

上海 65 m 口径射电望远镜方位轨道力学分析

凌权宝¹, 刘维明², 付丽¹, 刘国玺²

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国电子科技集团第 54 研究所, 石家庄 050081)

摘要: 对上海 65 m 口径射电望远镜方位轨道进行了静态力学分析。用温克尔弹性地基梁模型对轨道承载弯矩及地基受力作了估算, 用赫兹接触理论对滚轮与轨道接触面的接触应力作了分析计算, 为合理选择轨道材料和制定轨道焊接工艺方案提供了设计理论依据。

关键词: 射电望远镜方位轨道; 轨道力学分析; 地基梁; 轨道焊接

中图分类号: TU13

1 引言

上海 65 m 口径射电望远镜是一架多频段、全方位可转动的方位 - 俯仰型轮轨座架式望远镜。望远镜工作频段最高可达 Q 波段, 指向精度最好为 $3''$ 。方位轨道直径 42 m, 整个轨道的不平度要求不大于 0.5 mm, 望远镜设计总重量约为 2640 吨, 方位座架共有 6 组 12 个滚轮支撑, 座架设计使得每个滚轮承受的载荷均匀分布。

大型射电望远镜因为其重量巨大, 所以对方位轨道不仅要求有足够的强度能支撑巨大载荷, 而且要求有很高的表面不平度。轨道斜面或直面拼接的方法一直被广泛应用于方位轨道的连接。然而, 在滚轮越过轨道接缝时, 在 2 段轨道接缝之间会形成高低差台阶, 产生附加的冲击动力, 在轨道接缝边缘产生很高的接触应力, 这不仅使接缝处的钢轨材料容易损坏, 还会降低望远镜在轨道上运行的平顺性, 影响到望远镜的指向精度^[1]。近年来, 国外有些大型射电望远镜相继采用了无缝焊接轨道工艺来克服这个缺点^[2], 由于轨道的轮载很大, 必须首先对轨道的承载情况进行力学分析, 以选择合理的轨道材料和制定可行的焊接工艺方案。

2 轨道结构和焊缝设计

望远镜方位轨道采用的焊接方式是在轨道上部开深为轨道高度三分之一的“U”形坡口, 实行部分截面熔接焊, 而在轨道底部用拼接底板角焊连接, 这样既可以提供无缝的轨道表面, 又可以保持轨道抗弯曲和剪切的整体特性。这种方法不但可以满足轨道强度和表面精度的要求, 而且在轨道焊接和安装的复杂程度上比全截面焊接的方法要低得多。

轨道焊接接头处的安装结构见图 1, 其主要的技术参数如下:

收稿日期: 2011-06-27; 修回日期: 2011-07-29

资助项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (08DZ1160100); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJCX-YW-18)

- 材料：高强度合金钢。
- 轨道截面宽 580 mm，高 240 mm。
- 连接两侧轨道表面的 U 形槽坡口深 80 mm。
- 连接两段轨道底部的拼接钢板长 0.8 m，宽 0.8 m，高 70 mm。
- 轨道段底部与拼接板用约 20 mm 宽的角焊焊接。
- 轨道段用预埋螺栓固定，轨道安装位置的高低可以用螺母进行上下调节后固定。

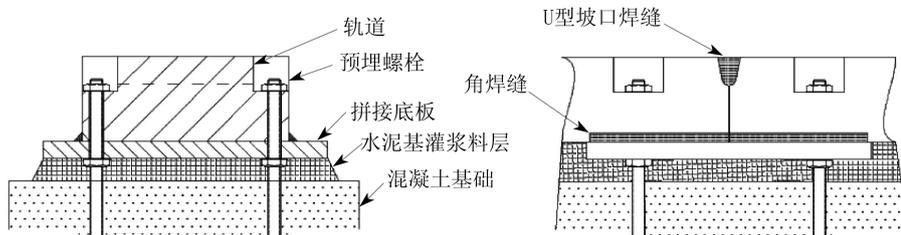


图 1 轨道结构示意图

3 轨道力学分析

为了对轨道及轨道焊接部分的材料进行合理地选择，首先须对轨道进行受力分析。轨道受载的动态情况非常复杂，根据铁路轨道的使用经验，引起动态附加增值载荷的主要原因是滚轮和轨道运行得不平顺，如滚轮越过轨道拼缝台阶时的冲击载荷有时可达静载的几倍，而圆顺滚轮在平顺轨道上的动力附加值一般不会超过 20%。附加增值载荷可以用速度系数来表示，其值的表达式为 $(0.6/100)V$ ， V 为列车速度 (单位是 km/h)^[3]。另外，望远镜绕中心枢轴作圆周转动时，还会对轨道面产生一个沿轨道圆周径向朝外的横向力，其值也与转动速度有关。由于望远镜转动的速度很低，最高转动速度 ω 为 $0.5^\circ/\text{s}$ ，滚轮速度 = 轨道半径 $r \times \omega = 0.183 \text{ m/s} = 0.66 \text{ km/h}$ ，加速度 $0.25^\circ/\text{s}^2$ ，故未将望远镜的起始和停止、轮轨摩擦力等动载因素考虑在内，对轨道力学计算只考虑轨道受载的静态情况。轨道主要受力为轮载作用下的弯曲应力，温度变化引起的轨道内部温度应力，以及在轮轨接触部分产生的接触应力。对于大型射电望远镜的方位轨道而言，轮轨的接触应力计算是选择轨道材料及加工工艺的主要设计依据。

3.1 轨道弯曲应力计算

轨道弯曲应力是轨道受力弯矩在截面上产生的拉、压应力。整个圆形轨道是安装在混凝土基础的预埋螺栓上的，并在轨道底部与混凝土基础之间用水泥基灌浆料充实，因此可以将轨道受力情况看作是支撑在连续弹性基础上的无限长梁来计算。为使计算简化，有如下的几个假定条件：

- 1) 假定轨道底部为弹性基础支撑，作用于弹性基础上的压力与其引起的沉陷之间成线性比例关系。
- 2) 因滚轮作圆周运动，滚轮和轨道接触面有一定的锥度，但为计算方便，假定为垂直平面接触。

- 3) 轮载作用在轨道纵向中心对称面上。
- 4) 不考虑轨道本身重量。
- 5) 假定焊缝部分为理想焊缝, 即其机械性能与母材相同。

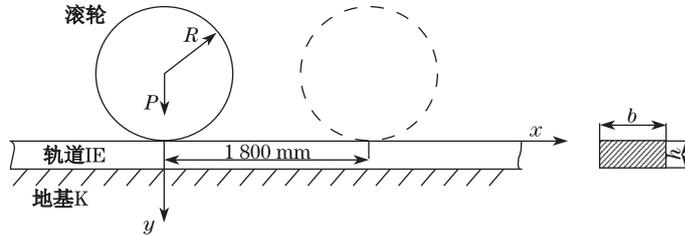


图 2 轨道计算简图

计算简图见图 2, 根据温克尔假定弹性地基梁计算方法, 轨道截面的挠度 y 、弯矩 M 、剪力 Q 和基础梁单位长度反力强度 q 分别为^[4]:

$$y = \frac{P\beta}{2k}\psi_1, \quad M = \frac{P}{4\beta}\psi_2, \quad Q = \frac{P}{2}\psi_3, \quad q = \frac{P\beta}{2}\psi_1$$

式中:

$$\psi_1 = e^{-\beta x}[\cos(\beta x) + \sin(\beta x)], \quad \psi_2 = e^{-\beta x}[\cos(\beta x) - \sin(\beta x)], \quad \psi_3 = e^{-\beta x} \cos(\beta x)$$

β — 轨道基础与轨道的刚比系数, $\beta = \sqrt[4]{k/4IE} = 0.00189 \text{ mm}^{-1}$ 。

k — 轨道基础弹性系数, $k = k_0 \times b = 12 \times 580 = 6.96 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。

k_0 是轨道混凝土基础弹性系数^[5], $1200 \text{ kg/cm}^3 = 12 \text{ N/mm}^3$, b 为轨道宽度 580 mm。

E — 轨道钢材弹性模量, $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 = 2.06 \times 10^5 \text{ MP}$ 。

I — 钢轨截面相对水平中性轴的惯性矩, $I = b \times h^3/12 = 580 \times 240^3/12 = 6.68 \times 10^8 \text{ mm}^4$ 。

h 为轨道高度, 240 mm。

P — 望远镜单轮最大载重 310 吨 (天线自重单个轮载 210 吨 + 最大风载 + 其它附加载荷) = $3.10 \times 10^6 \text{ N}$ 。

图 3 为公式中的影响曲线。可见在 $x = 0$ 时 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 的值均为 1, 此时 y 、 M 、 Q 、 q 均为最大值:

$$y_{\max} = \frac{P\beta}{2k} = 0.42 \text{ mm}$$

$$M_{\max} = \frac{P}{4\beta} = 4.1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$Q_{\max} = \frac{P}{2} = 1.55 \times 10^6 \text{ N}$$

$$q_{\max} = \frac{P\beta}{2} = 2.93 \times 10^3 \text{ N/mm}$$

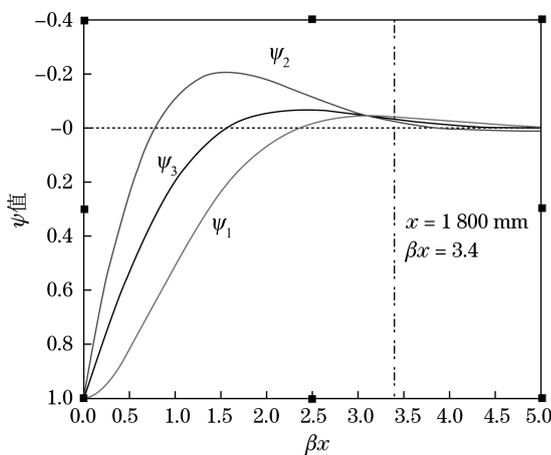


图 3 影响曲线图

以上为单个滚轮作用在轨道上的情况。在重载情况下,为了减少单个滚轮的承载,往往采用多个滚轮组合的方法。从图3中可以看出,当离开滚轮中心时,受力曲线迅速减小,当距离 x 等于1.8 m时, y 、 M 、 Q 迅速下降到很小的负值。因此只要2个滚轮相距一定的距离,彼此的轮轨作用力影响就会很小,2个滚轮之间的应力叠加值也不会超过单轮承载的峰值。

3.1.1 最大弯矩及轨道截面最大应力

当 $x=0$ 时, M 为最大,截面产生的拉压应力也为最大,上表面为最大纵向压应力,下表面为最大纵向拉应力:

$$\sigma_{\max\text{上、下}} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{4.1 \times 10^8}{5.57 \times 10^6} = 73.6 \text{ N/mm}^2 = 73.6 \text{ MPa} \quad .$$

其中, W 为轨道底部和顶部对水平中心轴的截面模量, $W = I/y = 6.68 \times 10^8 / (240/2) = 5.57 \times 10^6 \text{ mm}^3$, $y = h/2$ 是截面中心轴到顶面和底面的距离。

3.1.2 最大剪切应力

$$\sigma_{\text{剪切}} = \frac{Q_{\max}}{A} = \frac{1.55 \times 10^6}{240 \times 580} = 11.1 \text{ N/mm}^2 = 11.1 \text{ MPa} \quad ,$$

其中, A 是轨道截面积。

3.1.3 轨道最大支撑反力

根据梁单位长度最大反力 q_{\max} ,可求得基础梁上最大受压应力:

$$\sigma_{\max} = \frac{q_{\max}}{b} = \frac{2.93 \times 10^3}{580} = 5.05 \text{ N/mm}^2 = 5.05 \text{ MPa} \quad .$$

3.1.4 轨道焊接处的受力分析

在轨道段的焊缝处底部,增加了钢质底板并焊接固定,补偿了弯矩作用下焊缝处在截面模量上的不足,其计算同上述地基梁计算方法。所得纵向拉压应力和支撑反力均有减小,但因轨道焊接截面面积只有原母材的三分之一,所以最大剪应力要相应增大3倍,其值为33.3 MPa。

3.2 温度应力

由于轨道在焊接后,整体用预埋螺栓固定在地基上,因此在环境温度变化时,轨道的自由伸缩受到了约束,在轨道纵向产生了温度内应力,其值为:

$$\sigma_t = E\alpha\Delta t = 2.43\Delta t \text{ MPa} \quad .$$

式中: E 为钢轨材料弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{ MP}$, α 为钢轨材料线膨胀系数 $11.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, Δt 为轨道温度变化幅度。

根据上海地区的最高温度 60°C 、最低温度 -12°C 来计算,如取中间温度 24°C 为轨道建造时的锁定温度,则在最高和最低轨道温度条件下,钢轨将产生87.5 MPa温度压应力或拉应力。

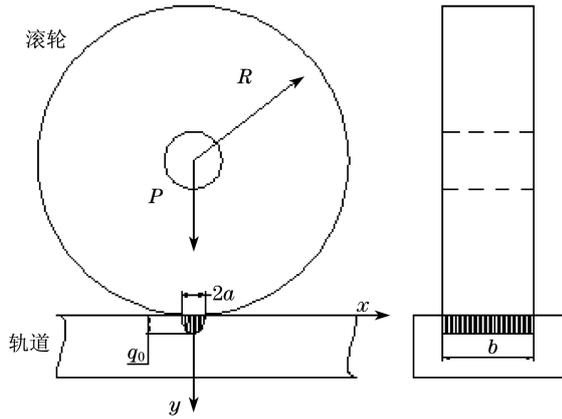


图 4 轮轨接触应力示意图

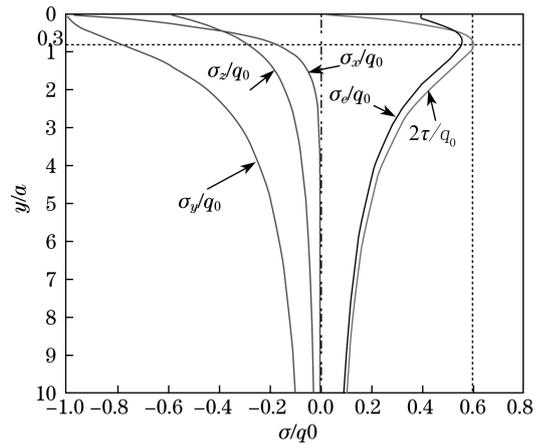


图 5 轨道内部应力图

3.3 滚轮与轨道接触应力计算

滚轮和轨道的接触可视为圆柱体在一平面上滚动的线接触, 按照经典赫兹接触应力计算方法, 其接触应力呈半椭圆柱体分布, 如图 4 所示。

最大接触应力在接触面中心^[6],

$$q_0 = \frac{2P}{\pi ab} \quad (1)$$

其中, P 为滚轮载荷, b 为滚轮和轨道接触面宽度, a 为椭圆面沿轨道纵向的半轴长度, 可用下面公式求出:

$$a = \sqrt{\frac{8P(1-\nu^2)R}{\pi Eb}} = 1.52\sqrt{\frac{PR}{Eb}} = 1.52\sqrt{\frac{3.10 \times 10^6 \times 600}{2.06 \times 10^5 \times 350}} = 7.7 \text{ mm} \quad ,$$

其中, R 为滚轮半径 0.6 m, ν 为泊松系数 (0.25~0.30), E 为轨道钢材弹性模量。

将 a 代入式 (1), 得:

$$q_0 = 0.418\sqrt{\frac{PE}{bR}} = 0.418\sqrt{\frac{3.10 \times 10^6 \times 2.06 \times 10^5}{350 \times 600}} = 729 \text{ MPa} \quad .$$

按照接触应力在轨道表面的载荷分布, 可以求出轨道接触面中心沿下方的轨道内部各项

应力, 在接触面中心沿 y 轴的应力分别为 [7]:

$$\sigma_x = -\frac{q_0}{a} [(a^2 + 2y^2)(a^2 + y^2)^{-1/2} - 2y] = -q_0 \left[\frac{1 + 2\varphi^2}{\sqrt{1 + \varphi^2}} - 2\varphi \right], \quad (2)$$

$$\sigma_y = -q_0 a (a^2 + y^2)^{-1/2} = -q_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \varphi^2}}, \quad (3)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) = -0.6q_0(\sqrt{1 + \varphi^2} - \varphi), \quad (4)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2]}, \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = -q_0 \left[\frac{\varphi^2}{\sqrt{1 + \varphi^2}} - \varphi \right]. \quad (6)$$

其中, $\varphi = y/a$, σ_e 组合应力, τ_{\max} 最大主剪应力, 应力分布曲线见图 5。

根据第三、第四强度理论, 对轨道强度影响最大的是剪应力或是组合应力 [8], 其最大当量应力发生在距表面一定深处, 分别约 $0.8a = 6.2 \text{ mm}$ 和 $0.7a = 5.4 \text{ mm}$, 其值分别是 $2\tau_{\max} = 0.6q_0 = 437 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_e = 0.557q_0 = 406 \text{ MPa}$ 。

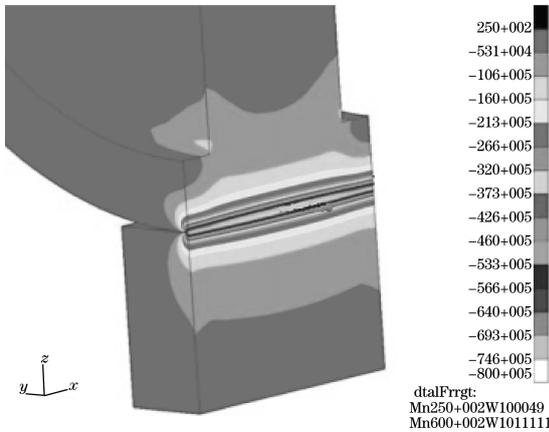


图 6 轮轨法向应力图

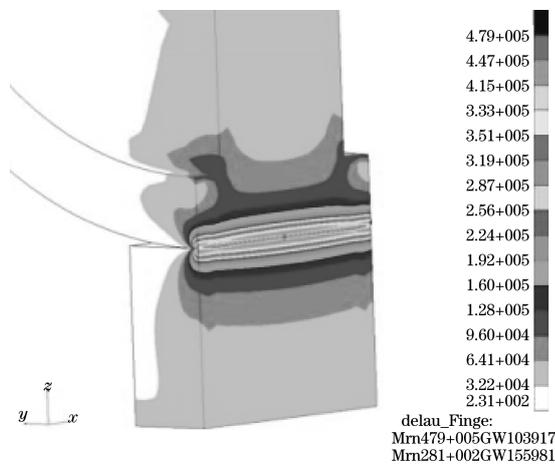


图 7 轮轨组合应力图

随着计算技术的发展, 工程上也常用有限元方法对各种复杂结构的接触应力进行分析核算。图 6、图 7 为用有限元方法对轮轨作受力分析的应力图 [9], 最大法向力为 800 MPa , 最大组合应力为 479 MPa , 与赫兹接触应力的解符合得较好。

4 结论

1) 计算得出地基梁对轨道的单位分布支撑力为 5 MPa 。对于 65 m 望远镜 C30 混凝土地基梁, 其设计抗压强度为 14.3 MPa , 满足轨道载荷的要求。

2) 由轮轨接触应力的计算得出, 其最大法向力作用在滚轮表面, 最大剪应力作用在距表面约 6 mm 的层面。对轨道表面适当的热处理, 可提高轨道表面的耐磨性能和抗疲劳强度,

轨道表面淬火的深度应大于 6 mm 深度值。

3) 根据轨道力学分析所求得的轨道材料机械性能要求, 焊缝部位材质也应具有相匹配的力学性能, 即焊缝材料应具有和母材同等深度和硬度的工艺要求。

4) 根据焊缝受力以承压为主的情况, 焊缝等级要求须在二级及以上。

5) 随着距表面的深度增加, 接触应力相应减小, 在焊缝根部深度的应力虽然不是很大, 为 $0.1q_0 = 73 \text{ MPa}$, 但由于是结构形状突变部位, 容易引起应力集中, 在焊接方案中应对此采取相应工艺措施, 减缓或避免应力集中。

参考文献:

- [1] Gawronski W et al. IPN Progress Report , February 15, 2006: 42-164
- [2] Joseph Antebi, Frank W Kan. Proceedings of SPIE Vol. 4840 (2003): 612
- [3] 童大坝. 铁路轨道. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 56
- [4] 龙驭球. 弹性地基梁的计算. 北京: 人民教育出版社, 1981: 17 19
- [5] 中国船舶工业总公司第九设计研究院. 弹性地基梁及矩形板计算. 北京: 国防工业出版社, 1983: 288
- [6] 雷腾. 中国铁道科学, 1985, 6(1): 56
- [7] 蔡武等. 工程力学, 2006, 23(9): 173
- [8] 杜庆华. 材料力学. 北京: 人民教育出版社, 1963: 192
- [9] 上海 65 米射电望远镜结构力学分析报告. 内部资料, 2010 - 0 9

Shanghai 65-m Diameter Radio Telescope Azimuth Track Mechanics Analysis

LING Quan-bao¹, LIU Wei-ming², FU li¹, LIU Guo-xi²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030; 2.No.54 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, 050081)

Abstract: This article describes the static mechanical analysis of Shanghai 65-m diameter radio telescope azimuth track. The bending moment of the track and the stress of the foundation under loading are estimated using Winkler elastic ground-beam model. The contact stress between wheel and track is calculated according to Hertz theory. Thus it can provide the design basis to select the suitable track material and to make welding procedure.

Key words: radio telescope azimuth track, track mechanics analysis, ground beam, track welding