

成都工学院图书馆

基本馆藏

369148

工业调节系统的 整定计算

〔苏联〕В·Я·罗塔奇著



中国工业出版社

工业调节系统的整定计算

[苏联] B·Я·罗塔奇 著

重庆大学动力系仪表调节教研组译

中国工业出版社

В. Я. Ротач
РАСЧЕТ НАСТРОЙКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ГЭИ, 1961

* * *

工业调节系统的整定计算
重庆大学动力系仪表调节教研组译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南街)

中国工业出版社出版(北京珠市口西10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/2}$ ·印张 $9^{1/4}$ ·字数218,000
1965年5月北京第一版·1965年5月北京第一次印刷
印数0001—4,290·定价(科五)1.30元

*

统一书号: 15165·3914(水电-510)

前 言

本书論述了生产过程綫性自动調节系統整定計算的工程方法。在动力、化工、冶金、及食品工业部門，凡采用BTM及PMA电子式、UKTH电气机械式、04及AVC型气动式、液动式及气动电气式等系列生产的調节器来实现自动調节的絕大部分調节系統，大都屬於这类綫性系統。

如所熟知，正确地选择任一工业自动調节系統的整定值，可以提高系統工作的可靠性与經濟性。但近几年来，生产过程由局部自动化过渡到全盘自动化，調节綫路至为复杂，因此，对調节系統整定参数的正确計算，不仅是系統正常工作所期望的，而且是断不可少的条件。自寻最佳点（极值的）控制系統对調节系統的整定质量要求尤高。众所周知，这类系統对外部扰动特别敏感，外部扰动的存在使得最佳点的寻求过程显著地复杂起来。采用极值調节系統的經驗指出，实际生产过程中此类系統可靠工作的必要条件之一，是其参数应严格地稳定于各給定值上。

力图对较为广泛的調节系統类型找到統一的計算方法（本书中除单回路系統的計算外，还研究了从調节对象各中間点取附加冲量的調节系統、具有补偿扰动的綜合系統以及具有几个被調量的对象的自治調节系統的整定計算），势必对解决此問題一般采用的方法作适当的更改。

首先这涉及到最佳值的标准，在生产过程自动調节系統的一般整定計算方法中，是把系統在預先选定形式的扰动作用下发生的过渡过程品质作为依据，而本书的計算方法是把系統在任意扰动作用下满足最高动态精确度的条件作为依据。关于这一点基本上可以用两个原因来解释。首先，在工业調节系統运行的时候，它受到各种形式的扰动。因此，在仅仅求得一种形式扰动作用下

的整定值后，很难判断系統在实际情况下的工作品质。其次，扰动一般总是經由几个通道进入調节对象的，在这种情况下，对于由某一个通道进入的扰动作用來說是最佳的整定值，对于虽是同一形式、但由另一通道进入的扰动來說一般将不是最佳的。

当根据最高动态精确度进行系統計算时，上述的不定性就可以避免，因为在这种情况下，作为計算用的扰动作用，可以用某些概率特性来表示，后者是对进入所有各通道中足够充分的大量扰动取其均值而得到的。过渡过程的品质指标，可以通过对最为典型的扰动作用下的調节过程作出相应的曲綫來更精确地表明。

根据上述情况，通常被认为是系統工作品质最重要的指标之一的过渡过程振蕩度，今后将直接地看成是系統稳定性的量度。應該順便指出，甚至在以給定的輸入扰动作为計算依据时，也只有在最简单的单回路随动系統中，并且是在調节器的定值器作用下，才能把过渡过程振蕩度（通常用系統特征方程根的分布來估計它）作为衡量調节过程品质的一种合理的尺度。当外部扰动作用于調节对象时，尤其在复杂的調节系統中，其过渡过程可能与“常見”的指数衰减形式过渡过程有显著差別。

大家都知道，在計算生产过程自动調节系統时，对数幅频特性法在很大程度上会失去其簡明的特点。这是由于：工业調节对象存在着传输延迟而屬於非最小相角的系統，这种系統的幅频与相频特性之間，不存在单值的关系。因此，这类系統一般应用广义頻率特性法来进行計算。但是繪制广义頻率特性，特别是当对象的动态特性是由試驗求得的时候，是一项非常麻煩的运算工作，計算复杂的多回路系統时困难更大。

本书对系統振蕩度的估計是根据系統幅频特性的相对最大值來进行的。这便能把計算工作变为相当簡單的作图工作。还必须指出，这种方法的精确度并不亚于广义頻率特性的方法。实际計算表明，这两种計算方法可以大致认为是同样正确的。

本书內容共分六章，包括了所有主要的計算过程。

第一章論述了綫性系統的微分方程、時間特性、頻率特性以

及典型环节的特性和它們的连接方式。

第二章論述了典型的調节对象与調节器的动态特性，以及由試驗决定这些动态特性的方法。此外还介紹了把時間特性轉換成頻率特性的方法。

第三章闡述了关于稳定性、稳定裕度、調节系統精确度及其过渡过程品质等基本概念。

第四章論述了按調节对象頻率特性确定单回路調节系統最佳整定参数的具体方法，而且还提供了在已求得整定参数时繪制过渡过程曲綫的方法。

第五章介紹了在典型的单回路調节系統中确定調节器整定参数的一些近似方法。

第六章論述了下列更为复杂的系統的計算方法：从調节对象中間点取附加冲量的多回路系統、具有补偿扰动的系統，以及具有几个被調量的調节对象的自治系統。

全书引用了大量例証来闡明著者的論点。

著者对С·Г·格拉西莫夫(С.Г.Герасимов)、Е·П·斯捷潘尼(Е.П.Стефаня)及Ш·Е·斯达因勃尔格(Ш.Е.Штейнберг)在本书付印前对手稿的审閱，С·Ф·齐斯佳可夫(С.Ф.Чистяков)对本书的校閱，以及Г·В·別辽也夫(Г.В.Беляев)为本书完成的一系列的例題計算，表示深切的感謝。

著 者

本书论述了生产过程自动调节系统的理论基础及其最佳整定参数的工程计算方法，研究了典型调节对象和调节器的动态特性，除具有一个被调量的简单回路调节系统的计算方法外，还系统地列举了更复杂系统的计算方法：由调节对象中点取附加冲量的系统、具有扰动补偿的复合系统及具有几个相关被调量复杂对象的自治系统。

本书还研究了許多基于用更简单的特性代替调节对象、开环及闭环动态特性的近似计算方法。

本书供对生产过程自动化感兴趣的工程技术工作者及大学生使用。

本书翻译过程中，重庆大学动力系仪表调节教研组大部分同志都参加了这一工作。前言及精言，系由周其鉴、吴炳朝主译，第一章由吴炳朝主译，第二章由周其鉴主译，第三章由彭明启主译，第四章由教研组译，第五章由吴志清主译，第六章由涂植英主译，附录由曹长修主译。全部译稿并由周其鉴审阅、曹长修、吴志清、郭荣江校订。

目 录

前 言	
緒 言	1
第 一 章 线性调节系统的方程式及其动态特性	7
1-1 线性系统的微分方程式	7
1-2 线性系统的时间特性	14
1-3 线性系统的频率特性	18
1-4 自动调节系统的典型环节	29
1-5 环节的典型连接方式及其动态特性	45
第 二 章 调节对象与调节器的动态特性	54
2-1 调节对象的典型动态特性	54
2-2 通过试验确定调节对象的动态特性	65
2-3 由对象的时间特性求其频率特性	75
2-4 基本的线性调节规律及其在工业自动调节器中的实现方法	81
第 三 章 调节系统过渡过程的稳定性、精确度及品质	100
3-1 线性调节系统的稳定性	100
3-2 利用调节系统处于稳定边界的结论求取调节对象的幅相特性	105
3-3 线性调节系统的稳定度和振荡度	108
3-4 模和相角的稳定裕度。振荡指数	113
3-5 在给定的控制作用和扰动作用下过渡过程的品质	119
3-6 在任意形式的扰动作用下调节系统的工作精确度	125
3-7 在模为有限值的扰动作用下被测量最大偏差的估算	129
第 四 章 单回路调节系统整定参数的选择	132
4-1 单回路调节系统中调节器的最佳整定条件	132
4-2 具有单容调节对象的系统的最佳整定参数的选择	137
4-3 按调节对象的幅相特性确定稳定区域边界	147
4-4 按调节对象的幅相特性确定调节器的最佳整定参数	155

V

4-5	在調節器最佳整定参数下系統过渡过程品质分析	165
第五章	确定单回路調節系統中調節器最佳整定参数的 某些簡化方法	177
5-1	具有迟延的单容对象的系統其調節器最佳整定参数的确定 ..	177
5-2	按調節对象近似的时间特性和頻率特性确定調節器的 最佳整定参数	186
5-3	按开环系統近似的幅相特性确定調節器的最佳整定参数	190
5-4	按闭环調節系統的时间特性确定調節器的近似整定参数	196
第六章	多回路調節系統和具有扰动补偿的系統整定 参数的选择	201
6-1	具有稳定調節器的系統的整定	201
6-2	具有引入的中間被調量导数冲量的系統的整定	213
6-3	具有扰动补偿的調節系統的整定	220
6-4	具有几个相关被調量的調節系統整定参数的确定	247
附录	265
参考文献	283

緒 言

具有一个被調量的最简单的自动調节系統可以用图1-1a上的方框图表示。图上用长方形表示系統的两个主要組成部分——調节对象与調节器；箭头表示它們之間的相互作用以及来自系統之外的外作用。小圓圈是表示求几个量的代数和的元件，而符号“—”則表示求和时相应的量應該取負值。

調节对象的工况由被調量 x 的数值决定；如果被調量等于其給定值 x_g ，那么这种工况在一定意义上可以认为是最佳的。被調量的給定值由專門裝置①給出，并且以一种作用的形式引入系統，这种作用可以称为控制作用。被調量与其給定值之間的偏差可以因給定值 x_g 的改变而产生，也可以因任一种扰动 x_{o1} , x_{o2} , ... 作用于調节对象而产生。被調量由自动調节器来保持在給定值上，差值 $z = x_g - x$ （称为調节誤差或偏差）引入調节器的輸入端。当出現偏差时，調节器把調节作用 x_p 加在对象上，从而使这一偏差减到允許的最小值。

图1-16上加热器后热网水溫調节的原理图就是一个例子。水在加热器中由蒸汽加热，流入的蒸汽量用調节机关 PO 进行調节，而后者是安装在供汽管道上的閥門。調节系統的任务是保証被調节量（加热器出口热网水溫 $t_{c.o}$ ）与外界空气溫度 $t_{k.o}$ 成預先規定的函数关系 $t_{c.o} = f(t_{k.o})$ 。为此，采用电阻式溫度計測量外界空气溫度，它是調节器的定值器 $ЗЗ$ 。必要时，定值器发出的信号先在計算裝置 $ВУ$ 中按規定的函数关系 $x_g = f(t_{k.o})$ 进行轉換，而后再进入調节器的比較元件 $ЗС$ 。在調节系統的輸出端，用感受元

① 在最簡單的情况下，它可以是按事先規定的程序来改变被調量給定值的程序定值器（其特殊情形是給定值可以不随時間而变化）。在更复杂的情况下，它可以是專門的計算裝置，有时还带有邏輯作用元件。

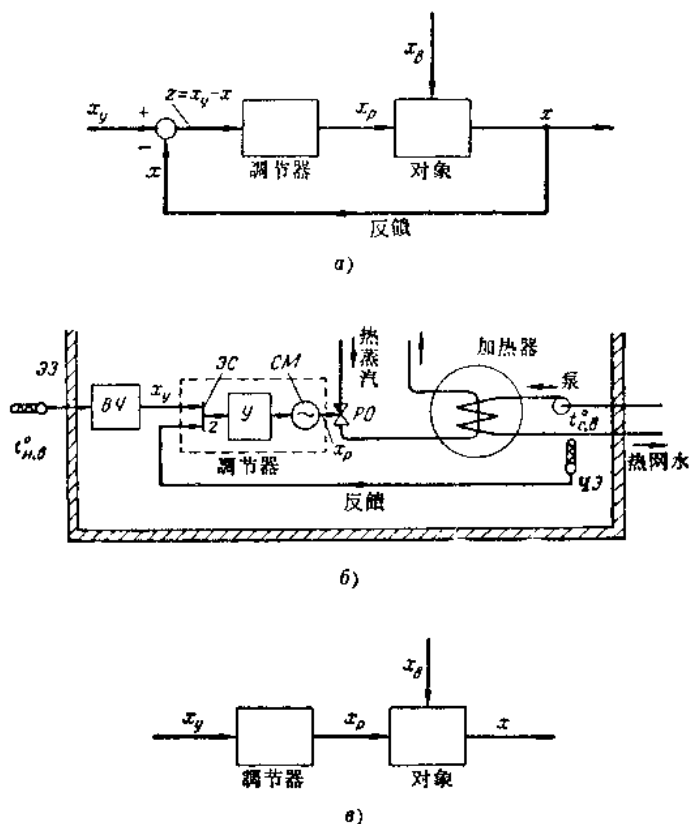


图 1-1 有一个被调量的调节系统

a—闭环系统的方框图；b—热网水温调节系统的例子（33—定值器；3C—比较元件；Y—放大器；CM—伺服马达；PO—调节机关；43—感受元件；BY—计算装置； $t_{c.s}^{\circ}$ —热网水温度； $t_{n.s}^{\circ}$ —外界空气的温度）；c—闭环系统的方框图

件 43（电阻式温度计）测量被调量的实际数值 x （加热器后热网水温）， x 经反馈送到调节器的比较元件与温度的给定值 $x_y = f(t_{n.s}^{\circ})$ 进行比较。它们之间的差值，即偏差 z ，作为比较元件的输出信号，在放大器 Y 中得到放大。由于这里作用于对象上的调节作用是调节阀 PO 的机械位移，所以在调节器的最后一级放

大器中，还應該把电气信号轉換成机械位移。为此，在調節器的輸出端裝有电动机，它称为伺服馬达 *CM*。这样，当溫度的瞬時值与給定值之間出現偏差以后，調節系統就使伺服馬达合閘，从而改变流入加热器的蒸汽量，結果使偏差消除。

在調節器中，除了上述基本功能元件（定值器、感受元件、比較元件及放大器），通常还設有所謂的校正元件。它們用來得到所需的調節規律，調節器就根据这些規律，按照偏差的变化，來實現調節作用。例如，調節器可以按与被調節量的偏差成比例，或按与被調節量偏差值及其积分之和成比例等規律來移动調節机关。

拟定調節系統的基本任务之一，就是为給定的調節对象选择一个最合式的調節規律。由上述方框圖可以看出，解决这个問題的困难首先在于，在調節系統中，作用是沿閉合回路循环的。調節回路的閉合是通过反饋實現的，反饋是用来将每一瞬間对象被調量实际数值的信息送給調節器的輸入端。在沒有这类反饋时，例如在开环調節系統中（图1-1, *б*），被調量可能或者由于外部扰动作用于对象，或者由于調節設備有不可避免的誤差，而自发地“离开”其給定值。

然而，調節系統中反饋的存在（图1-1, *а*）也是使系統的可調性变坏的原因。事实上，因为这种系統里只有当被調量的实际值与其給定值之間出現了一定的偏差以后調節器才开始工作，因而在原理上这种系統中被調量的偏差就不能完全消除。只能說使这一偏差减少到容許的最小值。不难看出，可以通过在調節器中增加信号的放大倍数的方法来减小調節誤差（即提高系統的工作精确度）。这时以較小的偏差就能产生所必需的調節作用。然而調節器中信号的最高放大倍数，或者受到裝置技术条件的限制，或者是受到下列情况限制：具有反饋的系統在一定的条件下（其中特别是当回路中信号的放大倍数增加时）可能丧失稳定性。这就是說，該系統可能自激并开始产生不衰减或甚至漸扩的振蕩，以至被調量一个周期比一个周期更远地离它的給定值。

选择适当的调节规律（例如在调节规律中引入偏差的导数），可以在调节器中提高信号的放大倍数而不损坏它的稳定性。然而要得到复杂的调节规律通常只有在采用复杂的系统结构及提高造价的条件下才有可能。因此，选择最合适调节规律的任务就可归结为：在调节系统的精确度、稳定性及构造简单三因素之间寻求一个合理的折衷方案。

目前在生产过程自动化的实践中只拟定了为数不多的几种典型的调节规律，这些规律在成批生产的调节器中得到实现。在这些调节器里装有所谓调节器的整定机构，用这种整定机构，可以在一定的范围内改变整定参数的数值，也就是最后可以改变调节器调节规律所确定的方程式的系数值。这样一来，同一调节器可以适用于调节特性不同的对象^①。

因为调节规律的这种统一，故为给定对象选择调节器的任务通常可以按下述程序进行：

1. 在对调节对象、系统在工作过程中可能受到的扰动及控制作用的特性、以及设备品种等作全面考虑的基础上，选择合适而足够简单的调节规律。

2. 计算调节器的最佳整定参数，即确定调节器整定参数的数目值。在此参数值下，调节系统将具有足够大的稳定度，并且以可能达到的最大精确度工作。

3. 在求得的最佳整定参数下对调节系统的工作品质进行校验，并由此求出调节过程在事先指定形式的输入扰动作用下最有代表性的一些特征量（被调量的最大偏差量，被调量重新回复到给定值所需的时间等等）。校验工作一般是对这样一种作用来进行的，这种作用可以设想为或者对系统而言是最危险的；或者是系统工作中最常出现的。

若检验分析的结果指出系统工作质量不能满足所提出的要求，这就是说必须使系统进一步完善。系统的进一步完善可以按

^① 对工业自动调节器的基本要求在 В. Д. Миронов 的著作中有所论述（这里以及今后凡在脚注中所提到的著作请见本书末的文献）。

两种方法来进行：

1. 不改变系统的结构，另外选用具有更为完善的调节规律的调节器。

2. 使系统结构复杂化（即在原系统中引入辅助回路或者对扰动引入辅助冲量）。也可以同时既使调节规律复杂化，又使系统结构复杂化。然后，重复上述计算。

调节规律及系统方框图的初步选择，一般与计算者的学识及经验有关，但是往往也还与计算者的观察能力有关。所选定系统的最佳整定参数的确定，可按专门拟定的方法进行。本书的内容主要就是提供解决这个问题方法。

目前有許多精确的与近似的计算方法，可以用来分析选定系统方框图在最佳整定值下的工作。但遗憾的是，实际应用这些方法时，通常要进行大量复杂而又十分繁琐的计算。所以这个计算过程最好应用专门的电子模拟装置来完成^①。

从别的、原则上更为重要的理由来看，应用模拟装置计算生产过程自动调节系统是合适的。因为如果对影响系统工作的某些因素不作一定的简化假定，即使对于最简单的调节系统，整定计算也是十分复杂的。特别是难以研究非线性因素对于系统工作的影响，因此在进行最佳整定计算时，必须力求用近似的线性系统代替真实系统。当系统更为复杂时（例如采用调节规律更为完善的调节器，或采用传递脉冲的补充通道等），系统整定计算的困难程度迅速增加。同时还必须注意，工业调节对象往往不是有一个、而是有几个互相关连的被调量，这就要求在实现自动化的时候，必须建立十分复杂的多回路调节系统。

在这些情况下，根据某些简化来进行最佳整定计算，虽然有时也会有害于所得结果的精度，但是仍具有实用意义。因为最佳

① 在调整调节系统时，如果系统已安装好并准备投入运行，那么对于系统在计算出的最佳整定参数下，对于最为典型扰动下的工作情况的分析，在大多数场合下，最好是在系统投入试验时直接在设备上进行。在这个过程中可以进行最后的“精调”。当然，进行试验时应该采取必要的预防措施，以避免调节系统进入不满意的工况。

整定参数的数值可以非常快而又简单地通过在模拟装置上分析系统的工作而最后确定下来。

“在自动调节系统的研究和调整中，广泛应用模拟方法（特别是电子模拟）将对于这些系统的研究方法和计算方法产生重要影响。模拟方法的发展使得可能在各种最为复杂的系统中，相当迅速而精确的研究其中的过程。例如对于各种不同组合参数及非线性类型的非线性系统的研究。

“然而也不能错误地认为模拟方法会简单地‘排挤’掉理论计算方法。因为模拟本身并不能够解决在计算、设计、制作与调整自动调节系统时所出现的全部主要问题。另一方面，企图仅用理论计算方法来解决所有的这些问题也是不合理的。因此，最好是把理论计算方法与模拟方法彼此协调地使用，使两种方法相互补充，这样才能最快与最全面地解决一般性的问题。这就不可避免地要使各种理论方法作某些修改，其相对的实用价值发生变化，以及出现一些新的计算方法等。然而模拟方法应该发展成为用综合方法求得问题最好地解决的一种手段，发展成为一种有助于把理论计算与模拟统一为一个整体的计算和研究方法。”^①

① 摘自A. A. Фельбаум的B。

第一章 綫性調节系統的方程式 及其动态特性

1-1 綫性系統的微分方程式

生产过程自动調节系統，当其輸入量和輸出量相对于平衡状态出現微小偏差时，通常可以相当准确地当作綫性系統来研究。这就是說，系統的輸入量和輸出量之間的关系，可以用下列綫性微分方程确定：

$$\begin{aligned} a_n x_{obx}^{(n)} + a_{n-1} x_{obx}^{(n-1)} + \dots + a_1 x'_{obx} + a_0 x_{obx} \\ = b_m x_{ox}^{(m)} + b_{m-1} x_{ox}^{(m-1)} + \dots + b_1 x'_{ox} + b_0 x_{ox}, \quad (1-1) \end{aligned}$$

式中 x_{ox} 和 x_{obx} 分别为系統的輸入量和輸出量；

$a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ ——常系数。

在系統有几个輸入量和几个輸出量的情况下，其运动規律不是用一个，而是要相应地用几个方程式来确定。

方程式(1-1)还可以写成算子或算符的形式：

$$\begin{aligned} [a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0] X_{obx}(p) \\ = [b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0] X_{ox}(p), \end{aligned}$$

式中 $p = \frac{d}{dt}$ ——微分符号。

上式在形式上又可以表示为：

$$X_{obx}(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} X_{ox}(p)。$$

引入符号：

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, \quad (1-2)$$

得，

$$X_{obx}(p) = W(p) X_{ox}(p)。 \quad (1-3)$$

上式純粹是通过形式上的变换得到的，在使用中作为記写方

程式 (1-1) 的方便形式。函数 $W(p)$ 称为系统的传递函数。但可以证明^①，系统的传递函数事实上与对微分方程 (1-1) 进行拉普拉斯变换所得到的结果完全一样，并且方程式 (1-1) 中的实际输入量与其在方程式 (1-3) 中相应的象之间存在着下列积分关系：

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt, \quad (1-4)$$

式中 p ——复变数。

当输入作用和初始条件均为已知时，常系数线性微分方程式的解是自由分量和强迫分量之和：

$$x_{\text{обш}} = x_{\text{св}} + x_{\text{пр}}.$$

解的自由分量 $x_{\text{св}}$ 由齐次方程式

$$a_n x_{\text{св}}^{(n)} + a_{n-1} x_{\text{св}}^{(n-1)} + \dots + a_1 x_{\text{св}}' + a_0 x_{\text{св}} = 0$$

的通解决定，它具有下面的形式：

$$x_{\text{св}} = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}, \quad (1-5a)$$

式中 p_k ——下列特征方程式的根

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0;$$

C_k ——任意常数。

当特征方程式的根中有 l 重根 p_k 时，相应于此根的自由分量由下式确定：

$$(C_1 + C_2 t + \dots + C_l t^{l-1}) e^{p_k t}. \quad (1-5b)$$

如果根中有一对共轭复根：

$$p_k = \alpha_k + i\omega_k, \quad p_{k+1} = \alpha_k - i\omega_k,$$

那么相应的分量为：

$$e^{\alpha_k t} (C_k e^{i\omega_k t} + C_{k+1} e^{-i\omega_k t}),$$

并且利用欧拉公式立即可以写成：

① 这种说法的严格证明可以在任一本自动调节原理参考书中找到，例如在 А.А. Воронков[2], Е.Г. Дудников[2] 以及 А.А. Фельдбаум 的书中。