$  的取值定为 0.90 ~ 1.10。

### 2.2 X 轴与 Y 轴方向数据拟合

确定好波动系数  $a$  的取值范围后,研究者需要对于表 1 中的距离  $d$  与尘量  $N$  的关系进行一个数据的拟合,得到一个经验公式。

由表 2 中数据可以看出,在离发尘源的距离达到

一定的时候,变化的幅度越来越小,其粒子数量慢慢达到一个稳定的状态,所以针对这样的趋势可以利用以下分段函数来进行拟合:

$$\bar{N}(d) = \begin{cases} \frac{\alpha(k_1 e^{k_2 d} + k_3 e^{k_4 d})1000}{28.3}, & d < d_1 \\ \frac{1000\alpha c}{28.3}, & d \geq d_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{N}$ —每立方米大于  $0.3 \mu\text{m}$  的粒子数之和, $\alpha$ —粒子波动系数, $c$ —环境尘量, $k$ —常数项, $d$ —离发生源的距离, $d_1$ —当粒子数等于环境尘量的  $d$  值。

通过利用 Matlab 来对矩阵进行动态运算,得出结果如图 5 所示。

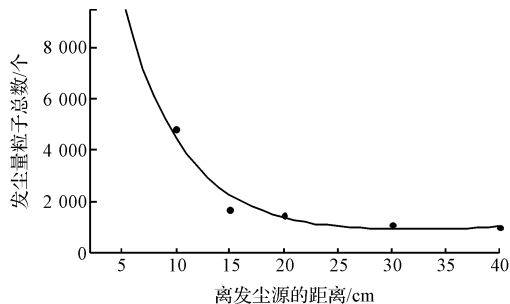


图5 Matlab 数据拟合函数图

$$\bar{N}(d) = \begin{cases} \frac{\alpha(25030e^{-0.2d} + 981e^{-0.0001d})}{28.3/100}, & d < d_1 \\ \frac{926\alpha}{28.3/1000}, & d \geq d_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a \in [0.9, 1.1]$ ,  $d_1 = 577$ 。

分析拟合误差<sup>[10]</sup>确定系数  $R$ -square:

$$R\text{-square} = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n \omega_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad \text{回归平方和} \quad (6)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad \text{总平方和} \quad (7)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{误差平方和} \quad (8)$$

计算得出  $R\text{-square} = 0.9884$ , 而  $R\text{-square}$  的取值为  $[0, 1]$ , 越接近 1 拟合效果越好, 由拟合的  $R\text{-square}$  的值来看拟合的程度较好。

另通过拟合出的公式看出它是一个指数形式函数, 趋势满足测量数据。

### 3 加速度对于发尘量的影响

上述测量的数据中显示在相同距离下 A、B 点的发尘量 A1 与 B1、B2 并不是一个对等的关系, 并且 B1 和 B2 是滚珠丝杠上滑块存在一个加速以及减速过程

的位置, A1 处是稳定的匀速运动位置, 测量的数据结果表明在 B 点的发尘量要大于 A 点 50% 左右, 由采集数据可得发尘量的大致分布。

滚珠丝杠发尘量分布示意图如图 6 所示。

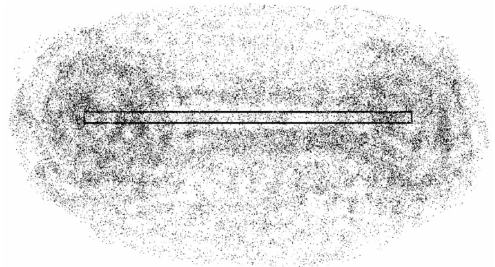


图6 滚珠丝杠发尘量分布示意图

滚珠丝杠副存在加速度运动对发尘量有较大的影响。空气洁净度要求高的工况环境中, 在保证设备的正常工作和不降低效率的前提下, 调整机床的运动, 使之尽可能减少存在加速度的运动位置, 或者尽可能减少加速度的数值, 将除尘装置放置在存在变速运动的机床运动部件附近, 来达到更好的除尘效果。

### 4 结束语

本研究提出了滚珠丝杠发尘量扩散性规律并且得到了实验验证, 实验结果表明在实验的过程中保持温度、通风量、工作载荷以及运动状态恒定的情况下, 把变量因素减少到最少, 只改变测量距离, 拟合出的经验公式指出该实验中发尘量扩散性与距离有一定的函数关系。由于一般工况相对来说更为复杂, 但是在一般工况环境中, 设备进行生产运作的状态相对稳定, 不同的只是一些常量, 如温度, 湿度, 通风量, 厂房空间等, 拟合公式对于一般的工况环境具有一定的参考价值。如将拟合公式应用到其他工况环境中, 研究者还需要考虑环境的综合影响因素, 今后的研究中可以在拟合出的公式的基础上增加一个环境的影响因子  $f$ , 其中包括环境空间大小、通风量、负载影响、润滑脂的型号, 以及运动的改变等这样的因素综合考虑得到环境影响因子, 再结合本研究中的测试方法测量在所需位置点的粒子总数  $N$ , 以测量出的数据拟合出特定工况更完善的发尘量的扩散公式。

本研究推导出的经验公式是为了更容易保持洁净工厂的空气洁净度等级, 经验公式可推算出机床设备或仪器发尘量集中的位置, 在合适的位置安装吸尘或换气装置来减少发尘量对于环境的影响, 直接处理发尘源的尘量来提高整体环境的洁净度等级。另通过对机床运行速度的控制也能减少发尘量。

本研究推导出的发生量扩散性经验公式对工厂的环境洁净度的处理与改善具有参考价值。

参考文献 (References) :

[1] TAKEBAYASHI H. Bearings for Extreme Special Environments[J]. **KOYO Engineering Journal English Edition**, 2000, 156(E) :52-57.

[2] TOYOTA H. Development of Linear Slide Bearing Coated with Special Fluorocarbon Polymer Lubrication Film [J]. **KOYO Engineering Journal English Edition**, 2001, 158 (E) :31-36.

[3] TSURU K. Linear Motion Bearing for Extreme Special Environments[J]. **KOYO Engineering Journal English Edition**, 1999, 145(E) :51-54.

[4] 施建华. 行星滚柱丝杠副热特性与发尘特性研究[D]. 武

汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2015.

[5] 余晓流. 摩擦学与润滑技术[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2013.

[6] 王大千,刘 娜,王 尧. 粒子与洁净度分级[J]. 洁净与空调技术 CC & AC,2010,3(1) :26-29.

[7] 史 燕. 锂基润滑脂流变特性与摩擦磨损性能相关性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2014.

[8] 希 鼎. 小粒径粉尘粒子扩散沉降量的计算[J]. 中国安全生产科学技术,1994,6(14) :41-44.

[9] 晓 霞. 基于 Matlab 的通用数据拟合方法[J]. 山西大同大学学报:自然科学版,2014,8(4) :1-6.

[10] 孙光东,孙建印,彭 长. 刚采用不同路径推求城市暴雨强度总公式的拟合误差分析[J]. 水利学报,2015,1(1) :97-101.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

梁 汉,杨家军,高 扬,等. 滚珠丝杠的发尘特性研究[J]. 机电工程,2016,33(6) :684 - 688.

LIANG Han, YANG Jia-jun, GAO Yang, et al. Particle generation characteristics of ballscrew[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33 (6) :684 - 688.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 683 页)

4 结束语

本研究基于材料力学理论建立了 PLA 成型过程中外表面褶皱缺陷的数学模型,并分析了成型过程中涉及的几个重要工艺参数(层厚,喷嘴温度,倾角,速度)对成型过程中褶皱缺陷的影响,然后设计了实验验证分析结论。最终给出了针对不同添加剂的 PLA 材料,如何调整工艺参数以改善成型质量的参考建议。本研究的数学模型可靠有效,实验结果客观真实,对于研究不同添加剂的 PLA 材料的成型工艺参数有一定的参考意义。

参考文献 (References) :

[1] The difference between ABS and PLA for 3D printing[EB/OL] [2013-01-01]. <http://www.protoparadigm.com/blog/2013/01/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing>.

[2] 杜宇雷,孙菲菲,原 光. 3D 打印材料的发展现状[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2014,29(1) :20-24.

[3] 朱 珠,雷 林,罗向东,等. 含能材料 3D 打印技术及应用现状研究[J]. 兵工自动化,2015,34(6) :52-55,70.

[4] 柳 建,殷凤良,孟凡军,等. 3D 打印再制造目前存在问题与应对措施[J]. 机械,2014,41(6) :8-11.

[5] 包宽亮,丁 筠,乔 辉. 生物降解材料聚乳酸研究进展[C]//中国染料工业协会色母粒专业委员会 2012 年全

国塑料着色与色母粒学术交流会. 黄山:[出版者不详], 2012:124-132.

[6] 乔 辉,赖金琼,丁 筠. 中国色母粒现状调查与分析[J]. 塑料,2015,44(4) :1-5.

[7] 倪荣华. 熔融沉积快速成型精度研究及其成型过程数值模拟[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2013.

[8] WITTBRODT B, PEARCE J M. The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components[J]. **Additive Manufacturing**,2015(8) :110-116.

[9] ROSAS L. Characterization of Parametric Internal Structures for Components Built by Fused Deposition Modeling [D]. University of Windsor,2013.

[10] SUN Q, RIZVI G M, BELLEHUMEUR C T, et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments[J]. **Rapid Prototyp**,2008,14(2) :72-80.

[11] MakeitFrom, Polyactic Acid (PLA). [EB/OL] [2014-9-20]. <http://www.makeitfrom.com/materialproperties/Polyactic-Acid-PLA-Polyactide>.

[12] CIURANA J, SERENóA L, VALLÈS è. Selecting Process Parameters in RepRap Additive Manufacturing System for PLA Scaffolds Manufacture[J]. **Procedia**,2013(5) :152-157.

[13] 肖苏华,巫小珍. 聚乳酸材料在桌面型 3D 打印中的应用研究[J]. 机电工程,2015,32(10) :1344-1347.

[编辑:李 辉]