

大跨度钢桁梁桥预拱度实现方法的应用研究

于贞波, 徐建华, 胡玉珠

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对大跨度钢桁梁桥预拱度设置参数求解问题, 在综述当前常用求解方法的基础上, 结合具体工程实例, 通过实际应用进行比较分析, 讨论了这些方法在求解大跨度钢桁梁桥预拱度设置参数问题上的优劣。研究表明: 几何(电算)法求得的预拱度设置参数较为零散, 不利于加工制造精度控制, 大跨度钢桁梁不建议直接采用; 几何(电算)法计算结果可用作非线性规划法的初值; 非线性规划法可视对几何(电算)法计算结果的规整, 规整后的计算结果可较好的适应工程实际需要; 大跨度钢桁梁桥预拱度的设置, 建议将几何(电算)法和非线性规划法结合采用。

关键词: 大跨度钢桁梁桥; 预拱度; 几何法; 非线性规划法

中图分类号: U488.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)12-0058-04

0 引言

当铁路钢桁梁桥由恒载和静活载共同作用下产生的竖向挠度大于 $1/1600$ 时, 应设置预拱度^[1]。钢桁梁桥预拱度的数值与恒载和半个静活载产生挠度基本相同, 但方向相反。钢桁梁桥预拱度的实现, 主要通过部分杆件制造时伸长或缩短, 之后现场无应力组装, 最终形成需要线型^[2,6]。如对简支三角形钢桁梁桥, 仅上弦杆伸长或缩短即可实现全桥的起拱^[2]。

钢桁梁桥预拱度的实现需要确定两个参数: 用于施加调整的杆件和杆件调整的具体数值。对大跨度复杂钢桁梁桥, 其预拱度曲线复杂, 简单的选择全部上弦杆(下承式桥)或下弦杆(上承式桥)伸长缩短可能无法完全实现需求, 且由于桥梁较长, 调整杆件数日较多, 确定各个杆件调整量的工作也较为复杂。针对大跨度钢桁梁桥预拱度的设置, 已有较多研究^[2-9], 主要方法可归为几何法和非线性规划法两类。本文在综述这些大跨度钢桁梁预拱度设置方法的基础上, 结合具体工程实例, 研究上述方法的适用性, 得到一些有益的结论。

1 大跨度钢桁梁桥预拱度实现方法

1.1 几何法

几何法即作图法, 从支座处或对称位置出发, 逐个钢桁梁节段作图, 使得上弦或下弦与给定的预拱度曲线重合。以某下承式简支钢桁梁为例(见图1), 说明几何法具体实施步骤。图1(a)中给出

了简支钢桁梁的构造和理论预拱度目标值。下承式钢桁梁一般通过调整上弦杆长度实现起拱, 这样图1(a)中虚线所示三角形将始终保持设计状态, 称为节段。作图可以从 A0 和 A8 这两个端点开始向跨中进行, 也可以 A4E4 杆件为起始位置向两侧进行, 即以能直接确定位置的点或杆件开始, 本文以端点开始。如图1(b)所示, 对节段 A0A2E1 以 A0 为原点转动, 使得 A2 点达到理论预拱度 F2。如图1(c)所示, 以此时的 A2 为原点旋转 A2A4E3, 使得 A4 达到理论预拱度 F4。另一半跨同样作图。此时, 该钢桁梁桥下弦达到所需预拱度。如图1(d)所示, 作 $\angle E1A2E3$ 的角平分线, 长度取原 A2E2 长度, 即可得到设置预拱度后 E2 的位置, 同理可得 E4 和 E6 的位置。至此, 设置预拱度的钢桁梁就完全确定, 所得上弦杆长度与原长度的差值即杆件调整的具体数值。

几何法在早期铁路小跨度钢桁梁设计中应用较多。但对大跨度钢桁梁桥, 作图过程较为繁琐, 误差容易累积, 应用受到限制。蔡禄荣^[6]、冯沛^[8]等尝试推导了几何法中杆件伸长缩短调整量与预拱度间的相互影响矩阵, 可以将作图过程转为数学计算过程, 但公式较为繁琐。

季伟强^[9]等采用在有限元模型中强制节点位移至理论预拱度位置, 直接得到上弦杆拉应力进而得到上弦杆伸长量。操作中, 施加调整杆件的刚度可取为原设计的 $1/100$ 左右。其效果与几何作图法完全一致, 可称为几何电算法, 能大大简化了几何法的求解过程。

1.2 非线性规划法

非线性规划法以杆件的调整量与桥面节点的位移量之间相互影响矩阵为基础, 运用非线性规划

收稿日期: 2019-07-16

作者简介: 于贞波(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事大跨度桥梁设计工作。

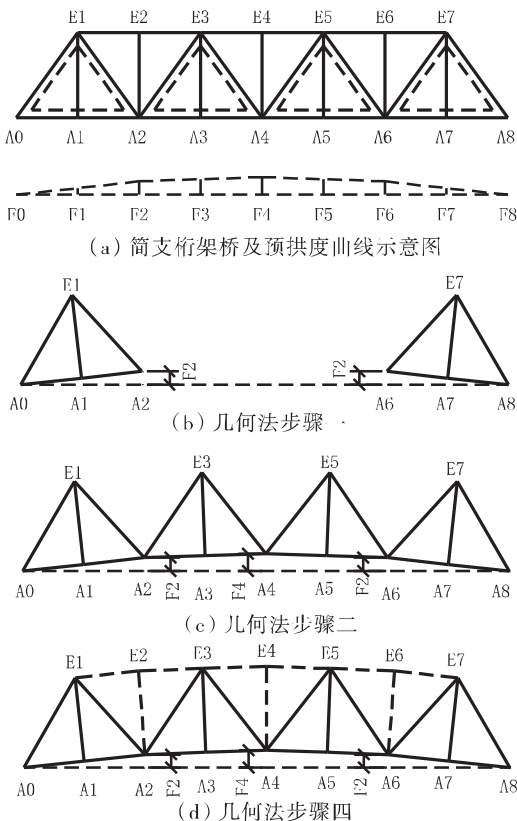


图 1 几何法的实施

方法求得杆件伸长缩短量的最优解，目标函数一般是支点反力最小^[3,4]。

目标函数： $\min R = \|T\Delta\|_2$ (1)

约束方程： $\left| \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \delta_j - f_i \right| \leq f_{\delta i}$ (2)

目标函数式(1)中： R 为支座反力向量的二范数； T 为杆件调整量对支点反力的影响矩阵； Δ 为杆件调整量向量。

约束方程式(2)中： λ_{ij} 为第 j 个杆件单位调整量引起的第 i 个桥面节点的位移； δ_j 为第 j 个杆件调整量； f_i 为第 i 个桥面节点的理论预拱度值； $f_{\delta i}$ 为第 i 个桥面节点预拱度值允许误差。

目标函数式(1)的目的是保证设置预拱度后，

相关杆件伸长缩短对结构受力影响最小，但其不够直观，可直接采用全桥杆件应力或轴向应变能最小作为目标函数，见式(3)。约束方程式(2)是为了控制预拱度设置精度，不同位置节点可根据需要单独设置。

目标函数： $\min V = \sum_{jk=1}^n \frac{F_k^2 L_k}{2E_k A_k}$ (3)

上述影响矩阵的求解，蔡禄荣^[6]、冯沛^[8]等以何法为基础进行了推导；向律楷^[7]等以热弹性有限元为基础进行了推导。这些推导过程均较为繁杂。胡步毛^[3]、曾永平^[4]等直接从杆系有限元模型入手，采用杆件升降温来模拟杆件的伸长缩短，进而可以提取得到相应的影响矩阵。这种获取影响矩阵的方法较为简单，便于工程实践。

非线性规划问题的求解可采用 Matlab 等通用计算软件进行。计算过程中可适当增加约束条件，以使得计算结果更简洁并方便实施。如增加杆件最小调整量限制，调整量很小的杆件直接取零以减少制造安装难度；或将杆件调整值设置为整数以方便制造精度控制等。

2 计算实例应用分析

以某铁路 104 m+147 m+242 m+147 m+104 m 大跨度钢桁梁桥为计算实例，分别采用上述几何法和非线性规划法进行预拱度设置计算。该桥标准桁高 15 m，在中支点处局部加高到 34 m；标准节间长度 13 m，在支点处局部加宽到 15 m。该桥为上承式钢桁梁桥，桁式方案见图 2。钢桁梁桥理论预拱度见图 3，在中跨跨中处理论预拱度值达 353.7 mm。

2.1 几何(电算)法应用分析

以全部下弦杆为施加调整的杆件，采用几何(电算)法直接求得各杆件调整量见表 1，腹杆及

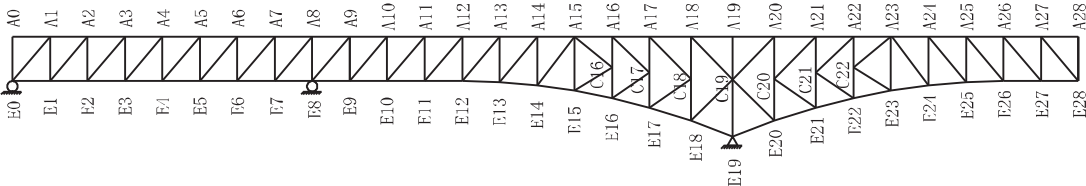


图 2 1/2 钢桁梁桥主桁杆件示意图

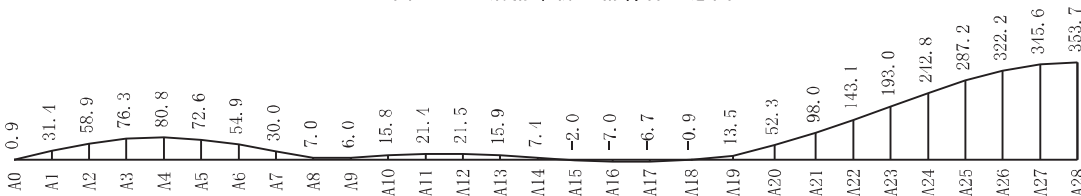


图 3 1/2 钢桁梁桥理论预拱度图

上弦杆等非调整杆件合计应变能及轴向应力大于 10 MPa 的杆件(变形量约大于 1 mm)情况见表 2。从表 1 可知,采用几何法求得的下弦杆调整量数值较为零散。从表 2 可知,对本文算例的复杂结构桥梁,直接以下弦杆作为施加调整的杆件将引起连续梁中支点和中跨跨中位置附近杆件产生较大附加力。

表 1 下弦杆长度调整值表

下弦杆编号	调整值/mm	下弦杆编号	调整值/mm
E0E1	-4.9	E14E15	5.8
E1E2	-11.7	E15E16	8.2
E2E3	-14.9	E16E17	10.4
E3E4	-14.2	E17E18	23.0
E4E5	-11.3	E18E19	21.9
E5E6	-8.0	E19E20	21.9
E6E7	3.7	E20E21	20.4
E7E8	30.1	E21E22	8.5
E8E9	5.3	E22E23	7.3
E9E10	-4.3	E23E24	-0.2
E10E11	-6.4	E24E25	-7.0
E11E12	-6.3	E25E26	-11.2
E12E13	-3.6	E26E27	-14.7
E13E14	-0.6	E27E28	-24.8

注:表 1 中负值表示缩短,正值表示伸长。

表 2 非调整杆件应力及合计应变能

	杆件编号	应力/MPa
部分非调整 杆件轴向应力	A8E8	91.9
	A18C19	89.5
	C19E19	111.3
	A20C19	90.6
	A27E28	-30.1
非调整杆件轴向应变能合计/kJ		652.8

存在较大附加力的杆件,将在施工中将产生强迫安装问题,可考虑将应力较大杆件也作为施加调整的杆件。表 3 为将部分腹杆也作为施加调整的杆件后,按几何法得到的杆件调整值表,可见下弦杆调整量基本不发生变化,部分腹杆调整量较大,最大达 13.6 mm。此时,全桥非调整杆件轴向应变能合计仅 13.0 kJ,最大轴向应力仅 9 MPa。

应该指出,几何(电算)法作为一种从理论预拱度出发,直接求解杆件调整量的方法,操作简单,目标明确,一次计算即可完成,且所得拱度值与理论预拱度完全一致。但杆件的调整值较为零散,不利于杆件工厂加工制造和精度控制。几何(电算)法一般未建立杆件调整量与预拱度的相互

表 3 下弦杆及部分腹杆长度调整值表

杆件号	调整值/mm	杆件号	调整值/mm
E0E1	-4.9	E17E18	24.8
E1E2	-11.7	E18E19	20.2
E2E3	-14.9	E19E20	20.2
E3E4	-14.2	E20E21	24.4
E4E5	-11.3	E21E22	9.3
E5E6	-8.0	E22E23	7.3
E6E7	3.7	E23E24	-0.3
E7E8	30.1	E24E25	-7.0
E8E9	5.3	E25E26	-11.2
E9E10	-4.3	E26E27	-14.7
E10E11	-6.4	E27E28	-25.2
E11E12	-6.3	A8E8	7.0
E12E13	-3.6	A18C19	7.5
E13E14	-0.6	C19E19	13.6
E14E15	5.8	A20C19	9.6
E15E16	8.3	A27E28	-5.9
E16E17	10.8		

注:表 3 中负值表示缩短,正值表示伸长。

影响矩阵,无法预测杆件调整量对预拱度的影响,要进行杆件调整量的规整较为困难。

由上述计算可知,几何(电算)法还可用于施加调整的杆件初判,即凡是按几何(电算)法计算的应力较大的杆件,均应作为施加调整杆件考虑。

2.2 非线性规划法应用分析

采用非线性规划法难点在于相互影响矩阵、施加调整杆件组和施加调整量初始向量等的确定。

杆件调整量与桥梁拱度相互影响矩阵可通过有限元模型,以杆件升降温作为荷载组,分别求得各个施加调整杆件单位升降温引起的全桥拱度变化^[3-5],进而将影响向量组合得到温度相关影响矩阵 T_1 。由于施加调整的杆件间还存在相互影响,杆件在给定升降温值条件下直接按材料热膨胀计算得到的杆件变形与杆件实际变形量之间存在差异,实际变形量为理论热膨胀量减去杆件轴向应力引起的变形。因此还应建立杆件升降温与杆件实际变形量的相互影响矩阵 T_2 。这样,施加调整杆件的实际调整量与桥梁拱度之间的相互影响矩阵可表达为式(4)。

$$T=T_1T_2^{-1} \quad (4)$$

不合理地施加调整杆件组和施加调整量初始向量很可能导致非线性规划运算不收敛。为降低非线性规划的实施难度,可以直接以几何(电算)法的计算结果作为初值。事实上,几何(电算)法的计算结果是一组成立的解,非线性规划算法可以看作是通过加入了人为控制因素即附加的约束方程等,

对这组解进行规整化,以使得杆件的调整量更易加工制造和现场安装。

当采用几何(电算)法确定了施加调整杆件组后,为简化影响矩阵 T 求解过程,也可考虑将施加调整的杆件的刚度取大 100 倍左右。这样,在一般的杆件调整量下,杆件相互影响产生的杆件伸长缩短量可以忽略。

本文算例桥梁以施加调整杆件组以外的杆件轴向应变能最小为目标函数,以上弦杆节点预拱度较理论预拱度小,但最大差值小于 8 mm 为主要约束方程,将尽可能减少施加调整杆件数量,特别是腹杆尽量不调整,并要求杆件调整量均为整数作为附加控制条件,运用非线性规划法进行了预拱度设置计算,杆件调整量计算结果见表 4,预拱度偏差见表 5。可见,经过非线性规划对杆件调整量规整后,需要施加调整的杆件数量减少了 10 根,仅为几何(电算)法的 2/3 左右;规整后,杆件调整量部分局部做到统一,均为整数,最小值为 7 mm,方便加工和精度控制;规整后杆件最大调整量仅为 25 mm;预拱度偏差均小于 8 mm。此时,全桥非调整杆件轴向应变能合计仅 0.3 kJ,最大轴向应力仅 2.1 MPa。

表 4 非线性规划法杆件调整量

杆件号	调整值/mm	杆件号	调整值/mm
E0E1	0	E17E18	25
E1E2	-13	E18E19	15
E2E3	-13	E19E20	15
E3E4	-13	E20E21	25
E4E5	-13	E21E22	25
E5E6	-13	E22E23	0
E6E7	7	E23E24	0
E7E8	25	E24E25	-7
E8E9	15	E25E26	-7
E9E10	-7	E26E27	-22
E10E11	-7	E27E28	-25
E11E12	-7	A8E8	0
E12E13	0	A18C19	0
E13E14	0	C19E19	14
E14E15	0	A20C19	12
E15E16	0	A27E28	0
E16E17	23		

由上述计算可知,几何(电算)法结果在满足预拱度设置精度要求的基础上,经过非线性规划法规整后,更贴近工程实际需求。

表 5 非线性规划法预拱度偏差 mm

节点	偏差	节点	偏差	节点	偏差
A0	-0.9	A10	-5.3	A20	-1.6
A1	-4.7	A11	-5.2	A21	-6.5
A2	-5.6	A12	-5.5	A22	-1.2
A3	-7.3	A13	-6.0	A23	-0.6
A4	-7.1	A14	-3.5	A24	0.2
A5	-5.1	A15	0.0	A25	0.9
A6	-4.6	A16	-0.9	A26	5.4
A7	-7.8	A17	-7.1	A27	3.0
A8	-7.0	A18	-5.4	A28	-5.1
A9	-7.1	A19	0.5		

4 结 论

(1)几何(电算)法求得的预拱度设置参数较为零散,不利于杆件加工制造精度控制,且可调整性差,大跨度钢桁梁不建议直接采用。

(2)几何(电算)法可用于初步判定施加调整杆件的范围和调整量的大小,作为非线性规划法计算预拱度参数的初始值。

(3)非线性规划法可视为对几何(电算)法计算结果的规整,规整后可大幅减少施加调整杆件的数日,并优化调整量为加工可控精度,且可根据特殊需要进一步通过约束方程实现目标。

(4)大跨度钢桁梁桥预拱度的设置,建议按本文思路,将几何(电算)法和非线性规划法结合采用,以提高非线性规划法的求解效率。

参考文献:

[1] TB 10091—2017,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
[2] 李韶龄.三角形钢桁梁桥的预拱方法[J].铁道标准设计,1995(9):13-14.
[3] 胡步毛,艾宗良,袁明,等.基于非线性规划实现钢桁连续梁预拱度[J].铁道工程学报,2010(4):49-52.
[4] 曾永平,陈天地,袁明,等.大跨度铁路钢桁梁斜拉桥预拱度设置[J].铁道工程学报,2010,27(10):78-81.
[5] 陈建峰,余浪,杨国静.南广铁路桂平郁江特大桥主桥钢梁预拱度设置[J].铁道建筑,2011(9):30-31.
[6] 蔡禄荣,王荣辉,王钰.大跨度柏式钢桁梁桥厂制预拱度设置研究[J].铁道学报,2013,35(4):96-101.
[7] 向律楷,鄢勇,袁明,等.钢桁梁预拱度设置方法研究[J].四川建筑,2015,35(1):150-153.
[8] 冯沛.大跨度铁路连续钢桁梁桥预拱度设置研究[J].铁道标准设计,2016,60(4):62-64.
[9] 季伟强.大跨铁路曲弦钢桁加劲连续梁预拱度设置研究[J].高速铁路技术,2018,9(2):19-23.