

# 基于状态空间法的铁路建设工程 过程质量模型研究

鲁守东<sup>1,2</sup>,周国华<sup>1</sup>,陈海峰<sup>1</sup>,赵国堂<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学经济管理学院,成都 610031; 2. 中山市广播电视大学,广东中山 528400)

**[摘要]** 在ISO9000过程“输入-输出”模型下,过程质量概念很难得到正确的阐释。从过程的“白箱”理论出发,以铁路建设工程的基本作业单元6M1E为例,给出了过程质量概念的科学涵义及过程质量模型。指出基本作业单元系统的过程包括工艺自然过程、作业过程、管理过程;基本作业单元系统的过程质量取决于3个子过程之间的相互联系和相互作用,同时还受到外界扰动输入因素的影响。最后以现浇预应力砼连续箱梁施工过程为例,阐述了该理论在铁路建设工程质量管理中的具体应用。

**[关键词]** 铁路建设工程;“白箱”模型;状态转移方程;过程质量

**[中图分类号]** F532.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)03-0064-06

## 1 前言

中国铁路总公司副总经理卢春房在石太铁路客运专线连续发生多起质量事故之后举行的全路建设工程质量电视电话会议上,进一步强调工序、工艺及过程控制在确保铁路工程质量中的重要性,并指出管理标准、技术标准、作业标准不落实的重要原因是现场的设计、施工、监理等基层管理者的责任意识不强所致<sup>[1]</sup>。

目前,国内铁路建设施工单位基本上借用了加工制造业的经验,将是否“贯标”(通过ISO9000认证)作为衡量其质量管理水平的重要指标之一。ISO9000质量管理的过程方法是基于传统的统计过程控制(SPC)理论而构建的,它比早期泰勒所提倡的通过增加专业的质检队伍来提高质量管理水平的方法要先进一步,但是在很多情况下,它还是一种事后控制。例如,ISO9000过程质量审核中用来计算过程能力和过程能力指数的 $C_p$ 和 $C_{pk}$ 就是通过半成品或成品的结果质量水平来计算的;此外,像ISO9000中的SPC同样也是拿阶段性结果质量数据

进行反馈控制,仍然具有明显的滞后性。

与一般的加工装配型或流程型工业大批量生产的特点有所不同,铁路工程建设系统的生产是单件性、一次性的,具有典型的项目型工艺流程的特点。一般的工业产品质量不良还有返修、返工的机会,而铁路建设项目的分项或分部工程一旦有瑕疵或缺陷几乎没有补救的措施。由于ISO9000中的过程方法及过程质量控制主要是基于结果质量的事后控制,而过程的在线控制、过程的前馈控制和过程质量等理论越来越受到相关研究者的关注。

## 2 过程质量理论研究的现状综述

工业过程控制按照直接目标来分,可分为过程安全控制、过程质量控制、过程产量控制、过程能耗控制、过程成本控制等,过程控制的间接目标就是对过程的特性参数,如温度、压力、速度等的控制,从而实现产量、质量、安全等直接目标。

王海宇在传统的SPC和先进过程控制(APC)理论集成的基础上,进一步研究探讨并建立了多步延迟自动反馈控制的过程质量监控模型<sup>[2]</sup>。孔金生

**[收稿日期]** 2012-10-08

**[基金项目]** 铁道部科技研究开发计划重点课题(2011G010-D);中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU12ZT12)

**[作者简介]** 鲁守东,1971年出生,男,安徽无为县人,博士研究生,研究方向为项目质量管理;E-mail: donaldlsd@163.com

等通过神经网络算法建立了由质量模型和质量控制器构成的产品生产过程中闭环的质量反馈控制及前馈控制系统,从而形成产品质量指标的在线软测量,最终实现产品生产过程中的质量控制<sup>[3]</sup>。Navid Sahebjamnia 等运用粗糙集理论对在线的过程质量参数进行模糊识别、分类和界定,结合具体的案例推算出两阶段的马尔可夫状态转移概率矩阵,该方法可以用来有效地降低过程质量控制成本<sup>[4]</sup>。Guh Ruey-Shiang 运用人工神经网络的方法对过程控制参数的均值和方差的异动进行实时同步预测,实证数据显示这种方法对过程行为能作出良好的预测和控制<sup>[5]</sup>。另外,国外文献中大量出现的“process quality management”,其本质含义是指通过对过程质量要素的控制获得良好的结果质量,它们还不算是现代意义上的过程质量概念。

《质量管理体系基础和术语》标准(ISO 9000:2005)给出质量概念的定义如下:产品、过程或体系的一组固有特性满足顾客和其他相关方要求的程度。早期的质量概念是从产品领域引出的,随着人们认识程度的加深,先后又出现了所谓的服务质量、过程质量等概念。按照ISO的定义,过程质量是指过程本身所固有的一组特性满足相关方要求的程度<sup>[6]</sup>。

陈皓琼认为衡量过程质量的3个维度是效果、效率和适应性。如果产出能够满足顾客的需要,则过程是有效的;如果能以最小的成本实现,则过程是有效率的;如果在诸多变化下,过程仍然能够保持其效果和效率,则该过程具有良好的适应性<sup>[7]</sup>。邓军等运用可拓理论,提出了产品质量与过程质量之间的映射关系和定量化度量的模型,通过某轴承企业的经验数据,验证了该模型在反映产品质量与过程特性参数关系方面具有良好的效果<sup>[8]</sup>。Sivert Sørungård 和 Guttorm Sindre 在分析软件开发过程质量的含义时指出:“过程质量不应该简单地定义成‘能生产高质量产品的过程即具有较高的过程质量’,过程质量同时还需要考虑过程的稳定性、及时性、成本等过程自身的特质因素。”文章通过确立资源质量模型、过程质量模型和产品质量模型之间的关系,从而建立起产品质量指标、资源质量指标和过程质量之间的关系<sup>[9]</sup>。

从国内外的研究文献来看,有关现代意义上的过程质量概念和理论研究并不多。绝大部分文献是运用戴明的过程质量控制理论和方法(4M1E)来

解决实践中遇到的问题。另外,还有部分文献从传统的控制工程理论的角度来研究过程参数的反馈控制和前馈控制方法。所有这些研究本质上都是基于“黑箱”模型的过程理论,而本文将从过程的“白箱”模型出发来探讨过程质量概念的本质内涵及其在建设工程质量管理中的应用。

### 3 基于“白箱”理论的过程质量模型

#### 3.1 过程的“黑箱”模型和“白箱”模型

目前理论界对过程的认识主要基于两种模型,即“黑箱”模型和“白箱”模型。过程的“黑箱”模型理论认为:许多过程的机理是非常复杂的,理论研究中通常把过程看成一个“黑箱”系统,把关注的焦点聚集在可直接观察和测量的过程输入和输出上,通过输入输出信息来推测“黑箱”系统的内在特性(过程的传递函数),从而建立起与过程的外在行为表现等价的过程模型(见图1)。

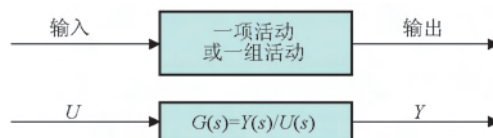


图1 过程的“黑箱”模型和传递函数

Fig.1 Process “black box” model and transfer function

过程的“白箱”模型也叫状态空间法模型或者叫状态转移模型。它的基本思想是:过程的本质就是系统内部的所有状态变量由于之间的相互联系和相互作用,从而导致系统随时间的演变而发生变化的表现形式。要了解复杂过程必须要深入到系统的内部去,找出系统的所有状态变量,写出系统的状态转移方程,通过一定的方法求解状态转移方程,从而得到各状态变量的时域解 $x(t)$ ,或得到状态变量随环境扰动输入的时域解 $x(u, t)$ 。其具体的数学模型如下

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax(t) + Du(t) & (1) \\ y(t) = Cx(t) & (2) \end{cases}$$

式(1)、(2)中, $x$ 是系统内部的状态变量, $x(t)$ 表示状态变量随时间变化的函数,对于确定的 $t_i$ , $x(t_i)$ 的值是唯一确定的; $u(t)$ 是系统的输入,又称扰动变量; $y(t)$ 是系统的输出。式(1)通常是由若干个一阶微分方程组成,称为系统的状态转移方程,矩阵 $A$ 称为状态转移矩阵,它是表示系统内部状态变量之间相

相互作用和相互影响的系数矩阵; $D$ 是表示输入变量对状态变量作用和影响的关系矩阵。式(2)称为系统的输出方程, $C$ 是表示状态-输出映射关系的系数矩阵<sup>[10]</sup>。

“白箱”模型比“黑箱”模型的优越性主要表现在以下几个方面:第一,它进一步深入到过程系统的内部,研究系统内部各状态变量之间的联系和作用(主要是通过 $A$ 矩阵来刻画),而这种联系和作用也是系统自身演化的动力和原因;第二,它引入了状态空间的概念,所谓状态空间就是系统中各状态变量的所有可能的不同取值所形成的各种状态向量的集合,用状态转移方程来描述过程更接近过程的本质;第三,模型不仅能给出一定输入下的输出解,而且还能给出各状态变量的时域解,这也是过程最本质的内容。

### 3.2 “白箱”理论下的过程质量模型

下面以铁路的土建工程基本作业单元为例(简称基本作业单元系统),来介绍基于“白箱”理论的过程质量概念及过程质量模型。

从状态空间法理论出发,将基本作业单元系统定义为由管理者(management)、工人(man)、机器设备(machine)、材料(material)、作业方法(method)、测量(measure)、环境(environment)7个要素所组成,从而形成基本作业单元的6M1E系统。需要强调的是,6M1E与SPC中的4M1E的主要区别在于:  
a. 管理者要素由原先的过程控制主体变成了状态向量中的一个状态变量,从而成为影响过程质量的一个实体要素;  
b. 状态空间法关注基本作业单元系统6M1E中的具体过程,而不是它的7个具体的实体要素。

如果说结果质量与工程半成品、工程完成品直接对应,那么过程质量应当与基本作业单元6M1E系统的过程相对应,这里的过程包括以下具体内容:  
a. 管理者对工人(技术人员)的管控过程;  
b. 管理者对材料的管控过程;  
c. 管理者对机器设备、作业方法、测量、环境的管控过程;  
d. 工人的直接作业过程;  
e. 工人利用机器对材料的作业过程;  
f. 材料本身的工艺自然过程。

为了便于简化研究,将a~c项合并为管理过程,d和e项合并为作业过程。而f项的工艺自然过程是指在特定的工艺标准条件下,材料之间发生的物理的、化学的、生物的运动变化过程。于是,基本作业单元系统中的过程便简化为管理过程、作业过

程以及工艺自然过程(见图2)。

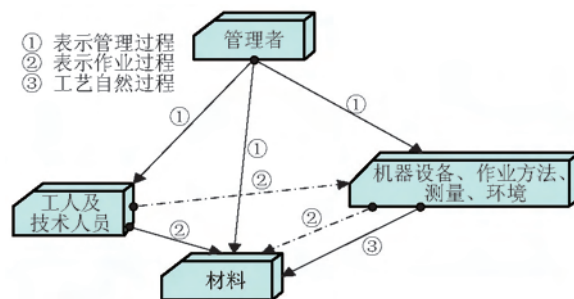


图2 基本作业单元系统中的过程

Fig.2 The process of basic productive unit system

质量是实体(产品、过程、系统)的属性,质量寓于实体之中,但它不等于实体,与结果质量对应的是半成品或完成品,而与过程质量对应的则是过程本身。在ISO9000的过程定义中,将原材料、资源或客户需求作为输入,而将产品或客户满意作为输出,基本上是按照物流的逻辑顺序展开的,输出的要么是半成品、要么是成品。半成品质量也好,成品质量也好,它们都是结果质量,不是过程质量。过程质量不应该和物流系统对应,而应该和基本作业单元系统中的过程对应,它应该是活动(运动)的质量,即一项或一组活动(运动)所特有的属性,满足相关方需求的程度。

基本作业单元系统6M1E的过程质量则是指管理过程质量、作业过程质量和工艺自然过程质量及它们之间的相互作用的综合表现。

由于质量概念的抽象性,使得人们很难对其加以量化研究,而有关可靠性方面的定量化理论则比较成熟,并且可靠性也是土建工程项目最重要的质量特性之一,因此,下文将借用可靠性概念来代替质量概念,说明基本作业单元系统6M1E中各子过程之间的相互联系和相互作用关系。

工人的作业过程可靠度受到管理过程可靠度的影响,即工人作业失效率偏高的情况下,有效的管理监督可以弥补和提升整个作业过程的可靠度,它们之间的关系反映在可靠性框图(RBD)中即为并联关系。而工艺自然过程既受管理过程也受作业过程的间接影响,即有效的管理和工人作业的可靠性为工艺自然过程的顺利进行提供了良好的外在条件,因而它们之间的关系反映在RBD中也为并联关系。而由3个子过程组成的过程网络系统的总体可靠度则是由作业过程可靠度和工艺自然过程可靠度两者串联而形成,基本作业单元系统6M1E



的过程RBD见图3。

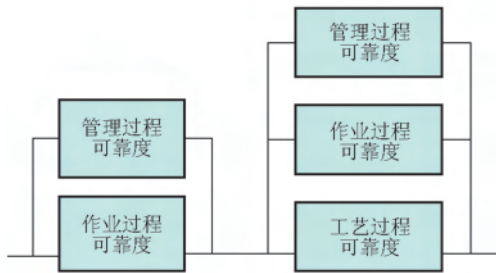


图3 基本作业单元系统过程的RBD

Fig.3 Process RBD of basic productive unit system

由状态空间法理论可知,在一个封闭的、不受外界干扰和影响、重复加工的作业单元系统中,工人作业过程的可靠性、工艺自然过程的可靠性、管理过程的可靠性随时间变化而呈现出小幅度波动,系统的可靠性也维持在一个稳定的水平,这样的系统被称为自治系统。如果系统是一个开放的系统,且外界环境扰动输入巨大,这种扰动会直接波及过程网络系统中的各个子过程,使得各子过程随时间变化而呈现出大幅度波动,过程网络系统将面临一种新的自组织过程,基本作业单元的过程质量与可靠性随时间推移将产生剧烈波动的现象。

经验表明:作为结果质量的分部工程或最终工程的质量与过程质量之间存在着显著的因果关系,即优秀的过程质量会促成良好的结果质量。为了确保分部工程或最终工程的质量,需要从基本作业单元系统的内外两方面去努力。其一是研究工艺自然过程、作业过程、管理过程质量的变化规律以及它们之间的相互作用和相互影响的规律,确保系统内部过程运行质量的稳定;其二是研究基本作业单元系统的外部扰动输入因素及其对系统内部子过程的影响规律,努力消除负面影响,在没有把握促成正面影响的情况下至少确保系统外部环境的相对稳定。

#### 4 应用实例

本文以铁路建设工程中常见的现浇预应力砼连续箱梁施工工艺过程为例,来介绍“白箱”理论下的过程质量模型的应用。

现浇预应力砼连续箱梁施工工艺流程如下:地基处理—搭设支架—支架预压—安装模板—梁体钢筋绑扎—预应力管道埋设—混凝土浇筑—压浆—养护—拆模。

目前铁路工程建设系统一般的质量管理方法是:质检、计量人员现场检测计量,过程试块保留检测记录;施工队组长连同现场工艺技术人员对过程的4M1E进行监督和控制;现场监理通过旁站和巡检的方式落实关键过程和隐蔽工程的过程控制;监理人员连同业主进行分项、分部工程的阶段性质量验收和最终工程质量验收。

对于工程产品来说,事后的检查验收即使发现有质量瑕疵或不良也于事无补,例如,在支架搭设或地基处理作业过程中,如果参数未控制到位,在浇筑过程中,当发现有支架、模板、钢筋等松动、变形或移位时,再来实施调整、加固等补救措施收效甚微,除非是重新返工。而过程质量控制方法也有很大的局限性,例如,绑扎钢筋工序,监理人员不可能对工人的作业进行全检;此外像混凝土浇筑过程,需要时间上的连续性和进度的严格控制,其结果质量很大程度上取决于工人的责任心和作业经验的积累。

当把现浇预应力砼连续箱梁施工过程看成由管理过程、作业过程以及工艺自然过程3个子过程组成的过程网络系统时,针对各子过程实施过程质量提升,则可以间接提升施工的结果质量(见表1)。

为了提高现浇预应力砼连续箱梁施工过程质量,除针对基本作业单元系统6M1E内部的3个子过程质量要素进行控制外,系统外的扰动因素也是不可忽略的。

与工艺自然过程质量有关的外界扰动因素有:  
a. 超出勘测预期的恶劣水文、地质条件;  
b. 设计单位对设计和施工标准的技术交底深度;  
c. 工艺标准适用的外在环境条件等。

与作业过程质量有关的外界扰动因素主要有:  
a. 外部经济面对员工的影响,如物价房价上涨,员工子女升学就业等困难问题;  
b. 劳务用工方面,如架子队组建问题、包工头拖欠农民工工资问题;  
c. 工程建设当地的社会治安环境条件等。

与管理过程质量有关的外界扰动因素主要有:  
a. 社会风气和市场商业环境的影响;  
b. 工程建设系统的宏观管理体制面的变化;  
c. 公司的收入分配制度的调整;  
d. 社会治安环境状况等。

需要特别强调的是,自改革开放以来,中国经济经历了持续30多年的快速增长期。尽管人们的收入和生活水平提高了,但思想道德水平的提高却相对滞后。过去那种扎扎实实干事的作风被一

表1 现浇预应力砼连续箱梁施工的过程质量及其要素

Table 1 Prestressed concrete continuous box-girder construction process quality and its elements

序号	工艺阶段	工艺自然过程质量要素	作业过程质量要素	管理过程质量要素
1	地基处理	地基承载力、碾压 密实度和平整度	按作业标准作业、测量	对现场地质环境条件的 掌握及4M1E管控
2	支架搭设		按作业标准作业、测量, 控制支架的垂直及水平偏差	对员工的培训教育
3	支架预压	支架、地基的 弹性变形程度	定期定点测量	对员工和测量技术人员 的培训及4M1E管控
4	安装模板		吊装前进行打磨,刷脱模剂; 不定期测量内模定位准确度和 稳固程度	对员工及质量检验人员 的责任心教育
5	梁体钢筋绑扎		按作业标准作业,保持 足够的刚度和稳定性	对员工及质量检验人员 的责任心教育
6	预应力管道埋设		不定期测量波纹管上、下、 左、右定位标准符合程度, 检查其有无破损	对员工技术交底和培训,质量检验 人员的责任心教育及4M1E管控
7	混凝土浇筑	混凝土材料 的配合比	施工中振动棒应快插慢拔; 及时检查支架、模板、钢筋 和预埋件等是否有松动、移位	对员工技术交底和培训,质量检验 人员的责任心教育及4M1E管控
8	压浆	搅拌结束至压浆入管 时间不超过40 min; 温度控制在5~35℃	检测水泥浆的稠度和流动度	对员工技术交底和 培训及4M1E管控
9	养护	养护期不少于14天	混凝土初凝后及时洒水养护	对员工的培训教育
10	拆模		混凝土强度达到设计强度的 95%方可拆除支架	对员工的培训教育

夜暴富的贪婪心理所取代,整个社会处在一种浮躁和投机的文化氛围中。从最近国内的一些铁路建设工程质量问题的案例中,不难发现工程建设系统外部的负面扰动输入因素正在成为影响工程质量的首位原因,铁路建设工程的质量与可靠性是一个良心和责任大于技术的问题。所谓“心不正则品不良”这句质量管理领域的训导语不仅是针对现场一线工人们而言的,对于现场的技术人员和现场的管理人员乃至项目的最高层管理人员,它同样是一句至理名言。

## 5 结语

鉴于传统的“黑箱”理论模型在过程质量概念认识上的局限性,本文从过程的“白箱”理论出发,对过程质量概念的涵义作出科学解释。文章指出:过程质量不应该和物流系统对应,而应该和过程本身对应,它是活动(运动)的质量,即一项活动所特有的属性满足相关方需求的程度;基本作业单元系统6M1E的过程质量包括:工艺自然过程质量、作业过程质量、管理过程质量。同时它还受到外界的扰

动输入因素的影响。

对于工程项目这种一次性的过程产品来说,针对分项、分部工程结果质量的检查和验收固然不可少,但是仅用检查和验收的方式进行质量管理,往往会使管理者处于被动救火的状态。通过从源头抓工艺自然过程质量、作业过程质量、管理过程质量来进行过程质量提升,往往会起到事半功倍的效果,在具体的工程质量管理实践中,将两者结合运用,相得益彰,从而最终保证工程完成品的质量与可靠性水平。

## 参考文献

- [1] 卢春房. 铁道部副部长卢春房在全路建设工程质量电视电话会议上的讲话[Z]. 2009.
- [2] 王海宇. 基于多步延迟的自动反馈控制过程质量监控[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1): 138-143.
- [3] 孔金生, 陈铁军, 万百五. 产品生产过过程质量模型与闭环质量控制[J]. 科技进步与对策, 2005(6): 116-117.
- [4] Navid Sahebjamnia, Mohammad Mahdi Paydar. Applying fuzzy approach to develop transient probability matrix for on-line variable quality monitoring[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(3): 420-425.
- [5] Guh Ruey-Shiang. Simultaneous process mean and variance mon-

- itoring using artificial neural networks [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(4):739-753.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 9000: 2005 Quality Management Systems—Fundamentals and Vocabulary [S]. Switzerland: ISO/TC176/SC1, 2005.
- [7] 陈皓琼. 过程质量的度量[J]. 标准科学, 2009(10):46-48.
- [8] 邓 军, 余忠华, 吴昭同. 产品质量与过程质量的映射研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(17):2070-2074.
- [9] Sivert Sørungård, Guttorm Sindre. Aspects of Process Quality [C]// Proceedings of the Fourth Software Quality Conference. Scotland: University of Abertay Dundee, 1995.
- [10] 马 卡, 塞 勒. 动态系统建模与控制[M]. 李乃文, 孙江宏, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.

# Research on the railway construction process quality model based on the state-space method

Lu Shoudong<sup>1,2</sup>, Zhou Guohua<sup>1</sup>, Chen Haifeng<sup>1</sup>, Zhao Guotang<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. ZhongShan Radio and TV University, Zhongshan, Guangdong 528400, China)

**[Abstract]** In the ISO9000 “input-output” process model, the concept of process quality is difficult to get the correct interpretation. From the point of view of the process’s “white box” theory, this paper puts forward the scientific meaning of the concept of process quality and the process quality model by taking the basic operating unit of 6M1E in the railway construction project for example. The basic operating unit system consists of the technological natural process, operation process and management process; the process quality of the basic operating unit system depends on the interrelation and interaction among those three sub-processes, and also subject to the impact of the external disturbance input factors. Finally, the cast-in-situ prestressed concrete continuous box girder construction process is utilized to elaborate the specific application of this theory in the quality management of the railway construction project.

**[Key words]** railway construction project; “white box” model; state transition equation; process quality