

# The Structural Design of the Steel Stair in Secondary Design

Weiming Dong, Bin Zhou, Xiaosong Ren

Division of Capital Construction, Tongji University, Shanghai  
Email: [dwm@tongji.edu.cn](mailto:dwm@tongji.edu.cn), [ebinzb@163.com](mailto:ebinzb@163.com), [rxs@tongji.edu.cn](mailto:rxs@tongji.edu.cn)

Received: Nov. 20<sup>th</sup>, 2013; revised: Dec. 15<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2014

Copyright © 2014 Weiming Dong et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Weiming Dong et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** The steel stair is widely used in engineering practice and is usually designed and installed by professional construction company after the main structure of building was completed. As a typical space system, the steel stair's analysis is quite complicated. As no special codes for design, it is usually designed as a beam structure under static load. In this paper, the static design method and dynamic design method are suggested. Firstly, the design load is discussed. The strength, the deformation and the stability should be analyzed by the space model. Secondly, the dynamic characteristic, such as the vibration frequency and the vertical peak acceleration should be restricted according to the passing condition of the stair.

**Keywords:** Secondary Design; Steel Stair; Static Analysis; Dynamic Characteristic

## 二次设计钢楼梯的结构设计

董伟明, 周 彬, 任晓崧

同济大学基建处, 上海  
Email: [dwm@tongji.edu.cn](mailto:dwm@tongji.edu.cn), [ebinzb@163.com](mailto:ebinzb@163.com), [rxs@tongji.edu.cn](mailto:rxs@tongji.edu.cn)

收稿日期: 2013 年 11 月 20 日; 修回日期: 2013 年 12 月 15 日; 录用日期: 2014 年 1 月 2 日

**摘 要:** 钢楼梯在新建工程和改建装修工程中应用广泛, 经常在主体结构完工后由专业施工单位进行二次设计和单独安装。这些钢楼梯多为轻柔的空间结构, 受力复杂, 并没有专门的设计规定, 一般多按照梁结构进行静力设计。本文对这类钢楼梯的结构设计问题进行讨论。首先, 合理确定设计荷载, 建立空间模型对钢楼梯进行分析, 校核在复合应力状态下的强度, 验算变形条件, 并进行必要的稳定性分析; 其次, 需要研究其动力特性, 根据楼梯的通行情况控制其自振频率范围和加速度响应。

**关键词:** 二次设计; 钢楼梯; 静力分析; 动力特性

### 1. 引言

楼梯是建筑中连接各个水平楼层且兼备垂直交通功能的重要建筑部件, 是建筑中的小建筑, 反映的不仅仅是各时期的建筑思想, 而且还有建造的工艺与技术。在当今社会, 随着人们生活水平的提高, 建筑作为人们活动的载体其功能空间要求复杂多变, 因而对

楼梯的建筑形态提出了更高的要求, 这对于丰富大空间部分的建筑形态很有价值。钢楼梯不仅能够像传统楼梯那样起到空间转换作用, 而且其轻盈、通透、复杂多变的形态还能够直接参与室内空间构成, 成功的设计和运用钢楼梯已经成为一种独特而有效的空间设计手法。图 1 中的两座钢楼梯均为同济大学新建教



Figure 1. Typical space steel stair  
图 1. 典型空间钢楼梯

学楼中的室内楼梯，采用的是悬挑结构形式的两跑楼梯、中柱承重的旋转楼梯，属于典型的空间钢结构，由专业施工单位进行二次设计与施工。

## 2. 静力设计方法

根据钢结构设计规范，强度、刚度、稳定性是结构设计考虑的三个主要方面，二次设计钢楼梯设计主要由专业的钢结构公司深化设计，一般简化为梁结构进行静力设计。但由于这类钢楼梯多为轻柔的空间结构，受力复杂，简单的简化处理无法满足安全性要求，需要进行更为准确和详细的空间受力分析。

某室内椭圆形旋转钢楼梯 A，属于改建工程中的后加楼梯，支承在上下楼层梁上，沿长轴方向悬挑，最大悬挑长度 5.4 m，原设计为内、外圈两道  $\Phi 245 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的钢曲梁，后改为单根钢箱梁，截面尺寸为  $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ，楼梯标准层平面示意图 2，建成后的现场情况见图 3<sup>[1]</sup>。

### 2.1. 荷载取值

在实际工程中，二次设计钢楼梯主要分为两种，一为通行楼梯，二为景观楼梯。通行楼梯即主要承担上下层沟通，人员主要通过其进行移动的，出现意外情况时可以作为主要疏散作用的楼梯。景观楼梯即主要起到外观造型作用，一般不能作为疏散作用的楼梯，可以考虑适当降低其设计荷载取值。参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)<sup>[2]</sup>，本文建议如下的计算荷载(表 1)。

### 2.2. 强度与挠度计算

二次设计的钢楼梯由于配合主体结构的外观或

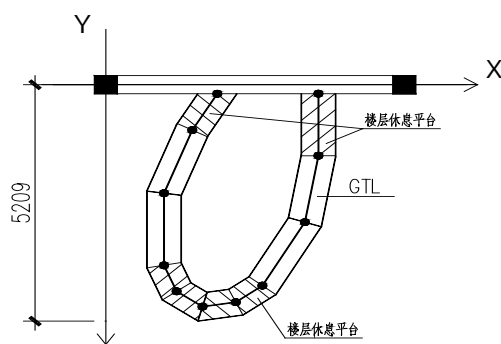


Figure 2. Plan sketch of stair A  
图 2. 楼梯 A 平面示意图

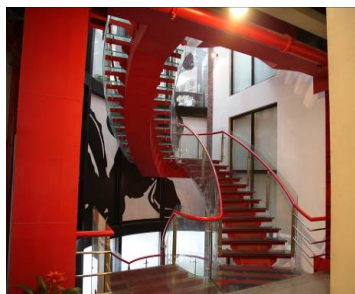
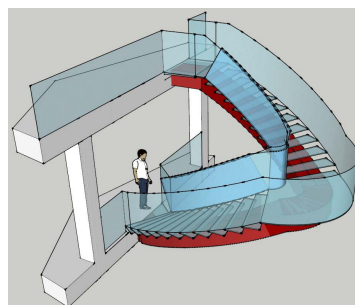


Figure 3. Three-dimensional model and photo of stair A  
图 3. 楼梯 A 空间三维模型及照片

Table 1. The uniform live load of stair  
表 1. 楼梯均布活荷载

楼梯用途	楼梯所处建筑	荷载建议取值 (kN/m <sup>2</sup> )
通行楼梯	宿舍、旅馆、医院病房、托儿所、幼儿园、住宅	不小于 2.5
	办公楼、教学楼、餐厅、医院门诊部	不小于 2.5
景观楼梯	人流可能密集时，如消防疏散等	不小于 3.5
	室内景观楼梯	不小于 2.5
	室外景观楼梯	不小于 2.0

装修要求，结构形式一般较复杂，构件均处于压(拉)、弯、剪、扭的复合受力状态，楼梯上每小段梁所受弯矩、扭矩、剪力、轴力的矢量方向随着截面的方向改变不断变化<sup>[3]</sup>，《钢结构设计规范》<sup>[4]</sup>中相应的强度、

挠度及稳定性验算公式均针对简单受力状态的构件，一般无法直接运用于该种类型的钢楼梯设计，为此必要采用有限元法对空间钢楼梯的结构进行分析，建议根据第四强度理论对其强度验算，见下式。

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为第一、二和三主应力。

钢楼梯的挠度建议采用《钢结构设计规范》中变形容许值要求进行验算，见式(2)：

$$f \leq \frac{1}{250} L \quad (2)$$

式中， $L$  为受弯构件的跨度。

对于上面所述的室内椭圆形旋转钢楼梯 A(图 2、3)，采用有限元软件建立空间有限元模型进行分析，钢箱梁采用梁单元进行模拟，共分 300 个单元。楼梯的活荷载取  $2.5 \text{ kN/m}^2$ ，荷载组合为 1.2 恒载 + 1.4 活载。通过计算发现楼梯钢箱梁的最大 Von mises 应力为  $92.6 \text{ Mpa}$ ，位置在楼梯钢箱梁与楼层梁连接处。楼梯最大变形量为  $26.7 \text{ mm}$ ，位于楼梯休息平台最外侧。可见，该楼梯是由变形控制的。

### 2.3. 稳定性计算

当某些构件在压应力作用下失稳破坏，钢楼梯就会出现结构失效。对于形态复杂的钢楼梯，因其构件为曲线导致屈曲荷载较直线构件的屈曲荷载下降很多，为此本文建议采用和梁弯扭屈曲相类似的方法计算其临界荷载，需要建立空间有限元模型，根据最不利的荷载分布进行结构的整体屈曲分析。

对于上面提到的椭圆形旋转钢楼梯 A(图 2、3)，仍采用如上的有限元分析模型进行其屈曲模态分析，第一屈曲模态为整体屈曲模态，第二至六模态为中间休息平台的局部发现屈曲模态，即由整体失稳所控制的，满足使用要求<sup>[2]</sup>。

## 3. 动力特性要求

由于钢楼梯具有结构轻柔的特点，加上阻尼较小，对动荷载的影响更为敏感，因而更容易产生振动问题。因此钢楼梯的设计注重的不仅是强度、刚度两方面，还应考虑人体工程学、振动下人的生理和心理感受等，这一部分是设计中的容易被忽略的一个关键问题<sup>[5,6]</sup>。

某宾馆大堂设置一室内椭圆形钢旋转楼梯 B，高  $8.8 \text{ m}$ ，共有 3 个休息平台，分别对应于椭圆的长、短轴上，属于二次设计的新建钢楼梯，主要受力构件为一根通长的钢箱梁，支承在上下楼层梁上，椭圆长轴达  $13.16 \text{ m}$ ，短轴为  $4.22 \text{ m}$ ，如图 4 及图 5 示意，尽管沿短轴的整体悬挑长度不大，但是第一、三个休息平台远离支承点，属于结构薄弱部位，在使用过程中振动幅度较大，导致了人员的不舒适感，单人跑动下实测竖向加速度峰值已达到  $46 \text{ gal}$ 。建立有限元模型进行分析，可以发现其强度、刚度和稳定性均可满足要求，因此有必要对其动力特性加以限制<sup>[7]</sup>。

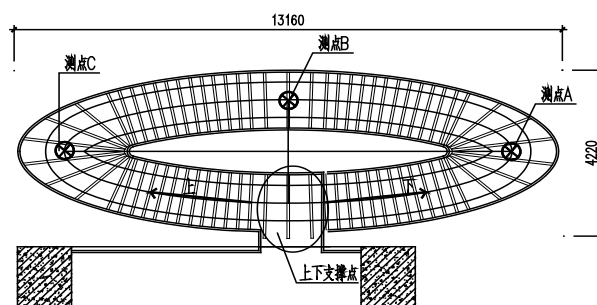


Figure 4. Plan sketch of stair B  
图 4. 楼梯 B 平面示意图

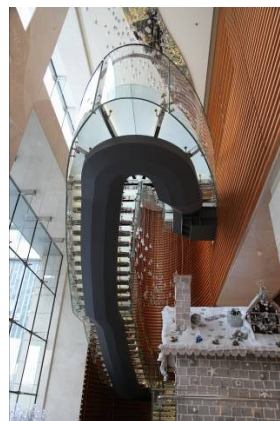
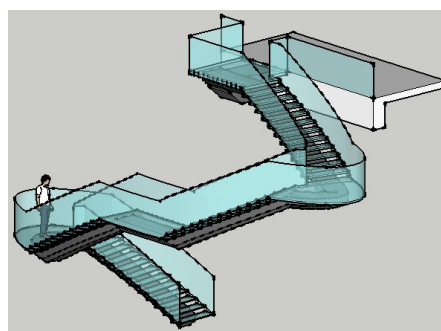


Figure 5. Three-dimensional model and photo of stair B  
图 5. 楼梯 B 三维空间模型及照片

### 3.1. 频率控制指标

鉴于尚无针对楼梯动力特性的规范或标准,通过对国内外人行天桥相关规范进行比较,发现对结构自振频率的控制并没有统一的标准,见表2。本文认为需根据空间钢楼梯根据使用功能进行划分,对结构竖向、横向或扭动的自振频率进行控制,建议如表3。

建立空间有限元模型对楼梯B的自振频率进行计算,同时对楼梯进行振动测试,可以发现该楼梯理论计算的自振频率为4.45 Hz,实测的自振频率为4.90 Hz,可满足景观楼梯要求,但不满足通行楼梯要求<sup>[8]</sup>。

### 3.2. 峰值加速度控制指标

国内外相关规范及文献对加速度峰值的控制指标汇总如表4<sup>[9-11]</sup>,其中并未给出钢楼梯的峰值加速度控制指标。考虑到楼梯部分为室内的通行区域,其峰值加速度可较公寓、旅店、办公室的要求适当降低。参考BS5400标准并考虑空间钢楼梯的特点,本文建议空间钢楼梯振动的竖向加速度峰值不得超过 $0.2\sqrt{f}$  m/s<sup>2</sup>和0.5 m/s<sup>2</sup>(50 gal), f为楼梯竖向自振频率。

根据本文提出的竖向加速度控制标准,竖向加速度峰值限值为43.8 cm/s<sup>2</sup>。而通过理论与实测可知,该楼梯多人激励下最大竖向加速度峰值的理论计算值为48.5 cm/s<sup>2</sup>,实测值为68 cm/s<sup>2</sup>,可见峰值加速度

**Table 2. Limitation of frequency of foot-bridge**  
**表 2. 相关人行天桥规范频率控制指标**

规范	控制指标
城市人行天桥与人行地道技术规范 CJJ 69-95	结构竖向自振频率不应小于 3 Hz
欧洲规范 EN1990 <sup>[12]</sup>	竖向振动频率低于 5 Hz
英国规范 BS5400	避免竖向自振频率小于 5 Hz

**Table 3. Suggested limitation of frequency of steel stair**  
**表 3. 本文建议钢楼梯频率控制指标**

种类	用途	频率限值
景观楼梯	装饰用途为主, 不作为主要行人通道, 人员行进基本为走动	竖向振动频率不应低于 3 Hz 横向或扭动频率不低于 2.5 Hz
通行楼梯	作为主要行人通道, 承担人员流动作用, 人员行进为走动和跑动	竖向振动频率不应低于 5 Hz 横向或扭动频率不低于 2.5 Hz

**Table 4. Limitation of peak acceleration**  
**表 4. 相关加速度峰值控制指标**

规范	控制指标
《高层建筑钢结构设计规程》(DG/TJ08-32-2008)	公寓小于 15 cm/s <sup>2</sup> , 旅店、办公室小于 25 cm/s <sup>2</sup>
欧洲规范 EN1990	人行桥任意位置的竖向振动加速度峰值应小于 0.7 m/s <sup>2</sup>
英国规范 BS5400	竖向加速度峰值小于 $0.2\sqrt{f}$ m/s <sup>2</sup> 和 0.7 m/s <sup>2</sup> , f 为桥面竖向自振频率(大部分情况即为其基频)
Bachmann	人行天桥竖向振动的可感界限为 10 gal, 舒适度限值 55 gal, 忍受界限为 180 gal

超过了建议的控制值,建议该旋转钢楼梯需要严格控制通行人流<sup>[8]</sup>。

## 4. 有限元分析过程

有限元分析法(FEA, Finite Element Analysis)是目前工程技术领域中实用性最强,应用最为广泛的数值模拟方法。其基本思想是用较简单的问题代替较复杂的问题后再求解。它将求解域划分为一系列单元,单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求物理量通过选定的函数关系插值求得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式,然后将各个单元方程“装配”在一起而形成总体代数方程组,加入边界条件后即可对方程组求解。常用的通用计算软件为 Ansys 及 Abaqus 等。

### 4.1. 模型建立

钢楼梯的有限元模型一般采用梁单元(Beam)或壳单元(shell),钢弹性模量取值为  $2.06 \times 10^6$  N/mm<sup>2</sup>,泊松比取为 0.2,密度取值为 7800 kg/m<sup>3</sup>,阻尼采用 Rayleigh 阻尼,结构总阻尼比可取为 2%。例如,本文中楼梯 B,采用梁单元建模,模型示意图见图 6。

### 4.2. 计算分析

楼梯的空间有限元模型建立完成后,需要进行静力及动力两部分分析。

静力加载与求解过程中可以进行多步载荷计算,即荷载步。在线性静载或稳态分析中,可以使用荷载步处理不同静载的工况组合。如在钢楼梯的静载计算过程中可以将恒载与活载定义为不同荷载步,进行工况叠加。

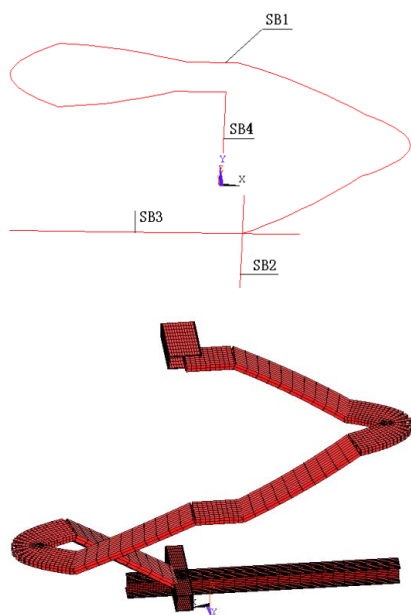


Figure 6. Finite element model of stair B  
图 6. 楼梯 B 的有限元模型图

通用有限元软件 Ansys 中<sup>[13,14]</sup>, 动力响应分析方法有: 谐响应分析、瞬态动力分析和谱分析。其中谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的荷载时的稳态响应, 分析结构的持续动力特性。瞬态动力分析用于确定结构在承受任意随时间变化荷载的动力响应, 如冲击荷载和突加荷载等。谱分析是将模态分析的结果和已知谱结合, 进而确定结构的动力响应, 如不确定荷载或时间变化的荷载(如地震、风载、波浪、喷气推力等)。由于人行荷载会不断随时间变化, 因此本文建议在动力响应分析时采用瞬态动力分析法。

## 5. 结论

二次设计的钢楼梯在实际工程中应用广泛, 为满足建筑形态要求钢楼梯多为复杂钢结构, 构件始终处

于拉/压、弯、剪、扭的复杂应力状态, 每段截面上各种内力的矢量绕旋转轴方向不断改变, 除按静力要求进行设计外, 尚需要考虑动力特性。本文建议区分楼梯的通行情况确定不同的活荷载, 建立空间有限元模型进行分析, 按照第四强度理论校核应力, 按照设计规范要求控制变形, 并进行稳定性分析; 同时, 确定合理的人行荷载进行动力分析, 需要设置自振频率、峰值加速度指标等动力特性指标的限制。

## 参考文献 (References)

- [1] 周彬, 任晓崧 (2009) 某椭圆形旋转钢楼梯的设计分析. *结构工程师*, **25**, 19-23.
- [2] GB50009-2012 (2011) 建筑结构荷载规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [3] 时旭东, 丁大益 (2003) 椭圆形旋转楼梯内力分析及计算. *清华大学学报(自然科学版)*, **43**, 845-847.
- [4] GB50017-2003 (2003) 钢结构设计规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [5] Bachmann, H., Pretlove, A. and Rainer, H. (1995) *Vibration problems in structures: Practical guidelines*. Birkhauser Verlag, Basel.
- [6] Rainer, J.H., Pernica, G. and Allen, D.E. (1998) Dynamic loading and response of footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **15**, 66-71.
- [7] 周彬, 任晓崧, 吕西林 (2012) 行人激励作用下室内旋转楼梯振动分析. *振动与冲击*, **31**, 128-132.
- [8] DG/TJ08-32-2008 (2008) 高层建筑钢结构设计规程. 建筑工业出版社, 上海.
- [9] 廖顺辉 (1995) 人行天桥的设计与施工. 同济大学出版社, 上海.
- [10] Ellis, B.R. (2000) On the response of long-span floors to walking loads generated by individuals and crowds. *The Structural Engineering*, **78**, 17-25.
- [11] Kerr, S. and Bishop, N. (2001) Human induced loading on flexible staircases. *Engineering Structures*, **23**, 37-45.
- [12] CJJ 69-95 1998 年修订 (1995) 城市人行天桥与人行地道技术规范. 建筑工业出版社, 北京.
- [13] 郝文化 (2005) ANSYS 土木工程应用实例. 中国水利水电出版社, 北京.
- [14] 尚晓江等 (2008) ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用. 中国水利水电出版社, 北京.