网络出版时间：2014-06-16 16:25
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2014.02.16.html
第27卷 第2期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 27 No. 2
2014年06月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Jun. 2014

关于高速铁路调度指挥系统稳定性的探讨

李 凯， 汪 颖， 王明起， 安 定

(西南交通大学 交通运输与物流学院,四川 成都 610031)

摘要:探讨了高速铁路调度所内调度系统的信息传递过程,采用控制论中系统方块图进行描述,计算出高铁调度系统的信息传递函数,然后求得调度系统的特征方程和特征根,通过分析特征根是否均有负实部来判断系统的稳定性。提出了描述调度系统控制精确度的稳态误差的计算方法。为今后高速铁路调度系统的稳定性的研究有所启发。

关键词:高速铁路;调度指挥系统; 稳定性;传递函数;稳态误差

中图分类号:U29 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2014)02-0075-04

0 引言

高速铁路调度指挥系统是我国高速列车行车组织的中枢系统。在高速铁路飞速发展的今天,如何保证列车高速安全行车是我国当前亟待解决的重要内容,其中调度指挥的作用尤显重要。而高速铁路调度系统的稳定则是进行正常调度指挥工作的保证。对调度系统稳定性的研究国内外并不是很多,文献[1]将高速铁路调度指挥系统看作是串并联系统,对高速铁路的可靠性进行研究,并计算了调度系统的可靠度,同时采用故障树对列车调度子系统进行可靠性评价。文献[2]对调度人员可靠性进行分析,采用可靠性理论计算调度人员的可靠度,分析了各子系统的可靠性关系建立了列车调度工作的可靠性逻辑框图。文献[3]也对人的可靠性进行量化分析,建立了计算人可靠性的威布尔分配模型。现主要将调度所内调度指挥系统作为信息流动的控制系统,采用控制理论的方法去探讨高速铁路调度系统的稳定性相关问题。

1 我国高速铁路调度系统各工种之间信息流程

高速铁路调度所内的组织机构及岗位设置如图1所示。图1表明了高速铁路调度系统中各工种间的信息传递过程。为了简化问题,本文仅对信息的主要流动方向进行探讨。首先,值班主任把所在班的日常运输生产计划下发给高铁值班副主任,高铁值班副主任再下达给计划调度员。计划调度员将列车运行方案下达给列车调度员,同时列车调度员把各站现车情况和运行图的实施情况反馈给计划调度员[2]。列车调度员下达给客运调度员、动车调度员、综合设施调度员、供电调度员、动车司机调度员各工种人员所需要的方案信息及调度命令。客调、动调、综合设施调度、供电调度、动车司机调度员再将方案的实际实施反馈给列车调度员。

现主要探讨调度所内的调度系统的稳定性问题,也就是图1中虚线框中的部分。根据复杂大系统理论,高速铁路调度指挥系统是一个连续有序的过程。为简化问题,结合控制理论,可将此调度系统假设为一个单输入单输出的线性定常串并联控制系统,如图2所示。

图2表示了高速铁路调度系统内各工种的信息的联系,其中节点表示调度系统的各工种,边表示各部门之间的信息传递。S_1,S_2 分别表示调度所内的值班主任和高铁值班副主任,S_3 表示计划调度子系统,

DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2014.02.16
收稿日期:2013-04-02
作者简介:李凯 男 1989年出生 硕士研究生
基金项目:国家自然科学基金(U1234206);铁路科技开发计划项目(2012X007-A)

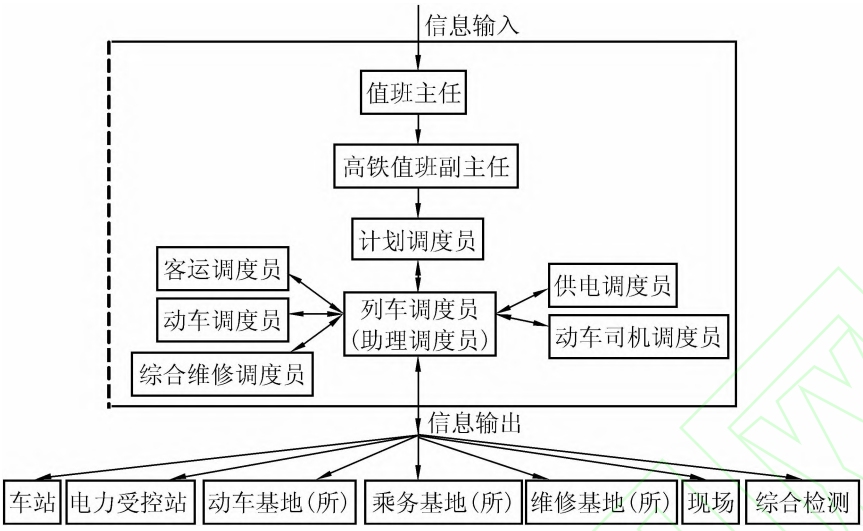

图 1　高速铁路调度系统各工种信息流图

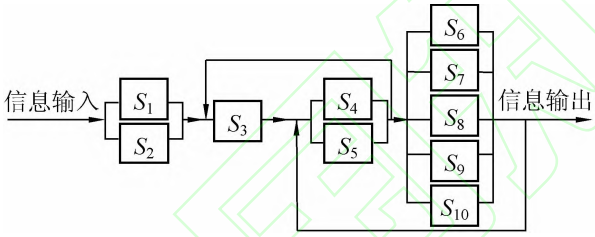

图 2　高速铁路调度串并联控制系统

S_4 为列调子系统,S_5 为助理列调子系统,S_6 为动车调度子系统,S_7 为综合设施调度子系统,S_8 为供电调度子系统,S_9 为客服调度子系统,S_{10} 为动车司机调度子系统。

2　高速铁路调度指挥系统方块图的建立

根据上述高速铁路调度串并联系统,建立高速铁路调度指挥系统方块图,如图 3 所示。图 3 中,$G_i(s)$ 为串并联环节调度子系统 i 的传递函数,其中 $i = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$;$H_i(s)$ 为反馈环节的传递函数,其中 $i = 1,2$;$X_i(s)$ 为输入信息;$X_o(s)$ 为输出信息。

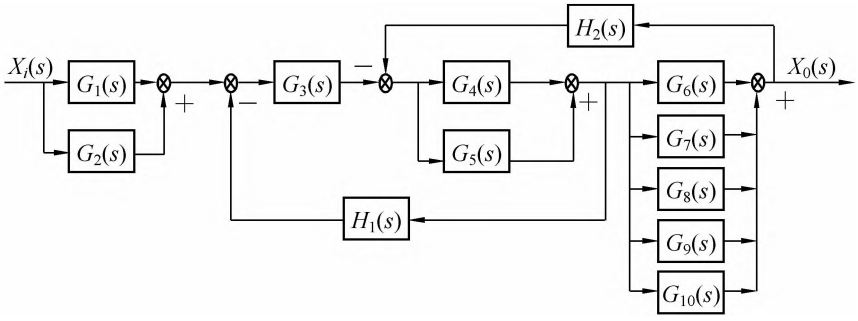

图 3　高速铁路调度指挥系统方块图

若求上述含有负反馈的调度系统的传递函数,首先要对上述方块图进行简化,简化步骤如图 4 ~ 图 7 所示。

(1)步骤一。子系统 4 和 5 进行并联等效,子系统 6、7、8、9、10 并联等效,并将反馈环节 2 比较点后移,如图 4 所示。

(2)步骤二。子系统 3 和子系统 4 和 5 的等效并联系统进行串联等效,同时将反馈环节 2 进行等效串联,如图 5 所示。

(3)步骤三 。将反馈环节 1 和子系统 3、4、5 的等效系统进行负反馈等效,同时将子系统 4、5 和反馈环节 2 的等效系统和子系统 6、7、8、9、10 的并联等效系统进行负反馈等效,如图 6 所示。

(4)步骤四。将第三步所得的三部分进行串联等效,最后得到整个调度控制系统的传递函数,如图 7 所示。

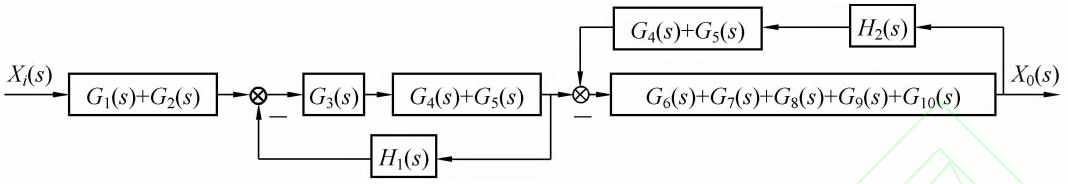

图 4　步骤一

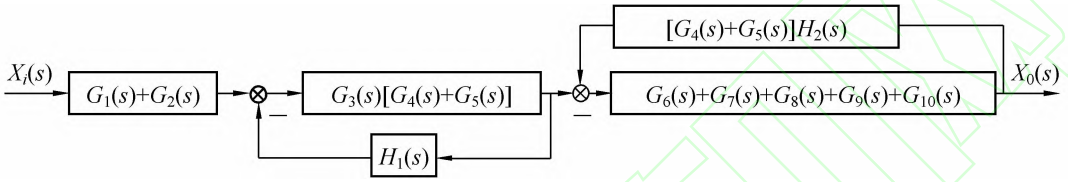

图 5　步骤二

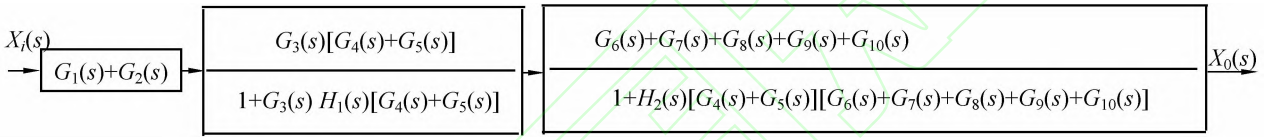

图 6　步骤三

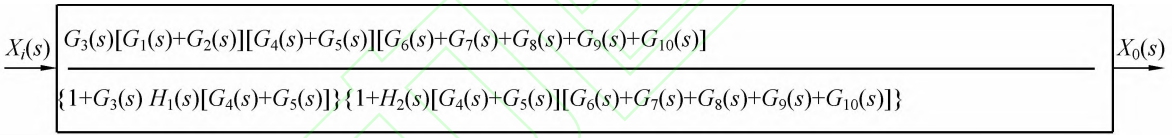

图 7　步骤四

因此可求得该调度系统的传递函数为

$$\phi(s)=\frac{G_3(s)[G_1(s)+G_2(s)][G_4(s)+G_5(s)]}{\{1+G_3(s)\,H_1(s)[G_4(s)+G_5(s)]\}}\cdot\frac{[G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]}{\{1+H_2(s)[G_4(s)+G_5(s)][G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]\}}\tag{1}$$

3　高速铁路调度系统的稳定性及稳态误差的探讨

根据判断控制系统稳定的充要条件:如果控制系统的所有特征根 p_i 均具有负实部,则系统为稳定系统。如果控制系统的特征根 p_i 中存在一个或多个具有正实部根,则系统为不稳定系统[4]。因此由上述调度控制系统的传递函数得到系统的特征方程:$\{1+G_3(s)\,H_1(s)[G_4(s)+G_5(s)]\}\{1+H_2(s)[G_4(s)+G_5(s)][G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]\}=0$。从而计算出高速铁路调度系统的特征根 p_i,若 p_i 均具有负实部则说明系统是稳定的,若存在一个或多个正实部根则说明系统是不稳定的。

假设已经判断出高速铁路调度系统是稳定的,然后对调度系统控制的精度进行探讨。结合控制理论本文提出调度系统的稳态误差。调度系统的稳态误差是控制精度的,而精度又反映了调度系统传递信息的准确性。稳态误差指的是调度系统传递信息误差的终值。上述调度系统可以等效为一个闭环系统,如图 8 所示。

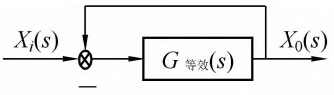

图 8　调度系统等效转化方块图

在图 8 中,取 $H_{等效}(s)=1$ 表示等效单位负反馈,$G_{等效}(s)$ 为调度系统转化为闭环系统的等效前向通道传递函数,计算如下

$$G_{等效}(s) = \frac{G_3(s)[G_1(s)+G_2(s)]}{\{1+G_3(s)H_1(s)[G_4(s)+G_5(s)]\}} \rightarrow$$
$$\leftarrow \frac{[G_4(s)+G_5(s)]}{\{1+H_2(s)[G_4(s)+G_5(s)][G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]\}} - \rightarrow$$
$$\leftarrow \frac{[G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]}{G_3(s)[G_1(s)+G_2(s)][G_4(s)+G_5(s)][G_6(s)+G_7(s)+G_8(s)+G_9(s)+G_{10}(s)]} \tag{2}$$

根据文献[3]可得到高速铁路调度系统的误差传递函数 $\phi_e(s)$ 为

$$\phi_e(s) = E(s)/X_i(s) = \frac{1}{H_{等效}(s)} \cdot \frac{1}{1+G_{等效}(s)H_{等效}(s)} = \frac{1}{1+G_{等效}(s)} \tag{3}$$

式中，$E(s)$ 为系统误差信息 $e(t)$ 的拉氏变换；$X_i(s)$ 为输入信息的 $x_i(s)$ 的拉氏变换。从而可求得高速铁路调度系统的稳态误差 e_{ee} 为

$$e_{ee} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to\infty} sE(s) = \lim_{s\to\infty} s\varphi_e(s)X_i(s) = \lim_{s\to\infty} s \cdot \frac{1}{1+G_{等效}(s)} \cdot X_i(s) \tag{4}$$

求出的稳态误差越小，说明高速铁路调度系统的控制精确度越高。由于每一个子系统都是一个复杂系统，具体计算出每一个子系统的传递函数是今后需要努力的方向，在此不做深入探讨，仅提出判断高速铁路调度系统稳定性和控制精确度的方法。

4 结论

基于高速铁路调度所内的调度指挥系统可以看作一个单输入单输出的线性定常串并联控制系统，通过调度系统的传递函数来计算系统的特征根，通过判断特征根是否均有负实部来判定系统的稳定性。假若系统稳定，然后通过计算高速铁路调度系统的稳态误差来判断调度系统控制的精确度。

参 考 文 献

[1]褚飞跃. 高速铁路调度指挥可靠性及应急处置相关问题研究[D]. 成都:西南交通大学交通运输与物流学院,2012.
[2]魏新平. 铁路列车调度系统可靠性研究[D]. 成都:西南交通大学交通运输与物流学院,2010.
[3]肖国清,陈宝智. 人因失误机理及其可靠性的研究[J]. 中国安全科学学报,2001(2):22-25.
[4]吴振顺,张健成. 控制理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007:103.

Discussion of Stability of High-speed Railway Dispatch Command System

Li Kai, Wang Ying, Wang Mingqi, An Ding

(College of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This article mainly discusses the message transfer process in the high-speed railway dispatch command system. Using systematic block diagram in control theory, this paper figures out message transfer function about the high-speed railway dispatch command system, then work out characteristic equation and characteristic roots, and finally judge the stability of the system through the analysis of whether characteristic roots have negative real part. This article also puts forward the calculation method of steady-state error for describing the control accuracy, which may be useful and inspiring to the research on the stability of high-speed railway dispatch command system.

Key words: high-speed railway; dispatch command system; stability; transfer function; steady-state error

(责任编辑 车轩玉)