

大跨度曲线人行桥舒适度评估与减振研究

杨翔骞

(中都工程设计有限公司, 四川 成都 610011)

摘要: 大跨度曲线人行桥通常结构基频较低,难以通过结构构造调整来优化基频,导致人致振动问题尤为突出。以某城市大跨度曲线钢结构人行桥为例,利用空间有限元设计软件,结合国内外人行桥舒适度评价标准,在规定的人群荷载激励下,对桥梁设置TMD(tuned mass damper)阻尼器之前与之后的峰值加速度响应结果进行对比分析,并且按照国内与国外标准不同的评价规则划分行人舒适度等级。研究表明,在一定的成本控制限制条件下,选择合适的阻尼器参数和布置位置能够大幅降低振动峰值加速度,有效改善行人舒适度,此方式对于类似大跨度曲线人行桥减振设计能够提供很好的借鉴价值,同时也验证了国内人行桥修订版规范的适用性。

关键词: 人行桥;大跨度曲线;TMD;峰值加速度;减振设计

中图分类号: U448.11;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0096-05

Research on Comfort Level Evaluation and Vibration Reduction of Long-Span Curved Footbridge

YANG Xiangqian

(Zhongdu Engineering Design Co., Ltd., Chengdu 610011, China)

Abstract: Long-span curved footbridges usually have a relatively low fundamental frequency of structure, making it difficult to optimize the fundamental frequency through structural adjustment, which leads to particularly prominent human-induced vibration problems. Taking a long-span curved steel structure footbridge in a certain city as an example, the author used spatial finite element design software and combined domestic and international footbridge comfort level evaluation standards. Under the specified crowd load excitation, the peak acceleration response results of the bridge before and after the installation of TMDs(tuned mass dampers) were compared and analyzed, and the comfort level was classified according to different domestic and international evaluation standards. Research shows that under certain cost control constraints, choosing appropriate damper parameters and layout positions can significantly reduce the peak vibration acceleration and effectively improve pedestrian comfort. This approach can provide good reference value for the vibration reduction design of similar long-span curved footbridges and also verifies the applicability of the revised domestic footbridge standards.

Keywords: footbridge; long-span curved; TMD; peak acceleration; vibration reduction design

0 引言

现代景观桥项目中,钢结构人行桥梁往往由于景观要求设计形式偏向异形且轻柔,也常因为下部条件等环境因素限制,越来越向大跨度方向发展,导致人行桥结构基频和阻尼均较小^[1],其自振频率难以满足我国人行桥规范^[2]规定的最大3 Hz要求。而在有限的投资条件下,拟通过构造优化提高自振频率满足规范是非常困难的,不仅背离了景观要求的

初衷,也会造成不必要的材料浪费。因此,在前期结构设计阶段提前介入TMD阻尼器的设置设计,可以同时解决合规性与经济性的两大难题^[3-6]。

在人行桥的共振研究领域,陈道请^[7]等介绍了关于人致振动在人行桥设计时亟需解决的难题,郭建明等^[8]结合大量的工程实例,依靠人致荷载激励作用下的设计理论方法详细阐述了大跨度人行桥使用TMD提高减振性能的可靠性研究,并获得了较好的实践验证。本文以某大跨度曲线人行天桥项目为研究对象,结合德国人行桥规范与国内人行桥规范中不同舒适度评价标准,使用MIDAS Civil空间有限元软件,建立振动分析模型,运用桥梁振动理论方

收稿日期: 2025-07-21

作者简介: 杨翔骞(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

法对模型施加一定的人群振动激励,从而得到人行桥整体结构在布置TMD前与布置后的人致振动响应结果并进行分析,为类似的大跨度钢结构,尤其是曲线半径较小的人行桥设计提供较高的参考价值。

1 桥梁结构概况

人行天桥桥梁全长 168 m,为 46 m+70 m+46 m 跨度单箱单室变截面连续钢箱梁弯桥,梁高由 1.6 m 变到 2.8 m,桥宽由 4.6 m 变到 6.845 m。下部桥墩形式为钢筋混凝土独柱花瓶式弧线墩+钢筋混凝土承台,每个承台 4 根桩基础,为钻孔灌注桩,桩端持力层落入中风化砂质泥岩。钢箱梁竖曲线和平曲线服从整体景观造型和使用性的需求。桥上装饰形式为玻璃护栏+铝板外包飘带,桥梁东侧连接有钢结构旋转楼梯,方便行人从主干路人行道直接上桥。

桥梁平曲线形式为直线+半径 $R=100\text{ m}$ 圆曲线+半径 $R=70\text{ m}$ 圆曲线。桥梁纵断面位于 $R=500\text{ m}$ 和 600 m 的竖曲线上,墩台布置方向为径向。主体结构采用 Q345C 钢材,其中标准段(跨中段)顶板厚 14 mm、底板厚 14 mm,加强段(边支点 5 m 范围内,中支点左右各 5 m 范围内)钢板局部加厚,加强段顶板厚 20 mm、底板厚 20 mm,标准段及加强段腹板厚度均为 14 mm。顶板、底板及腹板纵向加劲条肋均为 16 mm 厚、高 18 cm。实腹式横隔板与框架式横隔板为交替布置,间距均为 4 m,板厚为 14 mm。桥梁结构支座处设置加强式支点横隔板,板厚为 24 mm。

桥梁桥型布置如图 1 至图 3 所示,图 4 所示为桥梁上部结构 MIDAS Civil 计算模型。

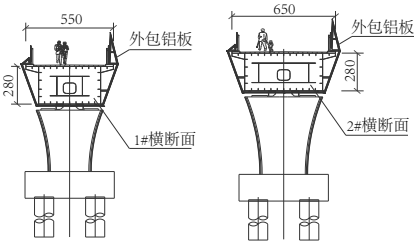


图 3 桥梁横断面图(单位:cm)

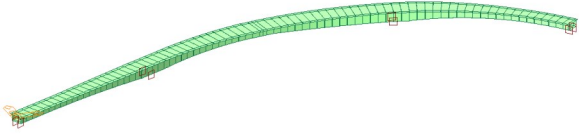


图 4 桥梁上部结构 MIDAS Civil 计算模型

三阶模态振型以及自振频率等动力特征值,该前三阶模态自振频率均小于 3 Hz,依据规范标准为需要研究的振型,根据模型数据提取得到的振型因子参数确定各阶振型特点结果。图 5 至图 7 所示为前三阶模态振型图,表 1 所示为前三阶模态振型方向因子参数表,表 2 所示为前三阶模态振型特点分析表。



图 5 第一阶振型($f_1=1.14$)



图 6 第二阶振型($f_2=2.26$)



图 7 第三阶振型($f_3=2.81$)

表 1 前三阶模态振型因子参数表

模态	TRAN-X	TRAN-Y	TRAN-Z	ROTN-X	ROTN-Y	ROTN-Z
1	1.80	0.01	12.71	84.61	0.30	0.57
2	4.09	0.08	0.78	8.86	85.46	0.73
3	0.07	0.09	90.52	9.26	0.05	0.01

表 2 前三阶模态振型特点分析表

模态	主要振型特点描述	验算分析
1	Z 向竖弯,绕 X 扭转	不处于验算范围
2	XY 平面内侧弯,绕 Y 扭转	弯桥侧弯按竖向验算考虑
3	Z 向竖弯,绕 X 扭转	处于竖向验算范围

振型参数分析时可以参考《城市人行天桥与人行地道技术规范》(征求意见稿)^[9]中规定,在验算桥梁竖向振动舒适度时,对自振频率处于 1.25 ~ 3.00 Hz 范围的所有竖向振动模态,应当分别进行验算;在验算桥梁侧向振动舒适度时,对自振频率处于 0.5 ~ 1.2 Hz 范围的所有侧向振动模态。按照本项目模态分析结果,需要验算的是第二阶和第三阶的竖向模态,其频率为 $f_2=2.26\text{ Hz}$ 、 $f_3=2.81\text{ Hz}$ 。根据振型分析,第二阶振型敏感区域即关注位移最大位置为 2/5 边跨处附近(节点号 11),1/4 中跨处附近(节点号 34),

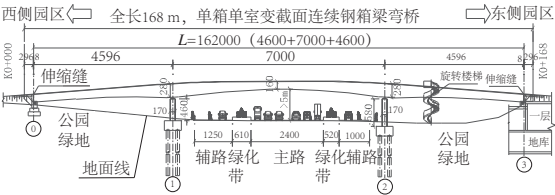


图 1 桥梁正立面图(单位:cm)

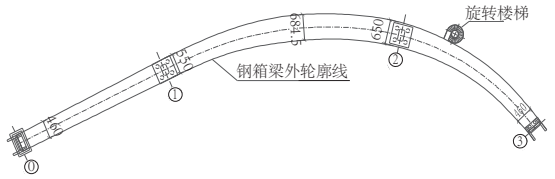


图 2 桥梁平面图(单位:cm)

2 基本计算参数

2.1 振型分析

通过 MIDAS Civil 特征值分析法计算结果得到前

第三阶振型敏感区域即关注位移最大位置为2/5边跨处附近(节点号74),中跨中附近(节点号53)。

2.2 行人荷载模型

文献研究表明,人致振动的荷载计算模式通常会使用时域模型^[10],时域模型中的确定性模型一般假定对人致荷载采用周期性假定,其周期性规律通过傅里叶级数形式来描述,因为此种模型形式具有简单的统一性,所以经常被运用在实际工程项目中,这种模式是符合工程师设计需求的。本项目所采用的时域模型源自于德国人行桥设计指南EN03(2008)^[11],其原理为通过全桥连续人流模型来计算结构最不利响应,该行人脚步荷载模型如式(1)所示:

$$p(t) = P\cos(2\pi f_s t) \times \psi \times N_p \tag{1}$$

式中: $p(t)$ 为模拟桥上行人的谐波荷载函数, P 为单个行人所产生的动荷载最大值; f_s 为行人的普遍行走步频代表值; N_p 为等效行走人数,是假设将桥上无规律自由行走的 n 个人所产生的共同效应与一起共同同步行走人数进行效应等效; ψ 为折减系数,是根据不同的行走步频在接近桥梁自振基频的不同程度,依据发生振动的概率而考虑的适当折减。

2.3 荷载取值

根据本项目所处地区的人流量分析,桥梁位于市区繁忙地段,因此人群密度取 $d=1.5$ 人/ m^2 (交通十分繁忙),计算出来桥面上步行区的总面积 $S=810\text{ m}^2$,那么相应总发生的行走人数 $n=d\times S=1\,215$ 人。

根据规范规定,当人群密度在 $d>1.0$ 人/ m^2 时,桥上行人的步频会基本趋于一致,此时人群谐波函数只有相位不一样,周期接近。依据随机概率模型分析的理论方法,可以将这种高密度条件下的等效同步行的人数计算方法按照式(2)进行简化计算^[12-13]:

$$N_p = 1.85 \sqrt{n} \tag{2}$$

因此,对于本人行桥,计算出等效的同步行人人数 $N_p=1\,215$ 人,可以理解为,相当于有1 215个行人在桥上自由无规律行走,可等效成65人相同步频行走并且计算可假设这些人产生的竖向荷载沿桥长均匀分布。其中单个人的动荷载幅值 $P=280\text{ N}$ (竖向);根据脚步荷载模型以及规范规定,第二阶($f_2=2.26$)折减系数为1.0,第三阶($f_3=2.81$)折减系数为0.29。最终得到模型中节点处的谐振函数参数,如表3所示,并将第二阶、第三阶的行人谐波函数输入模型加载,步行荷载的加载方向应根据第二阶、第三阶振型来确定,加载原则是使结构振动在最不利的方向上加

载,加载结果如图8和图9所示。

表3 节点处谐振函数模型输入参数表

模态	系数 ψ	频率 f	振幅 A/N	相位 $PA/(\text{^\circ})$
2	1.00	2.26	214	90
3	0.29	2.81	62	90

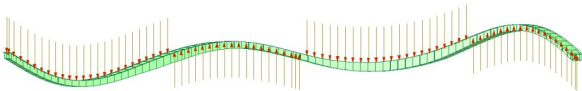


图8 第二阶振型全桥等效行人节点动力荷载加载图示



图9 第三阶振型全桥等效行人节点动力荷载加载图示

2.4 人行天桥舒适度指标

1996年我国发布了《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995),此规范在人行天桥舒适性指标方面的内容已经不完整,并且有些参数指标已经无法很好的适应当前社会人行桥建设需要,在行业标准更新之前,业内主流参考的评价指标,通常是依据德国人行桥设计指南EN03(2008)研究成果,采取行人承受的峰值加速度限值的方法规定舒适性等级。而后国内为了适应最新需求,规范组深刻总结国内外实践经验,并在广泛征求意见的基础上,修订了国内规范,提出3个等级的评价标准,分别为CL1、CL2、CL3。表4列出了德国与国内修订规范中每个等级的加速度峰值要求。

表4 人行桥峰值加速度舒适性等级(EN03与国内) 单位: m/s^2

规范	类别	舒适性	竖向加速度限值	侧向加速度限值
EN03	CL1	最佳	<0.50	<0.10
	CL2	中等	$0.50 \sim 1.00$	$0.10 \sim 0.30$
	CL3	差	$1.00 \sim 2.50$	$0.30 \sim 0.80$
	CL4	不接受	>2.50	>0.80
国内	CL1	最佳	$<0.25f^{0.78}$	<0.10
	CL2	合格	$0.25f^{0.78} \sim \min(0.5f^{0.78}, 0.7)$	$0.10 \sim 0.15f^{0.5}$
	CL3	不合格	$>\min(0.5f^{0.78}, 0.7)$	$>0.15f^{0.5}$

3 减振设计

3.1 TMD减振原理

TMD(tuned mass damper)即调频质量阻尼器,常用于各类需要减振设计的工程结构,包括建筑结构与各类桥梁。该装置的工作原理是将人行桥主体与阻尼器看作一个单自由度系统,两者在共同使用时发生相互作用,系统成为双自由度。TMD通常是由质量块、弹簧和阻尼器三部分组成,并作为一个子结构被附着在另一个主体结构上。通过对子结构进行

定制参数化设计,使得其自振特性尽量接近主结构(被控制结构)基频。当受到人群激励时,主结构发生振动,此时子结构也会随着主结构产生振动,子结构由于惯性原因会产生相反的作用于主结构,主结构振动因此受惯性力抑制,慢慢使得振动不断衰减,最终趋于稳定的状态,人行桥的振动得到有效控制。

3.2 参数化设计

一定结构刚度和质量的桥梁在理论上会存在最佳的 TMD 配置参数。通常意义上,桥梁结构上所布置的 TMD 总质量越大,那么产生的减振效果也会越好,但是实际项目还要根据使用成本和项目需求进行限制和优化,一般会调整 TMD 调谐总质量,使其大概占到桥梁总系统质量的 1%~5%^[14-15]。根据 DEN Hartog 理论^[16],因为主系统阻尼相对较小,假设忽略阻尼,在正弦函数波的激励下,此时最优频率比 α_{opt} 和最优阻尼比 ξ_{opt} 按照式(3)、式(4)确定。

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu}} \tag{3}$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \tag{4}$$

当初算确定了质量比、频率比和阻尼比之后,阻尼器的频率 f 、质量 m 、弹簧刚度 k 、阻尼系数 c 参数按照式(5)至(8)计算,其中 M 为主系统的总质量。

$$f = \alpha_{opt} \times f_s \tag{5}$$

$$m = \mu \times M \tag{6}$$

$$k = (2\pi f)^2 \times m \tag{7}$$

$$c = 2m \times \xi_{opt} \times 2\pi f \tag{8}$$

参数设计时,一般根据理论公式计算出较为合理的参数范围,再结合实际的成本与采购方案确定具体的 TMD 型号参数,将参数带入公式进行反算得到实际使用的质量比值。

3.3 TMD 布置方案

根据第二阶、第三阶振型以及设置减振前的加速度响应结果可知,这两种振型均在 2/5 边跨附近振动最明显,按照 TMD 布置位置的确定原则应尽量设置在靠近振动最大的位置,以此让减振效果达到最大化,这样一方面能同时照顾到第二阶与第三阶两个都容易发生共振的振型,另外一方面也是最好的经济性方案。因此在 2/5 边跨处位置布置 TMD,每个位置布置 4 个 TMD,全桥对称布置。故根据此原则,TMD 的布置参数如表 5 所示。

表 5 TMD 布置参数表

型号	控制方向	质量/t	弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)	阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)
TMD-1.25t	竖向	1.25	252.0	3.55

将 TMD 布置在连续梁的 2 个 2/5 边跨位置处,一组 2 个每处 2 组,全桥对称布置。具体的布置位置如图 10 所示。

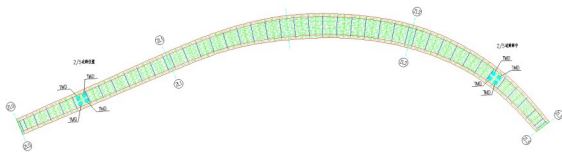


图 10 TMD 全桥布置方案图

3.4 TMD 布置前后加速度响应分析

布置 TMD 前,第二阶振型对应模型中的振幅节点为 2/5 边跨处位置(节点 11)和 1/4 中跨处位置(节点 34),对于该竖向振型,2/5 边跨处位置(节点 11)的加速度峰值为 2.97 m/s²,1/4 中跨处位置(节点 34)的加速度 1.23 m/s²。第三阶振型对应模型中的振幅节点为 2/5 边跨处位置(节点 74)和中跨跨中处位置(节点 53),对于该竖向振型,2/5 边跨处位置(节点 74)的加速度峰值为 0.64 m/s²,中跨跨中位置(节点 53)的加速度 0.39 m/s²。

布置 TMD 后,第二阶模型 2/5 边跨处位置(节点 11)的加速度在 TMD 减震后稳定在 0.66 m/s²左右,1/4 中跨处位置(节点 34)的加速度在 TMD 减震后稳定在 0.27 m/s²左右。第三阶模型 2/5 边跨处位置(节点 74)的加速度在 TMD 减震后稳定在 0.26 m/s²左右,中跨跨中处位置(节点 53)的加速度在 TMD 减震后稳定在 0.17 m/s²左右,布置 TMD 前后桥梁的第二阶 2/5 边跨处位置、1/4 中跨处位置与第三阶 2/5 边跨处位置、中跨跨中处位置加速度时程响应图结果如图 11 至图 14 所示。

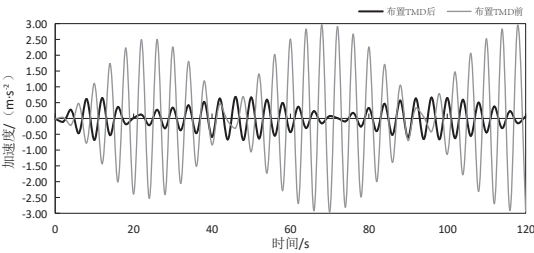


图 11 布置 TMD 前后 2/5 边跨处加速度时程图(第二阶)

3.5 舒适度评价分析

本项目在布置 TMD 后,第二阶振型和第三阶振型峰值加速度均得到了大幅降低,各工况设置前后峰值以及减振率可见表 6。按照德国标准,二阶竖向

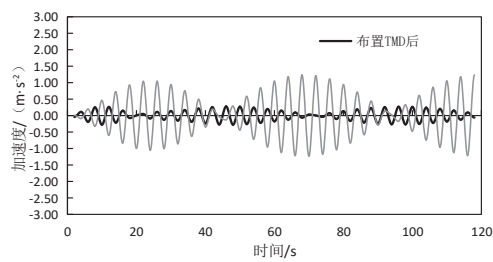


图 12 布置 TMD 前后 1/4 中跨处加速度时程图(第二阶)

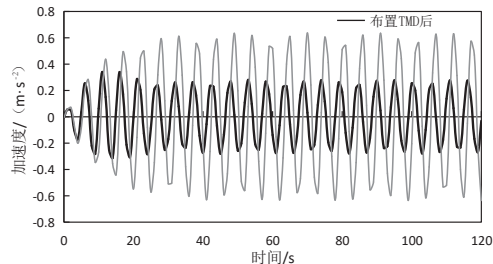


图 13 布置 TMD 前后 2/5 边跨处加速度时程图(第三阶)

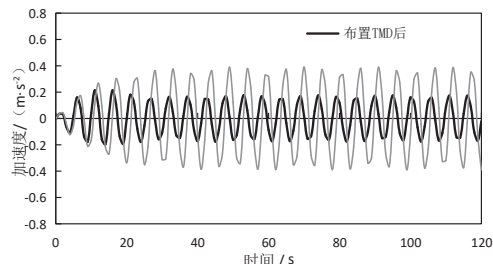


图 14 布置 TMD 前后中跨跨中处加速度时程图(第三阶)

2/5 边跨处舒适性类别由 CL4 提升至 CL2,二阶竖向 1/4 中跨处舒适性类别由 CL3 提升至 CL1,三阶竖向 2/5 边跨处舒适性类别由 CL2 提升至 CL1;按照国内标准,二阶竖向 2/5 边跨处舒适性由 CL3 提升至 CL2,二阶竖向 1/4 中跨处舒适性类别由 CL3 提升至 CL1,三阶竖向 2/5 边跨处舒适性类别由 CL2 提升至 CL1,两种评价标准下结果都能满足使用要求,而且使用的 TMD 数量也不多,总造价在一定的接受范围内,非常符合低成本高改善的经济要求。

表 6 TMD 设置前后峰值加速度表				
振型	分析位置	设置前峰值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	设置后峰值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	减振率/%
二阶 竖向	2/5 边跨	2.97	0.66	77.8
	1/4 中跨	1.23	0.27	78.0
三阶 竖向	2/5 边跨	0.64	0.26	59.4
	中跨中	0.39	0.17	56.4

4 结 语

本文以大跨度异形钢箱梁人行桥为例,介绍了人行桥舒适度的评价方法以及减振设计,得到以下结论。

(1)对比德国与国内两种规范下的舒适度评价结果,均满足要求,采用国内修订版能很好的适应大跨度曲线人行桥减振设计的需求。

(2)本工程在未设置 TMD 情况下桥梁无法满足舒适度标准,设置 TMD 后,峰值加速度相比设置前各阶振型中最大降低幅度达到 78.0%,效果显著,表明该减振措施符合经济性要求,可为类似大跨度曲线人行天桥项目的减振设计提供较好的借鉴作用。

参考文献:

[1] 胡晓锋,胡世德.调频质量阻尼器参数设计优化算法[J].同济大学学报,1999,27(2):141-144.

[2] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[3] 张慧新,邵明洁.钢结构景观人行桥振动舒适度优化设计[J].城市道桥与防洪,2024(10):115-118.

[4] 华旭刚,温青,陈政清,等.大跨度双层曲线斜拉桥人致振动减振优化与实测验证[J].振动工程学报,2016,29(5):822-830.

[5] 王均刚,马汝建,赵东,等.TMD 振动控制结构的发展及应用[J].济南大学学报(自然科学版),2006(2):172-175.

[6] 李爱群,陈鑫,张志强.大跨楼盖结构减振设计与分析[J].建筑结构学报,2010,31(6):160-170.

[7] 陈道请,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[8] 郭建民,余晓琳.结合工程实例的大跨度人行桥减振设计与研究[J].特种结构,2011,28(3):71-74.

[9] CJJ 69—201X 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[10] 马斐,张志强,李爱群,等.大跨高空连廊人群荷载下 TMD 减振控制分析[J].建筑结构,2011,41(增刊1):1399-1403.

[11] EN03—2008 Design of footbridge guideline[S].

[12] Matsumoto Y, Nishioka T, Shiojiri H. Dynamic design of footbridges[J]. International Association for Bridge and Structural Engineering, 1978, 15(12): 17-28.

[13] Bachmann H, Ammann W. Vibrations in structures: induced by man and machines[M]. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987.

[14] 陈政清.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[15] 李爱群.工程结构减振控制[M].北京:机械工业出版社,2007.

[16] DEN Hartog J P. Mechanical Vibrations[M]. 3nd edition. New York: McGraw-Hill, 1947: 125-132.