

# T型导轨翘曲变形矫正的载荷-行程模型\*

周磊 余忠华

(浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027)

**【摘要】** 根据弹塑性力学理论,分析了T型导轨翘曲矫正过程中所经历的弹性加载、弹塑性反弯和卸载回弹这3个变形阶段,推导了各个阶段的矫正载荷、弯矩和行程间的关系,给出各变形阶段的载荷-行程关系式,从而建立T型导轨翘曲变形矫正的载荷-行程模型。利用该模型,可根据导轨的初始翘曲挠度快速、准确地计算出相应的矫正行程。为验证该模型的正确性,以T89/B型导轨为例进行了实验对比分析,其结果表明该理论模型与实验所得出的矫正行程间的相对误差在10%以内,该模型是切实可行的,可为T型导轨全自动翘曲矫正机的开发提供理论支持。

**关键词:** T型导轨 载荷 行程 翘曲 矫正

**中图分类号:** TG302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0193-05

## Load-stroke Model for Straightening the Warpage of T-rail

Zhou Lei Yu Zhonghua

(Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

### Abstract

Three deformation stages of straightening T-rail's warpage, including elastic deformation, elastic-plastic deformation and elastic unloading springback, were analyzed according to the elastic-plastic mechanics theory, the load-stroke expressions of three deformation stages were gained through deriving relationships among load, bending moment and stroke, and then the straightening load-stroke model was established. By using the model, the straightening stroke could be calculated directly and accurately according to the initial deflection. In order to verify the model presented, taking T89/B guide rail for example, the straightening experiment was conducted. Comparing the calculation strokes by model with experimental results, the relative errors are less than 10%. It showed the presented model was practical. It will give theoretical support to the development of automatic machines for T-rail's warpage straightening.

**Key words** T-rail, Load, Stroke, Warpage, Straightening

### 引言

T型导轨作为重要的导向类零件,被广泛用于机械传动装置中。T型导轨的长度尺寸远大于高度和宽度的尺寸,其导向面加工时导轨内的残余内应力易使导轨产生翘曲变形,导向时会给被导向部件一个侧向力,使被导向部件产生振动、晃动,直接影响被导向部件的运行平稳性乃至安全性。为此,翘

曲矫正工序是T型导轨加工过程中的必不可少的环节。

目前矫正T型导轨翘曲变形的的方法有压力矫正、辊式矫正。辊式矫正难以对导轨的全长进行矫正,矫后导轨端部有矫正死区,且需要根据不同T型导轨型号频繁调整矫正辊,而压力矫正法具有更大的柔性、便于获得较大的矫正力及弯矩,且具有容易调整、控制等优点,因此被广泛应用于T型导轨

的变形矫正工艺中。但目前普遍作法为基于工人经验的手工压力矫正,不同经验层次的工人确定的矫正行程相差很大,生产实践中经常出现工件被过度矫正而报废的现象,且手工压力矫正的效率、精度难以保证。因此,研制T型导轨全自动压力矫正机成为亟待解决的问题。现有的压力矫正理论大多以轴类、矩形类和管类等对称截面零件为研究对象<sup>[1~7]</sup>,T型导轨翘曲方向的截面为非对称截面,其压力矫正工艺较为复杂,尚缺乏系统的矫正理论指导,制约了T型导轨全自动压力矫正机的发展。

本文在分析T型导轨翘曲变形的基础上,利用弹塑性理论分析翘曲矫正中的弹塑性变形各个阶段及其弯矩,得出矫正载荷-行程模型,利用该模型可方便得到矫正一定T型导轨翘曲挠度的精确矫正行程。为验证模型的正确性,对T89/B型导轨进行实例研究,并设计翘曲矫正实验。通过对比模型结果与实验数据,证实模型的可行性。

## 1 基于弹塑性力学的矫正载荷-行程模型

### 1.1 数学模型

如图1所示,T型导轨的翘曲变形沿长度方向呈现出多个弧度的翘曲,在矫正时可以将多弧度翘曲分解为一系列的单弧度翘曲,因此这里以T型导轨单弧度翘曲为例进行研究。

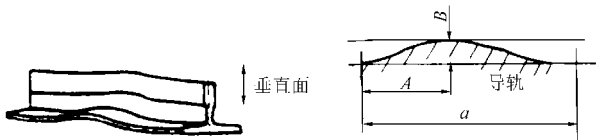


图1 T型导轨翘曲变形

Fig. 1 Warpage of T-rail

T型导轨翘曲矫正为典型的弹塑性变形问题,矫正时将翘曲的导轨简单支撑,对中间最大变形挠度 $\delta_0$ 处施加反向矫正载荷 $F$ ,导轨发生反向弹塑性弯曲 $\delta_w$ ;在卸去载荷后,导轨变形的一部分发生永久的塑性变形,一部分变形在金属弹性势能作用下回弹,若此回弹的变形与施加的反向变形 $\delta_w$ 相等,则导轨的翘曲变形便得到了矫正<sup>[8]</sup>。因此,随着加载过程的持续,导轨矫正过程实际经历了图2所示的3个阶段<sup>[9~10]</sup>,即初始阶段的弹性加载段 $OA$ 、弹塑性变形段 $AB$ 及弹性回弹阶段 $BC$ 。由于压力矫正的下压量相对工件尺寸及简支的跨距非常小,因此压力矫正为小变形问题,满足简单卸载定律,故可认为 $OA$ 与 $BC$ 具有相同的斜率,而 $A$ 点为屈服点,根据导轨材料特性,可事先确定 $A$ 点的位置,而若测得工件的初始变形量 $\delta_0$ ,便可以确定 $C$ 点的位置,过 $C$ 点做 $CB$ 平行于 $OA$ 与 $AB$ 相交于点 $B$ ,由点

$B$ 便得出矫正的反向变形量 $\delta_w$ 及矫正载荷 $F_B$ ,从而得到矫正压头的矫正行程 $\delta = \delta_0 + \delta_w$ 。因此,若能得到3个阶段的 $F-\delta$ 规律,即获得矫正过程的数学模型,可根据导轨的初始翘曲挠度 $\delta_0$ 获得进行矫正行程 $\delta$ ,故建立精确的矫正数学模型为T型导轨压力矫正的关键。

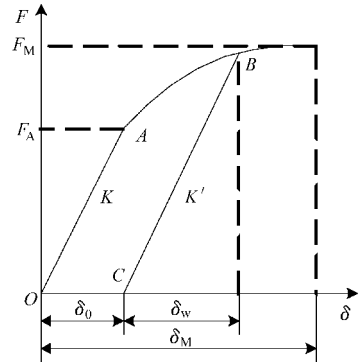


图2 压力矫正载荷-行程模型

Fig. 2 Press straightening load-stroke model

由于T型导轨翘曲矫正是典型的小变形问题,因此这里沿用弹塑性力学中的平截面假设并忽略包辛格效应。导轨材料的应力应变模型采用更为接近矫正实践的线性强化模型,且忽略小变形过程中导轨中性层的内移现象。

#### 1.1.1 弹性加载与回弹阶段

T型导轨矫正过程的弹性变形阶段( $OA$ 段),载荷 $F$ 与行程 $\delta$ 间的关系为

$$F = \frac{6EI}{l^3} \delta = K\delta \quad (0 < F \leq F_A) \quad (1)$$

式中  $E$ ——材料弹性模量  $F_A$ ——弹性极限载荷  
 $I$ ——导轨截面惯性矩  
 $l$ ——简支梁支撑距离的一半

卸载阶段( $BC$ 段)的载荷与行程间的关系根据卸载定律,卸载阶段 $BC$ 的斜率 $K'$ 与弹性加载阶段 $OA$ 的斜率 $K$ 相同,此时载荷与行程关系可表示为

$$F = \frac{6EI}{l^3} (\delta - \delta_0) \quad (0 < F \leq F_M) \quad (2)$$

式中  $F_M$ ——弹塑性极限载荷

#### 1.1.2 弹塑性变形阶段

T型导轨矫正过程为典型的非线性弹塑性变形,因此,矫正过程模型的关键是建立弹塑性变形阶段的 $F-\delta$ 关系式。如图3所示,矫正时支撑距离为 $2l$ ,考虑到压力矫正工艺,在T型导轨中点处施加集中载荷 $F$ ,图中阴影部分为T型导轨端部内发生了塑性变形的区域,其与弹性变形区的边界线为 $\zeta-x$ 线,该区域长度为 $2l_0$ ,弹区比 $\zeta$ 为沿导轨高度方向弹性区与 $h_2$ 的厚度之比, $M$ 为对应于矫正载荷 $F$ 的矫正弯矩, $2H_1$ 为弹性变形区厚度, $h_1, h_2, h_3, h_4, B_1,$

$B_2$  及  $B_3$  为导轨截面尺寸。

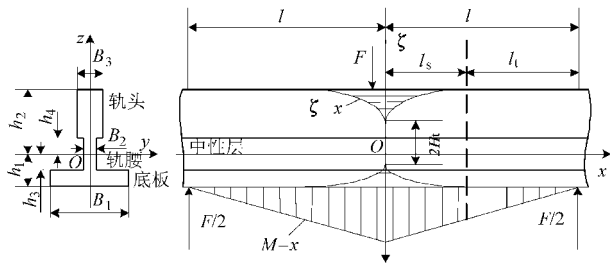


图 3 T 型导轨截面塑性区及弯矩分布  
Fig. 3 Plastic region and bending moment distribution of T-rail

T 型导轨为上下不对称截面梁,其截面形状在高度方向上有几何形状的突变,当翘曲矫正过程中的塑性变形纤维层厚度渗透至横截面的突变处时,

$$\begin{cases}
 M_{\lambda 1} = \frac{\sigma_t}{6\zeta h_2} (2B_1 h_1^3 - 2B_1 h_3^3 + 2B_2 h_3^3 + 2B_2 h_4^3 - \zeta^3 B_3 h_2^3 - 2B_3 h_4^3 + 3\zeta B_3 h_2^3 + 2\lambda B_3 h_2^3 + \lambda \zeta^3 B_3 h_2^3 - 3\lambda \zeta B_3 h_2^3) \\
 \quad (h_1/h_2 < \zeta \leq 1) \\
 M_{\lambda 2} = \frac{\sigma_t}{6\zeta h_2} (3\zeta B_1 h_2 h_1^2 - \zeta^3 B_1 h_2^3 + 2\lambda B_1 h_1^3 + \lambda \zeta^3 B_1 h_2^3 - 3\lambda \zeta B_1 h_2 h_1^2 - 2B_1 h_3^3 + 2B_2 h_3^3 + 2B_2 h_4^3 - \zeta^3 B_3 h_2^3 - \\
 \quad 2B_3 h_4^3 + 3\zeta B_3 h_2^3 + 2\lambda B_3 h_2^3 + \lambda \zeta^3 B_3 h_2^3 - 3\lambda \zeta B_3 h_2^3) \quad (h_3/h_2 < \zeta \leq h_1/h_2) \\
 M_{\lambda 3} = \frac{\sigma_t}{6\zeta h_2} (3\zeta B_1 h_2 h_1^2 - 3\zeta B_1 h_2 h_3^2 + 2\lambda B_1 h_1^3 - 2\lambda B_1 h_3^3 - 3\lambda \zeta B_1 h_2 h_1^2 + 3\lambda \zeta B_1 h_2 h_3^2 - \zeta^3 B_2 h_2^3 + 3\zeta B_2 h_2 h_3^2 + \\
 \quad \lambda \zeta^3 B_2 h_2^3 + 2\lambda B_2 h_3^3 - 3\lambda \zeta B_2 h_2 h_3^2 + 2B_2 h_4^3 - \zeta^3 B_3 h_2^3 - 2B_3 h_4^3 + 3\zeta B_3 h_2^3 + 2\lambda B_3 h_2^3 + \lambda \zeta^3 B_3 h_2^3 - 3\lambda \zeta B_3 h_2^3) \\
 \quad (h_4/h_2 < \zeta \leq h_3/h_2) \\
 M_{\lambda 4} = \frac{\sigma_t}{6\zeta h_2} (3\zeta B_1 h_2 h_1^2 - 3\zeta B_1 h_2 h_3^2 + 2\lambda B_1 h_1^3 - 2\lambda B_1 h_3^3 - 3\lambda \zeta B_1 h_2 h_1^2 + 3\lambda \zeta B_1 h_2 h_3^2 - 2\zeta^3 B_2 h_2^3 + 3\zeta B_2 h_2 h_3^2 + \\
 \quad 2\lambda B_2 h_3^3 + 2\lambda \zeta^3 B_2 h_2^3 - 3\lambda \zeta B_2 h_2 h_3^2 + 3\zeta B_2 h_2 h_4^2 + 2\lambda B_2 h_4^3 - 3\lambda \zeta B_2 h_2 h_4^2 + 3\zeta B_3 h_2^3 - 3\zeta B_3 h_2 h_4^2 + 2\lambda B_3 h_2^3 - \\
 \quad 2\lambda B_3 h_4^3 - 3\lambda \zeta B_3 h_2^3 + 3\lambda \zeta B_3 h_2 h_4^2) \quad (0 < \zeta \leq h_4/h_2)
 \end{cases} \quad (3)$$

将此弯矩与仅取决于导轨截面尺寸及材质的弹性极限弯矩  $M_1$  相比,可分别得出上述 4 种情况下的弯矩比  $\overline{M}_{\lambda 1}$ 、 $\overline{M}_{\lambda 2}$ 、 $\overline{M}_{\lambda 3}$  和  $\overline{M}_{\lambda 4}$  为

$$\begin{cases}
 \overline{M}_{\lambda 1} = \frac{1}{\zeta} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} \right) & \left( \frac{h_1}{h_2} < \zeta \leq 1 \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 2} = \frac{1}{\zeta} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} \right) & \left( \frac{h_3}{h_2} < \zeta \leq \frac{h_1}{h_2} \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 3} = \frac{1}{\zeta} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} + \frac{G_4}{G_1} \right) & \left( \frac{h_4}{h_2} < \zeta \leq \frac{h_3}{h_2} \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 4} = \frac{1}{\zeta} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} + \frac{G_4}{G_1} + \frac{G_5}{G_1} \right) & \left( 0 < \zeta \leq \frac{h_4}{h_2} \right)
 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned}
 M_1 &= (B_1 h_1^3 - B_1 h_3^3 + B_2 h_3^3 + B_2 h_4^3 + B_3 h_2^3 - B_3 h_4^3) \sigma_t / (3h_2) \\
 G_1 &= 2B_1 h_1^3 - 2B_1 h_3^3 + 2B_2 h_3^3 + 2B_2 h_4^3 + 2B_3 h_2^3 - 2B_3 h_4^3 \\
 G_2 &= (\lambda - 1) B_3 h_2^3 (\zeta + 2) (\zeta - 1)^2 \\
 G_3 &= (\lambda - 1) B_1 (\zeta h_2 + 2h_1) (\zeta h_2 - h_1)^2
 \end{aligned}$$

变形弯矩及矫直的  $F-\delta$  模型均发生变化。因此,导轨的翘曲程度不同,塑性变形区的大小也不同。按照塑性变形区的大小,可分 4 种情况推导导轨矫正时的弹塑性弯矩方程:①塑性变形只在头部产生,扩展,此时弹性区厚度  $H_1$  满足  $h_1 < H_1 \leq h_2$ ,用弹区比  $\zeta$  可表示为  $h_1/h_2 < \zeta \leq 1$ ,此时弯矩为  $M_{\lambda 1}$ 。②塑性变形从头部、底板同时产生并往内渗透,此种情况下弹性区厚度  $H_1$  满足  $h_3 < H_1 \leq h_1$ ,弹区比  $\zeta$  的变动范围为  $h_3/h_2 < \zeta \leq h_1/h_2$ ,弯矩为  $M_{\lambda 2}$ 。③底板全部发生塑性变形,并往上渗透至轨腰,此时  $h_4 < H_1 \leq h_3$ ,  $h_4/h_2 < \zeta \leq h_3/h_2$ ,矫正弯矩为  $M_{\lambda 3}$ 。④塑性变形分别从头部、底部渗透至腰部,此时  $0 < H_1 \leq h_4$ ,  $0 < \zeta \leq h_4/h_2$ ,弯矩为  $M_{\lambda 4}$ 。

$$\begin{aligned}
 G_4 &= (\lambda - 1) (B_1 - B_2) (\zeta h_2 + 2h_3) (\zeta h_2 - h_3)^2 \\
 G_5 &= (\lambda - 1) (B_2 - B_3) (\zeta h_2 + 2h_4) (\zeta h_2 - h_4)^2
 \end{aligned}$$

弹区比  $\zeta$  与翘曲时的总翘曲比  $\overline{C}_2$  呈反比,而总翘曲率比是初始翘曲曲率比  $\overline{C}_0$  与反翘曲率比  $\overline{C}_w$  之和,反翘曲率比与弯矩比  $\overline{M}$  相等<sup>[11]</sup>,故可得各阶段弯矩比  $\overline{M}$  与导轨初始翘曲比的关系式

$$\begin{cases}
 \overline{M}_{\lambda 1} = (\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 1}) \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} \right) & \left( 1 \leq \overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 1} < \frac{h_2}{h_1} \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 2} = (\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 2}) \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} \right) & \left( \frac{h_2}{h_1} \leq \overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 2} < \frac{h_2}{h_3} \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 3} = (\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 3}) \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} + \frac{G_4}{G_1} \right) & \left( \frac{h_2}{h_3} \leq \overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 3} < \frac{h_2}{h_4} \right) \\
 \overline{M}_{\lambda 4} = (\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 4}) \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} + \frac{G_3}{G_1} + \frac{G_4}{G_1} + \frac{G_5}{G_1} \right) & \left( \frac{h_2}{h_4} \leq \overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 4} \right)
 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$G_2' = B_3 h_2^3 (\lambda - 1) \left( \frac{1}{\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 1}} + 2 \right) \left( \frac{1}{\overline{C}_0 + \overline{M}_{\lambda 1}} - 1 \right)^2$$

$$G'_3 = B_1(\lambda - 1) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 2}} + 2h_1 \right) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 2}} - h_1 \right)^2$$

$$G'_4 = (\lambda - 1)(B_1 - B_2) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 3}} + 2h_3 \right) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 3}} - h_3 \right)^2$$

$$G'_5 = (\lambda - 1)(B_2 - B_3) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 4}} + 2h_4 \right) \left( \frac{h_2}{C_0 + M_{\lambda 4}} - h_4 \right)^2$$

由上式可知,只要对 T 型导轨的翘曲进行测量,得出导轨的初始翘曲比,便可得到矫正该处翘曲的矫正弯矩比,从而得出此时的矫正载荷  $F$  与矫正行程  $\delta$ ,于是可得 T 型导轨翘曲矫正的载荷-行程模型表达式

$$\begin{cases} F = 2 \overline{M_\lambda} M_1 / l \\ \delta = \delta_0 + \frac{l^2 M_1}{3 EI} \overline{M_\lambda} \end{cases} \quad (6)$$

在具体的 T 型导轨矫正实践中,针对导轨不同的翘曲挠度  $\delta_0$ ,可得该处翘曲在翘曲跨度为支点距  $2l$  处的初始翘曲曲率  $C_0$ ,将该曲率与弹性极限曲率  $C_1 = M_1 / (EI)$  相比,便可得导轨的原始曲率比  $\overline{C_0}$ ,再将此对应于原始挠度  $\delta_0$  的  $\overline{C_0}$  代入式(5),得出矫正该  $\delta_0$  得矫正弯矩比  $\overline{M_\lambda}$ ,最后通过式(6)可获得一系列的  $(F, \delta)$  数据点,利用 Matlab 可做出弹塑性变形段的  $F - \delta$  曲线,再联合式(1)、(2)可得 T 型导轨翘曲矫正的准确载荷-行程模型。

1.2 计算实例

以 T89/B 系列导轨为例,其材料特性按线性强化处理,材质为 Q235,弹性模量  $E = 206\ 000$  MPa,切向模量  $E' = 3\ 560$  MPa,强化系数  $\lambda = 0.017\ 3$ ,弹性极限应力  $\sigma_1 = 235$  MPa,其截面尺寸: $h_1 = 20.9$  mm,  $h_2 = 41.1$  mm,  $h_3 = 11.3$  mm,  $h_4 = 7.7$  mm,  $B_1 = 89$  mm,  $B_2 = 10$  mm,  $B_3 = 15.88$  mm,截面惯性矩  $I = 5.97 \times 10^5$  mm<sup>4</sup>,矫正支撑距离  $2l = 500$  mm。将这些参数代入上述的数学模型,便可得出图 4 所示的 T 型导轨翘曲矫正的理论载荷-行程模型曲线,利用此模型曲线可根据简单卸载定律直接得出矫正相应翘曲挠度的矫正行程。

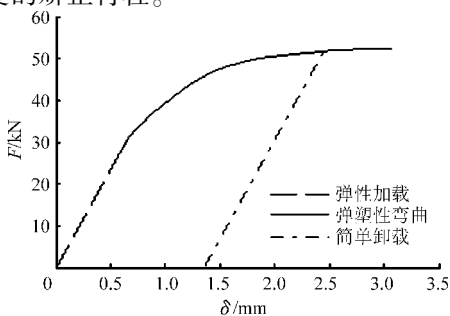


图 4 理论载荷-行程模型曲线

Fig. 4 Theoretical load-stroke model curves

2 实验验证

上述理论模型的矫正过程对导轨的材料特性做了线性强化处理,且忽略了导轨矫正过程中支撑块与压力头的结构形式对矫正参数的影响。因此,需对理论模型进行验证。为此,设计了 T 型导轨翘曲矫正实验,以实验数据为基础拟合得出精确矫正行程-挠度关系曲线,以此来证实上述的理论模型。

2.1 实验设计

压力矫正实质为一简支梁的三点反向弯曲过程,故采用三点弯曲实验来研究 T 型导轨中点加载过程中的变形规律。实验在 AG-1 型电子万能试验机上进行,其最大加载载荷为 250 kN,加载载荷相对误差在 0.01% 内。图 5 为翘曲矫正实验装置,实验时将 T89/B 型导轨简支,支撑距离 500 mm,在导轨中点施加压力或行程,加载时以压头下压方向为正方向。施加的压力和对应的矫正行程数据由对应的传感器输出,改变施加的矫正压力的大小,便可获得一系列对应的加载和卸载后的位移及压力的实时数据,通过数据分析便可得矫正行程及对应的初始翘曲挠度,表 1 为实验所得的载荷与行程数据。

表 1 实验载荷-行程数据

Tab. 1 Load-stroke data of the experiment

初始挠度/mm	矫正载荷/kN	矫正行程/mm
0	27.21	0.631
0.0125	33.47	0.776
0.030	35.79	0.851
0.051	37.50	0.977
0.100	39.74	1.041
0.152	42.77	1.103
0.207	43.10	1.214
0.325	45.01	1.309
0.399	46.75	1.549
0.504	48.10	1.670
0.697	49.33	1.803
0.820	50.05	1.975
0.927	50.81	2.090
1.050	50.99	2.299
1.185	51.87	2.364
1.343	52.39	2.525
1.450	52.79	2.647
1.590	53.17	2.899
1.753	53.58	2.995
1.910	53.98	3.177
2.110	54.37	3.370

2.2 实验分析

根据表 1 实验所得数据,利用 Matlab 曲线拟合建立图 6 实线所示的实验矫正载荷-行程曲线,为便



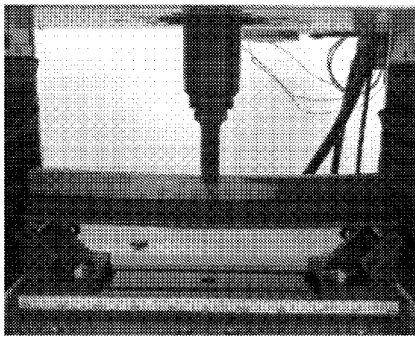


图 5 矫正实验

Fig. 5 Straightening experiment

于比较将其与上述的理论模型曲线画在一起。为说明模型的精确性,以实验数据为标准,表 2 给出了分别利用理论模型与实验所得的、矫正一定初始翘曲挠度的矫正行程及相对误差值。

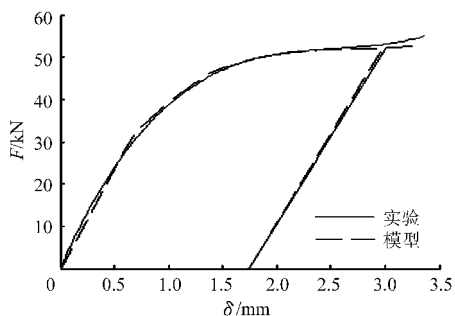


图 6 载荷-行程模型对比曲线

Fig. 6 Comparison chart of load-stroke model curves

表 2 矫正行程对比

Tab. 2 Stroke comparison

初始挠度 /mm	矫正行程		
	实验/mm	模型/mm	相对误差/%
0.504	1.670	1.511	9.52
0.820	1.975	1.879	4.86
1.050	2.299	2.129	7.39
1.753	2.995	2.858	4.57
2.110	3.370	3.220	4.45

从模型对比曲线图 6 及矫正行程对比表 2 可看出,理论模型曲线与基于实验数据的拟合曲线趋势完全一致,利用理论模型计算出来的矫正一定初始挠度的矫正行程与实验所得矫正行程间的相对误差较小,误差在 T 型导轨检验范围以内,证明了本文所提出的理论模型的正确、可行性。理论模型结果与实验结果存在一定误差的原因是:理论模型中对 T 型导轨的材料特性作了线性强化的假设,而实际上 T 型导轨从毛坯的轧制到半成品、成品的加工过程中受到诸如温度变化、内外应力、捆扎及堆放方式和刨削残余应力的影响,其实际应力-应变关系要复杂得多,且 T 型导轨矫正时压头与支撑块的结构形式对矫正参数也有影响,理论模型并未考虑矫正时的接触非线性问题。因此,在 T 型导轨翘曲矫正实践中,需根据导轨的实际材料特性及矫正支撑、压头的结构形式对理论模型进行适当的修正,这正是今后要进一步研究的内容。

### 3 结束语

针对 T 型导轨翘曲矫正问题,本文利用弹塑性力学,建立了 T 型导轨翘曲矫正的数学模型,给出了 T 型导轨翘曲矫正的载荷-行程规律,为 T 型导轨翘曲矫正提供了理论支撑。为验证理论模型的正确性及模型在计算矫正行程时的精度,设计了 T 型导轨翘曲矫正实验,基于实验得到 T 型导轨翘曲矫正的载荷-行程规律,将模型和实验所得的载荷-行程曲线进行对比,发现理论模型与实验所得的载荷-行程曲线的趋势完全一致,且利用理论模型计算出来的矫正一定翘曲挠度的矫正行程与实验所得的矫正行程非常吻合,最大相对误差小于 10%,验证了理论模型的可行性。应用本文的理论模型,可根据工件初始挠度直接计算出精确的矫正行程,可为 T 型导轨全自动压力矫正机的研制提供参考。

### 参 考 文 献

- Li J, Xiong G. Study on calculation method of press straightening stroke based on straightening process model[J]. Key Engineering Materials, 2007, 340 ~ 341(2): 1 345 ~ 1 350.
- Abenhaim A. Shaft straightness and concentricity in process correction[D]. Montreal: Ecole Polytechnique, 2006:1 ~ 42.
- Zhai Hua. Research on straightening technology CAM system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(2): 175 ~ 178.
- 徐曼琼, 蒯书田, 汪北平, 等. 电梯导轨反弯矫直弹塑性变形分析[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(8): 1 010 ~ 1 013. Xu Manqiong, Lin Shutian, Wang Beiping, et al. Elastic-plastic deformation analysis of guide rail of elevator in straightening its bends[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(8): 1 010 ~ 1 013. (in Chinese)
- 钦明浩, 柯尊忠, 张向军, 等. 精密矫直机中轴类零件矫直工艺理论研究[J]. 机械工程学报, 1997, 33(2): 48 ~ 53. Qin Minghao, Ke Zunzhong, Zhang Xiangjun, et al. Study on straightening technical theory of shaft kind in exact straightening press[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(2): 48 ~ 53. (in Chinese)

## 4 结论

(1) 与全膜润滑相比, 乏油条件下有限长滚子副的润滑性能更差。

(2) 表面粗糙度会引起油膜厚度及压力的波

动, 从而在滚子接触副中产生局部压力及膜厚的变化, 对润滑不利。

(3) 在一定的供油条件下, 滚子副表面粗糙度的幅值越小, 波长越大, 对润滑的危害越小。

## 参 考 文 献

- 1 Mostofi A, Gohar R. Elastohydrodynamic lubrication of finite line contacts[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1983, 105(4): 598 ~ 604.
- 2 Park T J, Kim K W. Elastohydrodynamic lubrication of a finite line contact[J]. Wear, 1998, 223(1~2): 102 ~ 109.
- 3 Liu X, Yang P. Analysis of the thermal elastohydrodynamic lubrication of a finite line contact[J]. Tribology International, 2002, 35(3): 137 ~ 144.
- 4 Elrod H G. A cavitation algorithm[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1981, 103(3): 350 ~ 354.
- 5 Roelands C J A. Correlation aspects of viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils [D]. Delft: Delft University of Technology, 1966.
- 6 Dowson D, Higginson G R. Elastohydrodynamic lubrication[M]. New York: Pergamon Press, 1977.
- 7 Venner C H. Multilevel solution of the EHL line and point contact problems[D]. Enschede: University of Twente, 1991.
- 8 Yin C, Yang P, Tan H, et al. Thermal elastohydrodynamic lubrication of starved elliptical contacts [J]. Tribology International, 2009, 42(6): 964 ~ 974.

(上接第 197 页)

- 6 Kim S, Chung S. Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes [J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 139 ~ 156.
- 7 Lu H, Zhang X, Leopold J, et al. Straightening model and prediction of straightening stroke of precision linear guide rail [C] // Proceedings of the 1st International Conference on Intelligent Robotics and Applications, ICIRA 2008. Wuhan: Springer Verlag, 2008: 321 ~ 328.
- 8 弓海霞, 闫通海, 王进礼. 钻具校直的理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(3): 116 ~ 119.  
Gong Haixia, Yan Tonghai, Wang Jinli. Straightening of drill pipe[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(3): 116 ~ 119. (in Chinese)
- 9 Li J, Zou H, Xiong G. Establishment and application of load-deflection model of press straightening[J]. Key Engineering Materials, 2004, 274 ~ 276(1): 475 ~ 480.
- 10 Katoh T, Urata E. Measurement and control of a straightening process for seamless pipes[J]. ASME Journal of Engineering for Industry-transactions, 1993, 115(3): 347 ~ 351.
- 11 Wu B J, Chan L C, Lee T C, et al. A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1~3): 202 ~ 206.