

# 高速磁浮线路系统公差预制检测体系

程庆术<sup>1</sup>,袁建军<sup>2</sup>

(1.上海市政工程设计研究总院,上海市 200092;2.上海迈创科技有限公司,上海市 201204)

**摘要:**该文简要叙述高速磁浮线路复合梁技术的加工特点以及车间检测系统公差构成体系,同时分析了系统公差的检测布置点,提出了系统公差的分析方法。

**关键词:**复合轨道梁;系统公差;预制检测体系;定子面;侧向导向面;滑行面;公差检测分析

**中图分类号:**U237 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0171-03

## 0 引言

高速磁浮列车系统的线路是线路、结构、轨道、路基合成一体。由于磁浮列车系统车辆与轨道之间的无接触、无磨损的支承和导向,无接触的牵引和制动特性,线路设计参数要考虑轨道梁的制作工艺和可能达到的制造精度。要满足轨道梁制作和安装要求,线路设计的要素不再是传统交通设计的方式,而是体现为空间曲线。线路的精度是通过轨道梁体现的。

上海磁悬浮快速列车工程大部分线路采用复合轨道梁(简称复合梁),复合梁主体由钢筋混凝土梁体、连接件、功能件和定子组成(见图1)。磁悬浮复合梁对钢筋混凝土梁体的收缩徐变变形的要求极高,整根复合梁在加工上是采用总公差控制,根据加工工艺的实际把总公差分解为单体公差,同时以工艺决定各单体所分配到的公差,加工工艺高的所得到的公差较少。

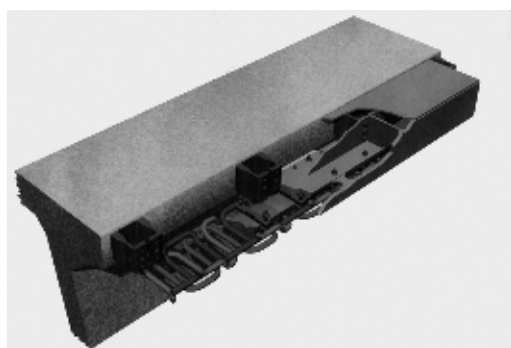


图1 复合梁构造示意图

复合梁是通过连接件与功能件、定子相连,且连接件需进行机加工,在定子、连接件安装时须按照一定的安装程序,最后在轨道梁出厂时,须对轨道梁进行公差测量。同时在轨道梁上主线时须进行精调。总之,复合梁的公差控制是复合梁加工过

程中最重要的一步,也是轨道梁验收的标准之一。

## 1 系统公差预制检测体系

高速磁浮线路系统复合轨道梁系统公差预制检测体现的测量内容包括:定子面的长波、短波、NGK、偏转公差,侧向导向面的长波、短波、NGK、偏转公差,滑行面的长波、NGK、偏转公差。

### 1.1 定子面公差

#### (1)长波公差

在一跨范围内,通过对离散的轨道梁测点值进行内插计算,得到的实际预拱与理论预拱之间的距离(差值)。

单跨梁:

$$\Delta Z_{i,\max} = \pm Z_{i,\text{理}} / Z_{\max}$$

$$Z_i = Z_{\max} \times \frac{384}{120} \times \left\{ \frac{x_i}{L} - \frac{2x_i^3}{L^3} + \frac{x_i^4}{L^4} \right\}$$

双跨梁:

$$\begin{cases} \Delta Z_{i,\max} = \pm Z_{i,\text{理}} / Z_{\max} & (x_i \leq 0.421L_i) \\ Z_{i,\max} = \pm 1 \text{ mm} & (x_i > 0.421L_i) \end{cases}$$

$$Z_i = Z_{\max} \times \frac{185}{48} \times \left\{ \frac{x_i}{L} - \frac{3x_i^3}{L^3} + \frac{2x_i^4}{L^4} \right\}$$

#### (2)短波公差

短波公差是离散的实测点到由实测点拟合的长波公差曲线的距离。

容许短波误差:  $\pm 1 \text{ mm}$

#### (3)坡度变化标准(NGK)

梁跨内:

$$\text{NGK} \leq 1.5 \text{ mm/1 000 mm}$$

梁端(在梁端各1 m范围内):

$$|N_y| \leq 0.75 \text{ mm/1 000 mm}$$

#### (4)偏转公差

此公差反映定子底面不平行的程度。

实测横坡相对于理论横坡的容许偏差:

$$\Delta \alpha = \pm \arctan(2 \text{ mm/1 100 mm}) (0.103^\circ)$$

实测横坡相对于设计横坡的容许偏差:

$$\Delta \alpha = \pm \arctan(0.2 \text{ mm/92.50 mm}) (0.124^\circ)$$

收稿日期:2006-07-20

作者简介:程庆术(1976-),男,福建福州人,工程师,从事道路工程和磁浮系统工程。

## 1.2 侧向导向面公差

### (1) 长波公差

实测位置拟合相对于理论位置的长波偏差。

单跨梁:

$$y_i = \Delta y_{\max} \times \frac{384}{120} \times \left\{ \frac{x_i}{L} - \frac{2x_i^3}{L^3} + \frac{x_i^4}{L^4} \right\} \quad (\text{mm})$$

$$\Delta y_{\max} = (2.5/30\ 960) \cdot L \quad (\text{mm})$$

双跨梁:

$$\begin{cases} y_i = \Delta y_{\max} \times \frac{185}{48} \times \left\{ \frac{x_i}{L_i} - \frac{2x_i^3}{L_i^3} + \frac{x_i^4}{L_i^4} \right\} \quad (\text{mm}) \quad (x_i \leq 0.421L_i) \\ y_i = \Delta y_{\max} \quad (x_i > 0.421L_i) \end{cases}$$

$$\Delta y_{\max} = (2.5/30\ 960) \cdot L_i \quad (\text{mm})$$

### (2) 短波公差

容许短波误差:  $\pm 2\text{ mm}$

### (3) 坡度变化标准(NGK)

实测位置相对于理论位置的坡度变化标准 NGK。

梁跨内:

$$\text{NGK} \leq 2.0\text{ mm}/1\ 000\text{ mm}$$

梁端(在梁端 1 m 范围内):

$$|N_y| \leq 1.0\text{ mm}/1\ 000\text{ mm}$$

### (4) 容许偏转

梁跨内:

$$\Delta \alpha = \pm \arctan(0.7\text{ mm}/155\text{ mm})$$

梁端:

$$\Delta \alpha = \pm \arctan(0.5\text{ mm}/155\text{ mm})$$

## 1.3 滑行面公差

### (1) 长波公差

$$Z_{\text{容}} = Z_{\text{拟合}} - 3/5\text{ mm}$$

### (2) 坡度变化标准(NGK)

梁跨内:

$$\text{NGK} \leq 3.0\text{ mm}/1\ 000\text{ mm}$$

梁端(在梁端 1 m 范围内):

$$|N_z| \leq 1.5\text{ mm}/1\ 000\text{ mm}$$

### (3) 容许偏转

滑行轨在 z 方向的容许偏转(相对于滑行轨面的轴线):

$$\Delta \alpha_{\text{CLE}} = \pm \arctan(0.5\text{ mm}/75\text{ mm})$$

## 2 公差检测分析

### 2.1 测点布置

根据复合梁的特点,在轨道梁功能件和定子面上分别布置测点,布置测点的原则是使实际测得的轨道梁系统公差值可与在线路设计中理论位置的坐标进行同点转换,建立同一的测量和计算坐标系,并可进行系统公差分析计算。测点布置剖

面示意图,如图 2 所示。

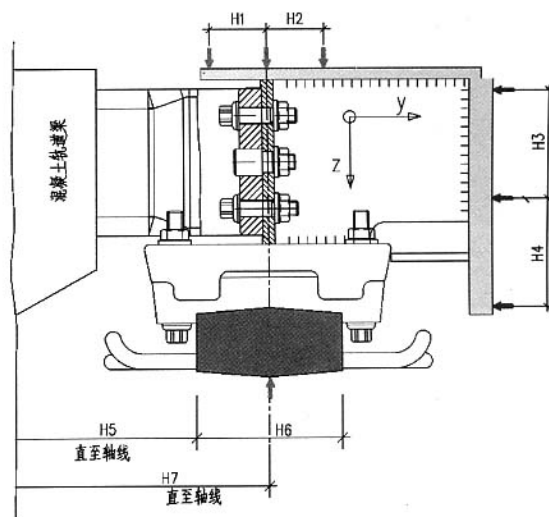


图 2 测点布置剖面图

轨道梁功能件滑行面和侧向导向面测点三维示意图,如图 3 所示。

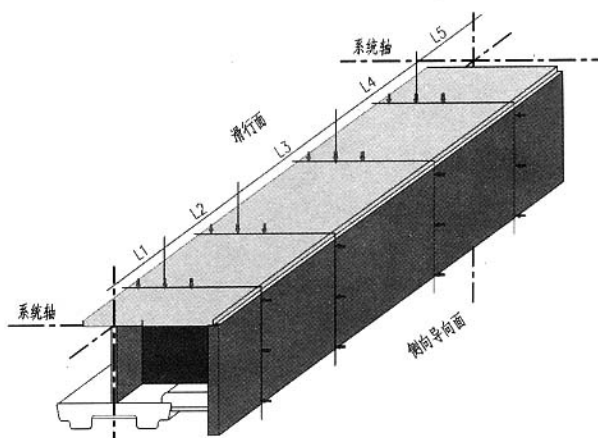


图 3 测点布置三维图

### 2.2 获取数据

系统公差检测的数据分为理论数据和测量数据,理论数据是进行误差分析的基础,实测数据为在加工车间进行同步实测的数据。在采集数据过程中,需建立统一的轨道梁标识平台,如轨道梁的梁号、梁长类型、轨道梁系统长度、直曲梁信息等。

#### (1) 理论数据

根据线路的理论空间曲线计算各测点位置在大地坐标系中的坐标点数据。计算的理论数据在一个轨道梁上断面为 14 个点,以 24 m 梁为例要计算 32 个断面。

#### (2) 实测数据

轨道梁系统公差的测量和计算是须合理地布置测点,建立合理的坐标系,在此基础上完成理论位置与实际位置系统公差的比较。

在建立同一的测量和计算坐标系基础上,在

加工车间采用 API 对所有的测点进行逐点的测量,并记录生成一定的数据格式提供公差分析。

### 2.3 公差分析

#### (1) 坐标系转换

各测点的理论数据是各测点在大地坐标系中的坐标,而实测点坐标是在测量仪器(API)坐标系下的坐标点。为了使测量值能与计算的理论值进行比较,须将两者转换到同一坐标系下,即计算坐标系。

坐标系变换遵从直角坐标系变换公式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & X_0^* \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & Y_0^* \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & Z_0^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ 1 \end{bmatrix}$$

$\text{Rot}[X, Y, Z]$ 代表计算坐标系,  $\text{Rot}[X^*, Y^*, Z^*]$ 代表原坐标系(大地坐标系或仪器坐标系),  $\text{Rot}[X_0^*, Y_0^*, Z_0^*]$ 为计算坐标系原点在原坐标系中的坐标,  $A$ 称为变换矩阵。

测量仪器 API 的是球形探测头,在测量平面上某点的坐标时,沿垂方向的测量精度容易保证,而另两个坐标则难以保证精度。根据测量仪器特性以及测量误差要求,将在两个坐标系统中计算

轨道梁公差。

#### (2) 数据拟合分析

实际测量所得到的坐标包含测量误差,为得出梁的实际轮廓,需要对测量数据进行拟合处理,即用平滑曲线逼近测量点。

公差系统分析采用多项式最小二乘拟合方法进行测量数据的拟合。即用一定阶数( $<5$ )的多项式曲线逼近测量数据。

在数据预处理和数据拟合的基础上,按照公差体系要求进行误差分析和计算。

### 3 总结

高速磁浮线路由于测点数量多,所以以上公差测量涉及的分析计算工作量很大,必须采用专用的软件,对各测点数据进行分析计算,并与理论值进行比较后得出相应误差值,并按规定的格式生成测量结果报告。

在上海线复合轨道梁加工检测中,建立了以上公差检测体系,并完成专业软件的测试和使用,且大大提高了轨道梁成品检测速度,同时也为系统公差的加工检测提供必要的依据,为轨道梁的安装调试提供参考。

(上接 170 页)应用平面杆系理论计算的结果如表 3:

表 3 平面杆系理论计算的内力及位移(公式(11)、(12)计算刚度)

加载情况	自重			加载 500 kN		
梁位	1/2 L	1/4 L	1/8 L	1/2 L	1/4 L	1/8 L
M(kN·m)	545.67	440.99	-145.96	3981.49	-514.43	-1178.2
Q(kN)	0	-16.58	10.3	0	41.98	-47.24
N(kN)	2336.19	2459.62	2708.81	2900.18	3069.69	3318.59
f(mm)	13.31	7.84	4.52	29.73	8.81	4.83

以上结果中,采用空间结构理论计算的弯矩  $M$ 、剪力  $Q$  和压力  $N$ ,相比较采用平面杆系理论计算的结果都要小,说明用平面杆系理论计算钢管混凝土桁架拱拱肋的内力相对比较保守。空间结构理论计算的挠度与平面杆系理论(公式(11)(12)计算刚度)计算的挠度很相近,而比采用平面杆系理论(换算截面法计算刚度)计算的挠度要大,说明用平面杆系理论(换算截面法计算的刚度)计算的挠度安全度不够。而两种平面杆系理论计算的内力又相对比较接近。从以上的分析可以看出,采用平面杆系理论用公式(11)、(12)计算刚度比用换算截面法计算刚度要优越。

### 6 结论

该文主要有以下结论:

(1) 四肢格构桁式截面钢管混凝土拱肋抗弯刚度的影响因素有:腹杆间距、上下弦杆水平间距、上下弦杆垂直间距、上下弦杆外径、直斜腹杆外径、平联杆外径等。

(2) 推导出了计算四肢格构桁式截面钢管混凝土拱肋抗弯刚度的计算公式,并说明了其适用条件。

(3) 通过实例验证了该公式的优越性。

#### 参考文献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 人民交通出版社, 1999
- [2] 贺拴海. 桥梁结构理论与计算方法[M]. 人民交通出版社, 2003
- [3] 邓建中, 刘之行. 计算方法[M]. 西安交通大学出版社, 2001
- [4] 许士杰, 王元丰. 钢管混凝土肋拱桥拱肋截面几何特性计算探讨[J]. 力学与实践, 1999