

基于时变可靠度理论的柔性系杆维护决策研究

李胜才^{1,2}

(1. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 511450; 2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 针对我国在役系杆拱桥柔性系杆维护时机决策的量化难题, 基于时变可靠度理论构建考虑混凝土抗力衰减的时变抗力模型, 并提出改进的PNET(概率网络)法量化多构件失效相关性, 解决传统JC法(一次二阶矩法)对体系可靠度的高估问题; 同时进一步提出柔性系杆维护阈值判定方法, 以量化维护决策时机, 为同类桥梁的预防性养护提供了科学依据。

关键词: 系杆拱桥; 时变可靠度; 抗力衰减; PNET法; 维护决策

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0061-05

Study on Maintenance Decision for Flexible Tie Rods Based on Time-Variant Reliability Theory

LI Shengcai^{1,2}

(1. Guangdong Heli Traffic Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou 511450, China; 2. Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, China)

Abstract: Aiming at the quantification problem of decision-making on the maintenance timing of flexible tie rods for in-service bowstring arch bridges in China, a time-variant resistance model considering the concrete resistance degradation is constructed according to the time-variant reliability theory. And an improved PNET (probabilistic network) method is proposed to quantify the failure correlation of multiple components, resolving the overestimation of system reliability by the traditional JC method (first-order second-moment method). Furthermore, a method for determining the maintenance threshold of flexible tie rods is further proposed to quantify the timing of maintenance decisions, which provides a scientific basis for the preventive maintenance of similar bridges.

Keywords: bowstring arch bridge; time-variant reliability; resistance degradation; PNET method; maintenance decision

0 引言

系杆拱桥作为中等跨度桥梁的典型结构, 凭借其优异的力学性能和美学表现, 在我国交通基础设施中占据重要地位。统计数据显示, 截至2024年, 全国建成系杆拱桥已超过1 800座, 其中约35%建成于1990—2000年^[1]。这类桥梁通过预应力系杆平衡拱脚推力, 可降低基础工程量30%~40%^[2], 在软土地基区域展现出显著优势。然而, 在长期服役过程中, 系杆在环境腐蚀与交变应力耦合作用下, 普遍出现了钢绞线断丝率超标、PE护套开裂等典型病害^[3]。2018年长江某大桥因系杆腐蚀断裂引发桥面塌陷, 2021年东南沿海某桥因系杆失效导致吊杆应力超限(增幅达210%)等事故^[4], 暴露出当前维护体系在系

杆病害防控方面的三大局限性: 经验判据滞后, 传统以断丝率作为维护阈值的经验判据, 未能考虑结构体系可靠度的时变特性; 多因素耦合评估不足, 现有规范未充分量化锈蚀率、应力重分布与混凝土抗力衰减的协同效应; 维护时机缺乏理论支撑, 国内近10年发生的17起系杆相关事故中, 63%源于维护时机误判^[5-6]。

国际研究方面, Torres-Acosta等^[7]通过腐蚀梁试验证实, 钢筋锈蚀率每增加1%, 构件抗弯承载力衰减达2.3%~3.1%, 该结论为抗力衰减模型(见式(1))提供了试验依据。兰维勇^[8]通过有限元及试验的方法, 分析了钢绞线不同锈蚀程度对索力的影响。金聪鹤^[9]则聚焦钢筋混凝土桥梁的环境-荷载耦合作用, 引入非平稳随机过程理论, 量化了材料退化与荷载效应的时空变异性。田洪金^[5]、高欣^[6]的可靠度研究进一步揭示了吊杆损伤对体系可靠度的非线性影响, 其成果可延伸至系杆系统分析。国内工程实

收稿日期: 2025-09-03

作者简介: 李胜才(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁结构设计与理论研究。

践中,绵阳飞来石大桥项目^[10-11]考虑到混凝土构件局部切除等施工措施对结构可靠度的影响,采取相应技术措施,将施工期结构可靠度指标 β 稳定控制在4.2以上,为同类系杆更换提供了技术范式。

研究表明,混凝土徐变、刚度退化等导致的超静定体系重构,以及柔性系杆自身或关联性病害引发的系杆力损失与结构可靠度退化存在显著的非线性耦合关系。本文引入时变可靠度理论,构建考虑混凝土抗力衰减的时变抗力模型,通过PNET法(Probability Network Evaluation Technique)量化多构件失效相关性,以解决传统一次二阶矩法(JC法)对体系可靠度高估的问题;结合体系失效演化机理,揭示系杆力损失率与可靠度退化临界点的关系,提出科学的柔性系杆维护时机判定方法,量化维护决策时机。

1 结构可靠度计算方法

1.1 作用概率模型及统计参数

(1)恒荷载,属永久作用。其量值在设计基准期内随时间变化很小,可近似认定为恒定量值,采用随机变量概率模型描述(不做随机过程分析),服从正态分布^[12]。

设计基准期内的恒荷载统计参数见表1。

表1 恒荷载统计参数			
作用种类	分布类型	平均值/标准值 k_G (或 k_τ)	变异系数 δ_G (或 δ_τ)
恒荷载	正态	1.014 8	0.043 1

(2)汽车荷载,属可变作用。其量值在设计基准期内随时间变化而变化,分一般运行状态和密集运行状态。汽车荷载效应采用随机过程概率模型描述,服从正态分布^[12]。

设计基准期内的汽车荷载效应统计参数见表2。

表2 汽车荷载效应统计参数					
随机情况	汽车运行 状态	效应 种类	分布 类型	平均值/ 标准值 k_{SQ}	变异系 数 δ_{SQ}
设计基准期 最大值分布	一般	弯矩	正态	0.668 4	0.199 4
	一般	剪力	正态	0.592 5	0.200 8
设计基准期 最大值分布	密集	弯矩	正态	0.788 2	0.108 2
	密集	剪力	正态	0.709 6	0.096 4

(3)人群荷载,属可变作用。其量值在设计基准期内随时间变化而变化,采用随机过程概率模型描述,服从极值I型分布^[12]。

设计基准期内的人群荷载统计参数见表3。

表3 人群荷载统计参数				
随机情况	标准值 $L_{ki}/$ ($kN \cdot m^{-2}$)	分布类型	平均值/ 标准值 k_L	变异 系数 δ_L
设计基准期 分布	3.0	极值I型	0.684 7	0.214 6

1.2 抗力统计参数

在现行设计规范中,可靠度分析通常假设结构抗力服从对数正态分布^[12]。

钢筋混凝土构件抗力 R 的统计参数见表4。

表4 钢筋混凝土构件抗力 R 的统计参数			
构件受力状态	分布类型	平均值/ 标准值 k_R	变异 系数 δ_R
正截面受弯	对数正态分布	1.226 2	0.141 4
斜截面受剪(矩形截面)	对数正态分布	1.671 7	0.288 3
大偏心受压(短柱)	对数正态分布	1.204 2	0.144 7
小偏心受压(短柱)	对数正态分布	1.436 2	0.151 7

根据系杆拱桥结构受力特点,拱肋属于小偏心受压构件,桥墩属于偏心受压构件,相关抗力统计参数参照表4参数取值。

1.3 时变抗力衰减模型

受钢筋锈蚀等因素影响,随着时间推移,钢筋混凝土构件的抗力逐渐降低。在结构可靠度分析中,用抗力衰减模型来描述^[7,9,13-14]:

$$R(t) = r(t)R_0 \tag{1}$$

$$r(t) = 1 - 1.78\eta(t) + 1.47[\eta(t)]^2 \tag{2}$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻的结构抗力; R_0 为初始结构抗力; $r(t)$ 为衰减系数,表示抗力随时间减少的程度; $\eta(t)$ 为 t 时刻钢筋混凝土构件的锈蚀率。

1.4 可靠度计算

1.4.1 JC法计算结构可靠度

JC法是对一次二阶矩法的一种改进,它通过考虑随机变量的实际分布类型,并通过当量正态化来处理非正态变量^[12],是目前广泛应用的结构可靠度计算方法。

结构功能函数 Z 通常表示为结构抗力 R 与作用效应 S 之差,即 $Z = R - S$ 。

1.4.2 PNET法计算体系可靠度

PNET法是一种用于评估复杂结构体系可靠度的方法。它基于网络分析理论,将结构体系分解为多个基本事件(即构件或组件的失效),并假设这些事件之间是相互独立的,从而评估整个体系的可靠度^[3,15]。结构体系可靠度 P_s 的计算式为:

$$P_s = \prod_{i=1}^m P_{si} = \prod_{i=1}^m (1 - p_{fi}) \tag{3}$$

则失效概率 P_f 为:

$$p_f = 1 - p_s = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{fi}) \tag{4}$$

式中： m 为所分事件组数。

结构体系的可靠度指标计算流程见图 1。

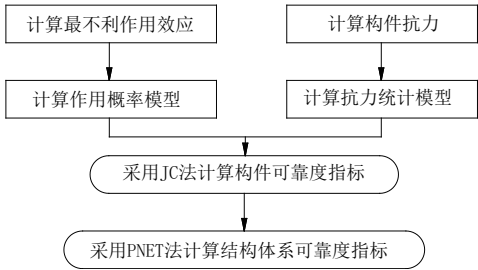


图 1 结构体系的可靠度指标计算流程

2 柔性系杆维护决策研究

2.1 依托工程概况

某大桥作为典型的下承式无风撑钢管混凝土系杆拱桥，其结构特征与受力机理具有重要研究价值。该桥位于广州市中心城区，建成于 1998 年，主桥采用 55.0 m+83.6 m+55.0 m 3 跨连续布置，桥面全宽 25 m（双向 4 车道），拱肋中心间距 18 m。

桥型布置图见图 2、图 3。

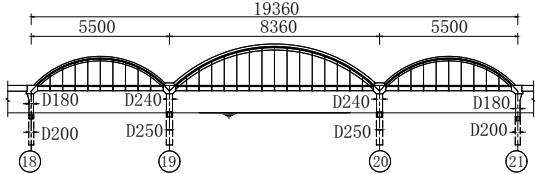


图 2 桥型布置图(立面)(单位:cm)

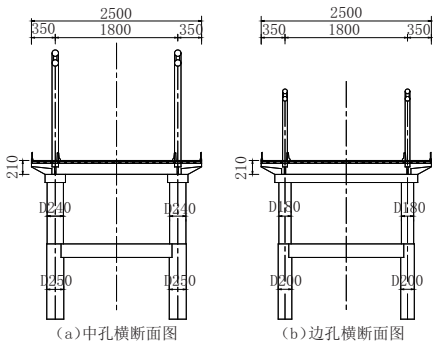


图 3 桥型布置图(横断面)(单位:cm)

该桥结构体系呈现以下技术特征：

(1)拱肋系统。采用抛物线形钢管混凝土拱肋，边跨矢跨比 1:4.5，中跨矢跨比 1:5。拱肋通过上下两层柔性系杆来平衡水平推力。上层系杆(12 根)锚固于拱肋根部钢锚箱，中孔采用 4×109φ7 钢丝，边孔为 4×55φ7 钢丝；下层系杆(32 根)锚固于墩顶横梁，中孔为 16×85φ5 钢丝，边孔为 8×85φ5 钢丝。

(2)吊杆布置。全桥共设 33 对(9+15+9)吊杆，纵向间距 5 m，采用 85φ7 镀锌高强度低松弛预应力钢

丝，其应力状态对系杆力损失敏感度较高。

(3)桥面体系。由 33 片部分预应力混凝土横梁、钢筋混凝土加劲纵梁及槽型板组成，后浇混凝土结构层实现整体化。设计荷载为汽车-超 20 级，验算荷载挂车-120，符合 1990 年代大跨度城市桥梁荷载标准。

至 2023 年该桥已服役 25 年，其结构退化特征为研究时变可靠度与系杆维护决策时机提供了理想案例。

2.2 模拟方法及研究工况

2.2.1 系杆力损失模拟

系杆力损失采用升温法模拟，即将损失力的大小换算成温度升高数值加到相应的系杆上进行计算，其表达式为：

$$t = -\frac{F}{EA\alpha} \tag{5}$$

式中： t 为等效温度； F 为系杆力损失值； E 为系杆弹性模量； A 为系杆截面面积； α 为系杆线膨胀系数。

对于超静定结构，每一系杆力变化都会引起其他系杆内力发生变化。因此，需要通过影响矩阵计算各系杆力损失的相互影响情况。

2.2.2 研究工况

考虑连拱效应，中、边跨的系杆力损失按表 5 中的 4 种研究工况考虑。

表 5 系杆力损失研究工况

工况	系杆力损失率/%	
	中拱	边拱
工况 1	0	0
工况 2	5	5
工况 3	10	10
工况 4	15	15

2.3 荷载效应及抗力计算

荷载效应采用通用有限元软件模拟分析计算，系杆、吊杆采用桁架单元模拟，其他构件采用梁单元模拟；桩土效应采用弹性约束模拟。

有限元模型见图 4。

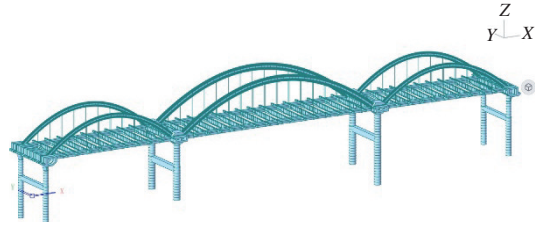


图 4 有限元模型

模型验证采用现场静载试验数据，校验系数为 0.87~0.93（置信度 95%）。

计算时选取拱肋、桥墩等关键构件的控制截面作为研究对象,系杆力损失对构件内力的影响计入

恒载。基于表5工况进行非线性分析,不同工况下关键构件荷载效应见图5。

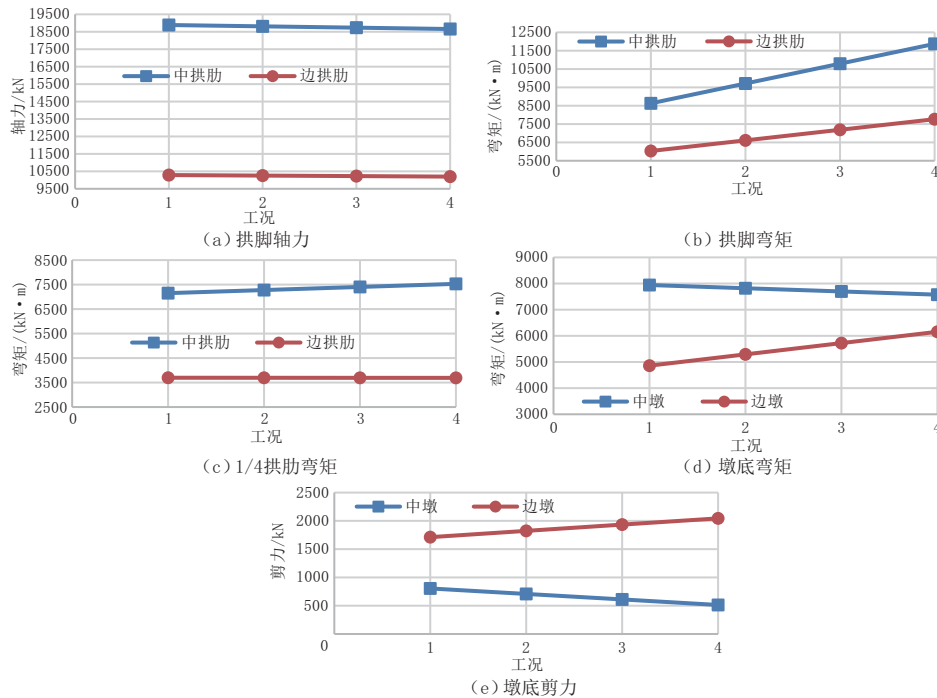


图5 不同工况下关键构件荷载效应变化

由图5可知,荷载效应体现如下特征。

(1)拱肋内力重分布。系杆力损失对拱肋轴力影响不明显,当系杆力损失率达15%时,拱肋轴力变化幅度均小于2%;系杆力损失对拱脚截面弯矩影响显著,在15%损失率时较初始状态增幅达37.6%(中拱肋),增长趋势近似线性。表明拱肋-系杆组成的超静定体系主要通过弯矩重分布来消化系杆力损失。

(2)桥墩响应差异。系杆力损失率增至15%时,边墩墩底弯矩增幅达26.7%,中墩墩底弯矩则呈现4.6%的线性递减趋势。这种响应差异源于结构体系以下三重重构效应:一是传力路径转移,系杆失效导致水平推力重新分配,边墩被迫承担更多拱肋推力;二是连拱效应激活,中墩因相邻跨变形协调产生“杠杆效应”,部分荷载向边墩转移^[2];三是刚度重分布,系杆刚度退化引发主拱-墩柱刚度比变化,形成非对称变形模式。

依据式(1)抗力衰减模型,考虑钢筋锈蚀率年均增长值,2023年构件抗力衰减系数 $r(t)=0.931$ 。关键构件控制截面抗力修正值见表6。

2.4 构件可靠度计算结果分析

基于JC法对拱肋、桥墩等关键构件的时变可靠度计算(见表7),结合荷载效应与抗力衰减模型,得出以下结论。

(1)拱肋可靠性较高。拱肋控制截面在15%系

表6 关键构件控制截面抗力修正值

截面位置	初始抗力 R_0	2023年抗力 $R(t)$	衰减率/%
中拱 1/4 截面	16 076	14 967	6.9
中拱拱脚	18 622	17 337	6.9
边墩墩底	9 839	9 160	6.9
中墩墩底	12 365	11 512	6.9

表7 关键构件时变可靠度指标(2023年)

截面位置	工况1(0% 损失率)	工况2(5% 损失率)	工况3(10% 损失率)	工况4(15% 损失率)
中拱 1/4 截面	5.53	5.40	5.17	4.98
中拱拱脚	5.70	5.55	5.30	5.09
边墩墩底	5.22	5.06	4.80	4.49
中墩墩底	5.41	5.33	5.13	4.88

杆力损失率(工况4)时,可靠度指标 β 均高于4.7,满足一级安全等级要求($\beta \geq 4.7$)。

(2)桥墩可靠度响应存在差异。边墩墩底 β 值在10%损失率(工况3)时降至4.80,接近一级安全等级限值;在15%损失率(工况4)时小于4.70,不满足一级安全等级要求,成为体系可靠度的薄弱环节,与田洪金^[5]对支撑结构敏感性的研究一致;中墩因抗力衰减和连拱效应, β 值呈现近线性递减趋势(工况4时为4.88)。

(3)抗力衰减影响明显。2023年构件抗力因钢筋锈蚀衰减6.9%,导致初始 β 值(5.9~6.3)显著下降,凸显时变分析的必要性,符合金聪鹤^[9]的非平稳随

机过程理论。

2.5 体系可靠度计算结果分析

基于 PNET 法对钢管混凝土拱桥体系可靠度的计算结果表明(见表 8),结构体系失效机制呈现显著的多构件耦合特征,主要结论如下。

表 8 体系可靠度指标变化

工况	系杆力损失率/%	β_{sys}	主导失效模式	失效概率 P_f
工况 1	0	5.13	边墩墩底受压失效	2.87×10^{-7}
工况 2	5	4.98	边墩墩底受压失效	3.16×10^{-7}
工况 3	10	4.72	边墩墩底受压+中拱 1/4 受弯	1.19×10^{-6}
工况 4	15	4.42	边墩墩底受压+中拱 1/4 受弯	4.92×10^{-6}

(1)边墩主导体系失效路径。在系杆力损失率为 10% 时(工况 3),边墩墩底可靠度指标 β 降至 4.80,低于拱肋控制截面 β 值(5.17~5.30)及中墩墩底 β 值(5.13),成为体系可靠度的首要控制因素,此时对应的体系可靠度指标 $\beta_{sys}=4.72$ 。

(2)体系失效模式发生演化。随着系杆力损失加剧,主导失效模式从单一构件(边墩受压失效)演变为多构件耦合失效(边墩受压+中拱 1/4 受弯),源于拱肋-系杆协同作用失效引发的结构体系重构效应,包括传力路径转移(拱肋承担额外荷载)、连拱效应激活、刚度重分布(主拱-墩柱刚度比变化),符合 PNET 法对相关失效事件的描述^[15]。

(3)传统 JC 法对体系可靠性评估存在高估。通过对比 JC 法与 PNET 法的计算结果发现:在系杆力损失率为 10% 工况下,JC 法计算的拱肋构件可靠度指标 β (5.17~5.30)显著高于 PNET 法所得体系可靠度指标 $\beta_{sys}=4.72$,偏差幅度达 9.5%~12.3%。这一差异源于 JC 法未考虑构件失效相关性,而实际结构中边墩与拱肋的耦合失效概率通过 PNET 法量化后,体系失效概率较 JC 法独立事件假设下的乘积结果显著增大。Torres-Acosta 等^[7]的腐蚀梁试验表明,锈蚀导致的抗力衰减会同步加剧多构件失效相关性;田洪金^[5]、高欣^[6]的研究也指出,钢管混凝土拱桥中吊杆(或系杆)损伤会通过内力重分布引发非独立失效模式。因此,PNET 法通过概率网络分析(式(3)、式(4)),能更准确地反映实际工程的体系可靠度特征。

2.6 柔性系杆维护时机判定

本文案例表明,单一构件可靠度指标 β 会显著高估结构整体安全性,若据此作为系杆维护时机判定依据可能导致维护决策滞后;体系时变可靠度指标

β_{sys} 由于综合考虑了抗力时变特性、多构件相关性和失效模式演化等因素,能更准确地反映实际工程的体系可靠度特征,据此则更具科学性。依据《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)一级安全等级要求,可用体系可靠度指标 $\beta_{sys}=4.7$ 作为维护时机阈值。

3 结 语

(1)系杆力损失会引发拱肋-墩柱体系内力重分布,随着损失加剧,主导失效模式从单一构件失效演变为多构件耦合失效。

(2)传统 JC 法因忽略构件失效相关性,存在显著高估结构整体安全性可能;而改进的 PNET 法通过概率网络量化多构件失效关联性,可反映拱肋-墩柱-系杆协同退化特征,结构体系可靠度更准确。

(3)提出以体系可靠度指标 $\beta_{sys}=4.7$ 作为柔性系杆维护时机阈值,为同类桥梁预防性养护提供量化依据。本文案例表明,当系杆力损失率超过 10% 后, β_{sys} 逼近规范限值,需启动维护程序。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2024 年全国桥梁建设统计年报[M]. 北京:人民交通出版社,2024.

[2] 李国豪,项海帆. 现代拱桥设计与施工[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2023.

[3] 崔秀鹏. 柔性系杆拱桥系杆力损失与系杆更换技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.

[4] 赵洋. 系杆拱桥吊杆更换研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[5] 田洪金. 异形钢管混凝土系杆拱桥吊杆可靠度研究[D]. 南京:东南大学,2015.

[6] 高欣. 在役钢管混凝土拱桥吊杆损伤与系统可靠性分析方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[7] TORRES-ACOSTA A. A., NAVARRO-GUTIERREZ S., TERÁN-GUILLÉN J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 1145-1152.

[8] 兰维勇. 既有斜拉桥拉索索力有限元分析及试验研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

[9] 金聪鹤. 基于非平稳随机过程的 RC 桥梁时变可靠度分析方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.

[10] 张兆强,姜山,康孝先,等. 大跨度飞燕式系杆拱桥系杆更换关键技术[J]. 施工技术,2018,47(22):96-100.

[11] 康孝先,刘路,丁洪华. 系杆拱桥系杆更换关键技术研究及施工[J]. 公路,2015,60(8):110-114.

[12] GB/T 50283—1999 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].

[13] 古李田. 超长服役期港口混凝土结构安全性分析与评估[D]. 大连:大连理工大学,2024.

[14] 金伟良,赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑,2001(5):9-11.

[15] 唐辉,崔秀鹏,高燕梅,等. 基于可靠度的柔性系杆更换研究[J]. 公路工程,2016,41(6):29-35.